

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | <b>DIN EN 60076-12</b><br><b>(VDE 0532-76-12)</b>                                                                                                                                                                                                                                                             |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Diese Norm ist zugleich eine <b>VDE-Bestimmung</b> 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. |  |
| <div>ICS 29.180<div>Einsprüche bis 2008-03-08</div></div>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                     |
| <div>Entwurf</div>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                     |
| <div><div><div><div><div>Leistungstransformatoren –</div><div>Teil 12: Belastungsrichtlinie für Trocken-Leistungstransformatoren</div><div>(IEC 14/562/CDV:2007);</div><div>Deutsche Fassung prEN 60076-12:2007</div></div><div><div>Power transformers –</div><div>Part 12: Loading guide for dry-type power transformers</div><div>(IEC 14/562/CDV:2007);</div><div>German version prEN 60076-12:2007</div></div><div><div>Transformateurs de puissance –</div><div>Partie 12: Guide de charge pour transformateurs de puissance de type sec</div><div>(CEI 14/562/CDV:2007);</div><div>Version allemande prEN 60076-12:2007</div></div></div><div><div>Anwendungswarnvermerk</div><div><div>Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2008-01-08 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und Stellungnahme vorgelegt.</div><div>Weil die beabsichtigte Norm von der vorliegenden Fassung abweichen kann, ist die Anwendung dieses Entwurfes besonders zu vereinbaren.</div><div>Stellungnahmen werden erbeten</div><div><div><div>– vorzugsweise als Datei per E-Mail an <b>dke@vde.com</b> in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter <b>www.dke.de/stellungnahme</b> abgerufen werden</div><div>– oder in Papierform an die DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE, Stresemannallee 15, 60596 Frankfurt am Main.</div></div><div><div>Die Empfänger dieses Norm-Entwurfs werden gebeten, mit ihren Kommentaren jegliche relevante Patentrechte, die sie kennen, mitzuteilen und unterstützende Dokumentationen zur Verfügung zu stellen.</div><div>Gesamtumfang 61 Seiten</div></div><div>DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE</div></div></div></div></div></div> |                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                     |

## Beginn der Gültigkeit

Diese Norm gilt ab ...

## Nationales Vorwort

Die Deutsche Fassung des europäischen Dokuments prEN 60076-12:2007 „Leistungstransformatoren – Teil 12: Belastungsrichtlinie für Trocken-Leistungstransformatoren“ (Entwurf in der Umfrage) ist unverändert in diesen Norm-Entwurf übernommen worden.

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. Dem entsprechend ist das internationale Dokument IEC 14/562/CDV:2007 „Power transformers – Part 12: Loading guide for dry-type power transformers“ unverändert in den Entwurf prEN 60076-12:2007 übernommen worden.

Da die Deutsche Fassung noch nicht endgültig mit der Englischen und Französischen Fassung abgeglichen ist, ist die englische Originalfassung des IEC-CDV 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 14 „Power transformers“ der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) erarbeitet.

Bei der Abstimmung zu dem Europäischen Schluss-Entwurf bei CENELEC und dem Internationalen Schluss-Entwurf bei IEC [Final Draft International Standard (FDIS)] sind jeweils nur „JA/NEIN“-Entscheidungen möglich, wobei „NEIN“-Entscheidungen fundiert begründet werden müssen. Dokumente, die bei CENELEC als Europäische Norm angenommen und ratifiziert werden, sind unverändert als Deutsche Normen zu übernehmen.

Für diesen Norm-Entwurf ist das nationale Arbeitsgremium K 321 „Transformatoren“ der DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE (<http://www.dke.de>) zuständig.

## Nationaler Anhang NA (informativ)

### Zusammenhang mit Europäischen und Internationalen Normen

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

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

Eine Information über den Zusammenhang der zitierten Normen mit den entsprechenden Deutschen Normen ist in Tabelle NA.1 wiedergegeben.

Tabelle NA.1

| Europäische Norm                           | Internationale Norm                                                           | Deutsche Norm                               | Klassifikation im VDE-Vorschriftenwerk |
|--------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------|
| EN 60076-1:1997<br>+ A1:2000<br>+ A12:2002 | IEC 60076-1:1993<br>+ A1:1999                                                 | DIN EN 60076-1<br>(VDE 0532-76-1):2003-01   | VDE 0532-76-1                          |
| EN 60076-2:1997                            | IEC 60076-2:1993                                                              | DIN EN 60076-2<br>(VDE 0532-102):1997-12    | VDE 0532-102                           |
| EN 60076-11:2004                           | IEC 60076-11:2004                                                             | DIN EN 60076-11<br>(VDE 0532-76-11):2005-04 | VDE 0532-76-11                         |
| EN 60216-1:2001                            | IEC 60216-1:2001                                                              | DIN EN 60216-1<br>(VDE 0304-21):2002-09     | VDE 0304-21                            |
| EN 60126-2:2005                            | IEC 60216-2:1990<br>(zurückgezogen)<br>ersetzt durch:<br>IEC 60216-2:2005     | DIN EN 60216-2<br>(VDE 0304-22):2006-04     | VDE 0304-22                            |
| EN 60126-3:2006                            | IEC 60216-3:2002<br>zurückgezogen<br>ersetzt durch:<br>IEC 60216-3:2006       | DIN EN 60216-3<br>(VDE 0304-23):2007-03     | VDE 0304-23                            |
| EN 60126-4-1:2006                          | IEC 60216-4-1:1990<br>(zurückgezogen)<br>ersetzt durch:<br>IEC 60216-4-1:2006 | DIN EN 60216-4-1<br>(VDE 0304-4-1):2006-12  | VDE 0304-4-1                           |
| EN 60216-5:2003                            | IEC 60216-5:2003                                                              | DIN EN 60216-5<br>(VDE 0304-25):2003-10     | VDE 0304-25                            |
| EN 60216-6:2006                            | IEC 60216-6:2003<br>(zurückgezogen)<br>ersetzt durch:<br>IEC 60216-6:2006     | DIN EN 60216-6<br>(VDE 0304-26):2007-06     | VDE 0304-26                            |
| EN 61378-1                                 | IEC 61378-1                                                                   | DIN EN 61378-1<br>VDE 0532-41)              | VDE 0532-41                            |

## Nationaler Anhang NB (informativ)

### Literaturhinweise

DIN EN 60076-1 (VDE 0532-76-1):2003-01, *Leistungstransformatoren – Teil 1: Allgemeines*;  
(IEC 60076-1:1993, modifiziert + A1:1999); Deutsche Fassung EN 60076-1:1997 + A1:2000 + A12:2002

DIN EN 60076-2 (VDE 0532-102):1997-12, *Leistungstransformatoren – Teil 2: Übertemperaturen*  
(IEC 60076-2:1993, modifiziert); Deutsche Fassung EN 60076-2:1997

**E DIN EN 60076-12 (VDE 0532-76-12):2008-01**

DIN EN 60076-11 (VDE 0532-76-11):2005-04, *Leistungstransformatoren – Teil 11: Trockentransformatoren (IEC 60076-11:2004); Deutsche Fassung EN 60076-11:2004*

DIN EN 60216-1 (VDE 0304-21):2002-09, *Elektroisolierstoffe – Eigenschaften hinsichtlich des thermischen Langzeitverhaltens – Teil 1: Warmlagerungsverfahren und Auswertung von Prüfergebnissen (IEC 60216-1:2001); Deutsche Fassung EN 60216-1:2001*

DIN EN 60216-2 (VDE 0304-22):2006-04, *Elektroisolierstoffe – Eigenschaften hinsichtlich des thermischen Langzeitverhaltens – Teil 2: Leitfaden zur Bestimmung thermischer Langzeiteigenschaften von Elektroisolierstoffen – Auswahl der Prüfmerkmale (IEC 60216-2:2005); Deutsche Fassung EN 60216-2:2005*

DIN EN 60216-3 (VDE 0304-23):2007-03, *Elektroisolierstoffe – Eigenschaften hinsichtlich des thermischen Langzeitverhaltens – Teil 3: Anweisungen zur Berechnung thermischer Langzeitkennwerte (IEC 60216-3:2006); Deutsche Fassung EN 60216-3:2006*

DIN EN 60216-4-1 (VDE 0304-4-1):2006-12, *Elektroisolierstoffe – Eigenschaften hinsichtlich des thermischen Langzeitverhaltens – Teil 4-1: Wärmeschränke für die Warmlagerung – Einzelkammerwärmeschränke (IEC 60216-4-1:2006); Deutsche Fassung EN 60216-4-1:2006*

DIN EN 60216-5 (VDE 0304-25):2003-10, *Elektroisolierstoffe – Eigenschaften hinsichtlich des thermischen Langzeitverhaltens – Teil 5: Bestimmung des relativen thermischen Lebensdauer-Indexes (RTE) von Elektroisolierstoffen (IEC 60216-5:2003); Deutsche Fassung EN 60216-5:2003*

DIN EN 60216-6 (VDE 0304-26):2007-06, *Elektroisolierstoffe – Eigenschaften hinsichtlich des thermischen Langzeitverhaltens – Teil 6: Bestimmung der thermischen Langzeitkennwerte (TI und RTE) eines Isolierstoffes unter Anwendung des Festzeitraahmenverfahrens (IEC 60216-6:2006); Deutsche Fassung EN 60216-6:2006*

DIN EN 61378-1 (VDE 0532-41), *Stromrichtertransformatoren – Teil 1: Transformatoren für industrielle Anwendungen*

Deutsche Fassung

Leistungstransformatoren –  
Teil 12: Belastungsrichtlinie für Trocken-Leistungstransformatoren

Inhalt

|                                                                                                 | Seite |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Einleitung.....                                                                                 | 3     |
| 1 Anwendungsbereich .....                                                                       | 4     |
| 2 Normative Verweisungen.....                                                                   | 4     |
| 3 Begriffe.....                                                                                 | 4     |
| 4 Auswirkungen von Belastungen über die Bemessung auf dem Leistungsschild hinaus.....           | 5     |
| 4.1 Einleitung .....                                                                            | 5     |
| 4.2 Allgemeine Auswirkungen.....                                                                | 5     |
| 4.3 Auswirkungen und Gefahren einer kurzzeitigen Notbetriebsbelastung.....                      | 5     |
| 4.4 Auswirkungen einer langzeitigen Notbetriebsbelastung .....                                  | 6     |
| 5 Alterung und Lebensdauer der Transformatorisolation .....                                     | 6     |
| 5.1 Allgemeines.....                                                                            | 6     |
| 5.2 Lebensdauer .....                                                                           | 7     |
| 5.3 Beziehung zwischen konstanter Dauerbelastung und Temperatur .....                           | 8     |
| 5.4 Alterungsgeschwindigkeit .....                                                              | 8     |
| 5.5 Lebensdauerverbrauch .....                                                                  | 9     |
| 5.6 Heißpunkt-Übertemperatur im stationären Zustand .....                                       | 9     |
| 5.7 Angenommener Heißpunktfaktor .....                                                          | 9     |
| 5.8 Heißpunkttemperaturen bei sich verändernden Umgebungstemperaturen und Lastbedingungen ..... | 9     |
| 5.9 Belastungsgleichungen.....                                                                  | 10    |
| 5.10 Bestimmung der Zeitkonstanten der Wicklung .....                                           | 11    |
| 5.11 Bestimmung der Zeitkonstanten der Wicklung nach empirischen Konstanten .....               | 12    |
| 5.12 Berechnung der Belastbarkeit.....                                                          | 12    |
| 6 Grenzwerte.....                                                                               | 14    |
| 6.1 Strom- und Temperaturgrenzwerte.....                                                        | 14    |
| 6.2 Weitere Grenzwerte .....                                                                    | 14    |
| Anhang A.....                                                                                   | 16    |
| Anhang B.....                                                                                   | 20    |
| Bilder                                                                                          |       |
| Bild A.1 .....                                                                                  | 16    |
| Bild A.2 – Thermisches Langzeitverhaltensdiagramm.....                                          | 18    |
| Bild B.1 .....                                                                                  | 21    |
| Bild B.2 .....                                                                                  | 24    |

|                                                                                                                          | Seite |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Bild B.3 .....                                                                                                           | 27    |
| Bild B.4 .....                                                                                                           | 27    |
| Tabellen                                                                                                                 |       |
| Tabelle 1 .....                                                                                                          | 7     |
| Tabelle 2 .....                                                                                                          | 13    |
| Tabelle 3 – Strom- und Temperaturgrenzwerte für die Belastung über die Bemessung auf dem<br>Leistungsschild hinaus ..... | 14    |
| Tabelle 5 .....                                                                                                          | 23    |
| Tabelle 6 .....                                                                                                          | 26    |
| Tabelle 7 .....                                                                                                          | 29    |

## Einleitung

Dieser Teil von IEC 60076 enthält eine Anleitung für die Spezifikation und für die Belastung von Trocken-Leistungstransformatoren aus der Sicht der Betriebstemperaturen und der thermischen Alterung. Dargestellt werden die Folgen aus einer Belastung über die Bemessungswerte, die auf dem Leistungsschild angegeben sind, und eine Anleitung für den Entwickler zur Auswahl geeigneter Bemessungsgrößen und Belastungsbedingungen für neue Anlagen.

IEC 60076-11 ist die Grundlage für vertragliche Vereinbarungen und enthält die Anforderungen und Prüfungen hinsichtlich der Übertemperaturwerte für Trocken-Leistungstransformatoren bei Bemessungsdauerbelastung. Es sollte beachtet werden, dass sich IEC 60076-11 auf die mittlere Übertemperatur der Wicklung bezieht, während in diesem Teil von IEC 60076 hauptsächlich auf die Heißpunkttemperatur verwiesen wird und die angegebenen Werte nur als Orientierung vorgesehen sind.

In diesem Teil von IEC 60076 werden mathematische Modelle für die Beurteilung der Auswirkungen von unterschiedlicher Belastung mit unterschiedlichen Temperaturen des Kühlmittels und mit vorübergehender oder zyklischer zeitlicher Schwankung gezeigt. Die Modelle dienen zur Berechnung der Betriebstemperaturen im Transformator, besonders der Temperatur der heißesten Stelle der Wicklung. Diese Heißpunkttemperatur wird zur Abschätzung der Stundenanzahl der Lebensdauer verwendet, die in einer bestimmten Dauer verbraucht wurde.

In diesem Teil von IEC 60076 werden außerdem Empfehlungen für Begrenzungen der zulässigen Belastung entsprechend den Ergebnissen der Temperaturberechnungen oder -messungen gegeben. Diese Empfehlungen beziehen sich auf unterschiedliche Arten von Belastungen – Dauerbelastung, Kurzzeit- und Langzeit-Notbetriebsbelastungen. Anhang A enthält eine Erläuterung zu den Grundlagen der Alterung.

## 1 Anwendungsbereich

Dieser Teil von IEC 60076 gilt für Trockentransformatoren, die in den Anwendungsbereich von IEC 60076-11 gehören. Er liefert die Mittel zur Abschätzung der Alterungsgeschwindigkeit und des Verbrauchs der Lebensdauer der Transformatorisolation als eine Funktion von Betriebstemperatur, Dauer und Belastung des Transformators.

ANMERKUNG Für Sonderanwendungen, wie die Anwendung von Transformatoren für Windturbinen, als Ofentransformatoren, Schweißtransformatoren und weitere, sollte der Hersteller hinsichtlich des speziellen Belastungsprofils zu Rate gezogen werden.

## 2 Normative Verweisungen

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

IEC 60076-1:1993, *Power transformers – Part 1: General*

IEC 60076-2:1993, *Power transformers – Part 2: Temperature rise*

IEC 60076-11:2004, *Dry-type transformers*

IEC 61378-1, *Convertor transformers – Part 1: Transformers for industrial applications*

## 3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Teiles von IEC 60076 gelten die folgenden Begriffe.

### 3.1

#### **langzeitige Notbetriebbelastung**

Belastung durch die langdauernde Nichtverfügbarkeit einiger Systemelemente, die nicht wieder angeschlossen werden, bevor der Transformator eine neue und höhere stationäre Temperatur erreicht

### 3.2

#### **kurzzeitige Notbetriebsbelastung**

unübliche schwere Belastung bei einem Übergangsvorgang (kleiner als eine Zeitkonstante der Spule), aufgrund eines oder mehrerer außergewöhnlicher Ereignisse, die die normale Systembelastung erheblich stören

### 3.3

#### **Heißpunkt**

sofern nicht anders festgelegt, bedeutet „Heißpunkt“ die heißeste Stelle der Wicklung

### 3.4

#### **relative Geschwindigkeit der thermischen Alterung**

bei einer vorgegebenen Heißpunkttemperatur die Geschwindigkeit, bei der die Alterung der Transformatorisolation im Vergleich zur Alterungsgeschwindigkeit bei einer Bezugs-Heißpunkttemperatur verlangsamt oder beschleunigt wird

### 3.5

#### **Lebensdauer der Transformatorisolation**

die Gesamtdauer zwischen dem Anfangszustand, bei dem die normale Lebensdauer der Transformatorisolation als unverbraucht betrachtet wird, und dem Endzustand, bei dem aufgrund von thermischer Alterung, Spannungsbeanspruchung, Kurzschlussbeanspruchung oder mechanischer Bewegung, die beim Normalbetrieb auftreten können, mit einem hohen Risiko eines elektrischen Ausfalls zu rechnen ist

### 3.6

#### AN-Kühlung

Kühlung durch natürliche Luftbewegung

### 3.7

#### AF-Kühlung

Kühlverfahren mit Ventilator Kühlung zur Steigerung der Bemessungsleistung des Transformators

## 4 Auswirkungen von Belastungen über die Bemessung auf dem Leistungsschild hinaus

### 4.1 Einleitung

Die übliche Bezugsgrundlage für den Dauerbetrieb bei der Auslegungs-Umgebungstemperatur und den Bemessungsbetriebsbedingungen ist die normale Lebensdauererwartung. Das Anlegen einer Last oberhalb der Bemessung auf dem Leistungsschild und/oder einer Umgebungstemperatur oberhalb der Auslegungs-Umgebungstemperatur zieht Gefahren und eine beschleunigte Alterung nach sich. In diesem Teil von IEC 60076 werden derartige Risiken aufgezeigt und mit gewissen Einschränkungen wird angegeben, wie Transformatoren über die Bemessung auf dem Leistungsschild hinaus belastet werden dürfen.

### 4.2 Allgemeine Auswirkungen

Die Auswirkungen der Belastung eines Transformators über die Bemessung auf dem Leistungsschild hinaus sind folgende:

Die Temperaturen von Wicklungen, Klemmen, Zuleitungen, Stufenschalter und Isolierung steigen und können unzulässige Werte erreichen.

Die Kühlung des Gehäuses ist empfindlicher für Überlastung und führt zu einem schnelleren Ansteigen der Temperatur der Isolierung auf unzulässige Werte.

Folglich besteht die Gefahr eines vorzeitigen Ausfalls zusammen mit erhöhten Strömen und Temperaturen. Diese Gefahr kann unmittelbar und kurzfristig oder durch die Summierung der thermischen Alterung der Isolierung im Transformator über viele Jahre auftreten.

ANMERKUNG Eine weitere Auswirkung von Überlastung ist ein ansteigender Spannungsfall im Transformator.

### 4.3 Auswirkungen und Gefahren einer kurzzeitigen Notbetriebsbelastung

Die Hauptrisiken bei kurzzeitiger Notbetriebsbelastung über die festgelegten Grenzwerte sind:

- kritische mechanische Spannungen wegen der ansteigenden Temperatur, die ein unzulässiges Niveau erreichen können und Risse in der Isolierung von Gießharz-Transformatoren verursachen;
- mechanische Beschädigung in der Wicklung aufgrund von kurzzeitigen und wiederholten Strömen, die höher als der Bemessungsstrom sind;
- mechanische Beschädigung in der Wicklung aufgrund von kurzzeitigen und wiederholten Strömen in Kombination mit einer höheren Umgebungstemperatur als der festgelegten;
- nachteilige Veränderung der mechanischen Eigenschaften bei höherer Temperatur könnte die Kurzschlussfestigkeit verringern;
- Verringerung der Spannungsfestigkeit aufgrund der erhöhten Temperatur.

Als ein Ergebnis daraus wird der maximale Überstrom auf 50 % über dem Bemessungs-nennstrom begrenzt.

Die Zustimmung des Herstellers ist bei einer Überlastung notwendig, die über 50 % hinausgeht, um die Auswirkungen einer derartigen Überlastung zu bewerten. Die Dauer einer derartigen Überlastung sollte in jedem Fall so kurz wie möglich sein.

#### 4.4 Auswirkungen einer langzeitigen Notbetriebsbelastung

Bei höheren Temperaturen wird die Verschlechterung der mechanischen und dielektrischen Eigenschaften der Leiterisolierung beschleunigt. Wenn diese Verschlechterung weit genug fortgeschritten ist, kann sie die Lebensdauer des Transformators herabsetzen, besonders wenn dieser Kurzschlüssen des Netzes ausgesetzt ist.

Andere Isolierstoffe sowie Bauteile und die Leiter unterliegen ebenfalls einer schnelleren Alterungsgeschwindigkeit bei höheren Temperaturen.

Die Berechnungsregeln für die relative Alterungsgeschwindigkeit und den Verbrauch der Lebensdauer beruhen auf Betrachtungen der Belastung.

### 5 Alterung und Lebensdauer der Transformatorisolierung

#### 5.1 Allgemeines

Die Erfahrung zeigt, dass die normale Lebensdauer eines Transformators einige Jahrzehnte beträgt. Dies kann nicht genauer angegeben werden, weil es sogar Abweichungen zwischen identischen Einheiten geben kann, hauptsächlich wegen der Betriebsfaktoren, die sich von einem Transformator zum anderen unterscheiden können. Von wenigen Ausnahmen abgesehen wird ein Transformator während seiner Lebensdauer selten bei 100 % seines Bemessungsstroms betrieben. Andere Erwärmungsfaktoren, wie unzureichende Kühlung, Oberschwingungen, Übererregung und/oder ungewöhnliche Bedingungen, wie sie in IEC 60076-11, 4.4, beschrieben sind, könnten die Lebensdauer eines Transformators ebenso beeinträchtigen.

Wenn Wärme, hauptsächlich erzeugt durch Transformatorverluste, auf das Isoliersystem übertragen wird, setzt ein chemischer Prozess ein. Dieser Prozess verändert die molekulare Struktur der Werkstoffe, aus denen das Isoliersystem besteht. Die Alterungsgeschwindigkeit steigt in dem Maße an, wie die Wärme an das System übertragen wird. Dieser Prozess ist kumulativ und irreversibel, d. h., dass die Werkstoffe ihre ursprüngliche molekulare Struktur nicht wiedererlangen können, wenn die Wärmezufuhr eingestellt wird und die Temperatur sinkt. Der Temperaturindex des Isoliersystems ist in den Unterlagen des Herstellers angegeben und befindet sich auch auf dem Leistungsschild. Es wird angenommen, dass der Ausfall der Isolierung aufgrund von Alterung eine der Ursachen für das Lebensdauerende eines Transformators ist.

Außerdem wird angenommen, dass die Alterung nach der Arrhenius-Gleichung von der Temperatur abhängt. Zu weiteren Angaben siehe Anhang A. Die beiden Konstanten in der Arrhenius-Gleichung sollten im Idealfall durch thermische Dauerprüfung bestimmt werden. In Fällen, in denen derartige Daten aus Prüfungen nicht zur Verfügung stehen, liefert diese Richtlinie geschätzte Konstanten, die auf Grundlage der folgenden Annahmen berechnet wurden:

- Eine Erwärmung um 6 K verdoppelt die Alterungsgeschwindigkeit. 6 K ist ein geschätzter Wert für die gesamte Wicklung in Verbindung mit dem Wert der spezifischen Werkstoffe, die in der Wicklung verwendet werden.
- Ein weiterer Wert für die Verdopplungsgeschwindigkeit sollte angewendet werden, wenn er durch thermische Dauerprüfungen des vollständigen elektrischen Isoliersystems (EIS) bestätigt wird.
- Ausfälle der Isolierung sind die Ursache für das Lebensdauerende eines Transformators.

## 5.2 Lebensdauer

Die erwartete Lebensdauer  $L$  eines Transformators bei einer konstanten thermodynamischen Heißpunkttemperatur  $T$  in Kelvin kann mit der folgenden Gleichung berechnet werden:

$$L = a \cdot e^{\frac{b}{T}} \quad (1)$$

Diese Gleichung kann geeigneter geschrieben werden als:

$$L = a \cdot \exp\left(\frac{b}{T}\right) \quad (2)$$

Obwohl in diesen Gleichungen jede Zeiteinheit verwendet werden kann, wird in dieser Richtlinie die Stunde verwendet. Die in Tabelle 1 angegebene Konstante  $a$  für die unterschiedlichen Temperaturen des Isoliersystems beruht auf dieser Zeiteinheit.

ANMERKUNG 1 Die nach dieser Gleichung berechnete erwartete Lebensdauer sollte nicht sehr wörtlich genommen werden. Die Eignung eines Transformators, hohen Überströmen durch Kurzschlüsse im Starkstromnetz sowie Überspannungen zu widerstehen ist – nach dieser theoretisch berechneten Lebensdauer – sicherlich schwächer als bei einem neuen Transformator. Treten derartige Störungen nicht auf, kann der Transformator für viele Jahre zufrieden stellend betrieben werden. Die Lebensdauer eines Transformators kann durch Vorsichtsmaßnahmen zur Vermeidung von Kurzschlüssen und Anlagen mit angemessenem Überspannungsschutz verlängert werden.

**Tabelle 1**

| Temperatur des Isoliersystems<br>(Temperaturindex $T_i$ )<br>°C | Konstanten der Arrhenius-Gleichung |          | Heißpunkttemperatur der Wicklung<br>$\vartheta_{HSr}$<br>°C |
|-----------------------------------------------------------------|------------------------------------|----------|-------------------------------------------------------------|
|                                                                 | $a$<br>h                           | $b$<br>K |                                                             |
| 105 (A)                                                         | 3,10 E-14                          | 15 900   | 95                                                          |
| 120 (E)                                                         | 5,48 E-15                          | 17 212   | 110                                                         |
| 130 (B)                                                         | 1,72 E-15                          | 18 115   | 120                                                         |
| 155 (F)                                                         | 9,60 E-17                          | 20 475   | 145                                                         |
| 180 (H)                                                         | 5,35 E-18                          | 22 979   | 170                                                         |
| 200                                                             | 5,31 E-19                          | 25 086   | 190                                                         |
| 220                                                             | 5,26 E-20                          | 27 285   | 210                                                         |

ANMERKUNG 2 Für die Bestimmung der Koeffizienten  $a$  und  $b$  für die Bemessungs-Heißpunkttemperatur in der Wicklung werden die folgenden Gleichungen angewendet:

$$\ln(180\,000) = \frac{b}{\vartheta_{HSr} + 273} + \ln(a)$$

$$\ln(90\,000) = \frac{b}{\vartheta_{HSr} + 6 + 273} + \ln(a)$$

Dabei ist

$\vartheta_{HSr}$  die Heißpunkttemperatur der Wicklung;

$T_i$  die Temperatur des Isoliersystems (Temperaturindex  $T_i$ ).

Die Tabelle wird durch Verdopplung der Alterung für je 6 K berechnet.

ANMERKUNG 3 Die Lebensdauern in Tabelle 1 gelten nur für Referenzzwecke, weil die meisten Leistungstransformatoren während des größten Teils ihrer Lebensdauer gut unterhalb der Vollast betrieben werden. Eine Heißpunkttemperatur, die um die 6 °C unter den Bemessungswerten liegt, führt zu einer Halbierung der Lebensdauer, die tatsächliche Lebensdauer der Transformatorisolation wird ein Mehrfaches betragen, beispielsweise 180 000 h.

### 5.3 Beziehung zwischen konstanter Dauerbelastung und Temperatur

Die konstante thermodynamische Heißpunkttemperatur  $T$  in Kelvin der Wicklung wird berechnet mit:

$$T = 273 + \vartheta_a + \Delta\vartheta_{\text{HSn}} \quad (3)$$

Dabei ist

$\vartheta_a$  die Umgebungstemperatur in °C.

$\Delta\vartheta_{\text{HSn}}$  ist die Übertemperatur am Heißpunkt der Wicklung über der Umgebungstemperatur bei der betrachteten Last.

Es ist zu beachten, dass die Umgebungstemperatur nicht unabhängig von Belastung sein kann, sondern eine Funktion der Belastung sein kann.

$$\vartheta_a = f(\text{Strom}) \quad (4)$$

Diese Funktion kann von einem Standort zu einem anderen verschieden sein. Für einen bestimmten Standort sind Kenntnisse über diese Wechselbeziehung erforderlich, um sinnvolle Schätzungen der Alterungsgeschwindigkeit und Verbrauch der Lebensdauer vornehmen zu können. Diese Wechselbeziehung kann durch Messung an einem bestimmten Standort ermittelt werden. Wenn keine entsprechenden Angaben zur Verfügung stehen, können Hinweise hinsichtlich der Alterungsgeschwindigkeit und des Lebensdauerverbrauchs durch alternative Berechnungen bei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen gewonnen werden, z. B. im Bereich von 10 °C bis 40 °C.

Bei den Gleichungen, die in dieser Norm angegeben werden, sind sowohl Wirbelstromverluste als auch ohmsche Verluste in den Wicklungen berücksichtigt worden. Die Prüfdaten weisen darauf hin, dass die Gleichungen eine höhere Lebensdauerabnahme als erwartet zeigen. Wenn Oberschwingungsströme vorhanden sind, dann kann es erforderlich sein, die erhöhten Wirbelstromverluste während der Überlastung einer zusätzlichen Betrachtung nach IEC 61378-1, Abschnitt 9, zu unterziehen.

### 5.4 Alterungsgeschwindigkeit

Die normale Lebensdauer eines Transformators beträgt in der Praxis mindestens 180 000 h. Für eine Angabe der Alterungsgeschwindigkeit  $k$  als Verbrauch der Lebensdauerstunden je Stunde Betriebszeit bei einer Temperatur  $T$  in Kelvin werden 180 000 h als konservativer Bezugswert in der folgenden Gleichung verwendet:

$$k = 180\,000 \cdot a^{-1} \cdot \exp\left(\frac{-b}{T}\right) \quad (5)$$

Die relative Alterungsgeschwindigkeit  $kr$  bei einer konstanten Heißpunkttemperatur  $T$  (in Kelvin) wird als prozentualer Anteil der Alterungsgeschwindigkeit angegeben, die eine nach der folgenden Gleichung berechnete Lebensdauer von 180 000 h ergibt:

$$kr = 100 \cdot t \cdot a^{-1} \cdot \exp\left(\frac{-b}{T}\right) \quad (6)$$

Dabei werden  $a$  und  $b$  der Tabelle 1 entnommen.

## 5.5 Lebensdauerverbrauch

Der Lebensdauerverbrauch  $L_c$ , angegeben in h, bei einer konstanten Heißpunkttemperatur  $T$  (in Kelvin) während einer Dauer  $t$  in h wird nach der folgenden Gleichung berechnet:

$$L_c = 180\,000 \cdot t \cdot a^{-1} \cdot \exp\left(\frac{-b}{T}\right) \quad (7)$$

Dabei werden  $a$  und  $b$  der Tabelle 1 entnommen.

## 5.6 Heißpunkt-Übertemperatur im stationären Zustand

Bei den meisten im Einsatz befindlichen Transformatoren ist die Heißpunkttemperatur im Inneren einer Wicklung nicht genau bekannt. Für die meisten dieser Einheiten kann die Heißpunkttemperatur durch Berechnung abgeschätzt werden. Die Berechnungsregeln in diesen Teilen beruhen auf Folgendem:

$\vartheta_{HS}$  ist die Heißpunkttemperatur in °C bei Bemessungsbedingungen (Bemessungsstrom, Bemessungsumgebungstemperatur, Bemessungsspannung, Bemessungsfrequenz usw.).

Der Parameter  $\vartheta_{HS}$  kann nach einem Berechnungsverfahren oder durch Prüfung ermittelt werden.

ANMERKUNG Obwohl es keine genormte Prüfung für die Bestimmung der Heißpunkttemperatur gibt, der Hersteller andere Werte durch die Prüfungen zeigt, darf der Hersteller diese Werte für die Berechnung des Lebensdauerverbrauchs des Transformators verwenden.

## 5.7 Angenommener Heißpunktfaktor

Bei den folgenden Betrachtungen beträgt der angenommene Heißpunktfaktor  $Z = 1,25$ .

$$\Delta\vartheta_{HS} = Z \cdot \Delta\vartheta_{Wr} \quad (8)$$

$\Delta\vartheta_{HS}$  ist die Übertemperatur am Heißpunkt [K].

$\Delta\vartheta_{Wr}$  ist die mittlere Übertemperatur der Wicklung bei Bemessungslast [K].

## 5.8 Heißpunkttemperaturen bei sich verändernden Umgebungstemperaturen und Lastbedingungen

Der für die Berechnung des Lebensdauerverbrauchs erforderliche Grundwert ist die Temperatur am Heißpunkt. Für diesen Zweck ist es notwendig, die Übertemperatur an dieser Stelle bei jeder Belastungsbedingung und bei jeder Umgebungstemperatur zu kennen.

$$\Delta\vartheta_{HSn} = Z \cdot \Delta\vartheta_{Wr} \cdot I_n^q \quad (9)$$

$\Delta\vartheta_{HSn}$  ist die Übertemperatur am Heißpunkt bei der betrachteten Last.

$I_n$  ist der Belastungsfaktor je Einheit.

$q$  = 1,6 für natürliche Luftkühlung (AN), oder  
= 2 für Transformatoren mit AF-Kühlung (AF).

$Z$  wird mit 1,25 angenommen.

Vorzugsweise anzuwenden sind möglichst Prüfergebnisse für  $\Delta\vartheta_{Wr}$ , um die Unsicherheit hinsichtlich der Gültigkeit des Faktors  $Z$  und den Wert von  $q$  zu begrenzen. Die Erfahrung zeigt, dass  $q$  und  $Z$  in Abhängigkeit vom Transformatortyp und der Höhe des Laststroms, bei dem er arbeitet, unterschiedliche Werte annehmen.

ANMERKUNG Bei einigen Typen der Wicklungsausführung kann die Bestimmung von  $\Delta\vartheta_{Wr}$  nur an Transformatoren-Entwicklungsmustern möglich sein.

## 5.9 Belastungsgleichungen

### 5.9.1 Dauerbelastung

Die Übertemperatur am Heißpunkt als eine Funktion der Last unter stationären Bedingungen sollte mit den folgenden Gleichungen berechnet werden:

$$\vartheta_{\text{HS}} = \vartheta_{\text{a}} + \Delta \vartheta_{\text{HS}} \quad (10)$$

Die folgende Gleichung gilt für AN-Kühlung:

$$\Delta \vartheta_{\text{HS}} = \Delta \vartheta_{\text{HS,r}} [I]^{2m} \quad (11)$$

Die folgende Gleichung gilt für AF-Kühlung:

$$\Delta \vartheta_{\text{HS}} = \Delta \vartheta_{\text{HS,r}} [I^2 C_T]^X \quad (12)$$

$$C_T = \frac{T_k + \vartheta_{\text{HS}}}{T_k + \vartheta_{\text{HS,r}}} \quad (13)$$

Dabei ist

- $\Delta \vartheta_{\text{HS}}$  die Übertemperatur am Heißpunkt bei bezogener Last  $I$ , in K;
- $\Delta \vartheta_{\text{HS,r}}$  die Bemessungstemperatur oder die geprüfte Temperatur am Heißpunkt bei einer bezogenen Last von 1,0, in °C (die geprüften Werte für selbstkühlenden Betrieb zur Anwendung in Gleichung (11) können sich von den geprüften Werten für Betrieb mit Ventilator Kühlung für die Anwendung in Gleichung (12) unterscheiden);
- $I$  der Belastungsfaktor je Einheit (Verhältnis zwischen Laststrom und Bemessungsstrom);
- $C_T$  die Temperaturkorrektur für die Widerstandsänderung mit der Temperatur;
- $m$  eine empirische Konstante, die 0,8 beträgt (vorgeschlagen, sofern nicht Prüfdaten vorliegen);
- $\vartheta_{\text{a}}$  die Umgebungstemperatur in °C;
- $\vartheta_{\text{HS}}$  die Heißpunkttemperatur bei der Last  $K$ , in °C;
- $\vartheta_{\text{HS,r}}$  die Bemessungstemperatur oder die geprüfte Temperatur am Heißpunkt bei einer bezogenen Last von 1,0, in K;
- $T_k$  die Temperaturkonstante für Leiter, die für Aluminium 225 und für Kupfer 235 beträgt;
- $X$  ist eine empirische Konstante, die für Berechnungen bei Zwangsluftkühlung verwendet wird, welche 1 beträgt (vorgeschlagen, sofern nicht Prüfdaten vorliegen).

Die Prüfdaten zeigen, dass die vorstehend angegebenen Gleichungen zu konservativen Voraussagen der Heißpunkttemperatur führen sollten.

Der Exponent  $m$  mit 0,8 für selbstkühlenden Betrieb und der Exponent  $X$  mit 1 für Betrieb mit Ventilator Kühlung wurden aus der Wärmeübertragungswechselbeziehung für natürliche und erzwungene Konvektion abgeleitet. Die Prüfdaten zeigen, dass eine Temperaturkorrektur für den Widerstand nach Gleichung (13) erforderlich ist, um die Heißpunkt-Übertemperatur während der Belastung und mit erzwungener Luftkühlung aufgrund der höheren Verluste vorauszusagen, die bei Betrieb mit Zwangskühlung vorhanden sind.

In den Gleichungen (11) und (12) finden Wirbelstromverluste in den Wicklungen keine Berücksichtigung, die sich umgekehrt mit der Temperatur ändern. Die Gleichung liefert ein konservatives Ergebnis, weil Wirbelstromverluste üblicherweise niedrig sind, sofern es keine Oberschwingungsströme gibt.

Die Gleichungen (11) und (12) erfordern ein iteratives Berechnungsverfahren. Unter Anwendung der vorgeschlagenen Exponenten und unter Berücksichtigung der temperaturabhängigen Widerstandsänderung bei Betrieb mit Ventilator Kühlung sollten die Berechnungen sogar dann zu konservativen Ergebnissen für die Heißpunkt-Übertemperatur führen, wenn die Wirbelstromverluste nicht berücksichtigt werden. Bei Vorhandensein von Oberschwingungsströmen kann es erforderlich sein, die ansteigenden Wirbelstromverluste während der Überlastung nach IEC 61378-1, Abschnitt 9, zu berücksichtigen.

### 5.9.2 Vorübergehende Belastung

Die Heißpunkt-Übertemperatur aufgrund vorübergehender Belastung sollte mit den folgenden Gleichungen bestimmt werden:

$$\Delta \vartheta_t = (\Delta \vartheta_U - \Delta \vartheta_i) \left[ 1 - \exp \frac{-t}{\tau} \right] + \Delta \vartheta_i \quad (14)$$

$$\vartheta_{HS} = \Delta \vartheta_t + \vartheta_a \quad (15)$$

Dabei ist

- $\Delta \vartheta_i$  die anfängliche Heißpunkt-Übertemperatur bei etwas Vorlast  $I_n$ , angegeben in K;
- $\Delta \vartheta_t$  die Heißpunkt-Übertemperatur in K zum Zeitpunkt  $t$  nach Veränderung der Last;
- $\Delta \vartheta_U$  der Endwert der Heißpunkt-Übertemperatur in K, wenn die bezogene Überlast  $I_U$  anhaltend ist, bis sich die Heißpunkt-Übertemperatur stabilisiert;
- $t$  die Zeit in min;
- $\tau_R$  die Zeitkonstante des Transformators in min bei Bemessungslast;
- $\tau$  die Zeitkonstante des Transformators in min bei einer angegebenen Last;
- $\vartheta_{HS}$  die Heißpunkttemperatur in °C;
- $\vartheta_a$  die Umgebungstemperatur in °C.

## 5.10 Bestimmung der Zeitkonstanten der Wicklung

### 5.10.1 Allgemeines

Der Begriff einer Transformator-Zeitkonstanten beruht auf der Annahme, dass eine einzige Wärmequelle die Wärme an eine einzige Wärmesenke liefert und dass die Übertemperatur der Senke eine Exponentialfunktion der Wärmezufuhr ist. Die Zeitkonstante ist definiert als die Dauer bis sich die Übertemperatur gegenüber der Umgebungstemperatur nach einem stufenförmigen Lastsprung um 63,2 % verändert hat. Üblicherweise stabilisiert sich die Temperatur nach 5 Zeitkonstanten. Berechnungen der Heißpunkttemperatur bei Belastung sollten sowohl für Niederspannungs- als auch für Hochspannungswicklungen durchgeführt werden, da die veröffentlichten Prüfdaten darauf hinweisen, dass die Zeitkonstanten unterschiedlich sein können. Außerdem können auch die Temperaturklassen des Isoliersystems der beiden Wicklungen unterschiedlich sein.

Die Zeitkonstante sollte berechnet oder nach Vereinbarung zwischen Hersteller und Käufer durch Prüfung am Transformator bestimmt werden.

### 5.10.2 Berechnungsverfahren für die Zeitkonstante

Die Zeitkonstante einer Wicklung bei Bemessungslast,  $\tau_R$ , wird berechnet mit:

$$\tau_R = \frac{C(\Delta \vartheta_{HS,r} - \vartheta_e)}{P_r} \quad (16)$$

Dabei ist

- $C$  die effektive Wärmekapazität der Wicklung, in Wattminuten je K,  
 =  $(15,0 \times \text{Masse des Aluminiumleiters in Kilogramm}) + (6,35 \times \text{Masse des Epoxidharzes und der weiteren Wicklungsisolierung in Kilogramm})$ , oder  
 =  $(6,42 \times \text{Masse des Kupferleiters in Kilogramm}) + (6,35 \times \text{Masse des Epoxidharzes und der weiteren Wicklungsisolierung in Kilogramm})$ ;
- oder
- $C$  die effektive Wärmekapazität der Wicklung, in Wattstunden je K,  
 =  $(0,25 \times \text{Masse des Aluminiumleiters in Kilogramm}) + (0,106 \times \text{Masse des Epoxidharzes und der weiteren Wicklungsisolierung in Kilogramm})$ , oder  
 =  $(0,107 \times \text{Masse des Kupferleiters in Kilogramm}) + (0,106 \times \text{Masse des Epoxidharzes und der weiteren Wicklungsisolierung in Kilogramm})$ ;
- $P_r$  die Gesamtverluste der Wicklung (Widerstandsverluste + Wirbelstromverluste) bei Bemessungslast und Bemessungsübertemperatur, in Watt;
- $\Delta \vartheta_{HS,r}$  die Heißpunkt-Übertemperatur der Wicklung bei Bemessungslast, in K;
- $\vartheta_e$  der Beitrag des Kerns zur Heißpunkt-Übertemperatur der Wicklung im Leerlauf. Dieser Wert sollte der nachfolgend angegebene Wert oder der vom Hersteller bei der Transformator-Übertemperaturprüfung gemessene Wert sein.  
 = 5 K für äußere Wicklung (üblicherweise Hochspannung)  
 = 25 K für innere Wicklung (üblicherweise Niederspannung)

ANMERKUNG Die vorstehend angegebenen Werte beruhen auf den Erfahrungen des Herstellers.

### 5.10.3 Prüfverfahren für die Zeitkonstante

Die Zeitkonstanten dürfen auch aus der Abkühlkurve des Heißwiderstandes abgeleitet werden, die bei den Temperaturprüfungen erhalten wurde.

## 5.11 Bestimmung der Zeitkonstanten der Wicklung nach empirischen Konstanten

Bei Veränderungen der Übertemperatur verändert sich die Zeitkonstante entsprechend einer empirischen Konstanten  $m$ .

$$\tau_R = \frac{C(\Delta \vartheta_{HS,r} - \vartheta_e)}{P_r} \quad (17)$$

Wenn  $m = 1$ , dann ist Gleichung (17) für jede Last und jede Anfangstemperatur richtig. Wenn  $m \neq 1$ , dann ist die Zeitkonstante für jede Last und für jede Anfangstemperatur für entweder einen Aufwärmzyklus oder einen Abkühlzyklus mit Gleichung (18) zu bestimmen:

$$\tau = \tau_R \frac{\left( \frac{\Delta \vartheta_U}{\Delta \vartheta_{HS,r}} \right) - \left( \frac{\Delta \vartheta_A}{\Delta \vartheta_{HS,r}} \right)}{\left( \frac{\Delta \vartheta_U}{\Delta \vartheta_{HS,r}} \right)^{\frac{1}{m}} - \left( \frac{\Delta \vartheta_A}{\Delta \vartheta_{HS,r}} \right)^{\frac{1}{m}}} \quad (18)$$

## 5.12 Berechnung der Belastbarkeit

Für die Bestimmung der Heißpunkttemperatur während des Belastungsspiels sollten die Gleichungen (10) bis (18) angewendet werden. Sie sollten auch Anwendung finden zur Bestimmung des Kurzzeit- oder Dauer-

betriebs, bei denen die in Tabelle 1 angegebenen höchsten Temperaturen oder andere Temperaturendwerte erreicht werden.

Die anfängliche Heißpunkt-Übertemperatur für den Anfangsbelastungsfaktor  $I_i$  sollte Gleichung (11) entnommen werden und wird wie folgt bestimmt:

$$\Delta \vartheta_i = \Delta \vartheta_{HS,r} [I_i]^{2m} \quad (19)$$

$I_i$  ist der Anfangsbelastungsfaktor (Verhältnis zwischen Laststrom und Bemessungsstrom).

Die begrenzende Heißpunkttemperatur  $\vartheta_{HS}$  ist aus Tabelle 2 auszuwählen. Für die Umgebungstemperatur ist die zulässige Heißpunkt-Übertemperatur zum Zeitpunkt  $t$  nach Gleichung (10) zu bestimmen.

**Tabelle 2**

| Temperatur des Isoliersystems<br>(IEC 60076-11)<br>°C | Höchste Heißpunkttemperatur<br>der Wicklung<br>°C |
|-------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| 105 (A)                                               | 130                                               |
| 120 (E)                                               | 145                                               |
| 130 (B)                                               | 155                                               |
| 155 (F)                                               | 180                                               |
| 180 (H)                                               | 205                                               |
| 200                                                   | 225                                               |
| 220                                                   | 245                                               |

Eine Berechnung der Lebensdauer für Temperaturen über der höchsten zulässigen Temperatur nach Tabelle 2 ist irrelevant, weil sich die Zusammensetzung der Wicklungswerkstoffe verändern kann. Transformatorbelastungen, die zu Temperaturen führen, mit denen die Grenzwerte in Tabelle 2 überschritten werden, tragen das Risiko von Transformatorausfällen in einer nicht vorhersagbaren kurzen Dauer.

$$\vartheta_{HS} = \Delta \vartheta_{HS} + \vartheta_a \quad (20)$$

Dabei ist

- $\vartheta_{HS}$  die Heißpunkttemperatur in °C;
- $\Delta \vartheta_{HS}$  die Heißpunkt-Übertemperatur in K;
- $\vartheta_a$  die Umgebungstemperatur in °C.

$$\Delta \vartheta_t = \vartheta_{HS} - \vartheta_a \quad (21)$$

Dabei ist

$\Delta \vartheta_t$  die Heißpunkt-Übertemperatur in K zum Zeitpunkt  $t$  nach der Laständerung.

Aus Gleichung (14) ist der Endwert der Heißpunkt-Übertemperatur zu bestimmen.

$$\Delta \vartheta_U = \left[ \frac{\Delta \vartheta_t - \Delta \vartheta}{1 - \exp(-t/\tau)} \right] + \Delta \vartheta \quad (22)$$

Dabei ist

$\Delta\vartheta_U$  der Endwert der Heißpunkt-Übertemperatur in K.

Die Zeitkonstante  $t$  sollte nach 5.9 ermittelt werden. Für die Dauer eines Belastungsspiels ist eine Zeit  $t$  auszuwählen, die in die obige Gleichung eingesetzt wird. Aus Gleichung (11) kann die Überlast entsprechend diesen Bedingungen wie folgt erhalten werden:

$$I_U = \left[ \frac{\Delta\vartheta_U}{\Delta\vartheta_{HS,r}} \right]^{\frac{1}{2m}} \quad (23)$$

Dabei ist

$I_U$  der Endwert des Belastungsfaktors.

Die Bestimmung der Zeitkonstanten sollte in einem iterativen Prozess erfolgen.

## 6 Grenzwerte

### 6.1 Strom- und Temperaturgrenzwerte

Bei Belastungswerten über die Bemessung auf dem Leistungsschild hinaus, darf die in Tabelle 3 angegebene Heißpunkttemperatur der Wicklung nicht überschritten werden und die in 4.3 und 5.12 angegebenen bestimmten Grenzwerte sind zu berücksichtigen.

Zur Vermeidung einer mechanischen Beschädigung der Wicklung, besonders bei kurzem und wiederholtem Spiel, wird der Wert des Stroms auf  $1,5 I_r$  begrenzt. Werte über  $1,5 I_r$  sind in der Anfragestufe festzulegen und zwischen Käufer und Hersteller zu vereinbaren. Bei allen anderen Spieltypen wird der Strom auf  $1,5 I_r$  begrenzt.

**Tabelle 3 – Strom- und Temperaturgrenzwerte für die Belastung über die Bemessung auf dem Leistungsschild hinaus**

| Temperatur des Isoliersystems °C | 105 | 120 | 130 | 155 | 180 | 200 | 220 |
|----------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Höchster Strom (bezogener Wert)  | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 |
| Höchste Heißpunkttemperatur °C   | 130 | 145 | 155 | 180 | 205 | 225 | 245 |

ANMERKUNG 1 Die Grenzwerte für Temperatur und Strom gelten nicht gleichzeitig. Der Strom darf auf einen niedrigeren Wert als angegeben begrenzt werden, um die Anforderungen an die Temperaturbegrenzung einzuhalten. Umgekehrt darf die Temperatur auf einen niedrigeren Wert als angegeben begrenzt werden, um die Anforderungen an die Strombegrenzung zu erfüllen.

ANMERKUNG 2 Die Berechnung zeigt, dass die Lebensdauer eines neuen Transformators bei den höchsten in der Tabelle angegebenen Heißpunkttemperaturen nur wenige tausend Stunden beträgt.

### 6.2 Weitere Grenzwerte

#### 6.2.1 Strom- und Temperaturgrenzwerte

Mit ansteigendem Strom vergrößert sich das magnetische Streufeld. Dieses Feld kann in den metallischen Bauteilen Übertemperaturen verursachen, die die Überlastung beschränken können. Die in Tabelle 2 aufgeführten Grenzwerte von Laststrom, Heißpunkttemperatur und Temperatur der metallischen Bauteile, ausgenommen Wicklungen und Zuleitungen, sollten nicht überschritten werden. Es sollte beachtet werden, dass bei einer höheren Heißpunkttemperatur als der höchsten Temperatur nach Tabelle 2 entsprechend der

Isolierklasse des Transformators, die Kennwerte des Isoliersystems auf ein Niveau unterhalb des Mindestwertes für das dielektrische Stehvermögen des Transformators abnehmen.

#### **6.2.2 Zubehör und sonstige Betrachtungen**

Außer den Wicklungen können andere Teile des Transformators wie Durchführungen, Kabelendverbindungen, Stufenschalter, Temperaturmesseinrichtungen, Überspannungsableiter und Zuleitungen den Betrieb beim 1,5fachen Bemessungsstrom beeinträchtigen.

#### **6.2.3 Transformatoren in einem Gehäuse**

Der Lebensdauerverbrauch aufgrund von Überlastung ist höher, wenn sich der Transformator in einem Gehäuse befindet.

Beim Einsatz von Transformatoren in Innenräumen sollte eine Korrektur des Bemessungswertes der Heißpunkt-Übertemperatur zur Berücksichtigung des Gehäuses vorgenommen werden.

#### **6.2.4 Umgebungsbedingungen im Freien**

In vielen Teilen der Welt kann die direkte Sonnenstrahlung die Temperatur des Transformators drastisch erhöhen und sollte in Betracht gezogen werden, wenn eine Belastung über den Bemessungsstrom hinaus betrachtet wird.

Wind kann die Kühlung des Transformators verbessern, ist jedoch aufgrund seiner unvorhersagbaren Natur nicht mit in Betracht zu ziehen.