

	DIN IEC 60076-7 (VDE 0532-76-7)	DIN
	Diese Norm ist zugleich eine VDE-Bestimmung im Sinne von VDE 0022. Sie ist nach Durchführung des vom VDE-Präsidium beschlossenen Genehmigungsverfahrens unter der oben angeführten Nummer in das VDE-Vorschriftenwerk aufgenommen und in der „etz Elektrotechnik + Automation“ bekannt gegeben worden.	VDE
ICS 29.180 Ersatz für DIN 57536 (VDE 0536):1977-03 Siehe jedoch Beginn der Gültigkeit Leistungstransformatoren – Teil 7: Leitfadens für die Belastung von ölgefüllten Leistungstransformatoren (IEC 60076-7:2005) Power transformers – Part 7: Loading guide for oil-immersed power transformers (IEC 60076-7:2005) Transformateurs de puissance – Partie 7: Guide de charge pour transformateurs immergés dans l'huile (CEI 60076-7:2005) Gesamtumfang 55 Seiten DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE		

Inhalt

Seite

Einleitung	6
1 Anwendungsbereich	7
2 Normative Verweisungen	7
3 Begriffe	7
4 Symbole und Abkürzungen	9
5 Auswirkung von Belastung über der Bemessungsleistung	11
5.1 Einleitung	11
5.2 Allgemeine Auswirkungen von Belastung über die Bemessungsleistung hinaus	11
5.3 Auswirkungen und Gefahren beim kurzzeitigen Notbetrieb	12
5.4 Auswirkungen von lang andauerndem Notbetrieb	12
5.5 Transformatorgröße	13
5.6 Nicht thermisch und thermisch stabilisiertes Isolierpapier	13
6 Relativer Lebensdauerverbrauch und Lebensdauer der Transformatorisolierung	15
6.1 Allgemeines	15
6.2 Relativer Lebensdauerverbrauch	15
6.3 Berechnung des Lebensdauerverbrauchs	16
6.4 Lebensdauer der Isolierung	16
7 Begrenzungen	16
7.1 Strom- und Temperaturbegrenzungen	16
7.2 Spezielle Grenzwerte für Verteilungstransformatoren	17
7.3 Spezielle Grenzwerte für Transformatoren mittlerer Leistung	18
7.4 Spezielle Grenzwerte für Transformatoren hoher Leistung	19
8 Ermittlung der Temperaturen	20
8.1 Übertemperatur des Heißpunktes im stationären Zustand	20
8.2 Temperaturen der obersten Ölschicht und des Heißpunktes bei schwankender Umgebungstemperatur und schwankenden Lastbedingungen	25
8.3 Umgebungstemperatur	30
9 Einfluss von Stufenschaltern	31
9.1 Allgemeines	31
9.2 Kurzschlussverluste	32
9.3 Verlustverhältnis	32
9.4 Lastfaktor	32
Anhang A (informativ) Berechnung der Wicklungs- und der Ölzeitkonstante	33
Anhang B (informativ) Praktisches Beispiel zum Verfahren mit Exponentialgleichungen	35
Anhang C (informativ) Erläuterung des Lösungsverfahrens Differentialgleichungen	40
Anhang D (informativ) Flussdiagramm zum Beispiel in Anhang B	49
Anhang E (informativ) Beispiel zur Berechnung und Darstellung der Überlastdaten	51
Literaturhinweise	55

Bild 1 – Beschleunigte Alterung in Mineralöl in einem geschlossenen Gefäß bei 150 °C	14
Bild 2 – Temperaturverteilung	21
Bild 3 – Örtliche Übertemperaturen über der Lufttemperatur in einer 120-kV-Wicklung bei einem Lastfaktor von 1,6	22
Bild 4 – Örtliche Übertemperaturen über der Lufttemperatur in einer 410-kV-Wicklung bei einem Lastfaktor von 1,6	22
Bild 5 – Zwei Lichtwellenleiter-Messfühler, die in einem Abstandshalter befestigt wurden, bevor dieser an der 120-kV-Wicklung angebracht wurde	23
Bild 6 – Zickzackförmig gekühlte Scheibenwicklung, bei der der Abstand zwischen allen Scheibenabschnitten gleich ist und der den Fluss ausrichtende Dichtungsring im Zwischenraum zwischen den Scheibenabschnitten angebracht ist	24
Bild 7 – Draufsicht auf eine rechteckige Wicklung, bei der die Kühlkanäle im Bereich der Joche entfallen	24
Bild 8 – Temperaturverläufe nach sprunghaften Änderungen im Laststrom	26
Bild 9 – Funktion $f_2(t)$ mit den in Tabelle 5 angegebenen Kennwerten berechnet	28
Bild 10 – Blockdiagrammdarstellung der Differentialgleichungen	29
Bild 11 – Prinzip der Verluste in Abhängigkeit der gewählten Anzapfung	32
Bild B.1 – Verhalten der Heißpunkttemperatur bei sprunghaften Änderungen des Laststromes	38
Bild B.2 – Verhalten der Temperatur der obersten Ölschicht bei sprunghaften Änderungen des Laststromes	38
Bild C.1 – Grafische Darstellung der Eingangsdaten für das Beispiel	44
Bild C.2 – Grafische Darstellung der Ergebnisse des Beispiels	47
Bild E.1 – Transformatoren hoher Leistung mit OF-Kühlung: Zulässige Belastungen bei normalem Lebensdauerverbrauch	54
Tabelle 1 – Lebensdauer von Papier unter verschiedenen Bedingungen	14
Tabelle 2 – Relativer Lebensdauerverbrauch in Abhängigkeit der Heißpunkttemperatur	15
Tabelle 3 – Normale Lebensdauer der Isolierung eines gut getrockneten, sauerstofffreien, thermisch stabilisierten Isoliersystems bei Referenztemperatur von 110 °C	16
Tabelle 4 – Strom- und Temperaturgrenzwerte für die Belastung über die Bemessungsleistung hinaus	17
Tabelle 5 – Empfohlene thermische Kennwerte für Exponentialgleichungen	28
Tabelle 6 – Korrektur für erhöhte Umgebungstemperatur durch das Gehäuse	31
Tabelle B.1 – Lastverlauf des 250-MVA-Transformators	35
Tabelle B.2 – Temperaturen am Ende jedes Lastabschnittes	39
Tabelle C.1 – Eingangsdaten für das Beispiel	43
Tabelle C.2 – Ergebnisse des Beispiels	46
Tabelle E.1 – Beispielkennwerte bezogen auf die Belastbarkeit von Transformatoren	51
Tabelle E.2 – Beispieltabelle mit zulässigen Belastungen und entsprechendem täglichen Lebensdauerverbrauch (in „Normaltagen“) und der höchsten Heißpunkt-Übertemperatur während des Lastzyklus	53

Beginn der Gültigkeit

Diese Norm gilt ab 2008-02-01.

Daneben darf **DIN 57536 (VDE 0536):1977-03** noch bis 2009-01-01 angewendet werden.

Nationales Vorwort

Vorausgegangener Norm-Entwurf: E DIN EN 60076-7 (VDE 0532-76-7):2004-12.

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 57536 (VDE 0536):1977-03** wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) Zur Berechnung der relativen Alterung wird eine theoretische Lebensdauer der Leiterisolation von 150 000 h eingeführt.
- b) Die Alterung von thermisch stabilisiertem Papier wurde aus dem „Loading Guide“ von IEEE übernommen.
- c) Es wird nur noch zwischen Leistungstransformatoren und Verteilungstransformatoren unterschieden. Mittelleistungstransformatoren werden nicht mehr betrachtet.
- d) Die erlaubte Grenztemperatur für Kern und für Konstruktionsteile, die nicht in Kontakt mit Zellulose stehen, wurde von 180 °C auf 200 °C erhöht.
- e) Heißpunktfaktoren wurden neu festgelegt.
- f) Veränderte Übergangsfunktionen für die Heißpunkttemperatur nach Lastsprüngen wurden eingeführt.

Frühere Ausgaben

DIN 57536 (VDE 0536): 1977-03

Nationaler Anhang NA (informativ)

Zusammenhang mit Europäischen und Internationalen Normen

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

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

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

Tabelle NA.1

Europäische Norm	Internationale Norm	Deutsche Norm	Klassifikation im VDE-Vorschriftenwerk
EN 60076-1	IEC 60076-1	DIN EN 60076-1 (VDE 0532-76-1)	VDE 0532-76-1
EN 60076-2:1997	IEC 60076-2:1993	DIN EN 60076-2 (VDE 0532-102):1997-12	VDE 0532-102
EN 60076-4:2002	IEC 60076-4:2002	DIN EN 60076-4 (VDE 0532-76-4):2003-06	VDE 0532-76-4
EN 60076-5:2000 Ersetzt durch: EN 60076-5:2006	IEC 60076-5:2000 Ersetzt durch: IEC 60076-5:2006	DIN EN 60076-5 (VDE 0532-5):2001-11 Ersetzt durch: DIN EN 60076-5 (VDE 0532-75-5):2007-01	VDE 0532-5 Ersetzt durch: VDE 0532-75-5
–	IEC 60354:1991 Ersetzt durch: IEC 60076-7:2005	–	–

Nationaler Anhang NB (informativ)

Literaturhinweise

DIN EN 60076-1 (VDE 0532-76-1): Leistungstransformatoren – Teil 1: Allgemeines

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

DIN EN 60076-4 (VDE 0532-76-4):2003-06, Leistungstransformatoren – Teil 4: Leitfaden zur Blitz- und Schaltstoßspannungsprüfung von Leistungstransformatoren und Drosselspulen (IEC 60076-4:2002); Deutsche Fassung EN 60076-4:2002

DIN EN 60076-5 (VDE 0532-5):2007-01, Leistungstransformatoren – Teil 5: Kurzschlussfestigkeit (IEC 60076- 5:2006); Deutsche Fassung EN 60076-5:2006

Leistungstransformatoren – Teil 7: Leitfaden für die Belastung von ölgefüllten Leistungstransformatoren

Einleitung

Der vorliegende Teil der IEC 60076 liefert eine Anleitung für die Spezifikation und die Belastung von Leistungstransformatoren vom Standpunkt der Betriebstemperaturen und der thermischen Alterung aus. Er enthält Empfehlungen für Belastungen über der Bemessungsleistung und eine Anleitung für Projektierende bei der Auswahl geeigneter Bemessungsgrößen und Belastungsbedingungen für neue Anlagen.

IEC 60076-2 enthält die Anforderungen und Prüfungen in Bezug auf die Übertemperatur von Öltransformatoren bei Dauerbelastung bei Bemessungsbedingungen. Es sollte beachtet werden, dass sich **IEC 60076-2** auf die mittlere Übertemperatur der Wicklung bezieht, während dieser Teil der IEC 60076 hauptsächlich die Heißpunkttemperatur betrifft und die angegebenen Werte nur als Richtwerte angegeben werden.

Dieser Teil von IEC 60076 gibt mathematische Modelle zur Beurteilung der Auswirkungen unterschiedlicher Belastungen mit unterschiedlichen Temperaturen des Kühlmediums und mit transienten oder zyklischen Schwankungen in Abhängigkeit von der Zeit an. Die Modelle dienen der Berechnung von Betriebstemperaturen im Transformator, besonders der Temperatur der heißesten Stelle in der Wicklung. Diese Heißpunkttemperatur wird dann zur Berechnung des relativen Lebensdauerverbrauchs und des prozentuellen Anteils der Lebensdauer, der in einem bestimmten Zeitabschnitt verbraucht wird, benutzt. Das Modell gilt für kleine Transformatoren, die hier als Verteilungstransformatoren bezeichnet werden, und für Leistungstransformatoren.

Eine wesentliche Änderung gegenüber IEC 60354:1991 ist die verstärkte Nutzung von Lichtwellenleiter-Temperaturmessfühlern in Transformatoren. Damit haben sich die Möglichkeiten für eine genaue thermische Modellierung von Leistungstransformatoren wesentlich verbessert, besonders bei sprunghaften Änderungen des Laststromes. Diese Möglichkeiten haben auch einige Unterschiede zwischen dem „Ölexponenten x “ und dem „Wicklungsexponenten y “ für Leistungstransformatoren, die in diesem Teil von IEC 60076 und in **IEC 60076-2** von 1993 benutzt werden, nach sich gezogen:

- $x = 0,9$ in **IEC 60076-2** und $x = 0,8$ in diesem Teil von IEC 60076 bei ON-Kühlung.
- $y = 1,6$ in **IEC 60076-2** und $y = 1,3$ in diesem Teil von IEC 60076 bei ON- und OF-Kühlung.

Für Verteilungstransformatoren werden in diesem Teil von IEC 60076 die gleichen Werte für x und y benutzt wie in **IEC 60076-2**.

Dieser Teil von IEC 60076 enthält außerdem Empfehlungen für die Begrenzung der zulässigen Belastung nach den Ergebnissen der Temperaturberechnungen oder -messungen. Diese Empfehlungen beziehen sich auf unterschiedliche Belastungen – Dauerbelastung, normale zyklische ungestörte Belastung oder zeitlich begrenzter Notbetrieb. Die Empfehlungen gelten für Verteilungstransformatoren, Transformatoren mittlerer Leistung und Transformatoren hoher Leistung.

Die **Abschnitte 1 bis 7** enthalten Definitionen, allgemeine Hintergrundinformationen und bestimmte Grenzwerte für den Betrieb verschiedener Transformatorkategorien.

Abschnitt 8 umfasst die Ermittlung der Temperaturen und liefert mathematische Modelle zur Bestimmung der Heißpunkttemperatur im stationären Zustand und bei Übergangsbedingungen.

Abschnitt 9 enthält eine kurze Beschreibung des Einflusses der Stufenschalterstellung.

In den **Anhängen B, C und E** werden Anwendungsbeispiele gegeben.

1 Anwendungsbereich

Der vorliegende Teil von IEC 60076 gilt für Öltransformatoren. Er beschreibt die Auswirkungen eines Betriebs bei verschiedenen Umgebungstemperaturen und Lastbedingungen auf die Lebensdauer des Transformators.

ANMERKUNG Bei Ofentransformatoren sollte hinsichtlich des besonderen Belastungsprofils der Hersteller konsultiert werden.

2 Normative Verweisungen

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

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

IEC 60076-4:2002, *Power transformers – Part 4: Guide to the lightning impulse and switching impulse testing – Power transformers and reactors*

IEC 60076-5:2000, *Power transformers – Part 5: Ability to withstand short circuit*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die folgenden Begriffe.

3.1

Verteilungstransformator

Leistungstransformator mit einer maximalen Bemessungsleistung von 2 500 kVA dreiphasig oder 833 kVA einphasig

3.2

Transformator mittlerer Leistung

Leistungstransformator mit einer maximalen Bemessungsleistung von 100 MVA dreiphasig oder 33,3 MVA einphasig

3.3

Transformator hoher Leistung

Leistungstransformator, der die in 3.2 festgelegten Grenzwerte übersteigt

3.4

zyklische Belastung

Belastung mit zyklischen Schwankungen (Zyklusdauer gewöhnlich 24 h), die hinsichtlich des summierten Alterungsbetrages während des Zyklus betrachtet wird. Die zyklische Belastung kann entweder eine normale Belastung oder ein lang andauernder Notbetrieb sein.

3.5

normale zyklische Belastung

Während eines Teils des Zyklus liegt eine höhere Umgebungstemperatur oder ein höherer Laststrom als der Bemessungswert vor, aber aus Sicht des relativen Lebensdauerverbrauchs (nach dem mathematischen Modell) entspricht diese Belastung der Bemessungslast bei normaler Umgebungstemperatur. Dabei wird der Vorteil niedriger Umgebungstemperaturen oder niedriger Lastströme während des restlichen Lastzyklus ausgenutzt. Für Planungszwecke kann dieses Prinzip auf lange Zeitabschnitte angewandt werden, indem Abschnitte mit relativem Lebensdauerverbrauch über Eins durch Abschnitte mit relativem Lebensdauerverbrauch unter Eins ausgeglichen werden.

3.6

lang andauernde Notbetriebsspiele

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

3.7

kurzzeitiger Notbetrieb

ungewöhnlich starke Belastung bei einem Übergangsvorgang (weniger als 30 min) aufgrund eines oder mehrerer außergewöhnlicher Ereignisse, die die normale Systembelastung stark stören

3.8

Heißpunkt

falls es nicht besonders festgelegt ist, bedeutet „Heißpunkt“ die heißeste Stelle in der Wicklung

3.9

relativer Lebensdauerverbrauch

Erhöhung oder Verringerung des Lebensdauerverbrauches der Transformatorisolierung bei einer bestimmten Heißpunkttemperatur, verglichen mit dem Lebensdauerverbrauch bei Referenz-Heißpunkttemperatur

3.10

Lebensdauer der Transformatorisolierung

Gesamtzeit zwischen dem Anfangszustand, wenn die Isolierung neu ist, und dem Endzustand, wenn nach thermischer Alterung, Spannungsbeanspruchung, Kurzschlussbeanspruchung oder mechanischer Bewegung, die beim Normalbetrieb auftreten können, die Gefahr eines elektrischen Versagens hoch ist

3.11

prozentualer Lebensdauerverbrauch

äquivalente Alterung in Stunden über einem Zeitabschnitt (gewöhnlich 24 h) multipliziert mit 100, geteilt durch die erwartete Lebensdauer der Transformatorisolierung. Die äquivalente Alterung in Stunden wird erhalten, indem der relative Lebensdauerverbrauch mit der Stundenzahl multipliziert wird.

3.12

thermisch stabilisiertes Isolierpapier

Isolierpapier auf Zellulosebasis, das chemisch verändert wurde, um die Zersetzungsgeschwindigkeit des Isolierpapiers herabzusetzen. Alterungseffekte werden entweder durch teilweisen Entzug wasserbildender Mittel (wie bei der Zyanoethylierung) oder durch Unterbinden der Wasserbildung durch Einsatz von Stabilisierungsmitteln (wie durch Aminzusatz, Dizyandizyamid) verringert. Isolierpapier wird als thermisch stabilisiert betrachtet, wenn es die Lebensdauerkriterien nach ANSI/IEEE C57.100 erfüllt; Erhalt der Zugfestigkeit von 50 % nach 65 000 Stunden in einem geschlossenen Gefäß bei 110 °C oder einer anderen Kombination von Zeit/Temperatur nach folgender Gleichung:

$$\text{Zeit (h)} = e^{\left(\frac{15\,000}{(\theta_h + 273)} - 28,082 \right)} \approx 65\,000 \times e^{\left(\frac{15\,000}{(\theta_h + 273)} - \frac{15\,000}{(110 + 273)} \right)} \quad (1)$$

Da die derzeit benutzten thermischen Veredelungschemikalien Stickstoff enthalten, das in Kraftpapier nicht vorhanden ist, wird der Grad der chemischen Veränderung durch Prüfung der vorhandenen Stickstoffmenge im behandelten Isolierpapier bestimmt. Übliche Werte für den Stickstoffgehalt von thermisch stabilisiertem Isolierpapier liegen bei der Messung nach ASTM D-982 zwischen 1 % und 4 %.

ANMERKUNG Diese Definition wurde am 7. Oktober 2003 vom IEEE Transformers Committee Task Force als Definition für thermisch stabilisiertes Isolierpapier bestätigt.

3.13

nicht gerichteter Ölfluss OF

gibt an, dass das von den Wärmetauschern oder Kühlern abgepumpte Öl frei innerhalb des Kessels fließt und nicht gezwungen wird, durch die Wicklungen zu fließen (das Öl kann innerhalb der Wicklungen entweder axial in senkrechten Kühlkanälen oder zickzackförmig in waagerechten Kühlkanälen fließen)

3.14**nicht gerichteter Ölfluss ON**

gibt an, dass das von den Wärmetauschern oder Kühlern zuströmende Öl frei innerhalb des Kessels fließt und nicht gezwungen wird, durch die Wicklungen zu fließen (das Öl kann innerhalb der Wicklungen entweder axial in senkrechten Kühlkanälen oder zickzackförmig in waagerechten Kühlkanälen fließen)

3.15**gerichteter Ölfluss OD**

gibt an, dass der größte Teil des von den Wärmetauschern oder Kühlern abgepumpten Öls gezwungen wird, durch die Wicklungen zu fließen (das Öl kann innerhalb der Wicklungen entweder axial in senkrechten Kühlkanälen oder zickzackförmig in waagerechten Kühlkanälen fließen)

3.16**Auslegungs-Umgebungstemperatur**

Umgebungstemperatur, für die die zulässige mittlere Wicklungstemperatur, die Temperatur der obersten Ölschicht und die Heißpunkttemperatur über der Umgebungstemperatur definiert sind

4 Symbole und Abkürzungen

Symbol	Bedeutung	Einheit
C	Wärmekapazität	Ws/K
c	spezifische Wärmekapazität	Ws/(kg · K)
DP	Polymerisationsgrad	
D	Differenzoperator in Differenzgleichungen	
g_r	Temperaturgradient der mittleren Wicklungstemperatur zur mittleren Öltemperatur (im Kessel) bei Bemessungsstrom	K
m_A	Masse der Baugruppe aus Kern und Wicklungen	kg
m_T	Masse von Kessel und Armaturen	kg
m_O	Ölmasse	kg
m_W	Masse der Wicklung	kg
H	Heißpunktfaktor	
K_{11}	Wärmemodellkonstante	
K_{21}	Wärmemodellkonstante	
K_{22}	Wärmemodellkonstante	
K	Lastfaktor (Laststrom/Bemessungsstrom)	
L	gesamter Lebensdauerverbrauch im betrachteten Zeitabschnitt	H
n	Nummer des jeweiligen Zeitabschnittes	
N	Gesamtzahl der Zeitabschnitte während der betrachteten Dauer	
OD	entweder ODAN-, ODAF- oder ODWF-Kühlung	
OF	entweder OFAN-, OFAF- oder OFWF-Kühlung	
ON	entweder ONAN- oder ONAF-Kühlung	
P	eingespeiste Verluste	W
P_e	relativer Wirbelstromverlust in der Wicklung	bezogener Wert
P_W	Wicklungsverluste	W

Symbol	Bedeutung	Einheit
R	Verhältnis der Lastverluste bei Bemessungsstrom zu den Leerlaufverlusten	
R_r	Verhältnis der Lastverluste zu den Leerlaufverlusten an der Hauptanzapfung	
R_{r+1}	Verhältnis der Lastverluste zu den Leerlaufverlusten an der Anzapfung $r + 1$	
$R_{\min}$	Verhältnis der Lastverluste zu den Leerlaufverlusten an der kleinsten Anzapfung	
$R_{\max}$	Verhältnis der Lastverluste zu den Leerlaufverlusten an der größten Anzapfung	
s	Laplace-Operator	
t	Zeitvariable	
tap_r	Nummer der Hauptanzapfung	
tap_{r+1}	Nummer der Anzapfung $r + 1$	
$\text{tap}_{\min}$	Nummer der kleinsten Anzapfung	
$\text{tap}_{\max}$	Nummer der größten Anzapfung	
V	relativer Lebensdauerverbrauch	
V_n	relativer Lebensdauerverbrauch im Zeitabschnitt n	
x	Exponent der Gesamtverluste in Bezug auf die Erwärmung der obersten Ölschicht im Kessel („Ölexponent“)	
y	Exponent des Stromes in Bezug auf die Wicklungserwärmung gegenüber Öl („Wicklungsexponent“)	
θ_a	Umgebungstemperatur	°C
θ_E	über ein Jahr gewichtete Umgebungstemperatur	°C
θ_h	Heißpunkttemperatur	°C
θ_{ma}	mittlere Monatstemperatur	°C
$\theta_{\text{ma-max}}$	mittlere Monatstemperatur des heißesten Monats nach IEC 60076-2:1993	°C
θ_o	Temperatur der obersten Ölschicht (im Kessel) bei der betrachteten Last	°C
θ_{ya}	mittlere Jahrestemperatur nach IEC 60076-2:1993	°C
τ_o	mittlere Ölzeitkonstante	min
τ_W	mittlere Wicklungszeitkonstante	min
$\Delta\theta_{br}$	Übertemperatur der untersten Ölschicht (im Kessel) bei Bemessungslast (Leerlaufverluste + Lastverluste)	K
$\Delta\theta_h$	Gradient der Heißpunkttemperatur zur Temperatur der obersten Ölschicht (im Kessel) bei der betrachteten Last	K
$\Delta\theta_{hi}$	Gradient der Heißpunkttemperatur zur Temperatur der obersten Ölschicht (im Kessel) am Anfang	K
$\Delta\theta_{hr}$	Gradient der Heißpunkttemperatur zur Temperatur der obersten Ölschicht (im Kessel) bei Bemessungsstrom	K
$\Delta\theta_o$	Übertemperatur der obersten Ölschicht (im Kessel) bei der betrachteten Last	K
$\Delta\theta_{oi}$	Übertemperatur der obersten Ölschicht (im Kessel) am Anfang	K

Symbol	Bedeutung	Einheit
$\Delta\theta_{om}$	mittlere Übertemperatur des Öls (im Kessel) bei der betrachteten Last	K
$\Delta\theta_{omr}$	mittlere Übertemperatur des Öls (im Kessel) bei Bemessungslast (Leerlaufverluste + Lastverluste)	K
$\Delta\theta_{or}$	Übertemperatur der obersten Ölschicht (im Kessel) im stationären Zustand bei Bemessungslast (Leerlaufverluste + Lastverluste)	K
$\Delta\theta'_{or}$	korrigierte Übertemperatur der obersten Ölschicht (im Kessel) durch das Gehäuse	K
$\Delta(\Delta\theta_{or})$	zusätzliche Übertemperatur der obersten Ölschicht (im Kessel) durch das Gehäuse	K

5 Auswirkung von Belastung über der Bemessungsleistung

5.1 Einleitung

Die normale Lebensdauererwartung ist übliche Bezugsgrundlage für den Dauerbetrieb bei der Auslegungs-Umgebungstemperatur und den Bemessungs-Betriebsbedingungen. Das Anlegen einer Last oberhalb der Bemessungsleistung und/oder einer Umgebungstemperatur oberhalb der Auslegungs-Umgebungstemperatur zieht Gefahren und eine beschleunigte Alterung nach sich. Dieser Teil von IEC 60076 dient der Erkennung solcher Gefahren und gibt Einschränkungen an, wie Transformatoren über die Bemessung auf dem Leistungsschild hinaus belastet werden dürfen.

5.2 Allgemeine Auswirkungen von Belastung über die Bemessungsleistung hinaus

Die Auswirkungen der Belastung eines Transformators über die Bemessungsleistung hinaus sind Folgende:

- die Temperaturen von Wicklungen, Klemmen, Zuleitungen, Isolierung und Öl steigen und können unzulässige Werte erreichen;
- die Streuflussdichte außerhalb des Kerns steigt und verursacht eine zusätzliche Erwärmung durch Wirbelströme in Metallteilen, die mit Streufluss durchsetzt sind;
- durch die Temperaturänderungen ändert sich der Feuchte- und Gasgehalt der Isolierung und des Öls;
- Durchführungen, Stufenschalter, Kabelendanschlüsse und Stromwandler werden ebenfalls höheren Beanspruchungen ausgesetzt, die über ihre Auslegungs- und Anwendungsreserven hinausreichen können.

Die Überlagerung der Hauptflusses und des erhöhten Streuflusses macht Beschränkungen für eine mögliche Übererregung des Kerns erforderlich [1], [2], [3].

ANMERKUNG Bei belasteten Kerntransformatoren mit einem Energiefluss von der äußeren Wicklung (gewöhnlich Oberspannung) zur inneren Wicklung (gewöhnlich Unterspannung) tritt die größte magnetische Flussdichte des Kerns, die Ergebnis der Überlagerung des Hauptflusses und des Streuflusses ist, im Joch auf.

Wie Untersuchungen ergeben haben, ist dieser Fluss geringer oder gleich dem Fluss, der bei der gleichen angelegten Spannung an den Anschlüssen der äußeren Wicklung beim unbelasteten Transformator erzeugt wird. Der magnetische Fluss in den Schenkeln des Kerns des belasteten Transformators wird durch die Spannung an den Anschlussklemmen der inneren Wicklung bestimmt und gleicht annähernd dem Fluss, der bei der gleichen Spannung ohne Last erzeugt wird.

Bei Kerntransformatoren mit einem Energiefluss von der inneren Wicklung tritt die größte Flussdichte in den Kernschenkeln auf. Ihr Wert ist nur wenig höher als bei der gleichen angelegten Spannung ohne Last. Die Flussdichte im Joch wird dann durch die Spannung an der äußeren Wicklung bestimmt.

Daher sollten bei der Belastung über die Bemessungsleistung hinaus Spannungen an beiden Seiten des belasteten Transformators untersucht werden. Solange die Spannungen auf der gespeisten Seite des belasteten Transformators unterhalb der in IEC 60076-1, Abschnitt 4, angegebenen Grenzwerte bleiben, sind bei der Belastung über die Bemessungsleistung hinaus keine Beschränkungen der Erregung erforderlich. Wenn eine stärkere Erregung auftritt, um

die Lastspannung unter Notbedingungen in einem Bereich zu halten, in dem das Netzwerk noch aufrechterhalten werden kann, sollten die magnetischen Flussdichten in den Kernteilen nie Werte übersteigen, bei denen eine Streuung des Kernflusses aus dem Kern heraus auftreten kann (bei kaltgewalztem kernorientiertem Stahl steigen diese Sättigungseffekte oberhalb 1,9 Tesla stark an). Streuflüsse können dann aufgrund von Hochfrequenzanteilen zeitlich unvorhersagbare, hohe Temperaturen an der Kernoberfläche und in nahen Metallteilen, wie Wicklungseinspannungen oder auch in den Wicklungen selbst verursachen. Unter allen Umständen sind im Allgemeinen die Überlastungszeiten, die von den Wicklungen vorgegeben werden, so kurz, dass der Kern bei einer Übererregung nicht überhitzt wird. Dies wird durch die lange thermische Zeitkonstante des Kerns verhindert.

Folglich besteht die Gefahr eines vorzeitigen Ausfalls aufgrund erhöhter Ströme und Temperaturen. Diese Gefahr kann unmittelbar und kurzfristig oder durch die Summierung der thermischen Alterung der Isolierung im Transformator über viele Jahre auftreten.

5.3 Auswirkungen und Gefahren beim kurzzeitigen Notbetrieb

Eine kurzzeitige erhöhte Belastung führt zu einer Betriebsbedingung mit erhöhter Ausfallgefahr. Ein kurzzeitiger Notbetrieb führt zu einer Heißpunkttemperatur mit einem Wert, bei der möglicherweise eine zeitweilige Verringerung der Durchschlagfestigkeit eintritt. Die Zulässigkeit dieser Bedingung für eine kurze Zeit kann jedoch günstiger sein als der Verlust der Spannungsversorgung. Diese Belastungsart tritt wahrscheinlich selten ein und die Belastung sollte sofort verringert oder der Transformator innerhalb kurzer Zeit abgeschaltet werden, um einen Ausfall zu vermeiden. Die zulässige Dauer dieser Belastung ist kürzer als die thermische Zeitkonstante des Transformators und hängt von der Betriebstemperatur vor dem Anstieg der Belastung ab; gewöhnlich liegt sie unter einer halben Stunde.

- a) Die Hauptgefahr für Kurzzeitausfälle ist die Verringerung der Durchschlagfestigkeit durch das mögliche Vorhandensein von Gasblasen in einem Bereich hoher elektrischer Beanspruchung, d. h. in den Wicklungen und Zuleitungen. Diese Blasen können auftreten, wenn die Heißpunkttemperatur bei einem Transformator mit einem Feuchtegehalt der Wicklungsisolierung von etwa 2 % 140 °C übersteigt. Diese kritische Temperatur sinkt in dem Maß, wie die Feuchtekonzentration steigt.
- b) Gasblasen können sich auch an den Oberflächen von metallischen Konstruktionsteilen entwickeln (entweder in Öl- oder Feststoffisolierung), die durch den Streufluss erwärmt werden, oder sie werden durch die Übersättigung des Öls gebildet. Solche Blasen entwickeln sich jedoch gewöhnlich in Bereichen geringer elektrischer Beanspruchung und müssen in Bereiche wandern, in denen die Beanspruchung höher ist, bevor eine wesentliche Verringerung der Durchschlagfestigkeit eintritt.

Blanke Metallteile außer Wicklungen, die nicht in direktem thermischem Kontakt mit Zelluloseisolierung stehen, aber Kontakt mit nicht zellulosehaltiger Isolierung haben (z. B. Aramidpapier, Glasfasern), und das Öl im Transformator können sich schnell auf hohe Temperaturen erwärmen. 180 °C sollten nicht überschritten werden.
- c) Eine zeitweilige Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften bei höheren Temperaturen kann die Kurzschlussfestigkeit verringern.
- d) Ein Druckaufbau in den Durchführungen kann zu einem Ausfall aufgrund von Ölaustritt führen. Wenn die Temperatur der Isolierung etwa 140 °C übersteigt, kann in Kondensatordurchführungen auch Gasbildung auftreten.
- e) Die Ölausdehnung kann zum Überlaufen des Öls im Ausdehnungsgefäß führen.
- f) Das Abschalten übermäßig hoher Ströme im Stufenschalter kann gefährlich sein.

Die Begrenzungen der höchsten Heißpunkttemperaturen von Wicklungen, Kern und Konstruktionselementen beruhen auf Betrachtungen kurzzeitiger Gefahren, siehe [Abschnitt 7](#).

Die kurzzeitigen Gefahren verschwinden gewöhnlich, nachdem die Last auf den normalen Pegel verringert wurde, jedoch muss das klar festgelegt und von allen beteiligten Parteien (z. B. Planer, Eigentümer und Betreiber) akzeptiert werden.

5.4 Auswirkungen von lang andauerndem Notbetrieb

Dieser Fall ist keine normale Betriebsbedingung und tritt selten ein, er kann aber über Wochen oder selbst Monate anhalten und zu einer beträchtlichen Alterung führen.

- a) Bei hohen Temperaturen wird die Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften der Leiterisolierung beschleunigt. Wenn diese Verschlechterung weit genug fortgeschritten ist, kann sie die effektive Lebensdauer des Transformators herabsetzen, vor allem wenn dieser Kurzschlüssen des Netzes oder einem Transport ausgesetzt ist.
- b) Auch andere Isolierteile, besonders Teile, die dem Axialdruck des Wickelblockes ausgesetzt sind, können bei einer höheren Temperatur beschleunigte Alterung erfahren.
- c) Der Kontaktwiderstand der Stufenschalter kann bei erhöhten Strömen und Temperaturen steigen und in kritischen Fällen kann eine thermische Instabilität eintreten.
- d) Die Dichtungswerkstoffe im Transformator können durch erhöhte Temperaturen brüchig werden.

Die Berechnungsregeln für den relativen Lebensdauerverbrauch und den prozentualen Verlust an Lebensdauer beruhen auf Betrachtungen langzeitiger Gefahren.

5.5 Transformatorgröße

Die Empfindlichkeit von Transformatoren für eine Belastung über die Bemessungsleistung hinaus hängt gewöhnlich von ihrer Größe ab. Die wachsende Größe führt zu:

- einer steigenden Streuflussdichte;
- steigenden Kurzschlusskräften;
- einer steigenden Masse an Isolierung, die einer hohen elektrischen Beanspruchung ausgesetzt ist;
- einer schwierigeren Ermittlung der Heißpunkttemperaturen.

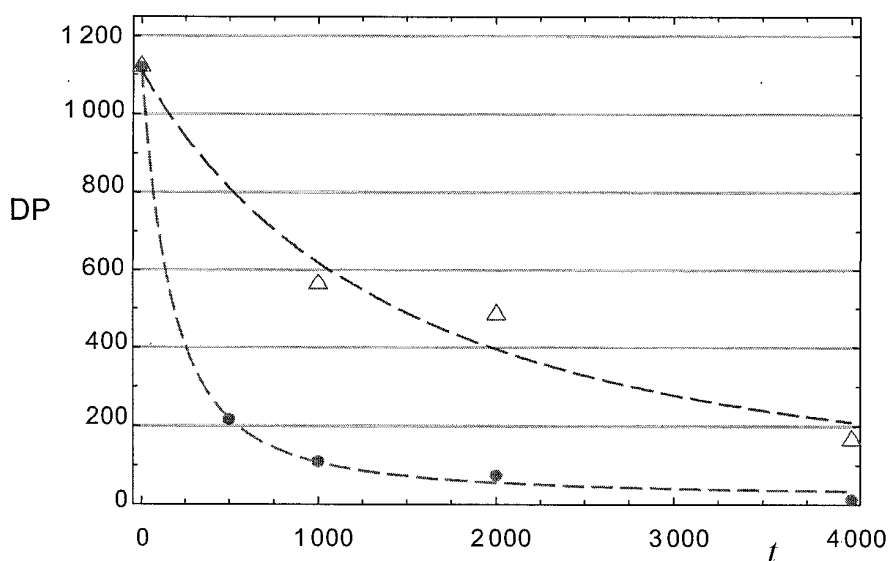
Folglich ist ein großer Transformator anfälliger für eine Belastung über die Bemessungsleistung hinaus als ein kleinerer. Außerdem sind die Folgen eines Transformatorausfalls bei großen Transformatoren kritischer als bei kleineren Einheiten.

Aus diesem Grund und um bei der erwarteten Belastung eine vernünftige Bewertung des Risikos vorzunehmen, werden in diesem Teil von IEC 60076 drei Kategorien betrachtet:

- a) Verteilungstransformatoren, bei denen nur die Heißpunkttemperaturen der Wicklungen und die thermische Verschlechterung betrachtet werden müssen;
- b) Transformatoren mittlerer Leistung, bei denen ein Wechsel der Kühlungsart betrachtet werden muss;
- c) Transformatoren hoher Leistung, bei denen auch die Auswirkungen des Streuflusses wesentlich und die Ausfallfolgen schwerwiegend sind.

5.6 Nicht thermisch und thermisch stabilisiertes Isolierpapier

Der Zweck, Isolierpapier thermisch zu stabilisieren, ist die Neutralisation der Säureproduktion durch Hydrolyse (thermischer Abbau) des Stoffes über die Lebensdauer des Transformators. Diese Hydrolyse tritt bei erhöhten Temperaturen verstärkt ein und veröffentlichte Forschungsergebnisse geben an, dass thermisch stabilisiertes Isolierpapier einen viel höheren Prozentsatz seiner Zug- und Reißfestigkeit behält als unbehandeltes Papier, wenn es erhöhten Temperaturen ausgesetzt wird [4], [5]. Die gleichen Quellen geben die Veränderung des Polymerisationsgrades von nicht thermisch und thermisch stabilisiertem Papier, das einer Temperatur von 150 °C ausgesetzt ist, in Abhängigkeit von der Zeit an (siehe Bild 1).



Legende

DP Polymerisationsgrad

t Zeit (h)

△ Werte für thermisch stabilisiertes Papier

• Werte für nicht thermisch stabilisiertes Papier

Bild 1 – Beschleunigte Alterung in Mineralöl in einem geschlossenen Gefäß bei 150 °C

Eine weitere Quelle [6] zeigt den Einfluss von Temperatur und Feuchte, wie in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1 – Lebensdauer von Papier unter verschiedenen Bedingungen

Papierart/ Alterungstemperatur		Lebensdauer in Jahren	
		trocken und luftfrei	mit Luft und 2 % Feuchte
Zellstoff bei	80 °C	118	5,7
	90 °C	38	1,9
	98 °C	15	0,8
Thermisch stabilisierter Zellstoff bei	80 °C	72	76
	90 °C	34	27
	98 °C	18	12

In Industrienormen wurde der angegebene Unterschied des Verhaltens der thermischen Alterung folgendermaßen berücksichtigt:

- Der relative Lebensdauerverbrauch $V = 1,0$ entspricht bei nicht thermisch stabilisiertem Papier einer Temperatur von 98 °C und bei thermisch stabilisiertem Papier 110 °C.

ANMERKUNG Die Ergebnisse aus Bild 1 und Tabelle 1 sind nicht zur Verwendung von Altersberechnungen und Lebensdauerabschätzungen geeignet. Sie werden in dieser Norm nur berücksichtigt, um nachzuweisen, dass es einen Unterschied im Alterungsverhalten zwischen nicht thermisch und thermisch stabilisiertem Isolierpapier gibt.

6 Relativer Lebensdauerverbrauch und Lebensdauer der Transformatorisolation

6.1 Allgemeines

Es gibt kein einfaches und eindeutiges Kriterium für das Ende der Lebensdauer, mit dem die verbleibende Lebensdauer eines Transformators zahlenmäßig angegeben werden kann. Ein solches Kriterium ist jedoch für Anwender eines Transformators nützlich, somit ist es angebracht, sich auf den Alterungsprozess und den Zustand der Transformatorisolation zu konzentrieren.

6.2 Relativer Lebensdauerverbrauch

Obwohl die Alterung oder der Abbau der Isolation eine zeitabhängige Funktion von Temperatur, Feuchtegehalt, Sauerstoffgehalt und Säuregehalt ist, beruht das in diesem Teil von IEC 60076 dargestellte Modell nur auf der Temperatur der Isolation als maßgeblicher Parameter.

Da die Temperaturverteilung nicht gleichmäßig ist, wird der Teil, der bei der höchsten Temperatur betrieben wird, gewöhnlich am stärksten abgebaut. Deshalb wird der Lebensdauerverbrauch auf die Heißpunkttemperatur der Wicklung bezogen. In diesem Fall wird der relative Lebensdauerverbrauch V für nicht thermisch stabilisiertes Papier nach Gleichung (2) und für thermisch stabilisiertes Papier nach Gleichung (3) definiert [7].

$$V = 2^{(\theta_h - 98)/6} \quad (2)$$

$$V = e^{\left(\frac{15000}{110 + 273} - \frac{15000}{\theta_h + 273} \right)} \quad (3)$$

Dabei ist

θ_h die Heißpunkttemperatur in °C.

Die Gleichungen (2) und (3) setzen voraus, dass V sehr empfindlich auf die Heißpunkttemperatur anspricht, wie es in Tabelle 2 dargestellt ist.

Tabelle 2 – Relativer Lebensdauerverbrauch in Abhängigkeit der Heißpunkttemperatur

θ_h °C	Isolierung aus nicht thermisch stabilisiertem Papier V	Isolierung aus thermisch stabilisiertem Papier V
80	0,125	0,036
86	0,25	0,073
92	0,5	0,145
98	1,0	0,282
104	2,0	0,536
110	4,0	1,0
116	8,0	1,83
122	16,0	3,29
128	32,0	5,8
134	64,0	10,1
140	128,0	17,2

6.3 Berechnung des Lebensdauerverbrauchs

Der Lebensdauerverbrauch L in einem bestimmten Zeitabschnitt ist gleich

$$L = \int_{t_1}^{t_2} V dt \quad \text{oder} \quad L \approx \sum_{n=1}^N V_n \times t_n \quad (4)$$

Dabei ist

V_n der relative Lebensdauerverbrauch im Zeitabschnitt n nach Gleichung (2) oder (3);

t_n der n -te Zeitabschnitt;

n die Nummer des jeweiligen Zeitabschnittes;

N die Gesamtzahl der Zeitabschnitte in der betrachteten Periode.

6.4 Lebensdauer der Isolierung

In Quelle [7] werden vier unterschiedliche Kriterien für das Ende der Lebensdauer vorgeschlagen, d. h. vier unterschiedliche Lebensdauern für thermisch stabilisiertes Papier, wie in Tabelle 3 angegeben.

Tabelle 3 – Normale Lebensdauer der Isolierung eines gut getrockneten, sauerstofffreien, thermisch stabilisierten Isoliersystems bei Referenztemperatur von 110 °C

Grundlage	Normale Lebensdauer der Isolierung	
	Stunden	Jahre
50 % verbleibende Zugfestigkeit der Isolierung	65 000	7,42
25 % verbleibende Zugfestigkeit der Isolierung	135 000	15,41
verbleibender Polymerisationsgrad der Isolierung von 200	150 000	17,12
Auswertung von Ergebnissen bezüglich der Funktionslebensdauer von Verteilungstransformatoren	180 000	20,55

Die Angaben für die Lebensdauern in Tabelle 3 dienen nur als Referenz, da die meisten Leistungstransformatoren die größte Zeit ihrer tatsächlichen Lebensdauer unterhalb ihrer vollen Belastung betrieben werden. Eine Heißpunkttemperatur von wenigstens 6 °C unterhalb der Bemessungswerte ergibt die Hälfte des normalen Lebensdauerverbrauchs und die tatsächliche Lebensdauer der Transformatorisolierung vervielfacht sich, z. B. auf 180 000 h.

ANMERKUNG GSU-Transformatoren, die mit Grundlastgeneratoren verbunden sind, und andere Transformatoren, die eine konstante Last versorgen oder die bei relativ gleichmäßigen Umgebungstemperaturen betrieben werden, erfordern für die aktuelle Lebensdauer eine gesonderte Betrachtung.

7 Begrenzungen

7.1 Strom- und Temperaturbegrenzungen

Bei Belastungswerten über die Bemessungsleistung hinaus dürfen die einzelnen in [Tabelle 4](#) angegebenen Grenzwerte nicht überschritten werden und es sollten die in [7.2 bis 7.4](#) angegebenen speziellen Grenzwerte berücksichtigt werden.

Tabelle 4 – Strom- und Temperaturgrenzwerte für die Belastung über die Bemessungsleistung hinaus

Belastungsarten	Verteilungs- transformatoren (siehe Anmerkung)	Transformatoren mittlerer Leistung (siehe Anmerkung)	Transformatoren hoher Leistung (siehe Anmerkung)
Normale zyklische Belastung			
Strom (bezogener Wert)	1,5	1,5	1,3
Heißpunkttemperatur der Wicklung und von Metallteilen, die in Kontakt mit zellulosehaltigem Isolierstoff stehen (°C)	120	120	120
Heißpunkttemperatur sonstiger Metallteile (in Kontakt mit Öl, Aramidpapier, Glasfaserstoffen) (°C)	140	140	140
Temperatur der obersten Ölschicht (°C)	105	105	105
Notbetrieb über längere Zeit			
Strom (bezogener Wert)	1,8	1,5	1,3
Heißpunkttemperatur der Wicklung und von Metallteilen, die in Kontakt mit zellulosehaltigem Isolierstoff stehen (°C)	140	140	140
Heißpunkttemperatur sonstiger Metallteile (in Kontakt mit Öl, Aramidpapier, Glasfaserstoffen) (°C)	160	160	160
Temperatur der obersten Ölschicht (°C)	115	115	115
Kurzzeitiger Notbetrieb			
Strom (bezogener Wert)	2,0	1,8	1,5
Heißpunkttemperatur der Wicklung und von Metallteilen, die in Kontakt mit zellulosehaltigem Isolierstoff stehen (°C)	siehe 7.2.1	160	160
Heißpunkttemperatur sonstiger Metallteile (in Kontakt mit Öl, Aramidpapier, Glasfaserstoffen) (°C)	siehe 7.2.1	180	180
Temperatur der obersten Ölschicht (°C)	siehe 7.2.1	115	115
ANMERKUNG Die Temperatur- und Stromgrenzwerte gelten nicht gleichzeitig. Der Strom kann auf einen niedrigeren Wert als angegeben begrenzt werden, um die Anforderungen an die Temperaturbegrenzung einzuhalten. Umgekehrt kann die Temperatur auf einen niedrigeren Wert als angegeben begrenzt werden, um die Anforderungen an die Strombegrenzung zu erfüllen.			

7.2 Spezielle Grenzwerte für Verteilungstransformatoren

7.2.1 Strom- und Temperaturgrenzwerte

Die in Tabelle 4 angegebenen Grenzwerte für den Laststrom, die Heißpunkttemperatur, die Temperatur der obersten Ölschicht und die Temperatur von Metallteilen außerhalb von Wicklungen und Zuleitungen sollten nicht überschritten werden. Die Temperaturen der obersten Ölschicht und des Heißpunktes bei kurzzeitigem Notbetrieb werden bei Verteilungstransformatoren nicht begrenzt, weil in diesem Fall die Dauer des Notbetriebs gewöhnlich nicht gesteuert werden kann. Es sollte beachtet werden, dass sich bei Überschreitung der Heißpunkttemperatur von 140 °C Gasblasen bilden können, die die Spannungsfestigkeit des Transformators gefährden können, siehe 5.3.