

	DIN EN 60076-2 (VDE 0532-76-2)	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

Einsprüche bis 2010-01-31

Vorgesehen als Ersatz für
DIN EN 60076-2
(VDE 0532-102):1997-12

Entwurf

**Leistungstransformatoren –
Teil 2: Übertemperaturen für flüssigkeitsgefüllte Transformatoren
(IEC 14/613/CDV:2009);
Deutsche Fassung FprEN 60076-2:2009**

Power transformers –
Part 2: Temperature rise for liquid-immersed transformers
(IEC 14/613/CDV:2009);
German version FprEN 60076-2:2009

Transformateurs de puissance –
Partie 2: Échauffement des transformateurs immergés dans le liquide
(CEI 14/613/CDV:2009);
Version allemande FprEN 60076-2:2009

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2009-11-30 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und Stellungnahme vorgelegt.

Weil die beabsichtigte Norm von der vorliegenden Fassung abweichen kann, ist die Anwendung dieses Entwurfes besonders zu vereinbaren.

Stellungnahmen werden erbeten

- vorzugsweise als Datei per E-Mail an **dke@vde.com** in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter **www.dke.de/stellungnahme** abgerufen werden
- oder in Papierform an die DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE, Stresemannallee 15, 60596 Frankfurt am Main.

Die Empfänger dieses Norm-Entwurfs werden gebeten, mit ihren Kommentaren jegliche relevante Patentrechte, die sie kennen, mitzuteilen und unterstützende Dokumentationen zur Verfügung zu stellen.

Gesamtumfang 93 Seiten

DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE

Beginn der Gültigkeit

Diese Norm gilt ab ...

Nationales Vorwort

Die Deutsche Fassung des europäischen Dokuments FprEN 60076-2:2009 „Leistungstransformatoren – Teil 2: Übertemperaturen für flüssigkeitsgefüllte Transformatoren“ (Entwurf in der Umfrage) ist unverändert in diesen Norm-Entwurf übernommen worden.

Die Internationale Elektrotechnische Kommission (IEC) und das Europäische Komitee für Elektrotechnische Normung (CENELEC) haben vereinbart, dass ein auf IEC-Ebene erarbeiteter Entwurf für eine Internationale Norm zeitgleich (parallel) bei IEC und CENELEC zur Umfrage (CDV-Stadium) und Abstimmung als FDIS (en: Final Draft International Standard) bzw. Schluss-Entwurf für eine Europäische Norm gestellt wird, um eine Beschleunigung und Straffung der Normungsarbeit zu erreichen. Dem entsprechend ist das internationale Dokument IEC 14/613/CDV:2009 „Power transformers – Part 2: Temperature rise for liquid-immersed transformers“ unverändert in den Entwurf FprEN 60076-2:2009 übernommen worden.

Da die Deutsche Fassung noch nicht endgültig mit der Englischen und Französischen Fassung abgeglichen ist, ist die englische Originalfassung des IEC-CDV entsprechend der diesbezüglich durch die IEC erteilten Erlaubnis beigelegt. Die Nutzungsbedingungen für den deutschen Text des Norm-Entwurfes gelten gleichermaßen auch für den englischen IEC-Text.

Das internationale Dokument wurde vom TC 14 „Power transformers“ der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) erarbeitet.

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

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

Änderungen

Gegenüber DIN EN 60076-2 (VDE 0532-102):1997-12 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) vollständige redaktionelle Überarbeitung der Norm;
- b) Anwendungsbereich von ölgefüllten auf flüssigkeitsgefüllte Transformatoren erweitert;
- c) Abschnitt Kühlung umfassend überarbeitet und erweitert;
- d) Abschnitt Erwärmungsmessungen vollständig überarbeitet und erweitert;
- e) Anhänge zur Bestimmung des Heißpunktes ergänzt;
- f) Anhang zur Gasanalyse ergänzt;
- g) Anhang zur Heißpunkt-Messung mit LWL-Fühlern ergänzt.

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
CLC/TR 50462:2008	–	–	–
–	IEC 115:2007	–	–
EN 60076 (Reihe)	IEC 60076 (Reihe)	DIN EN 60076 (VDE 0532-76) (Reihe)	VDE 0532-76 (Reihe)
EN 60076-1:1997 + A1:2000 + A12:2002	IEC 60076-1:2000 entspricht: IEC 60076-1:1997 + A1:1999	DIN EN 60076-1 (VDE 0532-76-1):2003-01	VDE 0532-76-1
–	IEC 60076-7:2005	DIN IEC 60076-7 (VDE 0532-76-7):2008-02	VDE 0532-76-7
–	IEC 60076-8:1997	–	–
EN 60085:2008	IEC 60085:2004 ersetzt durch: IEC 60085:2007	DIN EN 60085 (VDE 0301-1):2008-08	VDE 0301-1
EN 60296:2004 + Corr.:2004	IEC 60296:2003	DIN EN 60296 (VDE 0370-1):2005-01	VDE 0370-1
EN 60567:2005	IEC 60567:2005	DIN EN 60567 (VDE 0370-9):2006-05	VDE 0370-9
EN 60836:2005	IEC 60836:2005	DIN EN 60836 (VDE 0374-10):2006-03	VDE 0374-10
EN 61099:1992	IEC 61099:1992	DIN EN 61099 (VDE 0375-1):1994-07	VDE 0375-1
EN 61181:2007	IEC 61181:2007	DIN EN 61181 (VDE 0370-13):2007-12	VDE 0370-13
–	IEEE C57.91:1995	–	–

Nationaler Anhang NB (informativ)

Literaturhinweise

DIN EN 60076 (VDE 0532-76) (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 60085 (VDE 0301-1):2008-08, *Elektrische Isolierung – Thermische Bewertung und Bezeichnung* (IEC 60085:2007); Deutsche Fassung EN 60085:2008

DIN EN 60296 (VDE 0370-1):2005-01, *Flüssigkeiten für elektrotechnische Anwendungen – Neue Isolieröle für Transformatoren und Schaltgeräte* (IEC 60296:2003); Deutsche Fassung EN 60296:2004 + Corrigendum:2004

DIN EN 60567 (VDE 0370-9):2006-05, *Ölgefüllte elektrische Betriebsmittel – Probennahme von Gasen und von Öl für die Analyse freier und gelöster Gase – Anleitung* (IEC 60567:2005); Deutsche Fassung EN 60567:2005

DIN EN 60836 (VDE 0374-10):2006-03, *Anforderungen an ungebrauchte Silikonisierflüssigkeiten für elektrotechnische Zwecke* (IEC 60836:2005); Deutsche Fassung EN 60836:2005

DIN EN 61099 (VDE 0375-1):1994-07, *Anforderungen an neue synthetische organische Ester für elektrotechnische Zwecke* (IEC 61099:1992); Deutsche Fassung EN 61099:1992

DIN EN 61181 (VDE 0370-13):2007-12, *Getränkte Isolierstoffe – Verwendung der Gasanalyse für gelöste Gase (DGA) als Werkprüfung für elektrische Betriebsmittel* (IEC 61181:2007); Deutsche Fassung EN 61181:2007

DIN IEC 60076-7 (VDE 0532-76-7):2008-02, *Leistungstransformatoren – Teil 7: Leitfaden für die Belastung von ölgefüllten Leistungstransformatoren* (IEC 60076-7:2005)

Deutsche Fassung

Leistungstransformatoren –
Teil 2: Übertemperaturen für flüssigkeitsgefüllte Transformatoren

Inhalt

	Seite
1 Anwendungsbereich	3
2 Normative Verweisungen	3
3 Begriffe	3
4 Kühlungsarten	5
4.1 Kennzeichnungssymbole.....	5
4.2 Transformatoren mit anderen Kühlungsarten.....	6
5 Übliche Kühlungsbedingungen.....	6
5.1 Luftgekühlte Transformatoren	6
5.2 Wassergekühlte Transformatoren	7
6 Zulässige Übertemperaturen	7
6.1 Allgemeines	7
6.2 Zulässige Übertemperaturen bei Bemessungsleistung.....	7
6.3 Geänderte Anforderungen aufgrund besonderer Kühlbedingungen	9
6.4 Übertemperatur während eines festgelegten Belastungsspiels	10
7 Erwärmungsmessungen.....	10
7.1 Allgemeines	10
7.2 Prüfverfahren zur Bestimmung der Übertemperatur	12
7.3 Bestimmung der Flüssigkeitstemperaturen	14
7.4 Bestimmung der Flüssigkeitsübertemperaturen oben und unten sowie der mittleren Flüssigkeitsübertemperatur	15
7.5 Bestimmung der mittleren Wicklungstemperatur.....	15
7.6 Bestimmung der mittleren Wicklungsübertemperatur zum Zeitpunkt des Abschaltens	16
7.7 Bestimmung des Gradienten der mittleren Wicklungstemperatur zur mittleren Flüssigkeitstemperatur	17
7.8 Bestimmung der Heißpunkt-Wicklungsübertemperatur	17
7.9 Unsicherheiten, die die Ergebnisse der Erwärmungsmessung beeinflussen	18
7.10 Gas-in-Öl-Analyse	18
7.11 Korrekturen.....	18
Literaturhinweise.....	20
Anhang A (informativ) Bestimmung der Heißpunkt-Wicklungsübertemperatur an OFAF- und OFAF-gekühlten Transformatoren beruhend auf der Flüssigkeitstemperatur oben im Kessel.....	21
Anhang B (informativ) Verfahren zur Schätzung der Heißpunkt-Wicklungsübertemperaturen.....	23

Anhang C (informativ) Angewendete Verfahren bei der Erwärmungsmessung von flüssigkeitsgefüllten Transformatoren	28
Anhang D (informativ) Gasanalyse für gelöste Gase zur Feststellung von lokaler Überhitzung	36
Anhang E (informativ) Anwendung von LWL-Messfühlern für Heißpunkt-Messungen an Wicklungen	40

Bilder

Bild B.1 – Übertemperatur-Verteilungsmodell für ON...-Kühlsysteme	24
Bild B.2 Werte des Faktors Q als Funktion der Bemessungsleistung und der Leiterhöhe (W)	25
Bild B.3 – Typische Strömungswege der Flüssigkeit in einer Scheibenwicklung mit Umlenkscheiben	26
Bild C.1 – Empfohlene Schaltung für Transformatoren mit einem niedrigen Wicklungswiderstand und Anwendung von zwei getrennten Gleichstromquellen, eine für jede Wicklung. Die Widerstände R_1 und R_2 werden zur Beschleunigung des Abklingens von Einschwingvorgängen verwendet	30
Bild C.2 – Empfohlene alternative Schaltung mit nur einer Gleichstromquelle für beide Wicklungen. R ist ein zusätzlicher Widerstand zur Beschleunigung des Abklingens von Einschwingvorgängen	31
Bild C.3 – Veränderung der mittleren Wicklungstemperatur nach dem Abschalten	31
Bild C.4 – Extrapolation der Abkühlkurve mit der Anpassungsfunktion $\Delta\theta_w(t) = A_0 \times (1 - k \times t) + G \times e^{-t/T_w}$	35
Bild E.1 – Anwendung eines LWL-Messfühlers an einer Scheibenwicklung eines Kerntransformators	42
Bild E.2 – Anwendung eines LWL-Messfühlers an einem Drillleiter eines Kerntransformators	42
Bild E.3 – Einzelheiten für die Anwendung eines LWL-Messfühlers in einem Wicklungsabstandhalter eines Kerntransformators	43
Bild E.4 – Anwendung eines LWL-Messfühlers für eine Hochspannungswicklung eines Manteltransformators	43

Tabellen

Tabelle 1 – Zulässige Übertemperaturen	8
Tabelle 2 – Empfohlene Werte für die Korrektur der Übertemperatur für den Fall besonderer Betriebsbedingungen	9
Tabelle 3 – Exponenten für die Korrektur der Ergebnisse der Erwärmungsmessung	19
Tabelle A.1 – Heißpunkt-Wicklungsübertemperaturen an einigen spezifischen Transformatoren aus den Daten der Dauerprüfung mit Erwärmungsmessung, kombiniert mit berechneten Heißpunkt-Wicklungsübertemperaturen und aus direkten LWL-Messungen	22
Tabelle C.1 – Beispiel für das Ergebnis einer Tabellenkalkulation für die Abkühlkurve	34
Tabelle D.1 – Kleinster erfassbarer Wert S_D von Gasen in Öl	37
Tabelle D.2 – Zulässige Grenzwerte für Gasanstiegsraten	38
Tabelle E.1 – Empfohlene Mindestanzahl von Messfühlern für Drehstromtransformatoren	40
Tabelle E.2 – Empfohlene Mindestanzahl von Messfühlern für Einphasentransformatoren	41

1 Anwendungsbereich

Dieser Teil der Internationalen Norm IEC 60076 gilt für flüssigkeitsgefüllte Transformatoren, bezeichnet Leistungstransformatoren nach ihren Kühlungsarten, legt Grenzwerte für Übertemperaturen fest und gibt Verfahren für Erwärmungsmessungen an.

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 60076-1:2000, *Power transformers – Part 1: General*

IEC 60076-7:2005, *Loading guide for oil-immersed power transformers*

IEC 60076-8:1997, *Application guide for power transformers*

IEC 60085:2004, *Thermal evaluation and classification of electrical insulation*

IEC 60296:2003, *Fluids for electrotechnical applications – Unused mineral insulating oils for transformers and switchgear*

IEC 60567:2005, *Oil-filled electrical equipment – Sampling of gases and of oil for the analysis of free and dissolved gases – Guidance*

IEC 60836:2005, *Specifications for unused silicone insulating liquids for electrotechnical purposes*

IEC 61099:1992, *Specifications for unused synthetic organic esters for electrical purposes*

IEC 61181:2007, *Mineral oil-filled electrical equipment – Application of dissolved gas analysis (DGA) to factory tests on electrical equipment*

IEC 6xxxx, *Specifications for natural esters for electrical purposes*

IEC 115:2007, *Application of uncertainty of measurement to conformity assessment activities in the electrotechnical sector*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieser Norm gelten die in IEC 60076-1 angegebenen und die folgenden Begriffe.

3.1

äußeres Kühlmittel

äußeres Medium für das Transformatorkühlsystem (Luft oder Wasser), an das die von den Transformatorverlusten erzeugte Wärme übertragen wird

3.2

inneres Kühlmittel

Flüssigkeit, die mit den Wicklungen und weiteren Transformatorteilen in Kontakt steht, und mit der die aufgrund der Verluste erzeugte Wärme an das äußere Kühlmittel übertragen wird.

Diese Flüssigkeit kann ein Mineralöl oder eine andere natürliche oder synthetische Flüssigkeit sein.

3.3

Übertemperatur

Differenz zwischen der Temperatur des betrachteten Teils (z. B. die mittlere Wicklungstemperatur) und der Temperatur des äußeren Kühlmittels

3.4

Flüssigkeitstemperatur oben

θ_o

Temperatur der Isolierflüssigkeit oben am Kessel, die für die oberste Schicht im Kühlflüssigkeitsstrom repräsentativ ist

3.5

Flüssigkeitsübertemperatur oben

$\Delta\theta_o$

Temperaturunterschied zwischen der Flüssigkeitstemperatur oben und der Temperatur des äußeren Kühlmittels

3.6

Flüssigkeitstemperatur unten

θ_b

Temperatur der Isolierflüssigkeit, die unterhalb der Unterseite der Wicklung oder in der Flüssigkeit gemessen wird, die aus der Flüssigkeitskühlanlage austritt

3.7

Flüssigkeitsübertemperatur unten

$\Delta\theta_b$

Unterschied zwischen der Flüssigkeitstemperatur unten und der Temperatur des äußeren Kühlmittels

3.8

mittlere Flüssigkeitstemperatur

θ_{om}

mittlere Temperatur zwischen der Flüssigkeitstemperatur oben und der Flüssigkeitstemperatur unten

3.9

mittlere Flüssigkeitsübertemperatur

$\Delta\theta_{om}$

Unterschied zwischen der mittleren Flüssigkeitstemperatur und der Temperatur des äußeren Kühlmittels

3.10

mittlere Wicklungstemperatur

θ_w

Temperatur der Wicklung, die am Ende der Erwärmungsmessung aus der Messung des Gleichstromwiderstandes der Wicklung bestimmt worden ist

3.11

mittlere Wicklungsübertemperatur

$\Delta\theta_w$

Unterschied zwischen der mittleren Wicklungstemperatur und der Temperatur des äußeren Kühlmittels

3.12

mittlerer Temperaturgradient der Wicklung

g

Unterschied zwischen der mittleren Wicklungstemperatur und der mittleren Temperatur der Isolierflüssigkeit

3.13

Heißpunkt-Wicklungstemperatur

θ_h

heißeste Temperatur der Leiter der Wicklung, die mit einem festen Isolierstoff und/oder einer Isolierflüssigkeit in Kontakt stehen

3.14

Heißpunkt-Wicklungsübertemperatur

$\Delta\theta_h$

Unterschied zwischen der Heißpunkt-Wicklungstemperatur und der Temperatur des äußeren Kühlmittels

3.15

Heißpunkt-Faktor

H

dimensionsloser Faktor zur Schätzung des Anstiegs des mittleren Temperaturgradienten der Wicklung, der dem lokalen Anstieg zusätzlicher Verluste und Schwankungen in der Flüssigkeitsströmung zuzuschreiben ist

ANMERKUNG Der H -Faktor ist das Produkt aus den beiden folgenden Faktoren Q und S .

3.16

Q -Faktor

dimensionsloser Faktor zur Schätzung des Anstiegs des mittleren Temperaturkoeffizienten aufgrund eines Anstiegs lokaler Verluste

3.17

S -Faktor

dimensionsloser Faktor zur Schätzung des lokalen Anstiegs des mittleren Temperaturgradienten der Wicklung aufgrund der Schwankungen in der Flüssigkeitsströmung

3.18

thermisch verbessertes Papier

Papier auf Zellulosebasis, welches chemisch verändert wurde, um die Geschwindigkeit zu verringern, mit der Papier zerfällt.

Alterungseffekte werden entweder verringert durch partielles Entfernen von wasserbildenden Stoffen oder durch Hemmung der Bildung von Wasser durch Anwendung von Stabilisatoren.

Ein Papier wird als thermisch verbessert angesehen, wenn es die Lebensdauerkriterien erfüllt, und zwar der Erhaltung von 50 % der Zugfestigkeit nach einer Lagerung von 65 000 h in einem verschlossenem Rohr bei 110 °C oder jeder anderen Zeit/Temperatur-Kombination nach Gleichung (1):

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

4 Kühlungsarten

4.1 Kennzeichnungssymbole

Transformatoren sind nach der angewendeten Kühlungsart zu kennzeichnen. Für flüssigkeitsgefüllte Transformatoren erfolgt diese Kennzeichnung, wie nachfolgend beschrieben, mit einem Vier-Buchstaben-Schlüssel.

Erster Buchstabe: Inneres Kühlmittel, das mit den Wicklungen in Berührung steht:

- O Mineralöl oder synthetische Kühlflüssigkeit mit einem Brennpunkt ≤ 300 °C;
- K Isolierflüssigkeit mit einem Brennpunkt > 300 °C;
- L Isolierflüssigkeit mit nichtmessbarem Brennpunkt.

Zweiter Buchstabe: Art des Kreislaufs des inneren Kühlmittels:

- N natürliche Thermosiphon-Strömung durch Kühler und Wicklungen;
- F erzwungener Umlauf durch die Kühler, Thermosiphon-Strömung durch die Wicklungen;
- D erzwungener Umlauf durch die Kühler, vom Kühler mindestens in die Hauptwicklungen gerichtet.

Dritter Buchstabe: Äußeres Kühlmittel:

- A Luft;
- W Wasser.

Vierter Buchstabe: Art des Kreislaufs des äußeren Kühlmittels:

- N natürliche Konvektion;
- F erzwungener Umlauf (Ventilatoren, Pumpen).

ANMERKUNG 1 Aus Sicherheits- und Umweltgründen wird in dieser Norm nur die Anwendung der Isolierflüssigkeiten K und L betrachtet.

ANMERKUNG 2 In einem Transformator mit erzwungenem gerichtetem Kreislauf der Isolierflüssigkeit (zweiter Buchstabe D) wird die Flüssigkeitsmenge, die durch die Hauptwicklungen strömt, durch die Pumpen und grundsätzlich nicht durch die Belastung bestimmt. Ein geringerer Teil der durch den Kühler strömenden Flüssigkeit kann als gesteuerter Nebenzweig so gerichtet werden, dass der Eisenkern und andere, nicht zur Hauptwicklung gehörende Teile, gekühlt werden. Stufenwicklungen und/oder andere Wicklungen mit verhältnismäßig geringer Leistung können auch von nicht-gerichteter Flüssigkeit im Nebenzweig durchströmt werden.

Bei einem Transformator mit erzwungener nichtgerichteter Kühlung (zweiter Buchstabe F) ist die Durchflussmenge der Flüssigkeit durch alle Wicklungen abhängig von der Belastung und steht in keinem direkten Zusammenhang mit der durch den Kühler gepumpten Menge.

4.2 Transformatoren mit anderen Kühlungsarten

Für einen Transformator können andere Kühlungsarten festgelegt sein. Die technische Beschreibung und das Leistungsschild müssen in diesem Fall Angaben enthalten, die über die Leistungswerte Aufschluss geben, bei denen der Transformator die zulässigen Übertemperaturen unter Anwendung der anderen Kühlungsarten einhält, siehe IEC 60076-1.

Der Leistungswert für die andere Kühlungsart mit der höchsten Kühlleistung ist die Bemessungsleistung des Transformators (oder einer einzelnen Wicklung eines Mehrwicklungstransformators, siehe IEC 60076-1). Diese anderen Kühlungsarten werden gewöhnlich mit steigender Kühlleistung angegeben.

Beispiele:

- ONON/ONAF: Der Transformator hat eine Reihe von Ventilatoren, die bei hoher Belastung in Betrieb genommen werden können. Der Umlauf der Isolierflüssigkeit erfolgt in beiden Fällen nur durch den Thermosiphon-Effekt.
- ONAN/OFAP: Der Transformator hat eine Kühleinrichtung mit Ventilatoren und Pumpen, er ist aber auch mit einer verringerten Bemessungsleistung bei natürlicher Kühlung angegeben (z. B. im Fall eines Ausfalls oder einer Verringerung in der Hilfsstromversorgung).

5 Übliche Kühlungsbedingungen

5.1 Luftgekühlte Transformatoren

Die üblichen Grenzwerte der Umgebungstemperatur (–25 °C und +40 °C) für Leistungstransformatoren sind in IEC 60076-1 angegeben.

Hinsichtlich der Übertemperaturanforderungen sollten die Temperaturen an den vorgesehenen Aufstellungs-orten weder überschreiten:

- +40 °C zu jeder Zeit;
- +30 °C Monatsmittelwert des wärmsten Monats;
- +20 °C Jahresmittelwert.

ANMERKUNG Die mittleren Temperaturen sind wie folgt aus den meteorologischen Daten abzuleiten (siehe IEC 60076-1).

Mittlere Monatstemperatur:

- die Hälfte der Summe der Mittelwerte der täglichen Maxima und der Mittelwerte der täglichen Minima während eines bestimmten Monats, ermittelt über viele Jahre;

Mittlere Jahrestemperatur:

- ein Zwölftel der Summe der mittleren Monatstemperaturen.

5.2 Wassergekühlte Transformatoren

Die üblichen Kühlungsbedingungen für wassergekühlte Transformatoren sind eine Temperatur des Kühlwassers am Einlass zu jedem Zeitpunkt nicht über 25 °C oder ein Jahresmittelwert von 20 °C.

Wenn die Betriebswassertemperatur höher als dieser Wert ist, dann sollte eine niedrigere Übertemperatur festgelegt werden (siehe IEC 60076-1).

In Hinsicht auf die Übertemperaturanforderungen sollte die mittlere Jahrestemperatur des Kühlwassers am vorgesehenen Aufstellungsort niemals +20 °C überschreiten.

6 Zulässige Übertemperaturen

6.1 Allgemeines

Zulässige Übertemperaturen für Transformatoren werden aufgrund verschiedener Wahlmöglichkeiten festgelegt:

- Eine Reihe von Anforderungen gilt für Dauerbetrieb mit Bemessungsleistung (siehe 6.2).
- Wenn ausdrücklich festgelegt, tritt eine weitere Gruppe von Anforderungen hinzu, die sich auf ein vorgeschriebenes Belastungsspiel beziehen (siehe 6.4).

ANMERKUNG Diese weitere Gruppe von Anforderungen ist hauptsächlich auf Großtransformatoren anwendbar, bei denen Notbetriebsbedingungen besondere Aufmerksamkeit erfordern, und sollte nicht regelmäßig bei kleinen und mittleren Normtransformatoren angewendet werden.

In diesem Teil von IEC 60076 wird vorausgesetzt, dass die Betriebstemperaturen der verschiedenen Teile eines Transformators jeweils als Summe der Temperatur des äußeren Kühlmittels (Umgebungsluft oder Kühlwasser) und einer Übertemperatur des Transformatorteils beschrieben werden können.

Es gelten die üblichen zulässigen Übertemperaturen, falls nicht die Anfrage und Bestellung „ungewöhnliche Betriebsbedingungen“ nennt. In derartigen Fällen sind die zulässigen Übertemperaturen, wie in 6.3.1 angegeben, näher zu bestimmen.

Eine Überschreitung der zulässigen Übertemperaturen ist nicht erlaubt.

6.2 Zulässige Übertemperaturen bei Bemessungsleistung

Für Transformatoren bis 2 500 kVA und/oder mit einem Anzapfungsbereich nicht über $\pm 5\%$ gelten die zulässigen Übertemperaturen für jede Hauptanzapfung entsprechend der Bemessungsspannung (siehe IEC 60076-1).

Bei Bemessungsleistungen über 2 500 kVA und einem Anzapfungsbereich über $\pm 5\%$ gelten die zulässigen Übertemperaturen für jede Anzapfung bei den entsprechenden Werten von Anzapfungsleistung, Anzapfungsspannung und Anzapfungsstrom.

ANMERKUNG 1 Die Kurzschlussverluste sind auf verschiedenen Anzapfungen unterschiedlich und manchmal auch die Leerlaufverluste, wenn Einstellung der Anzapfungsspannung bei veränderlichem Fluss festgelegt ist.

ANMERKUNG 2 Bei einem Transformator mit getrennten Wicklungen ist die Anzapfung mit den höchsten Kurzschlussverlusten üblicherweise die Anzapfung mit dem höchsten Strom.

ANMERKUNG 3 Bei einem Spartransformator mit Anzapfungen ist die Anzapfung mit den höchsten Kurzschlussverlusten von der Anordnung der Anzapfungen abhängig.

Bei einem Mehrwicklungstransformator beziehen sich die Übertemperaturanforderungen auf die Bemessungsleistung in allen Wicklungen gleichzeitig, wenn die Bemessungsleistung einer Wicklung der Summe der Bemessungsleistungen der anderen Wicklungen entspricht. Ist dies nicht der Fall, sind eine oder mehrere besondere Belastungskombinationen auszuwählen und für die zulässigen Übertemperaturen festzulegen.

In Transformatoren mit konzentrischer Wicklungsanordnung können zwei oder mehrere getrennte Wicklungen axial übereinander angeordnet sein. In diesem Fall gilt für die zulässige Wicklungstemperatur der Mittelwert der Ablesungen für die übereinanderliegenden Wicklungen, falls sie gleiche Größe und Bemessung haben. Ist dies nicht der Fall, ist die Auswertung Gegenstand einer Vereinbarung.

Die in Tabelle 1 angegebenen Übertemperaturen gelten für Transformatoren mit fester Isolierung, bezeichnet als „Klasse 105 °C“ nach IEC 60085, und eingetaucht in Mineralöl oder synthetische Isolierflüssigkeit mit einem Brennpunkt nicht über 300 °C (erster Buchstabe O).

Die Grenzwerte beziehen sich auf den Beharrungszustand bei Dauerbetrieb mit Bemessungsleistung und eine mittlere Jahrestemperatur des äußeren Kühlmittels von 20 °C.

Die in Tabelle 1 angegebenen zulässigen Übertemperaturen gelten für Kraft-Papier und verbessertes Papier, wenn nicht anders zwischen Hersteller und Abnehmer vereinbart.

Die Verwendung von thermisch verbessertem Papier, auch teilweise, sowie andere zulässige Übertemperaturen müssen zwischen Hersteller und Abnehmer zum Zeitpunkt der Bestellung vereinbart werden (siehe IEC 60076-7).

Tabelle 1 – Zulässige Übertemperaturen

Anforderungen für	Zulässige Übertemperatur K
Isolierflüssigkeit oben	60
Mittlere Wicklung (bestimmt durch Widerstandsmessung):	
– mit ON...- und OF...-Kühlung	65
– mit OD...-Kühlung	70
Heißpunkt der Wicklung	78

Für die Übertemperatur des Kerns, blanke elektrische Verbindungen, elektromagnetische Schirmungen und für Bauteile im Kessel sind keine numerischen Grenzwerte festgelegt. Es ist jedoch eine selbstverständliche Forderung, dass derartige Teile keine Temperaturen erreichen dürfen, die Beschädigungen benachbarter Teile oder unzulässige Alterung der Isolierflüssigkeit verursachen. Wenn es als notwendig angesehen wird, dürfen zulässige Übertemperaturen für die Oberfläche des Kerns zwischen Hersteller und Abnehmer vereinbart werden.

ANMERKUNG 4 Bei einigen Konstruktionen lässt die zulässige Heißpunkt-Übertemperatur der Wicklung auf niedrigere Flüssigkeitsübertemperatur oben und/oder mittlere Wicklungsübertemperatur schließen, als die in der Tabelle angegebene.

ANMERKUNG 5 Die Richtlinien zur Bestimmung der Heißpunkt-Wicklungsübertemperatur werden in 7.8 angegeben.

ANMERKUNG 6 Bei großen ölgefüllten Leistungstransformatoren kann eine Analyse des im Öl gelösten Gases (DGA), die während der Erwärmungsmessung durchgeführt wird, ein Werkzeug zur Feststellung unerwünschter Übertemperaturen sein (siehe Anhang D).

ANMERKUNG 7 Bei großen Leistungstransformatoren kann die Übertemperatur des Kessels und von Oberflächen der Verkleidung mit einer Thermovisions-Infrarotkamera überprüft werden.

An Wicklungen mit einem sehr niedrigen Widerstand und zahlreichen verschraubten Verbindungen (z. B. Niederspannungswicklungen von Ofentransformatoren), kann die Bestimmung der mittleren Wicklungsübertemperatur nach dem Verfahren der Widerstandsänderung schwierig und durch große Unsicherheiten beeinflusst sein. Hilfsweise und nach Vereinbarung können die Wicklungs-Übertemperaturanforderungen nur auf die vorgeschriebene Heißpunkt-Wicklungsübertemperatur begrenzt werden.

Zulässige Übertemperaturen von Transformatoren, die ein temperaturbeständigeres Isoliersystem haben und/oder deren Aktivteil in eine schwerer brennbare Isolierflüssigkeit eingetaucht ist (Buchstabe K oder L), sind Gegenstand einer Vereinbarung.

6.3 Geänderte Anforderungen aufgrund besonderer Kühlbedingungen

Wenn die Betriebsbedingungen am vorgesehenen Aufstellungsort nicht innerhalb der Grenzen für die übliche Kühlbedingungen nach Abschnitt 5 liegen, dann sind die zulässigen Übertemperaturen des Transformators nach den nachfolgend angegebenen Regeln zu ändern.

6.3.1 Luftgekühlte Transformatoren

Falls die Umgebungstemperatur am Aufstellungsort einen oder mehr der üblichen Werte nach 5.1 überschreitet, müssen alle in Tabelle 1 angegebenen zulässigen Übertemperaturen um den gleichen Betrag der Überschreitung korrigiert werden. Die erhaltenen Zahlenwerte sind auf ganzzahlige Werte zu runden.

In Tabelle 2 sind die empfohlenen Bezugswerte der Umgebungstemperatur und der betreffenden Korrekturwerte für die zulässigen Übertemperaturen angegeben.

Tabelle 2 – Empfohlene Werte für die Korrektur der Übertemperatur für den Fall besonderer Betriebsbedingungen

Umgebungstemperatur °C			Korrektur der Übertemperatur ^a K
Mittlere Jahrestemperatur	Mittlere Monatstemperatur	Höchstwert	
20	30	40	0
25	35	45	–5
30	40	50	–10
35	45	55	–15
^a Bezogen auf die in Tabelle 1 angegebenen Werte.			

ANMERKUNG 1 Für Umgebungstemperaturen unterhalb der normalen Temperaturen werden keine Regeln angegeben. Die in Tabelle 1 angegebenen zulässigen Übertemperaturen gelten, sofern sie nicht vom Abnehmer anders festgelegt worden sind.

ANMERKUNG 2 Die in Tabelle 2 angegebenen Werte dürfen interpoliert werden.

Falls der Aufstellungsort höher als 1 000 m über NN liegt, nicht aber das Herstellerwerk, sind die zulässigen Übertemperaturen während der Prüfung im Werk wie folgt zu verringern:

- bei einem selbstgeköhltem Transformator (...AN), ist die zulässige mittlere und die Heißpunkt-Wicklungsübertemperatur um 1 K je 400 m zu verringern, um die der Aufstellungsort über 1 000 m liegt;
- bei einem Transformator mit erzwungener Kühlung (...AF) beträgt die Verringerung 1 K für je 250 m über 1 000 m.

Eine entsprechend umgekehrte Korrektur kann vorgenommen werden, wenn das Herstellerwerk über 1 000 m liegt und die Aufstellung unter 1 000 m erfolgt.

Jede Höhenkorrektur ist auf ganze Gradwerte zu runden.

Wenn die festgelegten zulässigen Übertemperaturen eines Transformators verringert worden sind, entweder wegen hoher Kühlmitteltemperatur oder wegen der Höhe des Aufstellungsortes, dann ist dies auf dem Leistungsschild anzugeben (siehe IEC 60076-1).

ANMERKUNG 3 Wenn genormte Transformatoren in großen Höhen anzuwenden sind, kann ein verringerter Leistungswert errechnet werden, der hinsichtlich Kühlung und Übertemperatur dem Betrieb mit Bemessungsleistung unter üblichen Umgebungsbedingungen entspricht.

6.3.2 Wassergekühlte Transformatoren

Falls die Kühlwassertemperatur am Aufstellungsort die in 5.2 angegebenen Werte überschreitet müssen alle vorgeschriebenen zulässigen Übertemperaturen um den gleichen Betrag der Überschreitung verringert werden. Die Zahlenwerte sind auf ganze Gradwerte zu runden.

ANMERKUNG Die vorstehend angegebene Regel gilt nicht für Wassertemperaturen, die niedriger als die üblichen sind. In diesem Fall ist eine Übereinkunft zwischen Hersteller und Abnehmer erforderlich.

Der Einfluss abweichender Umgebungstemperatur oder Aufstellungshöhe auf die Luftkühlung des Kessels wird außer acht gelassen.

6.4 Übertemperatur während eines festgelegten Belastungsspiels

Nach Vereinbarung zwischen Hersteller und Abnehmer dürfen die zulässigen Übertemperaturen zugesichert und/oder eine Sonderprüfung hinsichtlich des Betriebs mit Belastungsspiel festgelegt werden. Für ölgefüllte Transformatoren sollte auf IEC 60076-7 Bezug genommen werden.

7 Erwärmungsmessungen

7.1 Allgemeines

In den folgenden Abschnitten werden die Verfahren zur Bestimmung der Temperatur- und Übertemperaturwerte während der Werksprüfung sowie die Verfahren beschrieben, um Betriebsbelastungen durch gleichwertige Prüfabläufe nachzubilden.

Während der Erwärmungsmessungen muss der Transformator mit seinen Schutzausrüstungen ausgerüstet sein (z. B. Buchholz-Relais). Jede Anzeige dieser Einrichtungen während der Prüfung ist aufzuzeichnen und der Fall ist zu untersuchen.

Bei Transformatoren mit mehreren Werten der Bemessungsleistung (z. B. wenn zwei oder mehr Kühlsysteme vorgesehen sind) muss eine Erwärmungsmessung grundsätzlich für jede Bemessungsleistung durchgeführt werden, jedoch darf die Anzahl der Prüfungen nach Vereinbarung zwischen Hersteller und Abnehmer verringert werden.

7.1.1 Umgebungstemperatur

Die Kühllufttemperatur sollte bei der Erwärmungsmessung im Bereich zwischen 10 °C und der höchsten Umgebungstemperatur liegen, für die der Transformator ausgelegt ist.

Wenn die Temperatur des äußeren Kühlmittels während der Prüfung außerhalb der vorstehend angegebenen Grenzwerte liegt, dann sind die Prüfergebnisse entsprechend einer Vereinbarung zu interpretieren.

Für die Bewertung der Prüfergebnisse müssen mindestens vier Messfühler vorgesehen und der Mittelwert ihrer Ablesewerte zur Bestimmung der Umgebungstemperatur verwendet werden.

ANMERKUNG 1 Bei Prüfungen an großen Leistungstransformatoren sollte die Anzahl der Messfühler bis auf sechs erhöht werden, um die Unsicherheit hinsichtlich der Beeinflussung des Mittelwertes der Ablesewerte zu verringern.

Die Ablesungen sollten in regelmäßigen Abständen erfolgen oder es kann eine durchgehend automatische Aufzeichnung angewendet werden.

Bei einem selbstgekühlten Transformator sind die Messfühler etwa in halber Höhe der Kühlflächen anzuordnen. Die Messfühler sind um den Kessel herum, etwa in 2 m Abstand vom Kessel und den Kühlflächen entfernt anzuordnen und vor direkter Wärmestrahlung zu schützen.

Bei einem luftgekühlten Transformator müssen die Messfühler in der Luft etwa 0,5 m vor der Eintrittsöffnung der Kühler angeordnet werden.

Im Fall einer gesonderten Kühleinrichtung, die sich in einem Abstand von 3 m vom Transformator-kessel befindet, muss die Umgebungstemperatur um das Kühlsystem unter Anwendung der vorstehend angegebenen Regeln gemessen werden.

Vorsicht ist geboten wegen möglicher Rückströmung heißer Luft. Der Transformator sollte so aufgestellt werden, dass Störungen der Luftströmung möglichst vermieden und gleich bleibende Umgebungsbedingungen eingehalten werden.

Vorkehrungen sollten getroffen werden, um Veränderungen der Kühllufttemperatur besonders während des letzten Abschnitts der Prüfdauer möglichst gering zu halten, wenn die Annäherung an die Beharrungszustände erfolgt. Schnelle Veränderungen der Ablesewerte aufgrund von Turbulenzen sollten durch geeignete Maßnahmen verhindert werden, z. B. Wärmeableitvorrichtungen mit geeigneter Zeitkonstante für die Temperaturmessfühler.

7.1.2 Wassertemperatur

Die Kühlwassertemperatur sollte für die Erwärmungsmessung im Bereich zwischen 5 °C und der höchsten Wassertemperatur liegen, für die der Transformator ausgelegt ist.

Wenn die Wassertemperatur außerhalb der vorstehend angegebenen Grenzwerte liegt, dann sind die Prüfergebnisse entsprechend einer Vereinbarung zu interpretieren.

Die Temperatur muss am Einlass des Kühlers gemessen werden. Ablesungen der Temperatur oder der Kühlwassermenge sollten in regelmäßigen Abständen erfolgen, oder es kann laufend automatisch aufgezeichnet werden.

Vorsorge sollte getroffen werden, um Veränderungen der Kühlwassermenge und -temperatur während der Prüfdauer möglichst gering zu halten.

7.2 Prüfverfahren zur Bestimmung der Übertemperatur

7.2.1 Allgemeines

Das Standardverfahren zur Bestimmung der stationären Übertemperaturen im Prüffeld ist die gleichwertige Prüfung im Kurzschluss nach 7.2.2.

In Sonderfällen kann vereinbart werden, die Prüfung etwa mit Bemessungsspannung und Bemessungsstrom durch Anschluss einer geeigneten Last durchzuführen. Dies ist hauptsächlich bei Transformatoren mit kleiner Bemessungsleistung anwendbar.

Ein „Rückarbeitsverfahren“ kann ebenfalls vereinbart werden. Bei diesem Verfahren werden zwei Transformatoren, wobei einer der beiden der Prüfling ist, parallel geschaltet und mit der Bemessungsspannung des geprüften Transformators erregt. Durch unterschiedliche Übersetzungen oder eine Zusatzspannung wird erreicht, dass in dem zu prüfenden Transformator dessen Bemessungsstrom fließt.

7.2.2 Prüfung von Transformatoren mit zwei Wicklungen nach dem Kurzschlussverfahren

Während dieser Prüfung wird der Transformator nicht gleichzeitig mit Bemessungsspannung und Bemessungsstrom beansprucht, sondern mit den berechneten Gesamtverlusten, die zuvor mit zwei getrennten Verlustermittlungen, nämlich der Kurzschlussverluste bei Bezugstemperatur und der Leerlaufverluste bestimmt wurden (siehe IEC 60076-1).

Der Zweck dieser Prüfung ist die Bestimmung:

- der Flüssigkeitsübertemperatur oben und der mittleren Flüssigkeitsübertemperatur unter stationären Bedingungen bei Abgabe der Gesamtverluste;
- der mittleren Wicklungsübertemperatur bei Bemessungsstrom bei der mittleren Flüssigkeitsübertemperatur, die wie vorstehend bestimmt worden ist;
- der Heißpunkt-Wicklungsübertemperatur bei Bemessungsstrom und für die Flüssigkeitsübertemperatur oben wie vorstehend aufgeführt.

Dies wird in zwei Stufen erreicht:

a) Einspeisung der Gesamtverluste

Zuerst wird die Flüssigkeitsübertemperatur oben und die mittlere Flüssigkeitsübertemperatur festgestellt; hierzu wird der Transformator mit einem Prüfstrom derart beansprucht, dass die gemessene Wirkleistung gleich den Gesamtverlusten des Transformators ist (siehe IEC 60076-1). Der Prüfstrom wird über dem Bemessungsstrom in einer Höhe liegen, die notwendig ist, um zusätzliche Verluste zu erzeugen, die gleich den Leerlaufverlusten bei Bemessungsspannung sind, wodurch sich die Wicklungsübertemperatur entsprechend erhöht wird.

Die Flüssigkeitsübertemperatur oben und die Kühlmitteltemperatur werden überwacht und die Prüfung wird so lange fortgesetzt, bis ein Beharrungszustand der Flüssigkeitsübertemperatur erreicht ist.

Der erste Teil der Prüfung darf beendet werden, wenn die Änderungsgeschwindigkeit der Flüssigkeitsübertemperatur oben unter 1 K/h liegt und für 3 h bei diesem Wert geblieben ist. Falls Einzelablesungen in regelmäßigen Abständen erfolgen, wird der Mittelwert der Ablesungen während der letzten Stunde als Ergebnis der Prüfung genommen. Liegt eine ununterbrochene automatische Aufzeichnung vor, wird der Mittelwert während der letzten Stunde genommen.

b) Einspeisung der Gesamtverluste

Wenn die Flüssigkeitsübertemperatur oben nachgewiesen ist, ist der Versuch sofort mit einem Prüfstrom weiterzuführen, der auf den Bemessungsstrom der angeschlossenen Wicklungskombination verringert ist. Dieser Zustand wird für 1 h beibehalten. Während dieser Dauer sollten mindestens alle 5 min kontinuierliche Temperaturaufzeichnungen der Flüssigkeit oben, des Wicklungs-Heißpunktes (falls gemessen) und des äußeren Kühlmittels vorgenommen werden.

Am Ende der Stunde werden die Widerstände der zwei Wicklungen gemessen, entweder nach schneller Abschaltung der Versorgungsspannung und des Kurzschlusses (siehe 7.5.1 und Anhang C) oder ohne

Abschalten der Versorgungsspannung durch das Überlagerungsverfahren, das darin besteht, in die Wicklung einen Gleichstrom geringer Höhe als Messstrom einzuspeisen und dem Belastungsstrom zu überlagern.

Die Werte der mittleren Temperatur der zwei Wicklungen werden aus den Widerstandsänderungen bestimmt, wobei zusätzlich zu berücksichtigen ist, dass die Flüssigkeitstemperatur sinkt, wenn der Strom auf den Bemessungswert verringert wird.

Wenn die direkte Messung der Heißpunkt-Wicklungstemperatur vorgesehen ist, wird die entsprechende Übertemperatur durch den höchsten Ablesewert vor der Trennung und Anwendung der in 7.8 angegebenen Korrektur erhalten, weil die Flüssigkeitstemperatur absinkt, wenn der Strom auf den Bemessungsstrom verringert wird.

Die zweistufige Prüfung kann nach Vereinbarung in einer einzigen Prüfung erfolgen, wobei die eingespeiste Leistung zwischen den Kurzschlussverlusten und den Gesamtverlusten liegt. Bei flüssigkeitsgefüllten Transformatoren sind die Zahlenwerte der Flüssigkeitsübertemperatur oben, die mittlere Flüssigkeitsübertemperatur sowie die Übertemperaturen der Wicklungen unter Anwendung der Korrekturregeln nach 7.11 zu bestimmen. Die während der Prüfung eingespeiste Leistung muss jedoch mindestens 80 % der Gesamtverluste betragen.

7.2.3 Abänderung des Prüfverfahrens für besondere Transformatoren

Zweiwicklungstransformator mit einem Anzapfungsbereich über $\pm 5\%$

Wenn nicht anders festgelegt, ist die Erwärmungsmessung mit dem Transformator auf der Anzapfung mit größtem Strom (siehe IEC 60076-1) durchzuführen, und der Anzapfungsstrom für diese Anzapfung wird während der weiteren Prüfung verwendet (siehe 7.2.2 b)).

Die Gesamtverluste, die während des ersten Teils der Prüfung (siehe 7.2.2 a)) einzuspeisen sind, müssen gleich dem höchsten Wert der Gesamtverluste sein, die auf irgendeiner Anzapfung auftreten (entsprechend ihren Anzapfungswerten). Diese Anzapfung ist auch oft, aber nicht immer, die Anzapfung mit dem größten Strom. Mit diesem Teil der Prüfung wird die höchste Temperatur der Flüssigkeit oben bestimmt. Für die Bestimmung der Wicklungsübertemperatur auf der Anzapfung mit größtem Strom muss der Wert der Flüssigkeitsübertemperatur, der bei der Auswertung zu verwenden ist, den Gesamtverlusten dieser Anzapfung entsprechen. Der Wert aus dem ersten Teil der Prüfung wird umgerechnet, falls er mit anderen Daten erreicht wurde.

Mehrwicklungstransformator

Für den ersten Teil der Prüfung sind Gesamtverluste einzuspeisen, die der Bemessungsleistung (oder Anzapfungsleistung) aller Wicklungen entsprechen, wenn die Bemessungsleistung einer Wicklung gleich der Summe der Bemessungsleistungen der anderen Wicklungen ist.

Trifft dies nicht zu, gibt es bestimmte Belastungsfälle mit verschiedenen Kombinationen der einzelnen Wicklungsbelastungen. Der Fall mit den höchsten Gesamtverlusten ist bestimmend für die Prüfleistung zur Ermittlung der Flüssigkeitsübertemperatur.

Der Wert der Übertemperatur einer einzelnen Wicklung über Flüssigkeit ist mit dem Bemessungsstrom in der Wicklung zu erreichen.

Bei der Ermittlung der Wicklungsübertemperatur über der Umgebungstemperatur wird die Flüssigkeitsübertemperatur für den betreffenden Belastungsfall aus der Prüfung mit den eingespeisten Gesamtverlusten nach 7.11 umgerechnet und ebenso die Wicklungsübertemperatur über Flüssigkeit für jede Wicklung, falls anwendbar.

Ein Leitfaden für die Umrechnung der Verluste von Mehrwicklungstransformatoren ist in IEC 60076-8 angegeben.

Die Einspeisung der Gesamtverluste zur Bestimmung der Flüssigkeitsübertemperatur erfolgt:

- entweder in einer dem tatsächlichen Belastungsfall möglichst nahe kommenden Weise, wobei der den Gesamtverlusten entsprechende Strom in eine Wicklung eingespeist wird, während die anderen Wicklungen gleichzeitig kurzgeschlossen oder an eine Impedanz angeschlossen sind;
- oder durch ein Näherungsverfahren, bei dem bestimmte Wicklungen nicht kurzgeschlossen oder angeschlossen werden; z. B. wenn eine der Wicklungen eine relativ geringe Bemessungsleistung hat und einen geringen Beitrag zu den Gesamtverlusten des Transformators leistet, kann es zulässig sein, diese Wicklung offen zu lassen und den Strom in den anderen beteiligten Wicklungen zu erhöhen, bis der richtige Wert der Gesamtverluste erreicht ist.

Falls wegen begrenzter Prüffeldmöglichkeiten keines der obigen Verfahren in vollem Umfang angewendet werden kann, darf vereinbart werden, die Prüfung mit bis auf 80 % der zutreffenden Werte herabgesetzten Verlusten durchzuführen. Die gemessenen Temperaturwerte sind dann entsprechend 7.11 zu korrigieren.

Die Einzelheiten der Erwärmungsmessung eines Mehrwicklungstransformators sollten in der Regel bereits im Angebotsstadium vorgelegt und vereinbart werden.

Bei Mehrwicklungstransformatoren mit Wicklungen, die keine äußeren Anschlüsse haben, sollte das Erwärmungsprüfverfahren zum Angebotsstadium vereinbart werden. Die Anwendung zusätzlicher Prüfdurchführungen kann zweckmäßig sein.

7.3 Bestimmung der Flüssigkeitstemperaturen

7.3.1 Flüssigkeitstemperatur oben

Die Flüssigkeitstemperatur oben (θ_o) wird üblicherweise mit einem oder mehr Messfühlern bestimmt, die im obersten Bereich des Kessels oder in Taschen im Deckel in die Isolierflüssigkeit eingetaucht sind.

Die empfohlene Anzahl der Taschen ist:

Bemessungsleistung ≥ 100 MVA:	3 Taschen;
Bemessungsleistung von 20 MVA bis < 100 MVA:	2 Taschen;
Bemessungsleistung < 20 MVA:	1 Tasche.

Bei der Verwendung mehrerer Taschen müssen die Ablesewerte der Messfühler gemittelt werden, um einen repräsentativen Temperaturwert zu erhalten.

ANMERKUNG 1 Die Temperatur der Flüssigkeit kann an verschiedenen Stellen im obersten Bereich des Kessels, abhängig von der Bauform, unterschiedlich sein. Messungen bei Benutzung von Taschen im Deckel können durch Wirbelstromerwärmung des Deckels verfälscht werden.

ANMERKUNG 2 Bei Transformatoren mit erzwungenem Flüssigkeitsumlauf durch die Kühleinrichtung liegt eine Mischung der durch die Wicklungen strömenden Flüssigkeit mit der Bypassflüssigkeit im Kessel vor, die an verschiedenen Stellen des Kessels oder in verschiedenen Sammelrohren des Kühlkreislaufts ungleich sein kann. Bezüglich der Bedeutung der Flüssigkeitstemperatur oben in Transformatoren mit erzwungenem Flüssigkeitsumlauf siehe Anhang A.

7.3.2 Flüssigkeitstemperatur unten und mittlere Flüssigkeitstemperatur

Flüssigkeit in der untersten Schicht ist die Benennung, die eigentlich die Temperatur der Flüssigkeit bedeutet, die am Kesselboden in die Wicklungen eintritt. Aus praktischen Gründen wird sie gleichgesetzt mit der Temperatur der Flüssigkeit, die vom Kühler in den Kessel zurückströmt.

Die Flüssigkeitsübertemperatur unten (θ_b) ist mit Messfühlern zu bestimmen, die in den Rückleitungen in den Kühlern oder Radiatoren angeordnet sind. Sind mehrere Batterien von Kühlern vorhanden, sollte mehr als ein Messfühler verwendet werden und der Mittelwert der Ablesewerte wird als Flüssigkeitstemperatur unten angesehen.

ANMERKUNG 1 Die Flüssigkeitsströmung in Rückleitungsrohren kann turbulent sein, falls durch Pumpen erzwungen, oder vorwiegend laminar, falls natürlicher Umlauf durch die Radiatoren vorliegt. Dies ist für eine repräsentative Bestimmung der Flüssigkeitstemperatur im Sammelrohr von Bedeutung.

Die mittlere Flüssigkeitstemperatur ist im Prinzip die mittlere Temperatur der Kühlflüssigkeit in den Wicklungen.

Die mittlere Flüssigkeitstemperatur (θ_{om}) kommt bei der Berechnung des mittleren Temperaturgradienten der Wicklung und bei der Korrektur bestimmter Ergebnisse der Erwärmungsmessung (siehe 7.11) zur Anwendung.

Die mittlere Flüssigkeitstemperatur wird berechnet mit:

$$\theta_m = \frac{\theta_o + \theta_b}{2}$$

ANMERKUNG 2 Die Gültigkeit der angegebenen Beziehung für unterschiedliche Kühlsysteme wird auch in Anhang A diskutiert.

ANMERKUNG 3 Bei ONAN-gekühlten Transformatoren bis 2 500 kVA mit Glattblech- oder Wellblechkesseln oder einzeln direkt am Kessel befestigten Kühlrohren kann die mittlere Flüssigkeitsübertemperatur über der Umgebungsluft mit 80 % der Flüssigkeitsübertemperatur oben angenommen werden.

7.4 Bestimmung der Flüssigkeitsübertemperaturen oben und unten sowie der mittleren Flüssigkeitsübertemperatur

Die Flüssigkeitsübertemperatur oben ($\Delta\theta_o$) wird bestimmt aus der Differenz zwischen der Flüssigkeitstemperatur oben (θ_o), gemessen am Ende der Prüfdauer mit Gesamtverlusten, und der Temperatur des äußeren Kühlmittels (θ_a), gemessen am Ende der Prüfdauer mit Gesamtverlusten, d. h.:

$$\Delta\theta_o = \theta_o - \theta_a$$

Die mittlere Flüssigkeitsübertemperatur ($\Delta\theta_{om}$) wird bestimmt aus der Differenz zwischen der mittleren Flüssigkeitstemperatur (θ_{om}), berechnet nach 7.3.2, und der Temperatur des äußeren Kühlmittels (θ_a), d. h.:

$$\Delta\theta_{om} = \theta_{om} - \theta_a$$

Die Flüssigkeitsübertemperatur unten ($\Delta\theta_b$) wird bestimmt aus der Differenz zwischen der Flüssigkeitstemperatur unten (θ_b), definiert nach 7.3.2, und der Temperatur des äußeren Kühlmittels (θ_a), d. h.:

$$\Delta\theta_b = \theta_b - \theta_a$$

7.5 Bestimmung der mittleren Wicklungstemperatur

Die mittlere Wicklungstemperatur wird mit Hilfe der Messung des Wicklungswiderstandes bestimmt.

Bei Drehstromtransformatoren sollte die Messung üblicherweise die mittlere Phase der Wicklungen einschließen.

Bei Niederspannungs- und Hochstromwicklungen in Sternschaltung sollte die Messung zwischen den Leitungsanschlüssen durchgeführt werden, damit die Neutraleiterverbindung aus dem Prüfkreis ausgeschlossen wird.

Für alle Wicklungswiderstände wird eine Bezugsmessung (R_1 , θ_1) bei Umgebungstemperatur des Transformators in einem stationären Zustand (siehe IEC 60076-1, 10.2.3) durchgeführt.

Die Messung des Widerstandes R_2 nach dem Abschalten der Stromversorgung führt zum Temperaturwert:

$$\theta_2 = \frac{R_2}{R_1} \times (235 + \theta_1) - 235 \quad \text{für Kupfer}$$

$$\theta_2 = \frac{R_2}{R_1} \times (225 + \theta_1) - 225 \quad \text{für Aluminium}$$

In den Gleichungen werden die Temperaturen in °C angegeben.

ANMERKUNG Bei der Widerstandsmessung nach dem Abschalten von Niederspannungswicklungen sehr großer Leistungstransformatoren sollte das mögliche Entstehen einer Thermopaar-EMK zwischen den metallischen Kontakten beachtet werden.

7.5.1 Bestimmung des Wicklungswiderstandes zum Zeitpunkt des Abschaltens

Der Wicklungswiderstand (R_2) vor dem Abschalten ist nach den Regeln zu bestimmen, die nachfolgend angegeben werden.

Unmittelbar nach dem Abschalten der Prüfstromversorgung und dem Entfernen der Kurzschlussverbindung wird ein Gleichstrommesskreis an die Wicklungsanschlüsse angeschlossen, deren Widerstand zu messen ist.

Da sich der Wicklungswiderstand bei abkühlender Wicklung mit der Zeit verändert, muss die Messung über eine ausreichende Dauer vorgenommen werden, um eine Extrapolation auf den Zeitpunkt des Abschaltens zu ermöglichen.

Weil die Wicklungen eine sehr große elektrische Zeitkonstante (L/R) haben, sind genaue Ablesungen daher nur mit einer gewissen Verzögerung zu erhalten.

Die Verzögerung kann durch Begrenzung der Dauer zwischen dem Abschalten und dem Einschalten des Widerstand-Leistungsschalters sowie durch Verringerung der elektrischen Zeitkonstanten durch entsprechende Auswahl der Parameter des Stromkreises verringert werden.

Während der Dauer, in der die Widerstandsmessungen durchgeführt werden, sollten die Kühlbedingungen möglichst ungestört sein. Wenn während der Erwärmungsmessung Pumpen arbeiten, dann sollten sie auch während der Messungen in Betrieb sein.

Empfehlungen für die detaillierte Durchführung der Messung und alternative Verfahren, die in bestimmten Fällen mit Vorteil angewendet werden können, sind in Anhang C angegeben.

7.6 Bestimmung der mittleren Wicklungsübertemperatur zum Zeitpunkt des Abschaltens

Die mittlere Wicklungsübertemperatur muss unter Verwendung des nach 7.5 erhaltenen Widerstandswertes zum Zeitpunkt des Abschaltens bestimmt werden.

Die gemessenen Werte der mittleren Wicklungstemperatur müssen um den gleichen Betrag angehoben werden, wie die mittlere Flüssigkeitsübertemperatur vom korrekten Wert, der nach 7.3.2 erhalten wird, bis auf den Wert am Ende der Dauer von 1 h bei Bemessungsstrom abgesunken ist.

Die korrigierte mittlere Wicklungsübertemperatur der Wicklung ($\Delta\theta_w$) beträgt somit:

$$\Delta\theta_w = \theta_2 + \Delta\theta_{of} - \theta_a$$

Dabei ist θ_a die Umgebungstemperatur am Ende der Prüfdauer mit Gesamtverlusten und $\Delta\theta_{of}$ ist das Absinken der mittleren Flüssigkeitstemperatur während der 1-h-Prüfung bei Bemessungsstrom.

Empfehlungen für die detaillierte Durchführung der Messung werden in Anhang C gegeben.

ANMERKUNG Für Mehrwicklungstransformatoren sind die Prüfverfahren zwischen Hersteller und Abnehmer zu vereinbaren.

7.7 Bestimmung des Gradienten der mittleren Wicklungstemperatur zur mittleren Flüssigkeitstemperatur

Der Gradient der mittleren Wicklungstemperatur zur mittleren Flüssigkeitstemperatur (g) ist zu bestimmen als die Differenz aus mittlerer Wicklungstemperatur (θ_2) zur mittleren Flüssigkeitstemperatur (θ_{om}) beim Abschalten:

$$g = \theta_2 - \theta_{om}$$

7.8 Bestimmung der Heißpunkt-Wicklungsübertemperatur

Für Transformatoren mit einer Bemessungsleistung 20/3 MVA/Phase und darüber muss die Bestimmung der Heißpunkt-Wicklungsübertemperatur stets durch Berechnung beruhend auf dem Ergebnis einer Erwärmungsmessung bestimmt werden, deren Verfahren zwischen Hersteller und Abnehmer zu vereinbaren ist.

Alternativ darf die Heißpunkt-Wicklungsübertemperatur durch direkte Messung als eine Sonderprüfung und nach Vereinbarung zwischen Hersteller und Abnehmer durchgeführt werden.

Für Transformatoren mit einer Bemessungsleistung je Phase unter 20/3 MVA/Phase sind weder direkte Messungen noch Berechnungen erforderlich, da in dieser Hinsicht die mittlere Wicklungsübertemperatur ausreichend betrachtet worden ist, um auch die Anforderungen an die Heißpunkt-Wicklungsübertemperatur zu erfüllen.

Für strategische Werte oder bei spezifischen Betriebsbedingungen (z. B. Kernkraftwerk), für die strengere Anforderungen anzuwenden sind, kann die Heißpunkt-Wicklungsübertemperatur sowohl durch Berechnung als auch direkte Messung bestimmt und die erhaltenen Ergebnisse verglichen werden.

Für Spartransformatoren bezieht sich der vorstehend angegebene Grenzwert auf die Bemessungsleistung und die Kurzschlussimpedanz des entsprechenden Transformators.

7.8.1 Bestimmung durch Berechnung

Der Hersteller muss dem Abnehmer die Ergebnisse einer Untersuchung hinsichtlich der Lage des Heißpunktes und der Schätzung seiner Übertemperatur vorlegen. Die Untersuchung sollte beruhen auf:

- den Ergebnissen der Erwärmungsmessung, bei denen die Messung der Heißpunkt-Wicklungstemperaturen nicht direkt durchgeführt worden ist;
- der Kenntnis des Streuflussfeldes zur Bestimmung der zusätzlichen Verlustverteilung;
- dem Umlaufmodell der Isolierflüssigkeit innerhalb der Wicklungen in den Bereichen, in denen der zusätzliche Verlust höher ist.

ANMERKUNG Grundsätzlich könnte die Schätzung der Heißpunkt-Wicklungsübertemperaturen von den Konstruktionsdaten ausgehen, jedoch ist die Aufmerksamkeit auf die Unsicherheiten zu richten, die diesem Verfahren innewohnen.

Für Transformatoren mit einer Bemessungsleistung zwischen 20/3 MVA und 100/3 MVA je Phase und einer Kurzschlussimpedanz $\leq 14\%$ dürfen zwischen Hersteller und Abnehmer vereinfachte Verfahren für die Berechnung der Heißpunkt-Wicklungsübertemperatur vereinbart werden (siehe auch Anhang B).

7.8.2 Direkte Messung während der Erwärmungsmessung

Im Inneren der Wicklungen sind eine Anzahl von Temperaturmessfühlern (z. B. LWL-Messfühler) an den Stellen zu befestigen, von denen angenommen wird, dass dort die Heißpunkte liegen.

ANMERKUNG 1 Die Heißpunkte befinden sich im Allgemeinen am oberen Teil der Wicklungen, ihre korrekte Lagebestimmung mit einer Konstruktionsprüfung wird jedoch empfohlen.

ANMERKUNG 2 Die Anwendung von LWL-Messfühlern wird empfohlen. Zu Einbauverfahren siehe Anhang E.

Wenn mehr als ein Messfühler an ein und derselben Wicklung angewendet werden, dann muss der höchste Ablesewert als die Heißpunkt-Wicklungstemperatur betrachtet werden.

Die Heißpunkt-Wicklungsübertemperatur ($\Delta\theta_h$) wird berechnet mit:

$$\Delta\theta_h = \theta_h + \Delta\theta_{of} - \theta_a$$

Dabei ist θ_h der Temperaturablesewert beim Abschalten, $\Delta\theta_{of}$ das Absinken der Flüssigkeitstemperatur oben während der 1-h-Prüfung bei Bemessungsstrom und θ_a ist die Umgebungstemperatur am Ende der Prüfdauer mit Gesamtverlust.

ANMERKUNG 3 Die vorstehend angegebenen Verfahren können auch für die Bestimmung der Heißpunkt-Übertemperatur bei einem sehr niedrigen Wicklungswiderstand angewendet werden, wenn die mittlere Wicklungsübertemperatur durch Widerstandsveränderung durch große Unsicherheiten beeinflusst ist (siehe 6.2).

7.9 Unsicherheiten, die die Ergebnisse der Erwärmungsmessung beeinflussen

Die Ergebnisse der Erwärmungsmessung sind durch Unsicherheiten beeinflusst, die dem Prüfverfahren und den eingesetzten Messgeräten zuzuschreiben sind. Im Prüfbericht sollten Schätzungen der Unsicherheiten angegeben werden, die einen Einfluss auf die Übertemperaturen haben.

ANMERKUNG Die Schätzungen der Unsicherheiten dürfen nicht für die Herleitung verwendet werden, wenn die vorgeschriebenen Grenzwerte berücksichtigt werden oder nicht, sondern nur zur Information.

Allgemeine Kriterien für die Bewertung der Unsicherheiten werden im IEC-Guide 115 und in den Literaturhinweisen angegeben. Als eine allgemeine Empfehlung sollten die erweiterten Unsicherheiten auf ein Vertrauensniveau von 95 % bezogen werden. [2]

7.10 Gas-in-Öl-Analyse

Bei großen ölgefüllten Transformatoren, in denen zusätzlich Strömungseffekte potentielle Risikofaktoren sind, gestattet die chromatographische Analyse des im Öl gelösten Gases die Feststellung von möglicher lokaler Überhitzung.

Die Analyse sollte, wenn dies zwischen Hersteller und Abnehmer vereinbart worden ist, als eine Sonderprüfung vor und nach der Erwärmungsmessung durchgeführt werden.

Einzelheiten zum Prüfverfahren und den Annahmekriterien zur Bewertung der Analyseergebnisse werden in Anhang D gegeben.

7.11 Korrekturen

Wenn die festgelegten Werte von Leistung oder Strom während der Erwärmungsmessung nicht erreicht wurden, sind die Ergebnisse nach den folgenden Beziehungen umzurechnen, die innerhalb eines Bereichs von $\pm 20\%$ des Sollwerts der Leistung und $\pm 10\%$ des Sollwerts des Stromes gültig sind.

Nach Vereinbarung dürfen sie auch über einen größeren Bereich angewendet werden, jedoch nicht niedriger als –30 % vom Sollwert der Leistung und –15 % vom Sollwert des Stromes.

Die Übertemperaturen über der Temperatur des äußeren Kühlmittels beim Abschalten muss multipliziert werden mit:

$$\left(\frac{\text{Gesamtverluste}}{\text{Verluste bei der Prüfung}} \right)^x$$

Beim Abschalten muss die mittlere Wicklungsübertemperatur über der Flüssigkeitstemperatur oben multipliziert werden mit:

$$\left(\frac{\text{Bemessungsstrom}}{\text{Strom bei der Prüfung}} \right)^y$$

Beim Abschalten muss die Heißpunkt-Wicklungsübertemperatur über der Flüssigkeitstemperatur oben multipliziert werden mit:

$$\left(\frac{\text{Bemessungsstrom}}{\text{Strom bei der Prüfung}} \right)^z$$

Die für den jeweiligen Transformatortyps und die jeweilige Kühlungsart anzuwendenden Exponenten sind in Tabelle 3 angegeben.

Die Korrekturen, die mit den in der Tabelle angegebenen Exponenten vorgenommen werden, sind eher vorsichtig und sind nur zur Angabe der Übertemperatur während einer Prüfung im stationären Zustand innerhalb der vorstehend angegebenen Grenzen vorgesehen.

Tabelle 3 – Exponenten für die Korrektur der Ergebnisse der Erwärmungsmessung

	Verteilungs- transformatoren	Mittlere und große Leistungstransformatoren			
	ONAN	ONAN	ONAF	OF...	OD...
Exponent für die Flüssigkeit oben x	0,8	0,9	0,9	1,0	1,0
Mittlerer Wicklungsexponent y	1,6	1,6	1,6	1,6	2,0
Exponent für den Wicklungsgradienten z	—	1,6	1,6	1,6	2,0
ANMERKUNG Für die Anwendung dieser Tabelle haben Verteilungstransformatoren eine Bemessungsleistung $\leq 2\,500\text{ kVA}$.					

Literaturhinweise

- [1] IEEE Standard C57.91:1995; *IEEE Guide for loading mineral-oil-immersed transformers*
- [2] CENELEC Technical Report CLC/TR 50462:2008; *Regeln zur Bestimmung von Messunsicherheiten bei der Messung von Verlusten von Leistungstransformatoren und Drosselspulen*

Anhang A (informativ)

Bestimmung der Heißpunkt-Wicklungsübertemperatur an OFAF- und OFWF-gekühlten Transformatoren beruhend auf der Flüssigkeitstemperatur oben im Kessel

Die Heißpunkt-Wicklungsübertemperatur über der Temperatur der Umgebungsluft oder des Kühlwassers beruhte traditionsgemäß auf der Flüssigkeitsübertemperatur oben im Kessel nach folgender Beziehung:

$$\Delta\theta_h = \Delta\theta_o + H \times g \quad (\text{A.1})$$

dabei ist $\Delta\theta_o$ die Flüssigkeitsübertemperatur oben im Kessel, H ist der Heißpunkt-Faktor und g ist der Gradient der mittleren Wicklungstemperatur zur mittleren Flüssigkeitstemperatur. Aus streng wissenschaftlicher Sicht ist ein derartiges Verfahren ungenau, weil die Führung der Flüssigkeit oben innerhalb der Wicklung offensichtlich eine eher zutreffende Temperaturbasis als die gemischte Flüssigkeit im Kessel bietet. In ON-gekühlten Transformatoren wird diese Ungenauigkeit als geringfügig betrachtet, weil im Beharrungszustand der Volumenstrom der Flüssigkeit durch die Wicklung etwa gleich dem Volumenstrom durch die Radiatoren ist. Das Gleiche gilt im Allgemeinen auch für einen echten OD-gekühlten Transformator, bei dem es nur eine geringe Leckrate gibt oder kontrollierte Abzweigungen von den Kühlern in den freien Raum des Kessels hineinführen. Die Verhältnisse sind jedoch anders bei einem OF-gekühlten Transformator, bei dem sich ein kleiner Strom der heißen Flüssigkeit aus den Wicklungen turbulent mit dem Hauptstrom der Kühlerflüssigkeit mischt, die in der Schleife „äußere Wicklungen – Kühler – äußere Wicklungen“ zirkuliert.

Die Frage lautet nun: „Kann diese Temperatur der gemischten Flüssigkeiten oben im Kessel dazu verwendet werden, die Heißpunkt-Wicklungstemperatur aus den Daten der Dauerprüfung mit Erwärmungsmessung zu bestimmen oder muss eine derartige Bestimmung auf der heißen Flüssigkeit beruhen, die an der obersten Stelle der Wicklung austritt?“

Eine Antwort zur oben aufgeworfenen Frage beruht auf den Ergebnissen, die an einigen OFAF-gekühlten Transformatoren erhalten wurden, an denen die Heißpunkt-Wicklungstemperaturen direkt mit LWL-Messaufnehmern gemessen worden sind. Die ausgewählten Transformatoren repräsentieren unterschiedliche Transformatorengrößen und unterschiedliche Öumlauftarten (axial und zickzack) durch die Wicklungen. Die Ergebnisse, die an einigen spezifischen Transformatoren erhalten wurden, sind in Tabelle A.1 dargestellt.

Die gemessenen Heißpunkt-Wicklungsübertemperaturen wurden aus dem Höchstwert von 8 LWL-Messfühlern je Wicklung gewonnen.

Tabelle A.1 – Heißpunkt-Wicklungsübertemperaturen an einigen spezifischen Transformatoren aus den Daten der Dauerprüfung mit Erwärmungsmessung, kombiniert mit berechneten Heißpunkt-Wicklungsübertemperaturen und aus direkten LWL-Messungen

Bemessungsleistung MVA	Kühlungsart/ Wicklungsölauf	Gemessene Werte bei der Dauerprüfung mit Erwärmungsmessung		Heißpunkt-Wicklungsübertemperatur K	
		$\Delta\theta_o$ K	g K	Berechnet	Gemessen
230 dreiphasig	OFAF/Zickzack	40,6	14,5 (LV) ^{a)} 15,0 (HV)	59,3 63,6	57,1 60,9
605 dreiphasig	OFAF/Zickzack	35,2	11,7 (LV) 23,0 (HV)	58,7 67,9	56,5 65,3
1 000 dreiphasig	OFAF/Axial	36,1	21,9 (HV)	71,4	68,9
133 einphasig	OFAF/Axial	37,3	21,1 (LV)	69,4	70,1
^{a)} (LV) bedeutet Niederspannungswicklung, (HV) bedeutet Hochspannungswicklung.					

Es wurden Versuche ausgeführt, die geführte Öltemperatur in einigen ausgewählten Prüfeinheiten zu messen. Diese Art der Messung hat sich als unpraktisch und schwierig erwiesen, weil sich die geführte Öltemperatur in einem breiten lokalen Schwankungsbereich zeigt.

Schlussfolgerung

Beruhend auf der Vergleichbarkeit der berechneten und gemessenen Werte der Heißpunkt-Wicklungsübertemperaturen nach Tabelle A.1 wird empfohlen, die Flüssigkeitstemperatur oben im Kessel für die Berechnung der Heißpunkt-Übertemperatur zu verwenden.

Anhang B (informativ)

Verfahren zur Schätzung der Heißpunkt-Wicklungsübertemperaturen

B.1 Allgemeines

Der Heißpunkt ist die höchste Temperatur, die an einem beliebigen Teil des Isolationssystems der Wicklung auftritt, und es wird angenommen, dass dies der Parameter für die thermische Begrenzung des Transformators ist.

Wenn die Heißpunkt-Wicklungsübertemperatur nicht direkt gemessen wird, kann ausgehend von den Ergebnissen der Erwärmungsmessung ein Schätzwert abgeleitet werden oder es werden andere Konstruktionsdaten oder Ergebnisse verwendet werden, die an ähnlichen Transformatoren durchgeführt wurden.

Es wird eine Unterscheidung zwischen Kühlsystemen mit natürlicher Flüssigkeitsströmung (Kurzbezeichnung ON...) und Kühlsystemen mit erzwungener Flüssigkeitsströmung (Kurzzeichen OF... oder OD...) vorgenommen.

In diesem Anhang werden die Regeln für Kerntransformatoren und Manteltransformatoren angegeben.

B.2 Verwendete Symbole

- $\Delta\theta_o$ Flüssigkeitsübertemperatur oben (siehe 7.4)
- $\Delta\theta_{om}$ mittlere Flüssigkeitsübertemperatur (siehe 7.4)
- $\Delta\theta_b$ Flüssigkeitsübertemperatur unten (siehe 7.4)
- $\Delta\theta_w$ mittlere Wicklungsübertemperatur der Wicklung zum Zeitpunkt des Abschaltens (siehe 7.6)
- $\Delta\theta_h$ Heißpunkt-Wicklungsübertemperatur (siehe 7.8)
- g Gradient der mittleren Wicklungstemperatur zur mittleren Flüssigkeitstemperatur (siehe 7.7)
- $H = Q \times S$ Heißpunktfaktor
- Q Heißpunktfaktor, bezogen auf die zusätzlichen Verluste
- S Heißpunktfaktor, bezogen auf den Wirkungsgrad der Kühlkreise

B.3 Mathematische Modelle für Kühlsysteme mit natürlicher und direkt erzwungener Flüssigkeitsströmung

B.3.1 Kerntransformatoren

Bei Transformatoren mit konzentrischen Wicklungen, die regelmäßig entlang der Kernschenkel verteilt sind, kann die Heißpunkt-Wicklungsübertemperatur ausgehend von den Ergebnissen der Erwärmungsmessung unter der Annahme berechnet werden, dass die Flüssigkeit am Wicklungsausgang die Temperatur der Flüssigkeit oben ist (siehe 7.3.1) und dass die mittlere Flüssigkeitstemperatur der Mittelwert aus der Flüssigkeitstemperatur oben und der Flüssigkeitstemperatur unten ist.

Es wird angenommen, dass die Übertemperatur der Flüssigkeit innerhalb der Wicklungen des Transformators linear mit der Höhe der Wicklungen ansteigt.

Die Wicklungsverluste, die von der Wicklung auf die Flüssigkeit entlang der Wicklung übertragen wird, erfordert ein Temperaturgefälle zwischen der Wicklung und der umgebenden Flüssigkeit, von dem angenommen wird, dass es in allen Höhenpositionen, mit Ausnahme des oberen Endes der Wicklung, gleich ist.

In der grafischen Darstellung in Bild B.1 werden die Wicklungsüber-
 temperatur deshalb als zwei parallele Linien dargestellt.

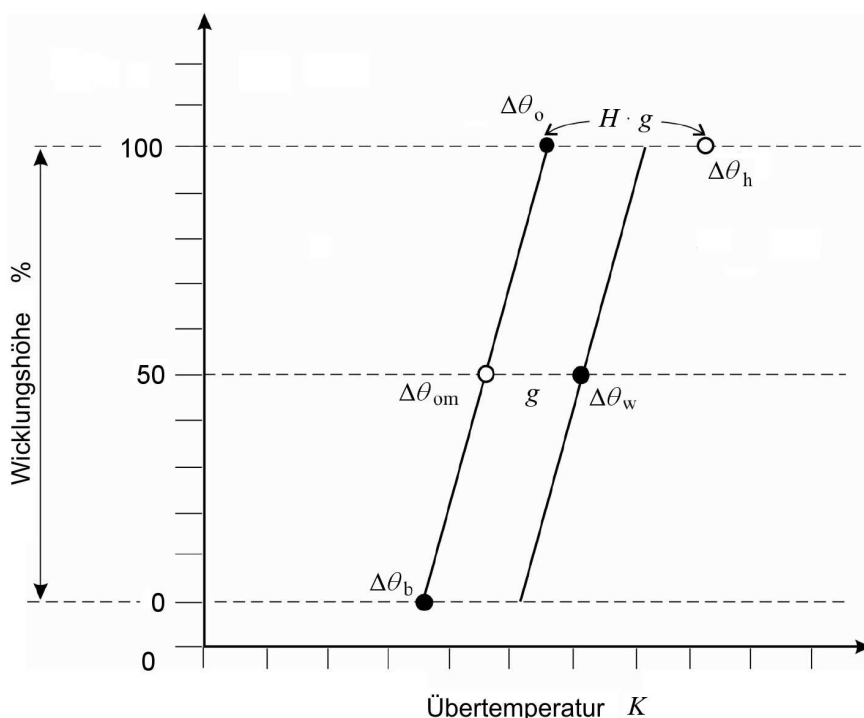


Bild B.1 – Übertemperatur-Verteilungsmodell für ON...-Kühlsysteme

Die Heißpunkt-Wicklungsüber-
 temperatur kann mit der folgenden Beziehung bestimmt werden:

$$\Delta\theta_h = \Delta\theta_o + H \times g$$

Der mittlere Temperaturgradient zwischen jeder Wicklung und der Flüssigkeit (g) wird als die Differenz zwischen der mittleren Wicklungsüber-
 temperatur ($\Delta\theta_w$) und der mittleren Flüssigkeitsüber-
 temperatur ($\Delta\theta_{om}$) angenommen.

Es wird angenommen, dass die Heißpunkte an den oberen Wicklungsenden liegen, aufgrund

- der Konzentration zusätzlicher Verluste aufgrund der Abweichung von Streuflusslinien;
- von Schwankungen in den Flüssigkeitsführungen am oberen Teil der Wicklungen.

Deshalb hängt der entsprechende Heißpunkt-Faktor ($H = Q \times S$) jeder Wicklung ab von:

- Faktor Q bezieht sich auf die zusätzlichen Verluste und hängt vom Verhältnis zwischen den spezifischen Verlusten im Bereich der Streuflusskonzentration (oberer Teil der Wicklung) und den mittleren spezifischen Verlusten der Wicklung ab;
- Faktor S bezieht sich auf den Wirkungsgrad der Flüssigkeitskühlkreise innerhalb der Wicklung.

Der Faktor Q ist ein individueller Faktor für jede Transformatorwicklung, der von den Kennwerten der Wicklung abhängig ist und sein Schätzwert kann durch Kenntnis des Streuflussfeldes (z. B. nach der Methode der finiten Elemente) erhalten werden.

Für Scheiben- und Lagenwicklungen von Drehstrom-Kerntransformatoren bis 150 MVA (50 MVA für Einphasen-Einheiten), 50 Hz und Kurzschlussimpedanzen von 10 % bis 14 % können die Kurvenverläufe in Bild B.2 als eine Richtschnur verwendet werden. Die Kurvenverläufe, die den Q -Faktor als eine Funktion der Bemessungsleistung und der Leiterhöhe angeben, wurden als Mittelwert einer Anzahl von Fällen erhalten, für