

	DIN EN 60076-19 (VDE 0532-76-19)	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 „etx Elektrotechnik + Automation“ bekannt gegeben worden.	VDE

ICS 29.180

Einsprüche bis 2020-06-10

Entwurf

Vorgesehen als Ersatz für
DIN EN 60076-19
(VDE 0532-76-19):2016-12

Leistungstransformatoren –
**Teil 19: Regeln für die Bestimmung von Unsicherheiten in der Messung
der Verluste von Leistungstransformatoren und Drosselspulen
(IEC 14/946/CD:2017);**
Text Deutsch und Englisch

Power transformers –

Part 19: Rules for the determination of uncertainties in the measurement of the losses on
power transformers and reactors
(IEC 14/946/CD:2017);

Text in German and English

Transformateurs de puissance –

Partie 19: Règles pour la détermination des incertitudes de mesure des pertes des
transformateurs de puissance et bobines d'inductance
(IEC 14/946/CD:2017);

Texte en allemand et anglais

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2020-04-10 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und Stellungnahme vorgelegt.

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

Stellungnahmen werden erbeten

- vorzugsweise online im Norm-Entwurfs-Portal von DIN unter www.din.de/go/entwuerfe bzw. für Norm-Entwürfe der DKE auch im Norm-Entwurfs-Portal der DKE unter www.entwuerfe.normenbibliothek.de, sofern dort wiedergegeben;
- oder als Datei per E-Mail an dke@vde.com möglichst in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter www.din.de/go/stellungnahmen-norm-entwuerfe oder für Stellungnahmen zu Norm-Entwürfen der DKE unter www.dke.de/stellungnahme abgerufen werden;
- oder in Papierform an die DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE, Stresemannallee 15, 60596 Frankfurt am Main.

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

Gesamtumfang 65 Seiten

DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE

Anwendungsbeginn

Anwendungsbeginn dieser Norm ist

Nationales Vorwort

Das internationale Dokument IEC 14/946/CD "Power transformers – Part 19: Rules for the determination of uncertainties in the measurement of the losses on power transformers and reactors" (CD, en: Committee Draft) ist unverändert in diesen Norm-Entwurf übernommen worden. Dieser Norm-Entwurf enthält eine noch nicht autorisierte deutsche Übersetzung.

Um Zweifelsfälle in der Übersetzung auszuschließen, ist die englische Originalfassung des CD 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 IEC/TC 14 "Power transformers" der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) erarbeitet und den nationalen Komitees zur Stellungnahme vorgelegt.

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. Dokumente, die bei CENELEC als Europäische Norm angenommen und ratifiziert werden, sind unverändert als Deutsche Normen zu übernehmen.

Da der Abstimmungszeitraum für einen FDIS bzw. Schluss-Entwurf FprEN nur 6 Wochen beträgt, und dann keine sachlichen Stellungnahmen mehr abgegeben werden können, sondern nur noch eine "JA/NEIN"-Entscheidung möglich ist, wobei eine "NEIN"-Entscheidung fundiert begründet werden muss, wird bereits der CD als DIN-Norm-Entwurf veröffentlicht, um die Stellungnahmen aus der Öffentlichkeit frühzeitig berücksichtigen zu können.

Für dieses Dokument ist das nationale Arbeitsgremium DKE/K 321 "Transformatoren" der DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE (www.dke.de) zuständig.

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

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

Der Zusammenhang der zitierten Dokumente mit den entsprechenden deutschen Dokumenten ergibt sich, soweit ein Zusammenhang besteht, grundsätzlich über die Nummer der entsprechenden IEC-Publikation. Beispiel: IEC 60068 ist als EN 60068 als Europäische Norm durch CENELEC übernommen und als DIN EN 60068 ins Deutsche Normenwerk aufgenommen.

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. IEC ist nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

Änderungen

Gegenüber **DIN EN 60076-19 (VDE 0532-76-19):2016-12** wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) Korrekturfaktoren und Messunsicherheiten wurden an IEC 60076-8 angepasst, wo einige allgemeine Hinweise zu ihrer Bestimmung gegeben werden.
- b) Die Verweise auf andere Normen wurden dem aktuellen Stand angepasst.

Inhalt

Seite

Einleitung	6
1 Anwendungsbereich	7
2 Normative Verweisungen	7
3 Begriffe	7
4 Symbole	8
4.1 Allgemeine Symbole	8
4.2 Symbole für die Messunsicherheit	9
5 Leistungsmessung, systematische Abweichung und Messunsicherheit	10
5.1 Allgemeines	10
5.2 Rückverfolgbarkeit	10
5.3 Modellfunktion	10
5.4 Messsysteme	10
6 Verfahren für die Messung der Leerlaufverluste	10
6.1 Allgemeines	10
6.2 Modellfunktion für die Leerlaufverluste bei Bezugsbedingungen	11
6.3 Unsicherheitsbilanz für Leerlaufverluste	11
7 Verfahren für die Messung der Kurzschlussverluste	12
7.1 Allgemeines	12
7.2 Modellfunktion für die Messung der Kurzschlussverluste bei Bemessungsstrom	12
7.3 Modellfunktion für die Leerlaufverluste bei Bezugsstrom und Bezugstemperatur	13
7.4 Unsicherheitsbilanz für die auf den Bemessungsstrom neu berechnete gemessene Leistung P_2	13
7.4.1 Allgemeines	13
7.4.2 Messunsicherheiten der gemessenen Kurzschlussverlustleistung P_2 bei Umgebungstemperatur θ_2	13
7.5 Unsicherheitsbilanz für den angegebenen Kurzschlussverlust bei Bezugstemperatur	13
8 Berechnungen der Leistung für Drehstromtransformatoren	14
9 Bericht	15
10 Schätzung von Korrekturwerten und Unsicherheitsbeiträgen	15
10.1 Messwandler	15
10.1.1 Allgemeines	15
10.1.2 Fehler des Übersetzungsverhältnisses von Messwandlern	16
10.1.3 Fehlwinkel von Messwandlern	17
10.2 Spannungs- und Strommessungen	18
10.3 Leistungsmessgerät	18
10.4 Modernes System mit angegebener Messunsicherheit des Systems	19
10.5 Korrektur der sinusförmigen Wellenform	19
10.6 Messung des Wicklungswiderstandes	20
10.7 Wicklungstemperatur bei der Messung der Kurzschlussverluste	20
Anhang A (informativ) Beispiel für die Bewertung der Messunsicherheit des Leerlaufverlustes Modernes Messsystem	22
A.1 Allgemeines (Zweck des Beispiels)	22
A.2 Spezifikation des Wandlers	22
A.3 Messsystem	22
A.4 Messungen	22
A.5 Korrektur der gemessenen Werte	23

A.6	Berechnung der Messunsicherheit	23
A.7	Angabe des Verlustes und Schätzung des Messunsicherheit	24
Anhang B (informativ) Beispiel für die Bewertung der Messunsicherheit des Leerlaufverlustes Verfahren auf Kalibrierungsbasis		25
B.1	Allgemeines	25
B.2	Spezifikation des Wandlers	25
B.3	Messsystem	25
B.4	Messungen	26
B.5	Korrektur der gemessenen Werte	26
B.6	Berechnung der Messunsicherheit	26
B.7	Angabe des Verlustes und Schätzung des Messunsicherheit	27
Anhang C (informativ) Beispiel für die Bewertung der Messunsicherheit des Kurzschlussverlustes Klassenindex-Verfahren		28
C.1	Allgemeines	28
C.2	Spezifikation des Wandlers	28
C.3	Messsystem	28
C.4	Messungen	29
C.5	Berechnung nach IEC 60076-1	29
C.6	Berechnung der Messunsicherheit	29
C.7	Angegebene Schätzung von Verlust und Messunsicherheit	31
Literaturhinweise		32
Tabellen		
Tabelle 1 – Gemessene Messunsicherheiten der Leerlaufverluste		12
Tabelle 2 – Gemessene Messunsicherheiten der Kurzschlussverluste bei Umgebungstemperatur		13
Tabelle 3 – Absolute Messunsicherheit der zusätzlichen Verluste P_{a2} bei der Temperatur θ_2		14
Tabelle 4 – Absolute Messunsicherheit der Kurzschlussverluste P_{LL} , angegeben für die Bezugstemperatur θ_r		14
Tabelle 5 – Gemessene Messunsicherheiten der Leerlaufverluste; modernes System		19
Tabelle 6 – Gemessene Messunsicherheiten der Kurzschlussverluste bei Umgebungstemperatur; modernes System		19
Tabelle A.1 – Ölgefüllter Drehstromtransformator		22
Tabelle A.2 – Unsicherheitsspezifikation des Leistungsmesssystems		22
Tabelle A.3 – Messdaten		23
Tabelle A.4 – Korrigierte Werte		23
Tabelle A.5 – Messunsicherheit des Leerlaufverlustes (nach 6.3, Tabelle 1)		23
Tabelle B.1 – Ölgefüllter Drehstromtransformator		25
Tabelle B.2 – Messunsicherheiten der Strom- und Spannungswandler des Messsystems		25
Tabelle B.3 – Messunsicherheiten des Leistungsmessgerätes		26
Tabelle B.4 – Messdaten		26
Tabelle B.5 – Korrigierte Werte		26
Tabelle B.6 – Messunsicherheit des Leerlaufverlustes (siehe 6.3, Tabelle 1)		27
Tabelle C.1 – Drehstrom-Trockentransformator		28
Tabelle C.2 – Messunsicherheiten der Strom- und Spannungswandler des Messsystems		28
Tabelle C.3 – Messdaten		29
Tabelle C.4 – Messdaten		29
Tabelle C.5 – Ableitung von Standardunsicherheitsbeiträgen		29
Tabelle C.6 – Unsicherheitsbilanz für die bei Umgebungstemperatur gemessenen Kurzschlussverluste (7.4.2, Tabelle 2)		30

Tabelle C.7 – Unsicherheitsbilanz für die absolute Messunsicherheit der zusätzlichen Verluste P_{a2} bei der Temperatur θ_2 (7.5, Tabelle 3)	30
Tabelle C.8 – Unsicherheitsbilanz für die absolute Messunsicherheit der Kurzschlussverluste PLL, angegeben für die Bezugstemperatur (7.5, Tabelle 4)	31

Einleitung

Die Verluste von Leistungstransformatoren (Leerlauf- und Kurzschlussverluste) sind in vielen Verträgen Gegenstand von Gewährleistungen und Vertragsstrafen und spielen eine wichtige Rolle bei der Bewertung der Gesamt(betriebs)kosten und werden deshalb in die Investitionsrechnungen einbezogen. Außerdem können regionale Bestimmungen wie z. B. die Ökodesign-Richtlinie der Europäischen Union auch Anforderungen an die Ermittlung zuverlässiger Werte für die Verluste stellen.

Das Ergebnis jeder Messung sollte nach ISO/IEC 17025 und ISO/IEV Guide 98-3 mit der Bewertung seiner Unsicherheit beschrieben werden. Eine weitere Anforderung besteht darin, dass bekannte Korrekturen vor der Bewertung der Unsicherheit anzuwenden sind. Diese Vorgaben wurden in diesem Schriftstück berücksichtigt.

Korrekturen und Unsicherheiten werden auch in IEC 60076-8 berücksichtigt, in der einige allgemeine Hinweise zu deren Bestimmung angegeben werden.

Diese Internationale Norm behandelt die Messung der Verluste, die aus messtechnischer Sicht aus der Schätzung einer Messgröße und der Bewertung der Unsicherheit besteht, die sich auf die Messgröße selbst auswirkt. Die Verfahren können auch für Verlustmessungen an Leistungstransformatoren, für die Bewertung der erreichbaren Leistungsfähigkeit der Prüfeinrichtung bei Vorqualifizierungsprozessen, für Schätzungen der erreichbaren Unsicherheit bei der Angebotsanfrage zu einer Bestellung oder vor Beginn der Endprüfung beim Hersteller und bei Bewertungen von Marktüberwachungsmessungen angewendet werden.

Die Bewertung der Unsicherheit bei der Prüfung wird oftmals als „top-down“ oder „bottom-up“ beschrieben, wobei die erste sich auf Vergleichsprüfungen zwischen Laboratorien an weitergegebenen Prüfobjekten (Ringversuche) stützt, um die Streuung und damit die Unsicherheit einzuschätzen. Das letztgenannte Verfahren stützt sich stattdessen auf die Aufstellung einer Modellfunktion, bei der das Prüfergebnis y als eine Funktion der Eingangsgrößen angegeben wird. Diese Funktion ist häufig die Gleichung, die zur Berechnung des Ergebnisses angewendet wird. In diesem Schriftstück wird das „bottom-up“-Verfahren angewendet.

Der Unsicherheitsbereich hängt von der Qualität der Prüfeinrichtung und des Messsystems, von der Erfahrung des Personals und den durch die geprüften Objekte gegebenen Messschwierigkeiten ab.

Es wird empfohlen, dass sich die Berechnungen bei Gewährleistungen und Vertragsstrafen auf die besten Schätzwerte der Verluste ohne Berücksichtigung der Messunsicherheiten beziehen, beruhend auf einem Konzept des gemeinsamen Risikos, wobei beide Parteien sich der Folgen von nicht vernachlässigbarer Messunsicherheit bewusst sind und sie akzeptieren.

In Fällen, in denen gefordert wird, dass die Verluste den angegebenen Toleranzgrenzen entsprechen, wird empfohlen, dass die geschätzte Unsicherheit kleiner als die Toleranzgrenze ist. Diese Sachlage zeigt sich z. B. bei Marktüberwachungsaktivitäten. Es kann festgestellt werden, dass 3 % ein gängiger Wert für die Unsicherheit des Verlusts ist.

In den Anhängen zu diesem Schriftstück sind Beispiele von Unsicherheitsberechnungen für Messungen von Leerlauf- und Kurzschlussverlusten bei großen Leistungs- und Verteilungstransformatoren enthalten.

Normen, technische Berichte und Guides, die im Text erwähnt werden, jedoch nicht erforderlich sind, werden am Ende des Schriftstücks aufgeführt.

Leistungstransformatoren – Teil 19: Regeln für die Bestimmung von Unsicherheiten in der Messung der Verluste von Leistungstransformatoren und Drosselspulen

1 Anwendungsbereich

Dieser Teil von IEC 60076 beschreibt die Verfahren, die bei der Bewertung der Unsicherheit von Messungen der Leerlauf- und Kurzschlussverluste bei Stückprüfungen an Leistungstransformatoren angewendet werden sollten.

Dieses Schriftstück legt den Schwerpunkt auf Messsysteme, die digitale Messgeräte verwenden, auch wenn die Verfahren auch auf die Bewertung von Systemen mit analogen Messgeräten übertragen werden können, bei denen weitere Quellen der Unsicherheit berücksichtigt werden müssen.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente werden im Text in solcher Weise in Bezug genommen, dass einige Teile davon oder ihr gesamter Inhalt Anforderungen des vorliegenden Dokuments darstellen. 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 60076-1:2011, *Power transformers – Part 1: General*

IEC 60076-2:2011, *Power transformers – Part 2: Temperature rise for liquid-immersed transformers*

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

ISO/IEC Guide 98-3:2008, *Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995)*

ISO/IEC Guide 99:2007, *International vocabulary of metrology — Basic and general concepts and associated terms (VIM)*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe nach **IEC 60076-1** und **IEC 60076-2** und die folgenden Begriffe.

3.1

Messunsicherheit

dem Messergebnis zugeordneter Parameter, der die Streuung der Werte kennzeichnet, die vernünftigerweise der Messgröße zugeordnet werden könnten

[QUELLE: ISO/IEC Guide 98-3:2008, 2.2.3]

3.2

Standardunsicherheit

als Standardabweichung ausgedrückte Unsicherheit des Ergebnisses einer Messung

[QUELLE: ISO/IEC Guide 98-3:2008, 2.3.1]

3.3

kombinierte Standardunsicherheit

Standardunsicherheit eines Messergebnisses, wenn dieses Ergebnis aus den Werten einer Anzahl anderer Größen gewonnen wird, welche gleich der positiven Quadratwurzel einer Summe von Gliedern ist, wobei die Glieder Varianzen oder Kovarianzen dieser anderen Größen sind, gewichtet danach, wie das Messergebnis mit Änderungen dieser Größen variiert

[QUELLE: ISO/IEC Guide 98-3:2008, 2.3.4]

3.4

erweiterte Messunsicherheit

Kennwert, der ein Vertrauensniveau für das Messergebnis kennzeichnet, von dem erwartet werden kann, dass es einen spezifischen Anteil der Verteilung der Werte umfasst, die der Messgröße vernünftigerweise zugeordnet werden könnten

[QUELLE: ISO/IEC Guide 98-3:2008, 2.3.5]

3.5

Erweiterungsfaktor

Zahlenfaktor, mit dem die kombinierte Standardunsicherheit multipliziert wird, um eine erweiterte Messunsicherheit zu erhalten

[QUELLE: ISO/IEC Guide 98-3:2008, 2.3.6]

3.6

Rückverfolgbarkeit

Eigenschaft eines Messergebnisses, durch die das Ergebnis durch eine dokumentierte, ununterbrochene Kette von Kalibrierschritten mit einer Bezugsgröße in Beziehung gesetzt werden kann, wobei jeder Kalibrierschritt zur Messunsicherheit beiträgt

[QUELLE: ISO/IEC Guide 99:2007, 2.41]

3.7

Genauigkeitsklasse

Klasse von Messgeräten oder Messsystemen, die die angegebenen messtechnischen Anforderungen erfüllen, die dazu bestimmt sind, Messfehler oder Messunsicherheiten innerhalb spezifischer Grenzen unter bestimmten Betriebsbedingungen zu halten

[QUELLE: ISO/IEC Guide 99:2007, 4.25]

4 Symbole

4.1 Allgemeine Symbole

F_D	Parameter für die Korrektur der Leistung bei Phasenverschiebung im Messkreis
I_M	mit dem Strommessgerät gemessener Strom (vorzugsweise Bemessungsstrom)
I_S	mit einem modernen Messsystem gemessener Strom
I_N	Bezugsstrom (entspricht üblicherweise dem Bemessungsstrom)
k_{CN}	Bemessungsübersetzungsverhältnis des Stromwandlers
k_{VN}	Bemessungsübersetzungsverhältnis des Spannungswandlers
P	Leistung
P_2	bei der Messung des Kurzschlussverlustes gemessene Leistung, korrigiert um bekannte systematische Abweichungen und bezogen auf den Strom I_N
P_{LL}	Leerlaufverlust bei Bezugsbedingungen und korrigiert um bekannte Fehler in der Messung
P_{NLL}	Leerlaufverlust bei Bezugsbedingungen und korrigiert um bekannte Fehler in der Messung
P_W	mit dem Leistungsmessgerät gemessene Leistung
P_S	mit einem modernen Messsystem gemessene Leistung
P_{ar}	zusätzlicher Verlust bei Bezugstemperatur
P_{a2}	zusätzlicher Verlust bei der Temperatur θ_2
R_1	Ersatzwiderstand der Wicklungen bei der Temperatur θ_1
R_2	Ersatzwiderstand der Wicklungen bei der Temperatur θ_2
R_r	Ersatzwiderstand der Wicklungen bei der Bezugstemperatur
t	Parameter für den Temperaturkoeffizienten des Wicklungswiderstandes
U_{avg}	Spannung, gemessen mit einem Messgerät zur Anzeige des gleichgerichteten Mittelwerts
U_M	gemessene Spannung
U_N	Bemessungsspannung

U_{rms}	Spannung, gemessen mit einem Messgerät zur Anzeige des echten Effektivwerts
θ	Temperatur (°C)
θ_1	Temperatur der Transformatorwicklung bei der Prüfung des „kalten Wicklungswiderstandes“ nach IEC 60076-1 (°C)
θ_2	Temperatur der Transformatorwicklungen bei der Prüfung der Kurzschlussverluste (°C)
θ_r	Bezugstemperatur für Transformatorwicklungen nach IEC 60076-1 (°C)
$\Delta\varphi_C$	Istwert des Fehlwinkels des Stromwandlers (rad)
$\Delta\varphi_V$	Istwert des Fehlwinkels des Spannungswandlers (rad)
ε_C	Istwert der Abweichung des Übersetzungsverhältnisses des Stromwandlers (% des Nennübersetzungsverhältnisses)
ε_V	Istwert der Abweichung des Übersetzungsverhältnisses des Spannungswandlers (% des Nennübersetzungsverhältnisses)
φ	Istwert des Phasenwinkels zwischen Spannung und Strom (rad)
φ_M	mit dem Leistungsmessgerät gemessener Phasenwinkel zwischen Spannung und Strom (rad)

4.2 Symbole für die Messunsicherheit

Allgemeine Bezeichnungen

u	relative Standardunsicherheit
$\dot{u}$	absolute Standardunsicherheit
U	relative erweiterte Messunsicherheit
$\dot{U}$	absolute erweiterte Messunsicherheit

Spezifische Bezeichnungen

u_C	Messunsicherheit des Stromwandler-Übersetzungsverhältnisses (angegeben in Prozent des Verhältnisses)
u_{IM}	Messunsicherheit der Strommessung
u_{IS}	Messunsicherheit des mit einem modernen Messsystem gemessenen Stroms
u_{LL}	Messunsicherheit des Kurzschlussverlustes bei Bezugstemperatur
u_{NLL}	Messunsicherheit des Leerlaufverlustes
u_{P2}	Unsicherheit von P_2
u_{FD}	Unsicherheit des Terms F_D
u_{PW}	Messunsicherheit der vom Leistungsmessgerät angezeigten Leistung
u_{PS}	Messunsicherheit der von einem modernen Messsystem angezeigten Leistung
u_{R1}	Messunsicherheit des Ersatzwiderstandes R_1
u_{R2}	Messunsicherheit des Ersatzwiderstandes R_2
u_{UM}	Messunsicherheit der Spannungsmessung
u_V	Messunsicherheit des Spannungswandler-Übersetzungsverhältnisses
u_{WF}	Unsicherheit der Korrektur der sinusförmigen Wellenform bei Leerlaufverlusten
$u_{\Delta\varphi}$	Unsicherheit der Phasenverschiebung im gesamten Messsystem
$u_{\Delta\varphi_C}$	Unsicherheit der Phasenverschiebung des Stromwandlers
$u_{\Delta\varphi_V}$	Unsicherheit der Phasenverschiebung des Spannungswandlers

ANMERKUNG Spezifische Bezeichnungen können nach der Definition in der Liste der allgemeinen Bezeichnungen als relativ oder absolut genauer bestimmt werden.

5 Leistungsmessung, systematische Abweichung und Messunsicherheit

5.1 Allgemeines

Im Folgenden wird angenommen, dass die Transformatorverluste unter den in IEC 60076-1 vorgeschriebenen Bedingungen mit digitalen Messgeräten gemessen werden.

Bei Drehstrom-Transformatoren werden Verluste mit drei unabhängigen Einphasen-Messsystemen gemessen. Diese Systeme können aus einzelnen Messgeräten oder aus der Kombination in einem Drehstrom-Messgerät aufgebaut sein.

Die Verluste werden im Allgemeinen mit Strom- und Spannungswandlern in Verbindung mit einem Leistungsmessgerät gemessen. Spannungs- und Stromwerte können mit einzelnen Messgeräten oder mithilfe der Funktionen des Leistungsmessgerätes gemessen werden.

Jedes Messsystem kann mit einer systematischen Abweichung (Fehler) und einer Messunsicherheit charakterisiert werden. Wenn die systematische Abweichung bekannt ist, sollte sie korrigiert werden. Wenn sie nicht korrigiert werden kann, sollte sie als zusätzliche Messunsicherheit gewertet werden.

Magnetische Transformatoren und Messwiderstände weisen eine vernachlässigbare Drift auf, weshalb die Bewertung ihrer Leistung durch Anwendung von Kalibrierergebnissen zur Korrektur von bekannten Fehlern und als Basis für die Schätzung der Unsicherheit deutlich verbessert werden kann.

Alle anderen Messgeräte sollte anhand technischer Spezifikationen (oder der Genauigkeitsklasse) bewertet werden. Es werden keine Korrekturen angewendet und Schätzungen der Messunsicherheit beruhen auf Spezifikationen. Die Restabweichungen sollten bei den Schätzungen der Messunsicherheit berücksichtigt werden. In diesen Fällen wird die Leistungsbeschreibung vorrangig durch die Kalibrierung überprüft.

ANMERKUNG Einige moderne Messsysteme wenden Messprinzipien an, die zu vernachlässigbaren systematischen Abweichungen, aber nicht zu vernachlässigbaren Messunsicherheiten führen. Dies sollte aber immer gründlich geprüft werden.

5.2 Rückverfolgbarkeit

Messungen, die zur Bestimmung von Verlusten verwendet werden, sollten rückverfolgbare Kalibrierungen aufweisen.

5.3 Modellfunktion

Die Schätzung der Messunsicherheit schließt Messunsicherheiten im Messsystem und im geprüften Objekt (Transformator) ein.

Die nachfolgend angegebenen Modellfunktionen enthalten deshalb das Messsystem und das Prüfobjekt in einer Gleichung.

5.4 Messsysteme

Messsysteme können entweder anhand der angegebenen Gesamt-Messunsicherheit, die durch systemweite Kalibrierung überprüft wird, oder der Leistungsbeschreibungen ihrer Komponenten, die durch Kalibrierungen der Komponenten überprüft werden, charakterisiert werden.

Dieses Schriftstück konzentriert sich auf die Messunsicherheitsanalyse, die auf Kalibrierungen von Komponenten beruht.

Für Systeme, die anhand einer Gesamt-Messunsicherheit charakterisiert sind, kann die Messunsicherheitsanalyse vereinfacht werden, siehe 10.4.

6 Verfahren für die Messung der Leerlaufverluste

6.1 Allgemeines

Das Prüfverfahren ist in IEC 60076-1 angegeben.

Die Messung der Leerlaufverluste muss bei Bemessungsspannung und -frequenz durchgeführt werden; bei Abweichungen von der Bemessungsspannung in der Prüfung dürfen keine Korrekturen vorgenommen werden, weil es für eine derartige Korrektur keine von der IEC definierte Gleichung gibt. Darüber hinaus berücksichtigt die in dieser Norm geschätzte Messunsicherheit keine Beiträge durch nichtlineares Verhalten der Leerlaufverluste als Funktion der Prüfspannung.

Der vom Prüfling aufgenommene Strom ist nicht sinusförmig, und dies kann Verzerrungen der Spannungsform verursachen, die zu fehlerhaften Werten der Verluste führt. In IEC 60076-1 werden sowohl eine Korrektur für die Transformatorverluste als auch ein Grenzwert für die zulässige Verzerrung vorgegeben.

6.2 Modellfunktion für die Leerlaufverluste bei Bezugsbedingungen

Für die Messung der Leerlaufverluste (und als Grundlage für die Schätzung der Messunsicherheit) wird die folgende Modellfunktion angewendet:

$$P_{NLL} = k_{CN} \frac{1}{1 + \frac{\varepsilon_C}{100}} \cdot k_{VN} \frac{1}{1 + \frac{\varepsilon_V}{100}} \cdot \frac{P_W}{1 - (\Delta_{\varphi V} - \Delta_{\varphi C}) \tan \varphi} \cdot \left(1 + \frac{U_{avg} - U_{rms}}{U_{avg}} \right) \quad (1)$$

Dabei ist

$$k_{CN} \frac{1}{1 + \frac{\varepsilon_C}{100}}$$

der Term, der das Nennübersetzungsverhältnis k_{CN} des Stromwandlers (CT) und die Korrektur um den bekannten Fehler des Übersetzungsverhältnisses ε_C kombiniert;

$$k_{VN} \frac{1}{1 + \frac{\varepsilon_V}{100}}$$

der Term, der das Nennübersetzungsverhältnis k_{VN} des Spannungswandlers (VT) und die Korrektur um den bekannten Fehler des Übersetzungsverhältnisses ε_V kombiniert;

$$\frac{1}{1 - (\Delta_{\varphi V} - \Delta_{\varphi C}) \tan \varphi}$$

der Term für die Korrektur der Phasenverschiebung (F_D) der Strom- und

$$P_W$$

Spannungswandler;

die Anzeige des Leistungsmessgerätes, welches keine bekannten Fehler aufweist, sodass es sich hier um keinen Korrekturterm handelt.

$$\left(1 + \frac{U_{avg} - U_{rms}}{U_{avg}} \right)$$

wird zur Kompensation des Einflusses der Verzerrung der Spannungswellenform auf die Leerlaufverluste verwendet. U_{avg} ist der Anzeigewert eines Mittelwert anzeigenden Messgerätes und U_{rms} ist der Anzeigewert eines Effektivwert anzeigenden Messgerätes (siehe IEC 60076-1).

Die wahre Phasenwinkel φ zwischen Spannung und Strom unter Sinusbedingungen wird wie folgt aus der bekannten Phasenverschiebung zwischen CT und VT erhalten: $(\Delta_{\varphi V} - \Delta_{\varphi C})$

$$\varphi = \varphi_M - (\Delta_{\varphi V} - \Delta_{\varphi C}) = \arccos \left(\frac{P_W}{I_M U_M} \right) - (\Delta_{\varphi V} - \Delta_{\varphi C}) \quad (2)$$

Dies ist in vielen Fällen nicht zwingend für Leerlaufverluste mit vorhandener Verzerrung anwendbar, dient aber dem Zweck dieses Schriftstücks.

Der Term $\frac{P_W}{I_M U_M}$ in Gleichung (2) ist der Leistungsfaktor.

ANMERKUNG 1 Es ist zu beachten, dass die Gleichung für die Bestimmung der Verluste nur durch das Produkt einer Anzahl von Faktoren ausgedrückt und dadurch die Schätzung der gesamten relativen Messunsicherheit vereinfacht wird.

ANMERKUNG 2 In der angegebenen Gleichung wurden einige sekundäre Einflussgrößen nicht berücksichtigt, wie Frequenz, in der Annahme, dass die Prüffrequenz einen ähnlichen Wert wie die Bemessungsfrequenz besitzt.

ANMERKUNG 3 In IEEE C57.123-2002 wird ein kleiner Temperatureffekt der Leerlaufverluste mit 1 % je 15 K Erwärmung angegeben. Dieser Effekt ist nicht bekannt und wurde innerhalb der IEC nicht bestimmt und deshalb nicht berücksichtigt.

6.3 Unsicherheitsbilanz für Leerlaufverluste

Der Schätzwert der Messunsicherheit der Leerlauf-Verlustleistung wird aus den Angaben in Tabelle 1 ermittelt, wobei alle möglichen Beiträge zur Messunsicherheit berücksichtigt wurden.

Die Messunsicherheit hinsichtlich der Phasenverschiebung kann vernachlässigt werden, wenn der Leistungsfaktor größer ist als 0,2 ist, was der Normalfall bei Kurzschlussverlusten ist;

Tabelle 1 – Gemessene Messunsicherheiten der Leerlaufverluste

Größe	Komponente	Standard-unsicherheit	Empfindlichkeitskoeffizient	Standardunsicherheitsbeitrag	Siehe Unterabschnitt
Fehler des Stromwandler-Übersetzungsverhältnisses	ε_C	u_C	1	u_C	10.1.2
Fehler des Spannungswandler-Übersetzungsverhältnisses	ε_V	u_V	1	u_V	10.1.2
Gemessene Leistung	P_W	u_{PW}	1	u_{PW}	10.3
Phasenverschiebung	$\frac{1}{1 - (\Delta\varphi_V - \Delta\varphi_C)\tan\varphi}$	$u_{\Delta\phi} \approx 0$	1	≈ 0	10.1.3
Korrektur der sinusförmigen Wellenform	$1 + \frac{U_{avg} - U_{rms}}{U_{avg}}$	u_{WF}	1	u_{WF}	10.5
Die kombinierte relative Messunsicherheit wird berechnet mit: $u_{NLL} = \sqrt{u_C^2 + u_V^2 + u_{PW}^2 + u_{WF}^2}$					
Die erweiterte relative Messunsicherheit beträgt $U_{NLL} = 2u_{NLL}$, was einer Überdeckungswahrscheinlichkeit von etwa 95 % entspricht.					

7 Verfahren für die Messung der Kurzschlussverluste

7.1 Allgemeines

Das Prüfverfahren ist in IEC 60076-1 angegeben.

Bei der Messung der Kurzschlussverluste muss der gemessene Verlust bei Bemessungsstrom gemessen oder auf diesen Stromwert neu berechnet werden, wenn mit einem verringerten Strom gearbeitet wird. Darüber hinaus müssen die Ergebnisse der Messungen der Kurzschlussverluste auf die Bezugstemperatur neu berechnet werden.

7.2 Modellfunktion für die Messung der Kurzschlussverluste bei Bemessungsstrom

In IEC 60076-1 wird gefordert, dass der Messwert des Kurzschlussverlustes mit dem Quadrat des Verhältnisses von Bemessungsstrom zu Prüfstrom zu korrigieren und die erhaltene Leistung vom Istwert auf den Bezugswert der Temperatur neu zu berechnen ist.

Die Modellfunktion für die Leistung P_2 , gemessen bei Temperatur θ_2 und bezogen auf den Bemessungsstrom, I_N ist:

$$P_2 = k_{CN} \frac{1}{1 + \frac{\varepsilon_C}{100}} \cdot k_{VN} \frac{1}{1 + \frac{\varepsilon_V}{100}} \cdot \frac{P_W}{1 - (\Delta\varphi_V - \Delta\varphi_C)\tan\varphi} \cdot \left[\frac{I_N}{k_{CN} \frac{1}{1 + \frac{\varepsilon_C}{100}} I_M} \right]^2, \quad (3)$$

die umgestellt wird zu:

$$P_2 = k_{CN} \left(1 + \frac{\varepsilon_C}{100}\right) \cdot k_{VN} \frac{1}{1 + \frac{\varepsilon_V}{100}} \cdot \frac{P_W}{1 - (\Delta\varphi_V - \Delta\varphi_C)\tan\varphi} \cdot \left[\frac{I_N}{k_{CN} I_M} \right]^2 \quad (4)$$

Dabei ist

$\left[\frac{I_N}{k_{CN} I_M} \right]^2$ der Term für den bei der Prüfung gemessenen Istwert des Stroms I_M , bezogen auf den Bezugsstrom I_N , für den der Transformator geprüft werden muss;

Weitere Terme sind in 6.2 definiert.

ANMERKUNG 1 Es ist zu beachten, dass auch in diesem Fall die Gleichung für die Bestimmung der Verluste nur durch das Produkt einer Anzahl von Faktoren ausgedrückt und dadurch die Schätzung der gesamten relativen Messunsicherheit vereinfacht wird.

ANMERKUNG 2 In der angegebenen Gleichung wurden einige sekundäre Einflussgrößen nicht berücksichtigt, wie Frequenz und Wellenformen.

Der wahre Phasenwinkel φ zwischen Spannung und Strom unter den Sinusbedingungen, die normalerweise für die Messung von Kurzschlussverlusten gelten, wird erhalten aus:

$$\varphi = \varphi_M - (\Delta\varphi_V - \Delta\varphi_C) = \arccos\left(\frac{P_W}{I_M U_M}\right) - (\Delta\varphi_V - \Delta\varphi_C) \quad (5)$$

7.3 Modellfunktion für die Leerlaufverluste bei Bezugsstrom und Bezugstemperatur

Für den gemessenen Verlust P_2 wird angenommen, dass er aus dem Verlust $I^2 R$ und dem zusätzlichen Verlust P_{a2} besteht. Die Beziehung zwischen diesen bei dem Bezugsstrom I_N wird durch die Modellfunktion beschrieben:

$$P_2 = I_N^2 R_2 + P_{a2} \quad (6)$$

Für den Gesamt-Kurzschlussverlust P_{LL} gilt nach IEC 60076-1:2011, Anhang E, bei Bezugstemperatur:

$$P_{LL} = I_N^2 \times R_r + P_{ar} = I_N^2 R_2 \frac{t+\theta_r}{t+\theta_2} + P_{a2} \frac{t+\theta_2}{t+\theta_r}, \quad (7)$$

wobei der Ersatzwiderstand R_2 der Wicklungen dem Wert entspricht, der während der bei Temperatur θ_2 durchgeführten Kurzschlussverlustprüfung erzielt wurde.

7.4 Unsicherheitsbilanz für die auf den Bemessungsstrom neu berechnete gemessene Leistung P_2

7.4.1 Allgemeines

Bemessungswerte wie I_N und θ_r werden als konstant betrachtet und nicht in die Bewertungen der Messunsicherheit einbezogen.

7.4.2 Messunsicherheiten der gemessenen Kurzschlussverlustleistung P_2 bei Umgebungstemperatur θ_2

Der Schätzwert der Messunsicherheit der Kurzschlussverlustleistung P_2 wird aus den Angaben in Tabelle 2 ermittelt, wobei alle möglichen Beiträge zur Messunsicherheit berücksichtigt wurden.

Wenn der Leistungsfaktor der gemessenen Leistung größer als 0,2 ist, kann der Beitrag der Phasenverschiebung vernachlässigt werden.

Tabelle 2 – Gemessene Messunsicherheiten der Kurzschlussverluste bei Umgebungstemperatur

Größe	Komponente	Standard-unsicherheit	Empfindlichkeitskoeffizient	Standard-unsicherheitsbeitrag	Siehe Unterabschnitt
Fehler des Stromwandler-Übersetzungsverhältnisses	ε_C	u_C	1	u_C	10.1.2
Fehler des Spannungswandler-Übersetzungsverhältnisses	ε_V	u_V	1	u_V	10.1.2
Leistungsmessgerät	P_W	u_{PW}	1	u_{PW}	10.3
Phasen-verschiebung	$\frac{1}{1 - (\Delta\varphi_V - \Delta\varphi_C) \tan\varphi}$	u_{FD}	1	u_{FD}	10.1.3
Strommessgerät	I_M	u_{IM}	2	$2u_{IM}$	10.2
Die kombinierte relative Standardunsicherheit wird berechnet mit: $u_{P2} = \sqrt{u_C^2 + u_V^2 + u_{PW}^2 + u_{FD}^2 + 4u_{IM}^2}$					
Die erweiterte relative Messunsicherheit beträgt $U_{P2} = 2u_{P2}$, was einer Überdeckungswahrscheinlichkeit von etwa 95 % entspricht.					

7.5 Unsicherheitsbilanz für den angegebenen Kurzschlussverlust bei Bezugstemperatur

Die Ergebnisse der Kurzschlussverlustprüfung müssen nach IEC 60076-1 (siehe 7.3) bezogen auf die Bezugstemperatur angegeben werden.

Die Verlustleistung und die zugehörigen Unsicherheitsbeiträge sind in Watt (d. h. in absoluten Messunsicherheiten) anzugeben, damit die Gesamtmessunsicherheit bei Bezugstemperatur richtig berechnet werden kann.

Der Schätzwert der Messunsicherheiten mit Auswirkungen auf $I_N^2 R_2$ sowie zusätzliche Verluste bei der Temperatur θ_2 werden aus den Angaben in Tabelle 3 ermittelt.

Tabelle 3 – Absolute Messunsicherheit der zusätzlichen Verluste P_{a2} bei der Temperatur θ_2

Größe	Komponente	Absolute Messunsicherheit	Empfindlichkeitskoeffizient	Standardunsicherheitsbeitrag
Gemessener Verlust	P_2	$\dot{u}_{P2}$	1	$\dot{u}_{P2}$
$I_N^2 R_2$ -Verlust	$I_N^2 R_2$	$\dot{u}_{R2}$	I^2	$I_N^2 R_2 \times u_{R2}$
Die absolute Messunsicherheit des zusätzlichen Verlustes wird berechnet mit: $\dot{u}_{Pa2} = \sqrt{\dot{u}_{P2}^2 + (I_N^2 R_2 \times u_{R2})^2}$				
Die erweiterte absolute Messunsicherheit beträgt $\dot{U}_{Pa2} = 2\dot{u}_{Pa2}$, was einer Überdeckungswahrscheinlichkeit von etwa 95 % entspricht.				

Die Messunsicherheit der Gesamt-Kurzschlussverluste P_{LL} , die für die Bezugstemperatur angegeben werden, können beginnend mit der Modellfunktion in 7.3 bestimmt werden:

$$P_{LL} = I_N^2 R_r + P_{ar} = I_N^2 R_2 \frac{t + \theta_r}{t + \theta_2} + P_{a2} \frac{t + \theta_2}{t + \theta_r} \quad (8)$$

In Tabelle 4 wird das Verfahren für die Schätzung der absoluten Messunsicherheit der Gesamtverluste P_{LL} bei Bezugstemperatur angegeben.

Tabelle 4 – Absolute Messunsicherheit der Kurzschlussverluste P_{LL} , angegeben für die Bezugstemperatur θ_r

Größe	Komponente	Absolute Standardunsicherheit	Empfindlichkeitskoeffizient	Beitrag der absoluten Standardunsicherheit
$I_N^2 R_r$ -Verlust	R_r	$R_2 \cdot u_{R2}$	$I_N^2 \frac{t + \theta_r}{t + \theta_2}$	$\frac{t + \theta_r}{t + \theta_2} I_N^2 R_2 u_{R2}$
Zusätzlicher Verlust	P_{ar}	$\dot{u}_{Pa2}$	$\frac{t + \theta_2}{t + \theta_r}$	$\frac{t + \theta_2}{t + \theta_r} \dot{u}_{Pa2}$
Mittlere Wicklungstemperatur	θ_2	$\dot{u}_{\theta 2}$	$\approx I_N^2 R_2 \frac{t + \theta_r}{(t + \theta_2)^2}$	$\frac{t + \theta_r}{(t + \theta_2)^2} I_N^2 R_2 \dot{u}_{\theta 2}$
Die absolute Gesamt-Standardunsicherheit wird berechnet mit: $\dot{u}_{LL} = \sqrt{\left(\frac{t + \theta_r}{t + \theta_2} I_N^2 R_2 u_{R2}\right)^2 + \left(\frac{t + \theta_2}{t + \theta_r} \dot{u}_{Pa2}\right)^2 + \left(\frac{t + \theta_r}{(t + \theta_2)^2} I_N^2 R_2 \dot{u}_{\theta 2}\right)^2}$				
Die erweiterte absolute Messunsicherheit beträgt $\dot{U}_{LL} = 2\dot{u}_{LL}$, was einer Überdeckungswahrscheinlichkeit von etwa 95 % entspricht.				
Die relative erweiterte Messunsicherheit wird ermittelt mit: $U_{LL} = \frac{\dot{U}_{LL}}{P_{LL}}$				

ANMERKUNG 1 Für einen herkömmlichen flüssigkeitsgefüllten Transformator mit Kupferwicklung mit $t = 235$, $\theta_2 = 20$ °C und $\theta_r = 75$ °C werden die folgenden Empfindlichkeitsfaktoren erhalten:

$$\frac{t + \theta_2}{t + \theta_r} \cong 0,83 \quad I_N^2 R_2 \frac{t + \theta_r}{(t + \theta_2)^2} \cong 0,0048 I_N^2 R_2$$

ANMERKUNG 2 In Tabelle 4 wurde die Vereinfachung $\left| -I_N^2 R_2 \frac{t + \theta_r}{(t + \theta_2)^2} + P_{a2} \frac{1}{t + \theta_r} \right| \leq I_N^2 R_2 \frac{t + \theta_r}{(t + \theta_2)^2}$ angewendet.

8 Berechnungen der Leistung für Drehstromtransformatoren

Für Drehstromtransformatoren sollte die Leistungsmessung durch Zusammenfassen von drei Einphasen-Messungen durchgeführt werden.

In diesem Fall sind die Kriterien für die Schätzung der Messunsicherheit der Leistung in jeder Phase die gleichen, die bereits für Einphasenkreise angegeben wurden.

Im Normalfall können die drei Messungen der Leistung als nicht voneinander abhängig betrachtet werden, und die absolute Messunsicherheit $\dot{u}_T$ der Gesamtleistung wird anhand der folgenden Gleichung ermittelt:

$$\dot{u}_T = \sqrt{\dot{u}_1^2 + \dot{u}_2^2 + \dot{u}_3^2} \quad (9)$$

Dabei repräsentieren die Symbole unter dem Wurzelzeichen die absoluten Unsicherheiten der Leistungsmessungen, die an den einzelnen Phasen durchgeführt und in Watt angegeben werden.

Die relative Messunsicherheit beträgt:

$$u_T = \frac{\dot{u}_T}{P_W} \quad (10)$$

Dabei ist P_W die Summe der Leistung an allen drei Phasen.

Es wird angenommen, dass alle Unsicherheitsbeiträge nicht voneinander abhängig sind.

ANMERKUNG 1 Eine Folge der Zusammenfassung der unabhängigen Schätzwerte der Messunsicherheit für drei Phasen zu einem einzelnen Schätzwert ist, dass dieser einzelne Schätzwert eine niedrigere relative Messunsicherheit als die Schätzwerte für eine einzelne Phase aufweist.

ANMERKUNG 2 Manchmal werden Messkreise für die Drehstromleistung mit einer verringerten Anzahl von Messelementen verwendet. Bei derartigen Stromkreisen ist die Angabe eines gültigen Schätzwertes der Unsicherheit sehr problematisch, weil es schwierig ist, ausreichende Informationen über die beeinflussenden Parameter zu erhalten. Derartige Messkreise werden deshalb nicht empfohlen.

9 Bericht

Die erweiterte Messunsicherheit der Verlustmessungen sollte nach dieser Norm angegeben werden.

Die erweiterten Messunsicherheiten sollten durch Multiplizieren der Standardunsicherheit mit dem Erweiterungsfaktor $k = 2$ bestimmt werden, was bei einer Normalverteilung einer Überdeckungswahrscheinlichkeit von etwa 95 % entspricht.

Es wird die Angabe des Umfangs aller Korrekturen bezüglich der Wellenform empfohlen.

10 Schätzung von Korrekturwerten und Unsicherheitsbeiträgen

10.1 Messwandler

10.1.1 Allgemeines

Die Grundsätze für die Bestimmung der Unsicherheiten werden in 5.1 behandelt.

Im Stromkanal in Verlustmesssystemen können klassische oder moderne Stromwandler verwendet werden:

- klassische Wandler mit einfachen Magnetkreisen;
- Zero-Flux-Stromwandler;
- Zweistufen-Stromwandler;
- verstärkergestützte Stromwandler.

Moderne Stromwandler setzen Technologien ein, die die Genauigkeit erhöhen, und arbeiten nach dem Prinzip des verringerten Flusses im aktiven Kern bis auf nahezu null, wodurch sich die Fehler des Übersetzungsverhältnisses und der Fehlwinkel auf sehr kleine Werte verringern. Sie werden daher anhand Technischer Spezifikationen bewertet. Siehe 10.1.2.2 und 10.1.3.2.

Im Spannungskanal in Verlustmesssystemen können klassische induktive Spannungswandler oder moderne Spannungswandler verwendet werden:

- klassische Wandler mit einfachen Magnetkreisen;
- Druckgas-Kondensatoren in Verbindung mit verschiedenen aktiven Rückführungsschaltungen, mit denen Fehler des Übersetzungsverhältnisses und Fehlwinkel auf ein Minimum verringert werden.

Moderne Spannungswandler setzen Technologien ein, die die Genauigkeit erhöhen, und arbeiten mit elektronischer Rückführung, wodurch sich die Fehler des Übersetzungsverhältnisses und der Fehlwinkel auf sehr kleine Werte verringern. Sie werden daher anhand Technischer Spezifikationen bewertet. Siehe 10.1.2.2 und 10.1.3.2.

Magnetische Transformatoren werden als stabil angesehen und die Ergebnisse ihrer Kalibrierung können zur Verbesserung der Leistung verwendet werden, siehe 10.1.2.1 und 10.1.3.1.

10.1.2 Fehler des Übersetzungsverhältnisses von Messwandlern

10.1.2.1 Verfahren auf Kalibrierbasis

Dieses Verfahren ist nur für klassische Messwandler anwendbar.

Messwandler werden im Regelfall bei unterschiedlichen Strömen (Spannungen) und mindestens zwei verschiedenen Bürden kalibriert. Die Fehler für die tatsächlichen Messbedingungen können durch Interpolation aus den verfügbaren Daten im Kalibrierzertifikat ermittelt werden.

Das Kalibrierzertifikat sollte die erweiterte Unsicherheit des angegebenen Fehlers des Übersetzungsverhältnisses und die Fehlwinkel sowie den angewendeten Erweiterungsfaktor aufführen.

Strom- und Spannungswandler werden bei jedem Übersetzungsverhältnis über einen Bereich von Strömen (Spannungen) eingesetzt, wobei der Fehler des Übersetzungsverhältnisses variieren kann. Grundsätzlich sollten Korrekturen und entsprechende Messunsicherheiten für jede Verlustmessung berechnet werden. Im Normalfall ist es aber möglich, dies wesentlich zu vereinfachen, indem:

- ein einzelner, durchschnittlicher Fehler des Übersetzungsverhältnisses ε_C (ε_V) für ein bestimmtes Übersetzungsverhältnis und einen bestimmten Strombereich (Spannungsbereich) bestimmt wird;
- eine einzelne, durchschnittliche Messunsicherheit u_C (u_V) für diesen Fehler bestimmt wird, die sowohl die im Kalibrierzertifikat angegebene Messunsicherheit als auch die Fehlervariation über den Strom- bzw. Spannungsbereich und die Variation aufgrund der Bürden auf Sekundärseite des Stromwandlers berücksichtigt.

$$u_C = \sqrt{u_{cal\ C}^2 + u_{var\ C}^2 + u_{bur\ C}^2} \quad (11)$$

Dabei ist

- u_C die Messunsicherheit des Stromwandlers über einen Bereich von Strömen und Bürden;
- $u_{cal\ C}^2$ die im Kalibrierzertifikat angegebene Standardunsicherheit (erweiterte Messunsicherheit/ Erweiterungsfaktor);
- $u_{var\ C}$ die Standardunsicherheit des geschätzten durchschnittlichen Fehler des Übersetzungsverhältnisses ε_C , berechnet als Differenz zwischen dem größten und dem kleinsten Fehler des Übersetzungsverhältnisses über den Strombereich, geteilt durch $\sqrt{12}$;
- $u_{bur\ C}$ die Standardunsicherheit des geschätzten durchschnittlichen Fehler des Übersetzungsverhältnisses ε_C , berechnet als Differenz zwischen dem größten und dem kleinsten Fehler des Übersetzungsverhältnisses über den Strombereich, geteilt durch $\sqrt{12}$.

10.1.2.2 Verfahren unter Anwendung einer Technischen Spezifikation

Dieses Verfahren, das sowohl für klassische als auch für moderne Messwandler anwendbar ist, beruht auf dem zulässigen Fehler (e_{class}), der:

- als Klassenindex für die Genauigkeitsklasse des (herkömmlichen) Messwandlers verwendet wird;
- als Grenzwert der Messunsicherheit verwendet wird, der in der Spezifikation für die Strom- oder Spannungskanäle in einem modernen Messsystem angegeben ist.

Das Verfahren setzt voraus, dass die Spezifikation durch Kalibrierung überprüft wird.

Der Fehler des Übersetzungsverhältnisses wird auf $\varepsilon_C = 0$ für Stromwandler und $\varepsilon_V = 0$ für Spannungswandler geschätzt.

Bei einer angenommenen Rechteckverteilung (siehe ISO/IEC Guide 98-3) ist die Standardunsicherheit deshalb:

$$u_C = \frac{e_{class}}{\sqrt{3}} u_V = \frac{e_{class}}{\sqrt{3}} \quad (12)$$

Eine Vorbedingung für dieses Verfahren besteht darin, dass der Messwandler innerhalb der zulässigen Bereiche von Bürde und Strom (oder Spannung) eingesetzt wird.

10.1.3 Fehlwinkel von Messwandlern

10.1.3.1 Verfahren auf Kalibrierbasis

Dieses Verfahren ist nur für klassische Messwandler anwendbar.

Die Korrektur des Messwertes aufgrund der Auswirkung des Fehlwinkels wird berechnet mit:

$$F_D = \frac{1}{1 - (\Delta_{\varphi V} - \Delta_{\varphi C}) \tan \varphi} \quad (13)$$

Dabei ist

$\Delta_{\varphi C}$ der Fehlwinkel des Stromwandlers (rad);

$\Delta_{\varphi V}$ der Fehlwinkel des Spannungswandlers (rad);

φ der Istwert des Phasenwinkels zwischen Spannung und Strom im Hauptstromkreis (Korrekturen für die Phasenverschiebung von Messwandlern wurden angewendet).

Die Messunsicherheit u_{FD} bezogen auf die Korrektur der Phasenverschiebung $F_D = \frac{1}{1 - (\Delta_{\varphi V} - \Delta_{\varphi C}) \tan \varphi}$ kann für praktische Anwendungen durch den folgenden vereinfachten Zusammenhang geschätzt werden:

$$u_{FD} \approx u_{\Delta \varphi} \tan \varphi \quad (14)$$

Dabei ist

$u_{\Delta \varphi}$ die kombinierte Standardunsicherheit der Fehlwinkel der Strom- und Spannungswandler, deren Bestimmung nachfolgend diskutiert wird;

$\Delta_{\varphi C}$ der Fehlwinkel des Stromwandlers (rad);

$\Delta_{\varphi V}$ der Fehlwinkel des Spannungswandlers (rad);

φ der Istwert des Phasenwinkels zwischen Spannung und Strom (Korrekturen für die Phasenabweichung von Messwandlern wurden angewendet).

ANMERKUNG Die Fehlwinkelunsicherheit wird üblicherweise als Absolutwert angegeben. Das Ergebnis von [Gleichung \(12\)](#) liefert allerdings nur die relative Messunsicherheit (in rad, Multiplizieren des Ergebnisses mit 100 liefert das Ergebnis in Prozent).

Die kombinierte Standardunsicherheit der Phasenverschiebung ist gegeben als

$$u_{\Delta \varphi} = \sqrt{u_{\Delta \varphi V}^2 + u_{\Delta \varphi C}^2} \quad (15)$$

wobei $u_{\Delta \varphi C}$ und $u_{\Delta \varphi V}$ die Standardunsicherheiten sind, die von der im Kalibrierzertifikat angegebenen Messunsicherheit abgeleitet sind. Wenn im Kalibrierzertifikat zum Beispiel ein Erweiterungsfaktor von 2 angegeben ist, wird die erweiterte Messunsicherheit durch diesen Faktor dividiert, um die Standardunsicherheit zu erhalten. Wenn im Kalibrierzertifikat die Genauigkeit jedoch ohne Angabe des Erweiterungsfaktors angegeben ist, kann die entsprechende Standardunsicherheit mit dieser Genauigkeit dividiert durch $\sqrt{3}$ angenommen werden (Rechteckverteilung der Wahrscheinlichkeit).

Wenn das Interpolationsverfahren zur Bestimmung des Beitrages von Spannungs- und Stromwandlern auf den Fehlwinkel angewendet wird und die entsprechenden Unsicherheiten nicht unberücksichtigt bleiben können, dann sollten sie mit den vorstehend bestimmten Standardunsicherheiten zusammengestellt werden:

$$u_{\Delta \varphi} = \sqrt{u_{\text{int} \Delta \varphi V}^2 + u_{\Delta \varphi V}^2 + u_{\text{int} \Delta \varphi C}^2 + u_{\Delta \varphi C}^2} \quad (16)$$

Dabei sind die Unsicherheiten u_{int} die Standardunsicherheiten, die den Interpolationen zuzuschreiben sind. Diese Unsicherheiten sind zu schätzen und können anstelle anderer Bewertungen mit 1/3 der angewendeten Interpolationskorrektur angenommen werden.

10.1.3.2 Verfahren unter Anwendung einer Technischen Spezifikation

10.1.3.2.1 Moderne Messwandler

Die Spezifikation setzt voraus, dass sie regelmäßig durch Kalibrierung überprüft wird. Die Fehlwinkelunsicherheit wird durch Berücksichtigung der angegebenen Unsicherheit und der Standardunsicherheit der Kalibrierung bestimmt.

$$u_{\Delta\varphi C} = \sqrt{u_{cal}^2 + \frac{u_{spec}^2}{3}} \text{ und } u_{\Delta\varphi V} = \sqrt{u_{cal}^2 + \frac{u_{spec}^2}{3}} \quad (17)$$

Dabei ist

- u_{cal} die Standardunsicherheit, die durch Division der im Kalibrierzertifikat angegebenen erweiterten Messunsicherheit für den Fehlwinkel durch den Erweiterungsfaktor erhalten wird. Wenn der Erweiterungsfaktor nicht ausdrücklich angegeben ist, besteht das allgemeine Verfahren darin, eine Rechteckverteilung anzunehmen und durch $\sqrt{3}$ zu teilen;
- u_{spec} der maximale Fehlwinkel, der für die Genauigkeitsspezifikation des Messwandlers festgelegt ist.

Somit ist die kombinierte Standardunsicherheit für den Fehlwinkel gegeben als

$$u_{\Delta\varphi} = \sqrt{u_{\Delta\varphi V}^2 + u_{\Delta\varphi C}^2} \quad (18)$$

und die Standardunsicherheit bezogen auf die Korrektur der Phasenverschiebung gegeben als

$$u_{FD} \approx u_{\Delta\varphi} \tan\varphi \quad (19)$$

10.1.3.2.2 Klassische Messwandler

Für die gemessene Leistung wird hinsichtlich des Fehlwinkels keine Korrektur vorgenommen und deshalb ist $F_D \approx 1$.

Bei den klassischen Messwandlern kann die Standardunsicherheit der Phasenverschiebung aus dem Höchstwert geschätzt werden, den der Term F_D für den Wertebereich von $\tan\phi$ annehmen könnte, der für die höchste Differenz der in der maßgebenden Genauigkeitsklasse für die Messwandler festgelegten Phasenverschiebung berechnet wird und der eine Rechteckverteilung der Wahrscheinlichkeit voraussetzt:

$$u_{FD} = \frac{1}{\sqrt{3}} |(1 - F_D)| = \frac{1}{\sqrt{3}} \left| 1 - \frac{1}{1 - (\Delta\varphi_V - \Delta\varphi_C) \tan\varphi} \right| \quad (20)$$

Dabei ist

- $\Delta\varphi_C$ die Fehlergrenze für seine Genauigkeitsklasse nach IEC 61869-2 (in rad) für den Fehlwinkel des Stromwandlers;
- $\Delta\varphi_V$ die Fehlergrenze für seine Genauigkeitsklasse nach IEC 61869-3 (in rad) für den Fehlwinkel des Spannungswandlers.

10.2 Spannungs- und Strommessungen

Die Messungen sollten mit digitalen Messgeräten durchgeführt werden. Die Genauigkeit jedes Ablesewertes lässt sich mit der folgenden allgemeinen Gleichung berechnen:

$$a = b \cdot \text{reading} + c \cdot \text{range} \quad (21)$$

Dabei sind b und c Koeffizienten, die sich auf die Genauigkeitsspezifikation des Messgerätes beziehen. Das Ergebnis a gibt den absoluten Unsicherheitsbeitrag in Volt (oder Ampere) an.

ANMERKUNG 1 In einigen Handbüchern wird noch ein dritter Term angegeben, der als Offset bezeichnet wird.

ANMERKUNG 2 Die Gleichung für die Genauigkeitsbewertung kann sich von der vorstehend angegebenen unterscheiden; die erforderlichen Informationen sind in den Handbüchern der Messgeräte enthalten.

Da die angegebene Unsicherheit üblicherweise als rechteckverteilt angenommen wird, ergibt sich die relative Standardabweichung für die Spannungs- bzw. die Strommessung aus den folgenden Beziehungen:

$$u_{UM} = \frac{a}{U_m \sqrt{3}} \text{ und } u_{IM} = \frac{a}{I_m \sqrt{3}} \quad (22)$$

Wenn die Unsicherheit im Handbuch des Messgerätes zusammen mit einem Erweiterungsfaktor angegeben ist, entspricht die Standardunsicherheit der angegebenen Unsicherheit dividiert durch diesen Erweiterungsfaktor.

10.3 Leistungsmessgerät

Im Allgemeinen wird die Genauigkeit einer Leistungsmessung, die mit einem Leistungsmessgerät durchgeführt wird, von den Spannungs- und Stromkanälen und insbesondere von dem Leistungsfaktor der Messung beeinflusst.

Die Grundlage der Unsicherheitsbestimmung sollten die Spezifikation des Leistungsmessgerätes und unterstützende Kalibrierzertifikate sein.

Für heutzutage eingesetzte Leistungsmessgeräte wird in der Regel die Gesamt-Standardunsicherheit der Leistungsmessung u_{PW} angegeben, wobei die Art der Angabe je nach Hersteller und/oder Modell variieren kann. Die Messunsicherheit kann beispielsweise in Form einer Tabelle mit festgelegten Unsicherheitswerten für unterschiedliche Bereiche des Leistungsfaktors und des Eingangsstroms bzw. der Eingangsspannung oder in Form einer Tabelle mit einzelnen Wertepaaren oder mithilfe von einer oder mehreren Gleichungen angegeben werden.

Für den Zweck dieses Schriftstücks wird die Messunsicherheit eines Leistungsmessgerätes in Form einer Tabelle angegeben, die Gesamt-Messunsicherheitswerte u_{PW} für unterschiedliche Bereiche des Leistungsfaktors und des Eingangsstroms bzw. der Eingangsspannung enthält. Eine derartige Tabelle kann direkt für die Bestimmung der Messunsicherheit der Verlustmessung verwendet werden.

In Fällen, in denen die Messunsicherheit der Leistungsmessung u_{PW} nicht tabellarisch angegeben ist, muss die Messunsicherheit u_{PW} mithilfe der vom Hersteller bereitgestellten Verfahren und Informationen (Spezifikation) bestimmt werden.

10.4 Modernes System mit angegebener Messunsicherheit des Systems

Im Allgemeinen wird die Genauigkeit einer Leistungsmessung, die mit einem Messsystem durchgeführt wird, für das die Gesamt-Messunsicherheit u_{PS} angegeben ist, von den Spannungs- und Stromkanälen und dem Leistungsmessgerät und insbesondere von dem Leistungsfaktor der Messung beeinflusst.

Die Grundlage der Unsicherheitsbestimmung sollten die Spezifikation des Messsystems und unterstützende Kalibrierzertifikate sein.

Bei Verwendung eines derartigen Systems ersetzt der Unsicherheitsbeitrag u_{PS} in [Tabelle 1](#) und [Tabelle 2](#) die Messunsicherheiten für die Leistungstransformatoren, Spannungs- und Stromwandler und die Phasenverschiebung, da diese bereits eingeschlossen sind. Die Tabellen werden wie folgt vereinfacht:

Tabelle 5 – Gemessene Messunsicherheiten der Leerlaufverluste; modernes System

Größe	Komponente	Standard-unsicherheit	Empfindlichkeits-koeffizient	Standardunsicherheits-beitrag	Siehe Unterabschnitt
Gemessene Leistung	P_S	u_{PS}	1	u_{PS}	
Korrektur der sinusförmigen Wellenform	$1 + \frac{U_{avg} - U_{rms}}{U_{avg}}$	u_{WF}	1	u_{WF}	10.5
Die kombinierte relative Messunsicherheit wird berechnet mit: $u_{NLL} = \sqrt{u_{PS}^2 + u_{WF}^2}$					
Die erweiterte relative Messunsicherheit beträgt $U_{NLL} = 2u_{NLL}$, was einer Überdeckungswahrscheinlichkeit von etwa 95 % entspricht.					

Tabelle 6 – Gemessene Messunsicherheiten der Kurzschlussverluste bei Umgebungstemperatur; modernes System

Größe	Komponente	Standard-unsicherheit	Empfindlichkeits-koeffizient	Standardunsicherheits-beitrag	Siehe Unterabschnitt
Gemessene Leistung	P_S	u_{PS}	1	u_{PS}	
Strommessgerät	I_S	u_{IS}	2	$2u_{IM}$	10.2
Die kombinierte relative Messunsicherheit wird berechnet mit: $u_{P2} = \sqrt{u_{PS}^2 + 4u_{IM}^2}$					
Die erweiterte relative Messunsicherheit beträgt $U_{P2} = 2u_{P2}$, was einer Überdeckungswahrscheinlichkeit von etwa 95 % entspricht.					

10.5 Korrektur der sinusförmigen Wellenform

Die in IEC 60076-1 angegebene Näherungskorrektur für den Wert der Leerlaufverluste aufgrund von Verzerrungen beruht auf dem wahren Effektivwert der Spannung U_{rms} und auf dem Mittelwert der

gleichgerichteten Spannung U_{avg} und ist skaliert, um den entsprechenden Effektivwert direkt ablesen zu können.

$$1 + \frac{U_{avg} - U_{rms}}{U_{avg}} \quad (23)$$

Die Standardunsicherheit u_{WF} für diese Korrektur beträgt bei Verwendung zweier voneinander unabhängiger Messgeräte:

$$u_{WF} = \sqrt{u_{Vavg}^2 + u_{Vrms}^2} \quad (24)$$

Dabei bezieht sich u_{Vavg} auf die Messunsicherheit des Messgerätes für den gleichgerichteten Messwert und u_{Vrms} auf das Messgerät für den wahren Effektivwert.

Viele digitale Messgeräte berechnen jedoch beide Werte aus derselben abgestasteten Wellenform, und da die numerischen Fehler in der Regel sehr gering ausfallen, kann diese Messunsicherheit für derartige Messgeräte vernachlässigt werden.

10.6 Messung des Wicklungswiderstandes

Der Wicklungswiderstand wird üblicherweise nach der Volt-Ampere-Methode gemessen und die Unsicherheit, die dem Messgerät zuzuschreiben ist, kann mit der folgenden Beziehung angegeben werden:

$$u_{R1} = \sqrt{u_{UM}^2 + u_{UIM}^2 + u_{SH}^2} \quad (25)$$

Dabei ist

- u_{UM} die Standardunsicherheit der Spannungsmessung;
- u_{UIM} die Standardunsicherheit bei der Messung der Spannung am Messwiderstand; und
- u_{SH} die Standardunsicherheit des Messwiderstandes.

ANMERKUNG Es wird angenommen, dass ausreichend Zeit vergangen ist, um sicherzustellen, dass alle Ausgleichsvorgänge, die beim Schließen des Messkreises beginnen, abgeklungen sind und stabile Ablesewerte erhalten werden.

Zur Schätzung der Unsicherheiten bei Spannungs- und Strommessungen sollten die gleichen Verfahren wie in 10.2 angewendet werden.

Für den Strommesswiderstand ist es üblicherweise ausreichend, die Standardunsicherheit aus dem Klassenindex zu schätzen und die systematische Abweichung zu vernachlässigen, das heißt:

$$u_{sh} = \frac{u_{class}}{\sqrt{3}} \quad (26)$$

Der Wert des Widerstandes wird auch durch den Unsicherheitsbeitrag der Temperatur beeinflusst, bei der die Messung durchgeführt wird, wie es in 10.7 erläutert wird.

Wenn die Widerstandsmessung mit einem integrierten Widerstandsmessgerät durchgeführt wird, dann sollte die Unsicherheit in der Spezifikation des Herstellers angegeben und durch Kalibrierung bestätigt sein.

10.7 Wicklungstemperatur bei der Messung der Kurzschlussverluste

Die Temperatur der Wicklungen während der Messung der Kurzschlussverluste hat Einfluss auf die nachfolgende Neuberechnung der Ergebnisse auf die Bezugstemperatur.

Das Verfahren zur Ermittlung der Wicklungstemperatur ist in IEC 60076-1 bzw. in 60076-11 beschrieben. Eine sichere Schätzung der erwarteten Unsicherheit der auf diese Weise bestimmten Wicklungstemperatur ist 2 K.

Die Schätzung der Wicklungstemperatur kann durch Messung der Wicklungswiderstände erfolgen, um die Temperaturänderung gegenüber der Umgebungstemperatur zu ermitteln. Das Verfahren sollte auf sehr große Transformatoren verwendet werden oder dort, wo angenommen wird, dass die Wicklungen nicht im stationären Zustand sind.

Bei kleinen Transformatoren ist die Bestimmung der Wicklungstemperatur durch Messung des Wicklungswiderstandes oftmals nicht gerechtfertigt. In Fällen, in denen viele identische Transformatoren geprüft werden, kann es ausreichend sein, die Untersuchung an einer Einheit als Sonderprüfung durchzuführen und das Ergebnis für alle Transformatoren eines Loses zu verwenden.