

**DIN IEC 61378-3
(VDE 0532-43)**
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 2021-07-28

Entwurf
**Stromrichtertransformatoren –
Teil 3: Anwendungsrichtlinie
(IEC 61378-3:2015)**

Converter transformers –
Part 3: Application guide
(IEC 61378-3:2015)

Transformateurs de conversion –
Partie 3: Guide d'application
(IEC 61378-3:2015)

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2021-05-28 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 93 Seiten

DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE

Anwendungsbeginn

Anwendungsbeginn dieser Norm ist

Inhalt	Seite
Nationales Vorwort.....	7
Einleitung	8
0.1 Allgemeines	8
0.2 Bemessungsdaten (Abschnitt 5)	8
0.3 Wicklungsanordnungen (Abschnitt 6).....	8
0.4 Anzapfungen und Impedanzen (Abschnitt 7)	8
0.5 Isolationsaspekte und Spannungsprüfungen (Abschnitt 8).....	9
0.6 Verluste (Abschnitt 9)	9
0.7 Kern- und Geräuschaspekte (Abschnitt 10)	9
0.8 Transformator-Pflichtenheft (Abschnitt 11).....	9
0.9 Kurzschlussbetrachtungen (Abschnitt 12).....	9
0.10 Bauteile (Abschnitt 13)	10
0.11 Instandhaltung (Abschnitt 14).....	10
0.12 Monitoring und Vor-Ort-Untersuchungen (Abschnitt 15).....	10
0.13 Zusätzliche Informationsquellen.....	10
1 Anwendungsbereich	11
2 Normative Verweisungen	11
3 Begriffe	11
4 Symbole und Abkürzungen	11
5 Bemessungsdaten	12
6 Wicklungsanordnungen	13
6.1 Allgemeines	13
6.2 Industrielle Anwendungen	15
6.2.1 Gleichrichter	15
6.2.2 Spannungsregelung	16
6.2.3 Spartransformatoraufbau	17
6.3 HGÜ-Anwendungen	22
6.3.1 Verschiedene Arten von Transformatoranordnungen	22
6.3.2 Wicklungsanordnungen	23
6.3.3 Betrachtungen zur Impedanz – Kopplungsimpedanz	24
7 Anzapfungen und Impedanzen – HGÜ-Anwendungen	25
7.1 Impedanzwert	25
7.2 Impedanzschwankungen	25
8 Isolationsaspekte und Spannungsprüfungen	26
8.1 Hybrid-Isolationssysteme	26

8.1.1	Allgemeines.....	26
8.1.2	Hybridisolation für Stromrichtertransformatoren	27
8.2	Spannungsprüfungen	28
8.2.1	Allgemeines.....	28
8.2.2	Dielektrische Sicherheitsabstände bei Gleichspannungs-Dauer- und Polaritätsumkehrprüfung	30
8.2.3	Kommentare zu den dielektrischen Prüfverfahren.....	31
9	Verluste	33
9.1	Allgemeines.....	33
9.1.1	Allgemeine Betrachtungen	33
9.1.2	Verluste und Frequenz.....	34
9.1.3	Stromaufteilung, Verluste und Heißpunkte in Hochstromwicklungen	35
9.1.4	Stromüberschwingungen	35
9.1.5	Transformatoren mit drei oder mehr Wicklungen, die auf dem selben Kernschenkel gewickelt sind	36
9.1.6	Zweifrequenzprüfung von HGÜ-Transformatoren	41
9.1.7	Transformatoren mit mehr als einem Aktivteil im gleichen Kessel	43
9.1.8	An einen spannungsgeführten Umrichter angeschlossene Transformatoren	44
9.2	Erwärmungsprüfungen	44
9.2.1	Allgemeines.....	44
9.2.2	Berechnung von Prüfströmen und Verlusten für industrielle Transformatoren.....	44
9.2.3	Berechnung von Verlusten und Prüfströmen für HGÜ-Transformatoren.....	44
9.2.4	Betrachtungen am Heißpunkt und Grenzen der Erwärmungsprüfungen	45
9.2.5	Betrachtungen zur Erwärmungsprüfung von Industrietransformatoren	45
9.2.6	Kessel-Heißpunkte in Industrietransformatoren.....	46
10	Kern und Geräuschaspekte	46
10.1	Kern.....	46
10.1.1	Konstruktive Merkmale.....	46
10.1.2	Auswirkungen von Oberschwingungen auf Kerne des Aktivteils von Transformatoren	47
10.1.3	Auswirkungen einer Vormagnetisierungs-Gleichspannung auf Kerne eines wesentlichen Aktivteils	47
10.1.4	Zusammenfassung zu Kernen	48
10.2	Schall.....	48
10.2.1	Allgemeines.....	48
10.2.2	Grundlegende Betrachtungen	49
11	Transformator-Pflichtenheft.....	50
11.1	Allgemeines.....	50
11.2	Technisches Pflichtenheft versus funktionales Pflichtenheft	51
11.2.1	Allgemeines.....	51
11.2.2	Technisches Pflichtenheft	51

	Seite
11.2.3 Funktionales Pflichtenheft	51
11.3 HGÜ-Transformator-Pflichtenheft.....	51
11.4 Anmerkungen und Stellungnahmen zu Pflichtenheftpositionen, die jeweils durch Käufer und Lieferanten bereitzustellen sind.....	52
11.5 Informationen, die vom Käufer oder Anlagenplaner bereitzustellen sind.....	52
11.5.1 Allgemeine Beschreibung.....	52
11.5.2 Systemdaten.....	52
11.5.3 Umgebungsdaten	53
11.5.4 Anforderungen an das Betriebsverhalten.....	53
11.5.5 Anforderungen an Prüfungen	56
11.5.6 Reihenfolge der Werkprüfungen	57
11.5.7 Prüfungen am Aufstellort.....	57
11.5.8 Anforderungen an Auslegung und Konstruktion	58
11.5.9 Hilfseinrichtungen	58
11.5.10 Verfügbarkeit und Maßnahmen zur Minimierung der Wartungsausfallzeiten	60
11.6 Informationen, die vom Lieferanten bereitzustellen sind.....	60
11.6.1 Allgemeines	60
11.6.2 Allgemeine Beschreibung.....	60
11.6.3 Leistungsdaten	60
11.6.4 Zusatzdaten.....	61
11.7 Qualitätssicherung und Prüfprogramme.....	63
11.8 Verfügbarkeit und Maßnahmen zur Minimierung der Wartungsausfallzeiten	63
12 Kurzschlussbetrachtungen	64
13 Bauteile.....	67
13.1 Laststufenschalter	67
13.1.1 Allgemeines	67
13.1.2 Stromrichter für industrielle Anwendungen	67
13.1.3 Stromrichter für HGÜ-Anwendungen	68
13.2 Ventileitige Durchführungen	68
13.2.1 Allgemeines	68
13.2.2 Anlagenauslegung.....	69
13.2.3 Technische Betrachtungen.....	69
13.2.4 Durchführungsarten.....	69
13.2.5 Prüfen	69
14 Instandhaltung	71
14.1 Allgemeines	71
14.2 Öl	72
14.2.1 Allgemeines	72
14.2.2 Indikatoren für Ölqualität und Transformatorqualität.....	73

14.3	Isolationsqualität.....	73
14.3.1	Allgemeines.....	73
14.3.2	Anforderungen an die Probennahme von Öl	75
14.3.3	Ölprüfungen	75
14.3.4	Handhabung, Lagerung und Aufbereitung.....	76
14.3.5	Ölkonservierungssystem.....	76
14.4	Stufenschalter	77
14.5	Zubehörteile und Armaturen	79
15	Überwachung	80
15.1	Allgemeines.....	80
15.2	Zustandsbeurteilung des Transformators im Betrieb.....	80
15.3	Wächtertypen	80
15.3.1	Allgemeines.....	80
15.3.2	Ölzustandsüberwachung.....	81
15.3.3	„Off-line“-Zustandsbeurteilung	81
15.3.4	„On-Line“- und „Off-line“-Überwachungseinrichtungen.....	82
15.3.5	Expertensysteme	84
15.3.6	Fingerabdruck	84
15.4	Zusammenfassung zur Überwachung	84
16	Auslegungsprüfung von Stromrichtertransformatoren	85
16.1	Allgemeines.....	85
16.2	Zeitplanung und Vertraulichkeit.....	85
16.3	Betreff für Auslegungsprüfung	87
16.3.1	Allgemeines.....	87
16.3.2	Informationen zur Anlage.....	87
16.3.3	Umgebungsbezogene Informationen.....	87
16.3.4	Besondere Anforderungen an den Transformator	88
	Literaturhinweise	92

Bilder

Bild 1 – Brückenanschluss für 6-Puls-Anordnung	14
Bild 2 – Brückenanschluss für 12-Puls-Anordnung	14
Bild 3 – Transformatorschaltungen Stern-Dreieck und Stern-Stern oder Dreieck-Dreieck und Dreieck-Stern ergeben einen Abstand von 30° elektrisch zwischen den ventilseitigen Spannungen	14
Bild 4 – 15° Phasendrehung wird vorzugsweise durch erweiterte Dreieck- oder Zickzack-Schaltung erreicht	15
Bild 5 – Doppelstern-Schaltung.....	15
Bild 6 – Typische Schaltung von Transduktoren.....	16
Bild 7 – Auslegung eines Spartransformators für offene Wicklungsstränge mit groben und feinen Regelstufen	17
Bild 8 – Übliche Auslegung des Spartransformators für geschlossene Wicklungsstränge mit groben	

und feinen Regelstufen.....	18
Bild 9 – Übliche Auslegung des Spartransformators für geschlossene Wicklungsstränge mit mehrfacher grober Regelung	19
Bild 10 – Auslegung eines Zusatz-Spartransformators für geschlossene Wicklungsstränge mit groben und feinen Regelstufen	20
Bild 11 – Auslegung eines Spartransformators für offene Wicklungsstränge mit groben und feinen Regelstufen	21
Bild 12 – Auslegung eines Spartransformators für geschlossene Wicklungsstränge mit groben und feinen Regelstufen.....	22
Bild 13 – Zwei Grundanordnungen der einzelnen Wicklungen eines Zweiwicklungstransformators	23
Bild 14 – Kopplungsimpedanz	25
Bild 15 – Typische Impedanzmodelle	26
Bild 16 – Bauteile eines typischen Industrie-Stromrichtertransformator-Isolationssystems	27
Bild 17– Isolationssystem, äquivalente R-C-Schaltung	29
Bild 18 – Spannungsverteilung vor und unmittelbar nach Polaritätsumkehr	30
Bild 19 – AC/DC-Umwandlung – Vereinfachte Darstellung.....	32
Bild 20 – Streufelder für Dreiwicklungstransformator mit eng gekoppelten Ventilwicklungen	38
Bild 21 – Streufelder für Dreiwicklungstransformator mit entkoppelten Ventilwicklungen.....	39
Bild 22 – Streufelder für Dreiwicklungstransformator mit locker gekoppelten doppelt konzentrischen Ventilwicklungen.....	40
Bild 23 – Streufelder für Dreiwicklungstransformator mit locker gekoppelten, doppelt aufeinandergeschichteten Ventilwicklungen	41
Bild 24 – Kurzschlussfehler-Bedingungen in einer Gleichrichterbrücke.....	64
Bild 25 – Anordnung von Ventil-Durchführungen	70
Bild 26 – Beispiele von Wechsel-, Gleichstrom und kombinierten elektrischen Feldverteilungen in der Nähe von HGÜ-Durchführungen und zugehörigen elektrischen Isolationssystemen.....	71
Tabellen	
Tabelle 1 – Anordnungen von zwei Wicklungen.....	24
Tabelle 2 – Daten zur Berechnung von Kurzschlussverlusten mit Oberschwingungsströmen	43
Tabelle 3 – Arten der Überwachung	83

Nationales Vorwort

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

Aktuelle Informationen zu diesem Dokument können über die Internetseiten von DKE (www.dke.de) und DIN (www.din.de) durch eine Suche nach der Dokumentennummer aufgerufen werden.

Die enthaltene IEC-Publikation wurde vom TC 14 „Power transformers“ der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) erarbeitet und unterliegt dem Copyright der IEC .

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

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

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.

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.

Die zweite Ausgabe der IEC-Publikation IEC 61378-3:2015, übernommen im vorliegenden Entwurf DIN IEC 61378-3 (VDE 0532-43), ersetzt die erste Ausgabe der IEC-Publikation IEC 61378-3:2006 und berücksichtigt folgende Änderungen:

- a) Überarbeitung des Abschnitts zu Verlusten, um die durch die zweite Ausgabe von **IEC 61378-1** eingeführten Änderungen zu berücksichtigen;
- b) Hinzufügen von zwei neuen Abschnitten zur Auslegungsüberprüfung von Stromrichtertransformatoren sowohl für industrielle Anwendungen als auch HGÜ-Anwendungen;
- c) Hinzufügen von Inhalten für Transformatoren, die an selbst- oder spannungsgeführte Umrichter (VSC) angeschlossen sind;
- d) Verweisung auf die Arbeit von CIGRE JWG A2/B4.28 zu HGÜ-Transformatoren.

Einleitung

0.1 Allgemeines

Die Normenreihe IEC 61378 besteht aus drei Teilen:

- Teil 1 gilt für Transformatoren im Zusammenhang mit allgemeinen „industriellen“ Anwendungen von Stromrichtern. (Kupferherstellung, Aluminiumverhüttung und die Elektrolyse bestimmter Gase).
- Teil 2 gilt für Transformatoren, die für HGÜ-Anwendungen benötigt werden.
- Teil 3 ist diese Anwendungsrichtlinie, welche die in 0.2 bis 1.3 beschriebenen Themenüberschriften enthält.

Der Anwendungsbereich von IEC 61378-1 ist beschränkt auf die Anwendung von Leistungsumrichtern mit beliebiger Bemessungsleistung. Übliche Anwendungen sind: Thyristorgleichrichter für Elektrolyse, Diodengleichrichter für Elektrolyse, Thyristorgleichrichter für große Antriebe, Thyristorgleichrichter für Altmetallschmelzöfen und Diodengleichrichter zur Einspeisung in Wechselrichter für Antriebe mit variabler Drehzahl. Die Norm behandelt auch die Regeleinrichtung, die in einer solchen Anwendung als Abwärtssteuerttransformator oder Spartransformator verwendet wird. Die höchste Spannung der Ventilwicklung für Betriebsmittel ist auf 36 kV begrenzt.

IEC 61378-2 behandelt Stromrichtertransformatoren, die in „HGÜ-Anwendungen“ eingesetzt werden. Es gibt zwei verschiedene Arten von HGÜ-Energieübertragungssystemen, bekannt unter dem Oberbegriff „Gegentakt“- und „Übertragungs“-Anordnung. Der Betrieb und die Bewertung von Transformatoren, die nach diesen zwei Systemen arbeiten, werden in Teil 2 und in diesem Teil von IEC 61378 behandelt.

Weder IEC 61378-1:2011 noch IEC 61378-2:2001 schließen ausdrücklich Transformatoren in ihrem Anwendungsbereich ein, die mit einem spannungsgeführten Umrichter (VSC; en: voltage source converter) verbunden sind. Da die Anwendung von VSC immer stärker verbreitet ist, wird in dieser Norm eine Richtlinie bereitgestellt.

0.2 Bemessungsdaten (Abschnitt 5)

Sowohl in IEC 61378-1 als auch in IEC 61378-2 unterscheiden sich die Bemessungsdaten von Stromrichtertransformatoren von den historisch gebräuchlichen. Im herkömmlichen Verfahren wurde der Effektivwert des Stromes zur Festlegung der Leistungsschild-Bemessungsdaten des Transformators verwendet. IEC 61378 bringt eine grundlegende Änderung des Verfahrens zur Festlegung der Bemessungsdaten des Transformators mit sich. Das Konzept der Verwendung grundlegender Komponenten von Spannung und Strom als Grundlage für die Bemessungsdaten des Transformatorleistungsschildes wird erläutert. Die von diesen grundlegenden Komponenten abgeleiteten Bemessungsdaten des Leistungsschildes, bilden die Grundlage der garantierten Impedanzen und Verluste.

0.3 Wicklungsanordnungen (Abschnitt 6)

Es gibt eine große Anzahl von Wicklungsanschlüssen und -anordnungen in industriellen und HGÜ-Anwendungen, die auf Stromrichtertransformatoren zugeschnitten sind. Sie wurden über viele Jahre entwickelt. Die Betriebskennwerte der verschiedenen Gleichrichteranschlüsse werden größtenteils durch die Normenreihe IEC 60146 abgedeckt. Im vorliegenden Teil von IEC 61378 werden die Anschlüsse insoweit behandelt, wie sie die Bauart und einige betriebliche Aspekte des Transformators beeinflussen.

Die Verwendung von Regelungsanordnungen ist in industriellen Anwendungen üblich. Der vorliegende Teil von IEC 61378 behandelt die Grundsätze für einige dieser Anordnungen.

0.4 Anzapfungen und Impedanzen (Abschnitt 7)

Die Impedanz von Transformatoren für HGÜ-Anwendungen erfordert besondere Aufmerksamkeit und Bauartlösungen. Die Anforderungen betreffen in erster Linie die Begrenzung der Impedanz-Verstellbarkeit über den gesamten Anzapfungsbereich, die Begrenzung der Impedanzunterschiede zwischen den

Transformatoren und in einigen Anwendungen die Impedanzunterschiede zwischen Stern- und Dreieckswicklungen. Diese Norm erörtert diese Anforderungen und ihre praktischen Aspekte.

Im allgemeinen ist der Anzapfungsbereich in Stromrichtertransformatoren größer als in herkömmlichen Transformatoren. Diese Auswirkung des breiteren Anzapfungsbereichs auf den Transformator und den Stufenschalter wird in dieser Norm behandelt.

0.5 Isolationsaspekte und Spannungsprüfungen ([Abschnitt 8](#))

In [Abschnitt 8](#) werden zwei Aspekte behandelt. Erstens der zunehmende Gebrauch von „hybriden“ Isolationssystemen in Transformatoren für industrielle Anwendungen. Zweitens die Fähigkeit von Transformator-Isolationsaufbauten von HGÜ-Transformatoren, wenn sie mit Gleichspannung und im Betrieb geprüft werden.

Die elementaren Grundsätze, die Prüfverfahren und die Prüfspannungspegel, die bei der Wechsel- und Gleichspannungsprüfung eingesetzt werden, werden erörtert. Es werden auch die Sicherheitsabstände zusammen mit den vorgeschlagenen Prüfbedingungen überprüft.

0.6 Verluste ([Abschnitt 9](#))

Der vorliegende Teil von IEC 61378 behandelt detailliert die Ableitung von verwendeten Grundsätze, Prüfungen und Berechnungsverfahren, welche die Auswirkungen von nicht-sinusförmigen Lastströmen in Stromrichtertransformatoren aller Arten berücksichtigen.

Die Grundsätze der Prüfung bei zwei Frequenzen für HGÜ-Anwendungen werden zusammen mit einem ausgearbeiteten Beispiel der Berechnung einzeln aufgeführt. Die aus diesen Prüfungen und Berechnungen hergeleiteten Verluste bilden die Grundlage für die Bestimmung der Prüfverluste und Ströme, die verwendet werden, um die Öl- und Wicklungsgradienten während der Wärmeprüfung aufzustellen.

0.7 Kern- und Geräuschaspekte ([Abschnitt 10](#))

Die Auswirkungen der Spannungsüberschwingungen und eines umlaufenden Vormagnetisierungs-Gleichstroms werden bezüglich der Ausführung und Bauart eines Kerns besprochen und zusammengefasst.

Die Ursachen von Geräuschen und die Unterschiede, die man zwischen den üblichen Schallmessungen in der Fabrik erwarten kann und denen, die am Aufstellort erwartet und festgestellt werden, werden betrachtet.

Die jüngsten Verfahren zur Bewertung von Schall im Zusammenhang mit Stromrichtertransformatoren werden besprochen.

0.8 Transformator-Pflichtenheft ([Abschnitt 11](#))

Transformatoren für Umrichter unterscheiden sich bezüglich des Transformator-Pflichtenheft (Transformatorspezifikation) wesentlich von Leistungstransformatoren. Ein Entwurf der in jedem Pflichtenheft erforderlichen Einzelheiten ist als Teil der Richtlinie, für beide Arten von Pflichtenheften, technischen und funktionalen, enthalten.

Es wird eine Anleitung dafür gegeben, was während der Angebots- und Auftragsphase vom Käufer festgelegt und was vom Hersteller erwartet werden sollte.

0.9 Kurzschlussbetrachtungen ([Abschnitt 12](#))

In gewöhnlichen Leistungstransformatoren ist die Berechnung der Kurzschlussströme einzig von den Impedanz- und Widerstandsbau-elementen des Transformators und der angeschlossenen Spannungsversorgung abhängig.

Bei Transformatoren, die zur Versorgung von Umrichteranwendungen eingesetzt werden, gibt es Fehlerbedingungen innerhalb des Umrichters, die betrachtet werden müssen, wenn die Spitzenwerte der

Fehlerströme möglicherweise größer als diejenigen sind, die von gewöhnlichen Leistungstransformatoren abgeleitet werden. Diese Bedingungen werden im vorliegenden Teil von IEC 61378 im Detail behandelt.

0.10 Bauteile (Abschnitt 13)

Bei der Auslegung von Transformatoren für industrielle und HGÜ-Stromrichter-Anwendungen ist die Wahl und der Betrieb des Stufenschalters entscheidend. Im vorliegenden Teil von IEC 61378 werden einige der Grundsätze umrissen, die den Einsatz von Stufenschaltern in diesen Anwendungen bestimmen.

In der HGÜ-Anwendung ist die Wahl und die Integration der ventileitigen Durchführungen in die Gesamtkonstruktion von ausschlaggebender Bedeutung.

Die allgemeinen Anforderungen und Empfehlungen für die Konstruktion, Integration der Durchführungen im Transformator und die geforderten Prüfungen werden detailliert aufgeführt. Eine IEC-Norm eigens für HGÜ-Durchführungen ist in Vorbereitung und die Empfehlungen im vorliegenden Teil von IEC 61378 beziehen sich auf die Anforderungen der neuen Norm.

0.11 Instandhaltung (Abschnitt 14)

Statistiken lassen darauf schließen, dass die HGÜ-Transformatoren einen hohen Standard der Instandhaltung erfordern. Die Positionen, die eine besondere Aufmerksamkeit erfordern, sind Stufenschalter und die ventileitigen Durchführungen. In dieser Norm wird die Aufmerksamkeit auf die Instandhaltungsanforderungen gelenkt.

0.12 Monitoring und Vor-Ort-Untersuchungen (Abschnitt 15)

Das Transformator-Monitoring wird empfohlen, falls Vor-Ort-Probleme minimiert werden sollen und in dieser Hinsicht Zustandsüberwachung diskutiert wird. Im vorliegenden Teil von IEC 61378 werden auch Empfehlungen für zu befolgende Verfahren und Vorgehensweisen im Fall eines Vor-Ort-Fehlers gegeben. Diese Empfehlungen sind derart, dass ausschlaggebende Hinweise und Daten im Anfangsstadium der Untersuchung nicht unbrauchbar oder verfälscht werden.

Der Gebrauch der Zustandsüberwachung in dieser Anwendung wird ebenfalls in [Abschnitt 15](#) besprochen.

0.13 Zusätzliche Informationsquellen

Die Vorbereitung des vorliegenden Teils von IEC 61378, insbesondere für HGÜ-Stromrichteranwendungen nach [IEC 61378-2](#), wurde maßgeblich von den Arbeitspapieren zu verschiedenen Themen der CIGRÉ Gemeinschaftsarbeitsgruppe 12/14.10 beeinflusst.

Stromrichtertransformatoren – Teil 3: Anwendungsrichtlinie

1 Anwendungsbereich

Dieser Teil von IEC 61378 gibt dem Anwender Informationen zu bestimmten Themen in Bezug auf industrielle und HGÜ-Stromrichtertransformatoren deren Auslegung, Konstruktion, Prüfungen und Betriebsbedingungen von herkömmlichen in Versorgungsnetzen eingesetzten Transformatoren abweicht. Zusätzlich ist das Ziel des vorliegenden Teils von IEC 61378, den Herstellern den technischen Hintergrund zu vermitteln, der die Grundlage der in IEC 61378-1 und IEC 61378-2 verwendeten Grundsätze bildet.

Es ist beabsichtigt, dass dieser Teil von IEC 61378 die Anwendungsrichtlinie für Leistungstransformatoren, IEC 60076-8, ergänzt und nicht ersetzt, da viele der darin enthaltenen Grundsätze gleichermaßen für Stromrichtertransformatoren anwendbar sind.

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 60076-5:2006, *Power transformers – Part 5: Ability to withstand short circuit*

IEC 60076-14:2013 *Power transformers – Part 14: Liquid-immersed power transformers using high-temperature insulation materials*

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

IEC 60422, *Mineral insulating oils in electrical equipment – Supervision and maintenance guidance*

IEC 61378-1:2011, *Converter transformers – Part 1: Transformers for industrial applications*

IEC 61378-2:2001, *Convertor transformers – Part 2: Transformers for HVDC applications*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe nach IEC 61378-1 und IEC 61378-2.

4 Symbole und Abkürzungen

Kurzzeichen	Bedeutung	Einheit
I_1	Effektivwert des Grundswingungsanteils des netzseitigen Bemessungsstroms	A
I_x	Effektivwert des Prüfstroms der Kurzschlussverluste bei der Frequenz f_x	A
I_{LN}	Effektivwert des nicht-sinusförmigen Laststroms im Betrieb in der betrachteten Wicklung bei Bemessungslast eines Stromrichters	A
I_h	Effektivwert des Oberschwingungsstroms der Ordnung h	A
I_{eq}	Effektivwert des gleichwertigen sinusförmigen Prüfstroms bei dem sich der Kurzschlussverlust der	A

Kurz- zeichen	Bedeutung	Einheit
	Wicklungen im Betrieb ergibt	
h	Ordnungszahl der Oberschwingung	
U_1	Effektivwert des Grundschwingungsanteils der Leiter/Leiter-Bemessungsspannung	V
S_r	Bemessungsleistung des Transformators	VA
P_1	Kurzschlussverluste des Transformators, gemessen bei Strom I_1	W
P_x	Kurzschlussverluste des Transformators, gemessen bei Strom I_x	W
$I_1^2 R$	Ohmsche Verluste bei Bemessungsstrom I_1	W
R	Gleichstromwiderstand der Wicklungen einschließlich der inneren Leiter	Ω
P_{WE1}	Wirbelstromverluste in den Wicklungen mit Strom I_1	W
P_{SE1}	Streuverlust in den Bauteilen (ausgenommen Wicklungen) bei Strom I_1	W
P_N	Kurzschlussverluste des Transformators im Betrieb mit Strom I_N	W
f_1	Bemessungsfrequenz und auch Grundfrequenz (50 Hz oder 60 Hz)	Hz
f_x	Frequenz ≥ 150 Hz, die verwendet wird, um die Verteilung der Streuverluste zu bestimmen (nur bei HGÜ-Transformator-Anwendungen, nicht anwendbar für industrielle Transformatoranwendungen)	Hz
f_h	Frequenz bei der Oberschwingung der Ordnung h	Hz
F_{WE}	Erhöhungsfaktor für Wirbelstromverluste in den Wicklungen	
F_{SE}	Erhöhungsfaktor für Streuverluste in den Bauteilen	
K_h	Verhältnis des Stroms I_h zum Bemessungsstrom I_1	
U_{ac}	unabhängig eingespeiste Prüf-Wechselspannung für die Ventilwicklungen (Effektivwert)	V
U_m	höchste Systemspannung der netzseitigen Wicklungen	V
U_{dm}	höchste Gleichspannung pro Ventilbrücke	V
U_{dc}	unabhängig eingespeiste Prüf-Gleichspannung für die Ventilwicklungen	V
U_{pr}	Polaritätsumkehr-Prüfspannung für die Ventilwicklungen (Gleichspannung)	V
U_{vm}	höchste Betriebs-Wechselspannung der Ventilwicklungen des Stromrichtertransformators zwischen den Leitern	V
N	Anzahl der 6-Puls-Brücken in Reihe vom gleichstromseitigen Nullleiter bis zur an den Transformator angeschlossenen Gleichrichterbrücke	
ANMERKUNG „Ventilseite“ und „Netzseite“ beschreiben die äußeren Anschlüsse der Transformatorwicklungen. Die Netzseite bezieht sich auf die an das Wechselstromnetz angeschlossene Wicklung und die Ventilseite auf die Wicklung, die an den Stromrichter angeschlossen ist.		

5 Bemessungsdaten

In IEC 61378-1 und IEC 61378-2 ist angegeben, dass die Bemessungskennwerte des Transformators als sinusförmige Größen im eingeschwungenen Zustand von Strom und Spannungen bei Bemessungs-Grundfrequenz angegeben werden. Die garantierten Verluste, Impedanzen und Schallpegel müssen diesen Werten entsprechen. Die Bemessungsspannung und der Bemessungsstrom beziehen sich auf die Grundgrößen, Leiter-Leiter-Spannung und Netzstrom.

Grundbauteile werden ausgewählt, um eine gemeinsame Plattform für garantierte Größen wie Verluste und Impedanzen einzurichten, unabhängig von den Betriebsbedingungen und dadurch vom Spektrum des

Oberschwingungsanteils. Es sollte beachtet werden, dass die Prüfungen zur Einrichtung der Betriebskennwerte nur mit sinusförmigen Größen ausgeführt werden können.

Wenn industrielle Transformatoreinheiten mit Transduktoren (sättigbare Drosseln) in ihrem Kessel ausgerüstet sind, stellen Transformatorkerne aufgrund der durch sie verursachten Verzerrung der Wellenformen von Strom und Spannung eine Herausforderung für die Prüfungen dar. Vor der Unterzeichnung des Vertrags muss zwischen dem Lieferanten und dem Käufer eine Vereinbarung über die Prüfbedingungen erreicht werden. Es wurde kein Verfahren allgemein anerkannt. Einige werden in [IEC 61378-1:2011, Anhang G](#), dargestellt.

Garantierte Übertemperaturwerte sind für eine bestimmte Lastbedingung wichtig, wie sie durch Vereinbarung zwischen Käufer und Hersteller festgelegt wird. Da ein Stromrichtertransformator einem Strom mit einem bestimmten Oberschwingungsanteil ausgesetzt ist, werden sich die tatsächlichen Verluste von den Verlusten, die durch einen rein sinusförmigen Strom entwickelt werden, unterscheiden. Im allgemeinen werden Oberschwingungen im Strom, verglichen mit dem Betrieb mit rein sinusförmigem Strom, zu einer Erhöhung der Kurzschlussverluste führen.

In Bezug auf die Bauart des Transformators ist es wichtig zu unterscheiden zwischen:

- Anwendungen mit im Wesentlichen sinusförmiger Spannung über der netzseitigen Wicklung des Transformators, und
- Anwendungen mit nicht-sinusförmiger Spannung, bei welchen die Primärwicklung eines Transformators von einem Stromrichterkreis für Wechselstrom-Leistungssteuerung oder veränderliche Frequenzumrichtung erregt wird.

Informationen zur Stromrichteranwendung sollten im Pflichtenheft des Transformators bereitgestellt werden.

Der garantierte Wert von Leerlaufverlusten ist festgelegt durch die sinusförmige Bemessungsspannung.

Der aktuelle Kurzschlussverlust im Stromrichterbetrieb wird mit ausreichender Genauigkeit durch das in [IEC 61378-1:2011, 6.2](#), und in [IEC 61378-2](#) vorgestellte Berechnungsverfahren abgeschätzt. Aus diesem Satz von Gleichungen kann der entsprechende Prüfstrom zur Ermittlung der entsprechenden Übertemperatur abgeleitet werden, siehe [IEC 61378-1:2011, 7.6](#), oder [IEC 61378-2:2001, 10.5](#).

Es sollte ebenfalls beachtet werden, dass der aktuelle Laststrom im Betrieb möglicherweise höher ist als der Bemessungsstrom, wenn er mit einem Messgerät zur Effektivwertanzeige des Stromes gemessen wird, da der auf dem Leistungsschild angegebene Bemessungsstrom sich auf die Grundschwingung des Laststroms bezieht.

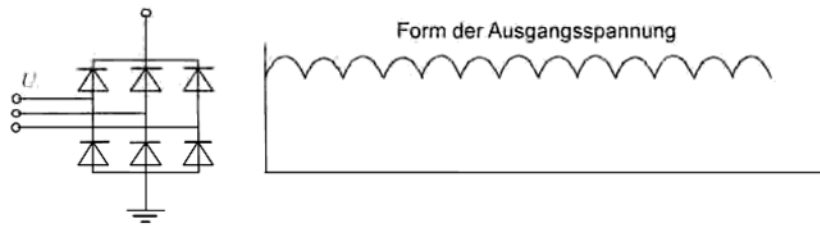
6 Wicklungsanordnungen

6.1 Allgemeines

Dieser Abschnitt beschreibt die verschiedenen Versionen von Wicklungsanordnungen, die in industriellen und in HGÜ-Anwendungen vorhanden sein können.

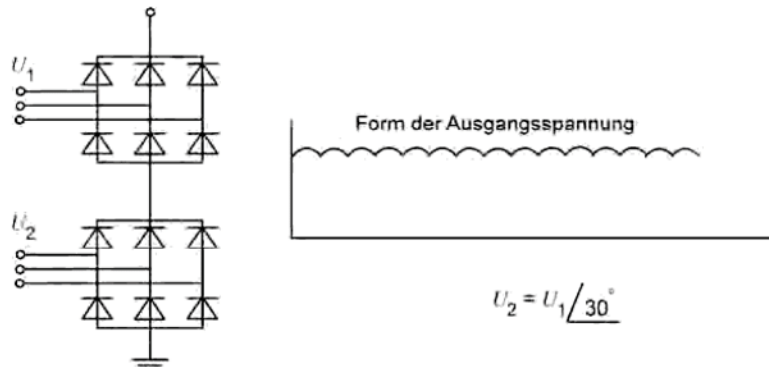
Im Allgemeinen werden die Wicklungen für die Bereitstellung einer 6-Puls-Stromrichterbrücke eines symmetrischen Drehstromsystems angeordnet. Der Stromrichter wird den Strom jeder Phase zweimal für die Höchstdauer von 120° elektrisch führen, oder für ein Drittel eines Zyklus, einmal in positiver und einmal in negativer Richtung. Siehe auch [Bild 1](#).

Zwei oder mehr 6-Puls-Brücken können in Reihe oder parallel geschaltet werden. Bei Versorgung der einzelnen Brücken mit netzseitig zeitversetzten Dreiphasenspannungen, wird der Oberschwingungsanteil der netzseitigen Ströme und der ventileitigen Spannungen und Ströme verringert. Mit zwei 6-Puls-Brücken, die in einer so genannten 12-Puls-Anordnung angeschlossen werden, müssen die zwei Drehstromversorgungen um 30° elektrisch getrennt sein. Noch höhere Pulszahlen der Stromrichter benötigen eine geringere Verschiebung der Systeme. Siehe auch [Bild 2](#) und [Bild 3](#).



ANMERKUNG Das Gleichrichtersymbol bedeutet entweder Diode oder Thyristor.

Bild 1 – Brückenanschluss für 6-Puls-Anordnung



ANMERKUNG Das Gleichrichtersymbol bedeutet entweder Diode oder Thyristor.

Bild 2 – Brückenanschluss für 12-Puls-Anordnung

ANMERKUNG 1 Steigende Pulszahl verringert den Oberschwingungsanteil von Spannung und Strom.

Eine häufige Anordnung um zwei Drehstromsysteme mit einem Abstand von 30° elektrisch zu erhalten, ist der Anschluss von zwei Transformatoren an eine gemeinsame netzseitige Sammelschiene. Ein Transformator hat die gleiche Wicklungsschaltung auf der Netz- und Ventilseite, Stern-Stern oder Dreieck-Dreieck. Der andere Transformator hat die Schaltung Stern-Dreieck oder Dreieck-Stern.

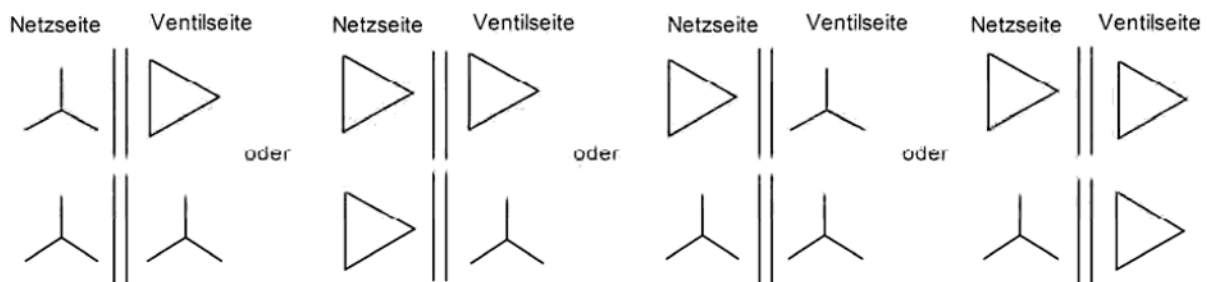


Bild 3 – Transformatorschaltungen Stern-Dreieck und Stern-Stern oder Dreieck-Dreieck und Dreieck-Stern ergeben einen Abstand von 30° elektrisch zwischen den ventilseitigen Spannungen

Zwei identische Transformatoren mit einer Wicklungsschaltung, die eine Phasendrehung von 15° elektrisch zwischen der netzseitigen und ventilseitigen Spannung bewirkt, können dazu verwendet werden, eine 30° Phasendrehung zwischen den zwei ventilseitigen Spannungen bereitzustellen. Ein Transformator wird für positive Drehung (1U-2U, 1V-2V und 1W-2W) geschaltet, der andere für negative Drehung (1U-2V, 1V-2U und 1W-2W). Mit dieser Anordnung erhält man +15° elektrisch und -15° elektrisch auf der Ventilseite im Vergleich zur Netzseite.

Eine Drehung um 15° elektrisch kann am besten erreicht werden, indem eine der zwei Wicklungen im Zickzack oder erweiterten Dreieck geschaltet wird. Siehe auch Bild 4.



Bild 4 – 15° Phasendrehung wird vorzugsweise durch erweiterte Dreieck- oder Zickzack-Schaltung erreicht

ANMERKUNG 2 Die zwei Schaltungen können auch für andere Phasenwinkel wie z. B. 7,5° elektrisch für 24-Puls-Brücken genutzt werden.

Industrielle Einheiten mit Tertiärwicklungen, belastet mit Filter und Kompensation, werden in IEC 61378-1:2011, 5.7, behandelt. Es sollte beachtet werden, dass das Anschließen des Filters an die Tertiärwicklung zu einer Spannung höher als die Bemessungsspannung führt. Folglich wird der Grundschwingsstrom des durch die Filterimpedanz fließenden Stroms höher als der Bemessungsstrom sein, wie im vorgenannten Abschnitt erwähnt. Deshalb ist es wichtig, dass der Systemingenieur dieses Phänomen bei der Festlegung des höchsten Grundschwingsstroms der Tertiärwicklung berücksichtigt.

6.2 Industrielle Anwendungen

6.2.1 Gleichrichter

Im Allgemeinen werden Stromrichtertransformatoren für industrielle Anwendungen für ziemlich hohe Ströme auf der Ventilseite konstruiert. Die Ventilwicklungen müssen deshalb einfache Schaltungen wie z. B. Stern oder Dreieck besitzen.

Für manche industrielle Anwendungen mit hohen Gleichströmen und geringer Gleichspannung ist es häufig von Vorteil, eine Doppelstern-Anordnung statt einer Brückenanordnung zu verwenden.

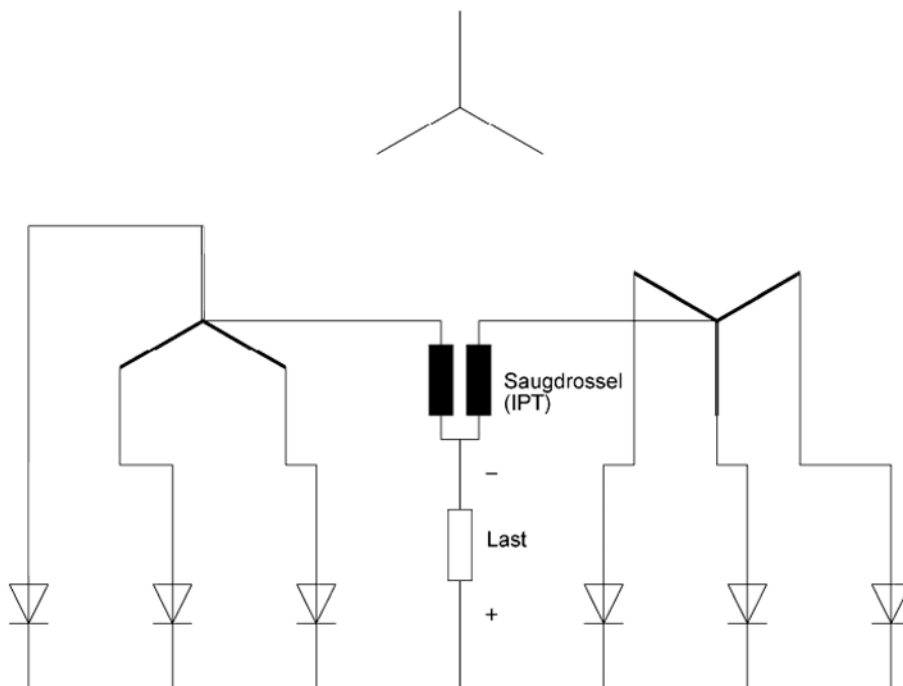


Bild 5 – Doppelstern-Schaltung

Die Netzseite weist entweder einer Stern- oder Dreieckschaltung auf und die Ventilseite weist eine Doppelsternschaltung mit 180° Phasenverschiebung auf. Die Ventilwicklungen sollten physikalisch ver-

schachtelt sein, um eine Gleichstrommagnetisierung des Kerns zu vermeiden und die magnetischen Streuflüsse (Wirbelstromverluste) in Bezug auf geradzahlige Oberschwingungen zu minimieren. Eine Saugdrossel (IPT; en: interphase transformer) zwischen den zwei Sternpunkten ist zusammen mit einem dreischenkigen Kern erforderlich, um eine 120° Ventilwicklung sicherzustellen und die Auswirkungen einer Unsymmetrie zwischen den zwei Neutralleiterströmen der Ventilwicklungen zu minimieren. Wenn diese zwei Neutralleiterströme symmetrisch sind, darf ein fünfschenkiger Kern statt des IPT verwendet werden.

Der Transformator für eine 6-Puls-Stromrichterbrücke ist eine Drehstromeinheit mit im Stern oder Dreieck geschalteten Ventilwicklungen.

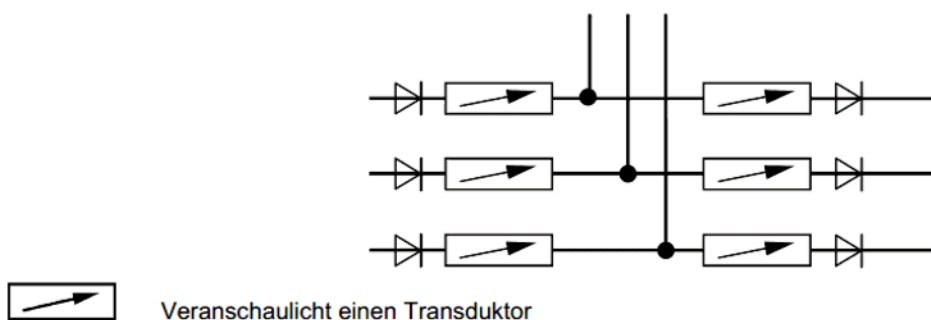
12-Puls-Verhalten kann durch den Einsatz von zwei 6-Puls-Einheiten mit unterschiedlichen Schaltgruppen erreicht werden oder durch Einsatz eines Transformators mit zwei Ventilwicklungen, die in Stern und Dreieck geschaltet sind. Die letzte Lösung erfordert einen normalen Dreiphasenkern.

Komplexere Fälle erfordern eine andere Anordnung mit Stern und Dreieck auf der Primärseite und im Stern oder Dreieck geschaltete Ventilwicklungen. Diese besonderen Anordnungen erfordern möglicherweise außerdem eine besondere Kernkonstruktion. Bei 12-Puls-Doppelsterngleichrichtern ist das Erreichen einer Phasenverschiebung von 30° an den netzseitigen Wicklungen (Stern – Dreieck, Zickzack) erforderlich.

Stromrichteranlagen mit mehr als 12-Pulsen fordern die Anwendung von unterschiedlichen Phasenwinkeln zwischen den verschiedenen Einheiten. Dies wird in den meisten Fällen erreicht, indem eine Zickzackschaltung oder eine erweiterte Dreieckschaltung verwendet wird, oder in seltenen Fällen eine Polygon-schaltung. Eine detaillierte Beschreibung und Beispiele sind in IEC 61378-1:2011, Anhang I, enthalten.

Die physikalische Anordnung des Transformators wird möglichst mit der Ventilwicklung als äußerer Wicklung durchgeführt, um einfache Anordnungen der ventileitigen Ausgänge zu bieten. Die ventileitige Ausgangsanordnung hängt vom Stromrichteraufbau ab.

Falls der Stromrichter den Einsatz von Transduktoren erfordert, sind diese allgemein im gleichen Kessel des Transformators und in diesem Gehäuse untergebracht, und es ist notwendig zwei Leitungsausgänge je Phase bereitzustellen. Transduktoren, sofern vorhanden, dürfen entsprechend Bild 6 angeschlossen werden.



ANMERKUNG Das Gleichrichtersymbol bedeutet entweder Diode oder Thyristor.

Bild 6 – Typische Schaltung von Transduktoren

Die physikalische Auslegung (sowohl innerhalb als auch außerhalb des Kessels) von Hochstrom-Sammelschienen wirkt sich möglicherweise erheblich auf die Kurzschlussverluste, die Kurzschlussimpedanz und Kessel-Heißpunkte eines Transformators aus. In IEC 61378-1:2011, Anhang F, ist ein Leitfaden zur Abschätzung dieser Auswirkungen enthalten.

6.2.2 Spannungsregelung

Im Allgemeinen gibt es die Notwendigkeit zur Spannungsregelung zwischen Versorgungs- und Ventilspannungen und oft ist der Regelbereich ziemlich groß, von ein paar Prozent bis zu 100 % der Ventilwicklungsspannung. Der Zweck des weiten Anzapfungsbereichs ist es, den Verbrauch von Blindleistung und die Verschmutzung durch Oberschwingungen, im Zusammenhang mit dem Stromrichterbetrieb,

zu reduzieren. Aus praktischen Gründen erfordert der große Regelbereich oft einen eigenen Regeltransformator zwischen dem Wechselspannungsanschluss und dem Stromrichtertransformator selbst.

Abhängig von der Netzspannung kann die Regeleinheit entweder als Spartransformator oder mit zwei einzelnen Wicklungen gebaut werden, um die Risiken des Eintritts von hohen Transienten-Überspannungen in den Stromrichtertransformator zu reduzieren.

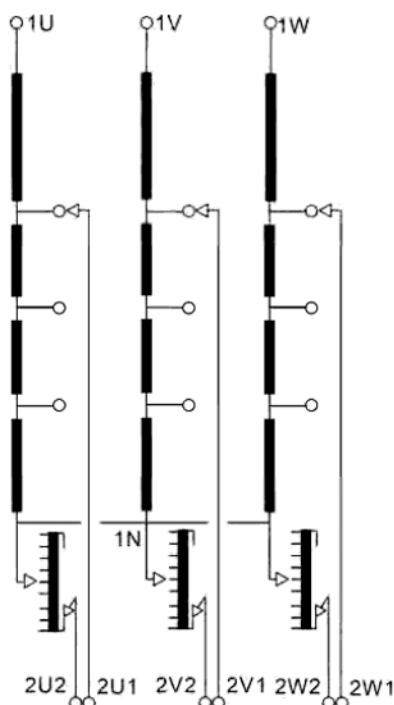
6.2.3 Spartransformatoraufbau

6.2.3.1 Allgemeines

Verschiedene häufige Schaltungen sind in den Bildern 7 bis 13 dargestellt.

6.2.3.2 Sternschaltung – offene Wicklungsstränge

Der schematische Aufbau der Wicklung ist in Bild 7 dargestellt.

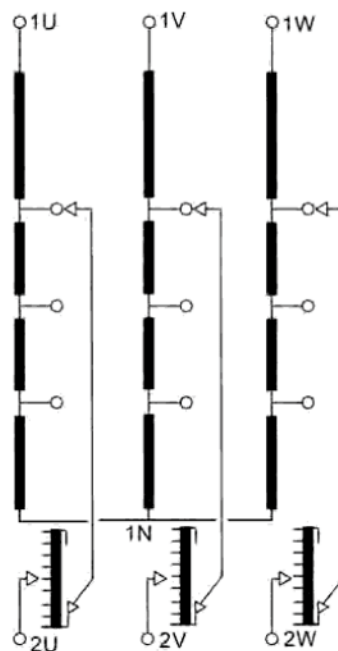


Legende

1U – Netz	2U1 – Stromrichtertransformator	2U2 – Stromrichtertransformator
1N – Netz-Sternpunkt	1V – Netz	2V1 – Stromrichtertransformator
	2V2 – Stromrichtertransformator	
1W – Netz	2W1 – Stromrichtertransformator	2W2 – Stromrichtertransformator

Bild 7 – Auslegung eines Spartransformators für offene Wicklungsstränge mit groben und feinen Regelstufen

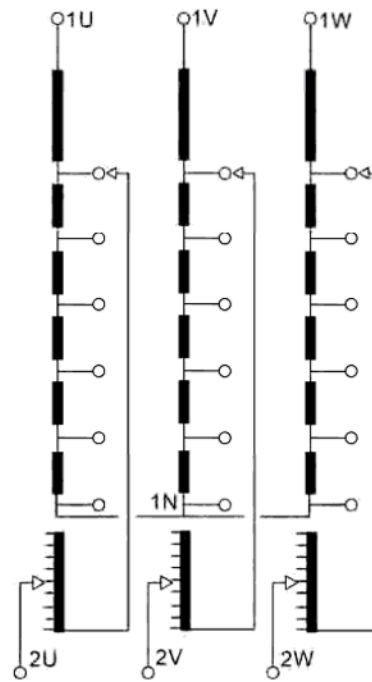
6.2.3.3 Sternschaltung – geschlossene Wicklungsstränge



Legende

	1U – Netz	2U – Stromrichtertransformator
1N – Netz-Sternpunkt	1V – Netz	2V – Stromrichtertransformator
	1W – Netz	2W – Stromrichtertransformator

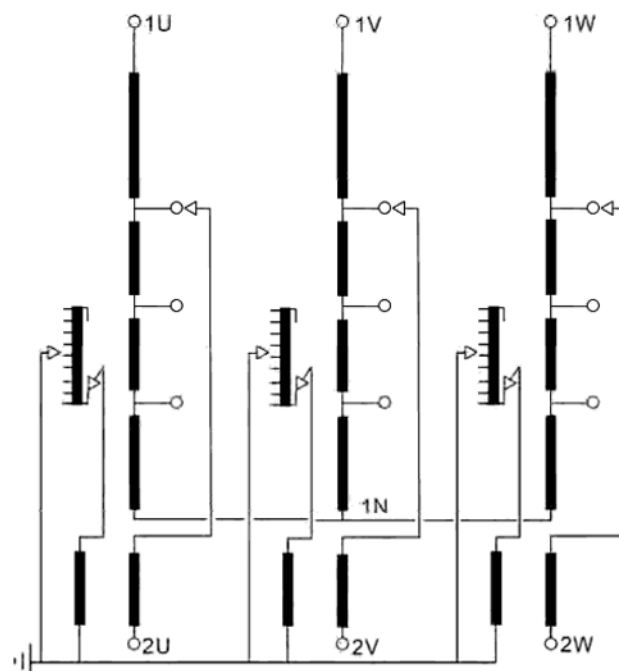
Bild 8 – Übliche Auslegung des Spartransformators für geschlossene Wicklungsstränge mit groben und feinen Regelstufen



Legende

1U – Netz	2U – Stromrichtertransformator
1N – Netz-Sternpunkt	1V – Netz
1W – Netz	2V – Stromrichtertransformator
	2W – Stromrichtertransformator

Bild 9 – Übliche Auslegung des Spartransformators für geschlossene Wicklungsstränge mit mehrfacher grober Regelung

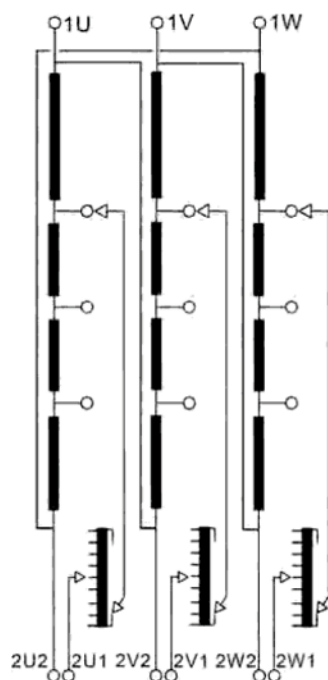


Legende

	1U – Netz	2U – Stromrichtertransformator
1N – Netz-Sternpunkt	1V – Netz	2V – Stromrichtertransformator
	1W – Netz	2W – Stromrichtertransformator

Bild 10 – Auslegung eines Zusatz-Spartransformators für geschlossene Wicklungsstränge mit groben und feinen Regelstufen

6.2.3.4 Sternschaltung – Offene Wicklungsstränge

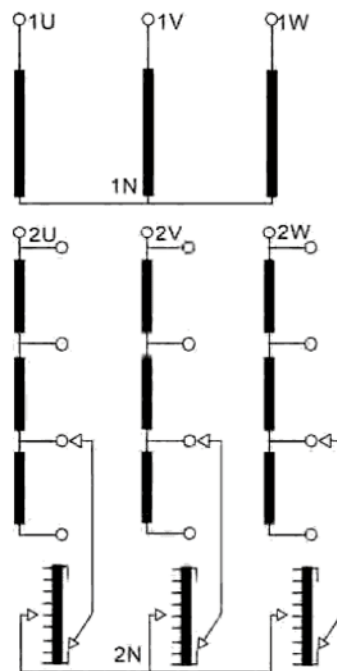


Legende

1U – Netz	2U1 – Stromrichtertransformator	2U2 – Stromrichtertransformator
1V – Netz	2V1 – Stromrichtertransformator	2V2 – Stromrichtertransformator
1W – Netz	2W1 – Stromrichtertransformator	2W2 – Stromrichtertransformator

Bild 11 – Auslegung eines Spartransformators für offene Wicklungsstränge mit groben und feinen Regelstufen

6.2.3.5 Zweiwicklungsausführung



Legende

	1U – Netz		2U – Stromrichtertransformator
1N – Netz-Sternpunkt	1V – Netz	2N – Sekundär-Sternpunkt	2V – Stromrichtertransformator
	1W – Netz		2W – Stromrichtertransformator

Bild 12 – Auslegung eines Spartransformators für geschlossene Wicklungsstränge mit groben und feinen Regelstufen

6.3 HGÜ-Anwendungen

6.3.1 Verschiedene Arten von Transformatoranordnungen

Im Allgemeinen werden HGÜ-Übertragungen für beträchtliche Nennleistungen mit Anschlüssen an Hochspannungs-Wechselstromnetze errichtet. Um Oberschwingungen in den Wechsel- und Gleichstromnetzen zu verringern, werden die Brücken üblicherweise in 12-Puls-Anordnungen gebaut. Meistens haben die Transformatoren die Wicklungen auf der Netzseite im Stern geschaltet, um die nicht einheitlichen Isolationsanforderungen und eine Spannungsregelung nahe der Erde auszunutzen. Systemforderungen und effizienter Betrieb des Stromrichters erfordern häufig ziemlich umfangreiche Spannungsregelungen, um im Bereich von bis zu ca. 40 % der Spannung auf dem Leistungsschild zu sein.

Abhängig von Nennleistung, Spannungen und physikalischen Einschränkungen können Stromrichtertransformatoren als einphasige oder dreiphasige Einheiten gebaut werden.

Mit den folgenden Lösungen ist es möglich HGÜ-Transformatoren mit 12-Puls-Brücken umzusetzen.

- Sechs einphasige Zweiwicklungstransformatoren.
 - Drei in Stern-/Dreieckschaltung.
 - Drei in Stern-/Sternschaltung.
- Drei einphasige Dreiwicklungstransformatoren.
 - Alle in Stern-/Dreieck-Sternschaltung.

- c) Zwei Drehstromtransformatoren.
 - Einer in Stern-/Dreieckschaltung.
 - Einer in Stern-/Sternschaltung.
- d) Ein Dreiwicklungstransformator.
 - In Stern-/Dreieck-Sternschaltung.

Ein Stromrichtertransformator wird allgemein mit zwei oder drei Hauptwicklungen gebaut. Eine dritte Wicklung ist nur in einigen besonderen Fällen erforderlich, z. B. Einspeisung der Prüfspannung, Anschluss an besondere Filteranordnungen.

6.3.2 Wicklungsanordnungen

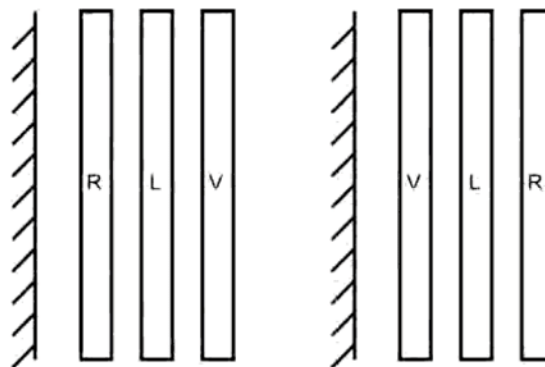
6.3.2.1 Allgemeines

In Kerntransformatoren sind die Wicklungen zylinderförmig und konzentrisch um den Kernschenkel angeordnet. Der Anzapfungsteil der netzseitigen Wicklung bildet im Allgemeinen eine eigene physikalisch getrennte Wicklung, die Steuerwicklung. Die einzelnen Wicklungen haben annähernd gleiche Höhe und gleiche Verteilung der Amperewindungen über die Wicklungshöhe.

Im Allgemeinen ist die Steuerwicklung physikalisch nahe dem Hauptteil der Netzwicklung angeordnet aber nicht zwischen Ventil- und Netzwicklung (siehe [Abschnitt 7](#) zu Anzapfungen und Impedanzen und [Abschnitt 9](#) zu Verlusten).

6.3.2.2 Zwei Wicklungen

Im Allgemeinen gibt es zwei Möglichkeiten, die einzelnen Wicklungen in einem Zweiwicklungstransformator anzuordnen, wie vorgenannt in Bild 13 dargestellt. Die Haupt- und Steuerwicklungen bilden die netzseitigen Wicklungen. Die ventilseitige Wicklung besteht aus einer einzelnen Wicklung.



Legende

- R Steuerwicklung (Anzapfung)
- L Hauptwicklung (Netz)
- V Ventilwicklung

Bild 13 – Zwei Grundanordnungen der einzelnen Wicklungen eines Zweiwicklungstransformators

Tabelle 1 – Anordnungen von zwei Wicklungen

Relative Lage der Wicklung	Vorteile	Nachteile
Steuerung – Netz – Ventil	Gleichstrom-Ausgangsleitung leicht anzuordnen Steuerung auf der Sternpunktseite	Mechanische Ausführung der Ausgangsleitungen für die Steuerwicklung Wechselstrom-Ausgangsleitung Beschränkte Lösung für die Steuerwicklung
Ventil – Netz – Steuerung	Wechselstrom-Steuer-Ausgangsleitung leicht anzuordnen Steuer-Ausgangsleitung leicht anzuordnen Steuerung auf der Sternpunktseite	Gleichstrom-Ausgangsleitung etwas schwerer anzuordnen

6.3.2.3 Drei Wicklungen

Die Hauptlösung entspricht dem Folgenden:

Bei der Auslegung von Einphasentransformatoren gibt es allgemein zwei bewickelte Schenkel, einen für Stern/Dreieck- und den zweiten für Stern/Stern-Schaltung. Dies bedeutet, dass die Ventilwicklung der Dreieckschaltung die $\sqrt{3}$ -fache Anzahl Windungen der Wicklung in Sternschaltung hat, aber einen Laststrom von $1/\sqrt{3}$ des Stroms der Wicklung in Sternschaltung.

Die relativen Lagen der einzelnen Wicklungsschalen sind die gleichen, wie die Lagen bei einem Zweiwicklungstransformator (siehe Tabelle 1).

Wenn die physikalische Größe nur begrenzte Bemessungsleistungen und Netzspannungen zulässt, z. B. ein Gegentakt-Stromrichter mittlerer Größe, darf der Transformator als dreiphasiger Dreiwicklungstransformator gebaut werden. Anforderungen an gleiche Impedanzen zwischen dem netzseitigen Anschluss und den zwei Ventilanschlüssen erfordern oft die Planung mit zwei Wicklungsanordnungen, die axial auf dem gleichen Schenkel angeordnet sind, einer so genannten axialen Unterteilung. Die zwei netzseitigen Wicklungen mit ihren Steuerwicklungen sind parallel angeschlossen und eine der Ventilwicklungen ist im Dreieck und die andere im Stern geschaltet. Die relative Lage der einzelnen physikalisch getrennten Wicklungen muss mit [Bild 13](#) übereinstimmen.

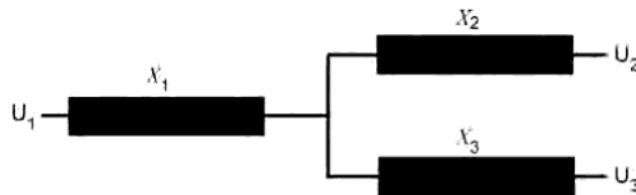
Anordnungen, in der jede der zwei ventilseitigen Wicklungen zwei konzentrische Lagen belegen, oft auf entgegengesetzten Seiten der Netzwicklung, sind allgemein keine realisierbare Alternative. Bei einem Transformator mit Spannungsregelung ist es schwierig, die gleiche Impedanz zu den zwei ventilseitigen Wicklungen für alle Stufenstellungen zu erhalten.

6.3.3 Betrachtungen zur Impedanz – Kopplungsimpedanz

Das Impedanzmodell zwischen einem Netz- und zwei Ventilanschlüssen kann durch drei Impedanzen dargestellt werden, die in ein und demselben Punkt zusammengeschaltet sind, mit zwei Zweigen zu den Ventilanschlüssen und einem zum Netzanschluss, auch gemeinsame Kopplungsimpedanz genannt.

Im Allgemeinen muss die gemeinsame Kopplungsimpedanz so klein wie möglich sein, um Wechselwirkungen zwischen den Spannungen während der Kommutierung zu vermeiden.

In Zweiwicklungstransformatoren ist die gemeinsame Kopplungsimpedanz durch den Transformator nicht vorhanden; einen Beitrag zur Kopplungsimpedanz kann man nur von der gemeinsamen Sammelschiene erhalten. Dreiwicklungstransformatoren ([Bild 14](#)), bei denen die zwei Ventilwicklungen auf verschiedenen Schenkeln angeordnet sind, weisen ebenfalls keine Kopplungsimpedanz auf. Dreiwicklungstransformatoren, die eine axiale Unterteilung verwenden, weisen auch eine geringe gemeinsame Kopplungsimpedanz auf.



Legende

$X_1 + X_2 = X_1 + X_3 =$ Transformatorimpedanz

X_1 idealerweise gleich Null, aber immer viel kleiner als X_2 und X_3

Bild 14 – Kopplungsimpedanz

7 Anzapfungen und Impedanzen – HGÜ-Anwendungen

7.1 Impedanzwert

Die ausgewählte Impedanz ist das Ergebnis von Einflüssen einer Zahl von Anforderungen. Obwohl sie die Oberschwingungsstrompegel verringert, erhöht eine hohe Impedanz die Kommutierungsreaktanz, die zu einem erhöhten Blindleistungsverbrauch des Stromrichters führt und dadurch die Kosten der Filterkreise und der Ventilbaugruppe erhöht.

Eine niedrige Impedanz hat einen Einfluss auf die Betrachtung der Kurzschlusskräfte und erhöht die Größe und das Gewicht des Transformators mit Folgewirkungen auf Kosten und Transport.

7.2 Impedanzschwankungen

Es ist entscheidend, dass die wirkliche und die gemessene Transformatorimpedanz innerhalb einer gegebenen Abweichung von einem festgelegten Wert bleibt. Abweichungen können sowohl systemabhängig als auch zufälliger Art sein.

Systemabhängige Abweichungen können ihren Ursprung in Einschränkungen im Entwurf und bei der Fertigung haben. Zufällige Abweichungen hängen von Fertigungsschwankungen und Messungenauigkeiten ab. Impedanzänderungen in Abhängigkeit von der Stufenstellung können als systemabhängige Abweichungen betrachtet werden, bei denen die Art der Stufenanordnung die Richtung der Abweichung beeinflusst, d. h. lineare Anzapfung oder Umkehranzapfung.

Zulässige Abweichungen der Impedanz von festgelegten Werten betreffen möglicherweise:

- Abweichungen von einem festgelegten Impedanzwert an der Hauptanzapfung;
- Schwankung zwischen einzelnen Phasen;
- Schwankung zwischen Transformatoreinheiten;
- Schwankung innerhalb des Anzapfungsbereichs;
- Abweichungen zwischen Wicklungen in Stern- oder Dreieckschaltung.

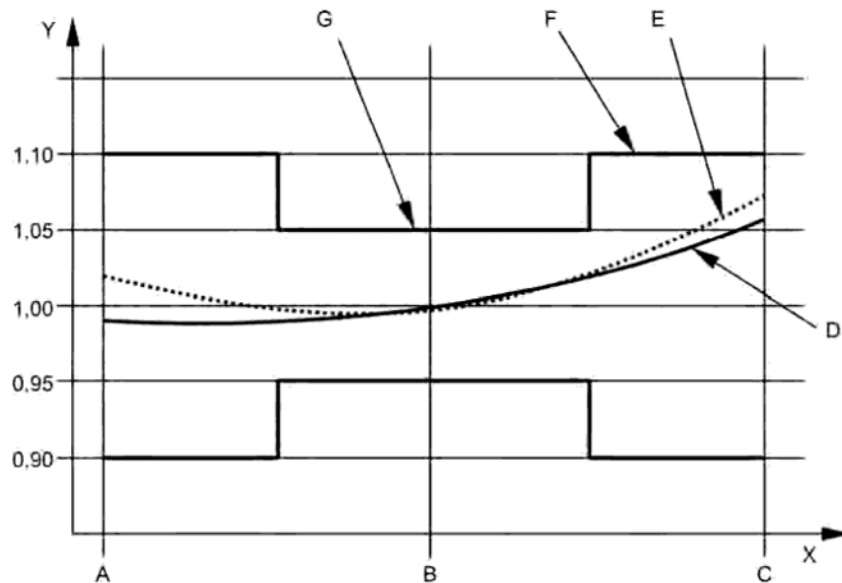
Der Käufer darf für alle fünf Möglichkeiten Grenzwerte festlegen.

Falls nichts anderes festgelegt, werden die in **IEC 60076-1** niedergelegten Regeln für zulässige Grenzabweichungen zusammen mit den nachgenannten Anforderungen angewendet.

Die durch den Käufer festgelegte Abweichung von der Impedanz darf 5 % im üblichen Betriebsbereich des Stufenschalters nicht überschreiten. Außerhalb dieses Bereichs darf die Abweichung bis zu 10 % ansteigen (siehe Bild 15).

Die Impedanzänderungen zwischen einzelnen Phasen, Transformatoreinheiten und Wicklungen in Stern- und Dreieckschaltung sollten in der gleichen Stufenstellung 3 % nicht überschreiten. Die wirksame Auslöschung

von Oberschwingungen in einer 12-Puls-Brückenschaltung erfordert geringe Impedanzschwankung. Große Änderungen zwischen Phasen, Einheiten und Wicklungen in Stern- und Dreieckschaltung erhöhen die Größe der Filter.



Legende

- A Kleinste Windungszahl
- B Übliche Windungszahl
- C Größte Windungszahl
- D Lineare Anzapfungen
- E Umkehranzapfung
- F $\pm 10\%$ Toleranzband
- G $\pm 5\%$ Toleranzband
- X Windungen
- Y spezifische Transformatorimpedanz

Bild 15 – Typische Impedanzmodelle

8 Isolationsaspekte und Spannungsprüfungen

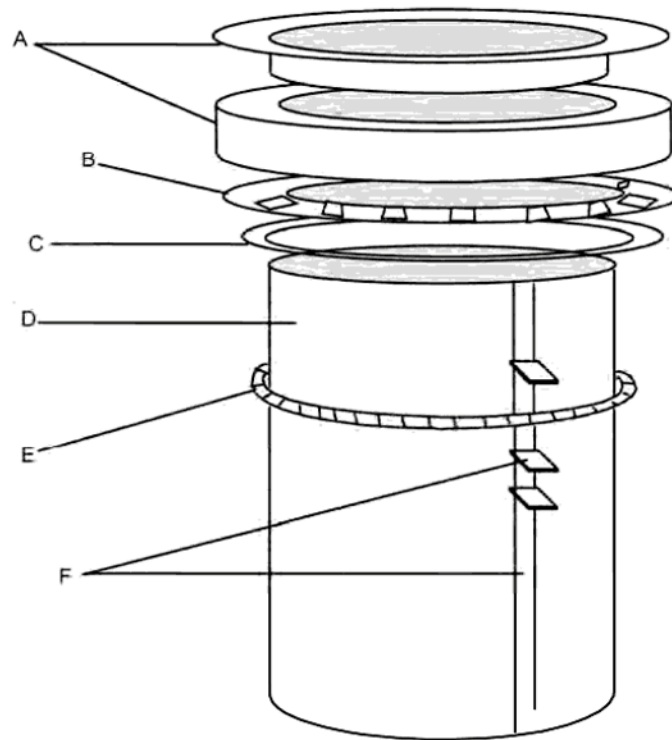
8.1 Hybrid-Isolationssysteme

8.1.1 Allgemeines

Hybrid-Isolationssysteme werden in erster Linie in industriellen Stromrichtertransformatoren eingesetzt, weil sich dort in solchen Transformatoren Betriebsvorteile bei erhöhten Temperaturen ergeben.

Wann immer der Begriff „hybrid“ bezüglich eines Isolationssystems gebraucht wird, ist gemeint, dass Hochtemperatur-Isolierstoffe (wie Aramidpapier oder Hochtemperatur-Isolierlack) mit Isolierstoffen für übliche Temperaturen (wie Zellulose) kombiniert werden.

Isolierstoffe werden in einigen der verschiedenen Bauteile verwendet, die eine Transformatorwicklung bilden: Leiterisolierung, Abstandshalter, Zylinder, Winkelringe usw. (siehe Bild 16).



Legende

- A Winkelringe und Abdeckungen
- B Hilfsunterlegscheibe
- C Statikringe
- D Zylinder
- E Leiterisolierung
- F Axiale und radiale Abstandshalter

Bild 16 – Bauteile eines typischen Industrie-Stromrichtertransformator-Isolationssystems

Hybridisolation wurde über viele Jahre für ölgekühlte Transformatoren verwendet. Hochtemperaturwerkstoffe werden für Teile in direktem Kontakt mit Kupfer (Leiterisolierung) oder in unmittelbarer Nähe dazu (Abstandshalter), verwendet, während alle anderen Isolationsbauteile aus Zellulose bestehen. Wicklungen mit Hybridisolation sind für eine Durchschnittsübertemperatur ausgelegt worden, die höher ist, als die für Zellulose zulässige (ohne Verkürzung der Transformatorlebensdauer), wodurch sich die Leistung pro Volumeneinheit erhöht.

8.1.2 Hybridisolation für Stromrichtertransformatoren

Wann immer ein Transformator in Verbindung mit einem Stromrichter benutzt wird, werden Oberschwingungsströme in seine Wicklungen eingekoppelt. Die Oberschwingungsströme werden die Wirbelstromverluste der Wicklungen durch einen Faktor erhöhen, der in IEC 61378-1 und IEC 61378-2 festgelegt ist. In einem gewöhnlichen Transformator sind die Wirbelstromverluste abhängig von der radialen und axialen Komponente des magnetischen Streuflusses und von den geometrischen Abmessungen des Leiters, der diesem Fluss ausgesetzt ist (siehe IEC 61378-1). Die Wirbelstromverluste ändern sich über die Wicklungshöhe. Sie sind niedriger im mittleren Teil der Wicklung, wo der Streufluss meist parallel zur Höhe des Leiters fließt und steigen an den Enden der Wicklung, wo der Streufluss nahezu senkrecht zur Breite des Leiters fließt. Diese nicht einheitliche Verteilung von Verlusten ergibt sich aus der nicht einheitlichen Verteilung der Temperatur über die Wicklungshöhe. Die Differenz zwischen dem Heißpunkt und der mittleren Wicklungstemperatur ist deshalb über jene hinaus erhöht, die durch die üblichen Kühlungsmechanismen verursacht werden.

In Stromrichtertransformatoren kann, falls Oberschwingungsströme in Betracht gezogen werden, die Differenz zwischen dem Heißpunkt und der mittleren Wicklungstemperatur wegen des entsprechenden Anstiegs der Wirbelstromverluste weiter ansteigen (siehe IEC 60076-8, 9.6).

Für dieses Problem ist eine Reihe von Lösungen verfügbar. Nach Vereinbarung mit dem Käufer ist die Übernahme von Hochtemperatur-Isolierstoffen in den Heißpunktbereich immer dann eine Lösung, wenn es nicht möglich ist die Heißpunkttemperatur auf die in IEC 60076-2:2011, 6.2, angegebenen zulässigen A-Temperaturgrenzen zu verringern.

In Leistungstransformatoren ist Hybridisolation allgemein vorgesehen, um die zulässige mittlere Wicklungstemperatur und damit die Nennleistung zu erhöhen. Deshalb wird Hochtemperatur-Isolierstoff in der Nähe aller Wicklungsleiter verwendet. In Stromrichtertransformatoren könnte Hybridisolation auch in Bereichen in der Nähe hoher Heißpunkttemperaturen verwendet werden, während die mittlere Wicklungstemperaturerhöhung innerhalb der Grenzen bleibt. Es folgt auch, dass Hochtemperatur-Isolierstoff auf die Wicklungsleiter in den Heißpunktbereichen angewendet werden sollte.

Am Markt sind zunehmend feste und flüssige Hochtemperaturwerkstoffe verfügbar. Diese Tatsache erhöht die Anzahl möglicher Lösungen für alle Fälle, in denen die mittleren Temperaturen und Heißpunkttemperaturen wichtig sind. Die ordnungsgemäße Anwendung dieser Materialien wird in IEC 60076-14 behandelt.

8.2 Spannungsprüfungen

8.2.1 Allgemeines

Spannungsprüfungen und Isolationsaspekte beziehen sich in erster Linie auf HGÜ-Stromrichtertransformatoren. Die Spannungsprüfungen und Isolationsaspekte bei industriellen Stromrichtertransformatoren stimmen mit denen von gewöhnlichen Leistungstransformatoren überein und werden in IEC 60076-3 abgedeckt.

Das Isolationssystem in einem HGÜ-Stromrichtertransformator wird Belastungen durch die angelegte Spannung und induzierte Spannungen ausgesetzt. Für die Netzwicklung und ihre Anschlüsse sind die Spannungen von gleicher Art wie für einen gewöhnlichen Transformator, das heißt, statische Wechselspannungen und transiente Spannungen, z. B. Blitz- und Schaltstoßspannungen. Die Ventilwicklungen und ihre Anschlüsse werden, zusätzlich zu den Spannungen in einem gewöhnlichen Transformator, auch Gleichspannungen ausgesetzt. Das führt auf der anderen Seite zu einer Erhöhung einer kombinierten Wechsel- und Gleichspannungsbelastung.

Die Verteilung aller zeitabhängigen Spannungen über das Isolationssystem ist hinreichend bestimmt durch die Geometrie und die Dielektrizitätskonstante (Permittivität) der beteiligten Werkstoffe. Im folgenden Absatz wird angenommen, dass diese Werkstoffe hauptsächlich Transformatorenöl und Zellulose sind. Die Verteilung von statischer Gleichspannung in Öl-/Zellulose-Isolation weicht bedeutend von der von zeitabhängigen Spannungen ab (Stoß- und Wechselspannungen). Die Verteilung wird hauptsächlich durch Scheinwiderstände bestimmt. Diese Widerstände sind in großem Umfang abhängig von der Mobilität von Raumladungen im Isolationssystem. Als Folge davon ist der spezifische Widerstand kein gleichförmiger Wert und ändert sich mit einer Anzahl von Parametern, z. B. Temperatur, elektrische Belastung, Feuchtigkeit, Geschwindigkeit der Ölströmung, Dauer der Spannungsanwendung, Alterung und chemischer Aufbau. Diese Erscheinungen werden besser durch ein Raumladungs-Zeitmodell dargestellt.

Aus praktischer Sicht ist es allgemein anerkannt, dass eine Isolationsstruktur als R-C-Netzwerk modelliert werden kann, um ihr Verhalten unter Gleichstrombedingungen zu bestimmen (sofern die Auswirkungen von Ionendrift vernachlässigt werden können). Wenn anfangs eine Gleichspannung eingespeist wird, ist die Spannungsverteilung kapazitiv, während das endgültige oder statische Gleichspannungsfeld in einer komplexen Struktur durch die relativen spezifischen Widerstände der beteiligten Werkstoffe bestimmt wird. In den meisten Fällen gibt die Anwendung eines R-C-Modells einen mäßigen und sicheren Planungsspielraum. Das spezifische Widerstandsverhältnis zwischen fester Isolation und Öl kann bei Raumtemperatur von 10:1 bis zu 500:1 streuen. Wenn die Temperatur erhöht wird, sinkt das spezifische Widerstandsverhältnis üblicherweise bis zu einer Größenordnung.