

DIN EN 61857-41
(VDE 0302-41)
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 29.080.30

Einsprüche bis 2019-05-29

Entwurf

**Elektrische Isoliersysteme –
Verfahren zur thermischen Bewertung –
Teil 41: Spezifische Anforderungen für elektrische Isoliersysteme zur
Anwendung in Hochspannungstrocken-Transformatoren mit
Betriebsspannung von 1 kV und darüber
(IEC 112/427/CD:2018);
Text Deutsch und Englisch**

Electrical insulation systems –
Procedures for thermal evaluation –
Part 41: Specific requirements for electrical insulation systems for use in dry-type high-voltage transformers with operating voltages of 1kV and above
(IEC 112/427/CD:2018);
Text in German and English

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2019-03-29 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 84 Seiten

DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE

Anwendungsbeginn

Anwendungsbeginn dieser Norm ist

Nationales Vorwort

Das internationale Dokument IEC 112/427/CD:2018 „Electrical insulation systems – Procedures for thermal evaluation – Part 41: Specific requirements for electrical insulation systems for use in dry-type high-voltage transformers with operating voltages of 1kV and above“ (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 TC 112 „Evaluation and qualification of electrical insulating materials and systems“ 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 K 183 „Bewertung und Qualifizierung von elektrischen Isolierstoffen und Isoliersystemen“ 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.

Das Original-Dokument enthält Bilder in Farbe, die in der Papierversion in einer Graustufen-Darstellung wiedergegeben werden. Elektronische Versionen dieses Dokuments enthalten die Bilder in der originalen Farbdarstellung.

Inhalt

Seite

EINLEITUNG	6
1 Anwendungsbereich.....	7
2 Normative Verweisungen	7
3 Begriffe	7
3.1 elektrischer Beanspruchungspfad.....	7
3.2 Spulenfamilien.....	8
3.3 Gesamtisolierung	8
3.4 Spannungsbeanspruchungspegel [VSL].....	8
3.5 Trockentransformatoren	8
3.6 vergossene Transformatoren	8
3.7 Gießharztransformatoren	8
3.8 Transformaterspulenfamilie.....	8
3.9 Kondensationskammer	8
4 Allgemeine Informationen	8
4.1 Thermische Klassifizierung	8
4.2 Methodik.....	9
4.3 Thermische Alterung	9
4.4 Kälteeinwirkung	10
4.5 Befeuchtung	10
4.6 Dielektrische Prüfungen	10
5 Prüfspulen	12
5.1 Allgemeine Informationen	12
5.2 Bevorzugte Leitergröße und -form	12
5.3 Bevorzugter Leiter	13
5.4 Gesamtisolierung	13
6 Für den Entwurf des Prüfverfahrens erforderliche Informationen.....	16
6.1 Allgemeines.....	16
6.2 Beispiel für Betriebsspannung	16
6.3 Beispiel für Stoßspannung	18
7 Prüfeinrichtung	20
8 Anzahl der Prüfspulen.....	20
8.1 Allgemeines.....	20
8.2 Auswahlprüfung.....	20
8.3 Anzahl an für Phase 2, thermische Alterung, erforderlichen Prüfspulen	21
9 Prüfverfahren für die Auswahlprüfung: Diagnose vor der Alterung zur Bewertung von Entwurf und Konstruktion.	22
9.1 Einleitung.....	22
9.2 Anfangsbrauchbarkeitsprüfung der Prüfspule.....	22
9.3 Bewertung von Entwurf und Konstruktion vor der thermischen Alterung – Ermittlung	

	Seite
möglicher Obergrenzen für die thermische Alterung.....	23
9.4 Bewertung von Entwurf und Konstruktion vor der thermischen Alterung – zur Bewertung der tatsächlichen Anfangsdurchschlagfestigkeit des EIS an der Prüfspule mit Betriebsspannung.	24
9.5 Bewertung von Entwurf und Konstruktion vor der thermischen Alterung – zur Bewertung der tatsächlichen Anfangsdurchschlagfestigkeit des EIS an der Prüfspule mit Stoßbewertung.....	25
10 Prüfverfahren für thermische Alterung	26
10.1 Einleitung.....	26
10.2 Prüfungszyklus der thermischen Alterung.....	27
10.3 Thermisches Alterungsprogramm	27
10.4 Bewertung gealterter Proben	28
11 Auswertung, Berichterstattung und Klassifizierung.....	28
11.1 Auswertung.....	28
11.2 Bewertung der Alterungsergebnisse	29
11.3 Bericht.....	29
11.4 Klassifizierung	29
Anhang A (informativ) Prüfeinrichtung.....	31
A.1 Beschreibung der Prüfeinrichtung	31
Anhang B (informativ) Anleitung zur Auswahl von Alterungstemperaturen.....	33
B.1 Einleitung.....	33
B.2 Alterungsbeispiel 1 – Frühe Ausfälle.....	34
B.3 Alterungsbeispiel 1 – Niedrige R^2	36
Anhang C	40
C.1 <u>Anleitungen für die Entwurfstabelle für die HS-Familie</u>	40
Anhang D Literaturhinweise.....	42
 Bilder	
Bild 1 – Beispielmmodell für offenen Wicklungstyp	14
Bild 2 – Beispielmmodell für offenen Gießharztyp.....	15
Bild 3 – Elektrischer Beanspruchungspfad – Spule zu Spule und Spule zu Masse.....	20
Bild A.1 – Prüfeinrichtung mit Spule, Vorder- und Seitenansicht der Prüfeinrichtung.....	31
Bild A.2 – Prüfspule in der Prüfeinrichtung ohne Abdeckung.....	31
Bild A.3 – Prüfmodell, Ansicht von oben	32
Bild B.1 – Alterungsdiagramm – Beispiel mit frühen Ausfallzeiten	35
Bild B.2 – Alterungsdiagramm – Schätzung ohne hohen Temperaturpunkt	35
Bild B.3 – Alterungsdiagramm – Schätzung mit geschätztem niedrigeren Temperaturpunkt.....	36
Bild B.4 – Alterungsdiagramm –Schätzung mit gültigen Zeiten aber niedriger R^2	37
Bild B.5 – Alterungsdiagramm –Schätzung mit verlängerten Zeiten bei niedriger Temperatur zur Erfüllung von R^2	38
Bild B.6 – Alterungsdiagramm –Schätzung mit zusätzlichem niedrigen Temperaturpunkt zur Erfüllung von R^2	39

Bild B.7 – Alterungsdiagramm –Zweite Schätzung mit zusätzlichem niedrigen Temperaturpunkt zur Erfüllung von R^2	39
---	----

Tabellen

Tabelle 1 – Empfohlene Alterungstemperaturen und -zeiten	10
Tabelle 2 – Beispiele für die Spannungsbeanspruchungspegel einer Reihe von Transformaterspulen, die mit dem gleichen EIS konstruiert wurden	17
Tabelle 3 – Beispiel für mögliche Stoßspannungsprüfwerte unter Zuhilfenahme von Spannungsklassen	19
Tabelle 4 – Beispiele für den dielektrischen Durchschlagwert und empfohlene Anpassungen.....	25
Tabelle B1 – Empfohlene Alterungstemperaturen und -zeiten	33
Tabelle B2 – Empfohlene Alterungstemperaturen und -zeiten	33

EINLEITUNG

Das vorliegende Dokument dient zur Bewertung von elektrischen Isoliersystemen [EIS], die bei Transformatoren mit einer Betriebsspannung von mehr als 1 kV angewendet werden. Der Ansatz sieht die Bewertung der EIS anhand des Konzepts der Spannungsbeanspruchungspegel [kV/mm] vor. Bei der Prüfung soll die thermische Klassifizierung des EIS festgelegt werden.

Die nach den Angaben im vorliegenden Dokument festgelegte Leistung von Transformatoren, die für die Anwendung des EIS ausgelegt und konstruiert sind, muss in Übereinstimmung mit den Anwendungsanforderungen des zuständigen Technischen Komitees der IEC bewertet werden.

**Elektrische Isoliersysteme –
Verfahren zur thermischen Bewertung –
Teil 41: Spezifische Anforderungen für elektrische Isoliersysteme zur
Anwendung in Hochspannungstrocken-Transformatoren mit Betriebsspannung
von 1 kV und darüber**

1 Anwendungsbereich

Das vorliegende Dokument legt das Prüfverfahren zur thermischen Bewertung eines elektrischen Isoliersystems [EIS] fest, das bei vergossenen Transformatoren sowie bei Trocken- und Gießharztransformatoren mit Betriebsspannungen von 1 kV und darüber verwendet werden.

Mit der vorliegenden Norm wird beabsichtigt, die EIS für eine Reihe von Transformatoren mit einzelnen EIS zu bewerten, deren Isolierdicken angepasst werden können, um den Spannungsbeanspruchungspegel [VSL, en: Voltage Stress Level] auf oder unter den geprüften Werten der festgelegten EIS zu halten.

Die nach den Angaben im vorliegenden Dokument festgelegte Leistung von Transformatoren, die für die Anwendung des EIS ausgelegt und konstruiert sind, muss in Übereinstimmung mit den Anwendungsanforderungen des zuständigen Technischen Komitees der IEC bewertet werden.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente, die in diesem Dokument teilweise oder als Ganzes zitiert werden, sind für die Anwendung dieses Dokuments erforderlich. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

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

IEC 60505, *Evaluation and qualification of electrical insulation systems*

IEC 60216-4-1, *Electrical insulating materials – Thermal endurance properties – Part 4-1: Ageing ovens – Single-chamber ovens*

IEC 60493-1, *Guide for the statistical analysis of ageing test data – Part 1: Methods based on mean values of normally distributed test results*

IEC 61857-1, *Electrical insulation systems – Procedures for thermal evaluation – Part 1: General requirements – Low-voltage*

IEEE C57.12.58-1991 – IEEE Guide for Conducting a Transient Voltage Analysis of a Dry-Type Transformer Coil

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe nach **IEC 60505** und **IEC 61857-1** und die folgenden Begriffe.

3.1 elektrischer Beanspruchungspfad

möglicher Leitungsweg bei einem elektrischen Ausfall in einem Transformator, der für die Anwendung des EIS entworfen und konstruiert wurde

3.2 Spulenfamilien

Produktionsspulen auf der Grundlage des gleichen EIS zur Auswahl des bei der Konstruktion zu verwendenden Werkstoffs

ANMERKUNG Eine Spulenfamilie kann eine umfangreiche Bandbreite von Betriebsspannungen mit allen möglichen Lichtbogenpfaden abdecken, die konstruktionsbedingt auf oder unter dem bewerteten Spannungsbeanspruchungspegel [VSL] funktionieren.

3.3 Gesamtisolierung

Gesamtheit der Werkstoffe in einem vom EIS dargestellten voll funktionsfähigen Transformator

ANMERKUNG Dies schließt jede Luftspalte ein, die Teil des Entwurfs ist. Bei der Anwendung der elektrischen Beanspruchung, bei der ein Luftspalt ein Bestandteil der Gesamtisolierung ist, muss die Prüfspule den gleichen oder einen engeren Luftspalt aufweisen.

3.4 Spannungsbeanspruchungspegel [VSL]

Wert der Höchstspannung an einer gemessenen Position, geteilt durch die Dicke der Gesamtisolierung an dieser Position, in kV/mm

3.5 Trockentransformatoren

Transformatoren, deren Magnetkreis und Wicklungen sich nicht in einer Isolierflüssigkeit befinden

3.6 vergossene Transformatoren

Transformatoren mit vakuumvergossenen Spulen. Die Spulen sind vollständig mit Epoxidharz imprägniert

3.7 Gießharztransformatoren

Transformatoren mit (epoxid-)harzüberzogenen (verkapselten) Spulen

3.8 Transformatorspulenfamilie

gesamte Palette von Produktionsmodellen, die aus den gleichen EIS (gleiche Werkstoffgruppe) konstruiert sind

3.9 Kondensationskammer

Einrichtung zur Erzeugung eines Klimas mit einer hohen relativen Feuchte (mehr als 95 %) bei 5 K bis 10 K über Zimmertemperatur, bei dem die Prü fzellen auf einem Gestell platziert werden, das auf 5 K bis 10 K unter Zimmertemperatur gekühlt wird, um Oberflächenfeuchte (sichtbare Kondensation) zu erzeugen

4 Allgemeine Informationen

4.1 Thermische Klassifizierung

4.1.1 Als thermischer Index [TI] durchgeführte Bewertung

Dieser Teil der Normenreihe 61857 kann ohne Referenz-EIS durchgeführt werden. Bei der Durchführung ohne Referenz-EIS ist der zugewiesene Wert ein thermischer Index [TI]-Wert.

Der zugewiesene thermische Indexwert wird anhand des Zersetzungsmusters der Prüfdaten bestimmt, die sich bei höheren Alterungstemperaturen ergeben. Dieses Muster wird anschließend auf eine zuvor

ausgewählte Bezugszeitkoordinate von 40 000 h projiziert. Die Verwendung einer zuvor ausgewählten Bezugszeit ist allein kein Hinweis auf eine mögliche zu erwartende Betriebslebensdauer eines Transformators, der mit dem EIS entworfen und gebaut wurde. Die Bezugszeit wird für eine einheitliche Zuweisung der thermischen Klassifizierung des Prüflings-EIS verwendet.

4.1.2 Als relativer thermischer Index [RTI] durchgeführte Bewertung

Dieser Teil der Normenreihe 61857 kann mit einem Referenz-EIS durchgeführt werden. Bei der Durchführung mit einem Referenz-EIS ist der zugewiesene Wert ein thermischer Index [TI]-Wert.

Bei jeder Verwendung eines Referenz-EIS wird die Prüfung mit den gleichen Verfahren für Referenz- und Prüflings-EIS durchgeführt.

Der zugewiesene relative thermische Indexwert wird anhand des Zersetzungsmusters der Prüfdaten bestimmt, die sich bei höheren Alterungstemperaturen ergeben. Dazu werden die Ergebnisse des Zersetzungsmusters mit dem Referenz-EIS verglichen. Wenn das Referenz-EIS zur Festlegung eines RTI-Werts verwendet wird, muss es sich um das vorhandene EIS handeln, das von einzelnen Herstellungsunternehmen verwendet wird.

4.2 Methodik

Diese Prüfung soll Leistung des EIS anhand Spannungsbeanspruchungspegel [VSL] bewerten, die bei allen Wicklungsverfahren auftreten können. Die Bewertung und die festgelegten VSL-Werte können anschließend auf alle Wicklungsverfahren angewandt werden, bei denen die Spannungsbeanspruchungspegel höchstens die im spezifischen EIS bewerteten Werte erreichen.

Die Bewertung folgt der Struktur in IEC 61857-1. Die Spulen sind dabei Transformatorspulen oder repräsentative Spulen, siehe 5.1. Repräsentative Spulen müssen aus den gleichen Werkstoffen gefertigt und verwenden die gleichen Prozesse wie bei der Konstruktion der Transformatorspulen. Die Entscheidung zur Verwendung repräsentativer Spulen beruht auf der Annahme, dass die sie kleiner und leichter sind.

Dieses Prüfverfahren folgt ähnlichen Protokollen anderer Prüfverfahren der Normenreihe IEC 61857, bei denen die Prüfspulen anfänglichen Auswahlprüfungen unterzogen werden, denen dann wiederholte Zyklen der thermischen Dauerbeständigkeitsprüfung aus Unterzyklen in der angegebenen Reihenfolge folgen:

- a) ein Unterzyklus mit thermischer Alterung (4.3);
- b) ein Unterzyklus mit vordiagnostischem Kälteschock (4.4) und Befeuchtung (4.5), in dieser Reihenfolge;
- c) eine diagnostische dielektrische Prüfung (4.6).

4.3 Thermische Alterung

Die Informationen und die Tabelle in IEC 61857-1, Abschnitt 6 beziehen sich auf die Auswahl von Alterungstemperaturen, die auf einer Bezugszeit im Bereich von 20 000 h beruhen. Die Bezugszeit dieser Teil der Normenreihe 61857 ist 40 000 h. Bei der Auswahl der Alterungstemperaturen muss die Anpassung an die größere Bezugszeit berücksichtigt werden, was in der Regel eine Erhöhung der Alterungstemperaturen um 6 K auf -10 K bedeutet. Wie bei IEC 61857- ist es bei diesem Teil erforderlich, dass das beim Alterung drei Alterungstemperaturen eingesetzt, wobei jede Temperatur mindestens 10 K von den anderen Temperaturen auseinanderliegen muss. Zudem muss nach 61857-1 die höchste Alterungstemperatur einem minimalen logarithmischen Mittelwert der Prüf-Lebensdauer von mindestens 100 h entsprechen. In Abschnitt 11 werden die Anforderungen an den minimalen logarithmischen Mittelwert der Prüf-Lebensdauer für die Alterungstemperatur ausgeführt.

ANMERKUNG In Anhang B sind Beispiele für Alterungsprogramme enthalten, bei denen drei Alterungstemperaturen erforderlich wären.

Diese in 61857-1 dargestellten typischen Anpassungen anhand üblicher Alterungsmuster müssen mit den Ergebnissen der thermischen Beanspruchung der Auswahlprüfung in Abschnitt 9 dieses Teils kombiniert werden. Wenn der Bereich möglicher Alterungstemperaturen anzeigt, dass das allgemeine Muster von 61857-1 innerhalb des möglichen Bereichs der Alterungstemperaturen angepasst werden kann, wird

erwartet, dass die für die Beendigung der gesamten thermischen Alterung erforderliche Zeit innerhalb der Erwartung für die Beendigung von bis zu etwa 5 000 h liegt. Wenn der Bereich möglicher Alterungstemperaturen die Anhebung der Alterungstemperaturen einschränkt, muss erwartet werden, dass sich die für die Beendigung erforderliche Zeit verlängert.

Aufgrund der längeren Bezugszeit und des erforderlichen weiteren Optionen in Abhängigkeit des Ergebnisses der thermischen Auswahlprüfung werden in Tabelle 1 Optionen für die Auswahl geeigneter Zeiten und Temperaturen für die Durchführung dieser Alterung angegeben. Zudem sollte darauf hingewiesen werden, dass in 61857-1 vorgeschlagen wird, dass die gewählten Alterungstemperaturen und die Alterungszeiten so gewählt werden sollten, dass eine erwartete durchschnittliche Lebensdauer von 5 bis 10 Prüfungszyklen für jeden Prüfobjektsatz erzielt wird. Für diesen Teil sind für gültige Prüfergebnisse mindestens ein erfolgreicher Prüfungszyklus mit anschließenden Prüfungszyklen von etwa der gleichen Dauer erforderlich. Wenn nach 4 Prüfungszyklen keine Ausfälle auftreten, darf der Alterungszyklus verdoppelt werden. Wenn vor der Beendigung des dritten Prüfungszyklus Ausfälle auftreten, muss die Alterungszykluszeit halbiert werden.

Tabelle 1 – Empfohlene Alterungstemperaturen und -zeiten

Alterungszeit je Zyklus	Alterungstemperatur für EIS mit erwarteter thermischer Klasse von °C (Annahme 40 000 h Bezugszeit)								
	90	105	120	130	155	180	200	220	250
504 bis 840 h	120	135	150	160	185	210	230	250	280
336 bis 504 h	130	145	160	170	195	220	240	260	290
168 bis 336 h	140	155	170	180	205	230	250	270	300
72 bis 168 h	150	165	180	190	215	240	260	280	310
24 bis 72 h	160	175	190	200	225	250	270	290	320

4.4 Kälteeinwirkung

Die Kälteeinwirkung dient dem Einleiten der Oberflächenkondensation auf den Spulen. Die Kondensation ist Teil der Konditionierung, um die Diagnose der Isolierung zu erleichtern.

Als Teil der Konditionierung ist es zulässig, dass die Prüfspule nach jedem thermischen Alterungszyklus auf genormte Laborbedingungen abkühlt. Sobald die Oberfläche der Prüfspule $-25\text{ °C} \pm 5\text{ K}$ erreicht hat, wird die Prüfspule 1 h $\pm 10\text{ min}$ auf dieser Temperatur gehalten. Die Oberflächentemperatur der Prüfspule wird von Thermoelementen gemessen, die die Spulenoberfläche direkt berühren.

Innerhalb von 10 min nach Entfernung der Kälteeinwirkung wird jede Prüfspule in eine Kondensationskammer gelegt.

4.5 Befeuchtung

Jede Prüfspule wird mindestens 40 h in die Kondensationskammer gelegt. Danach sollte noch immer eine sichtbare Kondensation vorhanden sein.

4.6 Dielektrische Prüfungen

4.6.1 Allgemeines

Dielektrische Prüfungen der Prüfspulen werden als Diagnosewerkzeug zur Festlegung von Ausfällen verwendet. Dieser Abschnitt beschreibt, wie die dielektrischen Prüfungen der Prüfspulen durchzuführen sind. In [Abschnitt 6](#) wird beschrieben, wie die in den diagnostischen Anfangsprüfungen verwendete Spannung berechnet wird und in [Abschnitt 9](#) werden die Eignungsprüfung sowie die dielektrische Auswahlprüfung zur Bestimmung des Spannungsbereichs beschrieben, der in der Alterungsphase des Prüfprogramms zu

berücksichtigen ist. In [Abschnitt 10](#) wird die Verwendung der dielektrischen Prüfungen beim Alterungsprogramm beschrieben.

In dieser Norm werden zwei dielektrische Prüfungen zur Prüfung der Prüfspulen verwendet. Diese beiden Verfahren sind die Betriebsspannungsprüfung (4.6.2) und die dielektrische Stoßspannungsprüfung (4.6.3). Die Betriebsspannungsprüfung ist für alle EIS für Spulen mit Betriebsspannungen von 1 kV und mehr erforderlich. Beide diagnostische Prüfungen sind für EIS für Spulen mit Betriebsspannungen von 2,5 kV und mehr erforderlich. Letzteres impliziert einen BIL von 10 kV oder mehr. Wenn beide diagnostische Prüfungen durchzuführen sind, sollte die Betriebsspannungsprüfung zuerst erfolgen.

In den Prüfspulen gibt es sechs mögliche elektrischen Beanspruchungspfade. Wahrscheinlich werden in den Prüfspulen nicht alle dieser sechs Pfade enthalten sein. Die Reihenfolge der dielektrischen Prüfungen sollte wie folgt sein und dabei die nicht in der Prüfspule vorhandenen Pfad ausschließen:

- 1) Windung zu Windung
- 2) Schicht zu Schicht
- 3) Scheibe zu Scheibe
- 4) Abschnitt zu Abschnitt.
- 5) Spule zu Spule
- 6) Spule zu Masse

4.6.2 Betriebsspannungsprüfung

In den meisten Fällen (mit Ausnahme der Anfangsphase der dielektrischen Auswahlprüfung in [9.4](#)) werden die Prüfspulen vor dieser Prüfung den in [4.4](#) und [4.5](#) beschriebenen Konditionierungszyklen ausgesetzt.

Im Anschluss an den Konditionierungszyklus werden die Prüfspulen der Kondensationskammer einzeln entnommen und einer diagnostischen dielektrischen Spannungsprüfung innerhalb von 45 min nach Entnahme unterzogen. Die Prüfspannung für jeden elektrischen Beanspruchungspfad wird für (60 ± 5) s gehalten.

Die Branchenerfahrung hat gezeigt, dass sich ein Stromfluss über 50 mA beim Erkennen von Ausfall bewährt hat. Ausfälle können auch durch sichtbare Lichtbögen bestimmt werden. Die Lebensdauer jeder Prüfspule beruht auf dem ersten Ausfall in einem der elektrischen Beanspruchungspfade innerhalb der Prüfspule. Die Prüfung ist erfolgreich, wenn Einbruch der Prüfspannung auftritt.

4.6.3 Dielektrische Stoßspannungsprüfung

Bei der dielektrischen Stoßspannungsprüfung wird die Stoßspannung, wenn die Prüfspule kein funktionsfähiger Transformator wie bei der in 4.6.2 beschriebenen Prüfung ist, entlang jedes elektrischen Beanspruchungspfads der in [4.6.1](#) dargelegten Folge angelegt. Die entsprechende Spannung nach dem vereinbarten Verfahren wie [IEC 60076-11](#), [Abschnitt 21](#) ($11,2 \mu\text{s} \pm 30\%$ / $50 \mu\text{s} \pm 20\%$ negative Stoßwelle) oder IEEE C57.12.91 ist anzulegen. Da nur diese Prüfung als Diagnosewerkzeug verwendet wird, wäre nur eine einzige Prüfung mit dem in [Abschnitt 6.3](#) und [Abschnitt 9](#) bestimmten Spannungspegel erforderlich.

Sollte ein funktionsfähiger Transformator als Prüfspule verwendet werden, wird die Spannung nicht nacheinander, sondern an den ganzen Transformator angelegt und der Entwurf des Transformators gibt die Spannungsbeanspruchung entlang jedes elektrischen Beanspruchungspfads vor, wie mithilfe der Ausgleichsspannungsanalyse nach [6.3](#) berechnet.

Ausfälle bei diesen dielektrischen Stoßspannungsprüfungen müssen auf der Grundlage von Vereinbarungen zwischen Hersteller und Kunde bestimmt, werde, wie bei [IEC 60076-11](#) oder IEEE C57.12.91.

5 Prüfspulen

5.1 Allgemeine Informationen

In diesem Teil der Normenreihe 61857 werden folgende Prüfspulen berücksichtigt

- Transformator- oder Kleintransformatorspulen
- repräsentative Spulen, die aus den gleichen Werkstoffen und mit den gleichen Herstellungsprozessen konstruiert wurden.

Transformator- oder Kleintransformatorspulen. Prüfproben sollten funktionsfähige Spulen voller Größe sein, die in der Lage sind, die Anforderungen von **IEC 60076-11**: Trockentransformatoren zu erfüllen. Spulen müssen so gewählt werden, dass sie die Transformatorreihe für gewerbliche Nutzung darstellen. Die Spulen sollten so klein wie praktisch möglich sein, gleichzeitig jedoch groß genug für übliche Durchschlagweiten der dargestellten Spannungsklassen.

Repräsentative Spulen. Alternativ dürfen für diese Bewertung repräsentative Spulen des Isoliersystems verwendet werden, die dafür entworfen wurden, alle möglichen Fehlzustandsarten zu prüfen.

Für eine genaue Bewertung der Auswirkungen thermischer Alterung auf die Lebensdauer der Transformatorisolierung muss die repräsentative Spule Folgendes erfüllen:

- 1) Darstellung des kritischen Isoliersystems, das (aufgrund thermischer Degradation) die vollständige elektrische Isolierung der Transformatorwicklungen verschlechtern kann.
- 2) Simulation realistischer Spannungsbeanspruchungen (Stoß oder Niederfrequenz) zur Bestimmung des Endes der funktionalen Lebensdauer des Isoliersystems der Wicklung nach dem thermischen Alterungsverfahren.
- 3) Verwendung bifilarer Wicklungen zur Simulation der Windung-zu-Wicklung-Konfiguration und zur Vereinfachung der Prüfung.

Repräsentative Spulen: Falls repräsentative Spulen als Prüfobjekte verwendet werden, müssen Entwurf, Konstruktion und Prüfparameter festgelegt werden. Repräsentative Spulen müssen aus genormten Werkstoffen und mit genormten Herstellungsverfahren gefertigt werden. Bei der Konstruktion müssen alle wesentlichen Werkstoffe elektrisch isolierender Komponenten [EIM, en: Electrical Insulating Component Materials] und Verarbeitungsverfahren verwendet werden, wie beispielsweise Vakuumgussimprägnierung oder Vakuumdruckimprägnierung. Eine repräsentative Spule kann der im Transformator verbauten Spule ähnlich sein, muss aber nicht notwendigerweise dem verwendeten Spulendesign genau entsprechen.

Der Entwurf und die Konstruktion repräsentativer Spulen wird durch zwei Faktoren bestimmt:

- Spannungsbeanspruchungspegel (siehe [Abschnitt 6](#)) und
- Größe, Dicke und andere Faktoren jedes EIM, der entlang jedes möglichen elektrischen Beanspruchungspaths verwendet wird.

Die sowohl in [Tabelle 2](#) als auch in diesem Abschnitt angegebenen Beispielinformationen dienen der Veranschaulichung des Entwurfskonzepts für eine repräsentative Spule. Die Größe und Konstruktion der repräsentativen Spulen können nicht eingeschränkt werden und müssen auf den spezifischen Anforderungen basieren.

5.2 Bevorzugte Leitergröße und -form

Es gibt keine bevorzugte Größe für den Leiter. Bei der Prüfung wird das elektrische Isoliersystem des Spulendesigns bewertet, nicht die Strombelastbarkeit des Leiters einer funktionalen Spule. Die Wicklungen sollten mit einem Leiter einer Größe ausgeführt werden, die mit der ausgewählten Isolierdicke leicht auf die Spule der benötigten Größe aufgewickelt werden kann.

Die Branchenpraxis hat gezeigt, dass die Bewertung des EIS nur das EIS selbst bewertet und bei allen Leiterformen angewandt werden kann, die die Anforderungen des Herstellers erfüllen.

5.3 Bevorzugter Leiter

Der bevorzugte Leiter besteht aus Kupfer. Ein mit einem Kupferleiter geprüftes EIS ist sowohl für Kupfer- als auch Aluminiumleiter geeignet. Ein mit einem Aluminiumleiter geprüftes EIS darf nicht für Anwendungen genutzt werden, die Kupferleiter enthalten. Die thermische Alterung der Leiteroberfläche ist bei Kupfer und Aluminium unterschiedlich, was die erwartete Leistung beeinflussen kann.

5.4 Gesamtisolierung

5.4.1 Allgemeines

Die Transformatorspule wird mithilfe eines EIS in der Spule entworfen. Innerhalb der Spule befinden sich verschiedene Segmente des EIS entlang der verschiedenen elektrischen Beanspruchungspfade. Da sich verschiedene Segmente eines EIS entlang der verschiedenen elektrischen Beanspruchungspfade befinden, ist es unerlässlich, die Konstruktion und die Beschreibung der Untergruppe der Gesamt-EIM am Pfad zu bestimmen. Der VSL entlang der verschiedenen elektrischen Beanspruchungspfade wird mit der einzelnen EIS-Prüfung bewertet, wenn die Beschreibung jedes elektrischen Beanspruchungspfade im Prüfspulenentwurf enthalten ist.

Das EIS eines voll funktionsfähigen Transformators kann auch einen Luftspalt enthalten. Bei der Anwendung der elektrischen Beanspruchung, bei der ein Luftspalt ein Bestandteil der Gesamtisolierung ist, muss die Prüfanordnung den gleichen oder einen engeren Luftspalt aufweisen (siehe [Anhang A](#)).

Bei allen EIS mit verschiedenen elektrischen Beanspruchungspfaden sind nicht alle EIM in jedem Pfad enthalten. Der Entwurf der repräsentativen Spule muss jede der Untergruppen des gesamten EIS im gewählten Diagnoseverfahren enthalten. Für jeden elektrischen Beanspruchungspfad muss die Beschreibung der Untergruppe festgelegt und die Prüfspannung für die einzelne Bewertung anhand des VSL multipliziert mit der Isolierungsdicke für jede diagnostische Prüfung berechnet werden.

Es wird empfohlen, dass die Dicke der in der Prüfspule verwendeten Isolierung im Prüfbereich (Windung zu Windung, Schicht zu Schicht usw.) 80 % bis 100 % der im Transformatorentwurf mit dem höchsten VSL verwendeten Dicke entspricht.

5.4.2 Offener Wicklungstyp

In einem Beispiel einer Prüfspule mit offener Wicklung besteht das EIS zusätzlich zum Luftspalt aus den folgenden EIM-Kombinationen.

- Gewickelte Papierisolierung, gewickelte Folienisolierung oder Lackisolierung
- Flexible Verbundtafeln aus Folie oder Faser; oder Folien-/Faserverbund aus zwei oder mehr Schichten
- Wickelkopf-Stützkamm oder fingerförmige Stäbe zum Halten der Scheibenwicklung
- Separate Folie, Papier oder flexible Verbundtafel
- Tränkharz

In diesem Beispiel könnte ein elektrischer Beanspruchungspfad ausschließlich aus der Leiterisolierung mit einem zusätzlichem EIM und dem Tränkharz bestehen. Ein weiterer Pfad besteht aus der Leiterisolierung und mehr als einem EIM, jedoch nicht aus allem in Verbindung mit dem Tränkharz. Ein weiterer elektrischer Beanspruchungspfad besteht aus dem gesamten EIS. [Bild 1](#) zeigt ein Beispiel für ein Modell für einen Entwurf eines offenen Wicklungstyps.

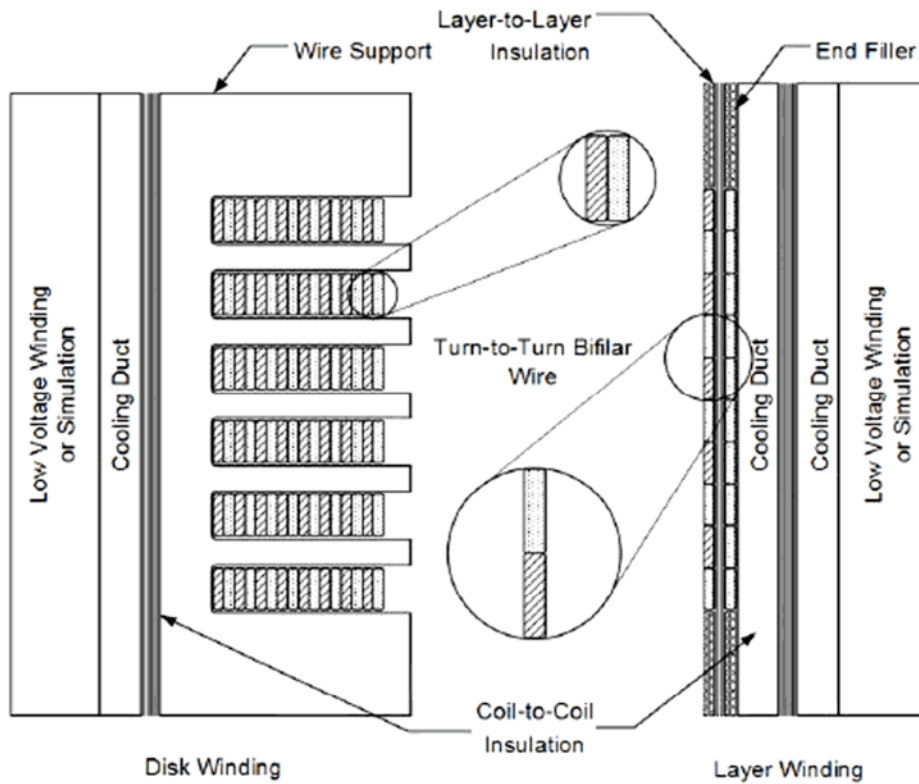


Bild 1 – Beispielmodell für offenen Wicklungstyp

5.4.3 Gießharztyp

Nach [Abschnitt 3](#) gibt es zwei Typen von Trockentransformatoren, die sich in der Struktur von den in [5.4.2](#) beschriebenen offenen Wicklungstypen unterscheiden. Diese beiden Typen, vergossene Transformatoren und Gießharztransformatoren werden Transformatoren oder Prüfspulen vom Gießharztyp genannt. In einem Beispiel für eine Gießharzprüfspule besteht das EIS zusätzlich zum Luftspalt aus folgenden EIM-Kombinationen.

- Gewickelte oder Lackisolierung
- Flexible Verbundtafel aus Folie oder Faser; oder Folien-/Faserverbund aus zwei oder mehr Schichten
- Gießharz, Epoxid oder andere Chemikalien

[Bild 2](#) zeigt ein Beispiel für ein Modell für einen Entwurf eines Gießharztyps.

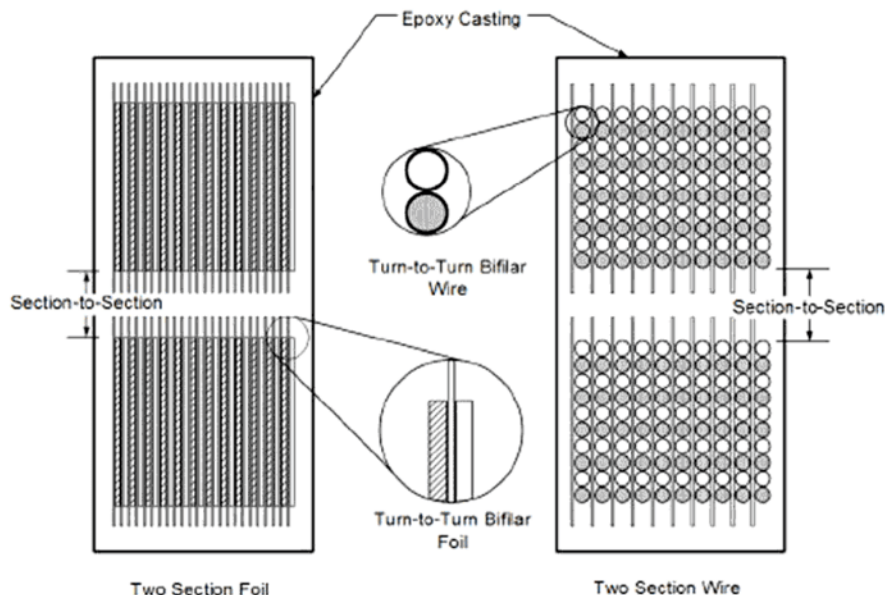


Bild 2 – Beispielmodell für offenen Gießharztyp

5.4.4 Isolierungsbericht

Der Bericht muss die verschiedenen elektrischen Beanspruchungspfade und den VSL für jede Untergruppe des EIS festlegen. Das heißt, dass der Bericht für jede Untergruppe eine genaue Beschreibung jeder Untergruppe des EIS und des geprüften VSL enthalten muss. Die Informationen zu jeder Untergruppe ändert die Definition des bewerteten EIS nicht.

5.4.4.1 Elektrischer Beanspruchungspfad – Windung zu Windung

Die bifilare dielektrische Prüfung für Windung zu Windung wird zwischen zwei benachbarten Leitern durchgeführt, die entweder aus Draht oder Folie bestehen und durch ein elektrisches Isoliermaterial getrennt sind. Wickeldraht darf mit jedem geeigneten elektrischen Isolierungstyp isoliert sein. Bei Folienwicklungen wird die dielektrische Prüfung zwischen benachbarten Folienschichten durchgeführt, die durch ein elektrisches Isoliermaterial getrennt sind.

5.4.4.2 Elektrischer Beanspruchungspfad – Schicht zu Schicht

Die dielektrische Prüfung für Schicht zu Schicht wird zwischen zwei benachbarten Aderschichten in einer Transformatorwicklung durchgeführt, die durch ein elektrisches Isoliermaterial oder -materialsystem getrennt ist.

5.4.4.3 Elektrischer Beanspruchungspfad – Scheibe zu Scheibe

Die dielektrische Prüfung für Scheibe zu Scheibe wird zwischen zwei benachbarten Adern in einer scheibengewickelten Konfiguration durchgeführt.

5.4.4.4 Elektrischer Beanspruchungspfad – Abschnitt zu Abschnitt

Die dielektrische Prüfung für Abschnitt zu Abschnitt wird zwischen zwei benachbarten Abschnitten einer lagengewickelten Konfiguration durchgeführt.

5.4.4.5 Elektrischer Beanspruchungspfad – Spule zu Spule

Die dielektrische Prüfung für Wicklung zu Wicklung wird zwischen zwei Spulen innerhalb eines Transformators durchgeführt, die durch ein elektrisches Isoliermaterial getrennt sind, z. B.

Oberspannungsspule zu Unterspannungsspule oder Oberspannungsspule zu Unterspannungsspule, wenn das Prüflingssystem simuliert werden muss. Die Niederspannungsspule darf durch eine Masseplatte aus Metall simuliert werden. Die Trennung zwischen den beiden Spulen darf eine feste Isolierung und/oder Luft einschließen.

5.4.4.6 Elektrischer Beanspruchungspfad – Spule zu Masse

Die dielektrische Prüfung für Spule zu Masse wird zwischen dem Kern und der Oberspannungswicklung durchgeführt. Der Kern darf durch eine Masseplatte aus Metall simuliert werden. Die Trennung zwischen dem Kern und der Wicklung darf eine feste Isolierung und/oder Luft einschließen.

6 Für den Entwurf des Prüfverfahrens erforderliche Informationen

6.1 Allgemeines

Die folgenden Angaben sind ein Beispiel für Informationen über eine Transformatorfamilie, die für den Entwurf einer optimalen EIS-Bewertung erforderlich sind. Die Informationen in den [Tabellen 2](#) und [3](#) zeigen mehrere mögliche elektrische Beanspruchungspfade und stellen mögliche Ausfallpfade dar. Verschiedene Transformatorfamilien können unterschiedliche elektrische Beanspruchungspfade aufweisen. Die zusammengestellten Daten müssen die spezifischen Entwürfe umfassen, die im EIS-Prüfling enthalten sein müssen.

In den folgenden Abschnitten sind Informationen enthalten, die angeben, wie die anfänglichen Spannungsbeanspruchungspegel für jeden elektrischen Beanspruchungspfad zu bestimmen sind. Andere Verfahren oder kompliziertere Entwurfsregeln dürfen zur Bestimmung der für [Tabelle 2](#) und [3](#) erforderlichen Werte verwendet werden. Diese Informationen werden in [Abschnitt 11](#) verwendet, um geeignete elektrische Prüfschärpen für die Durchführung der Prüfung zu bestimmen.

In [6.2](#) wird, wie in [Tabelle 2](#) und dem der Tabelle folgenden Text dargelegt, ein Beispiel mit Beanspruchungspegeln für die Betriebsspannung angegeben. In [6.3](#) wird, wie in [Tabelle 3](#) und dem darauffolgenden Text dargelegt, ein zweites Beispiel mit Beanspruchungspegeln für die Stoßspannung angegeben.

6.2 Beispiel für Betriebsspannung

6.2.1 VSL-Bestimmung

Für den Entwurf eines einzelnen EIS-Prüflings über die in der Beispieltabelle unten aufgeführten Entwürfe ist der erste Schritt, die höchsten VSL-Werte unabhängig vom spezifischen Modell auszuwählen. Dabei ist es unüblich, alle ausgewählten VSL-Werte beim gleichen Transformatormodell zu finden.

Die repräsentativen Spulen müssen eine Konstruktion aufweisen, die eine Bewertung der elektrischen Beanspruchungspfade mit den höchsten VSL-Werten für diese Bewertung erlauben. Bei Anwendung der Werte aus der Beispieltabelle oben würden die Prüfspannungen anhand der maximalen Beanspruchungswerte für jeden einzelnen Pfad ausgewählt.

ANMERKUNG Die höchsten elektrischen Beanspruchungspegel stammen weder notwendigerweise vom gleichen Produktionsmodell noch notwendigerweise vom Transformatormodell mit der höchsten Betriebsspannung.

Tabelle 2 – Beispiele für die Spannungsbeanspruchungspegel einer Reihe von Transformatorspulen, die mit dem gleichen EIS konstruiert wurden

Beispiel für Produktionsmodelle einer bestimmten maximalen Betriebsspannung	Maximale Betriebsspannung	Möglicher elektrischer Beanspruchungspfad		
		Windung zu Windung	Schicht zu Schicht Abschnitt zu Abschnitt Scheibe zu Scheibe	Spule zu Masse Spule zu Spule
		VSL bei jedem elektrischen Beanspruchungspfad		
		max. (kV/mm)	max. (kV/mm)	max. (kV/mm)
2.5K412	2,5 kV	1,20	1,10	1,50
5K604	5 kV	1,40	1,60	1,60
10K987	10 kV	1,10	0,98	1,70
15K141	15 kV	1,70	1,45	0,80
20K555	20 kV	1,40	0,95	0,90
25K457	25 kV	1,30	1,40	1,20
35K730	35 kV	1,50	1,30	0,90

Nach den Werten aus der Beispieltabelle oben stammen die höchsten elektrischen Beanspruchungspegel von:

- Modell 15K141 bei 1,7 kV/mm für Windung zu Windung
- Modell 5K604 bei 1,6 kV/mm für Schicht zu Schicht oder Abschnitt zu Abschnitt oder Scheibe zu Scheibe
- Modell 10K987 bei 1,7 kV/mm für Spule zu Masse oder Spule zu Spule

Siehe [Anhang C](#) für eine vollständigere Tabelle, die verwendet werden kann, um die Transformatoren einer Familie, die mit demselben EIS konstruiert wurden, zu beschreiben.

6.2.2 Bestimmung des Prüfwerts

Nach diesen Werten können die repräsentativen Spulen mit zwei Spulenwicklungen konstruiert und mit den Spannungen auf der Grundlage von Pegeln über den in Tabelle 2 angegebenen Werten geprüft werden.

Anhand dieser Prüfspannungswerte wäre ein einzelnes EIS für alle Produktionsspulen anwendbar, die bei maximal diesen VSL betrieben würden. Mit den Werten aus der Beispieltabelle müssen die Prüfspannungen 0,5 kV/mm oder mehr als die VSL-Werte betragen, die als höchste für die Repräsentation der Familie bestimmte VSL-Werte ausgewählt wurden. Wie in der Auswahlprüfung ([Abschnitt 9](#)) beschrieben wird dies der Ausgangspunkt für die geprüften VSL-Werte für jeden der in Tabelle 2 ausgeführten Spannungsbeanspruchungspfade sein.

- 2,2 kV/mm oder höher für Windung zu Windung
- 2,1 kV/mm oder höher für Schicht zu Schicht oder Abschnitt zu Abschnitt oder Scheibe zu Scheibe
- 2,2 kV/mm oder höher für Spule zu Masse oder Spule zu Spule

Diese VSL-Prüfwerte decken Transformatorspulen für Betriebsspannungen mit niedrigen Werten von 1 kV oder höheren Werten ab; nach dem Beispiel von [Tabelle 1](#) decken diese VSL-Prüfwerte von der niedrigsten max. Betriebsspannung von 2,5 kV bis zu höchsten Betriebsspannungen von 35 kV ab, da alle diese Spulen Betriebs-VSL unterhalb der Prüfwerte aufweisen.

6.2.2.1 Anfangsprüfspannung für Windung zu Windung

Zur Bewertung des VSL für Windung zu Windung muss die innere Spule eine bifilare Konstruktion haben. Die zwischen den beiden Leitern anzulegende Prüfspannung ist das Produkt des VSL multipliziert mit der Isolierungsdicke.

Beispiel für diesen Entwurf und die Berechnung der Prüfspannung: Der Entwurf hat einen gewickelten Leiter mit 0,05 mm Papier und 50 % Überlappung, dabei ist die Gesamtdicke der Isolierung zwischen zwei Windungen $4 \times 0,05 \text{ mm} = 0,2 \text{ mm}$.

Prüfspannung für Windung zu Windung = $2,2 \text{ kV/mm} \times 0,2 \text{ mm} = 0,44 \text{ kV}$ oder höher

Die Prüfung für Windung zu Windung bewertet die Wicklungsisolierung in Kombination mit der tränkharzgesättigten Leiterisolierung.

6.2.2.2 Anfangsprüfspannung für Schicht zu Schicht oder Abschnitt zu Abschnitt oder Scheibe zu Scheibe

Zur Bewertung von Abschnitt zu Abschnitt (s-s) oder Scheibe zu Scheibe (d-d) oder Schicht zu Schicht (l-l) sorgt eine zweite Wicklung über der inneren Wicklung mit geeigneten zusätzlichen Isolierungen für geeignete Prüfbedingungen. Für einige Entwürfe für Prüfspulen sind nur zwei Wicklungen erforderlich, für andere Entwürfe können dagegen mehr als zwei Wicklungen erforderlich sein. Beim Entwurf der Prüfspulen aus dem Beispiel in [Tabelle 1](#) wird die äußere Spule mit der berechneten Prüfspannung aufgeladen, die zwischen den äußeren und den inneren Spulen angelegt wird.

Beispiel für diesen Entwurf und die Berechnung der Prüfspannung: Der Entwurf hat eine Leiterisolierung + flexible Tafel + Tränkharze = 2,4 mm

Prüfspannung für s-s/d-d/l-l = $2,1 \text{ kV/mm} \times 2,4 \text{ mm} = 5,04 \text{ kV}$

6.2.2.3 Prüfspannung für Spule zu Masse oder Spule zu Spule

Zur Bewertung von Spule zu Masse (c-g) mit einem Luftspalt als Teil der zu bewertenden Gesamtisolierung werden die Wicklungen mit dem Metallrahmen der geerdeten Prüfeinrichtung unter Spannung gesetzt. Wenn der Luftspalt nicht Teil der Bewertung ist, muss ein Erdungselektrodensystem aus Metall direkten Kontakt mit der äußeren Oberfläche der Prüfspule haben, wenn die Prüfspannung angelegt wird.

Beispiel für diesen Entwurf und die Berechnung der Prüfspannung: Der Entwurf hat keinen Luftspalt = Leiterisolierung + flexible Tafel + Tränkharze = 7,3 mm

Prüfspannung für c-g ohne Luftspalt = $2,2 \text{ kV/mm} \times 7,3 \text{ mm} = 16,0 \text{ kV}$

Beispiel für diesen Entwurf und die Berechnung der Prüfspannung: Der Entwurf hat einen Luftspalt = Leiterisolierung + flexible Tafel + Tränkharze + Luftspalt = 20,0 mm

Prüfspannung für c-g mit Luftspalt = $2,2 \text{ kV/mm} \times 20,0 \text{ mm} = 44,0 \text{ kV}$

6.3 Beispiel für Stoßspannung

Wie bei den Diskussionen zu Spannungsbeanspruchungspegeln (VSL) sollte ein Entwickler eines Transformators in der Lage sein, die maximalen Stoßspannungspegel einzuschätzen, denen die verschiedenen Bereiche des Transformatorentwurfs ausgesetzt sein werden. Im Fall von [Tabelle 2](#) können die berechneten Beanspruchungspegel bei Betriebsspannung direkt berechnet und daher schriftlich dokumentiert werden. Bei dielektrischer Stoßspannungsbeanspruchung ist die Spannungsverteilung je nach Wicklungskonfiguration und verwendeten Isoliermaterialien nicht linear und darf mithilfe von Ausgleichsspannungsanalysen (TVA), wie sie in IEEE C57.12.58 beschrieben wird, oder anhand einer Analyse der finiten Elemente (FEA) berechnet werden. Da die Anstiegszeit mit 1,2 konsistent ist, würde dies ermöglichen, dass jeder Entwurf in einer spezifischen Familie bewertet und die tatsächlichen maximalen Beanspruchungspegel als Funktion des Prozentsatzes der angebrachten Spannung in einer periodischen

Stoßspannungsprüfung bestimmt werden können. Bei Stoßspannungsprüfungen sollten jedoch alle Entwürfe für die Bewertung in der höchsten Spannungsstufe gewählt werden, von der zu erwarten ist, dass sie von diesem Prüfergebnis abgedeckt wird. Üblicherweise bedeutet dies für diese Spannungsstufe, dass eine periodische Stoßspannungsprüfung am kleinsten und am größten Transformator für eine bestimmte Spannungsstufe durchgeführt wird und bei ähnlichen Ergebnis die höchste Beanspruchung verwendet wird. Wenn sich die Ergebnisse unterscheiden, sollte ein Transformator mittlerer Größe ebenfalls geprüft werden, um sicherzustellen, dass die ungünstigste dielektrische Situation des gesamten Produktionsbereichs bewertet wird. In Tabelle 3 sind Beispiele mit unterschiedlichen Spannungsstufen angegeben.

Bei der periodischen Stoßspannungsprüfung wird eine Niederspannung am Transformator angebracht und als Ergebnis dieser Prüfung werden die Beanspruchungspegel als Prozentsatz der Eingangsstoßspannung erhalten. Das Ergebnis sollte den maximalen Prozentsatz der Eingangsspannung an jeder Position des Entwurfs eindeutig zu ermitteln, der dann in die Tabelle unten anhand der Positionen (möglicher elektrischer Beanspruchungspfad) eingegeben werden kann. Dieser Prozentsatz wird mit der Stoßspannungsstufe multipliziert, um den Entwurfsspannungsbeanspruchung für jeden elektrischen Beanspruchungspfad zu bestimmen.

Tabelle 3 – Beispiel für mögliche Stoßspannungsprüfwerte unter Zuhilfenahme von Spannungsstufen

Beispiel für Produktionsmodelle einer bestimmten Betriebsspannung	Höchste Spannung für Betriebsmittel U_m	Stoß Spannungs-klasse	Möglicher elektrischer Beanspruchungspfad					
			Windung zu Windung		Schicht zu Schicht, Abschnitt zu Abschnitt. Scheibe zu Scheibe		Spule zu Masse	
			Max. %	kV	Max. %	kV	Max. %	kV
500 kVA	7,2 kV	40 kV	1,0	0,40	5,0	2,0	45	18,0
1 000 kVA	12,0 kV	75 kV	1,2	0,90	4,5	3,4	38	28,5
2 500 kVA	17,5 kV	95 kV	1,3	1,24	5,2	4,94	50	47,5
1 000 kVA	24,0 kV	125 kV	1,6	2,0	4,8	6,0	48	60,0
5 000 kVA	24,0 kV	125 kV	2,1	2,64	5,3	6,63	55	68,8
10 000 kVA	36,0 kV	170 kV	1,8	4,59	4,9	8,33	60	102

In dieser Tabelle, die auf der periodischen Stoßspannungsprüfung basiert, wird eine Dokumentation jeder Stoßspannungsstufe in Bezug auf die maximale Stoßspannung angegeben, die für jeden elektrischen Beanspruchungspfad in der Entwurfssfamilie bei allen Spannungsstufen beobachtet wurde. Diese Spannungszahl wird wie folgt der Ausgangspunkt für Stoßspannungsauswahlprüfung:

Für eine Anfangsstoßspannungsprüfung ist zuerst die maximale Spannungsbeanspruchung zu ermitteln. Wenn die Einheiten so entworfen werden, dass die Anforderungen der Stoßspannungsstufe mit 170 kV (LI170 kV) erfüllen, wäre die Beanspruchung von Windung zu Windung 4,59 kV, von Schicht zu Schicht 8,33 kV und von Spule zu Masse 102 kV. Diese Spannungspegel stellen den Ausgangspunkt für die Auswahlprüfung dar.

Prüfspulen können anschließend für Alterungsversuche gebaut werden. Zwei Optionen sind möglich –

- 1) eine funktionsfähige Oberspannungsspule mit kleinen Maßen
- 2) ein Satz repräsentativer Spulen, mit dem die verschiedenen elektrischen Beanspruchungspfade eines üblichen Entwurfs simuliert werden können, der diese Prüfung modellhaft wiedergibt.

Jede der Prüfspulen sollte so entworfen sein, dass sichergestellt ist, dass sie bei den in Tabelle 3 angegebenen Spannungspegeln ohne Ausfall beansprucht werden können. Wenn eine funktionsfähige Spule mit geringen Maßen verwendet wird, um den tatsächliche Prozentsatz der Eingangsprüfspannung zu bestätigen, wird eine anschließende periodische Stoßspannungsprüfung empfohlen. Daraus ergeben sich die maximal zulässigen Werte, die für das Isoliersystem verwendet werden.

7 Prüfeinrichtung

Für jeden EIS-Prüfling wird eine eigene Prüfeinrichtung entworfen und verwendet. Sie müssen für jede Bewertung individuell hergestellt werden. Dies ist erforderlich, da die Spule hinsichtlich ihrer Größe und Maße nicht fest definiert werden kann. Die limitierenden Faktoren dabei sind die physikalischen Einschränkungen der Wärmeschränke für die thermische Alterung sowie das Gewicht der einzelnen Prüfspulen. Diese Einschränkungen müssen vor Beginn des Prozesses der thermischen Alterung zwischen allen interessierten Kreisen abgestimmt werden.

Die Prüfeinrichtung ist der Metallteil des Kernstapels und besteht aus dem oberen Teil, dem Innenteil der Spule und der Bodenplatten. Bild 3 gibt Beispiel für Prüfanordnungen von Spule zu Spule und von Spule zu Masse. [Anhang A](#) zeigt weitere Beispiele für die Konstruktion einer Prüfeinrichtung.

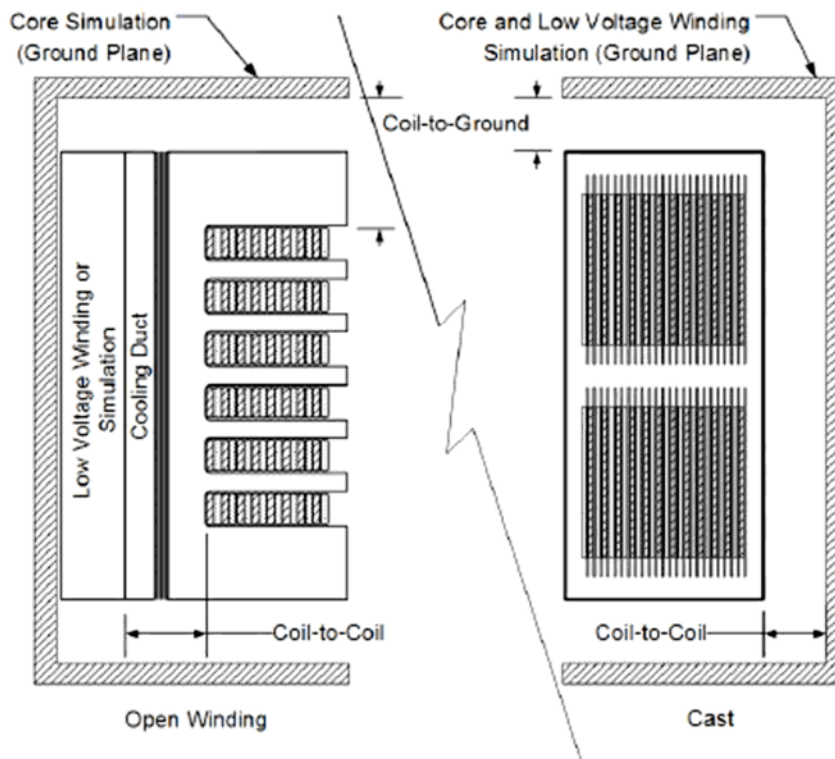


Bild 3 – Elektrischer Beanspruchungspfad – Spule zu Spule und Spule zu Masse

8 Anzahl der Prüfspulen

8.1 Allgemeines

Das Projekt ist in zwei Phasen aufgeteilt.

- Phase 1: Auswahlprüfung: Diagnose vor der Alterung zur Bewertung des Prüfspulenenwurfs und der Konstruktion nach [Abschnitt 9](#).
- Phase 2: Thermische Alterung: Die Anfangsbrauchbarkeitsprüfungen der Prüfspule zu Bewertung der Spulen vor der thermischen Alterung, gefolgt von der in [Abschnitt 10](#) beschriebenen thermischen Alterung.

8.2 Auswahlprüfung

Vor dem Bau des vollständigen Prüfspulensatzes wird eine geringe Anzahl an Prüfspulenprototypen zur Bewertung des Entwurfs und der Konstruktion verwendet. Es ist davon auszugehen, dass diese Bewertung vor dem Bau der Prüfspulensätze für die thermische Bewertung abgeschlossen ist.

- a) Wenn die Auswahlprüfung den Entwurf und die Konstruktion bestätigt und die erforderlichen Ergebnisse erzielen kann, sind die Prüfspulensatz zu bauen.
- b) Wenn die Auswahlprüfung bestätigt, dass eine geplante messbare Eigenschaft nicht erreichbar sein wird, können die Prüfspulen neu entworfen werden. Wenn die Spulen neu entworfen werden, müssen die Auswahlprüfungen erneut durchgeführt werden.

Ein Zweck der Durchführung der Auswahlprüfung vor der Konstruktion des gesamten Prüfspulensatzes ist es, die Kosten und die Zeitverzögerung vor der thermischen Alterung zu minimieren.

Eine Spule ist für jede Eigenschaft erforderlich, die bei der Auswahlprüfung bewertet werden muss. Die beiden gängigsten bei der Auswahlprüfung bewerteten Eigenschaften sind thermisch-mechanischer Spannungsbruch und dielektrischer Durchschlag.

- Thermisch-mechanischer Spannungsbruch hilft bei der Bestimmung des möglichen Alterungstemperaturbereichs. Eine Prüfspule ist für diese thermische Bewertung erforderlich.
- Der dielektrische Durchschlag bewertet die tatsächliche Stromfestigkeit der Prüfspulen. Zusätzliche Prüfspulen sind in den dielektrischen Auswahlprüfungen zu verwenden, eine für jeden dielektrischen Parameter, der in Phase 2, thermische Alterung, bewertet wird.

Da die in Phase 1 durchgeführten Auswahlprüfungen zerstörend sind, dürfen die in Phase 1 verwendeten Prüfspulen nicht für die Bewertung in Phase 2 eingesetzt werden.

Einzelheiten zur Auswahlprüfung sind [Abschnitt 9](#) zu entnehmen.

8.3 Anzahl an für Phase 2, thermische Alterung, erforderlichen Prüfspulen

Sobald die in [Abschnitt 9](#) beschriebenen Auswahlprüfungen abgeschlossen sind und der endgültige Entwurf der Prüfspulen bestätigt wurde, kann der gesamte Prüfspulensatz hergestellt werden. Dieser gesamte Spulensatz, der thermischer Alterung ausgesetzt wird, muss in Übereinstimmung mit den Anfangsbrauchbarkeitsprüfungen der Spule vor der Anwendung thermischer Alterung bewertet werden, um sicherzustellen, dass keine Schäden bei Versand und/oder Handhabung vor der thermischen Alterung aufgetreten sind.

Die Mindestanzahl an Transformatorspulen ist neun, drei je Alterungstemperatur. Bei repräsentativen Spulen ist die Mindestanzahl fünfzehn, fünf je Alterungstemperatur. Sollten weitere Alterungstemperaturen erforderlich sein, müsste für jede zusätzliche Alterungstemperatur ein zusätzlicher Spulensatz erforderlich sein. Eine größere Anzahl an Prüfspulen je Alterungstemperatur ist zulässig. Beim in [10.3.2](#) beschriebenen Heizverfahren mit Ausgleichsstrom ist eine zusätzliche Spule je Alterungstemperatur erforderlich.

ANMERKUNG Aufgrund der zur Herstellung der Prüfspulen erforderlichen Kosten und Zeit wird empfohlen, dass mindestens ein zusätzlicher Prüfspulensatz hergestellt und unter genormten Laborbedingungen gelagert wird.

Wie in Datenauswertung, [Abschnitt 11](#), beschrieben, muss die thermische Alterung bei mindestens 3 erhöhten Alterungstemperaturen eingeleitet werden. Wenn eine der Prüfspulen vorzeitig ausfällt, d. h. drei oder mehr Alterungszyklen vor dem nächsten Spulenausfall des Satzes, und wenn eine anschließende Untersuchung den Ausfall als Folge eines Fehlers bei Werkstoff oder Konstruktion oder Verarbeitung schlüssig darstellt, kann die Spule als Ausreißer aus der Auswertung genommen werden. In einer solchen Situation muss eine Ersatzspule thermischer Alterung mit dem gleichen Alterungszyklus, gleicher Konditionierung und gleicher Handhabung ausgesetzt werden, um die Mindestanzahl zu erhalten. Wenn der Prüfspulensatz größer als die Mindestanzahl ist, kann ein Ausreißer aus der Auswertung entfernt werden, ohne ausgetauscht werden zu müssen.

Die Entscheidung für die Anzahl an anfänglichen Alterungstemperaturen und die Anzahl an Prüfspulen innerhalb eines Satzes je Alterungstemperatur muss vor Beginn der thermischen Alterung festgelegt werden. Beide Aspekte der thermischen Alterung müssen anhand der erforderlichen Informationen festgelegt werden. Eine größere Anzahl an Alterungstemperaturen ist zulässig.

Weitere Einzelheiten zur Bewertung der thermischen Alterung sind [Abschnitt 10](#) zu entnehmen.

9 Prüfverfahren für die Auswahlprüfung: Diagnose vor der Alterung zur Bewertung von Entwurf und Konstruktion.

9.1 Einleitung

Der Zweck der Auswahlprüfung ist die Festlegung so vieler Parameter des Programms wie möglich vor dem Beginn der vollständigen thermischen Alterung. Die bei der Auswahlprüfung erhaltenen Prüfergebnisse werden dazu verwendet, zu bestimmen, ob es wahrscheinlich ist, dass das verwendete EIS in Entwurf und Konstruktion der Prüfspulen die gewünschten thermische Bemessung erreicht.

Der Zweck der Auswahlprüfung:

1. von Entwurf und Konstruktion mit einer geringen Anzahl an Spulen. Diese wird mit einer Anfangsbrauchbarkeitsprüfung der Prüfspule (9.2) durchgeführt.
2. Festlegung der Obergrenze möglicher Alterungstemperaturen.
3. Bewertung der tatsächlichen Anfangsdurchschlagfestigkeit des EIS an den Prüfspulen. Die minimale dielektrische Spannung für die Stehspannungsprüfung muss auf den für die Transformatorspulenfamilie erforderlichen VSL beruhen. Dabei ist es möglich, einen höheren Wert anhand der tatsächlichen Festigkeit der Prüfspulen festzulegen.

Die Bewertung von Entwurf und Konstruktion soll eine Anleitung für die Ermittlung der Prüfgrenzen sein, die beim Aufbau der gesamten in [Abschnitt 10](#) beschriebenen thermischen Alterung beachtet werden müssen. Die üblichsten Aspekte sind thermisch-mechanische Spannungsbrüche und dielektrischer Durchschlag. Beispiele für messbare Eigenschaften:

1. Thermisch-mechanisch: Ermittlung der maximalen Prüftemperatur, die für die vollständige thermische Alterung der Prüfspulen geeignet ist.
2. Dielektrischer Durchschlag: Ermittlung der maximalen Spannungsfestigkeit der verschiedenen elektrischen Beanspruchungspfade in ungealterten Prüfspulen.
3. Stoß: Ermittlung der maximalen Stoßspannungsfestigkeit der verschiedenen elektrischen Beanspruchungspfade in ungealterten Prüfspulen.

Messbare Eigenschaften müssen vor Beginn der thermischen Alterung bestimmt werden. In diesem Teil der Normenreihe IEC 61857 wird die grundlegende thermische Bewertung und Klassifizierung festgelegt, die als Basis für komplexere Bewertungen mit mehreren Faktoren erforderlich sind, die sich außerhalb des Anwendungsbereichs dieses Teils von IEC 61857 befinden.

9.2 Anfangsbrauchbarkeitsprüfung der Prüfspule

Bevor die Prüfspulen einer erhöhten Temperatur ausgesetzt werden, müssen sie alle einer Sichtprüfung und einem anfänglichen Voralterungszyklus unterzogen werden, um beschädigte Prüflinge auszusondern. Die Anfangsbrauchbarkeitsprüfung der Prüfspulen muss folgende Schritte einschließen und in der angegebenen Reihenfolge ausgeführt werden:

- Jede Prüfspule wird einer diagnostischen dielektrischen Anfangsprüfung unterzogen, bei dem die in [Abschnitt 6](#) berechneten Spannungspegel aufgebracht werden. Für die Betriebsspannung werden diese Pegel in allen Teilen von [6.2.2](#) dargelegt. Für Stoßspannung werden diese Pegel in [6.3](#) dargelegt. Wie in [6.1](#) erwähnt, kann das Isoliersystem mit nur einem der beiden oder mit beiden Spannungstypen bewertet werden. Die dielektrischen Prüfungen sind wie in [4.6.2](#) beschrieben durchzuführen.
- Nach erfolgreicher Durchführung dieser dielektrischen Anfangsprüfsequenz werden die Prüfspulen anschließend den vordiagnostischen Kälteschock und der Befeuchtung ausgesetzt, die in [4.4](#) und [4.5](#) beschrieben wurden.
- Während die Spulen noch der sichtbaren Kondensation aus der Befeuchtungskonditionierung ausgesetzt sind, werden die diagnostischen dielektrischen Prüfungen bei einem zweiten Satz wie in [4.6.2](#) beschrieben durchgeführt.

Alle Prüfspulen, die den Anfangsdiagnoszyklus nicht bestehen, sind für die Prüfung nicht zulässig und durch anwendbare Spulen zu ersetzen. Nur Prüfspulen, die die Anfangsbrauchbarkeitsprüfung der Prüfspule bestehen, werden einer Prüfung unterzogen.

9.3 Bewertung von Entwurf und Konstruktion vor der thermischen Alterung – Ermittlung möglicher Obergrenzen für die thermische Alterung

Die Prüfspule wird zunehmend erhöhten Temperaturen in Intervallen von 24 h ausgesetzt. Nach jedem Beanspruchungsintervall wird die Prüfspule aus der thermischen Beanspruchung genommen und unter genormten Laborbedingungen abkühlen gelassen. Anschließend wird sie einer Sichtprüfung auf Anzeichen physikalischer Degradation unterzogen.

- Bei vergossenen und Gießharztransformatoren kann die physikalische Degradation sichtbare Risse oder Mattheit oder Schmelzen eines Werkstoffs sein. Dies ist ein Hinweis darauf, dass die thermische Beanspruchung physikalischen Schaden erzeugt, was heißt, dass die Beanspruchungstemperatur zu hoch für die Bewertung der thermischen Zersetzung ist.
- Bei offenen Trockentransformatoraufbauten kann die physikalische Degradation durch eine sichtbare Trennung der Überlappung der Wicklungsisolierung angezeigt werden.

Wenn kein Hinweis auf physikalische Degradation beobachtet werden kann, ist die Prüfspule bei der nächsthöheren Beanspruchungstemperatur thermischer Beanspruchung auszusetzen.

Die Temperatur ist weiterhin schrittweise zu erhöhen, bis

- a) die Beanspruchungstemperatur mindestens 10 K über der in [Tabelle 1](#) in [4.3](#) angegebenen maximalen Alterungstemperatur für die thermische Zielklasse des Isoliersystems liegt oder
- b) eine festgelegte höhere Temperatur erreicht wurde, oder
- c) die Prüfspule Anzeichen physikalischer Degradation zeigt.

Wenn das Isoliersystem eine erwartete thermische Klasse hat, wird empfohlen, dass die Anfangstemperaturprüfung in der Auswahlprüfung 40 K über dieser erwarteten thermischen Klasse liegt. Diese Temperatur wäre die zweite Alterungstemperatur aus [Tabelle 1](#) in [4.3](#). Wenn zum Beispiel die erwartete thermische Klasse 180 °C ist, wäre die Anfangstemperaturprüfung 220 °C.

Bei Beendigung der letzten thermischen Beanspruchung wird die bearbeitete Prüfspule den Konditionierungsbeanspruchungen ausgesetzt und einer elektrischen Prüfung unterzogen, um zu bestimmen, ob die vorgeschlagenen Prüfspannungen und -modi die Erkennung von Ausfällen des Isoliersystems zulassen. Vor der Durchführung dieser dielektrischen Prüfung wird die vordiagnostische Konditionierung durch Kälteeinwirkung ([4.4](#)) und Befeuchtung ([4.5](#)) durchgeführt.

Nach dem Konditionierungszyklus wird die in [4.6.2](#) beschriebene dielektrische Prüfung durchgeführt. Prüfspannungen, die nach Durchlaufen des thermischen Zyklus auf die Prüfspule anzulegen sind, werden anhand der in [Abschnitt 6](#) beschriebenen Spannungspegel bestimmt.

ANMERKUNG Dabei handelt es sich lediglich um eine diagnostische Prüfung zur Bewertung des Bereichs der thermischen Alterung. Es ist nur eine dielektrische Prüfung erforderlich und der Einfachheit halber ist die einminütige Stehspannungsprüfung in dieser Auswahlbewertung ausreichend. Andere dielektrische Prüfungen können ebenfalls verwendet werden, es ist zu diesem Zeitpunkt jedoch nur eine erforderlich.

Wenn die Prüfspule die dielektrische Bewertung in jedem elektrischen Beanspruchungspfad standhält, ist diese Temperatur die maximale Alterungstemperatur für die gesamte thermische Alterung. Wenn die Prüfspule die dielektrische Bewertung in einem der Beanspruchungspfade nicht standhält, ist die Temperatur zu verwenden, die 10 K unter der maximalen Alterungstemperatur der gesamten thermischen Alterung liegt.

9.4 Bewertung von Entwurf und Konstruktion vor der thermischen Alterung – zur Bewertung der tatsächlichen Anfangsdurchschlagfestigkeit des EIS an der Prüfspule mit Betriebsspannung.

Für diese Bewertung wird eine zweite Prüfspule verwendet. Der Zweck dieser Auswahlprüfung ist die Bestimmung der tatsächlichen Anfangsdurchschlagfestigkeit des im Entwurf und der Konstruktion dieser Prüfspulen verwendeten EIS. Die angelegte Anfangsspannung wird aus Entwurfsparametern bestimmt, die in [Tabelle 2](#) angegeben sind. Die Prüfspule wird einer anfänglichen Prüfbeanspruchungspegelspannung TSL ausgesetzt, wie es in den verschiedenen Teilen von [6.2.2](#) für jeden identifizierten elektrischer Beanspruchungspfad beschrieben ist: $TSL (kV) = (VSL + 0,5 \text{ kV/mm}) \times \text{Dicke der Isolierung (mm)}$. Bei einer erfolgreichen Prüfung ist die angelegte Spannung schrittweise zu erhöhen, bis ein Ausfall nach [4.6.2](#) auftritt.

ANMERKUNG Da die Prüfspule keiner thermischen Beanspruchung ausgesetzt wurde, ist es für diese dielektrische Prüfung nicht erforderlich, die in [4.4](#) und [4.5](#) beschriebenen vordiagnostischen Konditionierungszyklen zu verwenden.

Die dielektrische Prüfung nach [4.6.2](#) ist durchzuführen. Wenn in keinem Modus ein Isolierungsdurchschlag auftritt, ist der Spannungspegel um 20 % zu erhöhen und die Prüfung erneut durchzuführen. Weitere Wiederholungsprüfungen mit Erhöhungen in gleichen Schritten sind durchzuführen, bis der Isolierungsdurchschlag bei mindestens einem Prüfmodus erkannt wird. Aus dem Beispiel in [6.2.2.1](#):

TSL 1 = VSL + 0,5 kV/mm Anfangszustand	100 % (TSL 1 = 0,44 kV)
TSL 2 = VSL + 0,5 kV/mm Anfangszustand 2. Prüfung	120 % (TSL 2 = 0,53 kV)
TSL 3 = VSL + 0,5 kV/mm Anfangszustand 3. Prüfung	140 % (TSL 3 = 0,62 kV)

Es ist fortzufahren, bis der Isolierungsdurchschlag für Entwurf und Konstruktion der ungealterten Prüfspule festgelegt ist.

Nach dem obigen Beispiel: Wenn die Spannung, bei der der Isolierungsdurchschlag auftritt, bei 200 % (0,88 kV) liegt, bedeutet das, dass die Isolierung des EIS, wenn sie neu ist, einen Beanspruchungspegel von mindestens 180 % (0,79 kV) standhalten kann. Aufgrund der Informationen aus dieser Prüfung muss die gewählte Spannung im Bereich zwischen dem ursprünglichen TSL von 0,44 kV und 75 % des Höchstwerts vor dem Ausfall liegen; 75 % von 0,79 kV = 0,59 kV. Die gewählte Prüfspannung muss im Bereich von 0,44 kV bis 0,59 kV liegen.

ANMERKUNG – Niedrigere Prüfschärfen werden vermutlich die Dauer der Prüfung überschreiten, können jedoch nützliche Informationen sein.

ANMERKUNG – Das Muster für das angegebene Beispiel für eine Betriebsspannungsprüfung kann auf andere dielektrische Prüfungen wie die dielektrische Stoßspannungsprüfung angewandt werden. Eine separate Prüfspule wäre für jede auswahlgeprüfte dielektrische Prüfung erforderlich.

Wenn der Durchschlagwert einer nicht gealterten Prüfspule nah an der geplanten Prüfspannung liegt, sind Überlegungen erforderlich, um zu entscheiden, ob die Prüfspule neu entworfen werden sollte oder ob der VSL des Projekts verringert werden sollte. Wenn der Durchschlagwert einer ungealterten Spule signifikant höher als die geplante Prüfspannung ist, kann die thermische Alterung mehr Zeit als gewünscht in Anspruch nehmen.

Richtlinien:

- a) Wenn der Durchschlagwert 120 % oder weniger der geplanten Anfangsprüfspannung beträgt, ist Folgendes zu in Betracht zu ziehen
 - a. Neuentwurf der Prüfspulen; oder
 - b. Verringerung des gewählten VSL, was zu einem niedrigeren VSL des bewerteten EIS führt
- b) Wenn der Durchschlagwert zwischen 120 % und dem Doppelten der geplanten Anfangsprüfspannung liegt, ist mit dem ursprünglichen Prüfplan fortzufahren
- c) Wenn der Durchschlagwert größer als das doppelte der geplanten Anfangsprüfspannung ist, ist Folgendes zu beachten
 - a. Neuentwurf der Prüfspulen; oder

- b. Erhöhung der Prüfspannung auf einen höheren VSL-Wert, um die zum Erreichen des Abschlusses erforderliche Zeit zu verringern, oder
- c. Bewahrung der geplanten Anfangsprüfspannungen mit der Erwartung, dass die gesamte thermische Alterung mehr Zeit als ursprünglich angenommen in Anspruch nehmen kann

Tabelle 4 – Beispiele für den dielektrischen Durchschlagwert und empfohlene Anpassungen

Anfangsprüfspannung	Tatsächlicher Durchschlagwert		Empfehlung
2,8 kV/mm	3,36 kV/mm	Die nicht gealterte Prüfspule hat im Vergleich zum Prüfwert eine geringe Lebensdauer der Isolierung. Es wird erwartet, dass die Prüflebensdauer unter thermischer Beanspruchung kurz ist.	Die Prüfspulen sind neu zu entwerfen. Die Verarbeitung ist zu bewerten, um Verbesserungen einzubauen. Der VSL und die Prüfspannungen sind zu verringern, wobei das EIS für die geringere VSL-Bewertung bestimmt wird.
2,8 kV/mm	4,48 kV/mm	Das EIS und der Spulendesign eignen sich für die gemeinsame Verwendung.	Der ursprüngliche Prüfplan ist für die gesamte thermische Alterung zu befolgen. Die Prüfspannung ist zwischen 2,8 kV/mm und 3,36 kV/mm zu wählen (75 % des tatsächlichen Durchschlagwerts).
2,8 kV/mm	9,20 kV/mm	Das EIS und/oder der Entwurf und die Konstruktion der Prüfspule sind sehr stark. Es wird erwartet, dass die Prüflebensdauer unter thermischer Beanspruchung übermäßig lang ist.	Die Prüfspulen sind neu zu entwerfen oder die Prüfspannung ist mit der geeigneten Steigerung des VSL-Werts zu erhöhen oder es ist mit dem Wissen fortzufahren, dass erwartet werden kann, dass vollständige thermische Alterung länger als geplant dauert. Die Prüfspannung ist zwischen 2,8 kV/mm und 6,9 kV/mm zu wählen (75 % des tatsächlichen Durchschlagwerts).

9.5 Bewertung von Entwurf und Konstruktion vor der thermischen Alterung – zur Bewertung der tatsächlichen Anfangsdurchschlagfestigkeit des EIS an der Prüfspule mit Stoßbewertung.

Diese Prüfung wird durchgeführt, um die endgültige Durchschlagfestigkeit der Prüfspulen zu erfassen, wenn sie Stoßströmen ausgesetzt sind. Wie bei der Betriebsspannungsprüfung werden die dielektrischen Anfangsbeanspruchungspegel nach den Ausführungen in 6.3 bestimmt und die dielektrische Beanspruchung anschließend erhöht, bis ein Ausfall auftritt.

Ausfälle in diesen Auswahlprüfungen (oder mit den gealterten Proben) werden in 4.6.3 dieses Dokuments beschrieben. Die Lösung dafür darf darin bestehen, einen weiteren Luftspalt (vertikal) in den Probenaufbau hinzuzufügen oder sie darf einen Neuentwurf des Modells erforderlich machen. Es sollte außerdem beachtet werden, dass gealterte Proben, da die Werkstoffe sich aufgrund der thermischen Alterung verschlechtern

können, leichter kriechen können als ungealterte Proben, daher kann dieser Kriechausfall mit den gealterten Proben durchaus die Ursache für den Ausfall sein (insbesondere bei der Prüfung für Spule zu Masse).

1. Auswahlprüfung für einen funktionsfähigen Transformator. Für dieses Beispiel ist anzunehmen, dass die Spannungen des Prüftransformators den in 6.3 beschriebenen Spannungen entsprechen. Nach IEC 60076-11, Abschnitt 21 sind 170 kV am Transformator anzulegen. Nach erfolgreicher Beendigung dieser Prüfung ist die Spannung am Transformator in Schritten von 10 kV zu erhöhen (d. h. die nächsten an den Transformator anzulegenden Spannungen wären 180 kV, 190 kV usw.). Ein Ausfall stellt in jedem der elektrischen Beanspruchungspfade einen Ausfall dar. Der letzte Spannungspegel, bei dem der Transformator besteht (in diesem Beispiel 180 kV), ist zu wählen, er wird die Grundlage für die Berechnung der auf der Auswahlprüfung basierenden Prüfspannung. Die Spannung für die anschließende Alterungsarbeit ist der erfolgreiche Spannungspegel (in diesem Beispiel 180 kV) multipliziert mit 0,75 kV oder 135 kV. Die tatsächlichen Beanspruchungspegel, die bei der Prüfung als durch die periodische Stoßstromprüfung des Transformators bestätigt angelegt wären, wären wie folgt:

Windung zu Windung $135 \times 0,022 = 2,60 \text{ kV}$ (oder $3,15 \times 165/150 \times 0,75 = 2,60 \text{ kV}$).

Schicht zu Schicht $135 \times 0,053 = 6,56 \text{ kV}$ (oder $7,95 \times 165/150 \times 0,75 = 6,56 \text{ kV}$).

Spule zu Masse $135 \times 0,6 = 74,25 \text{ kV}$ (oder $90,0 \times 165/150 \times 0,75 = 74,25 \text{ kV}$).

Es sollte beachtet werden, dass eine niedrigere Spannung angelegt werden könnte, diese Spannung jedoch nicht geringer als 0,75 mal die BIL-Bewertungsdaten der Transformatorreihe oder wie in diesem Beispiel $170 \text{ kV} \times 0,75 = 127,5 \text{ kV}$ betragen sollte. Die Grundlage für diese Prüfung kann eine beliebige Zahl zwischen 127,5 kV und 135 kV sein. Es sollte beachtet werden, dass sich die Prüfdauer bei steigender Zahl wahrscheinlich verkürzt und dass die Isolieranforderungen an zukünftige Entwürfe bei Prüfung mit einer größeren Zahl auf der geprüften Spannung (d. h. in diesem Fall LI180 kV) und nicht auf der geplanten Spannungsklasse (LI170 kV) beruhen.

2. Auswahlprüfung für eine Prüfspule. In diesem Fall muss die Prüfspule für die Prüfung der einzelnen elektrischen Beanspruchungspfade einzeln eingerichtet werden. Diese müssen in der folgenden Reihenfolge während des Prüfablaufs geprüft werden (Windung zu Windung dann Schicht zu Schicht und zuletzt Spule zu Masse). Der Ausgangspunkt für diese Auswahlprüfung ist wie oben angegeben (3,15 kV, 7,95 kV und 90,0 kV). Die Prüfspule wird dieser Anfangsspannung des Beanspruchungspegels der Stoßspannungsprüfung (ITSL; en: impulse test stress level) für jede dieser elektrischen Beanspruchungspfade ausgesetzt und wenn eine erfolgreiche Durchführung angenommen wird, würde der Spannungspegel für jeden Pfad um 10 % erhöht werden.

Prüfschärfe	Windung zu Windung	Schicht zu Schicht	Spule zu Masse
ITSL	3,15 kV	7,95 kV	90 kV
ITSL +10 %	3,47 kV	8,75 kV	99 kV
ITSL +20 %	3,78 kV	9,54 kV	108 kV
ITSL +30 %	4,10 kV	10,34 kV	117 kV
usw.			

In diesem Beispiel werden drei einzelne Ausfallspannungen bestimmt. Für diese Beispiele werden die folgenden Ausfälle bei der Prüfung angenommen (3,47 kV Windung zu Windung, 10,34 kV Schicht zu Schicht und 99 kV Spule zu Masse). Diese Auswahlprüfungswerte werden anschließend verwendet, um die aufgebrachten Stoßpegel (bei 75 % der Prüfschärfe der Auswahlprüfung) festzulegen, die während der Alterungsdiagnose verwendet werden sollten.

Windung zu Windung $3,47 \text{ kV} \times 0,75 \text{ kV} = 2,60 \text{ kV}$ (kann von 2,36 kV bis 2,60 kV geprüft werden)

Schicht zu Schicht $10,34 \text{ kV} \times 0,75 \text{ kV} = 7,76 \text{ kV}$ (kann von 5,96 kV bis 7,76 kV geprüft werden)

Spule zu Masse $99,0 \text{ kV} \times 0,75 \text{ kV} = 74,3 \text{ kV}$ (kann von 67,5 kV bis 74,3 kV geprüft werden)

10 Prüfverfahren für thermische Alterung

10.1 Einleitung

Die Anfangsbrauchbarkeitsprüfung der Prüfspule ist bei der thermischen Alterungsbewertung zu verwenden. Der vollständige Prüfspulensatz ist nach Zufall in den Satz zu teilen, der der thermischen Bewertung bei jeder