

	DIN IEC 60034-18-34 (VDE 0530-18-34)	
	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.	
ICS 29.080.30; 29.160.01	<div data-bbox="1098 510 1401 542" data-label="Text">Einsprüche bis 2008-10-31</div> <div data-bbox="628 616 1056 705" data-label="Text" style="border: 1px solid black; text-align: center; padding: 10px;"> Entwurf </div> <div data-bbox="242 784 1126 958" data-label="Section-Header"> <p>Drehende elektrische Maschinen – Teil 18-34: Funktionelle Bewertung von Isoliersystemen – Prüfverfahren für Wicklungen mit vorgeformten Elementen – Thermomechanische Bewertung von Isoliersystemen (IEC 2/1511/CD:2008)</p> </div> <div data-bbox="242 990 1362 1149" data-label="Text"> <p>Rotating electrical machines – Part 18-34: Functional evaluation of insulation systems – Test procedures for form-wound windings - Evaluation of thermomechanical endurance of insulation systems (IEC 2/1511/CD:2008)</p> </div> <div data-bbox="242 1243 632 1276" data-label="Section-Header"> <p>Anwendungswarnvermerk</p> </div> <div data-bbox="242 1292 1445 1350" data-label="Text"> <p>Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2008-08-11 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und Stellungnahme vorgelegt.</p> </div> <div data-bbox="242 1361 1445 1422" data-label="Text"> <p>Weil die beabsichtigte Norm von der vorliegenden Fassung abweichen kann, ist die Anwendung dieses Entwurfes besonders zu vereinbaren.</p> </div> <div data-bbox="242 1438 617 1467" data-label="Text"> <p>Stellungnahmen werden erbeten</p> </div> <div data-bbox="242 1482 1431 1612" data-label="List-Group"> <ul style="list-style-type: none"> – vorzugsweise als Datei per E-Mail an dke@vde.com in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter www.dke.de/stellungnahme abgerufen werden – oder in Papierform an die DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE, Stresemannallee 15, 60596 Frankfurt am Main. </div> <div data-bbox="242 1628 1445 1686" data-label="Text"> <p>Die Empfänger dieses Norm-Entwurfs werden gebeten, mit ihren Kommentaren jegliche relevante Patentrechte, die sie kennen, mitzuteilen und unterstützende Dokumentationen zur Verfügung zu stellen.</p> </div> <div data-bbox="1149 1843 1445 1874" data-label="Text"> <p>Gesamtumfang 31 Seiten</p> </div> <div data-bbox="322 1917 1361 1946" data-label="Text"> <p>DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE</p> </div>	

Beginn der Gültigkeit

Diese Norm gilt ab ...

Nationales Vorwort

Das internationale Dokument IEC 2/1511/CD:2008 „Rotating electrical machines – Part 18-34: Functional evaluation of insulation systems – Test procedures for form-wound windings – Evaluation of thermomechanical endurance of insulation systems“ (CD, en: Committee Draft) ist unverändert in diesen Norm-Entwurf übernommen worden. Dieser Norm-Entwurf enthält eine noch nicht autorisierte deutsche Übersetzung.

Der Teil 34 der 1. Ausgabe der Normenreihe IEC 60034-18 wurde – wie auch die nachfolgenden Teile – vom MT10 des IEC/TC2 „Drehende elektrische Maschinen“ vollständig überarbeitet. Ziele der Überarbeitung sind:

- Aktualisierung Inhalt und Status, insbesondere
 - Berücksichtigung neuer Materialien, Technologien, Prüfverfahren, Anwendungen;
 - Berücksichtigung neuer normativer Regeln und Harmonisierungsanforderungen;
 - technische Korrekturen und Verbesserungen;
 - Berücksichtigung von Prüferfahrungen mit dieser Normenreihe;
 - inhaltliche Straffung und Koordinierung zwischen den einzelnen Hauptabschnitten;
 - Berücksichtigung neuer Anwendungen im Geltungsbereich.

Um Zweifelsfälle in der Übersetzung auszuschließen, ist die englische Originalfassung des CD entsprechend der diesbezüglich durch die IEC erteilten Erlaubnis beigefügt. Die Nutzungsbedingungen für den deutschen Text des Norm-Entwurfes gelten gleichermaßen auch für den englischen IEC-Text.

Das internationale Dokument wurde vom TC 2 „Rotating machinery“ der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) erarbeitet und den nationalen Komitees zur Stellungnahme vorgelegt.

Die 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 prEN nur 2 Monate 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 diesen Norm-Entwurf ist das nationale Arbeitsgremium K 311 „Drehende elektrische Maschinen“ der DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE (www.dke.de) zuständig.

Nationaler Anhang NA (informativ)

Zusammenhang mit Europäischen und Internationalen Normen

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

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

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

Tabelle NA.1

Europäische Norm	Internationale Norm	Deutsche Norm	Klassifikation im VDE-Vorschriftenwerk
–	IEC 60028:1925	–	–
EN 60034-1:2004	IEC 60034-1:2004	DIN EN 60034-1 (VDE 0530-1):2005-04	VDE 0530-1
EN 60034-15:1996	IEC 60034-15:1995	DIN EN 60034-15 (VDE 0530-15):1996-08	VDE 0530-15
EN 60034-18-1:1994	IEC 60034-18-1:1992 + Corr.:1992	DIN EN 60034-18-1 (VDE 0530-18-1):1995-08	VDE 0530-18-1
EN 60034-18-1/A1:1996	IEC 60034-18-1/A1:1996	DIN EN 60034-18-1/A1 (VDE 0530-18-1/A1):1998-06	VDE 0530-18-1/A1
–	IEC 60034-18-32	–	–
–	IEC 60034-18-42:2008	–	–
–	IEC 60034-27	–	–
HD 429 S1:1983	IEC 60093:1980	DIN IEC 60093 (VDE 0303-30):1993-12	VDE 0303-30
	IEC 60243-1:1998	DIN EN 60243-1 (VDE 0303-21):1999-03	VDE 0303-21
EN 60270:2001	IEC 60270:2000	DIN EN 60270 (VDE 0434):2001-08	VDE 0434
		DIN EN 60270 Ber 1 (VDE 0434 Ber 1):2002-11	VDE 0434 Ber 1
EN 60505:2004	IEC 60505:2004	DIN EN 60505 (VDE 0302-1):2005-08	VDE 0302-1
–	IEC TR 60894:1987	–	–
–	IEC 61251	–	–
–	IEC 62539	–	–

Nationaler Anhang NB (informativ)

Literaturhinweise

DIN EN 60034-1 (VDE 0530-1):2005-04, *Drehende elektrische Maschinen – Teil 1: Bemessung und Betriebsverhalten (IEC 60034-1:2004); Deutsche Fassung EN 60034-1:2004*

DIN EN 60034-15 (VDE 0530-15), *Drehende elektrische Maschinen – Teil 15: Bemessungsstoßspannungen drehender Wechselstrommaschinen mit Formspulen im Ständer*

DIN EN 60034-18-1 (VDE 0530-18-1), *Drehende elektrische Maschinen – Teil 18: Funktionelle Bewertung von Isoliersystemen; Hauptabschnitt 1: Allgemeine Richtlinien*

DIN EN 60034-18-1/A1 (VDE 0530-18-1/A1), *Drehende elektrische Maschinen – Teil 18: Funktionelle Bewertung von Isoliersystemen; Hauptabschnitt 1: Allgemeine Richtlinien*

DIN IEC 60093 (VDE 0303-30):1993-12, *Prüfverfahren für Elektroisolistoffe – Spezifischer Durchgangswiderstand und spezifischer Oberflächenwiderstand von festen, elektrisch isolierenden Werkstoffen (IEC 60093:1980); Deutsche Fassung HD 429 S1:1983*

— Entwurf —

E DIN IEC 60034-18-34 (VDE 0530-18-34):2008-08

DIN EN 60243-1 (VDE 0303-21):1999-03, *Elektrische Durchschlagfestigkeit von isolierenden Werkstoffen – Prüfverfahren – Teil 1: Prüfungen bei technischen Frequenzen (IEC 60243-1:1998); Deutsche Fassung EN 60243-1:1998*

DIN EN 60270 (VDE 0434):2001-08, *Hochspannungs-Prüftechnik – Teilentladungsmessungen (IEC 60270:2000); Deutsche Fassung EN 60270:2001*

DIN EN 60270 Berichtigung 1 (VDE 0434 Berichtigung 1):2002-11, *Berichtigungen zu DIN EN 60270 (VDE 0434):2001-08*

DIN EN 60505 (VDE 0302-1), *Bewertung und Kennzeichnung von elektrischen Isoliersystemen*

**Drehende elektrische Maschinen –
Teil 18-34: Funktionelle Bewertung von Isoliersystemen –
Prüfverfahren für Wicklungen mit vorgeformten Elementen –
Thermomechanische Bewertung von Isoliersystemen**

Inhalt

	Seite
Einleitung	6
1 Anwendungsbereich	6
2 Normative Verweisungen	6
3 Allgemeine Feststellungen	6
3.1 Beziehung zu IEC 60034-18-1	6
3.2 Thermomechanische Alterungsverfahren	6
3.3 Kennzeichnung von Prüfverfahren	7
3.4 Referenz-Isoliersystem	7
4 Prüflinge und Prüfobjekte	7
4.1 Konstruktiver Aufbau	7
4.2 Anzahl der Prüflinge	7
5 Aufheiz- und Abkühlzyklen	8
5.1 Temperatur und Dauer bei Aufheiz- und Abkühlzyklen	8
5.2 Anzahl der Zyklen	8
6 Prüfverfahren 1 für Stäbe/Spulen in Modellnuten	9
6.1 Modellnut	9
6.2 Abstützungen für die Stirnseiten von Prüfobjekten	9
6.3 Aufheizverfahren	9
6.4 Abkühlverfahren	10
7 Prüfverfahren 2 für freiliegende Stäbe/Spulen	10
7.1 Anordnen der Stäbe/Spulen für die Prüfung	10
7.2 Aufheizverfahren	10
7.3 Abkühlverfahren	10
8 Diagnose-Prüfungen	10
8.1 Vorhergehende Qualitätssicherungs- und Diagnoseprüfungen	10
8.2 Empfohlene Häufigkeit von Diagnose-Prüfungen	11
8.3 Vorgeschlagene Diagnose-Prüfungen für einzelne Stäbe/Spulen	11
8.4 Abschließende Diagnose-Prüfungen	11
8.5 Qualifizierungskriterien	12
9 Auswertung und Prüfbericht	12
 Bild 1 – Einzelheiten des Prüfverfahrens	 14
Bild 2 – Zeit-Temperatur-Diagramm für einen Aufheiz- und Abkühlzyklus	14
Bild 3 – Beispiel für eine Modellnut mit zwei Stäben	15

Einleitung

IEC 60034-18-1 enthält allgemeine Leitlinien für die Bewertung und Klassifizierung von Isoliersystemen für drehende elektrische Maschinen.

In diesem Teil werden zyklische Temperaturbeanspruchungen zur Bewertung von Isoliersystemen für Wicklungen mit vorgeformten Elementen behandelt. Diese Art der Beständigkeit ist von besonderer Bedeutung für große drehende Maschinen (speziell für indirekt gekühlte) und für Maschinen, die während des normalen Betriebs einer Vielzahl von erheblichen Lastwechseln unterworfen werden.

1 Anwendungsbereich

Dieser Teil von IEC 60034 beschreibt Prüfverfahren zur Bewertung von Isoliersystemen für Wicklungen mit vorgeformten Elementen bei zyklischen thermomechanischen Beanspruchungen.

Bei dieser Bewertung wird das Verhalten eines Erprobungs-Isoliersystems mit dem eines Referenz-Isoliersystems mit nachgewiesener Betriebserfahrung verglichen.

2 Normative Verweisungen

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

IEC 60028:1925, *International standard of resistance for copper*

IEC 60034-1:2004, *Rotating electrical machines – Part 1: Rating and performance*

IEC 60034-15, *Rotating electrical machines – Part 15: Impulse voltage withstand levels of rotating a.c. machines with form-wound stator coils*

IEC 60034-18-1, *Rotating electrical machines – Part 18: Functional evaluation of insulation systems – Section 1: General guidelines*

IEC 60034-18-32, *Rotating electrical machines – Part 18: Functional evaluation of insulation systems – Section 32: Test procedures for form-wound windings – Electrical evaluation of insulation systems used in machines up to and including 50 MVA and 15 kV*

IEC 60034-18-42:2008, *Rotating electrical machines – Part 18-42: Qualification and acceptance tests for partial discharge resistant electrical insulation systems (Type II) used in rotating electrical machines fed from voltage converters*

IEC 60034-27:2006, *Rotating electrical machines – Part 27: Off-line partial discharge measurements on the stator winding insulation of rotating electrical machines*

IEC 60093:1980, *Method of test for volume resistivity and surface resistivity of solid electrical insulating materials*

IEC 60243-1:1998, *Electrical strength of insulating materials – Test methods – Part 1: Tests at power frequencies*

IEC 60270:2000, *Partial discharge measurements Amendment 1 (2001-10)*

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

IEC TR 60894:1987, *Guide for test procedure for the measurement of loss tangent of coils and bars for machine windings*

3 Allgemeine Feststellungen

3.1 Beziehung zu IEC 60034-18-1

Falls die Empfehlungen dieses Teils nichts anderes angeben, sollten die Leitlinien von IEC 60034-18-1 befolgt werden.

3.2 Thermomechanische Alterungsverfahren

Als Ergebnis der zyklischen thermomechanischen Beanspruchungen können im Isoliersystem der Wicklungen sechs Alterungsvorgänge auftreten:

- a) Ablösungen
- b) Spaltenbildung zwischen den Lagen der Isolierung
- c) Spaltenbildung zwischen einer Lage der Isolierung und dem Leiter
- d) Abrieb an der Isolierungsoberfläche
- e) Rissbildung rings um die Isolierung (Ablösen von Bändern, Risse am Umfang), besonders im Stirnseitenbereich
- f) Mechanische Beschädigung der Isolierung durch Verformung der Stirnseiten der Wicklung

3.3 Kennzeichnung von Prüfverfahren

Abhängig davon, welche Alterungsvorgänge nachzubilden sind, werden zwei Prüfverfahren beschrieben:

Prüfverfahren 1, bei dem Prüfstäbe/-spulen der Wicklung in Modellnuten angeordnet werden, wobei die Bedingungen in einer realen Maschine nachgebildet werden, einschließlich der Abstützungen an beiden Enden der Stäbe/Spulen.

Prüfverfahren 2, bei dem sich die Stäbe/Spulen ohne Behinderungen durch Modellnuten und Stirnseitenabstützungen frei bewegen können.

Das Prüfverfahren 1 kann zur Nachbildung aller sechs Alterungsvorgänge angewendet werden. Dieses Verfahren ist für die Bewertung der thermomechanischen Beständigkeit am aussagekräftigsten, da es die Bedingungen, denen die Wicklung der Maschinen im Betrieb ausgesetzt sind, genauer nachbildet.

Das Prüfverfahren 2 kann zur Nachbildung von Alterungsvorgang a) und – in manchen Fällen – von Alterungsvorgang c) angewendet werden, nämlich dann, wenn die Wicklung konstruktiv so ausgeführt ist, dass eine freie axiale Bewegung der Stäbe/Spulen in den Nuten möglich ist.

Bei beiden Prüfverfahren werden die Prüfobjekte vor den Untersuchungen Qualitätssicherungs- und diagnostischen Prüfungen unterworfen. Zu bestimmten vorgeschriebenen Zeiten während und am Ende der zyklischen thermischen Beanspruchungen werden die diagnostischen Prüfungen wiederholt. Danach werden einige zerstörende Prüfungen ausgeführt.

3.4 Referenz-Isoliersystem

Es muss ein Referenz-Isoliersystem nach dem gleichen Prüfverfahren wie beim Erprobungs-Isoliersystem geprüft werden. Ein Isoliersystem ist dann für den Einsatz als Referenz-Isoliersystem geeignet, wenn es über hinreichend lange Zeiträume unter den für das Isoliersystem typischen Betriebsbedingungen ein erfolgreiches Betriebsverhalten gezeigt hat. Die Wärmeklasse des Referenz-Isoliersystems darf von der des Erprobungs-Isoliersystems nicht mehr als eine Klasse abweichen. Falls keine Erfahrung mit einem passenden Referenz-System vorliegt, müssen maximal zulässige Werte für die durch die thermomechanischen Lebensdauerprüfungen verursachten Eigenschaftsänderungen des Isoliersystems ausgewählt werden; in einigen Fällen erfolgt das nach einer Übereinkunft zwischen Hersteller und Betreiber.

4 Prüflinge und Prüfobjekte

4.1 Konstruktiver Aufbau

Der Prüfling muss ein realer Stab oder eine reale Spule (siehe Bild 1) für eine drehende Maschine sein. Der Prüfling muss gleiche Form und gleiche Länge wie ein(e) Stab/Spule für den möglichen Einsatz in einer realen Maschine haben. Er muss so hergestellt werden, dass das Isoliersystem nach gleichem konstruktiven Aufbau und mit den gleichen Werkstoffen sowie mit den gleichen Fertigungsverfahren wie bei einem(r) realen Stab/Spule auf einen Leiter aufgebracht wird. Der Leiterquerschnitt, die Isolierdicke, die Kriechweglängen sowie die Glimmschutzanordnungen müssen ähnlich wie bei einem(r) realen Stab/Spule für die zu prüfende maximale Bemessungsspannung ausgeführt sein.

Beim Prüfverfahren 1 umfasst das Prüfobjekt eine Anzahl von Prüflingen (siehe 4.2), die in Modellnuten angeordnet und wie bei einer realen Maschine abgestützt sind.

Die Stäbe oder die Spulen müssen wie in der realen Maschine vollständig ausgehärtet sein.

4.2 Anzahl der Prüflinge

Bei jeder thermomechanischen Prüfung müssen mindestens vier Stäbe oder zwei Spulen untersucht werden. Zusätzliche Stäbe/Spulen sind erforderlich, um die Leitertemperatur zu überwachen und um an einer

Referenz-Gruppe (nicht zyklisch beanspruchter) Stäbe/Spulen Durchschlag-Spannungsprüfungen auszuführen (siehe 5.1, 6.3 und 7.2). Wenn die Temperatur über die Kupfer-Widerstandsänderung gemessen wird, sind diese zusätzlichen Spulen/Stäbe möglicherweise überflüssig.

5 Aufheiz- und Abkühlzyklen

5.1 Temperatur und Dauer bei Aufheiz- und Abkühlzyklen

Die zyklisch thermomechanische Beanspruchung des zu prüfenden Isoliersystems wird in der Weise ausgeführt, dass die Prüfobjekte abwechselnd zwischen festgelegten oberen und unteren Grenztemperaturen aufgeheizt und abgekühlt werden. Diese sind an der Oberfläche der an Hochspannung liegenden Leiter des Prüfobjektes sowohl im geraden Abschnitt als auch in den Krümmungsbereichen zu messen, damit irgendein Temperaturgefälle-Effekt so klein wie möglich gehalten wird (siehe 6.3 a) und 7.2).

Die Messung der Leitertemperatur darf mit Hilfe von Thermoelementen, Heißeleitern oder Glasfaser-Optik-Fühlern erfolgen. Um einen guten Kontakt mit der Leiteroberfläche zu erreichen, muss der Temperaturfühler in den noch nicht isolierten Leiterverband eingebaut oder in ein durch die Isolierung eines gesonderten Kontroll-Stabes gebohrtes Loch eingeführt werden.

Um das Einbringen einer Sonde direkt auf den Kupfer-Leiter zu vermeiden, kann alternativ der Widerstand des Stabes/der Spule gemessen werden. Der Kupfer-Widerstand hängt von der Temperatur wie in IEC 60028 beschrieben ab. Aus dem Widerstands-Messwert bei Raumtemperatur (zwischen 10 °C und 30 °C) des Stabes/der Spule kann nach der Beziehung in IEC 60028 die mittlere Kupfer-Temperatur bestimmt werden. Der Widerstand kann während des Aufheizens aus dem Spannungsabfall über dem Stab/der Spule gemessen werden, wenn ein Gleichstrom zum Aufheizen eingespeist wird. Die Spannungsmessung muss so nahe als möglich an der Isolierung und immer an gleicher Stelle erfolgen. Die Temperatur entlang der Oberfläche des Stabes/der Spule muss gleichmäßig und innerhalb einer Toleranz von $\pm 10^\circ\text{K}$ liegen, was mit einem berührungslosen Messmittel, wie z. B. einer Infrarot-Kamera oder einem Pyrometer, überprüft werden kann. Die Anschlüsse sollten normalerweise thermisch isoliert sein, um Wärmesenken zu vermeiden.

Nur die obere Grenztemperatur kann mit dieser Methode gemessen werden. Um den Zyklus erneut zu starten, wenn die untere Temperaturgrenze erreicht ist, wird eine Oberflächen-Temperaturmessung durchgeführt. Es ist vor der Oberflächen-Temperaturmessung erforderlich, die untere Temperaturgrenze am Leiter mit einer Kontrollmessung durch zeitlich begrenzte Einspeisung eines Gleichstromes und Messung der Widerstandsänderung zu überprüfen. Diese Stromeinspeisung ist klein zu halten, um die Kupfer-Temperatur während des Abkühlens des Stabes/der Spule nicht zu erhöhen. Diese Methode stimmt mit der „Widerstands-Methode“ in IEC 60034-1 überein.

Während des Alterungsprozesses wird eine Zunahme der thermischen Leitfähigkeit der Isolierung erwartet, aber diese Veränderung sollte nur einen begrenzten Einfluss auf die untere Grenztemperatur haben.

Die obere Grenztemperatur muss normalerweise mit der Wärmeklasse T_C des Isoliersystems übereinstimmen. Sie muss innerhalb eines Bereiches von $\pm 3^\circ\text{K}$ eingehalten werden. Bei Anwendung der Kupfer-Widerstandsmethode zur Temperaturkontrolle muss der obere Grenzwert $(T_C - 5)^\circ\text{C}$ eingehalten werden. Bei dieser Methode muss die obere Grenztemperatur auf $\pm 5^\circ\text{K}$ eingehalten werden. Da sich die thermische Leitfähigkeit häufig im Verlauf des Alterungsprozesses ändert, ist es erforderlich, die Kupfertemperatur während der Prüfung mindestens an einer(m) Spule/Stab zu überwachen. Die untere Grenztemperatur muss zwischen 30 °C und 50 °C liegen.

Einige Isoliersysteme haben eine Glasübergangstemperatur oberhalb der oberen Grenztemperatur. Das kann die Prüfergebnisse beeinflussen, insbesondere beim Vergleich mit einem Isoliersystem, das eine niedrige Glasübergangstemperatur hat.

Sowohl die Zeit für das Aufheizen und als auch für das Abkühlen muss jeweils zwischen 30 min und 60 min liegen, siehe Bild 2. Das Erprobungs-Isoliersystem und das Referenz-Isoliersystem müssen mit derselben zyklischen Beanspruchung geprüft werden, es sei denn, dass die oberen Grenztemperaturen bei voneinander abweichenden Wärmeklassen der Isoliersysteme unterschiedlich sind.

ANMERKUNG Für Maschinen mit besonderen thermischen Betriebsbedingungen können kürzere Zeiten festgelegt werden.

5.2 Anzahl der Zyklen

Die Prüfobjekte müssen mit mindestens 500 thermischen Zyklen beansprucht werden.

6 Prüfverfahren 1 für Stäbe/Spulen in Modellnuten

6.1 Modellnut

Die thermomechanische Prüfung nach diesem Prüfverfahren muss an Stäben/Spulen ausgeführt werden, die in Modellnuten eingebaut sind. Dabei sind folgende Anforderungen zu erfüllen:

- a) Die Modellnuten und die Ausladung der Stäbe/Spulen außerhalb der Nut müssen genau so lang wie diejenigen in einer realen Maschine sein (siehe Bild 1).
- b) Aus Blechen aufgebaute Modellnuten werden bevorzugt; zulässig sind jedoch auch Modelle, die hinreichend genau die Nutoberflächen und die mechanischen Eigenschaften von Blechpaketen wiedergeben. Während der Prüfung dürfen keine maßlichen Verformungen des Nutaufbaus stattfinden. Kühlkanäle sollten besser mit vorgesehen sein. Sie sollten in der Breite einander ähnlich sein und Gleiteigenschaften für die Isolierungsoberfläche ähnlich denen in der realen Maschine haben.
- c) Der Einbau der Stäbe/Spulen in die Modellnuten muss in der gleichen Weise wie bei den Nuten einer realen Maschine erfolgen, indem die üblichen Fertigungsverfahren und Bauteile eingesetzt werden. Der Festsitz der Nutkeile und der Seitenbeilagen soll axial gleichmäßig sein. Das Modell sollte vorzugsweise entsprechend der Maschinenausführung waagrecht oder senkrecht angeordnet werden. Anderenfalls ist zu befürchten, dass der Alterungsprozess nach 3.2 e) nicht geeignet nachgebildet wird.

Zusätzliche Einzelheiten von Modellen siehe Anmerkung zu Bild 3.

6.2 Abstützungen für die Stirnseiten von Prüfobjekten

Die Stirnseiten von Stäben/Spulen müssen – soweit es möglich ist – wie in der realen Maschine abgestützt werden.

6.3 Aufheizverfahren

Das Aufheizverfahren muss so ausgewählt werden, dass sich der Temperaturgradient in der Stab-/Spulen-Isolierung so weit wie möglich so einstellt wie in einer realen Maschine während der Aufheizung, und zwar sowohl im geraden Bereich als auch in den Stirnseiten. Um das zu erreichen, sollte die Temperatur an den Kupferleitern am höchsten sein. Die Heizanordnungen müssen für alle Prüflinge gleiche Temperatursteigerungsraten ermöglichen. Das kann den Einsatz von Wärmeschilden oder Wärmeisolierungen, die den Wärmefluss beeinflussen, erfordern.

Die folgenden Aufheizverfahren dürfen angewendet werden:

- a) Aufheizung mit elektrischem Strom durch die Leiter
Bei diesem Verfahren kann zum Aufheizen der Leiter der Stäbe/Spulen entweder Wechsel- oder Gleichstrom verwendet werden. Die elektrischen Anschlüsse sollten entsprechend bemessen und wärmeisoliert sein, damit sichergestellt ist, dass sie nicht zu Temperatursenken oder Wärmequellen werden. Falls Wechselstrom verwendet wird, ist es empfehlenswert, die Verbindungen mit den Leitern so auszuführen, dass die Summe der Ströme innerhalb jeder Modellnut klein ist, damit eine übermäßige Aufheizung magnetischer Bauteile des Modells als Folge elektromagnetischer Verluste verhindert wird.
- b) Aufheizung von innen mit Hilfe von Flüssigkeit oder Dampf
Wenn die Prüfobjekte für direkte Wasser- oder Gaskühlung ausgeführt sind, darf die Aufheizung in der Weise erfolgen, dass heiße Flüssigkeit oder Gas durch die hohlen Teilleiter oder Kühlkanäle geleitet wird.
- c) Kombination der Verfahren a) und b)
Die Aufheizverfahren a) und b) dürfen gemeinsam angewendet werden, jedoch ist eine derartige Kombination normalerweise wegen ihrer Kompliziertheit weniger wünschenswert als das Verfahren a) oder b) allein.

Eine genaue Nachbildung der zyklischen thermischen Beanspruchung erfordert, dass die Isolierung der Prüfobjekte dieselbe Oberflächen-Temperatur wie in einer realen Maschine annimmt, was besonders zu Beginn des Abkühlzyklus gilt. Das könnte eine zusätzliche Aufheizung oder Kühlung des Nut-Modells erfordern, und zwar abhängig von dessen thermischen Eigenschaften.

6.4 Abkühlverfahren

Das Abkühlverfahren muss so gewählt werden, dass es die in der Isolierung einer realen Maschine auftretenden Temperaturgradienten während der Abkühlung nachbildet. Die folgenden Verfahren dürfen angewendet werden:

a) Kühlung mit Lüftern

Bei diesem Verfahren wird auf die Oberfläche der Stäbe/Spulen in ihrer gesamten Länge strömende Luft gerichtet, und zwar senkrecht zu den Nutbereichen. Dieses Verfahren ist für Stäbe/Spulen geeignet, die in einer realen Maschine fremdbelüftet werden.

b) Kühlung des Nut-Modells mit Flüssigkeit

Bei diesem Verfahren wird zur Kühlung des geraden Teils Kühlflüssigkeit durch Kanäle im Nutmodell geleitet, während die Stirnseiten – wie beim Verfahren a) – mit strömender Luft gekühlt werden. Dieses Verfahren führt möglicherweise zu einer schnelleren Abkühlung als das Verfahren a). Das Verfahren ist auch für Stäbe/Spulen geeignet, die in einer realen Maschine von außen gekühlt werden.

c) Innen-Kühlung mit Flüssigkeit

Dieses Verfahren ist für Stäbe/Spulen geeignet, die von innen gekühlt werden, und zwar entweder durch hohle Teilleiter oder durch Kühlkanäle innerhalb des Leiters. Bei diesem Verfahren wird eine Kühlflüssigkeit durch die hohlen Teilleiter oder durch die Kanäle innerhalb des Prüfobjektes geleitet.

7 Prüfverfahren 2 für freiliegende Stäbe/Spulen

7.1 Anordnen der Stäbe/Spulen für die Prüfung

Um bei den Prüflingen eine einheitliche Temperaturverteilung zu gewährleisten, müssen die Stäbe/Spulen parallel und mit gleichen Abständen gegeneinander angeordnet werden. Sie müssen angemessen abgestützt sein, damit unnötige mechanische Beanspruchungen während der Prüfung vermieden werden. Es sollte sorgfältig darauf geachtet werden, dass sich gleichmäßige Temperatur an den Stäben einstellt, da die äußeren Stäbe höhere Strahlungsverluste haben können.

7.2 Aufheizverfahren

Es gelten die in 6.3 beschriebenen Methoden. Um unnötige mechanische Beanspruchungen in den Prüflingen zu vermeiden, müssen die Kupfer-Verbindungen zwischen den Stäben/Spulen außerhalb des Modellpaketes ausreichend flexibel und leicht sein.

7.3 Abkühlverfahren

Es gelten die in 6.4a und 6.4c beschriebenen Methoden.

8 Diagnose-Prüfungen

8.1 Vorhergehende Qualitätssicherungs- und Diagnoseprüfungen

Vor dem Beginn des ersten thermomechanischen Alterungszyklus müssen die folgenden Qualitätssicherungs-Prüfungen ausgeführt werden. Diese Prüfungen werden vor dem Einbringen der Stäbe/Spulen in die Modellnuten und der Abstützung der Enden oder anfänglich für die freiliegenden Stäbe/Spulen durchgeführt.

- a) Sichtkontrolle der Prüfobjekte;
- b) Messung des Oberflächen-Widerstandes der Leitbeläge im Nutteil der Stäbe/Spulen. Es sind zwei leitfähige ringförmige Elektroden in einer bekannten Entfernung im Bereich von 0,1 m bis 1 m aufzubringen (siehe IEC 60093);
- c) Breiten- und Tiefenmessungen an unterschiedlichen Stellen der Nutbereiche, an den Übergängen zu den Stirnseiten und an den Stirnseiten der Prüfobjekte mit einer Genauigkeit von $\pm 0,03$ mm. Die Messpunkte müssen gut gekennzeichnet sein, damit die Messungen an denselben Stellen nach der zyklischen Beanspruchung wiederholt werden können;
- d) Spannungsprüfungen mit $2 U_n + 1$ kV/1 min/50 oder 60 Hz/sinusförmige Spannung/Spannungswerte als Effektivwerte. Gleichstrom ist nicht erlaubt;