

16 IEC 60034-18-x Funktionelle Bewertung von Isoliersystemen

Die funktionelle Bewertung von Isoliersystemen, d. h. die Bewertung der Langzeitbeständigkeit kompletter Isoliersysteme für elektrische Maschinen, wird auf Basis von Prüfverfahren (Funktionsprüfungen) durchgeführt, die ursprünglich bereits 1992 im Auftrag des IEC TC2 erarbeitet worden sind. Die seinerzeit entstandene Normenreihe IEC 60034-18-x wurde seit 2009 in der dafür zuständigen Arbeitsgruppe IEC TC2 MT10 vollständig überarbeitet. Bei einigen der seitdem erschienenen Neuausgaben ist inzwischen eine neuerliche Überarbeitung angestoßen worden, um den technischen Fortschritten und deren industrieller Anwendung Rechnung zu tragen. Daher wird in den vorliegenden Erläuterungen teilweise auch auf aktuelle Entwürfe Bezug genommen, die schon bald als Norm zur Verfügung stehen werden.

In allen Teilen dieser Normenreihe wird ausschließlich das Langzeitverhalten vollständiger Isoliersysteme mithilfe von Modellen, Teilen von Maschinen oder kompletten Maschinen bewertet, wobei die Modelle oder Teile von Maschinen immer alle dazugehörige Isolierstoffe enthalten und unter Anwendung der jeweils zutreffenden Fertigungsverfahren hergestellt werden müssen.

Die Bewertung der Langzeiteigenschaften von einzelnen Isolierstoffen ist nach wie vor nicht Gegenstand dieser Normenreihe. Dazu sei auf die IEC 60216-x (**VDE 0304-x**) verwiesen, in der diese Problematik ausführlich behandelt wird. Aus der Tatsache, dass dort immer nur einzelne Isolierstoffe bewertet werden, folgt, dass weder die im System möglicherweise vorhandene gegenseitig unterstützende Wirkung noch die im Falle chemischer Unverträglichkeit vorhandene gegenseitige negative Beeinflussung der einzelnen Komponenten erfasst wird. Die Ergebnisse einer Bewertung nach IEC 60216-x können also immer nur der Vorauswahl von Komponenten für ein Isoliersystem dienen (z. B. über den Kennwert „Temperaturindex“ (TI) nach IEC 60216-x).

Die Isoliersysteme sind im Betrieb der elektrischen Maschine einer Reihe von Einflussfaktoren ausgesetzt, die in der Literatur oft als TEAM-Einflussgrößen bezeichnet werden, wobei sich die Abkürzung TEAM zusammensetzt aus

T thermische Belastung,

E elektrische Belastung,

A ambiente Belastung, d. h. Belastung durch Umgebungseinflüsse,

M mechanische Belastung.

Je nach Maschinentyp, Maschinengröße, Bemessungsspannung, Einsatzgebiet und Betriebsart haben die einzelnen Einflussgrößen mehr oder weniger Bedeutung für die Langzeitbeständigkeit der Isoliersysteme. Diese Belastungen können auch Alterung hervorrufen, d. h., die Einflussfaktoren werden dann zu Alterungsfaktoren. Logischerweise sind die einzelnen Prüfverfahren dieser Normenreihe nach Art der Einflussfaktoren (Alterungsfaktoren) gegliedert. Das einfachste Verfahren ergibt sich, wenn einer der Alterungsfaktoren (z. B. thermisch oder elektrisch) als dominierend gegenüber den anderen angenommen werden kann.

Ein anderer Grund für die Gliederung der Prüfverfahren sind die spezifischen Besonderheiten der verschiedenen Wicklungsarten. Die vielseitigen Ausführungsarten von Wicklungen und die sich daraus ergebenden Belastungen ihrer Isoliersysteme erfordern unterschiedliche Verfahren der funktionellen Bewertung.

Aufgrund der genannten Unterscheidungskriterien ist die IEC 60034-18-x wie folgt gegliedert:

Teil 18-1: Allgemeine Richtlinien

Teil 18-21: Thermische Qualifizierung von Isoliersystemen für Runddrahtwicklungen

Teile 18-31, 18-32, 18-33, 18-34: Qualifizierung von Isoliersystemen für Wicklungen mit vorgeformten Elementen

Teile 18-41, 18-42: Qualifizierung von Isoliersystemen für die elektrischen Belastungen im Umrichterbetrieb

Basis und Hintergrund für die Ausarbeitung der einzelnen Teile waren die nachfolgenden Normen mit den allgemeinen, für alle elektrischen Betriebsmittel geltenden Regeln zur Bewertung von Isoliersystemen einschließlich der statistischen Auswertung (**Tabelle 16.1**).

IEC 60085	Thermische Bewertung von Isolierstoffen und Isoliersystemen für den Einsatz in elektrischen Betriebsmitteln. Insbesondere werden Wärmeklassen von Isoliersystemen definiert und deren Bezeichnung angegeben, z. B. 130 (B), 155 (F) und 180 (H) für den Einsatz in drehenden Maschinen nach IEC 60034-1.
IEC 60505	Basis für die funktionelle Bewertung der Alterung von elektrischen Isoliersystemen unter dem Einfluss von elektrischen, thermischen, mechanischen oder umweltbedingten Beanspruchungen bzw. von Kombinationen dieser Beanspruchungen (Multifaktor-Beanspruchungen). Es werden die allgemeinen Prinzipien und Verfahren, die bei der Ausarbeitung von funktionellen Prüf- und Bewertungsverfahren befolgt werden sollten, angegeben.
IEC 60792-1	Funktionelle Bewertung von elektrischen Isoliersystemen bei mehreren Einflussgrößen (Multifaktor-Prüfung)
IEC 62539	Statistische Verfahren für die Auswertung von Durchschlagzeiten und Durchschlagspannungen aus elektrischen Prüfungen. Es werden Auswertungen mithilfe der Weibull-Verteilung, aber auch mit anderen Verteilungen beschrieben.
IEC 60493-1	Statistische Verfahren für die Auswertung von Alterungs-Prüfdaten, wobei im Teil 1 Methoden behandelt werden, die sich auf Mittelwerte der Normalverteilung abstützen.

Tabelle 16.1 Normative Basis und Hintergrund für die Ausarbeitung der einzelnen Teile von IEC 60034-18-x

16.1 IEC 60034-18-1 Allgemeine Richtlinien

16.1.1 Einleitung

Vorangestellt seien die bedeutsamen technischen Änderungen, die in der 2. Ausgabe dieser Norm, die im Jahr 2010 erschienen ist, gegenüber der 1. Ausgabe vorgenommen wurden:

- Wie bisher werden die allgemeinen Richtlinien für die funktionelle Bewertung der verschiedenen Wicklungstypen angegeben, zusätzlich jedoch diejenigen für die elektrische Bewertung bei Beanspruchung im Umrichterbetrieb.
- Der Inhalt der Norm wird auf die Angabe allgemeiner Richtlinien konzentriert. Sämtliche technischen Details der Prüfverfahren und Qualifizierungsregeln sind in die nachfolgenden Teile der Norm verlagert.
- Zu den allgemeinen Richtlinien der funktionellen Bewertung werden zusätzliche Details angegeben, insbesondere zu den statistischen Verfahren zum Vergleich zwischen Referenz- und Erprobungs-Isoliersystem und zur Bewertung von geringfügigen Änderungen bei den Komponenten und im Fertigungsprozess.
- Es wird eine neue Eignungsprüfung für die Bestätigung eines erwarteten Qualitätsniveaus im Fertigungsprozess der Isoliersysteme eingeführt.

Für die geplante nächsten Fassung wurden bereits weitere Verbesserungen vorbereitet, die sich z. B. auf eine Qualifizierung eines Kandidatsystems ohne vergleichende funktionale Prüfungen beziehen (siehe Teil 18-41, Abschnitt 15.8) und auch die Qualifizierung eines Kandidatsystems auf der Basis eines standardisierten Lebensdauerhaltens ermöglichen (siehe Teil 18-42, Abschnitt 15.9).

Da es in der Regel schwierig ist, absolute Aussagen über die Beständigkeit eines Isoliersystems gegenüber den TEAM-Einflussgrößen im normalen Betrieb aus Prüfungen zu gewinnen, sind fast alle Funktionsprüfungen im Sinne von Teil 18-1 grundsätzlich vergleichende Prüfungen, abgesehen von Teilen der IEC 60034-18-41 (siehe Abschnitt 15.8). Dies bedeutet, dass neben dem zu untersuchenden Isoliersystem, Erprobungs-Isoliersystem genannt, ein mit Betriebserfahrung verbundenes Isoliersystem, Referenz-Isoliersystem genannt, den jeweiligen Funktionsprüfungen unterzogen wird. Die Funktionsprüfung umfasst jeweils einen Alterungszyklus und einen diagnostischen Zyklus. Die daraus für das Erprobungs-Isoliersystem gewonnenen Ergebnisse werden mit denen des Referenz-Isoliersystems verglichen. Diese Verfahrensweise wird als funktionelle Bewertung bezeichnet.

Alternativ zu den beschriebenen Prüfungen kann der Nachweis der Eignung eines Isoliersystems auch grundsätzlich immer durch die Erfahrungen aus langjährigem, störungsfreiem Betrieb unter den erwarteten Betriebsbedingungen erbracht werden (Referenz-Isoliersystem).

16.1.2 Begriffe (3)

Im Abschnitt 3 der Norm sind insgesamt 21 Begriffe definiert, wobei im Rahmen der vorliegenden Erläuterungen auf sieben wesentliche Begriffe, die im Besonderen verständnisfördernd sind, eingegangen wird:

- „Klassentemperatur“: Temperatur, für die das Isoliersystem geeignet ist. Die Definition entspricht der Wärmeklasse nach IEC 60085 (**VDE 0301-1**) und IEC 60505 (**VDE 0302-1**).
Ergänzend sei erläutert: Bei der Klassentemperatur handelt es sich um die höchste Dauertemperatur im Isoliersystem, die eine hinreichend lange, von der Anwendung abhängige, Zeitdauer ausgehalten werden kann. Der Zuschlag für den sog. Heißpunkt, also die Temperaturdifferenz zwischen der nach IEC 60034-1 zulässigen mittleren Wicklungstemperatur (d. h. der Summe aus Kühlmitteltemperatur und Wicklungserwärmung) und der Klassentemperatur, ist immer eingeschlossen. Dagegen ist abhängig von der Betriebsart und dem Einsatzfall der Maschine zu gewährleisten, dass das Isoliersystem kurzzeitig auch gegenüber höheren Temperaturen als der Klassentemperatur beständig sein muss.

- „Isoliersystem“: isolierende Anordnung auf leitenden Teilen in drehenden elektrischen Maschinen, bestehend aus einem oder mehreren Isolierstoffen.
Ergänzend sei erläutert: Die Definition geht zurück auf die IEC 60505 (VDE 0302-1). Tatsächlich bestehen jedoch die Isoliersysteme elektrischer Maschinen immer aus mehreren Isolierstoffen. Zu beachten sind die Anmerkungen 1 und 2 im Normtext, die darauf hinweisen, dass in einem Isoliersystem mehrere Komponenten mit unterschiedlichen Anforderungen und Bemessungskriterien enthalten sein können.
- „Erprobungs-Isoliersystem“: Isoliersystem, das zur Ermittlung seiner Beständigkeit gegen Alterungseinflüsse untersucht wird.
Ergänzend sei erläutert: Ein „Erprobungs-Isoliersystem“ (oft wie im Englischen „Kandidat-Isoliersystem“ genannt) liegt immer dann vor, wenn ein neues Isoliersystem generiert wurde oder in einem bekannten Isoliersystem Änderungen in der stofflichen Zusammensetzung oder in der Fertigungstechnologie vorgenommen wurden.
- „Referenz-Isoliersystem“: Isoliersystem, dessen Funktionstüchtigkeit durch zufriedenstellende Betriebserfahrung festgestellt wurde.
Ergänzend sei erläutert: Die zufriedenstellende Betriebserfahrung muss unter den für den Vergleich mit einem Erprobungs-Isoliersystem vorausgesetzten Bedingungen vorhanden sein, d. h. sie muss z. B. bei einer bestimmten Klassentemperatur eine für den Anwendungsfall genügend lange Zeitdauer umfassen (siehe Definition „Klassentemperatur“).
- „Prüfobjekt“: zu prüfende Einheit.
Ergänzend sei erläutert: Die zu prüfende Einheit kann eine komplette Maschine, eine Maschinenkomponente oder ein Prüfmodell sein, an denen Funktionsprüfungen ausgeführt werden können. Ein Prüfobjekt darf mehr als einen Prüfling enthalten.
- „Klassifizierung“: eine Reihe von Untersuchungen, die zur Bestimmung der Beständigkeitsklasse eines Isoliersystems führen.

16.1.3 Allgemeine Feststellungen zur funktionellen Bewertung (4)

Alle Alterungsfaktoren – d. h., thermische, elektrische, umgebungsbedingte und mechanische – beeinflussen die Lebensdauer aller Arten von Maschinen. Jedoch ändert sich die Bedeutung jedes dieser Faktoren mit dem Maschinentyp und dem vorgesehenen Betrieb. In einigen Fällen kann einer dieser Alterungsfaktoren als dominant im Vergleich zu den anderen angesehen werden. In anderen Fällen können mehrere Alterungsfaktoren signifikant wirken. Diese unterschiedlichen Bedingungen müssen bei der Auswahl der geeigneten Funktionsprüfung im Sinne dieser Norm berücksichtigt werden.

Die nachfolgende **Tabelle 16.2** gibt Antwort auf die Frage, welche Rolle dabei z. B. die Maschinengröße spielt („+“ = wesentliche Bedeutung, „-“ = geringe Bedeutung):

Maschinengröße	Thermische Belastung	Elektrische Belastung	Umweltbedingte Belastung	Mechanische Belastung
kleine Maschinen	+	-	+	-
mittlere bis große Maschinen (mit vorgeformten Wicklungselementen)	+	+	+	+
sehr große Maschinen (üblicherweise mit Stabwicklungen)	-	+	-	+

Tabelle 16.2 Rolle der Maschinengröße

Natürlich müssen diese Belastungen nicht in jedem Fall wie angegeben zutreffen, z. B. die umweltbedingten Belastungen bei allen Maschinengrößen oder die elektrischen Belastungen bei mittelgroßen Niederspannungsmaschinen. Konstruktive Maßnahmen sind dabei geeignet, das Auftreten bestimmter Einflussgrößen zu verringern bzw. zu vermeiden. In Abhängigkeit davon muss schließlich die Wahl der erforderlichen Funktionsprüfungen getroffen werden.

Am Ende jeder funktionellen Prüfung ist eine funktionelle Bewertung durchzuführen. Das bedeutet, dass die diagnostischen Daten, die vom Erprobungs- und vom Referenz-System erhalten worden sind, miteinander verglichen werden. In der Regel werden die mittleren Ausfallzeiten miteinander verglichen.

Das Erprobungs-System gilt als qualifiziert, wenn die Daten des Erprobungs-Systems nicht schlechter sind als die des Referenz-Systems. Das ist dann der Fall, wenn der 90 %-Vertrauensbereich desjenigen Quantils der gewählten Wahrscheinlichkeits-Verteilungsfunktion, das den Mittelwert repräsentiert, größer ist als derjenige des Referenz-Systems bzw. sich mit diesem überlappt (siehe IEC 60439-1 (**VDE 0660-500**) und IEC 62539). Mit dieser eindeutigen Orientierung auf die mittleren Ausfallzeiten und die Zuordnung des angegebenen Vertrauensbereichs wird eine deutliche Präzisierung bei der statistischen Auswertung der Prüfergebnisse erreicht.

Eine weitere, in der Praxis sehr häufig gestellte Frage ist, wie geringfügige Änderungen im Isoliersystem zu behandeln sind. Dabei gilt zunächst der Grundsatz, dass jede Substitution von Komponenten (Isolierstoffen) oder jede bedeutsame Änderung im Fertigungsprozess ein Referenz-Isoliersystem in ein Erprobungs-Isoliersystem mit der Notwendigkeit einer erneuten funktionellen Bewertung wandelt, es sei denn, die neue Komponente kann als chemisch und physikalisch gleichwertig (identisch) angesehen werden, und die Änderung im Fertigungsprozess hat keinen Einfluss auf die Eigenschaften des elektrischen Isoliersystems. In diesem Fall ist in Verantwortung

des Maschinenherstellers zu entscheiden, ob überhaupt Prüfungen notwendig sind, und wenn ja, so ist es erlaubt, anstelle einer vollständigen funktionellen Bewertung lediglich eine reduzierte funktionelle Bewertung oder spezielle Lebensdauerprüfungen durchzuführen.

Schließlich sei nochmals als wichtige allgemeine Feststellung zur funktionellen Bewertung darauf hingewiesen, dass das Ergebnis der Funktionsprüfungen ein Vergleich mit einem betriebsbewährten Referenzsystem ist, abgesehen von Teilen der IEC 60034-18-41 (siehe Abschnitt 15.8). Jedoch ist es auch möglich, den funktionalen Vergleich mit einem fiktiven Isoliersystem zu führen, dessen Verhaltenskennlinie Bestandteil eines internationalen Standards ist, wie bei IEC 60034-18-42. Dieser Ansatz wird aktuell auch in der neuen Ausgabe der IEC 60034-18-32 hinterlegt.

Grundsätzlich wird für diese Normenreihe angestrebt, auch Prinzipien für die Qualifizierung neuer Isoliersysteme zu hinterlegen, die für eine geringere Lebensdauer vorgesehen sind als das zur Verfügung stehende Referenzsystem. Dieses Konzept ist bereits für die thermische Qualifizierung in der IEC 60034-18-31 eingeführt worden.

Definierte Lebensdauer-Schätzungen für den Betrieb sind weder durch Extrapolation noch durch Berechnungen sinnvoll, da zusätzliche Einflussfaktoren wirken können.

16.1.4 Thermische Funktionsprüfungen (5)

Ziel der thermischen funktionellen Bewertung ist die Bestätigung einer vorgegebenen (erwarteten) Wärmeklasse für das Erprobungs-Isoliersystem. Die Wärmeklassen selbst sind in IEC 60085 (**VDE 0301-1**) genannt, wobei die Klassentemperatur in Verbindung mit einem – in der Praxis seit langem Gebräuchlichen – Buchstaben angegeben wird. Die Nomenklatur wurde jedoch erweitert, und in der letzten Ausgabe der IEC 60034-18-31 wird z. B. die Wärmeklasse F benannt mit 155 (F) oder H mit 180 (H).

Die thermische funktionelle Bewertung wird angewendet, wenn der thermische Alterungsfaktor dominierend gegenüber den anderen Alterungsfaktoren ist.

Falls sich die angestrebte Wärmeklasse für das Erprobungs-Isoliersystem von der bekannten Wärmeklasse des Referenz-Isoliersystems unterscheidet, dürfen angepasste Alterungstemperaturen, unterschiedliche Zeitdauern für die Unterzyklen und – wenn es technisch gerechtfertigt ist – unterschiedliche Diagnosefaktoren angewendet werden. Diese Option gewährleistet eine erhöhte Verfügbarkeit von geeigneten Referenz-Isoliersystemen und unterstützt die wirtschaftliche Dimensionierung eines neuen Isoliersystems gemäß den jeweiligen Anforderungen. Der Unterschied bei den Wärmeklassen darf jedoch aus Gründen der Prüfdurchführung und der Vergleichbarkeit nicht mehr als eine Wärmeklasse betragen.

Wie in der Einleitung beschrieben, werden in der 2. Ausgabe der IEC 60034-18-1 alle detaillierten Festlegungen je nach zu bewertendem Wicklungstyp in die IEC 60034-18-21 oder die IEC 60034-18-31 verlagert, um diese unabhängig voneinander lesbar und anwendbar zu machen. In den vorliegenden Erläuterungen wird jedoch auf Wiederholungen verzichtet. Nachfolgend seien deshalb einige wichtige Details bereits an dieser Stelle genannt und, soweit angebracht, ergänzend erläutert:

Die wesentlichen Parameter des thermischen Alterungs-Unterzyklusses sind

- die erwartete Klassentemperatur des Erprobungs-Isoliersystems,
- Alterungstemperaturen,
- die Zeitdauer der Alterungs-Unterzyklen.

Die Prüfung ist bei wenigstens drei unterschiedlichen Alterungstemperaturen auszuführen. Die niedrigste ausgewählte Alterungstemperatur sollte im Versuch zu einer mittleren Ausfallzeit von etwa 5 000 h oder mehr führen. Gegenüber der niedrigsten Alterungstemperatur sollten wenigstens zwei weitere höhere Alterungstemperaturen in Abständen von mindestens 20 K ausgewählt werden. Dabei sind auch 10 K zulässig, wenn bei mehr als drei Alterungstemperaturen gealtert wird. Die mittlere Ausfallzeit sollte für jede Alterungstemperatur nach etwa zehn Zyklen erreicht werden, um damit genügend Prüfdaten bereitstellen zu können.

Die in einer Tabelle angegebene Zuordnung zwischen Alterungstemperatur und Zeitdauer der Alterungs-Unterzyklen beruht auf langjähriger Prüferfahrung. Für die erwartete Klassentemperatur 155 °C ist es z. B. üblich, die niedrigste Alterungstemperatur zwischen 170 °C und 180 °C zu wählen, woraus sich eine empfohlene Zeitdauer der Alterungs-Unterzyklen von 28 bis 35 Tagen ergibt.

Für die Art und Weise der Temperaturerzeugung werden alternativ empfohlen

- Öfen,
- unmittelbare Aufheizung durch elektrischen Strom,
- Reversierbetrieb an kompletten Maschinen (Motorprüfung),
- Überlagerung des normalen Wechselstroms eines Motors im Leerlauf mit einem Gleichstrom.

Mehrheitlich wird die Ofenlagerung angewendet.

Im Anschluss an jeden thermischen Alterungs-Unterzyklus ist ein diagnostischer Unterzyklus durchzuführen. Dies bedeutet, dass an jedem Prüfling eine Reihe ausgewählter Diagnoseprüfungen ausgeführt werden, wobei die Reihenfolge einzelner Diagnoseprüfungen nicht unerheblich ist. Als Diagnoseprüfungen und mögliche Reihenfolge kommen infrage

- eine mechanische Prüfung (z. B. Aufspannung auf Rütteltisch mit 50-Hz- bzw. 60-Hz-Schwingbewegungen),
- eine Feuchteprüfung (Lagerung in feuchter Atmosphäre mit sichtbarem Feuchteniederschlag),
- eine Spannungsprüfung,
- andere diagnostische Prüfungen (z. B. von Isolationswiderstand, Verlustfaktor und/oder Teilentladungen).

Die Erfahrung hat gezeigt, dass diese Reihenfolge der Diagnoseprüfungen in vielen Fällen die beste Erkennung einer geschädigten Isolierung zulässt, da durch die anfangs auferlegte mechanische Belastung Schäden in der Isolierung, wie z. B. Risse, durch die anschließende Feuchtelagerung bei der abschließenden Spannungsprüfung relativ sicher signalisiert werden.

Zur Auswertung der thermischen Funktionsprüfung ist eine lineare Regressionsanalyse in Arrhenius-Koordinaten mit den aus einer geeigneten Verteilungsfunktion gewonnenen mittleren Ausfallzeiten und den zugehörigen 90 %-Vertrauensbereichen sowohl für das Erprobungs-Isoliersystem als auch für das Referenz-Isoliersystem durchzuführen. Anschließend ist das Diagramm auf die Forderungen für das Erprobungs-Isoliersystem hin zu überprüfen, wobei im einfachsten Fall die Forderung gilt, dass beide Systeme mindestens gleiche mittlere Ausfallzeiten haben sollen. Daraus kann dann die Klassentemperatur (Wärmeklasse) des Erprobungs-Isoliersystems ermittelt werden.

Beim Vergleich von Erprobungs-Isoliersystem und Referenz-Isoliersystem ist vorzusetzen, dass die Ausfallzeit-Temperatur-Kennlinien im Arrhenius-Diagramm Geraden sind. Sollten dabei Abweichungen, wie ein gekrümmter Kurvenverlauf oder sogar ausgeprägte Knickpunkte im Kurvenverlauf erkannt werden, so deutet das auf Unterschiede im Alterungsmechanismus hin, was die Vergleichbarkeit der Systeme infrage stellen kann. Das ist auch dann der Fall, wenn Erprobungs- und Referenz-Isoliersystem deutlich unterschiedliche Neigungen der Geraden aufweisen. In diesen Fällen ist die Funktionsprüfung ggf. bei einer zusätzlichen Alterungstemperatur zu wiederholen.

16.1.5 Elektrische Funktionsprüfung (6)

Die elektrische funktionelle Bewertung wird angewendet, wenn der elektrische Alterungsfaktor dominierend gegenüber den anderen Alterungsfaktoren ist. Die dafür gültigen Qualifizierungsverfahren sind in IEC 60034-18-32, IEC 60034-18-41 und IEC 60034-18-42 genau beschrieben.

Der Alterungsprozess kann dadurch beschleunigt werden, dass die Prüfspannung und/oder die Frequenz erhöht werden. Das Ende der Prüflebensdauer wird entweder als Durchschlag während der elektrischen Alterung oder als Versagen bei einer diagnostischen Prüfung erkennbar.

Für eine vollständige Bewertung sollten wenigstens drei netzfrequente Spannungsniveaus so ausgewählt werden, dass die angestrebte mittlere Zeit bis zum Ausfall beim höchsten Spannungsniveau etwa 100 h und beim niedrigsten Spannungsniveau etwa 10 000 h beträgt. Durch die Prüfung bei den verschiedenen Spannungen kann eine Beziehung zwischen Prüflebensdauer und elektrischer Beanspruchung aufgezeichnet werden. Wie bei der thermischen funktionellen Bewertung ist dabei auf die mittleren Ausfallzeiten einer geeigneten Verteilungsfunktion einschließlich des dazu gehörigen 90 %-Vertrauensbereichs zu orientieren. Für die statistische Auswertung von Durchschlagzeiten wird allgemein die Weibull-Verteilung als geeignet angesehen.

Die Prüflinge können während der elektrischen Alterung Raumtemperatur oder Klassentemperatur haben. Es sollte sorgfältig darauf geachtet werden, dass die dielektrischen Verluste bei hoher Beanspruchung oder erhöhter Frequenz nicht die Ergebnisse durch Temperaturerhöhung in der Isolierung beeinflussen.

Alternativ zur Diagnoseprüfung mit netzfrequenter Hochspannung, die wie bei der Windungsisolierung zerstörend oder wie bei der Hauptisolierung als Stehspannungsprüfung durchgeführt wird, können auch Verlustfaktor- oder Teilentladungsprüfungen als zerstörungsfreie Prüfverfahren angewendet werden.

Mit den Normen zur elektrischen Qualifizierung der Wicklungsisolierung für Umrichterbetrieb IEC 60034-18-41 und -42 wurde die Impulsspannungs-Isolationsklasse (englisch „Impulse Voltage Insulation Class (IVIC)“) der Wicklungsisolierung einer rotierenden Maschine eingeführt. Sie stellt eine Spezifikation der rotierenden Maschine dar, mit der ihr Hersteller die max. zulässigen Impulsspannungsamplituden an ihren Klemmen festlegen oder mit der der Anwender bzw. der Systemintegrator Forderungen an die Festigkeit eines Isoliersystems gegenüber Impulsspannungsamplituden auf Basis dieses Standards stellen können.

Die tatsächlich an den Klemmen umrichtergespeister Maschinen zu erwartenden Spannungen können mit der IEC/TS 61800-8 abgeschätzt werden und wurden bei der Festlegung der Impulsspannungs-Isolationsklassen (IVIC) der Wicklungsisolierung in IEC 60034-18-41 und -42 berücksichtigt.

Mit dem im Juni 2019 erschienenen Amendment zur IEC 60034-18-41 und dem in Kürze erscheinenden Amendment zur -42 werden aus dieser IVIC-Spezifikation resultierende, zum Teil höhere Prüfspannungen auch für die Stehspannungsprüfung festgelegt und in der derzeit erarbeiteten 14. Ausgabe der IEC 60034-1 referenziert.

16.1.6 Mechanische Funktionsprüfung (7)

Es ist bekannt, dass in einigen Anwendungen die mechanische Beanspruchung als Alterungsfaktor wirkt, und zwar entweder allein oder zusammen mit anderen Alterungsfaktoren. Die mechanische Alterung kann eine Folge von Schwingungsbeanspruchungen, Beanspruchungen durch Stromkräfte oder thermomechanischen Beanspruchungen infolge einer sehr großen Zahl von beachtlichen Lastwechseln im normalen Betrieb sein.

Gegenwärtig gibt es jedoch noch keine hinreichenden technischen Kenntnisse, die es erlauben, Prüfverfahren für die mechanische Alterung mit dominierendem mechanischem Alterungsfaktor zu normen. Voraussetzung ist sicherlich ein geeignetes Lebensdauermodell auf Basis des mechanischen Alterungsmechanismus. An einem solchen Modell wird im Rahmen der IEC 60505 gearbeitet.

16.1.7 Funktionsprüfungen zu Umgebungseinflüssen (8)

Obwohl auch Umgebungseinflüsse maßgebend Alterung hervorrufen können, gibt es wie bei den mechanischen Funktionsprüfungen gegenwärtig noch keine hinreichenden technischen Kenntnisse, die es erlauben, genormte Prüfverfahren für umgebungsbedingte Alterung vorzulegen.

Es gibt allerdings weitgehend aufbereitete Prüfverfahren zum Nachweis der Beständigkeit gegenüber speziellen Umgebungseinflüssen, wie z. B. der Wirkung der Kältemittel in Hermetikmotoren oder der Wirkung von ionisierender Strahlung in Kernkraftwerken, die jedoch über den Geltungsbereich dieser Norm hinausgehen.

16.1.8 Funktionsprüfungen mit mehreren Einflussgrößen (9)

Gegenwärtig gibt es nur für Sonderfälle hinreichende technische Kenntnisse, die es erlauben, genormte Prüfverfahren für Beanspruchungen mit mehreren Einflussgrößen vorzulegen. Es ist jedoch unbestritten, dass Alterung durch mehrere Einflussgrößen in Hochspannungsindustriemotoren, in mechanisch hoch beanspruchten Nieder- oder Hochspannungsmaschinen und in thermomechanisch beanspruchten Turbogeneratoren auftreten können, z. B. in der Kombination thermisch-elektrisch (siehe IEC 60034-18-34).

16.2 IEC 60034-18-21 Prüfverfahren für Runddrahtwicklungen – thermische Bewertung und Klassifizierung

In der Norm IEC 60034-18-21 sind fünf sog. Normalprüfverfahren beschrieben. Der Anwender dieser Norm muss dasjenige Prüfverfahren auswählen, das für die Art und Größe der zu prüfenden und zu klassifizierenden Wicklung am besten geeignet ist. Wie in den Erläuterungen zur IEC 60034-18-1 bereits ausgeführt wurde, hat die Erfahrung gezeigt, dass in vielen Fällen die beste diagnostische Bewertung einer durch die Alterung thermisch geschädigten, mehr oder weniger stark versprödeten oder sogar rissbehafteten Isolierung durch Prüfungen in einer bestimmten Reihenfolge möglich wird:

1. mechanische Prüfung,
2. Feuchtelagerung,
3. Spannungsprüfung und/oder andere diagnostische Prüfungen (durchzuführen im unmittelbaren Anschluss an die Feuchtelagerung an den noch feuchten Prüflingen).

In der nachstehenden **Tabelle 16.3** sind die fünf sog. Normalprüfverfahren mit deren Kennzeichnung und Art der diagnostischen Prüfverfahren im diagnostischen Unterzyklus so zusammengestellt, wie sie im Abschnitt 4.8 der IEC 60034-18-21 beschrieben sind.

Im Anhang von IEC 60034-18-21 sind auf informativer Basis ein Beispiel für die Motoretten-Konstruktion (Anhang A) und Beispiele für Modelle von Polwicklungen (Anhang B) dargestellt. Es kann erforderlich sein, dass die Modelle entsprechend der Größe der Maschinen, in denen ein Isoliersystem eingesetzt werden soll, auf größere Abmessungen hin abgeändert werden müssen. Dies ist z. B. mit Rücksicht auf die unterschiedlichen Wärmedehnungen der einzelnen Isolierstoffkomponenten und der Metalle Kupfer und Stahl erforderlich. Auf jeden Fall sind aber die Modelle für das Erprobungs- und das Referenzsystem konstruktiv gleich aufzubauen.

Für Isoliersysteme von Runddraht-Ständerwicklungen in Niederspannungs-Induktionsmaschinen hat sich eindeutig Verfahren 1 (Motoretten-Prüfverfahren) als bevorzugte Variante durchgesetzt. Es ist aber genauso gut möglich, mit Verfahren 2 (Motor-Prüfverfahren) die offensichtlichen Nachteile von Verfahren 1 bei der Nachbildung wichtiger Einflussgrößen auf die thermische Alterung zu überwinden. Als solcher Nachteil ist z. B. anzusehen, dass der Einfluss der maschinellen Einziehtechnik mit einer Motorette als Prüfobjekt nicht nachgebildet werden kann. Deshalb wird oft auch das Motor-Prüfverfahren angewendet, bei dem vollständige Motoren im Reversierbetrieb betrieben werden. Die dabei wirksame Alterung kann zwar weiterhin

wie beim Motoretten-Verfahren als dominierend thermisch angesehen werden; der Lageparameter der Ausfallzeit-Temperatur-Kennlinie spiegelt jedoch die veränderten Belastungen wider. Insofern ist das Motor-Prüfverfahren praxisnäher; es darf jedoch nicht dazu verführen, die zu erwartende absolute Lebensdauer des Isoliersystems im Betrieb abschätzen zu wollen. Erhöhte mechanische Belastung, erhöhte Konzentration von Zersetzungsprodukten oder erhöhte Belastung durch Schaltüberspannungen können wiederum im Versuch von den Betriebsbedingungen abweichend sein.

Wenn sich das Erprobungs-Isoliersystem nur geringfügig vom bereits klassifizierten Erprobungs-Isoliersystem unterscheidet, darf entsprechend IEC 60034-18-1 mit einem Überprüfungsversuch unter unveränderten Bedingungen geklärt werden, ob bei einer ausgewählten Alterungstemperatur eine gleichwertige oder eine längere Prüflebensdauer erreicht wird und damit die geringfügige Änderung als annehmbar angesehen werden kann.

Prüfverfahren-Bezeichnung	Prüfverfahren	Diagnostische Prüfungen
Verfahren 1	Motoretten-Prüfverfahren	<ul style="list-style-type: none"> • mechanische Prüfung, • Feuchtelagerung, • Spannungsprüfung, • andere diagnostische Prüfungen
Verfahren 2	Motor-Prüfverfahren	<ul style="list-style-type: none"> • Feuchtelagerung, • Spannungsprüfung, • andere diagnostische Prüfungen
Verfahren 3	Prüfverfahren für Ständerwicklungen in Nuten	<ul style="list-style-type: none"> • mechanische Prüfung, • Feuchtelagerung, • Spannungsprüfung, • andere diagnostische Prüfungen
Verfahren 4	Prüfverfahren für Polwicklungen	<ul style="list-style-type: none"> • mechanische Prüfung, • Feuchtelagerung, • Spannungsprüfung, • andere diagnostische Prüfungen
Verfahren 5	Prüfverfahren für Läuferwicklungen in Nuten	<ul style="list-style-type: none"> • mechanische Prüfung, • Feuchtelagerung, • Spannungsprüfung, • andere diagnostische Prüfungen

Tabelle 16.3 Normalprüfverfahren