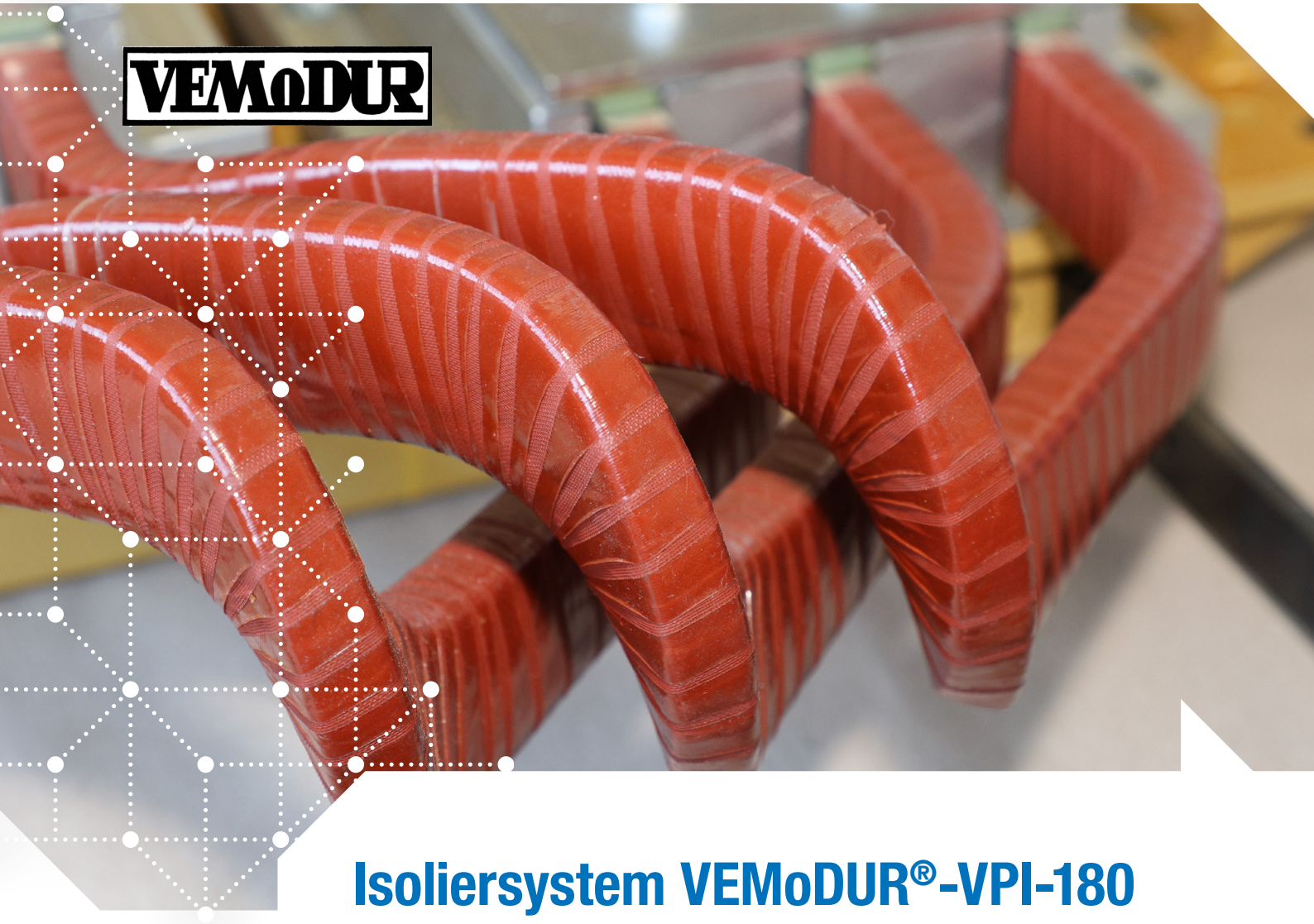
ELECTRIC DRIVES
FOR EVERY DEMAND



Isoliersystem VEMoDUR®-VPI-180

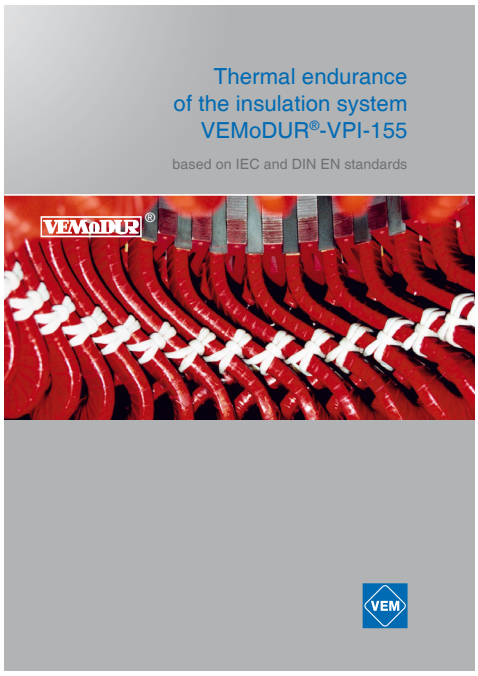
auf Basis von IEC und DIN EN Standards

Autoren: Dr.-Ing. H. Bärnklau, Dipl.-Ing. J. Proske

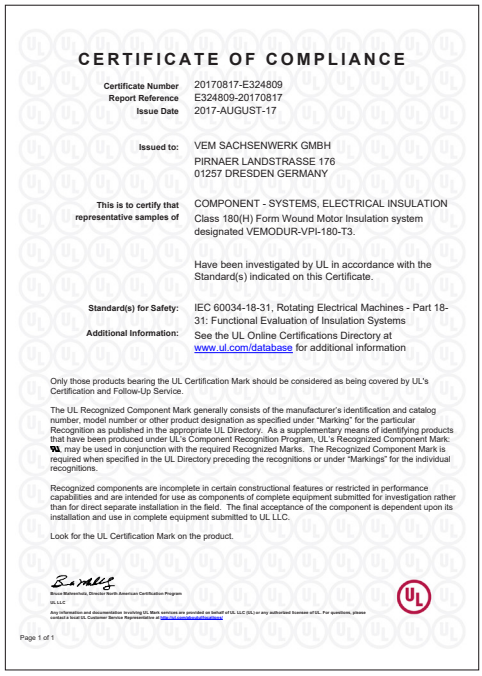
Motivation

Die Einführung des Isoliersystems VEMoDUR®-VPI-155 begann Mitte der 80er Jahre am Standort in Dresden. Mit diesem Hochspannungsisoliersystem für globalgetränkte Maschinen (VPI-System) kann VEM heute auf rund vier Jahrzehnte an Betriebserfahrungen zurückblicken. Die Palette der Anwendungsfelder der Maschinen ist breit gefächert: Sie umfasst neben den klassischen Industrieanwendungen auch Sonderanwendungen im Bereich der Energieerzeugung, dem Bergbau, Anwendungen im explosionsgeschützten Bereich und Schiffsantriebe – jeweils sowohl im klassischen Netz- als auch im Stromrichterbetrieb.

Auf Basis von thermischen Alterungstests wurde das Hochspannungsisoliersystem nach thermischer Klasse 155 (F) ausgewiesen [1]. Im Bereich der Niederspannung wurde 2017 eine UL-Zertifizierung gemäß thermischer Klasse 180 (H) erreicht [2]. Das Isoliersystem ist also trotz seines fortgeschrittenen Alters noch immer zeitgemäß!



a) Druckschrift [1]



CERTIFICATE OF COMPLIANCE

Certificate Number 20170817-E324809
Report Reference E324809-20170817
Issue Date 2017-AUGUST-17

Issued to: VEM SACHSENWERK GMBH
PIRNAER LANDSTRASSE 176
01257 DRESDEN GERMANY

This is to certify that representative samples of COMPONENT - SYSTEMS, ELECTRICAL INSULATION Class 180(H) Form Wound Motor Insulation system designated VEMODUR-VPI-180-T3.

Have been investigated by UL in accordance with the Standard(s) indicated on this Certificate.

Standard(s) for Safety: IEC 60034-18-31, Rotating Electrical Machines - Part 18-31: Functional Evaluation of Insulation Systems

Additional Information: See the UL Online Certifications Directory at www.ul.com/database for additional information

Only those products bearing the UL Certification Mark should be considered as being covered by UL's Certification and Follow-Up Service.

The UL Recognized Component Mark generally consists of the manufacturer's identification and catalog number, model number or other product designation as specified under "Marking" for the particular Recognition as published in the appropriate UL Directory. As a supplementary means of identifying products that have been produced under UL's Component Recognition Program, UL's Recognized Component Mark: RA, may be used in conjunction with the required Recognized Marks. The Recognized Component Mark is required when specified in the UL Directory preceding the recognitions or under "Markings" for the individual recognitions.

Recognized components are incomplete in certain constructional features or restricted in performance capabilities and are intended for use as components of complete equipment submitted for investigation rather than for direct separate installation in the field. The final acceptance of the component is dependent upon its installation and use in complete equipment submitted to UL LLC.

Look for the UL Certification Mark on the product.

Bruce Mahrenholz, Director North American Certification Program
UL LLC

Any information and documentation involving UL Mark services are provided on behalf of UL LLC (UL) or any authorized licensee of UL. For questions, please contact a local UL Customer Service Representative at http://ul.com/aboutul/locations/

Page 1 of 1

b) UL-Zertifikat [2]

Abb. 1: Isoliersystem VEMoDUR®-VPI-155

Hochspannungsmaschinen der thermischen Klasse 155 (F) wurden lange Zeit für Betrieb gemäß Wärmeklasse B (WKL F/B) oder F (WKL F/F) ausgeführt. Trotz bestehender internationaler Normen zur Eingruppierung kompletter Isoliersysteme wie [3], wird oftmals nur auf die thermische Klasse von Einzelkomponenten [4] zurückgegriffen.

Markttrends, die daher aus dem berechtigten Wunsch nach gesichert höherer Lebensdauer resultieren sowie Kundenwünsche nach immer kompakteren Maschinen führen zu einer perspektivischen Anhebung der Klassentemperaturen. Dies und geänderte gesetzliche Rahmenbedingungen (→ EU-Reach Verordnung) führten dazu, dass man sich bei VEM nach Alternativen zum Härter des eingesetzten Tränkharzes – und letztendlich auch zum verwendeten Harz – umsehen musste. Zu diesem Zweck wurden umfangreiche Voruntersuchungen durchgeführt. Ein Teil der Ergebnisse ist in [5] publiziert. Auf dieser Basis wurden drei Systeme als potentielle Kandidaten für ein Nachfolgersystem mit verbesserten thermischen Eigenschaften ausgewählt.

Die Entwicklung eines Isoliersystems beinhaltet umfangreiche Tests und Qualifizierungen. Ein wesentlicher Schritt auf diesem Wege ist eine thermische Klassifizierung nach IEC 60034-18-31. Bei einer thermischen Klassifizierung nach IEC 60034-18-31 handelt es sich um ein vergleichendes Testverfahren zur Bewertung des thermischen Alterungsverhaltens: Man möchte wissen, wie sich ein Kandidatsystem im Vergleich zu einem erprobten System, dem sogenannten Referenzsystem, bei thermischer Alterung verhält.

Die thermische Klassifizierung wurde für drei potentielle Kandidatsysteme und für das Referenzsystem „VEMoDUR®-VPI-155“ durchgeführt. Nur eines der Kandidatsysteme erfüllte die Anforderungen an ein der Norm entsprechendes „erfolgreiches Kandidatsystem“. In diesem Beitrag sind ausgewählte Schritte und Ergebnisse zusammengestellt.

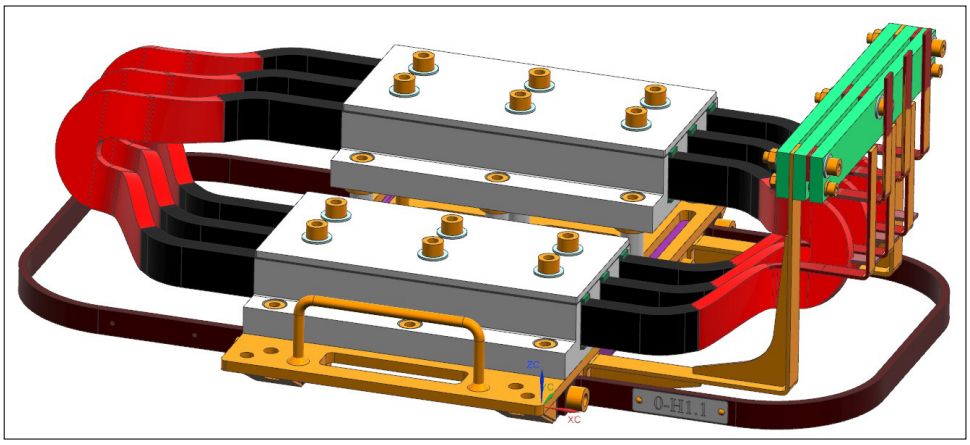


Abb. 2: 3D-Modell einer Formette mit drei Spulen

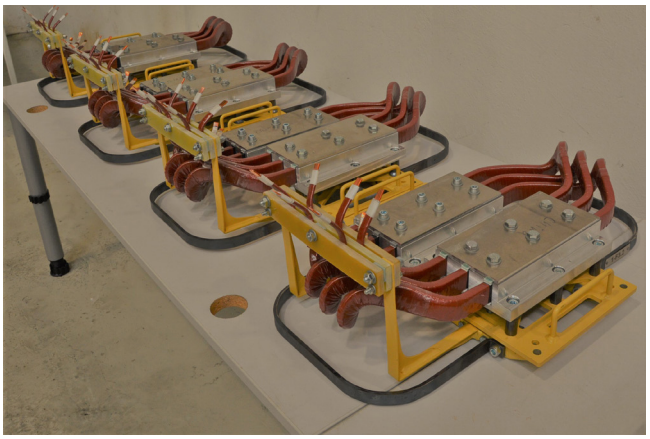
Autoren: Dr.-Ing. H. Bärnklau, Dipl.-Ing. J. Proske

Experiment

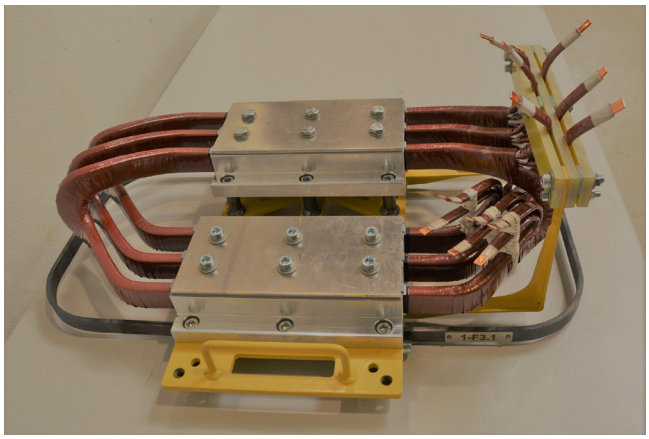
Prüflinge

Aus verschiedenen Gründen – so z. B. Änderungen in der Norm [3] – erschien die Prüflingsgeometrie aus [1] nicht optimal für die aktuelle Qualifizierung. Die nun verwendeten Prüflinge bestehen aus Formspulen mit zwei (übereinander) parallel gewickelten Drähten. Da die Drähte voneinander isoliert sind, können sie in den Diagnosezyklen elektrisch gegeneinander geprüft werden. Bei den Spulen handelt es sich um Spulen mit einer 6,6 kV-Isolation. Entsprechend den Empfehlungen aus [3] wurden die Spulen auf Maschinen und Anlagen der normalen Fertigung gewickelt, gespreizt und maschinell isoliert. Technische Einschränkungen des Maschinenparks (→ minimaler Abstand der geraden Spulenseiten) führten zu der realisierten Spulenweite, die letztendlich einen entscheidenden Einfluss auf die Anzahl der Prüflinge je Formette hatte.

Nach IEC 60034-18-31 sind je Temperaturstufe mindestens fünf Prüflinge zu verwenden. Auf Grund von Platz- und Gewichtsgründen wurden drei Prüflinge je Formette gewählt. Dies bedingt 2 x 3 = 6 Prüflinge je Temperaturstufe.



a) Vier Formetten vor dem Tränken



b) Detailansicht

Abb. 3: Formetten mit jeweils drei Prüflingen in massiver Nutnachbildung; Schutzringe montiert

Tränkfertig montierte Formetten sind in Abb. 3 zu sehen. Um die Spulen vor möglichen Beschädigungen beim Laden / Umladen in den Zyklen der Qualifizierung zu schützen, wurden bodennahe Schutzringe montiert.

Prinzipieller Ablauf und Teststrecke

Der schematische Ablauf der Qualifizierung ist in Abb. 4 zu sehen: Jeder Zyklus beginnt mit einer Wärmelagerung im Ofen zur thermischen Alterung und endet mit elektrischen Prüfungen im diagnostischen Unterzyklus. Der zu jedem Zyklus gehörende diagnostische Unterzyklus beinhaltet

- eine mechanische Konditionierung auf einem Schwingtisch,
- eine Konditionierung / Lagerung in einer Klimakammer mit
- anschließender elektrischer Prüfung der Windungs- und Hauptisolation im feuchten Zustand.

Ein Ausfall in der elektrischen Prüfung beendet für diesen Prüfling formal den Alterungszyklus.

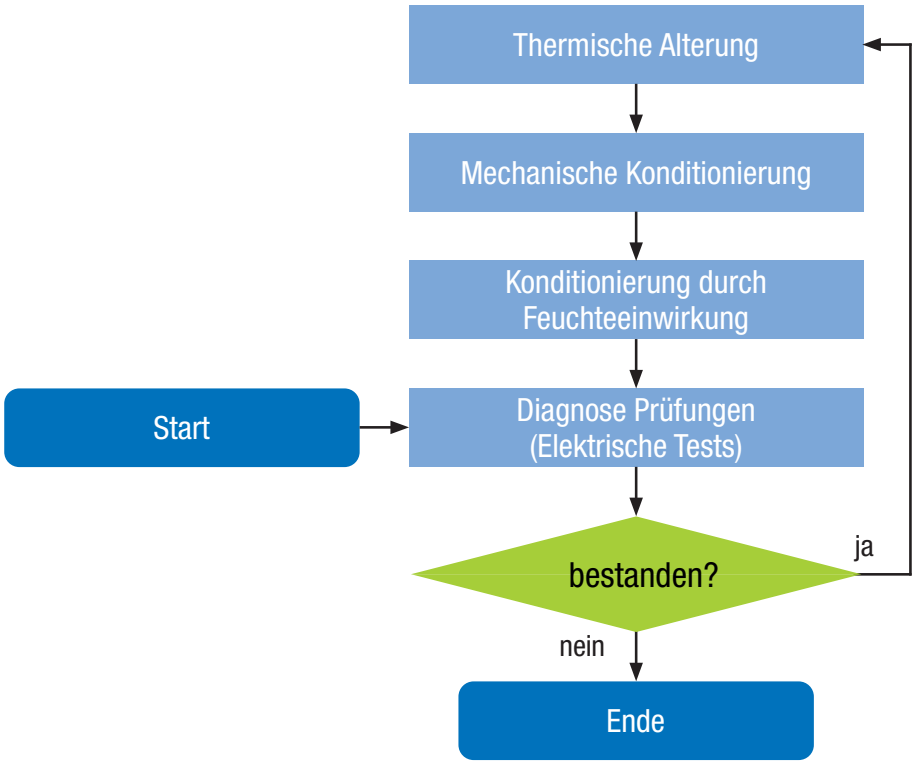
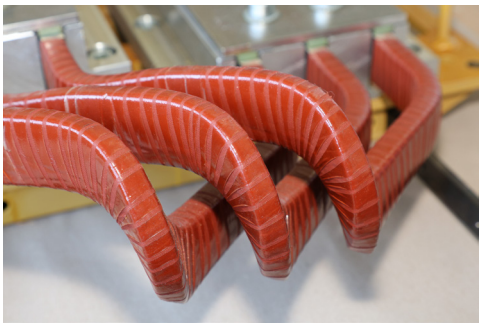
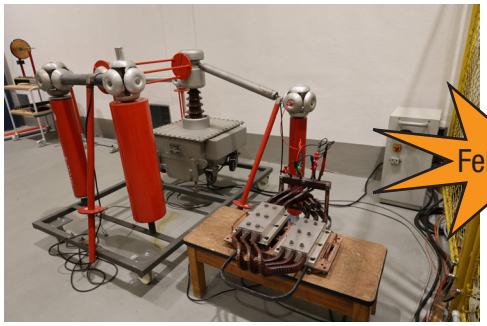


Abb. 4: Schematischer Ablauf einer thermischen Qualifizierung nach IEC 60034-18-31

Autoren: Dr.-Ing. H. Bärnklau, Dipl.-Ing. J. Proske



Punkt für LD-Kurve)



Elektrische Tests (AC, 50 Hz)

Feuchtelagerung in Klimakammer

Thermische Alterung in Öfen

Mechanische Konditionierung

Abb. 5: Bilder der Teststrecke am IEEH der TU-Dresden

Die thermische Klassifizierung wurde am Institut für elektrische Energieversorgung und Hochspannungstechnik (IEEH) der Technischen Universität Dresden (TU Dresden) durchgeführt. Dazu wurde eine Teststrecke bestehend aus vier Wärmeschränken, einem Schwingtisch, zwei Klimakammern und einer Hochspannungsprüfanlage (50 Hz, AC) eingerichtet. Die Durchführung erfolgte in enger Abstimmung mit VEM.

Parameter der thermischen Klassifizierung

In der IEC 60034-18-31 Stand 2012-06 sind viele Parameter nicht festgelegt. Dies betrifft sowohl Parameter der thermischen Klassifizierung als auch der diagnostischen Unterzyklen. Sowohl die Alterungstemperaturen als auch die –zeiten können in gewissen Grenzen frei gewählt werden. Eine erste Orientierung zur Wahl bieten die Empfehlungen aus [3]:

- Bei Qualifizierungen mit ungleicher Wärmeklasse, sollen die niedrigsten Prüftemperaturen nicht mehr als 25 K Abstand von der bekannten Klassentemperatur des Referenzsystems bzw. den angestrebten Klassentemperaturen der Kandidatsysteme haben.
- Werden drei Temperaturstufen je Qualifizierung verwendet, so sollen sich diese um mindestens 20 K unterscheiden.

In der Vergangenheit wurde das Referenzsystem VEMoDUR®-VPI-155 bei Hochspannungsmaschinen in WKL F/B und WKL F/F je nach Kundenwunsch betrieben. Aufgrund der umfangreichen Erfahrungswerte mit dem Referenzsystem der VEM in WKL F wurden für die thermische Qualifizierung der Kandidatsysteme und des Referenzsystems RS1 die Alterungstemperaturen 180 °C, 200 °C und 220 °C gewählt. Diese Temperaturstufen entsprechen den drei Alterungsstufen aus [3]. Das Kandidatsystem CS3 (WKL H) wurde bei den Temperaturstufen 200 °C, 220 °C und 240 °C gealtert. Die in der thermischen Qualifizierung gewählten Parameter sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Aus Arbeitsschutzgründen fanden Erwärmung und Abkühlung der Formetten im Ofen statt.

Tabelle 1: Parameter der thermischen Klassifizierung

	RS1	CS3
T_1 / Dauer	180 °C / 28 d	200 °C / 28 d
T_2 / Dauer	200 °C / 10 d	220 °C / 10 d
T_3 / Dauer	220 °C / 3 d	240 °C / 3 d
Schwingtisch (vertikal)	50 Hz / 0,3 mm (peak-peak) / 1 h	
Klimakammer	25 °C / 95 % (r. H.) / 48 h	
Hauptisolation	AC / 13,2 kV (RMS) / 1 Min	
Leiter-/ Windungsisolation	AC / 2,9 kV (RMS) / 1 Min	

Autoren: Dr.-Ing. H. Bärnklau, Dipl.-Ing. J. Proske

Anmerkung: Nach [3] beendet ein Ausfall in der elektrischen Prüfung für diesen Prüfling formal den Alterungszyklus. Das gilt sowohl für Ausfälle der Haupt- als auch der Leiter-/ Windungsisolation. Bzgl. der Leiter-/ Windungsisolation war der zum Zeitpunkt der Klassifizierung gültige Standard [3] unspezifisch, was die Art der Prüfspannung (Wechsel- bzw. Impulsspannung) und die Höhe der (mittleren) elektrischen Feldstärke betrifft.

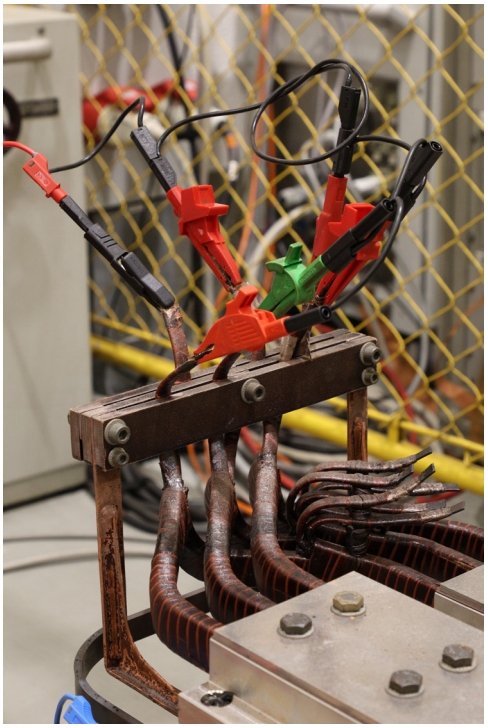
In der überarbeiteten Version (IEC 60034-18-31 ED3 CD) ist daraus resultierend ein Hinweis zur elektrischen Mindestfeldstärke aufgenommen worden. Allerdings sind die für das bei VEM verwendete Prüflingsdesign resultierenden Spannungspegel gegenüber den Pegeln aus Tabelle 1 um ca. 75% geringer. Diese geringen Pegel werden aus VEM Sicht kritisch bewertet, da die Realisierungen („Ausfälle“) bei der VEM-Qualifizierung immer die Windungsisolation betraf! Bei einer erneuten Durchführung der Tests wäre folglich ein wesentlich größerer Zeitaufwand für die Bestimmung der Lebensdauerkurven erforderlich. Weiter wäre deren Lageparameter zu noch längeren Lebensdauern / höheren Temperaturen verschoben. Ggf. wäre auch die Steigung der Kurven anders.

Gerissenes Deckband eines gealterten Prüflings

Montage der Vorserie

Anpassen der unteren Temperaturstufe

Die Temperaturstufe T1 wurde entsprechend den Empfehlungen aus IEC 60034-18-31 gewählt. Während der Durchführungsphase stellte sich heraus, dass diese Temperaturstufen unter ökonomischen Gesichtspunkten eindeutig zu niedrig angesetzt waren. Folglich wurde der Versuch in der Durchführungsphase angepasst: Dazu wurde die jeweils niedrigste Alterungsstufe durch eine höhere Temperaturstufe ersetzt.
Beim Kandidatsystem CS3 wurden die beiden zusätzlichen Temperaturpunkte T4 und T5 mit jeweils sechs Spulen ergänzt (230 °C / 250 °C). Beim Referenzsystem RS1 wurde zunächst ein zusätzlicher Alterungspunkt bei T = 240 °C eingefügt. Jedoch lagen die realisierten mittleren Ausfallzeiten unter dem von der Norm geforderten Wert von 100 h. Der Punkt wurde daher nicht in die Bestimmung der Lebensdauerkurve einbezogen. Stattdessen wurden zwei Formetten bei der zusätzlichen Temperaturstufe T = 230 °C gealtert.



Detailansicht bei der elektrischen Prüfung

Detailansicht bei der mechan. Konditionierung

Autoren: Dr.-Ing. H. Bärnklau, Dipl.-Ing. J. Proske

Ergebnisse

Die Ergebnisse der thermischen Klassifizierung für das Referenzsystem RS1 und das erfolgreiche Kandidatsystem CS3 sind in Abb. 6 zu sehen. Aus dem Diagramm ist zu erkennen, dass die Steigungen der Kennlinien des Referenzsystems RS1 und des Kandidatsystems CS3 ähnlich sind. Jedoch ist der Lageparameter des Kandidatsystems CS3 zu deutlich höheren Temperaturen gegenüber dem Referenzsystems horizontal verschoben. In Konsequenz ist das System CS3 wesentlich resistenter gegenüber thermischer Alterung als das Referenzsystem RS1.

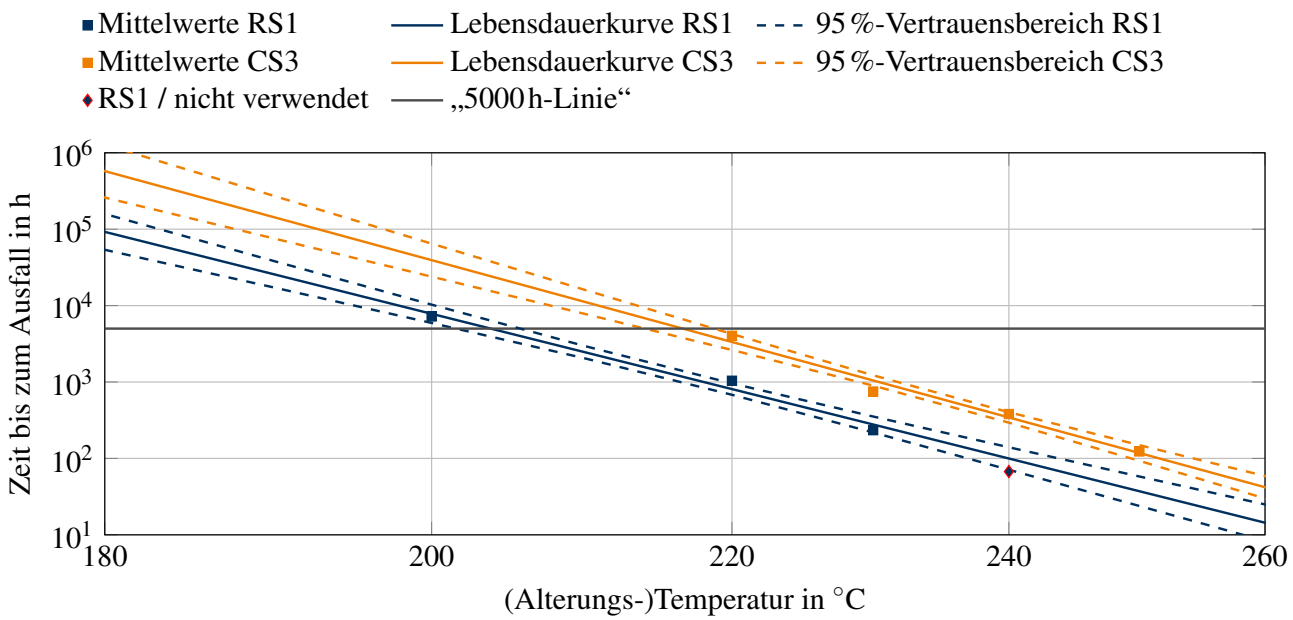


Abb. 6: Berechnete Lebensdauerkurven für Ausfälle der Leiterisolation. Für das Referenzsystem (RS1) ist der nicht verwendete Punkt bei 240°C zusätzlich mit eingezeichnet. Zur besseren Einordnung der Ergebnisse ist die „5000h-Linie“ eingezeichnet.

Mit den experimentell bestimmten Lebensdauerkurven kann die mittlere Ausfallzeit bei den ursprünglich gewählten Alterungstemperaturen T1 = 180 °C (RS1) und T1 = 200 °C (CS3) abgeschätzt werden. Beispielsweise würde die Alterungstemperatur T1 = 180 °C (RS1) zu einer mittleren Ausfallzeit von ca. 10^5 Stunden führen (extrapolierter Wert). Dies entspricht einer zu erwartenden Versuchszeit von mehr als zehn Jahren.

Diese unökonomischen Ausfallzeiten motivierten VEM dazu, unsere Erfahrungen mit der Wahl der Temperaturstufen entsprechend den Empfehlungen aus [3] mit einer breiten Öffentlichkeit zu teilen [6, 7]. Weiter hat sich VEM am zugehörigen Normungsgeschehen aktiv beteiligt: Erkenntnisse aus unseren Versuchen sind in die überarbeiteten Fassung von [3] eingeflossen – so auch das Design der Formetten, das in der aktuellen Fassung der IEC 60034-18-31 ED3 (CD) enthalten ist.

Fazit

Den Kundenwünschen folgend, hat VEM sein bewährtes Isoliersystem VEMoDUR®-VPI-155 weiterentwickelt. Ein wichtiger Schritt bei der Entwicklung des neuen Systems ist eine thermische Klassifizierung nach [3]. Die von VEM unternommenen Schritte sind in diesem Beitrag beschrieben. Die Formetten wurden im Sachsenwerk Dresden entworfen und gebaut; die thermische Qualifizierung erfolgte an der Technischen Universität Dresden. Sie umfasste das jahrzehntelang bewährte Referenzsystem sowie verschiedene Kandidatsysteme.

Ursprünglich wurden die Alterungstemperaturen eng nach [3] gewählt. Jedoch führte die hohe Qualität der geprüften Isoliersysteme zu unökonomischen Ausfallzeiten. Aus diesem Grunde wurden weitere Temperaturstufen eingeführt. Mit diesen konnte der Alterungsversuch innerhalb von drei Jahren erfolgreich abgeschlossen werden.

Im Ergebnis wurde ein Kandidatsystem erfolgreich als Hochspannungsisoliersystem mit erhöhter thermischer Alterungsbeständigkeit qualifiziert. Dessen Lebensdauerkurve hat eine ähnliche Steigung wie die des bewährten Referenzsystems und liegt in seinen Temperaturen wesentlich darüber. Damit ist es VEM möglich, die herausragenden Betriebserfahrungen des bisherigen Referenzsystems auf das neue Hochspannungsisoliersystems zu übertragen. Dieses System mit gegenüber dem bewährten System VEMoDUR®-VPI-155 verbesserten thermischen Alterungseigenschaften wird unter dem Namen

VEMoDUR®-VPI-180

eingeführt. Es löst perspektivisch das bewährte System VEMoDUR®-VPI-155 ab.

Parallel zu den Tests der thermischen Qualifizierung wurden zusätzliche Formetten gealtert, um diese einer darauffolgenden nuklearen Bestrahlung auszusetzen. Die für den Einsatz in Kernkraftwerken geforderten Qualifizierungsschritte wurden erfolgreich bestanden, so dass das neue VEMoDUR®-VPI-180 auch bei erhöhten Strahlungsbelastungen für Hochspannungsmaschinen bis 13,8 kV zum Einsatz kommen kann.

Im Zusammenhang mit den Untersuchungen entstanden die Veröffentlichungen [6, 7]. Erkenntnisse aus unseren Versuchen sind in die überarbeitete Fassung von [3] eingeflossen. Das betrifft auch das Design der Formetten (Abb. 7), das in der aktuellen Fassung des Nachfolgers von [3] (IEC 60034-18-31 ED3 CD) enthalten ist.

Autoren: Dr.-Ing. H. Bärnklau, Dipl.-Ing. J. Proske

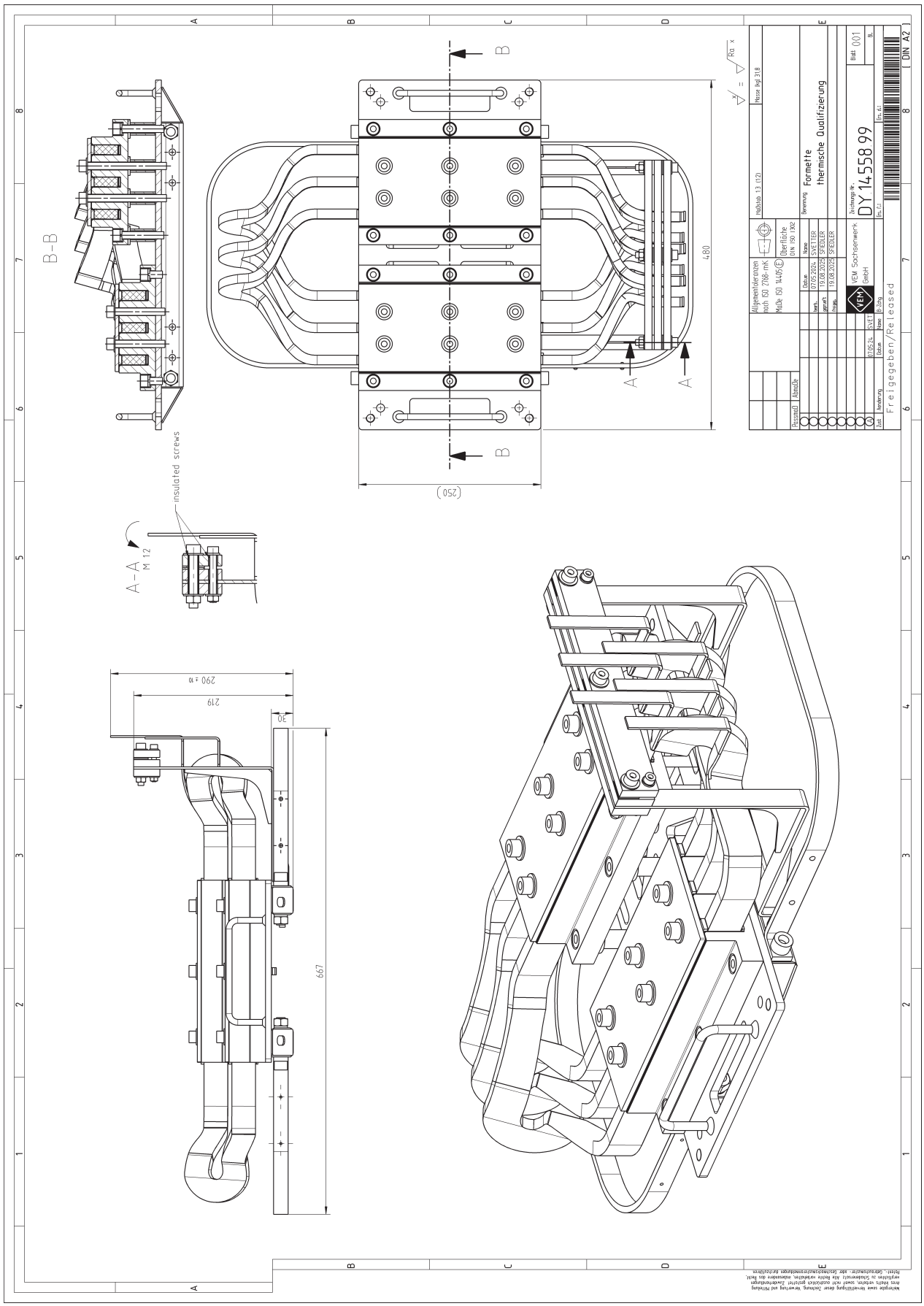


Abb. 7: VEM Zeichnung der Formette, wie sie auch in der IEC 60034-18-31 ED3 CD enthalten ist.

Literatur

[1] W. Golbig, K, and W. Günther. Thermal Endurance of the insulation system VEMoDUR-VPI-155 based on IEC and DIN EN standards, SWD/09-006 E/0211, VEM Sachsenwerk GmbH, Dresden, Germany. https://www.vem-group.com/files/downloads/broschueren/produkt-mittelspannung/VEM-VEMoDUR-VPI-155_e_ThermischeLebensdauer_en.pdf

[2] UL, Certificate of compliance, certificate number 20170817-E324809, 17. Aug. 2017; VEM SACHSENWERK GMBH

[3] IEC 60034-18-31:2012. Rotating electrical machines – Part 18-31: Functional evaluation of insulation systems – Test procedures for form-wound windings – Thermal evaluation and classification of insulation systems used in rotating machines (IEC 60034-18-31:2012), Ed. 2.0, June 2012.

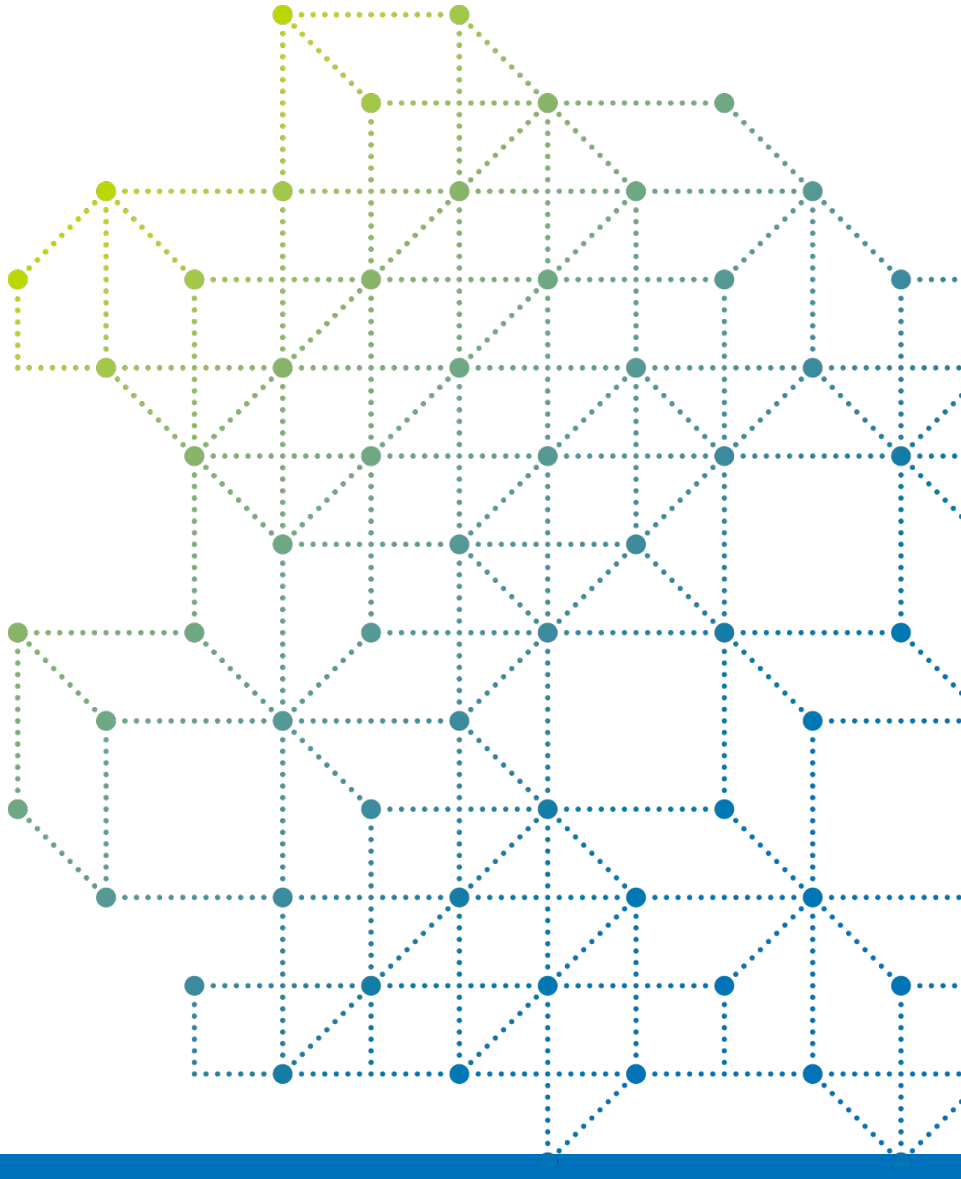
[4] IEC 60085:2007: Electrical insulation – Thermal evaluation and designation, 2007

[5] T. Linde, K. Backhaus, J. Stahl, and T. Kaffenberger. Comparison of the Dissipation Factor of Insulating Resins With and Without Anhydride Curing Agents. In 2020 IEEE 3rd International Conference on Dielectrics (ICD), 2020. 10.1109/ICD46958.2020.9341819.

[6] H. Bärnklau, K. Neikes, J. Proske, L. Elspass, and St. Schlegel. Practical Experience with the Thermal Evaluation and Classification of Type II Machine Insulation Systems according to IEC 60034-18-31, CIGRE 2024 Paris Session, Paris, 25.-30. Aug. 2024

[7] H. Bärnklau, K. Neikes, J. Proske, L. Elspass, and St. Schlegel. Practical Experience with a Thermal Classification Test According to IEC 60034-18-31 for Type II Machine Insulation Systems, Einladung zur Veröffentlichung bei IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation (DEIS) erhalten; zur Zeit in Arbeit. Ziel: Veröffentlichung 2025 / 2026

Autoren: Dr.-Ing. H. Bärnklau, Dipl.-Ing. J. Proske



ELECTRIC DRIVES

FOR EVERY DEMAND

VEM Sachsenwerk GmbH
Pirnaer Landstraße 176
01257 Dresden
Deutschland

Tel.: +49 351 208 0
E-Mail: sachsenwerk@vem-group.com

www.vem-group.com

© 2025 VEM GmbH