

e&i

elektrotechnik und informationstechnik heft 2.2018

OVE Verbands-
zeitschrift

THEMENSCHWERPUNKT

Elektrische Maschinen und
Antriebe

PRAXIS + WISSEN

Hochspannungsisolation
Klasse H

Der Isolationstester – ein
Prüfgerät zur Entwicklung und
Validierung moderner
Isolationssysteme

Aktuelles aus dem Fachbereich
Robotik der GMAR

Accelerated efficiency and loss
mapping of electric drives

Erdungsimpedanz: So leicht
kann Messen sein

Um Sie in Wien und weltweit sicher ans Ziel zu bringen: **Wir entwickeln das Herz der Elektromobilität weiter.**

www.tsa.at, TSA – Traktionssysteme Austria

INTERVIEW

mit Dipl.-Ing. Karin Eichinger,
TGM



Traktionsmotor
Bombardier Transportation, „Flexity Wien“ Straßenbahn

TSA
TRAKTIONSSYSTEME AUSTRIA

Lebensdauermodellierung von nicht-teilentladungsresistenten Isoliersystemen elektrischer Maschinen in dynamischen Lastkollektiven

A. Ruf, F. Pauli, M. Schröder, K. Hameyer

In diesem Beitrag wird ein Verfahren zur Lebensdauermodellierung von nicht-teilentladungsresistenten Isoliersystemen, die in dynamischen Lastkollektiven betrieben werden, an einem Beispiel diskutiert und untersucht. Ziel dieser Untersuchungen ist die Parametrierung eines Lebensdauermodells, welches anwendungsspezifische Belastungen durch Temperatur, Vibration oder Umweltbedingungen, aber auch normative Anforderungen an Prüfspannungen und Teilentladungsfreiheit berücksichtigt. Hierfür werden zunächst beschleunigte Alterungsversuche motiviert und ihre Modellgrenzen diskutiert. Darauf aufbauend werden Probekörper bzw. Motoretten ausgelegt, die das Isoliersystem einer elektrischen Maschine vollständig nachbilden, um diese einer beschleunigten Alterung auszusetzen und schließlich zyklisch hinsichtlich ihrer Teilentladungseigenschaften zu untersuchen. Die Ergebnisse der Lebensdaueruntersuchungen werden mit Hilfe von Zuverlässigkeitskenngrößen und drei verschiedenen Regressionsverfahren ausgewertet, um als Resultat eine belastungsabhängige Wahrscheinlichkeitsverteilung der prognostizierten Lebensdauer zu erhalten.

Schlüsselwörter: elektrische Maschine; Isoliersystem; Teilentladungen; Zuverlässigkeit; Lebensdauer

Lifetime modeling of non-partial discharge-resistant insulation systems of electrical machines under dynamic load.

This article discusses and examines a process of lifetime modeling of non-partial discharge resistant insulation systems operating in dynamic load collectives. The aim of these investigations is the parameterization of a lifetime model, which considers application specific loads due to temperature, vibration or environmental conditions, but also normative requirements for test voltages and partial discharges. For this purpose, accelerated aging tests are motivated and their model limitations are discussed. Based on this, specimens resp. motorettes are designed which completely reproduce the insulation system of an electrical machine. These are used to study their partial discharge properties during cyclical durability tests. The results of the lifetime investigations are evaluated using reliability characteristics and different regression methods in order to obtain a load-dependent probability distribution of the predicted lifetime.

Keywords: electrical machine; insulation system; partial discharges; reliability; lifetime

Eingegangen am 7. Dezember 2017, angenommen am 23. Jänner 2018, online publiziert am 12. März 2018
© Springer-Verlag GmbH Austria, ein Teil von Springer Nature 2018



1. Einleitung und Problemstellung

Der quantitative Zusammenhang zwischen der chemischen Reaktionsgeschwindigkeit und der Temperatur ist bereits seit den Arbeiten von Arrhenius [1] aus dem 19. Jahrhundert beschrieben. Montsinger, Büssing und Dakin haben diesen Zusammenhang auf die thermische Alterung von elektrischen Betriebsmitteln übertragen und Mitte des 20. Jahrhundert erforscht. Bis heute stellen ihre wissenschaftlichen Ergebnisse die Grundlage vieler Publikationen und internationaler Normen dar. Diese besagen, dass eine lineare Erhöhung der Temperatur zu einer exponentiellen Verringerung der Betriebslebensdauer führt. So kann für eine gegebene elektrische Maschine die Belastung erhöht werden, wenn eine geringere Lebensdauer gefordert wird. Andersherum kann für eine gegebene Belastung die E-Maschine so dimensioniert werden, dass bei geforderter Last eine minimale Ziellebensdauer erreicht wird. Dies bietet das Potential von erheblichen Einsparungen hinsichtlich der eingesetzten Ressourcen, des notwendigen Einbauvolumens und letztendlich der Kosten. Im besonderen Gegensatz hierzu stehen die Zuverlässigkeit und Lebensdauer, die als zentrale Designparameter bei dem Entwurf der E-Maschine berücksichtigt werden müssen. Insbe-

sondere bei elektrischen Traktionsantrieben in mobilen Anwendungen unterscheiden sich die Belastungen, die durch die individuelle Nutzung des Fahrers und insbesondere von den Umwelteinflüssen bestimmt werden. Um die belastungsabhängige Lebensdauer im Entwurfsprozess nutzen zu können, muss diese zunächst empirisch untersucht werden. Die vorliegende Arbeit widmet sich dieser Fragestellung im Gesamtkontext der mobilen Anwendung.

2. Alterungsmechanismen und beschleunigte Alterungsverfahren von Isoliersystemen

Alterung eines elektrischen Isoliersystems ist definiert als irreversible Änderung der physikalisch chemischen Eigenschaften als Folge der Einwirkung einer oder mehrerer Beanspruchungen [2]. Elektro-

Ruf, Andreas, Institut für Elektrische Maschinen (IEM), RWTH Aachen University, Schinkelstraße 4, 52062 Aachen, Deutschland (E-Mail: andreas.ruf@iem.rwth-aachen.de); Pauli, Florian, Institut für Elektrische Maschinen (IEM), RWTH Aachen University, Schinkelstraße 4, 52062 Aachen, Deutschland; Schröder, Michael, Institut für Elektrische Maschinen (IEM), RWTH Aachen University, Schinkelstraße 4, 52062 Aachen, Deutschland; Hameyer, Kay, Institut für Elektrische Maschinen (IEM), RWTH Aachen University, Schinkelstraße 4, 52062 Aachen, Deutschland

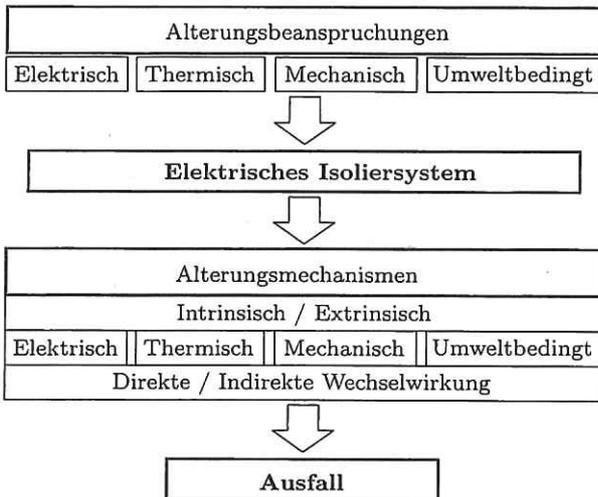


Abb. 1. Alterung eines EIS [2]

solierstoffe altern im Betrieb, d. h. ihre Material- und ihre dielektrischen Eigenschaften verändern sich. Als Resultat entstehen Abbauprodukte, die z. B. eine verringerte Isolierfähigkeit aufweisen. Ursache für diese stattfindenden Alterungsprozesse, welche die Eigenschaften der Stoffe verändern, sind sogenannte Alterungsmechanismen. Diese unterscheiden sich in ihrer Ausprägung je nach Betriebsart und den vorherrschenden Umgebungsbedingungen. Seit den Arbeiten von Montsinger (1930) [3], Büssing (1942) [4] und Dakin (1948) [5] wurde die Alterung von elektrischen Betriebsmitteln umfangreich untersucht. Elektrische, thermische, mechanische und umweltbedingte Beanspruchungen wurden als dominante Alterungsbeanspruchungen von elektrischen Isoliersystemen (EIS) identifiziert und werden häufig als TEAM-Faktoren bezeichnet [6]. Diese wirken in der Regel kombiniert auf das EIS ein und führen ebenfalls zu elektrischen, thermischen, mechanischen und umweltbedingten Alterungsmechanismen (vgl. Abb. 1), die entweder intrinsisch oder extrinsisch sind, miteinander wechselwirken und zu einem Ausfall des EIS führen. Zur Identifikation der relevanten Alterungsmechanismen werden in der DIN EN 60505 [2] vier Flussdiagramme der o. g. dominanten Alterungsformen auf Grundlage von Betriebserfahrungen zur Verfügung gestellt. Diese visualisieren die Wechselwirkungen der verschiedenen Beanspruchungen und liefern Hilfestellungen bei der Identifikation der stattfindenden Alterungsmechanismen. So können während der Alterung einwirkende Beanspruchungen, die zu Beginn eine nicht relevante Größe darstellen, zu zusätzlichen Alterungsfaktoren werden und die Alterungsgeschwindigkeit verändern. Wesentlich für das Altern von Isoliermaterialien ist das Überschreiten eines Schwellenwertes, welches den Alterungsprozess einer Alterungsform initiiert. Dieser Schwellenwert variiert je nach Material und muss in der Regel experimentell ermittelt werden.

Mit beschleunigten Alterungsverfahren (auch Schnellalterungstests oder beschleunigte Lebenszyklustests) wird das Ziel verfolgt, aussagekräftige Abschätzungen über das Verhalten von relevanten Eigenschaftswerten während der gesamten Lebensdauer von Produktionsgütern zu erlangen und damit die Qualität bzw. die Funktionalität sicherzustellen. Da in vielen Bereichen Lebensdauern von mehreren Jahren erzielt werden sollen, sind vorab Langzeittests zur Überprüfung der Einhaltung der Betriebslebensdauer ökonomisch nicht vertretbar. Beschleunigte Alterungsverfahren sind die einzige Methode, Industriegüter im Vorfeld ihrer Markteinführung wirtschaftlich über ihre Lebensdauer bewerten zu können. Des weiteren

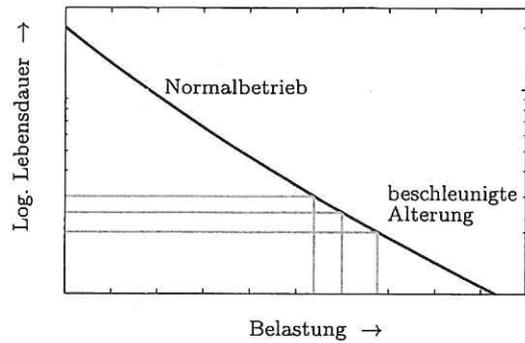


Abb. 2. Prinzip der beschleunigten Alterungsversuche im einfachlogarithmischen Lebensdauer-Belastungsdiagramm

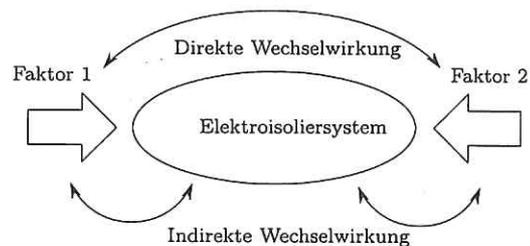


Abb. 3. Direkte und indirekte Wechselwirkung von Beanspruchungsfaktoren

bieten Schnellalterungstests die Möglichkeit, lebensdauerrelevante Veränderungen von bestehenden Industriegütern quantifizieren zu können. Die Alterung wird künstlich beschleunigt, indem die Testobjekte größeren Belastungen als im Betrieb ausgesetzt werden. Dies kann dadurch erreicht werden, dass entweder die Frequenz, die Wiederholungsrate oder das Belastungsniveau erhöht werden. Somit werden ein Eintreten eines Fehlers oder ein Unterschreiten eines Grenzwertes einer Betrachtungsgröße, was zum Ausfall führt, in einer kürzeren Zeitdauer erzwungen. Wenn das beschleunigte Alterungsverfahren alle zur Alterung beitragenden Faktoren richtig berücksichtigt, kann die Lebensdauer für längere Zeiträume und unter Betriebsbelastungen abgeschätzt werden.

Das Prinzip von beschleunigten Alterungsverfahren ist in Abb. 2 beispielhaft dargestellt. Im Bereich der beschleunigten Alterung werden Untersuchungen durchgeführt, die es erlauben in einer relativ kurzen Beanspruchungsdauer Aussagen über das Verhalten im Normalbetrieb zu prognostizieren. Physikalisch motivierte Modellgleichungen weisen in der Regel nichtlineare Zusammenhänge auf, die mathematisch nur korrekt parametrisiert werden können, wenn eine ausreichende Anzahl von Belastungsniveaus untersucht wird. Hier muss ein Kompromiss zwischen dem Aufwand und der Genauigkeit gefunden werden. Die maximale Beschleunigung der Untersuchungen ist durch die maximale Belastung limitiert, die zu Alterungsmechanismen führen, welche im Normalbetrieb nicht auftreten würden. Ein Beispiel hierfür sind die eingeschränkt nutzbaren Temperaturbereiche von den eingesetzten Materialien.

Die Anzahl und die Komplexität der lebensdauerrelevanten Beanspruchungen bestimmen den Prüfaufwand von beschleunigten Alterungsprüfungen. Handelt es sich ausschließlich um einen relevanten Beanspruchungsfaktor, dann handelt es sich um ein eindimensionales Problem, welches den Aufwand für die Untersuchungen in einem überschaubaren Rahmen hält. Für den Fall mehrerer relevanter Beanspruchungsfaktoren ist ihre Wechselwirkung entscheidend.

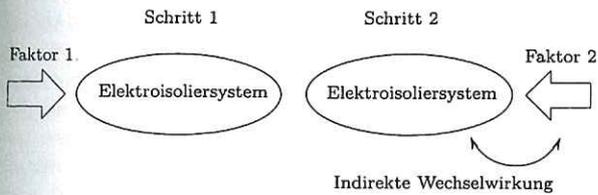


Abb. 4. Indirekte Wechselwirkung durch sequentielle Beanspruchung [7]

In Abb. 3 ist der Unterschied zwischen einer direkten und indirekten Wechselwirkung dargestellt. Liegt eine direkte Wechselwirkung vor, dann beeinflussen sich die Faktoren unmittelbar, ohne dass eine Veränderung des Isoliertsystems erfolgen muss. Ein Beispiel hierfür ist die thermische Beanspruchung von Isoliertsystemen, die nicht nur zu einer thermischen Zersetzung des Isoliermaterials führt, sondern auch zu einer thermischen Ausdehnung, die direkt die Zugkräfte auf die Isoliertschichten beeinflusst. Das Pendant hierzu ist die indirekte Wechselwirkung, die erst über die Veränderung des Isoliertsystems wirksam wird. Mechanische Kräfte oder Vibrationen führen zu einer Hohlraumentwicklung, die wiederum durch die Überhöhung des elektrischen Feldes die Entstehung von inneren Teilentladungen begünstigt. Würden Teilentladungen ausschließlich während der Vibrationen entstehen, dann wäre es eine direkte Wechselwirkung. Sind die Hohlräume auch ohne die Vibrationen präsent und Teilentladungen können entstehen, dann kann von einer indirekten Wechselwirkung gesprochen werden. Per Definition liegt eine indirekte Wechselwirkung vor, wenn die Belastungen wie in Abb. 4 sequentiell erfolgen können und diese zu gleichen Resultaten wie kombinierte Belastungen führen [7]. Die indirekte Wechselwirkung erfolgt durch die veränderten Eigenschaften des EIS.

Direkte Wechselwirkungen führen zu einem mehrdimensionalen Problem, welches sich mit der Anzahl der berücksichtigten Faktoren potenziert. Um den Aufwand dennoch in einem ökonomischen Rahmen zu halten, wird der dominante Alterungsfaktor identifiziert und im Rahmen eines eindimensionalen Problems untersucht. Die wechselwirkenden Faktoren werden als Katalysator berücksichtigt, indem diese gleichzeitig und in ihrer maximal zu erwartenden Ausprägung beaufschlagt werden, um das Worst-Case-Szenario abzubilden. Dies führt zwangsläufig zu einer Überschätzung der Alterungsgeschwindigkeit und damit zu einer Unterschätzung der zu erwartenden Lebensdauer. Steht kein Referenzsystem zur Verfügung, dann wird auf dieser Datengrundlage das neu entwickelte Isoliertsystem überdimensioniert. Dies führt jedoch in der Regel zu einer besseren Auslegung, als eine die ausschließlich auf Worst-Case-Annahmen beruht, weshalb dies eine häufig genutzte Lösung zur Modellreduktion darstellt und Gegenstand vieler internationaler Normen ist [10, 11].

3. Alterungsversuche mit Hilfe des Motorettenverfahrens

Das untersuchte Niederspannungswicklungssystem ist als verteilte Wicklung mit Runddrähten ausgeführt, welches mit einem Spannungswechselrichter betrieben wird und nicht teilentladungsresistent ist. Durch die variablen Lastkollektive eines Traktionsantriebs wird die Maschine kurzzeitig thermisch hoch ausgenutzt und durch den mobilen Einsatz ist eine chemische Kontamination durch Wasser nicht auszuschließen. Im Folgenden werden auf der Basis dieser anwendungsspezifischen Randbedingungen Alterungsversuche mit Hilfe des Motorettenverfahrens abgeleitet. Diese Lebensdaueruntersuchungen von EIS orientieren sich an normative Vorgaben, insbesondere DIN EN 60034-18-21 [10] und DIN EN 60034-18-41 [12].

Die Auswahl und der Aufbau der Probekörper ergeben sich aus den Zielsetzungen der geplanten beschleunigten Alterungsversuche.

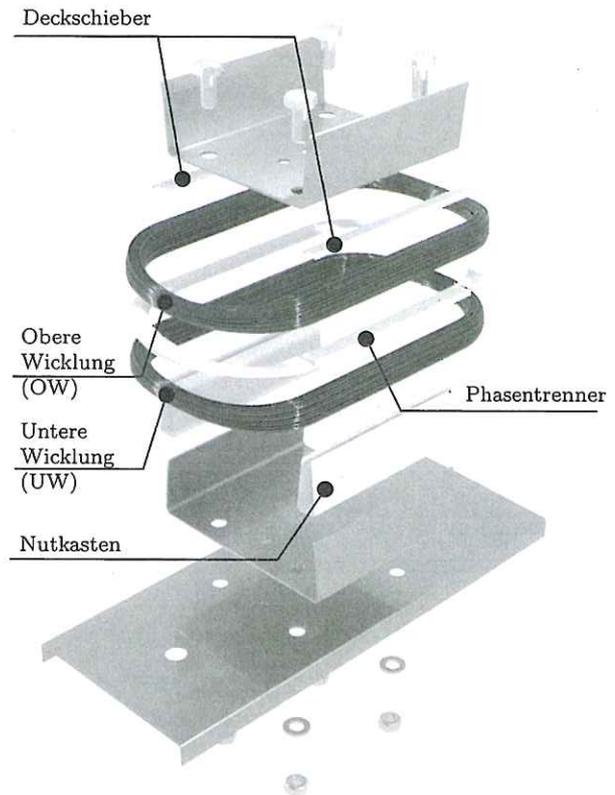


Abb. 5. Aufbau einer Motorette als Probekörper

Im Vordergrund steht das Ziel, die zu erwartende Lebensdauer eines Isoliertsystems auf Basis von beschleunigten Alterungsversuchen, mit einer gewissen statistischen Sicherheit, zu prognostizieren und die Schwachstellen zu identifizieren. Die Forderung nach einer statistischen Sicherheit verlangt eine größere Anzahl von Probekörpern, die mit vollständigen Motoren oder Statoren nicht wirtschaftlich realisiert werden kann. Für den Fall von Runddrahtwicklungen sind in der einschlägigen Literatur und internationalen Normen Modelle von Isoliertsystemen als Motoretten bekannt [10]. Diese bilden den konstruktiven Aufbau und das Isoliertsystem einer Runddrahtwicklung möglichst genau ab, was einer konstruktions- und betriebsbedingten Leistungsfähigkeit des Modells entspricht. Ausgangspunkt hierfür ist das Wicklungsschema der betrachteten Maschine. Für den Aufbau der Motoretten werden Symmetrieeigenschaften des untersuchten Wicklungssystems genutzt, um das Modell möglichst einfach zu halten und gleichzeitig die konstruktive Leistungsfähigkeit zu gewährleisten. Da es sich um eine verteilte Wicklung handelt, muss die Motorette sowohl die Hauptisolierung gegen das Blechpaket, die Windungsisolierung, als auch die Phasenisolierung zwischen den Wicklungssträngen abbilden. Hierzu ist in Abb. 5 die Motorette als Explosionszeichnung dargestellt. Sie besteht aus einer Grundplatte und zwei Blechkantungen, die zusammengeschraubt den Querschnitt der Nut des Statorblechpakets möglichst genau abbildet. In die Nut werden eine untere Wicklungslage (UW) und eine obere Wicklungslage (OW) eingebracht, die gegeneinander und gegen die Blechkantungen bzw. das Gehäuse isoliert sind. Jede Wicklungslage besteht aus lackisolierten Drähten die in ihrer Windungszahl und in ihrer Anzahl von parallelen Drähten dem Wicklungssystem der elektrischen Maschine exakt nachempfunden sind. Auch die axiale Länge der Blechkantungen, der Abstand zwischen den beiden Nu-

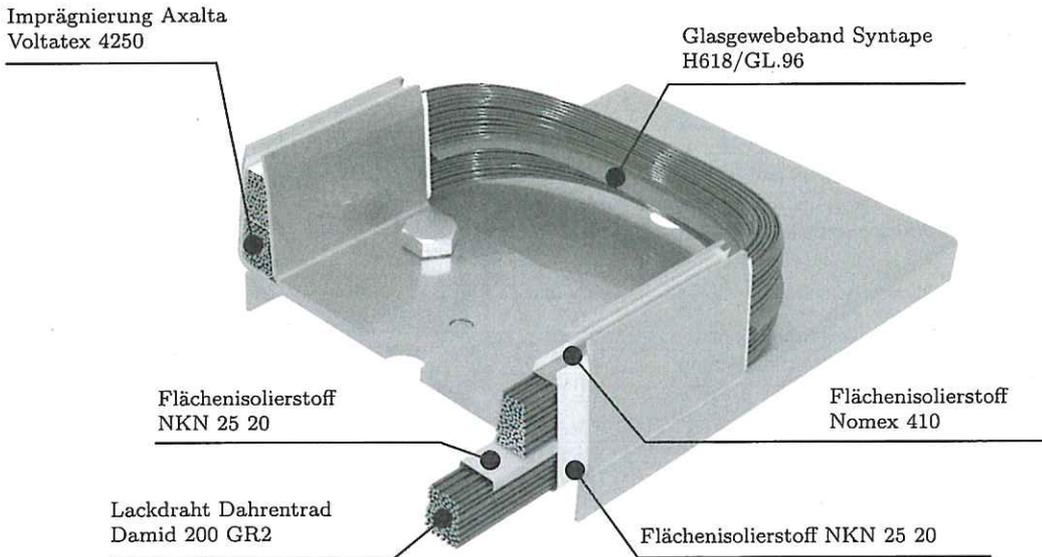


Abb. 6. Eingesetzte Isoliermaterialien

Tab. 1. Materialeigenschaften des Isoliersystems

<i>Lackdraht Dahrendrad Damid 200-GR2</i>	
Temperaturschock IEC 60851-6.3	≥220 °C
Temperaturindex IEC 60851-6.5	≥200 °C
Elektrische Festigkeit IEC 60851-5.3	5 kV
<i>Nutgrundisolierung Trivoltherm NKN 25 20</i>	
Kapton-Dicke IEC 626-2	25 µm
Nomex-Dicke IEC 626-2	80 µm
Zugfestigkeit längs IEC 626-2	180 N/mm ²
Durchschlagsspannung IEC 626-2	8 kV
Thermische Leitfähigkeit	130 mW/(m K)
Feuchtegehalt IEC 626-2	5,7 %
<i>Imprägnierharz Axalta Voltatex 4250</i>	
Temperaturindex IEC 60455-3-5	220 °C
Thermische Leitfähigkeit ISO 22007-2	230 mW/(m K)
Elektrische Festigkeit IEC 60455-2	65 kV/mm
Wasseraufnahme	0,6 % bis 1,0 %
<i>Glasgewebeband Syntape H618/GL.96</i>	
Glasgewebe-Stärke	0,12 mm
Gesamtstärke	0,165 mm
Reißkraft pro 10 mm	280 N
Durchschlagsspannung	2,5 kV
Temperaturindex	≥180 °C

ten und die Wickelkopflänge entsprechen den Längenverhältnissen des untersuchten Erprobungsträgers.

Die verwendeten Isoliermaterialien sind in Abb. 6 dargestellt und ihre Eigenschaften sind in Tab. 1 aufgelistet. Als Draht wird ein Kupferlackdraht mit einer THEIC-modifizierten Polyesterimid (PESI) Grundsicht und einem Polyamid-imid (PAI) Mantel eingesetzt, der sich durch eine hohe Wärmebeständigkeit, mechanische Festigkeit und chemische Beständigkeit gegen Öle und Kältemittel auszeichnet. Bei der Auswahl des Flächenisoliertstoffs als Nutgrundisolierung werden neben der guten thermischen Beständigkeit eine hohe mechanische und elektrische Festigkeit gefordert. Demgegenüber steht

die Wärmeleitfähigkeit, die mit steigender Papierstärke schlechter wird. Durch das Zusammenspiel von Nomex und Kapton werden die herausragenden elektrischen und thermischen Eigenschaften der Polyimid-Folie und die thermischen und mechanischen Eigenschaften des Nomex-Papiers kombiniert. Zusätzlich schützen die Nomex-Außenlagen die Polyimid-Folie vor Hydrolyse-Einflüssen und mechanischer Beanspruchung. Als Wickelkopfisolierung kommt ein reißfestes und hochtemperaturbeständiges Glasgewebeband zum Einsatz, welches für eine Zugentlastung und mechanische Festigkeit sorgt. Dieses Material zeichnet sich durch eine gute Verarbeitbarkeit aus. Die Kombination mit einem Tränkharz als Imprägniermittel ermöglicht gleichzeitig eine hohe elektrische Festigkeit. Beim Imprägniermittel werden neben der thermischen Beständigkeit und Leitfähigkeit eine gute Verarbeitbarkeit (hoher Füllgrad) und Wasserbeständigkeit gefordert. Dies wird dadurch erreicht, dass ein ungesättigtes Polyesterimidharz eingesetzt wird, welches mit Hilfe des Strom-UV-Tränkverfahrens verarbeitet wird. Es zeichnet sich durch eine gute Lösemittel-, Kältemittel- und Wasserbeständigkeit aus und eignet sich besonders für Anwendungen, bei denen die Isoliermaterialien solchen Beanspruchungen ausgesetzt sein können. Die Zuleitungen werden mit einem Glas-Filament-Schlauch (mit flüssigkristallinen Polymeren) mit einer Glasgewebestärke von 0,2 mm überzogen, der eine Durchschlagsspannung von 4 kV und einen Temperaturindex oberhalb von 250 °C hat. Die resultierende Leistungsfähigkeit dieses EIS soll unter spezifischen Belastungen im Folgenden untersucht werden. Hierzu werden Endpunkt-Kriterien abgeleitet, die einen unmittelbaren Einfluss auf die zu erwartende Lebensdauer haben.

4. Ableitung der Endpunktkriterien

Bei beschleunigten Alterungsverfahren werden die Prüfobjekte bis zu ihrem Ausfall geprüft. Der Ausfallzeitpunkt (Engl.: End-Of-Life (EOL)) wird durch das Erreichen eines bestimmten Grenzwertes einer Eigenschaft definiert. Zur Bewertung der elektrischen Isolierfähigkeit von EIM oder EIS werden in der Regel elektrische Messmethoden verwendet. Alle Messmethoden können jedoch nur die Symptome und nicht die Ursache eines Fehlers messen. Aus diesem Grund kann nicht die Lebensdauererwartung selber gemessen werden, sondern symptomatische Veränderungen von Eigenschaftswerten

ten, die mit der verbleibenden Lebensdauererwartung korrelieren. In [6] sind häufig eingesetzte Messmethoden und ihre symptomatische Bedeutung zusammengetragen. Bei den elektrischen Messmethoden wird in der Regel zwischen HiPot-Prüfungen (Engl.: High Potential) und informativen Prüfungen unterschieden. HiPot-Prüfungen werden in der Regel bei Initial- oder End-of-Line-Prüfungen eingesetzt. Die Grundidee ist: Wenn die Wicklung einer Überspannung standhält, dann wird diese dem Normalbetrieb auch standhalten. Die Vorteile von HiPot-Prüfungen sind:

- Ein Fehler in der Isolierung tritt in der Regel durch eine transiente Überlast auf, die durch eine HiPot-Prüfung berücksichtigt werden kann.
- Sie eignen sich als EOL-Prüfung, um das Ende der Betriebslebensdauer zu bestimmen.
- Sie sind einfach und schnell.

Nachteile von HiPot-Prüfungen sind, dass sie schädigend sein können und nicht beliebig wiederholbar sind. Sie liefern keine Information über den Zustand einer Isolierung, d. h. sie sind nicht vergleichbar. Dem gegenüber stehen informative Prüfungen: Sie sind immer vergleichende Prüfungen, die im Zusammenhang mit anderen Messwerten (oder Erfahrungswerten) Informationen über den Zustand der Isolierung liefern können. Sie gehören in der Regel zu den nicht-zerstörenden Prüfungen. Ihr Nachteil ist, dass sie im Vergleich zu den HiPot-Prüfungen einen vergrößerten Aufwand bedeuten.

Für den Fall, dass die betrachtete Maschine von einem Spannungswechselrichter gespeist wird, muss das EIS dafür qualifiziert werden. Hierbei werden teilentladungsfreie EIS (Typ 1) und nicht-teilentladungsfreie EIS (Typ 2) unterschieden. Bei dem ersten Fall handelt es sich um nicht-teilentladungsresistente EIS bei denen für die gesamte Lebensdauer eine Teilentladungsfreiheit sichergestellt werden muss. Dies ist notwendig weil nicht-teilentladungsresistente EIS durch Teilentladungen um ein Vielfaches schneller altern würden (elektrische Alterung) und ihre Ziellebensdauer nicht erreichen könnten. Somit wird für solche Systeme eine elektrische Alterung ausgeschlossen und ist nicht Gegenstand von den beschleunigten Alterungsprüfungen. Bei dem zweiten Fall (Typ 2) können Teilentladungen aufgrund besonderer Gegebenheiten wie der Höhe der Betriebsspannung (z. B. Hochspannungsmaschinen) oder verkleinertem Bauraum nicht verhindert werden. In diesem Fall muss das Elektroisoliersystem teilentladungsresistent ausgelegt werden. Die beschleunigten Alterungsversuche werden hierbei unter Teilentladungen bzw. elektrischer Alterung durchgeführt. Diese beiden Qualifizierungsprüfungen werden in den Normen DIN EN 60034-18-41 (Typ 1) [12] und DIN EN 60034-18-42 (Typ 2) [13] behandelt, die zusätzlich zu den zyklischen Prüfungen für Runddraht- und Formspulenwicklungen berücksichtigt werden müssen. Teilentladungsfreie Isoliersysteme stellen den Standard in Niederspannungsmaschinen dar, weil teilentladungsresistente Systeme, wie sie in Hochspannungsmaschinen eingesetzt werden, zu einer nicht vernachlässigbaren Vergrößerung des Isolierungsaufwands bzw. der Kosten führen. Die Teilentladungsfreiheit ist für solche Systeme als EOL-Kriterium definiert und stellt weitaus höhere Anforderungen durch die Höhe der Prüfspannungen. Ein zuverlässiger Betrieb oder die hier untersuchte elektrische Beständigkeit kann nur untersucht werden, wenn die elektrischen Beanspruchungen durch den Wechselrichter bekannt sind [8]. Um die Prüfspannungen für die Teilentladungsmessungen zu berechnen, müssen zunächst die höchsten Spitzenspannungen, die bei dem Erprobungswechselrichter auftreten können, bestimmt werden. Bei geschalteten Spannungen müssen insbesondere Wanderwellenphänomene, die in Reflexionen, Überlagerungen und damit in ungleichmäßigen Spannungsverteilungen resultieren, berücksichtigt werden. Das Verhältnis der Spannungsspitze zur

Tab. 2. Maximale Spitze-Spitze-Spannungen im Betrieb bezogen auf \hat{u}_{DC} für einen 2-Level-Umrichter [12]

Faktor OF U_p/\hat{u}_{DC}	Max. Spitze-Spitze-Spannungen bezogen auf \hat{u}_{DC}	
	Phase-Phase Gl. (1)	Phase-Erde Gl. (2)
1,1	2,2	1,5
1,5	3,0	2,1
2,0	4,0	2,8
2,5	5,0	3,5

Zwischenkreisspannung wird als Überschwingfaktor OF (Engl. Overshoot Factor) bezeichnet und in unterschiedliche Beanspruchungskategorien bei einer definierten Impulsanstiegszeit t_r geteilt [12, 15]. Für Maschinen, deren Wechselrichter nicht weiter bekannt ist, wird die Beanspruchungskategorie C (Stark, OF = 2) empfohlen, was den Einsatz von den meisten Wechselrichtern bei definierter Zwischenkreisspannung ermöglicht. Für einen Zweipunktwechselrichter berechnet sich die maximale Spitze-Spitze-Spannung zwischen den Phasen zu:

$$\hat{u}_{\text{Phase,Phase}} = 2 \cdot \text{OF} \cdot \hat{u}_{DC} \quad (1)$$

und zwischen den Phasen und der Erde zu:

$$\hat{u}_{\text{Phase,Erde}} = 0,7 \cdot \hat{u}_{\text{Phase,Phase}} \quad (2)$$

Mögliche Zwischenkreisschwankungen erhöhen die Beanspruchungen. Aus diesem Grund ist die maximal mögliche Zwischenkreisspannung in den Prüfspannungen zu berücksichtigen. Der Kopplungsfaktor 0,7 ist abhängig von dem Erdungssystem des Antriebs und kann abseits der Norm vom Hersteller der Leistungselektronik zu einem anderen Wert festgelegt werden, der in der Berechnung berücksichtigt werden muss. Insgesamt ergeben sich die in Tab. 2 aufgelisteten maximalen Spitze-Spitze-Spannungen bezogen auf die Zwischenkreisspannung \hat{u}_{DC} . Das Annahmekriterium für die Qualifizierung eines Prüflings ist, dass die Teilentladungseinsetzspannung PDIV (Engl. Partial Discharge Inception Voltage) der gealterten Prüflinge oberhalb der Bezugsspannung für die ausgewählte Beanspruchungskategorie liegt, erhöht um einen Sicherheitsfaktor, der weitere Effekte berücksichtigt. Der PD-Sicherheitsfaktor von 1,25 ergibt sich aus dem Hystereseeffekt, nachdem die Teilentladungsaussetzspannung PDEV (Engl. Partial Discharge Extinction Voltage) nach praktischen Erfahrungen um 25 % unter der PDIV liegt, was bei sinusförmigen Prüfspannungen in Versuchen nachgewiesen werden konnte [15]. Dies trifft zu, wenn die Teilentladungsaktivität durch eine transiente Überspannung ausgelöst wird, die die normale Spitzenspannung überschreitet. Der zweite zu berücksichtigende Aspekt (Faktor 1,0 bis 1,3) für die Erhöhung ergibt sich aus der Temperaturerhöhung [16], wonach ein Anstieg der Wicklungstemperatur von 25 °C auf 155 °C üblicherweise zu einer Verringerung der PDIV um 30 % führt. Bei der Phase-Erde-Prüfung reduziert sich dieser Faktor durch die Kühlwirkung auf benachbarte Windungen in einer Nut und trägt nur mit 5 % bis 10 % bei. Für die Qualifizierungsprüfung ist anders als bei einer Typprüfung der Alterungsfaktor gleich Eins, weil hier u.a. gealterte Prüflinge untersucht werden bzw. dies genau der Betrachtungsgegenstand ist.

Für einen Zweipunktwechselrichter der Beanspruchungskategorie C (Stark) mit einer Zwischenkreisspannung 350 V, die um 10 % schwanken kann, ergibt sich die maximale Zwischenkreisspannung zu $\hat{u}_{DC} = 385$ V. Unter Berücksichtigung der Faktoren zur Berechnung der maximalen Spitze-Spitze-Spannungen aus Tab. 2 und der jeweils maximal angenommenen Sicherheitsfaktoren, ergeben sich

Tab. 3. Sicherheitsfaktoren nach [12]

	Phase-Phase	Phase-Erde	Windung-Windung
PD-Hysterese	1,25		
Temperatur	1,0 bis 1,3	1,0 bis 1,1	1,0 bis 1,3
Alterung	1,0 bis 1,2		
Gesamt	1,25 bis 1,95	1,25 bis 1,65	1,25 bis 1,95

Tab. 4. Prüfspannungen und Sicherheitsfaktoren nach DIN EN 60034-18-41 [12] für eine Zwischenkreisspannung von 385 V (Amplitudenwerte)

Isolierung	Phase-Phase	Phase-Erde	Windung-Windung
Spannungsform	Sinus	Sinus	Stoßspannung
<i>Qualifizierungsprüfung als EOL-Kriterium</i>			
Sicherheitsfaktoren	1,63	1,38	1,63
Prüfspannungen OF = 1,5	1883 V	1116 V	1318 V
Prüfspannungen OF = 2,0	2510 V	1488 V	1758 V
<i>Typprüfung zur Qualitätssicherung</i>			
Sicherheitsfaktoren	1,95	1,65	1,95
Prüfspannungen OF = 1,5	2252 V	1334 V	1577 V
Prüfspannungen OF = 2,0	3003 V	1779 V	2102 V

die in Tab. 4 aufgelisteten Prüfspannungen. Der betrachtete Eigenschaftswert ist hierbei das Teilentladungsverhalten, das durch einen unteren Schwellenwert limitiert ist.

Im Folgenden gilt das EOL-Kriterium als erreicht, wenn Teilentladungen vor dem Erreichen dieser Spannungsschwelle einsetzen oder ein Durchschlag eintritt. Um eine bessere Vergleichbarkeit zwischen den Spannungsformen zu ermöglichen, werden im Folgenden alle Spannungswerte als Amplitudenwerte angegeben.

5. Prüfablauf der Lebensdaueruntersuchungen

Der grundsätzliche Ablauf der Lebensdaueruntersuchungen basiert auf der Grundstruktur von Beständigkeitsprüfungen nach [10] und ist in Abb. 7 dargestellt. Zu Beginn der Lebensdaueruntersuchungen findet zunächst eine Qualitätssicherungsprüfung statt, bei der die Probekörper auf die vorher definierten Eigenschaften überprüft werden. Dies umfasst eine visuelle Kontrolle auf ein fehlerhaftes Erscheinungsbild um mögliche Fertigungsfehler auszuschließen. Darüber hinaus wird die Qualität der Isolierung mit Hilfe von HiPot-Prüfungen überprüft, um eine minimale Spannungsfestigkeit zu gewährleisten. Ist die Qualitätssicherungsprüfung erfolgreich bestanden, erfolgt im Anschluss die vorhergehende vordiagnostische Prüfung. Diese wird in den Normen unterschiedlich definiert. Grundsätzlich soll die vordiagnostische Prüfung sicherstellen, ob die Probekörper mit den geplanten Beanspruchungen im Belastungsunterzyklus oder Diagnoseprüfungen beaufschlagt werden können, ohne dass diese sofort zerstört werden. Die Annahme, dass keine bzw. vernachlässigbar geringe elektrische Alterung auftritt wenn die Teilentladungsfreiheit sichergestellt wird, soll im Rahmen der vorhergehenden Diagnoseprüfung überprüft werden. Hierbei wird die Phase-Erde-Isolierung der Prüfobjekte über einen Zeitraum von 24 Stunden mit der maximalen Betriebsfrequenz und der Spitze-Spitze-Spannung aus der Qualifizierungsprüfung beansprucht. Anschließend wird die Teilentladungseinsetzspannung festgestellt, um zu überprüfen, ob diese weiterhin oberhalb der definierten minimalen Schwellenwerte (EOL-Kriterium) liegt. Elektroisoliermaterialien mit einem hohen Verlustfaktor würden zu einer Überhitzung neigen und bei dieser Prüfung

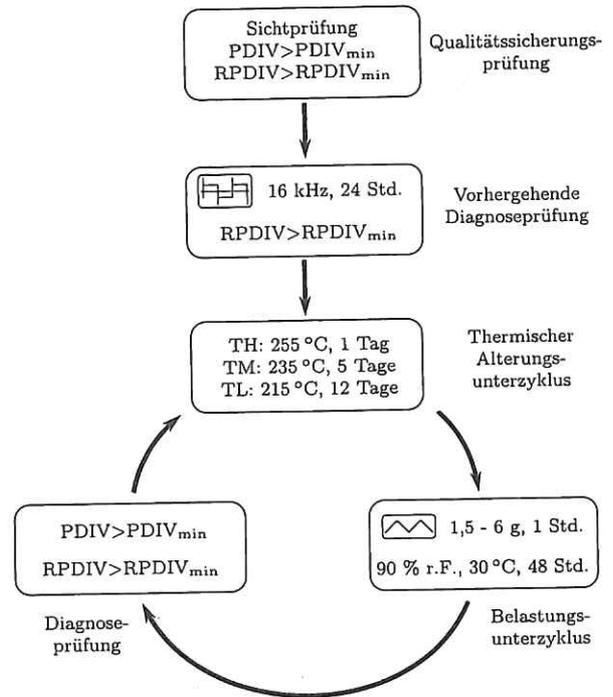
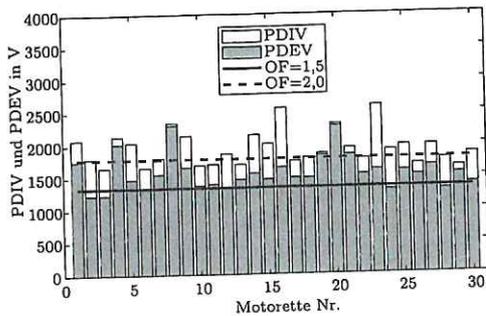


Abb. 7. Ablauf der Beständigkeitsprüfung

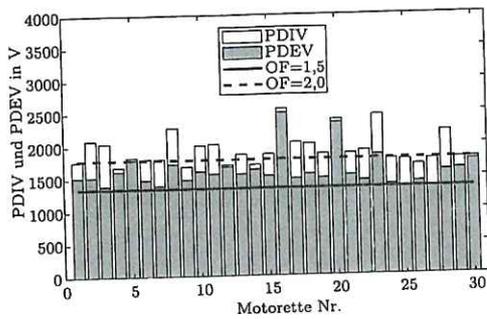
identifiziert werden. Nach der vorhergehenden vordiagnostischen Prüfung beginnt der Hauptzyklus, welcher von den Probekörpern bis zu ihrem Komplettausfall mehrmals durchlaufen wird. Er besteht aus dem thermischen Alterungsunterzyklus, dem Belastungsunterzyklus und den Diagnoseprüfungen. Da die thermische Belastung als dominanter Alterungsfaktor angesehen wird, ist dieser abseits des Belastungsunterzyklus separat aufgeführt. Hier werden die Probekörper für eine vordefinierte Dauer in einem Wärmeprüföfen thermisch beansprucht bzw. gealtert. Anschließend werden im Belastungsunterzyklus zusätzliche Beanspruchungen beaufschlagt, die sich anwendungsspezifisch voneinander unterscheiden können. Um dem drehzahlvariablen Betrieb und dem mobilen Einsatz des Systems gerecht zu werden, wird innerhalb des Belastungszyklus eine frequenzvariable mechanische Beanspruchung und eine Feuchtelagerung durchgeführt. Die Prüflinge werden direkt nach der thermischen Belastung auf einem Beschleunigungstisch arretiert und mit 1,5 g bis 6 g (30 Hz- bis 80 Hz) 60 min lang beschleunigt, um während des Abkühlvorgangs die thermomechanische Alterung nachzubilden. Anschließend werden diese bei einer relativen Feuchte von min. 90 % in einer Klimakammer über 48 h gelagert, um die chemische Beständigkeit gegen Hydrolyse zu berücksichtigen. Der Hauptzyklus endet mit einer Diagnoseprüfung bei der die vorher definierten Eigenschaftswerte überprüft werden. Anschließend beginnt der Hauptzyklus von neuem bis die Prüflinge ihre Lebensdauer erreicht haben bzw. die Diagnoseprüfung nicht überstehen. Da die Beanspruchungen zyklisch hintereinander erfolgen, wird im Folgenden von einer indirekten Wechselwirkung (vgl. Abschn. 2) ausgegangen.

6. Qualitätssicherungsprüfung und vorhergehende Diagnoseprüfung

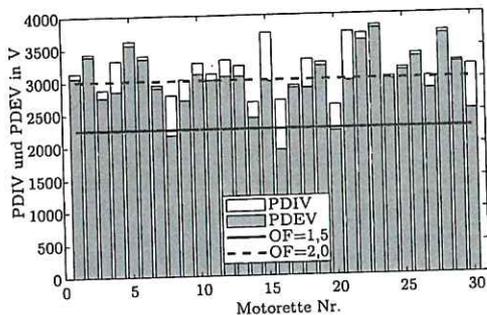
In der Qualitätssicherungsprüfung wird überprüft, ob alle Komponenten der Prüflinge korrekt verarbeitet worden sind und bis zu welcher Spannung die Teilentladungsfreiheit (Typprüfung) eingehalten werden kann. Anschließend wird bei der vorhergehenden Diagnoseprüfung die Phase-Erde-Isolierung über einen Zeitraum von



(a) Obere Wicklungslage gegen das Gehäuse.



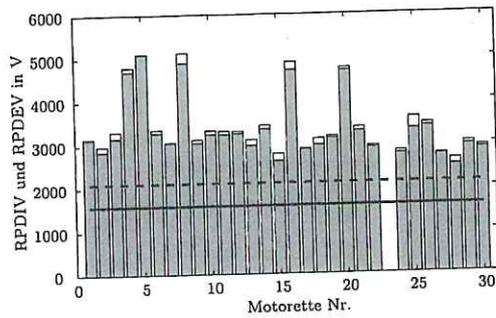
(b) Untere Wicklungslage gegen das Gehäuse.



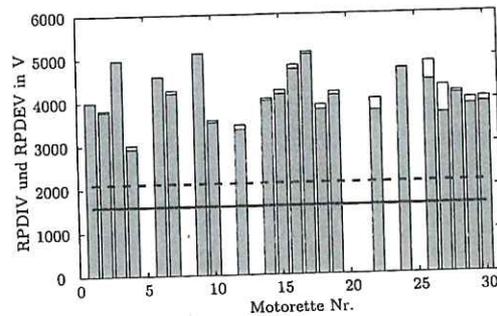
(c) Obere gegen untere Wicklungslage.

Abb. 8. Teilentladungsmessungen für die Phase-Erde- und Phase-Phase-Isolierung (Sinus, Amplitudenwerte)

24 Stunden mit der maximalen Schaltfrequenz von 16 kHz beansprucht und erneut die Teilentladungsfreiheit analog zur Qualitätssicherungsprüfung sichergestellt. Die Teilentladungsmessungen der Qualitätssicherungsprüfung sind in den Abb. 8 und 9 dargestellt. In Abb. 8 wird die Phase-Erde- und die Phase-Phase-Isolierung auf ihre Teilentladungseinsetz- (PDIV) und Teilentladungsaussetzspannung (PDEV) geprüft. Zusätzliche untere Grenzlinien sind als Minimalwerte für die Teilentladungseinsetzspannung aus Tab. 4 (Typprüfung) für unterschiedliche Überspannungsspitzen eingetragen. Diese beinhalten Sicherheitsfaktoren aus Tab. 3, die verschiedene Effekte berücksichtigen. Obwohl die PDEV ebenfalls gemessen werden, werden die PDIV zur Bewertung herangezogen und die PD-Hysterese mit 25 % berücksichtigt. Die tatsächlich gemessene mittlere PD-Hysterese liegt bei 18,9 % (Obere Wicklungslage gg. Gehäuse) und 16,9 % (Untere Wicklungslage gg. Gehäuse) für die Phase-Erde-Isolierung und 7,3 % (Obere gg. untere Wicklungslage) für die Phase-Phase-Isolierung und damit unterhalb den normativen Vorgaben von 25 %. Diese sei als Worst-Case-Betrachtung für die folgenden Untersuchungen festgelegt, um alterungsbedingten Ver-



(a) Obere Wicklungslage.



(b) Untere Wicklungslage.

Abb. 9. Teilentladungsmessungen für die Windungsisolierung (Stoßspannung, Amplitudenwerte)

änderungen, unterschiedlichen Messbedingungen und einer besseren Vergleichbarkeit mit anderen Untersuchungen Rechnung zu tragen. In diesen Messungen konnte gezeigt werden, dass die hohen normativen Anforderungen an die Teilentladungsfreiheit für einen $OF = 2,0$, unter Berücksichtigung der maximalen Sicherheitsfaktoren, von der Phase-Erde- und Phase-Phase-Isolierung mit diesem EIS nicht erreicht werden können. Aus diesem Grund muss seitens des Wechselrichters sichergestellt werden, dass der Überschwingsfaktor den Wert von $OF = 1,75$ nicht übersteigt. Alternativ muss die Phase-Erde- und die Phase-Phase-Isolierung aus Tab. 1 durch eine größere Schichtdicke verbessert werden.

Bei der Messung der Windungsisolierung wird eine unipolare Stoßspannung zehn mal auf den Prüfling geschaltet und in 50 V Schritten bis auf 5,5 kV vergrößert, bis gemäß [9] die periodische Teilentladungseinsetzspannung RPDIV (Engl. Repetitive Partial Discharge Inception Voltage) gemessen wird. In Abb. 9 sind die Ergebnisse für die RPDIV und RPDEV Messungen dargestellt. Die einzelnen Lücken ergeben sich dadurch, dass für den Messbereich bis 5,5 kV keine periodisch wiederkehrenden Teilentladungen gemessen werden können. Insgesamt zeigen die Messungen auf, dass die Windungsisolierung zu Teilentladungsspannungen oberhalb der geforderten Minimalgrenzen neigt. Des weiteren kann festgestellt werden, dass die obere Wicklungslage eine geringere RPDIV aufweist, als die untere Wicklungslage im Nutgrund. Dies lässt sich damit begründen, dass die Prüflinge liegend ausgehärtet wurden und die Wicklungslage im Nutgrund eine bessere Imprägnierung aufweist, als die obere Wicklungslage. Für die im Folgenden durchgeführten Untersuchungen wird der Überschwingsfaktor auf den Wert $OF = 1,5$ (mittlere bis starke Beanspruchungskategorie) begrenzt, wodurch die Impulsanstiegszeit des Wechselrichters entsprechend diesem Limit angepasst werden muss, um den Erprobungsträger mit diesem EIS teilentladungsfrei betreiben zu können. Alternativ

müssen die eingesetzten Flächenisierstoffe in ihrer Dicke vergrößert werden, um die Phase-Erde- und Phase-Phase-Isolierung zu verbessern. Die Prüfspannungen bzw. Minimalwerte für eine Teilentladungsaktivität sind in der Tab. 4 unter OF = 1,5 zusammengefasst.

7. Ergebnisse der Lebensdaueruntersuchungen

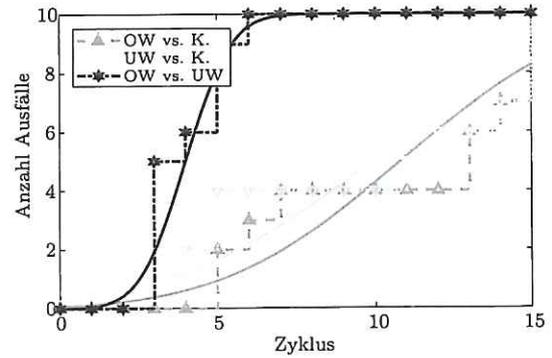
In Abb. 10 ist die Anzahl der Ausfälle über die untersuchten Zyklen aufgetragen. Hier sind die Ergebnisse in Ausfälle der oberen und unteren Wicklungslage (OW + UW) gegen das Gehäuse (K) und die Wicklungslagen gegeneinander (OW vs. UW) unterschieden, was die Phase-Erde-Isolierung bzw. Phase-Phase-Isolierung abbildet. Ein Ausfall der Windungsisolierung tritt bei den zuvor definierten Prüfspannungen im gesamten Untersuchungszeitraum nicht auf. Diese beobachtete Ausfallverteilung beinhaltet alle drei charakteristischen Ausfallphasen (Frühausfallphase, Zufallsausfallphase, Spätausfallphase), die in der Lebensdauerbetrachtung berücksichtigt werden müssen. Sie unterscheiden sich durch ihren Verlauf der Ausfallrate: Während in der Frühausfallphase die Ausfallrate abklingt, nimmt sie in der Zufallsausfallphase einen ungefähr konstanten Wert an. Die Spätausfallphase, die insbesondere Alterung und Verschleißerscheinungen beinhaltet, zeichnet sich durch einen Anstieg der Ausfallrate aus und lässt sich in Näherung durch eine Normalverteilung charakterisieren [17]. In der Darstellung aus Abb. 10 sind zunächst alle beobachteten Ausfälle mitberücksichtigt. Aus diesen Ergebnissen ist festzustellen, dass die Phase-Phase-Isolierung zu deutlich früheren Ausfällen führt als die Phase-Erde-Isolierung. Im Hinblick auf den Auslegungszeitraum ist die Phase-Phase-Isolierung mit den aus Tab. 1 aufgeführten Werkstoffen durchgefallen. Die Ursache hierfür sind die Massenverluste der Imprägnierung (im speziellen im Wickelkopf) durch die thermische Alterung. Das Glasgewebe baut die elektrische Festigkeit erst durch die Imprägnierung auf. Geht diese im Laufe der Lebensdauer verloren, sind die Phasen im Wickelkopf nur durch ein Glasgewebe voneinander getrennt. Die daraus verbleibende Luftstrecke ist nicht ausreichend, um den hohen Anforderungen durch die Prüfspannungen gerecht zu werden. Die Phase-Erde-Isolierung, sowohl die obere als auch die untere Wicklungslage, zeigt eine deutlich längere Beständigkeit als die Phase-Phase-Isolierung. Die Verteilungsfunktionen erreichen für alle Temperaturen im Bereich von Zyklus zehn ihren Mittelwert, was der erwarteten mittleren Lebensdauer entspricht. Die untere Wicklungslage erreicht für alle Temperaturen eine geringere Lebensdauer, was sich mit der vergrößerten Fläche gegenüber dem Gehäuse (Nutgrund + Wickelkopf) erklären lässt. Im Folgenden wird davon ausgegangen, dass die Phase-Phase-Isolierung für die Serienfertigung des Erprobungsträgers angepasst wird, sodass eine mittlere Lebensdauer entsprechend der Phase-Erde-Isolierung erreicht wird, um eine möglichst gute Ausnutzung des Gesamtsystems zu erreichen. Aus diesem Grund werden zur Lebensdauermodellierung des Isoliersystems im Folgenden nur die Ergebnisse für die Phase-Erde-Isolierung berücksichtigt.

Die Zuverlässigkeit bzw. die Fähigkeit ausfallfrei über die Dauer eines vorgegebenen Zeitintervalls unter bestimmten Bedingungen zu arbeiten hat stets einen statistischen Charakter. Die Wahrscheinlichkeit einer ausfallfreien Arbeit $P(t)$ ist eine mit der Zeit, oder dem Alter, fallende Funktion und erfüllt nach einer ausreichenden Qualitätssicherungsprüfung die Bedingungen [17]:

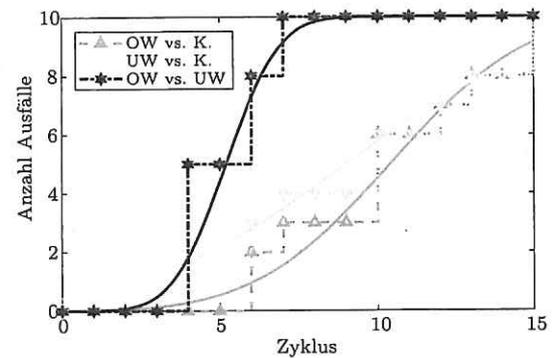
$$0 \leq P(t) \leq 1 \quad \text{mit } P(0) = 1, P(\infty) = 0. \quad (3)$$

Die Ausfallwahrscheinlichkeit $Q(t)$ als Pendant zur Wahrscheinlichkeit der ausfallfreien Arbeit, ist definiert als:

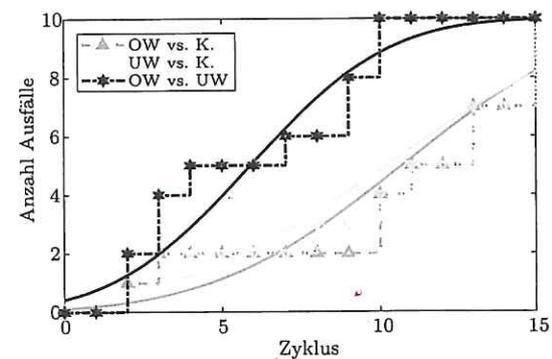
$$Q(t) = 1 - P(t) \quad \text{mit } Q(0) = 0, Q(\infty) = 1 \quad (4)$$



(a) Hohe Belastungsklasse (TH 255 °C).



(b) Mittlere Belastungsklasse (TM 235 °C).



(c) Niedrige Belastungsklasse (TL 215 °C).

Abb. 10. Summe der Ausfälle der Phase-Erde- und Phase-Phase-Isolierung für alle drei Belastungsklassen

und gibt die Wahrscheinlichkeit an, bei der mindestens ein Ausfall in einem betrachteten Intervall erfolgt. Die Ausfallhäufigkeit in einem Zeitintervall bezogen auf den Anfangsbestand entspricht der Ausfallwahrscheinlichkeitsdichte $f(t)$ und ist die zeitliche Ableitung der Ausfallwahrscheinlichkeit $Q(t)$ oder die negative Ableitung der Wahrscheinlichkeit der ausfallfreien Arbeit $P(t)$:

$$f(t) = \frac{dQ}{dt} = -\frac{dP}{dt} \quad (5)$$

Dementsprechend ergibt sich die Ausfallwahrscheinlichkeit $Q(t)$ zu:

$$Q(t) = \int_0^t f(t) dt \quad (6)$$

und die Wahrscheinlichkeit der ausfallfreien Arbeit $P(t)$ zu:

$$P(t) = 1 - \int_0^t f(t) dt. \quad (7)$$

Die Ausfallrate einer Betrachtungseinheit $\lambda(t)$ ist das Verhältnis der Ausfälle in der Zeiteinheit, bezogen auf die mittlere Anzahl der im betrachteten Zeitabschnitt arbeitsfähigen Betrachtungseinheiten [17]. Sie berechnet sich aus dem Quotient der Ausfallwahrscheinlichkeitsdichte $f(t)$ und der Wahrscheinlichkeit der ausfallfreien Arbeit $P(t)$:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} = -\frac{P'(t)}{P(t)} \tag{8}$$

Durch die Integration der Ausfallrate $\lambda(t)$ ergibt sich die ausfallfreie Arbeit $P(t)$ zu:

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} \tag{9}$$

und die Ausfallwahrscheinlichkeit $Q(t)$ zu:

$$Q(t) = 1 - e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} \tag{10}$$

Da die Ausfallrate $\lambda(t)$ im Allgemeinen zeitabhängig ist, folgt die Wahrscheinlichkeit der ausfallfreien Arbeit $P(t)$ nach Gl. (9) nicht einer Exponentialfunktion. Die Gleichungen sind allgemeine Ausdrücke, die für verschiedene Wahrscheinlichkeitsverteilungen ihre Gültigkeit haben. Die beobachtete Ausfallrate stellt eine zeitlich abhängige Größe dar, die sich aus der Kombination von verschiedenen Ausfallraten und ihren Wirkmechanismen ergibt. Die ausgeprägte Streuung der beobachteten Ergebnisse aus Abb. 10 ergibt sich durch die gesamttheoretische Berücksichtigung sämtlicher Ausfälle (inkl. Frühausfälle und Zufallsausfälle). Um die verschiedenen charakteristischen Ausfallphasen voneinander zu separieren ist eine große Anzahl von Stichproben notwendig, die bei Systemprüfungen den Aufwand und die Kosten unpraktikabel machen. Um die Verfälschung der untersuchten Alterungsmechanismen durch Frühausfälle zu bereinigen, werden die ersten vier Zyklen der Frühausfallphase zugeordnet und aus der folgenden Untersuchung zunächst herausgenommen. Die verbleibenden Ausfälle sind eine Kombination aus zufälligen Ausfällen und Ausfällen durch Alterung, die durch die geringe Anzahl von Stichproben nicht eindeutig voneinander separiert werden können. Aus diesem Grund werden diese im Folgenden den Alterungsausfällen zugeordnet, was einer Worst-Case-Betrachtung entspricht. Obwohl Alterungsausfälle häufig einer Normalverteilung folgen [17], wird im Folgenden die allgemeinere Weibull-Verteilung verwendet, die mit dem Skalen-Parameter λ_0 und dem Form-Parameter k verschiedene Verteilungsformen (u.a. die Form der Normalverteilung) annehmen kann. Die Wahrscheinlichkeit der ausfallfreien Arbeit $P(t)$, die Ausfallwahrscheinlichkeit $Q(t)$ und die Ausfallwahrscheinlichkeitsdichte $f(t)$ ergeben sich nach der Weibull-Verteilung zu:

$$P(t) = e^{-(\lambda_0 \cdot t)^k} \tag{11}$$

$$Q(t) = 1 - e^{-(\lambda_0 \cdot t)^k} \text{ und} \tag{12}$$

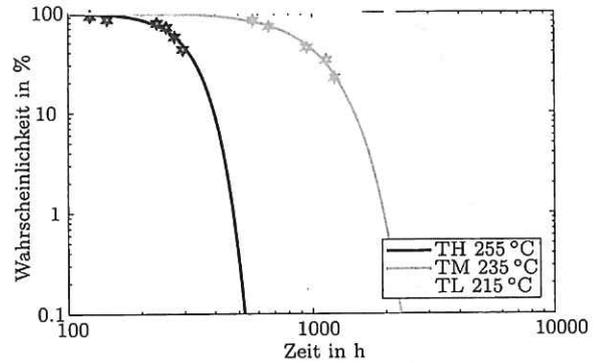
$$f(t) = \lambda_0 \cdot k \cdot (\lambda_0 \cdot t)^{k-1} \cdot e^{-(\lambda_0 \cdot t)^k} \tag{13}$$

Eine Inversion des Skalen-Parameters liefert die charakteristische Lebensdauer $T = 1/\lambda_0$, die analog zur Zeitkonstante die Dauer beschreibt, bei der ca. 63,2 % der Betrachtungseinheiten ausgefallen sind. In Tab. 5 sind für die drei Belastungsklassen die identifizierten Parameter aufgelistet und in der Abb. 11 die zeitabhängige Wahrscheinlichkeit der ausfallfreien Arbeit $P(t)$, die Ausfallwahrscheinlichkeit $Q(t)$ und die Ausfallrate $\lambda(t)$ abgebildet. Der Ansatz mit Hilfe der Weibull-Verteilung liefert für alle drei Belastungen eine gute Abbildung der erhobenen Ausfalldaten. Alle drei Formparameter k sind größer 2 und liefern nach Gleichung:

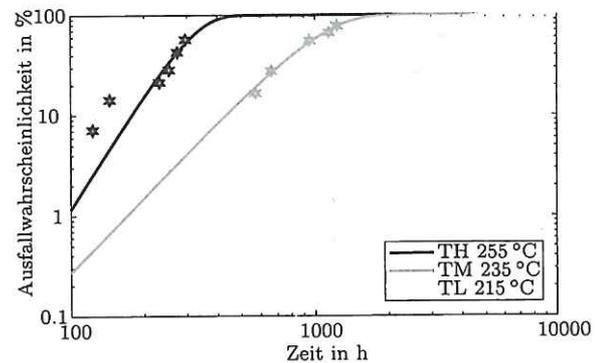
$$\lambda(t) = \lambda_0 \cdot k \cdot (\lambda_0 \cdot t)^{k-1} \tag{14}$$

Tab. 5. Identifizierte Parameter für die Weibullverteilung

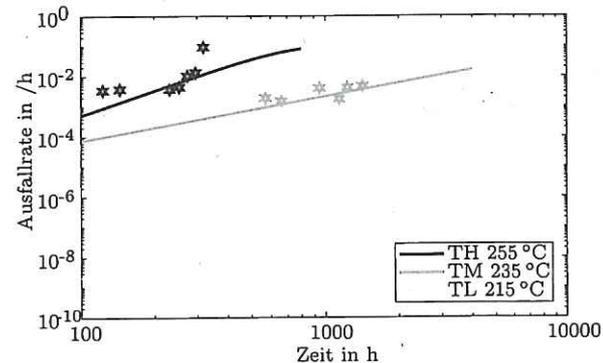
Belastungsklasse	Höchste (TH)	Mittlere (TM)	Niedrigste (TL)
Formparameter k	3,85	2,51	4,89
Skalenparameter λ_0 in h^{-1}	$3,1 \times 10^{-3}$	$0,94 \times 10^{-3}$	$0,3 \times 10^{-3}$
char. Lebensdauer T in h	319	1059	3385



(a) Wahrscheinlichkeit der ausfallfreien Arbeit $P(t)$.



(b) Ausfallwahrscheinlichkeit $Q(t)$.



(c) Ausfallrate $\lambda(t)$.

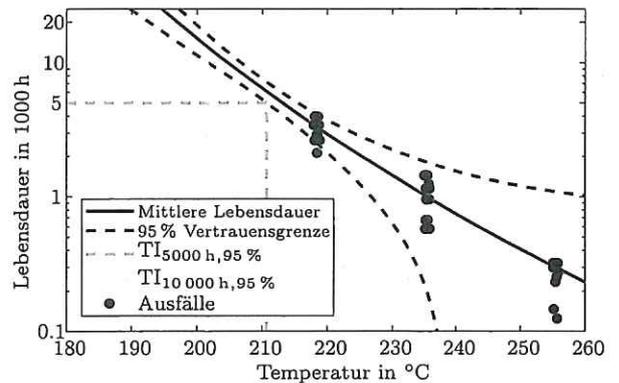
Abb. 11. Zuverlässigkeitskenngrößen für die drei Belastungsklassen

eine zeitabhängige bzw. exponentiell steigende Ausfallrate (vgl. Abb. 11(c)). Da der für alle Belastungsklassen errechnete mittlere Formparameter eine Verteilung mit verschwindender Schiefe $\bar{k} = 3,75$ ähnlich der Normalverteilung ($\approx 3,602$) liefert, kann die Annahme, dass Alterungsausfälle häufig einer Normalverteilung fol-

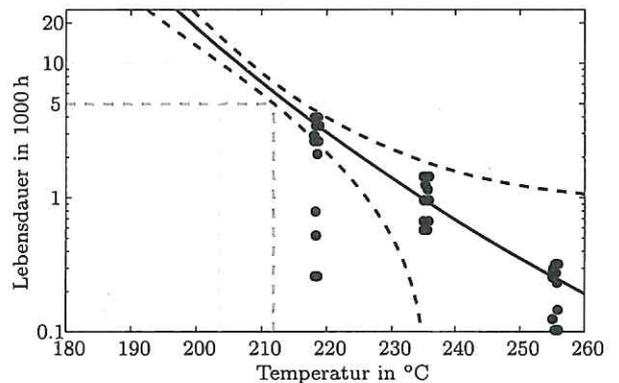
gen [17], bestätigt werden. Aus diesem Grund wird für alle Belastungen im Folgenden die Normalverteilung für die Berechnung der Lebensdauerwahrscheinlichkeit verwendet. Zusätzlich werden drei verschiedene Regressionsverfahren verglichen, um dem Einfluss der zuvor bereinigten Frühausfälle Rechnung zu tragen. Bei dem ersten Verfahren werden unter Berücksichtigung der vorherigen Ergebnisse die ersten vier Zyklen der Frühausfallphase zugeordnet und die Ausfälle aus der Bewertung herausgenommen. Das Lebensdauermodell wird entsprechend der Norm [14] mit Hilfe der Methode der nichtlinearen kleinsten Quadrate parametrisiert. Anschließend werden die Prädiktions- oder Konfidenzintervalle für eine Normalverteilung berechnet. Bei den anderen beiden Methoden werden Regressionsverfahren verwendet, die gegenüber Ausreißern besonders robust sind. Bei dem iterativen Bisquare-Verfahren werden Eingangsdaten unterschiedlich gewichtet. Die Ausfälle mit dem größten Abstand zur Regressionsgeraden werden quadratisch schwächer gewichtet, als diejenigen, die sich in ihrer Nähe befinden. Bei dem LAR-Verfahren (Engl.: Least Absolute Residuals) werden die Residuen und nicht das Quadrat der Residuen minimiert, um den Einfluss der Ausreißer gleich zu gewichten. Bei beiden robusten Regressionsverfahren werden alle Eingangsdaten berücksichtigt und keine frühzeitigen Ausfälle vernachlässigt. Für die Systemmodellierung bei multifaktorieller Belastung ist es zweckmäßig das Lebensdauermodell zu vereinfachen, weil es aufgrund der begrenzten Daten mathematisch nicht möglich ist sämtliche Parameter mit der notwendigen Sicherheit zu identifizieren, ohne umfangreiche Messreihen mit isolierten Beanspruchungen durchzuführen. Im Folgenden wird zur Lebensdauermodellierung das belastungsabhängige Lebensdauermodell nach Dakin [5] verwendet:

$$L = A_{\text{Dakin}} \cdot e^{\frac{B_{\text{Dakin}}}{T}} \quad (15)$$

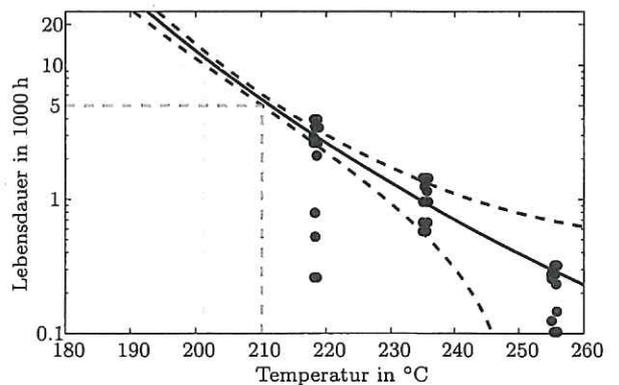
Hierbei entspricht L der mittleren zu erwartenden Lebensdauer (Engl. Mean Time To Failure (MTTF)) und T der beaufschlagten Temperatur. A_{Dakin} und B_{Dakin} entsprechen Modellparametern, die häufig dazu verwendet werden, um mit Hilfe des Koeffizientenvergleichs weitere Modellparameter, wie z. B. die Aktivierungsenergie E_A der Arrhenius-Gleichung, zu berechnen. In Abb. 12 sind die entsprechend der drei Regressionsverfahren parametrisierten Lebensdauermodelle und ihre Prädiktionsintervalle für 95 % dargestellt. Diese sind nicht mit den Konfidenzintervallen der identifizierten Parameter zu verwechseln. Prädiktionsintervalle werden häufig als Konfidenzintervalle bezeichnet, weil diese eine Konfidenz einer Prädiktion oder einer zukünftigen Antwort darstellen. Bei den Prädiktionsintervallen werden die Regressionsgerade bzw. das Lebensdauermodell und die Kovarianz aller Eingangsdaten berücksichtigt. Sie geben eine Sicherheit oder eine Konfidenz an, bei denen ein zukünftiger temperaturabhängiger Ausfall innerhalb eines Intervalls zu erwarten ist. Alle drei Verfahren führen zu ähnlichen Ergebnissen, die sich im vakanten Bereich nur um einige Kelvin unterscheiden (vgl. Tab. 6). Das Standardverfahren und das Bisquare-Verfahren weisen größere Prädiktionsintervalle auf als das LAR-Verfahren, welches im direkten Vergleich zu einer niedrigeren Lebensdauerkurve und geringeren Kennwerten führt. Zur Bewertung der Güte der drei Regressionsverfahren sind in Tab. 6 drei charakteristische Kennwerte bestehend aus der Residuenquadratsumme SSE (Engl.: Sum of Squared Errors), der mittleren quadratischen Abweichung RMSE (Engl. Root Mean Square Error) und der Korrelationskoeffizient R^2 aufgelistet. Die besten Kennwerte liefert die Regressionsgerade nach dem LAR- und die schlechtesten nach dem Bisquare-Verfahren, welches abweichend zu den anderen beiden Lösungen zu einem kleineren Halbzeitintervall führt. Wird das Standard-Verfahren und das LAR-Verfahren unter Berücksichtigung der 95 % Prädiktionsintervalle verglichen, dann



(a) Standardverfahren.



(b) Bisquare-Regressionsverfahren.



(c) LAR-Regressionsverfahren.

Abb. 12. Lebensdauermodelle und ihre Prädiktionsintervalle für drei verschiedene Regressionsverfahren

liefern beide Lösungen eine Schwankung um ca. 1 K was im Bereich der Modell- und Messgenauigkeiten liegt. Für die Auslegung und den Betrieb der elektrischen Maschine eignet sich insbesondere das Lebensdauermodell nach dem LAR-Verfahren, weil dieses numerisch das beste Ergebnis liefert und im Mittelwert geringere Temperaturkennwerte aufweist, was eine zusätzliche Sicherheit gewährleistet. Es sollten zusätzlich kurzzeitige Maximaltemperaturen oberhalb von 225 °C vermieden werden, was bei einem Temperaturindex $TI_{5000 \text{ h},95\%} \approx 210^\circ\text{C}$ und einem Halbzeitintervall $HIC \approx 7,5 \text{ K}$ einer Vervielfachung der Alterungsgeschwindigkeit entspricht. In Temperaturbereichen oberhalb dieser Temperaturen können kombi-

Tab. 6. Modellparameter zur Berechnung der Lebensdauer mit verschiedenen Regressionsverfahren

Verfahren	Standard	Bisquare	LAR
A_{Dakin}	$22,2 \times 10^{-5} \text{ h}$	$44,8 \times 10^{-6} \text{ h}$	$33,5 \times 10^{-5} \text{ h}$
B_{Dakin}	3599,4 K	3961,4 K	3490,7 K
$\bar{T}_{20000 \text{ h}}$	196,5 °C	98,9 °C	195,0 °C
$T_{20000 \text{ h}, 95 \%}$	192,0 °C	195,2 °C	193,1 °C
$\bar{T}_{10000 \text{ h}}$	204,3 °C	206,1 °C	202,8 °C
$T_{10000 \text{ h}, 95 \%}$	201,2 °C	203,6 °C	201,5 °C
$\bar{T}_{5000 \text{ h}}$	212,6 °C	213,8 °C	211,3 °C
$T_{5000 \text{ h}, 95 \%}$	210,2 °C	211,6 °C	210,1 °C
HIC	7,73 K	7,17 K	7,86 K
SSE	$7,25 \times 10^6$	$10,18 \times 10^6$	$2,18 \times 10^6$
RMSE	397,0	418,9	194,0
R^2	0,9135	0,8998	0,9785

nierte Alterungseffekte innerhalb der Maschine auftreten, die in diesen Untersuchungen nicht vollständig ausgeschlossen werden konnten. Dies können maximale Temperaturen für eingebaute Sensorik, Durchführungen, Klemmen und Zuleitungsmantel sein.

8. Methodische Anwendung am Beispiel eines Traktionsmotors

Um das abgeleitete Lebensdauermodell am Beispiel einer permanentmagneterregten Synchronmaschine (PMSM) in der Anwendung als Traktionsmotor zu bewerten, wird im Folgenden ein Längsdynamikmodell eines Fahrzeugs verwendet, welches die wesentlichen Kräfte und Drehmomente, die auf das Fahrzeug bzw. die Reifenkontaktfäche wirken, berücksichtigt [18]. Darauf aufbauend werden verschiedene Anforderungen an die Anwendung formuliert, die sich aus den normativen Motor- und Fahrzeugcharakterisierungen der ECE R 85 [19] und dem WLTP (Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Procedure) [20], den Anforderungen aus dem Straßenprofil und einem stochastischen Modellansatz für verschiedene Fahrscenarien zusammensetzen. Als Anwendung wird ein Kleinstwagen mit einem Leergewicht von 1150 kg betrachtet, der eine Maximalgeschwindigkeit von 130 km/h erreichen soll und eine maximale Zuladung von 360 kg erlaubt. Auf Grundlage der vielfältigen anwendungsspezifischen Anforderungen wird eine Adaption der Maschinendimensionen unter Berücksichtigung der erwarteten Lebensdauer durchgeführt, um den gesamtheitlichen Zusammenhang des multiphysikalischen Modells aufzuzeigen. Der Zweipunktwechselrichter mit einer Zwischenkreisspannung von 350 V und einem Maximalstrom von 250 A wird nicht variiert, während bei konstanten Längenverhältnissen des Querschnitts, konstanter Wicklungs- und Kühltopologie die Maschinendimensionen variabel gestaltet werden können. Im Folgenden werden zwei Motorvarianten ausgelegt, bei denen die Randbedingungen hinsichtlich der maximalen Temperatur unterschiedlich gewählt werden. Bei der Variante V1 wird der Motor mit einer Maximaltemperatur von 180 °C konservativ ausgelegt. Bei der zweiten Variante V2 werden die Ergebnisse aus der Lebensdauermodellierung berücksichtigt und die maximal zulässige Temperatur wird auf 225 °C angehoben. Damit beide Varianten miteinander verglichen werden können, müssen für beide Motoren die gleichen Anforderungen spezifiziert werden.

In Tab. 7 sind vier Betriebspunkte als Anforderungen an den Kleinstwagen definiert, die die Anforderungen durch Straßensteigungen und Geschwindigkeiten berücksichtigen. Die stark lastvariable Nutzung des Fahrzeugs hat einen stochastischen Charakter. Hierfür werden in Abb. 13 für verschiedene Drehzahl- oder

Tab. 7. Anforderung an das Fahrzeug durch Fahrscenarien und Straßensteigungen

Nr.	Steigung	Anforderungen
1	0 %	130 km/h muss bei voller Zuladung über die gesamte Reichweite gehalten werden können
2	5 %	90 km/h muss bei voller Zuladung 30 Minuten gehalten werden können
3	10 %	60 km/h muss bei voller Zuladung 30 Minuten gehalten werden können
4	25 %	35 km/h muss bei 200 kg Zuladung 60 Sekunden gehalten werden können

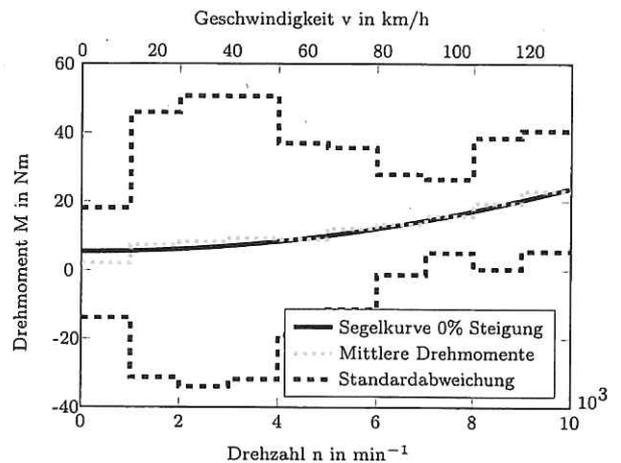


Abb. 13. Mittelwert und Standardabweichung der WLTC Klasse 3 Betriebspunkte am Beispiel eines Kleinstfahrzeugs

Tab. 8. Leistungsdaten für einen Kleinstwagen mit zwei verschiedenen Antriebsmotoren und einer Zuladung von 200 kg

	Variante 1	Variante 2
Motordaten		
Max. Drehzahl n_{max}	10 430 min ⁻¹	10 970 min ⁻¹
Max. Peakleistung P_{peak}	48,5 kW	45,7 kW
Max. Dauerleistung P_{max}	34,9 kW	31,6 kW
Bauraum V_{ges}	5353 dm ³	4448 dm ³
Beschleunigungen		
0–50 km/h	4,2 s	4,7 s
0–80 km/h	10,0 s	10,8 s
0–100 km/h	16,7 s	17,9 s
0–130 km/h	36,5 s	39,6 s
Verbrauchsdaten WLTC Klasse 3		
El. Energie W_{el}	2732 kWh	2725 kWh
Verlustenergie W_v	266 Wh	259 Wh
Mittl. Wirkungsgrad $\bar{\eta}$	91,66 %	91,91 %
Max. Temperatur T_{max}	50,1 °C	52,4 °C

Geschwindigkeitsbänder Verteilungsfunktionen definiert, die einer Beta-Verteilung folgen. Der Mittelwert und die jeweiligen Standardabweichungen sind für jedes Drehzahlband in Abb. 13 aufgetragen. Diese Verteilung entspricht einer Steigung von 0 % und muss ent-

sprechend für größere oder kleinere Steigungen vertikal verschoben werden. In Abb. 14 sind die zwei Betriebsdiagramme der resultierenden Motoren dargestellt und in Tab. 8 die Fahrleistungen aufgelistet. Als Resultat ist zunächst ersichtlich, dass die zweite Variante V2 ein um 16,9 % kleineres Volumen als die Version V1 benötigt, um dieselben Anforderungen an den Antrieb zu erfüllen. Durch den geringeren Rotordurchmesser kann sie bei gleichen mechanischen Kräften höher drehen, liefert jedoch ein geringeres Drehmoment, eine 5,7 % geringere Spitzenleistung und damit auch längere Beschleunigungsdauern. In einem Lastkollektiv, wie z. B. dem Fahrzyklus WLTC Klasse 3, setzt die kleinere Maschine jedoch eine geringere Energiemenge um. Dies lässt sich auf die Verteilung der Arbeitspunkte aus Abb. 13 zurückführen. Diese liegen insbesondere im Bereich geringerer Drehmomente, wo die Eisenverlustleistung eine dominante Rolle spielt [21, 22]. Bei einer kleineren Maschine wird ein geringerer feldschwächender Strom benötigt und weniger Volumen magnetisiert, was in einer geringeren Eisenverlustleistung resultiert. In diesem beispielhaften Lastkollektiv (1800 s) erreichen beide Motoren eine moderate Temperatur die im Hinblick auf die Lebensdauer eine untergeordnete Rolle spielt. Dies lässt sich damit erklären, dass der Fahrzyklus keine Steigungen der Fahrbahn berücksichtigt und dementsprechend die Lastanforderungen nur kurzzeitig auftreten. Treten Steigungen größer 0 % auf, dann verschieben sich die Segelkurven entsprechend der Darstellung in Abb. 14 nach oben und es verbleibt ein vergrößertes Drehmoment, um der Hangabtriebskraft entgegen zu wirken. In Abb. 15 sind zwei beispielhafte Temperaturverläufe für Steigungsfahrten dargestellt, die den Anforderungen 2 und 3 aus Tab. 7 entsprechen. In beiden Fällen erreicht die Version 2 höhere Temperaturen gegenüber der ersten Version, sodass von einer beschleunigten Alterung ausgegangen werden kann. Die Höhe dieser Temperatur ist stark von der Vorlauf-temperatur des Kühlmediums abhängig und damit auch von dem vorausgehenden Fahrzenario. So ergeben sich für Vorlauf-temperaturen größer 100 °C bereits Wicklungstemperaturen oberhalb von 200 °C. Die resultierende Alterungsbeschleunigung kann mit Hilfe der identifizierten Lebensdauer kennwerte aus Tab. 6 für alle exem-

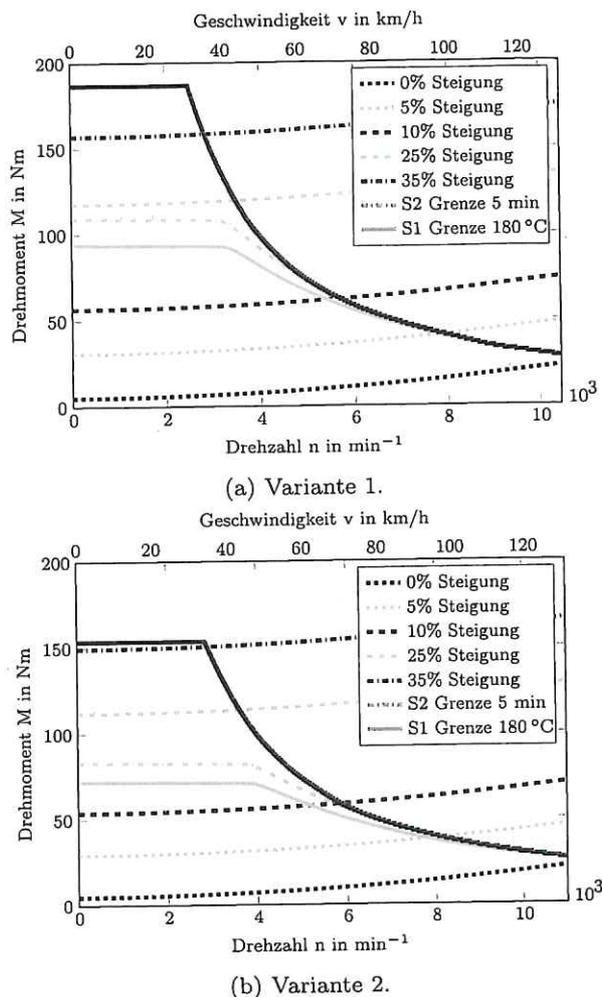
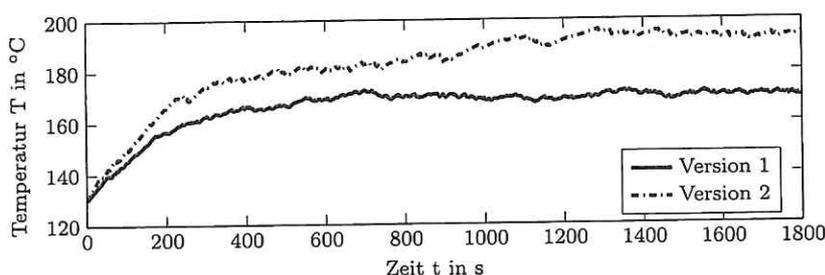
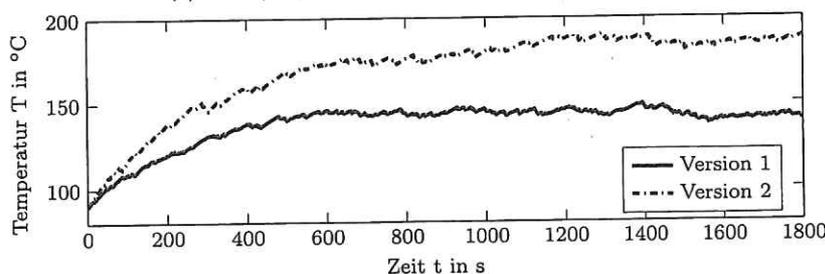
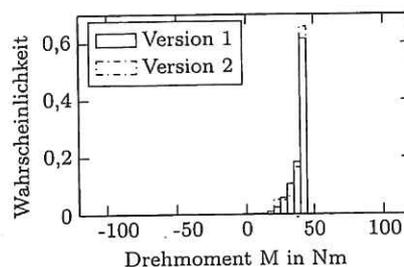


Abb. 14. Betriebsdiagramme für die Maschinen



(a) 91 km/h (V1: 7301 min⁻¹, V2: 7679 min⁻¹), 5% Steigung und 100 °C Kühltemperatur.



(b) 52 km/h (V1: 4172 min⁻¹, V2: 4388 min⁻¹), 10% Steigung und 60 °C Kühltemperatur.

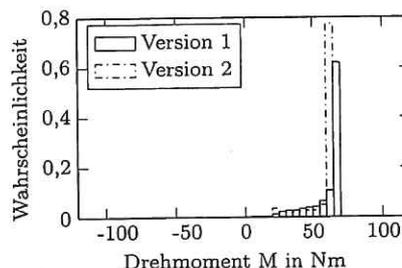


Abb. 15. Temperaturen und die zugehörigen Drehmomentverteilungen für beide Versionen

plarischen Fahrscenarien berechnet werden [23]. Die Wahrscheinlichkeit der zu erwartenden Lebensdauer des Antriebs ergibt sich aus der Häufigkeit der jeweiligen Fahrscenarien, die wiederum stark von der jeweiligen Nutzung und dem Einsatzgebiet abhängig sind. Bei dem hier untersuchten Beispiel eines Kleinstwagens treten je nach Fahrscenario zum Teil vielfach höhere Alterungsgeschwindigkeiten gegenüber der klassischen Auslegung auf. Diese sind in ihrer Häufigkeit jedoch selten, sodass trotz größerer thermischer Ausnutzung und geringerem Materialeinsatz die Gesamtziellebensdauer des Antriebs von 5000 h mit einer hohen Wahrscheinlichkeit erreicht werden kann bzw. überschritten wird.

9. Konklusion

In diesem Beitrag wird eine Methodik vorgestellt mit der die Lebensdauerwahrscheinlichkeit von Elektroisoliersystemen elektrischer Maschinen untersucht werden kann, die in dynamischen Lastkollektiven wie z. B. Traktionsanwendungen eingesetzt werden. Moderne Isoliervstoffe erreichen eine hohe Beständigkeit gegenüber multifaktoriellen Alterungsmechanismen und erlauben hohe Beanspruchungen, die in der Auslegung von elektrischen Maschinen neue Randbedingungen bzw. eine höhere thermische Ausnutzung ermöglichen. Des Weiteren konnte gezeigt werden, dass beschleunigte Alterungsversuche ein zielführendes und notwendiges Verfahren darstellen, um Schwachstellen in Isoliersystemen a priori zu identifizieren. Schließlich konnte am Beispiel eines Kleinstfahrzeugmotors exemplarisch gezeigt werden, wie Lebensdauermodelle bereits in der Auslegung einer elektrischen Maschine berücksichtigt werden können. Bei definierten Anforderungen konnte durch eine Vergrößerung der thermischen Ausnutzung eine signifikante Volumenreduktion um 16,9 % erzielt werden. Diese Gewichtsreduktion macht sich signifikant bei der Fahrzeugreichweite positiv bemerkbar.

Literatur

- Arrhenius, S. (1889): Über die Dissociationswärme und den Einfluss der Temperatur auf den Dissociationsgrad der Elektrolyte, *Z. Phys. Chem.*, 4.
- DIN EN 60505:2012-05 (2012): Bewertung und Kennzeichnung von elektrischen Isoliersystemen. Berlin.
- Montsinger, V. M. (1930): Loading transformers by temperature. *Trans. Am. Inst. Electr. Eng.*, 49(2), 776–790.
- Büssing, W. (1942): Beiträge zum Lebensdauergesetz elektrischer Maschinen. *Arch. Elektrotech.*, 36(12), 735–742.
- Dakin, T. W. (1948): Electrical insulation deterioration treated as a chemical rate phenomenon. *Trans. Am. Inst. Electr. Eng.*, 67(1), 113–122.
- Stone, G. C., Culbert, I., Boulter, E. A., Dhirani, H. (2014): Electrical insulation for rotating machines: design, evaluation, aging, testing, and repair. In IEEE press series on power engineering. Piscataway: IEEE.
- Gjerde, A. C. (1997): Multifactor ageing models—origin and similarities. *IEEE Electr. Insul. Mag.*, 13(1), 6–13.
- Kaufhold, M., Aninger, H., Berth, M., Speck, J., Eberhardt, M. (2000): Electrical stress and failure mechanism of the winding insulation in PWM-inverter-fed low-voltage induction motors. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 47(2), 396–402.
- DIN IEC/TS 61934:2012-09 (2012): Elektrische Isoliervstoffe und -systeme – Elektrische Messung von Teilentladungen (TE) bei sich wiederholenden Spannungsimpulsen mit kurzer Anstiegszeit. Berlin.
- DIN EN 60034-18-21:2013-07 (2013): Drehende elektrische Maschinen – Teil 18-21: Funktionelle Bewertung von Isoliersystemen – Prüfverfahren für Runddrahtwicklungen – Thermische Bewertung und Klassifizierung. Berlin.
- DIN EN 60034-18-31:2013-01 (2013): Drehende elektrische Maschinen – Teil 18-31: Funktionelle Bewertung von Isoliersystemen – Prüfverfahren für Wicklungen mit vorgeformten Elementen – Thermische Bewertung und Klassifizierung. Berlin.
- DIN EN 60034-18-41:2014-11 (2014): Drehende elektrische Maschinen – Teil 18-41: Qualifizierung und Qualitätsprüfungen für teilentladungsfreie elektrische Isoliervsysteme (Typ I) in drehenden elektrischen Maschinen, die von Spannungsumrichtern gespeist werden. Berlin.
- DIN EN 60034-18-42:2016-03 (2016): Drehende elektrische Maschinen – Teil 18-42: Teilentladungsresistente Isoliervsysteme (Typ II) von drehenden elektrischen Maschinen, die von Spannungsumrichtern gespeist werden – Qualifizierungsprüfungen. Berlin.
- DIN EN 60216-2:2006-04 (2006): Elektroisoliervstoffe – Eigenschaften hinsichtlich des thermischen Langzeitverhaltens – Teil 2 Leitfaden zur Bestimmung thermischer Langzeiteigenschaften von Elektroisoliervstoffen – Auswahl der Prüfmerkmale. Berlin.
- Ruf, A., Paustenbach, J., Franck, D., Hameyer, K. (2017): A methodology to identify electrical ageing of winding insulation systems. In International electric machines and drives conference, IEMDC 2017.
- DIN EN 60034-25:2013-04 (2013): Drehende elektrische Maschinen – Teil 25 Wechselstrommaschinen zur Verwendung in Antriebssystemen – Anwendungsleitfaden. Berlin.
- Ermolin, N. P., Zerichin, I. P. (1981): Zuverlässigkeit elektrischer Maschinen. Berlin: VEB Verlag Technik.
- Breuer, S., Rohrbach-Kerl, A. (2015): Fahrzeugdynamik: Mechanik des bewegten Fahrzeugs. ATZ/MTZ-Fachbuch. Wiesbaden: Springer.
- Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen: Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung von Verbrennungsmotoren oder elektrischen Antriebssystemen für den Antrieb von Kraftfahrzeugen der Klassen M und N hinsichtlich der Messung der Nutzleistung und der höchsten 30-Minuten-Leistung elektrischer Antriebssysteme, 7.11.2014.
- Liebl, J., Lederer, M., Rohde-Brandenburger, K., Biermann, J.-W., Roth, M., Schäfer, H. (2014): Energiemanagement im Kraftfahrzeug: Optimierung von CO₂-Emissionen und Verbrauch konventioneller und elektrifizierter Automobile. ATZ/MTZ-Fachbuch. Wiesbaden: Springer.
- Ruf, A., Steentjes, S., Pflingsten, G. v., Grosse, T., Hameyer, K. (2016): Requirements on soft magnetic materials for electric traction motors. In Conf. proc. 7th international conference on magnetism and metallurgy, WMM'16 (pp. 111–128).
- Elfgen, S., Ruf, A., Steentjes, S., Hameyer, K. (2017): Consideration of the manufacturing influence in standardized material characterizations using machine measurements In International electric machines and drives conference, IEMDC 2017. CD-ROM.
- Rothe, R., Hameyer, K. (2011): Life expectancy calculation for electric vehicle traction motors regarding dynamic temperature and driving cycles. In International electric machines and drives conference, IEMDC 2011, Canada.

Autoren



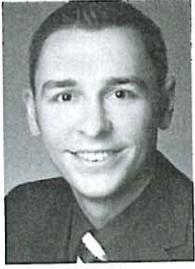
Andreas Ruf

studierte an der Ruhr-Universität Bochum Elektrotechnik und erhielt im August 2012 den Master of Science. Im Anschluss wurde er wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Elektrische Maschinen der RWTH Aachen. Nach seiner Promotion im Januar 2018 tritt er eine Stelle in der Entwicklungsabteilung eines deutschen Automobilkonzerns an. Seine Forschungsschwerpunkte umfassen die Auslegung und Berechnung von elektrischen Maschinen hinsichtlich ihrer thermischen Ausnutzung, Überlastfähigkeit und Zuverlässigkeit.



Florian Pauli

studierte an der RWTH Aachen Elektrotechnik und erhielt im April 2017 den Master of Science. Seit Mai 2017 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Elektrische Maschinen an der RWTH Aachen. Seine Forschungsschwerpunkte sind Isoliervsysteme, Lebensdauermodellierungen, die Auslegung elektrischer Maschinen, sowie die Auswirkungen von Fertigungseinflüssen.

**Michael Schröder**

studierte an der RWTH Aachen Elektrotechnik und schloss im Mai 2012 mit dem Diplom ab. Im Anschluss wurde er wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Elektrische Maschinen der RWTH Aachen. Seit 2014 ist er Gruppenleiter der Gruppe „Analyse und Design“ und seit November 2017 Oberingenieur des Instituts. Seine Forschungsschwerpunkte liegen im Bereich des akustischen und strukturdynamischen Verhaltens elektrischer Maschinen unter dem Einfluss von Fertigungsabweichungen.

**Kay Hameyer**

erhielt sein Diplom in Elektrotechnik von der Universität Hannover und promovierte an der Technischen Universität Berlin. Nach seinem Studium arbeitete er für die Robert Bosch GmbH in Stuttgart als Entwicklungingenieur für permanentmagneterregte Servomotoren und Kraftfahrzeugbordnetzkomponenten. Von 1996 bis 2004 war Dr. Hameyer Professor für Numerische Feldberechnungen

und Elektrische Maschinen an der KU Leuven in Belgien. Seit 2004 ist er Professor und Leiter des Instituts für Elektrische Maschinen der RWTH Aachen. 2006 war er Vizedekan der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der RWTH Aachen und von 2007 bis 2009 Dekan. Seine Forschungsschwerpunkte liegen im Bereich der numerischen Feldberechnung und -optimierung, dem Entwurf und der Regelung elektrischer Maschinen, insbesondere von permanentmagneterregten Maschinen und Asynchronmaschinen. Seit vielen Jahren beschäftigt sich die Arbeit von Dr. Hameyer mit der elektromagnetischen Geräuschanregung elektrischer Maschinen und der Charakterisierung ferromagnetischer Materialien. Er ist Autor von mehr als 250 Journal-Publikationen, mehr als 500 internationalen Konferenzveröffentlichungen und Autor von vier Büchern. Dr. Hameyer ist Mitglied im VDE, IEEE Senior Member und Fellow des IET.