

E-Mobilität - Elektromotorenproduktion

E-Motor-Testing: Neue Produktionsprozesse erfordern neue Prüfverfahren

S. Hartmann

ZUSAMMENFASSUNG Durch die Möglichkeit der Substitution stochastischer Wickel- und Einziehprozesse mit deterministischen Umform- und Montageprozessen hat sich die Hairpin-Technologie als Standard für elektrische Antriebe etabliert. Gleichzeitig charakterisiert die Technologie eine Vielzahl von Produkt- und Prozess-Interdependenzen. Das Einbeziehen dieser Randbedingungen in der Komponenten- und Systemprüfung ist daher unbedingt erforderlich, um eine kosteneffiziente und stabile Produktion zu ermöglichen.

STICHWÖRTER

Fertigungsmesstechnik, Automobilindustrie, Zuliefererindustrie

New Production Processes Require New Methods in E-Motor Testing

ABSTRACT Hairpin technology has established itself as the standard for electric drives due to the possibility of substituting stochastic winding and drawing-in processes with deterministic forming and assembly processes. At the same time, the technology is characterized by numerous product and process interdependencies. It is therefore essential to include these boundary conditions in component and system testing to enable cost-efficient and stable production.

1 Hairpin-Technologie: Disruptive Produkt-Innovation für elektrische Antriebe

Die Transformation der Mobilität gilt als eine wesentliche Säule einer nachhaltigen, klimaneutralen Zukunft und gleichzeitig als eine der zentralen Herausforderungen für die Automobilindustrie [1, 2]. Aus technischer Perspektive steht der Substitution des Verbrennungsmotors durch einen elektrischen Antrieb nichts im Wege, weswegen die technologische, marktwirtschaftliche und auch politische Lösung für die Transformation des Individualverkehrs in der Elektromobilität liegt [3].

Aktuelle Prognosen rechnen für die Zeit bis 2030 mit bis zu acht Millionen elektrischen Fahrzeugen pro Jahr und einem Marktanteil von knapp 60 % für den europäischen Markt. Basierend auf der Annahme von rund 1,45 Traktionsmotoren pro Fahrzeug ergibt sich ein jährlicher Bedarf von 11,6 Millionen Elektromotoren für 2030 in Europa. [4]

Um diesem Marktbedarf einerseits und den etablierten Automotive-Standards andererseits gerecht zu werden, hat in den vergangenen Jahren ein massiver Innovationsschub in der Entwicklung etablierter E-Motor-Topologien stattgefunden. Dabei hat sich insbesondere die flachleiterbasierte Hairpin-Technologie für Statoren elektrischer Traktionsmaschinen am Markt etabliert. Produktseitig ermöglicht die Hairpin-Technologie beispielsweise höhere Füllfaktoren und damit höhere Leistungsichten im Vergleich mit konventionell gewickelten Statoren – mit dem Vorteil einer prozesseitig deterministischen Produktionsprozesskette

[5, 6]. Aus diesen und anderen Gründen wird der Hairpin-Technologie für die kommenden Jahre eine Marktdurchdringung von mehr als 95 % für elektrische Traktionsmaschinen zugesprochen [7, 8].

2 Produkt- und produktionsseitige Herausforderungen

Neben ihren Vorteilen bringt die Hairpin-Technologie verschiedene Herausforderungen mit sich, die im Kontext der Produkt- und der Produktionstechnik zu lösen sind.

- **Produktseitiger Individualisierungsgrad:** Das aktuelle Marktumfeld zeigt eine Vielzahl zueinander variabler, produktseitiger Gestaltungsmerkmale. Mit Blick auf die Produktionssysteme lässt sich daraus die Anforderung an eine hohe Variantenflexibilität ableiten – oder aber die Notwendigkeit der kontinuierlichen Investition zur Befähigung bestehender Maschinen- und Anlagen-Infrastruktur für die Produktion nachfolgender Derivate. Verstärkt wird diese Herausforderung durch die kurzen Innovations- und Iterationszyklen mit entsprechend kurzen Projektlaufzeiten von drei bis fünf Jahren sowie einer ansteigenden Wachstumsprognose für die kommenden Jahre.
- **Disruptives Innovationsfeld:** Trotz der langjährigen Historie elektrischer Antriebe stellen die serielle Produktion und der Einsatz elektrischer Antriebe eine vergleichsweise junge Technologie dar. Bisherige Wickeltechnologien und zugehörige Produktionsprozessketten werden vollständig durch die

Hairpin-Technologie ersetzt. Gleichzeitig kommt es in diesem disruptiven Technologiefeld zu fortschreitenden Entwicklungen und Innovationen. So zeigte sich beispielsweise zur Einführung der ersten Generation von Elektrofahrzeugen ein Spannungsniveau von 400 Volt. Der Bedarf an höheren Ladeleistungen für kürzere Ladezeiten sowie höheren Antriebsleistungen führte zu einem Standard von 800 Volt und mehr, mit steigender Tendenz [9]. Die Folge dieser Entwicklungen sind steigende Anforderungen an das Produkt und die verwendeten Halbzeuge, die wiederum die Anpassung beziehungsweise Entwicklung von Prozesstechnik zur seriellen Verarbeitung erforderlich machen.

- **Produkt-Prozess-Interdependenzen:** Ein großer Vorteil der Hairpin-Technologie liegt in der deterministischen Produktionsprozesskette, die die Realisierung von Automotive-Anforderungen an die Qualität und die Wiederholgenauigkeit des Produktionsprozesses deutlich erleichtert. Damit gehen jedoch zahlreiche werkzeuggebundene Prozesstechnologien entlang der Produktionsprozesskette einher, die hinsichtlich ihrer Wirkweise auf bestimmte Ausprägungen und Wertebereiche von Produkteigenschaften limitiert sind. Eine Anpassung auf variable, produktseitige Gestaltungsmerkmale erfordert hohe Zeit- und Kostenaufwände.

Die skizzierten Herausforderungen der Hairpin-Technologie zeigen sowohl auf der Produkt- als auch auf der Produktionsseite unterschiedliche Handlungsbedarfe auf. Die hohe Abhängigkeit zwischen Produkt und Produktionsprozess erfordert die gegenseitige Abstimmung und Berücksichtigung der entsprechenden Randbedingungen. Fortschreitende Entwicklungen und Innovationen auf Produktebene nehmen einen direkten Einfluss auf das Produktionssystem und beeinflussen wesentlich die Wirtschaftlichkeit und Produktivität. Gleichzeitig erfordert die Vielzahl der produktseitigen Gestaltungsmerkmale, gepaart mit kurzen Iterationszyklen der zu produzierenden Derivate, eine hohe Variantenflexibilität und Robustheit zugehöriger Produktionssysteme. Des Weiteren ergibt sich zur Deckung des prognostizierten Nachfragezuwachses eine generelle Notwendigkeit zum Ausbau der Produktionskapazitäten für elektrische Antriebe. In diesem Spannungsfeld aus wirtschaftlichen und technischen Pull-Faktoren ist es notwendig, die produkt- und prozesseitigen Anforderungen miteinander in Einklang zu bringen, um die erfolgreiche Produktion elektrischer Antriebe sicherzustellen.

3 Spezifikation und Testing in der Stator-Produktion

Der Blick auf den aktuellen Stand der Technik und die industrielle Praxis zum Testing in der Hairpin-Stator-Produktion zeigt unterschiedliche Ansätze in Abhängigkeit von der Position in der Lieferkette.

- Motorproduzenten verfolgen – auf Basis vorhandener Normen und Standards der Automobilindustrie – den Ansatz zunehmend engerer Spezifikationen der eingesetzten Halbzeuge. Vor dem Hintergrund der Anwendung elektrischer Antriebe als Traktionsmotoren in Fahrzeugen bilden diese Normen jedoch lediglich den kleinsten gemeinsamen Nenner und berücksichtigen die eigentliche Anwendung und zugehörigen Verarbeitungsprozesse nicht.
- Komponentenhersteller sind getrieben von der aktuellen und prognostizierten Marktsituation und versuchen daher

einerseits, die Fertigungskapazitäten zu erhöhen, und andererseits, die Produkteigenschaften hinsichtlich bestehender Innovationen und Trends zu optimieren. Der Schwerpunkt liegt dabei vor allem auf den elektrischen Eigenschaften, nicht jedoch auf den mechanischen Anforderungen, die aus der Hairpin-Stator-Prozesskette resultieren.

- Maschinen- und Anlagenbauer orientieren sich am Zielbild eines möglichst effizienten und zuverlässigen Produktionssystems. Der Fokus liegt daher auf der Optimierung der Prozesstechnologien zur Steigerung der Gesamtproduktivität und auf der Reduktion von Ausschuss. Aufgrund der charakteristischen Interdependenzen zwischen Material und Prozess können diese Optimierungen jedoch nur teilweise ausgenutzt werden.

Die derzeit einseitige Fokussierung der Spezifikation und des Testings in der Stator-Produktion auf die produktseitigen Eigenschaften resultiert in langen Anlauf- und Wiederanlaufzeiten sowie hohen Kosten durch die Produktion von Ausschuss und den Aufbau von Know-how zur Berücksichtigung der halbzeuginhärenten Eigenschaftsschwankungen. Zur Befähigung einer wirtschaftlichen, seriellen Produktion elektrischer Antriebe ist es daher notwendig, die Anforderungen der produktionstechnischen Anwendung in Bezug auf das Testing und die daraus resultierenden Spezifikationen einzubeziehen. Damit wird die langfristige Möglichkeit der standardisierten, kontinuierlichen Prüfung der Halbzeug-Eigenschaften unter Berücksichtigung aller relevanten Rahmenbedingungen und Einflussfaktoren aus Produkt- und Prozessperspektive geschaffen.

4 Wirtschaftliche Produktion durch anwendungsspezifisches Testing

In einem fortschreitenden, disruptiven Technologie-Umfeld mit zunehmender Komplexität und Innovationskraft lassen sich die Anforderungen an elektrische Antriebe in einem Zieldreieck aus Leistung, Kosten und Nachhaltigkeit darstellen [10]. Dabei bildet vor allem das Isolationssystem als Kernkomponente im elektrischen Antrieb eine Basis zur Erfüllung dieser Anforderungen.

Die grundlegende Funktion des elektrischen Antriebs liegt in der Umwandlung elektrischer in mechanische Leistung in Form von Drehzahl und Drehmoment [11]. Bei dieser Umwandlung kommt es innerhalb der Antriebseinheit zu Kupfer- und Eisen- sowie Reibungs- und sonstigen Verlusten [12]. Das Verhältnis der nutzbaren mechanischen Energie abzüglich der Verluste zur eingebrachten elektrischen Energie entspricht dem Wirkungsgrad der elektrischen Maschine und beschreibt damit die Effizienz [11, 12]. Mit Blick auf die grundsätzlichen Funktionen und Aufgaben der Isolation lassen sich drei Punkte definieren.

- **Trennung elektrischer Potenziale:** Isolation der stromführenden Komponenten (beispielsweise Kupferleiter) gegenüber den geerdeten Komponenten (zum Beispiel Stator-Blechpaket)
- **Ableitung von Verlustwärme:** Effektive Ableitung der entstehenden Verlustwärme von den stromführenden Komponenten zur Vermeidung einer Überhitzung, Beschädigung und vorzeitigen Alterung
- **Mechanische Fixierung und Schutz:** Mechanische Fixierung der stromführenden Komponenten in der Gesamtbaugruppe sowie Schutz vor ambienten Belastungen
- **Aufbau des Isolationssystems**

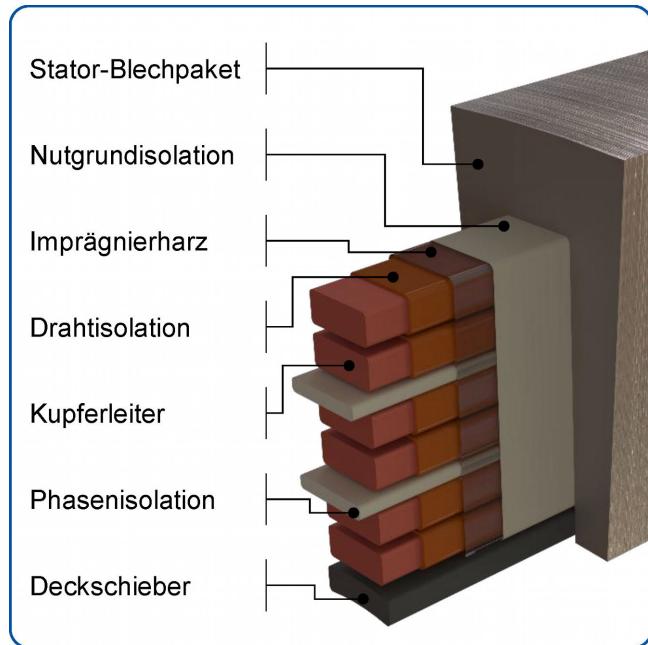


Bild 1. Generischer Aufbau des Stator-Isolationssystems.
Grafik: PEM RWTH Aachen

Das Isolationssystem übt einen maßgeblichen Einfluss auf die Effizienz, die Leistungsfähigkeit und die Lebensdauer des elektrischen Antriebs aus und erfordert daher eine der Anwendung gerechten Auslegung [13]. Des Weiteren können der Aufbau des Isolationssystems und die Art der verwendeten Materialien wesentlichen Einfluss auf die Kosten und die Nachhaltigkeit nehmen.

In **Bild 1** ist der generische Aufbau eines Stator-Isolationssystems dargestellt. In Abhängigkeit von Konzept und Anwendung besteht das System aus bis zu fünf unterschiedlichen Elementen. Das erste Element bildet die Isolation der stromführenden Komponente, des Kupferdrahts, mit der Aufgabe der individuellen Isolation der einzelnen Kupferdrähte beziehungsweise Flachleiterstäbe innerhalb eines Leiterbündels oder einer Wicklung voneinander. Die Leiter sind im Stator-Blechpaket fixiert. Zur Trennung des geerdeten Stator-Blechpaketes von der Wicklung kommt die sogenannte Nutgrundisolation als zweites Element zum Einsatz. Das dritte Element bildet die Imprägnierung, beispielsweise in Form eines Harzes, das die Lufträume innerhalb der Stator-Nut ausfüllt und damit einerseits die mechanische Fixierung der Wicklung sicherstellt und andererseits zur Optimierung der Wärmeleit- und der Isolationseigenschaften des Isolationssystems dient. [13, 14]

Diese Elemente bilden den Grundaufbau des Stator-Isolationssystems elektrischer Antriebe. Bestehende und zukünftige Innovationen bieten das Potenzial, mehrere Funktionen in einem Element abzubilden oder auch einzelne Elemente vollständig entfallen zu lassen [13]. Ergänzend zum Grundaufbau existieren weitere Elemente des Isolationssystems, deren Einsatz auf bestimmte Stator-Topologien und Produktdesigns begrenzt ist. Weist das Stator-Blechpaket eine offene Nutgeometrie auf (beispielsweise beim Einsatz der Continuous-Hairpin-Technologie), ist der Einsatz von Deckschiebern notwendig. Ihnen kommt die Aufgabe der mechanischen Fixierung der Wicklung in der Nut bei gleichzeitigem Verschluss der offenen oder halb offenen Stator-

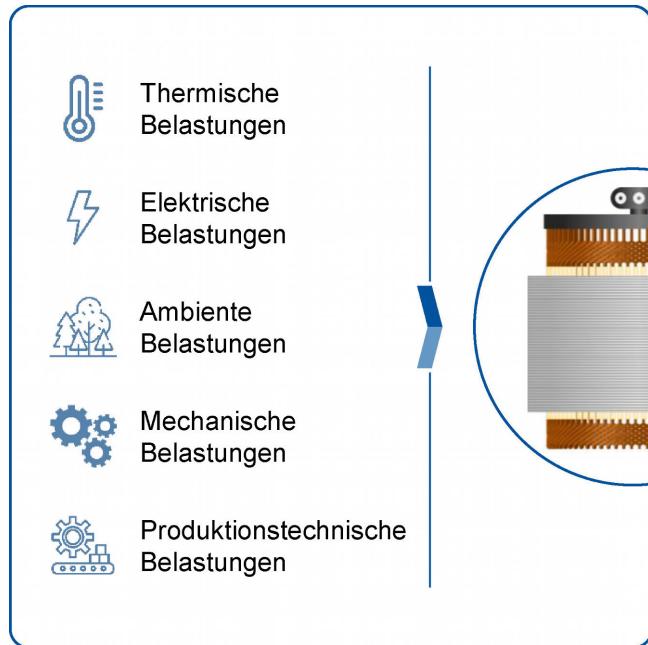


Bild 2. Belastungsarten im elektrischen Antrieb. Grafik: PEM RWTH Aachen

Nut zu [14]. Werden innerhalb einer Nut mehrere Phasenstränge geführt, ist außerdem der Einsatz einer Phase-zu-Phase-Isolation notwendig [14].

5 Anforderungen an das Isolationssystem

Die Anforderungen an das Stator-Isolationssystem begründen sich aus den unterschiedlichen Belastungen, denen der Stator beziehungsweise der Motor unterliegt. Sie lassen sich in den sogenannten TEAM-Belastungen zusammenfassen. [15] (**Bild 2**)

- **Thermische Belastungen:** Die thermische Belastung der Isolationssystem-Komponenten resultiert aus der Bestromung der Wicklung im entsprechenden Betriebsprofil. Thermische Belastungen aus der Betriebstemperatur tragen wesentlich zu Alterungserscheinungen der Komponenten des Isolationssystems bei.
- **Elektrische Belastungen:** Mit zunehmenden Spannungsniveaus steigt auch die Wahrscheinlichkeit schädlicher Teilentladungen. Außerdem wird bei sehr hohen Spannungen der Isolator selbst zum Leiter.
- **Ambiente Belastungen:** Belastungen aus der Umgebung, beispielsweise hohe Schwankungen der Temperatur und der Feuchtigkeit, können in Abhängigkeit von der Intensität und Dauer der Exposition erheblichen Einfluss auf die Lebensdauer des Isolationssystems nehmen.
- **Mechanische Belastungen:** Mechanische Einflüsse durch den Betrieb der Maschine, beispielsweise Vibrationen und Reibung, tragen zu einer Schwächung und langfristigen Schädigung des Isolationssystems bei.

Die Aufgabe des Isolationssystems besteht im Schutz der funktionalen Komponenten vor inneren und äußeren Belastungen und muss robust gegen sie ausgelegt sein. Die Belastungen selbst bewirken eine beschleunigte Alterung der Isolationssystem-Komponenten und erhöhen damit die Gefahr des lokalen und globalen

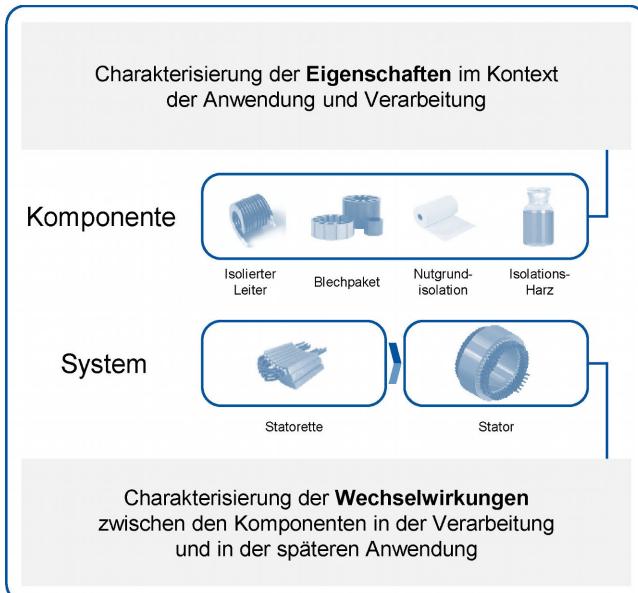


Bild 3. Darstellung der unterschiedlichen Betrachtungsebenen und Zielsetzungen der anwendungsorientierten Prüfung. *Grafik: PEM RWTH Aachen*

Versagens der Isolation. Im Kontext der Hairpin-Stator-Technologie ist zudem eine weitere Belastungsart zu berücksichtigen.

- Produktionstechnische Belastung: Die Hairpin-Technologie ist durch eine besonders hohe Interdependenz zwischen Prozess und Material gekennzeichnet [16, 17]. Dadurch kommt es im Produktionsprozess zu einer wesentlichen Beanspruchung der Materialien und zu einer teilweisen Änderung der Materialeigenschaften [18]. Die Berücksichtigung produktionstechnischer Belastungen im Kontext der Prüfung und Spezifikation der eingesetzten Materialien ist daher obligatorisch.

6 Betrachtungsebenen der anwendungsorientierten Prüfung

Der Aufbau des Stator-Isolationssystems erlaubt die Prüfung der Eigenschaften vor dem Hintergrund der Belastungsarten auf unterschiedlichen Betrachtungsebenen, **Bild 3**. Die erste Ebene beschreibt die Prüfung der zentralen Einzelkomponenten,

beispielsweise des isolierten Kupferdrahts oder der Nutgrundisolation. Die Komponentenprüfung verfolgt das Ziel, die Eigenschaften der einzelnen Bestandteile im Kontext der Verarbeitung und Anwendung über den aktuellen, normativen Rahmen hinaus zu charakterisieren. Die zweite Ebene beschreibt die Prüfung des vollständigen Stator-Isolationssystems. Zweck der Systemprüfung ist die Identifikation von Wechselwirkungen zwischen den Einzelkomponenten, ebenfalls im Kontext der Verarbeitung sowie des späteren Betriebs der elektrischen Maschine.

7 Prüfung von Komponenten am Beispiel von Kupferdraht

Als stromführende Komponente stellt der isolierte Kupferdraht ein zentrales Element im elektrischen Antrieb dar. Dabei fungiert die Drahtisolation als erste wirksame Isolationsschicht innerhalb des elektrischen Antriebs. Die anwendungsorientierte Spezifikation und die Prüfung des isolierten Kupferdrahts sind daher zwingend notwendig, um den langfristigen Betrieb des Elektromotors sicherzustellen [15]. Die Anforderungen an die anwendungsorientierte Prüfung des Kupferdrahts leiten sich aus den komponentenspezifischen Fehlerbildern ab. Dabei werden vier Eigenschaften beziehungsweise Fehlerbilder unterschieden, **Bild 4**.

- Rückstandsfreies Entfernen der Drahtisolation: Innerhalb der Hairpin-Stator-Prozesskette ist es erforderlich, die Drahtisolation partiell zu entfernen, um anschließend die zugehörigen Leiterenden miteinander kontaktieren zu können. Der Prozess des Kontaktierens selbst zählt zu den wesentlichen Produzenten von Ausschuss, teilweise hervorgerufen von Isolationsrückständen in den abisolierten Bereichen.
- Ablösen der Isolation: In der Hairpin-Stator-Prozesskette unterliegt der Kupferdraht einer Reihe von Biege-Operationen, die zu einem Ablösen der Drahtisolation vom Kupferkern führen können, bedingt durch eine mangelnde Haftkraft. Dabei ist vor allem der Übergangsbereich zur abisolierten Zone gefährdet.
- Dicke der Drahtisolation nach hoher Umformung: Die Biege-Operationen bedingen teilweise hohe Umformgrade der ursprünglichen Drahtgeometrie mit entsprechender Belastung der Isolationsschicht. Infolgedessen kann es zu einer lokalen

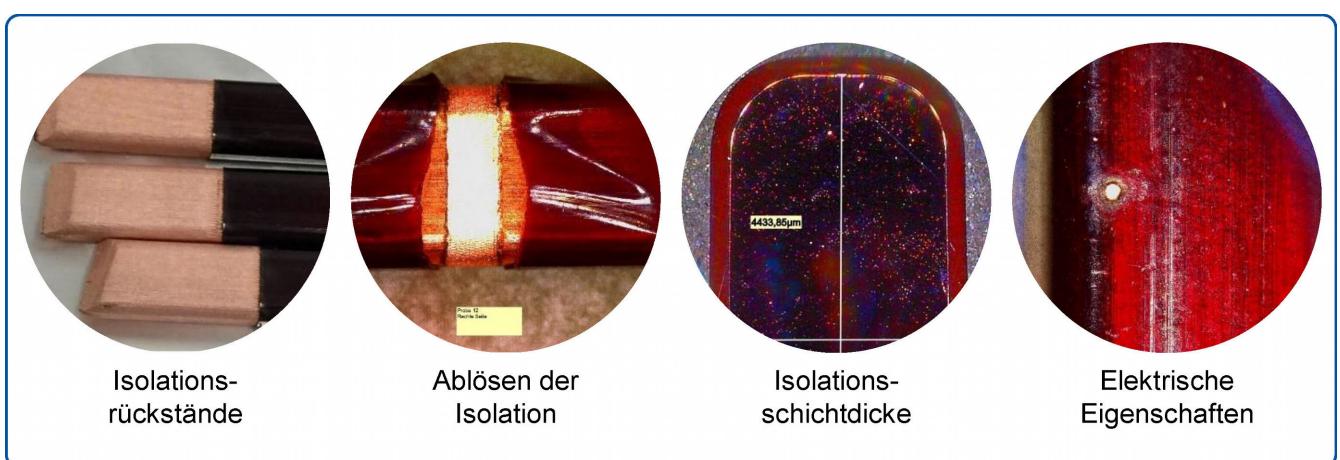


Bild 4. Drahtspezifische Fehlerbilder und Eigenschaften. *Grafik: PEM RWTH Aachen*

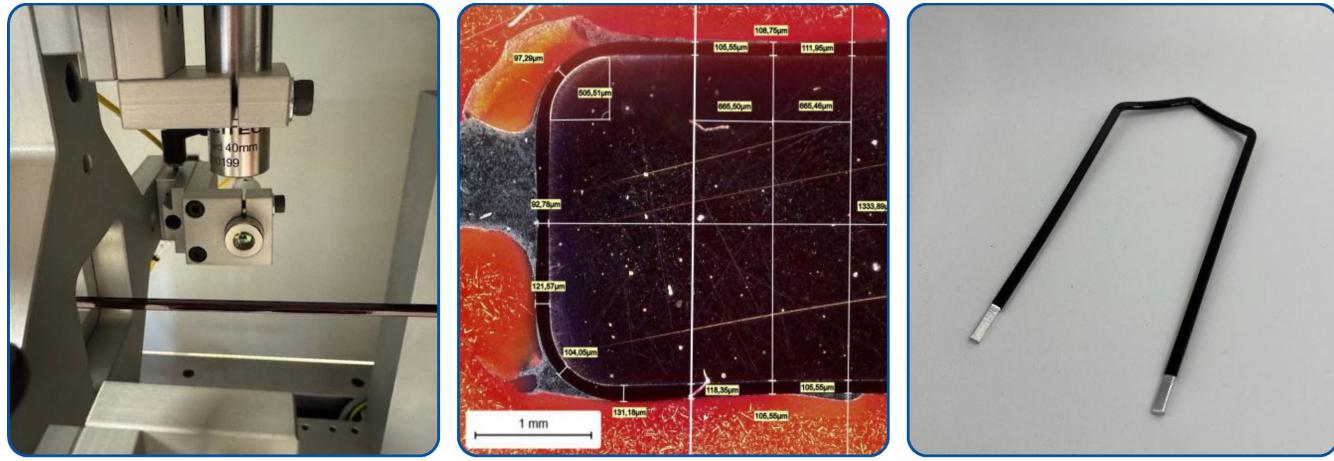


Bild 5. Vorgehen zur Messung der Isolationsschichtdicke (links) und zur Geometriemessung (Mitte) sowie Bestimmung der Umformfähigkeit (rechts).
Grafik: PEM RWTH Aachen

Aufdickung beziehungsweise Verdünnung der Isolationsschicht kommen.

- Elektrische Materialeigenschaften: Die Optimierung der elektrischen Materialeigenschaften ist ein zentraler Hebel gegen elektrischen Durchschlag und das Auftreten von Teilentladungen.

Ausgehend von diesen Fehlerbildern setzt sich die Vorgehensweise zur anwendungsorientierten Drahtprüfung zusammen, übergeordnet in die Charakterisierung der geometrischen Eigenarten, der mechanischen Eigenschaften und der elektrischen Eigenarten gegliedert.

8 Charakterisierung der geometrischen Drahteigenschaften

Die Charakterisierung der geometrischen Drahteigenschaften setzt sich aus drei untergeordneten Testverfahren zusammen.

- Messung der Isolationsschichtdicke: Das Messverfahren wird mithilfe eines Schichtdickenmessgeräts realisiert. Es quantifiziert die Dicke der Isolationsschicht über die Drahtlänge hinweg sowie die generelle Außengeometrie und Form, **Bild 5**.
- Diskrete Geometriemessung: Beschreibt die mikroskopische Analyse des Drahtquerschnitts hinsichtlich der Geometrie des Drahtkerns und der Verteilung der Isolationsschicht. (Bild 5)
- Bestimmung der Umformfähigkeit: Herstellung spezifischer Leiter-Geometrien durch spezifisches Umformen des Kupferdrahts analog zum Produktionsprozess. Mittels anschließender Analyse hinsichtlich Rissen an den Biegeradien erfolgt die Analyse der Umformfähigkeit. (Bild 5)

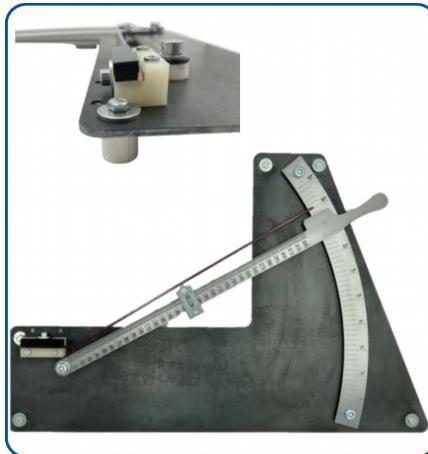
9 Charakterisierung der mechanischen Drahteigenschaften

Die Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften setzt sich aus fünf untergeordneten Testverfahren zusammen. Die ersten drei sind auf Basis des normativen Rahmens der DIN EN ISO 603170 und 60851 festgelegt, die die Eigenschaften zur Spezifikation der technischen Lieferbedingungen für isolierte

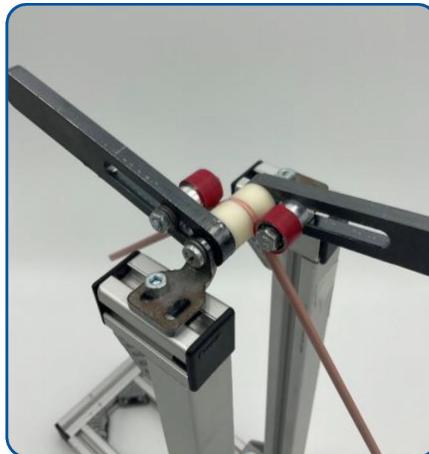
Lackdrähte aus Kupfer beschreibt. DIN EN ISO 60851 Teil 1 – 6 greift die zugehörigen Prüfverfahren auf.

- Messung des Rückfederungsverhaltens: Die Messung der Rückfederung dient zur Quantifikation der geometrischen Änderung nach erfolgter Biege-Umformung des Kupferdrahtes. Da die Rückfederung gewissen Schwankungen unterliegt, muss ihre erlaubte Abweichung gemäß der Norm innerhalb von fünf Grad liegen. Die Rückfederung bildet ein entscheidendes Kriterium zur Realisierung prozesssicherer und wiederholgenauer Biege-Operationen (Hairpin-Herstellung und Schränken). Der Aufbau zur Prüfung, die Probenvorbereitung sowie die Vorgehensweise sind in den genannten Normen festgelegt, **Bild 6**.
- Flexibilität der Drahtisolation: Die Zielsetzung des Prüfverfahrens besteht in der Ermittlung des kleinstmöglichen Biegeradius, bis zu dem die Drahtisolation keine Risse aufweist. Als Prüfkriterium kommt dabei ein Dorn zum Einsatz, der den entsprechenden Biegeradius abbildet. Produktseitig werden dabei die Randbedingungen geringer Wickelkopfhöhen im Stator simuliert. Diese erfordern kleine Biegeradien bei der Hairpin-Herstellung, die wiederum die Isolationsschicht des Drahts auf besondere Weise belasten und zur Rissbildung führen können. Der normierte Aufbau zur Umsetzung der Prüfung ist in Bild 6 dargestellt.
- Anhaftung der Drahtisolation: Zur Prüfung der Haftkraft der Drahtisolation wird der Draht an einer spezifischen Position quer eingeschnitten, bis zum Kupferkern. Anschließend erfolgt ein Zugversuch, bei dem der Draht um 15 % gedehnt wird. Abschließend wird der Draht auf Ablösungserscheinungen der Isolationsschicht hin untersucht. Damit sollen ebenfalls Umformoperationen im Zuge der Hairpin-Stator-Prozesskette simuliert werden – mit einem besonderen Fokus auf den Übergang zwischen dem isolierten und dem abisolierten Drahtbereich. Die Isolation muss den wirkenden Umformkräften widerstehen, um eine prozesssichere Produktion sicherzustellen. (Bild 6)

Über das normierte Prozedere hinaus kommen zwei weitere Testverfahren zum Einsatz, um die anwendungsspezifischen Rahmenbedingungen abzubilden.



Messung des Rückfederungsverhaltens

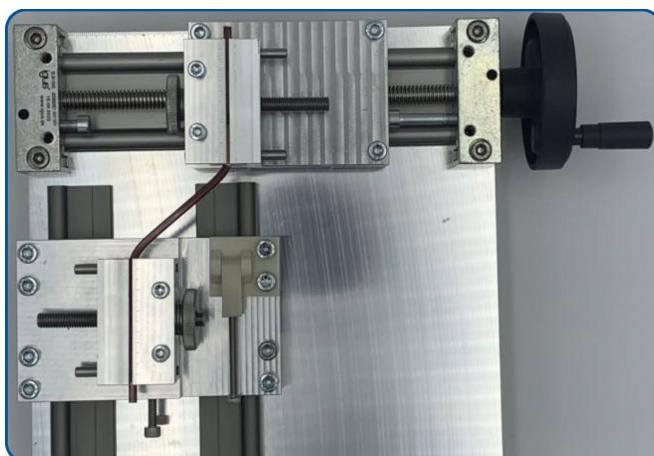


Flexibilität der Drahtisolation



Anhaftung der Drahtisolation

Bild 6. Aufbau zur Messung des Rückfederungsverhaltens (links), der Flexibilität der Drahtisolation (Mitte) und der Anhaftung der Drahtisolation (rechts). *Grafik: PEM RWTH Aachen*



Messung der Eigenschaften im Schränkprozess



Messung der Anhaftung der Imprägnierung

Bild 7. Vorgehen zur Bestimmung der Eigenschaften im Schränkprozess (links) und der Anhaftung der Imprägnierung (rechts). *Grafik: PEM RWTH Aachen*

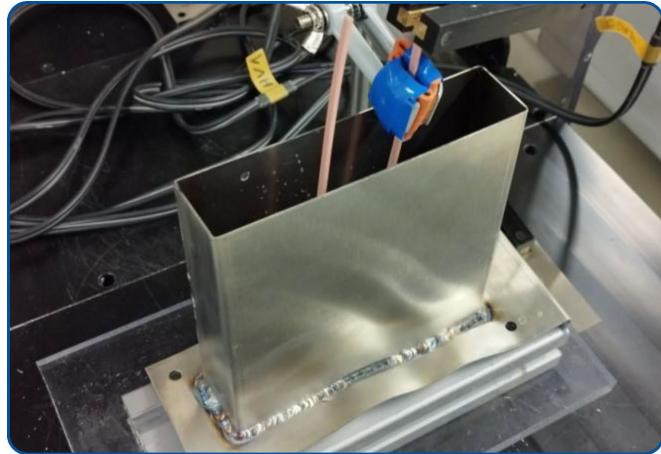
- Eigenschaften im Schränkprozess: Die Ermittlung des Drahtverhaltens im Prozessschritt des Schräenkens erfolgt mittels einer speziell entwickelten Vorrichtung, **Bild 7**. Sie ermöglicht eine analoge Umformung des Drahts zum Schränkprozess und soll die Robustheit des Isolationssystems gegenüber mechanischer Belastung, insbesondere im Biegeprozess, identifizieren. Zugleich lässt sich der maximale Umformgrad ermitteln, bis zu dem keine Delamination der Isolationsschicht auftritt. Der Testaufbau und die Umsetzung sind nicht im normativen Rahmen standardisiert spezifiziert.
- Anhaftung der Imprägnierung: Dieses Testverfahren ist ebenfalls nicht standardisiert und in den genannten Normen beschrieben. Das Ziel besteht in der Identifikation der Haftkräfte zwischen Drahtisolation und Imprägnierharz. Das ist notwendig, um die mechanische Integrität der Wicklung im Betrieb sowie die korrekte Funktionsweise des Isolationssystems sicherzustellen. Im ersten Schritt des Prüfverfahrens werden Probenkörper hergestellt, die in einem spezifischen Bereich mit Imprägnierharz versehen sind. Diese Probenkörper werden an-

schließend in einem Zugversuch auseinandergezogen, um die Haftkräfte zu ermitteln. Probenvorbereitung und Prüfvorgang sind standardisiert und ermöglichen dadurch beispielsweise die schnelle Identifikation der chemischen Kompatibilität zwischen Drahtisolation und Imprägniermaterial. (Bild 7)

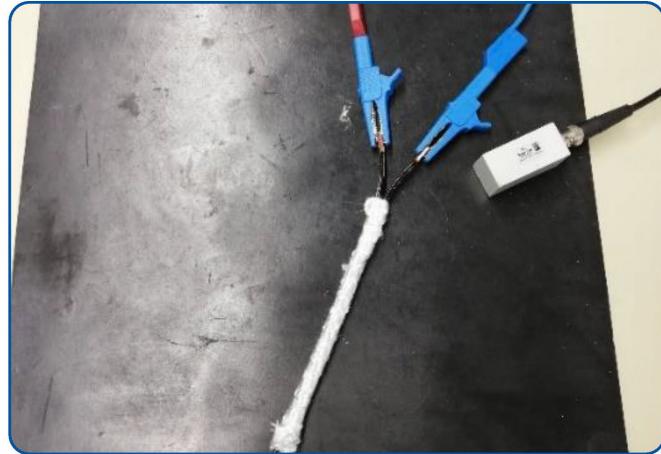
10 Charakterisierung der elektrischen Drahteigenschaften

Zur Charakterisierung der elektrischen Eigenschaften kommen zwei untergeordnete Testverfahren zur Anwendung.

- Wasserbadtest: Das Prüfverfahren dient der Identifikation des elektrischen Widerstands der Drahtisolation gegen elektrischen Durchschlag. Gemäß den normativen Vorgaben kann die Prüfung sowohl im ionisierten Wasserbad als auch mittels metallischer Kugeln erfolgen [18]. Die Prüfung im Wasserbad erzeugt eine höhere Belastung der Isolation. Als Prüfkörper kommt ein umgeformtes Drahtstück zum Einsatz, um die Einflüsse der mechanischen Belastung auf die Isolationsschicht während des



Prüfaufbau zum Wasserbadtest



Messung der Teilentladung

Bild 8. Aufbau zum Wasserbadtest (links) und zur Teilentladungsmessung (rechts). Grafik: PEM RWTH Aachen

Produktionsprozesses hinsichtlich der elektrischen Eigenschaften zu berücksichtigen. Als Prüfkriterium fungiert die Durchschlagsspannung, die die elektrische Spannung beschreibt, bei der ein Versagen des Isolationssystems auftritt. Für die Prüfung wird eine Spannung zwischen dem Wasserbad und dem Prüfkörper angelegt und schrittweise erhöht, bis ein elektrischer Durchschlag eintritt oder der gewünschte Grenzwert erreicht ist, **Bild 8**.

- Teilentladungsmessung: Aufbau und Umsetzung der Teilentladungsmessung sind ebenfalls im normativen Rahmen festgelegt. Die Probe besteht aus zwei verdrillten Drahtstücken, die nach außen hin zusätzlich isoliert werden. Durch den Probenaufbau sollen die Einflüsse auf das Teilentladungsverhalten durch die Umformprozesse berücksichtigt werden. Für die Durchführung wird eine Spannung zwischen den beiden Leitern angelegt und schrittweise gesteigert, bis es zum Eintritt eines Teilentladungsereignisses kommt [19], Bild 8. Grundsätzlich lässt sich die Teilentladungsmessung mittels Gleich- und Wechselstrom-Beaufschlagung ermitteln. Da die hier betrachteten elektrische Antriebe jedoch mit Wechselstrom betrieben werden, empfiehlt sich die Messung zur Berücksichtigung der anwendungsspezifischen Rahmenbedingungen auch mit Wechselstrom.

11 Anwendungsorientierte Systemprüfung

Die anwendungsorientierte Systemprüfung beschreibt die Identifikation der elektrischen, thermischen und mechanischen Eigenschaften von vollständigen Stator-Isolationssystemen unter Berücksichtigung der Interaktionen zwischen den Einzelementen. Das Ziel liegt dabei in der möglichst exakten Abbildung der in der Stator-Baugruppe vorherrschenden Randbedingungen.

12 Abstrahierter „Statorette“-Prüfkörper

Zur Identifikation der Eigenschaften des Stator-Isolationssystems hat sich der Aufbau eines abstrahierten Prüfkörpers bewährt [20, 21]. Dabei werden die wesentlichen Eigenschaften und Randbedingungen der Stator-Baugruppe hinsichtlich der thermischen, elektrischen und mechanischen Prüfung (beispielsweise Grad der Umformung, Luftspalte und Kriechstrecken) in einem

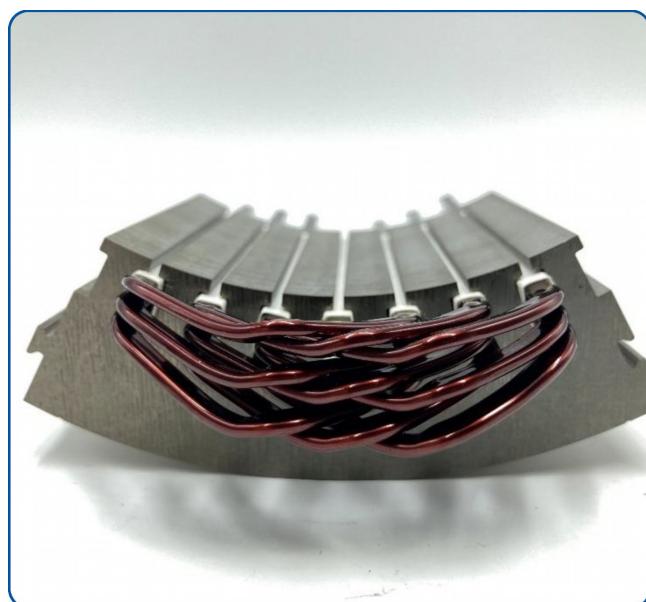


Bild 9. Abstrahierter „Statorette“-Prüfkörper zur anwendungsorientierten Systemprüfung. Grafik: PEM RWTH Aachen

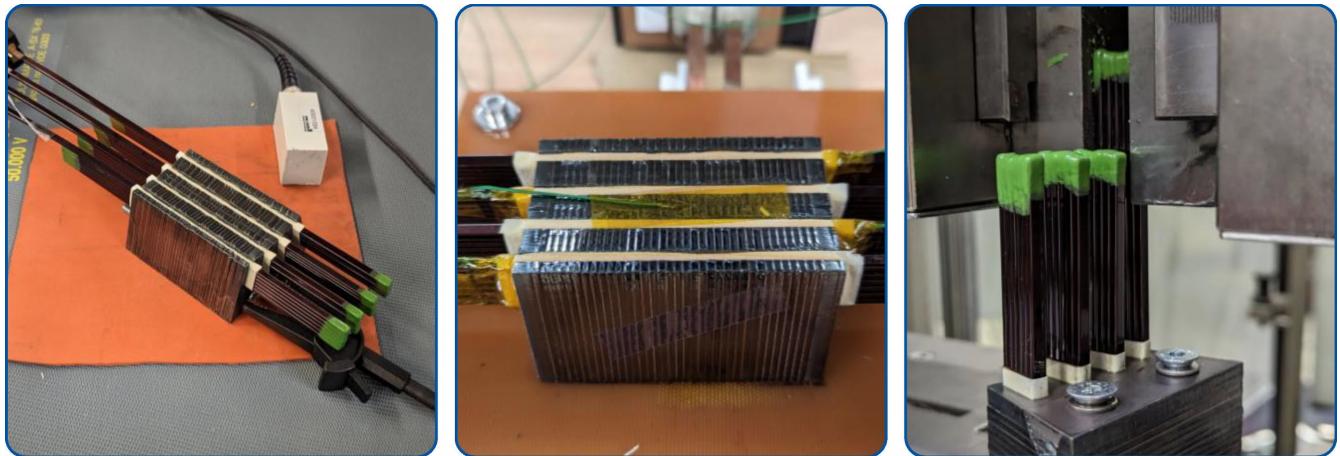
kompakten Design berücksichtigt, das sich möglichst flexibel auf unterschiedliche Stator-Topologien und Isolationssystem-Konfigurationen anpassen lässt.

Bild 9 zeigt das Design eines solchen abstrahierten Prüfkörpers, einer „Statorette“, entwickelt vom Lehrstuhl Production Engineering of E-Mobility Components (PEM) der RWTH Aachen. Der Aufbau basiert auf einem einzelnen Blechpaket-Segment, das mit Blick auf die Nutgeometrie, die verwendeten Materialien und die Fertigungs- sowie Montageprinzipien identisch zu einem vollwertigen Stator-Blechpaket ausgeführt ist. Dadurch lassen sich alle wesentlichen Merkmale des Isolationssystems in diesem Prüfkörper abbilden. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, mehrere Segmente zu einem vollständigen Ring zusammenzusetzen und dadurch für den Aufbau und die Vorbereitung der Prüfkörperprozesse und Fertigungsverfahren zu verwenden, die denen eines vollwertigen Stators entsprechen.

Eigenschaft	Belastung/Alterungseffekt		
	Thermisch	Elektrisch	Chemisch
Teilentladung	✓	✓	✓
Durchschlagsfestigkeit	✓	✓	✓
Thermische Eigenschaften	✓	✓	✓
Haftung	✓	✓	✓

Neben der **singulären Applikation** von Belastungen/Alterungseffekten besteht die Möglichkeit zur **Kombination dieser Effekte**.

Bild 10. Möglichkeiten zur Überlagerung der Prüfprozesse mit Alterungs- und Belastungseffekten. Grafik: PEM RWTH Aachen



Aufbau zur elektrischen Systemprüfung

Aufbau zur thermischen Systemprüfung

Aufbau zur mechanischen Systemprüfung

Bild 11. Verfahren zur elektrischen, thermischen und mechanischen Systemprüfung. Grafik: PEM RWTH Aachen

Die Verwendung einer Statorette zur Erprobung des Stator-Isolationssystems stellt damit eine kosteneffiziente, schnelle und wiederholgenaue Möglichkeit dar, die Eigenschaften unterschiedlicher Isolationssysteme zu ermitteln und einander gegenüberzustellen.

13 Verfahren zur anwendungsorientierten Systemprüfung

Das Prozedere zur Identifikation der Isolationssystem-Eigenschaften lässt sich in elektrische, thermische und mechanische Prüfverfahren aufteilen. Die elektrischen Eigenschaften werden mithilfe einer Teilentladungs-Messung und einer Messung der Durchschlagsfestigkeit ermittelt. Die thermischen Eigenschaften werden durch die Messung der thermischen Leitfähigkeit und die mechanischen Eigenschaften durch die Messung der mechanischen Integrität der Komponenten im Stator-Blechpaket bestimmt. Zur Berücksichtigung der betriebsspezifischen Belas-

tungen können die Proben außerdem Alterungseffekte und Belastungen ausgesetzt werden, beispielsweise in Form von thermischer und elektrischer Alterung sowie chemischer Belastung durch Kühlflüssigkeiten. (Bild 10) Während die Messung und Analyse der entsprechenden Eigenschaften gemäß dem normativen Rahmen erfolgen, wurden die spezifischen Prüfaufbauten individuell für den Anwendungsfall der Statorettentestungsweise Hairpin-Stator Prüfung entwickelt.

- Prüfung der elektrischen Eigenschaften: Die Prüfung der elektrischen Eigenschaften des Isolationssystems erfolgt mittels Teilentladungs- und Durchschlagfestigkeitsmessung. (Bild 11) Zur Messung der Teilentladung wird grundsätzlich zwischen Online- und Offline-Messmethoden unterschieden. Die Online-Messung erlaubt zwar, das Teilentladungsverhalten unter realen Bedingungen über einen längeren Zeitraum hinweg zu bestimmen, jedoch ergibt sich ein höheres Rauschen in den Messwerten und die Notwendigkeit langwieriger Alterungsprozesse, bis Teilentladungen überhaupt auftreten.

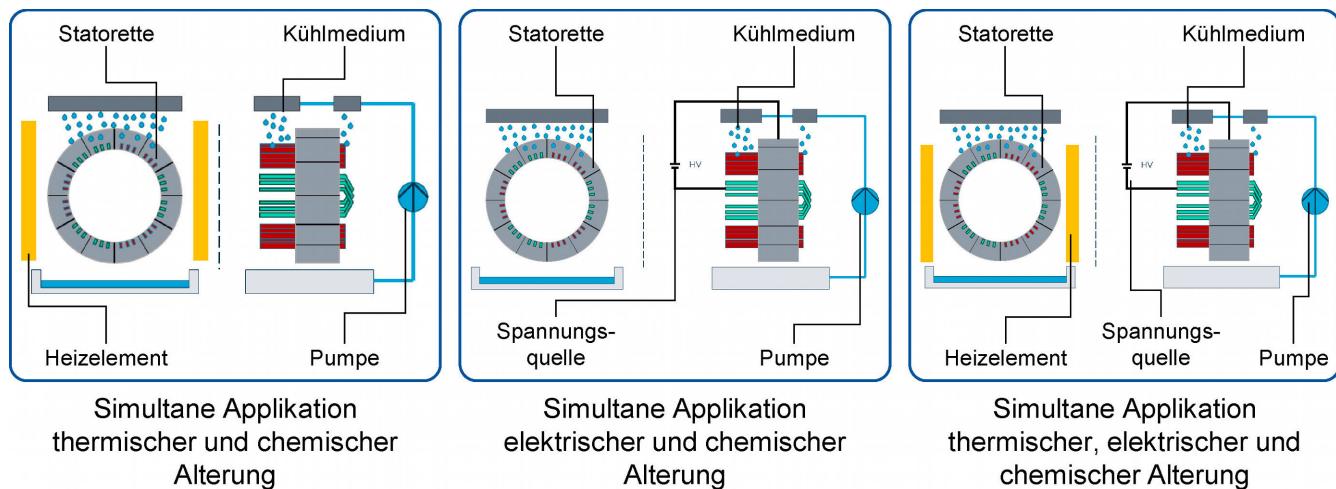


Bild 12. Schematische Übersicht zur Applikation von Alterungseffekten. *Grafik: PEM RWTH Aachen*

Die Offline-Messung wird hingegen unabhängig vom Betrieb mit Hilfe von Prüfkörpern vorgenommen und bietet den Vorteil, die Zuverlässigkeit des Isolationssystems unabhängig vom Alterungszustand zu bestimmen, indem die Spannung zum Teilentladungseintritt (PDIV) ermittelt wird [18, 19]. Die Messung der Durchschlagsfestigkeit des Isolationssystems erfolgt durch das Anlegen einer steigenden elektrischen Spannung bis zu einem Durchschlagsereignis, einem Lichtbogen oder der Bildung von Funken. Die Durchschlagsfestigkeit dient damit als Indikator dafür, bis zu welcher elektrischen Feldstärke die isolierenden Eigenschaften des Isolationssystems erhalten bleiben [18, 19, 22].

- Prüfung der thermischen Eigenschaften: Für die Messung der thermischen Eigenschaften werden die Probenkörper an den relevanten Komponenten des Isolationssystems zunächst mit Temperatursensoren ausgestattet. Anschließend durchlaufen die Probenkörper kontrollierte Erwärmungszyklen unter konstanter Auswertung der Temperatursensoren.

- Prüfung der mechanischen Eigenschaften: Die Ermittlung der mechanischen Eigenschaften des Isolationssystems erfolgt mit Hilfe eines Zugversuchs. Dabei wird die Wicklung in der Prüfmaschine fixiert und eine zunehmende Zugkraft appliziert. Auf diese Weise kann entweder hinsichtlich einer vordefinierten Maximalkraft geprüft werden oder bis zum Versagen des Probenkörpers durch ein Herausziehen der Wicklung.

Bei sämtlichen Prüfverfahren besteht die Möglichkeit einer Überlagerung mit anwendungsbedingten Belastungen und Alterungseffekten, um den Zustand des Isolationssystems an unterschiedlichen Punkten des Lebenszyklus zu ermitteln.

- Applikation von thermischer Alterung: Im Betrieb ist das Isolationssystem durch den Widerstand in der Wicklung und Wirbelströme signifikanter Wärme ausgesetzt. Die Applikation der thermischen Alterung erfolgt, indem die Probenkörper in einer kontrollierten und reproduzierbaren Umgebung während eines bestimmten Zeitraums einer definierten Temperaturbelastung ausgesetzt werden.
- Applikation von elektrischer Alterung: Die elektrische Alterung sieht die konstante Beaufschlagung der Probenkörper mit einer definierten Spannung und Frequenz während eines bestimmten Zeitraums oder alternativ bis zum Versagen des Probenkörpers – beispielsweise durch das Auftreten von Teilentladungen –

vor. Das Ziel besteht in der Identifikation von Schwachstellen im Isolationssystem, die zum Auftreten von Teilentladungen im Nutzungszeitraum des elektrischen Antriebs führen können.

- Applikation von chemischer Alterung: Die zunehmende Relevanz der direkten Wicklungskühlung hinsichtlich aktueller und zukünftiger Stator-Designs bringt die Anforderung der Widerstandsfähigkeit des Isolationssystems gegenüber unterschiedlichen Kühlmedien mit sich. Die Applikation der chemischen Alterung hat zum Ziel, diese Effekte nachzustellen. Dabei werden die Prüfkörper in einer kontrollierten und reproduzierbaren Umgebung dem Kühlmedium unter definiertem Druck und mittels bestimmter Düsen-Geometrien während eines festgelegten Zeitraums ausgesetzt.

Neben der Beaufschlagung der Probenkörper mit einzelnen Belastungen und Alterungseffekten besteht die Möglichkeit der überlagerten Beaufschlagung. Hierbei werden einzelne Statoretten mit (unterschiedlichen) Konfigurationen zu einem vollständigen Ring zusammengesetzt und anschließend mit den entsprechenden Belastungen und Alterungseffekten beaufschlagt. Die Auswahl und Art sind in Abhängigkeit von den gewünschten Erkenntnissen beziehungsweise den Anforderungen an den elektrischen Antrieb festzulegen. (Bild 12)

Durch die Verwendung der Statorette als Prüfkörper in Kombination mit den genannten Verfahren zur Applikation der unterschiedlichen Belastungs- und Alterungseffekte in der Stator-Baugruppe eröffnet sich die Möglichkeit einer flexiblen, kostengünstigen und ressourcenschonenden Prüfung des Stator-Isolationssystems bei gleichzeitiger Berücksichtigung der anwendungs-spezifischen Rahmenbedingungen. Dadurch eröffnen sich vielfältige Möglichkeiten, sowohl für Material- und Komponentenhersteller als auch Produzenten von elektrischen Antrieben. Die Berücksichtigung der Produkt- und Produktionsseitigen Einflussfaktoren und Randbedingungen ermöglicht Material- und Komponentenherstellern die strukturierte Quantifikation der Eigenschaften ihres Produktportfolios mit der gleichzeitigen Möglichkeit der Gegenüberstellung zu Produkten von Mitbewerbern. Motorproduzenten hingegen können bereits früh im Entwicklungsprozess flexibel und kostengünstig unterschiedliche Varianten und Innovationen des Isolationssystems im praktischen Umfeld testen und quantifizieren unter Randbedingungen, die denen der späteren Stator-Baugruppe entsprechen.

14 Zusammenfassung

Als wesentlichen Beitrag zu einer klimaneutralen Zukunft bietet die Hairpin-Stator-Technologie großes Potenzial zur künftigen Deckung der globalen Nachfrage elektrischer Antriebe. Zugleich offenbart die industrielle Anwendung dieser Technologie eine Vielzahl von Produkt-Prozess-Interdependenzen, deren Kenntnis und Berücksichtigung für die stabile und wirtschaftliche Großserienproduktion von wesentlicher Bedeutung sind. Eine zentrale Komponente bildet dabei das Isolationssystem des elektrischen Antriebs, das die Funktion und die Lebensdauer des Gesamtsystems maßgeblich definiert und gleichzeitig von zahlreichen Prozessschritten entlang der Produktion beeinflusst wird. Die Berücksichtigung der anwendungsspezifischen Rahmenbedingungen im Kontext des Testings ist zwingend erforderlich, da bestehende Normen und Richtlinien diese Charakteristika nur bedingt abdecken. Der vorliegende Beitrag gibt daher am Beispiel des Hairpin-Stator-Isolationssystems einen Überblick zu den unterschiedlichen Möglichkeiten der Komponenten- und Systemprüfung und zeigt konkrete Möglichkeiten zur Berücksichtigung der Anwendung in diesem Kontext auf. Auf Basis dieser Vorschläge besteht künftig das Potenzial, den normativen Rahmen zu erweitern und den Kontext der Anwendung – insbesondere für elektrische Antriebe – standardisiert mit aufzunehmen und dadurch insgesamt zu einer Steigerung der Stabilität in der Elektromotorenproduktion beizutragen.

E-MOTOR-TESTING AM LEHRSTUHL PEM DER RWTH AACHEN

Die Forschungsgruppe „Electric Drive Production“ am Lehrstuhl PEM der RWTH Aachen verfügt über eine umfassende Maschinen-, Anlagen- und Prüf-Infrastruktur, um die steigenden Anforderungen der Materialhersteller, der Anlagenbauer und der produzierenden Unternehmen im Kontext des elektrischen Antriebes abzubilden und zu erproben. Dies erlaubt umfassende Analysen zur Charakterisierung der einzelnen Komponenten des Isolationssystems bis hin zu vollständigen Stotoren inklusive dem zugehörigen Aufbau von Prototypen. Die Testing-Infrastruktur ermöglicht nahezu alle relevanten elektrischen Prüfungen von E-Motoren gemäß Norm mithilfe von Prüfständen zur Messung von Teilentladungen unter AC- und DC-Spannung, zur Messung der Durchschlagsfestigkeit bis 20 Kilovolt AC sowie zur Messung der thermischen, elektrischen und chemischen Alterung. Zusätzlich besteht die Möglichkeit selbstentwickelter, anwendungsspezifischer Testverfahren, beispielsweise zur Charakterisierung der Draht-eigenschaften im Prozess der Hairpin-Stator-Produktion.

www.pem.rwth-aachen.de/e-motor-testing

LITERATUR

- [1] IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC). 2012
- [2] Roca-Puigros, M.; Marmy, C.; Wäger, P. et al.: Modeling the transition toward a zero emission car fleet: Integrating electrification, shared mobility, and automation. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 115 (2023), S. 103576
- [3] Tober, W.: Praxisbericht Elektromobilität und Verbrennungsmotor. Analyse elektrifizierter Pkw-Antriebskonzepte. Wiesbaden: Springer 2016
- [4] Philipp Keller; Tim Wicke: Verkaufszahlen von Elektroautos: Vorübergehende Flaute oder anhaltende Trendumkehr? Stand: 24.10.2024. Internet: <https://www.isi.fraunhofer.de/de/blog/themen/batterie-update-elektroautos-verkaufszahlen-hybrid-flaute-deutschland-europa.html>. Zugriff am 29.03.2025
- [5] Palmer, C.: The Drive for Electric Motor Innovation. *Engineering* 8 (2022), S. 9–11
- [6] Haas, A.; Hackmann, W.: Process for Manufacturing Stator Wave Windings for Electric Traction Motors. *MTZ worldwide* 83 (2022) 5, S. 62–65
- [7] o.V.: New Energy Vehicle Hairpin Motor With Huge Market Growth Space and Policy Advantages. Stand: 09.12.2022. Internet: <https://en.cnhonest.com/news/234.html>. Zugriff am 09.12.2022
- [8] Global Hairpin Stator Market Growth 2022-2028, Intelligence Market Report, London, UK, 2022
- [9] Hans-Martin Fischer: Spannungsklassen in der Elektromobilität. Frankfurt am Main: ZVEI 2013
- [10] El Hadraoui, H.; Zegrari, M.; Chebak, A. et al.: A Multi-Criteria Analysis and Trends of Electric Motors for Electric Vehicles. *World Electric Vehicle Journal* 13 (2022) 4, S. 65
- [11] Binder, A.: Elektrische Maschinen und Antriebe. Grundlagen, Betriebsverhalten. Berlin, Heidelberg: Springer 2017
- [12] Gundabattini, E.; Kuppan, R.; Solomon, D. G. et al.: A review on methods of finding losses and cooling methods to increase efficiency of electric machines. *Ain Shams Engineering Journal* 12 (2021) 1, S. 497–505
- [13] Bailoni, M.; Nategh, S.; Gauvenssens, B. et al.: A Study on Insulation Components of High Voltage Electrical Machines Used in Electric Vehicles. *IECON 2022 – 48th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Brussels, Belgium, 2022, S. 1–6
- [14] Sihvo, V.; Nerg, J.; Pyrhonen, J.: Insulation System and Thermal Design of a Hermetically Sealed Turbo-Generator Operating in a Small-Power CHP Plant. *2007 International Conference on Clean Electrical Power*, Capri, Italy, 2007, S. 45–50
- [15] Mancinelli, P.; Stagnitta, S.; Cavallini, A.: Qualification of Hairpin Motors Insulation for Automotive Applications. *IEEE Transactions on Industry Applications* 53 (2017) 3, S. 3110–3118
- [16] Kampker, I. A.; Dorn, B.; Brans, F. et al.: Stator design for flexible manufacturing in hairpin technology, Newcastle, UK, 2022, pp. 6–11
- [17] Fleischer, J.; Hausmann, L.; Wirth, F.: Production-oriented design of electric traction drives with hairpin winding, Enschede, Niederlande, 2021, pp. 169–174
- [18] Born, H. C.; Schaffrath, M.; Tege, D. et al.: Analysis of the Influence of Various Bending Parameters on the Resulting Electrical Properties of Bent Hairpins. *2023 13th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*, Regensburg, Germany, 2023, S. 1–8
- [19] Hanisch, L. V.; Dietrich, T.-H.; Henke, M.: Analysis of Partial Discharges and Failure Mechanism in Electrical Machines with Hairpin Winding. *2021 IEEE 13th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED)*, Dallas, TX, USA, 2021, S. 1–7
- [20] Madonna, V.; Giangrande, P.; Zhao, W. et al.: Insulation Capacitance as Diagnostic Marker for Thermally Aged, Low Voltage Electrical Machines. *2019 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, Harbin, China, 2019, S. 1–5
- [21] Mancinelli, P.; Stagnitta, S.; Cavallini, A.: Lifetime analysis of an automotive electrical motor with hairpin wound stator. *2016 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*, Toronto, ON, Canada, 2016, S. 877–880
- [22] He, C.; Tenbohlen, S.; Beltle, M.: Ageing Analysis of Hairpin Windings in Inverter-Fed Motor Under PWM Voltage. *Energies* 18 (2025) 6, S. 1376

Sebastian Hartmann, M.Sc.

s.hartmann@pem.rwth-aachen.de

Chair of Production Engineering
of E-Mobility Components (PEM)
RWTH Aachen University
Bohr 12, 52072 Aachen
www.pem.rwth-aachen.de

LIZENZ



Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons
Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)