

Hochleistungsisolierungen für moderne Traktionsmotoren – Drähte und Nutisolation

PEEK, ETFE und PFA als Antwort auf die Anforderungen der Elektromobilität, moderner Wicklungskonzepte und leistungsstarker Industrieantriebe

1 Klassische Isolierlacke stoßen an ihre Grenzen

Jahrzehntelang haben Lackrunddrahte auf Basis von Polyetherimid (PEI), Polyamidimid (PAI) oder Polyimid (PI) die Wicklungen elektrischer Maschinen zuverlässig isoliert. Mit dem Durchbruch der Elektromobilität und der rasanten Entwicklung moderner Umrichtertechnik auf Basis von Siliziumkarbid (SiC) geraten diese bewährten Materialien jedoch zunehmend unter Druck – und zwar gleich aus mehreren Richtungen gleichzeitig.

Ein zentrales Problem ist die steigende Betriebsspannung. Während klassische Industrieantriebe mit 400-V-Netzen arbeiteten, operieren heutige Traktionsmotoren in der Elektromobilität typischerweise auf Spannungsniveaus von 400 V bis hin zu 800 V. Die nächste Fahrzeuggeneration zielt bereits auf 900-V-Systeme ab. Mit steigender Zwischenkreisspannung nehmen die elektrischen Feldstärken in den Nutschlitzten des Stators und vor allem zwischen benachbarten Leitern erheblich zu.

Hinzu kommt die charakteristische Eigenschaft moderner SiC-basierter Inverter: ihre extrem hohen Spannungsanstiegsgeschwindigkeiten (dU/dt), die Werte von 10 kV/ μ s und mehr erreichen können. Solche steilen Spannungsflanken erzeugen ausgeprägte transiente Überspannungen in der Wicklung und belasten das Isoliersystem auf eine Weise, für die klassische PI- oder PEI-Lacke schlicht nicht ausgelegt wurden. Lufteinschlüsse in den Nuten, unvermeidliche Fehlstellen im Lack oder Grenzflächen zwischen Isolierschichten bilden Einsatzpunkte für Teilentladungen (Partial Discharge, PD). Diese lokalen elektrischen Durchbrüche tragen durch hochenergetischen Plasmabeschuss das Isoliermaterial langsam und stetig ab – mit der Folge einer drastisch verkürzten Lebensdauer des Wicklungssystems.

PI- und PEI-basierte Lacke besitzen eine weitere systemimmanente Schwäche: ihre Anfälligkeit gegenüber Hydrolyse. In Umgebungen mit hoher Luftfeuchtigkeit oder bei zyklischer Kondensation durch Temperaturschwankungen können diese Polymere langsam depolymerisieren. Die Isolationsschicht wird mit der Zeit spröde, Risse entstehen, und die elektrische Festigkeit nimmt ab. Für Traktionsmotoren in Fahrzeugen, die in unterschiedlichsten Klimazonen betrieben werden, ist dies ein nicht zu unterschätzender Degradationsmechanismus.

Insgesamt ergibt sich damit ein Anforderungsprofil, das klassische Isolierlacke mit ihren Grenzen bei Teilentladungsfestigkeit, Hydrolysestabilität und thermischer Belastbarkeit unter den Bedingungen frequenzvariabler Umrichterbetriebe nicht mehr zuverlässig erfüllen können.

2 Wicklungstechnologien im Vergleich: Hairpin und Wellenwicklung

2.1 Die Hairpin-Technologie und ihre Anforderungen an die Isolation

Die Hairpin-Technologie hat sich in den vergangenen Jahren als dominierendes Wickelverfahren für moderne Traktionsmotoren etabliert. Große Automobilhersteller wie Volkswagen, Audi, Porsche und BMW setzen konsequent auf Hairpin-Statoren. Das

Grundprinzip: Anstelle flexibler Runddrahte werden U-förmig vorgebogene, lackierte Kupferflachdrahte – die sogenannten Hairpins – präzise in die Statornuten eingesetzt, anschließend verschränkt und laserverschweißt.

Der entscheidende Vorteil liegt im deutlich höheren Nutfüllfaktor. Während bei klassischen Runddrahtwicklungen Füllgrade von maximal etwa 45 % erreichbar sind, ermöglichen die rechteckige Querschnittsform der Flachdrähte Füllgrade von bis zu 73 bis 80 %. Mehr Kupfer im gleichen Bauraum bedeutet höhere Leistungsdichte, bessere Wärmeableitung und damit geringere Kupferverluste.

Dieser hohe Füllfaktor stellt die Drahtbeschichtung vor spezifische Anforderungen. Die mechanischen Belastungen auf die Isolierschicht während der Fertigungsprozesskette sind erheblich:

- Beim Biegen der Hairpins in ihre finale U-Form wirken auf der Außenseite der Biegung erhebliche Zugspannungen, auf der Innenseite Druckspannungen. Die Isolierschicht muss diese Deformation ohne Risse oder Delamination überstehen.
- Beim Einziehen der Hairpins in die engen Statornuten entsteht Gleitreibung zwischen Draht und Blechpaketrandern. Schlechte Gleiteigenschaften erhöhen die Einzugskräfte und das Risiko von Isolationsschäden erheblich.
- Im fertig montierten Stator liegen die Drahte bei hohem Füllfaktor unter konstantem Anpressdruck dicht beieinander. Jede lokale Beschädigung der Isolierung – ein Pinhole, ein Riss – kann unter den hohen Betriebsspannungen zum dielektrischen Versagen führen.

Klassische PI-Emaillacke, die durch Einbrennen aufgebracht werden, zeigen unter diesen kombinierten mechanisch-elektrischen Belastungen zunehmend Schwächen: Pinhole-Defekte entstehen vergleichsweise leicht, und die Teilentladungsfestigkeit entspricht nicht den Anforderungen hochvolttauglicher 800-V-Systeme.

2.2 Wellenwicklung – eine leistungsfähige Alternative

Neben der Hairpin-Technologie gewinnt die Wellenwicklung – auch als Wave Winding bezeichnet – zunehmend an Bedeutung im modernen Traktionsmotorenbau. Das Prinzip unterscheidet sich grundlegend vom Hairpin-Konzept: Beim Wellenwickeln wird ein kontinuierlicher Draht oder ein Flachleiter in einer sinusartigen Wellenform abwechselnd durch die Nuten verschiedener Pole geführt, ohne dass einzelne Leiter getrennt und verschweißt werden müssen. Das Resultat ist eine nahezu verschweißfreie, integral aufgebaute Wicklung.

Aus elektrischer und thermischer Sicht bietet die Wellenwicklung gegenüber dem Hairpin-Ansatz mehrere relevante Vorteile, die unmittelbare Auswirkungen auf die Anforderungen an das Isoliersystem haben.

Stromverdrängung und Wechselstromverluste: Ein bekanntes Problem bei Hairpin-Wicklungen ist die Stromverdrängung in den Leitern, die sogenannte AC-Verlustproblematik. Da Hairpins aus massiven Rechteckleitern bestehen, können bei den hohen Schaltfrequenzen moderner SiC-Inverter in den oberen und unteren Lagen der Nut unterschiedliche Spannungsniveaus auftreten – die Folge sind zirkulierende Ströme und erhöhte Wechselstromverluste. Wellenwicklungen lassen sich konstruktiv so gestalten, dass die Leiter in jeder Nut über die Leiterausgänge hinweg liegen, was die Stromverdrängung deutlich reduziert. Alternativ können bei Wellenwicklungen auch transponierte Leiter oder Litzendrahte eingesetzt werden, die das Prinzip der Stromverdrängungs-Minimierung konsequent weiterführen (dazu mehr in Kapitel 4).

Thermisches Verhalten: Die gleichmäßigere Stromverteilung bei Wellenwicklungen führt zu einer homogenen Verlustverteilung über die Wicklung. Hotspots, wie sie bei Hairpin-Wicklungen durch die Stapellage benachbarter Leiter mit unterschiedlicher Flussdichtenbelastung entstehen können, sind seltener. Dies entlastet das thermische

Management und reduziert die Spitzentemperaturen im Isoliersystem – ein wichtiger Aspekt, da thermische Überlastung einer der häufigsten Ausfallmechanismen von Wicklungsisolierungen ist.

Fertigungstechnische Aspekte: Da bei Wellenwicklungen keine aufwendigen Biegeoperationen und Schweißverbindungen an jedem einzelnen Leiter notwendig sind, entfallen einige der mechanischsten Belastungsszenarien, die bei Hairpins die Isolierung beanspruchen. Dennoch entstehen durch das Einlegen und Formen der Wellenwicklung eigene mechanische Herausforderungen, insbesondere an den Umbiegepunkten – den Wickelköpfen – sowie durch das Einziehen in enge Nuten. Die Anforderungen an Flexibilität, Abriebfestigkeit und mechanische Integrität der Isolierschicht bleiben also auch bei Wellenwicklungen hoch. Fluormodifizierte Beschichtungen und PEEK-basierte Systeme bieten hier dieselben Vorteile wie beim Hairpin-Einsatz.

Zusammengefasst eröffnet die Wellenwicklung neue Freiheitsgrade bei der Motorkonstruktion, stellt aber keine grundsätzlich anderen Anforderungen an das Isoliermaterial als die Hairpin-Technologie. Beide Ansätze profitieren in gleicher Weise von den überlegenen dielektrischen, thermischen und mechanischen Eigenschaften moderner Hochleistungsisolierungen.

3 PEEK und fluormodifizierte Systeme als Hochleistungsalternative

3.1 PEEK – mechanische Robustheit als Ausgangsbasis

Polyetheretherketon (PEEK) gilt als eines der leistungsfähigsten technischen Thermoplaste. Seine Kombination aus hervorragender mechanischer Festigkeit, Abriebresistenz und thermischer Beständigkeit bis deutlich über 200 °C macht es für Hochleistungsanwendungen attraktiv. Im Kontext der Hairpin- und Wellenwicklungsfertigung bietet PEEK gegenüber klassischen Emaillacken vor allem im Bereich der mechanischen Integrität Vorteile: Die Abriebfestigkeit ist signifikant höher, was den Einziehprozess in die Statornuten weniger kritisch macht. PEEK wird typischerweise im Extrusionsverfahren aufgebracht – ein Verfahren, das eine gleichmäßigere Schichtdicke und höhere Reproduzierbarkeit ermöglicht und ohne die hochgiftigen Lösungsmittel wie Kresol auskommt, die bei konventionellen PI-Emaillierprozessen eingesetzt werden.

Reines PEEK hat jedoch relevante Einschränkungen. Bei sehr engen Wickelradien zeigt es eine gewisse Sprödigkeit, die zu Rissen in der Isolierschicht führen kann. Die Haftung auf dem Kupfersubstrat und gegenüber nachfolgenden Tränklarzen ist nicht von Haus aus optimal. Und für die Anforderungen moderner 800-V-Systeme ist die Teilentladungsfestigkeit von reinem PEEK allein nicht ausreichend.

3.2 ETFE und PFA – fluormodifizierte Systeme im Detail

Die eigentliche Innovation liegt in den fluormodifizierten Polymersystemen, insbesondere ETFE (Ethylen-Tetrafluorethylen-Copolymer) und PFA (Perfluoralkoxy-Alkane). Diese Materialien vereinen die chemische Stabilität der Fluorchemie mit ausreichender mechanischer Verarbeitbarkeit. Das Herzstück ihrer überlegenen Eigenschaften ist die Kohlenstoff-Fluor-Bindung, eine der stärksten Bindungen der organischen Chemie. Sie verleiht fluorierten Polymeren eine chemische Inertheit und eine mechanische Beständigkeit, die kaum ein anderes technisches Polymer erreicht.

Fluorierte Polymere sind nahezu immun gegen hydrolytischen Abbau. Das grundlegende Problem klassischer PI-Lacke – die schleichende Depolymerisation unter Feuchte- und Wärmeeinwirkung – entfällt damit vollständig. Für Traktionsmotoren in Fahrzeugen, die über

Jahre in verschiedensten Klimazonen betrieben werden, ist dies ein entscheidender Zuverlässigkeitsvorteil.

Von zentraler Bedeutung für Hochvoltanwendungen ist die Teilentladungsfestigkeit. Fluorierte Polymere, insbesondere PFA, zeigen eine deutlich höhere Erosionsbeständigkeit gegenüber dem Ionenbeschuss bei Teilentladungsereignissen als Standard-PI-Lacke oder reines PEEK. Die chemische Stabilität und dichte Packung der Fluorpolymer-Moleküle verlangsamen den Abtragsvorgang durch Teilentladungsplasmen signifikant und verlängern die Lebensdauer des Isoliersystems erheblich.

Für den SiC-Umrichterbetrieb ist zudem der niedrige dielektrische Verlustfaktor $\tan \delta$ in Verbindung mit der geringen Dielektrizitätskonstante ϵ_r bedeutsam. Fluorpolymere besitzen von Natur aus sehr niedrige ϵ_r -Werte (PFA ca. 2,1; ETFE ca. 2,5), was zu geringeren kapazitiven Verlusten in der Wicklung bei den hohen Schaltfrequenzen moderner SiC-Inverter führt. Die reduzierte dielektrische Eigenwärmung erhöht den Gesamtwirkungsgrad des Antriebssystems und entlastet das thermische Management.

ETFE und PFA unterscheiden sich dabei in ihrer Positionierung:

- ETFE bietet exzellente mechanische Eigenschaften – hohe Zugfestigkeit, Abriebfestigkeit und Flexibilität – bei Dauerbetriebstemperaturen bis etwa 150 °C. Es ist mechanisch zäher als viele andere Fluorpolymere, gut extrudierbar und damit besonders für automatisierte Fertigungsprozesse in der Hairpin- und Wellenwicklungsproduktion geeignet. Spezielle Automotive-Grades genügen den Anforderungen der Norm LV112; Crosslink-Varianten durch Strahlenvernetzung erhöhen die Hochtemperaturbetändigkeit weiter.
- PFA bietet eine noch umfassendere chemische Inertheit und höhere Dauertemperaturfestigkeit bis ca. 260 °C. Der Fokus liegt auf maximaler elektrischer Reinheit und Teilentladungsresistenz. PFA kann sowohl im Extrusionsverfahren als auch durch Dispersionsbeschichtung im Flüssig-/Tauchverfahren verarbeitet werden, wobei letzteres besonders dünne, defektarme Schichten ermöglicht. Adhäsive PFA-Formulierungen eignen sich besonders für dünne Isolationsschichten mit verbesserter Kupfer- und PI-Haftung.

3.3 Fluormodifiziertes PEEK – die Kombination zweier Welten

Die Kombination von PEEK mit fluorierten Komponenten adressiert gezielt die Schwächen beider Ausgangsmaterialien. Fluormodifiziertes PEEK behält die hervorragende mechanische Festigkeit und Abriebresistenz von PEEK, gewinnt aber durch die Fluor-Modifikation in Flexibilität, dielektrischen Eigenschaften und chemischer Stabilität. Das Ergebnis ist ein Material, das die hohen Spannungsspitzen moderner SiC-Leistungselektronik besser abfangen kann, ohne dabei die mechanische Integrität des Leiters im anspruchsvollen Biegeprozess zu verlieren. Praktisch bedeutsam ist auch das verbesserte Gleitverhalten beim Einziehen der Leiter in die Statornuten: Die Fluor-Modifikation wirkt wie eine intrinsische Schmierung, reduziert die Einzugskräfte und vermindert den Produktionsausschuss.

3.4 Verarbeitungsseitige Herausforderungen und Lösungsansätze

Die Extrusion fluorierte Polymere erfordert spezialisierte Anlagenkomponenten. Wegen prozessbedingt freisetzbarer korrosiver Gasanteile müssen Zylinder, Schnecken und Düsen aus korrosionsbeständigen Speziallegierungen oder nitrierten Stählen gefertigt sein. Die Investitionskosten solcher Anlagen übersteigen die konventioneller Emailieranlagen erheblich.

Die bekannte Achillesferse reiner Fluorpolymere ist die schlechte Haftung auf Kupferoberflächen und in nachfolgenden Tränkhärzen. Verschiedene Ansätze adressieren dieses Problem erfolgreich:

- Speziell entwickelte adhäsive Fluorpolymer-Compounds nutzen gezielte chemische Modifikationen, um eine ausgeprägte Haftaffinität gegenüber Kupfer, PI-Schichten und Tränkhärzen zu erzielen.
- Plasma-Oberflächenbehandlung des Kupferleiters vor der Beschichtung erhöht die Oberflächenenergie und schafft reaktive Gruppen, die eine chemische Anbindung der Fluorpolymer-Matrix begünstigen.
- Mehrschichtaufbauten mit einer dünnen PI-Haftbrückenschicht zwischen Kupfer und der Fluorpolymer-Decklage nutzen die gute PI-Kupfer-Haftung als Zwischenstufe, während die Fluorpolymer-Außenschicht die dielektrischen Vorteile beisteuert.
- Innovative Trockenextrusionsverfahren ermöglichen die Direktapplikation von PFA und anderen anspruchsvollen Polymeren auf Kupferdrähte ohne Lösungsmittel oder Primer und eröffnen damit wirtschaftlich attraktive Prozessketten.

Hinsichtlich der Kompatibilität mit Tränkhärzen bleibt auch bei modifizierten Systemen eine Herausforderung bestehen. Die niedrige Oberflächenenergie der Fluorpolymer-Außenfläche erschwert die Benetzung durch konventionelle Epoxid- oder Polyesterimid-Tränkhärze. Spezielle Harze mit angepasster Formulierung sowie definierte Imprägnierparameter sind erforderlich, um einen zuverlässigen Verbund herzustellen.

3.5 PFAS-Regulatorik und wirtschaftliche Rahmenbedingungen

Der primäre wirtschaftliche Nachteil fluorierter Systeme sind die erheblich höheren Materialkosten. PFA und ETFE kosten im Vergleich zu Standard-PI-Lack ein Vielfaches, fluormodifiziertes PEEK noch mehr. Dies beschränkt ihren wirtschaftlich sinnvollen Einsatz derzeit vorwiegend auf leistungsstarke Traktionsmotoranwendungen. Gleichzeitig steht die gesamte Klasse der fluorierten Polymere im Kontext der PFAS-Debatte unter wachsendem regulatorischem Druck, insbesondere in der EU. Hochmolekulare Fluorpolymere wie ETFE und PFA gelten als deutlich weniger problematisch als die kürzerkettigen PFAS-Verbindungen (PFOS, PFOA). Dennoch erfordert die Entwicklung neuer Formulierungen eine sorgfältige Prüfung unter den sich verschärfenden gesetzlichen Rahmenbedingungen.

4 Nutisolation: Ein wichtiger Bestandteil des Isolationssystems

Die Drahtbeschichtung steht im Fokus vieler Diskussionen über elektrische Isolation in Traktionsmotoren – zu Recht, denn sie ist die erste und engste Schutzschicht jedes einzelnen Leiters. Doch sie ist nur ein Teil eines Gesamtsystems, dessen zweite tragende Säule lange Zeit stiefmütterlich behandelt wurde: die Nutisolation. Dabei übernimmt sie Aufgaben, die für Zuverlässigkeit, Lebensdauer, Thermik, Akustik und elektrische Sicherheit des gesamten Motors gleichermaßen entscheidend sind.

In der Nut des Stators treffen alle Einflussgrößen zusammen: hohe elektrische Feldstärken zwischen Leiter und geerdetem Blechpaket, Fliehkräfte bei hohen Drehzahlen, thermische Gradienten zwischen kupfergebundenen Verlustzonen und dem kühlenden Blechpaket, mechanische Schwingungsanregung durch elektromagnetische Kräfte sowie der Einfluss des Tränkhärzes auf den Gesamtverbund. Die Nutisolation muss all diesen Einflüssen gleichzeitig standhalten – und das über eine Fahrzeuglebensdauer von 15 Jahren und mehreren Hunderttausend Betriebskilometern.

Was in der Vergangenheit als einfaches Nutisolierpapier aus Polyamid-Aramid-Verbunden (Nomex®) oder Polyester genügte, stößt unter den Anforderungen moderner 800-V-Hochleistungsantriebe zunehmend an seine Grenzen. Die folgenden Abschnitte beleuchten die einzelnen Anforderungsfelder, die aktuellen Materialentwicklungen und die Prozesstechnologien, die das Feld der Nutisolation gerade grundsätzlich verändern.

4.1 Funktionsweise und Aufbau klassischer Nutisolationssysteme

Die Nutisolation hat im klassischen Sinne eine klar definierte und einfache Aufgabe: Sie trennt den gesamten Leiterverbund in der Nut elektrisch vom geerdeten Statorblech. Zusätzlich schützt sie die Leiter vor den scharfen Stanzkanten des Blechpakets, die beim Einziehen der Wicklung mechanische Schäden an der empfindlichen Drahtisolation verursachen können.

Klassische Nutisolierpapiere bestehen typischerweise aus einem Dreischichtverbund: einer Polyimid- oder Polyesterfolie als Tragschicht, kombiniert mit Faservlieslagen auf Aramidbasis (z. B. Nomex® von DuPont). Dieser Aufbau bietet ausreichende mechanische Robustheit für den Einziehprozess, eine gute Schnittkantenqualität beim Zuschnitt und eine ausreichende elektrische Durchschlagfestigkeit für klassische Niederspannungsanwendungen bis etwa 500 V.

Die Montage erfolgt entweder durch Einlegen vorgestanzter und vorgeformter Nutisolierhülsen – sogenannter Nuteinlagen oder Nutschachteln – oder durch direkte Folienwicklung um den bereits gesetzten Leiterverbund. Bei Hairpin-Statoren werden die Nutisolierhülsen typischerweise vor dem Einziehen der Hairpins in die Nut eingesetzt. Die Hülse muss dabei so steif sein, dass sie formstabil in der Nut verbleibt und den Einziehprozess nicht behindert, gleichzeitig aber flexibel genug, um ohne Bruch in die exakte Nutgeometrie gefaltet werden zu können.

Der Nutschluss – die Öffnung der Nut zum Luftspalt hin – wird durch einen separaten Nutkeil geschlossen, der die Leiter mechanisch in der Nut sichert und zusätzliche Isolationswirkung zwischen Wicklung und Luftspalt bietet. Klassische Nutkeile bestehen aus Kunststoffen wie Polyester-Glasfaserverbunden oder auch aus imprägnierten Kartonmaterialien. In modernen Hochleistungsmotoren übernimmt der Nutkeil eine zunehmend aktive Rolle im Gesamtsolutionskonzept, wie die folgenden Abschnitte zeigen.

4.2 Thermisches Management – der Flaschenhals im Wärmepfad

Thermisches Management ist eine der zentralen Ingenieursaufgaben im modernen Traktionsmotorenbau. Je höher die geforderte Leistungsdichte, desto höher die Verlustleistung pro Volumeneinheit – und desto kritischer wird die Fähigkeit des Isoliersystems, diese Wärme effizient abzuleiten. Die Nutisolation liegt dabei geometrisch und physikalisch im direkten Wärmepfad zwischen der kupfernen Verlustquelle und dem wasseraktivkühlten Statorblech.

Das Problem klassischer Nutisolierpapiere liegt in ihrer geringen Wärmeleitfähigkeit. Nomex®-Papier erreicht typischerweise Werte von 0,12 bis 0,15 W/(m·K), Polyimidfolie etwa 0,10 bis 0,25 W/(m·K). Diese Werte mögen absolut klein erscheinen, aber bei Schichtdicken von 0,2 bis 0,5 mm über die gesamte Nutlänge von typisch 60 bis 100 mm akkumuliert sich der thermische Widerstand zu einem messbaren Hindernis für die Wärmeabfuhr. Simulationen zeigen, dass die Nutisolation bei typischen 400-V-Motorauslegungen für 15 bis 25 % des gesamten thermischen Widerstands zwischen Wicklung und Kühlmantel verantwortlich sein kann. Bei 800-V-Hochleistungsmotoren, die mit höheren Stromdichten und entsprechend größeren Wärmedichten betrieben werden, verschärft sich dieses Problem erheblich.

4.2.1 Thermisch leitfähige Füllstoffe in Folien und Compounds

Der effektivste Ansatz zur Steigerung der Wärmeleitfähigkeit von Nutisolierfolien ist die Einbettung keramischer Füllstoffe hoher intrinsischer Wärmeleitfähigkeit in die Polymermatrix. Als Füllstoffe kommen hauptsächlich in Frage:

- Hexagonales Bornitrid (h-BN): Wärmeleitfähigkeit der Partikel 300 bis 600 W/(m·K) in Ebenenrichtung, elektrisch isolierend, gute Verträglichkeit mit Polyimidmatrices. Plättchenförmige BN-Partikel richten sich bei der Folienherstellung bevorzugt in der

Ebene aus – was für den in der Nut dominierenden lateralen Wärmetransport vorteilhaft ist.

- Aluminiumoxid (Al_2O_3): Wärmeleitfähigkeit ca. 20 bis 40 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, elektrisch isolierend, kostengünstig, vielfältig verfügbar. In Kugelform ergibt sich isotrope Wärmeleitfähigkeit; als gepfefferte Mischung mit plättchenförmigem BN lassen sich Füllungsgrade und Richtungscharakteristik gezielt einstellen.
- Aluminiumnitrid (AlN): Wärmeleitfähigkeit ca. 150 bis 200 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, elektrisch isolierend, jedoch feuchtigkeitsempfindlich und deutlich teurer als Al_2O_3 . AlN wird vor allem dann eingesetzt, wenn bei gleichzeitig limitiertem Füllgrad maximale Wärmeleitfähigkeit angestrebt wird.
- Siliziumkarbid (SiC): Wärmeleitfähigkeit ca. 120 bis 200 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, jedoch halbleitend – der Einsatz als Füllstoff in Isolierfolien erfordert daher sorgfältige Abstimmung von Füllgrad und Partikelgröße, um keine durchgängigen leitfähigen Pfade zu erzeugen.

Mit gut abgestimmten Füllstoffmischungen erreichen thermisch leitfähige Nutisolerfolien heute Wärmeleitfähigkeiten von 1 bis über 3 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ – das ist eine Verbesserung um den Faktor 10 bis 20 gegenüber klassischem Nomex®-Papier. Motorensimulationen zeigen, dass diese Verbesserung die Wicklungs-Hotspot-Temperatur je nach Motorauslegung um 10 bis 30 K absenken oder alternativ bei gleicher Motortemperatur höhere Stromdichten und damit höhere Leistungsdichten ermöglichen kann.

Die Herausforderung liegt in der Folienherstellung: Hohe Füllgrade verschlechtern die mechanische Flexibilität der Folie und erschweren das Stanzen und Formen der Nutisolerhülsen. Darüber hinaus erhöhen keramische Füllstoffe die Dielektrizitätskonstante der Folie, was für die Teilentladungscharakteristik nachteilig sein kann. Die optimale Formulierung erfordert daher immer eine Abwägung zwischen thermischen, elektrischen und mechanischen Eigenschaften.

4.2.2 Thermische Grenzflächenmaterialien und Wärmeleitpasten

Selbst die beste thermisch leitfähige Nutisolerfolie ist nur so gut wie ihre Anbindung an die umgebenden Grenzflächen. Zwischen der Folie und dem Blechpaket existieren in der Praxis stets Luftspalte und Unebenheiten, die den effektiven Wärmewiderstand signifikant erhöhen. Luft hat eine Wärmeleitfähigkeit von etwa 0,025 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ – selbst dünne Luftspalte von wenigen Mikrometern können daher den thermischen Widerstand der Grenzfläche dominieren.

Thermische Grenzflächenmaterialien (Thermal Interface Materials, TIM) schließen diese Lücke. Im Kontext der Nutisolation werden verschiedene TIM-Konzepte diskutiert und erprobt:

- Wärmeleitpasten und -kleber auf Silikonbasis mit keramischen Füllstoffen füllen Mikrounebenheiten zwischen Folie und Blechpaket aus und schaffen einen kontinuierlichen Wärmepfad. Ihr Nachteil liegt im Fertigungsaufwand: Auftragen, Positionieren und Dosieren sind prozessintensiv.
- Phase-Change-Materialien (PCM) sind bei Raumtemperatur fest und schmelzen im Betrieb bei definierter Temperatur – dadurch fließen sie in Mikrospalte ein und verbessern den thermischen Kontakt im Betrieb ohne Klebstoffauftrag in der Montage.
- Kompressible Wärmeleitpads, die zwischen Folie und Blechpaket eingelegt werden und unter dem Druck der eingesetzten Leiter komprimiert werden, bieten einen guten Kompromiss zwischen Montagbarkeit und thermischer Anbindung.

Einige Hersteller integrieren die thermische Anbindungsfunktion direkt in die Nutisolerfolie, indem sie eine der Decklagen aus einem drucksensitiven Klebstoff mit thermisch leitfähigem Füllstoff formulieren. Dieser Ansatz vereinfacht die Montage erheblich, da kein separater TIM-Auftrag notwendig ist.

Alternativ eröffnet die Vakuumimpregnätierung mit thermisch leitfähigen Tränkhharzen eine systemische Lösung: Wenn das Tränkhharz alle Luftspalte im Leiterverbund und an der Grenzfläche zur Nutisolation vollständig ausfüllt und zudem eine hohe Wärmeleitfähigkeit aufweist, wird die Nutisolierfolie selbst zum weniger dominanten thermischen Widerstand. Hierauf wird in Abschnitt 4.7 noch eingegangen.

4.3 Mechanische Belastbarkeit – Fliehkräfte, Stanzkanten und Betriebsvibrationen

Moderne Traktionsmotoren werden bis zu Spitzendrehzahlen von 20 000 U/min und mehr betrieben. Bei diesen Drehzahlen wirken enorme Fliehkräfte auf die Wicklung. Für einen Leiter mit einem typischen Querschnitt von 4×2 mm und einer Dichte von Kupfer (8.900 kg/m^3) ergeben sich bei 20 000 U/min und einem Statorinnenradius von 75 mm radiale Beschleunigungen von mehreren Tausend g. Die Leiter werden radial nach außen gedrückt – die Nutisolation muss dabei als mechanische Schutzhülle fungieren, die Kupferlage sicher in der Nut halten und gleichzeitig die scharfen Stanzkanten des Blechpakets abpuffern, ohne selbst zu reißen oder zu delaminieren.

Diese mechanische Funktion wird durch konventionelle Nutisolierpapiere zunehmend grenzwertig erfüllt. Zwar bieten Nomex®-Verbundpapiere ausreichende Reißfestigkeit für viele Anwendungen, doch zeigen sie bei wiederholten thermomechanischen Belastungszyklen – wie sie im Fahrbetrieb durch permanente Temperaturwechsel und Drehmomentschwingungen auftreten – eine progrediente Ermüdung, die zur Ausdünnung der Nutisolierlage und damit zur lokalen Reduktion der Durchschlagfestigkeit führen kann.

4.3.1 Faserverstärkte Hochleistungsverbundfolien

Neue Materialentwicklungen setzen auf faserverstärkte Verbundfolien mit gezielt abgestimmter Schichtarchitektur. Ein typischer Aufbau solcher Hochleistungsnutisolierungen umfasst:

- Eine Trageschicht aus biaxial gereckter Polyimidfolie (z. B. Kapton® oder äquivalente Produkte), die hohe Reißfestigkeit, ausgezeichnete elektrische Durchschlagfestigkeit und chemische Beständigkeit gegenüber Tränkhharzen und Kühlmittelkontakt gewährleistet.
- Aramid-Vlieslagen (Nomex® oder Teijinconex®) als Pufferschicht gegen Stanzkanten und als dreidimensionale Struktur, die beim Falten der Nutisolierhulse Spannungen aufnimmt, ohne zu brechen.
- Bei Bedarf eine zusätzliche PEEK- oder ETFE-Funktionsschicht, die besondere Eigenschaften wie verbesserte chemische Resistenz, niedrigere Dielektrizitätskonstante oder spezifische Oberflächenenergie für die Haftung zu Tränkhharzen einbringt.

Solche Mehrschichtverbunde werden in industriellen Laminierverfahren hergestellt und anschließend auf Hochpräzisionsstanzanlagen zu den erforderlichen Nuteinlagegeometrien zugeschnitten. Die Falzfähigkeit an den Nutecken – typischerweise 90° -Umbiegungen mit Radien von 0,5 bis 1,5 mm – ist ein kritisches Qualitätsmerkmal, das durch die Vlieslagenarchitektur gezielt eingestellt wird.

Für Hochdrehzahlanwendungen werden zusätzlich Nutkeile aus glasfaserverstärkten Hochleistungskunststoffen eingesetzt, die die Wicklung mechanisch in der Nut fixieren. Während klassische Nutkeile aus impragnierten Karton- oder Glasfaserlaminaten gefertigt werden, setzen neuere Konzepte auf spritzgegossene oder pultrudierte Nutkeilprofile aus GFK (Glasfaserverstärkter Polyester), PEEK-GFK oder CFK-Composites. Diese Profile bieten nicht nur höhere mechanische Festigkeit, sondern können auch thermisch leitfähige Füllstoffe integrieren oder als Träger für Temperatursensoren ausgebildet werden.

4.3.2 Einformen und Pressfitting in die Nutgeometrie

Ein wichtiger Aspekt, der im Produktionsumfeld oft unterschätzt wird, ist die Präzision der Nuteinlagegeometrie. Zwischen der Nutisolierhülse und dem Blechpaket darf kein nennenswerter Luftspalt verbleiben, weil dieser sowohl den thermischen Widerstand erhöht als auch als potenzielle Teilentladungszone fungiert. Moderne Nutisolierprozesse umfassen daher aktive Umformprozesse, bei denen die Nutisolierhülse thermisch oder mechanisch in die exakte Nutgeometrie eingepresst wird. Thermoplastische Bindermaterialien in der Vliesschicht ermöglichen ein flussfähiges Anpassen an die Nutkontur beim Heizen, was den flächigen Kontakt zwischen Isolierung und Blechpaket erheblich verbessert.

4.4 Akustik – die Nutisolation als Dämpfungselement

Elektromotoren haben kein klassisches Motorgeräusch. Dieser Vorteil kehrt sich im Hochleistungsbetrieb in ein spezifisches Problem um: Die im Fahrzeuginnenraum nunmehr deutlich wahrnehmbaren elektromagnetischen Geräusche des Elektromotors. SiC-Inverter schalten mit Frequenzen von typischerweise 10 bis 48 kHz und erzeugen dabei hochfrequente Drehmomentschwankungen und magnetische Querkräfte, die den Stator zu radialen Schwingungen anregen – dem sogenannten Heulen, Pfeifen oder Singen des Elektromotors.

Diese Schwingungen entstehen im Statorjoch als Reaktion auf die magnetischen Maxwell'schen Spannungen an der Luftspaltgrenzfläche und pflanzen sich über das Gehäuse als Struktur- und Luftschall fort. Im Innenraum eines Elektrofahrzeugs, der nicht mehr durch den Verbrennungsmotor akustisch überdeckt wird, sind selbst kleine Pegelunterschiede deutlich wahrnehmbar. Frequenzanteile im Bereich 1.000 bis 4.000 Hz sind für das menschliche Gehör besonders sensibel und damit besonders störend.

4.4.1 Dämpfende Nutisolierungen: Prinzip und Materialien

Die Nutisolation befindet sich an einer akustisch günstigen Position im Schwingungsausbreitungspfad: direkt zwischen Leiterverbund und Statorblech. Wenn ein Teil der Schwingungsenergie an dieser Grenzfläche in Wärme umgewandelt werden kann, reduziert sich die Amplitude der Schwingungen, die in das Statorjoch und weiter in das Motorgehäuse weitergeleitet werden.

Viskoelastische Materialien ermöglichen genau dies. Materialien mit ausgeprägter innerer Dämpfung – also einem hohen mechanischen Verlustfaktor $\tan \delta_{\text{mech}}$ – wandeln mechanische Deformationsenergie effizient in Wärme um. Für den Einsatz in Nutisolierungen eignen sich insbesondere:

- Acrylat-basierte Klebstoffzwischenlagen mit gezielt eingestellter Viskoelastizität, die als Dämpfungsschicht zwischen den steiferen Folienschichten des Nutisoliersystems fungieren. Solche Acrylatklebstoffe können ihren Dämpfungsmaximum (Glasumwandlungsbereich) durch chemische Formulierung auf die relevante Frequenz- und Temperaturzone angepasst werden.
- Silikonbasierte Elastomerkissen, die zwischen Nutisolierfolie und Leiter oder zwischen Nutisolierfolie und Blechpaket eingelegt werden. Silikon bietet einen über einen weiten Temperaturbereich stabilen mechanischen Verlustfaktor und ist zugleich chemisch beständig gegenüber gängigen Tränkharzen.
- Bituminöse oder polymere Constrained-Layer-Damping-Systeme (CLD-Systeme), wie sie im Fahrzeugbau aus der Karosseriebedämpfung bekannt sind und nun in miniaturisierter Form auf Nutisolierstärken adaptiert werden.

Die Herausforderung dieser Dämpfungsansätze liegt in ihrer Verträglichkeit mit den übrigen Anforderungen der Nutisolation. Viskoelastische Polymerschichten besitzen in der Regel eine sehr geringe Wärmeleitfähigkeit, was dem Ziel der thermischen Entkopplung entgegenläuft. Zusätzliche Schichten erhöhen die Gesamtdicke der Nutisolation und reduzieren damit den Nutfüllfaktor. Die Verbindung thermischer Leitfähigkeit mit mechanischer Dämpfung ist daher ein aktives Forschungsfeld.

Mehrere Materialhersteller und Tier-1-Zulieferer verfolgen Ansätze, in denen BN-gefüllte, thermisch leitfähige Acrylatklebstofflagen gleichzeitig als Dämpfungsschicht und Wärmeleitlage fungieren. Die Entwicklung dieser Doppelfunktionsschichten ist technologisch anspruchsvoll, aber konzeptionell überzeugend.

4.4.2 Systemische Betrachtung: NVH-Optimierung am Gesamtmotor

Die Nutisolation ist nur eine Möglichkeit zur akustischen Optimierung des Elektromotors. Eine systemische Betrachtung des NVH-Verhaltens (Noise, Vibration, Harshness) umfasst die Wechselwirkungen zwischen Inverterauslegung (Schaltfrequenz, PWM-Strategie), Blechpaketdesign (Nutschrägung, Jochgeometrie), Wicklungskonzept und Isoliersystem. Die Nutisolation kann innerhalb dieses Systems als Stellschraube dienen, die andere Maßnahmen ergänzt und verstärkt. Besonders in Verbindung mit akustisch optimierten PWM-Modulationsstrategien, die bestimmte Harmonische gezielt vermeiden oder spräitzen, kann eine dämpfende Nutisolation eine messbare Verbesserung des Gesamt-NVH-Profiles leisten.

4.5 Teilentladungsresistenz – die elektrische Barriere im Gesamtsystem

Das Thema Teilentladungen wird im Kontext von Drahtbeschichtungen ausführlich diskutiert. Doch die Nutisolation ist im Gesamtsolationssystem die zweite – und in ihrer Flächenwirkung größere – Barriere. Zwischen dem Leiterverbund in der Nut und dem geerdeten Statorblech liegen bei 800-V-Systemen elektrische Feldstärken, die klassische Nutisolierpapiere auf Dauer in Teilentladungsbereiche treiben können, sobald Lufteinschlüsse oder Fehlstellen vorhanden sind.

Das Teilentladungseinsatzfeld PDIV (Partial Discharge Inception Voltage) einer Nutisolation wird maßgeblich von drei Faktoren bestimmt: der elektrischen Feldstärke in der Isolierschicht, der Größe und Lage von Lufteinschlüssen im Isoliersystem sowie der Dielektrizitätskonstante des Isoliermaterials. Für 800-V-Systeme muss das PDIV der Nutisolation deutlich oberhalb der maximalen transienten Betriebsspannung liegen, die durch die dU/dt -Werte des SiC-Inverters bestimmt wird und im Worst Case 1.500 bis 2.000 V übersteigen kann.

4.5.1 Nanocomposite-Ansätze für erhöhte PD-Resistenz

Konventionelle Nutisolierpapiere aus Nomex®-PI-Verbunden bieten zwar ausreichende elektrische Durchschlagfestigkeit, aber keine besondere Resistenz gegenüber Teilentladungserosion. Unter persistentem Teilentladungsbeschuss werden die Polymerketten des Araamid- oder PI-Materials durch den Ionenbeschuss des Plasmas sukzessive abgebaut – ein Prozess, der letztlich zum Durchschlag führt.

Nanocomposite-Ansätze adressieren dieses Problem, indem nanoskalige anorganische Partikel direkt in die Polyimidmatrix der Nutisolierfolie eingebettet werden. Als Partikel werden hauptsächlich eingesetzt:

- Nanoskaliges Aluminiumoxid (Al_2O_3) mit Partikeldurchmessern von 20 bis 100 nm: Die Partikel unterbrechen die thermischen und chemischen Abbaukaskaden, die durch Ionenbeschuss im Polymer ausgelöst werden, und erhöhen damit die Erosionsfestigkeit signifikant. Zugleich werden Rissfortschritt und Tracking-Pfade durch die harte, chemisch inerte Al_2O_3 -Phase blockiert.
- Nanoskaliges Siliziumdioxid (SiO_2): ähnlicher Wirkungsmechanismus wie Al_2O_3 , mit etwas geringerer intrinsischer Härte, aber besserer Verarbeitbarkeit in Polyimid-Vorstufen (Polyamidsäure-Lösungen).
- Montmorillonit-Schichtsilikate (Nano-Tone): Plättchenförmige Nanopartikel, die in der Polyimidmatrix als Barrierschichten gegen Gasdiffusion wirken und zusätzlich die mechanische Steifigkeit der Folie erhöhen können.

Wissenschaftliche Untersuchungen belegen, dass PI-Nanocomposite mit 5 bis 10 Gew.-% nanoskaligem Al_2O_3 die Teilentladungserosionsfestigkeit um den Faktor 3 bis 10 gegenüber ungefülltem PI steigern können. Dies übersetzt sich in eine erheblich verlängerte

Betriebsdauer unter Teilentladungsbedingungen, die bei 800-V-Antrieben im Grenzfall unvermeidlich auftreten.

Mehrere Folienhersteller und Materiallieferanten – darunter Firmen wie Isovolta, Nitto Denko und von der DuPont-Produktgruppe ausgegliederte Organisationen – haben Nanocomposite-PI-Folien in Kleinserie eingeführt. Die Herausforderung der Serienproduktion liegt in der gleichmäßigen Nanopartikeldispersion ohne Agglomeration sowie in der Reproduzierbarkeit der thermischen Imidisierungsreaktion bei gefüllten Polyamidsäure-Systemen.

4.5.2 Reduktion von Lufteinschlüssen als Systemstrategie

Die wirksamste Strategie gegen Teilentladungen in der Nutisolation ist die Beseitigung der Voraussetzung für ihr Auftreten: der Lufteinschlüsse. Dies erfolgt primär durch konsequente Vakuumimpregnätierung (Vacuum Pressure Impregnation, VPI) des fertig montierten Stators. Beim VPI-Verfahren wird der Stator unter Vakuum evakuiert und anschließend mit Tränkharz infiltriert, das unter Druck in alle Hohlräume eindringt. Ein vollständig ausgetränktes Wicklungssystem ohne Lufteinschlüsse ist nahezu immun gegen Teilentladungen, da die Paschen-Bedingung für elektrische Durchbrüche in gasförmigem Medium nicht erfüllt werden kann.

In der Praxis ist eine vollständige Lufteinschlussfreiheit nur näherungsweise erreichbar, insbesondere in Systemen mit hohem Nutfüllfaktor und engen Toleranzen zwischen Leiter und Nutisolation. Die Impregnierung bei höheren Füllgraden erfordert Harze mit niedriger Viskosität und guten Benetzungseigenschaften auch gegenüber schwer benetzbaren Oberflächen wie Fluorpolymerbeschichtungen.

4.6 Litzen, folienisolierte Leiter und alternative Leiterkonzepte

Die bisher diskutierten Nutisolutionskonzepte gehen implizit von einem massiven Leiterverbund aus – sei es aus Hairpin-Flachleitern oder einem kontinuierlichen Wellenleiter. Daneben gibt es alternative Leiterarchitekturen, die sowohl die Eigenschaften des Leiters selbst als auch die Anforderungen an die Nutisolation und das Gesamtsolationssystem verändern.

4.6.1 Litzendrahte: Prinzip und Hochfrequenzeignung

Litzendrahte bestehen aus einer Vielzahl dünner, einzeln lackisolierten Kupferdrahte, die nach einem definierten Verseilmuster miteinander verdreht sind. Das Grundprinzip ist in der Hochfrequenzelektrotechnik seit über einem Jahrhundert bekannt: Durch die Verseilung durchläuft jeder Einzeldraht über die Länge der Litze alle Positionen im Leiterquerschnitt. Damit wird der Skin-Effekt, der bei massiven Leitern den Strom bei hoher Frequenz auf eine dünne Randschicht konzentriert und die effektive Querschnittsfläche reduziert, weitgehend aufgehoben. Ebenso wird der Proximity-Effekt durch die gegenseitige magnetische Beeinflussung benachbarter Leiter minimiert.

Für Traktionsmotoranwendungen mit SiC-Invertern und Schaltfrequenzen von 10 bis 48 kHz werden sogenannte HF-Litzen (Hochfrequenzlitzen) mit Einzeldrahtdurchmessern von 0,05 bis 0,2 mm und hoher Verseilqualität entwickelt. Der kritische Einzeldrahtdurchmesser, unterhalb dessen der Skin-Effekt bei einer gegebenen Frequenz keine signifikante Rolle mehr spielt, ist proportional zur Skintiefe $\delta = \sqrt{2\rho/\omega\mu}$, wobei ρ den spezifischen Widerstand, ω die Kreisfrequenz und μ die Permeabilität des Leitermaterials bezeichnet. Für Kupfer bei 20 kHz ergibt sich eine Skintiefe von etwa 0,47 mm – Einzeldrahte mit Durchmessern deutlich unterhalb von 0,5 mm sind daher erforderlich, um den Skin-Effekt bei diesen Frequenzen vollständig zu unterdrücken.

Für die Nutisolation bedeutet der Einsatz von Litzen eine veränderte Herausforderung: Der Leiterverbund in der Nut ist weniger kompakt und steif als ein Hairpin-Verbund. Litzen benötigen häufig eine stabilisierende Impregnätierung schon vor dem Einsetzen in die Nut oder eine sehr gute VPI-Qualität, um den Leiterverbund zu festigen. Der Nutfüllfaktor ist trotz

Hochleistungslitze geringer als bei Flachleitern, typischerweise 50 bis 60 %, was den thermischen Vorteil hoher Wärmeleitfähigkeit der Nutisolation relativiert, da das Tränkharz einen großen Anteil der Nutfüllung ausmacht.

Die Isolierung einzelner Litzen für Hochvoltanwendungen ist eine eigenständige technische Herausforderung. Jeder Einzeldraht trägt einen klassischen PI-Emallack; die Litze als Ganzes kann mit einer zusätzlichen Außenisolation aus ETFE oder PFA extrudiert werden, was die Hochvoltfähigkeit und die PD-Resistenz des gesamten Leiterbündels erheblich verbessert. Solche ETFE- oder PFA-ummantelten Hochfrequenzlitzen werden derzeit in Vorentwicklungsprojekten für Hochvolt-Traktionswicklungen evaluiert.

4.6.2 Folienisolierte Flachleiter: Präzision in dünnster Schicht

Folienisolierte Leiter stellen ein konzeptionell anderes Isolationskonzept dar als aufgebrannte oder aufextrudierte Lackschichten. Beim folienisolierten Flachleiter wird ein Rechteck-Kupferleiter nicht mit einem Lackfilm überzogen, sondern mit einer dünnen, hochpräzise gewalzten oder gestrichenen Isolierfolie – oder einer Kombination aus mehreren Folienzuschnitten – schraubenlinienförmig umwickelt oder in einem Folienmantel eingehüllt.

Die Folienwickeltechnik ermöglicht Isolationsschichtdicken, die mit konventionellen Lackierverfahren nicht erreichbar sind: hochpräzise Schichtdicken von 0,025 bis 0,1 mm pro Folienlage, bei gleichzeitig außerordentlicher Gleichmäßigkeit und Defektfreiheit. Polyimidfolien, die nach dem duPont-Kapton®-Prinzip hergestellt werden, erreichen Durchschlagfestigkeiten von über 200 kV/mm – etwa doppelt so hoch wie vergleichbare aufgespritzte oder aufgebrannte PI-Lackschichten. Dies erlaubt bei gleicher elektrischer Festigkeit eine deutlich dünnere Gesamtisolation und damit einen höheren Nutfüllfaktor.

Kombiniert man die Folienwickeltechnik mit fluorierten Folienmaterialien, eröffnen sich zusätzliche Vorteile. ETFE-Folien mit Waddicken von 0,025 bis 0,05 mm bieten:

- Niedrige Dielektrizitätskonstante ($\epsilon_r \approx 2,5$) für geringe kapazitive Verluste bei SiC-Inverterfrequenzen.
- Ausgezeichnete Teilentladungsresistenz durch die chemische Stabilität der C-F-Bindung, die Erosion durch Plasmabeschuss verlangsamt.
- Hydrolyseresistenz und chemische Inertheit für Langzeitstabilität unter Feuchte- und Temperaturwechselbeanspruchung.
- Definierte glatte Oberfläche mit niedrigem Reibungskoeffizienten für verbesserten Einziehprozess.

PFA-Folienwicklungen bieten noch höhere Dauertemperaturfähigkeit (bis 260 °C) und maximale Teilentladungsresistenz, sind aber aufgrund der schwierigeren Verarbeitbarkeit von PFA-Folie – höhere Kosten, eingeschränkte Verfügbarkeit von Dünnschichten, anspruchsvolle Folienwickelprozesstechnik – derzeit noch nicht in Serie.

Ein wichtiger Unterschied folienisolierter Leiter zur extrudierten Beschichtung liegt im Überlappungsbereich beim Schraubenlinienwickeln: An jedem Folienrand existiert eine leichte Stufigkeit, die bei der Impregnätierung vollständig mit Harz aufzufüllen ist. Wird dies nicht gewährleistet, können in diesen Überlappungsbereichen Teilentladungskeime entstehen. Präzise Folienwickelmaschinen mit definiertem Überlappungswinkel und angepasste VPI-Prozesse sind daher Voraussetzung für zuverlässige folienisolierte Leiter in Hochvoltanwendungen.

4.7 Tränkharze und Impregnätierung als systemisches Bindeglied

Das Tränkharz wird in Diskussionen über Nutisolation häufig als nachgelagerter Prozessschritt behandelt – dabei ist es eines der wichtigsten Elemente des gesamten Isolationssystems. Ein vollständig ausgetränkter Stator ohne Lufteinschlüsse erhöht PDIV und Durchschlagfestigkeit erheblich, verbessert die thermische Anbindung zwischen Leiter,

Nutisolation und Blechpaket und steigert die mechanische Stabilität der Wicklung gegen Fliehkräfte und Vibrationen.

Klassische Tränkharze auf Basis von Polyesterimid oder Epoxid bieten bewährte elektrische Eigenschaften und Verarbeitbarkeit, aber wenig Spielraum bei Viskosität, Wärmeleitfähigkeit und Kompatibilität mit fluorierten Isolieroberflächen.

Aktuelle Entwicklungen im Bereich Tränkharze für Hochleistungsmotoren zielen auf drei Eigenschaften ab:

- Thermische Leitfähigkeit: Mit keramischen Füllstoffen modifizierte Epoxidharze erreichen Wärmeleitfähigkeiten von 0,5 bis über 1,5 W/(m·K) – gegenüber 0,18 bis 0,25 W/(m·K) bei ungefüllten Harzen. In Kombination mit thermisch leitfähigen Nutisolierfolien entsteht ein zusammenhängender Wärmepfad, der die Wicklungstemperatur signifikant senken kann.
- Gute Penetration und niedrige Viskosität: Für die Impregnätierung von Hochfüllgrad-Hairpin- oder Wellenwicklungen sind Harze mit sehr niedriger Viskosität (unter 500 mPa·s bei Verarbeitungstemperatur) erforderlich. Niedervisköse, reaktive Monomer-modifizierte Systeme oder heißhärtende Harze mit niedrigem Molekulargewicht im Ausgangszustand gewährleisten eine vollständige Penetration auch enger Leiterzäcken.
- Fluorpolymer-Kompatibilität: Die niedrige Oberflächenenergie von ETFE- und PFA-beschichteten Leitern erschwert die Benetzung durch polare Tränkharze. Silanhaftvermittler-Additive im Harz oder Plasma-Vorbehandlung der Leiteroberfläche verbessern die Haftung. Einige Hersteller arbeiten an Tränkharz-Formulierungen mit fluorierten Kettenendgruppen, die eine thermodynamisch günstigere Anbindung an Fluorpolymer-Oberflächen ermöglichen.

Der Impregnätierprozess selbst – in der Regel VPI oder Tauch-Tränkung mit anschließender Wärmehärtung – wird für moderne Hochleistungsmotoren zunehmend durch Prozessmonitoring und Qualitätssicherung begleitet. Computertomographische Prüfung nach dem VPI-Prozess ermöglicht die zerstörungsfreie Verifikation der Lufteinschlussfreiheit und wird von einigen OEMs bereits als Serienprüfmerkmal gefordert.

4.8 Entwicklungstrends und zukünftige Ansätze

Das Feld der Nutisolation befindet sich in einem vergleichsweise frühen Stadium der Innovationskurve. Während für Drahtisolationen bereits serienreife Hochleistungsprodukte auf Basis von ETFE und PFA verfügbar sind, befinden sich viele der fortschrittlichsten Nutisolutionskonzepte noch in der Vorentwicklung oder frühen Kleinserie. Einige der besonders vielversprechenden Entwicklungsrichtungen sind:

- Multifunktionale Nutisolierfolien, die thermische Leitfähigkeit, mechanische Dämpfung, Teilentladungsresistenz und definierte Tränkharkanbindung in einem einzigen Mehrschichtverbund integrieren. Derzeit müssen diese Eigenschaften noch durch separate Lagen erkaufte werden, was zu erhöhter Schichtdicke und komplexerer Montage führt.
- Spritzgegossene oder 3D-gedruckte Nutisoliereinsätze aus Hochleistungsthermoplasten (PEEK, PPS, LCP), die präzise an die Nutgeometrie angepasst werden können und gleichzeitig thermische Leitfähigkeit durch Compoundierung einbringen. Additive Fertigung ermöglicht dabei kundenspezifische Geometrien und integrierte Funktionen wie Sensorkanäle oder Strukturrippen.
- Direktbeschichtung der Nutinnenfläche des Stators mit isolierenden, thermisch leitfähigen Lacksystemen – ein Ansatz, der die Nutisolierhülse als separates Bauteil gänzlich ersetzen und den Montageschritt einsparen würde. Erste Versuche mit plasmapolymerten Beschichtungen oder sol-gel-basierten Keramiksichten auf

Aluminiumoxidbasis zeigen vielversprechende elektrische und thermische Eigenschaften, sind aber noch weit von serientauglicher Reproduzierbarkeit entfernt.

- Integration von Temperatursensoren in die Nutisoliervolie: Dünne Sensor-Folien auf Basis von Platinwiderständen oder Thermoelementstrukturen, die als zusätzliche Lage in den Nutisolierverein einlaminiert werden, erlauben direkte Messung der Wicklungstemperatur im Inneren der Nut – bislang ein kaum zugänglicher Messpunkt. Solche Sensor-Nutisolierungen befinden sich in der Erprobungsphase bei einzelnen Motorenherstellern.
- Selbstheilende Isoliersysteme: Materialforscher arbeiten an Polymersystemen mit eingebetteten Mikrokapseln, die bei mechanischer Beschädigung aufbrechen und reaktives Monomer freisetzen, das die Schadenstelle in situ ausheilt. Obwohl noch weit von der Serientauglichkeit entfernt, ist das Konzept für Nutisolierungen besonders attraktiv, da mechanische Schäden durch Einziehprozesse oder Betriebsschwingungen dort am häufigsten auftreten.

5 Zusammenfassung: Vor- und Nachteile im Überblick

Klassische PI/PEI-Emaillacke

Vorteile: ausgereiftes Serienverfahren, niedrige Materialkosten, hervorragende Kupferhaftung, bewährte Tränkhartzkompatibilität, gute Verarbeitbarkeit in etablierten Anlagen.

Nachteile: unzureichende Teilentladungsfestigkeit für 800-V-Systeme, Hydrolyseempfindlichkeit, steigende dielektrische Verluste bei hohen Frequenzen, begrenzte mechanische Belastbarkeit bei Extremladung, toxische Lösungsmittel im Prozess.

PEEK-Beschichtung

Vorteile: hervorragende mechanische Festigkeit und Abriebresistenz, hohe thermische Beständigkeit, lösungsmittelfreie Extrusionsverarbeitung.

Nachteile: Sprödigkeit bei engen Biegeradien, Teilentladungsresistenz für Hochvolt allein nicht ausreichend, schlechte Haftung zu konventionellen Tränkharden, hohe Materialkosten, anspruchsvolle Verarbeitungsanlagen.

ETFE-Beschichtung

Vorteile: sehr gute Kombination aus mechanischer Zähigkeit und chemischer Resistenz, ausgezeichnete Flexibilität und Abriebfestigkeit, niedrige Dielektrizitätskonstante, Dauertemperatur bis ca. 150 °C, breite Verfügbarkeit optimierter Automotive-Grades, Crosslink-Varianten verfügbar.

Nachteile: adhäsive Modifikation für zuverlässige Kupferbindung erforderlich, niedrigere Dauertemperatur als PFA, höhere Materialkosten als PI, PFAS-Regulatorik im Blick zu behalten, spezielle Extrusionsanlagen nötig.

PFA-Beschichtung

Vorteile: überragende Teilentladungsresistenz, maximale chemische Inertheit, sehr niedrige Dielektrizitätskonstante ($\epsilon_r \approx 2,1$), Dauertemperatur bis 260 °C, flexible Verarbeitungsoptionen durch Extrusion und Dispersionsbeschichtung, höchste Hydrolysestabilität.

Nachteile: Adhäsion auf Kupfer ohne Modifikation oder Spezialprozess problematisch, höchste Materialkosten, PFAS-Regulatorik beobachten, sehr anspruchsvolle Verarbeitungstechnik.

Fluormodifiziertes PEEK

Vorteile: kombiniert mechanische PEEK-Stärke mit verbesserter Flexibilität und besseren dielektrischen Eigenschaften, optimiertes Gleitverhalten für Hairpin- und Wellenwicklungsfertigung, höhere Teilentladungsfestigkeit als reines PEEK, verbesserte Haftung zu Tränkhäuten.

Nachteile: höchste Materialkosten, komplexe Verarbeitungstechnik, PFAS-Regulatorik relevant, noch begrenzte Serienreife im Vergleich zu klassischem PI.

Nutisolationssysteme

Vorteile: Direkter Einfluss auf thermisches Management, Teilentladungsresistenz und akustisches Verhalten des Motors; neue Materialansätze (thermisch leitfähige Füllstoffe, Nanocomposites, dämpfende Schichtverbunde) ermöglichen erhebliche Leistungssteigerungen gegenüber klassischen Nutisolierpapieren.

Nachteile: höhere Systemkomplexität und Fertigungsaufwand bei Hochleistungsfolienverbunden; Kostendruck in der Serienproduktion; viele innovative Ansätze befinden sich noch in der Vorentwicklungsphase.

6 Fazit

Die Anforderungen moderner Traktionsmotorentechnik – steigende Betriebsspannungen bis 800 V und darüber, schnell schaltende SiC-Inverter mit hohen dU/dt -Werten, hohe Füllgrade durch Hairpin- und Wellenwicklungstechnologie sowie extreme mechanische Belastungen in der Fertigung und im Betrieb – definieren ein Anforderungsprofil, das klassische PI- und PEI-basierte Isolierlacke und konventionelle Nutisolierpapiere an ihre physikalischen Grenzen führt.

PEEK, ETFE, PFA und fluormodifizierte PEEK-Compounds bieten jeweils spezifische Antworten auf diese Herausforderungen, ergänzt durch neue Ansätze bei der Nutisolation, dem Leiterdesign (Litzen, folienisolierte Leiter) und der Wicklungsarchitektur. Die Wahl des optimalen Isoliersystems ist keine Einzelentscheidung, sondern erfordert eine systemische Betrachtung der gesamten Antriebseinheit – von der Drahtisolation über die Nutisolation bis zum Tränkhäut und dem thermischen Managementkonzept. Fluormodifizierte Systeme sind für Hochvolt-Traktionsanwendungen der kommenden Generation häufig die technisch überlegene Wahl, sofern die Gesamtprozesskette konsequent auf ihre spezifischen Anforderungen ausgelegt wird. Mit fortschreitender Skalierung der Elektromobilität und steigendem Kostendruck werden die heute noch hohen Materialpreise durch steigende Abnahmemengen und Prozessoptimierungen voraussichtlich sinken und fluormodifizierte Isoliersysteme damit einer breiteren Marktdurchdringung zugeführt.©