

Herstellung von segmentierten Hairpin-Steckspulen für elektrische Traktionsmotoren

Fertigungskonzepte

Johannes Gerner*,
Jonas Haag,
Sebastian Henschel und
Jürgen Fleischer

Mit Hairpin-Wicklungen erreichen elektrische Traktionsmotoren einen höheren Wirkungsgrad als mit konventionellen Runddrahtwicklungen. Bei hohen Drehzahlen wird dieser Vorteil jedoch durch frequenzabhängige Wechselstromverluste begrenzt. Ein vielversprechender Ansatz zu ihrer Reduzierung ist die Segmentierung der luftspaltnahen Leiter. Im Forschungsvorhaben BendE werden hierzu geeignete Fertigungs- und Verarbeitungsverfahren für segmentierte Hairpin-Steckspulen erarbeitet.

Einleitung und Motivation

Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs von Personen- und Nutzfahrzeugen ist ein wesentlicher Bestandteil globaler Strategien zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen. Dies resultiert in einer steigenden Nachfrage nach leistungsstarken und effizienten elektrischen Antriebssträngen, welche sich aus den Hauptbestandteilen, der Traktionsbatterie und des Traktionsmotors, zusammensetzen. [1] Speziell die elektrischen Traktionsmotoren müssen in diesem Kontext die zur Verfügung stehenden Bauräume optimal

ausnutzen. Dies ermöglicht trotz der kompakten Bauform eine wirtschaftliche Fertigung. [2] Die Effizienz elektrischer Traktionsmotoren hängt maßgeblich von der Auslegung der Statorwicklung ab. Zwar bieten konventionelle Hairpin-Wicklungen Vorteile beim Nutzfaktor und bei der Wärmeabfuhr, jedoch nehmen mit steigender Drehzahl und der damit einhergehenden höheren elektrischen Frequenz die Wechselstromverluste in den massiven Flachleitern zu. Ein verbreiteter Ansatz, um diese Verluste zu reduzieren, ist die Segmentierung des Flachdrahtes in mehrere Einzeldrähte. [3]

Hintergründe und Problemstellung

Mit zunehmender Drehzahl im elektrischen Traktionsmotor steigt, aufgrund der gleichbleibenden Polpaarzahl, die elektrische Frequenz in der Statorwicklung. [4] Dadurch entstehen Wechselstromverluste, welche sich wiederum aus Stromverdrängungs- und Kreisstromverlusten zusammensetzen. Die Stromverdrängungsverluste werden dabei in Skin- und Proximity-Verluste unterteilt. Der Skin-Effekt beschreibt die frequenzabhängige Stromverdrängung innerhalb eines einzelnen Leiters, während der Proximity-Effekt durch äußere magnetische Wechselfelder benachbarter Leiter entsteht und zu einer zusätzlichen Inhomogenisierung der Stromdichte führt. [5] Kreisströme sind hingegen unerwünschte Ströme, die zwischen parallelen Wicklungszweigen infolge unterschiedlicher induzierter Spannungen oder wechselstrombedingter Widerstände auftreten. Sie entstehen insbesondere durch Stromverdrängungseffekte und ungleichmäßige magnetische Flussverkettenungen innerhalb der Statornut und führen zu

* Korrespondenzautor

Johannes Gerner M. Sc.; wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruher Institut für Technologie (KIT); Kaiserstr. 12, 76131 Karlsruhe; Tel.: +49 (0) 174 2394375, E-Mail: johannes.gerner@kit.edu

Weitere Autoren

Jonas Haag, B. Sc.; wbk, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Sebastian Henschel, M. Sc.; wbk, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer; wbk, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

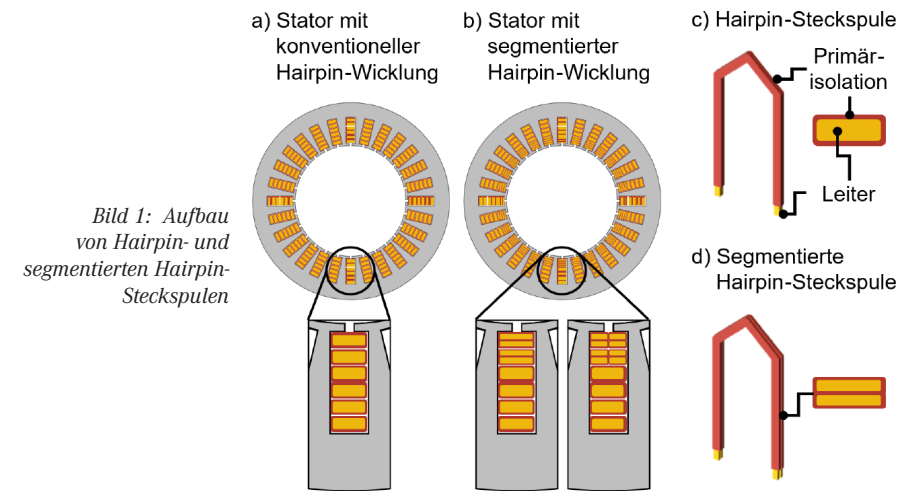
Hinweis

Bei diesem Beitrag handelt es sich um einen von den Mitgliedern des ZWF-Advisory-Board wissenschaftlich begutachteten Fachaufsatz (Peer Review).

zusätzlichen ohmschen Verlusten sowie einer erhöhten thermischen Belastung der Wicklung. [6]

Zur Reduzierung dieser Verluste stellt die Segmentierung der massiven Flachleiter einen vielversprechenden Ansatz dar. Durch die Aufteilung eines Leiters in mehrere parallel geführte Teileiter lassen sich Stromverdrängungseffekte begrenzen und die Stromdichteverteilung im Querschnitt gezielt homogenisieren. Mehrere Studien zeigen, dass sich auf diese Weise die Wechselstromverluste in Hairpin-Wicklungen im Vergleich zu konventionellen Ausführungen deutlich reduzieren lassen, insbesondere in den luftspaltnahen Leiterschichten und bei hohen elektrischen Frequenzen (Bild 1). [3, 7–9]

Die hierfür erforderliche Aufteilung der Leiter und die damit einhergehende Komplexität der Wicklungsgeometrie wirken sich jedoch unmittelbar auf die fertigungstechnische Umsetzung aus. Segmentierte Leiterkonzepte erhöhen die Anzahl der Teileiter, Kontaktierungsstellen und Fügeoperationen, wodurch neue Anforderungen an die Prozesssicherheit, Reproduzierbarkeit und die industrielle Skalierbarkeit entstehen. Insbesondere für Verbundleiter, die aus einem Strang mehrerer Einzelleiter bestehen, fehlt bislang eine durchgängige, wirtschaftliche und robust beherrsch-



bare Fertigungslösung, mit der sich segmentierte Hairpin-Steckspulen in großem Maßstab herstellen lassen.

Vor diesem Hintergrund stellt insbesondere die Fertigung segmentierter Hairpin-Steckspulen eine zentrale Herausforderung dar. Durch die Aufteilung der Leiter ergeben sich neue Anforderungen an geeignete Fügetechnologien und die Prozessführung. Neben einer hohen Prozesssicherheit müssen dabei insbesondere reproduzierbare Verbindungsqualitäten und eine wirtschaftliche Skalierbarkeit gewährleistet sein. Nur so lassen sich die elektromagnetischen Po-

tenziale segmentierter Verbundleiter zuverlässig in industriellen Traktionsantrieben nutzen.

Stand der Technik

Die Fertigung von Hairpin-Statoren ist durch eine automatisierte Prozesskette gekennzeichnet, in der formstabile, mit Polyamid (PAI), Polyetheretherketon (PEEK) oder Polyimid (PI) isolierte Kupferflachdrähte zu einer Wicklung umgeformt werden. Innerhalb der Prozesskette für die Fertigung elektrischer Traktionsmotoren stellt die Herstellung des Stators aufgrund der Vielzahl an Prozessschritten einen zeit- und kostenintensiven Fertigungsschritt dar und besitzt daher eine hohe Relevanz für Prozessoptimierungen in der industriellen Serienproduktion. Ein Hairpin-Stator besteht aus einem Statorblechpaket, einer Nutisolation, einer Wicklung aus isolierten Kupferflachdrähten sowie einem Imprägnierharz. [10]

Wie in Bild 2 dargestellt, umfasst die konventionelle Fertigung von Hairpin-Statoren im Wesentlichen die Schritte Formgebung, Setzen und Einbringen, Aufweiten und Twisten, Kontaktieren sowie Imprägnieren. Bei der Formgebung wird der Flachdraht gerichtet, abisoliert, zugeschnitten und durch mehrstufige Biegeprozesse in die gewünschte Hairpin-Geometrie überführt. Die einzelnen Hairpin-Steckspulen werden in einem Setznest zu einem Hairpin-Korb vorgesetzt und anschließend axial in das bereits mit Nutisolutionspapier isolierte Blechpaket eingebracht. Nach dem Ein-

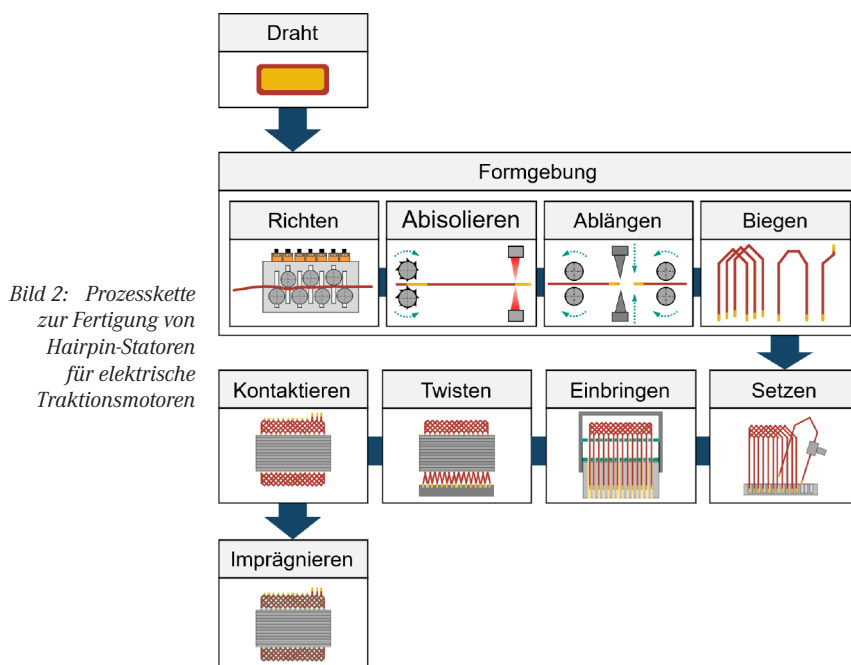


Bild 2: Prozesskette zur Fertigung von Hairpin-Statoren für elektrische Traktionsmotoren

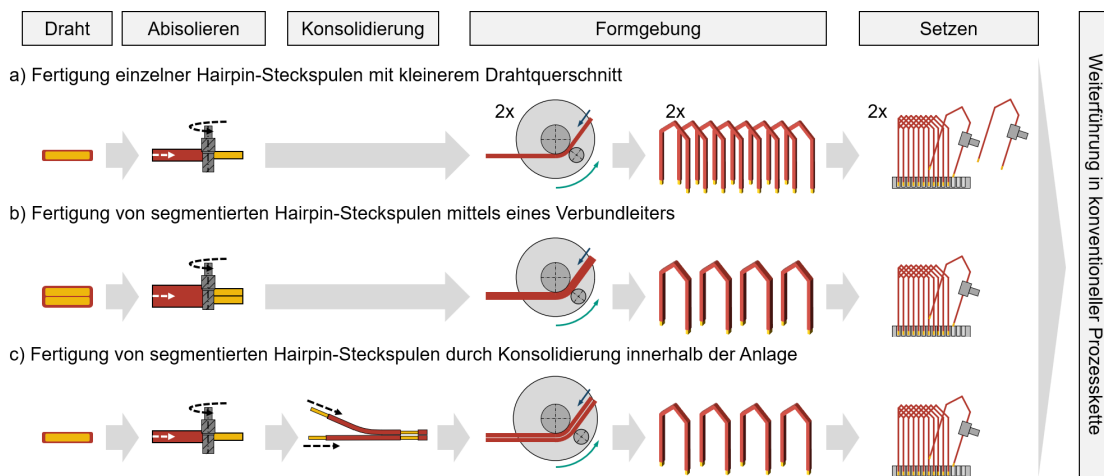


Bild 3: Prozessketten zur Fertigung von segmentierten Hairpin-Steckspulen

bringen werden die Leiterenden aufgeweitet und getwistet, um die notwendige Geometrie für die elektrische Verschaltung zu erzeugen. Die elektrische Kontaktierung erfolgt anschließend durch Laserschweißen der abisolierten Hairpin-Enden. Im letzten Schritt wird die Wicklung mittels Träufel- oder Tauchverfahren imprägniert. Diese Sekundärisolation verbessert insbesondere die mechanische Stabilität gegenüber Vibrationen, die Wärmeabfuhr sowie die Hochspannungs- und Teilentladungsfestigkeit der Wicklung. [10–12]

Ein wesentlicher Vorteil dieses etablierten Fertigungskonzepts liegt im hohen Automatisierungsgrad sowie in der guten Reproduzierbarkeit der Wicklungsgeometrie. Gleichzeitig ist die Hairpin-Technologie mit einem vergleichsweise hohen Fertigungsaufwand verbunden und reagiert sensibel auf Schwankungen in der Prozesskette, welche einen unmittelbaren Einfluss auf den Isolationsfehler oder die Lebensdauer des Stators haben können. Somit ist die konventionelle Hairpin-Prozesskette zwar industriell etabliert, bildet aber zugleich einen engen prozesstechnischen Rahmen für die Integration neuer Leiterkonzepte.

Lösungsansatz und Herausforderungen

Die im Kapitel „Stand der Technik“ vorgestellte Prozesskette für die Fertigung von Hairpin-Statoren ist auf vergleichsweise massive Flachleiter ausgelegt und erhöht bei einer Änderung der Leiteranzahl pro Nut den Fertigungsaufwand

deutlich. Daher entstehen bei der Fertigung von Statoren mit segmentierter Hairpin-Wicklung zusätzliche Anforderungen an Herstellung und Handhabung, wobei diese in mehrere Varianten unterteilt werden können. Die Unterscheidung der Varianten erfolgt anhand einer notwendigen Zusammenführung der elektrisch voneinander getrennten Teileiter. Aus fertigungstechnischer Sicht können die drei in Bild 3 dargestellten Varianten unterschieden werden: Herstellung einzelner Hairpin-Steckspulen mit kleinerem Querschnitt und Assemblierung in einem Setznest, die Verwendung eines bereits fertig konsolidierten Verbundleiters sowie eine Konsolidierung einzelner Flachdrähte zu einem Verbundleiter innerhalb der Anlage, welcher im Anschluss wie ein einzelner Flachdraht verarbeitet werden kann.

Die erste Variante für eine Prozesskette zur Fertigung segmentierter Hairpin-Steckspulen besteht aus der Fertigung mehrerer einzelner Hairpin-Steckspulen aus einem dünnen Drahtquerschnitt und ist in Bild 3a dargestellt. Der Vorteil dieses Konzepts liegt darin, dass auf die bereits etablierte Hairpin-Prozesskette zurückgegriffen werden kann. Gleichzeitig erhöht sich jedoch die Anzahl unterschiedlicher Leiter beziehungsweise Drahtvarianten, wodurch der anlagenseitige Aufwand für die Herstellung deutlich erhöht wird und in Abhängigkeit des gewählten Wickschemas mindestens eine zusätzliche Drahtvariante innerhalb einer Produktionslinie verarbeitet werden muss. Außerdem nehmen die Handhabungsschritte zur Assemblierung des Hairpin-Korbes deutlich zu. Der Einsatz

eines bereits vorgefertigten Drahtes, wie in Bild 3b dargestellt, ermöglicht hingegen die Verwendung einer einheitlichen Anlagentechnik, da die Querschnitte der Vollleiter und Verbundleiter derart gewählt werden können, dass diese übereinstimmen. Somit können im Vergleich zur Assemblierung einzelner dünner Hairpin-Steckspulen die Zahl separater Handhabungsschritte reduziert und bestehende Fertigungsschritte prinzipiell weitgehend beibehalten werden. Gleichzeitig zeigt eine durchgeführte Literatur-, Patent- und Marktrecherche, dass ein industriell hergestellter Verbundleiter derzeit nicht verfügbar ist. Darüber hinaus stellt die rückstandsfreie Entfernung der Isolationsschicht zwischen den Einzelleitern aufgrund des kleinen Spaltmaßes eine Herausforderung dar. Bei der Konsolidierung einzelner Flachdrähte innerhalb einer Anlage zu einem Verbundleiter, wie es Bild 3c zeigt, werden mehrere Einzelleiter zunächst separat bereitgestellt und innerhalb der Fertigungsanlage zu einem Verbundleiter zusammengeführt und gefügt. Im Unterschied zum bereits konsolidierten Verbundleiter würde die Bündelung somit unmittelbar im Produktionsprozess erfolgen. Dafür ist jedoch eine Konsolidierungseinheit erforderlich, welche die Einzeldrähte zu einem Verbund fügt. Aufgrund der Inline-Konsolidierung wird somit nur der Biegeprozess zur Hairpin-Steckspule beeinflusst, da die Einzeldrähte vor dem Fügeschritt gerichtet und abisoliert werden können.

Eine zentrale Herausforderung besteht derzeit darin, dass weder in der wissenschaftlichen Literatur noch in Pa-

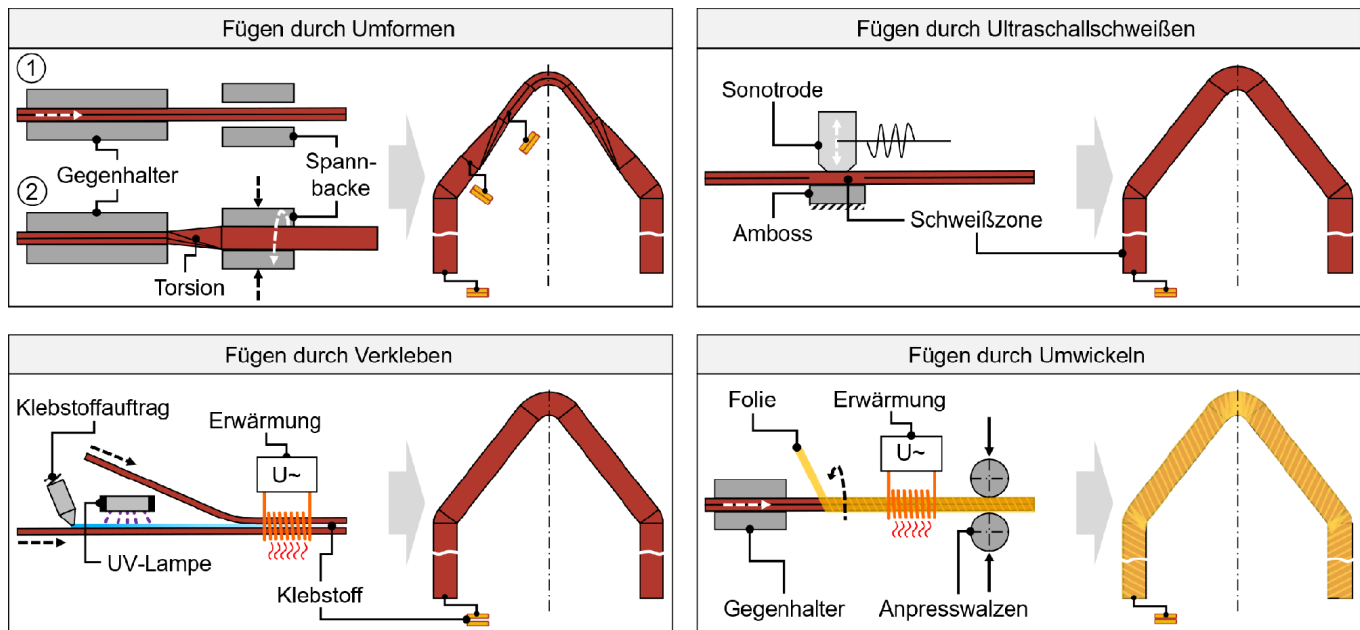


Bild 4: Fügeverfahren zur Herstellung von Verbundleitern für segmentierte Hairpin-Steckspulen

tenten eine eindeutig etablierte Herstellungsmethode für segmentierte Hairpin-Leiter beschrieben wird. Stattdessen werden unterschiedliche Verbundleiterkonzepte, Isolationsaufbauten und Bündelungsstrategien diskutiert, wodurch verschiedene Fügeverfahren für die Konsolidierung der Leiter betrachtet werden müssen. Daher ist es erforderlich, potenzielle Fügeverfahren zunächst grundlegend zu analysieren und systematisch hinsichtlich ihrer Eignung für einen Inline-Einsatz in konventionellen Hairpin-Fertigungsanlagen zu bewerten. Im Folgenden werden dazu vier Lösungsansätze für die Konsolidierung von einzelnen Flachleitern zu Verbundleitern betrachtet und deren industrielle Einsetzbarkeit bewertet.

Vorgehensweise

Zur Bewertung geeigneter Fügeverfahren für segmentierte Hairpin-Steckspulen wurden potenzielle Verfahren systematisch hinsichtlich ihrer Eignung untersucht. Im Vordergrund standen dabei insbesondere die thermische und mechanische Belastung der Primärisolation, die erreichbare Verbindungsstabilität, die elektrische Trennwirkung zwischen den Teilleitern sowie die Integrierbarkeit in eine bestehende Hairpin-Prozesskette. Ziel war es, Verfahren zu identifizieren, mit denen mehrere

Teilleiter zu einem Verbundleiter konsolidiert und anschließend gemeinsam weiterverarbeitet werden können.

Ein erster betrachteter Ansatz ist das Fügen durch Umformen, welches in Bild 4 dargestellt ist. Hierbei besteht ein wesentlicher Vorteil darin, dass die Fügeverbindung formschlüssig, ohne einen zusätzlichen Fügeworkstoff und Wärmeinput, auskommt. Die durchgeführten Versuche zeigen, dass sich durch eine geeignete Kombination von Biege- und Torsionsoperationen ein vollständiger Lagenwechsel der Teilleiter realisieren lässt. Damit eröffnet dieser Ansatz grundsätzlich die Möglichkeit, innerhalb einer Hairpin-Steckspule eine Transponierung umzusetzen, wodurch Kreisstromverluste reduziert werden können. Dem stehen jedoch erhebliche Nachteile gegenüber. Die notwendige plastische Verformung führt lokal zu hohen Dehnungen und Relativbewegungen zwischen den Leitern, wodurch die Primärisolation beschädigt werden kann. In den experimentellen Untersuchungen konnte bei einer überlagerten Biege- und Torsionsbelastung zudem keine ausreichend stabile, formschlüssige Verbindung zwischen den Leitern erzeugt werden.

Als weiteres Verfahren wurde das Fügen durch Ultraschallschweißen betrachtet. Grundsätzlich ist dieses Verfahren

aus fertigungstechnischer Sicht attraktiv, da kurze Prozesszeiten und eine prinzipiell gute Automatisierbarkeit erreichbar sind. Bei den eingesetzten Flachleitern ergibt sich jedoch der entscheidende Nachteil, dass die dünnen, polymerbasierten Isolationsschichten durch die eingeleiteten mechanischen Schwingungen und die lokale Erwärmung beschädigt, verdrängt oder partiell zerstört werden. Dadurch wird die Primärisolation des Flachdrahtes irreparabel beschädigt, so dass die erforderlichen Isolationseigenschaften nicht mehr gewährleistet werden können. Somit ist das Fügen durch Ultraschallschweißen nicht geeignet.

Ein deutlich vielversprechenderes Fügeverfahren stellt hingegen das Fügen durch Verkleben dar. Der wesentliche Vorteil liegt darin, dass die Verbindung ohne hohe mechanische Presskräfte und mit geringer thermischer Belastung unterhalb der Glasübergangstemperaturen des eingesetzten Isolationswerkstoffes für die Primärisolation hergestellt werden kann. Gleichzeitig hängt die Eignung des Verfahrens stark vom eingesetzten Klebstoff ab, sodass zwischen unterschiedlichen Klebesystemen, die eine ausreichende Flexibilität aufweisen müssen, eine Differenzierung erfolgen muss. Ein weiteres Fügeverfahren stellt das Fügen durch Umwickeln mit thermisch

aktivierbaren Folien, insbesondere mit Polyimid-Verbundfolien, dar. Dieser Ansatz verbindet die mechanische Bündelung der Leiter mit einer zusätzlichen, stoffschlüssigen Fixierung, welche durch eine thermische Aktivierung zwischen Folie und Primärisolation des Flachdrahtes zustande kommt. Der Vorteil dieses Ansatzes liegt somit in einer vergleichsweise einfachen Prozessintegration und in der zusätzlichen elektrischen Isolation der Fügestelle. Einen Nachteil hingegen stellt das Umformverhalten der applizierten Folie dar, da während des Biegevorgangs an Innenradien Aufwerfungen und an Außenradien Risse entstehen können.

Zusammenfassung und Ausblick

Basierend auf den im Projekt gewonnenen Erkenntnissen stellen Klebeverbindungen und thermisch aktivierbare Folien die vielversprechendsten Ansätze dar, da sie eine elektrisch isolierende Verbindung mehrerer Teilleiter ermöglichen und sich zugleich in bestehende Hairpin-Prozessketten integrieren lassen. Im weiteren Verlauf sollen daher diese Verfahren genauer hinsichtlich ihres Biegeverhaltens bei der Formgebung zu Hairpin-Steckspulen und der resultierenden elektrischen Eigenschaften untersucht werden.

Literatur

- Grumbach, M.; Locher, A.; Kilian, S.: Paradigm Change in the Driveline – Electrification as the Standard. MTZ Worldw 82 (2021) 4, Art. Nr. 4
DOI:10.1007/s38313-021-0625-3
- Hagedorn, J.; Sell-Le Blanc, F.; Fleischer, J.: Handbuch der Wickeltechnik für hoch-effiziente Spulen und Motoren. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg 2016
DOI:10.1007/978-3-662-49210-9
- Mao, C.; Yan, Y.; Ren, H.; Li, C.: Magnetic Field Distribution-Based Design Optimization of Variable Cross-Section Windings for Flat-Wire Motors in New Energy Vehicles. Int.J Automot. Technol., Mai 2026,
DOI:10.1007/s12239-026-00475-1
- Doppelbauer, M.: Grundlagen der Elektromobilität: Technik, Praxis, Energie und Umwelt. Springer Fachmedien, Wiesbaden 2025
DOI:10.1007/978-3-658-44828-8
- Ostović, V.: The Art and Science of Rotating Field Machines Design: A Practical Approach. Springer International Publishing, Cham 2017
DOI:10.1007/978-3-319-39081-9
- England, M.; Dotz, B.; Ponick, B.: Evaluation of Winding Symmetry and Circulating Currents of Hairpin Windings. In: Proceedings of the 2021 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), Mai 2021, S. 1–8
DOI:10.1109/IEMDC47953.2021.9449604.
- Pastura, M.; Notari, R.; Nuzzo, S.; Barater, D.; Franceschini, G.: AC Losses Analysis and Design Guidelines for Hairpin Windings With Segmented Conductors. IEEE Transactions on Transportation Electrification 10 (2024) 1, S. 33–41
DOI:10.1109/TTE.2023.3254667
- Preci, E. et al.: Segmented Hairpin Topology for Reduced Losses at High-Frequency Operations. IEEE Transactions on Transportation Electrification 8 (2022) 1, S. 688–698
DOI:10.1109/TTE.2021.3103821
- Ju, X.; Cheng, Y.; Du, B.; Yang, M.; Yang, D.; Cui, S.: AC Loss Analysis and Measurement of a Hybrid Transposed Hairpin Winding for EV Traction Machines. IEEE Transactions on Industrial Electronics 70 (2023) 4, S. 3525–3536
DOI:10.1109/TIE.2022.3179571
- Wirth, F.J.: Prozessgeregelte Formgebung von Hairpin-Steckspulen für elektrische Traktionsmotoren. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe 2024
- Hagedorn, J.; Sell-Le Blanc, F.; Fleischer, J.: Handbuch der Wickeltechnik für hoch-effiziente Spulen und Motoren. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg 2016
DOI:10.1007/978-3-662-49210-9
- Wirth, F.J.; Fraider, F.; Gerner, J.; Hausmann, L.; Fleischer, J.: Defect Types and Mechanisms of Hairpin Coils in Manufacturing of Electric Traction Motors. In: Elektromechanische Antriebssysteme 2023; 9. Fachtagung (VDE OVE), Wien, Austria, Nov. 2023, S. 312–318

Die Autoren dieses Beitrags

Johannes Gerner, M.Sc., ist seit dem Ende seines Maschinenbaustudiums am KIT als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am wbk Institut für Produktionstechnik in der Forschungsgruppe Agile Produktionsanlagen tätig und beschäftigt sich mit der Produktionstechnik für die Elektromobilität.

Jonas Haag, B.Sc., arbeitet neben seinem Maschinenbaustudium als studentischer Mitarbeiter am wbk Institut für Produktionstechnik im Forschungsfeld Produktionstechnik für die Elektromobilität.

Sebastian Henschel, M.Sc., ist Obergeringenieur der Forschungsgruppe Agile Produktionsanlagen des wbk Institut für Produktionstechnik.

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer leitet am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) den Bereich Maschinen, Anlagen und Prozessautomatisierung des wbk Institut für Produktionstechnik.

Abstract

Manufacturing Approaches for Segmented Hairpin Coils of Electric Traction Motors.

Hairpin windings enable electric traction motors to be more efficient than those with conventional, round wire windings. However, at high rotational speeds, frequency-dependent AC losses limit this advantage. One promising approach to reducing these losses is the segmentation of the conductors near the air gap. The research project BendE aims to develop suitable manufacturing and processing methods for segmented hairpin coils.

Danksagung

Die Autoren danken dem Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus des Landes Baden-Württemberg für die Förderung des Vorhabens im Rahmen des Programms Invest BW (Az. BW7_1208/02). Zudem gilt der Wafios AG als industriellem Projektpartner besonderer Dank für die Zusammenarbeit im Projekt. Des Weiteren bedanken sich die Autoren bei den Firmen ASTA Elektrodraht GmbH, DELO Industrie Klebstoffe GmbH & Co. KGaA und Onity Electronics Inc. für die Unterstützung des Projektes durch technische Beratungen und Versuchsmaterialien.

Schlüsselwörter

Elektromobilität, Elektromotor, Hairpin-Technologie, Segmentierte Hairpin-Steckspule, BendE

Keywords

Electric Mobility, Electric Motor, Hairpin Technology, Segmented Hairpin Coils, BendE

Bibliography

DOI:10.1515/zwf-2026-1111
ZWF 121 (2026) 9; page 630 – 634
Open Access. © 2026 bei den Autoren, publiziert von De Gruyter.  Dieses Werk ist lizenziert unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz.
ISSN 0947-0085 · e-ISSN 2511-0896