

Optimierte Wicklungstopologien für die Hairpin-Technologie

Laserkontakteieren von Vierfachkupferflachdrähten

D. Merz, S. Schabel, L. Schmid, J. Fleischer

ZUSAMMENFASSUNG Die Hairpin-Technologie, häufig verwendet in der Produktion elektrischer Traktionsmotoren, zeigt bei hohen Drehzahlen deutliche Effizienznachteile aufgrund von Skin- und Proximityeffekten. Im Rahmen des Verbundforschungsprojekts *KontaktE* wird der Laserkontakteierprozess innovativer Wicklungstopologien und Leitertechnologien untersucht und optimiert. Diese Studie präsentiert die Ergebnisse experimenteller Untersuchungen zur Identifikation idealer Parameterfenster für das Laserkontakteieren von Vierfachschweißungen.

STICHWÖRTER

Lasertechnik, Schweißen, Qualitätssicherung

Laser contacting of quadruple copper flat wires – Optimized winding topologies for hairpin technology

ABSTRACT Hairpin technology, commonly used in the production of electric traction motors, has significant efficiency drawbacks at high rotational speeds due to skin and proximity effects. The „KontaktE“ collaborative research project investigates and optimizes the laser contacting process for innovative winding topologies and conductor technologies. This study presents the results of an experimental design that identifies an ideal parameter window for producing quadruple welds.

1 Einleitung und Motivation

Mit dem weltweiten Übergang zur Elektromobilität erlebt die Automobilindustrie eine signifikante Transformation. In diesem Zusammenhang ist die Entwicklung hochleistungsfähiger elektrischer Traktionsmotoren von zentraler Bedeutung. Diese Motoren müssen nicht nur kosteneffizient, sondern auch in hoher Qualität und großer Stückzahl produzierbar sein, um den wachsenden Marktanforderungen gerecht zu werden. In der Statorproduktion hat sich die Hairpin-Technologie als vorherrschendes Verfahren etabliert. Diese Technologie wird bei nahezu allen deutschen Automobilherstellern und -zulieferern, unabhängig vom eingesetzten Maschinentyp (permanent- und fremderregte Synchronmaschine sowie Asynchronmaschine), angewandt [1]. Sie basiert auf der sequenziellen Verarbeitung massiver Flachdrähte, die im Regelfall aus einem Kupferleiter sowie einer PEI/PAI- oder PEEK-basierten Primärisolierung bestehen, und ermöglicht durch die Parallelisierung von Prozessschritten eine hochautomatisierte und qualitativ reproduzierbare Fertigung.

Obwohl die Hairpin-Technologie in Bezug auf Produktivität und Qualität der Wicklungen viele Vorteile bietet, weist sie auch bedeutende Nachteile auf, insbesondere bei hohen Drehzahlen. Die höheren Kupferverluste bei Drehzahlen über 10 000 U/min führen beispielsweise zu signifikanten Effizienzeinbußen [2, 3]. Diese Verluste werden vor allem durch Stromverdrängungseffekte wie Skin- und Proximity-Effekte verursacht, die bei derart hohen Drehzahlen verstärkt auftreten [4]. Um diese Herausforderungen zu adressieren, wurden spezifische Lösungsansätze entwickelt, wie etwa der Einsatz optimierter Lagenaufbauten sowie dünnerer

Leiterquerschnitte im Bereich des Zahnkopfes, welche die drehzahlabhängigen Verluste erheblich verringern können. Zusätzlich ermöglicht der Einsatz von Aluminium als Leitermaterial eine weitere Reduktion der Wechselstromverluste, trotz seiner geringeren elektrischen Leitfähigkeit im Vergleich zu Kupfer [4].

Die Fügequalität der Schweißverbindungen trägt wesentlich zur Funktionsfähigkeit und einer hohen Lebensdauer des elektrischen Traktionsmotors bei. Bereits eine einzelne fehlerhafte Schweißverbindung kann zum Ausfall des gesamten Systems führen. Deshalb ist der Prozessschritt des Kontaktierens als elementar für die Qualität des fertigten Stators anzusehen.

Im Verbundforschungsvorhaben „KontaktE“ kooperieren die Gehring Technologies GmbH + Co. KG und das wbk Institut für Produktionstechnik am Karlsruher Institut für Technologie, um innovative Produktionstechnologien für das automatisierte Laserkontakteieren effizienter Wicklungstopologien und ressourcenschonender Leitertechnologien sowie die zugrunde liegenden Schweißstrategien zu erarbeiten. Diese Forschungsarbeiten sind exemplarisch für die Bestrebungen, die Effizienz und Produktivität in der Fertigung elektrischer Traktionsmotoren zu steigern und so den Herausforderungen der Elektromobilität wirksam zu begegnen.

Im Gegensatz zu konkurrierenden Produktionstechnologien, wie der Flachdrahtwellenwicklung, die auch auf einer Erhöhung der Leiteranzahl in der Nut der elektrischen Maschine basieren, zielen die im Forschungsvorhaben KontaktE zu erarbeitenden Produktionslösungen darauf ab, bestehende Prozessketten der Hairpin-Technologie in der Automobilindustrie zu bewahren und

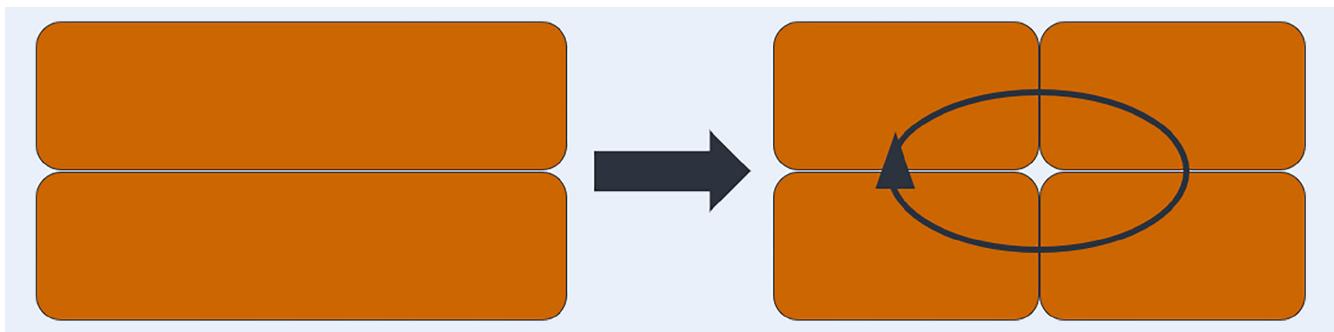


Bild 1. Vergleich einer konventionellen Zweifach-Hairpin-Schweißanordnung (links) und Vierfach-Schweißanordnung, inklusive Darstellung des Laserverfahrwegs (rechts). *Grafik: eigene Darstellung*

von den produktseitigen Vorteilen neuartiger Wicklungstopologien zu profitieren.

In diesem Beitrag werden Schweißstrategien für Vierfachschweißung untersucht, bei der im Gegensatz zur herkömmlichen Methode, welche zwei Kupferflachdrähte verwendet, vier Drähte miteinander verschweißt werden. Eine schematische Darstellung zeigt **Bild 1**.

2 Stand der Technik

Nach aktuellem Stand der Wissenschaft und Technik sind die drei größten Herausforderungen beim laserbasierten Fügen von Kupferleitern die Reproduzierbarkeit des Prozesses, eine geringe Porosität der Schweißverbindungen sowie eine geringe Spritzerbildung. Auf die Qualität der Schweißverbindung hat neben der Positionierung beziehungsweise Ausrichtung der Spulenenden insbesondere die Eingangsqualität der Kontaktierstellen einen großen Einfluss. Hier sind unter anderem der Drahtquerschnitt nach dem Abisolieren, Isolationsrückstände oder Verunreinigungen der zu kontaktierenden Flächen als Einflussgrößen zu benennen. Ebenso sind die Geometrie der Spulenenden, die Wahl der Schweißstrategie sowie die Spannkraft und das Thermomanagement der Spannmaskierung signifikante Einflussfaktoren.

Ansätze zur KI-gestützten Fehlerkorrektur wurden auf wissenschaftlicher Seite unter anderem durch *Vater et al.* beschrieben [5, 6]. Die Möglichkeit der berührungslosen Kontaktierung, der geringe Wärmeeintrag sowie die im Vergleich zu Technologiealternativen kurzen Taktzeiten des Laser- und Elektronenstrahlstrahlschweißens sind die wesentlichen Vorteile der Verfahren. Gleichzeitig hängt die Schweißnahtqualität strahlbasierter Verfahren vor allem von der Materialzusammensetzung, den Oberflächeneigenschaften, der korrekten Vorpositionierung der Komponenten zueinander sowie den gewählten Schweißparametern ab, die nach dem Stand der Technik in umfangreichen experimentellen Versuchsreihen ermittelt werden müssen. Außerdem sind die hohe Wärmeleitfähigkeit der für die Wicklung verwendeten Kupfermaterialien sowie die geringe Absorptionsfähigkeit des infraroten Laserlichts mit einer typischen Wellenlänge von 1030 nm eine besondere Herausforderung bei der Kontaktierung. Deshalb werden in der aktuellen industriellen Entwicklung vor allem grüne und blaue Laser mit deutlich höherer Absorptionsleistung und damit verbesserter Schweißbarkeit von Kupfer und Aluminium entwickelt [7], deren Einsatzspektrum aufgrund der begrenzten Leistung der Strahlquellen jedoch noch sehr eingeschränkt ist.

Auf wissenschaftlicher Seite wurde in der Vergangenheit insbesondere der laserbasierte Schweißprozess zur Kontaktierung

von Hairpin-Steckspulen untersucht. Dabei lag der Fokus auf der Analyse der grundsätzlichen Prozesseinflüsse sowie der Entwicklung geeigneter Auswertemethoden zur prozessintegrierten Charakterisierung der Schweißnahtqualität. *Gläsel et al.* [8] zeigen grundlegende Untersuchungen zum Einfluss der Schweißparameter einer infraroten Laserstrahlquelle auf die Kontaktierqualität von Hairpin-Steckspulen sowie Auswirkungen auf den resultierenden elektrischen Kontaktwiderstand. In aktuellen Analysen wurde zudem der Einfluss der Prozessparameter einer gepulsten Nahinfrarot-Laserstrahlquelle auf die Morphologie, die mechanische Festigkeit sowie den Kontaktwiderstand beim Schweißen von Hairpin-Steckspulen von *Dimatteo et al.* untersucht [9]. Im Rahmen wissenschaftlicher Forschung sind neben den Arbeiten zur allgemeinen Prozesscharakterisierung verschiedene Ansätze zur Fehlererkennung und Bewertung der Schweißnahtqualität durch den Einsatz von Methoden des maschinellen Lernens von *Mayr et al.* [10, 11] und *Vater et al.* [5, 6, 12, 13] vorgestellt worden.

3 Methodisches Vorgehen

Die Optimierung von Vierfachschweißungen erfolgt auf der Laserschweißanlage „Gehring SWD 1000 SP“ bei Gehring Technologies. Die Schweißprozesse werden mit einem „TruDisk 6001 Laser“ (Trumpf Laser GmbH) durchgeführt, der mit der Optik „PFO33-2“ ausgestattet ist. Diese Optik besitzt eine Fokussierbrennweite von 255 mm und erzeugt einen Laserstrahldurchmesser von 170 µm. Die Wellenlänge des Lasers beträgt 1030 nm und liegt damit im infraroten Bereich des elektromagnetischen Spektrums.

Zur Vorbereitung der Schweißexperimente wurde ein Kupferflachdraht mit einem Querschnitt von 1,3 mm * 2,75 mm und einer Länge von 10 cm verwendet. Von jedem Draht wurde an einem Ende eine umlaufende Fläche mit 1 cm Breite abisoliert. Die Drähte werden auf einer „FMU 40E“ (Wafios AG) automatisiert abisoliert und konfektioniert, wodurch eine flache Trennfläche für die Schweißung entsteht. Die Anordnung der vier Kupferdrähte ist in **Bild 1** abgebildet.

Zur Ermittlung der optimalen Schweißparameter wurde ein zentral zusammengesetzter Versuchsplan aufgestellt. Laut dieser Versuchsplanung wurden die Laserleistung und die Scangeschwindigkeit variiert, um den Energieeintrag in das Material zu steuern. Dies war entscheidend, um eine hochwertige Fügeverbindung zu erzielen. Die spezifischen Einstellungen an jedem Punkt des Versuchsplans, einschließlich des Gesamtenergieeintrags sind in **Bild 2** festgehalten. Der Laser fuhr die Materialoberfläche in

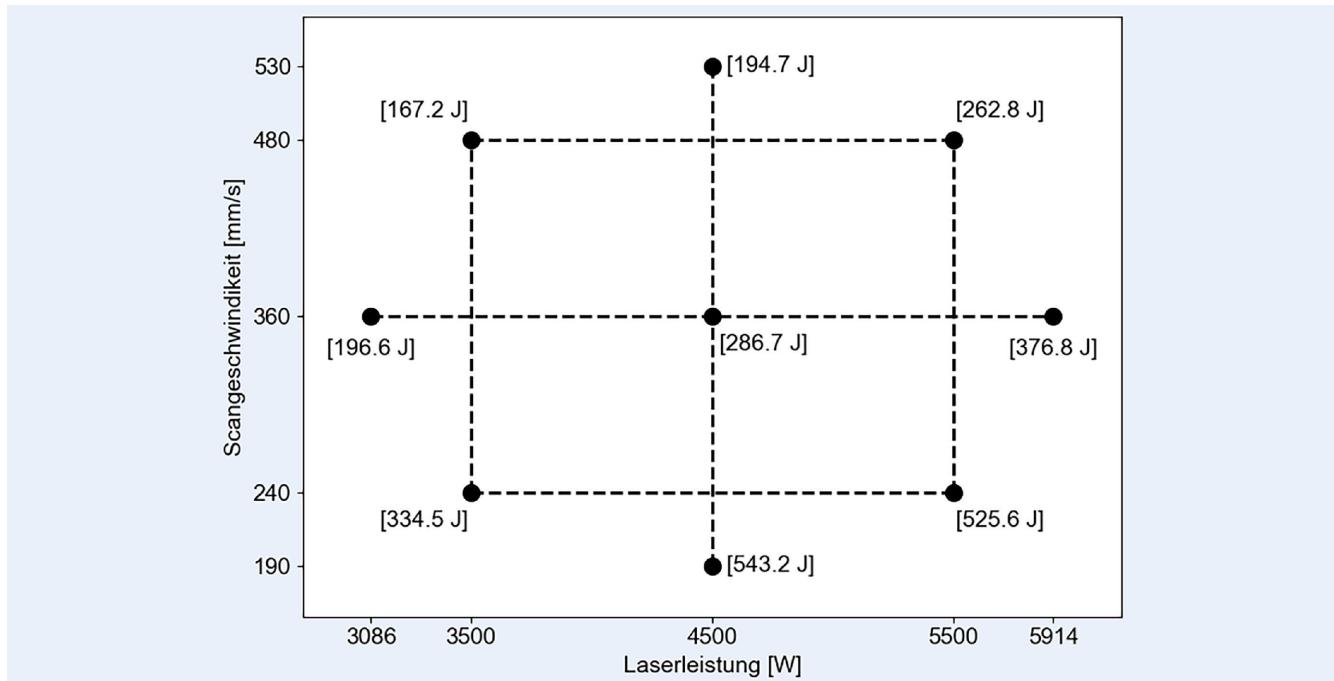


Bild 2. Zentral zusammengesetzter Versuchsplan, dargestellt mit den jeweiligen Energieeinträgen in eckigen Klammern an jedem Messpunkt.
Grafik: eigene Darstellung

einer elliptischen Bahn (siehe Bild 1) mit einem Hauptachsenradius von 1,7 mm und einem Nebenachsenradius von 0,6 mm ab, welche dreimal sequenziell durchlaufen wurde.

Die Qualität der Schweißverbindungen wurde anhand der Zugfestigkeit bewertet. Die Zugfestigkeit wurde durch einen standardisierten Zugversuch, orientiert an der ISO 14270 2016–11, bestimmt. **Bild 3** zeigt eine schematische Darstellung zur Vorbereitung der Proben, einschließlich der speziell angefertigten Spannbacken für die manuelle Formgebung der Proben. Dabei wurden die geschweißten Kupferflachdrähte über die lange Kante mit einem Radius von 15 mm um 90° gebogen.

Beim Einspannen in die Universalzugprüfmaschine „TH 10 RetroLine“ (ZwickRoell GmbH) wurden auf einer Seite die zwei Kupferflachdrähte jeweils an der langen Seite in die Zugprüfmaschine eingespannt. Das Ergebnis der Zugprüfungen wird als Kraft in Newton angegeben. Da die Anbindungsquerschnitte bei den Versuchen sehr unterschiedlich waren und dadurch keine vergleichbare Spannung angegeben werden kann, wird im Weiteren von der Zugfestigkeit gesprochen.

Von besonderer Bedeutung ist die Form der Schweißnaht sowie die Integrität der Isolierung am Übergang zwischen isoliertem und abisolierterem Bereich, um Schäden wie Anschmelzungen oder Blasenbildung zu vermeiden.

4 Auswertung des Versuchsplans

Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen zeigen den Zusammenhang zwischen der Zugfestigkeit und dem Energieeintrag. Das in **Bild 4** dargestellte Diagramm nutzt gestrichelte vertikale Linien, um die Energieeinträge zu markieren, zu denen die gezeigten Probenbilder korrespondieren.

Die Ergebnisse können in drei spezifische Energieeintragsbereiche klassifiziert werden.

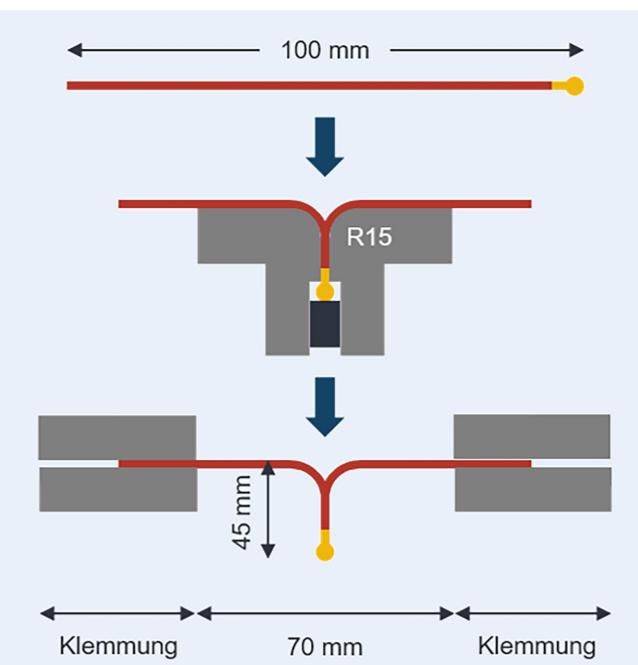


Bild 3. Schematische Darstellung der Probenvorbereitung: Geschweißtes Hairpin-Paar/Quadrupel (oben); manuell gebogenes Hairpin-Paar/Quadrupel (Mitte); Einspannung des Hairpins in die Zugprüfmaschine (unten).
Grafik: eigene Darstellung

- Niedriger Energiebereich (160 bis 200 J): In diesem Bereich ist der Energieeintrag unzureichend, was durch die geringe Zugfestigkeit von < 30 N bis zum Bruchpunkt bestätigt wird. Die Schweißverbindungen sind lediglich oberflächlich, was sich in einer minimal aufgeschmolzenen Zone und einer kaum sichtbaren Wärmeeinflusszone widerspiegelt. Die visuellen

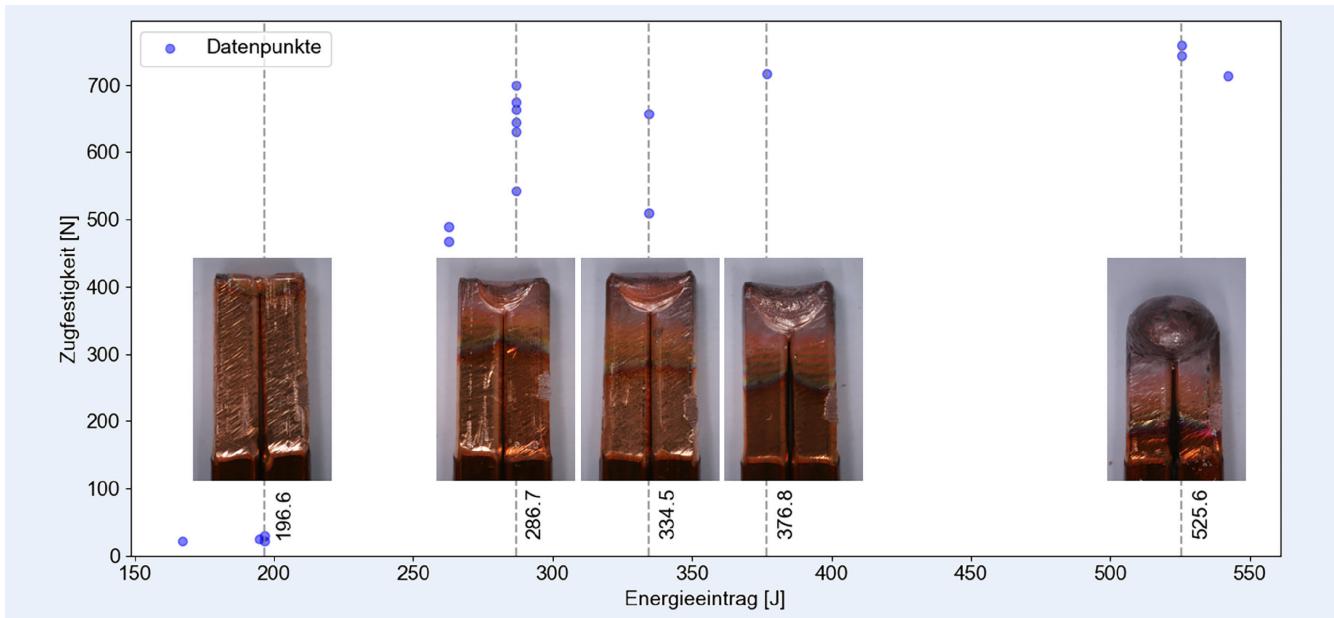


Bild 4. Auftragung der Zugfestigkeit gegenüber des absoluten Energieeintrags mit fünf Probenbildern zugeordnet zu den berührenden gestrichelten vertikalen Linien. *Grafik: eigene Darstellung*

Befunde bestätigen, dass die Verbindungen in diesem Bereich unzureichend sind.

- Mittlerer Energieeintragsbereich (260 bis 380 J): Innerhalb dieses Bereichs zeigt sich eine flache Schweißnaht. Bei 287 J konnte nicht die gesamte Oberfläche der vier Hairpin-Enden aufgeschmolzen werden, jedoch führt ein Energieeintrag ab 335 J zu einem vollständigen Aufschmelzen der Oberflächen. Die Wärmeeinflusszone ist deutlicher ausgeprägt und vergrößert sich mit höherem Energieeintrag. Bei 377 J erhöht sich die Schweißnahttiefe weiter, bleibt jedoch flach, was diesen Bereich für Anwendungen geeignet macht, die eine flache Naht erfordern. Die Isolierung bleibt unbeschädigt, was zeigt, dass die Energieeinstellungen gut abgestimmt sind.
- Hoher Energiebereich (526 bis 550 J): In diesem Bereich verändert sich die Nahtform signifikant zu einer perlenähnlichen Struktur. Es wird deutlich mehr Material aufgeschmolzen, und die Wärmeeinflusszone geht bis nahe dem isolierten Bereich. So wird die Isolierung durch die hohen Temperaturen geschädigt. Es kommt zum Aufschmelzen der Isolierung und zur Blasenbildung. Die Erhöhung der Zugfestigkeit ist sehr gering. Obwohl die Zugfestigkeit sich leicht erhöht, ist der Energieeintrag als zu hoch anzusehen, da die Isolierung Schaden nimmt. Die vorliegenden Daten bestätigen, dass die Zugfestigkeit direkt vom Anbindungsquerschnitt abhängt, der seinerseits durch den Energieeintrag während des Schweißvorgangs bestimmt wird.

Bei unzureichendem Energieeintrag ist der Anbindungsquerschnitt gering, da nur wenig Material aufgeschmolzen wird. Dies führt zu einer niedrigeren Zugfestigkeit. Mit steigendem Energieeintrag erhöht sich der Anbindungsquerschnitt, bis er ein Plateau erreicht. Dieses Plateau stellt einen Sättigungspunkt dar, ab dem weitere Erhöhungen des Energieeintrags keinen signifikanten Einfluss mehr auf den Anbindungsquerschnitt haben, wie auch die vorgestellten Ergebnissen bestätigen konnten. Die Ergebnisse zeigen eine erkennbare Streuung der Messwerte, was eine sorgfältige Interpretation der Daten erforderlich macht. Am Mittelpunkt des Versuchsplans wurden sechs Proben angefertigt, um eine ver-

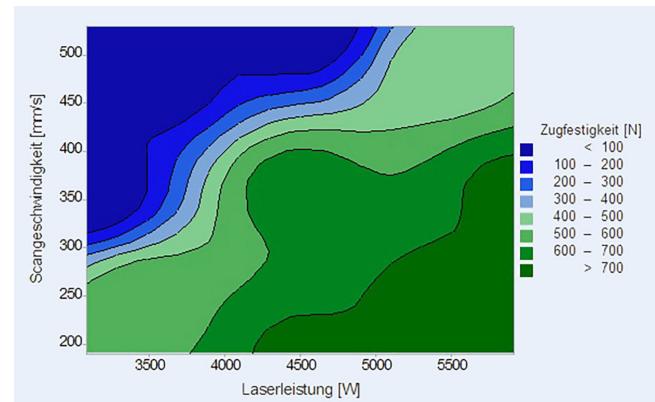


Bild 5. Konturdiagramm der Zugfestigkeit in Abhängigkeit von Laserleistung und Scangeschwindigkeit. *Grafik: eigene Darstellung*

lässlichere Schätzung der Streuungen im Prozess zu ermöglichen. Hierbei wurde eine durchschnittliche Zugfestigkeit von 642 N mit einer Standardabweichung von 49 N ermittelt. An anderen Punkten des Versuchsplans, an denen jeweils nur zwei Messwerte vorliegen, ist besondere Vorsicht bei der Auswertung geboten, da diese weniger verlässlich sein könnten.

Mehrere Faktoren tragen zur beobachteten Variabilität bei. Poren in der Schweißnaht beeinträchtigen den Anbindungsquerschnitt negativ und agieren als innere Kerben, welche die strukturelle Integrität der Verbindungen schwächen. Dies führt zu einer Reduktion der Zugfestigkeit. Des Weiteren führen die im Stand der Technik genannten Einflussgrößen zu weiteren Streuungen. Das Konturdiagramm in **Bild 5** illustriert die Verteilung der Zugfestigkeit in Abhängigkeit des durch die Laserleistung und Scangeschwindigkeit bestimmten Energieeintrags.

Der obere linke Bereich des Diagramms (blau) zeigt eine unzureichende Zugfestigkeit und wird daher für zukünftige Versuche ausgeschlossen. Ebenso sollte der untere rechte Bereich (dunkelgrün) vermieden werden, da hier trotz hoher Zugfestig-

keit aufgrund des zu hohen Energieeintrag die Isolierung am Übergang beschädigt wird.

Der mittlere rechte Bereich des Konturdiagramms bietet einen vielversprechenden Kompromiss zwischen hoher Nahtqualität und effizienter Verarbeitungszeit. Für weitere Versuche wird empfohlen, eine hohe Laserleistung bei mittlerer Scangeschwindigkeit zu verwenden, um eine optimale Balance zwischen Geschwindigkeit und Energieeintrag zu erzielen.

Auf Basis der vorgestellten Ergebnisse wird für die weiteren Validierungsversuche eine Scangeschwindigkeit von 320 mm/s kombiniert mit einer Laserleistung von 6000 W vorgeschlagen, was bei dem festgelegten Verfahrenweg einem Energieeintrag von etwa 430 J entspricht. Diese Einstellung soll überprüfen, ob dieser spezifische Energieeintrag ausreichend ist, um eine perlenförmige Schweißnaht zu erzeugen, welche Zugfestigkeit dabei erzielt wird und ob die Isolierung am Übergangsbereich intakt bleibt.

5 Ausblick

Die Analyse der experimentellen Daten deutet darauf hin, dass der optimale Bereich für den Energieeintrag, um die gewünschte Nahtform bei einer hohen Festigkeit zu erreichen, zwischen 400 Joule und 500 Joule liegt. Hier sind weitere Versuche notwendig, um diese Vermutung zu überprüfen.

Die Optimierung des Verfahrens des Lasers ist ein wesentlicher Bestandteil der aktuellen Forschungsarbeiten, um eine gleichmäßige perlenförmige Schweißnaht auf allen vier Hairpins sicherzustellen und Unregelmäßigkeiten wie das Überstehen der Naht an einer Seite zu minimieren. Im Verbundprojekt KontaktE ist geplant, zukünftig auch neuartige Wicklungstopologien zu erforschen, einschließlich Sechs- und Achtfachschweißungen sowie Mehrlagenflachdrähte. Darüber hinaus wird das Laserkontaktieren von Materialien mit inhomogenen Querschnitten und Materialien, insbesondere Kupfer und Aluminium, getestet.

Zusätzlich steht die Erforschung innovativer Leitertechnologien wie Aluminiumflachdraht und Litzenflachdraht im Fokus, um effektive Schweißstrategien für diese Konfigurationen abzuleiten. Diese Ansätze bieten neue Möglichkeiten, die Effizienz und die Qualität in der Fertigung elektrischer Traktionsmotoren zu steigern und tragen so zur weiteren Entwicklung in der Elektromobilitätsbranche bei.

DANKSAGUNG

Die Autoren danken dem Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus Baden-Württemberg für die Förderung des Projekts „KontaktE“ mit dem Förderkennzeichen BW1_1404/02 im Rahmen des Programms Invest BW. Darüber hinaus gilt der Dank dem Projektpartner Gehring Technologies GmbH + Co. KG für die gute Zusammenarbeit sowie der Bereitstellung der Anlageninfrastruktur zum Laserschweißen.

FÖRDERHINWEIS

Förderorganisation: Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus Baden-Württemberg Förder-Projekt-Kennungen: BW1_1404/02

L iteratur (

- [1] Stanek, R.; Flemming, J.; Kirchen, J. et al.: Wertschöpfungspotenziale von E-Motoren für den Automobilbereich in Baden-Württemberg. Themenpapier Cluster Elektromobilität Süd-West. Stand: Internet: www.e-mobilbw.de/fileadmin/media/e-mobilbw/Publikationen/Studien/Cluster_ESW_Themenpapier-Wertschoepfungspotenziale-von-E-Motoren-fuer-den-Automobilbereich-in-Baden-Wuerttemberg.pdf. Zugriff am 19.08.2024
- [2] Berardi, G.; Nategi, S.; Bianchi, N. et al.: A Comparison Between Random and Hairpin Winding in E-mobility Applications. 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2020), Singapore, 2020, pp. 815–820.
- [3] Du-Bar, C.; Wallmark, O.: Eddy Current Losses in a Hairpin Winding for an Automotive Application. 2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM), Alexandroupoli, 2018, pp. 710–716
- [4] Biela, J.: Wirbelstromverluste in Wicklungen induktiver Bauelemente. Stand: 2017. Internet: www.research-collection.ethz.ch/bitstream/handle/20.500.11850/604056/1/Wirbelstromverluste_J_Biela_2011.pdf. Zugriff am 19.08.2024
- [5] Vater, J.; Schamberger, P.; Knoll, A. et al.: Fault Classification and Correction based on Convolutional Neural Networks exemplified by laser welding of hairpin windings. 2019 9th International Electric Drives Production Conference (EDPC), Esslingen, Germany, 2019, pp. 1–8
- [6] Vater, J.; Kirschning, M.; Scheurenberg, D. et al.: Development of a Cloud- and Edge-Architecture for adaptive model weight optimization of a CNN exemplified by optical detection of hairpin welding. 2020 10th International Electric Drives Production Conference (EDPC), Ludwigsburg, Germany, 2020, pp. 1–7
- [7] Dold, E.-M.; Kaiser, E.; Pricking, S. et al.: Copper welding applications with a 2 kW cw laser in the green wavelength regime. Proceedings SPIE 11273, High-Power Laser Materials Processing: Applications, Diagnostics, and Systems IX, 112730D (2020), doi.org/10.1117/12.2546164
- [8] Gläsel, T.; Seefried, J.; Franke, J.: Challenges in the manufacturing of hairpin windings and application opportunities of infrared lasers for the contacting process. 2017 7th International Electric Drives Production Conference (EDPC), Würzburg, Germany, 2017, pp. 1–7
- [9] Dimatteo, V.; Ascari, A.; Faverzani, P. et al.: The effect of process parameters on the morphology, mechanical strength and electrical resistance of CW laser-welded pure copper hairpins. Journal of Manufacturing Processes 62 (2021), pp. 450–457
- [10] Mayr, A.; Lutz, B.; Weigelt, M. et al.: Evaluation of Machine Learning for Quality Monitoring of Laser Welding Using the Example of the Contacting of Hairpin Windings. 8th International Electric Drives Production Conference (EDPC), Schweinfurt, Germany, 2018, pp. 1–7
- [11] Mayr, A.; Hauck, L.; Meiners, M. et al.: Prediction of the Joint Cross-Section of Laser-Welded Hairpin Windings Based on 2D Image Data Using Convolutional Neural Networks. 2020 10th International Electric Drives Production Conference (EDPC), Ludwigsburg, Germany, 2020, pp. 1–7
- [12] Vater, J.; Pollach, M.; Lenz, C. et al.: Quality Control and Fault Classification of Laser Welded Hairpins in Electrical Motors. 2020 28th European Signal Processing Conference (EUSIPCO), Amsterdam, Netherlands, 2021, pp. 1377–1381
- [13] Vater, J.; Kirschning, M.; Knoll, A.: Closing the loop: Real-time Error Detection and Correction in automotive production using Edge-/Cloud-Architecture and a CNN. 2020 International Conference on Omni-layer Intelligent Systems (COINS), Barcelona, Spain, 2020, pp. 1–7

**D a v i d M e r z , M . S c .***Foto: KIT/wbk**david.merz@kit.edu**Tel. +49 1523 950 2608***S e b a s t i a n S c h a b e l , M . S c .****P r o f . D r . - I n g . J ü r g e n F l e i s c h e r**

wbk – Institut für Produktionstechnik

Karlsruher Institut für Technologie KIT

Kaiserstr 12, 76131 Karlsruhe

www.wbk.kit.edu**L a u r e n s S c h m i d M . S c .**

Gehring Technologies GmbH + Co. KG

Gehringstr. 28, 73760 Ostfildern

www.gehring-group.com

LIZENZ



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