

1 Einleitung

Derzeit¹ werden ca. 40 Prozent des weltweit erzeugten Stroms von Elektromotoren verbraucht.² Der Elektromotor und dessen industrielle und private Nutzung entspricht zweifelsohne dem gegenwärtigen Stand der Technik. Die erste Anwendung eines Elektromotors in der Praxis ist auf das Jahr 1834 zu datieren und auf den Physiker Moritz Hermann Jacobi zurückzuführen.³ Seither hat sich der Elektromotor stets weiterentwickelt und ist aus unserem Alltag nicht mehr wegzudenken. Im automobilen Antriebstrang war der Elektromotor bis vor wenigen Jahren jedoch kaum zu finden.⁴

Strengere gesetzliche Vorgaben für CO₂-Grenzwerte, Verknappung von fossilen Energieträgern und das sich ändernde Umweltbewusstsein auf Seiten der Bevölkerung stellen die Automobilbauer vor neue Herausforderungen. Die Kernherausforderung besteht dabei in der erfolgreichen Etablierung von Alternativen zum jahrzehntelang dominierenden Verbrennungsmotor.⁵ Der elektrische Antrieb ist hinsichtlich der Energieeffizienz und Leistungsdichte dem Verbrennungsmotor deutlich überlegen.⁶ Die technologische, marktwirtschaftliche und politische Lösung für den Individualverkehr liegt in der Elektromobilität.⁷ Prognosen rechnen bis 2030 mit Neuzulassungsszenarien von ca. 130 Millionen voll-, hybrid- und brennstoffzellenelektrischen Fahrzeugen auf dem europäischen Markt. Hieraus errechnet sich, unter der Annahme von 1,5 elektrischen Traktionsantrieben je Fahrzeug, ein potenzieller Bedarf von 195 Millionen Elektromotoren in Europa.⁸

1.1 Ausgangssituation

Initial Situation

Das Anforderungsprofil für elektrische Traktionsantriebe aus höchster Leistungsdichte und Energieeffizienz, gepaart mit dem Qualitäts- und Produktionsverständnis in Bezug auf Automobile, hat in den vergangenen Jahren zu einem hohen Innovationsdruck rund um den Elektromotor und dessen Produktion geführt. Die Steckspulentechnologie für die Produktion elektrischer Traktionsstatoren ist als disruptive Technologieinnovation der letzten Dekade zu identifizieren, die „klassische“ Wickelverfahren⁹ zunehmend substituiert bzw. bereits substituiert hat.¹⁰ Sie bietet sowohl auf der Produkt- als auch

¹ Stand 2020.

² Vgl. Perregaux et al. (Electromagnetic Motors are the World's Biggest Energy Consumers) 2022.

³ Vgl. Lindner (Elektromagnetismus als Triebkraft im zweiten Drittel des 19. Jahrhunderts) 1986.

⁴ Vgl. Link et al. (Abschätzung des Marktpotenzials und zukünftigen Marktanteils von Elektroautos) 2012.

⁵ Vgl. Seiffert (Fahrzeugantrieb im Wandel) 2014.

⁶ Vgl. Kreyenberg (Fahrzeugantriebe für die Elektromobilität) 2016.

⁷ Vgl. Tober (Praxisbericht Elektromobilität und Verbrennungsmotor) 2016, S. 176ff.

⁸ META-Studie vom PEM der RWTH Aachen im Jahr 2022.

⁹ Unter klassischen Wickelverfahren werden die etablierten Runddraht-Wickeltechniken subsumiert.

¹⁰ Vgl. Intelligence Market Report (Global Hairpin Stator Market Growth) 2022.

auf der Prozessseite hohe Potenziale. Anders als bei den bisher etablierten Verfahren, bei denen ein biegeschlaffer Runddraht kontinuierlich in das Statorblechpaket eingelegt wird, werden bei der Steckspulentechnologie flachleiterbasierte Formspulenelemente aus massivem Kupferdraht deterministisch in das Blechpaket eingebracht und miteinander kontaktiert. Dieses Verfahren ermöglicht hohe Kupferfüllfaktoren und bietet damit große Potenziale zur Erreichung der Ziele hinsichtlich Leistung und Effizienz bei gleichzeitig guter Eignung für die automobile Großserienproduktion.¹¹ Eine in dieser Arbeit näher behandelte Ausprägung dieser Technologie ist der Segment-Hairpin in U-Form, siehe Kapitel 2.1.3.

Der Automobilbau strebt stets nach perfektionierten Produktionsprozessketten und minimalen Ausschussraten nach dem Prinzip der Null-Fehler-Produktion¹², wohingegen die Hairpin-Statorproduktion den Automobilbau hinsichtlich der auftretenden Fehlerraten im Hochlauf vor neue Herausforderungen stellt. Die Steckspulentechnologie wurde in der Vergangenheit vorrangig für kleine Stückzahlen, z. B. für Transformatoren, Generatoren und Großmotoren, eingesetzt. Die Transformation der Prozesskette hin zur Großserientauglichkeit offenbart im Anlauf signifikante Effizienzeinbußen, die sich in hohen Ausschussquoten manifestieren. Aktuelle Ausschussverteilungen aus Produktionsanläufen zeigen eine hohe Fehlerauftrittwahrscheinlichkeit im Kontaktierprozess auf.¹³

1.2 Problemstellung und Motivation

Problem Definition and Motivation

Im Rahmen der Hairpin-Prozesskette stellt das Kontaktieren der Kupferenden durch Laserschweißverfahren den maßgeblich qualitätsbestimmenden Prozessschritt der gesamten Prozesskette dar.¹⁴ Im Kontaktierprozess werden die einzelnen Spulensegmente zu einer zusammenhängenden Wicklung verschaltet. Je nach Motorentopologie verfügt ein Hairpin-Stator über weit mehr als 100 Kontaktierstellen. Für das Gesamtprodukt ist jede Kontaktierung singulär qualitätsbestimmend und irreversibel: Ist nur eine der Schweißstellen unzureichend oder fehlerhaft kontaktiert, ist keine einwandfreie Bestromung möglich und der Stator, mit einer Wertschöpfung von über einhundert Euro, vergleiche Kapitel 7.3, ist Ausschuss. Analog dem Sprichwort „jede Kette ist nur so stark wie ihr schwächstes Glied“ ist jeder Hairpin-Stator nur so gut wie der schwächste Schweißpunkt. Die Qualität der Kontaktierung wird beispielhaft anhand von Anbindungsquerschnitt, Einschlüssen und Poren oder mechanischen Kennwerten bewertet.¹⁵ Wird der Kontaktierprozess isoliert betrachtet, so kann unter konstanten

¹¹ Vgl. Kampker et al. (Herausforderung Hairpintechnologie) 2018.

¹² Vgl. Westkämper (Null-Fehler-Produktion in Prozessketten) 1997.

¹³ Vgl. Dorn (An Integrated View on Variables in Electric Drive Production) 2022, S. 9.

¹⁴ Vgl. Kampker et al. (Produktionsprozess eines Hairpin-Stators) 2020.

¹⁵ Vgl. Glaessel et al. (Challenges in the Manufacturing of Hairpin Windings and Application Opportunities) 2017.

Randbedingungen die Prozessstabilität des Laserstrahlschweißens für Kupferflachleiter nachgewiesen werden.^{16,17} In der industriellen Praxis lässt sich diese Prozessfähigkeit aber nur bedingt reproduzieren. Der Grund dafür liegt beispielsweise in der notwendigen Schweißvorbereitung.¹⁸ Bestandteil der Schweißvorbereitung ist das geometrische Ausrichten und Spannen der Fügepartner. Dies impliziert den unmittelbaren Einfluss der Spannvorrichtung auf den Schweißprozess und damit eine mögliche Fehlerursache.

Die Motivation und Vision der vorliegenden Dissertation liegt darin, die Qualität und Prozessstabilität der Hairpin-Prozesskette durch eine aktive Entkopplung von Schweißvorbereitung und Kontaktierprozess zu verbessern. Hierzu wird der Ansatz des *anfangsfesten Fügens*, also der mechanischen Vorfixierung der Fügepartner, strukturiert erarbeitet und erprobt.

1.3 Aufbau und Struktur der Arbeit

Structure

Die vorliegende Arbeit untergliedert sich in acht Kapitel.

Im **zweiten Kapitel** werden die Grundlagen des Betrachtungsbereichs dargelegt. Um ein gemeinsames Verständnis des Anwendungszusammenhangs zu schaffen, werden zunächst die Grundlagen und Produktionsprozesse von Elektromotoren mit dem Fokus auf flachleiterbasierten Formspulen erläutert. Daran anschließend wird auf Qualitätsmerkmale und die Prozessstabilität im Umfeld der Elektromotorenproduktion eingegangen.

Das **dritte Kapitel** dient der Einordnung des Betrachtungsbereiches und der Formulierung von Zielsetzung und Forschungsfrage des Dissertationsvorhabens.

Das **vierte Kapitel** behandelt die technische Konzeptionierung, die Auswahl und die Beschreibung möglicher spannvorrichtungloser Verfahren zur Schweißvorbereitung flachleiterbasierter Formspulen. Zunächst werden die Anforderungen an das technische System erfasst. Anschließend wird der Lösungsraum sukzessive eingegrenzt und der Betrachtungsbereich für die praktische Erprobung festgelegt.

Das **fünfte Kapitel** beschreibt die Planung und Vorbereitung eines repräsentativen Versuchsablaufs zur Charakterisierung anfangsfester Fügesysteme für Kupferflachleiter. Zunächst wird ein einheitlicher Prüfkörper definiert und die technische Versuchsinfrastruktur vorgestellt. Des Weiteren werden die Untersuchungsmethoden und der Untersuchungsumfang für die Charakterisierung der Fügeverbindungen festgelegt.

¹⁶ Vgl. Neugebauer et al. (Manufacturing Electric Motors) 2019.

¹⁷ Vgl. Glaessel et al. (Process Reliable Laser Welding of Hairpin Windings) 2019.

¹⁸ Vgl. Kampker et al. (Initial Strength Joining of Flat Conductor-Based Shaped Coils) 2021.

Im **sechsten Kapitel** erfolgt die Auswertung und die Analyse der Versuchsergebnisse. Hierfür werden die veränderlichen Prozessparameter und ihre Wirkung diskutiert. Anschließend erfolgt die geometrische und mechanische Charakterisierung der anfangsfesten Fügeverbindung. Abschließend wird der Einfluss des anfangsfesten Vorfixierens auf das stoffschlüssige Laserkontaktieren bewertet und ein Zwischenfazit formuliert.

Das **siebte Kapitel** dient der Integrationsbetrachtung der anfangsfesten Fügeverfahren. Als Praxisbeispiel dient dabei ein Demonstrationsstator, der die Realanforderungen des Produktes repräsentiert. Auf Grundlage einer prototypischen Validierung wird die technische Umsetzbarkeit des Verfahrens für die industrialisierte Anwendung bewertet. Neben der technischen Beurteilung erfolgt die wirtschaftliche Bewertung der inkrementellen Prozessinnovation.

Im **achten Kapitel** werden die Ergebnisse der Dissertation zusammengefasst, ein Fazit formuliert und weiterer Forschungsbedarf aufgezeigt.