

1 Einleitung

Introduction

In einer Zeit, in der der Übergang zur Elektromobilität von einer Vision zur Realität wird, stehen die Akteure der Automobilindustrie vor signifikanten Herausforderungen. In der aktuellen Phase geht es dabei vor allem darum, schnell den Sprung in die Großserienproduktion zu schaffen und Produktionskapazitäten auszubauen, um die Wettbewerbsfähigkeit in einem volatilen Marktumfeld zu sichern. Infolge eines stark steigenden Preisdrucks liegt der Fokus vor allem auf der Entwicklung praxisnaher Lösungen für die effiziente Produktion der Elektromobilkomponenten. Die vorliegende Arbeit soll dazu einen Beitrag leisten.

Zur Einleitung wird im Folgenden zunächst auf die Ausgangssituation und die Problemstellung in der Produktion elektrischer Traktionsmotoren für die Elektromobilität eingegangen (Kapitel 1.1). Darauf folgend werden abschließend Struktur und Aufbau der Arbeit beschrieben (Kapitel 1.2).

1.1 Ausgangssituation und Problemstellung

Initial Situation and Problem Statement

Der menschengemachte Klimawandel stellt eine der größten Herausforderungen des 21. Jahrhunderts dar. Er gefährdet weltweit ökologische und ökonomische Systeme sowie die Lebensgrundlagen künftiger Generationen.¹ Hauptverantwortlich für die globale Erwärmung ist der übermäßige Ausstoß des Treibhausgases CO₂, der insbesondere durch die Verbrennung fossiler Rohstoffe in technischen Prozessen verursacht wird.² Vor diesem Hintergrund besteht ein großes Streben durch Gesellschaft, Politik und Wirtschaft die Emissionen von Treibhausgasen drastisch zu reduzieren und die Auswirkungen des Klimawandels zu begrenzen.

Internationale Vereinbarungen wie das Pariser Klimaabkommen von 2015 setzen ambitionierte Klimaschutzziele, um die globale Erwärmung auf mindestens 2 °C, möglichst aber unter 1,5 °C gegenüber vorindustriellen Werten zu begrenzen.³ Der Europäische Grüne Deal setzt sich zum Ziel die Emissionen in der Europäischen Union (EU) um 55 % gegenüber dem Stand von 1990 zu verringern und bis 2050 klimaneutral zu sein.⁴ Für den Verkehrssektor resultiert dies in einer radikalen Transformation, da Öl als fossiler Energieträger in Verbrennungsmotoren verbrannt wird. Der Verkehrssektor trägt weltweit etwa 20 % zu den gesamten CO₂-Emissionen bei und gilt daher als einer der größten Emittenten des Treibhausgases.⁵ Die EU liegt mit einem Wert von etwa 21 % im Jahr 2022 im globalen Durchschnitt, wobei etwa 73 % der Emissionen aus dem Verkehrssektor auf die Mobilität auf der Straße entfällt.⁶ Die Europäische Union hat daher

¹ Vgl. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (Summary for Policymakers). 2022, S. 33.

² Vgl. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (Summary for Policymakers). 2021, S. 4ff.

³ Vgl. United Nations (Paris Agreement). 2015, S. 3.

⁴ Vgl. Europäische Kommission (Europäischer Grüner Deal). 2021, S. 5.

⁵ Vgl. Cippa et al. (GHG Emissions of All World Countries). 2021, S. 9.

⁶ Vgl. Publications Office of the European Union (EU Transport in Figures). 2024, S. 134.

strenge Vorschriften erlassen, um die CO₂-Emissionen von Fahrzeugflotten zu senken und die Automobilhersteller zur Entwicklung klimafreundlicher Mobilitätslösungen zu verpflichten. Nach derzeitiger⁷ Gesetzeslage dürfen ab 2035 nur noch Neuwagen zugelassen werden, die im Betrieb keine CO₂-Emissionen verursachen, was faktisch einem Verkaufsverbot für neue Fahrzeuge mit herkömmlichen Verbrennungsmotoren (ICEV) gleichzusetzen ist.⁸

Eine zentrale technische Antwort auf diese Herausforderungen ist die Elektrifizierung des Antriebsstrangs in Fahrzeugen. Die Bandbreite reicht von rein batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV) über Plug-in-Hybride (PHEV) bis hin zu Brennstoffzellenantrieben (FCEV). BEVs nutzen ausschließlich elektrische Energie aus einer Batterie, die über das Stromnetz geladen wird. PHEVs kombinieren hingegen einen Verbrennungsmotor mit einem elektrischen Antriebsstrang, sodass sie sowohl elektrisch als auch mit fossilem Kraftstoff betrieben werden können. FCEVs erzeugen ihre elektrische Energie in einem Brennstoffzellensystem selbst, indem Wasserstoff mit Sauerstoff reagiert und der entstehende Strom in einer Batterie zwischengespeichert wird.⁹

Neben der ökologischen Notwendigkeit bietet diese technologische Transformation auch wirtschaftliche Chancen und Vorteile: Der zuletzt durch die EU ausgewiesene Wert der importierten Rohöl- und Mineralölzeugnisse aus Drittstaaten beträgt 97,7 % (2022).^{10,11} Die Importrechnung dafür lag 2024 bei 375,9 Mrd. €. ¹² Diese Importabhängigkeit lässt sich reduzieren, da elektrische Energie regional erzeugt werden kann.¹³ Darüber hinaus liegt der Wirkungsgrad von BEV in der ‚Well-to-Wheel‘¹⁴-Betrachtung bei etwa 71 %, während der Verbrennungsmotor bei etwa 21 % liegt.¹⁵ Dies manifestiert sich in etwa 30-50 % geringeren Energiekosten pro gefahrenem Kilometer. Auch der Wartungsbedarf von BEV ist bis zu 40-50 % geringer.^{16,17} Europa darf sich in diesem Strukturwandel keine Verzögerung leisten, da die Automobilindustrie mit einem Anteil von 7 % am Bruttoinlandsprodukt der (EU) und ca. 14 Millionen Arbeitsplätzen eine zentrale Säule der Industrie darstellt.¹⁸

Allen (teil-)elektrifizierten Fahrzeugkonzepten gemeinsam ist die Notwendigkeit eines Elektromotors, der elektrische Energie in kinetische Energie umwandelt, die Fahrzeuge antreibt und somit die Grundlage für emissionsfreie Mobilität bildet. Aktuelle Prognosen gehen davon aus, dass der Anteil elektrifizierter Neufahrzeugzulassungen im Jahr 2030 auf mindestens 50 %

⁷ Stand 2025

⁸ Vgl. Europäische Union (VO (EU) 2023/851). 2023.

⁹ Vgl. Elgowainy (Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles). 2021, S. 1ff.

¹⁰ Vgl. Eurostat (Oil import dependency at its highest in 2022). 2024.

¹¹ Vgl. Eurostat (Complete energy balances). 2022.

¹² Vgl. Eurostat (Imports of energy products to the EU down in 2024). 2025.

¹³ Vgl. Kosfeld, Gückelhorn (Ökonomische Effekte erneuerbarer Energien). 2012, S. 446f.

¹⁴ Beschreibt die Gesamtwirkungsgradkette eines Energieträgers von der Primärenergiegewinnung („Well“) über Verarbeitung, Transport, Bereitstellung und Umwandlung bis zur Umwandlung in nutzbare mechanische Arbeit am Rad („Wheel“).

¹⁵ Vgl. Prussi et al. (JEC Well-To-Wheels report v5). 2020, S. 47ff.

¹⁶ Vgl. Burnham et al. (Comprehensive Total Cost of Ownership Quantification). 2021, S. 83.

¹⁷ Vgl. Harto (Electric Vehicle Ownership Costs). 2020, S. 9f.

¹⁸ Vgl. Europäische Union (The future of European competitiveness). 2024, S. 140.

steigen wird.¹⁹ Damit wird auch der Bedarf an Elektromotoren drastisch zunehmen und sich auf über 120 Millionen produzierten Einheiten im Jahr 2035 belaufen.²⁰ Der nachhaltige Erfolg der Elektromobilität hängt jedoch nicht allein von der technologischen Entwicklung ab, sondern wird maßgeblich durch die Wirtschaftlichkeit der Produktion bestimmt. Ein hoher Preisdruck auf die Hersteller zwingt diese, sowohl Material- als auch Produktionskosten zu optimieren.²¹ In den letzten Jahren ist der durchschnittliche Aufpreis von BEV gegenüber ICEV in der Eurozone bereits von etwa 53 % im Jahr 2018 auf etwa 22 % im Jahr 2024 gesunken.²² Damit rückt die Produktion von Elektromotoren gleich in zweifacher Hinsicht in den Fokus, da zum einen der steigende Bedarf an Produktionskapazitäten gedeckt werden muss und zum anderen die Notwendigkeit besteht, die angestrebten Zielkosten zu erreichen.

Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs hat in den letzten Jahren einen hohen Innovationsdruck im Bereich der Elektromotoren hervorgerufen. Ein zentraler Entwicklungsschwerpunkt liegt auf der Steigerung der Effizienz, da eine höhere Effizienz des Traktionsmotors den Energieverbrauch reduziert, die benötigte Batteriekapazität und damit auch die Fahrzeugkosten senkt.²³ Neben den Anschaffungskosten von Elektrofahrzeugen werden dadurch auch die Betriebskosten reduziert. Neben der Effizienz ist auch der Bauraum ein entscheidender Faktor, da ein kompakterer Elektromotor es ermöglicht, zusätzliche Batteriekapazitäten unterzubringen und somit die Reichweite zu erhöhen.²⁴

Durch diesen Innovationsdruck hat sich im Bereich elektrischer Traktionsantriebe die Steckspulentechnologie zur Herstellung von Statoren als Alternative zur konventionellen Runddrahtwicklung etabliert.^{25,26} Durch die Verwendung formstabiler elektrischer Leiter mit rechteckigem Querschnitt soll eine höhere Leistungsdichte erreicht und die Prozessstabilität durch deterministische Umform-, Montage- und Schweißprozesse verbessert werden.²⁷ Im Vergleich zu etablierten Produktionsprozessen von Verbrennungsmotoren ist diese Fertigungstechnologie hochgradig disruptiv, sodass der Aufbau der notwendigen Produktionskompetenz in der Automobilindustrie eine zentrale Herausforderung darstellt.^{28,29}

In der Automobilindustrie ist die Null-Fehler-Produktion breiter Standard, der das Ziel verfolgt, Ausschuss zu vermeiden.³⁰ Gerade die Produktion neuer, disruptiver und unbekannter Technologien benötigen viel Zeit dieses Niveau zu erreichen.³¹ Infolgedessen führt die Unbekanntheit der Produktionsprozess der Steckspulentechnologie dazu, dass die Ausschussraten jedoch nur

¹⁹ Vgl. Möring-Martínez et al. (Clustering the European Union electric vehicle markets). 2024, S. 13.

²⁰ Vgl. Southcott (Propulsion Technology & the Importance of the Supply Chain). 2023.

²¹ Vgl. Kampker, Heimes (Elektromobilität). 2024, S. 30ff.

²² Vgl. JATO (Closing the gap: the progress towards affordable EVs). 2024, S. 4f.

²³ Vgl. Umair et al. (A Review on Electric Vehicles). 2025, S. 19.

²⁴ Vgl. Drexler et al. (Advances in electric motors: a review and benchmarking). 2025, S. 326ff.

²⁵ Vgl. Fleischer et al. (Production-oriented design of electric traction drives). 2021, S. 169.

²⁶ Vgl. Kampker, Heimes (Elektromobilität). 2024, S. 306.

²⁷ Vgl. Kampker et al. (Automotive quality requirements in the production of electric motors). 2017, S. 8.

²⁸ Vgl. Brans (Planung von Technologiesubstitutionen in Bestandsystemen). 2024, S. 1ff.

²⁹ Vgl. Kampker et al. (Ex-Ante Process-FMEA for Hairpin Stator Production). 2018, S. 1.

³⁰ Vgl. Mikosch, Westkämper (Null-Fehler-Produktion in Prozeßketten). 1997, S. 9ff.

³¹ Vgl. Degen et al. (Mastering Ramp-up of Battery Production). 2024, S. 1ff.

langsam sinken und die erforderlichen Qualitätsstandards bislang nur bedingt erreicht werden. Ursächlich dafür ist insbesondere die Vielzahl an Wechselwirkungen innerhalb der Prozesskette, sodass Fehlerabstellmaßnahmen oft nicht die gewünschte Wirkung entfalten, da Material-, Prozess- und Fertigungsparameter in komplexen Abhängigkeiten zueinanderstehen.³²

Ein zunehmend kritischer Faktor sind dabei die Wechselwirkungen zwischen dem isolierten Flachdraht als Halbzeug und den Prozessparametern. Schwankende Materialeigenschaften des isolierten Flachdrahtes stehen im Konflikt mit den festgelegten Prozessparametern, wodurch ein stabiler Produktionsoutput nicht gewährleistet werden kann.³³ Die hohen Kräfte in der Fertigung bergen zudem das Risiko von Beschädigungen der Isolation des Flachdrahtes.³⁴ Selbst kleinste Beschädigungen der Isolation führen dazu, dass der gesamte Stator als Ausschuss deklariert werden muss.

Die Konsequenz dieser Herausforderungen ist, dass die angestrebten Zielkosten für die Elektromotorenproduktion bislang nicht erreicht werden. Die Kombination aus hohen Ausschussraten, prozessbedingten Unsicherheiten und dem weiterhin erforderlichen Kompetenzaufbau in der Produktion stellt eine zentrale Problematik dar, die es zu lösen gilt, um die Wettbewerbsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit der Elektromobilität langfristig zu sichern.

1.2 Struktur und Aufbau der Arbeit

Structure of the Work

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in eine Struktur aus acht Kapiteln.

In Kapitel 1 wird ganz grundsätzlich in das Thema der vorliegenden Dissertation eingeführt, indem in der Ausgangssituation die Relevanz der Elektromobilität und der Elektromotor als wesentliche Komponenten elektrifizierter Antriebsstränge hergeleitet wird. Weiterhin wird die Problemstellung beschrieben, die vor allem in der Erreichung der Zielkosten in der Produktion für einen nachhaltigen Erfolg der Elektromobilität liegt.

Kapitel 2 beschreibt den Stand der Technik und schafft damit ein einheitliches Verständnis über die theoretischen Grundlagen sowie ein einheitliches Verständnis über begriffliche Grundlagen. Zunächst wird ein grober Überblick über die physikalischen Grundlagen sowie technologische Unterschiede verschiedener Arten von Elektromotoren gegeben. Im Folgenden wird der inhaltliche Rahmen auf die Elektromotorenproduktion im Allgemeinen und die Hairpinstatorproduktion im Speziellen sowie die Herausforderungen im Zusammenspiel mit dem Halbzeug des isolierten Flachdrahtes eingegrenzt. Abschließend wird der Herstellungsprozess sowie die Produktvielfalt isolierter Flachdrähte beschrieben. Aus den theoretischen Grundlagen werden Hypothesen in Form eines Theoriedefizits aufgestellt. Diese Hypothesen werden abschließend in

³² Vgl. Kampker et al. (Ex-Ante Process-FMEA for Hairpin Stator Production). 2018, S. 7f.

³³ Vgl. Wirth et al. (Model-based process control for the manufacturing of hairpin coils). 2024, S. 1f.

³⁴ Vgl. Born et al. (Analysis of the Influence of Various Bending Parameters). 2023, S. 1.

Zusammenhang gebracht und in einer Industriestudie validiert. Die Ergebnisse der Studie bestätigen das Theoriedefizit in einem Praxisdefizit.

Aufbauend darauf leitet Kapitel 0 ein, indem darauf basierend die Zielsetzung der Arbeit sowie der Lösungsansatz der Arbeit hergeleitet werden. Gleichzeitig wird schrittweise der forschungs-methodische Rahmen der Arbeit beschrieben.

In Kapitel 4 werden zunächst materialbedingte Fehlerbilder in der Hairpinstatorproduktion identifiziert. Darauf aufbauend werden Prüfverfahren zur Charakterisierung der verantwortlichen Eigenschaften der isolierten Flachdrähte konzeptioniert. Dazu werden zunächst allgemeine und spezifische Anforderungen an die Prüfverfahren erfasst.

Kapitel 5 umfasst die technische Ausgestaltung der hergeleiteten Prüfverfahren. In einem methodischen Vorgehen zur Produktentwicklung wird der konstruktive Lösungsraum nach und nach eingegrenzt. Als Endergebnis liegen die entwickelten Prüfverfahren vor.

In Kapitel 6 werden die entwickelten Prüfverfahren angewendet und validiert. Dazu wird zunächst je Prüfverfahren ein Versuchsplan definiert. Anschließend werden die Versuche entsprechend dem definierten Versuchsplan durchgeführt. Die Versuchsergebnisse werden abschließend dargestellt und ausgewertet. Die Auswertung umfasst dabei für jedes Prüfverfahren die Interpretation der konkreten Versuchsergebnisse. Weiterhin wird ein Fazit in Bezug auf die initial gesetzte Zielsetzung jedes Prüfverfahrens gezogen.

Das Kapitel 7 dient der Integration der entwickelten Prüfverfahren in das industrielle Umfeld der Hairpinstatorproduktion. Dazu werden die entwickelten Prüfverfahren zu einer Spezifikation isolierter Flachdrähte für die Hairpinstatorproduktion weiterentwickelt und zusammengefasst.

In Kapitel 8 dient der Zusammenfassung der Inhalte und Ergebnisse. Dabei wird Rückbezug zu den formulierten Forschungsfragen hergestellt und in ein Fazit zur definierten Zielsetzung gezogen.