

Einfluss geometrischer Materialtoleranzen auf die werkzeuggebundene Formgebung und Eigenschaften von Hairpin-Steckspulen

I. Einleitung & Motivation

Verschärfte Emissionsvorgaben der Europäischen Union, ein wachsendes Umweltbewusstsein der Bevölkerung sowie die Endlichkeit fossiler Energieträger werden im kommenden Jahrzehnt zu einem weitreichenden Wandel von konventionellen Antriebskonzepten hin zu elektrifizierten Mobilitätslösungen führen (Bauer & Riedel et al. 2019; PwC 2017). Unabhängig von der Art des eingesetzten Energiespeichersystems nimmt der elektrische Traktionsmotor eine zentrale und leistungsbestimmende Rolle in Fahrzeugen mit elektrifiziertem Antriebsstrang ein. Die Anforderungen der Automobilkonzerne hinsichtlich Stückzahl, Qualität sowie Volumen- und Massenleistungsdichte der elektrischen Maschine unterscheiden sich jedoch signifikant von den bislang bekannten Anwendungen im Maschinen- und Anlagenbau sowie Haushalts-, Elektrogeräten und Nebenaggregaten (Kampker & Kreisköther et al. 2017). Um diesen neuartigen Erfordernissen gerecht zu werden, sind die Entwicklung neuartiger oder die Optimierung bekannter Produktionstechnologien und deren nachfolgende Befähigung für den industriellen Einsatz erforderlich. Eines dieser Fertigungsverfahren für elektrische Traktionsmotoren stellt die sogenannte Hairpin-Technologie dar, welche insbesondere für die kostengünstige Produktion qualitativ hochwertiger Statoren synchronerregter Maschinen in hoher Stückzahl geeignet ist (Kampker & Kreisköther et al. 2018). Nach aktuellem Stand der Technik besteht die Prozesskette zur Fertigung von Statoren mit Hairpin-Technologie im Kern aus den Teilprozessen Ablängen & Abisolieren, Formen, Setzen, Einbringen, Twisten, Kontaktieren und Imprägnieren (siehe Abbildung 1) (Glaessel & Seefried et al. 2017; Kampker & Kreisköther et al. 2018). Obgleich der Fertigungsprozess in der Vergangenheit bereits zur Serienproduktion von Anlassern und Starter-Generatoren mit geringen Leistungen und ohne Dauerlauffunktion eingesetzt wurde, unterscheidet sich die moderne Prozesskette aufgrund erheblich komplexerer Vorgaben an

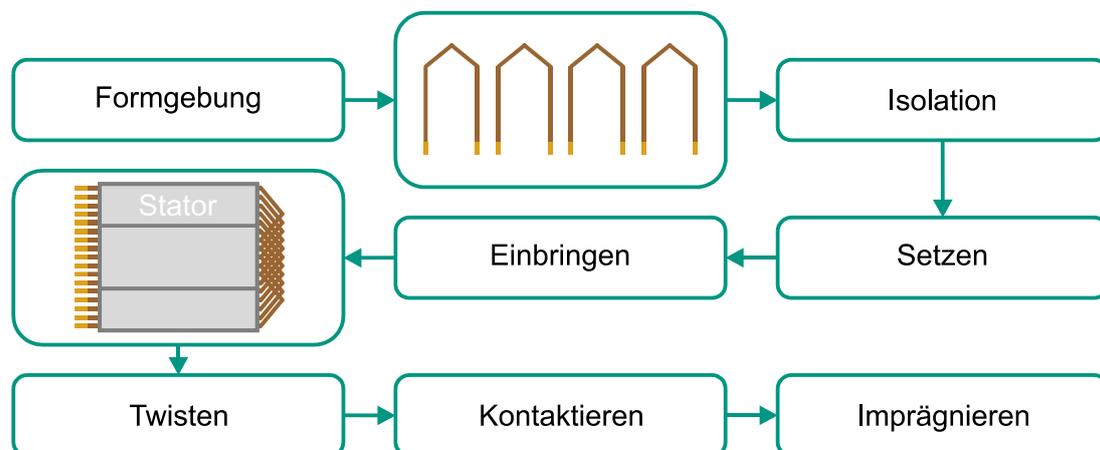


Abbildung 1 – Prozesskette zur Fertigung von Statoren mit Hairpin-Technologie

das Wickelschema und die Qualität derart stark von der früheren Anwendung, dass vorhandenes Prozesswissen nur eingeschränkt übertragen werden kann.

II. Grundlagen

Das Ausgangsmaterial der Hairpin-Prozesskette zur Fertigung von Statoren für die Elektromobilität stellt zumeist ein auf Polyesterimid-, Polyimid- oder Polyamidimid-Basis beschichteter Kupferflachdraht aus CU-OF1 oder CU-ETP1 dar, dessen spezifische Eigenschaften je nach Art und Temperaturklasse der Isolation in den Teilen 0-2, 28, 29, 30, 47 und 58 der Normenreihe DIN EN 60317 definiert werden (siehe Tabelle 1).

Norm	Beschreibung	Inhalt
DIN EN 60317-0-2	Allgemeine Anforderungen an lackisolierte Flachdrähte aus Kupfer mit Isolationen vom Grad 1 & 2	<ul style="list-style-type: none"> ▪ geometrische Kenngrößen und Toleranzen ▪ mechanische Eigenschaften ▪ elektrische Eigenschaften ▪ Isolationsfestigkeit bei chemischen, thermischen und mechanischen Belastungen ▪ Lieferbedingungen
DIN EN 60317-28	Anforderungen an Flachdrähte aus Kupfer mit Isolationsbeschichtung aus Polyesterimid der Klasse 180	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Flachdrähte mit einschichtiger Beschichtung auf Basis von Polyesterimid ▪ Temperaturindex 180 mit einer Wärmeschockresistenz > 200 °C
DIN EN 60317-29	Anforderungen an Flachdrähte aus Kupfer mit Isolationsbeschichtung aus Polyester oder Polyesterimid sowie Polyamidimid der Klasse 200	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Flachdrähte mit zweischichtiger Beschichtung auf Basis von Polyester/Polyesterimid (Grundlack) und Polyamidimid (Decklack) ▪ Temperaturindex 200 mit einer Wärmeschockresistenz > 220 °C
DIN EN 60317-30	Anforderungen an Flachdrähte aus Kupfer mit Isolationsbeschichtung aus Polyimid der Klasse 220	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Flachdrähte mit einschichtiger Beschichtung auf Polyimid-Basis ▪ abweichende Prüfung der Dehnbarkeit mit einer Mindesthaftung von 10 % ▪ Temperaturindex 220 mit einer Wärmeschockresistenz > 240 °C
DIN EN 60317-47	Anforderungen an Flachdrähte aus Kupfer mit Isolationsumhüllung aus aromatischen Polyimiden der Klasse 240	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Flachdrähte mit Umhüllung auf Basis aromatischer Polyimide ▪ abweichende Prüfung der Dehnbarkeit mit einer Mindesthaftung von 10 % ▪ Temperaturindex 240 mit einer Wärmeschockresistenz > 260 °C
DIN EN 60317-58	Anforderungen an Flachdrähte aus Kupfer mit Isolationsbeschichtung aus Polyamidimid der Klasse 220	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Flachdrähte mit Grundlackschicht auf Basis von Polyamidimid ▪ Temperaturindex 220 mit einer Wärmeschockresistenz > 240 °C

Anforderungsspezifikation nach DIN EN 60317-0-2

Tabelle 1 – Übersicht über die technischen Lieferbedingungen von Flachdraht nach DIN EN 60317

Sowohl die geometrischen, mechanischen, chemischen, elektrischen als auch thermischen Eigenschaften von Kupferflachdrähten werden in Form technischer Lieferbedingungen in der diesbezüglichen DIN EN 60317-0-2 definiert (DIN EN 60317-0-2). Die zur Prüfung der abgeleiteten Kenngrößen anzuwendenden Prüfverfahren werden hingegen in den Teilen 1-6 der Normenreihe DIN EN 60851 beschrieben. Durch die Gesamtheit der Prüfanforderungen und Prüfverfahren werden die wichtigsten funktionsrelevanten Merkmale des zur Herstellung von Hairpin-Steckspulen eingesetzten isolationsbeschichteten Kupferflachdrahtes eindeutig festgelegt.

Norm	Anmerkung	Inhalt
DIN EN 60851-1	Allgemeine Weisungen für die Prüfung von Wickeldrähten	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Begriffsdefinitionen ▪ Anforderungen an die Prüfumgebung
DIN EN 60851-2	Ermittlung der Maße	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ermittlung von Breite und Dicke mit und ohne Isolationsbeschichtung ▪ Ermittlung der Kantenradien
DIN EN 60851-3	Mechanische Eigenschaften	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Prüfung der Bruchdehnung ▪ Prüfung der Zugfestigkeit ▪ Prüfung des Rückfederungseffektes ▪ Prüfung von Biegsamkeit und Haftvermögen der Isolationsbeschichtung
DIN EN 60851-4	Chemische Eigenschaften	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Prüfung der Lösemittelbeständigkeit ▪ Prüfung der Beständigkeit gegenüber Hydrolyse und Transformatorenöl
DIN EN 60851-5	Elektrische Eigenschaften	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ermittlung des Ohm'schen Widerstandes ▪ Prüfung der Durchschlagsspannung ▪ Ermittlung des Dielektrischen Verlustfaktors
DIN EN 60851-6	Thermische Eigenschaften	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Prüfung der Wärmeschockresistenz ▪ Ermittlung des Temperaturindex nach IEC 60172

Tabelle 2 – Übersicht über die Prüfverfahren für Kupferflachdraht nach DIN EN 60851

Da insbesondere die geometrischen und mechanischen Eigenschaften des Kupferflachdrahtes in direkter Wechselwirkung mit dem umformenden Fertigungsprozess der Hairpin-Steckspulen stehen (Hoffmann & Spur et al. 2012), werden die entsprechenden Kenngrößen und Prüfverfahren nachfolgend weitergehend erläutert.

Breite und **Dicke** des Blank- und Gesamdrahtes sind nach DIN EN 60851-2 an jeweils mehreren Messstellen eines Drahtes mit einer hinreichenden Genauigkeit durch optische oder taktile Messsysteme zu bestimmen, wobei die Isolationsbeschichtung zur Ermittlung der Maße des Kupferleiters schonend entfernt werden muss. Die **Kantenrundung** des Flachdrahtes ist anhand eines zur Länge orthogonalen Schlibbildes eingegossener Drähte mittels geeigneter Vergrößerung zu bestimmen. Neben dem ermittelten Radius müssen die Art des Überganges der Kantenrundung in den Leiterbereich sowie scharfe, raue oder hervorstehende Bereiche im Querschnitt beschrieben werden. Ein Überblick über die zulässigen geometrischen Toleranzen nach DIN EN 60317-0-2 sowie deren Auswirkungen auf die Querschnitte und Abmaße des Flachdrahtes wird im nachfolgenden Abschnitt VI gegeben. (DIN EN 60851-2)

Die **Bruchdehnung** und **Zugfestigkeit** stellen zwei für das mechanischen Werkstoffverhalten von Metallen charakteristische Kennwerte dar und beschreiben die auf die Ausgangsmesslänge bezogene Längenänderung einer Probe beim Bruch unter uniaxialer Zugbelastung sowie die dabei maximal auftretende, auf den Ausgangsquerschnitt bezogene mechanische Spannung der Probe. Große Bruchdehnungen und geringe Zugfestigkeiten stellen somit ideale Ausgangsbedingungen für eine rückfederungsarme Formgebung von Hairpin-Steckspulen bei gleichzeitig geringen Prozesskräften dar. (Hoffmann & Spur et al. 2012) Die Prüfung beider Eigenschaften hat nach DIN EN 60851-3 an geraden Drahtproben definierter Länge zu erfolgen, welche mit moderaten Dehnraten unter uniaxialer Belastung gezogen werden. Über das in DIN EN 60851-3 beschriebene, vereinfachte Verfahren hinaus, kann eine vollständige Erfassung der **Fließkurven** und **elastischen Eigenschaften** des Drahtes durch die Durchführung von Zugversuchen nach DIN EN ISO 6892-1 erfolgen (DIN EN ISO 6892-1). Des Weiteren werden in Teil 3 der Normenreihe DIN EN 60851 mit der elastischen **Rückfederung** des Drahtes sowie der **Biegsamkeit und Haftung** der Isolationsbeschichtung weitere Eigenschaften des Halbzeuges beschrieben, welche einen maßgeblichen Einfluss auf dessen charakteristisches Verformungsverhalten aufweisen. Die material- und verfestigungsbedingten Streuungen der Rückfederung stehen dabei in direkter Wechselwirkung mit den geometrischen Toleranzen der Hairpin-Endkontur nach dem Formgebungsprozess, während die Wickel- und Haftprüfungen den Zusammenhang zwischen der mechanischen Umformung und der funktionellen Isolationsbeschichtung beschreiben. (DIN EN 60317-0-2; DIN EN 60851-3)

Über die in den Normenreihen DIN EN 60317 und DIN EN 60851 beschriebenen Kenngrößen und deren Prüfverfahren hinaus, werden die Eigenschaften des zur Herstellung von Kupferflachdraht bevorzugt eingesetzten **Halbzeuges aus Kupfer** in DIN EN 1977 (Kupfer und Kupferlegierungen – Vordraht aus Kupfer) definiert. Die Norm beschreibt dabei sowohl elektrische, geometrische als auch mechanische Kenngrößen des Ausgangsmaterials und definiert zur Prüfung der charakteristischen Größen geeignete Messverfahren. Der **Vordraht** aus Kupfer bezeichnet ein in Ringen geliefertes Zwischenprodukt runden Querschnittes von mehr als 6 mm, welches in der Regel durch ein Gießen, Walzen oder Strangpressen hergestellt wird. Um eine weitreichende Übereinstimmung der Materialeigenschaften zwischen verschiedenen Herstellern und Chargen sicherzustellen, werden in DIN EN 1977 Anforderungen an die **chemische Zusammensetzung** sowie charakteristische **mechanische und elektrische Eigenschaften** – wie die Dehnung, der ohmsche Widerstand, das Erweichungsverhalten oder die Versprödungsbeständigkeit – definiert und entsprechende Prüfverfahren beschrieben. (DIN EN 1977)

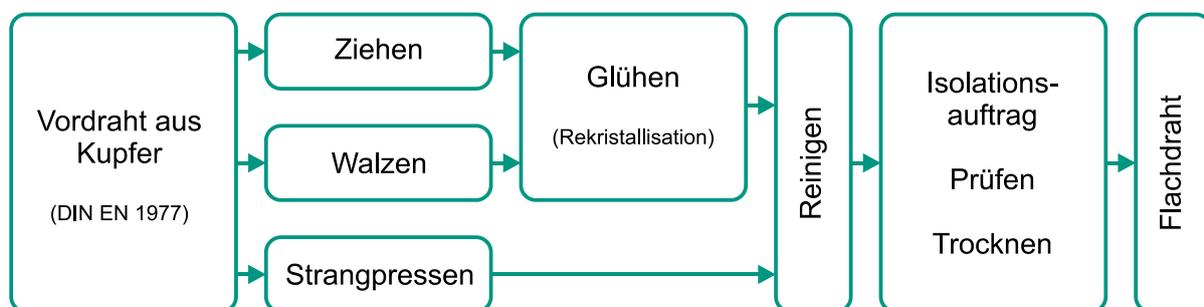


Abbildung 2 – Prozesskette zur Herstellung von lackisoliertem Flachdraht

Nach eigenen Recherchen im Rahmen der CWIEME Berlin 2019 werden zur Herstellung des eigentlichen Flachdrahtes aus dem zuvor beschriebenen Vordraht aus Kupfer drei verschiedene Fertigungsverfahren und Prozessketten eingesetzt, welche in Abbildung 2 dargestellt sind (ITE Group plc. 2019). Die voneinander abweichenden mechanischen Belastungen während der Prozessfolgen führen zu unterschiedlichen Ausprägungen der kristallinen Struktur des Flachdrahtes und damit einhergehend zu abweichenden Materialeigenschaften. Eines der eingesetzten Verfahren stellt das mehrstufige **Walzen** von Vordrähten zu Kupfersträngen dar, an welches ein Rekristallisationsglühen zur Reduktion der prozessbedingten Kaltverfestigung angeschlossen ist. Ein hierzu eng verwandtes Fertigungsverfahren kann durch das **Ziehen** von Vordrähten mit speziellen, nicht-rotationssymmetrischen Formziehsteinen beschrieben werden, an welches ebenfalls ein Glühprozess anschließt. Eine weitere Möglichkeit zur Herstellung des Drahtes stellt das kontinuierliche **Strangpressen** im Conform-Verfahren dar, auf welches infolge der durch die erhöhten Prozesstemperaturen reduzierten Kaltverfestigung kein Rekristallisationsprozess folgen muss.

Allen Verfahren ist gemein, dass die geometrischen Kenngrößen des Flachdrahtes – Breite, Höhe und Kantenradius – durch die Kontur von Formziehsteinen und Pressmatrize sowie die Zuordnung der notwendigen Querschnittsreduktion auf die einzelnen Walz- bzw. Ziehstufen beeinflusst werden können. Aufgrund der hohen Kosten für nicht-rotationssymmetrische Ziehsteine und der großen zu realisierenden Umformgrade finden derzeit zumeist Walz- oder Strangpressverfahren industrielle Anwendung, obgleich diese zu größeren Toleranzen (Walzen) respektive einer höheren Verfestigung (Strangpressen ohne Glühen) des Flachdrahtes als beim Ziehen führen. An die Formgebung und ein eventuelles Rekristallisationsglühen schließt der Auftrag der **Isolationsbeschichtung** auf den noch unbeschichteten Kupferflachdraht an. Dieser erfolgt zumeist in einem mehrstufigen Sprühverfahren mit Profildüsen (Hagedorn & Sell-Le Blanc et al. 2016), wobei die Prozessgeschwindigkeit im Vergleich zur Beschichtung von Runddrähten reduziert werden muss, um eine vergleichbare Beschichtungsqualität zu erzielen.

III. Stand der Forschung und Technik

Nach aktuellem Stand der Forschung und Technik stellen in vollautomatisierten Produktionsanlagen für die Hairpin-Technologie insbesondere die taktzeitoptimale Formgebung und Kontaktierung der Steckspulen bei gleichzeitiger Variantenflexibilität und hoher Robustheit gegenüber Störgrößen sowie die toleranzbedingten Wechselwirkungen innerhalb der Prozesskette eine große Herausforderung dar (Kampker & Kreisköther et al. 2018). Da die zu fertigende Kontur im Falle einer werkzeuggesteuerten, in der Regel zwei- oder mehrstufigen Konturerzeugung nur durch wenige Parameter beeinflusst werden kann, müssen die Toleranzen des Ausgangsmaterials hohe Anforderungen erfüllen, um eine hinreichend Stabilität des Fertigungsprozesses zu gewährleisten. Die Wechselwirkungen zwischen variablen Eingangsparametern, konstanter Strecke und schwankenden Ausgangsgrößen werden in abstrahierter Form für den Fall einer mehrstufigen, werkzeuggebundenen Formgebung von Hairpin-Steckspulen durch die nachfolgende Abbildung 3 beschrieben.

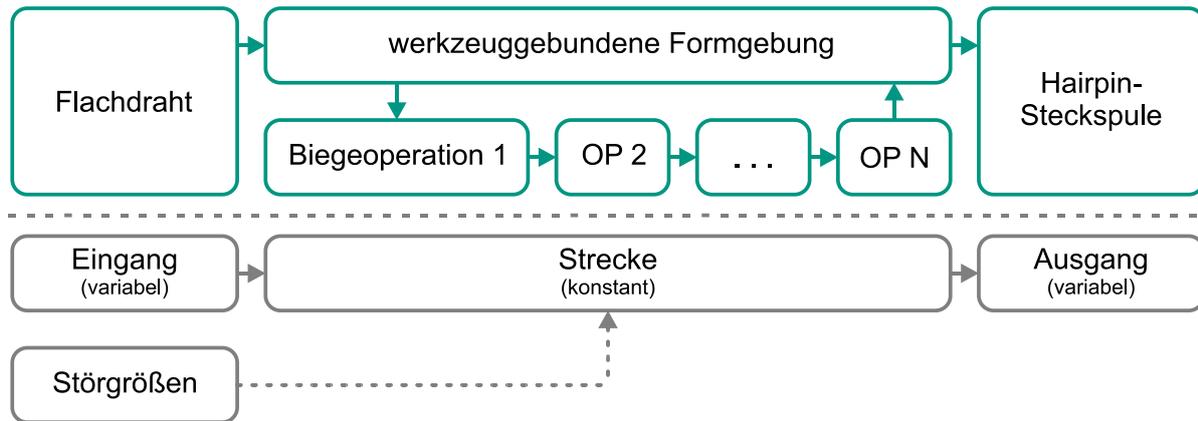


Abbildung 3 – Eingangs- und Ausgangsgrößen einer werkzeuggebundenen Formgebung von Hairpin-Steckspulen

Aufgrund der im nachfolgenden Kapitel V diskutierten, vielseitigen Wechselwirkungen zwischen Form- und Lagetoleranzen von Hairpin-Steckspulen mit den nachfolgenden Prozessschritten Setzen & Einbringen, Twisten und Schweißen, wurden in der Vergangenheit bereits erste simulative Untersuchungen zur Formgebung von Hairpin-Steckspulen publiziert. So wurde durch (Weigelt & Riedel et al. 2017) ein Ansatz zur simulationsgestützten Bewertung der Prozessgrenzen von Hairpin-Formgebungsprozessen aufgezeigt. Hierbei wurde ein werkzeuggebundener Formgebungsprozess aus konsekutivem 3-Punkt- und Gesenkbiegen auf zwei elementare Grundbelastungen zurückgeführt und diese durch normierte Versuchsvorrichtungen abgebildet. Durch die numerische Modellierung des Abschälverhaltens konnte die Ausdünnung der Isolationsschicht des Flachdrahtes während der elementaren Biegeoperationen untersucht werden, was in Kombination mit elektrischen Prüfverfahren eine zielführende Festlegung des Prozessfensters gestattet. Darüber hinaus wurden durch (Weigelt & Fröschl et al. 2018) weiterführende simulative Untersuchungen der Ausdünnung von Isolationsschichtungen im Kontext der Hairpin-Formgebung beschrieben.

Neben den Untersuchungen des Prozessfensters von Hairpin-Steckspulen wurden durch (Komodromos & Lobbe et al. 2017) Untersuchungen der umformtechnischen Eigenschaften von Runddrähten veröffentlicht. In experimentellen Analysen mittels Zug- und Druckversuchen konnten für verschiedene isolierte und nicht-isolierte Drahtdurchmesser eine Zug-Druck-Anisotropie des Fließverhaltens sowie eine Lastpfadabhängigkeit infolge des Bauschinger-Effektes nachgewiesen werden. Da aufgrund von fertigungsbedingten Abweichungen bereits zwischen Runddrähten unterschiedlicher Durchmesser signifikante Unterschiede der charakteristischen Materialeigenschaften auftreten, ist eine Übertragung der Ergebnisse auf das Umformverhalten von Flachdrähten nur eingeschränkt möglich.

Da die Prozessstabilität der Formgebung von Hairpin-Steckspulen nach aktuellem Stand der Technik maßgeblich durch Schwankungen des Ausgangsmaterials beeinflusst wird und die diesem Sachverhalt zugrunde liegenden Wechselwirkung in bisherigen Forschungsvorhaben nicht eingehend untersucht wurden, wird nachfolgend ein Lösungsansatz zur Analyse des Einflusses geometrischer Materialtoleranzen auf die werkzeuggebundene Formgebung von Hairpin-Steckspulen sowie deren Eigenschaften aufgezeigt und umgesetzt.

IV. Zielstellung und Lösungsansatz

Durch eine systematische Analyse des Einflusses der geometrischen Toleranzen des Flachdrahtes auf Fertigungsfehler im Kontext einer werkzeuggebundenen Formgebung sollen Wechselwirkungen zwischen Fehlerbildern und Materialschwankungen abgeleitet werden. Hierfür werden zunächst prozess- und produktrelevante Fehlerbilder von Hairpin-Steckspulen beschrieben und diese potenziellen Fehlerursachen und -mechanismen zugeordnet.

Nachfolgend werden die Breite, Dicke und Kantenradien des Ausgangsmaterials als variable Eingangsgrößen eines numerischen Prozessmodells der Hairpin-Formgebung innerhalb der nach DIN EN 60317-0-2 zulässigen oberen und unteren Abmaße variiert. Die systematische Variation der Eingangsgrößen gestattet eine Bewertung der Auswirkungen geometrischer Toleranzen des Flachdrahtes auf die Stabilität eines werkzeuggebundenen Formgebungsprozesses sowie eine Zuordnung der Konturabweichungen auf Basis der zuvor beschriebenen Fehlerbilder.

Die Grundlage der Sensitivitätsanalyse stellt ein numerisches Prozessmodell dar, welches auf Basis des in (Wirth & Kirgör et al. 2018) beschriebenen und validierten Ansatzes in vollparametrisierter Form in der kommerziellen Simulationsumgebung Abaqus FEA implementiert wurde. Den FE-Analysen des Formgebungsprozesses liegt der in Tabelle 3 dargestellte Versuchsplan zugrunde, welcher sowohl eine vollfaktorielle Bewertung der Wechselwirkungen aller Einflussgrößen als auch eine isolierte, teilfaktorielle Betrachtung der Parametereinflüsse in drei Faktorstufen ermöglicht.

Zur Bewertung des Einflusses der geometrischen Schwankungen des Ausgangsmaterials werden auf Grundlage der nach Tabelle 3 variierten Eingangsgrößen erzielte Simulationsergebnisse mit einer digitalen Referenzgeometrie verglichen, deren Formgebung ein Flachdraht mit Nennmaßen zugrunde liegt. Zum quantitativen Vergleich der Hairpin-Konturen werden Messungen charakteristischer geometrischer Merkmale eingesetzt und ein Flächenvergleich auf Basis eines Best-Fit der Gesamtkontur mit der 3D-Inspektionssoftware GOM Inspect 2018 durchgeführt.

Versuchsplan A	Versuchsplan B
vollfaktorielle Untersuchung der Wechselwirkungen von Breite, Dicke und Kantenradius	teilfaktorielle Untersuchung der isolierten Einflüsse von Breite, Dicke und Kantenradius
Breite <ul style="list-style-type: none"> ▪ oberer und unterer Grenzwert nach DIN EN 60317-0-2 (B+ & B-) Dicke <ul style="list-style-type: none"> ▪ oberer und unterer Grenzwert nach DIN EN 60317-0-2 (H+ & H-) Kantenradius <ul style="list-style-type: none"> ▪ oberer und unterer Grenzwert nach DIN EN 60317-0-2 (R+ & R-) 	isolierte Variation der Einflussgrößen gegenüber der Referenzkonfiguration in jeweils zwei Stufen <ul style="list-style-type: none"> ▪ Grenzwerte aus Versuchsplan A ▪ Referenzkonfiguration in Form der Nennwerte (B0, H0 & R0)
$2^3 = 8$ Versuche	$3 \times 2 = 6$ Versuche
VP-A + VP-B + Referenz = 15 Versuche	

Tabelle 3 – Statistische Versuchsplanung der Parameterstudie

In den nachfolgenden Kapiteln V, VI und VII werden zunächst Formgebungsfehler von Hairpin-Steckspulen klassifiziert, die geometrischen Toleranzen des Kupferflachdrahtes und deren Auswirkungen auf die elektrische Maschine beschrieben sowie die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse ausgewertet und Zusammenhänge mit Fehlerbildern abgeleitet.

V. Klassifizierung von Formgebungsfehlern

Während der werkzeuggebundenen Formgebung von Hairpin-Steckspulen können sowohl geometrische als auch materialeitige Toleranzen des Ausgangsmaterials sowie prozessbedingte Fehlermechanismen zu einer unzulässigen Abweichung zwischen der tatsächlichen und der durch die Auslegung definierten Spulenkontur führen. Während des Prozesses können dabei sowohl dynamische Effekte wie Schwingungen als auch Fehlpositionierungen der eingesetzten Werkzeuge, Klemm- und Spannelemente sowie eine schlechte Wahl charakteristischer Prozessparameter Fehlerursachen darstellen.

Die Form- und Lageabweichungen der Hairpin-Steckspulen nach dem Formgebungsprozess lassen sich hierbei aufgrund der Ausprägung des Fehlers und der zugrunde liegenden Fehlermechanismen klassifizieren, wobei ein Fehlerbild stets durch einen oder mehrere Mechanismen verursacht wird. Einen Überblick über typische Fehlerbilder bei der werkzeugbasierten Formgebung von Hairpin-Steckspulen sowie deren Auswirkungen auf das Produkt und die nachgelagerten Prozessschritte gibt die nachfolgende Tabelle 4.

Die Gesamtheit der **Präge-, Parallelitäts- und Winkelfehler** beschreibt eine Kategorie von Fehlerbildern, welche in einem direkten Zusammenhang mit der geometrischen Form- und Lagegenauigkeit der umgeformten Hairpin-Steckspule stehen und somit einen Einfluss auf die Realisierbarkeit, Prozesssicherheit und/oder Qualität der nachgelagerten Prozessschritte Setzen & Einbringen, Twisten bzw. Schweißen haben. So können beispielsweise Parallelitätsfehler der Hairpin-Beine ein automatisiertes Setzen der Hairpin-Steckspulen in die Nuten von Kalibriervorrichtungen verhindern oder Fehlstellungen der offenen Spulenenden nach dem Einbringen bewirken, woraus wiederum Probleme beim Einsatz von Twistwerkzeugen sowie unzulässige Schweißspalte resultieren.

Im Gegensatz dazu stellen **Isolationsfehler** eine unzulässige Unterschreitung der geforderten elektrischen Isolationseigenschaften der Spule – insbesondere der Isolationsfestigkeit – dar. Diese funktionellen Eigenschaften können beispielweise durch Hochspannungsprüfungen der Steckspulen in Salzlösung, sogenannte Salzbadtests, geprüft werden. Isolationsfehler haben somit keinen Einfluss auf die Durchführung der nachgelagerten Prozessschritte, führen jedoch zu einer unzureichenden Qualität des zu fertigenden Stators und damit zu Ausschuss oder frühzeitigem Ausfall des Traktionsmotors.

Den in Tabelle 4 beschriebenen Fehlerbildern liegen die nachfolgenden Fehlermechanismen zugrunde, die wiederum in **direkte Prozessfehler** (Positionier- und Klemmfehler), **Parametrierungsfehler** (Werkzeug- und Biegefehler) sowie bereits im Ausgangsmaterial begründete Fehler differenziert werden können.

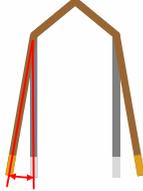
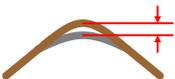
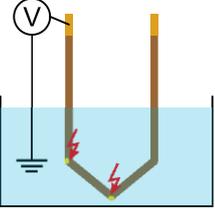
	Fehlerbilder			
	Beschreibung	Ursachen	Auswirkung	
Winkelfehler		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Biegefehler ▪ Klemmfehler 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Setzen/Einbringen bzw. Twisten der Hairpins nicht möglich ▪ Schweißfehler durch Spalte 	
Parallelitätsfehler		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Biegefehler, z. B. infolge von abweichendem Materialverhalten ▪ Klemmfehler ▪ Prägefehler 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Setzen/Einbringen bzw. Twisten der Hairpins nicht möglich ▪ Schweißfehler durch Spalte 	
Prägefehler		<ul style="list-style-type: none"> ▪ unzulässige Kontur des Hairpin-Kopfes ▪ z. B. falsche Größe oder Position der Auskrägung des Hairpin-Kopfes 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Werkzeugfehler durch Form und Position des Biegewerkzeuges ▪ Positionierfehler durch falsche Lage des U-Pins im Klemmelement 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Kollisionen im Bereich der Hairpin-Köpfe ▪ Setzen/Einbringen der Hairpins nicht möglich
Isolationsfehler		<ul style="list-style-type: none"> ▪ unzureichende Isolationseigenschaften des Kupferlackdrahtes nach der Formung 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ausdünnung der Isolation durch unzulässig kleine Biegeradien ▪ Quetschungen der Isolation durch Klemmfehler ▪ Materialfehler 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Hairpin bzw. Motor ist nicht funktionsfähig ▪ frühzeitiger oder sofortiger Ausfall des Motors im Betrieb

Tabelle 4 – Typische Fehlerbilder von Hairpin-Steckspulen

Positionierfehler beschreiben vom Sollwert abweichende Positionen von Draht oder U-Pin in Relation zum Klemm- bzw. Biegeelement und werden durch eine falsche horizontale oder vertikale Klemmposition verursacht. Aus Positionierfehlern resultieren indirekt Werkzeug- oder Biegefehler, welche sowohl zu Form- als auch Isolationsfehlern der Hairpin-Steckspulen führen.

Klemmfehler stehen in einem direkten Zusammenhang mit der Fixierung des Drahtes während des Biegeprozesses und bezeichnen alle Fehlermechanismen, welche zu einer unzureichenden bzw. zu starken Klemmung des Flachdrahtes führen. Ursachen des Fehlermechanismus können sowohl die Wahl falscher Toleranzen formschlüssiger Klemmelemente als auch deren Beaufschlagung mit unzureichenden Klemmkraften

darstellen. Als primäre Auswirkungen von Klemmfehlern sind Isolationsfehler anzusehen, jedoch resultieren darüber hinaus auch Positionierfehler, welche zu Sekundärfehlern führen.

Die Gesamtheit aller fehlerhaften Positionen des Biegewerkzeuges in Relation zum Werkstück können als **Werkzeugfehler** bezeichnet werden, welche durch falsche Zustellungen oder Verschiebungen während des Biegeprozesses aber auch unzutreffende Werkzeuggeometrien verursacht werden können. Werkzeugfehler führen insbesondere zu Prägefehlern, bewirken infolge abweichender Rückfederungseffekte aber auch indirekt Winkel- und Parallelitätsfehler.

Biegefehler stellen alle Fehler dar, die aus falschen Parametrierungen der Biegewinkel resultieren. Neben Winkel- und Parallelitätsfehlern führen Biegefehlern auch zu Isolationsfehlern, sofern minimale Biegeradien unterschritten werden.

Neben den beschriebenen, prozessbedingten Fehlermechanismen können alle direkt aus den Eigenschaften des Ausgangsmaterials resultierenden Fehlerursachen als **Materialfehler** bezeichnet werden. So können Prozessfehler und lieferantenabhängige Prozessketten bei der Drahtherstellung aber auch eine falsche Lagerung und Handhabung des Materials zu unzureichenden Isolationseigenschaften oder unzulässigen Streuungen der geometrischen Abmaße und mechanischen Materialeigenschaften führen. Aus Materialfehlern resultieren primär produktseitige Isolationsfehler, sekundär führen jedoch auch Klemm-, Werkzeug- und Biegefehler zu Parallelitäts- und Winkelfehlern – seltener auch Prägefehlern – der Hairpin-Steckspulen.

VI. Geometrische Toleranzen lackisolierter Kupferflachdrähte

Wie in Kapitel II dargestellt, werden die Toleranzfelder der geometrischen Eigenschaften des lackisolierten Kupferflachdrahtes unabhängig von der Art des zur Isolation eingesetzten Harzes in DIN EN 60317-0-2 beschrieben. Die Größe des Toleranzfeldes weist dabei eine direkte Abhängigkeit von der Dicke des Blankdrahtes sowie des Isolationsgrades auf, wobei im Allgemeinen gilt, dass die Streuung der geometrischen Abmessungen im Verhältnis zum Kupferquerschnitt für große Querschnitte geringer ist als für kleine Querschnitte. Die nachfolgende Abbildung 5 zeigt den Zusammenhang exemplarisch anhand der relativen Größe des Toleranzfeldes von Flachdrähten bezogen auf die aus Breite, Dicke und Radius des Drahtes resultierende **Querschnittsfläche** auf.

Neben den Querschnittsflächen des Blank- und Gesamtdrahtes stehen die **Flächenträgheitsmomente** (FTM) in direkter Wechselwirkung mit dem geometrischen Abmaß des Flachdrahtes. Unter der Annahme, dass die Breite des Drahtes in z-Richtung eines im Flächenmittelpunkt des Querschnittes befindlichen Koordinatensystems orientiert ist, lässt sich das Flächenträgheitsmoment I_{yy} wie folgt beschreiben:

$$I_{yy} = \frac{1}{12} \left((15\pi - 48) r^4 + (40 - 12\pi) * b * r^3 + 3 * ((\pi - 4) * b^2 * r^2) + b^3 * d \right)$$

Die biquadratische Abhängigkeit der polaren und axialen Flächenträgheitsmomente vom Toleranzfeld der geometrischen Kenngrößen zeigt, dass die geometriebedingten mechanischen Eigenschaften des Flachdrahtes – und damit dessen grundlegendes Biegeverhalten – in größerer Wechselwirkung mit den Toleranzen stehen als die

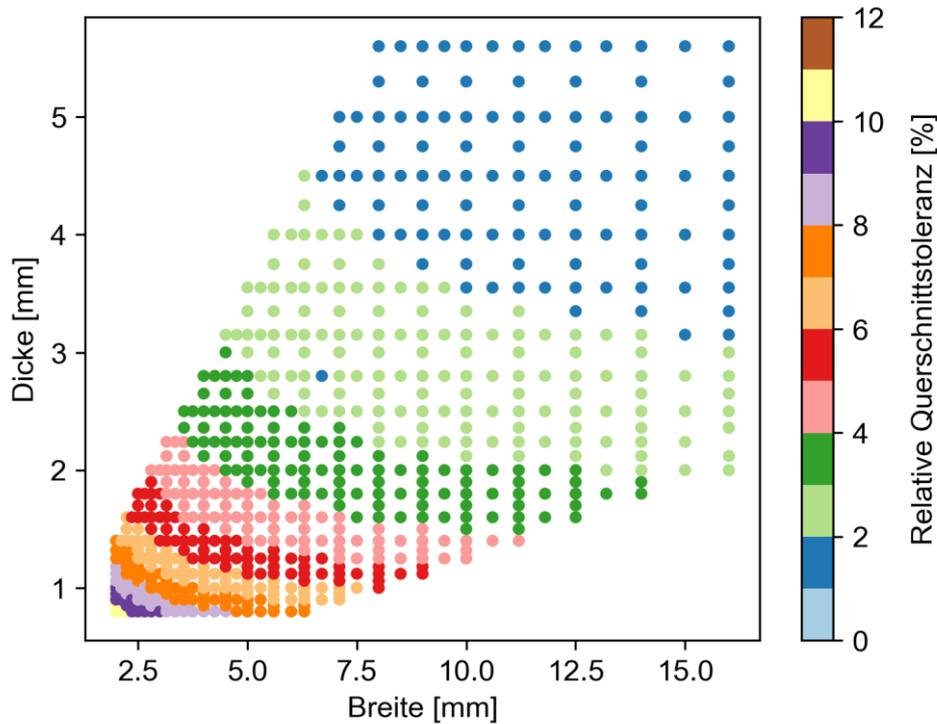


Abbildung 5 – Relative Größe des Toleranzfeldes von Flachdrähten nach DIN EN 60317-0-2

quadratischen Flächeneigenschaften (siehe Tabelle 5). Die nach DIN EN 60317-0-2 zulässige durchschnittliche Größe des entsprechenden Toleranzfeldes von in etwa 22–25 % lässt daher einen Zusammenhang zwischen möglichen Parametrierungsfehlern und den geometrischen Abmaßen des Flachdrahtes erwarten.

Darüber hinaus resultieren aus der Größe des Toleranzfeldes direkte Schwankungen des **mechanischen und elektrischen Füllfaktors**, welche in Abbildung 4 qualitativ dargestellt sind und in Tabelle 5 quantifiziert werden. Die Wechselwirkung zwischen der toleranzabhängigen Querschnittsfläche des Blankdrahtes und dem elektrischen Füllfaktor wird hierbei durch die geometrische Abhängigkeit der Nutgröße vom Abmaß des Gesamtdrahtes

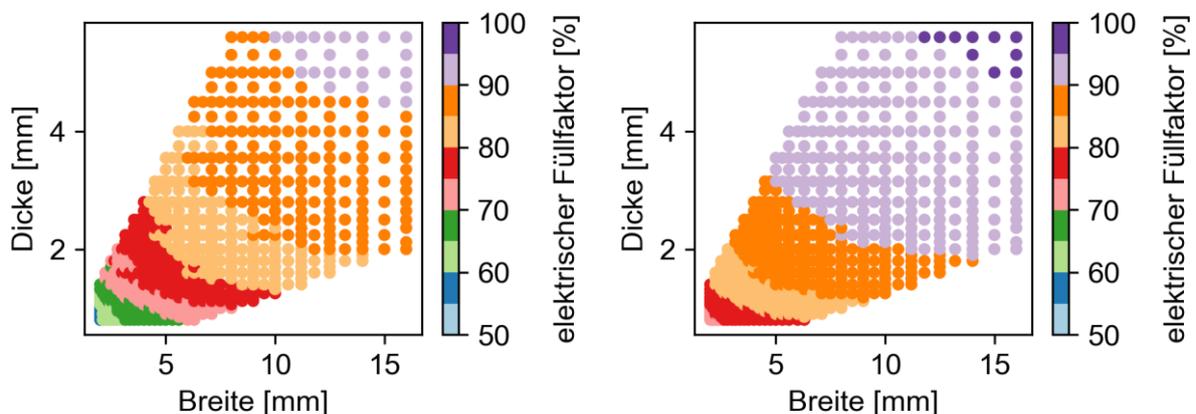


Abbildung 4 – Minimale und maximale Füllfaktoren für Flachdrähte nach DIN EN 60317-0-2

verstärkt, da das Einführen der Hairpin-Steckspulen stets für die Gesamtheit aller zulässigen Drahtquerschnitte gegeben sein muss. Da nach (Hagedorn & Sell-Le Blanc et al. 2016, S. 109) aus einer Erhöhung des Füllfaktors eines Elektromotors um zehn Prozent eine durchschnittliche Steigerung des Wirkungsgrades um ein Prozent resultiert, ist ein signifikanter Einfluss des Toleranzfeldes auf das Kennfeld der elektrischen Maschine sowie deren Leistungsfähigkeit zu erwarten. Die toleranzbedingten Schwankungen des Flachdrahtes stehen somit nicht nur in direkter Wechselwirkung mit der Produktionstechnik, sondern darüber hinaus mit den charakteristischen funktionellen Eigenschaften des Elektromotors.

Die nachfolgende Tabelle 5 zeigt die nach DIN EN 60317-0-2 tolerierten Schwankungen der charakteristischen geometrischen, mechanischen und elektrischen Kenngrößen des Flachdrahtes auf, wobei die Dicke des Isolationspapiers vernachlässigt wurde und die Relativgrößen stets auf das obere Abmaß des Toleranzfeldes bezogen sind.

DIN EN 60317-0-2		Isolationsgrad 1			Isolationsgrad 2		
		Min. [%]	Max. [%]	Ø [%]	Min. [%]	Max. [%]	Ø [%]
Toleranzfeld der Blankdrahtfläche		3,95	20,03	8,98	3,95	20,03	8,98
Toleranzfeld der Gesamtdrahtfläche		5,14	26,31	12,44	5,13	25,52	12,20
elektr. Füllfaktor	Worst Case	64,58	93,07	82,58	59,20	91,78	79,30
	Best Case	79,92	96,91	90,56	73,07	95,55	86,91
mech. Füllfaktor	Worst Case	69,44	94,33	85,90	69,90	94,31	86,00
	Best Case	94,23	99,44	98,04	93,85	99,41	97,89
Toleranzfeld des FTM I_{yy} in Breitenrichtung		9,82	47,70	22,69	9,82	46,51	22,40
Toleranzfeld des FTM I_{zz} in Dickenrichtung		11,33	46,30	25,16	11,28	44,73	24,63

Tabelle 5 – Wechselwirkungen von Drahttoleranzen und charakteristischen Kenngrößen

Der im Rahmen der nachfolgenden numerischen Untersuchungen eingesetzte Flachdraht weist nach Norm einen Kupferquerschnitt von $4,00 \pm 0,05$ mm bzw. $2,00 \pm 0,03$ mm und Kantenradien von $0,65 \pm 0,16$ mm auf. Durch Schliffbilder des Materials konnte zudem eine signifikante Asymmetrie der Isolationsschichtdicke des Flachdrahtes aufgezeigt werden, welche nach heutigem Stand der Forschung auf die Wirkung von Oberflächenspannungen und Gewichtskräften während des Auftrages des Isolationsmaterials zurückzuführen ist.

VII. Sensitivitätsanalyse

Um die isolierten Einflüsse der geometrischen Toleranzen des Flachdrahtes sowie deren Wechselwirkungen bewerten zu können, wurde auf Basis des in Kapitel IV beschriebenen Versuchsplanes (Tabelle 3) eine numerische Sensitivitätsanalyse des werkzeuggebundenen Formgebungsprozesses durchgeführt. Die quantitativen Werte der Faktorstufen basieren hierbei auf dem im vorangegangenen Kapitel VI dargestellten Toleranzfeld von lackisolierten Kupferflachdrähten nach DIN EN 60317-0-2. Zur Durchführung der numerischen

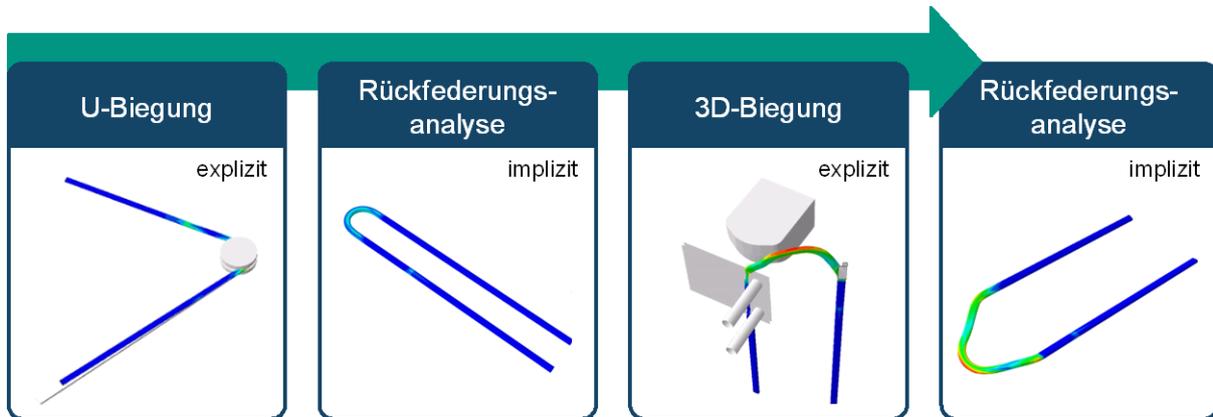


Abbildung 6 – Simulationskette der Formgebung von Hairpin-Steckspulen in Abaqus FEA

Untersuchungen wurde eine verbesserte und vollparametrisierte Version des im Rahmen der Electric Drives Production Conference (E|DPC) 2018 vorgestellten Simulationsmodells eingesetzt (Wirth & Kirgör et al. 2018), welches den zweistufigen Formgebungsprozess durch eine konsekutive Verkettung **expliziter Formgebungs- und impliziter Rückfederungsanalysen** vollständig abbildet (Abbildung 6).

Im Vorfeld der Sensitivitätsanalyse wurde zunächst ein auf den Nennwerten der geometrischen Abmessungen des Flachdrahtes basierendes Referenzmodell zur Validierung der Simulationsergebnisse eingesetzt. Hierfür wurden sowohl Konvergenzstudien der gewählten Netzgröße als auch ein **geometrischer Vergleich** der Hairpin-Kontur aus Simulation und **CT-Aufnahmen** in der 3D-Inspektionssoftware GOM Inspect 2018 durchgeführt, wobei die durchschnittliche Flächenabweichung der Hairpin-Kontur zwischen Realität und Simulation im Best-Fit 0,28 mm betrug.

Zur geometrischen Diskretisierung des Flachdrahtes wurde ein **strukturiertes Netz** aus linearen, reduziert integrierten Hexaederelementen vom Typ C3D8R gewählt. Um den Einfluss der Vernetzung auf das Ergebnis der Sensitivitätsanalyse möglichst gering zu halten, wurde ein strukturiertes und symmetrisches Netz mit 14 Elementen in der Breite, acht Elementen in der Dicke und vier Elementen entlang des Radius zur räumlichen Diskretisierung des Drahtes verwendet, woraus eine Gesamtelementanzahl von 49 032 resultiert. Während die beiden impliziten Rückfederungsanalysen mit einer realitätsnahen Belastungsdauer (step-time) von einer Sekunde numerisch abgebildet wurden, mussten die expliziten Formgebungsanalysen hingegen zeitlich um den Faktor 100 skaliert werden.

In Abbildung 7 ist die Auswertung der Simulationsergebnisse der **Parameterstudie** bezüglich der für die nachgelagerten Prozessschritte Setzen, Einbringen, Twisten und Schweißen relevanten Position der offenen Spulenenden dargestellt. Da das rechte Hairpin-Bein während des dreidimensionalen Formgebungsprozesses formschlüssig und damit eindeutig reproduzierbar positioniert wurde, konnte dessen Position für die Auswertung als Referenzposition angesehen werden. Die **Sensitivitätsanalyse** zeigt, dass grundsätzlich alle geprüften Parameterkonfigurationen eine Auswirkung auf die Lage des linken Hairpin-Endes und damit die Größe und räumliche Orientierung der Spulenweite haben. Aus dem isolierten Vergleich der Einflussgrößen geht zudem hervor, dass die Toleranzen des Kantenradius den

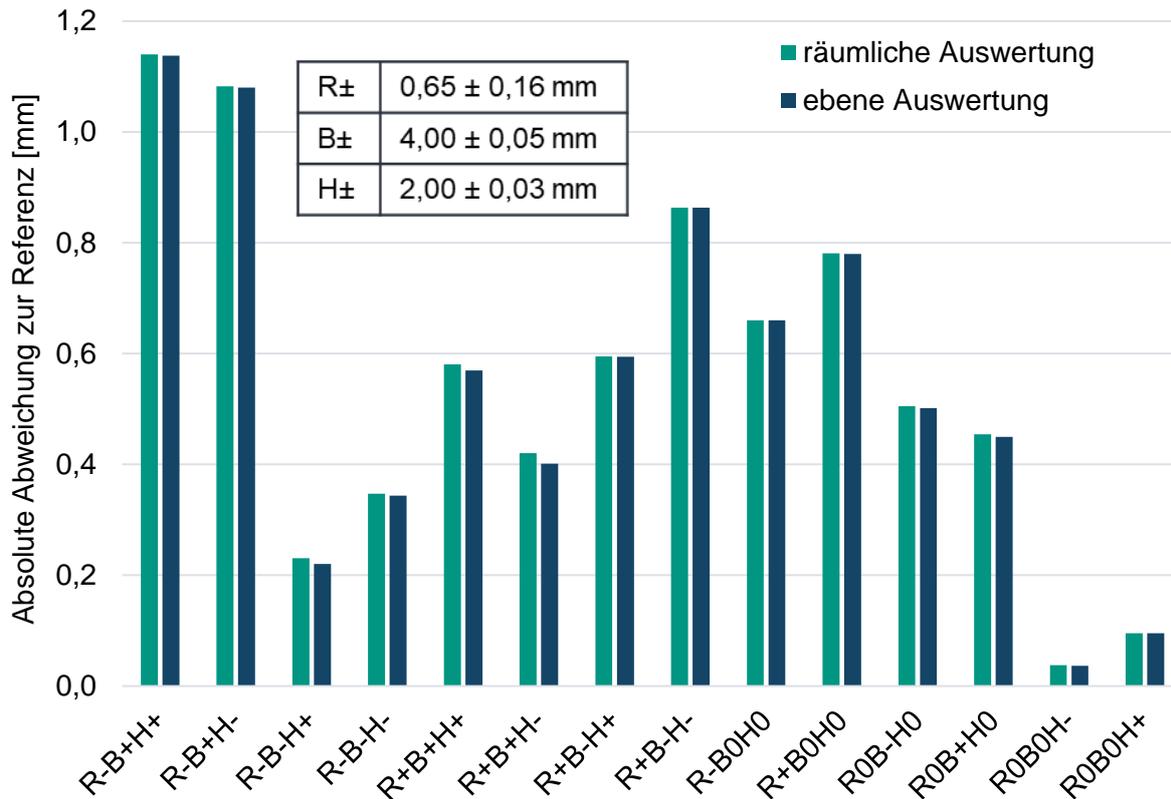


Abbildung 7 – Räumliche und ebene Abweichungen der Spulenweite in Bezug auf die Referenzsimulation

größten Einfluss auf die Position der offenen Spulenenden haben, wohingegen die toleranzbedingten Schwankungen in Dickenrichtung nur geringe Wechselwirkungen mit dem Formgebungsprozess aufweisen. Darüber hinaus kann aus den Ergebnissen der Sensitivitätsanalyse gefolgert werden, dass das Zusammenfallen von Parameterstufen, welche in Kombination zu einer weiteren Vergrößerung oder Verringerung des Querschnittes führen (wie z. B. R-B+ oder auch R+B-), signifikant größere Differenzen der Spulenweite verursachen als Toleranzkombinationen, aus welchen eine Angleichung des Drahtquerschnittes resultiert (wie z. B. R-B- oder auch R+B+). Unter der vereinfachten Annahme tolerierbarer Schwankungen der Spulenweite durch die Folgeprozesse von $\pm 0,2$ mm und einer damit verbundenen Toleranzfeldgröße von 0,4 mm ist davon auszugehen, dass einzig die Schwankungen der geometrischen Drahtabmessungen in neun von 14 Parameterkombinationen – darunter die isolierten Schwankungen der Größe des Kantenradius – zu Hairpin-Steckspulen mit **Winkel- oder Parallelitätsfehlern** geführt hätten.

Da zwischen der räumlichen und der ebenen Auswertung der Spulenweite kein signifikanter Unterschied festzustellen ist (maximale Differenz < 0,02 mm), kann davon ausgegangen werden, dass der Einfluss der geometrischen Toleranzen des Flachdrahtes auf die vertikale Verschiebung der Hairpin-Enden zu vernachlässigen ist. Um den Einfluss der Toleranzen auf die Position des Spulenendes detaillierter bewerten zu können, wurde eine erweiterte Auswertung der Simulationsergebnisse in der Ebene durchgeführt, die in Abbildung 8 visualisiert ist. Im Rahmen der Untersuchungen wurden die Schwankungen der Position des umgeformten linken Spulenendes, welche in einem direkten Zusammenhang mit der

Spulenweite steht, im Vergleich zum Referenz-Hairpin in die beiden ebenen Raumrichtungen ausgewertet. Die der Auswertung zugrunde gelegten Richtungen sind dabei in Bezug zum untersuchten Hairpin-Ende qualitativ entsprechend des dargestellten Hairpin-Querschnittes orientiert.

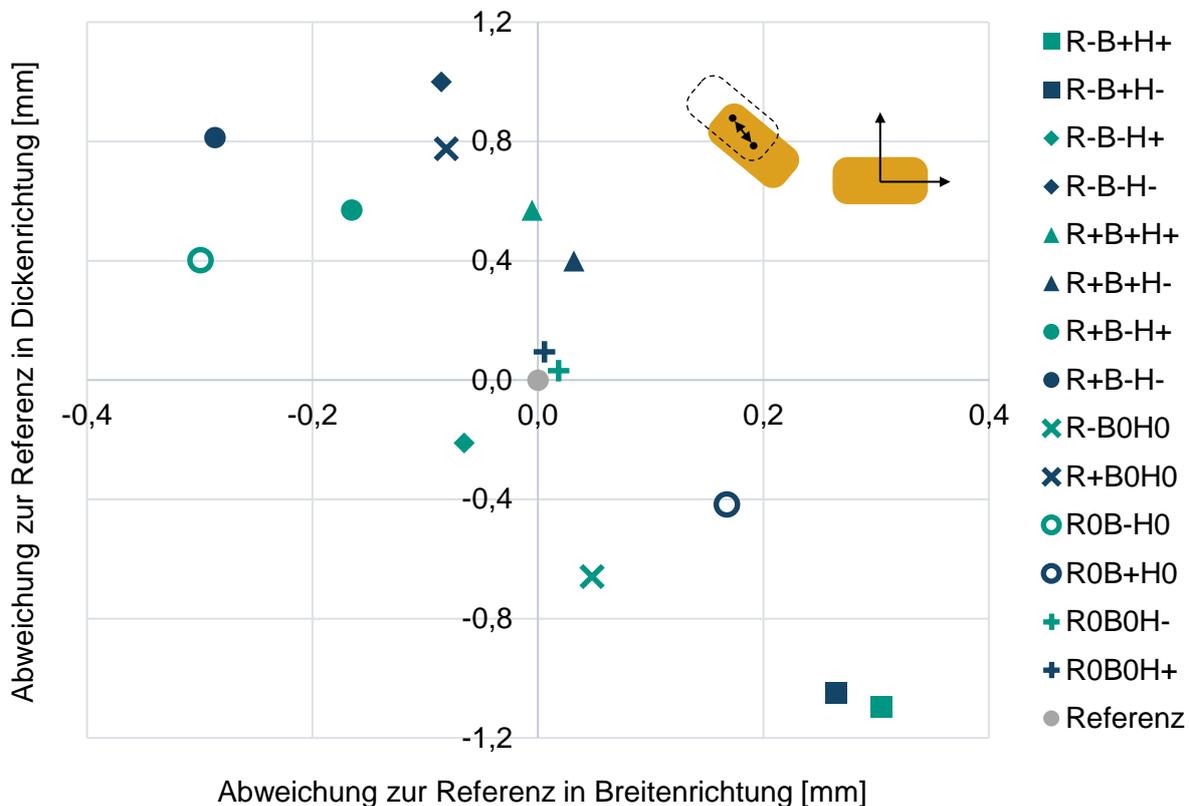


Abbildung 8 – Ebene Auswertung der Spulenweite in Bezug auf die Referenzsimulation

Die Auswertung in der Ebene zeigt, dass aus den geometrischen Drahttoleranzen in Breite, Dicke und Kantenradius stets **Schwankungen der Spulenposition** in der Breitenrichtung des Flachdrahtes resultieren (Lage der Abweichungsvektoren im zweiten und vierten Quadranten des Koordinatensystems), wohingegen die Position des Drahtes in Dickenrichtung vergleichsweise kaum beeinflusst wird (erster und dritter Quadrant). Zudem ist zu erkennen, dass kleinere Querschnitte infolge des verringerten Flächenträgheitsmomentes und der damit einhergehenden Zunahme der Rückfederung tendenziell zu einer Unterbiegung der Hairpin-Steckspule führen, während mit größeren Querschnitten und einer somit reduzierten Rückfederung Überbiegungen einhergehen.

Die Auswertung der Sensitivitätsanalyse zeigt eine große Abhängigkeit der Hairpin-Kontur von den Radien sowie der Breite des Flachdrahtes auf, woraus insbesondere Parallelitäts- und Winkelfehler hervorgehen. Ein signifikanter Einfluss der Toleranzen auf die Kontur des Hairpin-Kopfes konnte hingegen nicht nachgewiesen werden, woraus gefolgert werden kann, dass Prägefehler aufgrund der geometriegebundenen Formgebung nur eine geringe Abhängigkeit von den geometrischen Eigenschaften des Flachdrahtes aufweisen.

VIII. Zusammenfassung & Ausblick

In der vorliegenden Veröffentlichung wurde zunächst eine grundlegende Einführung in die im Kontext der Elektromobilität an Traktionsmotoren gestellten Anforderungen sowie die Hairpin-Technologie gegeben. Nachfolgend wurden die technischen Lieferbedingungen von Flachdrähten nach Normreihen DIN EN 60317 und die entsprechenden Prüfverfahren nach DIN EN 60851 eingeführt sowie die Fertigungsverfahren Ziehen, Walzen und Strangpressen als auch deren Wechselwirkungen mit den charakteristischen Drahteigenschaften dargestellt. In der folgenden Diskussion des Standes der Forschung und Technik wurde ein Forschungsdefizit in der Analyse des Einflusses geometrischer Materialtoleranzen auf die Formgebung und Eigenschaften von Hairpin-Steckspulen identifiziert und ein numerischer Lösungsansatz erläutert. Anschließend wurde sowohl eine systematische Klassifikation von Formgebungsfehlern auf Basis möglicher Fehlerbilder und zugrunde liegender Fehlermechanismen aufgezeigt als auch die Abhängigkeit der Querschnittsfläche, Füllfaktoren und Flächenträgheitsmomente von den geometrischen Eigenschaften des Flachdrahtes qualitativ und quantitativ beschrieben. Auf Grundlage der abgeleiteten Wechselwirkungen wurde eine Sensitivitätsanalyse eines zweistufigen, werkzeuggebundenen Formgebungsprozesses von Hairpin-Steckspulen mittels expliziter und impliziter numerischer Analysen in der Simulationsumgebung Abaqus CAE durchgeführt und die resultierenden Formabweichungen sowohl punktuell als auch ganzheitlich ausgewertet. Die Sensitivitätsanalyse zeigt dabei eine große Abhängigkeit der Position der offenen Spulenenden von den Radien- und Breitentoleranzen des Flachdrahtes auf, während das Toleranzfeld des Drahtes in Dickenrichtung einen weniger signifikanten Einfluss auf die Formgebung aufweist.

Um ein umfassendes Hintergrundwissen über die Wechselwirkungen geometrischer und werkstoffspezifischer Toleranzen des Flachdrahtes und der Formgebung von Hairpin-Steckspulen zu erlangen, werden diese in aktuellen Forschungsarbeiten systematisch untersucht. Darüber hinaus wird an einer Ausweitung der numerischen und experimentellen Untersuchungen auf weitere Formgebungsverfahren und Drahtquerschnitte gearbeitet.

IX. Förderhinweis und Danksagung

Die Autoren der Veröffentlichung danken dem Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Wohnungsbau des Landes Baden-Württemberg für die Förderung des Forschungsvorhabens „Anlagenentwicklung für Fertigung von Statoren mit Hairpin-Technologie – AnStaHa“ sowie den beteiligten Partnern für die Unterstützung im Projekt.

Weiterer Dank gilt Herrn Jane Jovanoski von der Essex Germany GmbH sowie Herrn Jan Oderwald von der SHWire – Schwering & Hasse Elektrodraht GmbH für die aufschlussreichen Diskussionen im Kontext der Herstellung von lackisolierten Kupferflachdrähten.

Darüber hinaus danken die Autoren dem Land Baden-Württemberg für die Unterstützung durch das bwHPC.

X. Literaturverzeichnis

(Bauer & Riedel et al. 2019)

Bauer, W.; Riedel, O.; Herrmann, F. & al. e. (2019), *ELAB 2.0. Wirkungen der Fahrzeugelektrifizierung auf die Beschäftigung am Standort Deutschland. 2. Auflage*, Fraunhofer IAO, Stuttgart .

(DIN EN 1977)

DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (2013), *DIN EN 1977: Kupfer und Kupferlegierungen – Vordraht aus Kupfer*, Beuth Verlag GmbH, Berlin.

(DIN EN 60317-0-2)

DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (2014), *DIN EN 60317-0-2: Technische Lieferbedingungen für bestimmte Typen von Wickeldrähten – Teil 0-2: Allgemeine Anforderungen – Lackisolierte Flachdrähte aus Kupfer*, Beuth Verlag GmbH, Berlin.

(DIN EN 60851-3)

DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (2014), *DIN EN 60851-3: Wickeldrähte – Prüfverfahren – Teil 3: Mechanische Eigenschaften*, Beuth Verlag GmbH, Berlin.

(DIN EN 60851-2)

DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (2016), *DIN EN 60851-2: Wickeldrähte – Prüfverfahren – Teil 2: Ermittlung der Maße*, Beuth Verlag GmbH, Berlin.

(DIN EN ISO 6892-1)

DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (2017), *DIN EN ISO 6892-1: Metallische Werkstoffe – Zugversuch – Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur*, Beuth Verlag GmbH, Berlin.

(Glaessel & Seefried et al. 2017)

Glaessel, T.; Seefried, J. & Franke, J. (2017), „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)*, IEEE, S. 1–7. ISBN: 978-1-5386-1069-5.

(Hagedorn & Sell-Le Blanc et al. 2016)

Hagedorn, J.; Sell-Le Blanc, F. & Fleischer, J. (2016), *Handbuch der Wickeltechnik für hocheffiziente Spulen und Motoren: Ein Beitrag zur Energieeffizienz*, Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg. ISBN: 978-3-662-49209-3.

(Hoffmann & Spur et al. 2012)

Hoffmann, H.; Spur, G. & Neugebauer, R. (2012), *Handbuch Umformen*, Carl Hanser Fachbuchverlag, s.l. ISBN: 978-3-446-42778-5.

(ITE Group plc. 2019)

ITE Group plc. (2019), *CWIEME Berlin 2019 | World's largest transformer manufacturing and electric motor event*. <https://www.coilwindingexpo.com/berlin/> [24.07.2019].

(Kampker & Kreisköther et al. 2017)

Kampker, A.; Kreisköther, K.; Buning, M. K.; Treichel, P. & Theelen, J. (2017), „Automotive quality requirements and process capability in the production of electric motors“. *2017 7th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*, IEEE, S. 1–8. ISBN: 978-1-5386-1069-5.

(Kampker & Kreisköther et al. 2018)

Kampker, A.; Kreisköther, K.; Büning, M. K. & Treichel, P. (2018), „Herausforderung Hairpintechnologie Technologieschub für OEMs und Anlagenbauer“, *ATZechnik*, 13 (5), S. 62–67.

(Komodromos & Lobbe et al. 2017)

Komodromos, A.; Lobbe, C. & Tekkaya, A. E. (2017), „Development of forming and product properties of copper wire in a linear coil winding process“. *2017 7th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*, IEEE, 1-7. ISBN: 978-1-5386-1069-5.

(PwC 2017)

PwC (2017), *Fahrzeugabsatz nach Antriebstechnologie in Regionen weltweit bis 2030*.
<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/37329/umfrage/fahrzeugabsatz-nach-antriebstechnologie-2025/> [23.07.2019].

(Weigelt & Fröschl et al. 2018)

Weigelt, M.; Fröschl, C.; Masuch, M.; Riedel, A. & Franke, J. (2018), *Simulative Betrachtung der Umformverfahren zur Herstellung von Hairpin Formspulenelementen*, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik.
https://www.umformtechnik.net/binary_data/3315900_whitepaper-online-11-plain.pdf [24.07.2018].

(Weigelt & Riedel et al. 2017)

Weigelt, M.; Riedel, A.; Masuch, M.; Mahr, A.; Glasel, T. & Franke, J. (2017), „Potentials of an explicit finite element analysis of the bending processes for coated copper wires“. *2017 7th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*, IEEE, S. 1–5. ISBN: 978-1-5386-1069-5.

(Wirth & Kirgör et al. 2018)

Wirth, F.; Kirgör, T.; Hofmann, J. & Fleischer, J. (2018), „FE-Based Simulation of Hairpin Shaping Processes for Traction Drives“. *2018 8th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*, IEEE, S. 1–5. ISBN: 978-1-7281-0148-4.