

Numerische Berechnung des mehrstufigen Rotationszugbiegeprozesses von Flachpaketstatorn für elektrische Maschinen

David Wüeterich^{1,a} und Mathias Liewald¹

¹Institut für Umformtechnik Universität Stuttgart, Holzgartenstr. 17, 70174 Stuttgart, Deutschland

^adavid.wueterich@ifu.uni-stuttgart.de

Keywords: Rotationszugbiegen, FEM, Rückfederung, elektrische Maschinen

Abstract. Die vorliegende Publikation enthält eine Zusammenfassung bisher durchgeführter numerischer und experimenteller Untersuchungen zum Flachpaketbiegeverfahren, welches zur Herstellung von hocheffizienten Statorn für elektrische Maschinen verwendet wird. Die Untersuchungen entstanden in einer Kooperation zwischen dem Institut für Umformtechnik der Universität Stuttgart und der SEG Automotive Germany GmbH. Basierend auf den Ergebnissen vorheriger Arbeiten zur Modellierung des Flachpaketbiegeprozesses werden hier weiterentwickelte Optimierungsrechnungen gezeigt, die im realen Fertigungsbetrieb validiert und anschließend aufgrund der erheblichen Reduktion der bis dato erreichten Rundheitsabweichungen in der laufenden Produktion übernommen wurden. Die vier Variablen des hier vorgestellten mathematischen Optimierungsproblems sind die Vorspannkräfte, die in jeder der vier aufeinanderfolgenden Biegeoperationen eingestellt werden können. Das Zusammenführen von vier Residualkurven mit den korrespondierenden Ergebniswerten ergibt einen mathematisch berechneten Statorprofilschnitt, dessen Rundheitsabweichungen durch Variieren der vier Variablen minimiert wird. Das Einstellen der ermittelten Vorspannkraft pro Biegestation führte einerseits zu einer Bestätigung des Rechenmodells und andererseits zu einer Senkung der Rundheitsabweichungen von bis zu 25 %.

Einführung

Forderungen nach Antrieben für Personenkraftwagen mit höchster Effizienz und geringen Schadstoffemissionen führen in der Automobilindustrie aktuell zu neuen Designs von elektrischen Maschinen im Antriebsstrang. Insbesondere bei der Fertigung von Statorn ergeben neue Trends elektromagnetische Baugruppen mit höchsten Füllfaktoren und damit hohen Energiedichten. Abb. 1 zeigt einen schematischen Ausschnitt einer elektrischen Maschine mit relevanten Begriffen für die Charakterisierung des Stators und dessen Eigenschaften innerhalb der Baugruppe. Der sogenannte mechanische Füllfaktor k ergibt sich nach [1] aus dem Verhältnis zwischen dem gesamten Querschnitt der isolierten Drähte A_{Draht} innerhalb einer Nut und dem verfügbaren Querschnitt der Nut $A_{\text{Nut,iso}}$ selbst. Es ist hervorzuheben, dass die Nutquerschnittsfläche in dieser Betrachtung durch die Isolationsfolie reduziert wird. Der mechanische Füllfaktor dient zur Bewertung von Statorfertigungsverfahren.

$$k = A_{\text{Draht}}/A_{\text{Nut,iso}}. \quad (1)$$

Die gesamte Leiterlänge ergibt sich aus den aktiven Drahtabschnitten innerhalb der Nuten des Statorkerns und den Abschnitten im sogenannten Wickelkopf. Der Wickelkopf bildet das Fundament der Verschaltung der aktiven Drähte, trägt jedoch nicht zur Bildung des effektiven Magnetfelds bei. Trotzdem entstehen in diesen Leiterabschnitten ohmsche Verluste, die über eine Reduktion der Länge, also über möglichst kleine Wickelköpfe, gesenkt werden können. Kleine Wickelköpfe stellen eine besondere Herausforderung in der Statorherstellung dar [1].

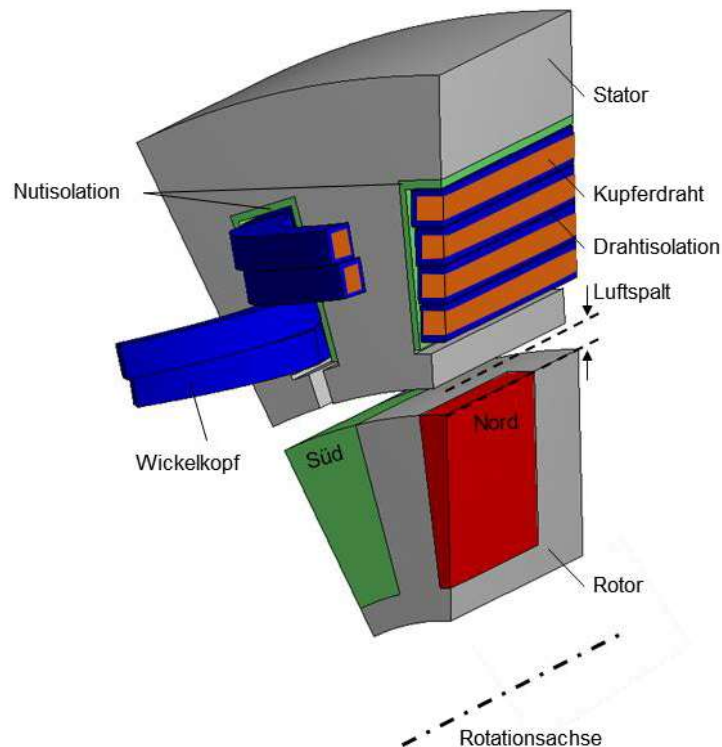


Abb. 1: Schematischer Ausschnitt einer elektrischen Maschine bestehend aus einem Rotor und einem Stator mit Wicklungen aus Kupferlackdraht, Nutisolationen und dem Stator Kern aus Elektroblech nach [5]

Darüber hinaus ist die hohe Nachfrage nach performanten Statorn heute unter Produktionsaspekten mit hohen Automatisierungsgraden verbunden, die aktuell nur mit zwei Verfahrensgruppen erreichbar scheinen. Die erste Gruppe, die Steckwickelverfahren (zum Beispiel Hairpin- oder I-pin-Verfahren), ermöglichen hohe Füllfaktoren durch das koaxiale Einstecken von vorgeformten Wicklungssegmenten in den innengenuteten Statorkern [2] aus sogenannten Elektroblechen [3]. Nach diesem Vorgang werden die Wicklungsenden umgeformt und stoffschlüssig gefügt. Insbesondere mit der Verwendung von Profildrähten können dadurch hohe Füllgrade auch unter hohen Automatisierungsanforderungen erreicht werden. Da die Leitfähigkeit von der Güte des stoffschlüssigen Fügeprozesses abhängt, stellt dieser eine wesentliche Herausforderung dieses Verfahrens dar [4].

Das Flachpaketbiegen basiert hingegen auf einem flachen, kammähnlichen Statorkern, welcher mit Kupferwicklungen bestückt wird. In diesem Zustand sind die Nutöffnungen vergleichsweise groß, sodass das Bestücken kraftfrei und automatisiert ablaufen kann. Während des anschließend folgenden vierstufigen Biegeprozesses zur Erzeugung der kreisförmigen Statorgeometrie verringert sich der Nutquerschnitt. Dadurch nimmt der Füllgrad in einem relevanten Maß zu. Der Herstellungsprozess schließt mit einer Kalibrier- und Fügeoperation des noch offenen Statorkerns ab. Eine wesentliche Herausforderung des Flachpaketverfahrens besteht in der erreichbaren Rundheit der Statorinnenkontur nach dem Biegen des bestückten Flachpaketes. Neben dem bereits genannten Füllfaktor, der Wickelkopfgröße und dem Automatisierungsgrad stellt die Rundheit der Statorinnenkontur eine besonders wichtige Eigenschaft für die Leistung der elektrischen Maschine dar. Rundheitsabweichungen führen dazu, dass ein größerer mittlerer Luftspalt zwischen Stator und Rotor angenommen werden muss, um einen Kontakt zwischen beiden Komponenten im Betrieb zu vermeiden. Der Luftspalt zwischen Stator und Rotor bildet einen Widerstand im magnetischen Kreis, da die Permeabilität von Luft deutlich kleiner als die des Eisenkerns ist [5].

Der mehrstufige Biegeprozess von Flachpaketen erweist sich als komplex in der Vorhersage bzw. der Berechnung der resultierenden Geometrie insbesondere bezogen auf die Rundheit des

erzeugten Stators. Vier sequenzielle Biege- und Rückfederungsstufen mit verschiedenen Biegewinkeln müssen bei diesem Verfahren aufeinander abgestimmt werden. Die Biegeoperationen können dem Rotationszugbiegen nach [6] zugeordnet werden, sodass sich Erkenntnisse aus dem Profilbiegen auf das Flachpaketbiegen übertragen lassen [7, 8]. Darüber hinaus besteht die Flachpaketbaugruppe aus Komponenten mit aufwändigen geometrischen Ausprägungen (z. B. vorgewickelte Spulen), verschiedenen Werkstoffeigenschaften (z. B. Siliziumeisen und Kupfer) sowie komplexen Kontaktbedingungen, die sich im Laufe des Prozesses stets verändern. Aus diesem Grund hängt die Auslegung des Prozesses bisher stark vom Erfahrungswissen einzelner Personen in der Produktion ab. Zur systematischen Vertiefung des Prozesswissens zu dieser komplexen Biegesequenz wurden in zurückliegenden Untersuchungen FE-basierte Prozessmodelle in Ansys Workbench 18.2 aufgebaut, mit denen Fragestellung zum Flachpaketverfahren systematisch untersucht werden konnten. Im Folgenden werden diese zusammengefasst.

FE-Modellierung des mehrstufigen Biegeprozesses

Erste Ansätze bestanden in der Analyse des Biegeverhaltens von leeren Flachpaketen, also der Statorkomponente mit 80 Statorzähnen ohne eingelegte Wicklungen [9]. Anschließend wurden spezielle Detailmodelle zur Berechnung des Einflusses der Wicklungen auf das Biege- und Rückfederungsverhalten der gesamten Flachpaketbaugruppe [10] entwickelt. Aus diesen Detailmodellen wurden Ersatzmodelle der Wicklungen abgeleitet, mit denen eine effiziente Berechnung der Einflüsse der Wicklung möglich war. Im weiteren Verlauf wurde die vollständige Biegesequenz, bestehend aus vier aufeinanderfolgenden Biege- und Rückfederungsoperationen mit einer anschließenden Kalibrier- und Fügeoperation modelliert [11, 12]. Abb. 2 zeigt den Grundaufbau der Biegewerkzeuge (Biegeform und Gegenhalter inklusive Federelement) sowie das Werkstück mit ausgeblendeten Wicklungen. Mithilfe einer aufwändigen Aneinanderreihung von Lastschritten konnte die vollständige Sequenz innerhalb einer einzigen Simulationsumgebung aufgebaut werden, sodass kein Mapping zwischen einzelnen Berechnungen notwendig war. Dazu wurden alle Biegeformen, die zu einem bestimmten Zeitpunkt nicht im Eingriff sind, trotzdem mit dem Werkstück mitgeführt und erst zu einem späteren Zeitpunkt aktiviert.

Beispielsweise führt Biegeform 1 (Bf_1) eine Biegeoperation durch, während Bf_{2-4} inaktiv sind und sich kraftfrei mit dem Werkstück mitbewegen. Die Rückfederung des Werkstücks lässt sich durch eine Bewegung des Gegenhalters Gh_1 in negativer vertikaler Richtung ermöglichen. Nach Beendigung des Biege- und Rückfederungsvorganges des ersten Biegesegments wird Bf_1 deaktiviert und die nächste Biegeform aktiviert. Damit ist gemeint, dass alle Freiheitsgrade bis auf die Drehung um den Mittelpunkt der Biegeform null sein müssen. Der entsprechende Gegenhalter bewegt sich in vertikaler Richtung, bis dieser am Werkstück anliegt. Anschließend erfolgt die Biegeoperation durch eine vorgegebene Drehung des aktiven Werkzeugs um dessen Mittelpunkt.

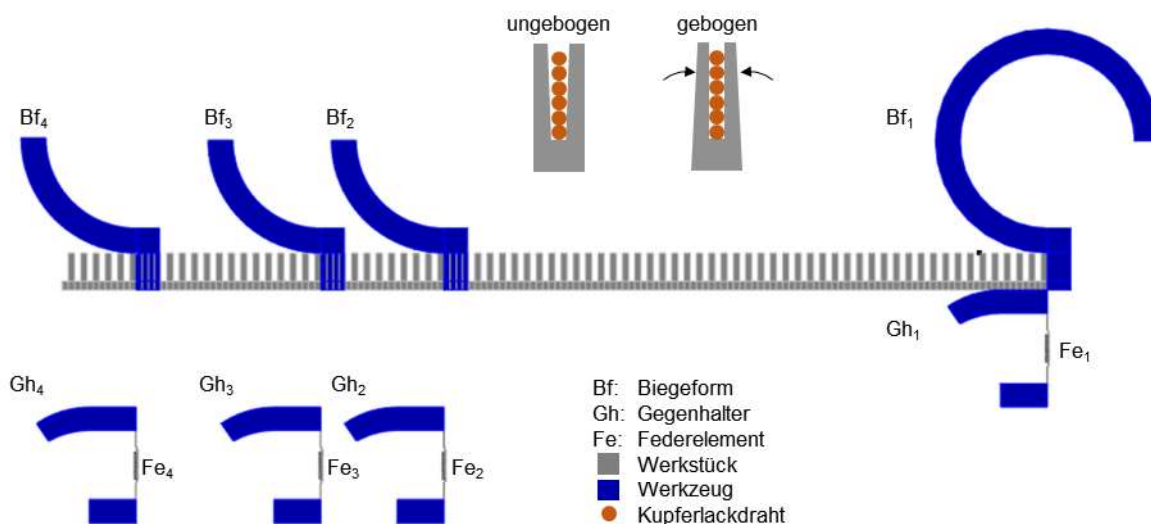


Abb. 2: Simulationsmodell des mehrstufigen Flachpaketbiegeprozesses mit vier Werkzeugpaarungen bestehend aus einer Biegeform Bf_{1-4} , einem Gegenhalter Gh_{1-4} inkl. Federelement Fe_{1-4} . Schnittansicht eines ungebogenen und gebogenen Statorsegments mit Wicklungen aus Kupferlackdraht

Im realen Biegeautomaten des Flachpaketprozesses ist die Biegeform zur Erzeugung des Biegemoments in einer vertikal beweglichen Traverse gelagert. Mit dem eingestellten Druck im pneumatischen Linearantrieb der Traverse kann eine Vorspannkraft zwischen Biegeform und Werkstück eingestellt werden. Die betrachteten Biegeautomaten enthalten außerdem Kraftmessdosen zur Überprüfung der tatsächlich aufgetragenen Vorspannkraft. Aufgrund der einfacheren Modellierung erfolgte die Implementierung dieser Vorspannkraft mittels eines Federelements nicht an der Biegeform, sondern am Gegenhalter. Die geometrische Vorpositionierung des Federelements und die Bestimmung einer entsprechenden Federsteifigkeit lieferten die gewünschten Vorspannkraft im FE-Modell. Im Zuge der ersten Modellierungsarbeiten und experimentellen Untersuchungen stellte sich heraus, dass insbesondere das Aufbringen einer Vorspannkraft als Parameter zur Beeinflussung der Biegerandbedingungen verwendet werden kann. Zu dieser Thematik wurden vergleichbare Ansätze in Arbeiten zum Profilbiegen identifiziert, in denen die Federelemente als Achssteifigkeit zur Genauigkeitssteigerung der Simulation berücksichtigt wurden [13].

Experimentelle Untersuchungen und Ergebnisse

Die Rundheit von Statoren stellt ein wichtiges Leistungsmerkmal innerhalb der Baugruppe einer elektrischen Maschine dar. Die Messung erfolgt im realen Fertigungsbetrieb zum Beispiel mithilfe von Koordinatenmessmaschinen, die zur Stichprobenmessung im laufenden Prozess angewendet werden können. Im Anschluss an eine Referenzmessung werden dazu die Köpfe der Statorzähne mit einem Kugeltaster abgetastet, um deren Positionen bezüglich eines Referenzkoordinatensystems zu ermitteln. So können in mehreren Schnittebenen des Stators Profilschnitte erzeugt werden, für die innerhalb einer Messebene ein Mittelpunkt z. B. nach dem Prinzip der kleinsten Fehlerquadrate berechnet wird. Idealerweise würden alle Messpunkte den gleichen Abstand zu diesem berechneten Mittelpunkt aufweisen. Beim Flachpaketbiegen können prozessbedingt aktuell Rundheitsabweichungen von mehr als 0,5 mm vorliegen. Abb. 3 zeigt auf der linken Seite den Profilschnitt eines Referenzversuchs $PS_{ref}(Z_{p,i})$ basierend auf einem Referenzpunkt $Z_{p,i}$ für jeden der 80 Statorzähne. Im Anschluss an die Kalibrier- und Fügeoperation findet im Prozess der SEG Automotive Germany GmbH ein weiterer Kalibriervorgang zur Reduktion der Rundheitsabweichungen statt. Aus diesem Grund liegen für diesen Zustand lediglich interne Eingriffsgrenzen vor.

In Voruntersuchungen wurde festgestellt, dass die eingestellte Vorspannkraft zwischen Biegeform und Werkstück einen signifikanten Einfluss auf die Rundheit eines gemessenen Profilschnittes aufweist. Das Diagramm auf der linken Seite von Abb. 3 enthält ebenfalls einen Profilschnitt mit veränderter Vorspannkraft in der dritten Biegeoperation und zeigt Veränderungen der Rundheit im gesamten Profilschnitt, obwohl lediglich ein Segment des Stators mit anderen Biegerandbedingungen gebogen wurde. Die Ursache hierfür liegt in der Position des nach Gauß berechneten Mittelpunktes. Diese Tatsache erschwert die intuitive Ermittlung von geeigneten Maschineneinstellungen. Aus diesem Grund wurden für den weiteren Verlauf sog. Residualkurven definiert, welche den Unterschied zwischen dem Profilschnitt des Referenzversuchs und eines Versuchs mit veränderten Maschineneinstellungen an jedem Messpunkt beschreiben. Bezogen auf den Referenzversuch führt eine Veränderung der Vorspannkraft zu einer Veränderung des Profilschnitts und ergibt damit eine Residualkurve. Das rechte Diagramm in Abb. 3 zeigt exemplarisch die Residualkurve infolge einer Änderung der Vorspannkraft in der dritten Biegestation. Zusätzlich ist das Ergebnis aus der FE-Simulation zu sehen.

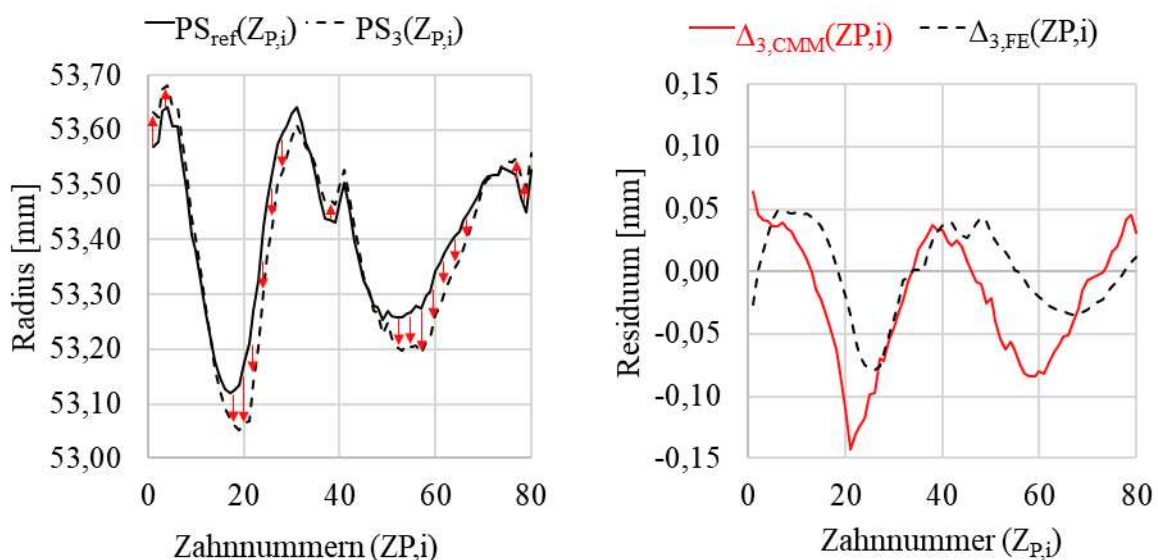


Abb. 3: links: Profilschnitte des Referenzversuchs $PS_{\text{ref}}(Z_{P,i})$ und mit veränderter Vorspannkraft in der dritten Biegestation $PS_3(Z_{P,i})$; rechts: experimentell bestimmte $\Delta_{3,\text{CMM}}(Z_{P,i})$ und mittels FE $\Delta_{3,\text{FE}}(Z_{P,i})$ berechnete Residualkurven

Der Vergleich zwischen experimentell ermittelter und mittels FE berechneter Residualkurve dient zur Beurteilung der Güte des gesamten Simulationsmodells. Insbesondere bei den Extremwerten der Residualkurve können vergleichbare Charakteristika bzw. nur leichte Verschiebungen festgestellt werden. Diese Vergleiche wurden für Änderungen der Vorspannkraft in allen vier Biegestufen durchgeführt und insgesamt eine hohe Übereinstimmung zwischen FE-Ergebnis und Messung festgestellt. Für den weiteren Verlauf kennzeichnet der Index der Residualkurve die Biegestation, in der eine Veränderung bezogen auf die Maschineneinstellungen des Referenzversuchs vorgenommen wurde.

Mathematisches Modell zur Optimierung der Statorrundheit

Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen zeigen, dass eine Änderung der Maschineneinstellungen zu veränderten Profilschnitten und damit zu charakteristischen Residualkurven führen. Aufgrund der Abhängigkeit des berechneten Statormittelpunktes von dem Profilschnitt, führt die geometrische Änderung eines einzelnen Statorsegments zu einer Veränderung des gesamten Profilschnitts. Aus diesem Grund erweisen sich die Zusammenhänge zwischen aufgebrauchten Vorspannkraften und dem resultierenden

Profilschnitt als nicht intuitiv begründbar, sodass sich neue Herausforderungen bei der Optimierung der Statorgeometrie ergaben. Der folgende Abschnitt beschreibt daher die Entwicklung eines mathematischen Ansatzes zur systematischen Ermittlung von Maschineneinstellungen, mit denen die Rundheitsabweichungen der Statoren unter Produktionsbedingungen reduziert werden konnte. Das mathematische Modell stellt eine Weiterentwicklung des bereits in [14] vorgestellten Berechnungsmodells dar.

Der Profilschnitt des Referenzversuchs wird gemessen, nachdem ein Flachpaket mit bekannten Maschineneinstellungen alle Biegevorgänge und die finale Kalibrier- und Fügeoperation durchlaufen hat. Die geometrische Differenz zwischen dem Referenzprofilschnitt und einem beliebigen Profilschnitt wurde als Residualkurve beschrieben. Diese Definition wird in der Form genutzt, dass ein Profilschnitt mathematisch ermittelt werden kann, indem eine Residualkurve zum Profilschnitt des Referenzversuchs addiert wird. Dieser berechneten Residualkurve liegen folgende zwei Annahmen zugrunde:

- Residualkurven ändern sich proportional zur Änderung der Vorspannkraft und
- die Addition mehrerer Residualkurven zu einer gesamten Residualkurve Δ_{math} ist zulässig.

Gemäß der Analyse in [14] kann für Änderungen der Vorspannkraft zwischen 3 und 13 kN von einer nahezu proportionalen Veränderung der Residualkurven ausgegangen werden. Dies traf insbesondere auf die Extrempunkte der Residualkurve zu, die eine besonders hohe Relevanz für die Optimierungsrechnung aufweisen. Die zweite Annahme bezieht sich auf die Addition mehrerer Residualkurven zu einer gesamten Residualkurve, welche eine Superkompensation der einzelnen Verläufe darstellt. Mit diesem mathematischen Modell ist es möglich, die Veränderungen in jeder Biegestation zu skalieren und deren Wirkung auf das Gesamtergebnis zu berechnen. Gleichung (2) beschreibt die gesamte Residualkurve Δ_{math} , welche sich aus den einzelnen Residualkurven Δ_{1-4} zusammensetzt:

$$\Delta_{\text{math}}(Z_{P,i}) = w_1 \cdot \Delta_1(Z_{P,i}) + w_2 \cdot \Delta_2(Z_{P,i}) + w_3 \cdot \Delta_3(Z_{P,i}) + w_4 \cdot \Delta_4(Z_{P,i}) \quad (2)$$

Die einzelnen Residualkurven werden mithilfe der Faktoren w_{1-4} in einem Wertebereich von -1 bis 1 skaliert bzw. gewichtet. Dieser Wertebereich stellt damit eine Interpolation der experimentellen Versuche dar. Die Addition des Profilschnitts des Referenzversuchs $\text{PS}_{\text{ref}}(Z_{P,i})$ mit der berechneten Residualkurve ergibt einen berechneten Profilschnitt $\text{PS}_{\text{math}}(Z_{P,i})$, siehe Gleichung (3). Eine Festlegung der Gewichtungsfaktoren w_{1-4} mit einem Wert von 0 ergibt die Referenzkurve. Gewichtungsfaktoren von +1 repräsentieren Profilschnitte mit der Maximal eingestellten Vorspannkraft in der jeweiligen Biegeoperation. Der Profilschnitt ergibt sich folgendermaßen aus den Einzelverläufen in Abhängigkeit von den Gewichtungsfaktoren w_{1-4}

$$\text{PS}_{\text{math}}(Z_{P,i}, w_{1-4}) = \text{PS}_{\text{ref}}(Z_{P,i}) + \Delta_{\text{math}}(Z_{P,i}, w_{1-4}) \quad (3)$$

Die Rundheitsabweichungen $\text{RA}_{\text{math}}(Z_{P,i}, w_{1-4})$ auf der Innenseite des Stators ergeben sich aus der Differenz zwischen Maximal- und Minimalwert des berechneten Profilschnitts gemäß Gleichung (4).

$$\text{RA}_{\text{math}}(Z_{P,i}, w_{1-4}) = \max(\text{PS}_{\text{math}}(Z_{P,i}, w_{1-4})) - \min(\text{PS}_{\text{math}}(Z_{P,i}, w_{1-4})) \quad (4)$$

Die ermittelten Gleichungen (3) und (4) lassen sich im nächsten Schritt in ein mathematisches Optimierungsproblem überführen, wobei die Rundheitsabweichungen sich als Differenz zwischen dem Maximal- und Minimalwert des berechneten Profilschnitts darstellen. Das Optimierungsziel besteht in der Minimierung dieser Differenz, die Variablen sind die vier Gewichtungsfaktoren w_{1-4} .

Gleichung (5) zeigt die Formulierung, welche beispielsweise vom *Generalized Reduced Gradient Solver* in MS Excel gelöst werden kann

$$\min_{w_1, w_2, w_3, w_4 \in [-1, 1]} (RA_{\text{math}}(Z_{P,i}, w_1, w_2, w_3, w_4)). \quad (5)$$

Im realen Prozess lassen sich die Vorspannkräfte einstellen, um das geometrische Ergebnis insbesondere die Rundheitsabweichungen der Statorinnenkontur zu verändern. Mithilfe des mathematischen Modells in Gleichung (5) können Rundheitsabweichungen bei bestimmten Gewichtungsfaktoren berechnet werden. Sobald das optimale Ergebnis gefunden wurde, liefert eine Rückrechnung der Gewichtungsfaktoren auf die entsprechenden Vorspannkräfte das Ergebnis der Optimierung. Dieses Ergebnis besteht aus einer optimalen Vorspannkraft pro Biegestation, mit der die geringsten Rundheitsabweichungen erzielt werden können. In den gezeigten Untersuchungen wurden Vorspannkräfte berechnet, mit denen eine Reduzierung der Rundheitsabweichungen von 21 % prognostiziert wurde. Abb. 4 zeigt das experimentell ermittelte Statorprofil des Referenzversuchs und das berechnete Statorprofil mit optimierten Maschineneinstellungen.

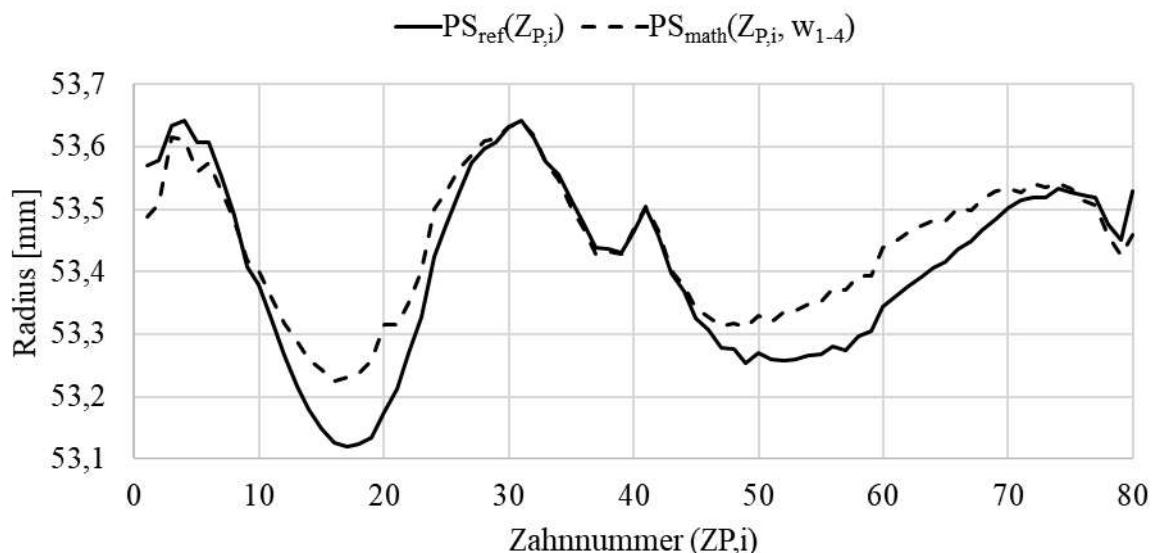


Abb. 4: Experimenteller Profilschnitt des Referenzversuchs $PS_{\text{ref}}(Z_{P,i})$ und berechneter Profilschnitt mit optimalen Gewichtungsfaktoren $PS_{\text{math}}(Z_{P,i}, w_{1-4})$

Mit den Biegeautomaten konnten die berechneten Verbesserungen des Profilschnitts erfolgreich bestätigt werden. Anschließend wurden weitere Versuche unternommen, indem die Grenzen für die Gewichtungsfaktoren des in Gleichung (5) formulierten Optimierungsproblems aufgehoben wurden, sodass auch eine Extrapolation der Versuchsreihe auf Maschineneinstellungen außerhalb der Versuchseinstellungen möglich war, siehe Gleichung (6).

$$\min_{w_1, w_2, w_3, w_4} (RA_{\text{math}}(w_1, w_2, w_3, w_4)) \quad (6)$$

Auch diese Optimierungsergebnisse konnten in den Praxisbetrieb zurückgeführt und experimentell bestätigt werden. Der Durchschnitt dreier Versuche mit optimierten Maschineneinstellungen ergab eine Rundheitsabweichung von 0,39 mm, welche eine Reduzierung von 25 % bezüglich des Referenzversuchs darstellt.

Übertragung der Erkenntnisse auf den Produktionsbetrieb

Abb. 5 zeigt den Profilschnitt des Referenzversuchs $PS_{ref}(Z_{P,i})$ und den berechneten Profilschnitt $PS_{math}(Z_{P,i}, w_{1-4})$ mit optimierten Maschineneinstellungen als gestrichelte Linie. Das blaue Feld zeigt die Messwerte von 15 Statoren, die mit diesen Maschineneinstellung zur Bestätigung für den Fertigungsbetrieb durchgeführt wurden. Im Durchschnitt konnte eine Rundheitsabweichung von 0,37 mm erzielt werden. In der Versuchsreihe wurden maximale Rundheitsabweichungen von 0,41 mm und minimale Rundheitsabweichungen von 0,34 mm gemessen. Die Ergebnisse dieser Untersuchung bestätigen einerseits den systematischen Ansatz zur Ermittlung geeigneter Maschinenparameter, andererseits konnten die Rundheitsabweichungen eines aktuellen Serienproduktes erheblich gesenkt werden.

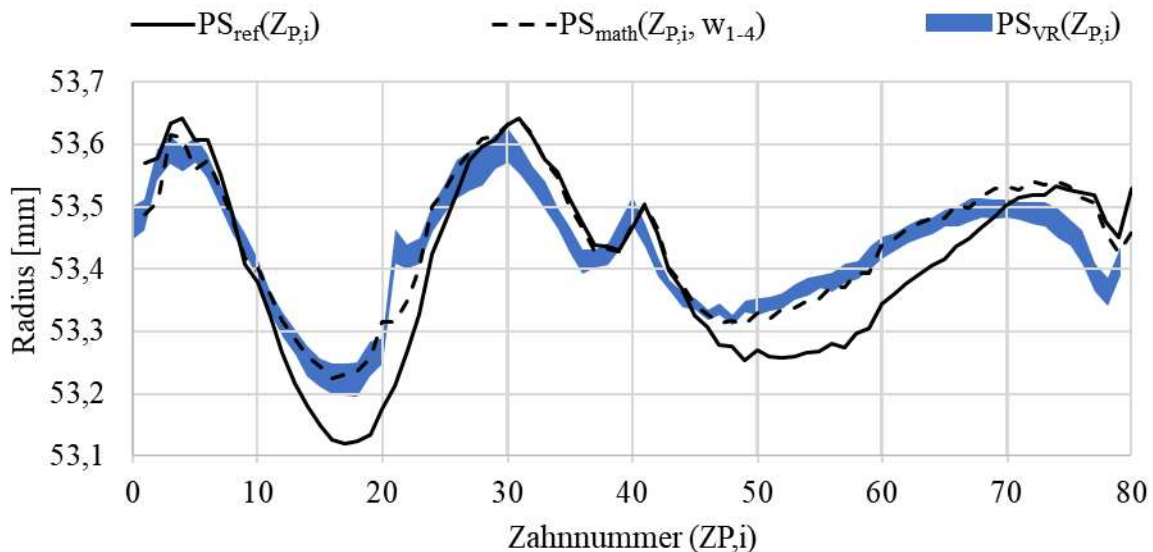


Abb. 5 Diagramm zum Vergleich des Profilschnitts des Referenzversuchs $PS_{ref}(Z_{P,i})$ und der Optimierungsrechnung $PS_{math}(Z_{P,i}, w_{1-4})$ mit den Profilschnitten der Versuchsreihe $PS_{VR}(Z_{P,i})$ mit 15 Proben

Zusammenfassung

Die in dieser Veröffentlichung dargestellten Ergebnisse umfassen numerische und experimentelle Untersuchungen zur Steigerung des Prozessverständnisses und zur Reduzierung der Rundheitsabweichungen in der Fertigung von Flachpaketstatoren. Basierend auf den Erkenntnissen aus mehrstufigen FE-Modellen wurde ein experimenteller Versuchsplan erstellt, durchgeführt und ausgewertet. Die Versuchsergebnisse dienen als Basis für mathematische Optimierungsrechnungen zur Ermittlung optimaler Prozesseinstellungen in Bezug auf die Rundheitsabweichungen nach dem Biegen des Flachpaketes. Die eingestellten Vorspannkräfte in jeder Biegestufe bildeten dabei die Variablen der Optimierungsrechnungen, die Rundheitsabweichungen das Minimierungsziel. Zur Validierung dieser mathematischen Ergebnisse wurden weitere Versuchsreihen mit den entsprechenden Maschineneinstellungen durchgeführt. Geringfügige Abweichungen zwischen der Vorhersage und den gemessenen Statorrundheiten lieferten den Nachweis für die grundsätzliche Eignung der Optimierungsrechnung. Darüber hinaus konnten die Rundheitsabweichungen um etwa 25 % reduziert werden.

Literaturverzeichnis

- [1] J. Fleischer et al., *Handbuch der Wickeltechnik für hocheffiziente Spulen und Motoren: Ein Beitrag zur Energieeffizienz*. Berlin, Heidelberg: Springer-Vieweg, 2016.
- [2] F. Wirth, T. Kirgör, J. Hofmann and J. Fleischer, “FE-Based Simulation of Hairpin Shaping Processes for Traction Drives,” 8th International Electric Drives Production Conference (EDPC), IEEE, pp. 1–5, 2018.
- [3] DIN EN 10106: Kaltgewalztes nicht kornorientiertes Elektroband und -blech im schlussgeglühten Zustand, Stand: 2016.
- [4] A. Kampker, K. Kreisköther, K. D. Büning and P. Treichel, “Herausforderung Hairpintechnologie Technologieschub für OEMs und Anlagenbauer,” *ATZelektronik*, vol. 5, pp. 62–67, 2018.
- [5] D. Wüterich, M. Kopp and M. Liewald, “Validation of Bending Simulation Models Based on Yield Strength Influences of Electrical Steel Sheets on Stator Core Radius,” 9th International Electric Drives Production Conference (EDPC), IEEE, pp. 1–6, 2019.
- [6] VDI 3430: Rotationszugbiegen von Profilen, Stand Juni 2014.
- [7] B. Engel, C. Gerlach und S. Cordes. "Biegemomentenabschätzung des Dornbiegeverfahrens", *UTF-Science*, vol. 2, pp. 1-8, 2008.
- [8] C. Heftrich, R. Steinheimer und B. Engel. "Rotary-draw-bending using tools with reduced geometries", in 17th International Conference on Metal Forming, 2018, pp. 804-811.
- [9] D. Wüterich, M. Kopp and M. Liewald, “Numerical investigations on the influence of material properties on bending behavior of comb shaped stator bodies,” *AIP Conference Proceedings*, vol. 2113, pp. 1–8, 2019.
- [10] D. Wüterich, M. Kopp and M. Liewald, “FE-based sensitivity analysis of stator winding geometries regarding bending behavior using flatpack bending,” 20. Internationales Stuttgarter Symposium, Springer Vieweg, pp. 197–207, 2020.
- [11] D. Wüterich, M. Kopp and M. Liewald, “Simulation von Biege- und Schweißprozessen von Flachpaketen für die Fertigung von Statorpaketen,” *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, vol. 115.11, pp. 779–782, 2020.
- [12] D. Wüterich, M. Kopp and M. Liewald, “Experimental Springback Validation of a Finite Element Model of Multi-stage Stator Bending,” *Congress of the German Academic Association for Production Technology*, Springer Berlin Heidelberg, pp. 202–211, 2020.
- [13] L. Borchmann, C. Kuhnhen, P. Frohn, and B. Engel, “Sensitivity analysis of the rotary draw bending process as a database of digital equipping support,” *Procedia Manufacturing*, vol. 29, pp. 592–599, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.promfg.2019.02.100.
- [14] D. Wüterich, M. Kopp and M. Liewald, “Numerical Simulation and Experimental Validation of Flatpack Bending and Joining Process,” 10th International Electric Drives Production Conference (EDPC), IEEE, pp. 1–8, 202