

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abkürzungsverzeichnis	V
Formelverzeichnis	VII
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	2
1.2 Zielsetzung	4
1.3 Aufbau der Arbeit	5
2 Grundlagen	7
2.1 Aufbau und Funktionsweise elektrischer Traktionsmotoren	7
2.2 Prozessketten zur industriellen Statorfertigung	11
2.2.1 Herstellung und Qualitätsmerkmale von Kupferflachdraht	11
2.2.2 Prozessketten zur Herstellung von Statorwicklungen	14
2.2.3 Prozesskette zur Fertigung von Statoren mit Hairpin-Technologie	18
2.3 Prozessmodellierung in der Wickel- und Profilbiegetechnik	28
2.3.1 Analytische und numerische Prozessmodellierung	29
2.3.2 Datenbasierte Prozessmodellierung	33
2.4 Prozessregelung in der Fertigungstechnik	36
2.4.1 Klassifikation von Regelungssystemen	38
2.4.2 Datenbasierte Regelungssysteme	42
2.5 Zusammenfassung der technischen und methodischen Grundlagen	43
3 Stand der Forschung und Technik	45
3.1 Formgebung von Hairpin-Steckspulen	45
3.1.1 Eigenschaften und Qualitätsmerkmale von Hairpin-Steckspulen	45
3.1.2 Klassifikation von Hairpin-Steckspulen	54
3.1.3 Biegetechnologien zur Formgebung von Hairpin-Steckspulen	60
3.1.4 Biegemaschinen zur Formgebung von Hairpin-Steckspulen	68
3.2 Modellbasierte Optimierung von Fertigungsprozessen für Statorwicklungen	70

3.2.1	Modellbildung und Optimierung von Runddraht-Wickelprozessen	71
3.2.2	Modellbildung und Optimierung von Flachdraht-Biegeprozessen	72
3.3	Regelung von Profilbiegeprozessen	76
3.3.1	Regelungssysteme für das kinematische Profilbiegen	77
3.3.2	Regelungssysteme für das sequenzielle werkzeuggebundene Profilbiegen	79
3.3.3	In-Process-Messmethoden für das Biegen von Rohren und Profilen	80
3.3.4	Off-Process-Messmethoden für das Biegen von Rohren und Profilen	81
3.4	Forschungsdefizit	83
4	Lösungsansatz und Vorgehensweise	86
4.1	Lösungsansatz	87
4.1.1	Analyse und Modellierung von Hairpin-Formgebungsprozessen	87
4.1.2	Modellbasierte Optimierung der Fertigungsgenauigkeit	89
4.2	Konzeption des Regelungssystems	91
5	Modellierung von Hairpin-Biegeprozessen	94
5.1	Modellierung der Materialeigenschaften von Kupferflachdraht	94
5.1.1	Methodik zur experimentellen Materialcharakterisierung	97
5.1.2	Methodik zur effizienten Modellierung des mechanischen Werkstoffverhaltens von lackisoliertem Kupferflachdraht	108
5.1.3	Modellierung von Fertigungseinflüssen auf die Isolationsfestigkeit	113
5.2	Implementierung des numerischen Prozessmodells	120
5.2.1	Diskretisierung von Maschine und Werkstück	120
5.2.2	Modellierung des Material- und Kontaktverhaltens	122
5.2.3	Modellierung der Maschinenkinematik und des Prozessablaufes	123
5.2.4	Verifikation des numerischen Prozessmodells	125
5.2.5	Validierung des numerischen Prozessmodells	126
5.3	Numerische Sensitivitäts- und Einflussanalysen	130
5.3.1	Einfluss von Drahttoleranzen auf die Fertigungsgenauigkeit	130
5.3.2	Einfluss von Maschinentoleranzen auf die Fertigungsgenauigkeit	139
5.3.3	Analyse von Produkt-Prozess-Wechselwirkungen	145
5.4	Metamodellierung des numerischen Prozessmodells	160

5.4.1	Metamodellierung mittels künstlicher neuronaler Netze	161
5.4.2	Metamodellierung mittels linearer Regression	164
5.4.3	Verifikation des datenbasierten Metamodells	165
6	Implementierung der Prozessregelung	168
6.1	Implementierung des Regelgliedes	169
6.1.1	Implementierung des linearen Regelungsalgorithmus	171
6.1.2	Implementierung des modellbasierten Regelungsalgorithmus	172
6.2	Implementierung des Führungsgrößenbildners	173
6.2.1	Identifikation der Profilmittellinie und Querschnittsorientierungen	174
6.2.2	Segmentierung der Profilmittellinie	176
6.2.3	Merkmalsextraktion zur Beschreibung der Geometrieelemente	177
6.2.4	Verifikation des Führungsgrößenbildners	179
6.3	Implementierung des Messgliedes	180
6.3.1	Off-Machine-Messglied zur vollständigen 3D-Geometrieerfassung	180
6.3.2	In-Process-Messglied zur iterativen 2D-Geometrieerfassung	181
6.4	Maschinenmodul zur prozessgeregelten Hairpin-Formgebung	184
6.4.1	Konzeption und mechanische Konstruktion des Maschinenmoduls	186
6.4.2	Konzeption und Implementierung des Steuerungssystems	195
7	Validierung des Lösungsansatzes	201
7.1	Versuchsaufbau und Validierungsmethodik	201
7.2	Ergebnisse der experimentellen Versuchsreihen	203
7.2.1	Versuchsreihen am Referenzdraht mit $4,50 \times 2,36 \text{ mm}^2$	203
7.2.2	Versuchsreihe am Vergleichsdraht mit $3,20 \times 2,80 \text{ mm}^2$	207
7.2.3	Versuchsreihe am Vergleichsdraht mit $5,00 \times 2,00 \text{ mm}^2$	208
7.3	Diskussion der Versuchsergebnisse	209
7.4	Bewertung des Lösungsansatzes	212
8	Zusammenfassung und Ausblick	214
8.1	Zusammenfassung	214
8.2	Ausblick	218

Publikationsliste des Verfassers	220
Literaturverzeichnis	223
Abbildungsverzeichnis	I
Tabellenverzeichnis	IX
Anhang	XII
A1 Forschungsarbeiten zur Auslegung von Hairpin-Wicklungen	XII
A2 Geometrieklassifikation von Hairpin-Steckspulen	XVI
A3 Biegeverfahren zur Formgebung von Hairpin-Steckspulen	XIX
A4 Modellierungsmethoden in der Wickeltechnik	XXI
A5 Prozessregelungen in der Rohr- und Profilbiegetechnik	XXIV
A6 Materialmodellierung von lackisoliertem Kupferflachdraht	XXV
A7 Werkstoffeigenschaften von lackisoliertem Kupferflachdraht	XXVI
A8 Konvergenzstudien zur Verifikation des Prozessmodells	XXVII
A9 Produkt-Prozess-Wechselwirkungen der Rückfederung	XXVIII
A10 Produkt-Prozess-Wechselwirkungen der Leiterdicke	XXXII
A11 Produkt-Prozess-Wechselwirkungen der Leiterbreite	XXXVI