

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	1
Formelzeichen und Abkürzungen	3
1 Einleitung.....	6
2 Grundlegendes Wissen und Stand der Forschung.....	7
2.1 Einsatz elektrischer Maschinen in Traktionsantrieben	7
2.1.1 Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie elektrischer Maschinen	7
2.1.2 Antriebsstrangkongfiguration.....	9
2.1.3 Anforderungen an elektrische Traktionsmaschinen	11
2.2 Grundlagen rotierender elektrischer Maschinen	12
2.2.1 Prinzipieller Aufbau und Wirkungsweise elektrischer Maschinen.....	12
2.2.2 Klassifizierung nach Funktionsprinzip.....	13
2.2.3 Durchflutungsgesetz und magnetische Durchflutung.....	14
2.2.4 Mechanische Leistung und Bauvolumen elektrischer Maschinen	15
2.2.5 Effizienz elektrischer Maschinen	17
2.3 Wicklungsarten und Füllfaktoren	18
2.3.1 Aufbau und Klassifizierung von Statorwicklungen	18
2.3.2 Elektrischer und mechanischer Nutzfüllfaktor.....	19
2.3.3 Einfluss des Herstellungsverfahrens auf den Füllfaktor	20
2.4 Einflussfaktoren auf die Effizienz elektrischer Maschinen	22
2.4.1 Einflussfaktoren auf den elektrischen Widerstand	22
2.4.2 Magnetische Ausnutzung des Stators	28
2.4.3 Thermisches Verhalten des Stators	30
2.5 Fertigungsverfahren für Einzelzahnspulen	32
2.5.1 Linearwickeln	33
2.5.2 Nadelwickeln	34
2.5.3 Gießtechnische Herstellung querschnittsvariabler Einzelzahnspulen	35
2.5.4 Sequenzielles Drahtstauchen mit anschließendem Biegen	36
2.5.5 Bereichsweises Stauchen gebogener Einzelzahnspulen aus Runddraht.....	37
2.5.6 Stauchumformverfahren mit vorgewickeltem Halbzeug	38
2.6 Umformung von lackisoliertem Draht	40
3 Zielsetzung und Vorgehensweise	41
4 Auswirkungen des Stauchprozesses auf die Wicklung	45
4.1 Drahteinschnürung aufgrund Volumenkonstanz beim Stauchprozess.....	45
4.1.1 Drahteinschnürung: Analytisches Modell.....	47
4.1.2 Drahteinschnürung: Numerisches Modell.....	51
4.2 Einfluss des Stauchprozesses auf den elektrischen Widerstand	67
4.2.1 Materialbedingte Widerstandsänderung	67
4.2.2 Geometriebedingte Widerstandsänderung	72
4.3 Umformung von Kupferlackdraht.....	78
4.3.1 Materialfluss des Isolationsmaterials beim Stauchen	80
4.3.2 FE-Modellierung einer Stauchumformung von lackisoliertem Draht	83

5	Konzepte zum Stauchen des Spulenrohlings.....	88
5.1	Konzept der einstufigen Umformung.....	88
5.2	Konzept der mehrstufigen Umformung.....	91
5.3	Konzept der Umformung mit Gegenhalter.....	95
5.4	Konzept der Umformung mit Werkzeugspule.....	98
5.5	Bewertung der Konzepte.....	100
5.6	Unterscheidung zur Stauchumformung mit vorgewickelterm Halbzeug.....	101
6	Spulsherstellung durch umformtechnischen Ansatz.....	103
6.1	CNC-Biegen des Spulenrohlings.....	103
6.2	Industrielle Anwendung der mehrstufigen Stauchumformung.....	105
6.3	Nachträgliche Isolierung umgeformter Einzelzahnspulen.....	108
7	Technologische und wirtschaftliche Bewertung.....	111
7.1	Widerstandserhöhung umgeformter Einzelzahnspulen.....	111
7.2	Prüfstandsmessung eines Demonstratormotors.....	112
7.2.1	Randbedingungen und Durchführung der Prüfstandsmessung.....	113
7.2.2	Wirkungsgradkennfeld von Technologieträger und Referenzmaschine.....	115
7.2.3	Thermisches Verhalten der Statoren.....	116
7.2.4	Fazit der Prüfstandsmessungen.....	118
7.3	Wirtschaftliche Betrachtung querschnittsvariabler Einzelzahnspulen.....	118
8	Zusammenfassung.....	121
	Literaturverzeichnis.....	124
	Danksagung.....	131
	Kurzfassung.....	132
	Abstract.....	133