

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 Antriebsstrangkonfiguration | 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 Nutfüllfaktor | 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 lackisiertem 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 lackisiertem 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 vorgewickeltem Halbzeug | 101 |
| 6 Spulenherstellung 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 umgeformer 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 |