

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis	ix
1 Einleitung und Zielsetzung	1
2 Kontaktierung im Kontext der Produktion elektrischer Traktionsantriebe	5
2.1 Weiterentwicklung elektrischer Antriebe durch automobile Anforderungen	6
2.1.1 Mobilitätstransformation durch die Elektrifizierung des automobilen Antriebsstrangs	7
2.1.2 Anforderungen an Maschinen zur Elektrifizierung des Antriebsstrangs	9
2.1.3 Potenziale produktseitiger Optimierungen	11
2.2 Wandel der Produktionstechnologien für die Herstellung von Statorwicklungen	14
2.2.1 Etablierte Technologien zur Wicklungsherstellung	15
2.2.2 Herstellung von Formspulenwicklungen	16
2.2.3 Produktionstechnische Potenziale und Herausforderungen	19
2.3 Kontaktierung flachleiterbasierter Formspulenwicklungen	20
2.3.1 Prozesstechnologien zum Fügen von Wicklungen	21
2.3.2 Abtrag der Isolationsschicht von Kupferleitern	28
2.3.3 Anwendungsszenarien und technologische Potenziale von Kontaktierungstechnologien	30
2.4 Kontaktierung von Wicklungen im Laserstrahlschweißverfahren	32
2.4.1 Herausforderungen beim Schweißen von Kupfer mit Laserstrahlung	33
2.4.2 Systemtechnik zum Fügen von Kupferwerkstoffen	35
2.4.3 Prozessoptimierungen zum Schweißen von Kupferwerkstoffen mit infraroter Laserstrahlung	37
2.5 Ableitung des Forschungsbedarfs und Lösungsweg der Arbeit	39

3	Kausalitäten beim Laserstrahlschweißen von Formspulenwicklungen.....	43
3.1	Prozessketten zur serientauglichen Herstellung flachleiterbasierter Formspulenwicklungen	45
3.2	Wechselwirkungen laserbasierter Kontaktierungstechnologien entlang der Prozesskette.....	49
3.3	Ermittlung und Darstellung prozessübergreifender Abhängigkeiten	51
4	Abtrag der Isolation von Kupferlackdrähten für Formspulenwicklungen.....	55
4.1	Quantifizierung von Lackrückständen mittels Fluoreszenzmessung.....	56
4.1.1	Messung der Fluoreszenz organischer Verbindungen	56
4.1.2	Qualifizierung der Fluoreszenzmessung zur Erfassung von Lackrückständen.....	58
4.2	Laserbasierter Abtrag des Isolationsmaterials von rechteckigen Kupferdrähten.....	60
4.2.1	Experimenteller Vergleich laserbasierter Abtragsprozesse für rechteckigen Kupferlackdraht	61
4.2.2	Prozessbezogene Abhängigkeiten für infrarote Laser	64
4.3	Benchmark mit alternativen Technologien und Fazit	69
5	Prozesseinflussgrößen beim Laserstrahlschweißen von Formspulenwicklungen.....	71
5.1	Thermische Wechselbeziehungen des Fügeprozesses.....	73
5.1.1	Numerische Bestimmung der Temperaturverteilung.....	74
5.1.2	Experimentelle Validierung des thermischen Modells....	76
5.1.3	Parameterabhängige Analyse von Temperaturfeldern	77
5.2	Prozessbezogene Einflussgrößen der laserbasierten Kontaktierung.....	79
5.2.1	Abhängigkeit der Kontaktstelleneigenschaften von Prozessparametern.....	84
5.2.2	Auswirkung maschinengebundener Einflussgrößen	98
5.2.3	Wirkbeziehungen zwischen Prozessergebnis und Werkstückbeschaffenheit.....	100

5.2.4	Wechselwirkung der Positionierung der Formspulenenden	108
5.2.5	Auswirkung des Einsatzes von Prozessgasen	111
5.3	Zusammenfassung und Fazit der Prozessuntersuchungen.....	112
6	Auslegung und Benchmark des laserbasierten Fügeprozesses	117
6.1	Verifizierung des Referenzprozesses.....	118
6.2	Technologischer und wirtschaftlicher Vergleich mit alternativen Fügeverfahren.....	122
6.3	Zusammenfassung von Potenzialen des Laserstrahlschweißens von Formspulenwicklungen	125
7	Prozessketten zur laserbasierten Kontaktierung von Formspulenwicklungen	127
7.1	Prozesskettenübergreifende Abhängigkeiten des laserbasierten Kontaktierungsprozesses.....	127
7.1.1	Prozesskettenbedingte Positionsabweichungen der Formspulen	128
7.1.2	Geometrische Variation der Formspulenenden durch vorausgehende Prozessschritte	133
7.1.3	Streuende Oberflächeneigenschaften der Fügezone in Folge der Formspulenherstellung.....	135
7.2	Integration des Kontaktierungsprozesses in die Prozesskette.....	137
7.2.1	Systematisierung prozesskettenübergreifender Wechselwirkungen	138
7.2.2	Konzeption eines Systems zur prozesssicheren Kontaktierung von Formspulenwicklungen	141
7.3	Zusammenfassung und Fazit prozesskettenübergreifender Abhängigkeiten.....	144
8	Zusammenfassung und Ausblick.....	147
9	Summary and outlook.....	153
10	Anhang.....	159
	Literaturverzeichnis.....	173