

Inhaltsverzeichnis

VERZEICHNIS DER ABKÜRZUNGEN UND SYMBOLE.....	XIII
1 EINLEITUNG	1
2 STAND DER FORSCHUNG	3
2.1 Elektrische Antriebe in der Automobilindustrie.....	3
2.2 Prozesskette zur Fertigung eines Stators mit Hairpinwicklung	5
2.3 Laserstrahlschweißen von Kupfer.....	10
2.4 Laserstrahlschweißen von Hairpinwicklungen	18
2.5 Qualitätsmerkmale und Prüftechnik	20
2.5.1 Zerstörungsfreie Prüftechnik	21
2.5.2 Zerstörende Prüftechnik	23
3 ABLEITUNG DER ZIELSTELLUNG.....	25
3.1 Zusammenfassung des Forschungsstandes und Ableitung der Forschungsfragen	25
3.2 Struktur der Arbeit.....	27
4 EXPERIMENTELLES VORGEHEN.....	31
4.1 Werkstoffe.....	31
4.2 Laserstrahlschweißen.....	32
4.2.1 Zentraler Versuchsaufbau	32
4.2.2 Ersatzmodell: Einzelne Hairpinpaare	34
4.2.3 Initialer Parametersatz	35
4.2.4 Vergleichsparametersatz	36
4.3 Analyseverfahren	38
4.3.1 Prozessbegleitende Röntgenbildgebung.....	38
4.3.2 Trägergasheißextraktion	40
4.3.3 Thermografie.....	41
4.3.4 Schwingungsprüfung.....	41

4.4	Qualitätsmerkmale der Hairpin-Schweißverbindung	42
4.5	Statistische Versuchsplanung	42
5	QUALIFIZIERUNG DER PRÜFMETHODEN.....	47
5.1	Prüfmethode für abisolierte Leiterenden.....	47
5.2	Röntgen-Computertomographie	51
5.2.1	Aufbau und Anordnung	52
5.2.2	Analysemethode	53
5.3	Prozessbegleitende Prüfmethoden	56
5.3.1	Versuchsaufbau	56
5.3.2	Methode zur Bildverarbeitung mit der Hochgeschwindigkeitskamera	57
5.3.3	Methode zur Auswertung akustischer Signale	59
5.3.4	Ergebnisse der prozessbegleitenden Prüfmethoden	61
5.4	Diskussion und Bewertung der Prüfmethoden im Kontext der Prozessentwicklung und Serienfertigung.....	65
6	FUNKTIONALE ANFORDERUNGEN	69
6.1	Beschreibung von Grenzmustern	69
6.2	Thermische Anforderungen	71
6.3	Anforderungen der Schwingfestigkeit.....	73
6.3.1	Schwingversuch am Stator	73
6.3.2	Schwingversuch am einzelnen Hairpinpaar	83
6.4	Anforderung an die Spritzerbildung	87
6.5	Diskussion und Zusammenfassung zur Definition der Qualitätsmerkmale	88
7	PROZESSEINFLÜSSE.....	91
7.1	Randbedingungen des Schweißprozesses	91
7.1.1	Übersicht der Parameter des Schweißprozesses	91
7.1.2	Charakterisierung des Schweißprozesses.....	95

7.1.3	Randbedingungen und Grenzen der Anlagentechnik.....	97
7.2	Untersuchungen zu Faktoren mit Effekt auf die Anbindungsfläche....	101
7.3	Untersuchungen zu Faktoren mit Effekt auf die Porosität.....	107
7.3.1	Prozessporen.....	110
7.3.2	Metallurgische Poren	115
7.4	Untersuchungen zu Faktoren mit Effekt auf die Spritzeranzahl	120
7.5	Diskussion und Zusammenfassung der Ergebnisse aus der Untersuchung der Prozesseinflüsse	124
7.5.1	Einordnung der Versuchsergebnisse	124
7.5.2	Bewertung hinsichtlich der Übertragbarkeit vorgestellter Ergebnisse im Kontext der Serienfertigung.....	127
8	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....	131
	LITERATURVERZEICHNIS	135
	PUBLIKATIONEN	149
	BETREUTE STUDENTISCHE ARBEITEN	151
	ANHANG.....	153