

Inhaltsverzeichnis

Verwendete Zeichen und Abkürzungen.....	9
Kurzfassung.....	11
Abstract.....	13
1 Einleitung.....	16
2 Stand der Technik.....	19
2.1 Relevante umformtechnische Verfahren.....	20
2.1.1 Allgemeine Definition des Umformens.....	20
2.1.2 Beschreibung des Karosserieziehens.....	21
2.1.3 Einordnung und Beschreibung des Streckziehens.....	21
2.1.4 Einordnung und Beschreibung des Tiefziehens.....	23
2.1.5 Beschreibung und Einordnung des Biegeprozesses von Blechen.....	25
2.1.6 Beschreibung des Falzprozesses.....	30
2.1.7 Beschreibung häufig verwendeter Falzgeometrien.....	39
2.1.8 Definitionen des Spaltmaßes im Fahrzeugrohbau und des Falzverlustes.....	40
2.2 Grundlagen der Robotertechnik.....	42
2.2.1 Definition und Begriffe zu Industrierobotern.....	42
2.2.2 Robotersteuerung.....	44
2.2.3 Roboterprogrammierungsmethoden.....	47
2.2.4 Genauigkeit von Industrierobotern.....	49
2.2.5 Steifigkeitsverhalten des Roboters.....	50
2.3 Grundlagen der Methoden der statistischen Versuchsplanung.....	53
2.3.1 Allgemeine Beschreibung der statistischen Versuchsplanung.....	53
2.3.2 Vollfaktorielle Versuchspläne.....	56
2.3.3 Teilfaktorielle Versuchspläne.....	57
2.3.4 Versuchspläne und Optimierung nach Taguchi.....	58
2.4 Grundlagen der Umformsimulation und der FEM-Berechnung.....	61
2.4.1 Beschreibung häufig verwendeter Elementtypen.....	63
2.4.2 Einführung und Vergleich von expliziter und impliziter Zeitintegration.....	65
2.5 Untersuchungsergebnisse aus Rollfalzexperimenten und FEM-Simulation.....	67
2.5.1 Spannungs- und Dehnungszustand während des Rollfalzens.....	68
2.5.2 Methoden der Versagensvorhersage für Rollfalzprozesse.....	68

2.5.3	Faltenbildung während des Rollfalzprozesses	70
2.5.4	Einflüsse auf den Falzverlust während des Rollfalzens	71
2.5.5	Einflüsse auf die Radiuseinsatzlinie während des Rollfalzens	73
2.5.6	Einflüsse auf die Falzqualität	73
2.5.7	Kraftbedarf und Robotersteifigkeit während des Rollfalzprozesses	74
3	Motivation und Zielsetzung der Arbeit	76
3.1	Betrachtung der vorliegenden Erkenntnisse	76
3.2	Motivation und wissenschaftliche Zielsetzung der Arbeit	77
3.3	Vorgehensweise	78
4	Modellentwicklung der FEM-Rollfalzsimulation	79
4.1	Beschreibung der virtuellen Prozesskette	79
4.2	Integration von FEM-Rollfalzsimulationen in die virtuelle Prozesskette	82
4.2.1	Anforderungen an die Netzgestaltung für Falzprozesse	83
4.3	Entwicklung einer Berechnungsmethode für 3D-Werkzeugkinematiken	85
4.3.1	Allgemeine Beschreibung der freien Rollenbewegung	86
4.3.2	Berechnung der allgemeinen kinematischen Beschreibungsgrößen	87
4.3.3	Umsetzungsmöglichkeiten in LS-DYNA	93
4.3.4	Bewertung der Lösungskonzepte zur Implementierung der Falzrollenbahnen	95
4.4	Optimierte Parameterwahl für Rollfalzsimulationen in LS-DYNA	97
4.4.1	Empfehlung für die Anwendung der Massenskalierung	97
4.4.2	Betrachtung der virtuellen Werkzeuggeschwindigkeit	99
5	Untersuchung des Rollfalzprozesses mittels FEM-Simulation	101
5.1	Auswahl von Prozessgrößen mit Einfluss auf das Rollfalzergebnis	101
5.1.1	Beschreibung der Störgrößen	101
5.1.2	Beschreibung der Steuergrößen	105
5.2	Sensitivitätsstudie nach Methoden des Design of Experiments und Taguchi	107
5.2.1	Versuchsplan und Ergebnisse der Analyse der Störgrößeneinflüsse	108
5.2.2	Versuchsplan und Ergebnisse der Analyse der Steuergrößeneinflüsse	113
5.2.3	Ergänzende Untersuchung des Einflusses des Vorfalzwinkels	121
5.3	Theoretische Robustheitsempfehlung nach Taguchi	123
5.4	Zusammenfassung der DoE-Ergebnisse	124
6	Entwicklung von Meta-Modellen für Rollfalzprozesse	126
6.1	Grundlagen zur Struktur von Meta-Modellen	126

6.1.1	Allgemeine Charakterisierung.....	126
6.1.2	Beschreibung der verwendeten empirischen Modelle	127
6.2	Vorgehensweise bei der Entwicklung der Meta-Modelle	129
6.2.1	Wahl zu berücksichtigender Parameter zur Entwicklung der Meta-Modelle	129
6.2.2	Festlegung des Versuchsplanes für die empirische Datenbasis	130
6.2.3	Bestimmung der Koeffizienten der Meta-Modelle für Rollfalzprozesse	132
6.3	Nutzung der Meta-Modelle zur optimalen Auslegung von Rollfalzprozessen	133
7	Validierung der FEM-Rollfalzsimulation und der Meta-Modelle.....	135
7.1	Entwicklung einer Strategie zur Übertragung der realen Falzrollenkinematik	135
7.1.1	Extraktion der Rollenkinematik aus dem Roboterprogramm	136
7.1.2	Roboterinterne Aufzeichnung der Rollenkinematik	139
7.1.3	Messtechnische externe Erfassung der Rollenkinematik	139
7.1.4	Diskussion der Strategien zur Bestimmung der realen Falzrollenkinematik	140
7.2	Validierung der FEM-Simulation an einer Prinzipgeometrie	143
7.2.1	Beschreibung der Versuchseinrichtung zur Validierung der FEM-Simulation .	144
7.2.2	Beschreibung des untersuchten Werkstoffes.....	146
7.2.3	Beschreibung der verwendeten FEM-Konfigurationen	146
7.2.4	Betrachtung der Dehnungsverteilung im Falz.....	147
7.2.5	Vergleich der benötigten Berechnungszeit der FEM-Rollfalzsimulation	148
7.2.6	Untersuchungen der Robotersteifigkeit.....	149
7.2.7	Vergleich von Simulation und Experiment hinsichtlich Falzverlust	151
7.3	Validierung der FEM-Simulation an einem Realbauteil.....	152
7.3.1	Beschreibung des Versuchsaufbaus	153
7.3.2	Beschreibung der verwendeten FEM-Konfigurationen	157
7.3.3	Ergebnis der Validierung hinsichtlich des Falzverlustes	158
7.3.4	Ergebnis der Validierung bezüglich der Lage der Radiuseinsatzlinie	161
7.3.5	Diskussion der FEM-Validierungsergebnisse	164
7.4	Validierung der Meta-Modelle an einem Realbauteil	166
7.4.1	Versuchskonfiguration und Vergleichsmethode	166
7.4.2	Ergebnis der Validierung der Meta-Modelle bezüglich des Falzverlustes	166
7.4.3	Ergebnis der Validierung der Meta-Modelle bezüglich der Radiuseinsatzlinie	168
7.5	Validierung einer optimierten Konfiguration nach Auslegungsstrategie.....	170

8	Validierung der Robustheitsempfehlungen für Rollfalzprozesse	172
8.1	Vorgehensweise bei der Verifikation der Robustheitsempfehlung.....	172
8.2	Verifikation der Annahmen an einer Versuchsgeometrie	173
8.3	Verifikation der Annahmen an einem Realbauteil.....	175
8.4	Zusammenfassung der Validierung der Robustheitsempfehlung.....	177
9	Zusammenfassung und Ausblick	178
10	Anhang	182
11	Literatur	188
	Danksagung.....	198
	Lebenslauf.....	200