

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis	ix
1 Einleitung	1
2 Stand der Technik und Forschung	3
2.1 Tiefziehen und Materialflusssteuerung.....	3
2.2 Verwendung von Ziehsicken.....	8
2.3 Veränderung der mechanischen Eigenschaften nach dem Ziehsickendurchlauf.....	13
2.3.1 Verfestigung und Bauschinger-Effekt beim Durchlauf einer Ziehsicke.....	13
2.3.2 Dehnpfad und Versagensverhalten	17
2.3.3 Analytische Modellierung des Ziehsickendurchlaufs	20
2.4 Veränderung des tribologischen Systems beim Ziehsickendurchlauf.....	21
2.4.1 Veränderung der Oberflächentopografie	23
2.4.2 Analyse und Modellierung der Reibzahl im Tiefziehprozess mit Ziehsicken.....	26
2.5 Simulation von Ziehsicken und Ersatzmodelle.....	30
2.6 Zusammenfassende Bewertung des Stands der Technik und Forschung	31
3 Zielsetzung und methodische Vorgehensweise	35
4 Versuchseinrichtungen, Werkstoffe und Methoden	37
4.1 Verwendete Werkstoffe und Zwischenmedien	37
4.2 Methoden der mechanischen Werkstoffcharakterisierung.....	39
4.3 Methoden der tribologischen Werkstoffcharakterisierung.....	40
4.4 Methoden der Prozessanalyse und -bewertung	44
4.4.1 Modellversuch zum Ziehsickendurchlauf	44
4.4.2 Optische Dehnungsmessung im Ziehsickendurchlauf ...	46
4.4.3 Tiefziehwerkzeug mit Ziehsicken	47
4.4.4 Digitalisierung der Gestalteigenschaften	48
4.4.5 Materialmodellierung in der FE Simulation.....	49
4.4.6 Aufbau der Finite-Elemente Simulationen.....	50

5	Experimentelle und numerische Prozessanalyse des Ziehsickendurchlaufs	53
5.1	Konzeptionierung eines adaptiven Werkzeugs zur Erweiterung des Streifenzugversuchs mit Ziehsicke.....	53
5.2	Beurteilung der numerischen Prognosegüte für den Streifenzug mit Ziehsicke	61
5.3	Analyse der mechanischen Werkstoffeigenschaften	66
5.3.1	Verlauf der Härte beim Ziehsickendurchlauf.....	67
5.3.2	Analyse der Dehnungen im Ziehsickendurchlauf.....	69
5.3.3	Fließkurven und Versagen nach Ziehsickendurchlauf ...	74
5.3.4	Einordnung der mechanischen Veränderungen nach dem Ziehsickendurchlauf.....	81
5.4	Analyse des tribologischen Systems beim Ziehsickendurchlauf	83
5.4.1	Oberflächenhärte nach dem Ziehsickendurchlauf	84
5.4.2	Veränderungen der Beschichtung nach Ziehsicke.....	85
5.4.3	Topografische Oberflächenvermessung nach dem Ziehsickendurchlauf.....	87
5.4.4	Schmierstoff, Schmiermenge und Restölanalyse	91
5.4.5	Bestimmung der Reibzahl nach Ziehsickendurchlauf ...	94
5.5	Zusammenfassende Bewertung der Prozessanalyse	98
6	Übertragung der Erkenntnisse und Erarbeitung von Wirkzusammenhängen	103
6.1	Berücksichtigung des Bauschinger-Effekts bei der Modellierung des Ziehsickendurchlaufs.....	103
6.2	Richtungsabhängigkeit der Mikrostruktur nach dem Ziehsickendurchlauf.....	106
6.3	Reibzahlmodellierung nach dem Ziehsickendurchlauf	110
6.4	Korrelation der mechanischen und tribologischen Systemveränderungen im Ziehsickendurchlauf.....	116
6.5	Erweiterte Modellierungs- und Analyseansätze	130
6.6	Simulative Vorhersage des kraft- und distanzgeregelten Ziehsickendurchlaufs	137
6.7	Zusammenfassende Erarbeitung der Wirkzusammenhänge ..	144

7	Erweiterung, Übertragbarkeit und Validierung der Erkenntnisse im Tiefziehprozess mit Ziehsicke	149
7.1	Streifen mit linearer Ziehsicke.....	150
7.2	Vorhersagegenauigkeit der Rückfederung nach dem Ziehsickendurchlauf.....	156
7.3	Validierung anhand eines Ovalnapfes.....	160
7.4	Zusammenfassende Bewertung der Validierung	165
8	Zusammenfassung und Ausblick.....	169
9	Summary and outlook.....	173
	Literaturverzeichnis.....	177
	Verzeichnis promotionsbezogener, eigener Publikationen.....	219
	Verzeichnis promotionsbezogener, studentischer Arbeiten	221
	Abstract.....	223