

## Inhaltsverzeichnis

<b>Danksagung.....</b>	<b>i</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>	<b>vii</b>
<b>Formelzeichen.....</b>	<b>viii</b>
<b>Kurzfassung .....</b>	<b>xv</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>xvi</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
<b>2 Stand der Technik.....</b>	<b>3</b>
2.1 Hochfeste Stahlbleche als Leichtbauwerkstoff .....	3
2.1.1 Metallurgische und mechanische Grundlagen der elastisch-plastischen Verformung .....	4
2.1.2 Herstellung, Anwendung und Wiederverwertung .....	9
2.1.3 Zukünftige Herausforderungen bei der Herstellung und Anwendung .....	12
2.2 Ausgewählte Verfahren der Blechumformung .....	15
2.2.1 Grundlagen und Klassifikation .....	15
2.2.2 Zugdruckumformen .....	16
2.2.3 Biegeumformen .....	23
2.3 Entstehung und Kompensation von Rückfederungsphänomenen .....	28
2.3.1 Ursache und Einflussgrößen auf die Rückfederung .....	28
2.3.2 Klassifizierung der Rückfederungsarten .....	31
2.3.3 Rückfederungskompensation durch geometrische Bauteilmodifikationen .....	34
2.3.4 Reduktion der Rückfederung durch modifizierte Umformprozesse.....	37
2.4 Spezifika der Finite-Elemente-Methode in der Blechumformung .....	44
2.4.1 Allgemeine Grundlagen zur FE-Modellierung.....	45
2.4.2 Elastisch-plastische Werkstoffmodelle für die Blechumformsimulation .....	48
2.4.3 Möglichkeiten der Werkstück- und Werkzeugdiskretisierung .....	55
2.5 Zusammenfassung des Standes der Technik und Ableitung des Forschungsbedarfs.....	58

<b>3</b>	<b>Motivation, Zielsetzung und Vorgehensweise der Arbeit.....</b>	<b>59</b>
<b>4</b>	<b>Konzeptionierung des Tiefdruckverfahrens .....</b>	<b>64</b>
4.1	Ansatz zur Verbesserung der Bauteilmaßhaltigkeit umgeformter Blechbauteile .....	64
4.2	Ansatz zur Effizienzsteigerung von Blechumformprozessen.....	69
4.3	Konsolidierung der Ansätze und Ableitung des neuartigen Blechumformverfahrens .....	75
4.4	Verwendete Bauteilgeometrien, Versuchswerkstoffe, Anlagen, Messmittel und Software.....	79
4.5	Zusammenfassende Darstellung des Tiefdruckverfahrens .....	82
<b>5</b>	<b>Charakterisierung und -modellierung der Versuchswerkstoffe .....</b>	<b>84</b>
5.1	Experimentelle Charakterisierung ausgewählter Dualphasenstähle.....	84
5.1.1	Quasi-statische Zugversuche .....	85
5.1.2	Zyklisch-schwellende Zugversuche .....	86
5.1.3	Quasi-statische Bulge-Versuche.....	87
5.1.4	Zyklische Scherversuche .....	89
5.2	Elastisch-plastische Werkstoffmodellierung der Dualphasenstähle.....	91
5.2.1	Modellierung der Fließkurve.....	92
5.2.2	Modellierung des dehnungsabhängigen Elastizitätsmoduls.....	93
5.2.3	Isotrop-kinematisches Verfestigungsmodell .....	94
<b>6</b>	<b>Untersuchung und Modellierung der elementaren Umformmechanismen für das Tiefdrücken .....</b>	<b>97</b>
6.1	Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Knickbiegen.....	97
6.1.1	Experimentelle Charakterisierung des Knickbiegeverfahrens .....	98
6.1.2	Simulation und Validierung des Knickbiegeverfahrens.....	103
6.2	Experimentelle und numerische Untersuchungen des Rollbiegens.....	107
6.2.1	Experimentelle Charakterisierung des Rollbiegens .....	107
6.2.2	Simulation und Validierung des Rollbiegens .....	112
6.3	Fazit zur Modellierung der elementaren Umformmechanismen für das Tiefdrücken ....	116

- 7 FE-Modellierung und Sensitivitätsanalyse des Tiefdrückens und Tiefziehens akademischer Biegeformteile..... 118**
  - 7.1 Implementierung und Parametrisierung der FE-Modelle ..... 118
    - 7.1.1 Modulare FE-Modelle für das Tiefdrücken und Tiefziehen..... 118
    - 7.1.2 Definition der Parameterräume für die stochastische Versuchsplanung ..... 121
  - 7.2 Identifikation einer geeigneten Prozessführung zur effizienten und maßhaltigen Umformung durch Tiefdrücken ..... 124
    - 7.2.1 Metamodellbasierte Parametersелеktion für eine geeignete Prozessführung des Tiefdrückens ..... 125
    - 7.2.2 Prozessanalyse und Einordnung der Ergebnisse gegenüber dem Tiefziehen..... 129
  - 7.3 Sensitivitätsanalyse der Prozess- und Werkzeugparameter..... 136
    - 7.3.1 Bewertung der Prozessrobustheit ..... 136
    - 7.3.2 Werkzeug- und bauteilgeometrische Einflüsse beim Tiefdrücken..... 141
  - 7.4 Zusammenfassung der numerischen Ergebnisse und Definition geeigneter Werkzeug- und Prozessparameter für das Tiefdrücken..... 147
- 8 Experimentelle Untersuchungen zur Umformung akademischer Biegeformteile..... 149**
  - 8.1 Entwicklung und Konstruktion des Versuchswerkzeugs ..... 149
    - 8.1.1 Anforderungen und Randbedingungen an die Werkzeugkonstruktion ..... 149
    - 8.1.2 Umsetzung einer biaxialen Krafteinleitung im Flanschbereich ..... 150
    - 8.1.3 Aufbau des Gesamtwerkzeugs und Inbetriebnahme ..... 153
  - 8.2 Experimentelle Betrachtung der Umformprozesse..... 156
    - 8.2.1 Analyse der Umformkinematik ..... 156
    - 8.2.2 Analyse der Umformkraft und -arbeit ..... 160
  - 8.3 Experimentelle Analyse der Bauteileigenschaften ..... 163
    - 8.3.1 Analyse der geometrischen Bauteileigenschaften ..... 163
    - 8.3.2 Analyse der mechanischen Bauteileigenschaften..... 167
  - 8.4 Zusammenfassung der experimentellen Untersuchungen und Validierung des FE-Modells ..... 173

---

<b>9</b>	<b>Numerische Potenzialabschätzung für das Tiefdrücken praxis-naher Biegeformteile .....</b>	<b>177</b>
9.1	Bewertung der Bauteilmaßhaltigkeit .....	179
9.2	Vergleich der Energieeffizienz der Umformprozesse .....	181
9.3	Gegenüberstellung der Materialeffizienz .....	183
9.4	Fazit und Diskussion der Potenziale des Tiefdrückens .....	185
<b>10</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>186</b>
10.1	Zusammenfassung .....	186
10.2	Ausblick .....	189
<b>11</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>192</b>
11.1	Ergänzungen zur Werkstoffcharakterisierung und -modellierung .....	192
11.2	Erweiterte Betrachtungen zum Knickbiegen.....	194
11.3	Erweiterte Betrachtungen zum Rollbiegen.....	195
11.4	Ergänzende Betrachtungen mittels FEM zum Tiefdrücken und -ziehen.....	197
11.5	Technische und wirtschaftliche Bewertung der Antriebskonzepte .....	199
11.6	Ergänzungen zur experimentellen Untersuchung der Umformverfahren.....	199
11.7	Validierung des FE-Modells zum Tiefdrücken .....	201
<b>12</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>202</b>
	<b>Curriculum Vitae .....</b>	<b>216</b>