

# Inhalt

<b>Verzeichnis der Kurzzeichen .....</b>	<b>XIII</b>
<b>Verzeichnis der Abkürzungen .....</b>	<b>XVII</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Stand der Forschung und Technik .....</b>	<b>5</b>
2.1 Grundlagen der Herstellung von Karosseriebauteilen .....	5
2.1.1 Struktur- und Außenhautbauteile .....	5
2.1.2 Verfahrensabgrenzung bei der Herstellung von Karosseriebauteilen .....	6
2.1.3 Übersicht der mehrstufigen Herstellung von Karosseriebauteilen .....	7
2.1.4 Werkzeugaufbau von Ziehwerkzeugen für Außenhautbauteile .....	9
2.1.5 Funktionsprinzip des Karosserieziehens von Außenhautbauteilen .....	10
2.2 Mechanismus, Ursachen und Wirkung der lokalen Ausdünnung .....	12
2.2.1 Lokale Ausdünnung infolge hoher Kontaktdrücke .....	12
2.2.2 Lokale Ausdünnung infolge Biegebeanspruchung .....	14
2.2.3 Lokale Ausdünnung infolge von Relativbewegungen .....	15
2.2.4 Maßabweichung durch lokale Ausdünnung an hervorstehenden Außenkanten .....	16
2.2.5 Ansätze und Methoden zur Kompensation der lokalen Ausdünnung .....	17
2.3 Finite-Element-Methode in der Umformtechnik .....	20
2.3.1 Aufbau und Bestandteile eines Simulationsmodells für Blechbauteile .....	20
2.3.2 Zeitdiskretisierung .....	21
2.3.3 Finite-Elemente-Formulierungen in der Blechumformsimulation .....	22
2.3.4 Schalenelemente in der FE-Simulation von Karosseriebauteilen .....	23
2.3.5 Volumenelemente in der FE-Simulation von Karosseriebauteilen .....	28
2.3.6 Kontaktmodellierung .....	29
2.3.7 Materialmodellierung .....	31
2.4 Resümee zum Stand der Technik .....	33

---

<b>3</b>	<b>Vorgehensweise und Struktur der Arbeit .....</b>	<b>35</b>
3.1	Forschungsziel.....	35
3.2	Vorgehensweise .....	36
<b>4</b>	<b>Experimentelle und simulative Vorversuche .....</b>	<b>39</b>
4.1	Werkstoffauswahl, Materialcharakterisierung und Lagerung .....	40
4.2	Experimentelle Studie mittels Angular-Stretch-Bend-Test .....	43
4.2.1	Anwendungen Angular-Stretch-Bend-Test .....	43
4.2.2	Werkzeug- und Versuchsaufbau ASBT .....	44
4.2.3	Versuchsdurchführung - ASBT .....	45
4.2.4	Auswertestrategie und Auswahl relevanter Ergebnisgrößen .....	47
4.3	Netzverfeinerungsstudie.....	49
4.3.1	Aufbau und Beschreibung der FE-Simulationsmodelle .....	50
4.3.2	Festlegung des Auswertintervalls .....	52
4.3.3	Auswertung der Stempelkontaktkraft .....	54
4.3.4	Auswertung der Normalspannung .....	55
4.3.5	Auswertung und Konvergenzuntersuchung der Rückfederung.....	57
4.3.6	Zusammenfassung der Netzverfeinerungsstudie .....	58
4.4	Aufbau und Auswertestrategie der ASBT-Simulationsmodelle .....	59
4.4.1	Auswahl der Diskretisierung für die ASBT-Volumenmodelle.....	59
4.4.2	Aufbau und Beschreibung der FE-Volumenmodelle.....	60
4.4.3	Aufbau und Beschreibung der FE-Schalenmodelle.....	61
4.4.4	Materialmodellierung und Auswahl der Materialkarte.....	61
4.4.5	Vorgehensweise bei der Auswertung der ASBT-Simulationsmodelle.....	62
4.5	ASBT - Gegenüberstellung von Experiment und Simulation.....	65
4.5.1	Ergebnisvergleich für den Stempelradius $R_S = 1 \text{ mm}$ .....	66
4.5.2	Ergebnisvergleich für die Stempelradien $R_S = 1,5 \text{ mm}$ bis $R_S = 5 \text{ mm}$ .....	68
4.6	Simulationsstudie der Massenskalierung .....	72

4.7	Resümee der experimentellen und simulativen Vorversuche.....	76
<b>5</b>	<b>Herstellung und Validierung geeigneter Demonstratorbauteile.....</b>	<b>79</b>
5.1	Festlegung und Auswahl der Demonstratorbauteile.....	79
5.2	Werkzeugaufbau und Inbetriebnahme.....	80
5.3	Versuchsparameter und Versuchsdurchführung.....	84
5.4	Bestimmung der Ausdünnung am Demonstratorbauteil.....	86
5.4.1	Blechdickenmessung mittels Flächendigitalisierung.....	86
5.4.2	Blechdickenmessung mittels Schliffbild.....	93
5.5	Finite-Element-Simulation der Demonstratorbauteile.....	99
5.6	Experimentelle Validierung der Umformsimulation.....	103
<b>6</b>	<b>Methodenentwicklung zur Auslegung von Aufmaßbändern.....</b>	<b>107</b>
6.1	Segmentbasierter Ansatz zur Auslegung von Aufmaßbändern.....	108
6.2	Differenzvektorfeldmethode (DVM) zur Auslegung von Aufmaßbändern.....	111
6.3	BMW-Konstruktionsrichtlinie zur Auslegung von Aufmaßbändern.....	118
6.4	Gegenüberstellung der Methoden zur Auslegung von Aufmaßbändern.....	121
<b>7</b>	<b>Experimentelle Absicherung der betrachteten Aufmaßbänder.....</b>	<b>125</b>
7.1	Messkonzept für die Kontaktkraftmessung am Stempel.....	125
7.2	Vorbereitung und Einarbeit der Stempeleinsätze mit Aufmaßband.....	126
7.3	Versuchsparameter und -durchführung der experimentellen Absicherung.....	127
7.4	Auswertung und Vergleich der Versuchsbauteile mit Aufmaßband.....	128
7.4.1	Messkonzept zur Vermessung und Auswertung der Zielradien.....	128
7.4.2	Ergebnisse der Radienvermessung für den Zielradius $R_M = 2,5 \text{ mm}$ .....	129
7.4.3	Ergebnisse der Radienvermessung für den Zielradius $R_M = 4,5 \text{ mm}$ .....	131
7.4.4	Kontaktkraftauswertung und Simulationsabgleich.....	132
7.4.5	Oberflächenbewertung der unlackierten Versuchsbauteile.....	134
7.4.6	Oberflächenbewertung der Versuchsbauteile mit KTL-Beschichtung.....	138
7.5	Fazit der experimentellen Absicherungsversuche.....	142

<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>143</b>
<b>A.</b>	<b>Zusätzliche Abbildungen .....</b>	<b>147</b>
<b>B.</b>	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>151</b>
<b>C.</b>	<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>159</b>
<b>D.</b>	<b>Literatur .....</b>	<b>161</b>