

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis.....</b>	<b>I</b>
<b>Formelzeichen und Abkürzungen .....</b>	<b>V</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Stand der Technik und der Forschung .....</b>	<b>4</b>
2.1 Vorspannung lasttragender Strukturen .....	4
2.1.1 Definition und Abgrenzung der Vorspannung .....	4
2.1.2 Wirkprinzipien und Nutzen der Vorspannung .....	6
2.1.3 Vorspannung biegebelasteter Tragstrukturen.....	8
2.1.4 FKV-Spannglieder.....	12
2.1.5 Verankerungssysteme für FKV-Spannglieder.....	15
2.1.6 Der Schlaufenanschluss .....	16
2.2 Verfahren der Blechumformung .....	26
2.2.1 Tiefziehen.....	26
2.2.2 Karosserieteilziehen.....	30
2.2.3 Kragenziehen .....	31
2.3 Fertigung mit Stegen versteifter Blechstrukturen .....	33
2.3.1 Leichtbaunutzen von Stegen .....	33
2.3.2 Unterteilung der Fertigungsrouten von Stegblechstrukturen .....	33
2.3.3 Stegblechumformung.....	35
2.4 Fügen im Hybridleichtbau.....	38
2.4.1 Einordnung des Fügens durch Umformen .....	39
2.4.2 Mechanisches Fügen durch Umformen .....	39
2.4.3 Fügen von Faser-Kunststoff-Verbunden und Metallblechen .....	43
<b>3 Motivation, Zielsetzung und Vorgehensweise.....</b>	<b>47</b>
3.1 Motivation .....	47
3.2 Zielsetzung und Vorgehensweise .....	48

<b>4 Ansätze zum umformtechnischen Fügen und Vorspannen hybrider Tragstrukturen .....</b>	<b>51</b>
4.1 Analyse vorzugsbelasteter Blech-Tragstrukturen .....	52
4.2 Vorbetrachtung des Füge- und Vorspannmechanismus .....	54
4.2.1 Berechnung der Vorspannkraft in Abhängigkeit der Dehnung ..	56
4.2.2 Berechnung der erforderlichen Strukturdehnung und Zugkraft zur Erzeugung einer definierten Vorspannung .....	57
4.2.3 Ergebnis der analytischen Vorbetrachtung .....	58
4.3 Analyse etablierter Blech-Umformverfahren .....	61
4.4 Herausforderungen beim Fügen und Vorspannen und Anforderungen an Fertigungskonzepte .....	63
4.5 Identifikation von Vorspannkonzepten und –prozessen .....	64
4.5.1 Ausreichende, plastische Dehnungen in Spanngliedrichtung ....	66
4.5.2 Unzureichende, plastische Dehnungen in Spanngliedrichtung .	68
<b>5 Materialien, Anlagen, Versuchsstände und Methoden .....</b>	<b>71</b>
5.1 Versuchsmaterialien .....	71
5.2 Versuchsanlagen .....	72
5.3 Gestalt und Fertigung der Proben .....	74
5.3.1 Proben zur Untersuchung des Fügens und Vorspannens von Stegblechstrukturen .....	74
5.3.2 Proben beim Fügen und Vorspannen durch Weiten eines umschlungenen Kragens .....	75
5.4 Versuchs- und Messaufbauten .....	76
5.5 Numerische Modellierung .....	79
<b>6 Vorspannung von Stegblech-Tragstrukturen .....</b>	<b>84</b>
6.1 Bestätigung des Vorspannmechanismus .....	84
6.2 Analytische Modellierung des Vorspannens im Zugversuch .....	87
6.3 Ermittlung von Einflussfaktoren auf die Vorspannkraft .....	88

---

6.4	Wirkprinzip deformierbarer Koppel-Elemente .....	95
6.5	Spannungszustände in Blech und Schlaufe.....	99
6.5.1	Spannungsverteilungen im Stegblech .....	99
6.5.2	Belastung ein- und mehrlagiger Schlaufen bei Verwendung starrer Koppel-Elemente .....	100
6.5.3	Belastung ein- und mehrlagiger Schlaufen bei Verwendung deformierbarer Koppel-Elemente .....	102
6.6	Prozessgrenzen und Fehlerbilder .....	105
6.7	Versteifungs- und Verstärkungswirkung.....	108
<b>7</b>	<b>Vorspannung von Blech-Tragstrukturen durch Weiten eines Kragens</b>	<b>111</b>
7.1	Bestätigung des wirksamen Vorspannmechanismus.....	111
7.2	Analytische Modellierung des Vorspannprozesses.....	114
7.3	Identifikation und Validierung von Einflussfaktoren.....	116
7.4	Einfluss des Spanngliedes auf die Blechumformung .....	120
7.5	Spannungsverteilung in der Schlaufe.....	123
7.6	Analytische Beschreibung der Schlaufenspannungen .....	127
7.6.1	Tangentialspannungsverlauf in der neutralen Schlaufenfaser.	127
7.6.2	Biegespannungen in den Kragenbereichen.....	133
7.7	Prozessgrenzen und Fehlerbilder .....	137
7.8	Verstärkungs- und Versteifungswirkung.....	139
7.9	Anwendungsdemonstration .....	140
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>146</b>
<b>9</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>150</b>
9.1	Materialkennwerte gebräuchlicher Matrixsysteme .....	150
9.2	Elastizitätsgesetz der unidirektionalen Schicht .....	150
9.3	Vorspannung von Trägern mit FKV-Spanngliedern .....	152
9.4	Verankerungssysteme für FKV-Spannglieder .....	156

---

9.5	Spannungsanalyse auf Basis des auf Innendruck belasteten Rohres nach Schürmann .....	158
9.6	Fließkurven der verwendeten Materialien .....	161
9.7	Herleitung der erforderlichen Dehnung zur Einstellung einer definierten Vorspannkraft (zu Abschnitt 4.2).....	162
9.8	Parametervariation zu Gleichung (4-9) .....	164
9.9	Validierung des FE-Modells zur Vorspannung von Stegblechstrukturen im Zugversuch .....	165
9.10	Ergebnisse der numerischen und der analytischen Parametervariation (zu Abschnitt 7.3) .....	167
9.11	Umformgrade am geweiteten, nicht-umschlungenen Kragen .....	168
9.12	Spannungsüberhöhungen in der Schlaufe aufgrund asymmetrischer Kragendeformationen .....	168
<b>10</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>171</b>