

## Inhaltsverzeichnis

<b>Danksagung</b> .....	<b>V</b>
<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>VI</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>VII</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>VIII</b>
<b>Bildverzeichnis</b> .....	<b>XI</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>XIV</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>XV</b>
<b>Formelzeichenverzeichnis</b> .....	<b>XVI</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Stand der Technik</b> .....	<b>3</b>
2.1 Schraubenverbindungen.....	3
2.1.1 Einflüsse auf die Schraubenvorspannkraft.....	5
2.1.1.1 Setzen.....	6
2.1.1.2 Lokale Plastifizierung und Streckgrenzen-Erniedrigung.....	7
2.1.1.3 Werkstoffkriechen.....	8
2.1.2 Beurteilung der Schraubenvorspannung.....	10
2.1.2.1 Schraubmontage.....	10
2.1.2.2 Qualitätssicherung.....	17
2.1.2.3 Forschung und Entwicklung .....	18
2.2 Aufrechterhaltung der Schraubenvorspannung.....	18
2.3 Schraubenverbindungen mit Faser-Kunststoff-Verbunden .....	23
2.3.1 Vorspannkraftverhalten und Modelle zu dessen Beschreibung.....	25
2.3.1.1 Einfluss der Temperatur.....	26
2.3.1.2 Einfluss des Elastizitätsmoduls in Laminatdickenrichtung .....	28
2.3.1.3 Einfluss der Feuchte.....	28
2.3.1.4 Einfluss der Montagevorspannkraft.....	29
2.3.1.5 Einfluss des Faservolumen gehaltes .....	30
2.3.1.6 Einfluss des Laminataufbaus .....	30
2.3.1.7 Einfluss Schraubenkopfform / Pressungsverteilung .....	31
2.3.1.8 Einfluss Nachziehen.....	32
2.3.1.9 Einfluss externer (zyklischer) Belastung .....	33
2.3.1.10 Modelle zur Beschreibung der Vorspannkraftrelaxation.....	33
2.3.2 Ertragbare Kontaktflächenpressung von Faser-Kunststoff-Verbunden.....	37
<b>3 Zielstellung</b> .....	<b>43</b>

<b>4</b>	<b>Versuchsmethoden .....</b>	<b>47</b>
4.1	Auswahl einer Methode zur Messung der Schraubenvorspannung .....	47
4.1.1	Definition der Messaufgabe .....	47
4.1.2	Verfahren für die Messung der Schraubenvorspannung .....	49
4.1.3	Verlängerungsmessung als Verfahren zur Bestimmung der Schraubenvorspannung.....	50
4.1.3.1	Ultraschallvorspannkraftmessung (TOF-Methode).....	51
4.1.3.2	Verlängerungsmessung mit taktiler Antastung .....	52
4.1.4	Auswahl und Optimierung des Messsystems .....	53
4.1.4.1	Reproduzierbarkeit der Antastung.....	54
4.1.4.2	Hohe Systemgenauigkeit .....	56
4.1.4.3	Wärmedehnung des Messobjektes .....	60
4.2	Vorspannkraftrelaxationsmessungen an Prüfkörperverschraubungen .....	61
4.2.1	Schraubmontageverfahren und analytische Berechnung der Montagevorspannkraft.....	66
4.3	Untersuchung des Querdruckverhaltens .....	70
<b>5</b>	<b>Versuchswerkstoffe und deren Charakterisierung .....</b>	<b>72</b>
5.1	CFK-Versuchsteile .....	72
5.1.1	Versuchsplattenkonfiguration.....	74
5.1.2	Versuchsplattenfertigung .....	77
5.1.3	Spanende Bearbeitung der Prüfkörper.....	79
5.1.4	Faservolumengehalt der Laminate .....	80
5.1.5	Glasübergangstemperaturbereich der Laminate .....	81
5.1.6	Zugfestigkeit der Laminate.....	84
5.2	Schrauben .....	88
5.3	Muttern .....	89
<b>6</b>	<b>Querdruckverhalten des Laminates .....</b>	<b>90</b>
6.1	Optische Untersuchung der Verstärkungsstruktur nach Vorspannkraftrelaxation .....	90
6.2	Temperaturabhängiges Querdruckverhalten .....	94
<b>7</b>	<b>Vorspannkraftrelaxationsverhalten von CFK-Prüfkörperverschraubungen.....</b>	<b>101</b>
7.1	Verifizierung des „Shivakumar Modells“ zur Beschreibung des Vorspannkraftrelaxationsverhaltens .....	101
7.2	Einfluss des Klemmteilwerkstoffes bei wechselnder und konstanter Auslagerungstemperatur.....	104
7.3	Einfluss der Montagevorspannung und der Auflagefläche .....	108
7.4	Einfluss der Laminatdicke .....	111
7.5	Einfluss einer zyklischen axialen Belastung .....	114

7.6	Zusammenfassung des Vorspannkraftrelaxationsverhaltens .....	117
<b>8</b>	<b>Verringerung der Vorspannkraftrelaxation von Schraubenverbindungen mit CFK .....</b>	<b>119</b>
8.1	Werkstoffliche Maßnahmen.....	120
8.1.1	Einfluss der Schichtreihenfolge und Faservolumengehalt.....	120
8.1.2	Einfluss einer Faserverstärkung in Laminatdickenrichtung mit dem Verfahren „Tufting“ .....	122
8.2	Konstruktive Maßnahmen.....	126
8.2.1	Einfluss von mitverspannten Hülsen zur Klemmlängenerhöhung.....	126
8.2.2	Einfluss von Spannscheiben DIN 6796 .....	127
8.3	Montageseitige Maßnahmen.....	135
8.3.1	Vorgehensweise der Warmverschraubung und des Warmvorpressens .....	136
8.3.1.1	Warmvorpressen .....	136
8.3.1.2	Warmverschraubung .....	138
8.3.2	Montagevorspannung bei der Warmverschraubung .....	139
8.3.3	Einfluss der Pressung bei dem Warmvorpressen sowie Vergleich mit konventioneller Verschraubung und Warmverschraubung .....	141
8.3.4	Langzeitiges Vorspannkraftrelaxationsverhalten warmverschraubter Prüfkörper.....	144
8.3.5	Einfluss der Warmverschraubungstemperatur .....	146
8.3.6	Einfluss des Klemmlängenverhältnisses und der Laminatdicke .....	152
8.3.7	Einfluss der Laminatoberfläche .....	154
8.3.8	Einfluss wechselnder Umgebungstemperatur auf das Vorspannkraftrelaxationsverhalten warmvorgepresster Prüfkörper .....	155
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>158</b>
<b>Literaturverzeichnis.....</b>		<b>XVIII</b>