

Inhaltsverzeichnis

Danksagung.....	V
Zusammenfassung.....	VI
Abstract.....	VII
Inhaltsverzeichnis.....	VIII
Bildverzeichnis.....	XI
Tabellenverzeichnis.....	XIV
Abkürzungsverzeichnis.....	XV
Formelzeichenverzeichnis.....	XVI
1 Einleitung.....	1
2 Stand der Technik.....	3
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 Faservolumengehaltes.....	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
3 Zielstellung.....	43

4	Versuchsmethoden	47
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
5	Versuchswerkstoffe und deren Charakterisierung	72
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 Laminare	80
5.1.5	Glasübergangstemperaturbereich der Laminare	81
5.1.6	Zugfestigkeit der Laminare.....	84
5.2	Schrauben	88
5.3	Muttern	89
6	Querdruckverhalten des Laminates	90
6.1	Optische Untersuchung der Verstärkungsstruktur nach Vorspannkraftrelaxation	90
6.2	Temperaturabhängiges Querdruckverhalten	94
7	Vorspannkraftrelaxationsverhalten von CFK- Prüfkörperverschraubungen	101
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
8	Verringerung der Vorspannkraftrelaxation von Schraubenverbindungen mit CFK	119
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
9	Zusammenfassung und Ausblick.....	158
	Literaturverzeichnis.....	XVIII