

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	XVIII
Tabellenverzeichnis	XXIV
Nomenklatur	XXIX
1 Motivation und Zielsetzung	1
2 Stand der Wissenschaft und Forschung	7
2.1 Dehnrateneffekt auf Faserverbund-Komponenten	7
2.1.1 Faser	8
2.1.2 Matrix	9
2.2 Dehnrateneffekt von FVK Laminaten	15
2.2.1 Zug	16
2.2.2 Druck	18
2.2.3 Schub	25
2.2.4 Multiaxiale Belastungen	28
2.3 Dehnratenabhängigkeit: Reinharz vs. Laminat	30
2.4 Prüfmethodik zur Ermittlung dehnratenabhängiger Materialkennwerte	31
2.4.1 Prüftechnik	35
2.4.2 Druckprüfung	37
2.5 Validierung und Dehnrateneffekte auf Komponentenebene	42
2.5.1 Biegeprüfung	42
2.6 Implementierung von dehnratenabhängigem Materialverhalten in der FEM	49
2.6.1 Bedatung einer Materialkarte	50
2.6.2 Kalibrierung einer Materialkarte	50
2.6.3 Validierung: Materialkarte und Materialmodell	51
2.6.4 Notwendigkeit der Berücksichtigung von Dehnrateneffekten	52
2.7 Zusammenfassung und wissenschaftliche Fragestellung	54
3 Material und Methoden	59
3.1 Material	59
3.2 Experimentelle Methoden	60
3.2.1 Servohydraulische Hochgeschwindigkeitsprüfmaschine	60
3.2.2 Kraft- und Dehnungsmessung	62
3.2.3 Validierungsmessungen mittels DMS	64

3.2.4	Ermittlung charakteristischer Größen	65
3.3	Charakterisierung von FVK	71
3.4	Statistische Versuchsplanung. Design of Experiments (DoE) ..	73
3.4.1	Theoretische Grundlagen	73
3.4.2	TAGUCHI-Methode	73
3.5	FEM-Simulation	74
3.5.1	FEM-Modell	74
3.5.2	Ein-Element-Kalibrierung	80
3.6	Zusammenfassung	81
4	Entwicklung der Prüfmethoden	83
4.1	Ganzheitliche Betrachtung des Dehnrateneinflusses	83
4.1.1	Kennwertermittlung: Coupon in plane	84
4.1.2	1. Validierungsebene: Coupon out of plane	85
4.1.3	2. Validierungsebene: Generische Struktur	85
4.2	Prüfmethodenentwicklung: Druckprüfung von Coupons	86
4.2.1	Ringversuch	86
4.2.2	Konzept axiale Druckvorrichtung	89
4.2.3	Optimierung der Prüfkörpergeometrie	90
4.2.4	Optimierte Prüfkörpergeometrie	97
4.2.5	Überprüfung des Biegefaktors	99
4.2.6	Bestimmung charakteristischer Größen	101
4.3	Prüfmethodenentwicklung: Biegung von Coupons	106
4.3.1	Entwurf der Vorrichtung	107
4.3.2	Kraftmessung mittels DMS	109
4.4	Prüfmethodenentwicklung: Generische Strukturen	109
4.4.1	Axiale Druck-Vorrichtung Omega-Profil	110
4.4.2	3PB-Vorrichtung Hut-Profil	110
4.4.3	Kompensation von Massenträgheitseffekten	113
4.4.4	Analytischer Ansatz zur Dehnungsmessung	114
4.5	Zusammenfassung	116
5	Dehnrateneffekte bei axialer Druckbelastung	119
5.1	Coupon-Ebene Laminat	119
5.1.1	Prüfparameter	120
5.1.2	Prüfergebnisse $[0^\circ]$ Lagenaufbau	121
5.1.3	Prüfergebnisse $[90^\circ]$ Lagenaufbau	121
5.1.4	Prüfergebnisse $[+45^\circ / -45^\circ]_{4s}$ Lagenaufbau	124
5.1.5	Prüfergebnisse $[0^\circ/90^\circ]_{4s}$ Lagenaufbau	127
5.1.6	Prüfergebnisse $[+45^\circ / -45^\circ/0^\circ/90^\circ]_s$ Lagenaufbau ..	129

5.2	Generische Struktur	130
5.2.1	Prüfkörpervorbereitung	131
5.2.2	Prüfergebnisse Omega-Profil	131
5.3	Dehnratenabhängigkeit Coupon vs. Omega-Profil	133
5.4	Experimentell vs. numerische Berechnung	133
5.4.1	Implementierung in die FEM-Materialkarte	134
5.4.2	Kalibrierung der Materialkarte	136
5.4.3	Validierung anhand multidirektionaler Lamine	140
5.4.4	Simulation der Omega-Profile	144
5.5	Zusammenfassung	146
6	Dehnrateneffekte biege-induzierter Lastfälle	149
6.1	Coupon-Ebene	149
6.1.1	Versuchsergebnisse Coupon	150
6.1.2	Experimentell vs. numerische Berechnung	154
6.2	Generische Struktur	154
6.2.1	Versuchsergebnisse Hut-Profil	155
6.2.2	Experimentell vs. numerische Berechnung	159
6.3	Zusammenfassung	161
7	Validierung der Prüfmethode	163
7.1	Vergleich zu Prüfverfahren aus einschlägigen Normungen	163
7.2	Dehnratenabhängigkeit eines alternativen Werkstoffsystems ...	166
7.3	Zusammenfassung	169
8	Zusammenfassung und Ausblick	171
	Literaturverzeichnis	177
	Publikationen	195
	Patentanmeldung	195
	Fachartikel und Konferenzbeiträge	195
	Vorträge	196
	Betreute studentische Arbeiten	199
	Anhang	201
	Zusatzinformation Literaturrecherche	203
	Zusatzinformation Material und Methoden	205
	Zusatzinformation Prüfmethodenentwicklung	211
	Zusatzinformationen in plane-Druckfestigkeit	219

Zusatzinformationen biege-induzierte Lastfälle 225

FEM-Simulation 229

Glossar 231

Curriculum Vitae 233

Erschienenene Bände 235