

Dipl.-Ing. Hans Bartosch, Ottobrunn

**Verbesserung  
des Zwischenfaser-  
bruchverhaltens  
von CFK-Laminaten  
bei praxisrelevanten  
Belastungen durch  
thermomechanische  
Behandlung**

Reihe **18**: Mechanik/  
Bruchmechanik

Nr. **226**

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Stand der Arbeiten . . . . .	4
1.2	Aufgaben und Ziele . . . . .	5
1.3	Die Wirkungsweise der Behandlung . . . . .	6
<b>2</b>	<b>Das Werkstoffmodell der UD-Schicht</b>	<b>8</b>
2.1	Begriffsdefinitionen zum Werkstoffverhalten . . . . .	8
2.1.1	Elastisches Materialverhalten . . . . .	8
2.1.2	Viskoelastisches Materialverhalten . . . . .	8
2.1.3	Viskoplastisches Materialverhalten . . . . .	11
2.2	Mikromechanik der orthotropen Einzelschicht . . . . .	11
2.2.1	Packungsmodelle . . . . .	12
2.2.2	Bezeichnungen und Koordinatensysteme . . . . .	14
2.2.3	Faserwerkstoff . . . . .	14
2.2.4	Matrixwerkstoff . . . . .	17
2.2.4.1	Zur Glasübergangstemperatur . . . . .	17
2.2.4.2	Beschreibung des Werkstoffverhaltens der Matrix . . .	18
2.2.4.2.1	Das Matrixverhalten unterhalb des Glasübergangs . . . . .	19
2.2.4.2.2	Das Matrixverhalten oberhalb des Glasübergangs . . . . .	19
2.2.5	Interphase . . . . .	21
2.2.6	Das FE-Modell . . . . .	21
2.2.7	Ergebnisse der Mikromechanik . . . . .	23
2.3	Makromechanik der orthotropen Einzelschicht . . . . .	24
2.3.1	Bezeichnungen und Orthotropiekoordinatensystem . . . . .	24
2.3.2	Das Werkstoffmodell der Einzelschicht . . . . .	25
2.3.2.1	Einachsiges Verhalten der UD-Schicht parallel zur Faser	27

2.3.2.2	Einachsige Beanspruchung senkrecht zur Faser und Schubbeanspruchung bei Isothermie . . . . .	28
2.3.2.2.1	Lineare Elastizität und lineare Viskoelastizität	28
2.3.2.2.2	Nichtlineare Elastizität und nichtlineare Viskoelastizität . . . . .	31
2.3.2.2.3	Viskoplastizität . . . . .	32
2.3.2.3	Beeinflussung der 2- und 6-Richtung durch die Temperatur . . . . .	33
2.3.2.3.1	Nichtlineare Thermoelastizität und nichtlineare Thermoviskoelastizität . . . . .	33
2.3.2.3.2	Thermoviskoplastizität . . . . .	33
2.3.2.4	Multiaxiale Spannungszustände . . . . .	34
2.3.2.4.1	Viskoelastische Dehnungen . . . . .	34
2.3.2.4.2	Viskoplastische Dehnungen . . . . .	34
2.3.2.5	Das zweidimensionale Materialverhalten der UD-Schicht	35
<b>3</b>	<b>Identifizierung der Werkstoffmodellparameter</b>	<b>36</b>
3.1	Der Kriechversuch mit Be- und Entlastungsphase . . . . .	36
3.1.1	Belastungsphase . . . . .	36
3.1.2	Phase nach der Entlastung . . . . .	38
3.2	Vorgehensweise bei der Parameteridentifikation . . . . .	40
3.3	Versuchseinrichtung und -durchführung . . . . .	42
3.3.1	Die Versuchsanlage . . . . .	42
3.3.2	Probekörper . . . . .	43
3.3.3	Messung von Dehnung und Gleitung . . . . .	44
3.3.3.1	Dehnungsmessung mit DMS . . . . .	44
3.3.3.1.1	90°-Proben . . . . .	44
3.3.3.1.2	±45°-Proben . . . . .	45
3.3.3.2	Dehnungsmessung mit Extensometern . . . . .	49
3.3.4	Versuchsumfang . . . . .	50

3.4	Werkstoffparameter für Berechnungen . . . . .	52
3.4.1	0°-Richtung . . . . .	52
3.4.2	90°-Richtung . . . . .	52
3.4.3	Schub in der Schichtebene . . . . .	54
3.4.4	Das Querkontraktionselement der Werkstoff-Nachgiebigkeitsmatrix . . . . .	55
3.5	Linear elastische Werkstoffkennwerte . . . . .	55
<b>4</b>	<b>Eigenspannungsanalyse von Laminaten</b>	<b>56</b>
4.1	Koordinatensysteme, Drehtransformationen, Annahmen und Voraussetzungen . . . . .	56
4.1.1	Orthotropiesystem und übergeordnetes Koordinatensystem . . .	56
4.1.2	Drehtransformation der Spannungen und der Verzerrungen . . .	57
4.1.3	Annahmen und Voraussetzungen . . . . .	57
4.2	Rekursive Formulierung der Materialmodellgleichungen . . . . .	58
4.2.1	Viskoelastische Dehnungen . . . . .	58
4.2.2	Viskoplastische Dehnungen . . . . .	62
4.2.3	Gesamtverzerrung . . . . .	62
4.3	Laminatberechnungsverfahren für statisch bestimmte Scheiben . . . . .	64
4.4	Finite-Elemente-Formulierung . . . . .	68
<b>5</b>	<b>Vorhersage des Schädigungsbeginns</b>	<b>72</b>
5.1	Eigenspannungen und Reservefaktor . . . . .	74
5.2	Tsai/Wu-Kriterium (2D) mit Eigenspannungen . . . . .	75
5.3	Puck-Kriterium (2D) mit Eigenspannungen . . . . .	76
5.4	Bruchfestigkeiten von T800/5245C . . . . .	78
<b>6</b>	<b>Verbesserung des Kerbverhaltens</b>	<b>79</b>
6.1	Eigenspannungsanalyse . . . . .	80
6.1.1	Zugbehandlung des ungekerbten Laminates (Verfahren 1) . . . . .	81

6.1.2	Zugbehandlung des gekerbten Laminates (Verfahren 2) . . . . .	86
6.1.2.1	Konvergenzuntersuchung . . . . .	86
6.1.2.2	Berechnungsergebnisse . . . . .	89
6.1.3	Lochaufweitungsbehandlung (Verfahren 3) . . . . .	92
6.1.3.1	Berechnungsergebnisse . . . . .	92
6.2	Kerbspannungsanalyse bei der Zugprüfung . . . . .	95
6.3	Bewertung des Behandlungserfolges . . . . .	100
6.4	Experimentelle Ergebnisse . . . . .	104
<b>7</b>	<b>Verbesserung des Lochleibungsverhaltens</b>	<b>106</b>
7.1	Eigenstressanalyse . . . . .	108
7.1.1	Behandlungsverfahren 1, 2 und 3 . . . . .	108
7.1.2	Lochleibungsbehandlung (Verfahren 4) . . . . .	108
7.2	Spannungsanalyse im Laminat . . . . .	113
7.2.1	Lochleibungsprobe nach DIN 56562 . . . . .	114
7.2.2	Unendliche quasiisotrope Scheibe . . . . .	114
7.2.2.1	Airysche Spannungsfunktion . . . . .	115
7.2.2.2	Randbedingungen . . . . .	116
7.2.2.3	Reihenentwicklung der Belastung . . . . .	117
7.2.2.4	Die Gleichungen für die Schnittlasten . . . . .	118
7.3	Bewertung des Behandlungserfolges . . . . .	119
7.3.1	Die Lochleibungsprobe nach DIN 56562 . . . . .	119
7.3.2	Die unendlich ausgedehnte quasiisotrope Scheibe . . . . .	120
<b>8</b>	<b>Verbesserung des Impactverhaltens</b>	<b>122</b>
8.1	Der transversale Niedergeschwindigkeitsimpact . . . . .	122
8.2	Schädigungsmechanismen beim Impact . . . . .	124
8.2.1	Schädigungsformen . . . . .	124
8.2.2	Sichtbarkeit der Schädigung . . . . .	124

8.2.3	Schädigungsablauf während des Impacts . . . . .	125
8.2.4	Beeinflussung des Bruchgeschehens durch Eigenspannungen . . .	126
8.3	Eigenspannungsanalyse . . . . .	127
8.4	Berechnung der Stoßkraft beim Impact . . . . .	128
8.4.1	Kontaktwechselwirkung zwischen Impactor und Platte . . . . .	129
8.4.1.1	Hertzsches Gesetz . . . . .	129
8.4.1.2	Berechnung des Kontaktparameters . . . . .	130
8.4.2	Kirchhoff- oder Mindlin/Reissner-Platte ? . . . . .	135
8.4.3	Dynamik der Impactplatte . . . . .	136
8.4.3.1	Die mechanische Eingangsadmittanz . . . . .	136
8.4.3.2	Entwicklung des Ersatzmodells der Platte . . . . .	140
8.4.4	Formulierung und Lösung des Impactproblems . . . . .	142
8.4.5	Ergebnisse für verschiedene Plattenrandbedingungen . . . . .	143
8.5	Spannungs- und Versagensanalyse beim Impact . . . . .	144
8.5.1	Statik oder Dynamik ? . . . . .	145
8.5.2	Spannungs- und Versagensanalyse . . . . .	149
8.5.2.1	Vereinfachungen . . . . .	149
8.5.2.2	Vorgehensweise bei der Berechnung . . . . .	150
8.6	Bewertung des Behandlungserfolges . . . . .	154
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>157</b>
	<b>Anhang</b>	<b>159</b>
A	Kriechkurven der 90°-Proben . . . . .	159
B	Kriechkurven der ±45°-Proben . . . . .	163
C	Kriechkurven der 90°-Proben mit Streuband . . . . .	167
D	Kriechkurven der ±45°-Proben mit Streuband . . . . .	167
	<b>Literatur</b>	<b>168</b>