

R. Cuntze, R. Deska und B. Szelinski, Karlsfeld
R. Jeltsch-Fricker und S. Meckbach, Kassel
D. Huybrechts und J. Kopp, Aachen
L. Kroll, Dresden
S. Gollwitzer und R. Rackwitz, München

**Neue Bruchkriterien
und Festigkeitsnachweise
für unidirektionalen
Faserkunststoffverbund
unter mehrachsiger
Beanspruchung
- Modellbildung
und Experimente -**

BMBF-Förderkennzeichen: 03N8002
Abschlußbericht 1997

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
Vorwort	III
Bezeichnungen	IX
1. Abkürzungen	IX
2. Symbole und Zeichen	IX
1 Einleitung	
1.1 Problemeinführung.....	1
1.1.1 Einsatz von Festigkeitskriterien in Auslegung und Nachweis.....	1
1.1.2 Grundsätzliche Betrachtungen zum Festigkeitsnachweis von SV (Laminaten).....	3
1.1.3 Grundlagen zur Bruchanalyse von UD-Schicht und Schichtverbund (SV).....	4
1.1.4 Ermittlung des Reservefaktors beim Festigkeitsnachweis und zug. Größen.....	8
1.2 Genereller Stand der FKV-Bruchkriterien.....	10
1.2.1 Allgemeines.....	10
1.2.2 Bisherige 3D-Festigkeitskriterien.....	12
1.2.3 Bisherige 2D-Festigkeitskriterien.....	14
1.3 Lösungsweg.....	16
1.3.1 Einführung in Pucks Wirkebene-Bruchkriterium für Zwischenfaserbruch.....	16
1.3.2 Probabilistische Zuverlässigkeitsbetrachtungen.....	21
1.3.3 2D- und 3D-Versuchstechniken sowie Erfassung von Eigenspannungen.....	26
2 Grundlagen der neuen ZFB-Kriterien [J-F, SM]	
2.1 Der Bruchkörper eines transversal-isotropen Werkstoffelementes.....	30
2.1.1 Grundbegriffe.....	30
2.1.2 Transformationsformeln.....	31
2.2 Mohrsche Bruchbedingungen.....	33
2.2.1 Die Hypothesen von Hashin / Mohr.....	33
2.2.2 Rechnerische Handhabung.....	34
2.2.3 Der zylindrische Ansatz.....	37
2.2.4 Eigenschaften des Mohrschen Bruchkörpers.....	40
2.3 Geometrische Deutung der Mohrschen Bruchhypothese.....	40
2.3.1 Der Projektionskörper als Masterkörper.....	40
2.3.2 Totraum.....	42
2.4 Die Hypothesen von Puck.....	43
2.4.1 Präzisierung der allgemeinen Mohrschen Bruchhypothese.....	43
2.4.2 Präzisierung der Mohrschen Bruchhypothese für die transv.-isotrope Ebene.....	44
2.5 Berücksichtigung von Eigenspannungen.....	45
2.6 Abhängigkeit von der Normalspannung σ_1	46
3 Modellbildung [J-F, SM]	
3.1 Vorgaben für die Modellierung.....	49
3.2 Starre Modelle.....	50
3.2.1 Einfacher parabolischer Ansatz.....	50

3.2.2	Parabolischer Ansatz von Puck	54
3.2.3	Allgemeiner parabolischer Ansatz	56
3.2.4	Der Bruchkörper im $(\sigma_2, \sigma_3, \tau_{21})$ -Raum	57
3.2.5	Der Bruchkörper im $(\sigma_2, \sigma_3, \tau_{23})$ -Raum	60
3.3	Elastische Modelle	63
3.3.1	Minimaler und maximaler Masterkörper	64
3.3.2	Eingrenzung des realen Bruchwinkels	67
3.4	α -Modelle	68
4	Datenanpassung und Sensitivitätsanalysen [SG, RR]	
4.1	Übersicht über die Methoden der Kurvenanpassung	70
4.1.1	Allgemeines	70
4.1.2	Theoretische Überlegungen und Qualitätskriterien der Anpassung	70
4.1.3	Verfahren nach dem Prinzip vom Minimum der Fehlerquadrate.	71
4.1.4	Indirekte Schätzverfahren	72
4.2	Vorstellung der für die Datenanpassung verwendeten Modelle	73
4.3	Vergleich und Bewertung der Modelle anhand der vorhandenen Daten	76
4.3.1	Verwendete Daten	76
4.3.2	Rechnerische Auswertung	76
4.4	Sensitivitätsanalyse für Steigungsparameter der ausgewählten Modelle	80
4.5	Bewertung der Modelle	85
5	Strukturzuverlässigkeit von FKV-Bauteilen [RR, SG]	
5.1	Einführung in die Theorie der Strukturzuverlässigkeit	88
5.1.1	Allgemeines	88
5.1.2	Zuverlässigkeitsmethode erster und zweiter Ordnung	89
5.1.3	Zusammenhang zwischen exakter Rechnung und Teilsicherheitsfaktoren	92
5.2	Stochastisches Modell für unsichere Größen	93
5.3	Berücksichtigung des Größeneffektes	94
5.3.1	Theorie	94
5.3.2	Das Weibullmodell für faserverstärkte Kunststoffe	95
5.3.3	Versuche zum Größeneffekt im Projekt und Schlußfolgerungen	96
5.4	Beispielrechnungen, Teilsicherheitsfaktoren	98
5.4.1	Zuverlässigkeitsuntersuchungen in der (σ_2, τ_{21}) -Ebene	98
5.4.2	GFK-Platte unter Scheiben- und Plattenbeanspruchung	102
6	Anforderungen an Versuchstechnik, Probekörper und Prüfvorrichtungen [DH, JK, LK]	
6.1	Definition der Testmatrix und der Lastpfade [LK]	105
6.2	Auswahl der Werkstoffe und Werkstoffkennwerte	106
6.3	Auswahl von Probekörpern, Probekörperfertigung	113
6.3.1	Existente Versuchstechnik zur Verifikation von Festigkeitskriterien	113
6.3.2	Konzepte zur Untersuchung von Bruchwinkeln	115
6.4	Probekörperfertigung	117

7	Der Zug-/Druck-Torsionsprobekörper (σ_2, τ_{21})	[LK, BS, RD, RC]	
7.1	Verifizierungsweg		121
7.2	Theoretische Untersuchungen		121
7.3	Durchführung der Z/D-T-Versuche.....		123
7.4	Versuchsergebnisse		124
7.5	Bruchwinkelmessungen am Z/D-T-Probekörper		127
7.6	Abschätzung des Einflusses der Aushärtungseigen- spannungen eines UD-Probekörpers		127
8	Das Querdruck-UD-Prisma (σ_2^d, θ_B^d)	[JK, DH]	
8.1	Verifizierungsweg		132
8.2	Erste Entwicklungsstufe: Geometriewahl und erste Bruchwinkelmessungen		133
8.3	Zweite Entwicklungsstufe: FEM-Optimierung, Modell- parameterermittlung.....		134
8.3.1	FEM-Optimierung		135
8.3.2	Ergebnisse.....		136
8.3.3	Ermittlung von Modellparametern und Abhän- gigkeit der zugehörigen Werte.....		136
9	Der Torsionsring ($\tau_{32}, \tau_{31}, \theta_B$)	[DH, JK]	
9.1	Verifizierungsweg		139
9.2	Erste Entwicklungsstufe: Auslegung, Bruchwinkel- messung, Ergebnisdiskussion.....		143
9.3	Zweite Entwicklungsstufe: Vertiefte Analyse und Ergebnisse		145
10	Der geschichtete gerade Biegeträger ($\sigma_2, \tau_{23}, \theta_B$)	[DH, JK]	
10.1	Überlegungen zur Spannungsverteilung.....		149
10.2	Qualitative Untersuchungen		154
10.3	Erste Entwicklungsstufe: In situ laminiertes Balken.....		154
10.4	Zweite Entwicklungsstufe: Kalt verklebter Balken.....		156
10.5	Dritte Entwicklungsstufe: Querkontraktionskom- pat. Balken; Ergebnisdiskussion		157
11	Die Quetsch-Nut ($v_f, \sigma_{1f}, \sigma_2^d, \sigma_3^d$)	[RD, RC]	
11.1	Verifizierungsweg		160
11.2	Erste Entwicklungsstufe: Probekörperfestlegung, Analysen, Tests		160
11.3	Zweite Entwicklungsstufe: FEM-Berechnung und Ergebnisse.....		163
12	Mehraxiale Druckversuche		
12.1	Hydrostatischer Versuch ($\sigma_1^d, \sigma_2^d, \sigma_3^d$)	[LK]	166
12.2	Biaxialer Querdruckversuch mit "G-Elementen" ($\sigma_1^d, \sigma_3^d, \theta_B$)	[DH, JK]	167
12.2.1	Verifizierungsweg		167
12.2.2	Erste Entwicklungsstufe: Prüfvorrichtungskonzept und Analyse		167
12.2.3	Zweite Entwicklungsstufe: Versuche an Probekör- pern mit Mulde.....		171

13 Ergebnisdarstellung

13.1 Zusammenfassung der Versuchsergebnisse	173
13.1.1 Mehrachsige Bruchspannungen, Festigkeitswerte und Modellreibungskoeffizienten	
13.1.2 Bruchwinkel	174
13.2 Diskussion verschiedener experimenteller und theoretischer Randfragen.....	176
13.2.1 Begrenzung des ZFB-Körpers im biaxialen Querdruckbereich	176
13.2.2 Modellannahme "spröder" FKV.....	177
13.2.3 Der "Dünne-Schicht-Effekt" eingebetteter 90°-Schichten	177
13.2.4 Mikromechanische Analysen zum (σ_2, τ_{21})-Verlauf	177
13.2.5 Abschätzung der biaxialen Querkzug-Bruchspannung σ_{1B}^{zz}	178
13.3 Mohrsche Bruchbedingungen für die Praxis	179
13.3.1 Allgemeines zur Auswahl der Modelle	179
13.3.2 Einfaches parabolisches Modell	180
13.3.3 Erweitertes Ausgangsmodell (inhomogen)	182
13.3.4 Parabolisches Modell nach Puck	183
13.4 Bewertung und Anmerkung zur Anwendung der Modelle	184
13.4.1 Bewertung der Modelle	184
13.4.2 Sensitivität von Reservefaktor und Bruchwinkel	185
13.4.3 Berücksichtigung von Eigenspannungen	186
13.5 Bisherige Implementierungen der neuen Bruchkriterien	186
13.6 Vergleich von Reservefaktoren verschiedener ZFB/FB-Kriterien.....	188
13.7 Empfehlungen zu stochastischem Modell und zu Teilsicherheitsfaktoren	190

Anhang

I Sonstige Versuche	192
I.1 Der geschichtete gekrümmte Biegeträger (σ_2^z, σ_3^z) [BS, RD].....	192
I.1.1 Verifizierungsweg	192
I.1.2 Erste Entwicklungsstufe: Probekörperfestlegung, Meßschichtan., Analyse	192
I.1.3 Zweite Entwicklungsstufe: Meßschichtanordnung, Analyse, Tests.....	199
I.1.4 Anwendung des neuen Bruchkriteriums auf den gekrümmten Biegeträger.....	203
I.2 Das kerngestützte Rohr ($\sigma_2, \tau_{21}, \theta_B$) [DH, JK]	205
I.2.1 Verifizierungsweg	205
I.2.2 Auslegung des Probekörpers	206
I.2.3 Diskussion der Ergebnisse mit einigen Schlußfolgerungen.....	207
II Farbtafeln	210
III Tabellen.....	226
IV Glossar.....	231

Literatur