

Helmut Schürmann

# Konstruieren mit Faser-Kunststoff- Verbunden

2., bearbeitete und erweiterte Auflage

mit 381 Abbildungen und 39 Tabellen

 Springer

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Historie der Faserverbundwerkstoffe .....	1
1.2 Vorteile und Nachteile der Faser-Kunststoff-Verbunde .....	4
1.3 Einsatzgebiete .....	5
1.3.1 Luft- und Raumfahrt .....	6
1.3.2 Fahrzeugbau .....	8
1.3.3 Boots- und Schiffsbau .....	8
1.3.4 Maschinenbau .....	9
1.3.5 Apparate- und Rohrleitungsbau .....	9
1.3.6 Elektrotechnik .....	9
1.3.7 Bauwesen .....	10
1.3.8 Sportgeräte .....	10
1.4 Allgemeine Bemerkungen .....	10
1.5 Informationsbeschaffung und Weiterbildung .....	11
Literatur .....	12
<b>2 Begriffe, Annahmen</b> .....	<b>13</b>
2.1 Zum Wirkprinzip und zur Benennung .....	13
2.2 Zur Matrix .....	14
2.3 Zu den Begriffen Mehrschichten-Verbund und Unidirektionale Schicht ..	14
2.4 Schichtenweise Betrachtungsweise .....	15
2.5 Zu den Begriffen Mikro- und Makromechanik .....	16
2.6 Begriffe zur Charakterisierung des Werkstoffs – Kontinuum, Homogenität, Anisotropie – .....	17
Normen .....	17
<b>Werkstoffkunde der Faser-Kunststoff-Verbunde</b> .....	<b>19</b>
<b>3 Fasern</b> .....	<b>21</b>
3.1 Zur Wirksamkeit der Faserform .....	21
3.1.1 Einfluss des Größeneffekts .....	21
3.1.2 Einfluss von Orientierungen .....	23
3.1.3 Verminderung von Fehlstellen und Kerben .....	23
3.1.4 Eigenspannungen .....	25
3.1.5 Auswirkung der Faserform auf den Versagensfortschritt .....	25
3.1.6 Zur Querschnittsform von Fasern .....	26

3.2 Einteilung der Fasern .....	26
3.3 Glasfasern .....	27
3.3.1 Herstellung .....	27
3.3.2 Mechanische Eigenschaften .....	28
3.3.3 Temperatureinfluss, Einsatzgrenzen .....	30
3.3.4 Chemikalienbeständigkeit .....	31
3.3.5 Elektrische Eigenschaften .....	33
3.3.6 Lieferformen .....	33
3.4 Kohlenstofffasern .....	35
3.4.1 Herstellung .....	35
3.4.2 Mechanische Eigenschaften .....	39
3.4.3 Temperatureinfluss, Einsatzgrenzen .....	41
3.4.4 Elektrische Eigenschaften .....	42
3.4.5 Lieferformen .....	42
3.5 Aramidfasern .....	43
3.5.1 Herstellung .....	43
3.5.2 Mechanische Eigenschaften .....	43
3.5.3 Temperatureinfluss, Einsatzgrenzen .....	46
3.5.4 Chemikalienbeständigkeit .....	47
3.5.5 Elektrische Eigenschaften .....	47
3.6 PBO-Faser .....	48
3.6.1 Herstellung .....	48
3.6.2 Mechanische Eigenschaften .....	48
3.6.3 Temperatureinfluss, Einsatzgrenzen .....	49
3.6.4 Chemikalienbeständigkeit .....	49
3.6.5 Elektrische Eigenschaften .....	49
3.7 Polyethylenfaser .....	49
3.7.1 Herstellung .....	50
3.7.2 Mechanische Eigenschaften .....	50
3.7.3 Temperatureinfluss, Einsatzgrenzen .....	51
3.7.4 Chemikalienbeständigkeit .....	51
3.7.5 Elektrische Eigenschaften .....	51
3.8 Weitere Fasertypen .....	52
3.8.1 Naturfasern .....	52
3.8.2 Basaltfasern .....	53
3.8.3 Quarzfasern .....	54
3.8.4 Aluminiumoxid-Fasern .....	55
3.8.5 Siliziumcarbid-Fasern .....	55
3.9 Zur Faser-Matrix-Grenzfläche .....	56
3.10 Faser-Halbzeuge .....	57
3.10.1 Gewebe .....	60
3.10.2 Multiaxialgelege .....	63
3.10.3 Matte, Vlies .....	64
3.10.4 Kernmaterialien .....	67
3.10.5 3D-Gewebe und Gelege .....	67
3.10.6 Maschenware: Gestricke und Gewirke .....	68

3.10.7 Abstandsgewebe.....	69
3.10.8 Flechtschläuche .....	69
3.10.9 Sticken.....	70
3.10.10 Nähen .....	71
3.10.11 Abreißgewebe.....	71
3.10.12 Blitzschutz, elektrische Abschirmung .....	73
3.11 Lagerungs- und Verarbeitungshinweise.....	74
3.12 Methodik zur Faserauswahl .....	75
3.12.1 Wahl des Fasertyps.....	75
3.12.2 Wahl und Überprüfung der geeigneten Schlichte.....	76
3.12.3 Zur Beschaffung und Bewertung von Faserdaten .....	78
Literatur .....	79
Normen .....	80
<b>4 Polymere Matrixsysteme.....</b>	<b>83</b>
4.1 Aufgaben und Einteilung der Matrixsysteme .....	83
4.1.1 Duroplaste .....	84
4.1.2 Thermoplaste .....	85
4.1.3 Elastomere .....	86
4.1.4 Füllstoffe .....	87
4.2 Methodik zur Matrixauswahl.....	91
4.3 Werkstoffeigenschaften von polymeren Matrixsystemen.....	92
4.3.1 Notwendige mechanische Eigenschaften .....	92
4.3.2 Temperaturbereiche.....	96
4.3.3 Einfluss hoher Temperaturen .....	96
4.3.4 Temperaturbelastung durch Sonneneinstrahlung .....	97
4.3.5 Beurteilung der Temperatureinsatzgrenzen eines Kunststoffes .....	99
4.3.6 Belastbarkeit bei $T > T_g$ .....	107
4.3.7 Wirkung tiefer Temperaturen .....	108
4.3.8 Ergänzende Hinweise .....	109
4.4 Chemische Beständigkeiten der Matrixpolymere .....	110
4.5 Fertigungsanforderungen an ein Matrixsystem.....	110
4.5.1 Zur Fasertränkung .....	111
4.5.2 Zur Lagerung.....	113
4.5.3 Zur Verarbeitungs- und Gelierzeit.....	113
4.5.4 Nachhärten oder Tempern .....	114
4.5.5 Kontrolle des Härtegrads .....	115
4.5.6 Anforderungen an den Arbeitsschutz und die Abfallentsorgung.....	116
4.6 Ungesättigte Polyesterharze.....	119
4.6.1 Allgemeines.....	119
4.6.2 Zur Verarbeitung und Härtung .....	121
4.6.3 Eine alternative Härtungsmethode, die Lichthärtung .....	124
4.6.4 Nachhärten oder Tempern .....	124
4.6.5 Kontrolle des Härtegrads .....	125
4.7 Epoxidharze .....	125
4.7.1 Allgemeines.....	125

4.7.2 Zur Verarbeitung und Härtung .....	126
4.7.3 Nachhärten oder Tempern .....	127
4.8 Vinylesterharze .....	127
4.8.1 Allgemeines .....	127
4.8.2 Zur Verarbeitung und Härtung .....	128
4.9 Harz-Sondereinstellungen .....	128
4.10 Thermoplastische Matrices .....	129
4.11 Ausgewählte Matrix-Daten .....	132
4.12 Abschließende Hinweise .....	133
Literatur .....	133
Normen .....	134
<b>5 Faser-Matrix-Halbzeuge .....</b>	<b>137</b>
5.1 Sinn und Einteilung vorimprägnierter Halbzeuge .....	137
5.2 Duroplastische SMC- und BMC-Formmassen .....	139
5.2.1 Allgemeines .....	139
5.2.2 Zur Herstellung .....	141
5.2.3 Zur Verarbeitung .....	142
5.2.4 Vorteile/Nachteile und Anwendungen .....	143
5.3 Duroplastische Prepregs .....	145
5.3.1 Allgemeines .....	145
5.3.2 Zur Verarbeitung .....	147
5.3.3 Vorteile/Nachteile und Anwendungen .....	149
5.4 Kurzfaserverstärkte Thermoplaste .....	150
5.5 Glasmattenverstärkte Thermoplaste (GMT) .....	151
5.5.1 Allgemeines .....	151
5.5.2 Zur Verarbeitung .....	152
5.5.3 Vorteile/Nachteile und Anwendungen .....	152
5.6 Langfaserverstärkte Thermoplaste (LFT) .....	154
5.6.1 Allgemeines .....	154
5.6.2 Zur Verarbeitung .....	155
5.6.3 Vorteile/Nachteile und Anwendungen .....	156
5.7 Thermoplastische Prepregs .....	156
5.7.1 Allgemeines .....	156
5.7.2 Zur Herstellung .....	156
5.7.3 Zur Verarbeitung .....	157
5.8 Garnmische und Pulver imprägnierte Garne .....	157
Literatur .....	158
<b>6 Wichtige Kenngrößen der Einzelschichten und des Laminats .....</b>	<b>161</b>
6.1 Relativer Faservolumenanteil .....	161
6.1.1 Zur Bestimmung des relativen Faservolumenanteils .....	162
6.1.2 Wichtige Hinweise .....	165
6.2 Dichte des Verbunds .....	165
6.3 Schichtdicken und benötigte Fasermengen .....	165
6.4 Benötigte Matrixmenge .....	167

6.5 Mischpreis.....	168
Literatur .....	168
Normen .....	168
<b>Das Werkstoffgesetz der Unidirektionalen Schicht.....</b>	<b>171</b>
<b>7 Das lineare Elastizitätsgesetz der UD-Schicht.....</b>	<b>173</b>
7.1 Definitionen .....	173
7.1.1 Begriff des Flusses und der Spannung .....	173
7.1.2 Begriff der Verzerrung .....	175
7.1.3 Begriff der Querkontraktionszahl.....	175
7.1.4 Begriff des Elastizitätsmoduls.....	176
7.1.5 Vorzeichenregelung.....	176
7.1.6 Zur Indizierung.....	177
7.1.7 Die Definitionen von „elastisch“ und „linear elastisch“.....	177
7.2 Einordnung des Elastizitätsgesetzes der UD-Schicht.....	177
7.2.1 Triklone Anisotropie .....	178
7.2.2 Monokline Anisotropie.....	180
7.2.3 Orthotropie .....	180
7.2.4 Transversale Isotropie .....	181
7.2.5 Definition des Orthotropiegrads .....	183
Normen .....	184
<b>8 Bestimmung der Grund-Elastizitätsgrößen einer UD-Schicht .....</b>	<b>185</b>
8.1 Zur experimentellen Bestimmung der Grund-Elastizitätsgrößen.....	186
8.1.1 Zu $E_{\parallel}$ .....	186
8.1.2 Zu $E_{\perp}$ und $G_{\perp\parallel}$ .....	186
8.1.3 Zu $\nu_{\perp\parallel}$ .....	187
8.2 Bestimmung der Grund-Elastizitätsgrößen mittels Mikromechanik.....	187
8.3 Längs-Elastizitätsmodul $E_{\parallel}$ einer UD-Schicht.....	189
8.3.1 Parameterdiskussion und Fazit .....	191
8.3.2 Validierung der mikromechanischen Ansatzes .....	192
8.3.3 Umrechnung von $E_{\parallel}$ auf einen anderen Faservolumenanteil .....	193
8.4 Quer-Elastizitätsmodul $E_{\perp}$ einer UD-Schicht.....	193
8.5 Quer-Längs-Schubmodul $G_{\perp\parallel}$ einer UD-Schicht.....	196
8.6 Querkontraktionszahlen einer UD-Schicht .....	197
8.6.1 Querkontraktionszahl $\nu_{\perp\parallel}$ .....	197
8.6.2 Querkontraktionszahl $\nu_{\parallel\perp}$ .....	199
8.6.3 Querkontraktionszahl $\nu_{\perp\perp}$ .....	200
8.7 Quer-Quer-Schubmodul $G_{\perp\perp}$ einer UD-Schicht .....	202
8.8 Ergänzungen .....	202
8.8.1 Physikalisch nichtlineares Werkstoffverhalten.....	203
8.8.2 Umrechnung experimentell ermittelter Elastizitätsgrößen .....	204
Literatur .....	204

<b>9 Polartransformation des Elastizitätsgesetzes der UD-Schicht.....</b>	<b>205</b>
9.1 Das lineare Elastizitätsgesetz der UD-Schicht als Scheibenelement .....	205
9.2 Polartransformation der Spannungen und Verzerrungen.....	208
9.2.1 Festlegung des Faserwinkels $\alpha$ .....	208
9.2.2 Spannungstransformation.....	209
9.2.3 Verzerrungstransformation.....	210
9.3 Polartransformation der Steifigkeiten und Nachgiebigkeiten .....	211
9.3.1 In das Laminat-KOS transformierte Scheiben-Nachgiebigkeiten ...	212
9.3.2 In das Laminat-KOS transformierte Scheiben-Steifigkeiten.....	213
9.4 Diskussion der Ergebnisse der Polartransformation .....	214
Normen .....	216
<b>Elasto-Statik des Mehrschichtenverbunds.....</b>	<b>217</b>
<b>10 Klassische Laminattheorie des MSV als Scheibenelement .....</b>	<b>219</b>
10.1 Begriffe, Annahmen, Anwendungsgrenzen .....	219
10.2 Elastizitätsgesetz des Mehrschichtenverbunds als Scheibenelement.....	221
10.2.1 Kräfteäquivalenz am MSV .....	221
10.2.2 Geometrische Beziehungen am MSV .....	222
10.2.3 Einbeziehung der Elastizitätsgesetze der Einzelschichten .....	222
10.3 Schichtenweise Spannungs- und Verformungsanalyse.....	223
10.4 Die Ingenieurskonstanten des MSV.....	226
10.5 Anwendung der CLT bei der Gestaltung einer FKV-Struktur.....	226
<b>11 Darstellung und Auswahl von Laminaten.....</b>	<b>229</b>
11.1 Kodierung eines Laminataufbaus .....	229
11.2 Darstellung von Laminataufbauten in Zeichnungen .....	230
11.3 Fertigungsanweisungen .....	232
11.4 Gebräuchliche Laminattypen.....	232
11.4.1 Die Unidirektionale Schicht .....	233
11.4.2 Der Ausgegliche Winkerverbund .....	234
11.4.3 Der Kreuzverbund.....	237
11.4.4 Schublamine .....	240
11.4.5 (0/+45/90)-Flugzeugbau-Lamine .....	243
11.4.6 Quasiisotrope Lamine.....	244
11.4.7 Mattenlamine.....	246
Literatur .....	246
<b>12 Einfluss der Temperatur.....</b>	<b>247</b>
12.1 Allgemeines.....	247
12.2 Elastizitätsgesetz der UD-Schicht einschließlich thermischer Dehnungen .....	250
12.3 Die thermischen Längenausdehnungskoeffizienten einer UD-Schicht..	252
12.3.1 Mikromechanische Bestimmung des thermischen Längenausdehnungskoeffizienten $\alpha_{T\parallel}$ der UD-Schicht.....	254

12.3.2 Mikromechanische Bestimmung des thermischen Längenausdehnungskoeffizienten $\alpha_{T\perp}$ der UD-Schicht .....	256
12.4 Elastizitätsgesetz des MSV einschließlich thermischer Dehnungen .....	259
12.5 Schichtenweise Analyse der thermischen Eigenspannungen .....	259
12.6 Thermische Ausdehnungskoeffizienten des MSV .....	265
12.7 Beeinflussung der thermischen Eigenspannungen .....	266
12.8 Wärmeleitfähigkeiten der UD-Schicht und des MSV .....	268
12.9 Wärmekapazitäten der UD-Schicht und des MSV .....	269
12.10 Tiefsttemperaturen .....	270
Literatur .....	273
Normen .....	274
<b>13 Einfluss von Feuchte.....</b>	<b>275</b>
13.1 Allgemeines .....	275
13.2 Elastizitätsgesetz der UD-Schicht einschließlich der Quelldehnungen..	281
13.3 Die Quell-Längenausdehnungskoeffizienten einer UD-Schicht .....	283
13.3.1 Mikromechanische Bestimmung des Längs-Quelldehnungskoeffizienten $\alpha_{M\parallel}$ der UD-Schicht .....	283
13.3.2 Mikromechanische Bestimmung des Quer-Quelldehnungskoeffizienten $\alpha_{M\perp}$ der UD-Schicht.....	284
13.4 Schichtenweise Analyse der Quelleigenspannungen .....	285
13.5 Bestimmung der Feuchteverteilung .....	286
13.6 Bestimmung der Sättigungsfeuchte .....	289
13.7 Bestimmung der Diffusionskoeffizienten .....	291
13.7.1 Zur experimentellen Bestimmung des Diffusionskoeffizienten .....	291
13.7.2 Temperaturabhängigkeit des Diffusionskoeffizienten .....	293
13.7.3 Die Diffusionskoeffizienten der UD-Schicht $D_{\parallel}$ und $D_{\perp}$ .....	294
Literatur .....	295
Normen .....	295
<b>14 Langzeitverhalten von Faser-Kunststoff-Verbunden.....</b>	<b>297</b>
14.1 Allgemeines, Begriffe .....	297
14.2 Lineare Viskoelastizität .....	300
14.2.1 Das isochrone Spannungs-Verzerrungs-Diagramm.....	300
14.2.2 Boltzmannsches Superpositionsprinzip .....	301
14.3 Beschreibung des zeitabhängigen Werkstoffverhaltens.....	302
14.3.1 Die differentielle Form .....	302
14.3.2 Die integrale Form.....	303
14.4 Das zeitabhängige, ebene, linear viskoelastische Werkstoffgesetz der UD-Schicht .....	304
14.5 Das zeitabhängige, ebene, linear viskoelastische Werkstoffgesetz des MSV .....	305
14.6 Zeitabhängige CLT des MSV mittels rekursiver Beziehungen.....	306
14.7 Zeitabhängige CLT mittels der quasistationären Lösung .....	307
14.8 Kräfteumlagerungen bei Langzeitbelastung .....	307



14.9 Zur Zeitstandfestigkeit.....	312
14.10 Kriechversuche an UD-Probekörpern.....	313
14.10.1 Auswertung von Kriechversuchen .....	314
14.10.2 Umrechnung von Kriechergebnissen auf andere Faservolumengehalte.....	317
14.10.3 Zur zeitlichen Veränderung der Querkontraktionszahlen.....	317
14.10.4 Zur Extrapolation von Ergebnissen aus Langzeitversuchen.....	318
14.11 Konstruktionshinweise .....	319
Literatur .....	320
Normen .....	321
<b>15 Klassische Laminattheorie des MSV als Scheiben- und Plattenelement .</b>	<b>323</b>
15.1 Begriffe, Annahmen, Anwendungsgrenzen .....	323
15.2 Elastizitätsgesetz des MSV als Scheiben-Plattenelement .....	324
15.2.1 Kräfte- und Momentenäquivalenz am MSV .....	326
15.2.2 Kinematische Beziehungen am Scheiben-Plattenelement.....	327
15.2.3 Einbeziehung der Elastizitätsgesetze der Einzelschichten .....	329
15.2.4 Scheiben-Steifigkeitsmatrix .....	331
15.2.5 Platten-Steifigkeitsmatrix.....	331
15.2.6 Koppel-Steifigkeitsmatrix .....	332
15.3 Die Schichtspannungen des MSV-Scheiben-Plattenelements .....	332
15.3.1 Verzerrungen der Einzelschichten.....	332
15.4 Thermische- und Quelleigenspannungen im MSV-Scheiben-Plattenelement.....	333
15.5 Die allgemeinen und speziellen Neutralebenen des MSV .....	335
15.5.1 Allgemeine Neutralebene .....	335
15.5.2 Spezielle Neutralebenen .....	336
15.6 Hinweise zur CLT und die Ingenieurskonstanten des MSV .....	337
15.6.1 Hinweise zur CLT des Scheiben-Plattenelements.....	337
15.6.2 Bestimmung der Ingenieurskonstanten am Plattenelement.....	338
15.7 Hinweise zur Laminatschichtung.....	339
Literatur .....	340
<b>Festigkeitsanalyse der Faser-Kunststoff-Verbunde .....</b>	<b>341</b>
<b>16 Versagen von UD-Schichten .....</b>	<b>343</b>
16.1 Allgemeines .....	343
16.2 Beanspruchungen, Festigkeiten und Versagensarten eines UD-Elements .....	344
16.3 Versagen der Fasern: Faserbruch.....	346
16.3.1 Faserbruch durch Längs-Zugbeanspruchung $\sigma_{\parallel}^+$ .....	346
16.3.2 Faserbruch durch Längs-Druckbeanspruchung $\sigma_{\parallel}^-$ .....	350
16.4 Versagen zwischen den Fasern: Zwischenfaserbruch.....	363
16.4.1 Der Unterschied zwischen Festigkeit und Wirkebenen-Bruchwiderstand.....	363
16.4.2 Beanspruchung durch Querkzug $\sigma_{\perp}^+$ .....	364

16.4.3 Beanspruchung durch Querdruck $\sigma_{\perp}^{-}$ .....	364
16.4.4 Beanspruchung durch Quer-Längs-Schub $\tau_{\parallel}$ ; bzw. durch Längs-Quer-Schub $\tau_{\perp\parallel}$ .....	365
16.4.5 Beanspruchung durch Quer-Quer-Schub $\tau_{\perp\perp}$ .....	366
16.4.6 Versagen bei Zugbeanspruchung quer zur Faserrichtung $\sigma_{\perp}^{+}$ .....	369
16.4.7 Versagen bei Druckbeanspruchung quer zur Faserrichtung $\sigma_{\perp}^{-}$ .....	376
16.4.8 Versagen bei Quer-Längs-Schubbeanspruchung $\tau_{\parallel}$ .....	377
16.4.9 Die Z/DT-Prüfung zur Bestimmung der Festigkeiten $R_{\perp}, R_{\parallel}$ .....	379
16.4.10 Versagen bei Quer-Quer-Schubbeanspruchung $\tau_{\perp\perp}$ .....	381
16.4.11 Überlagerung von Querkzug/Querdruck und Quer-Längs-Schubbeanspruchung.....	381
16.5 Das „Knie“ im Spannungs-Verzerrungs-Diagramm eines MSV .....	382
16.6 Schichtentrennung oder Delamination.....	385
16.6.1 Fälle, bei denen mit Delaminationen zu rechnen ist.....	385
16.6.2 Maßnahmen zur Vermeidung von Delaminationen.....	389
Literatur .....	390
Normen .....	391
<b>17 Bruchanalyse von unidirektionalen Schichten.....</b>	<b>393</b>
17.1 Begriffe, Aufgaben einer Festigkeitsanalyse .....	393
17.2 Anforderungen und allgemeine Formulierung eines Bruchkriteriums... 396	
17.2.1 Spezifische Faserverbund-Anforderungen .....	396
17.2.2 Zur mathematischen Formulierung und Visualisierung von Bruchbedingungen.....	397
17.2.3 Anpassung von Bruchbedingungen; Berücksichtigung des Einflusses von Querdruck auf den Schubbruch.....	399
17.2.4 Formulierung eines Bruchkriteriums und Einführung der Anstrengung .....	402
17.2.5 Berücksichtigung von Eigenspannungen, Einführung des Streckungsfaktors .....	404
17.2.6 Anstrengung und Streckungsfaktor bei nichtlinearem Werkstoffverhalten.....	406
17.2.7 Der Reservefaktor für ein Laminat .....	407
17.3 Gliederung der Bruchkriterien-Arten.....	408
17.4 Faser-Bruchkriterium der UD-Schicht.....	409
17.5 Vorbemerkungen zu Zwischenfaserbruch-Kriterien.....	411
17.6 Wirkebenen-bezogene Bruchkriterien für die UD-Schicht.....	411
17.6.1 Spannungen und Spannungskombinationen auf der Bruchebene, die zu Zfb führen .....	412
17.6.2 Bestimmung der Lage der Bruchebene .....	415
17.6.3 Die Master-Bruchbedingungen für Zfb .....	416
17.6.4 Der „Sonderfall“ des ebenen Spannungszustands .....	421
17.6.5 Wahl der Neigungsparameter .....	425
17.6.6 Vorteile der Wirkebenen-bezogenen Bruchkriterien.....	426
17.6.7 Zur experimentellen Ermittlung der Bruchwiderstände .....	427

17.7 Einfluss faserparalleler Spannungen auf den Zfb und das Zfb-Bruchkriterium.....	428
17.7.1 Zur Ermittlung der Anstrengung.....	428
17.7.2 Zur Ermittlung des Reservefaktors.....	433
17.8 Global-Bruchkriterien der UD-Schicht.....	434
17.8.1 Allgemeines.....	434
17.8.2 Ein Dehnungs-Globalkriterium; Festigkeitsanalyse von (0/90/±45) <sub>s</sub> -Flugzeugbau-Laminaten.....	434
17.9 Schichtenweise Bruchanalyse.....	436
17.9.1 Zur Übertragung der Festigkeitsanalyse der UD-Schicht auf den MSV.....	436
17.10 Maßnahmen gegen zu früh eintretenden Fb oder Zfb.....	437
17.10.1 Maßnahmen gegen zu frühen Faserbruch.....	437
17.10.2 Maßnahmen gegen zu frühen Zwischenfaserbruch.....	438
Literatur.....	439
<b>18 Degradationsanalyse von Laminaten.....</b>	<b>441</b>
18.1 Ziele einer Degradationsanalyse.....	441
18.2 Das Degradationsmodell für eine UD-Schicht.....	441
18.2.1 Zur Steuerung der Degradationstärke.....	444
18.2.2 Rechenschritte bei der Degradationsanalyse.....	446
18.2.3 Hinweise.....	447
Literatur.....	448
<b>Entwurfsmethoden für Lamine.....</b>	<b>449</b>
<b>19 Laminatentwurf mit Hilfe der Netztheorie.....</b>	<b>451</b>
19.1 Definitionen, Voraussetzungen.....	453
19.2 Polartransformation.....	454
19.3 Äquivalenz zwischen Schnittkräften und Schichtkräften im MSV.....	455
19.3.1 Äquivalenz- oder Gleichgewichtsbeziehungen.....	455
19.3.2 Übergang zum I,II-Hauptachsen-Koordinatensystem.....	456
19.4 Bestimmung der Schichtkräfte, der Faserwinkel und der Fasermengen.....	458
19.4.1 Lamine mit nur einer Faserrichtung.....	458
19.4.2 Lamine mit zwei Faserrichtungen.....	458
19.4.3 Lamine mit drei Faserrichtungen.....	462
19.4.4 Lamine mit vier oder mehr Faserrichtungen.....	467
19.5 Radialkräfte bei gekrümmten Laminaten.....	467
19.6 Mindestfaseraufwand, Optimierungsregeln.....	469
19.7 Beispiele.....	473
19.7.1 Druckbehälter oder endseitig verschlossenes Druckrohr.....	473
19.7.2 Torsionsrohr oder Schubsteg.....	474
Literatur.....	476
<b>20 Gewichtsoptimale Auslegung von Laminaten als Isotensoide.....</b>	<b>477</b>
20.1 Zum Begriff des Isotensoiden.....	477

20.2 Isotensoidische Optimierung auf Basis der CLT .....	478
20.3 Beispiel: Dünnwandiger Druckbehälter .....	481
Literatur .....	482
<b>Krafteinleitungen und Fügetechniken .....</b>	<b>483</b>
<b>21 Der Schlaufenanschluss.....</b>	<b>485</b>
21.1 Vorbemerkungen zum Thema Krafteinleitung .....	485
21.2 Vorbemerkungen zum Schlaufenanschluss.....	486
21.3 Spannungsanalyse des Schlaufenanschlusses .....	487
21.3.1 Kräftegleichgewicht .....	488
21.3.2 Kinematische Beziehungen .....	488
21.3.3 Elastizitätsgesetze.....	489
21.3.4 Randbedingungen .....	491
21.4 Ergebnisse und Diskussion der Spannungsanalyse.....	492
21.4.1 Einfluss des Radienverhältnisses.....	493
21.4.2 Einfluss des Orthotropiegrads $E_{II}/E_{I}$ .....	494
21.4.3 FE-Korrekturen der analytischen Ergebnisse .....	495
21.5 Ergebnisse einer Festigkeitsanalyse .....	497
21.6 Konstruktive Verbesserungsmaßnahmen und Detaillösungen.....	498
21.6.1 Die Schlaufenkaskade .....	498
21.6.2 Die mehrschichtige Schlaufe .....	499
21.6.3 Gestaltung als Hybridschlaufe.....	500
21.6.4 Einfügen von Rissstopperschichten.....	501
21.6.5 Konstruktionslösungen .....	501
21.6.6 Ausleiten des Schlaufenanschlusses in die Fläche .....	503
21.6.7 Einleitung von Biegemomenten .....	503
21.6.8 Einleitung von Querkräften .....	504
21.6.9 Die Schlaufe als Spannelement .....	505
21.6.10 Reduktion der Bauhöhe der Schlaufenumlenkung .....	506
21.6.11 Keil-Schlaufenanschlüsse.....	507
21.7 Druckbeanspruchte Schlaufen .....	508
21.8 Zusammengefasste Gestaltungsregeln .....	509
Literatur .....	510
<b>22 Bolzenverbindungen.....</b>	<b>513</b>
22.1 Vorbemerkungen .....	513
22.2 Versagensmöglichkeiten und ihre überschlägige Überprüfung .....	515
22.2.1 Festlegung und Überprüfung des Bolzendurchmessers.....	516
22.2.2 Festlegen der Randabstände .....	517
22.2.3 Überprüfen der Lochleibungsfestigkeit .....	519
22.2.4 Überprüfen auf Flankenzugbruch.....	521
22.2.5 Überprüfen auf Scherbruch .....	522
22.2.6 Überprüfen auf Spalten .....	523
22.2.7 Kombiniertes Scher- und Flankenzugbruch.....	524

22.2.8 Überlagerung aller auf mögliche Versagensformen abgestimmten Faserorientierungen.....	524
22.3 Feindimensionierung der Bolzenverbindung.....	526
22.4 Steigerung der Belastungsfähigkeit durch Anpressdruck auf die Füge­teile .....	528
22.5 Maßnahmen zur Erhöhung der Belastbarkeit von Bolzenverbindungen	529
22.5.1 Einlaminiere­n von Metallfolien.....	531
22.6 Zur Auswahl geeigneter Niete .....	536
22.6.1 Ausreichende Festigkeit .....	536
22.6.2 Werkstoffkompatibilität – elektrochemische Korrosion .....	536
22.6.3 Geeignete Niete sowie Niet- und Schließköpfe.....	537
22.6.4 Passungstoleranz Bohrung - Niet .....	540
22.7 Zusammenfassung aller Optimierungsmaßnahmen .....	541
22.8 Hinweise zur Fertigung der Bohrungen.....	541
22.9 Zur Prüfung von Bolzenverbindungen.....	542
22.10 Zur Gestaltung von Nietreihen .....	542
22.10.1 Analyse von Nietreihen .....	543
22.10.2 Zur Bestimmung der Nachgiebigkeiten.....	548
22.10.3 Ergebnis-Diskussion.....	548
22.11 Direktverschraubungen in Laminate.....	549
22.12 Stehbolzen mit einzubettender Fußplatte.....	553
22.12.1 Versuchsergebnisse quasistatischer Festigkeitsprüfungen .....	555
22.12.2 Versuchsergebnisse von Ermüdungsprüfungen.....	557
22.12.3 Zur Berechnung des Platte/Bolzen-Elements .....	559
22.12.4 Empfehlungen zur konstruktiven Ausgestaltung.....	562
22.13 Beispiele von Bolzenverbindungen in hoch beanspruchten Strukturen	564
Literatur .....	567
Normen.....	568
<b>23 Klebverbindungen.....</b>	<b>569</b>
23.1 Vorbemerkungen .....	569
23.2 Allgemeines zur Spannungsanalyse von Klebverbindungen .....	572
23.3 Zur Analyse einer geschäfteten Klebverbindung.....	573
23.3.1 Ablauf der Rechnung .....	573
23.3.2 Parameterdiskussion.....	574
23.4 Zur Analyse von Überlappungs-Fügungen.....	576
23.4.1 Annahmen .....	576
23.4.2 Elasto-Statik der Überlappungsklebung.....	577
23.4.3 Gleichzeitige Zug/Druck- und Schubbelastung einer Klebung.....	580
23.4.4 Diskussion der Analyseergebnisse bei ein- und zweischnittigen Überlappungs-Kle­bungen.....	580
23.4.5 Doppler-Kle­bungen.....	584
23.4.6 Bemerkungen zu einer verschärften Analyse .....	585
23.5 Einfluss der Kleber-Plastizität .....	586
23.6 Zum Langzeitverhalten von Klebverbindungen .....	588
23.6.1 Einfluss von Temperaturen und Medien .....	588

23.6.2 Zeitstandverhalten .....	588
23.6.3 Schwingfestigkeit .....	589
23.7 Zur Kleberauswahl.....	590
23.7.1 Wirkmechanismen einer Klebung .....	590
23.7.2 Klebertypen .....	592
23.7.3 Füllstoffe .....	594
23.8 Zur Herstellung von Klebverbindungen .....	594
23.8.1 Vorbehandlung der Fügeteile .....	594
23.8.2 Zum Einfluss der Klebschichtdicke.....	597
23.8.3 Empfehlung .....	599
23.9 Konstruktive Verbesserungen einer Klebverbindung .....	599
23.9.1 Erhöhung der Schubbelastbarkeit durch überlagerten Querdruck ..	599
23.9.2 Kombinations- oder Gradientenklebung .....	600
23.9.3 Keilförmige Klebfugen.....	601
23.9.4 Kleber-Kehle .....	601
23.9.5 Konstruktive Möglichkeiten, um Abschälen zu verhindern .....	602
23.10 Hinweis zur Prüfung von Klebverbindungen.....	603
Literatur .....	603
Normen .....	604
<b>Gestaltungs- und Konstruktionshinweise.....</b>	<b>605</b>
<b>24 Gestaltungshinweise für FKV-Strukturen .....</b>	<b>607</b>
24.1 Allgemeine Leichtbauregeln .....	607
24.1.1 Leichtbau durch realistische Anforderungen.....	607
24.1.2 Werkstoff-Leichtbau .....	607
24.1.3 Verbund-Leichtbau.....	608
24.1.4 Leichtbau durch geringe Streuungen.....	610
24.1.5 Leichtbau durch detaillierte mechanische Analyse .....	611
24.1.6 Konstruktiver Leichtbau .....	612
24.2 Spezielle Gestaltungshinweise für FKV .....	619
24.3 Fertigungstechnische Gestaltungsregeln für FKV .....	624
Literatur .....	629
<b>25 Besondere konstruktive Möglichkeiten der Faser-Kunststoff-Verbunde</b>	<b>631</b>
25.1 Zur Möglichkeit, Steifigkeiten und Festigkeiten gezielt einzustellen ....	632
25.1.1 Kombinieren verschiedener Fasertypen .....	632
25.1.2 Der Faservolumenanteil als Konstruktionsparameter .....	632
25.1.3 Anpassen der Faserwinkel an Belastungsverläufe.....	634
25.2 Nutzung des schichtenweisen Aufbaus von Laminaten.....	635
25.2.1 Anpassung der Wanddicken an Belastungsverläufe.....	636
25.2.2 Zur Gestaltung von Laminatstufungen .....	639
25.2.3 Laterale Schichtstufungen .....	641
25.3 Abstimmung von Schichtreihenfolgen und Faserorientierungen.....	641
25.3.1 Nutzung von Verformungs-Koppelungen .....	641
25.3.2 Abstimmung von Scheiben- und Plattensteifigkeit .....	645

- 25.3.3 Faserwinkelsteuerung bei tordierten Rohren zur Beeinflussung  
der Schubspannungsverteilung..... 646
- 25.4 Nutzung der statischen Unbestimmtheit von Laminaten ..... 651
- 25.5 Nutzung des anisotropen Festigkeitsverhaltens ..... 653
- 25.6 Nutzung des thermischen Verhaltens..... 655
  - 25.6.1 Lamine ohne thermische Ausdehnung ..... 655
  - 25.6.2 Zur Auslegung von Stäben ohne thermische Dehnung ..... 657
  - 25.6.3 Zur Steigerung der Wärmeleitfähigkeit von FKV ..... 657
- 25.7 Nutzung gezielt eingebrachter Eigenspannungen ..... 658
  - 25.7.1 Mechanisches Verfahren ..... 659
  - 25.7.2 Thermisch-mechanisches Verfahren ..... 660
  - 25.7.3 Analyse des Eigenspannungszustands..... 661
  - 25.7.4 Versuchsergebnisse ..... 664
  - 25.7.5 Einfluss von Zeit ..... 665
  - 25.7.6 Weitere Anwendungsmöglichkeiten ..... 665
  - 25.7.7 Wichtiger Hinweis..... 668
- Literatur ..... 668

**Sachverzeichnis..... 671**