

Inhaltsverzeichnis

- 1 Einleitung 1**
 - 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
- 2 Begriffe, Annahmen 13**
 - 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
- Werkstoffkunde der Faser-Kunststoff-Verbunde 19**
- 3 Fasern 21**
 - 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
4 Polymere Matrixsysteme.....	83
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 Kunststoffs	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 Härungsgrads	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 Härungsgrads	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
5 Faser-Matrix-Halbzeuge	137
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 Garngemische und Pulver imprägnierte Garne	157
Literatur	158
6 Wichtige Kenngrößen der Einzelschichten und des Laminats	161
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
Das Werkstoffgesetz der Unidirektionalen Schicht.....	171
7 Das lineare Elastizitätsgesetz der UD-Schicht.....	173
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
8 Bestimmung der Grund-Elastizitätsgrößen einer UD-Schicht	185
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

9 Polartransformation des Elastizitätsgesetzes der UD-Schicht.....	205
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 α	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
 Elasto-Statik des Mehrschichtenverbunds.....	217
 10 Klassische Laminattheorie des MSV als Scheibenelement	219
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
 11 Darstellung und Auswahl von Laminaten.....	229
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
 12 Einfluss der Temperatur.....	247
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
13 Einfluss von Feuchte.....	275
13.1 Allgemeines	275
13.2 Elastizitätsgesetz der UD-Schicht einschließlich der Quelledehnungen	281
13.3 Die Quell-Längenausdehnungskoeffizienten einer UD-Schicht	283
13.3.1 Mikromechanische Bestimmung des Längs-Quelledehnungskoeffizienten $\alpha_{M\parallel}$ der UD-Schicht	283
13.3.2 Mikromechanische Bestimmung des Quer-Quelledehnungskoeffizienten $\alpha_{M\perp}$ 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
14 Langzeitverhalten von Faser-Kunststoff-Verbunden.....	297
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
15 Klassische Laminattheorie des MSV als Scheiben- und Plattenelement .323	
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
Festigkeitsanalyse der Faser-Kunststoff-Verbunde 341	
16 Versagen von UD-Schichten 343	
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 σ_{\parallel}^+	346
16.3.2 Faserbruch durch Längs-Druckbeanspruchung σ_{\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 σ_{\perp}^+	364

16.4.3 Beanspruchung durch Querdruck σ_{\perp}^{-}	364
16.4.4 Beanspruchung durch Quer-Längs-Schub $\tau_{\perp\parallel}$, bzw. durch Längs-Quer-Schub $\tau_{\parallel\perp}$	365
16.4.5 Beanspruchung durch Quer-Quer-Schub $\tau_{\perp\perp}$	366
16.4.6 Versagen bei Zugbeanspruchung quer zur Faserrichtung σ_{\perp}^{+}	369
16.4.7 Versagen bei Druckbeanspruchung quer zur Faserrichtung σ_{\perp}^{-}	376
16.4.8 Versagen bei Quer-Längs-Schubbeanspruchung $\tau_{\perp\parallel}$	377
16.4.9 Die Z/DT-Prüfung zur Bestimmung der Festigkeiten R_{\perp} , $R_{\perp\parallel}$	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
17 Bruchanalyse von unidirektionalen Schichten	393
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 Spannungscombinationen 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) _s -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
18 Degradationsanalyse von Laminaten.....	441
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
Entwurfsmethoden für Lamine	449
19 Laminatentwurf mit Hilfe der Netztheorie	451
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
20 Gewichtsoptimale Auslegung von Laminaten als Isotensoide	477
20.1 Zum Begriff des Isotensoiden.....	477

20.2 Isotensoidische Optimierung auf Basis der CLT	478
20.3 Beispiel: Dünnwandiger Druckbehälter	481
Literatur	482
Krafteinleitungen und Fügeverfahren	483
21 Der Schlaufenanschluss	485
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_{\parallel}/E_{\perp}	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
22 Bolzenverbindungen	513
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 Flankenbruch	521
22.2.5 Überprüfen auf Scherbruch	522
22.2.6 Überprüfen auf Spalten	523
22.2.7 Kombierter Scher- und Flankenbruch	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 Lamine	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
23 Klebverbindungen.....	569
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
Gestaltungs- und Konstruktionshinweise	605
24 Gestaltungshinweise für FKV-Strukturen	607
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
25 Besondere konstruktive Möglichkeiten der Faser-Kunststoff-Verbunde	631
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



<http://www.springer.com/978-3-540-72189-5>

Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden

Schürmann, H.

2007, XXV, 672 S., Hardcover

ISBN: 978-3-540-72189-5