

Manfred Neitzel  
Peter Mitschang  
Ulf Breuer

# **Handbuch Verbundwerkstoffe**

**Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung**

**2., aktualisierte und erweiterte Auflage**

**HANSER**

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b>	VII
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	IX
<b>1 Einführung</b>	1
<i>U. Breuer, P. Mitschang</i>	
1.1 Stand der Technik	1
1.2 Technisch-wirtschaftliche Entwicklung	3
<i>U. Breuer, J. Schiimbach, M. Neitzel</i>	
1.2.1 Einleitung	3
1.2.2 Der industrielle Einsatz	4
1.2.2.1 Luft- und Raumfahrt, Wehrtechnik	5
1.2.2.2 Migration in andere Branchen	7
1.2.2.3 Entwicklung des FKV-Marktes	11
1.2.3 Technisch-wirtschaftliche Entwicklung der Kohlenstofffasern	14
<i>M. Heine</i>	
1.2.3.1 Status und Trends	14
1.2.3.2 Marktentwicklung	16
1.2.3.3 Mengenentwicklung	17
1.2.4 Ökonomische Bewertung der FKV-Verarbeitungstechnologien	19
<i>R. Holschuh, J. Mack</i>	
1.2.4.1 Grundlagen	20
1.2.4.2 Bisherige Ansätze	21
1.2.4.3 Erweiterte Ansätze	23
1.2.5 Zusammenfassung	27
<b>2 Werkstoffe</b>	31
<i>J. Karger-Kocsis</i>	
2.1 Fasern	31
2.1.1 Eigenschaften	31
2.1.2 Herstellung und Anwendung der Fasern	34
2.1.2.1 Glasfasern (GF)	34
2.1.2.2 Kohlenstofffasern (CF)	36
2.1.2.3 Aramidfasern	38
2.1.2.4 Polyethylenfasern	39
2.1.2.5 Naturfasern	39
<i>L. Medina</i>	

2.1.2.6	Stahlfasern, Metallfasern	41
	<i>U. Breuer</i>	
2.2	Matrixsysteme	42
2.2.1	Eigenschaften	42
2.2.2	Duroplaste	43
2.2.2.1	Herstellung und Anwendung	43
2.2.2.2	Polymerisations-Duroplaste	47
2.2.2.3	Polyadditions-Duroplaste	50
2.2.2.4	Polykondensations-Duroplaste	53
2.2.2.5	Biobasierte Duroplaste	54
2.2.3	Thermoplaste	56
2.2.3.1	Herstellung und Anwendung	56
2.2.3.2	Polymerisations-Thermoplaste	58
2.2.3.3	Polyadditions-Thermoplaste	59
2.2.3.4	Polykondensations-Thermoplaste	60
2.2.4	Biobasierte Thermoplaste	65
2.3	Grenzfläche und Grenzphase	67
2.3.1	Allgemeines	67
2.3.2	Charakterisierung der Grenzschicht	68
2.3.2.1	Duroplaste	68
2.3.2.2	Thermoplaste	69
<b>3</b>	<b>Textile Halbzeuge</b>	<b>73</b>
	<i>A. Ogale, C. Weimer, T. Grieser, P. Mitschang</i>	
3.1	Halbzeugformen	73
3.1.1	Matten (Non-wovens)	74
3.1.1.1	Aerodynamische Vlieslegung	75
3.1.1.2	Nadelvliese	75
3.1.1.3	Chemisch fixierte Matten (Gebondete Vliese)	76
3.1.2	Gewebe	77
3.1.2.1	2D-Gewebe	77
3.1.2.2	3D-Gewebe	79
3.1.2.3	Abstands-Textilien	81
3.1.2.4	Spiralgewebe	82
3.1.3	Gelege	83
3.1.4	Flechten	85
	<i>S. Wiedmer, K. Friedrich</i>	
3.1.5	Maschenware	89
3.1.5.1	Rundstricken	90
3.1.6	Technische Gesticke	90
3.1.7	Biaxialgewirke	92
<b>4</b>	<b>Preformverfahren</b>	<b>95</b>
	<i>C. Weimer, T. Grieser, P. Mitschang</i>	
4.1	Einleitung	95
4.2	Grundlagen	97

4.3	Direkte Preformherstellung	100
4.3.1	Standardverfahren	100
4.3.2	Direkte textiltechnische Preformverfahren	101
4.4	Sequentielle Preformherstellung	104
4.4.1	Binder-Umformtechnik	104
4.4.2	Textile Konfektionstechnik	105
4.4.2.1	Nähetechnik	105
4.4.2.2	Stichtypen für die Preform-Montage	109
4.4.2.3	Alternative Preform-Fügetechniken	124
4.4.3	Kontinuierliches Preforming	129
<b>5</b>	<b>Imprägnierte Halbzeuge</b>	<b>135</b>
	<i>L. Medina, J. Mack, M. Christmann</i>	
5.1	Einleitung	135
5.2	Duroplastprepregs	136
	<i>M. Sommer, M. Neitzel, L. Medina, P. Mitschang</i>	
5.2.1	Nicht-fließfähige Duroplastprepregs	136
5.2.2	Fließfähige Duroplastprepregs	138
5.3	Thermoplastische Prepregs und Halbzeuge	147
	<i>M. Sommer, K. Edelmann, A. Wöginger, M. Christmann, J. Mack, L. Medina, P. Mitschang</i>	
5.3.1	Gasmattenverstärkte Thermoplaste (GMT)	147
5.3.2	Langglasfaserverstärkte Thermoplaste in Granulatform (LFT)	152
5.3.2.1	Pressrheometer zur prozessintegrierten Analyse	157
5.3.2.2	Rheometer für faserverstärkte Pressmassen	159
5.3.2.3	Strömungsprofil beim Pressvorgang	161
5.3.2.4	Rheometerkonzept	163
5.3.2.5	Ergebnisse	167
5.3.2.6	Fehlerabschätzung	170
5.3.3	Endlosfaserverstärkte Thermoplaste	171
5.3.3.1	Prozesskette zur Halbzeugherstellung	171
5.3.3.2	Prepregtechnologie	175
5.3.3.3	Unidirektionale Halbzeuge (UD-Tapes)	183
5.3.3.4	Multidirektionale, flächige Halbzeuge	186
5.3.4	Polymerfaserverstärkte Verbundwerkstoffe	193
	<i>T. Bayerl</i>	
<b>6</b>	<b>Grundlagen der Verarbeitungsprozesse</b>	<b>201</b>
	<i>P. Mitschang, M. Arnold, M. Duhovic, M. Christmann, K. Hildebrandt, D. Maurer, H. Stadtfeld, T. Stöven, F. Weyrauch, M. Latrille, M. Louis, M. Neitzel, G. Beresheim</i>	
6.1	Einordnung der Verarbeitungsprozesse	201
6.2	Allgemeine Grundlagen	205
6.3	Grundlagen der Imprägnierung	209
6.3.1	Physikalische Grundlagen der Imprägnierung und Konsolidierung	209
6.3.2	Energietransfer	212
6.3.2.1	Konduktion	213

6.3.2.2	Konvektion	214
6.3.2.3	Strahlung	214
6.3.2.4	Modellierung des Wärmetransfers	216
6.3.3	Einfluss der Rheologie auf die Verarbeitung	218
6.3.3.1	Duroplaste	221
6.3.3.2	Thermoplaste	225
6.3.4	Grundlagen der Fließprozesse	227
6.3.4.1	Eindimensionales Fließen (1D)	228
6.3.4.2	Zweidimensionales Fließen (2D)	229
6.3.4.3	Dreidimensionales Fließen (3D)	231
6.3.5	Permeabilitätsmessung	232
6.3.5.1	Eindimensionale Permeabilitätsmessung (1D)	233
6.3.5.2	Zweidimensionale Permeabilitätsmessung (2D)	234
6.3.5.3	Dreidimensionales Permeabilitätsmessverfahren (3D)	237
6.3.5.4	Einflussgrößen auf die Permeabilität	239
6.4	Prozessketten	241
6.5	Qualitätsmanagement	243
6.5.1	Qualitätskontrolle	243
6.5.2	Sensorik zur Prozessüberwachung	244
6.5.3	Prozessregelung	245
6.6	Grundlagen der Simulation	247
6.6.1	Simulation der Fließpressverfahren	247
6.6.2	Simulation des Thermoformens von Organoblechen	249
6.6.3	Simulation der Flarzinjektionsverfahren	252
6.6.4	Weitere Simulationsprogramme	257
<b>7</b>	<b>Bauweisen und Smart Structures</b>	<b>277</b>
7.1	Bauweisen	277
	<i>N. Himmel</i>	
7.1.1	Einleitung	277
7.1.2	Bauweisenklassifizierung	278
7.1.2.1	Differential- und Integralbauweise	278
7.1.2.2	Integrierende Bauweise	279
7.1.2.3	Verbundbauweise	279
7.1.2.4	Sandwichbauweise	281
7.1.3	Leichtbau	281
7.1.4	Besonderheiten der FKV-Bauweisenentwicklung	283
7.1.4.1	Inhomogenität und Richtungsabhängigkeit	283
7.1.4.2	Umwelteinfluss	286
7.1.4.3	Werkstoffkonstruktion	287
7.1.4.4	Halbzeugvielfalt	288
7.1.5	Wechselwirkung zwischen Bauweise und Fertigungsprozess	288
7.1.6	Krafteinleitung und Verbindungstechnik	289
7.1.6.1	Mechanisches Fügen	289
7.1.6.2	Stoffliches Fügen	291
7.1.6.3	Weitere Fügeverfahren	294

7.1.7	Auslegung und Simulation	295
7.1.8	Beispiele für FKV-Bauweisen und -Anwendungen	297
7.2	Smart Structures	300
	<i>M. Gurka</i>	
7.2.1	Einleitung	300
7.2.2	Multifunktionale Werkstoffe	302
7.2.3	Integrationskonzepte	303
7.2.4	Multifunktionale Strukturen und Systeme	304
<b>8</b>	<b>Autoklaventechnik</b>	<b>307</b>
	<i>U. Schmitt, T. Weick</i>	
8.1	Einleitung	307
8.2	Anlagentechnik	307
8.3	Herstellung von FKV-Bauteilen	309
8.4	Zykluskosten, Prozessparameter und Verbrauchsmaterialien	311
8.5	Qualitätssicherung	313
8.6	Weitere Entwicklung	316
<b>9</b>	<b>Pultrusionsverfahren</b>	<b>317</b>
	<i>S. Wiedmer, K. Friedrich, R. Schledjewski</i>	
9.1	Einleitung	317
9.2	Grundlagen	318
9.3	Duroplast-Pultrusion	319
9.4	Thermoplast-Pultrusion	321
9.5	Verfahrenskombination	322
<b>10</b>	<b>Wickel- und Legetechnik</b>	<b>325</b>
	<i>R. Schledjewski, M. Schlottermüller, M. Neitzel, G. Beresheim, J. Mack, M. Brzeski</i>	
10.1	Wickeltechnik	325
10.1.1	Einleitung	325
10.1.2	Verfahrensgrundlagen	326
10.1.3	Anlagentechnische Umsetzung	329
	10.1.3.1 Duroplastwickeln	331
	10.1.3.2 Thermoplastwickeln	334
10.1.4	Weitere Entwicklung	341
10.2	Tapelegetechnik	342
10.2.1	Einleitung	342
10.2.2	Duroplast-Tapelegen	344
	10.2.2.1 Duroplast-Kontur-Tapelegen	347
	10.2.2.2 Duroplast-Multi-Tapelegen	349
10.2.3	Thermoplast-Tapelegen	350
10.2.4	Abgrenzung der Legeverfahren	352

<b>11 Harzinjektionsverfahren</b>	<b>357</b>
<i>P. Mitschang, M. Arnold, F. Weyrauch, H. Stadtfeld, C. Kissinger</i>	
11.1 Einleitung	357
11.2 Anwendungsfelder	358
11.3 Harzinjektions-Verfahrensvarianten	364
11.3.1 Vakuuminjektionsverfahren (VI)	365
11.3.2 Resin Transfer Molding (RTM)	366
11.3.3 Vacuum Assisted Resin Transfer Molding (VARTM)	368
11.3.4 Weitere Verfahrensvarianten	369
11.3.4.1 Flächeninjektionsverfahren	370
11.3.4.2 Advanced RTM (ARTM)	372
11.3.4.3 Thermal Expansion RTM (TERTM)	373
11.3.4.4 Differential Pressure RTM (DPRTM)	373
11.3.4.5 Schlauchblas-RTM	374
11.3.4.6 Structural Reaction Injection Molding (SRIM)	375
11.3.4.7 Spaltimprägnierverfahren	376
11.3.4.8 Same Qualified – Resin Transfer Molding (SQ-RTM)	376
11.3.4.9 Nasspressen	377
11.4 Zusammenfassung	377
<b>12 Pressverfahren</b>	<b>383</b>
<i>M. Sommer, K. Edelmann, R. Lahr, K. Hildebrandt, K. Grebel, L. Medina, R. Holschuh</i>	
12.1 Einleitung	383
12.2 Fließpressverfahren	384
12.2.1 Fließpressen von LFT und GMT	384
12.2.2 Fließpressen von Sheet Molding Compound (SMC)	387
12.2.3 Vergleich der Matrixsysteme im Fließpressprozess	391
12.3 Thermoformen von Organoblechen	393
12.3.1 Einleitung	393
12.3.2 Umformprinzipien	394
12.3.3 Umformverfahren allgemein	395
12.3.3.1 Diaphragmaformen	397
12.3.3.2 Umformen mit Metallstempel	398
12.3.3.3 Umformen mit Elastomerblock	399
12.3.3.4 Umformen mit Silikonstempel	400
12.3.3.5 Quicktemp-Konzept	401
12.3.3.6 Direktimprägnieren	402
12.3.3.7 Direktformen	405
12.3.3.8 Druckunterstütztes Thermoformen	406
12.3.3.9 Zusammenfassende Darstellung der Thermoformverfahren . . . .	407
12.3.4 Dickenadaptives Umformen	408
12.3.4.1 Sandwich-Umformen	408
12.3.4.2 Wege zu Sandwichbauteilen aus Organoblechen	409
12.3.4.3 Sandwich-Umformen in mehreren Schritten	409
12.3.4.4 Sandwich-Umformen in einem Schritt	410
12.3.4.5 Tailored-Blank-Technologie	412

12.4	Rollformen von Faser-Kunststoff-Verbunden	415
	<i>F. Henninger, K. Friedrich</i>	
12.4.1	Einleitung	415
12.4.1.1	Grundlagen des Rollformens	416
12.4.1.2	Rollformen von thermoplastischen FKV	418
12.4.1.3	Rollformen von duroplastischen FKV	419
12.4.1.4	Weitere Entwicklung und Potentiale	419
12.5	Verfahrenskombinationen mit Thermoformen (Hybridverfahren)	420
	<i>R. Florschuh</i>	
12.5.1	Thermoformen und Spritzguss	420
12.5.2	Thermoformen und Tapelegen	422
12.6	Direktverfahren	423
12.6.1	Direktverfahren zur Herstellung von SMC	424
12.6.2	Direktverfahren zur Herstellung von LFT	426
<b>13</b>	<b>Bearbeitung, Oberflächenbehandlung</b>	<b>433</b>
	<i>R. Schledjewski, M. Blinzler, K. Hildebrandt</i>	
13.1	Einleitung	433
13.2	Bearbeitung	433
13.2.1	Grundlagen	433
13.2.2	Bohren	435
13.2.3	Sägen	436
13.2.4	Fräsen	437
13.2.5	Wasserstrahlschneiden	439
13.2.6	Laserstrahlschneiden	441
13.3	Oberflächencharakterisierung und -behandlung	442
13.3.1	Einleitung	442
13.3.2	Messgrößen	443
13.3.2.1	Topographie	444
13.3.3	Lackierung	448
13.3.4	Beschichtungen	450
<b>14</b>	<b>Materialkreisläufe</b>	<b>455</b>
	<i>E. Witten</i>	
14.1	Einleitung	455
14.2	Produktion, Materialkreisläufe und Nachhaltigkeit	456
14.3	Umwelt, Ökologie und Ökonomie	458
14.4	Gesetzliche Grundlagen	458
14.4.1	Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG)	459
14.4.2	Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG)	459
14.4.3	Altfahrzeug-Verordnung (AltfahrzeugV)	460
14.5	Abfallhierarchie	460
14.6	Verwertungsmöglichkeiten	461
14.6.1	Werkstoffgruppe versus Werkstoff	462
14.6.2	Abfallvermeidung	462
14.6.3	Energetische Nutzung	463

14.6.4	Pyrolyse	464
14.6.5	Stoffliche Verwertung/Recycling	465
14.6.6	Verwendung in der Zementindustrie	465
14.7	Fazit	466
<b>15</b>	<b>Fügeverfahren</b>	<b>469</b>
	<i>M. Hümbert, M. Sommer, P. Mitschang, R. Velthuis, R. Rudolf</i>	
15.1	Einleitung	469
15.2	Fügen von duroplastischen FKV	470
15.2.1	Nieten von duroplastischen FKV	470
15.2.2	Kleben von duroplastischen FKV	471
15.2.2.1	Vorbereitung der Oberflächen	471
15.2.2.2	Optimale Verarbeitung und Anwendung des Klebstoffs	473
15.2.2.3	Verkleben von Composites	473
15.2.3	Z-Pinning von duroplastischen FKV	475
15.3	Fügen von thermoplastischen FKV	475
15.3.1	Nieten von thermoplastischen FKV	475
15.3.2	Kleben von thermoplastischen FKV	476
15.3.3	Schweißen von thermoplastischen FKV	477
15.3.3.1	Ultraschallschweißen	478
15.3.3.2	Vibrationsschweißen	479
15.3.3.3	Heizelementschweißen	479
15.3.3.4	Hochfrequenzschweißen	480
15.3.3.5	Widerstandsschweißen	480
15.3.3.6	Induktionsschweißen	480
15.3.3.7	Laserschweißen	481
15.3.3.8	Vergleich der Schweißverfahren	482
15.4	Physikalische Grundlagen	485
15.5	Prüfmethoden-Auswahl	487
15.5.1	Geeignete Prüfmethoden für geschweißte Verbindungen	487
15.5.2	Zugscherversuch	487
15.5.3	Spannungsverteilung in der einfach überlappten Verbindung	488
15.5.4	Gestaltungskonzepte für überlappte Verbindungen	490
15.6	Beschreibung ausgewählter Verfahren	491
15.6.1	Vibrationsschweißen	491
15.6.1.1	Einfluss des Fügewegs	493
15.6.1.2	Einfluss des Schweißdrucks	493
15.6.1.3	Einfluss des variablen Schweißdrucks	494
15.6.2	Induktionsschweißen	495
15.6.2.1	Induktor- und Feldgeometrie	496
15.6.2.2	Prozessführung beim kontinuierlichen Schweißprozess	497
15.6.3	Verfahrensvergleich Vibrations-/Induktionsschweißen	499
<b>16</b>	<b>Arbeitssicherheit</b>	<b>505</b>
	<i>M. Päßler</i>	
16.1	Einleitung	505

16.2	Grundlagen	506
16.3	Arbeitsschutzgesetz (ArbSchG)	507
16.4	Arbeitssicherheitsgesetz (ASiG)	508
16.5	Gefahrstoffverordnung (GefStoffV)	508
16.6	Arbeitsstättenverordnung (ArbStättV)	509
16.7	Unfallverhütungsvorschriften	510
16.8	Detailbeschreibung verbundwerkstofftypischer Problemfelder	511
16.8.1	Allgemeine Arbeitsschutzmaßnahmen	511
16.8.2	Spezielle Gefahren beim Umgang mit Reaktionsharzen	512
16.8.3	Styrolemissionen und Möglichkeiten der Reduzierung	514
16.8.4	Sonstige Verfahren	516
16.8.5	Umgang mit textilen Glasfasern	516
16.8.6	Umgang mit textilen Kohlenstofffasern	517
16.8.7	Umgang mit Partikeln	517
16.9	Anlagensicherheit	518
<b>17</b>	<b>Werkzeugbau</b>	<b>521</b>
	<i>H. Franz, M. Päßler, K. Grebel, L. Medina</i>	
17.1	Einleitung	521
17.2	Fließpressverfahren	521
17.2.1	Komponenten zum Werkzeugbau	523
17.2.1.1	Führungs- und Zentrierelemente	523
17.2.1.2	Schieber	523
17.2.1.3	Auswerfer	523
17.2.1.4	Werkzeugeheizung und -kühlung	524
17.2.1.5	Konstruktion und Maßgenauigkeit	525
17.2.2	Werkzeugstähle für den Formenbau	525
17.2.3	Oberflächenstrukturierung	526
17.3	Spritzgießen	526
17.4	Wickeltechnik	527
17.5	Pultrusionsverfahren	527
17.6	Harzinjektionsverfahren	528
17.7	Spezielle Werkzeugkonzepte	531
17.7.1	Prototypen- und Aluminium-Formwerkzeuge	531
17.7.2	Formenbau mit FKV	532
17.7.3	Formen für großflächige Teile	533
17.7.4	Schlauchblas-Werkzeuge	534
17.7.5	Variotherme Werkzeuge	535
	<b>Weiterführende Literatur</b>	<b>539</b>
	<b>Die Autoren</b>	<b>541</b>
	Herausgeber	541
	Mitverfasser	542
	<b>Index</b>	<b>545</b>