

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b> .....	V
<b>1 Einführung</b> .....	1
J. SCHLIMBACH, M. NEITZEL	
1.1 Stand der Technik .....	1
1.2 Technisch-wirtschaftliche Entwicklung .....	3
1.2.1 Einleitung .....	3
1.2.2 Der industrielle Einsatz von Faser-Kunststoff-Verbunden .....	4
1.2.2.1 Luft- und Raumfahrt, Wehrtechnik .....	4
1.2.2.2 Migration in andere Branchen .....	5
1.2.2.3 Entwicklungen des FKV-Marktes .....	9
1.2.3 Technisch-wirtschaftliche Entwicklung der Kohlenstofffasern ...	11
1.2.3.1 Status und Trends .....	11
1.2.3.2 Marktentwicklung .....	11
1.2.3.3 Mengenentwicklung .....	11
1.2.3.4 Einsatzgebiete .....	12
1.2.3.5 Weitere Anwendungen .....	14
1.2.4 Ökonomische Bewertung der FKV-Verarbeitungstechnologien ...	15
1.2.4.1 Grundlagen .....	16
1.2.4.2 Bisherige Ansätze .....	17
1.2.4.3 Erweiterte Ansätze .....	19
1.2.5 Zusammenfassung .....	22
<b>2 Werkstoffe</b> .....	25
J. KARGER-KOCSIS	
2.1 Fasern .....	25
2.1.1 Eigenschaften .....	25
2.1.2 Herstellung und Anwendung der Fasern .....	27
2.1.2.1 Aramidfasern .....	30
2.1.2.2 Polyethylenfasern .....	31
2.1.2.3 Naturfasern .....	31
2.1.2.4 Stahlfasern .....	32
2.2 Matrixsysteme .....	33
2.2.1 Eigenschaften .....	33
2.2.2 Duroplaste .....	34
2.2.2.1 Herstellung und Anwendungen .....	34
2.2.2.2 Polymerisations-Duroplaste .....	38
2.2.2.3 Polyadditions-Duroplaste .....	40
2.2.2.4 Polykondensations-Duroplaste .....	42
2.2.3 Thermoplaste .....	43
2.2.3.1 Herstellung und Anwendungen .....	43

2.2.3.2	Polymerisations-Thermoplaste .....	45
2.2.3.3	Polyadditions-Thermoplaste .....	46
2.2.3.4	Polykondensations-Thermoplaste .....	47
2.2.3.5	Polyethersulfone .....	47
2.2.3.6	Polyamide .....	48
2.2.3.7	Lineare Polyester .....	49
2.2.3.8	Polyarylsulfide .....	51
2.2.3.9	Polyaryletherketone .....	51
2.3	Grenzfläche und Grenzphase .....	52
2.3.1	Allgemeines .....	52
2.3.2	Charakterisierung der Grenzschicht .....	53
2.3.2.1	Duroplaste .....	53
2.3.2.2	Thermoplaste .....	55
<b>3</b>	<b>Textile Halbzeuge</b> .....	<b>57</b>
	A. OGALE, C. WEIMER, P. MITSCHANG	
3.1	Halbzeugformen .....	57
3.1.1	Matten (Non-wovens) .....	58
3.1.1.1	Aerodynamische Vlieslegung .....	58
3.1.1.2	Nadelvliese .....	59
3.1.1.3	Chemisch fixierte Matten (Gebondete Vliese) .....	59
3.1.2	Gewebe .....	60
3.1.2.1	2D-Gewebe .....	60
3.1.2.2	3D-Gewebe .....	62
3.1.2.3	Abstands-Textilien .....	63
3.1.2.4	Spiralgewebe .....	64
3.1.3	Gelege .....	65
3.1.4	Flechten .....	67
	S. WIEDMER, K. FRIEDRICH	
3.1.5	Maschenware .....	70
3.1.5.1	Rundstricken .....	71
3.1.6	Technische Gesticke .....	71
<b>4</b>	<b>Preformverfahren</b> .....	<b>73</b>
	C. WEIMER, P. MITSCHANG	
4.1	Einleitung .....	73
4.2	Grundlagen .....	74
4.3	Direkte Preformherstellung .....	77
4.3.1	Standardverfahren .....	77
4.3.2	Direkte textiltechnische Preformverfahren .....	78
4.4	Sequentielle Preformherstellung .....	81
4.4.1	Binder-Umformtechnik .....	81
4.4.2	Textile Konfektionstechnik .....	82
4.4.2.1	Stichtypen für die Preform-Montage .....	85
<b>5</b>	<b>Imprägnierte Halbzeuge</b> .....	<b>105</b>
	M. SOMMER, M. NEITZEL	
5.1	Einleitung .....	105

5.2	Duroplastprepregs	106
5.2.1	Nicht-fließfähige Duroplastprepregs	106
5.2.2	Fließfähige Duroplastprepregs	108
5.3	Thermoplastische Prepregs und Halbzeuge	114
	M. SOMMER, K. EDELMANN, A. WÖGINGER	
5.3.1	Glasmattenverstärkte Thermoplaste (GMT)	114
5.3.2	Langglasfaserverstärkte Thermoplaste in Granulatform (LFT)	119
5.3.2.1	Direktverfahren zur Herstellung von LFT	122
5.3.2.2	Pressrheometer zur prozessintegrierten Analyse	123
5.3.2.3	Rheometer für faserverstärkte Pressmassen	125
5.3.2.4	Strömungsprofil beim Pressvorgang	127
5.3.2.5	Rheometerkonzept	129
5.3.2.6	Ergebnisse	133
5.3.2.7	Fehlerabschätzung	136
5.3.3	Endlosfaserverstärkte Thermoplaste	136
5.3.3.1	Einleitung	136
5.3.3.2	Prozesskettenbetrachtung zur Halbzeugeherstellung	138
5.3.3.3	Prepregtechnologie	140
5.3.3.4	Halbzeugeherstellung	147
<b>6</b>	<b>Grundlagen der Verarbeitungsprozesse</b>	<b>155</b>
	P. MITSCHANG, H. STADTFELD, T. STÖVEN, F. WEYRAUCH, M. LATRILLE, M. LOUIS, M. NEITZEL, G. BERESHEIM	
6.1	Einordnung der Verarbeitungsprozesse	155
6.2	Allgemeine Grundlagen	158
6.3	Grundlagen der Imprägnierung	162
6.3.1	Physikalische Grundlagen der Imprägnierung und Konsolidierung	162
6.3.2	Energietransfer	165
6.3.2.1	Konduktion	165
6.3.2.2	Konvektion	166
6.3.2.3	Strahlung	167
6.3.2.4	Modellierung des Wärmetransfers	168
6.3.3	Einfluss der Rheologie auf die Verarbeitung	170
6.3.3.1	Duroplaste	173
6.3.3.2	Thermoplaste	177
6.3.4	Grundlagen der Fließprozesse	178
6.3.4.1	Eindimensionales Fließen (1D)	179
6.3.4.2	Zweidimensionales Fließen (2D)	180
6.3.4.3	Dreidimensionales Fließen (3D)	182
6.3.5	Permeabilitätsmessung	183
6.3.5.1	Eindimensionale Permeabilitätsmessung (1D)	183
6.3.5.2	Zweidimensionale Permeabilitätsmessung (2D)	184
6.3.5.3	Dreidimensionale Permeabilitätsmessverfahren (3D)	188
6.4	Prozessketten	189
6.5	Qualitätsmanagement	191
6.5.1	Qualitätskontrolle	192
6.5.2	Sensorik zur Prozessüberwachung	192

6.6	Grundlagen der Simulation .....	195
6.6.1	Simulation der Fließpressverfahren .....	195
6.6.2	Simulation des Thermoformens von Organoblechen .....	197
6.6.3	Simulation der Harzinjektionsverfahren .....	199
6.6.4	Weitere Simulationsprogramme .....	202
6.7	Verarbeitungstechnik und Bauweisen .....	212
6.7.1	Einleitung .....	212
6.7.2	Bauweisen .....	212
6.7.2.1	Differentialbauweise .....	213
6.7.2.2	Integralbauweise .....	213
6.7.2.3	Integrierende Bauweisen .....	214
6.7.2.4	Verbundbauweisen – Multi-Material-Design .....	215
6.7.3	Wechselwirkung Fertigungsprozess – Bauweise .....	216
<b>7</b>	<b>Autoklaventechnik</b> .....	<b>229</b>
	U. SCHMITT, T. WEICK	
7.1	Einleitung .....	229
7.1.1	Anlagentechnik .....	229
7.1.2	Herstellung von Faser-Kunststoff-Verbund-Bauteilen .....	230
7.1.2.1	Abgrenzung gegenüber anderen Verfahren .....	230
7.1.2.2	Wirkprinzip .....	231
7.1.2.3	Laminataufbauten .....	231
7.1.2.4	Prozessparameter .....	232
7.1.3	Zykluskosten, Prozessparameter und Verbrauchsmaterialien .....	233
7.1.4	Weitere Entwicklung .....	234
<b>8</b>	<b>Pultrusionsverfahren</b> .....	<b>235</b>
	S. WIEDMER, K. FRIEDRICH	
8.1	Einleitung .....	235
8.2	Grundlagen .....	236
8.3	Duroplast-Pultrusion .....	237
8.4	Thermoplast-Pultrusion .....	238
8.5	Verfahrenskombination .....	240
<b>9</b>	<b>Wickel- und Legetechnik</b> .....	<b>243</b>
9.1	Wickeltechnik .....	243
	M. SCHLOTTERMÜLLER, M. NEITZEL, R. SCHLEDJEWSKI, G. BERESHEIM	
9.1.1	Einleitung .....	243
9.1.2	Verfahrensgrundlagen .....	243
9.1.3	Anlagentechnische Umsetzung .....	246
9.1.3.1	Duroplastwickeln .....	248
9.1.3.2	Thermoplastwickeln .....	251
9.1.4	Weitere Entwicklung .....	257
9.2	Tapelegetechnik .....	258
9.2.1	Einleitung .....	258
9.2.2	Duroplast-Tapelegen .....	259
9.2.2.1	Duroplast-Kontur-Tapelen .....	262
9.2.2.2	Duroplast-Multi-Tapelegen .....	264

9.2.3	Thermoplast-Tapelegen . . . . .	266
9.2.4	Abgrenzung der Tapelegeverfahren . . . . .	267
<b>10</b>	<b>Harzinjektionsverfahren</b> . . . . .	<b>271</b>
	F. WEYRAUCH, H. STADTFELD, C. KISSINGER	
10.1	Einleitung . . . . .	271
10.2	Anwendungsfelder . . . . .	271
10.3	Harzinjektions-Verfahrensvarianten . . . . .	277
10.3.1	Vakuuminjektionsverfahren (VI) . . . . .	277
10.3.2	Vacuum Assisted Resin Transfer Molding (VARTM) . . . . .	280
10.3.3	Weitere Verfahrensvarianten . . . . .	281
10.3.3.1	Flächeninjektionsverfahren . . . . .	282
10.3.3.2	Advanced RTM (ARTM) . . . . .	284
10.3.3.3	Thermal Expansion RTM (TERM) . . . . .	285
10.3.3.4	Differential Pressure RTM (DPRTM) . . . . .	285
10.3.3.5	Schlauchblas-RTM . . . . .	285
10.3.3.6	Structural Reaction Injection Molding (SRIM) . . . . .	286
10.4	Zusammenfassender Überblick . . . . .	287
<b>11</b>	<b>Pressverfahren</b> . . . . .	<b>293</b>
	M. SOMMER, K. EDELMANN, R. LAHR	
11.1	Einleitung . . . . .	293
11.2	Fließpressverfahren . . . . .	294
11.2.1	Fließpressen von LFT und GMT . . . . .	294
11.2.2	Fließpressen von Sheet Molding Compound (SMC) . . . . .	296
11.2.3	Vergleich der Matrixsysteme im Fließpressprozess . . . . .	299
11.3	Thermoformen von Organoblechen . . . . .	301
11.3.1	Einleitung . . . . .	301
11.3.2	Umformprinzipien . . . . .	301
11.3.3	Umformverfahren allgemein . . . . .	303
11.3.3.1	Diaphragmaformen . . . . .	305
11.3.3.2	Umformen mit Metallstempel . . . . .	306
11.3.3.3	Umformen mit Elastomerblock . . . . .	306
11.3.3.4	Umformen mit Silikonstempel . . . . .	307
11.3.3.5	Quicktemp-Konzept . . . . .	308
11.3.3.6	Direktimpregnieren . . . . .	309
11.3.3.7	Direktformen . . . . .	311
11.3.3.8	Druckunterstütztes Thermoformen . . . . .	312
11.3.3.9	Zusammenfassende Darstellung der Thermoformverfahren . . . . .	313
11.3.4	Dickenadaptives Umformen . . . . .	314
11.3.4.1	Sandwich-Umformen . . . . .	315
11.3.4.2	Wege zu Sandwichbauteilen aus Organoblechen . . . . .	315
11.3.4.3	Sandwich-Umformen in mehreren Schritten . . . . .	316
11.3.4.4	Sandwich-Umformen in einem Schritt . . . . .	316
11.3.4.5	Tailored-Blank-Technologie . . . . .	318
11.4	Rollformen von Faser-Kunststoff-Verbunden . . . . .	321
	F. HENNINGER, K. FRIEDRICH	
11.4.1	Einleitung . . . . .	321

11.4.1.1	Grundlagen des Rollformens .....	321
11.4.1.2	Rollformen von thermoplastischen Faser-Kunststoff-Verbunden .....	323
11.4.1.3	Rollformen von duroplastischen Faser-Kunststoff-Verbunden .....	324
11.4.1.4	Weitere Entwicklung und Potentiale .....	324
<b>12</b>	<b>Schleuderverfahren</b> .....	<b>329</b>
	U. KREITEL	
12.1	Einleitung .....	329
12.2	Grundlagen des Schleuderverfahrens .....	329
12.3	Anlagentechnik .....	330
12.4	Verfahrenstechnik .....	331
12.5	Verfahrensbedingte Produktmerkmale .....	332
<b>13</b>	<b>Bearbeitung, Oberflächenbehandlung</b> .....	<b>335</b>
	R. SCHLEDJEWSKI	
13.1	Einleitung .....	335
13.2	Bearbeitung von FKV .....	335
13.2.1	Grundlagen .....	335
13.2.2	Bohren .....	337
13.2.3	Sägen .....	338
13.2.4	Fräsen .....	339
13.2.5	Wasserstrahlschneiden .....	340
13.2.6	Laserstrahlschneiden .....	342
13.3	Oberflächenbehandlung .....	343
13.3.1	Lackierung .....	343
13.3.2	Folienbeschichtung .....	344
<b>14</b>	<b>Oberflächenqualität</b> .....	<b>347</b>
	M. BLINZLER	
14.1	Einleitung .....	347
14.2	Messgrößen .....	348
14.2.1	Rauigkeit .....	349
14.2.2	Topografie .....	350
14.2.3	Welligkeit .....	352
14.3	Fazit .....	353
<b>15</b>	<b>Materialkreisläufe</b> .....	<b>355</b>
	J. BREITEL	
15.1	Einleitung .....	355
15.2	Gesetzliche Grundlagen .....	356
15.2.1	Begriffe .....	356
15.2.2	EU-Richtlinie über Abfälle (Richtlinie 75/442/EWG) .....	357
15.2.3	Abfallgesetz (AbfG) .....	357
15.2.4	Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) .....	358
15.2.5	Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (KrW-/AbfG) .....	358
15.2.6	Das untergesetzliche Regelwerk des KrW-/AbfG .....	358

15.3	Abfallsituation in Deutschland .....	358
15.3.1	Entsorgungssituation in Deutschland .....	358
15.3.2	Werkstoffkreislauf von Kunststoffen .....	359
15.3.3	Werkstoffkreislauf nachwachsender Rohstoffe .....	360
15.4	Vermeidung von Abfällen .....	360
15.5	Grundlagen der Verwertung .....	362
15.6	Werkstoffliche Verwertung von faserverstärkten Kunststoffen .....	363
15.6.1	Verwertungsverfahren für thermoplastische FKV .....	364
15.6.1.1	Umpressverfahren .....	364
15.6.1.2	Bondpressverfahren .....	365
15.6.1.3	Plastifizierpressverfahren .....	366
15.6.1.4	Halbzeugverfahren .....	367
15.6.1.5	Extrusionsverfahren .....	368
15.6.1.6	Sandwichverfahren .....	368
15.6.1.7	Spritzgießverfahren .....	369
15.6.2	Verwertung duroplastischer Faser-Kunststoff-Verbunde .....	369
15.6.2.1	Verwertungsverfahren für BMC und SMC .....	369
15.6.2.2	Verwertung biopolymerer Faser-Kunststoff-Verbunde ..	370
15.7	Rohstoffliche Verwertung von faserverstärkten Kunststoffen .....	371
15.7.1	Anforderungen an Abfälle zur rohstofflichen Verwertung .....	371
15.7.1.1	Degradation im Extruder .....	371
15.7.1.2	Pyrolyse, Hydrierung und partielle Oxidation .....	372
15.7.1.3	Solvolytische Verfahren .....	372
15.7.1.4	Reduktion im Hochofenprozess .....	373
15.8	Thermische Behandlung von Abfällen .....	373
<b>16</b>	<b>Fügeverfahren für FKV .....</b>	<b>377</b>
	P. MITSCHANG, R. VELTHUIS, R. RUDOLF .....	377
16.1	Einleitung .....	377
16.2	Fügen von duroplastischen Faser-Kunststoff-Verbunden .....	378
16.2.1	Nieten von duroplastischen Faser-Kunststoff-Verbunden .....	378
16.2.2	Kleben von duroplastischen Faser-Kunststoff-Verbunden .....	379
16.2.3	Z-Pinning von duroplastischen Faser-Kunststoff-Verbunden .....	379
16.3	Fügen von thermoplastischen Faser-Kunststoff-Verbunden .....	380
16.3.1	Nieten von thermoplastischen Faser-Kunststoff-Verbunden .....	380
16.3.2	Kleben von thermoplastischen Faser-Kunststoff-Verbunden .....	380
16.3.3	Schweißen von thermoplastischen Faser-Kunststoff-Verbunden ..	381
16.3.3.1	Ultraschallschweißen .....	382
16.3.3.2	Vibrationsschweißen .....	383
16.3.3.3	Heizelementschweißen .....	383
16.3.3.4	Hochfrequenzschweißen .....	383
16.3.3.5	Induktionsschweißen .....	384
16.3.3.6	Laserschweißen .....	384
16.3.3.7	Vergleich der Schweißverfahren .....	384
16.4	Physikalische Grundlagen .....	387
16.5	Prüfmethoden-Auswahl .....	389
16.5.1	Geeignete Prüfmethoden für geschweißte Hybrid-Verbindungen ..	389
16.5.2	Zugscherversuch .....	389

16.5.3	Spannungsverteilung in der einfach überlappten Verbindung . . . .	390
16.5.4	Gestaltungskonzepte für überlappte Verbindungen . . . . .	392
16.6	Beschreibung ausgewählter Verfahren . . . . .	393
16.6.1	Vibrationsschweißen . . . . .	393
16.6.1.1	Einfluss des Fügwegs . . . . .	394
16.6.1.2	Einfluss des Schweißdrucks . . . . .	395
16.6.1.3	Einfluss des variablen Schweißdrucks . . . . .	396
16.6.2	Induktionsschweißen . . . . .	396
16.6.2.1	Induktor- und Feldgeometrie . . . . .	397
16.6.2.2	Prozessführung beim kontinuierlichen Schweißprozess . . . . .	398
16.6.3	Verfahrensvergleich Vibrations-/Induktionsschweißen . . . . .	400
<b>17</b>	<b>Arbeitssicherheit</b> . . . . .	<b>405</b>
	M. PÄSSLER	
17.1	Einleitung . . . . .	405
17.2	Grundlagen . . . . .	405
17.3	Arbeitsschutzgesetz (ArbSchG) . . . . .	406
17.4	Arbeitssicherheitsgesetz (ASiG) . . . . .	407
17.5	Unfallverhütungsvorschriften . . . . .	407
17.6	Arbeitsstättenverordnung (ArbStättV) . . . . .	408
17.7	Gefahrstoffverordnung (GefStoffV) . . . . .	409
17.8	Detailbeschreibung verbundwerkstofftypischer Problemfelder . . . . .	409
17.8.1	Allgemeine Arbeitsschutzmaßnahmen . . . . .	409
17.8.2	Spezielle Gefahren beim Umgang mit Reaktionsharzen . . . . .	410
17.8.3	Styrolemissionen und Möglichkeiten der Reduzierung . . . . .	411
17.8.4	Sonstige Verfahren . . . . .	412
17.8.5	Umgang mit textilen Glasfasern . . . . .	413
17.8.6	Umgang mit textilen Kohlenstofffasern . . . . .	413
17.9	Anlagensicherheit . . . . .	414
<b>18</b>	<b>Werkzeugbau</b> . . . . .	<b>417</b>
	H. FRANZ, M. PÄSSLER	
18.1	Einleitung . . . . .	417
18.2	Fließpressverfahren . . . . .	417
18.2.1	Komponenten zum Werkzeugbau . . . . .	418
18.2.1.1	Führungs- und Zentrierelemente . . . . .	418
18.2.1.2	Schieber . . . . .	419
18.2.1.3	Auswerfer . . . . .	419
18.2.1.4	Werkzeugheizung und -kühlung . . . . .	419
18.2.1.5	Konstruktion und Maßgenauigkeit . . . . .	420
18.2.2	Werkzeugstähle für den Formenbau . . . . .	421
18.2.3	Oberflächenstrukturierung . . . . .	421
18.3	Spritzgießen . . . . .	422
18.4	Wickeltechnik und Schleuderverfahren . . . . .	422
18.5	Pultrusionsverfahren . . . . .	422
18.6	Harzinjektionsverfahren . . . . .	423
18.7	Spezielle Werkzeugkonzepte . . . . .	426
18.7.1	Prototypen- und Aluminium-Formwerkzeuge . . . . .	426



18.7.2 Formenbau mit Faser-Kunststoff-Verbunden .....	427
18.7.3 Formen für großflächige Teile .....	427
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>429</b>
<b>Register</b> .....	<b>433</b>