

# 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 Halbzeugherstellung ...	138
5.3.3.3	Prepregtechnologie .....	140
5.3.3.4	Halbzeugherstellung .....	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	Direktimprägnieren .....	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	
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 Fügewegs . . . . .	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> .....	429
<b>Register</b> .....	433