

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	V
1 Einführung	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
2 Werkstoffe	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
3	Textile Halbzeuge	57
	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
4	Preformverfahren	73
	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
5	Imprägnierte Halbzeuge	105
	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
6	Grundlagen der Verarbeitungsprozesse	155
	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
7	Autoklaventechnik	229
	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
8	Pultrusionsverfahren	235
	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
9	Wickel- und Legetechnik	243
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
10	Harzinjektionsverfahren	271
	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
11	Pressverfahren	293
	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
12	Schleuderverfahren	329
	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
13	Bearbeitung, Oberflächenbehandlung	335
	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
14	Oberflächenqualität	347
	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
15	Materialkreisläufe	355
	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
16	Fügeverfahren für FKV	377
	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
17	Arbeitssicherheit	405
	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
18	Werkzeugbau	417
	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
Abkürzungsverzeichnis	429
Register	433