

Handbuch Verbundwerkstoffe

Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung

Bearbeitet von
Manfred Neitzel, Peter Mitschang, Ulf Breuer

2., aktualisierte und erweiterte Auflage 2014. Buch. 576 S. Hardcover

ISBN 978 3 446 43696 1

Format (B x L): 17,9 x 24,5 cm

Gewicht: 1173 g

[Weitere Fachgebiete > Technik > Werkstoffkunde, Mechanische Technologie > Materialwissenschaft: Verbundwerkstoffe](#)

Zu [Inhaltsverzeichnis](#)

schnell und portofrei erhältlich bei

The logo for beck-shop.de features the text 'beck-shop.de' in a bold, red, sans-serif font. Above the 'i' in 'shop' are three red dots of increasing size. Below the main text, the words 'DIE FACHBUCHHANDLUNG' are written in a smaller, red, all-caps, sans-serif font.

beck-shop.de
DIE FACHBUCHHANDLUNG

Die Online-Fachbuchhandlung beck-shop.de ist spezialisiert auf Fachbücher, insbesondere Recht, Steuern und Wirtschaft. Im Sortiment finden Sie alle Medien (Bücher, Zeitschriften, CDs, eBooks, etc.) aller Verlage. Ergänzt wird das Programm durch Services wie Neuerscheinungsdienst oder Zusammenstellungen von Büchern zu Sonderpreisen. Der Shop führt mehr als 8 Millionen Produkte.



Leseprobe

Handbuch Verbundwerkstoffe

Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung

Herausgegeben von Manfred Neitzel, Peter Mitschang, Ulf Breuer

ISBN (Buch): 978-3-446-43696-1

ISBN (E-Book): 978-3-446-43697-8

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-43696-1>

sowie im Buchhandel.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	VII
Abkürzungsverzeichnis	IX
1 Einführung	1
<i>U. Breuer, P. Mitschang</i>	
1.1 Stand der Technik	1
1.2 Technisch-wirtschaftliche Entwicklung	3
<i>U. Breuer, J. Schlimbach, 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
2 Werkstoffe	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
3	Textile Halbzeuge	73
	<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 Gestricke	90
3.1.7	Biaxialgewirke	92
4	Preformverfahren	95
	<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	Nähtechnik	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
5	Imprägnierte Halbzeuge	135
	<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	Glasmatteverstärkte 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>	
6	Grundlagen der Verarbeitungsprozesse	201
	<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 Harzinjektionsverfahren	252
6.6.4	Weitere Simulationsprogramme	257
7	Bauweisen und Smart Structures	277
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
8	Autoklaventechnik	307
	<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
9	Pultrusionsverfahren	317
	<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
10	Wickel- und Legetechnik	325
	<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

11 Harzinjektionsverfahren	357
<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
12 Pressverfahren	383
<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. Holschuh</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
13	Bearbeitung, Oberflächenbehandlung	433
	<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
14	Materialkreisläufe	455
	<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
15	Fügeverfahren	469
	<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 Fügwegs	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
16	Arbeitssicherheit	505
	<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 Styrolemmissionen 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
17 Werkzeugbau	521
<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 Werkzeugheizung 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
Weiterführende Literatur	539
Die Autoren	541
Herausgeber	541
Mitverfasser	542
Index	545

Vorwort

Verbundwerkstoffe und insbesondere die faserverstärkten Polymere haben sich in den letzten 60 Jahren zu einer eigenständigen Werkstoffgruppe entwickelt und die Nische eines exklusiven Hochleistungswerkstoffs verlassen. Neue Anwendungen wie beispielsweise der BMW i3 oder der A350 von Airbus sind imageprägend und zeigen eine eindeutige Richtung hin zu konsequenten Leichtbautechnologien in größeren Stückzahlen. Ein wichtiger Erfolgsfaktor für die Verbundwerkstoffe ist auch das politische Umfeld und die sich wandelnde Einstellung der Gesellschaft zum Umgang mit den natürlichen Ressourcen und dem Umweltschutz. Hier leisten Verbundwerkstoffe aufgrund ihres hervorragenden Leichtbaupotentials per se einen Beitrag zu Nachhaltigkeit und Ressourcenschonung.

Obwohl sich die zur Entwicklung und Herstellung von Faser-Kunststoff-Verbunden eingesetzten Polymere, Fasern, Berechnungsmethoden und Prozesstechniken in den letzten 10 Jahren im Grundsatz nicht wesentlich verändert haben, sind dennoch einige wichtige Neuentwicklungen zu verzeichnen, die eine Überarbeitung und Aktualisierung dieses Buches erforderlich machten.

Durch das gesteigerte Interesse der Automobilindustrie hat auch die Großchemie die Verbundwerkstoffe als neuen Wachstumsmarkt wiederentdeckt, was zu entsprechenden Werkstoffoptimierungen und einer gewissen Verbreiterung des Angebots an Polymervarianten geführt hat. Die vielleicht wichtigsten Entwicklungen haben allerdings im Bereich der Verarbeitungsprozesse stattgefunden. Neben einer nach wie vor vorhandenen Tendenz, neue und hochspezialisierte Verfahren zu entwickeln, treten Aspekte wie vollständige Automatisierung, Qualitätssicherung und Großserie immer stärker in den Vordergrund. Die Hersteller haben eine breite Palette an Verfahrensoptionen zur Auswahl. Diese reichen von Handlegeverfahren über teilautomatisierte Prozesse bis hin zu vollautomatisierten Anlagen im Sinne einer Direktverarbeitung von Polymer und Faser zum komplexen Bauteil.

Dem Leitgedanken der Ressourceneffizienz folgend entwickeln sich Trends sowohl bei den Ausgangsmaterialien durch den Einsatz von biobasierten Polymeren und Naturfasern, aber auch durch eine ganzheitliche Auslegung und Prozessentwicklung. Neue Forschungsergebnisse zur Strukturoptimierung oder zum Langzeitverhalten sowie der verstärkte Einsatz der Prozesssimulation führen zu effizienteren Prozessen und Produkten. Besondere Anforderungen ergeben sich speziell in den

Themenfeldern der Prozess- und Bauteilüberwachung, der Reparatur von Verbundwerkstoffen, der Hybridisierung, den Multimaterialkonzepten, den hybriden Prozessansätzen und durch die ganzheitliche Integration von Produkt- und Prozessentwicklung.

Neben den offensichtlichen Potenzialen und Zukunftsthemen sind aber auch ganz aktuell gewisse Einsatzhemmnisse zu überwinden. An erster Stelle sind hier die Herstellkosten von Verbundwerkstoffen zu nennen. Im Kostenfokus stehen allerdings auch die Ausgangsmaterialien und hier besonders die noch immer vergleichsweise teuren Kohlenstofffasern und Hochleistungspolymere. Um die prognostizierten zweistelligen Wachstumsraten realisieren zu können, sind weiterhin große Anstrengungen entlang der gesamten Prozesskette notwendig.

Die Zielsetzung und Ausrichtung des Handbuches sowohl als Lehrbuch aber auch als Nachschlagewerk für den Praktiker wurde nicht verändert. So stehen die etablierten Verarbeitungsprozesse, deren werkstoffliche und prozesstechnischen Grundlagen, die Verfahrensbeschreibung und ein starker Praxisbezug nach wie vor im Fokus. Neue Prozessentwicklungen werden insbesondere dann berücksichtigt, wenn diese ein hohes Umsetzungspotential aufweisen und eine industrielle Einführung absehbar ist. Das Handbuch will auch an den Schnittstellen der Verarbeitungstechnik zu den eingesetzten Materialien und Bauweisen einen Beitrag leisten und hier die erforderlichen Brücken schlagen und somit eine ganzheitliche Sichtweise auf die Faser-Kunststoff-Verbunde ermöglichen.

Wie auch bei der Erstausgabe ist bei der nun vorliegenden Überarbeitung sowohl die langjährige Erfahrung der genannten Mitautoren eingeflossen als auch die Ergebnisse vieler junger Wissenschaftler und Ingenieure der Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, die im Rahmen von Dissertationen und sonstigen Forschungsarbeiten entstanden sind. Ein besonderer Dank gilt den Industriepartnern für die Zusammenarbeit und Bereitstellung von Bildmaterial, sowie Frau Andrea Hauck, die mit großem Engagement das Zusammenführen der Einzelbeiträge organisiert und unterstützt hat.

Manfred Neitzel, Peter Mitschang, Ulf Breuer

2

Werkstoffe

J. Karger-Kocsis

Faserverbundwerkstoffe bieten synergetisch eine Kombination der positiven Eigenschaften von mindestens zwei Materialien, nämlich Fasern und Matrix. Dabei können unterschiedliche Fasern mit verschiedenen Matrices kombiniert werden. Die Fasern mit hoher Steifigkeit und Festigkeit übertragen die Lasten und bilden die Verstärkungskomponente. Die Funktion der Matrix ist der Schutz der Fasern gegen äußere Einflüsse und sie fixiert die Fasern in ihrer Position. Die Grenzfläche zwischen der Matrix und den Fasern bewirkt, dass die Last von der Matrix in die tragenden Fasern eingeleitet wird. Diese „Interphase“ hat daher besondere Bedeutung für die mechanischen Eigenschaften und das Langzeitverhalten des Verbundwerkstoffs.

In der folgenden Übersicht sollen die häufigsten in Faserverbundwerkstoffen eingesetzten Verstärkungsfasern sowie die duroplastischen und thermoplastischen Matrixpolymere mit ihren charakteristischen Eigenschaften beispielhaft dargestellt werden. Dabei stehen neben den werkstofflichen Basiskennwerten und der Grenzflächenproblematik vor allem die für die Verarbeitungsverfahren wichtigen rheologischen, thermodynamischen und reaktionskinetischen Prozessparameter im Vordergrund. Ein kurzer Ausblick auf die technischen und ökonomischen Entwicklungstendenzen soll das Kapitel abrunden.

■ 2.1 Fasern

2.1.1 Eigenschaften

Verstärkungsfasern können nach verschiedenen Kriterien eingruppiert werden, wie z. B. nach Aufbau (anorganisch-organisch), nach Herstellung/Gewinnung (künstlich-natürlich) oder nach Eigenschaften (hochfest-hochsteif). Allerdings kann keine der obigen einfachen Zuordnungen der Vielfalt der verfügbaren Verstärkungsfasern gerecht werden. Daher sind die in Verbundwerkstoffen am häufigsten verwendeten Fasern mit ihren Eigenschaften in Tabelle 2.1 zusammengefasst. Die jeweiligen Kennwerte stammen aus unterschiedlichen Quellen. Trotz ihrer sorgfältigen Aus-

wahl sind sie daher als Richtwerte zu betrachten. Die jeweiligen Zug- und Druckkennwerte der meisten Fasern mit anorganischem Aufbau sind miteinander vergleichbar. Dies trifft allerdings nicht auf die polymeren Fasern (z.B. Aramid, Polyethylenterephthalat, Polyethylen) bzw. auf die aus polymeren Precursoren hergestellten Varianten (Kohlenstofffaser) zu, welche – im Gegensatz zu den anorganischen Fasern – über kein dreidimensionales Netzwerk verfügen. Dies ist auf fehlende starke intermolekulare Kräfte bzw. auf das nicht Vorhandensein eines dreidimensionalen Netzwerkes zurückzuführen. Es ist auch bekannt, dass dünne Fasern deutlich höhere Festigkeitswerte aufweisen als dickere aus dem gleichen Material. Dies ist ein Anzeichen dafür, dass die Wahrscheinlichkeit von Fehlstellen in einem Material mit der Dimensionsreduzierung deutlich abnimmt. Entsprechend ändert sich die Faserfestigkeit in Abhängigkeit der Einklemmlänge, welche üblicherweise mit der Weibull-Statistik beschrieben wird.

Die Daten in Tabelle 2.1 belegen, dass die hohe Steifigkeit und Festigkeit gewöhnlich eine niedrigere Dehnung (Duktilität) mit sich bringt (und umgekehrt). Diese Tatsache ist die Erklärung dafür, warum die gleichzeitige Anwendung von verschiedenen Fasern bzw. Faserkombinationen (Hybridverstärkung) schon früh vorangetrieben wurde. Die Dehnbarkeit der Fasern bestimmt auch ihren tolerierbaren Krümmungsradius, welcher bei der Verarbeitung von großer Bedeutung ist.

Tabelle 2.1 Höchste Kennwerte der häufigsten Verstärkungsfasern

Faser		Zug			Druck	Dichte g/cm ³	T _{max} °C
		Modul GPa	Festigkeit GPa	Dehnung %	Festigkeit GPa		
Stahl		200	2,8	4,8	–	7,8	1000
Glas	S-Typ	90	4,5	5,7	1,1	2,46	250–300
	E-Typ	80	3,5	4,0	–	2,54	300–350
Bor		440	3,5	1,0	5,9	2,6	1800
SiC		400	4,8	0,9	3,1	2,8	1300
Kohlenstoff	Pan-HT	240	3,75	1,6	2,9	1,78	500
	– HM	400	2,45	0,7	1,6	1,85	600
	– UHM	540	1,85	0,4	1,1	2,0	600
	Pech-HM	800	3,5	0,4	0,7	2,15	600
	– isotrop	50	1,0	2,3	0,7	1,55	400
Aramid	Kevlar 49	135	3,5	2,8	0,48	1,45	250–300
	Kevlar 149	185	3,4	2,0	0,46	1,47	250–300
UHMW-PE		172	3,3	4,0	0,17	0,97	100
Textil PET		16	1,2	15	0,09	1,39	150
Naturfaser	Hanf	70	0,60	1,6	–	1,45	200
	Flachs	30	0,75	2,0	–	1,48	200
	Jute	55	0,55	2,0	–	1,3–1,5	200
	Sisal	20	0,60	2,0	–	1,45	200

2.2 Matrixsysteme

2.2.1 Eigenschaften

Als Matrices in Verbundwerkstoffen dominieren Duroplaste noch deutlich. Allerdings zeigen die Thermoplaste höhere Zuwachsraten. Beide haben Vor- und Nachteile hinsichtlich der Verarbeitung, Eigenschaften und Anwendungen. Zwar gab es auch Ansätze, um synergetische Effekte durch Anwendung von Matrix-Kombinationen zu erzielen, z.B. thermoplastisch verarbeitbare Duroplaste oder phasensegre-gierende Duroplast/Thermoplast-Mischungen, jedoch haben sich solche Systeme bis heute nicht durchsetzen können.

Tabelle 2.2 Typische Eigenschaften duroplastischer Matrixwerkstoffe

Duroplast	Zug			Biegung		Dichte g/cm³	HDT-A (1,82 MPa) °C
	Modul GPa	Festigkeit MPa	Dehnung%	Modul GPa	Festigkeit MPa		
Ungesättigte Polyesterharze (UP)	2,8 – 3,5	40 – 75	1,3 – 3,3	3,4 – 3,8	80 – 130	1,25 – 1,30	80 – 140
Vinylesterharze (VE)	2,9 – 3,1	~80	3,5 – 5,5	3,0 – 3,7	120 – 140	~ 1,1	100 – 150
Epoxidharze (EP)	2,8 – 3,4	45 – 85	1,3 – 5,0	2,6 – 3,6	100 – 130	> 1,16	50 – 175

Im Folgenden werden die wichtigsten Duro- und Thermoplaste, welche als Matrices in Verbundwerkstoffen zum Einsatz kommen, mit ihren Eigenschaften, der Herstellung und den Anwendungen gegenübergestellt. Charakteristische, vergleichende Daten sind aus Tabelle 2.2 und Tabelle 2.3 zu entnehmen.

Tabelle 2.3 Typische Eigenschaften thermoplastischer Matrixwerkstoffe

Thermoplast	Zug			Biegung		Dichte g/cm³	HDT-A (1,82 MPa) °C
	Modul GPa	Festigkeit MPa	Dehnung%	Modul GPa	Festigkeit MPa		
Polypropylen (PP) – isotaktisches Homopolymer	1,3 – 1,8	30 – 40	> 50	1,1 – 1,6	~ 30	0,90 – 0,91	55 – 70
Polyamid 66 – trocken	3,0 – 3,5	75 – 100	> 20	~ 2,8	~ 110	1,13 – 1,20	75 – 100

Thermoplast	Zug			Biegung		Dichte g/cm ³	HDT-A (1,82 MPa) °C
	Modul GPa	Festigkeit MPa	Dehnung%	Modul GPa	Festigkeit MPa		
Polyethylen- terephthalat (PET) – teil- kristallin	2,8 – 3,5	55 – 80	> 20	~ 2,3	~ 90	1,38 – 1,40	65 – 75
Poly- phenylen- sulfid(PPS)	3,3 – 3,5	70 – 110	1,5	3,5 – 3,8	100 – 140	1,30 – 1,35	135
Polyether- etherketon (PEEK)	3,5 – 3,8	90 – 105	> 50	~ 3,6	~ 150	1,32	140 – 155

2.2.2 Duroplaste

2.2.2.1 Herstellung und Anwendung

Duroplaste entstehen durch eine irreversible chemische Reaktion von Reaktionsharzen, die meist als Vernetzung oder Härtung bezeichnet wird. Sie werden auch Präpolymere oder Oligomere genannt, da sie grundsätzlich als Monomere und Oligomere in flüssiger oder fester Form vorliegen. Die Glasumwandlungstemperatur T_g der festen Präpolymere liegt gewöhnlich oberhalb der Raumtemperatur, um ein Verkleben während der Lagerung zu vermeiden. Die Vernetzungsreaktion führt zu einem engmaschigen Netzwerk. Engmaschig bedeutet hierbei, dass die durchschnittliche Länge der Molekülsegmente zwischen den Vernetzungspunkten sehr gering ist, in deutlichem Unterschied zum Gummi, welches über eine weitmaschige Netzwerkstruktur verfügt. Dieses Netzwerk verleiht der Duroplast-Matrix unter anderem eine hohe Glasübergangstemperatur und entsprechend hohe Wärmeformbeständigkeit, gute Beständigkeit gegen Chemikalien und geringe Kriechneigung. Die chemische Vernetzungsreaktion ist irreversibel und bedeutet für die Duroplaste unter Umweltgesichtspunkten ein schwierigeres Recycling.

Die wichtigsten Duroplaste sind die ungesättigten Polyester- und Vinylesterharze (UP bzw. VE), Epoxidharze (EP) sowie die Phenolharze. Zwar unterscheiden sich die Harze hinsichtlich ihrer Vernetzung und entsprechend auch in den Eigenschaften, jedoch gibt es auch gemeinsame Merkmale. So kommt es während der Vernetzung zu einer Überlagerung zwischen Gel- und Glaszustand. Die Glasübergangs- oder Einfriertemperatur (T_g) ist erreicht, wenn die Bewegungsmöglichkeit der Moleküle, bzw. ihrer Kettensegmente endet. Das Bild 2.6 verdeutlicht das Geschehen am Beispiel eines EP-Harzes (Funktionalität: 2) mit einer primären Diaminverbindung (Funktionalität: 4). Mit zunehmender mittlerer Molekülmasse während der Vernetzungsreaktion, hier als Polyaddition, erhöht sich die Viskosität und das Harz geht

Die im Folgenden beschriebenen Preformverfahren können infolge der sich stetig weiterentwickelnden Techniken nur einen Überblick darstellen. Im Mittelpunkt der Betrachtung stehen die grundsätzlichen Möglichkeiten, Restriktionen und Grenzen der einzelnen Verfahren.

■ 4.2 Grundlagen

Aufgrund des zunehmenden Einsatzes und der steigenden Bedeutung neuer textil-technischer Verfahren zur Erzeugung komplexer Faserstrukturen für die anschließenden Verarbeitungsverfahren erscheint es sinnvoll, einige grundlegende Begriffe zu erläutern:

3D-Struktur: „Volumenbildende Anordnung von wenigstens drei oder mehr Fadensystemen oder Fadenvorzugsrichtungen, in die kein rechtwinkliges Koordinatensystem so gelegt werden kann, dass eine der drei Achsen senkrecht zu allen Fadensystemen oder senkrecht zu allen Vorzugsrichtungen des textilen Körpers steht [8].“

3D-Geometrie: „Volumenbildende Ausdehnung des textilen Körpers ohne die vorherige Einwirkung umformender Maßnahmen, so dass ein Volumen durch die Textilstruktur (selbst) gebildet oder von ihr umschlossen wird, unabhängig von der Anzahl der Fadensysteme und der durch sie gebildeten Struktur [8].“

Preform: „Preform oder Vorform ist ein der Bauteilgeometrie entsprechendes Verstärkungsgebilde vor der Imprägnierung/Konsolidierung. Eine Preform kann sowohl eine *3D-Struktur* als auch eine *3D-Geometrie* darstellen. Eine Preform besteht mindestens aus einem, meist mehreren Einzelteilen, den *Sub-Preforms*. Im Idealfall besteht eine Preform aus einem Teil, welches ausschließlich durch Einzelfasern gebildet wird.“

Sub-Preform: „Als Sub-Preform werden individuelle Halbzeuge, also zugeschnittene textile Flächengebilde bezeichnet. Sub-Preforms stellen somit die einfachste Entwicklungsstufe einer Preform dar.“

Um eine geeignete Preformtechnologie für ein spezifisches Bauteil auswählen zu können, müssen zunächst die anwendungs- und anforderungsspezifischen Eigenschaften quantifiziert werden. Hierbei handelt es sich um:

- Faserorientierung und Art der Fasern,
- Faseranteile in den Raumrichtungen,
- Komplexitätsgrad,
- Geometrieeigenschaften des zu realisierenden Bauteils.

Generell können zwei Wege zur Herstellung von Preforms unterschieden werden. Während 3D-Textiltechniken auch zur direkten Preformherstellung eingesetzt werden können, basiert der Einsatz der Binder- oder der Nähtechnik immer auf einem Vorprodukt, in der Regel 2D-Textilien, Bild 4.2. Das Binder- bzw. die Nähverfahren werden dabei als Verarbeitungsschritte definiert, die jeweils auf verschiedene Halbzeuge aufbauen.

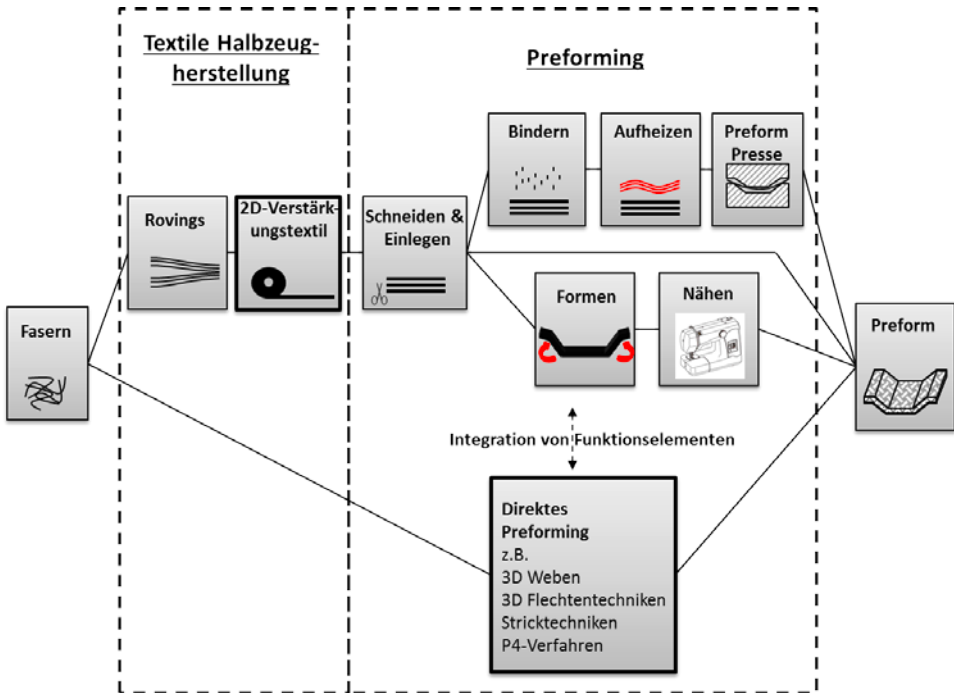


Bild 4.2 Prozesskette zur Preform-Herstellung

Basierend auf Fasermaterialien unterschiedlicher Typen und Aufmachungen können verschiedene Wege zur Herstellung einer Bauteil-Preform bei der direkten Preformherstellung gewählt werden. Die Möglichkeiten erstrecken sich über die Standard-Preformingverfahren bis hin zu direkten, textiltechnischen Verfahren der Preformherstellung. Hierzu zählen auch die „Fibre-Placement“-Techniken, die auf Bindersystemen [9] bzw. sticktechnischen Methoden („Tailored Fiber Placement“ – TFP) beruhen [10]. Bei diesen Verfahren legt man Faserbündel dem Kraftfluss entsprechend ab und nutzt dadurch das Leichtbaupotenzial der eingesetzten Verstärkungsfasern optimal aus [11].

Zum Einsatz kommen auch sequentielle Preformherstellungsverfahren. Die hierbei notwendigen Fertigungsstufen zur Erzeugung der 3D-Geometrie werden in der Regel mittels eines Binders bzw. der Nähtechnik umgesetzt. Beide Verfahren basieren jeweils auf einem textilen Halbzeug, meist einem ebenem Textil, das zunächst

speziell für den Preformprozess vorbereitet werden muss (Sub-Preform). Anschließend kann in weiteren Prozessschritten die komplette Preform erzeugt werden.

Bild 4.3 gibt einen vergleichenden Überblick zu den Möglichkeiten der direkten und der sequentiellen Herstellung von Preforms.

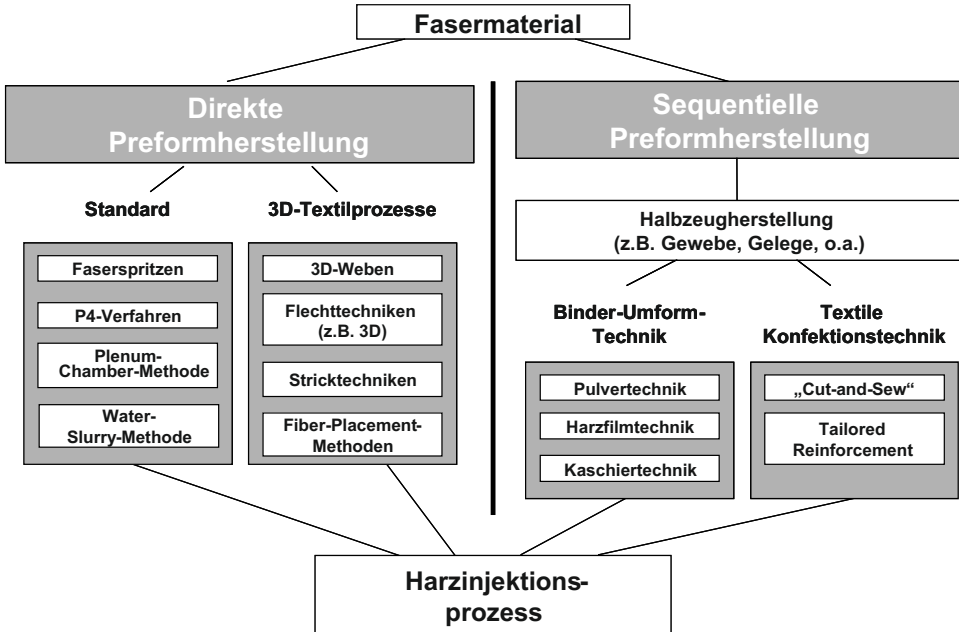


Bild 4.3 Übersicht der verschiedenen Verfahren zur Preformherstellung [12]

Während der Werkzeugbestückungsaufwand von den Eigenschaften der erzeugten Preform abhängt, richtet sich die Qualität des Bauteils unabhängig von den mechanischen Eigenschaften nach folgenden Kriterien:

- Schiebefestigkeit der Preform,
- Sicherung der Faserbündel vor Ausfransen im Bauteil-Randbereich,
- Dimensionstoleranz: $\pm 0,5$ bis $1,5$ mm,
- Preformbiegesteifigkeit,
- Verformungsverhalten der Geometrie nach dem Preformprozess („Springback“) und
- „Re-bulking“ der vorkompaktierten Struktur.

Die stark unterschiedlichen Anforderungen an die jeweils einzusetzende Preform definieren den erforderlichen Aufwand und damit die Kosten für deren Herstellung. Die Beurteilung ist aufgrund der Vielzahl unterschiedlicher Variationen der Technologien nur qualitativ und mit Einschränkungen möglich. In der Praxis ist davon auszugehen, dass jeweils nach Einsatzfall auch Kombinationen aus unterschiedli-

chen Ansätzen angewendet werden müssen, um ein optimales Ergebnis zu erzielen. Solche Ansätze können unter dem Begriff „Multi-Textile-Preforming“ [13] zusammengefasst werden.

Tabelle 4.1 Qualitativer Vergleich unterschiedlicher Preforming-Konzepte für komplexe Verstärkungsstrukturen

Anforderungen	Standard Preforming	3D-Textil-prozesse	Binder-Um-formtechnik	Textile Konfek-tionstechnik
Endkonturgenauigkeit	+ / -	+ / -	+ / -	++
Einsatz von Kohlenstofffasern	+	++	++	++
Ausnutzung der Fasereigenschaften	-	+ / -	++	++
Konstante Paketdicken	-	- ... ++	++	++
Realisierbare Paketdicken	+ / -	+	- ... +	- ... +
Lagenanzahl/Sprünge	-	- / +	++	++
Lokale Verstärkungen (z. B. multi-textil)	+ / -	-	+	++
Dickenverstärkung	-	++	-	+
Integration von Kraft-einleitungen (Inserts)	-	- ... +	-	++
Komplexe Formen	-	+ / -	+	+
Bauteilgrößen	+	+ / -	+ / -	+ / -
Automatisierung	+	+	++	++

■ 4.3 Direkte Preformherstellung

Unter direkten Preformverfahren versteht man Methoden, die eine Herstellung von 3D-Preformgeometrien direkt aus den Fasern und etwaigen Hilfsstoffen (Binder) erlauben. Hierbei ist zunächst keine Aussage über die Komplexität der Geometrie, den erreichbaren Faservolumengehalt oder den Grad der Faserorientierung getroffen.

4.3.1 Standardverfahren

Zur Herstellung von Preforms aus regellos orientierten Verstärkungsfasern (Kurzfasern) mit 3D-Geometrie können unterschiedliche Verfahren eingesetzt werden [14]. Je nach Einsatzzweck werden Faser-Spritzverfahren zum Preforming verwendet, die in der Regel als „Directed Fiber Preforming“ (DFP) bezeichnet werden [15]. Meist werden diese sehr einfachen Faserstrukturen mit Harzinjektionstechniken zu FKV-

Tabelle 5.5 Übersicht Prepregmaterialien (● Fasern, ○ Matrix)

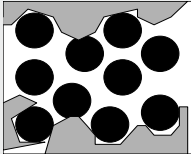
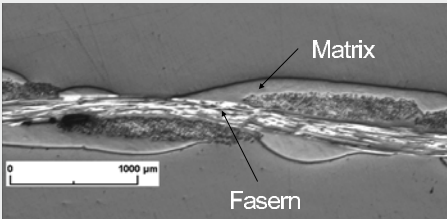
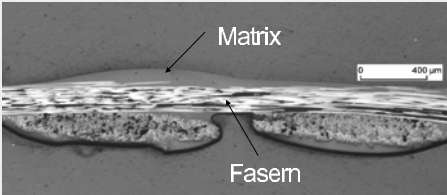
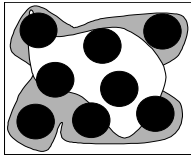
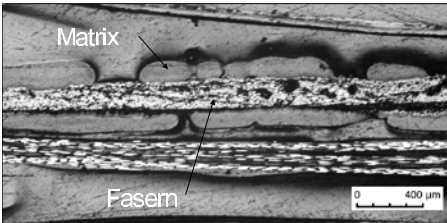
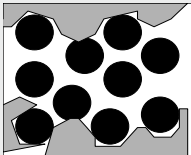
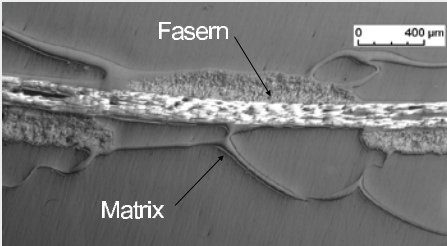
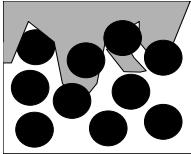
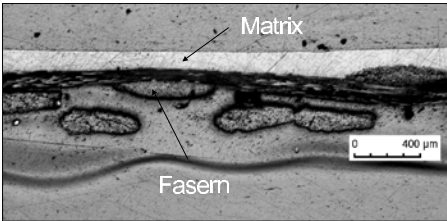
Prepregtyp	Imprägnierungs- und Konsolidierungsgrad	Herstellung und Bemerkungen
Pulver-Prepreg (flächige textile Halbzeugvorstufen, z. B. Gewebe) 	 	Herstellung über einen Pulverstreuungsprozess CF/PEEK-Prepreg, Versuchsprodukt (IVW GmbH) Herstellung über eine wässrige Pulversuspension CF/PEEK-Prepreg, Versuchsprodukt (IVW GmbH)
Pulver-Prepreg (Unidirektionale Roving-Halbzeugvorstufe, „Coated“-Tow) 		Herstellung über einen Pulverstreuungsprozess CF/PA6-Prepreg, TowFlex®-Gewebe
Lösungsmittel-Prepreg (flächige textile Halbzeugvorstufen, z. B. Gewebe) 		Herstellung über Lösungsmittelbad CF/PEI-Prepreg, Cetex® Thermoplastics
Film- und Schmelze-Prepreg 		Herstellung über einen Press- oder Kaschierprozess mit einer Folie oder Schmelze GF/PPS-Prepreg, TEPEX® semipreg

Tabelle 5.6 Vergleich von Prepregmaterialien und -verfahren (Fortsetzung)

Prepreg-Merkmale	Pulver	Suspension	Lösungsmittel	Schmelze	Film	UD-Tow	UD-Tape	Textil/Hybrid
Drapierbarkeit*	gering	gering	gering	gering	gering	mittel	gering	hoch
Geschwindigkeit	hoch	hoch	mittel	mittel	mittel	hoch	hoch	mittel
Verfügbarkeit der TP-Form**	mittel	mittel	nur amorphe TP	hoch	mittel	mittel	mittel	gering
Anlagenkosten	mittel	mittel	hoch	hoch	hoch	gering	gering	gering – hoch
Emissionen	gering	gering	hoch	mittel	mittel	gering	gering	gering

* Drapierbarkeiten von Geweben aus UD-Tows bzw. -Tapes
** TP-Form = Granulat, Pulver, Filament usw.

Pulver-Prepregs (unidirektionale und flächige Textilien)

Eine sehr einfache Möglichkeit zur Herstellung thermoplastischer Prepregs stellt die Verwendung von Polymerpulvern dar. Sofern das Polymer bei der Herstellung nicht direkt als Pulver anfällt, kann die Pulverform durch kryogenes Vermahlen aus dem Granulat hergestellt werden. Auf diesem Weg sind auch spezielle Polymercompounds und Polymerblends über die Pulver-Prepregtechnologie verarbeitbar. Die Kosten für das Mahlen eines Granulats liegen bei einer Materialmenge von ca. 1 Tonne im Bereich von 1 bis 2 €/kg. Zusätzlich besteht die Möglichkeit einer Eigenschaftsbeeinflussung des Matrixpulvers durch die Zugabe von pulverförmigen Additiven.

Die Pulverprepregherstellung kann dabei einerseits für einzelne Faserbündel separat erfolgen. Dabei ist das Faserbündel nicht vollständig imprägniert (vgl. „Coated“-Tow in Tabelle 5.5), sondern das im Prozess aufgebrachte Polymerpulver haftet lediglich an der Bündeloberfläche an (z. B. TowFlex®, Hersteller: Hexcel-Applied Fiber Systems) [44]. Die gängigere Variante stellt allerdings die Kombination eines flächigen textilen Halbzeugs (z. B. Gewebe oder Gelege) mit dem Polymerpulver dar. Der Pulverauftrag im Prepregprozess erfolgt bei beiden Versionen entweder in einem Imprägnierbad (mittels Wirbelbett oder dispergiert in einer Flüssigkeit), durch direktes Aufstreuen des Pulvers oder über elektrostatisches Anbinden. Im folgenden Prozessschritt wird das am Faden- oder der Textilstruktur anhaftende Pulver durch eine Heizstrecke (Ofen, Strahler, Kalanders, Düse oder Doppelbandpresse) geführt. Dabei schmilzt das Polymer auf, bzw. im Falle der Tränkung über eine Suspension verdampft die Flüssigkeit. Dabei dringt die Matrix, abhängig vom einwirkenden Prozessdruck, teilweise oder vollständig in die Verstärkungsstruktur ein

eine Temperaturerhöhung initiiert, stark beschleunigt ab, so dass hier ebenfalls die Prozessschritte Konsolidierung und Solidifikation prozessbestimmend sind. Somit gelten die grundsätzlichen Aussagen zur Herstellung von FKV für beide Varianten gleichermaßen.

■ 6.3 Grundlagen der Imprägnierung

Wie zuvor beschrieben sind die Verfahrensschritte Imprägnieren, Konsolidieren und Solidifikation die entscheidenden Prozessschritte. Dies gilt allgemein, unabhängig davon, ob es sich um ein duroplastisches oder thermoplastisches Matrixsystem mit beliebiger Verstärkungsstruktur handelt. Aus diesem Grund wird der Prozessschritt Imprägnieren in diesem Kapitel unabgänglich von einem Verarbeitungsprozess allgemeingültig dargestellt.

6.3.1 Physikalische Grundlagen der Imprägnierung und Konsolidierung

Zum besseren Verständnis des Imprägnier- und Konsolidierprozesses sollen in diesem Abschnitt die grundlegenden physikalischen Zusammenhänge und deren mathematische Beschreibung mit einfachen Modellen vorgestellt werden. Diese sind dann auf alle Verarbeitungsverfahren prinzipiell übertragbar.

Das Prinzip des Imprägnierens besteht im Tränken einer trockenen Faserstruktur mit einer Matrix. Das Durchströmen des Faserhalbzeugs ist mit dem Fließen eines inkompressiblen Fluids durch ein poröses Grundmedium vergleichbar. Die Strömung wird mit Hilfe der Navier-Stokes Gleichung beschrieben.

$$\rho \frac{dv}{dt} = -\nabla P + \eta \nabla^2 v \quad (6.1)$$

Hierbei stellen ρ die Dichte, v den Geschwindigkeitsvektor, ∇P den Druckgradienten und η die Viskosität des verwendeten Fluids dar.

Geht man davon aus, dass die Strömungsgeschwindigkeit der Matrix in der Verstärkungsstruktur als gering einzustufen ist, können die Trägheitskräfte in Gleichung 6.1, d. h. deren linke Seite, vernachlässigt werden. Folglich vereinfacht sich Gleichung 6.1 zu der als Stokes-Gleichung bekannten Form:

$$0 = -\nabla P + \eta \nabla^2 v \quad (6.2)$$

Eine weitere Vereinfachung stellte die Anwendung der Volumenkontrollmethode [6] auf Gleichung 6.2 dar. Das Verfahren orientiert sich an einer mittleren Längenausdehnung eines Kontrollvolumens. Dieses ist einerseits ausreichend klein zu wählen,

um die notwendige Informationstiefe über den zu beschreibenden Prozess zu erhalten, andererseits aber eine vertretbare Vereinfachung in Bezug auf die geometrisch bedingten, mikromechanischen Gegebenheiten des Prozesses. Wird dieses Verfahren angewendet und geht man davon aus, dass das poröse Medium – in diesem Falle das Faserhalbzeug – in seinen Abmessungen als unendlich angesehen wird, erhält man Gleichung 6.3 mit:

$$\langle v \rangle = - \frac{K}{\eta} \nabla \langle P \rangle \quad (6.3)$$

Hierbei sollen die Klammern um die Quantitäten v und P nach [7] an die durchgeführten Schritte der Volumenkontrollmethode erinnern.

Die in Gleichung 6.3 dargestellte Proportionalität zwischen der Fließgeschwindigkeit und der treibenden Kraftwirkung durch das Druckgefälle wurde bereits 1856 von D'Arcy empirisch ermittelt und ist als das Gesetz von D'Arcy bekannt. Er untersuchte das Fließen von Grundwasser in sandigen Bodenschichten [8] und leitet dabei die in Gleichung 6.3 beschriebene Proportionalität her.

Die Materialkonstante, welche die Durchlässigkeit des porösen Mediums darstellt, wird als Permeabilität bezeichnet und ist in Gleichung 6.3 mit dem Formelzeichen K belegt. Bei der Permeabilität handelt es sich um eine tensorielle Größe.

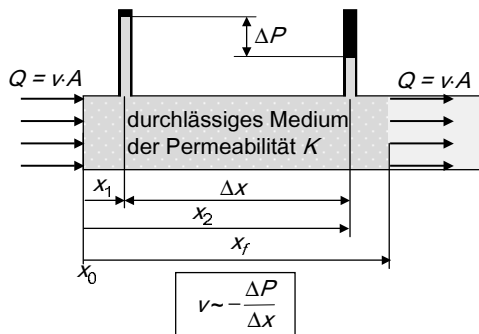


Bild 6.5 Eindimensionales Fließen durch ein poröses Medium

Zur Vereinfachung der Betrachtungsweise zeigt Gleichung 6.4 das Gesetz von D'Arcy in eindimensionaler Form.

$$v = - \frac{K_x}{\eta} \cdot \frac{\Delta P}{\Delta x} \quad (6.4)$$

Hierbei steht die Geschwindigkeit v für die gemittelte Geschwindigkeit des tränken Fluids in Richtung der Koordinate x ; $\Delta P / \Delta x$ stellt das Druckgefälle in Fließrichtung dar, Bild 6.5.

Die für Gleichung 6.4 geltenden Randbedingungen sind in Tabelle 6.2 zusammengefasst.

Der Tapelegeprozess (on-line Konsolidierung)

Für großflächige und komplexere Bauteile (Schalenstrukturen) bietet der Tapelegeprozess große Potenziale. Durch das sukzessive richtungs- und positionsvariable Ablegen von unidirektional faserverstärkten Tapes können Laminats beanspruchungsgerecht hergestellt werden. Von besonderem Interesse ist dabei die Verwendung von thermoplastischen Materialsystemen unter Nutzung einer in-situ Konsolidierung. Die Simulation des Verarbeitungsprozesses und die damit mögliche fundierte Erarbeitung der physikalischen und thermodynamischen Hintergründe des Prozesses wurde daher mit der Entwicklung des „ProSimFRT“ (Process Simulator for Fiber Reinforced Thermoplastic Tapes) angegangen.

Eine Prozessentwicklung allein auf Basis von Experimenten unter Nutzung von Anlagen im industriellen Maßstab ist vor allem aus Kostengründen ungeeignet. Erschwerend kommt hinzu, dass hiermit in der Regel die einzelnen Prozessphänomene nicht in ausreichendem Maße aufgelöst werden können. Um hier ein besseres Verständnis zu entwickeln, wurde in den zurückliegenden Jahren an vielen Stellen intensive Forschung betrieben, um zum Verständnis der Abstraktion und der Simulation der Prozesse beizutragen [73]. In vielen Fällen sind dabei allerdings theoretische Modellierungen entstanden, die nur einen eingeschränkten Bezug zum realen Prozess aufweisen. Mit ProSimFRT wird ein Ansatz verfolgt, der sich bei der Modellierung und der Simulation eng an den realen Bedingungen während des Prozesses orientiert. Ziel der Simulation ist dabei eine ganzheitliche Berechnung der Temperatur während des gesamten Prozesses für alle am Prozess beteiligten Komponenten [74], [75].

Thermodynamische Abstraktion und Modellierung

Thermoplast-Tapelegen (und -Wickeln) lassen sich mit Blick auf die thermodynamischen Aspekte in einer einheitlichen Weise abstrahieren, Bild 6.44. Dabei sind die Hauptenergieströme, die sich aus der Vorheizung, Hauptheizung, Werkzeugheizung und allen Verlusten ergeben, erfasst.

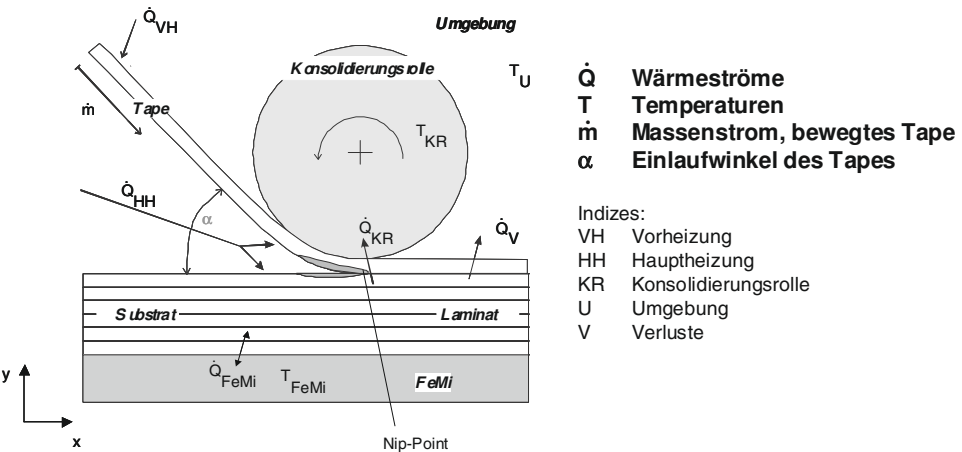


Bild 6.44 Thermodynamische Abstraktion des Verarbeitungsprozesses

Der Energiefluss, der immer in Richtung der niedrigeren Temperatur hin stattfindet, beruht auf unterschiedlichen physikalischen Energieübertragungsmechanismen. Die für den Verarbeitungsprozess relevanten sind dabei:

- Konduktion,
- Konvektion,
- Strahlung.

Ziel ist die Ermittlung der Temperatur. Abgeleitet aus dem 1. Hauptsatz der Thermodynamik lässt sich folgende Energiebilanz aufstellen:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c v \nabla T = \nabla(\lambda \nabla T) + \dot{Q} \quad (6.35)$$

mit:

$\rho c \frac{\partial T}{\partial t}$ Einfluss der transienten Temperaturänderung, (instationäres Problem)

$\rho c v \nabla T$ Energietransport durch Massenfluss

$\nabla(\lambda \nabla T)$ Energietransport durch Wärmeleitung im Volumen

T Temperatur in K

t Zeit in s

c spezifische Wärmekapazität in J/kgK

ρ Dichte in kg/m³

v Geschwindigkeitsvektor in m/s

$\dot{Q}$ innere Wärmequellen oder -senke in W/m³

λ Tensor der Wärmeleitfähigkeit in W/mK

Mit dieser Energiebilanz wird der Zusammenhang verschiedener Energieübertragungsmechanismen beschrieben, die jeweils als Einzelterme in der partiellen Differenzialgleichung (PDGL) enthalten sind. Da anisotropes Materialverhalten vorliegt, wird mit dieser PDGL das Temperaturfeld in einem 3-dimensionalen Kontinuum beschrieben. Allerdings ist die Auflösung der PDGL nach der Temperatur nicht trivial. Analytische Ansätze sind nur unter Zuhilfenahme von nicht tolerierbaren Vereinfachungen möglich. Eine numerische Lösungsmethode ist zu bevorzugen.

Als Hauptaufgabe der Prozesssimulation wird auf die Vorhersage des Temperaturfeldes abgezielt. Angewendet auf die in Bild 6.44 dargestellte Situation wurde beispielsweise für den Tapelegeprozess die Ausprägung des Temperaturfeldes im Bereich des Nip-Points für das bereits abgelegte, mehrlagige Substrat erfolgreich simuliert, Bild 6.45.

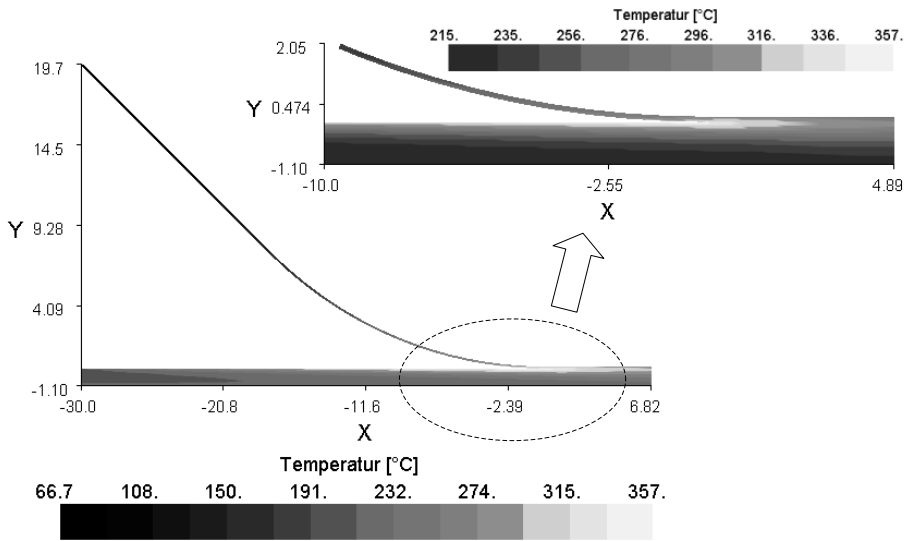


Bild 6.45 Temperaturfeldausprägung im Bereich des Nip-Points beim Tapelegeprozess (Material: CF/PEEK, Flammheizung)

Mit dieser Information lassen sich auch weitergehende Charakteristiken zum Materialverhalten während des Prozesses beschreiben, genannt seien hier beispielsweise Aspekte der Konsolidierung (Tape-Deformations- oder Adhäsionsverhalten), das Kristallisationsverhalten oder der Bauteilverzug infolge von Eigenspannungen. Vor diesem Hintergrund wurde ein modularer Aufbau des Simulationstools bevorzugt, wie er in Bild 6.46 dargestellt ist. Hiermit kann das Tool kontinuierlich erweitert werden und später als Element in einer integrierten Prozesskette zum Einsatz kommen.

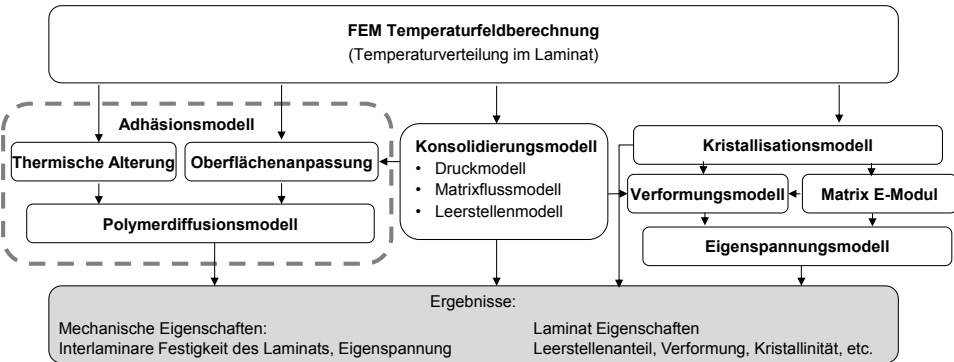


Bild 6.46 Aufbau des Prozesssimulators ProSimFRT

Montagekosten. Dem stehen eine aufwendige Fertigungsentwicklung, hohe Anforderungen an die Fertigung, Beschränkungen im Hinblick auf realisierbare Bauteilabmessungen, höhere Werkzeugkosten, eine geringe Flexibilität und eine sehr ungünstige Reparatursituation gegenüber.

7.1.2.2 Integrierende Bauweise

Der Nachteil von Integralbauweisen im Hinblick auf eingeschränkte Bauteilabmessungen wird bei der integrierenden Bauweise dadurch beseitigt, dass integrale Einzelsegmente zu größeren Struktureinheiten gefügt werden. Die integrierende Bauweise versucht, Vorteile der Integral- und Differentialbauweise, wie homogener Kraftfluss bzw. Fertigung von einzelnen Elementen, innerhalb eines Struktursystems bestmöglich zu nutzen. Integrierende Bauweisen zeichnen sich durch ein günstigeres Schädigungsverhalten, die Möglichkeit des Austausches einzelner Segmente, geringere Kosten, den Wegfall von Beschränkungen in den geometrischen Abmessungen und die lokale Anpassbarkeit an mechanische Anforderungen aus. Aus der Verbindungsproblematik ergeben sich wiederum Nachteile hinsichtlich Gewichtserhöhung und Montagemehraufwand. Bild 7.2 zeigt den Prototyp einer FKV-Linearführung für ein Zuführungssystem aus dem Maschinenbau als Beispiel für eine integrierende Bauweise.



integrales Einzelsegment



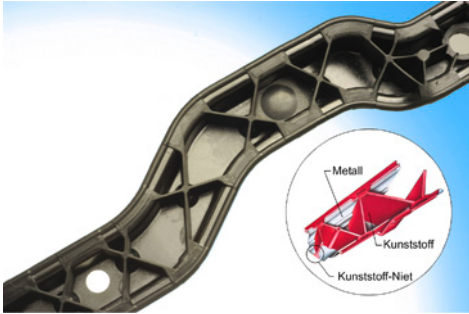
aus vier Einzelsegmenten gefügter Teil einer Linearführung

Bild 7.2 Prototyp einer FKV-Linearführung in integrierender Bauweise für ein Zuführungssystem aus dem Maschinenbau

7.1.2.3 Verbundbauweise

In Verbundbauweisen, auch Hybrid- oder Mischbauweisen sowie Multi-Material-Design, werden in der Regel mehrere Werkstoffe eingesetzt. Die Kombination unterschiedlicher Werkstoffe erlaubt eine effiziente Bauteilgestaltung, wenn die eingesetzten Materialien die an sie gestellten Anforderungen optimal erfüllen. Eine zwischenzeitlich weit verbreitete Verbundbauweise ist in dem links in Bild 7.3 dargestellten Trägerprofil aus einer Lkw-Vorbauklappe (Mercedes-Benz Actros) umgesetzt, bei dem ein Metallprofil mit unzureichender Eigenstabilität durch spritzgossene Kunststoffrippen ausgesteift ist. Ein Beispiel für Multi-Material-Design im

Fahrzeugbau stellt der BMW M3 CSL mit einer Motorhaube und Felgen aus Aluminium, Stoßfängerträgern aus endlosfaserverstärktem GMT, Sitzschalen aus GFK, einer Heckklappe aus SMC und einem besonders augenfälligen CFK-Dach dar (Bild 7.3, rechts). Diese Art von Bauweisen zeichnet sich derzeit durch starkes Wachstum in der Anwendung aus.



Trägerprofil für eine Lkw-Vorbauklappe
[Bildquelle: Mercedes-Benz Actros]



Multi-Material-Design beim BMW M3 CSL
[Bildquelle: BMW Group]

Bild 7.3 Links: Metall-Kunststoff-Verbundbauweise, rechts: Multi-Material-Design

Bei dem links in Bild 7.4 dargestellten Energieabsorberelement würde man anstelle einer Verbundbauweise besser von einem Werkstoffverbund oder Hybridverbundwerkstoff sprechen. Bei diesem Bauteil wurden Kohlenstoff- und Aramidfasern in einer Kunststoffmatrix kombiniert, um die Anforderungen nach Steifigkeit, Festigkeit und Energieabsorption sowie nach struktureller Integrität zu erfüllen. Andere Beispiele für Werkstoffverbunde sind ARALL oder GLARE (Bild 7.4, rechts) aus Aluminiumfolien und AFK- bzw. GFK-Schichten. GLARE, das mittlerweile bei der Rumpfoberschale und den Leitwerksvorderkanten des Airbus A380 eingesetzt wird, zeichnet sich durch eine ausgewogene Festigkeit und Steifigkeit, ein verringertes Ermüdungsrisswachstum, eine hohe Zähigkeit, Impact- und Korrosionsbeständigkeit sowie ein gutes Umform-, Bearbeitungs- und Durchbrandverhalten aus.

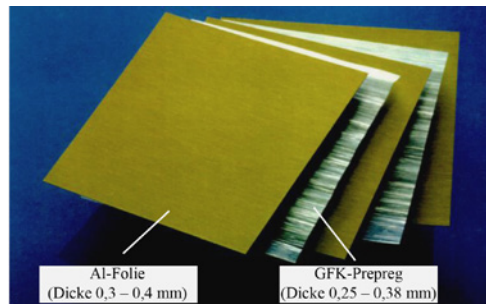


Bild 7.4 Werkstoffverbunde aus Kohlenstoff- und Aramidfasern (links) sowie (rechts) aus Aluminium- und GFK-Schichten (GLARE)

7.1.2.4 Sandwichbauweise

Die Sandwichbauweise ist in den Grenzbereich zwischen einer Verbundbauweise und einem Werkstoffverbund einzuordnen. Das vorrangige Merkmal dieser Bauweise ist die exzellente Biegesteifigkeit bei minimalem Gewicht, was durch die Kombination von dünnwandigen Deckschichten aus höher festen und steifen Werkstoffen mit einem dazwischen angeordneten, dickwandigen Kern aus Werkstoffen mit niedriger Dichte und eher mäßigen mechanischen Kenngrößen erzielt wird. Als Vorteile sind eine optimale Werkstoffausnutzung, Gewichts- und Materialersparnis, eine hohe Wirtschaftlichkeit und die Möglichkeit der Funktionsintegration (Wärme-/Schallschutz, Dämpfung) zu nennen. Nachteilig sind ein teilweise höherer Aufwand bei Fertigung und Lasteinleitung, unterschiedliche physikalische und chemische Eigenschaften bei der Kombination von Materialien und die aufwendige Stofftrennung nach dem Ende der Produktlebensdauer.

7.1.3 Leichtbau

Unter Leichtbau versteht man eine Konstruktionsphilosophie mit dem Ziel eines minimalen Strukturgewichts, die sich auf vielfältige Weise umsetzen lässt [1]. Als vorrangiges Gestaltungsprinzip ist der werkstoffliche Leichtbau zu nennen, bei dem Materialien zum Einsatz kommen, die sich durch eine hohe Festigkeit oder Steifigkeit bezogen auf ihre Dichte auszeichnen (Tabelle 7.1). Durch Faserkunststoffverbunde kann werkstofflicher Leichtbau sehr gut umgesetzt werden. Anwendungsbeispiele hierfür sind tragende Strukturen aus der Luft- und Raumfahrt, der Windkraft und dem Sportbereich sowie Bauteile mit einer möglichst geringen Massenträgheit aus dem Maschinenbau. Neben der optimalen Werkstoffauswahl ist die geometrische Gestaltung einer Struktur ausschlaggebend für ihr Leichtbaupotential (Gestaltleichtbau), was im Hinblick auf ein Bauteil mit einer möglichst hohen Betriebsfestigkeit die Einstellung einer homogenen Spannungsverteilung bedeuten kann. Ein anderes Beispiel für Strukturleichtbau im Flugzeugbau sind dünnwandige Hautfelder, für deren Versteifung wegen des deutlich höheren Torsionsträgheitsmoments Stringerprofile mit geschlossenem Querschnitt offenen Profilen vorzuziehen sind. Dass hier nach wie vor überwiegend offene Profile angewendet werden, ist darin begründet, dass weitere Anforderungen, wie Fertigungskosten oder Inspizierbarkeit, zu berücksichtigen sind. Das letztgenannte Beispiel verdeutlicht, dass Leichtbau nicht für sich allein umgesetzt werden kann, sondern immer in Wechselwirkung mit weiteren Technologiebereichen (Fertigungstechnik, Qualitätssicherung, Wartung) steht. Werkstoff- und Gestaltleichtbau werden häufig miteinander kombiniert, da die reine Werkstoffsubstitution in den meisten Fällen nicht sinnvoll ist. Für eine erste, vergleichende Abschätzung des benötigten Gewichtsaufwands für Konstruktionen aus alternativen Werkstoffen können Gütezahlen herangezogen werden, welche die Kennwerte der jeweiligen Werkstoffe, die gewählte Bauteilgeometrie und die äußere Belastung berücksichtigen [3].

Die Tabelle 10.5 zeigt zusammenfassend die Unterschiede zwischen dem Duroplast-, Binder und Thermoplast-Tapelegen.

Tabelle 10.5 Unterschiede zwischen dem Duroplast-, Binder- und Thermoplast-Tapelegen

Merkmal	Duroplast-Tapelegen	Binder-Tapelegen	Thermoplast-Tapelegen
Anlagen-technik	▪ Geometrieadaptive Rolle durch Gummibeschichtung oder Segmentierung	▪ Integrierte Aufheizvorrichtung ▪ Geometrie-adaptive Rolle durch Gummibeschichtung oder Segmentierung	▪ Integrierte Aufheizvorrichtung ▪ Geometrie-adaptive Rolle durch segmentierten Andruckschuh
Halbzeuge	▪ Faserbündel/Tow/Tape mit Schutzfolie ▪ Temperierung der Halbzeuge in Lager, Spulenschrank und Kopf	▪ In der Regel kommen Rovings zum Einsatz, die mit einem thermoplastischen Binder ausgerüstet sind	▪ In der Regel Tape
Aufbringen der ersten Lage	▪ Aufbringen eines Tackifiers	▪ Aufbringen eines Tackifiers	▪ Bisher Unterdruck, Verkleben, beheizen des Werkzeuges (nicht großserientauglich gelöst)
Ablegen und Konso-lidierung	▪ Leichtes Erwärmen zur Erhöhung der Eigenklebrigkeit ▪ Andrücken/Kompaktierung ▪ Konsolidierung im Autoklav	▪ Erwärmen zur Aktivierung der Eigenklebrigkeit ▪ Andrücken/Kompaktierung ▪ Bei geschickter Wahl des Binders wird sich dieser später beim Flüssigimprägnierverfahren im aushärtenden Harzsystem lösen	▪ Aufschmelzen des Tapes ▪ On-line Konsolidierung mit dem Laminat durch Applizierung des Konso-lidierungs-drucks

10.2.4 Abgrenzung der Legeverfahren

Trotz des fließenden Übergangs zwischen den Verfahren ist es notwendig, zwischen „Wickeltechnik“ und „Tapelegen“ zu differenzieren. Beim Tapelegen ist zudem zwischen „Multi-Tapelege-technik“ und „Kontur-Tapelege-technik“ zu unterscheiden. Die Tabelle 10.6 liefert eine zusammenfassende Abgrenzung der Verfahren [25].

Tabelle 10.6 Abgrenzung der Wickeltechnik von der Tapelege-technik [25]

Technologie	Wickeln	Tapelegen	
Prozess	Kontinuierlich	Diskontinuierlich	
Halbzeug	Rovings/Tapes/Hybridgarn	Tapes (Rovings/Hybridgarn)	Tape
Anzahl der Halbzeuge	1 bis 24	32 bis 2	1
Halbzeugbreite	Ca. 3 mm bis ca. 500 mm	3,175 mm bis 15 mm	15 mm bis 300 mm

Technologie	Wickeln	Tapelegen	
Verfahren	Wickeltechnik	Multi-Tapelegetechnik	Kontur-Tapelegetechnik
Bauteile	Rotationssymmetrische bzw. gekrümmte Körper mit konvex-geschlossener Oberfläche; keine lokalen Verstärkungen	Große, ebene oder gekrümmte Strukturen mit konvexer und konkaver Oberfläche; mit Stufungen der Bauteildicke bzw. lokalen Verstärkungen	Große, ebene offene Strukturen mit geringfügig konvexer und konkaver Oberfläche; mit Stufungen der Bauteildicke bzw. lokalen Verstärkungen
Konsolidierung/Kompaktierung über	Fadenspannung (ggf. Andrückvorrichtung)	Andrückvorrichtung	Andrückvorrichtung
Ablegebahn	Geodätisch bzw. gering davon abweichend	Beliebig, nur von der Drapierbarkeit der Tapes begrenzt	Beliebig, nur von der Drapierbarkeit der Tapes begrenzt
Ablegebreite	Konstant, unvariabel	Variabel (entsprechend Anzahl der Tapes)	Konstant, invariabel
Faserorientierung	15° bis 88° ohne Hilfsmittel	Beliebig	Beliebig
Faserpositionierung	Lagenweise	Lokal, beliebig	Lokal, beliebig
Förderprinzip	Rotation des Wickelkerns	Abrollen, Vorschubantrieb	Abrollen, Vorschubantrieb
Erforderliche Bewegungsachsen	1–2 rotatorisch, 3 translatorisch	3 rotatorisch, 3 translatorisch	3 rotatorisch, 3 translatorisch
Verfügbarkeit	Anlagen für faserverstärkte Duro- und Thermoplaste	Anlagen für faserverstärkte Duro- und Thermoplaste	Nur Anlagen für faserverstärkte Duroplaste

Literatur

- [1] *Neitzel, M.; Breuer, U.*: Die Verarbeitungstechnik der Faser-Kunststoff-Verbunde, Hanser, München, 1997
- [2] *Funck, R.*: Entwicklung innovativer Fertigungsverfahren zur Verarbeitung kontinuierlich faserverstärkter Thermoplaste im Wickelverfahren, Fortschritt-Berichte VDI-Reihe 2 Nr. 393, VDI Verlag, Düsseldorf, 1996
- [3] *Jao Jule, E.; Delmotte, M.*: Thermomechanical Couplings and Manufacture Conditions of Thermosetting Composite Materials with Heating by Dielectric Hysteresis, 10th European Conference on Composite Materials (ECCM-10), June 3–7, 2002, Brügge, Belgium
- [4] *Schürmann, H.*: Zur Erhöhung der Belastbarkeit von Bauteilen aus Faser-Kunststoff-Verbunden durch gezielt eingebrachte Eigenspannungen, Diss., Universität-Gesamthochschule Kassel, VDI Verlag, Fortschritt-Berichte, VDI-Reihe Nr. 170, Düsseldorf, 1989
- [5] *Christen, O.*: Entwicklung eines Thermoplast-Direktimprägnierverfahrens für die wickeltechnische Herstellung von Druckbehältern, Fortschritt-Berichte VDI Reihe 2 Nr. 529, VDI Verlag, Düsseldorf, 1999

11.3.1 Vakuuminjektionsverfahren (VI)

Das Vakuuminjektionsverfahren ist die einfachste Methode, um mittels Injektionstechnik endlosfaserverstärkte Bauteile herzustellen. Neben dem vorwiegend nur einseitigen Werkzeug, eine Vakuumfolie dient als Oberwerkzeug, werden lediglich eine Vakuumpumpe und ein Harzvorratsbehälter benötigt und damit die Investitionskosten niedrig gehalten.

Zu Beginn des Fertigungsprozesses wird, wie bei allen Harzinjektionsverfahren, ein textiles Halbzeug in die Kavität eingelegt, das Werkzeug geschlossen und mit Vakuum beaufschlagt. Durch den Unterdruck zwischen Werkzeughälfte und Vakuumfolie wird das Textil kompaktiert. Die Matrix tränkt nach Öffnen der Injektionsleitung das Fasermaterial aufgrund des Unterdrucks [28]. Um die Kavität vollständig füllen zu können, muss mindestens ein Vakuumanschluss am Fließwegende vorhanden sein. Zur Injektion bieten sich dabei verschiedene Angussvarianten an (Punkt, Linie und Ring). Dabei gilt die Faustformel: Je größer der Angussbereich, desto kürzer die Injektionszeit [29]. In Bild 11.12 wird das Vakuuminjektionsverfahren schematisch dargestellt.

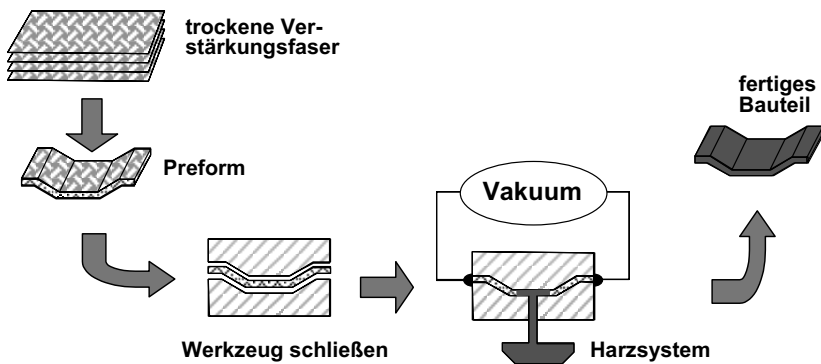


Bild 11.12 Vakuuminjektionsverfahren

Mit dem Vakuuminjektionsverfahren lassen sich luftblasenfreie Bauteile mit hoher Qualität und – im Falle zweischaliger Werkzeuge – beidseitig guten Oberflächen herstellen. Da durch das Vakuum nur eine maximale Druckdifferenz von $Dp \leq 1$ bar aufgebracht werden kann, sind der Fließweg und damit die Größe der Bauteile begrenzt. Durch spezielle Injektionsgewebe, harzverteilende Angussysteme und dünnflüssige Harze in einem temperierten Werkzeug lassen sich längere Fließwege realisieren und die relativ langen Injektionszeiten verkürzen. Das Vakuuminjektionsverfahren ist für Bauteile mit komplexer Geometrie oder Verrippungen besonders geeignet. Zur Integration von Inserts bietet das Verfahren ebenfalls gute Voraussetzung. Eine typische Seriengröße gibt es nicht, die Stückzahlen reichen von wenigen Stück pro Jahr bis ca. 3000 Stück/a, in Einzelfällen auch mehr.

11.3.2 Resin Transfer Molding (RTM)

Während beim Vakuuminjektionsverfahren das Füllen der Kavität durch das Anlegen eines Vakuums erfolgt, wird bei dem seit 1950 bekannten Resin Transfer Molding (RTM) das Matrixmaterial mittels Überdruck in die Kavität injiziert.

Nach dem Beschicken, d. h. optionalen Aufbringen von Trennmittel sowie Einlegen der Faserverstärkung in die Kavität des Werkzeugs, wird dieses geschlossen und das Reaktionsgemisch aus Harz, Härter und eventuell einem zusätzlichen Katalysator in die Kavität unter Druck injiziert. Die Verstärkungsstruktur wird durch das Gemisch imprägniert, welches anschließend meist unter erhöhter Temperatur aushärtet, Bild 11.13. Zur Erhöhung der spezifischen Biege- und Beulsteifigkeit können zusätzlich Schaumstoff- oder Balsaholkerne verwendet werden [30]. Nach dem Entformen des Bauteils muss das Werkzeug vor dem nächsten Fertigungszyklus von vorhandenen Harzresten an Anguss, Steiger und ggf. auch in Randbereichen gesäubert werden.

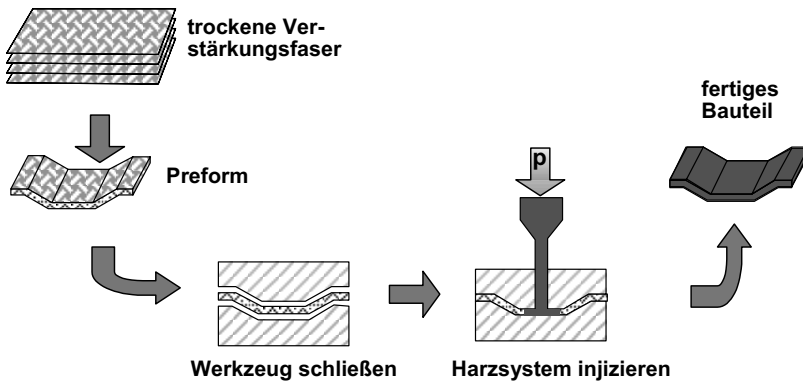


Bild 11.13 Resin Transfer Molding (RTM)

Im Allgemeinen betragen die Zykluszeiten je nach Bauteilgröße und Bauteilkomplexität für einen RTM-Prozesszyklus etwa 5 min bis 25 min. Injektion und insbesondere die Härtung beanspruchen bei einfachen Geometrien den größten Teil der Zeit. Seriengrößen von bis zu 50 000 Stück/a werden mit einem Werkzeug realisiert. In neueren Produktionsanlagen, in denen eine entsprechende Anzahl an Werkzeugen zusammengefasst ist oder Mehrkavitätenwerkzeuge zum Einsatz kommen, lassen sich inzwischen durch Optimierungen des Prozessablaufs auch höhere Stückzahlen erreichen.

Durch den Einsatz der Preforms kann die Beschickungszeit der Kavität wesentlich verkürzt werden. Damit erhöht sich die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens zur Herstellung von Bauteilen mit komplexer räumlicher Gestalt [31], [32], [33].

Grundsätzlich lassen sich mit dem RTM-Verfahren beidseitig glatte Oberflächen erreichen. Bei zu lackierenden Oberflächen, beispielsweise Außenhautteilen von KFZ,

■ 12.3 Thermoformen von Organoblechen

12.3.1 Einleitung

Beim Thermoformen wird ähnlich wie bei der Verarbeitung von thermoplastischen Fließpressmassen (GMT und LFT) von einem in der Regel voll imprägnierten und konsolidierten Halbzeug ausgegangen, den sogenannten Organoblechen. Im Gegensatz zu den Fließpressverfahren erfolgt beim Thermoformen die Ausformung der dreidimensionalen Bauteilgeometrie nicht durch ein Fließen des Materials, sondern ausschließlich durch das Drapieren der Verstärkungsstruktur, meist ein Gewebe, vgl. Abschnitt 6.6. Hiermit ist dieses großserientaugliche Verfahren auf die Herstellung schalenförmiger Strukturen beschränkt. Verrippungen sind nicht darstellbar. Die dargestellten verfahrensspezifischen Weiterentwicklungen und die unter Abschnitt 12.5 beschriebenen Hybridverfahren versuchen, diesen Nachteil aufzufangen.

Die Eingliederung des Thermoformens von Organoblechen in die Herstellungsprozesskette ist in Bild 12.8 dargestellt. Der Materialfluss beginnt mit der Herstellung der Organobleche, z.B. mittels Doppelband- oder Intervallheißpresstechnik, führt zur Formgebung und ggf. zu einem nachgeschalteten Fügeprozess mit anderen Teilen, wie Profilen oder Krafteinleitungselementen.

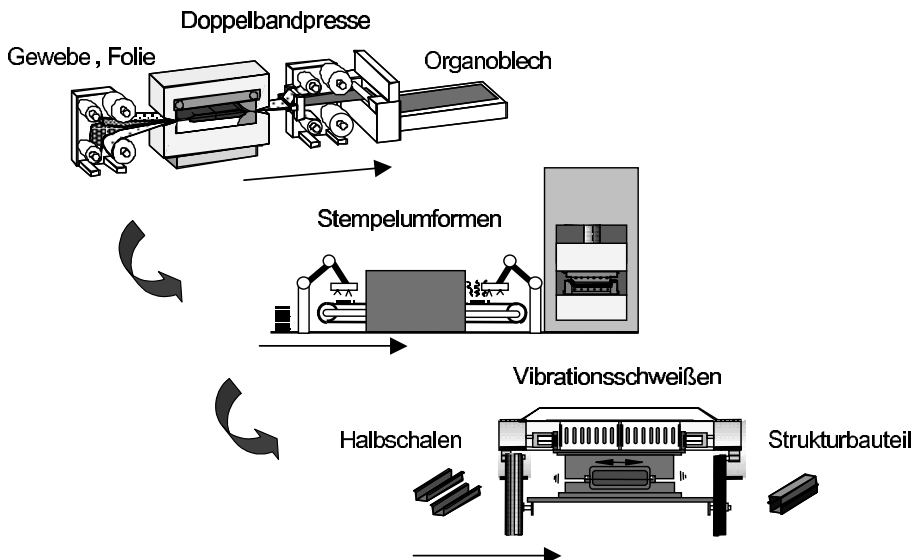


Bild 12.8 Materialfluss von Organoblechen: Herstellung-Formgebung-Fügen

12.3.2 Umformprinzipien

Anders als bei Materialien, bei denen der Umformprozess durch deren plastische Fließfähigkeit bestimmt wird, ist bei der Umformung faserverstärkter Thermoplaste die Drapierung der geometriedeterminierende Faktor. Hierbei wird unter Drapierbarkeit die sphärische Verformbarkeit von textilen Flächegebilden ohne Faltenbildung verstanden. Untersuchungen zur Drapierung werden an nicht imprägnierten und imprägnierten Verstärkungsstrukturen, z. B. mittels eines Spannrahmens, vgl. Abschnitt 6.6, durchgeführt und auf das Drapierverhalten eines vollständig imprägnierten Organoblechs übertragen. Bei diesen Untersuchungen zeigt sich, dass bei der Umformung von gewebeverstärkten Thermoplasten die Scherung des Gewebes der wichtigste Parameter darstellt, Bild 12.9. Andere Einflussparameter, wie z. B. Dehnung und Streckung der Kett- bzw. Schussfäden und die Verschiebung der Fasern spielen nur eine untergeordnete Rolle [10].

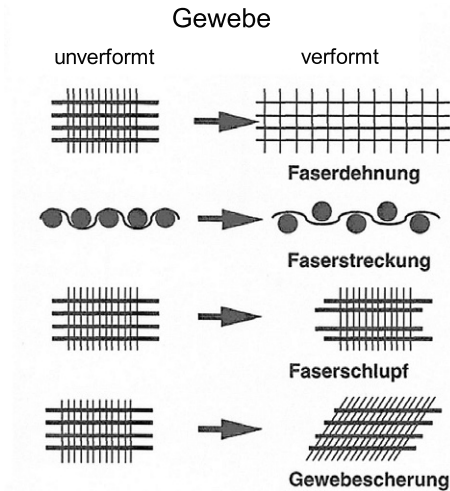


Bild 12.9

Prinzipien der zweidimensionalen Gewebeverformung (nach [11])

Während des Drapierens von Geweben über sphärische Geometrien verändern sich die Winkel zwischen Kett- und Schussfäden. Dadurch wird ein genaues Ablegen des Gewebes überhaupt erst möglich. Ausgehend von einem Winkel von 90° zwischen Kett- und Schussfäden verringert sich der Winkel, bis ein maximaler Scherwinkel erreicht ist. Dieser Scherwinkel ist ein Maß für die größte faltenfreie Verdichtung des Gewebes. Wird die Scherung über diesen Winkel fortgesetzt, so äußern sich die auftretenden Spannungen in Form von Falten, da das Gewebe nicht weiter verdichtet werden kann. Somit ist es ein Ziel der optimierten Umformung, diesen Grenzscherwinkel nicht zu erreichen. Wenn die Geometrie des Bauteils nicht verändert werden darf, kann man auf zwei Arten den Grenzwinkel reduzieren:

- Aufbringen von Vorspannkräften in das Gewebe (Zugspannung),
- Variation der Gewebegeometrie (Bindungsart, Offenheit, Titer, Fadendichte).

Unter Stempelumformen mit Metallstempel (engl.: Matched Metal Molding) versteht man das Umformen mit Werkzeugen aus Stahl oder Aluminium, Bild 12.13. Die Kavität des Werkzeuges ist durch die festen Werkzeughälften vorgegeben, die auf eine polymerabhängige Temperatur beheizt werden. Tabelle 12.4 listet die Vor- und Nachteile des Verfahrens.

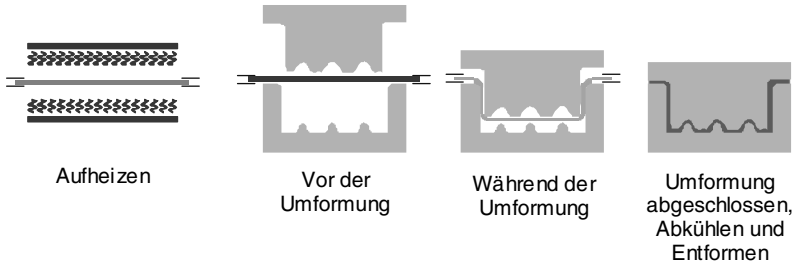


Bild 12.13 Stempelumformen mit Metallstempel

Tabelle 12.4 Vor- und Nachteile des Metallstempelverfahrens

Vorteile	Nachteile
- Sehr kurze Zykluszeiten - Sehr gute Ausformung kleiner Radien und Ecken - Sehr gute, reproduzierbare Formteilgenauigkeit und Oberflächen - Hohe Werkzeugstandzeit $\Rightarrow$ geringer Wartungsaufwand - Minimierung von Eigenspannungen und Verzug im Bauteil - Hohe Automatisierbarkeit des Verfahrens	- Vollständig imprägnierte Halbzeuge erforderlich - Variation der Laminatdicke bedingt jeweils eine neue Matrize oder Patrize - Kein Druck senkrecht zur Pressrichtung - Niederhalter bei Faltenbildungen notwendig - Hinterschnidungen nur mittels kostenintensiver Schikanenwerkzeuge möglich - Vergleichsweise hohe Werkzeugkosten

12.3.3.3 Umformen mit Elastomerblock

Ein Aufbau, der wegen der großen Zahl an Kleinst- und Kleinserien von Produkten in der Flugzeugindustrie Verwendung findet, ist das Stempelumformen mit einem Elastomerblock (engl.: Rubber Pad Forming). Hierbei wird das Oberwerkzeug (Matrize) als Elastomerblock ausgeführt, der möglichst temperaturbeständig und verschleißfest sein muss, Bild 12.14.

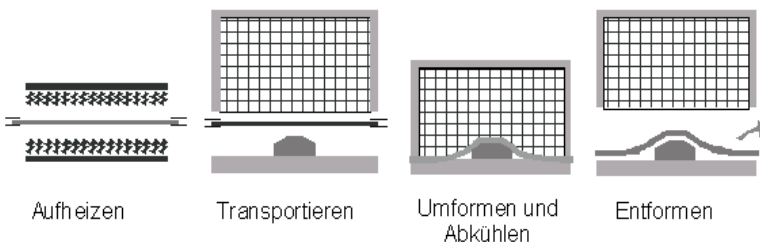


Bild 12.14 Stempelumformen mit Elastomerblock

Das Unterwerkzeug (Patrize) besteht zumeist aus Stahl oder Aluminium. Während der Umformung nimmt der hochverformbare Block die Kontur der Patrize an. Der Hauptvorteil dieses Verfahrens besteht in der Herstellung von unterschiedlichen Produkten mit nur einem Elastomerblock [16] (Vor- und Nachteile s. Tabelle 12.5).

Tabelle 12.5 Vor- und Nachteile des Stempelumformen mit Elastomerblock

Vorteile	Nachteile
▪ Kurze Zykluszeiten ▪ Nur eine Werkzeughälfte notwendig ▪ Gleichmäßige Druckverteilung auch senkrecht zur Pressrichtung ▪ Einseitig sehr hohe Oberflächenqualität ▪ Variationen der Laminatdicke oder des Lagenaufbaus möglich ▪ Leichte Formteilhinterschneidungen möglich ▪ Hohe Automatisierbarkeit des Verfahrens	▪ Vollständig imprägnierte Halbzeuge erforderlich ▪ Niederhalter bei Faltenbildung notwendig ▪ Begrenzte Haltbarkeit der Elastomerblöcke ▪ Eigenspannungen und Verzug im Bauteil wegen ungleichmäßiger Abkühlung ▪ Unzureichende Ausformung scharfkantiger Radien oder Ecken

12.3.3.4 Umformen mit Silikonstempel

Ein weiteres Stempelumformverfahren stellt das Silikonstempelumformen dar. Dieses Verfahren vereinigt die Vorteile der homogenen Druckverteilung und der variablen Werkzeugkavität mit einer erhöhten Werkzeugstandzeit. Der Unterschied zum Elastomerblock besteht in der Geometrie der Patrize, die der Bauteilkontur ähnelt. Die Querschnittsfläche des Silikonstempels ist, verglichen mit einem Metallstempel, etwas kleiner, um zunächst die Umformrate zu bewältigen. Da für eine vollständige Ausformung des Bauteiles das Volumen in der Matrize ausgefüllt sein muss, ist die Stempelhöhe größer, Bild 12.15.

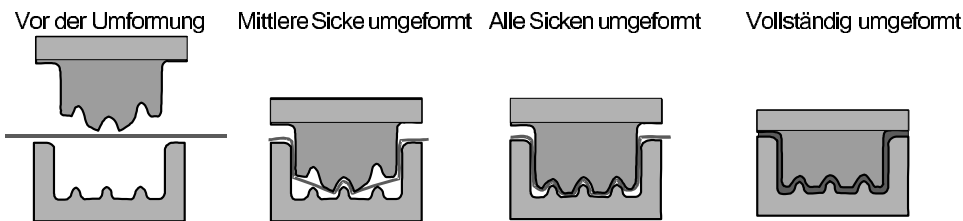


Bild 12.15 Silikonstempelverfahren

Der Silikonstempel ermöglicht durch seine hohe elastische Dehnung sequentielle Umformungen. Bei dem Werkzeug nach Bild 12.15 formt der Silikonstempel zunächst die mittlere Versteifungssicke, danach die beiden äußeren Sicken und zum Schluss erst die Ecken in der Matrize aus [17] (Vor- und Nachteile s. Tabelle 12.6).

Wie aus Tabelle 15.3 hervorgeht, erweisen sich das Vibrations- und das Induktions-schweißen unter den gegebenen Randbedingungen als am besten geeignet zum Schweißen von thermoplastischen Faser-Kunststoff-Verbunden. Diese beiden Ver-fahren werden im Folgenden detailliert vorgestellt.

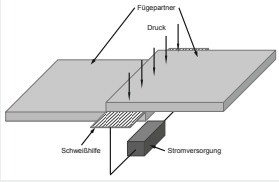
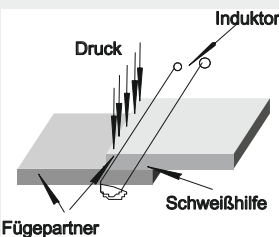
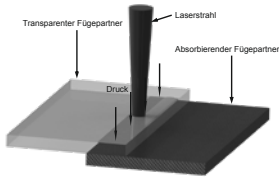
■ 15.4 Physikalische Grundlagen

Die Tabelle 15.4 zeigt die wesentlichen physikalischen Grundprinzipien, die zum Schweißen von Kunststoffen eingesetzt werden. Zusätzlich sind auch die jeweiligen Vorteile und die Verfahrensschwächen angegeben.

Tabelle 15.4 Charakteristik einiger wichtiger Schweißverfahren für FKV

Verfahren	Physikalisches Prinzip	Vorteile	Nachteile
Ultraschallschweißen	Wärme durch mechanische Reibung und Molekülreibung	▪ sehr kurze Taktzeit (< 2s) ▪ geringe Investitions- kosten beim Fügen kleiner Bauteile ▪ gute Automatisier- barkeit	▪ hohe Investitions- kosten beim Fügen großer Bauteile mit kontinuierlicher Naht ▪ Lärmbelastung ▪ Werkstoff hat großen Einfluss auf Füge- nahtqualität
Vibrationsschweißen	Wärme durch mechanische Reibung	▪ kurze Taktzeit (< 60 s) ▪ hohe Fügenaht- festigkeit ▪ Fügen unter Sauer- stoffausschluss ▪ artfremde Werkstoffe schweißbar ▪ niedriger Energie- einsatz	▪ hohe Investitions- kosten ▪ eingeschränkte Bauteilgeometrie ▪ Faserabrieb in der Fügezone ▪ Lärmbelastung ▪ schlechte Optik der Schweißnähte
Heizelementschweißen	Wärmeleitung	▪ geringe Investitions- kosten ▪ auch komplexe Bau- teile schweißbar ▪ gute Automatisier- barkeit	▪ lange Taktzeit ▪ niedermolekulare Polymere haften am Heizelement ▪ hoher Energieeinsatz

Tabelle 15.4 Charakteristik einiger wichtiger Schweißverfahren für FKV (Fortsetzung)

Verfahren	Physikalisches Prinzip	Vorteile	Nachteile
Hochfrequenzschweißen 	Wärme durch Molekülreibung	hohe Fügenahtfestigkeit	- nur polare Polymere schweißbar - CFK nicht schweißbar - Abschirmung gegen elektromagnetische Strahlung erforderlich
Widerstandsschweißen	Wärme durch elektrische Widerstandsverluste	- bedingte Lösbarkeit der Verbindung - geringe Investitionskosten - hohe Mobilität - auch komplexe Bauteile schweißbar - gute Regelbarkeit des Prozesses	- Isolationsproblematik bei elektrisch leitfähigen Laminaten - Komplizierte Kontaktierung des Schweißzusatzmaterials - Komplexe Fügeteilfixierung - Versagen in der Fügezone kann an Schweißzusatz beginnen
Induktionsschweißen 	Wärme durch Wirbelstromverluste	- bedingte Lösbarkeit der Verbindung - geringe Investitionskosten - hohe Flexibilität und Mobilität - auch komplexe Bauteile schweißbar - inhärente Erwärmung von CFK	- schwer kontrollierbare Wärmeverteilung - Spannungen bei artfremden Schweißhilfen - mittlere Taktzeiten
Laserdurchstrahlungsschweißen 	Wärme durch Strahlung im Infrarotbereich	- kurze Taktzeiten - hohe Flexibilität und Mobilität - auch komplexe Bauteile schweißbar - sehr konzentrierter Wärmeeintrag	- ein Partner muss für Laserstrahlung transparent sein - hohe Investitionskosten

■ 17.1 Einleitung

Alle formgebenden Verfahren der Verarbeitung von FKV benötigen Werkzeuge, mit denen die vorgesehene geometrische Gestalt des Bauteils exakt abgebildet werden kann. Dabei bestimmen die technischen Spezifikationen des Bauteils, einschließlich der zu verwendenden Werkstoffe, und die geplanten Stückzahlen den Aufwand für die Herstellung und den Betrieb der Werkzeuge. Deren Spektrum reicht von einfachen, einseitigen, von Hand gefertigten Werkzeugen aus Gießharzen oder Verbundwerkstoffen bis zu beheizten Stahlwerkzeugen mit Schiebern und verchromten, hochglanzpolierten Oberflächen für Teile im Sichtbereich von Kraftfahrzeugen. Im Folgenden soll ein Überblick zu der Thematik gegeben werden, der das grundlegende Verständnis unterstützt und sich an den jeweiligen Verarbeitungsverfahren orientiert, aber wegen der Breite der Thematik nicht umfassend sein kann. Für eine Vertiefung wird auf die angefügten Quellen verwiesen.

■ 17.2 Fließpressverfahren

Der mengenmäßig größte Anteil an den GFK-Produktionsmengen in Europa, mit etwa 36 %, wird heute über Pressverfahren verarbeitet. Dies basiert wesentlich auch auf den Großserienanwendungen in der Automobilindustrie zur Herstellung von Bauteilen aus SMC/BMC (25 %), GMT und LFT (ca. 11 %) [1]. Die entsprechenden Werkzeugkonstruktionen unterscheiden sich in der Grundkonzeption bei diesen Werkstoffen nicht wesentlich voneinander. Die Festlegung und Auslegung der zum Einsatz kommenden Werkzeuge erfolgt nach folgenden Gesichtspunkten [2]:

- verwendete Pressmasse (duroplastisch, thermoplastisch),
- Art, Größe und Funktion des Bauteils,
- geforderte Toleranzen im fertigen Bauteil,
- Lebensdauer, geforderte Stückzahlen (Vorserien-, Prototypenwerkzeug),
- verfügbare Anlagentechnik (Größe der Presse oder Spritzgießmaschine).

Beim Verarbeiten von duroplastischen und thermoplastischen Pressmassen im Fließpressverfahren kommen hauptsächlich zweiteilige Tauchkanten-Werkzeuge (auch „Füllraumwerkzeug“ [3]), aber auch Werkzeuge mit Quetschkanten zum Einsatz. Bild 17.1 zeigt ein typisches Tauchkantenwerkzeug mit den wichtigsten Elementen.

Vor Erreichen der Endposition taucht das Oberwerkzeug in die Unterform ein (u. U. mehrere Zentimeter), die beiden aneinander gleitenden, umlaufenden Flächen haben eine Passung von einigen hundertstel Millimetern [5]. Diese präzise gearbeiteten, geschliffenen und mindestens oberflächengehärteten Tauchkanten ermöglichen:

- die Abdichtung (eingewogenes Material wird nicht wieder aus der Form herausgepresst) und die gleichzeitige Entlüftung der Form,
- durch das Erreichen des erforderlichen Werkzeuginnendrucks eine ausreichende Kompaktierung der Pressmasse (bei GMT zwischen 200 und 400 bar [4]),
- somit die vollständige Füllung der Kavität, insbesondere bei komplexen Werkzeugen und langen Fließwegen und
- durch Ausbildung eines minimalen Grates die Reduzierung der Nacharbeit.

Aufgrund der engen Passungstoleranz kommt somit der ausreichend dimensionierten Werkzeugführung, aber auch der exakten Parallelhaltung der Presse besondere Bedeutung zu. Mit dem Einsatz einer modernen Parallelregelung kann heute bei Pressteilen aus faserverstärkten Thermoplasten auch auf eine Nachbearbeitung verzichtet werden.

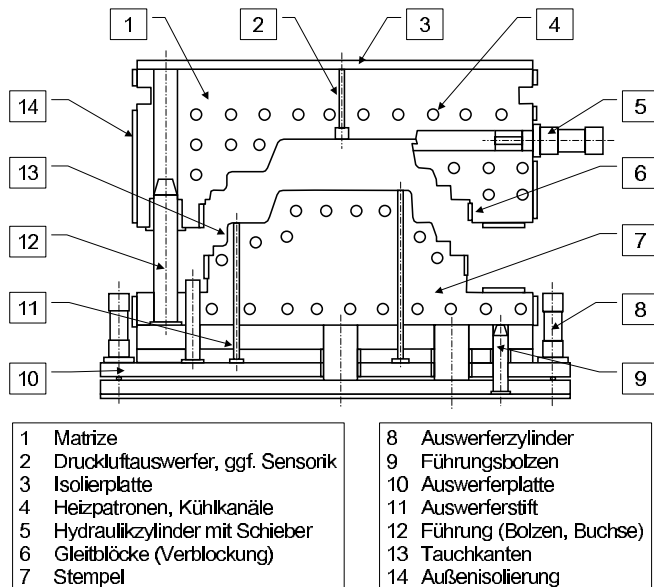


Bild 17.1 Typisches GMT-Presswerkzeug [4]

Index

Symbole

6-Achs-Knickarmroboter 351

A

Abfall 456
Abkühlrate 336
Abkühl- und Haltephase 492
Ablagepunkt 335
Ablegeprozess 344
Ablegerate 349
abrasiver Verschleiß 435
Abrasiv-Wasserstrahlschneiden 439
Abreibgewebe 310
Abscheren des überschüssigen Hybridgarn-
gewebes 404
Absorptionskoeffizient 215
Absorptionsmaximum 339
Abstandsgestricke 409
Abstands-Textilien 81
Achsen 326
Activity Based Costing 22
Advanced Resin Transfer Molding 372
aerodynamische Vliesbildung 75
Aggregatzustand 384
Aktuatorik 202
Amorphe Thermoplaste 56
Anbindungselemente 346
Andruckrollen 336
Andrucksystem 344
Andruckvorrichtung 344
Angussposition 255
Anlagendimensionierung 267
Anlagensicherheit 518
Anlagentechnik 329
Anwendungsfelder 499
Aramidfasern 38
Arbeitsschutz 434, 505
Arbeitssicherheit 505
Arbeitsstättenverordnung 509
Atlasbindung 77
Aufdickung des Laminates 395
Auffächerung 332
Aufheizstation 334
Aufheizvorrichtung 344, 351
Aufmachungsformen 73
Ausfransen 99
Aushärtensimulation 256

Aushärtetemperatur 435
Aushärtung 333
AutohäSION 477
Autoklav 362, 374
Autoklaven 348
Autoklav-freie Fertigung 351
Autoklavprozess 344
Automated Tape Lay-up 347
Automatisierung 106
Automobilindustrie 359

B

Balsaholzkern 363
Bandbremse 334, 335
Bandversatz 327
Baugröße 348
Bauteilformkomplexität 345
Bauteilgröße 203, 499
Bauteilkomplexität 499
Bauteilqualität 204
Bauweise 277
– Differential- 278
– Integral- (Monocoque-, monolithische B.) 278
– integrierende B. 279
– Verbund- (Hybrid-, Misch-, Multi-Material-Design)
279
Bearbeitungskräfte 438
Bearbeitungsparameter 435
Bearbeitungsverfahren 433
Bearbeitungsverhalten 434
Belastungsfall 385
Bereitstellungsformen 73
Besäumvorgang 396
Beschichten 433
Beschichtung 444
Betriebsdrücke 325
Binder 98
Binder-Umformtechnik 104
Bindungsart 394
bleed-Aufbau 310
Blindstich 112, 126
Blindstich und OSS® 109
Blockierwinkel 249

Bodenplatte 363
 Bohrungsdurchmesser 436
 Bremseinrichtung 336
 Brennbarkeit 386
 Bruchlasten 476
 Brückendeck 358

C

Carreau-Ansatz 227
 CFK-Seitenleitwerk 362
 chemisch fixierte Matten 76
 Class-A-Oberfläche 450
 Class-A-Oberflächenqualität 526
 Commingled Yarns 335
 Compounds 14
 Contour Tape Laying 347
 Crazing 62
 CTT-Diagramm 45
 Cut-and-Sew-Technik 106

D

D'Arcy 210
 DBP-Prozess 269
 Decklagentemperatur 411
 Degradation 286
 – Kriechen 286
 – mechanische 286
 – physikalisch-chemische Alterung 286
 – Schwingermüdung 286
 Dehnung 394
 Dehnviskosität 58
 DFP-Verfahren 101
 Diamantsäge 437
 Diaphragmaformen im Autoklaven 397
 Diaphragmaverfahren 395
 Diaphragmen 397, 407
 Dichtevariation 217
 Dichtungstechnik 372
 Dickenadaptives Umformen 408
 Dickenverstärkung 119
 dielektrische Verluste 495, 496
 Dielektrizität 236
 Dielektrizitätskonstante 236
 Differential Pressure Resin Transfer Molding 374
 Diffusion-Enhanced Adhesive Bonding 476
 Dilatanz 225
 Diodenlaser 339
 Directed Fibre Preforming 100
 Direktaufheizung 413
 direkte Preformherstellung 98, 100
 Direktformen 405
 Direktimprägnieren 402
 Direktimprägnierung 335
 Direkt-LFT-Verfahren 152, 387

Direktverfahren 387
 Doppelbandpresse 150
 Doppelbandpresstechnik 393
 Doppelsteppstich 109, 119, 123, 126
 Drapierbarkeit 106, 394
 Drapieren 393
 Drapiersimulation 253
 Drapierverhalten 77
 Drehen 433
 dreidimensionales Fließen 227, 231
 dreidimensionale Simulation 254
 Druckbehälter 325
 Druckgefälle 211
 Druckglocke 406
 druckunterstütztes Thermoformen 406
 Druckverlaufanalyse 388
 Druckverteilung 400
 Durchzeichnung der textilen Struktur 449
 Duroplaste 42, 221
 duroplastische FKV 469
 duroplastische Halbzeuge 343, 350
 Duroplast-Kontur-Tapelegen 347
 Duroplast-Kontur-Tapeleger 348
 Duroplast-Prepregs 333
 Duroplast-Tapelegeanlage 343
 Duroplastwickeln 331

E

Eigenspannung 435
 Eigenspannungen 333
 eindimensionale Permeabilitätsmessung 233
 eindimensionales Fließen 228
 einfach überlappte Vibrationsschweißnähte 488
 Einfadenkettenstich 126
 Einheitszelle 266
 Einlegebereich 152, 388
 Einsatzfelder 201
 Ein-Schritt-Verfahren 410
 Einseitennähkopf 116
 Einstichtiefe 114
 Elastizität 218
 Elektronenstrahl 333
 Emissionen 435
 Emissionsgrad 217
 Emissionskoeffizient 215
 endformnah 433
 Endkontur 107
 Energieabsorptionsvermögen 85
 Energiebilanzgleichung 216
 Energietransfer 212
 Entsorgung 457
 Epoxidharze 50
 Erstlagenproblem 350
 exotherme Reaktion 223
 Extruder 386

F

Fadenspannung 114
 Farbeindruck 442
 Faserbündel 349
 Faser-Desorientierungen 111
 Faserimprägnierung 319
 Faserkunststoffverbund 281, 283
 – Faserorientierung 284
 – Richtungsabhängigkeit 284
 – werkstoffliche Inhomogenität 283
 Faser/Matrix-Haftung 67
 Faserspritztechnologie 96
 Faserverstärkungsstruktur 95
 Faservolumengehalt 228, 373 f., 387
 Fernfeldschweißen 478
 Feststoffreibung 492
 Fiber Placement 349
 Fiber-Placement-Techniken 103
 fiber wash-out 234
 Filmbildner 35
 Final-Preform-Assembly 107
 FKV-Preforms 110
 FKV-Verarbeitungsverfahren 203
 Flächeninjektionsverfahren 370
 Flamme 351
 Flamme-Verfahren 340
 flammhemmende Eigenschaften 386
 Flechten 85
 Flechttechniken 103
 Fließbereich 388
 Fließfront 229, 255
 Fließfrontposition 237
 Fließgeschwindigkeit 211
 Fließpressen 204, 221, 383
 Fließprozesse 227
 Fließweg 365
 Fließwiderstand 373
 Flügel 358
 Folienbeschichtung 450
 Formkomplexität 203
 Formkomplexität der herzustellenden Fügenaht 482
 Formschluss 476
 Fräsen 433, 437
 Freiheitsgrade 329
 Fügenahtfestigkeit 476, 479, 493
 Fügenahtgeometrie 479
 Fügeprozess 107
 Fügweg 492, 493
 Fügungen 289
 – Clinchen 294
 – hybride Fügeverfahren 295
 – Kleben 291
 – Klebstoffsysteme 291
 – mechanische 289
 – Reibnieten 294

 – Schweißen 293
 – Stanznieten 294
 – Stanzverstiften 294
 – thermomechanisches Ausformfügen 295
 Führungselemente 336
 funktionsintegrierte Strukturen 361

G

ganzheitliche Entwicklungskonzepte 202
 Geflechte 102
 Gefügestruktur 56
 Gegenlaufsägen 436
 Gegenstromverfahren 375
 Gelcoat 367
 Gelege 73
 Gelpunkt 44
 Gelspinnen 39
 Generierung der Legepfade 350
 Geodätisch 328
 geometrie-adaptives Ablegen 350
 geregelte Prozesskette 335
 Gesamtpreform 107
 Gesetz von D'Arcy 227, 232, 253
 Gestaltungskonzepte 490
 getrenntes Aufheizen 414
 Gewebe 73, 77, 79, 102
 Gewebeprepreps 138
 Glanz 442
 Glanzvermögen 443
 Glasfasern 13, 34
 Glasübergangstemperatur 435
 Glasumwandlungstemperatur 43
 Graphitfasern 36
 Graphitstaub 435
 Grenzfläche 67, 477
 Grenzflächenreibung der Fügeflächen 478
 Grenzscherwinkel 394
 Grenzschiicht 67
 Großflächennähautomaten 107
 großflächige Strukturen 370
 Großserienfertigung 373
 großserientaugliche Verfahren 393

H

Haftvermittler 35, 68
 Halbzeuge 384
 Halbzeugspule 344, 351
 Handhabbarkeit 119
 Handhabung 109
 Hartmetallfräser 438
 Härtung 43, 224
 Härtungsverlauf 143
 Harzbad 332
 Harzinjektionsprozess 221

Harzinjektionsverfahren 204, 241, 252, 357, 365
 Harzpastenfilm 141
 Hauptachsenpermeabilitätswerte 230
 Heißgas 337, 347
 Heißgas-Verfahren 340
 Heißgas-Wickelanlagen 340
 Heißluft 336, 340
 Heizelementschweißen 479, 482
 Herstellungsprozesskette 393
 Heteropolymerisation 50
 Hinterpressen 450
 Hochfrequenz-Heizverfahren 337
 Hochfrequenzschweißen 480, 482
 hochreaktives Harzsystem 375
 homogene Dickenverteilung 408
 Homopolymerisation 50
 Hutprofile 418
 Hybridfasersysteme 78
 Hybridgarngewebe 401, 403
 Hybridverbundwerkstoff 280
 Hybridverstärkung 32
 Hystereseverluste 480

I

Imprägnieren 208, 401, 402
 Imprägnierphase 404
 Imprägnierprozess 211
 Imprägnierrad 153
 imprägnierte Halbzeuge 383
 Imprägnierung 173, 309
 Imprägniervorgang 331
 Induktion 337
 Induktionsschweißen 480, 482
 Induktionsschweißprozess 497
 induktive Erwärmung 257, 495
 Inertgas 340
 Infrarot-Aufheizverfahren 339
 Infrarotheizung 339
 Infrarotstrahler 337
 Infrarotstrahlerfeld 406, 410, 414
 Infrarotstrahlerfelder 398
 Infrastruktur und Bauwesen 358
 Injektionsdruck 255, 374, 375
 Injektionsgewebe 365
 Injektionspunkte 371
 Injektionssimulation 254
 Injektionstemperatur 222
 Injektionsverfahren 321
 Injektionsvolumen 255
 inkompressibles Fluid 209
 Innendruck 374
 Innenform 403
 Inniger Kontakt 477
 Inserts 365
 in-situ Konsolidierung 262, 335
 Instationäre Schmelzereibung 492
 Integralbauweise 4
 Integrationsgrad 346
 Integration von Sensorik 346
 Interdiffusion 68
 interpenetrating network 52
 Intervallheißpressverfahren 393
 Investitionsaufwand 367
 Investitionskosten 370, 372ff.
 isothermes Diaphragmaformen 397

K

Kalthärtung 48
 Kalt- und Warmhärtung 224
 Kavitation 62
 Keimbildner 57
 Kern 326
 Kernausschmelzverfahren 375
 Kerne 409
 Kernmaterial 405
 Kettenstich 109, 126
 Kevlar®-Nähgarn 117
 Klebeeigenschaften 476
 Kleben von thermoplastischen FKV 476
 Knickarmroboter 125
 Kohlenstoffasern 13, 36
 Kohlenstoffaserverbrauch 17, 18
 Kompaktierung 110, 120
 Kompaktierungsrolle 347
 Kompaktierungsverhalten 113
 Kompatibilität 106
 komplexe Formteile 405
 komplexe Geometrie 365
 Konduktion 213, 263
 Konfektion 119, 120
 Konfektionstechnik 106
 Konsolidierung 173, 208, 264, 386
 Konsolidierungsdruck 351
 Konsolidierungskraft 335
 Konsolidierungswerkzeug mit Tauchkanten 403
 Kontakterwärmung 336
 kontinuierliches Biegeumformen 416
 konturierte Tapes 348
 Kontur-Tapelegen 343
 Konvektion 214, 263
 Körperbindung 78
 Korrosions- und Witterungsbeständigkeit 358
 Kostenmodelle 23
 Kostenvergleichsrechnung 19
 Krafteinleitungselemente 433
 Kraftflusslinien 90
 Kraftschluss 476
 Kreuzwickeln 327
 Kristallinität 336
 Kristallisationsgrad 499

Kristallisationsverhalten 57, 264
 Kühlschmierstoffe 435
 Kunststoff-Tapes 342
 kurzfaserverstärkte Polymere 438
 kurzfaserverstärkte Spritzgussteile 479

L

Lackfilm 449
 lackierte Oberflächen 366
 Lackierung 448
 Lagenaufbau 284
 – allgemeiner 284
 – ausgeglichener 285
 – Koppeleffekte 284
 – symmetrischer 285
 Lamellen 56
 Laminataufdickung 328
 Laminatdickenrichtung 113
 Lamine 346
 langfaserverstärkte Polymere 438
 langfaserverstärkte Thermoplaste 334
 Längsschnitte 348
 Langwelligkeit 447
 Laser 337, 351
 Laserprofilometrie 443
 Laserschweißen 481f.
 Laserstrahlschneiden 441
 Lasertechnik 338
 LCM-Simulation 253f.
 Lebenszykluskostenrechnung 23
 Legegeschwindigkeit 348
 Legkopf 348
 Leichtbau 281
 – Gestalt- 281
 – System- 283
 – werkstofflicher 281
 Leinwandbindung 78
 Leistungsdichte 340
 LFT-Substrat 444
 Life-Cycle Assessment 457f.
 Lineare Polyester 62
 Liner 527
 Linienanguss 371
 Liniensensoren 235
 Liquid Composite Molding 252
 lokales Verschweißen 414
 lösbare Verbindungen 469
 Lösungsmittelimprägnierung 136
 Low Profile 225
 low profile additives 47
 Low Shrink 225
 Low Shrink-Rezepturen 446
 Luftfahrtbereich 361
 Luftstaub 434

M

Maschinenschutz 434
 Matched Metal Molding 399
 Materialdaten 246
 Materialdurchsatzraten 341
 Materialkreislauf 455
 Matrixviskosität 334
 Mattentypen 74
 maximale Festigkeit 478
 maximale Scherwinkel 395
 melt flow index 58
 melt volume index 58
 metallisches Plattenpermeometer 237
 Metallstempelverfahren 397
 Mikrowellen 333, 337
 Mischbauweise 140, 469
 Mischkammer 375
 Montagenähte 121
 Morphologie 56
 morphologisches Verhalten 208
 Multiaxial-Gelege 83, 111
 Multi-Tapelegen 343
 Multi-Tapelegeverfahren 349
 Multi-Textile-Preforming 100

N

Nachbearbeitung 367
 Nachbearbeitungsschritte 433
 Nachdrücken 369
 Nachführsysteme 395
 nachhaltige Entwicklungskonzepte 202
 Nachhaltigkeit 455
 Nachhärtungszyklus 47
 Nachkristallisation 57
 Nadel-GMT 448
 Nadelvliese 75
 Nähfaden 111
 Nähfadenanhäufung 114
 Nähfadenauswahl 123
 Nähfadenverknötung 120
 Nahfeldschweißen 478
 Nähgutauflege 116
 Nähmaschine 110
 Nähparameter 121
 Nähstation 113
 Nähtechnik 98, 105
 Nasslackierung 445
 Nassverfahren 150
 Naturfasern 13, 39
 NC-Cutter 107
 NC-Tapelegen 343
 Near-Net-Shape-Fertigung 367
 net-shape 90
 Newtonsche Flüssigkeiten 218
 Newtonsches Material 218

Newton'sche Viskosität 227
 Nicht-isotherme Prozesse 478
 Niederhalter 398, 405
 Niederhaltersysteme 395
 Nieten 469 f.
 Nieten von thermoplastischen FKV 475
 No-bleed-Aufbau 310
 Non-Crimp-Fabrics 83
 Non-wovens 74
 Normalien 523
 Novolak 53

O

Oberfläche 372, 385
 Oberflächenbehandlung 442
 Oberflächenerscheinung 442
 Oberflächenglätte 443
 Oberflächengüte 266
 Oberflächenproblematik 442
 Oberflächenqualität 369, 374, 438
 Oberflächenspannung 69
 Oberflächenstruktur 443
 Oberflächentopographie 266
 Oberflächentopologie 266
 Oberflächenveredelung 433
 Ofen 333
 offene Flamme 337
 Offshore 9, 10
 Ökobilanzierung 20
 Ökologie 458
 Oligomere 43
 One-Step-Textiltechnik 101
 on-line konsolidiert 351
 Organobleche 147, 241, 249, 393, 448
 OSS®-Stich 127
 out-of-plane Eigenschaften 114

P

P4-Verfahren 101
 Papier-GMT 448
 Papiermacher-Verfahren 151
 Permeabilität 211, 227
 Permeabilitätskennwerte 237
 Permeabilitätsmessung 232
 Pfadgenerator 350
 Pfadprozessor 350
 physikalische Alterung 57
 Plastifizierer 386
 Plastizität 218
 Polkappen 328
 Polkappenbereich 332
 Polyadditions-Duroplaste 50
 Polyadditions-Thermoplaste 59
 Polyamid 61

Polyarylsulfid 63
 Polyaryletherketon 64
 Polybutylenterephthalat 62
 Polyethersulfon 60
 Polyethylenfasern 39
 Polyethylenerephthalat 62
 Polyimid 53
 Polykondensations-Thermoplaste 60
 Polymerisations-Duroplaste 47
 Polymerisations-Thermoplaste 58
 Polypropylen 58
 Polypropylenschäume 411
 Poren 445
 Portalachsenanlagen 348
 Portalanlage 341
 Portfolioanalyse 203
 Position der Verstärkungsbleche 414
 Positioniernähte 121
 Power-Law-Ansatz 227, 248
 Precursor 36
 Preform 95, 97, 99, 101
 Preform-Einzelteile 119
 Preform Engineering 107 f.
 Preform-Konfektion 106
 Preforms 204, 359, 366
 Preformtechnik 95
 Prepregs 105, 135, 310, 333, 342
 Pressenelastizität 167
 Presserfuß 112, 120
 Pressgeschwindigkeit 248
 Presskraft 248, 385
 Pressmassen 14
 Pressspalt 388
 Pressspalthöhe 248
 Pressverfahren 383
 Pressvorgang 389
 Profilrollenpaare 416
 ProSimFRT 262
 Prozessauslegung 252
 Prozessgeschwindigkeit 217
 Prozessgrößen 334, 444
 Prozessketten 241
 Prozessmodell 245
 Prozessparameter 311, 321, 335, 433
 Prozessregelgrößen 268
 Prozessregelung 244 f.
 Prozessschritte 396
 Prozesssimulation 245, 247
 Prozessüberwachung 244
 Prozess- und Materialkenngrößen 249
 Prüfbedingungen 487
 Prüfmethode 487
 pseudoplastisches Verhalten 226
 Pullforming Verfahren 322
 Punktschweißen 414
 Pyrolyse 464

Q

QM-Tools 243
 Qualitätsmanagement 243
 Qualitätsmerkmal 120
 Quasistationäre Schmelzreibung 492

R

Race-Tracking-Effekt 234
 Randbedingungen 266
 Randüberhitzung 496
 Randzonenschädigung 441
 Rauigkeitswerte 443
 Reaktionsgemisch 366
 Reaktionsgeschwindigkeit 224
 Reaktionswärme 46, 222
 Recycling 461, 465
 Reflexion 443
 Reglermodell 245
 Reibung zwischen Werkzeug und Laminat 395
 Reifezeit 142
 Rekristallisationstemperatur 499
 Reproduzierbarkeit 383
 Reptationszeit 477
 Resin Transfer Molding 366
 Resole 53
 Restdruckfestigkeit 79
 Restspalthöhe 167
 Rheologie 218 f.
 rheologisches Verhalten 208
 Rheometer 248
 Ringfadenaugen 330
 Ringöffnungspolymerisation 63
 Rippen 405
 Roboter 116
 Roboterarm 113
 Robotereinheit 348
 robotergestütztes Nähssystem 119
 Rohre 325
 Rollformen 415
 Rollformen von Organoblechen 417
 Rollformwerkzeuge 417
 Rotationsflechten 88
 rotationssymmetrische Körper 325
 Rotoren 358
 Rovingband 326
 Rovingkraft 332
 Rovings 330
 Rovingspannung 332
 RTM-Bauteile 448
 RTM-Prozesse 373
 RTM-Prozesszyklus 366
 RTM-Schlauchblasverfahren 363
 RTM-Verfahren 359, 375
 Rubber Pad Forming 399
 Rundgestricke 90

S

Sägen 433, 436
 Sandwichaufbau 363
 Sandwichelemente 361
 Sandwichkern 371
 Sandwichsitzschale 410
 Sandwichstrukturen 371
 Sandwich-Umformen 408 f.
 Schädigungsformen 283
 – Ablösung 283
 – Debonding 283
 – Delamination 284
 – Faserbruch 284
 – Zwischenfaserbruch 283
 Schaumkern 373
 Schaumstoffe 409
 Scherrahmen 249
 Scherung des Gewebes 394
 Scherverformung 395
 Scherviskosität 58
 Scherwinkel 394
 Schiebefestigkeit 99
 Schienenfahrzeugbau 361
 Schiffbau 361
 Schlauchblas-RTM-Verfahren 374
 Schleifen 433
 Schleifmittel 439
 Schlichte 35
 Schmelzeimprägnierung 150
 Schmelzharzimprägnierung 137
 Schmelzindex 58
 Schmelzviskosität 395
 Schmelzvolumenindex 58
 Schneckenengeometrie 386
 Schneide 347
 Schneideinheit 345
 Schneidmechanismus 344
 Schneidstoffe 433
 Schneidstoffe und Schneidengeometrie 436
 Schneidvorrichtung 351
 schnellschließende hydraulische Pressen 396
 Schnittfläche 437
 Schnittgeschwindigkeit 436, 438
 Schrauben 469
 Schrumpf 369
 Schutzfolie 347
 Schweißdruck 492 f.
 Schweißen von kontinuierlich faserverstärkten
 Thermoplasten 470
 Schweißen von thermoplastischen Faser-Kunststoff-
 Verbunden 477
 Schweißhilfe 480
 Schweißnahteigenschaften 499
 Schweißphase 495
 Schweißtiefe 488, 490
 Schweißverfahren 469

Schweißwerkzeuge 497
 Schweißzeit 492
 Schwergeschwindigkeit 225
 Schwindung 47, 144
 Seemann Composites Resin Infusion Molding Process 370
 Sensoren 244
 Sensorik 202
 sequentielle Herstellung von Preforms 99
 sequentielle Preformherstellungsverfahren 98
 sequentielles Sandwich-Umformen 409
 Silanverbindungen 68
 Silikonstempelumformen 400
 Simulation 247
 Simulation der Fließpressverfahren 247
 Single Line Injection 374
 Solgehalt 44
 Solidifikation 173, 208
 spezifische Wärmekapazität 217
 sphärische Geometrien 394
 Sphärolithe 56
 Spinalgewebe 82
 Sport- und Freizeitbereich 363
 Sportwagen 360
 Spritzgießen 204
 SRIM-Prozess 375
 Stabgeflecht-Fördergurt 418
 Stanzen 433
 stationäre Permeabilitätsmessung 233
 stationäres Fadenauge 330
 Staubentwicklung 440
 Stehfäden 86
 Steifigkeitserhöhung 408
 Steiger 366
 Stempelumformen mit Elastomerblock 399
 Stempelumformverfahren 398, 400
 Steuerungs- und Regelungstechnik 331
 Stichbildung 119
 Stichbildungsparameter 110
 Sticheinzug 110
 Stichtypen 109, 126
 Stiftkronen 327
 stöchiometrisches Verhältnis 50
 Strahlmittel 439
 Strahlung 214, 263, 336, 397
 Strahlungserwärmung 480
 Strangziehverfahren 317
 Streckung 394
 Stricktechniken 103
 Stricktechnologie 89
 Struktur 97, 102, 277, 361
 strukturviskoses Fluid 58
 strukturviskoses Verhalten 226
 Stückzahlen 101, 252, 383, 499

Sub-Preform 97, 107
 Substratwelligkeit 443
 superelastische Folien 397

T

Tack 350
 Tackifier 350
 Tailored-Blank-Technologie 412
 Tailored Fibre Placement 98
 Tailored Reinforcements 106 f.
 Taktzeit 396
 Tapebreiten 348
 Tape Laying 347
 Tapelegeanlagen 343
 Tapelegekopf 344, 351
 Tapelegen 342
 Tapelegeprozess 262
 Tapepuffer 351
 Tapes 350
 Tape-Spule 344
 Tape-Vorschubeinheit 344
 Tauchkanten 388
 Tauchkantenwerkzeug 405, 522
 Technische Gesticke 90, 92
 Teilchenstrahl 337
 Teilkristalline Polymere 56
 Temperaturführung 336
 Temperaturgrenzen 498
 Temperaturprofil 268
 Temperaturverteilung 252
 Temperung 143
 Textile Halbzeuge 73, 205, 365
 TFP-Technologie 91
 T_{Heiz} 270
 Thermal Expansion Resin Transfer Molding 373
 thermischer Ausdehnungskoeffizient 435
 thermische Schwindung der Matrix 449
 thermisches Trennverfahren 441
 Thermoformen 249, 393
 Thermoformhalbzeuge 147
 Thermoformverfahren 407
 Thermoplaste 42, 225
 thermoplastische Polyurethane 59
 Thermoplast-Tapelegen 351
 Thermoplast-Tapes 351
 Thermoplast-Verarbeitung 350
 tie molecules 56
 time-temperature transformation 46
 $T_{\text{Kühl}}$ 270
 Topfzeit 221, 332
 Topografie 446
 Tow Placement 349
 Tows 349
 Trägermaterial 125
 Tränkbäd 330

Tränkungsprozess 211
 transiente Permeabilitätsmessung 233
 Transkristallisation 70
 Transportrahmen 403
 Trennmittel 448
 TTT-Diagramm 46
 Tufting 124, 127
 Tufting-Nähköpfe 125

U

Überlappungslänge 488
 ultrahigh molecular weight polyethylene 39
 Ultraschall 337
 Ultraschallschweißen 478, 482
 Umformen 383
 Umformprinzipien 394
 Umformstufen 417
 Umformverfahren 395
 Umformverhalten 395
 Umorientierungs- und Abgleitprozesse 396
 Umrissfräsen 440
 Umwelt 458
 Unfallverhütung 508
 Unfallverhütungsvorschriften 510
 ungesättigte Polyesterharze 47, 224
 UV-Licht 337
 UV-Strahlung 333

V

Vacuum Assisted Resin Transfer Molding 359, 368
 Vakuum 365
 Vakuumaufbau 312
 Vakuumfolien 312
 Vakuuminfusionsverfahren 363
 Vakuuminjektionsverfahren 243, 361, 365
 Vakuum- und Druckinjektion 368
 variabler Schweißdruck 494
 variable Werkzeugkavität 400
 Verarbeitungsdrücke 388
 Verarbeitungstemperatur 221f., 385
 Verarbeitungstemperaturen 334
 Verarbeitungsverfahren 202, 247
 Verbindungsmoleküle 56
 Verbindungsnahte 121
 Verbindungstechnik 469
 Verfahrensbewertung 482
 Verfahrensvergleich 499
 Verformungsverhalten 99
 Verjüngung 57
 Verknotungslage 120
 Verlegeköpfe 348
 verlorener Kern 326, 527
 Vernetzung 43, 384
 Vernetzungsdichte 51

Vernetzungsreaktion 388
 Verrippungen 365, 393
 Verschiebung der Fasern 394
 Verschnittreste 348
 Verstärkungsarchitektur 444
 Verstärkungsbleche 412
 Verstärkungsfasern 31
 Versteifungsprofile 414
 Versteifungsrippen 405
 Versteifungssicken 407
 Verteilerstruktur 370
 Verträglichkeitsmacher 58
 Verwertung 457, 461
 Vibrationsschweißen 479, 482, 491
 Vibrationszeit 494
 Vinylester-Harze 48
 Vinylester-Urethan-Hybridharze 48
 Viskosität 160, 211, 218, 385
 Viskositätsverlauf 143
 Viskositätswerte 219
 Vitrifikation 46
 Vollkunststoffbehälter 341
 Volumenschwindung 225, 444
 Vorbehandlung 476
 Vorformstempel 406
 Vorheizstrecke 335
 Vorlast 476
 Vorschub 436
 Vorschubeinheit 344
 Vorschubgeschwindigkeit 499
 Vorspannkräfte 394

W

Waben 409
 Wabenwände 411
 Walzgerüste 416
 Walzprofilieren 417
 Wanddickenabstufung 408
 Wareneingangskontrolle 243
 Wärmeausdehnungskoeffizienten 403
 Wärmefluss 217
 Wärmeleitfähigkeit 216f.
 Wärmetransfer 216
 Wärmeübergangskoeffizient 217
 Warmhärtung 48
 Wasserstrahlschneiden 439
 Webarten 77f., 103
 Wegmesssystem 388
 Wellen 326
 Welligkeit 442f.
 Werkstoffkonstruktion 287
 Werkstoffverbund 280
 Werkzeuggeometrie 433
 Werkzeugheizung 524
 Werkzeuginnendruck 385, 388

Werkzeugkosten 373, 417
Werkzeugspalt 386
Werkzeugtauglichkeit 434
Werkzeugtemperatur 385, 388
Wickelgeometrie 336
Wickelgeschwindigkeit 334, 338, 340
Wickelgeschwindigkeiten 340
Wickelkern 335
Wickelmuster 327
Wickeltechnik 325
Wickelverfahren 204
Wickelwinkel 326, 327
Widerstandsschweißen 482
Widerstandsverluste 495
Windkraftanlagen 358
Wirrfasermatten 74
Wirrlagenvlies 75

Y

YAG-Laser 339

Z

Zähigkeit 51
Zähigkeitserhöhung 62
Zeit-Temperatur-Diagramm 47
Zerspanung 433
Zerspanungsmechanismen 436
zerstörungsfreie Prüfmethode 487
Z-Fäden 80
Zielstückzahl 204
Z-Pinning 475
Zugscherversuch 487
Zuschnittpaket 388
zweidimensionale Permeabilitätsmessung 234
zweidimensionales Fließen 229
Zweispindelanordnung 341
Zykluszeit 366, 373 ff., 404, 414