

# Faserverbundwerkstoffe mit thermoplastischer Matrix

Hochleistungswerkstoffe für rationelle Verarbeitung

Dipl.-Phys. Hans-Peter Zepf

Dr.-Ing. Christian Baron  
Dr.-Ing. Herbert Börger  
Dipl.-Ing. Ulf P. Breuer  
Dr.-Ing. Bernhard Hinz  
Dipl.-Ing. (FH) G. Kempe

Dr.-Ing. Andreas Lücke  
Dipl.-Ing. M. Ostgathe  
Dipl.-Ing. Karl Heinz Sprenger  
Prof. Dr.-Ing. G. Ziegmann

Mit 142 Bildern, 27 Tabellen und 107 Literaturstellen



Kontakt & Studium  
Band 529

Herausgeber:  
Prof. Dr.-Ing. Wilfried J. Bartz  
Technische Akademie Esslingen  
Weiterbildungszentrum  
DI Elmar Wippler  
expert verlag

expert  verlag

## Inhaltsverzeichnis

---

	<b>Faserverbundwerkstoffe oder Hochleistungsfaserverbundwerkstoffe?</b>	<b>1</b>
	H.-P. Zepf	
	Einführung	1
<b>1</b>	<b>Produktvorteile durch Hochleistungs-Faserverbundwerkstoffe Bewertung des Werkstoffes in der Konkurrenz zu thermoplastischen Kunststoffen, zu Holz und Metall</b>	<b>3</b>
	H.-P. Zepf	
1.1	Einleitung	3
1.2	Das Leichtbaupotential der Konstruktionswerkstoffe	5
1.3	Wirtschaftlichkeit der Faserverbundbauweise	10
1.4	Einsatzgebiete für Faserverbundwerkstoffe	12
1.4.1	Entscheidungskriterien für den Einsatz von FVW in einem umkämpften Markt	12
1.4.2	Einsatzgebiete für Hochleistungsfaserverbundwerkstoffe	14
1.5	Energiebilanz	23
1.6	Schlußbetrachtung	26
1.7	Literaturverzeichnis	27
<b>2</b>	<b>FVW – Eine Werkstoffklasse mit vielen Gesichtern</b>	<b>28</b>
	K.-H. Sprenger	
2.1	Einleitung	28
2.2	Matrixsysteme: Duroplaste – Thermoplaste.	28
2.3	Eigenschaften und Ausrüstung der Fasern	30
2.3.1	Glasfasern	30
2.3.2	Aramidfasern	32
2.3.3	Kohlenstofffasern	32
2.4	Ausrüstung der Fasern	32
2.5	Verarbeitungsverfahren	33
2.5.1	GMT	35
2.5.2	BMC	35
2.5.3	SMC	35
2.5.4	RIM	35
2.5.5	R-RIM	35
2.6	Wahl des Verstärkungsmaterials	36
2.7	Gelegekomplexe	38

2.8	Gewebe	38
2.9	Ausrüstung der Gewebe	39
2.10	Hybridwerkstoffe	41
2.11	Anwendungen	42
2.12	Literatur	42
<b>3</b>	<b>Duroplastische und Thermoplastische Faserverbundwerkstoffe – Vorteile – Eigenschaften – Verarbeitung und Anwendungsgebiete beider Werkstoffgruppen</b>	<b>44</b>
	G. Kempe	
3.1	Einleitung	44
3.2	Beschreibung der Faserverbundwerkstoffe	44
3.2.1	Materialien für die FV-Duroplaste	44
3.2.2	Materialien für die FV-Thermopaste	45
3.2.3	Vergleich zwischen FV-Duroplast und FV-Thermoplast	46
3.3	Verarbeitung von Faserverbundwerkstoffen	51
3.3.1	Verarbeitung von FV-Duromeren	52
3.3.1.1	Faserspritzen	52
3.3.1.2	Handlaminieren	53
3.3.1.3	Vakuum-Verfahren	54
3.3.1.4	TER-Verfahren	55
3.3.1.5	Autoklavtechnik	55
3.3.1.6	Preßverfahren	56
3.3.1.7	Injektionsverfahren	58
3.3.1.8	Pultrudieren	59
3.3.1.9	Wickeln	60
3.3.1.10	Flechten	61
3.3.2	Verarbeitung von FV-Thermoplasten	62
3.3.2.1	Spritzgießen	63
3.3.2.2	Preßtechnik	64
3.3.2.3	Ablegeverfahren mit Prepreg-Einzellagen	65
3.3.2.4	Konsolidieren von Platten bzw. Formkörper mittels Vakuum	67
3.3.2.5	Kontinuierliche Herstellung von Platten	67
3.3.3	Umformverfahren für Thermoplaste	68
3.3.3.1	Umformen im Gesenk	68
3.3.3.1.1	Umformen im beheizten Gesenk	68
3.3.3.1.2	Umformen im kalten bzw. temperierten Gesenk	69
3.3.3.2	Umformen bzw. Formen mittels einem Ablegeverfahren	69
3.3.3.3	Vakuumformen	70
3.3.3.3.1	Tiefziehen	70
3.3.3.3.2	Superplastisches Umformen	70
3.3.3.4	Falttechnik	71
3.3.4	Wickeltechnik	71
3.3.4.1	Wickeln auf einem beheizten Kern	72

3.3.4.2	Wickeln mit der Flammheizung auf einen temperierten Kern	72
3.4	Anwendung von Faserverbundwerkstoffen	73
3.5	Quellenangabe	74
<b>4</b>	<b>Eigenschaften und Anwendungen von langfaser- verstärkten Thermoplasten</b>	<b>75</b>
	A. Lücke	
	<b>Werkstoffe für Spritzguß, für Plastifizier/ Preßverfahren und GMT</b>	<b>75</b>
4.1	Das Prinzip der Pultrusion	75
4.2	Spritzgußverarbeitung von langfaserverstärkten Thermoplasten	77
4.3	Eigenschaften	78
4.4	Substitution von kurzfaserverstärktem PA66 durch langfaserverstärktes PP	80
4.5	Substitution von Metall-Druckguß mit langglasfaser- verstärktem PA	81
4.6	Glasmatteverstärkte Thermoplaste (GMT)	83
4.7	Plastifizier/Pressmassen @Compel	83
4.8	Rezyklierbarkeit von @Compel	85
<b>5</b>	<b>Aufbau und Eigenschaften von thermoplastischen Hochleistungs-FVW</b>	<b>86</b>
	K.-H. Sprenger	
5.1	Einleitung	86
5.2	Thermoplastische Matrices	86
5.3	Herstellung von thermoplastischen Prepregs	87
5.4	Grenzfläche Faser - Matrix	88
5.5	Einfluß von Schichtaufbau und Fertigungstechnik	89
5.6	Misch- und Sandwichaufbauten	92
5.7	Halbzeuge (Tafelformate)	93
5.8	Anwendungen	93
5.9	Literatur	93
<b>6</b>	<b>Herstellung und Verarbeitung thermoplastischer Prepregs</b>	<b>95</b>
	Chr. Baron	
6.1	Einleitung	95
6.2	Herstellung thermoplastischer Prepregs	95
6.3	Weiterverarbeitung der Prepregs zu Laminatplatten u. Bauteilen	100
6.4	Anwendungen	103
6.5	Literatur	104

**7 Halbzeug- und Bauteilherstellung – Umformverfahren 106**  
U. Breuer, M. Ostgathe

7.1	Einleitung	106
7.2	Halbzeugherstellung	106
7.2.1	Thermoplastische Prepregs	108
7.2.1.1	Lösungsmittelimprägnierung	108
7.2.1.2	Pulverimprägnierung	108
7.2.1.3	Textile Imprägnierverfahren	109
7.2.2	Organobleche	109
7.2.2.1	Schmelzeimprägnierung	110
7.2.2.2	Folienimprägnierung	110
7.2.3	Eigenschaftsangepaßte Halbzeuge	111
7.2.3.1	Anlagentechnik für die Konsolidierung	111
7.2.3.2	Doppelbandpreßtechnik	112
7.3	Formgebungsverfahren	116
7.3.1	Autoklavverfahren	116
7.3.2	Diaphragmaverfahren	118
7.3.3	Hydroformverfahren	121
7.3.4	Umformen mit Gummi-Werkzeugen ("Rubber Pad Forming")	121
7.3.5	Stempelumformen mit Metallstempeln	123
7.4	Grenzen der Verformbarkeit- Umformsimulation	127
7.5	Zusammenfassung	130
7.6	Literaturverzeichnis	131

**8 Umformung mit Positiv-/Negativ-Preßwerkzeugen (Match Mold Verfahren) 132**  
H. Börger

8.1	Ein Preßverfahren mit Endlosfaser	132
8.2	Anlagentechnik	133
8.2.1	Verfahrensablauf	133
8.2.1.1	Materialzuschnitte	134
8.2.1.2	Anforderungen aus Verfahrensablauf und Umform-Methode	135
8.2.2	Aufbau von Anlagen	136
8.2.2.1	Vorbehandlung des Materials	136
8.2.2.2	Aufheizung der Thermoplast-Matrix auf die Verarbeitungstemperatur	137
8.2.2.3	Die Umformstation	137
8.2.2.4	Beschnitt des Rohteiles vor, während und nach der Umformung	138
8.2.2.5	Einplatzmaschinen	138
8.2.2.6	Automatische Fließfertigung	139
8.2.3	Anwendungsbereich und Wirtschaftlichkeit	139
8.2.3.1	Stückzahlbetrachtungen	139
8.2.3.2	Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen	139

8.3	Werkzeugtechnik	139
8.3.1	Grundaufbau der Match Mold Formen	139
8.3.1.1	Matrize/Stempel /Niederhaltersystem	139
8.3.1.2	Schieber und Losteile	140
8.3.1.3	Sichtflächen und Oberflächenqualität	140
8.3.2	Verfahrensbedingte Anforderungen	140
8.3.3	Produkt- und Werkzeugentwicklung	142
8.3.3.1	Drapiersimulation und Gestaltung	142
8.3.3.2	Prototypformen	142
<b>9</b>	<b>Umformung im Diaphragma-Verfahren</b>	<b>143</b>
	G. Ziegmann	
9.1	Einführung	143
9.2	Das Prinzip des Diaphragmaverfahrens	143
9.2.1	Aufheizverhalten von faserverstärkten Thermoplasten	145
9.2.1.1	Beschreibung der Aufheizmethoden	145
9.2.1.2	Energiebetrachtungen beim Aufheizen von faserverstärkten Laminaten	146
9.2.1.3	Das Temperaturverhalten von Laminaten im IR-Feld	148
9.2.1.4	Aufheizstrategie im IR-Feld	150
9.2.2	Beschreibung des Umformverhaltens von ebenen Laminaten	152
9.3	Entwicklung der Diaphragmatechnologie	153
9.4	Werkzeugkonzept für die Diaphragmatechnik	156
9.5	Zusammenfassung und Ausblick	159
9.6	Literaturverzeichnis	159
<b>10</b>	<b>Optimale Produkte aus thermoplastischen HL-FVK</b>	<b>161</b>
	H. Börger	
10.1	Das ideale Anforderungsprofil an einen (thermoplastischen) Hochleistungs-FVK	161
10.1.1	Allgemeines	161
10.1.2	Morphologie der HL-Faserverbundbauteile	162
10.1.3	Ultraleichtbau	162
10.1.4	Funktionseigenschaften	162
10.1.5	-Eigenschaftsanisotropie/-orthotropie	163
10.1.6	Typische Anforderungen/Vorteile,	163
10.2	Beispiele erfolgreichen Einsatzes von HL-Faserverbund- kunststoffen (Duro- und Thermoplast)	164
10.3	Erschließung neuer technischer Lösungen durch die Möglichkeiten von thermoplastischen HL-FVK	165
10.3.1	Großserienfertigung (kurze Zykluszeit/ex-situ Technologie)	165
10.3.2	Gewichtsoptimierung gegenüber Duroplast-FVK	165
10.3.3	Nachträgliches Verformen vorgeformter Halbtteile und Halbzeuge	165

10.3.4	Krafteinleitung/Fügen: Schweißen und Nieten	166
10.3.5	Wiederverwendung/Recycling	166
10.4	Wirtschaftlichkeit	166

**11 Auslegung und Dimensionierung von Bauteilen aus thermoplastischen Faserverbundwerkstoffen 168**  
B. Hinz

11.1	Einleitung	168
11.2	Grundlagen der Laminatberechnung	170
11.2.1	Bezeichnungen	170
11.2.2	Laminat-Typen	171
11.2.3	Faservolumen- und Gewichtsanteil	172
11.2.4	Steifigkeit und Festigkeit von Laminaten	172
11.2.4.1	UD-Laminat	172
11.2.4.2	0°/90°-Laminat	173
11.2.4.3	Bidirektionales Laminat	175
11.2.4.4	0°/±45°/90°-Laminat	175
11.2.5	Faserbezogene Materialkennwerte KE, KG, Ks, Kt	177
11.3	Grundregeln für den Laminataufbau und die Bauteilgestaltung	179
11.3.1	Grundregeln für den Laminataufbau	179
11.3.2	Grundregeln für die Bauteilgestaltung	182
11.4	Überschlägige Festlegung des Laminataufbaus von Faserverbundwerkstoff-Bauteilen	183
11.4.1	Bezeichnungen	183
11.4.2	Festlegung des Koordinatensystems	184
11.4.3	Trennung der Tragfunktion der verschiedenen Fasern	184
11.4.4	Überschlägige Bestimmung der Lagenzahl	184
11.4.5	Berechnung der Festigkeits- und Elastizitätskennwerte	185

**12 Produktbeispiel – Helmschale aus thermoplastischem HL-FVK 187**  
H. Börger

12.1	Einführung	187
12.2	Schutzhelme – Aufbau und Anforderungen	188
12.2.1	Aufbau der Helme	188
12.2.1.1	Grundaufbau	188
12.2.1.2	Stand der Technik bei der Helmkonstruktion	189
12.2.2	Anforderungen für Schutzhelme	191
12.3	Entwicklung der Materialspezifikation und der Dimensionierung des Halbzeuges	192
12.3.1	Angestrebte Vorteile (Gewicht, Steifigkeit, Festigkeit)	192
12.3.2	Festlegung eines Laminataufbaus/Werkstoffauswahl	192
12.3.3	Suche des geeigneten Halbzeugherstellers (1989/90!!)	192

12.3.4	Dimensionierung der Helmschale	193
12.3.5	Oberflächenqualität/Nachbehandlung (Lackierung/Beschneiden)	193
12.3.6	Kosten/Wirtschaftlichkeit	193
12.4	Das Engineering des Bauteils und die Fertigung	193
12.4.1	Computersimulation der Gewebedrapierung (geometr. Umformvorgang)	193
12.4.2	Projektablauf	195
12.4.3	Halbzeug-Zuschnitt, Werkzeuge, Produktionsmaschine	195
12.4.4	Beschnitt, Lackierung, Montage	195
<b>13</b>	<b>Produktbeispiel: Strukturbauteil für den Flugzeugbau</b>	<b>196</b>
	G. Ziegmann	
13.1	Einführung	196
13.2	Definition der Faserverbundbauweisen	197
13.2.2	Bewertung der Bauweisen	199
13.3	Bauteilbeispiele für faserverstärkte Thermoplaste	203
13.4.1	Landeklappenrippe D0 328	203
13.4.2	Exemplarisches stringerversteiftes Paneel	204
13.4	Ausblick	206
13.5	Literaturverzeichnis	206
<b>14</b>	<b>Bearbeitung von thermoplastischen Faser- verbundwerkstoffen</b>	<b>208</b>
	G. Ziegmann	
14.1.	Einführung	208
14.2	Nachbearbeitung	208
14.3	Recycling von Faserverbundwerkstoffen	213
14.3.1	Stoffliches Recycling	214
14.3.2	Thermisch-energetische Nutzung	215
14.3.2.1	Verbrennung unter reinem Sauerstoff	215
14.3.2.2	Hochtemperatur-Konvertierung	218
14.3.3	Abschließende Betrachtung	219
14.4	Literaturverzeichnis	220
	<b>Sachregister</b>	<b>222</b>