

# Faserverbund-Kunststoffe

Gottfried Wilhelm Ehrenstein

Werkstoffe - Verarbeitung - Eigenschaften

ISBN 3-446-22716-4

Inhaltsverzeichnis

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser.de/3-446-22716-4> sowie im Buchhandel

# INHALTSVERZEICHNIS

## Vorwort

Normen und Richtlinien im Text .....	XIII
Weitere Normen und Richtlinien .....	XVII
Liste der verwendeten Formelzeichen .....	XXI
Liste der verwendeten Abkürzungen .....	XXV

<b>1 VORBEMERKUNGEN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Besonderheiten .....	1
1.2 Wirtschaftliche Entwicklung .....	5
1.3 Besonderheiten der FVK als Konstruktionswerkstoff .....	7
1.3.1 Allgemeine Hinweise .....	7
1.3.2 Luftfahrt .....	10
1.3.3 Maschinenbau .....	12
1.4 Historische Entwicklung .....	14
1.5 Bezeichnungen .....	16
<b>2 VERSTÄRKUNGSFASERN .....</b>	<b>19</b>
2.1 Glasfasern .....	19
2.2 Aramidfasern .....	30
2.3 Kohlenstoff-Fasern .....	36
2.4 Naturfasern .....	42
2.5 Fasern im Vergleich .....	43

<b>3</b>	<b>MATRIX.....</b>	<b>50</b>
<b>3.1</b>	<b>Aufgabe der Matrix und die Matrixarten.....</b>	<b>50</b>
<b>3.2</b>	<b>Reaktionsharze .....</b>	<b>52</b>
3.2.1	Ungesättigtes Polyesterharz (UP-Harz) .....	54
3.2.2	Vinylesterharz (VE-Harz) .....	60
3.2.3	Epoxidharz (EP-Harz).....	63
3.2.4	Phenolharze (PF-Harz).....	68
<b>3.3</b>	<b>Merkmale der Härtung von Reaktionsharzen.....</b>	<b>72</b>
3.3.1	Exothermie, Viskositäts-erhöhung und Volumenveränderung	72
3.3.1.1	Exothermie .....	72
3.3.1.2	Viskosität .....	73
3.3.1.3	Volumenveränderung.....	75
3.3.1.4	Gelpunkt, Gelzeit und Topfzeit.....	76
3.3.2	Darstellung des Härtungsvorgangs im TTT-Diagramm .....	77
3.3.3	Aushärtung und Aushärtegrad .....	80
<b>3.4</b>	<b>Thermoplaste .....</b>	<b>89</b>
3.4.1	Kurzfaserverstärkte Thermoplaste .....	91
3.4.2	Langfaserverstärkte Thermoplaste .....	92
<b>3.5</b>	<b>Faser-Matrix-Haftung.....</b>	<b>96</b>
3.5.1	Textilglasfasern .....	96
3.5.1.1	Anbindung des Silans an die Glasfaser .....	96
3.5.1.2	Anbindung des Silans an den Kunststoff.....	97
3.5.1.3	Schichten .....	99
3.5.2	Kohlenstoff-Fasern .....	102
3.5.3	Aramidfasern .....	102
3.5.4	Naturfasern .....	102
<b>4</b>	<b>FASERN IM VERBUND .....</b>	<b>103</b>
<b>4.1</b>	<b>Bedingungen für die Verstärkungswirkung (nach Puck).....</b>	<b>103</b>
<b>4.2</b>	<b>Beanspruchung in Richtung der Fasern .....</b>	<b>103</b>
4.2.1	Endlose Fasern .....	103
4.2.1.1	Einzelfaser und Matrix .....	103
4.2.1.2	UD-Verbund.....	105

4.2.1.3	Faserbruch .....	107
4.2.1.4	Einfluß der Matrixdehnung .....	108
4.2.1.5	Besonderheiten der Druckeigenschaften .....	108
4.2.2	Kurze Fasern .....	111
4.2.2.1	Einzelne Faser .....	111
4.2.2.2	Praktische Bedeutung der Orientierung .....	117
4.2.2.3	Schwindung, Verzug .....	118
4.2.2.4	Pigmente .....	121
<b>4.3</b>	<b>Beanspruchung senkrecht zur Faser .....</b>	<b>123</b>
4.3.1	Dehnungsvergrößerung und Querrißbildung .....	123
4.3.2	Quer-Elastizitäts-Modul der Faser .....	127
4.3.3	Schubbeanspruchung parallel und senkrecht zur Faser .....	128
<b>4.4</b>	<b>Interlaminaire Reißfähigkeit .....</b>	<b>130</b>
<b>4.5</b>	<b>Thermische Eigenschaften .....</b>	<b>132</b>
<b>4.6</b>	<b>Wirkung der Faserverstärkung .....</b>	<b>135</b>
4.6.1	Das "Knie" im Spannungs-Dehnungs-Diagramm .....	135
4.6.2	Festigkeit .....	137
4.6.3	Steifigkeit (E-Modul) .....	141
4.6.4	Versagensverhalten .....	143
<b>5</b>	<b>VERARBEITUNG .....</b>	<b>148</b>
<b>5.1</b>	<b>Verarbeitung von Halbzeug .....</b>	<b>148</b>
5.1.1	Halbzeuge mit duroplastischer Matrix .....	148
5.1.1.1	Prepreg-Herstellung .....	150
5.1.1.2	SMC-Formmassen (Sheet Moulding Compounds) .....	151
5.1.2	Halbzeuge mit thermoplastischer Matrix .....	160
5.1.2.1	Hybridgarn .....	160
5.1.2.2	GMT – glasmattenverstärkte Thermoplaste .....	161
<b>5.2</b>	<b>Verarbeitung von faserverstärkten Reaktions-(Gieß-)harzen .....</b>	<b>162</b>
5.2.1	Manuelle Verfahren .....	162
5.2.2	Teilautomatisierte/ -mechanisierte Verfahren .....	163
5.2.3	Vollautomatisierte Verarbeitungs-Verfahren .....	167
5.2.3.1	Naßpressen .....	167
5.2.3.2	Warmpressen von vorimprägnierten Formmassen .....	168

5.2.3.2.1	Verarbeitung von SMC .....	170
5.2.3.2.2	Werkzeuge .....	172
5.2.3.2.3	Lackieren von SMC-Formteilen .....	172
5.2.3.2.4	Formteilgestaltung .....	173
5.2.3.2.5	Anwendungen von SMC .....	173
5.2.3.2.6	Spritzen von UP-GF (BMC/ZMC).....	173
5.2.4	Kontinuierliche Verfahren.....	175
5.2.5	Sonderverfahren .....	176
5.2.6	Feinschichten .....	178
<b>5.3</b>	<b>Verarbeiten von Verbunden mit thermoplastischer Matrix .....</b>	<b>179</b>
5.3.1	GMT-Herstellung .....	180
5.3.2	LFT .....	184
<b>5.4</b>	<b>Spezielle Verarbeitungsverfahren für Epoxidharze.....</b>	<b>188</b>
5.4.1	Elektrotechnik .....	188
5.4.2	Elektronik.....	191
5.4.3	Fertigungsmittelbau .....	194
<b>5.5</b>	<b>Nachbearbeiten.....</b>	<b>197</b>
5.5.1	Spanende Bearbeitung .....	197
5.5.2	Lackieren von SMC-Formteilen.....	199
<b>5.6</b>	<b>Recycling.....</b>	<b>201</b>
5.6.1	Stoffliche Wiederverwertung .....	202
5.6.2	Verbrennung.....	203
5.6.3	Chemische Verwertung.....	204
5.6.4	Organisation .....	204
<b>5.7</b>	<b>Arbeits- und Gesundheitsschutz .....</b>	<b>205</b>
5.7.1	Arbeitsplatzgrenzwert (AGW).....	205
5.7.2	Biologischer Grenzwert.....	206
5.7.3	Einzelne Komponenten.....	206
<b>6</b>	<b>MECHANISCHE PRÜFUNG .....</b>	<b>209</b>
<b>6.1</b>	<b>Besonderheiten des Verformungsverhaltens der UD-Schicht.....</b>	<b>209</b>
6.1.1	Rißbildung .....	209
6.1.2	Orthotrope Lamine .....	212

---

<b>6.2 Statische Belastung des Laminates</b> .....	<b>213</b>
6.2.1 Zug .....	215
6.2.2 Zug der UD-Schicht (NOL-Ring) .....	216
6.2.3 Druck .....	217
6.2.4 Schub .....	218
6.2.5 Biegung .....	222
<b>6.3 Statisches Langzeit-Verhalten</b> .....	<b>224</b>
<b>6.4 Dynamische Belastung</b> .....	<b>226</b>
6.4.1 Wöhlerkurven .....	228
6.4.2 Hysteresis-Meßverfahren .....	231
6.4.2.1 Meßverfahren .....	231
6.4.2.2 Ermittlung von Beanspruchungsgrenzen .....	234
<b>6.5 Prüfung</b> .....	<b>239</b>
6.5.1 Herstellung und Vorbehandlung der Probekörper .....	239
6.5.2 Anzahl der Probekörper .....	240
6.5.3 Bestimmung des Fasergehaltes .....	243
<b>7 AUSLEGUNG VON MEHRSCICHTVERBUNDEN</b> .....	<b>246</b>
<b>7.1 Einzelschicht (ES)</b> .....	<b>247</b>
7.1.1 Hookesches Gesetz bei ebenem Spannungszustand .....	248
7.1.2 Unidirektional verstärkte Schicht (UD-Schicht) .....	250
7.1.3 Wärmeausdehnungskoeffizient der UD-Schicht .....	253
7.1.4 Richtungsabhängigkeit der UD-Schicht-Kenngrößen .....	254
<b>7.2 Klassische Laminattheorie</b> .....	<b>257</b>
<b>7.3 Ausgeglicherer Winkelverbund (AWV)</b> .....	<b>259</b>
7.3.1 Wärmeausdehnungskoeffizienten des ausgeglichenen Winkelverbundes (AWV) .....	262
7.3.2 Kreuzverbund (KV) .....	264
<b>7.4 Gewebeschnitt</b> .....	<b>267</b>
<b>7.5 Wirrfaserschicht</b> .....	<b>268</b>
7.5.1 Steifigkeit .....	268
7.5.2 Wärmeausdehnungskoeffizient der Wirrfaserschicht .....	269

<b>7.6 Festigkeitsprobleme bei Mehrschichtverbunden .....</b>	<b>270</b>
7.6.1 Festigkeit einer UD-Schicht .....	270
7.6.2 Schichtenweise Analyse von Mehrschichtverbunden .....	276
7.6.3 Eigenspannungen in Mehrschichtverbunden .....	277
<b>8 TABELLEN .....</b>	<b>282</b>
<b>9 LITERATUR .....</b>	<b>285</b>
<b>10 STICHWORTVERZEICHNIS .....</b>	<b>290</b>