

AVK – Industrievereinigung  
Verstärkte Kunststoffe e.V. (Hrsg.)

# Handbuch Faserverbund- kunststoffe

Grundlagen, Verarbeitung, Anwendungen

3. Auflage

**PRAXIS**



**VIEWEG+  
TEUBNER**



## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Vorwort</b> .....	11
<b>2</b>	<b>Begriffe und Abkürzungen</b> .....	13
<b>3</b>	<b>Grundlagen</b> .....	17
3.1	Verbundwerkstoffe .....	17
3.2	Der Markt für Faserverbundkunststoffe .....	18
3.2.1	Einordnung in die Kunststoffindustrie und Marktbeschreibung .....	18
3.2.2	Anwendungen und Verfahren .....	20
3.2.3	Marktchancen .....	20
<b>4</b>	<b>Werkstoffe</b> .....	22
4.1	Rohstoffe .....	22
4.1.1	Harze .....	22
4.1.1.1	Ungesättigte Polyesterharze .....	22
4.1.1.2	Vinylesterharze .....	35
4.1.1.3	Diallylphthalatharze .....	44
4.1.1.4	Methyl-Methacrylatharze .....	45
4.1.1.5	Epoxidharze .....	53
4.1.1.6	Polyurethane .....	65
4.1.1.7	Phenol-Formaldehydharze .....	72
4.1.1.8	Aminoharze .....	74
4.1.2	Thermoplaste – Polypropylen .....	75
4.1.2.1	Einführung .....	75
4.1.2.2	Polymeraufbau .....	77
4.1.2.3	Eigenschaftspektrum .....	86
4.1.2.4	Verarbeitungsverfahren und Anwendungsgebiete .....	94
4.1.2.5	Aktuelle Entwicklungstrends und Zukunftsaussichten .....	99
4.1.3	Biopolymere .....	103
4.1.3.1	Beschreibung der Ausgangskomponenten .....	103
4.1.3.2	Voraussetzungen für die Verarbeitung .....	105
4.1.3.3	Darstellung ausgewählter Typen und ihrer Charakteristika .....	105
4.1.4	Reaktionsmittel .....	114
4.1.4.1	Chemische Grundlagen .....	114
4.1.4.2	Reaktionsmittel für Polymerisate .....	115
4.1.4.3	Reaktionsmittel für Polyadditionsreaktionen .....	119
4.1.4.4	Sicherer Umgang mit Reaktionsmitteln .....	121
4.1.5	Verstärkungsfasern .....	122
4.1.5.1	Textilglasfasern .....	122
4.1.5.2	Aramidfasern .....	133
4.1.5.3	Kohlenstoff-Fasern .....	139
4.1.5.4	Naturfasern .....	147

4.1.6	Vliesstoffe .....	165
4.1.6.1	Einführung .....	165
4.1.6.2	Herstellungsverfahren .....	165
4.1.6.3	Verwendungszweck .....	170
4.1.7	Füllstoffe .....	173
4.1.7.1	Einführung/Geschichtliches .....	173
4.1.7.2	Morphologie und Kristallstruktur .....	173
4.1.7.3	Ausgewählte Füllstoffe – eine Übersicht .....	176
4.1.7.4	Verfahrenstechnik .....	179
4.1.7.5	Anwendungshinweise für GFK .....	180
4.1.7.6	Ausblick .....	181
4.1.8	Additive .....	182
4.1.8.1	Einführung .....	182
4.1.8.2	Beschreibung der Additive .....	184
4.1.9	Farbmittel .....	205
4.1.9.1	Einführung/Geschichtliches .....	205
4.1.9.2	Grundlagen .....	206
4.1.9.3	Farbmittel in Faserverstärkten Kunststoffen .....	207
4.1.9.4	Übersicht ausgewählter Pigmente .....	207
4.1.9.5	Pigmentpräparationen und Aufbereitung .....	211
4.1.9.6	Ausblick .....	213
4.1.10	Trennmittel .....	213
4.1.10.1	Einleitung .....	213
4.1.10.2	Trennmittelsysteme .....	214
4.1.10.3	Fehlerquellen .....	219
4.1.10.4	Beispielhafte Anwendungen .....	222
4.1.10.5	Schlusswort .....	222
4.2	Halbzeuge .....	223
4.2.1	Faserhalbzeuge .....	223
4.2.1.1	Herstellung von Faserhalbzeugen .....	223
4.2.1.2	Konfektion von Faserhalbzeugen .....	231
4.2.2	Prepregs .....	233
4.2.2.1	Einleitung .....	233
4.2.2.2	Herstellung und Eigenschaften von Duroplastprepregs .....	233
4.2.2.3	FKV Halbzeuge mit thermoplastischer Matrix .....	235
4.2.3	SMC/BMC .....	237
4.2.3.1	Werkstoff SMC .....	237
4.2.3.2	BMC Polyesterformmassen .....	261
4.2.4	Thermoplastische Formmassen .....	274
4.2.4.1	Einführung .....	274
4.2.4.2	Ausgangsstoffe .....	274
4.2.4.3	Herstellverfahren .....	275
4.2.4.4	Eigenschaften .....	279
4.2.4.5	Ausblick .....	284
4.3	Werkzeug-Werkstoffe .....	286
4.3.1	Werkstoffe für geschlossene Werkzeuge .....	286
4.3.2	Werkstoffe für offene Werkzeuge .....	288

<b>5 Werdegang eines Produktes</b> .....	289
5.1 Gestaltung eines Produktes .....	289
5.2 Konstruktion und Berechnung .....	294
5.2.1 Umdenken in Schichten und Faserkoordinaten .....	294
5.2.2 Eigenschaften des Verbundes aus Fasern und Matrix .....	295
5.2.3 Eigenschaften mehrschichtiger Lamine .....	299
5.2.4 Dimensionierung mit der Klassischen Laminattheorie (CLT) .....	300
5.2.5 Festigkeitsanalyse .....	304
5.2.6 Hilfsmittel für die Berechnung .....	307
5.2.7 Lebensdauer von FVK .....	308
5.2.8 Verhalten bei Crash .....	308
5.2.9 Krafteinleitungselemente .....	308
<b>6 Herstellungsverfahren</b> .....	311
6.1 Handlaminieren/Faserspritzen .....	311
6.1.1 Einleitung .....	311
6.1.2 Verfahrensgrundlagen .....	312
6.1.3 Betriebsmittel/Werkzeuge .....	315
6.1.4 Ausgangsstoffe für handlamierte oder fasergespritzte Bauteile .....	319
6.1.5 Verfahrensablauf .....	321
6.1.6 Gestaltungsparameter .....	325
6.1.7 Eigenschaften/Qualität .....	327
6.2 Nasspressen .....	331
6.2.1 Einführung .....	331
6.2.2 Verfahrensgrundlagen .....	331
6.2.3 Verfahrensablauf .....	331
6.2.4 Betriebsmittel .....	332
6.2.5 Ausgangsstoffe .....	337
6.2.6 Qualität von Pressteilen .....	343
6.2.7 Mögliche Fehler und ihre Ursachen .....	344
6.2.8 Ausblick .....	345
6.3 Wickelverfahren .....	346
6.3.1 Einleitung .....	346
6.3.2 Verfahrensgrundlagen .....	346
6.3.3 Anlagentechnik .....	349
6.3.4 Thermoplastwickeln .....	354
6.3.5 Weitere Entwicklung .....	359
6.4 Profiliziehverfahren .....	361
6.4.1 Einleitung/Geschichtliches .....	361
6.4.2 Verfahrensgrundlagen .....	362
6.4.3 Betriebsmittel .....	364
6.4.4 Ausgangsstoffe .....	365
6.4.5 Gestaltungsparameter .....	367
6.4.6 Eigenschaften .....	369
6.4.7 Weiterverarbeitung .....	370
6.4.8 Anwendungsbeispiele .....	371

6.5	Injektionsverfahren .....	375
6.5.1	Einführung .....	375
6.5.2	RTM-Verfahrensablauf .....	376
6.5.3	Verfahrensgrundlagen .....	377
6.5.4	Betriebsmittel .....	378
6.5.5	Ausgangsstoffe .....	380
6.5.6	Prozessvarianten/Gestaltungsoptionen .....	380
6.5.7	Zusammenfassung .....	381
6.6	Das Spaltimprägnierverfahren .....	383
6.6.1	Einleitung .....	383
6.6.2	Konzept des Spaltimprägnierverfahrens .....	384
6.6.3	Formfüllvorgang im Spaltimprägnierverfahren .....	385
6.6.4	Fertigung von ebenen, monolithischen Bauteilen .....	387
6.6.5	Analyse der Fertigung von gekrümmten Sandwichbauteilen mithilfe des Spaltimprägnierverfahrens .....	389
6.6.6	Fazit und Ausblick .....	390
6.7	Heißpressen von SMC/BMC .....	393
6.7.1	Einführung/Geschichtliches .....	393
6.7.2	Verfahrensgrundlagen .....	393
6.7.3	Betriebsmittel .....	394
6.7.4	Produktionswerkzeuge/Hilfsmittel .....	403
6.7.5	Gestaltungsrichtlinien .....	406
6.7.6	Nachbehandlung .....	417
6.7.7	Qualität/Eigenschaften .....	418
6.8	Hochdruckpressen von GMT/LFT .....	419
6.8.1	Einführung/Geschichtliches .....	419
6.8.2	Verfahrensgrundlagen .....	419
6.8.3	Betriebsmittel /Verfahrensablauf .....	420
6.8.4	Ausgangsstoffe .....	422
6.8.5	Produktionswerkzeuge/Hilfsmittel .....	424
6.8.6	Gestaltungsrichtlinien .....	424
6.8.7	Nachbehandlung .....	427
6.8.8	Qualität/Eigenschaften .....	428
6.9	Spritzgießen von BMC .....	430
6.9.1	Einführung .....	430
6.9.2	Verfahrensgrundlagen .....	430
6.9.3	Betriebsmittel .....	433
6.9.4	Produktionswerkzeuge .....	437
6.9.5	Nachbehandlung .....	438
6.9.6	Qualität und Eigenschaften .....	438
6.10	Spritzgießen langfaserverstärkter Thermoplaste (LFT) .....	439
6.10.1	Einführung .....	439
6.10.2	Prinzip der Langfaserverstärkung .....	439
6.10.3	Verfahrensgrundlagen .....	441
6.10.4	Betriebsmittel/Verfahrensablauf .....	442
6.10.5	Ausgangsstoffe .....	448
6.10.6	Ausblick und Entwicklungstendenzen .....	449

6.11	Kontinuierliches Laminieren .....	451
6.11.1	Einführung .....	451
6.11.2	Verfahrenstechnische Grundlagen .....	451
6.11.3	Ausgangsstoffe/Hilfsmittel .....	452
6.11.4	Kontinuierliche Herstellung planer Platten und Bahnen .....	459
6.11.5	Produkte – Konstruktion – Eigenschaften – Anwendungen .....	465
6.12	Schleuderverfahren .....	470
6.12.1	Einführung .....	470
6.12.2	Grundlagen des Schleuderverfahrens .....	471
6.12.3	Fertigungseinrichtungen .....	471
6.12.4	Verfahrenstechnik .....	472
6.12.5	Verfahrensbedingte Produktmerkmale .....	473
6.12.6	Qualitätssicherung .....	475
6.13	Umformen endlosfaserverstärkter Thermoplaste .....	477
6.13.1	Einführung .....	477
6.13.2	Ausgangssituation .....	477
6.13.3	Verfahrensablauf .....	478
6.13.4	Umformverfahren, Betriebsmittel und Einsatzmöglichkeiten .....	478
6.14	Automatisierte Legeverfahren .....	484
6.14.1	Einleitung .....	484
6.14.2	Verfahrensgrundlagen .....	484
6.14.3	Anlagentechnik .....	485
6.14.4	Duroplast-Tapelegen .....	486
6.14.5	Thermoplast-Tapelegen .....	486
6.15	LFI-Verfahren .....	487
6.15.1	Einleitung .....	487
6.15.2	Verfahrensablauf .....	487
6.15.3	Anlagentechnik .....	489
6.15.4	Prozessüberwachung .....	497
6.15.5	Prozessvarianten .....	498
6.15.6	Zusammenfassung und Ausblick .....	499
6.16	Fertigteilbearbeitung .....	502
6.16.1	Spanende Bearbeitung .....	505
6.16.1.1	Fräsen .....	505
6.16.1.2	Bohren .....	509
6.16.1.3	Stanzen .....	511
6.16.1.4	Ultraschallschwinglappen .....	512
6.16.2	Strahl-Bearbeitung .....	513
6.16.2.1	Wasserstrahlschneiden .....	513
6.16.2.2	Laserstrahlschneiden .....	516
6.16.3	Fügetechnik .....	518
6.16.3.1	Oberflächenbehandlung .....	518
6.16.3.2	Kleben von FVK .....	521
6.16.3.3	Schweißen von FVK .....	524
6.16.3.4	Mechanisches Fügen .....	527
6.16.3.5	Weitere in der Praxis angewandte Verbindungstechniken .....	536

---

<b>7 Normung</b> .....	543
7.1 Institutionen der Normungsarbeit .....	543
7.1.1 Der Fachnormenausschuss Kunststoffe (FNK) im Deutschen Institut für Normung e.V. (DIN) .....	543
7.1.1.1 Aufgabenbeschreibung des FNK .....	544
7.1.1.2 Organisationsschema des FNK .....	544
7.1.1.3 Finanzierung der Normungsarbeit .....	546
7.1.1.4 Berichte und Arbeitsergebnisse aus den Gremien .....	548
7.1.2 Die „International Standard Organisation (ISO)“ .....	551
7.1.3 Das „Comité Européen de Normalisation“ (CEN) .....	553
7.1.4 Die wichtigsten Gremien des FNK mit ihren Internat. Spiegelgremien ..	555
7.1.5 Das Europäische Normungsverfahren .....	556
7.2 Werdegang einer internationalen Norm .....	558
7.2.1 Verfahren .....	558
7.2.2 Kosten einer Norm .....	558
7.2.3 Weitere Komitees .....	559
<b>8 Prüfverfahren</b> .....	561
8.1 Einleitung .....	561
8.2 Die wichtigsten Bestimmungen im Überblick .....	561
<b>9 Prüfzeichen</b> .....	579
<b>10 Die AVK stellt sich vor</b> .....	582
<b>Autorenverzeichnis</b> .....	584

# 1 Vorwort

Dem Konstrukteur steht heute eine Vielzahl von Werkstoffen zur Lösung eines speziellen Branchenproblems zur Verfügung.

Kunststoffe bilden eine dieser Werkstoffgruppen, die eine besonders große Typenvielfalt aufweisen. Das vom Carl-Hanser-Verlag aufgelegte Kunststoffhandbuch trägt dieser Tatsache Rechnung; es lässt von anerkannten Fachleuten das gesamte Spektrum der Kunststoff-Werkstoffe (Thermoplaste, Duroplaste, Elastomers) in 10 Bänden ausführlich darstellen, wobei jeder Band einer bestimmten Typenreihe zugeordnet ist. (Die Ausnahme bildet Band I, in dem Chemie, Physik und Technologie der Kunststoffe allgemein behandelt werden.)

Für verstärkte Kunststoffe waren zunächst die Duroplaste die wichtigste Werkstoffgruppe. Die schon im Jahre 1910 von dem Chemiker Baekeland aus Phenol und Formaldehyd entwickelte härtbare Formmasse, die nach ihm „Bakelite“ benannt wurde, spielt jedoch für die verstärkten Kunststoffe keine Rolle.

Entscheidend dafür waren Entwicklungen Ende der 30er Jahre in den USA, die zu den so genannten ungesättigten Polyesterharzen führten.

Bei diesen handelt es sich um längerkettige Moleküle, die auf Grund ihrer chemisch ungesättigten Struktur und gelöst in einer ebenfalls ungesättigten Verbindung als reaktives Flüssigharz zur Verfügung stehen. Durch Zusatz von Radikalbildnern kann eine Polymerisation eingeleitet werden, die zu einem hochmolekularen dreidimensional vernetzten Härtingsprodukt führt.

Der flüssige Ausgangszustand dieser Harze bietet neben der Möglichkeit, die verschiedenartigsten Füllstoffe hinzuzufügen, auch die Chance, durch Zusätze aus langen Fasern, die mechanische Festigkeit der gehärteten Produkte wesentlich zu erhöhen.

Als Fasern boten sich zu Beginn der Entwicklung die bereits bekannten Glasfasern an, wobei es darauf ankam, deren Oberfläche so zu präparieren, dass eine gute chemische Anhaftung der Matrixharze gewährleistet werden konnte.

Diese umfangreichen Entwicklungen in den USA, die in vielen Patenten niedergelegt wurden, kamen dann nach dem zweiten Weltkrieg über europäische Lizenznehmer auf den hiesigen Markt.

Eine Reihe der schon in den USA entwickelten Anwendungen und Verfahrenstechniken fand auch bei uns schon bald Eingang in die Praxis. Eine wichtige Rolle spielte dabei ein Verfahren, das – zum Teil auch kontinuierlich arbeitend – zur Herstellung der so genannten transparenten Wellplatten und -bahnen diente, da die optischen Brechungen der Polyesterharze und der Glasfasern einander angepasst werden konnten. Die in der damaligen Zeit aufstrebende Bauwirtschaft machte vor allem beim Industriebau davon Gebrauch, um Lichtbahnen in Asbest- oder Wellblechabdeckungen einzubringen.

Dieses Anwendungsgebiet hatte zunächst einen Marktanteil von über 50 % und die Herstellerfirmen fanden sich bereits 1958 zur Arbeitsgruppe „Wellplatten und -bahnen“ zusammen. Alle anderen Anwendungen waren lediglich regional von Belang, wobei nur in wenigen Fällen von industrieller Fertigung die Rede sein konnte.

Insgesamt war das Grundwissen über diesen neuen Werkstoff recht lückenhaft. Deshalb war es auf der Kunststoffmesse 1959 in Düsseldorf eine sehr richtungweisende Entscheidung (eingeleitet von der Glasfaserindustrie – vertreten durch Herrn Dr. von der Heide – und Vertretern

aus Industrie und Wissenschaft) die „Arbeitsgemeinschaft verstärkte Kunststoffe“ (AVK) 1960 ins Leben zu rufen. Wie es im Namen zum Ausdruck kommt, war es Ziel dieser Gemeinschaft, durch abgestimmte Aufgabenstellungen verlässliche Grundlagen über Eigenschaften, Prüfungen und Normungen dieser Werkstoffgruppe zu schaffen, so wie dies für andere Kunststoffe schon seit längerer Zeit geschah und beispielhaft übertragen werden konnte.

Die AVK, deren Mitglieder aus allen betroffenen Bereichen kamen (Rohstoffhersteller, Verarbeiter, wissenschaftliche Institute, Anlagenbauer, Ingenieurbüros und Prüfümter), hat sich zunächst dem „Gesamtverband Kunststoffverarbeitende Industrie e.V.“ (GKV) angeschlossen. Durch das gemeinsam erarbeitete Grundlagenwissen wurde die AVK sehr bald national wie international zum anerkannten Fachgremium; speziell ausgerichtete Seminare sowie die bereits ab 1960 stattfindende internationale Fachtagung leisteten dazu einen entscheidenden Beitrag.

Seit 1967 ist die AVK als eingetragener Verein (AVK e.V.) selbstständig. Schließlich ging daraus die heutige „Industrievereinigung verstärkte Kunststoffe“ als eigenständiger Industrieverband hervor.

Das vorliegende Handbuch fasst den derzeitigen Stand der Technik zusammen. Die Einzelbeiträge des im Jahre 2005 erschienenen AVK Branchenhandbuches haben dabei weitgehend Berücksichtigung gefunden und wurden entsprechend aktualisiert.

Einleitend werden die vielen, für das Verständnis wichtigen und allgemein gebräuchlichen Begriffe (auch in der genormten englischen Fachsprache) definiert. Es folgen Erläuterungen zu den Verbundwerkstoffen, zu den Märkten und den vielseitigen Anwendungen.

Danach werden die vielen inzwischen verfügbaren Matrixharze und Verstärkungsmaterialien sowie die daraus für die Verarbeitung entwickelten Halbzeuge ausführlich behandelt. Da die unterschiedlichen Verarbeitungsverfahren sehr spezielle Werkzeuge erfordern, ist den dafür bevorzugten Werkstoffen ein eigener Abschnitt gewidmet.

Einen breiten Raum nehmen die aus langjähriger Erfahrung gewonnenen Richtlinien für die Gestaltung und Berechnung eines Produktes sowie die Beschreibung der sehr unterschiedlichen Herstellverfahren und der Nachbearbeitungsmöglichkeiten ein. Deren detaillierte Kenntnis ist Voraussetzung für die Realisierung eines Produktes.

Auch in Zukunft sind weitere Neuentwicklungen zu erwarten; sie werden wie bisher in einschlägigen Fachzeitschriften publiziert. Unabhängig davon wird die AVK ihre erfolgreiche Informationspolitik über Fachseminare und vor allem über die internationale Fachtagung an wechselnden Orten weiter verfolgen.

# Handbuch Faserverbundkunststoffe

Das komplett überarbeitete Handbuch Faserverbundkunststoffe der AVK ist seit langem „das“ Standardwerk für alle, die in diesem Marktsegment der Kunststoffindustrie beschäftigt sind. Es vermittelt die grundlegende Übersicht aller Themenbereiche rund um die Verarbeitung der sogenannten „Composites“. Der aktuelle Stand der Technik wird komprimiert zusammengefasst. Die Vielfältigkeit der Anwendungsgebiete von Bauteilen bzw. Produkten aus Faserverbundkunststoffen wird dabei herausgearbeitet und anschaulich dargestellt.

Nach einem einleitenden Teil mit Begriffsklärungen und Erläuterungen zum Markt und zu Anwendungen werden die eingesetzten Materialien (Harze, Fasern) beschrieben. Die für die sehr speziellen Werkzeuge bevorzugten Werkstoffe werden ebenso erläutert wie die für die Verarbeitung entwickelten Halbzeuge. Die Beschreibung der sehr unterschiedlichen Herstellverfahren und Nachbearbeitungsmöglichkeiten komplettiert dieses in der vorliegenden Form einmalige Werk.

Das Handbuch eignet sich für Einsteiger mit wenig Vorkenntnissen ebenso wie als Nachschlagewerk für das Alltagsgeschäft des Praktikers im Markt für Faserverbundkunststoffe.

## PRAXIS

### Die Zielgruppen

Entwicklungsingenieure in Industrie-Unternehmen, die Bauteile aus verstärkten Kunststoffen einsetzen; Verarbeiter von verstärkten Kunststoffen; Rohstoffherzeuger und -lieferanten von verstärkten Kunststoffen und duroplastischen Formmasse Werkstoffexperten; Ingenieurbüros, Prüfämter und wissenschaftliche Institute Ingenieure und Fachkräfte im Bereich Maschinenbau, Fertigungs- und Verfahrenstechnik; Lehrende und Studierende in Fachgebieten wie Maschinenbau, Fertigungs- und Verfahrenstechnik

### Der Herausgeber

AVK – Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e. V.

Der Autorenkreis setzt sich zusammen aus Experten der AVK-Mitgliedsunternehmen. Die AVK – Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e. V. vertritt die Interessen der Erzeuger und Verarbeiter von verstärkten und gefüllten Kunststoffen, technischen Duroplasten sowie deren Rohstofflieferanten und Dienstleister auf nationaler und europäischer Ebene.

Ferner sind Maschinenbauer, Ingenieurbüros, Prüfämter und wissenschaftliche Institute Mitglieder der AVK. Kleine und mittlere Unternehmen finden sich in der Mitgliederstruktur ebenso wieder wie (multinationale) Konzerne.

ISBN 978-3-8348-0881-3