

Manfred Neitzel
Peter Mitschang
Ulf Breuer

Handbuch Verbundwerkstoffe

Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung



2., aktualisierte und erweiterte Auflage



EXTRA
Mit kostenlosem E-Book

HANSER



Bleiben Sie auf dem Laufenden!

Hanser Newsletter informieren Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter

www.hanser-fachbuch.de/newsletter

Die Internet-Plattform für Entscheider!

- **Exklusiv:** Das Online-Archiv der Zeitschrift Kunststoffe!
- **Richtungweisend:** Fach- und Brancheninformationen stets top-aktuell!
- **Informativ:** News, wichtige Termine, Bookshop, neue Produkte und der Stellenmarkt der Kunststoffindustrie

Kunststoffe.DE

Immer einen Click voraus!

Manfred Neitzel
Peter Mitschang
Ulf Breuer

Handbuch Verbundwerkstoffe

Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung

2., aktualisierte und erweiterte Auflage

HANSER

Die Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Manfred Neitzel,
Konrad-Adenauer-Straße 106, 67663 Kaiserslautern

Prof. Dr.-Ing. Peter Mitschang,
Institut für Verbundwerkstoffe GmbH (IVW), Technische Universität Kaiserslautern,
Erwin-Schrödinger-Straße/Geb. 58, 67663 Kaiserslautern

Prof. Dr.-Ing. Ulf Breuer,
Institut für Verbundwerkstoffe GmbH (IVW), Technische Universität Kaiserslautern,
Erwin-Schrödinger-Straße/Geb. 58, 67663 Kaiserslautern

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek:

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <<http://dnb.d-nb.de>> abrufbar.

Print-ISBN: 978-3-446-43696-1

e-book-ISBN: 978-3-446-43697-8

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutzgesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Alle in diesem Buch enthaltenen Verfahren bzw. Daten wurden nach bestem Wissen erstellt und mit Sorgfalt getestet. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die in diesem Buch enthaltenen Verfahren und Daten mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autor und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Art aus der Benutzung dieser Verfahren oder Daten oder Teilen davon entsteht.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Einwilligung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 URG genannten Sonderfälle – reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© Carl Hanser Verlag, München 2014

Herstellung: Steffen Jörg

Coverconcept: Marc Müller-Bremer, www.rebranding.de, München

Coverrealisierung: Stephan Rönigk

Satz, Druck und Bindung: Kösel, Krugzell

Printed in Germany

*Herrn Prof. Manfred Neitzel
zum 80. Geburtstag gewidmet.*

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 Fügewegs	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	Styrolemissionen 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 Handlegungsverfahren 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

Abkürzungs- verzeichnis

Kurzform	Bedeutung
1D	Eindimensional
2D	Zweidimensional
3D	Dreidimensional
AFM	Atomic Force Microscope
ARALL	Aramid Fiber Reinforced Aluminum Laminates
AFK	Aramidfaserverstärkter Kunststoff
ARTM	Advanced Resin Transfer Molding
BMC	Bulk Molding Compound
CBT	Cyclic Butylene Terephthalate
CF	Kohlenstofffasern
CF	Kresol-Formaldehyd-Harz
CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
CPC	Bisphenol-A-Polycarbonate
CTT	Conversion Temperature Transformation
DCB	Double Cantilever Beam
DFP	Directed Fiber Preforming
DIN	Deutsches Institut für Normung
DMC	Dough Molding Compound
DPRTM	Differential Pressure Resin Transfer Molding
EP	Epoxid Harze
FF	Furan-Formaldehyd-Harz
FKV	Faser-Kunststoff-Verbund
FPA	Final Preform Assembly
GF	Glasfasern
GLARE	Glass Fiber Reinforced Laminates
GMT	Glasmattenverstärkte Thermoplaste
HE	Heizelementschweißen
HF	Hochfrequenzschweißen
HM	High Modulus
HT	High Tenacity
IM	Intermediate Modulus
IND	Induktionsschweißen

Kurzform	Bedeutung
IPN	Interpenetrierendes Netzwerk
KIS	Kontinuierlicher Induktionsschweißprozess
LAS	Laserschweißen
LCC	Life Cycle Costing
LCM	Liquid Composite Molding
LFT	Langfaserverstärkte Thermoplaste (diskontinuierlich)
MAG	Multi-Axial-Gelege
MAK	Maximale Arbeitsplatzkonzentration
MF	Melamin-Formaldehyd
MFI	Melt Flow Index
MVI	Melt Volume Index
OB	Organoblech
OSS	One-Side-Stitch
PA	Polyamid
PAEK	Polyaryletherketon
PAN	Polyarylnitril
PBT	Polybutylenterephthalat
PC	Polycarbonat
PE	Polyethylen
PE-UHMW	Polyethylen-Ultra High Molecular Weight
PEEK	Polyetheretherketon
PEI	Polyetherimid
PEI-GF	Glasfaserverstärktes Polyetherimid
PES	Polyethersulfon
PET	Polyethylenterephthalat
PF	Phenol-Formaldehyd-Harz
PI	Polyimid
PKD	Polykristalliner Diamant
PMMA	Polymethylmethacrylat
PMR	Polymerisation of Monomer Reactants
PP	Polypropylen
PP-GF 30	Glasfaserverstärktes PP mit einem Faseranteil von 30 Gew.-%
PP-GM 30	Glasmattenverstärktes PP mit einem Faseranteil von 30 Gew.-%
PP-GMT	Glasmattenverstärktes PP
PPS	Polyphenylensulfid
ProSimFRT	Process Simulator for Fiber Reinforced Thermoplastic Tapes
PSU	Polysulfon
PTFE	Polytetrafluorethylen
PUR	Polyurethan

Kurzform	Bedeutung
PVC	Polyvinylchlorid
RF	Resorcin-Formaldehyd-Harz
RFI	Resin Film Infusion
R-GMT	Glasmattenverstärkter Thermoplast mit Rezyklatanteil
RIM	Reaction Injection Molding
RTM	Resin Transfer Molding
SB	Stahlblech
SCRIMP®	Seemann Composites Resin Infusion Molding Process
SLI	Single Line Injection
SMC	Sheet Molding Compound
SMC-D	SMC mit Faservorzugsrichtung
SPM	Stiche pro Minute
SRIM	Structural Reaction Injection Molding
TERTM	Thermal Expansion Resin Transfer Molding
TLK	Tapelegekopf
TPU	Thermoplastische Elastomere auf Basis Polyurethan
TR	Tailored Reinforcement
TTT	Time Temperature Transformation
UD	Unidirektional
UF	Harnstoff-Formaldehyd-Harz
UHM	Ultra-high Modulus
UP	Ungesättigtes Polyester Harz
US	Ultraschall
UV	Ultraviolett
VARTM	Vacuum Assisted Resin Transfer Molding
VE	Vinylester
VEUH	Vinylester-Urethan-Hybridharz
VI	Vakuuminjektion
VIB	Vibrationsschweißen
WID	Widerstandsschweißen
XF	Xylenol-Formaldehyd-Harz

1

Einführung

U. Breuer, P. Mitschang

■ 1.1 Stand der Technik

Verbundwerkstoffe kommen heute in einer Vielzahl von Anwendungen für die unterschiedlichsten Branchen zum Einsatz und sind aus dem täglichen Leben kaum wegzudenken. Eine besondere Stellung nehmen dabei die Faser-Kunststoff-Verbunde (FKV) ein, die mehr und mehr konventionelle, unverstärkte Kunststoffe und Metalle ersetzen und zu erheblichen technischen und wirtschaftlichen Produktverbesserungen führen.

Für endlosfaserverstärkte Polymere mit besonders hohem Leichtbaupotenzial hat seit Beginn ihrer Entwicklung in den 30er und 40er Jahren des vergangenen Jahrhunderts die Luftfahrt eine Vorreiterstellung eingenommen. Hier kommen heute für nahezu alle lasttragenden Primärstrukturen Hochleistungsverbundwerkstoffe mit Kohlenstofffasern zum Einsatz. Faservolumengehalt, Lagenaufbau, exakte Orientierung der Fasern und Fehlerfreiheit sind entscheidend für das erforderliche hohe strukturmechanische Leistungsvermögen und die Zuverlässigkeit der Flugzeugstrukturen, mit denen täglich Millionen von Passagieren transportiert werden.

Zwar erfüllen die heute zur Produktion von Strukturbauteilen aus Verbundwerkstoffen eingesetzten Verarbeitungsverfahren für die Luftfahrt die hohen Qualitätsanforderungen, allerdings gilt es – insbesondere im Hinblick auf zukünftige Anwendungen mit gleichartig hochwertigen Verbundwerkstoffsystemen in anderen Branchen, in denen das mögliche Leichtbaupotential u.U. zu geringeren Produktwertsteigerungen führt – die Wirtschaftlichkeit der Herstellungsprozesse entscheidend zu verbessern.

In Verbindung mit den Vorschriften zu Arbeitssicherheit und Umweltschutz sowie der Forderung nach der Prognosefähigkeit der Eigenschaften der Bauteile bzw. der Reproduzierbarkeit hat sich auch die Verarbeitungstechnik in den relevanten Anwendungsbereichen wie etwa dem Maschinenbau oder dem Automobilbau darauf eingestellt. Allerdings sind weiterhin Defizite vorhanden, die mit den wirtschaftlichen Anforderungen oft unverträglich sind.

Für die Fertigungstechnik der Verbundwerkstoffe besteht bei den meisten Verfahren noch erheblicher Entwicklungsbedarf im Hinblick auf Kosten und in vielen Fäl-

len auch im Hinblick auf die Qualität der Bauteile. Sie ist deswegen neben den andauernden Bemühungen zur Senkung der Kosten der Ausgangshalbzeuge, insbesondere der Kohlenstofffasern, als Schlüsseltechnologie für die weitere Marktdurchdringung der Faserverbundwerkstoffe mit polymerer Matrix anzusehen.

Für die Weiterentwicklung der Fertigungstechnik ist die gezielte Aus- und Weiterbildung unerlässlich. Materialien liegen hierzu in umfassender thematischer Breite vor, aber oft nur in Form von Zeitschriftenpublikationen. Verfügbare Sachbücher geben Teilaspekte wieder oder sind nicht in deutscher Sprache verfasst bzw. vergriffen.

Die Herausgeber sind daher gerne auf die Idee des Verlages eingegangen, das vorhandene Wissen in einem umfassenden Überblick darzustellen. Intention ist dabei eine tiefere Betrachtung von Kernproblemen und Potenzialen der Verarbeitung der Faser-Kunststoff-Verbunde. Dafür werden Technologie und Grundlagen unter Nutzung von Modellbildung und Simulation im Vergleich mit experimentellen Ergebnissen dargestellt. Hierzu war es erforderlich, die wichtigsten Eigenschaftswerte der betreffenden Werkstoffe und Verstärkungskomponenten sowie die thermodynamischen und rheologischen Stoffdaten in Abhängigkeit von Zeit und Temperatur zu aktualisieren. Dies gilt in gleicher Weise für die Beschreibung der Verarbeitungsverfahren und ihrer Kernprozesse mit den relevanten physikalischen und/oder chemischen Vorgängen im Werkzeug.

Das Buch ist in vier größere Blöcke mit insgesamt 17 Kapiteln gegliedert. Die Kapitel 1 bis 5 behandeln nach einem Überblick zur aktuellen Marktentwicklung und einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung die Matrixharze und die Fasern als Werkstoffgrundkomponenten, die textilen Halbzeuge sowie die vorimprägnierten Halbzeuge und deren Herstellung. Das Thema Preformverfahren in Kapitel 4 hat aufgrund des Vordringens der Flüssigimprägnierverfahren besondere Bedeutung gewonnen und soll das notwendige Grundwissen vermitteln, das in der Fokussierung auf die Verbundwerkstoffverarbeitung bisher in kurzer, aber ausreichend umfassender Form nicht zur Verfügung stand.

Im zweiten Block mit Kapitel 6 werden die Grundlagen der Verarbeitungsprozesse behandelt und die bestehenden Defizite aufgrund der meist noch verwendeten Näherungslösungen bei der Modellierung der chemischen und physikalischen Prozesse erläutert. Dies schließt die Grundlagen der Imprägnierung und Härtung ein. Das Ziel liegt darin, den Übergang von der noch vorherrschenden Prozesssteuerung zur Prozessregelung zu unterstützen und das Qualitätsmanagement abzusichern. Stand und Perspektiven der erforderlichen sensorunterstützten Online-Prozessüberwachung werden dargestellt und die Grundlagen sowie der Stand der verwendeten Modelle und Simulationsprogramme diskutiert.

Hier wird auch das wichtige Thema der Wechselwirkung zwischen Bauweise und Fertigung aufgegriffen. Diese wird heute im Hinblick auf die Reduzierung der Entwicklungszeit und damit auch der Kosten über das sog. „Concurrent Engineering“

beachtet, hat aber auf dem Gebiet der Verarbeitungstechnik der Verbundwerkstoffe noch nicht den angemessenen Stellenwert erlangt. Dabei soll erläutert werden, welche Konsequenzen die Vorgabe einer bestimmten Bauweise für die Wahl des entsprechenden Verarbeitungsprozesses hinsichtlich Machbarkeit und Kosten hat und bereits in der frühen Konzeptphase durch intensiven Austausch den Gedanken des „Design to Manufacturing“ unterstützt. Zusätzliche Bedeutung kommt dieser Thematik durch den Übergang zu Mischbauweisen mit unterschiedlichen Werkstoffen wie Stahl und Verbundwerkstoffen zu.

Im anschließenden dritten Abschnitt werden in den Kapiteln 8 bis 12 alle wesentlichen Verarbeitungsverfahren der FKV und Varianten vorgestellt. Es sind dies: Autoklaventechnik, Pultrusion, Wickeltechnik und die Injektions- bzw. Infusionsverfahren mit dem individuellen Stand der Simulationsanwendungen, Pressverfahren, Umformen kontinuierlich verstärkter thermoplastischer Halbzeuge und Rollformen. Bei allen dafür in Betracht kommenden Verfahren wird jeweils auf die Varianten mit thermoplastischer und duroplastischer Matrix eingegangen.

Im vierten Abschnitt werden mit den Verfahren zur Bearbeitung von FKV-Bauteilen auch deren Oberflächenqualität und Materialkreisläufe auf der Grundlage der geltenden gesetzlichen Regelungen und die entsprechenden Verwertungs- bzw. Entsorgungswege in den Kapiteln 13 und 14 dargestellt. Ferner wird in Kapitel 15 die Verbindungstechnik, u. a. im Hinblick auf die Mischbauweisen z. B. mit metallischen Teilstrukturen, behandelt. Hierzu gehören Hinweise auf geeignete Reparaturverfahren.

Die Kapitel 16 und 17 beinhalten die wichtigsten Aspekte der Arbeitssicherheit und den Werkzeugbau für alle Verarbeitungsverfahren. Ein Abkürzungsverzeichnis enthält die für Verbundwerkstoffe spezifischen Abkürzungen. Das abschließende Sachwort-Register mit ca. 1000 Begriffen soll dem Leser den schnellen Zugriff auf seine Fragen ermöglichen und das Buch in seinem Nutzen als Handbuch abrunden.

■ 1.2 Technisch-wirtschaftliche Entwicklung

U. Breuer, J. Schlimbach, M. Neitzel

1.2.1 Einleitung

Aufgrund ihres physikalischen und chemischen Eigenschaftsprofils weisen Faser-Kunststoff-Verbunde (FKV) wesentliche technische Vorteile gegenüber Konkurrenzwerkstoffen in einer großen Zahl von Anwendungsfeldern auf. Aufzuführen sind hier vor allem das Leichtbaupotential, aber z. B. auch Korrosionsbeständigkeit, Medienbeständigkeit, Dauerfestigkeit, Durchbrändeigenschaften, einstellbare Rich-

tungsabhängigkeit der mechanischen Eigenschaften, Energieabsorption und verschleißarme Oberflächen, um nur wenige zu nennen. Trotz des daraus resultierenden Marktpotenzials konnten sich die FKV jedoch in einigen Branchen noch nicht umfassend industriell durchsetzen. Ursache hierfür ist die im Allgemeinen zwischen FKV und traditionellen Materialien bestehende signifikante „Wirtschaftlichkeitslücke“. Hierzu tragen vor allem die vergleichsweise noch hohen Werkstoffkosten bei, insbesondere die der Kohlenstofffasern, aber auch der Stand der Verarbeitungstechnik, der in einem breiten Feld an Verfahren von der händischen Fertigung bis zur Großserienanlagentechnik in vielen Fällen noch nicht über ausreichend effiziente Prozessketten mit entsprechendem Qualitätsmanagement verfügt.

Im Folgenden soll daher zunächst anhand einer Reihe von Anwendungsbeispielen aus den verschiedensten Einsatzfeldern auf den technisch-wirtschaftlichen Hintergrund der Anwendung und die mögliche weitere Entwicklung eingegangen werden. Es schließt sich eine Darstellung der Möglichkeiten der Nutzung von Sensitivitätsanalysen zur Abschätzung der Wirtschaftlichkeit von Verarbeitungsprozessen für FKV-Bauteile an, die den Entwicklungsprozess unterstützen können.

1.2.2 Der industrielle Einsatz

Faser-Kunststoff-Verbunde sind eine seit nunmehr über 70 Jahren im industriellen Maßstab eingesetzte Werkstoffklasse. Primäre Merkmale von FKV sind hohe Festigkeit und Steifigkeit in Verbindung mit relativ geringer Dichte. Bei FKV besteht, anders als bei unverstärkten Kunststoffen oder Metallen, ein zusätzlicher Konstruktions-Freiheitsgrad durch gezieltes Ausnutzen anisotroper Eigenschaften, d. h. durch vorteilhafte Nutzung der Faserorientierung, womit eine Optimierung der für Festigkeits- und Steifigkeitsanforderungen erforderlichen Masse von Strukturen bzw. Bauteilen ermöglicht wird [1]. Ferner bestehen durch die Flexibilität der FKV bezüglich der Gestaltung von Materialaufbau und Geometrie besonders gute Voraussetzungen für einen hohen Grad an Funktionsintegration [2]. Die realisierbaren Integralbauweisen, gekoppelt mit dem Leichtbauvermögen, begründen das elementare Leistungspotenzial der FKV und damit wesentliche Vorteile gegenüber den Konkurrenzwerkstoffen in einer Reihe von industriellen Anwendungsfeldern sowie im Sport- und Freizeitbereich [3]. Neben diesen übergeordneten Vorzügen von FKV kommt ein breites Spektrum weiterer, durch die zu wählende Materialkonfiguration maßgeschneiderter Eigenschaften von FKV hinzu, wie etwa extrem günstiges Ermüdungsverhalten, Transparenz für elektromagnetische Wellen, geringe bzw. für die Anwendung optimierte thermische Ausdehnung, gute Dämpfungseigenschaften sowie Isolationseigenschaften.

1.2.2.1 Luft- und Raumfahrt, Wehrtechnik

Wegen der gegenüber konventionellen Werkstoffen erheblich besseren massebezogenen strukturellen Leistungsfähigkeit konnten sich hochpreisige FKV aus carbonfaserverstärktem Kunststoff (CFK) zunächst vor allem in Hochtechnologie-sektoren wie zum Beispiel der Raumfahrtindustrie oder der Wehrtechnik etablieren. Ein beeindruckendes Beispiel der Verarbeitung in sehr großen Bauteilen ist die aus CFK bestehende Struktur des Stealth Boat Visby der schwedischen Marine mit einer Länge von über 70 m, Bild 1.1.

Auch im zivilen Flugzeugbau wird CFK zunehmend angewendet, da gegenüber Aluminiumlegierungen nicht nur eine signifikante Steigerung der strukturellen Leistungsfähigkeit, die mit entsprechender Treibstoffersparnis bzw. Reichweitenerhöhung einhergeht, sondern aufgrund der Ermüdungsfreiheit auch Einsparungen bei der Wartung im Betrieb zu erzielen sind, die zu einer höheren Verfügbarkeit der Flugzeuge beitragen. Der zunehmende Einsatz von CFK leistet damit entscheidende Beiträge zur Erfüllung der Vorgaben der Europäischen Kommission für die Reduktion des Kerosinverbrauchs und unerwünschter Emissionen. Dies ist vor dem Hintergrund des mit jährlich etwa 5 % wachsenden Passagieraufkommens und einer erwarteten Verdopplung der heutigen (2013) weltweiten Flotte von rund 20 000 Passagierflugzeugen in den nächsten 20 Jahren von besonderer Bedeutung [15]. Bei einem Mittelstreckenflugzeug bedeutet die Verminderung der Strukturmasse um 1 kg über das gesamte Flugzeugleben gesehen eine Treibstoffersparnis von bis zu 2000 l Kerosin. Hierfür werden u. U. auch Herstellungskosten in Kauf genommen, die sich typischerweise zwischen 500 und 1000 € pro eingespartem kg Strukturmasse bewegen können.

Meilensteine der Einführung von CFK für sicherheitsrelevante Steuerungselemente und tragende Primärstrukturen in großen zivilen Verkehrsflugzeugen (> 100 Sitze) waren Spoiler und Ruder im Jahr 1982 für den Airbus A310, das komplette Seitenleitwerk des A310 im Jahr 1985, Querruder, Landeklappen und Höhenleitwerk des A320 im Jahr 1987, hochbelastete Rumpfelemente wie die den Druckbereich im Heck abschließende Kalotte sowie der Kiel des A340 im Jahr 2001, die tragende Fußbodenstruktur des oberen Passagierdecks, der Flügelmittelkasten sowie das unbedruckte Heck des Rumpfes des A380 im Jahr 2005, sowie schließlich der gesamte bedruckte Rumpf der Boeing B787 im Jahr 2009 und des A350 im Jahr 2013. Damit erreicht der Massenanteil an CFK in modernen Verkehrsflugzeugen heute über 50 %, Bild 1.2. Zusätzlich werden FKV auch in nicht primär lasttragenden Bereichen der Flugzeuge eingesetzt, wie z. B. in der Flugzeugkabine in Form von Verkleidungen, Trennwänden oder Gepäckablagefächern.

Von besonderer Bedeutung für die vorteilhafte Nutzung von CFK in tragenden Strukturen im Flugzeugbau ist der Umstand, dass durch die konstruktive Auslegung bzw. Dimensionierung die maximal auftretenden Spannungen bzw. Dehnungen so limi-

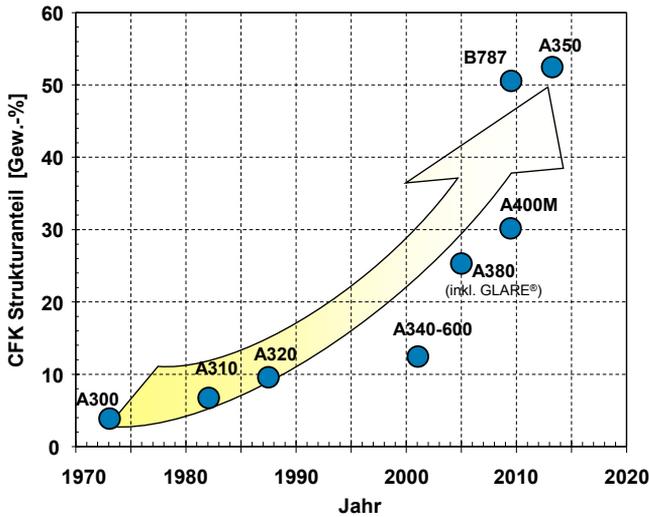
tiert werden können, dass bei Eintritt von Beschädigungen ein Wachstum von Rissen aufgrund der dynamischen Betriebslasten im betroffenen Bauteilabschnitt ausgeschlossen wird („no growth concept“). Dieser Umstand führt im Betrieb zu Einsparungen von erheblichem Aufwand der Flugzeugbetreiber, der bei Aluminiumstrukturen heute für die regelmäßige Inspektion des Risswachstums in vorgeschriebenen Intervallen erforderlich ist.

Zum Einsatz kommen in hochbelasteten Flugzeugstrukturen heute hauptsächlich Verbundwerkstoffe, die aus mehreren, in unterschiedlicher Orientierung aufeinander geschichteten Lagen aus unidirektional ausgerichteten Kohlenstofffasern in einer Epoxidharzmatrix bestehen. Typisch ist ein Faservolumengehalt von 60%, und es dominiert für großflächige Strukturen wie Flügel- oder Rumpfschalen die Autoklaventechnik. Während für Lasteinleitungsbereiche häufig Harzinfusionsverfahren in geschlossenen Werkzeugen zur Anwendung kommen, wird für kleinere Strukturbauteile wie z. B. Anschlusswinkel, die in relativ kurzer Taktzeit in größeren Stückzahlen produziert werden müssen, auch das Thermoformen von Organoblechen eingesetzt.

Insbesondere vor dem Hintergrund des Aufkommens neuer, hinsichtlich ihrer strukturmechanischen Leistungsfähigkeit sowie des Preis-Leistungs-Verhältnisses verbesserter Aluminiumlegierungen mit Lithium- oder mit Magnesium-Scandium-Anteilen besteht allerdings großer Entwicklungsbedarf für die Reduktion der Herstellungskosten (Materialkosten, Kosten der Verarbeitungsprozesse) sowie der unzureichenden elektrischen Leitfähigkeit von CFK. Diese reduziert heute das Leichtbaupotenzial erheblich, da zur Erfüllung wichtiger elektrischer Funktionen wie z. B. Erdung, Aufnahme von Fehlerströmen elektrischer Systeme, elektromagnetische Abschirmung und Blitzschutz entsprechende metallische Zusatzmassen im CFK-Flugzeugrumpf installiert werden müssen.



Bild 1.1 Stealth Boat „Visby“ der schwedischen Marine [4]

**Bild 1.2**

Strukturgewichtsanteil von CFK in Verkehrsflugzeugen [6]

1.2.2.2 Migration in andere Branchen

Aufgrund ihrer Vorzüge migrierte die FKV-Technologie neben der Luft- und Raumfahrt auch in andere Industriesektoren. Die besondere Eignung der FKV, einen Beitrag zur Lösung der sozio-technologischen Problemstellungen der 70er, 80er und 90er Jahre (Veränderung der Lage auf den Energiemärkten, gesteigertes Umweltbewusstsein) zu leisten, war ein wesentlicher Faktor der stetig zunehmenden Anwendung in verschiedensten Industriesektoren [5].

Der verschärfte Wettbewerb auf den Weltmärkten und der damit erzeugte zusätzliche Innovationsdruck hinsichtlich der Verbesserung der technologischen und ökonomischen Produktcharakteristika stellt bei der Entwicklung neuer Produkte immer höhere Anforderungen an die zu verwendenden Werkstoffe. Dieser Problematik kann in bestimmten Industriebereichen nur durch die Anwendung neuartiger Werkstoffe im Allgemeinen und FKV im Speziellen begegnet werden. In Bild 1.3 sind die übergeordneten ökonomischen und ökologischen Gründe für den ansteigenden industriellen Einsatz von FKV zusammengestellt.

Bild 1.4 veranschaulicht die Nachfrageprognose für endlosfaserverstärkte Verbundwerkstoffe für den Zeitraum 2011 - 2020.

Aufgrund der dargelegten industriellen Erfordernisse einerseits und des Leistungspotenzials der Materialklasse andererseits haben sich die Anwendungsfelder von FKV über die Jahre Schritt für Schritt erweitert. Es sind dies im Wesentlichen:

- Verkehrstechnik und Transport,
- Elektro-/Elektronikindustrie,
- Maschinenbau,
- Bauwesen,

- Chemie und Apparatebau (v. a. Behälter, Rohrleitungen),
- Energietechnik, Windkraft, Offshore,
- Sport und Freizeit.

Die Gliederung der Anwendungen in Branchen ist nicht einheitlich. Verkehrstechnik und Transport setzen sich aus den Industriezweigen Luftfahrt, Automobil, Schienenfahrzeuge und Schiffbau zusammen. Die hier verwendete Zuordnung basiert auf den Marktdaten nach [7]. Das Bild 1.5 zeigt die Zuordnung der Produktion von glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) auf Branchen in Europa sowie den globalen CFK-Verbrauch nach Anwendungen. Für GFK dominieren Bauwesen und Transport (hier spielt der Automobilbau eine wichtige Rolle), für CFK dominiert heute die Windkraft noch vor der Luftfahrt sowie dem Sport- und Freizeitsektor.

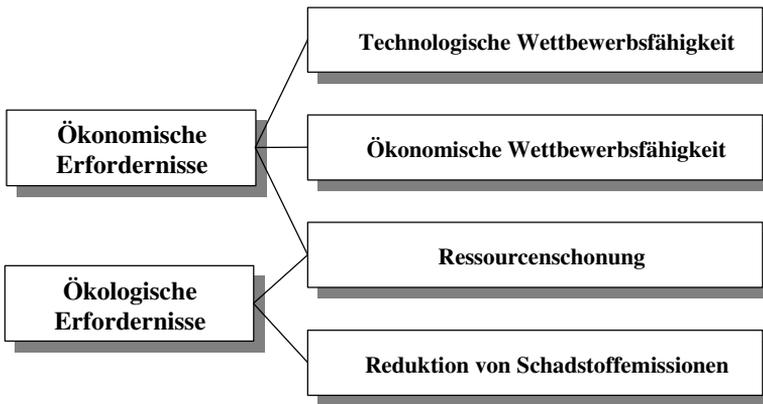


Bild 1.3 Übergeordnete Gründe für den industriellen Einsatz von FKV nach [8]

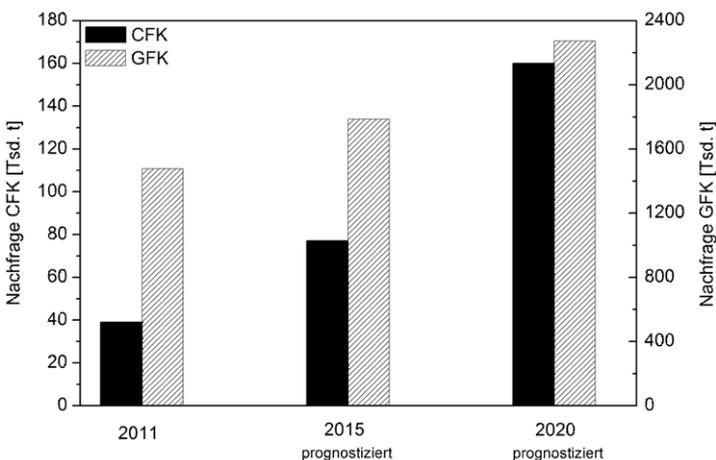


Bild 1.4 Nachfrageprognose für endlosfaserverstärkte Verbundwerkstoffe [9]

Ein weiteres Beispiel im Bereich Verkehrstechnik ist der Einsatz von FKV in Schienenfahrzeugen. Damit können neben erheblichen Gewichts- und Formvorteilen auch Herstellkosten durch Integration gesenkt werden, Bild 1.6.

Anwendungen der Elektro- und Elektronikbranche sind u. a. Trockentrafos, Hochspannungsschaltstangen oder Kryostate.

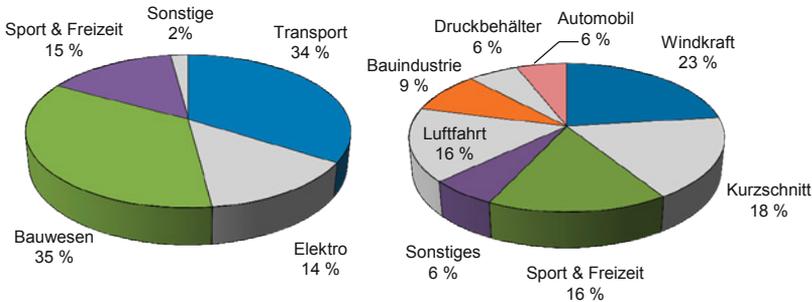


Bild 1.5 Aufteilung der GFK-Produktion (100% = 1,01 Mio t) 2012 in Europa auf Anwendungsindustrien (*links*) sowie globaler CFK-Verbrauch (100% = 57 000 t) 2011 nach Anwendungen (*rechts*) [7]



Bild 1.6 ICE mit FKV-Außenhaut [10]

Ein typisches Beispiel aus dem Bereich Bauwesen und Konstruktion ist der Brückenbau, Bild 1.7. Die abgebildete Konstruktion wurde anlässlich der Schweizer Expo 2002 für Fußgänger voll funktionstauglich aufgebaut und ist von mehreren 100 000 Besuchern benutzt worden [11].

In der hier verwendeten Einteilung des Marktes ist der Maschinenbau zum Teil den Bereichen Verkehrstechnik und Offshore, aber weitestgehend dem Sektor Bauwesen/Konstruktion zugeordnet. Als Anwendungen können beispielsweise hochbelastete CFK-Blattfedern genannt werden, aber auch große Bauteile wie Abgaskanäle in der Klimatechnik, Bild 1.8.



Bild 1.7 Brückenkonstruktion aus GFK [11]



Bild 1.8
Abgaskanal aus GF-UP [12]

Der Bereich Offshore stellt mengenmäßig einen nicht unerheblichen Teil der Gesamtproduktion dar. Die Anwendungen finden sich einerseits in Offshore-Windparks, Bild 1.9, zum anderen in Förderleitungen für Bohrinseln, wobei die Plattformen mittlerweile auch schon als Unterwasserstationen vorgesehen werden.

**Bild 1.9**

Utgrunden-Windpark in Schweden [13]

1.2.2.3 Entwicklung des FKV-Marktes

Derzeit beherrschen Werkstoffe mit duroplastischer Matrix den FKV-Markt. In Europa beträgt der Anteil duroplastischer FKV am Gesamtmarkt rund 80 % gegenüber rund 20 % thermoplastischer FKV [7].

Eine Übersicht über die Aufteilung des europäischen FKV-Marktes nach Matrixsystemen und den Verarbeitungsverfahren gibt Bild 1.10.

Für den im Vergleich zu CFK mengenmäßig wesentlich bedeutsameren GFK-Markt dominieren SMC- (Sheet Molding Compound) und BMC-Pressmassen (Bulk Molding Compound) mit zusammen rund 26 % Marktanteil. Von besonderer Bedeutung sind dabei Anwendungen für den Elektro- und Elektronikbereich (BMC) sowie für den Automobilbereich (SMC), die relativ hoch automatisiert in großen Serien hergestellt werden. Von großer Bedeutung sind GFK-Automobilanwendungen auch für die glas-mattenverstärkten Thermoplaste (GMT) und die langfaserverstärkten Thermoplaste (LFT), die sich durch ein überdurchschnittliches Marktwachstum auszeichnen. Kurzfaserverstärkte Thermoplaste werden in sehr großen Mengen für Spritzgussbauteile verwendet, die zwar prinzipiell auch zu den FKV gezählt werden, bezüglich der Werkstoffeigenschaften jedoch weit hinter der Kategorie der langfaserverstärkten Kunststoffe zurückbleiben.

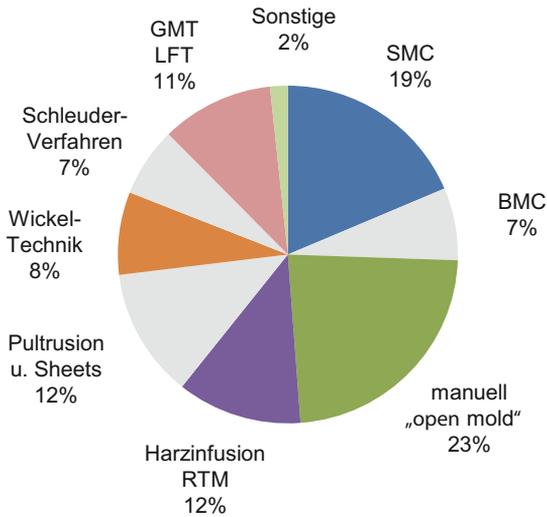


Bild 1.10
GFK-Produktion in Europa 2012 nach
Fertigungsverfahren [7]

Rückläufig sind dagegen die Entwicklungen der sogenannten „offenen Verfahren“ wie Handlaminieren und Faserspritzen. Die Produktion von GFK-Rotorblättern für Windkraftanlagen wird teilweise in das nicht-europäische Ausland verlagert. Weiterhin gibt es hier aufgrund der zunehmenden Rotorblattgröße einen Trend zur Substitution von GFK durch CFK.

Die im Resin Transfer Molding Verfahren (RTM) hergestellten Anwendungen haben weiterhin viel Entwicklungspotential, insbesondere im Zusammenhang mit neuen, schnell aushärtenden Harzsystemen für die Serienfertigung größerer Stückzahlen im Automobilbau.

Die Herstellung von GFK-Platten, die in kontinuierlichen Verfahren mit großem Automatisierungsgrad und hohen Ausbringungsmengen erfolgt, verzeichnet in Europa weiterhin Wachstum, während GFK-Pultrusionsprofile, die überwiegend im Bauwesen eingesetzt werden, aufgrund der in vielen europäischen Ländern brachliegenden Baukonjunktur derzeit rückläufig sind.

Eine bedeutende Anwendung für die GFK-Wickeltechnik ist die Sanierung der Abwasserkanäle mit sogenannten „Schlauchlinern“, d. h. aus FKV bestehenden neuen Rohren, die in die sanierungsbedürftigen alten Kanäle eingezogen werden (Bild 1.11) [14]. Weiterhin von Bedeutung ist auch die Herstellung von Rohr- und Tankbauteilen.



Bild 1.11 Sanierung von Abwasserkanälen mit Schlauchlinern [Bildquelle: Firma RelineEurope [14]]

Hinsichtlich der eingesetzten Verstärkungssysteme wird der FKV-Markt ganz klar von den Glasfasern beherrscht. Jedoch kann eine deutliche Verlagerung zu noch höheren Eigenschaftsprofilen und damit im Wesentlichen zu Kohlenstofffasern als Verstärkungsstrukturen festgestellt werden. Andere Faserarten (z.B. Naturfasern) gewinnen vor allem in der Automobilindustrie, aber auch im Bauwesen für Teile ohne höhere strukturelle Belastung an Bedeutung.

Die früher übliche Unterscheidung zwischen technischen und Hochleistungsverbundwerkstoffen ist überholt. Heute weisen die Verbundwerkstoffe ein Leistungsspektrum auf, das in der Breite von keiner anderen Werkstoffgruppe erreicht wird. Dabei sind Festigkeit und Steifigkeit im Bereich von 50 bis 3000 MPa bzw. 5 bis 500 GPa einstellbar. Diskontinuierlich glasfaserverstärkte Pressmassen mit mineralischen Füllstoffen und unidirektionale mit 60 Vol.-% Kohlenstofffasern verstärkte Prepregs bilden dabei beispielhaft die Extreme. Entsprechend bewegen sich auch die Werkstoffkosten zwischen etwa 2 €/kg und 1000 €/kg.

Entscheidend für neue Entwicklungen und Anwendungen von FKV bleibt die Erfüllung der Anforderungsprofile zu akzeptablen Kosten, die wesentlich auch von den Verarbeitungsverfahren und der Seriengröße bestimmt werden. Der Markt und das Image der Verbundwerkstoffe haben in den letzten Jahren in der breiten Öffentlichkeit wesentlich durch den zunehmenden Einsatz im Sport- und Freizeitbereich gewonnen, da mit dem Begriff „Carbon“ für Kohlenstofffaserbauteile z.B. in Rennrädern, Snowboards, Surfbrettern, Golf- und Tennisschlägern höchste Leistung und Qualität assoziiert werden.

Neben den bisher diskutierten FKV-Konstruktionswerkstoffen haben sich inzwischen Kohlenstofffasern in Pressmassen bzw. Compounds mit einem Anteil von etwa 50% der Gesamtproduktion als Funktionswerkstoffe einen bedeutenden Markt erobert. Dabei wird ihre gute Wärmeleitfähigkeit und die elektromagnetische Abschirmung in elektronischen Bauteilen genutzt, was bei dem heute stark zunehmenden Einsatz der drahtlosen Daten- und Informationsübertragung von großer Bedeutung und Umweltrelevanz ist.

1.2.3 Technisch-wirtschaftliche Entwicklung der Kohlenstofffasern

M. Heine

1.2.3.1 Status und Trends

Kohlenstofffasern als Verstärkungskomponenten in Faser-Kunststoffverbunden besitzen das größte Potenzial zur Umsetzung von Leichtbaukonstruktionen. Die aktuellen Diskussionen zum Klimawandel und die Energiepreisthematik haben wesentlich dazu beigetragen, dass dieser Werkstoff eine wichtige gesellschaftliche Bedeutung bekommen hat. Die voranschreitende Globalisierung erfordert im hohen Maße eine Zunahme der Mobilität mit allen damit verbundenen negativen Begleiterscheinungen. Die Einsparung von bewegten Massen, sowohl bei erdgebundenen Transportmitteln, als auch bei Flugzeugen, trägt direkt zur Klimaentlastung bei. Das verstärkt stattfindende Umdenken bei der Auswahl von Materialien zur Herstellung bewegter leichter, hochsteifer und fester Konstruktionen hat die Bedeutung der Verbundwerkstoffe maßgeblich in den Fokus gerückt. Kohlenstofffasern sind hier das wichtigste Material, um die bisherigen Materialien zu substituieren. Es ist damit je nach Anwendungsfall möglich, bei doppelter Festigkeit und Steifigkeit um bis zu 80% leichter als mit Stahl und um bis zu 50% leichter als mit Aluminium zu konstruieren.

Angesichts der prognostizierten Zunahme der Weltbevölkerung und der massiven Anstrengungen aufstrebender Staaten nach mehr Wohlstand ist weltweit von einer stetig zunehmenden Mobilität und steigendem Energiebedarf auszugehen. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, welche technologischen Ansätze heute ergriffen werden können, um die Folgen dieser Entwicklung zu beherrschen.

Durch den direkten Zusammenhang zwischen Energiebedarf und bewegter Masse wird der Ersatz traditioneller Konstruktionswerkstoffe durch leichte Materialien zunehmend in den Vordergrund gelangen. Hier werden Verbundmaterialien mit Carbonfasern einen wichtigen Beitrag leisten.

Die generelle Zunahme des Bedarfs an Energie kann grundsätzlich und mittelfristig über die Energie-Erzeugung auf alternativen Wegen, also ohne Öl, Kohle oder Kernkraft, abgefangen werden. Ein wichtiger Aspekt wird hier die Nutzung der Wind-

energie sein, wobei eine Verschiebung der Windkraftanlagen vom Land in die Off-shore-Bereiche erwartet wird. Die Frage der Verfügbarkeit von Plätzen mit hoher und gleichmäßiger Windstärke lässt sich so leichter lösen und die generelle Zunahme der Rotorblatt-Größen durch Verstärkung mit Kohlenstofffasergurten lässt den Wirkungsgrad deutlich steigen.

Die Luftfahrt ist Vorreiter beim Einsatz von CFK-Bauteilen im Flugzeug und nutzt bereits seit Jahrzehnten das damit verbundene Leichtbaupotenzial. Die höhere Nutzlast bzw. die Senkung des Kerosinverbrauchs sind hier wichtigste Innovationstreiber.

Einen ähnlichen Schub in der Verwendung von CFK-Bauteilen erwartet man beim Automobil. Das enorme Potenzial zeigt sich insbesondere schon im Sportwagenbereich, allerdings kann man prinzipiell davon ausgehen, dass diese Entwicklung im Gegensatz zur Luftfahrt eher revolutionär als evolutionär erfolgen wird. Der aktuell erwartete Trend zur Elektromobilität kann hier einen zusätzlichen Innovationsschub bewirken.

Hierzu müssen jedoch noch erhebliche Hürden in der Produktionstechnik genommen werden, um eine automatisierte Fertigung der notwendigen hohen Stückzahlen umsetzen zu können. Auch die Fragen zur Schadenserkenkung und Reparatur im Fall eines Crashes und ein wirtschaftliches Recycling von CFK-Bauteilen sind erst im Ansatz beantwortet.

Bei der Automatisierung der Fertigung von CFK-Bauteilen könnten neue Robotersysteme mit bewegten Komponenten aus CFK eine entscheidende Rolle spielen. Die geringeren bewegten Massen lassen sich schneller und präziser steuern. Dies kann zu entsprechend kürzeren Taktzeiten führen. Zusätzlich muss die heutige Preform- und Prepreg-Technologie weiterentwickelt werden, um die für den Großserieneinsatz notwendigen Kostenziele zu erreichen.

Ein wichtige Rolle wird hier auch die Kombination der Kohlenstofffasern mit anderen Werkstoffen spielen, wie z.B. bei Metall-CFK-Hybridstrukturen, die u. a. bei B-Säulen in der Automobilkarosserie bereits zum Einsatz kommen.

Auch die Nutzung der Korrosionsbeständigkeit in Kombination mit Werkstoffen in der Bauindustrie, wie z. B. Beton oder Holz lassen zukünftig ein immenses Potenzial erwarten, da diese neuen Werkstoffkombinationen hinsichtlich ihrer Stabilität und Langlebigkeit dem heutigen Stahlbeton und Spannbeton überlegen sein werden.

Bei allen Anwendungen ist die Weiterentwicklung der heutigen Verarbeitungstechnologien zu großserientauglichen Prozessen der Schlüssel zum Erfolg.

Die aktuellen Forschungsarbeiten, z. B. im Rahmen des Spitzenclusters MAI Carbon im Raum München-Augsburg-Ingolstadt [16] tragen hier wesentlich zu einer Weiterentwicklung der Faserverbundtechnologie und der großserientauglichen Prozesse bei.

MAI Carbon ist eine Abteilung des Carbon Composites e. V. (CCeV) und wurde als Initiative des Dachverbandes im Rahmen des Cluster-Wettbewerbs des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) am 19. Januar 2012 zum Spitzencluster nominiert.

MAI Carbon wird durch Unternehmen, Bildungs- und Forschungseinrichtungen sowie unterstützende Organisationen gebildet, die in der MAI Region München-Augsburg-Ingolstadt auf dem Technologiefeld „Carbonfaserverstärkte Kunststoffe“ (CFK oder Carbon) agieren. Die Mitglieder stammen aus sämtlichen Branchen, in denen Hochleistungs-Faserverbundwerkstoffe Anwendung finden. Der Hauptfokus liegt auf den Anwenderbranchen Automobilbau, Luft- und Raumfahrt sowie dem Maschinen- und Anlagenbau. Ziel des Clusters ist der Ausbau der MAI Region zu einem europäischen Kompetenzzentrum für CFK-Leichtbau, das die gesamte Wertschöpfungskette der CFK-Technologie abdeckt und den vertretenen Partnern in der Schlüsseltechnologie CFK zu einer Weltmarkt-Spitzenposition verhilft.

1.2.3.2 Marktentwicklung

Die aktuellen gesellschaftlichen Trends wie Nachhaltigkeit und Umweltbewusstsein werden den Werkstoff Faserverbund mit Kohlenstofffasern zum Durchbruch verhelfen. Entscheidend ist die allgemeine Akzeptanz des neuen Werkstoffs in Anwendungen, die Eigenschaften wie hohe Steifigkeit und Festigkeit bei geringem Gewicht nutzen können. Hier ist generell auch ein Umdenkungsprozess zu beobachten, der nicht die Einzelsubstitution eines Bauteils im Vordergrund sieht, sondern von einem systemischen Ansatz ausgeht. Die Dominanz des konstruktiven Denkens z. B. in reinen metallischen Strukturen muss kontinuierlich in Richtung einer Mischbauweise geändert werden. Ein intelligenter Materialmix kann entscheidend dazu beitragen, dass die Gesamtkosten sinken, obwohl teure Carbonmaterialien eingesetzt werden. Mittelfristig werden hier auch bionische Strukturen der Natur in die Konstruktionen einfließen, denn Biomaterialien sind oft im Vorteil, wenn Material und Ressourcen effizient genutzt werden sollen.

Die Prozesskette der kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffverbunde wird zunehmend als Prozessnetzwerk gesehen und umgesetzt werden. Dies geht einher mit einer Zentralisierung und Fokussierung der Entwicklungsarbeiten zwischen Industrie und wissenschaftlichen Instituten, wie sie beispielhaft beim bereits erwähnten Spitzencluster MAI Carbon stattfinden.

Die lokale Präsenz von entsprechenden Industrieunternehmen aus dem Bereich des Automobilbaus, der Luftfahrt, des Maschinenbaus und der Ausgangsmaterialien, wie Kohlenstofffasern und deren Halbzeuge, stellen sicher, dass innovative Ansätze auch wirtschaftlich umgesetzt werden.

In entsprechender Weise wichtig ist die gleichzeitige Verzahnung von Ausbildung, wissenschaftlicher Lehre und Forschung mit industriellem Denken, um so zu nachhaltigen Gesamtsystemen zu kommen.

1.2.3.3 Mengenentwicklung

Für Verstärkungszwecke einsetzbare Kohlenstofffasern haben eine vergleichsweise kurze Historie. Sie basieren heute überwiegend auf Polyacrylnitril, das erst in den 50er Jahren entdeckt wurde.

Davor gab es bereits Kohlenstofffäden basierend auf Cellulose, die aber anfangs lediglich in Glühlampen zum Einsatz kamen und eine sehr geringe mechanische Festigkeit aufwiesen.

Die Umwandlung des weißen Polymers in eine schwarze unbrennbare Faser wurde erstmals Anfang der 60er Jahre durch Shindo beschrieben und dann in Europa Ende der 60er Jahre erstmalig durch die heutige SGL Group mit einer Pilotanlage realisiert. Erst im Zeitraum von 1990 bis 2010 stiegen die Jahres-Bedarfsmengen deutlich von 5000 to/Jahr auf 30 000 to/Jahr an. In diesem Zeitraum wurde von SGL in weitere Anlagen investiert (Bild 1.12).

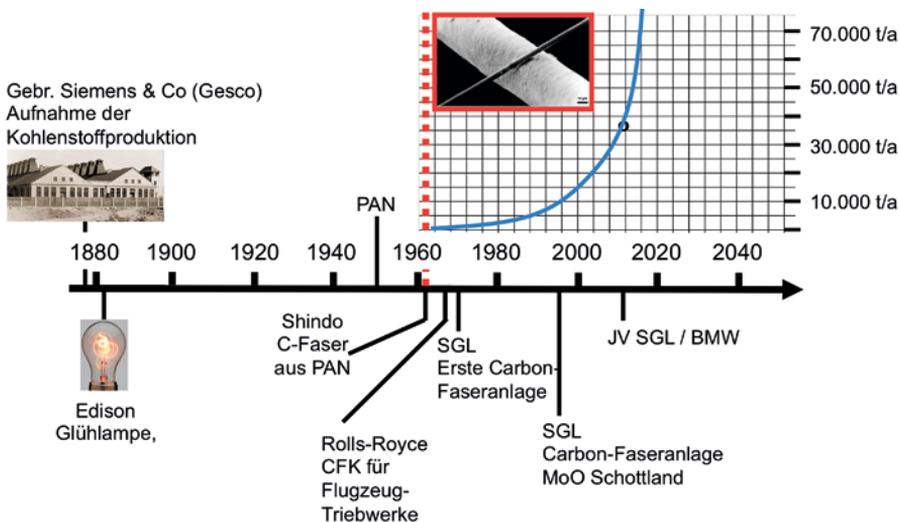


Bild 1.12 Kohlenstofffasern – ein Material mit erst kurzer Historie

Betrachtet man die Mengenentwicklung der letzten 6 Jahre und die geschätzte zukünftige Entwicklung, so wird deutlich, dass der größte Anstieg der Bedarfsmengen bei Industrieanwendungen zu erwarten ist (Bild 1.13). Die Mengen für Sportanwendungen bleiben durchweg auf gleichem Level und steigen nur geringfügig. Kohlenstofffasermengen für Flugzeuganwendungen steigen durchaus moderat, jedoch ist ihr Anteil bezogen auf den Gesamt-Weltbedarf prozentual gesehen rückläufig.

Jährlicher CF Bedarf für Anwendungen [1000t]

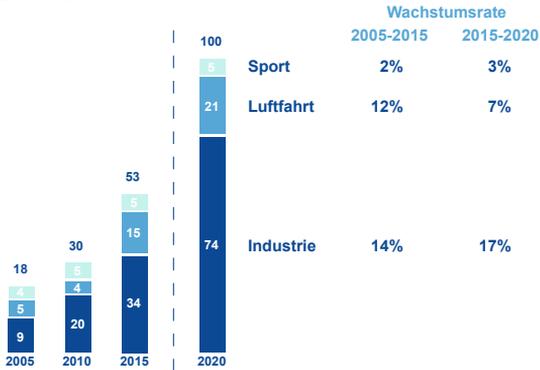


Bild 1.13
Kohlenstofffaserbedarf nach Marktsegmenten [17]

Source: SGL Group

Betrachtet man speziell den Bereich der industriellen Anwendungen, so wird der aktuell am stärksten wachsende Teilmarkt im Bereich der Automobilteile gesehen (Bild 1.14). In diesem Zusammenhang ist insbesondere das Engagement der BMW GROUP zusammen mit dem JV ACF (SGL/BMW) zu erwähnen, die im Herbst 2013 ein elektrisch betriebenes „Mega-City-Vehicle“ auf den Markt gebracht haben (BMW i3) und wenig später eine Sportwagenversion (BMW i8), bei der ein Elektroantrieb mit einem Benzin-Range-Extender kombiniert ist.

Jährlicher CF Bedarf für Industrieanwendungen [1000t]

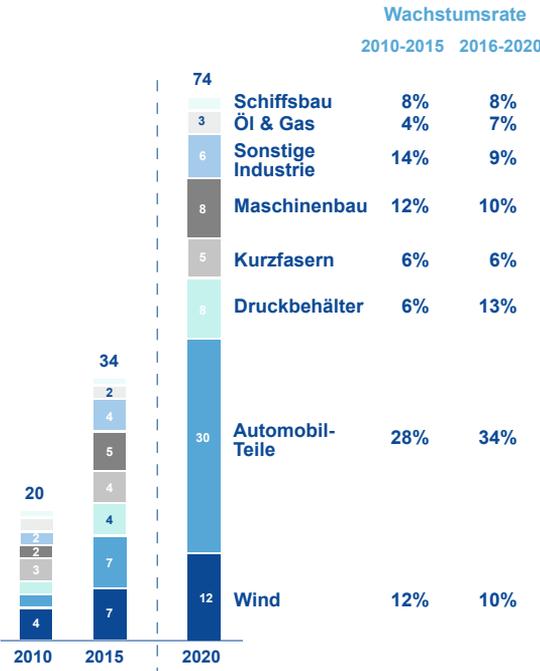


Bild 1.14
Kohlenstofffaserbedarf für das Marktsegment „Industrielle Anwendungen“ [18]

Source: SGL Group

1.2.4 Ökonomische Bewertung der FKV-Verarbeitungstechnologien

R. Holschuh, J. Mack

Eine ökonomische Bewertung von FKV-Verarbeitungstechnologien hinsichtlich ökonomischen Aspekten ist stark determiniert durch das spätere Anwendungsfeld der Bauteile. In der letzten Dekade hat sich eine deutliche Verschiebung abgezeichnet, ausgehend von den traditionellen polymerbasierten Hochleistungsapplikationsfeldern wie „Luft- und Raumfahrt“ hin zu einem stark verbreiteten Einsatz von FKV-Bauteilen basierend auf Standard- und technischen Polymeren [19]. Durch integrative Betrachtung und Optimierung der gesamten Prozessentstehungskette in Verbindung mit gesunkenen Material- und Halbzeugkosten können kostenneutrale bzw. kosteneffiziente Bauteile mit gleichzeitig gesteigerten Eigenschaftsprofilen hergestellt werden [20]–[22].

In Tabelle 1.1 sind die jeweiligen Kosten eines Bauteils aus Stahl, Aluminium und CFK im Jahr 2010 und 2030 (prognostiziert) dargestellt. Das Kostenverhältnis von CFK zu Stahl sinkt von Faktor 5,7 auf 1,9. [23]

Tabelle 1.1 Prognostizierter Bauteilkostenvergleich (2010 – 2030)

Material	Jahr 2010	Jahr 2030
Stahl	100	100
Aluminium	130	140
FKV mit Kohlenstofffasern	570	190

Technologieentscheidungen werden nach wie vor auf Basis einer Kostenvergleichsrechnung im Sinne einer statischen Vollkostenanalyse vorhandener Technologie mit einem Substitut getroffen. Langfristige Mehrwerte, die durch den Einsatz neuer Technologien und damit verbunden auch neuer Materialien generiert werden, wie beispielsweise Gewichtseinsparungspotential, verringerte Produktlebenszykluskosten oder reduzierter CO₂-Footprint, sind jedoch ebenfalls zu berücksichtigen. Es besteht bei der ökonomischen Bewertung oder bei Rentabilitätsvergleichen der FKV-Technologien mit klassischen Werkstoffen und Herstellungsverfahren die folgende Grundproblematik:

- die statischen Methoden der Wirtschaftlichkeitsanalysen im Sinne einer Kostenvergleichsrechnung sind typischerweise begrenzt auf die Herstellung bzw. Entwicklung der Substitute;
- qualitative Elemente werden häufig nicht quantifiziert bzw. die Daten reichen aufgrund der Neuheit meist nicht aus, verlässliche Aussagen über längere Zeiträume zu treffen;
- die meist neuartigen Herstellungsverfahren sind in Bezug auf die relevanten Prozessparameter noch nicht ausreichend untersucht bzw. diese sind nicht bekannt;

- es existieren nur wenige aussagekräftige Langzeitstudien über Serienfertigung und Betrieb sowie Einsatzkosten der neuen Bauteile.

Diese und andere Gründe haben in der Vergangenheit dazu geführt, dass Wirtschaftlichkeitsanalysen inhärent punktuelle Momentaufnahmen darstellten, was die betrachtete neue Technologie häufig als nachteilig erscheinen ließ. Die Ökobilanzierung ist dagegen eine Methodik, die auch langfristige ökologische Folgen jedes Bauteils über die gesamte Lebensspanne und alle damit verbundenen und zurechenbaren Prozesse ganzheitlich bilanziert. In der Konsequenz sind auch ökonomische Aspekte über den Herstellungsprozess hinaus bilanzierbar und sollten bei der Entscheidungsfindung bezüglich der Einführung einer neuen Technologie berücksichtigt werden.

1.2.4.1 Grundlagen

Ökonomische Bewertungen können im Rahmen technologischer Entwicklungen durch Projektion von Wirtschaftlichkeitskenngrößen, die auf Basis des jeweiligen Planungsstands nach dessen Realisierung zu erwarten sind, durchgeführt werden. Die Bewertung der ökonomischen Vorteilhaftigkeit kann dabei absolut oder relativ i. S. einer Kostenvergleichsrechnung erfolgen.

Dabei gilt zur Ermittlung dieser Bewertungsdaten der ökonomische Grundsatz:

Eine ökonomische Tätigkeit wird als wirtschaftlich bezeichnet, wenn das Verhältnis zwischen Output und Input größer ist als das vergleichbarer Alternativen.

Diese Aussage ist eine in sich logische Dichotomie: Entweder muss bei gegebenem Output der Input minimiert oder umgekehrt bei gegebenem Input maximaler Output generiert werden. In der Regel ist das vorrangige Ziel bei kommerziellen Anwendungen, die Kosten bei gegebenem Leistungsniveau zu minimieren. Somit ergibt sich ein einfaches Substitutionsmodell.

Das Bild 1.15 soll exemplarisch aufzeigen, wann eine traditionelle Technologie zu verlassen und auf eine fortschrittlichere Technologie überzugehen ist. Dies kann sinnvoll sein, wenn durch den Wechsel auf die neue Technologie zum einen eine höhere Wirtschaftlichkeit und zum anderen die Erreichbarkeit eines höheren technischen Leistungsniveaus realisiert werden kann.

Das Leistungsniveau L_1 kann aus technischer Sicht durch beide Alternativen erreicht werden. Allerdings mit geringeren Kosten bei der traditionellen Technologie, weshalb diese hier wirtschaftlich ist. Steigen die Ansprüche an die technische Leistungsfähigkeit auf das Niveau L_2 , liegen die Anforderungen über der maximalen Leistungsfähigkeit L_{grenz1} der traditionellen Technologie, die somit nicht mehr genutzt werden kann. Es muss zur neuen gewechselt werden. Der Schnittpunkt bei den Kosten/Leistungskurven bildet den Indifferenzpunkt (K_v, L_1) der Substitutionsentscheidung.

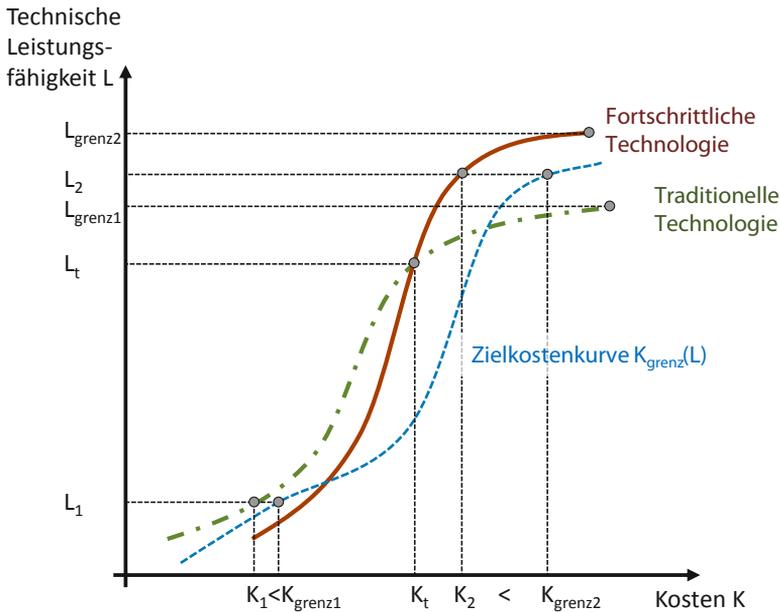


Bild 1.15 Einfaches Substitutionsmodell

In vielen Anwendungsbereichen liegen jedoch nicht nur Leistungsmerkmale vor, die es dann kostengünstig monokausal alternativ zu realisieren gilt, vielmehr gibt es eine Kostenobergrenze für die gelieferte Leistung der Produkte. Die daraus resultierende Zielkosten/Leistungskurve ist der marketingtechnisch realisierbare Marktpreis. In Bild 1.15 liegt diese Kurve so, dass es generell immer möglich ist, je nach Leistungsniveau entweder mit traditioneller oder fortschrittlicher Technologie die marktseitigen Kostengrenzen (K_{grenz1} und K_{grenz2} bzw. $K_{\text{grenz}}(L)$) zu erreichen. Dies ist aber nicht immer gegeben. Es ist durchaus denkbar, dass gewisse Leistungen nicht zum Marktpreis herstellbar sind bzw. die Leistungsmerkmale keine ökonomische Relevanz haben. Dann liegt die Zielkosten/Leistungskurve $K_{\text{grenz}}(L)$ über den technologisch realisierbaren Kurven.

1.2.4.2 Bisherige Ansätze

In den USA wurden eine ganze Reihe von FKV-Entwicklungsprogrammen aufgelegt, die neben technischen Zielsetzungen auch stärker als bisher auf die Reduktion der Herstellkosten von FKV-Bauteilen und -Strukturen ausgerichtet waren. Ein Beispiel ist das „Advanced-Composite-Technology-Programm“ unter Federführung der NASA, welches das zentrale Ziel verfolgte, FKV-Primärstrukturen für den zivilen Flugzeugbau zu entwickeln, die gegenüber der traditionellen Leichtmetallbauweise auch hinsichtlich der Herstellkosten wettbewerbsfähig sein sollen.

Im Rahmen der Forschungsarbeiten mit luft- und raumfahrtindustrieller Schwerpunktsetzung bildeten sich drei im theoretischen Ansatz grundsätzlich unterschiedliche Modellfamilien zur FKV-Wirtschaftlichkeitsanalyse heraus:

- parametrische, empirisch basierte Kostenmodelle,
- leistungsorientierte Kostenrechnungsmodelle,
- prozessanalytische Kostenmodelle.

Die parametrischen Kostenmodelle versuchen dabei aus empirischen Daten mittels statistischer Methoden (zumeist multiple Regression) Funktionen abzuleiten, die den Zusammenhang zwischen parametrisierten, technischen Charakteristika von Bauteilen (Gewicht, geometrische Komplexität etc.) und den in verschiedenen Kategorien entstehenden Kosten darstellen. Kostenmodelle, die zu dieser Familie gehören, werden hauptsächlich vor dem Einsatz etablierter Technologien zur Abschätzung von Kosten verwendet. Da die Funktionen auf empirischen Daten beruhen, ist eine Übertragung auf neue Technologien nicht möglich, weshalb die parametrischen Kostenmodelle für FKV-Entwicklungsaufgaben ungeeignet sind [24], [25].

Die leistungsorientierten Kostenmodelle ermöglichen es, alle Inputs in einem bestimmten Prozess zu erfassen, um so die Kosten pro Einheit des Outputs dieses Prozesses zu bestimmen. Als relativ verbreiteter Ansatz ist hier das Activity Based Costing zu nennen. Eine bessere Zuordnung der Kosten von Aktivitäten, die nicht zur Wertschöpfung beitragen, wird durch sehr kleine Kostenzuordnungseinheiten und eine detaillierte Berücksichtigung der Handlungsebenen im Prozess der Herstellung von FKV-Bauteilen erreicht. Nachteilig ist vor allem der hohe Aufwand, der für die Generierung der Input-Daten anfällt. Ob die Berechnungsgenauigkeit, die theoretisch erzielt werden kann, bei Entwicklungsaufgaben tatsächlich erreicht wird, ist zweifelhaft. Problematisch ist vor allem die inhärente „Unschärfe“ der Inputdaten [24] - [26].

In der Vergangenheit fanden bei der Abschätzung der Herstellkosten von FKV-Bauteilen vor allem auf betriebswirtschaftlichen Kostenrechnungsstandardmethoden basierende prozessanalytische Kostenmodelle Anwendung, da der notwendige Dateninput hier relativ gering ist und die theoretischen Grundlagen transparent sind. Bei solchen Modellen wird der Ressourcenverbrauch der einzelnen Prozessschritte eines Verarbeitungsprozesses ermittelt. Der abgeschätzte Ressourcenverbrauch wird monetär bewertet, um so die einzelnen Kosten, aufgeteilt nach Kostenarten, zu ermitteln. Es werden dabei alle Kosten erfasst, die mit einem Prozess zusammenhängen. Zu diesen Kosten gehören Materialkosten, Personalkosten, Gemeinkosten sowie Einmalkosten und sonstige wiederkehrende Kosten [24], [26], [27].

Allerdings sind zur Durchführung derartiger Analysen detaillierte Kenntnisse oder Vorplanung des Prozesses notwendig. Die Genauigkeit der prozessanalytischen Kostenmodelle ist sehr stark von der Qualität und dem Detaillierungsgrad der verfügbaren Eingabedaten abhängig.

Die bekanntesten prozessanalytischen Kostenmodelle für FKV sind:

- Advanced Composite Cost Estimating Model (ACCEM),
- Manufacturing Cost Model for Composites (MCMC),
- MSU Cost Comparison Model,
- Composite Optimization Software for Transport Aircraft Design (COSTADE).

Diese Modelle wurden jeweils im Auftrag bzw. in Eigenregie von großen US-amerikanischen Luft- und Raumfahrtunternehmen entwickelt und basieren auf bzw. beinhalten unternehmensspezifische Daten. Aus diesem Grund sind diese Modelle und die damit erarbeiteten Detailergebnisse für allgemeine Forschungszwecke nicht zugänglich.

In Europa bzw. in Deutschland sind ebenfalls Arbeiten zur FKV-Wirtschaftlichkeitsanalyse durchgeführt worden. Neben einzelnen Untersuchungen des Luftfahrtsektors wurden Arbeiten vor allem von der Automobilindustrie im Rahmen von Machbarkeitsstudien zum Einsatzpotenzial der FKV vorangetrieben. Inhaltlich konzentrierten sich die Studien auf die Vorkalkulation der Herstellkosten von FKV-Prototypbauteilen sowie Variantenuntersuchungen hinsichtlich FKV-Bauweisen und alternativen FKV-Verarbeitungsprozessen. Allerdings sind keine konkreten Wirtschaftlichkeitsdaten aus den Untersuchungen veröffentlicht worden. Auch die Einbindung von monetär nicht bewertbaren Kosten oder auch einem Nutzen wie Imagegewinn wurde untersucht [28].

Längerfristige wissenschaftliche Untersuchungen zur ökonomischen Bewertung der FKV-Technologie sind auch aus Projekten der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) bekannt. Die bislang umfangreichsten Arbeiten in Deutschland wurden an der RWTH Aachen im Kontext des DFG-Sonderforschungsbereichs 332 „Produktionstechnik für Bauteile aus nichtmetallischen Faserverbundwerkstoffen“ durchgeführt. Kern des entwickelten Expertensystems hinsichtlich der ökonomischen Bewertung ist ein Modell zur Vorkalkulation der Herstellkosten von FKV-Bauteilen auf Basis eines modifizierten, ressourcenorientierten Prozesskostenrechnungsansatzes [29].

1.2.4.3 Erweiterte Ansätze

Um einige der genannten Defizite klassischer Bewertungsmethoden zu überwinden, wurden Modelle entwickelt, die den speziellen Gegebenheiten der FKV-Technologien Rechnung tragen sollen. Ein Ansatzpunkt stellt dabei das Konzept der Lebenszykluskostenrechnung (LCC = Life Cycle Costing) dar, Bild 1.16. Hauptziel dieses Ansatzes bildet die Erweiterung des zeitlichen Horizonts der Kostenbewertung: Es werden nunmehr entlang des FKV-Lebenszyklus alle Kosten in die Berechnung mit einbezogen und entsprechend ihres Auftritts bewertet.

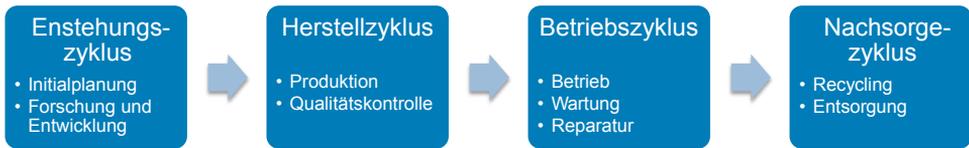


Bild 1.16 Der FKV-Lebenszyklus

Ein wesentlicher Vorteil des LCC-Modells ist die Möglichkeit, interperiodische Kostensubstitutionspotenziale schon in der Entwicklungsphase aufzeigen zu können [24]. Die zeitlichen Aspekte der Trade-Off-Beziehungen zwischen den einzelnen Lebenszyklusphasen sind in Bild 1.17 vereinfacht exemplarisch dargestellt.

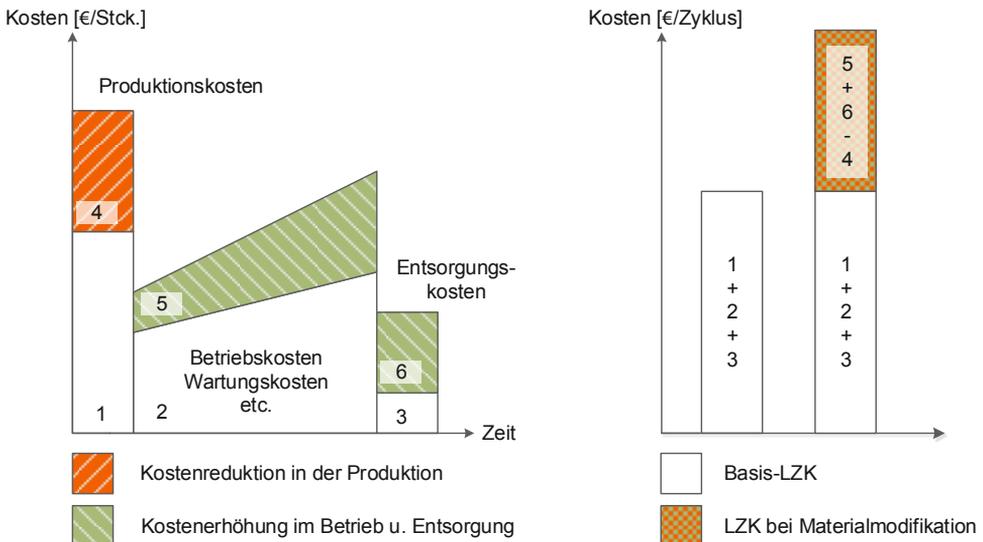


Bild 1.17 Interperiodische Kostensubstitution und resultierende LZZ-Effekte

Die Lebenszykluskostenanalyse deckt die Kosteneffekte der verschiedenen Lebenszyklusphasen auf. Diese können beispielsweise höhere Verbräuche bei KFZ durch die Gewichtszunahme, ansteigende Wartungskosten bei niedrigerem Qualitätsniveau oder ein Anstieg der Entsorgungskosten aufgrund geringerer Verwertungsmöglichkeiten sein. Eine Summierung der Kosten entlang des Lebenszyklus führt zu einer Gesamtkostenbewertung. In diesem Beispiel sind diese Summen auf der rechten Seite der Grafik zu sehen und ergeben, dass die Materialmodifikation in der Gesamtbetrachtung des Systems höhere Kosten verursacht als in der Produktion punktuell an Einsparungen erreicht werden konnten.

Ein weiterer Aspekt dieser Methodik ist die Einbeziehung von Geldwertentwicklungen. Diese Effekte bedingen, dass die einzelnen Posten über die Lebensdauer des Systems nicht einfach addiert werden können. Der Zeitpunkt ihres Auftretens hat wesentliche Bedeutung. Die grundsätzliche Überlegung, die hinter dieser Berech-

nungsmethodik liegt, sind die Kapitalkosten, die sich aus entgangenen Investitionen oder Opportunitätskosten bzw. zusätzlichen Kosten für nötig werdende Finanzmittel ergeben. Daraus resultiert, dass heutige Kosten gegenüber zukünftigen als höher zu bewerten sind. Dieser Effekt ist in Bild 1.18 dargestellt.

Wird eine Investition im Jahre 0 – also heute – getätigt, ist der Gegenwartswert in 5 Jahren (Punkt A) ohne Abnutzung alleine durch die Effekte der Geldwirtschaft wesentlich geringer. Umgekehrt bedeutet dies, dass Kosten, die erst zum Zeitpunkt C getätigt werden, einen noch niedrigeren Gegenwartswert aus heutiger Sicht darstellen. Folglich sind damit Kosten, die später anfallen, bei nominal gleicher Höhe günstiger als früher anfallende. Der Effekt verschärft sich, je besser die virtuell entgangenen Anlagemöglichkeiten sind bzw. je höher der kalkulatorische Zinssatz ist. Der Gegenwartswert sinkt also weiter auf der Linie A - B. Die für den Gegenwartswert angenommene Inflation beträgt 1,9% (gemittelter Durchschnitt 1992-2012) [30].

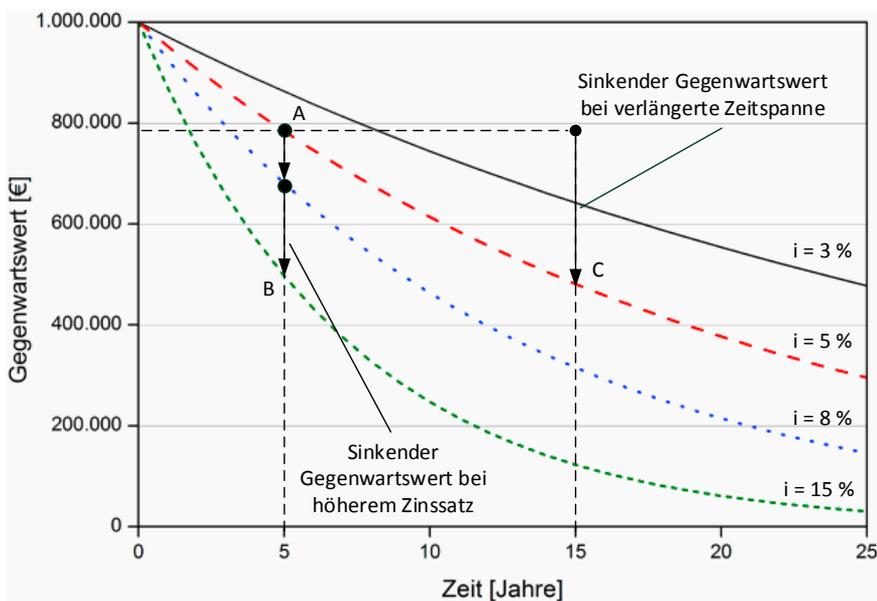


Bild 1.18 Gegenwartswert von 1 Mio. € in Abhängigkeit vom Zeitpunkt des Kostenfalls und Zinssatzes

Wenngleich der Ansatz eine wissenschaftliche Grundlage besitzt und den gesamten Lebenszyklus berücksichtigt, so besitzt er dennoch einige Schwachstellen:

- Aufbau eines Expertensystems, das den Unternehmen nicht direkt, sondern über eine Beratungsdienstleistung zur Verfügung gestellt wird.
- Unternehmen erwerben keine Kenntnis oder Sensibilität bzgl. des Prozesses.
- Produktkomplexität wird hauptsächlich produktbezogen betrachtet und nicht stetig skaliert.

- Die Datenbasis und Ausprägung der Verbrauchs- und Kostenfunktionen sind nicht transparent.
- Das Konzept bzw. die Modelle lassen sich nur auf Basis von empirischen Werten anwenden.
- Das Konzept bzw. die Modelle basieren nicht auf den Prozessparametern, so dass wichtige Informationen wie z.B. die Zykluszeit zur Herstellung eines Formteils nicht ausgegeben werden.

Ein weiteres Modell zur Vorhersage der Fertigungszeit und -kosten wurde vom Laboratory for Manufacturing and Productivity (LMP) am Massachusetts Institute of Technology (M.I.T.) entwickelt. Im Rahmen eines Projektes wurde ein Kosten-Abschätzungsprogramm entwickelt, das jedem Externen frei zur Verfügung steht [31]. Es kann von Firmen genutzt werden, die für ihre Bauteile die geeignete FKV-Fertigungstechnik identifizieren müssen. Der Nutzer kann dazu zwischen verschiedenen Bauteiltypen und Fertigungsverfahren auswählen. Nach Eingabe der bauteilspezifischen Daten können zusätzlich Produktionsparameter an die eigenen Produktionsgegebenheiten angepasst werden. Anschließend berechnet das Programm die entsprechenden Stückkosten und liefert weitere Informationen zum Fertigungsprozess.

Klassische Instrumente zur Analyse von Kosten haben ihren Ursprung in der Kostenrechnung. Sie basieren auf dem, was bereits existiert oder gemacht wurde. Diese zeitliche und technologische Rückwärtsorientierung erlaubt nicht, die Effekte durch Änderungen am Prozess- oder Bauteil-Design zu verstehen [32]. Die in der Vergangenheit benutzten Kostenanalyse-Methoden werden ausführlich in [33] beschrieben. Im Allgemeinen haben diese Methoden eine oder mehrere Schwachstellen: Sie basieren auf Intuition oder Schätzung, sind unabhängig von der Technologie und es fehlt die Betrachtung der Zykluszeit.

Die bisherigen Modelle vernachlässigen, dass Kosten abhängig von ihrem Kontext sind. Die Verwendung der prozessbasierten Modellierung hat folgende Vorteile:

- Auferlegung von Struktur,
- Berücksichtigung von Wissen,
- Implementierung von Annahmen,
- Einbeziehung von Technologie.

Auf der anderen Seite existieren die beiden möglichen Nachteile, dass die Analyse aufgrund schlechter Ausgangsdaten keine brauchbaren Ergebnisse liefern kann oder ein hoher Aufwand bzgl. Zeit und Kosten [34] entsteht.

Ein Ansatz zur Analyse von Kosten ist die prozessbasierte Kostenmodellierung (PBKM). Sie dient als mathematische Transformation, Abbildung der Beschreibung eines Prozesses und seiner Betriebsbedingungen zur Messung der Prozessleistung. Im Allgemeinen arbeitet die PBKM rückwärts von den Kosten zu den technischen Parametern, die verändert werden können. Durch Berücksichtigung der Kostenaus-

wirkung von Prozessgrößen und ökonomischen Parametern stellt die technische Modellierung eine Erweiterung der normalen Modellierung dar. Hierbei werden die Kosten beeinflussenden Elemente individuell von Ingenieurprinzipien und den technischen Parametern des Herstellungsprozesses abgeleitet.

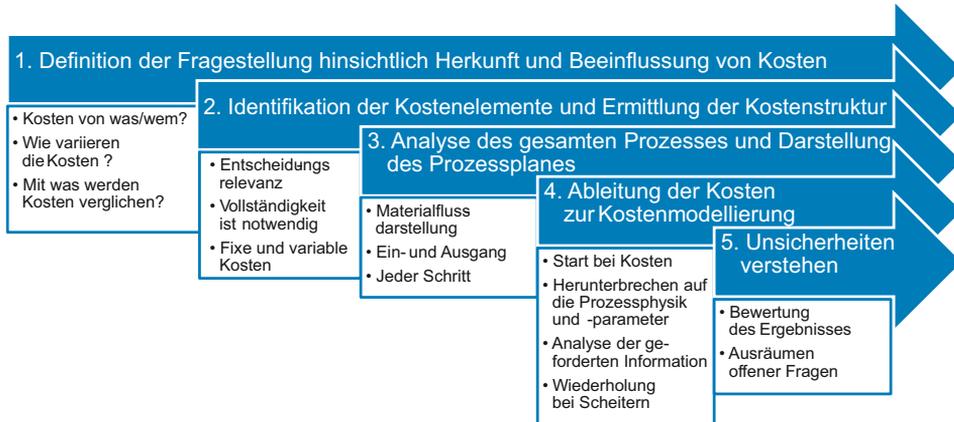


Bild 1.19 Vorgehensweise bei der prozessbasierten Kostenmodellierung

Erster Schritt zur Ableitung einer PBKM ist die Definition der Fragestellungen hinsichtlich Herkunft und Beeinflussung von Kosten. Im zweiten Schritt werden die Kostenelemente identifiziert und die Kostenstruktur ermittelt. Anschließend erfolgt eine Analyse des gesamten Prozesses. Der ausgearbeitete Prozessplan ist nun Basis für die Kostenmodellierung im 4. Schritt. Hierbei werden die Prozesselemente auf ihre technische Basis heruntergebrochen. Im 5. und letzten Schritt werden offene Fragen ausgeräumt, Bild 1.19.

Zentrales Element dieser Vorgehensweise ist der Schritt 4. Innerhalb dieses Schrittes wiederum ist die Ableitung der Prozesszykluszeit die wichtigste Aktivität, da insbesondere die Zykluszeit maßgebend für die Stückkosten ist.

1.2.5 Zusammenfassung

Wegen der wesentlichen technischen Vorteile gegenüber anderen Werkstoffen weisen Faser-Kunststoff-Verbunde (FKV) in vielen Anwendungsbereichen ein hohes Marktpotenzial auf. Ausgehend von Spezialanwendungen und Nischenmärkten hat sich diese Werkstoffklasse in nahezu allen technischen Bereichen etablieren können. In Abhängigkeit der Zielsektoren ist ein signifikanter Unterschied zwischen GFK und CFK erkennbar. In großserientauglichen Märkten wie beispielsweise im Automobilsektor ist der Einsatz von glasfaserverstärkten duroplastischen oder thermoplastischen Matrices dominierend. Im Hochleistungssektor finden vor allem Kohlenstofffasern in Verbindung mit duroplastischen Polymersystemen Einsatz.

Derzeit beherrschen dabei aus Kostengründen die Anwendungen mit duroplastischer Matrix den Markt, jedoch sind deutliche anteilige Zuwächse für thermoplastische Matrixsysteme zu verzeichnen. Ferner dominieren aus den gleichen Gründen als Verstärkungskomponente zurzeit Glasfasern. Auch hier ist ein klarer Trend zu verzeichnen, so dass in den nächsten Jahrzehnten eine deutliche Verlagerung in Richtung CFK erwartet wird. Ein wesentlicher Bestandteil dieser Entwicklung sind aber nach wie vor die weiter steigenden Anforderungen an die Materialien, die glasfaserverstärkte Kunststoffe nicht mehr leisten können, aber durch die C-Fasern in Verbindung mit optimierten Matrixsystemen realisiert werden können.

Die Herstellverfahren für FKV sind mit denen der Metallindustrie nicht unmittelbar vergleichbar. Deshalb können die dort verwendeten Bewertungsmethoden nicht direkt auf die Verarbeitungstechnologien der FKV übertragen werden. Je nach Verfahren sind sehr unterschiedliche Prozessparameter vorhanden, die bedingt durch die Vielzahl junger Prozessvarianten noch nicht ausreichend auf ökonomische Auswirkungen untersucht sind. Zusätzlich stellt das sehr unterschiedliche Materialverhalten (z. B. höhere Integrationsgrade und Standzeiten, andere Reparaturstrategien und -zyklen) neue Anforderungen an die Bewertungsmethodik.

Für eine realistische Kostenberechnung kommen neuere Konzepte wie die prozessbasierte Kostenmodellierung in Betracht. Die Bestimmung von Lebenszykluskosten kann dazu beitragen, die Eindimensionalität von Rentabilitätsvergleichen zu überwinden. Jedoch sind alle bisher entwickelten Konzepte nicht durchgehend einsetzbar, was dazu führt, dass Wirtschaftlichkeitsanalysen immer fallweise durchgeführt werden und nicht vergleichbar sind.

Literatur

- [1] *Flemming, M.; Roth, S.*: Faserverbundbauweisen, Springer, Berlin, 2003
- [2] *Schürmann, H.*: Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden, Springer, Berlin, 2007
- [3] *Ehrenstein, G. W.*: Faserverbund-Kunststoffe, 2. vollständig überarbeitete Auflage, 2006, Hanser, München, 1992
- [4] FMV Annual Report, Swedish Defence Materiel Administration 2009, www.fmv.se/Global Document
- [5] *Spur, G.*: Bedeutung der Technologie der Faserverbundkunststoffe für die zukünftige Entwicklung in der industriellen Produktionstechnik. Proceedings, 25. Internationale AVK-Tagung, 1993
- [6] *Breuer, U.*: Herausforderungen an die CFK-Forschung aus Sicht der Verkehrsflugzeug-Entwicklung und Fertigung, 10. Nationales Symposium SAMPE Deutschland e. V., 2005
- [7] AVK Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe, Composites-Marktbericht 2012
- [8] *Köhler, E.; Bergner, A.*: Faserverbundbauweisen – Chancen für den Maschinenbau und die Verkehrstechnik. Proceedings, Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde, Deutsche Gesellschaft für Materialkunde, Frankfurt, 1995, S. 259 – 270

- [9] Roland Berger Studie: Serienproduktion von hochfesten Faserverbundbauteilen, 09/2012
- [10] Foto: Deutsche Bahn AG/Günter Jazbec
- [11] TEC 21 Fachzeitschrift für Architektur, Ingenieurwesen und Umwelt, Nr. 44, 30. Okt. 2006
- [12] KTD-Plasticon Kunststofftechnik Dinslaken
- [13] <http://www.bsh.de/de/Meeresnutzung/Wirtschaft/Windparks/index.jsp>, Zugriff 08.05.2013
- [14] RELINEEUROPE AG, www.relineeurope.com, Zugriff 15.04.2013
- [15] Boeing Current Market Outlook 2012–2031, www.boeing.com
- [16] <https://www.mai-carbon-now.de/site/>, Zugriff 22.10.2013
- [17] Angaben und Schätzung durch SGL GROUP (Stand 2013)
- [18] Angaben und Schätzung durch SGL GROUP (Stand 2013)
- [19] *Lässig, R.; Eisenhut, M.; Mathias, A.; Schulte, R. T.; Peters, F.; Kühmann, T.; et al.*: Serienproduktion von hochfesten Faserverbundbauteilen. Perspektiven für den deutschen Maschinen- und Anlagenbau, 2012
- [20] *Ickert, L.; Matheis, R.; Seidel, K.; Eckstein, L.*: Thermoplastic FRP for Automotive Applications – A Strong Competitor in the Material Range. SAMPE Fall Technical Conference Proceedings: Navigating the Global Landscape for the New Composites. Charleston, SC: Society for the Advancement of Material and Process Engineering, 2012
- [21] *Holschuh, R.; Becker, D.; Mitschang, P.*: Verfahrenskombination für mehr Wirtschaftlichkeit des FVK-Einsatzes im Automobilbau. Lightweight Design, 2012
- [22] *Holschuh, R.; Becker, D.; Mitschang, P.*: Cost Competitiveness of Hybrid Structures Based on Thermoplastic In-Situ Tape-Placement Process. SAMPE Fall Technical Conference Proceedings: Navigating the Global Landscape for the New Composites. Charleston, SC: Society for the Advancement of Material and Process Engineering, 2012
- [23] McKinsey, 2011, Manager Magazin Nr. 2/2012, 27. Januar 2012
- [24] *Hartmann, A.*: Lebenszykluskostenrechnung als strategisches oder operatives Bewertungs- und Planungsinstrument für die Technologie der Faser-Kunststoff-Verbunde, in: *Neitzel, M. (Hrsg.)*: Schriftenreihe Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, Band 11, Diss. Universität Kaiserslautern, 2000
- [25] *Eaglesham, M. A.; Deisenroth, M. P.*: Advanced Composites Manufacturing Cost Estimation Decision Support System. In: Proceedings, 6th Industrial Engineering Research Conference. o. O: The Institute of Industrial Engineers, 1997
- [26] *Eaglesham, M. A.*: A Decision Support System for Advanced Composites Manufacturing Cost Estimation. Blacksburg: o. V., 1998
- [27] *Neitzel, M.; Hartmann, A.*: Sensitivitätsanalyse der Wirtschaftlichkeit von Bauteilen aus faserverstärkten thermoplastischen Kunststoffen. Projektbericht zum DFG-Projekt Ne 546/4-1. Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern, 1998

- [28] *Liebetrau, A.*: Beitrag zur Wirtschaftlichkeitsanalyse von schnell rotierenden Bauteilen aus Faser-Kunststoff-Verbunden, in: Fortschrittsberichte VDI, Reihe 16: Technik und Wirtschaft, Nr. 96, Diss. Universität Kaiserslautern, 1997
- [29] *Eversheim, W.*: FVK-Bauteilkosten systematisch bestimmen, Ingenieurwerkstoffe 4 (2000) 1, S. 54 – 58
- [30] Statistisches Bundesamt, 2012
- [31] *Kim, C.E.*: Composites Cost Modeling: Complexity, Master-Thesis, M.I.T., 1993
- [32] *Clark, J.; Field, F.R.*: Process-Based Cost Modeling: Understanding the Economics of Technical Decisions, MIT Vorlesungsskript, Wintersemester 2000
- [33] *Busch, J.V.; Field, F.R.*: Technical Cost Modeling, in: *Rosato D.V., Rosato, D.V., Alberghini, A.C. (Pub.)*: Blow Molding Handbook: Technology, Performance, Markets, Economics: the Complete Blow Molding Operation, Hanser, München 1989, S. 839 – 871
- [34] *de Neufville, R.; Clark, J.; Field, F.R.*: Introduction to Technical Cost Modeling – Concepts and Illustrations, in: Dynamic Strategic Planning, MIT Vorlesungsskript 2000

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

Ein weiteres Unterteilungskriterium der verwendeten Verstärkungsfasern stellt die Faserlänge dar. Prinzipiell wird zwischen Filamenten (= Endlosfasern) und Fasern mit endlicher Länge (= Stapelfasern) unterschieden. Natürliche Verstärkungsfasern liegen dabei stets als Stapelfasern vor. Die Faserlänge ist je nach Material sehr unterschiedlich und beträgt z.B. bei Baumwolle zwischen 5 und 40 mm, wohingegen Flachsfasern eine Länge zwischen 100 und 500 mm aufweisen. Dies verursacht, dass die Stapelfasern für die Verarbeitung zu einem Gewebe oder Gelege stets zuvor zu einem Garn verarbeitet werden müssen. Hierfür stehen unterschiedliche textile Verarbeitungsprozesse wie z.B. das Ringspinnen, das Umwindespinnen oder das Luftspinnen zur Verfügung. Im Gegensatz zu natürlichen Fasern liegen künstliche Fasern, wie z.B. Glasfasern oder Kohlenstofffasern, aufgrund Ihres Herstellungsprozesses grundsätzlich als Filamente vor. Aber auch für diese Verstärkungsmaterialien gibt es Bemühungen, textile Halbzeuge bestehend aus Stapelfasern anzufertigen. Bei „Stretch-Broken“ Kohlenstofffasern werden die Kohlenstofffasern bis über die Bruchgrenze gestreckt und dadurch an faserinhärenten Fehlstellen aufgebrochen. Der Zusammenhalt der so erzeugten Stapelfaserrovings wird dabei zum einen über eine Garnverdrillung, ähnlich der bei natürlichen Garnen, gewährleistet. Zudem wird dieses Mischgarn durch ein endloses, polymeres Umwindegarn umhüllt. Das letztere kann später die Rolle des Matrixmaterials übernehmen (Bild 2.1).

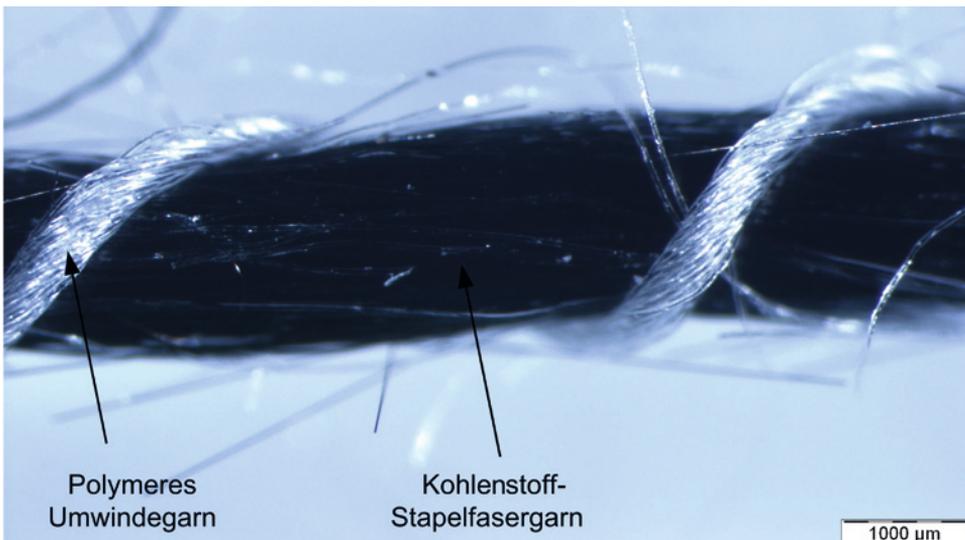


Bild 2.1 Stapelfasergarn

Der Einsatz von Stapelfasertextilien hat gegenüber der Verstärkung mit Filamenttextilien den Vorteil, dass komplexere Geometrien abgebildet werden können. Durch das Gleiten der Stapelfaser wird eine plastische Längenänderung des Garns ermöglicht. Somit wird zusätzlich zum gebräuchlichen Drapierungsmechanismus über Gewebescherung ein Tiefziehverhalten, ähnlich dem metallischer Werkstoffe, ermög-

licht (Bild 2.2). Die maximal realisierbare Festigkeit wird durch das Vorliegen von Stapelfasern allerdings nur wenig beeinflusst. Die Faserlänge ist bei Stretch-Broken Fasern zwar zufällig verteilt, jedoch übersteigt diese meistens die kritische Faserlänge, so dass die eingeleiteten Kräfte über den Matrixwerkstoff auf benachbarte Fasern vollständig übertragen werden können.

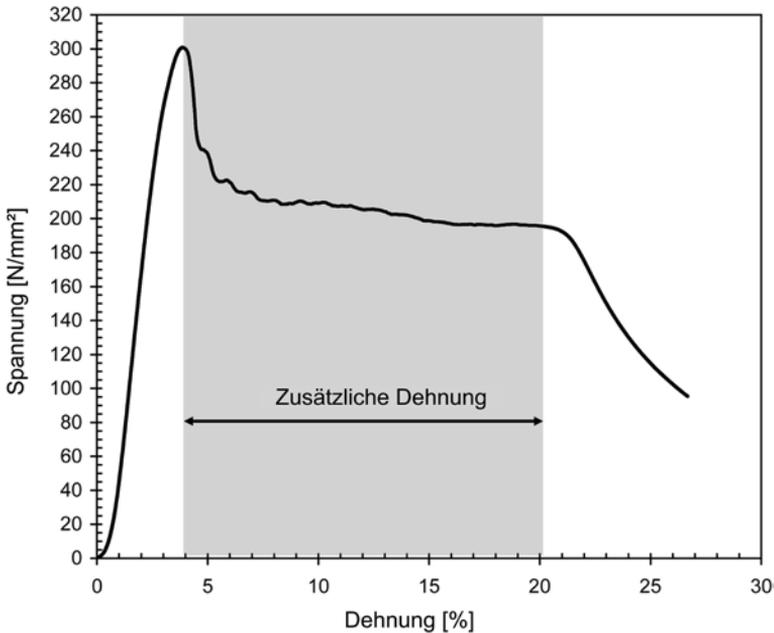


Bild 2.2 Spannungs-Dehnungsverhalten von Stapelfasergarnen

2.1.2 Herstellung und Anwendung der Fasern

2.1.2.1 Glasfasern (GF)

Glasfasern entstehen aus einer Schmelze verschiedener Oxide als Netzwerkbildner, wie z.B. SiO_2 , und Netzwerkmodifizierer, wie z.B. Alkalioxide, die schnell abgekühlt werden, um die Kristallisation zu verhindern. Das Material ist zwar thermodynamisch instabil, stellt im Anwendungsbereich aber einen hochfesten Werkstoff dar. Es gibt mehrere Herstellungsverfahren für Glasfasern. Textilglasfasern werden nach dem Düsenziehverfahren hergestellt, Bild 2.3. Fasern können nur aus solchen Glaszusammensetzungen gezogen werden, deren Viskositätsänderung in Abhängigkeit der Temperatur gewisse Voraussetzungen erfüllt. Die Glasschmelze fließt dabei frei durch die Lochnippel (bis zu 4000 Löcher mit ca. 1 bis 2 mm Durchmesser pro Spinnplatte), wird abgekühlt, beschichtet und mit hoher Geschwindigkeit aufgewickelt. Der Nenndurchmesser der Glasfasern, meist im Bereich von 5 bis 25 μm , wird durch die Abziehggeschwindigkeit kontrolliert.

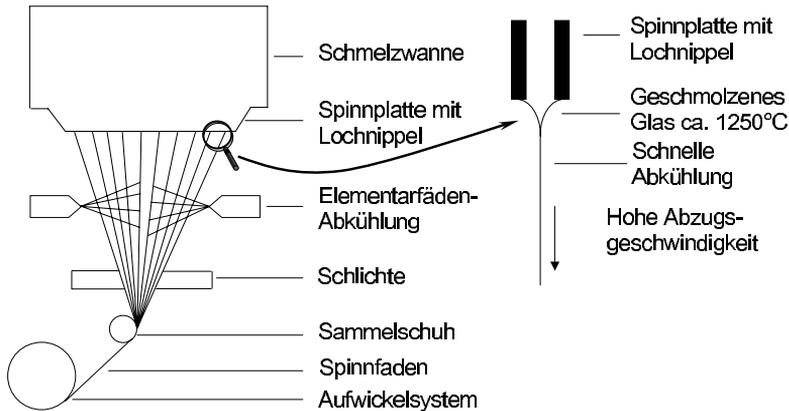


Bild 2.3 Herstellung von Glasfasern – schematisch

Die aufgebrachte Schlichte (Finish) beeinflusst die Glas/Polymer-Grenzfläche im Verbundwerkstoff und dementsprechend auch dessen Eigenschaftsprofil. Die Schlichte ist ein komplexes wässriges Gemisch, dessen Hauptkomponente der polymere Filmbildner ist. Dieser sorgt für den Zusammenhalt der Glasfilamente während der Herstellung, wodurch der abriebbedingte Faserbruch vermieden wird. Im Verbundwerkstoff hat der Filmbildner die Aufgabe, die benötigte Verträglichkeit zwischen der Matrix und dem Glas zu gewährleisten. Die üblichen Filmbildner werden auf Basis von Polyvinylacetat, Polyurethan, Polyacrylat oder Epoxidharz hergestellt. Weitere wichtige Bestandteile der Schlichte sind Gleitmittel (Glas selber hat einen sehr hohen Reibungskoeffizienten) und Haftvermittler (Coupling agent). Letztere (z. B. Organosilan-Verbindungen) beeinflussen die Faser/Matrix-Haftung maßgeblich (siehe Abschnitt 2.3). Für die textiltechnische Verarbeitung von Glasfilamenten (z. B. Zwirnen, Weben) benötigt man andere Schichten. Diese werden nach der Textilstrukturierung durch Wärmebehandlung entfernt, und es wird eine neue Schlichte mit Haftvermittler als Hauptkomponente, maßgeschneidert für die vorgegebene Matrix, aufgebracht.

Glasfasern sind aufgrund ihres günstigen Preis/Leistungsverhältnisses die bedeutendsten technischen Verstärkungsfasern. Nach Art ihrer Zusammensetzung tragen Glasfasern unterschiedliche Bezeichnungen, von denen im Folgenden nur die drei marktgängigsten kurz charakterisiert werden sollen:

- | | |
|-----------------|--|
| E-Glas E | elektrisch (ursprünglich für den elektr. Einsatz entwickelt), in FKV standardmäßig eingesetztes Aluminiumborsilikatglas, Alkalioxidgehalt < 1% |
| C-Glas C | verbesserte chemische Beständigkeit durch höheren Borgehalt, mechanische Eigenschaften ähnlich wie E-Glas, etwas geringere Bruchdehnung |
| S-Glas S | Strength, spezielles Glas mit höherer Bruchfestigkeit und Steifigkeit als E-Glas, besonders feuchtigkeitsbeständig |