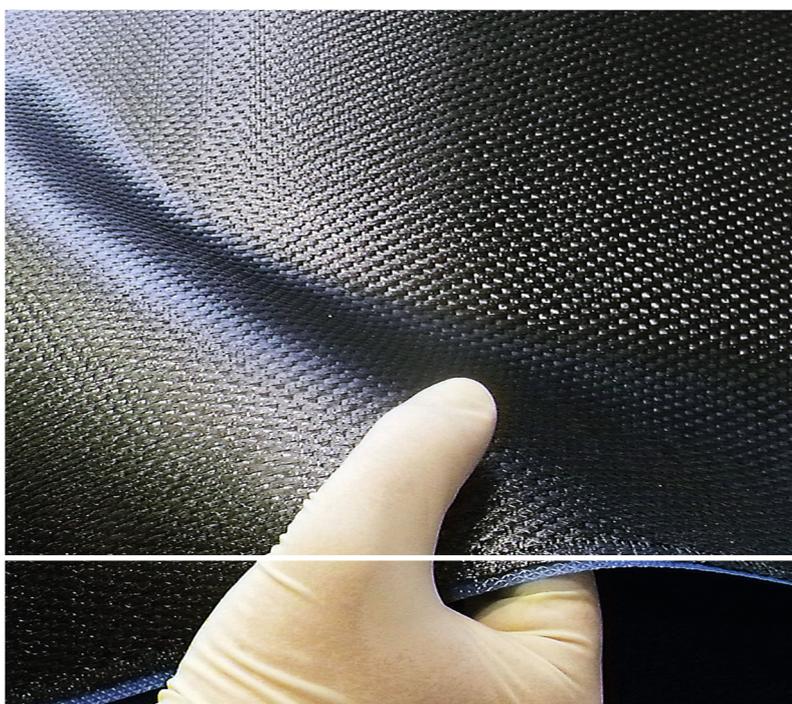


Hauke Lengsfeld · Javier Lacalle
Thomas Neumeyer · Volker Altstädt

Faserverbund- werkstoffe

Prepregs und ihre Verarbeitung



2., aktualisierte und erweiterte Auflage

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!

Richtungsweisend: Fach- und Brancheninformationen
stets top-aktuell!

Informativ: News, wichtige Termine, Bookshop, neue
Produkte und der Stellenmarkt der Kunststoffindustrie

Kunststoffe.de

Hauke Lengsfeld
Javier Lacalle
Thomas Neumeyer
Volker Altstädt

Faserverbund- werkstoffe

Prepregs und ihre Verarbeitung

2., aktualisierte und erweiterte Auflage

HANSER

Die Autoren:

Dr.-Ing. Hauke Lengsfeld, Schill+Seilacher, Hamburg

Dr.-Ing. Javier Lacalle, Goodrich Aerospace Europe GmbH

Dr.-Ing. Thomas Neumeyer, Neue Materialien Bayreuth GmbH

Prof. Dr.-Ing. Volker Altstädt, Neue Materialien Bayreuth GmbH



Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

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

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 dargestellt. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die in diesem Buch enthaltenen Darstellungen und Daten mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autoren und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Art aus der Benutzung dieser Darstellungen 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.

© 2020 Carl Hanser Verlag München

www.hanser-fachbuch.de

Lektorat: Ulrike Wittmann

Herstellung: Jörg Strohbach

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

Coverrealisierung: Max Kostopoulos

Satz: Kösel Media GmbH, Krugzell, Germany

Druck und Bindung: CPI books GmbH, Leck

Printed in Germany

ISBN: 978-3-446-44882-7

E-Book-ISBN: 978-3-446-46603-6

Vorwort zur zweiten Auflage

Seit den frühen 70er-Jahren bis heute, werden CFK-Strukturbauteile weitgehend mittels Prepreg-Technologie hergestellt. Obwohl immer wieder totgesagt, werden Prepregs in allen Segmenten der Composites-Industrie wegen ihrer Vielseitigkeit, dem hohen Faservolumenanteil und dem großen Angebot an Faser-Matrix-Kombinationen immer beliebter. In dieser zweiten, aktualisierten Auflage kommen Autoren zu Wort die die Sichtweise aus verschiedenen Feldern der Industrie und der anwendungsnahen Forschung vertreten. Damit wird sichergestellt, dass die neuesten Trends in diese Neuauflage einfließen. Spätestens seitdem der thermoplastische Composite-Leichtbau mit Organoblechen in die Großserie einfließt haben unidirektionale faserverstärkte Halbzeuge mit thermoplastischer Matrix, wie Organobleche und Tapes erheblich an Bedeutung gewonnen. Es ist daher für die Autoren an der Zeit in diesem Buch über die Perspektiven und Trends auch dieser Materialien in den verschiedenen Kapiteln aktuell zu berichten.

Duromere Prepregs werden hergestellt, indem man Verstärkungsfasern oder Textilien mit speziell formulierten, vorkatalysierten Harzsystemen unter Verwendung einer Maschinenteknik imprägniert. Die eingesetzte Maschinenteknik gewährleistet einen innigen Kontakt zwischen Faser und Matrix, in Kombination mit einer definierten Oberflächenklebrigkeit (Tack) des Tapes. Diese Prepregs werden eingesetzt, um Bauteile aus Verbundwerkstoffen schneller und mit geringeren Leistungseinbußen als bei vergleichbaren Nass-Impregniertechniken herzustellen. Mit einem flexiblen Trägerpapier bedeckt, sind Prepregs leicht handhabbar und bleiben für eine bestimmte Zeitdauer (Lagerfähigkeit) bei Raumtemperatur biegsam.

Im Gegensatz zu duromeren Prepregs, die seit rund 70 Jahren bekannt sind und eine dementsprechend große Verbreitung haben, sind thermoplastische Prepregs eine noch junge Materialvariante, die bislang noch nicht so verbreitet ist. Die Produktgruppe der endlosfaserverstärkten Thermoplaste bieten dem Konstrukteur wie auch dem Verarbeiter neue Möglichkeiten, Leichtbau mit Design und Funktionalität zu verbinden. Vor allem die deutlich höhere Schlagzähigkeit im Vergleich zu der von Duromeren bei gleichzeitig niedriger Dichte zeichnen Bauteile aus faserverstärkten Thermoplasten aus.

Weltweit wird erwartet, dass der Markt für Prepregs von 2019 bis 2024 um ca. 4,6% wächst und damit im Jahr 2024 ca. 6,4-Milliarden-Dollar erreichen wird (laut: Lucintel's Global Prepreg Market: Trends, Forecast and Opportunity Analysis). Obwohl die Einsatzkosten für Prepregs vielfach die von traditionellen Materialien übersteigen, zeigt deren Einsatz bei einer Gesamtbetrachtung unter Berücksichtigung der gewichtsbezogenen Eigenschaften häufig deutliche Kostenvorteile.

Das Fachbuch bespricht wichtige Fortschritte in Forschung und Entwicklung an Instituten und in den Laboratorien der Industrie. Dabei werden grundlegend Zusammenhänge zwischen der Struktur des Werkstoffs, der Verarbeitung und seinen Eigenschaften aufgezeigt. In die Zukunft weisend werden wichtige Entwicklungen im Bereich der modernen Prepreg-Technologie im Buch vorgestellt. Das Buch ist in acht Kapitel gegliedert, nach einer leicht verständlichen Einführung in die Welt der Faserverbundwerkstoffe (*Kapitel 1*) werden in *Kapitel 2* zunächst die wichtigsten Komponenten eines Prepregs vorgestellt. Hier findet man jetzt auch die thermoplastische Prepregs als wichtige Ergänzung. Daran schließen sich zwei Kapitel an, welche die Herstellung des Prepregs an sich und dessen Verarbeitung zu einem Vorformling (engl. preform) beschreiben (*Kapitel 3 und 4*). In den *Kapiteln 5 und 6* werden die Härtung der Preform zu einem Bauteil im Autoklav, im Ofen, mit der Quick-Step Technologie u. a. vorgestellt und die zugehörigen Technologien der formgebenden Aushärtewerkzeuge (Toolings) anschaulich erläutert. Die ausgehärteten Bauteile müssen nachfolgend geprüft werden und vielfach in für Verbundwerkstoffe charakteristischen Bauweisen zu ganzen Strukturen kombiniert werden. Dazu geben die abschließenden *Kapitel 7 und 8* einen Überblick in dem die spezifischen Besonderheiten, die beim Einsatz der Prepreg-Technologie berücksichtigt werden müssen, besonders herausgestellt werden. In den erwähnten Kapiteln werden die besonderen Aspekte der thermoplastischen Bauteile z.B. in der Verarbeitung, beim Tooling und in der Prüfung nun auch diskutiert.

Das Ziel des Buches ist es, dem Fachmann ein umfassendes anwendungsorientiertes Werk zur Verfügung zu stellen, welches sowohl aktuelle Entwicklungen aber auch den Weg dahin verständlich erläutert.

Bayreuth, im Juli 2020

Volker Altstädt

Danksagung

Wir bedanken uns bei allen, die uns bei der Erstellung der zweiten Auflage dieses Buches unterstützt haben.

Beim Carl Hanser Verlag möchten wir uns für die Möglichkeit zur Veröffentlichung dieses Buches bedanken, insbesondere bei Frau Ulrike Wittmann für die Gestaltung und Formatierung der Kapitel.

Wir danken Roland Bernicke, Andrea Glawe, Stefan Mörl, Dr. Silke Witzel, Dr. Wolfgang Nemetz, Prof. Dr.-Ing. Hilmar Apmann, Annika Epping und Hans Marquardt, für die sachdienlichen Hinweise, anregenden Diskussionen und das wertvolle Bildmaterial. Ein besonderer Dank gilt Mike Turner, einem Urgestein der Prepreg-Entwicklung für die Geschichte der Prepreg-Entwicklung in England.

Ein besonderer Dank gilt den Firmen M. Torres, Hexcel Composites, Teijin Carbon und C. Cramer, die wichtige Teile des Bildmaterials zur Verfügung gestellt haben.

Danke sagen wollen wir auch unseren Familien für ihre Geduld.

Die Autoren

Dr.-Ing. Hauke Lengsfeld

Nach seinem Chemiestudium in Kiel und der Promotion am Lehrstuhl für Polymere Werkstoffe der Universität Bayreuth (Prof. Dr.-Ing. Altstädt) arbeitete Dr.-Ing. Hauke Lengsfeld bei Airbus Operations GmbH als Material- und Prozessexperte in der Produktion für CFK-Großbauteile. Als Projektmanager war er an der Entwicklung und Herstellung von CFK-Komponenten der A350XWB beteiligt. Mehr als acht Jahre war er für die Hexcel Composites GmbH als Technical Support Manager Central Europe tätig. 2018 übernahm er bei Schill+Seilacher „Struktol“ GmbH, Hamburg, als General Manager die Leitung der Business Unit „Epoxy Resins“. Dr.-Ing. Hauke Lengsfeld hält seit 2007 Vorlesungen zu Faserverbundwerkstoffen und Kunststoffen an verschiedenen Hochschulen.



(Quelle: privat)

Dr.-Ing. Javier Lacalle

Nach seinem Maschinenbaustudium an der Universidad Pública de Navarra in Pamplona (Spanien) und der Promotion 2005 am Lehrstuhl für Mechanik der Universität Duisburg (Prof. Dr. rer. nat. Manfred Braun) arbeitete er bis 2011 bei M. Torres Diseños Industriales als Projekt- und Produktmanager für Ablegetechnologien. Im Jahr 2010 absolvierte er den Master of Science im Bereich Verbundwerkstoffe an der PFH-Privaten Hochschule Göttingen in Stade. Zwischen 2011 und 2014 war er als Gruppenleiter für automatisierte CFK Prozesse und für AFP-Technologie beim Fraunhofer Institut für chemische Technologie (ICT-FIL in Augsburg) bzw. am Lehrstuhl für Carbon Composites an der Technischen Universität München tätig. Zwischen 2014 und 2019 war er als Projektmanager und technischer Berater bei M. Torres Deutschland beschäftigt. Seit 2019 arbeitet er als Principal Engineer for Automation Development and Advanced Composite Manufacturing bei Goodrich Aerospace Europe GmbH.



(Quelle: privat)

Prof. Dr.-Ing. Volker Altstädt

Volker Altstädt arbeitete nach seinem Studium der Physik und seiner Promotion bei Prof. Gottfried W. Ehrenstein am Institut für Werkstofftechnik in Kassel (1987) acht Jahre bei der BASF AG in Ludwigshafen in der Polymerforschung, zuletzt als Gruppenleiter in der Abteilung Polymerphysik. Ab 1995 war er Lehrstuhlinhaber an der TU Hamburg-Harburg. Zusätzlich übernahm er ab 1998 die Leitung des Arbeitsbereiches Kunststoffe & Verbundwerkstoffe. Im Jahr 2000 wechselte Volker Altstädt an die Universität Bayreuth und übernahm dort die Leitung des Lehrstuhls für Polymere Werkstoffe an der Fakultät für Ingenieurwissenschaften. Parallel zu dieser Funktion ist Volker Altstädt seit 2009 alleiniger Geschäftsführer der Neue Materialien Bayreuth GmbH, einer außeruniversitären Landesforschungseinrichtung des Freistaats Bayern, die sich mit anwendungsnaher Werkstoff- und Verfahrensentwicklung für Kunststoffe, Verbundwerkstoffe und Metalle beschäftigt.



(Quelle: privat)

Dr.-Ing. Thomas Neumeyer

Nach seinem Mechatronikstudium war Thomas Neumeyer von 2010 bis 2015 als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Polymere Werkstoffe der Universität Bayreuth (Prof. Dr.-Ing. Altstädt) tätig, ab 2012 leitete er dort die Arbeitsgruppe „Duromere und Faserverbundwerkstoffe“. Im Jahr 2015 promovierte er an der Universität Bayreuth zum Thema „Struktur und Eigenschaften neuer, flammgeschützter Prepreg-Matrixsysteme für Anwendungen in der Kabine von Verkehrsflugzeugen“.



(Quelle: privat)

Seit 2015 ist Thomas Neumeyer Leiter des Geschäftsbereichs Kunststoffe bei der Neue Materialien Bayreuth GmbH, einer außeruniversitären Forschungseinrichtung des Freistaats Bayern. Seine Arbeitsgebiete umfassen Partikelschaumstoffe, Faserverbundkunststoffe, Thermoplast-Schaumspritzgießen und Additive Fertigung mit Kunststoffen. Herr Neumeyer lehrt an der Universität Bayreuth als Lehrbeauftragter im Fach „Polymere Verbundwerkstoffe“.

■ An der ersten Auflage haben mitgewirkt:

Dr.-Ing. Felipe Wolff-Fabris

Dr.-Ing. Felipe Wolff-Fabris studierte Materialwissenschaften an der Universidade Federal do Rio Grande do Sul in Porto Alegre (Brasilien) und an der Ecole Centrale de Nantes (Frankreich). Nach seinem Studium war Dr.-Ing. Wolff-Fabris am Lehrstuhl für Polymere Werkstoffe an der Universität Bayreuth als wissenschaftlicher Mitarbeiter und Gruppenleiter „Duroplaste und Faserverbundwerkstoffe“ tätig, wo er auf dem Thema „Zähmodifikation von schnell härtenden Faserverbundwerkstoffen“ promovierte. Dr.-Ing. Wolff-Fabris arbeitete als Laborleiter „Composites“ bei der Henkel AG und Co. KGaA und anschließend als Oberingenieur/Akademischer Rat an der Universität Bayreuth. Seit 2012 ist Dr.-Ing. Wolff-Fabris am Kunststoff-Zentrum SKZ tätig, wo er das Europäische Zentrum für Dispersionstechnologien (EZD) leitet.



(Quelle: privat)

Dipl.-Phys. Johannes Krämer

Nach dem Studium der Physik arbeitete Johannes Krämer als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Polymere Werkstoffe der Universität Bayreuth unter Prof. Dr.-Ing. Altstädt und war verantwortlich für den Bereich Duomere und Faserverbundkunststoffe. Seit 2012 ist er in der Abteilung Structural Materials in der Forschung Advanced Materials and Systems der BASF SE in Ludwigshafen tätig.



(Quelle: privat)

Kapitel 3 unter der Beteiligung von Herrn Mike Turner und Kapitel 6 unter der Beteiligung von Herrn Prof. Dr.-Ing. Hilmar Apmann.

Inhalt

Vorwort zur zweiten Auflage	V
Danksagung	VII
Die Autoren	IX
Abkürzungsverzeichnis	XVII
1 Einleitung	1
<i>Felipe Wolff-Fabris, Hauke Lengsfeld</i>	
1.1 Werkstoffe	1
1.2 Endlosfaserverstärkte Polymere	5
1.2.1 Eigenschaftsprofil	5
1.2.2 Herstellung	7
1.2.3 Anwendungsgebiete	9
2 Prepregs und deren Ausgangsmaterialien	13
<i>Felipe Wolff-Fabris, Hauke Lengsfeld, Johannes Krämer</i>	
2.1 Aufbau und Bereitstellung	15
2.2 Matrixsysteme	18
2.3 Fasern und Textilien	23
2.4 Prepreg-Systeme	26
2.4.1 Thermoset Prepregs	26
2.4.2 Thermoplastische Prepregs	31
3 Prepreg-Technologie	37
<i>Hauke Lengsfeld, Mike Turner</i>	
3.1 Entwicklungsgeschichte	37
3.2 Einleitung: Herstellungsmethoden	39
3.2.1 Aufbau einer Prepreg-Anlage	42
3.2.2 Herstellverfahren für Thermoset-Prepregs	42
3.2.2.1 Hot-Melt-Verfahren	42
3.2.2.2 Lösemittel-Verfahren Thermoset-Prepregs	47

3.2.3	Herstellverfahren für Thermoplast-Prepregs.	50
3.2.3.1	Pulverbeschichtungsverfahren	50
3.2.3.2	Extrusionsverfahren	52
3.2.3.3	Lösemittel-Verfahren Thermoplast-Prepregs	53
3.2.4	Prepreg-Varianten	55
3.2.4.1	Slit-Tape	55
3.2.4.2	Towpreg	56
3.2.5	Einfluss von Herstellungsparametern	56
3.2.5.1	Matrixgehalt	57
3.2.5.2	Imprägnierungsgrad	59
3.2.5.3	Tack	61
4	Prepregs: Verarbeitungstechnologie	65
	<i>Hauke Lengsfeld, Javier Lacalle, Thomas Neumeyer</i>	
4.1	Einleitung	65
4.2	Zuschneiden von Thermoset-Prepregs (engl.: cutting)	68
4.2.1	Manueller Zuschnitt	68
4.2.2	Automatisierter Zuschnitt	69
4.3	Handlaminiere von Thermoset Prepregs (Hand-Layup)	73
4.4	Automatisierte Ablegeverfahren: Automated-Tape-Laying (ATL) und Automated-Fiber-Placement (AFP)	76
4.4.1	Einleitung	76
4.4.1.1	Ziel der automatisierten Ablegeverfahren	80
4.4.1.2	Abläufe der automatisierten Ablegeverfahren ...	81
4.4.1.3	Prepregs für automatisierte Ablegeverfahren ...	84
4.4.1.4	Maschinenarchitektur	90
4.4.2	Automatic-Tape-Laying (ATL)	96
4.4.2.1	Einführung	96
4.4.2.2	Thermoset Prepreg-Materialien für ATL	98
4.4.2.3	Funktionsprinzip des ATL-Verfahrens	99
4.4.2.4	ATL-Technologie und wichtige Teilsysteme	102
4.4.2.5	Auswahl der Maschinenkonfiguration für ATL-Verfahren	105
4.4.3	Automatic-Fiber-Placement (AFP)	111
4.4.3.1	Einführung	111
4.4.3.2	Prepreg-Materialien für AFP	112
4.4.3.3	Funktionsprinzip des AFP-Verfahrens	115
4.4.3.4	AFP-Technologie und Konfigurationen	117
4.4.3.5	Kriterien für die Auswahl einer AFP-Konfiguration	128
4.4.4	Produktivität und Wirtschaftlichkeit der Ablegeverfahren	130
4.4.4.1	Ablege- und Floor-to-Floor Produktivität	131

4.4.4.2	Charakterisierung der Maschinenleistung.	132
4.4.4.3	Wirtschaftlichkeit der automatisierten Ablegeprozesse	135
4.4.5	Herstellung von Formteilen auf Basis von thermoplastischen UD-Tapes.	136
4.4.5.1	Tape-Gelege auf Basis von UD-Tapes als flächige Halbzeuge	137
4.4.5.2	Verfahrenstechnik zur Herstellung von Gelegen auf Basis von UD-Tapes	139
4.5	Pultrusion	144
4.6	Hot-Forming	148
4.7	Same-Qualified-Resin-Transfer-Moulding-Verfahren (SQRTM) . .	155
5	Härtungs- und Konsolidierungstechnologien	161
	<i>Felipe Wolff-Fabris, Hauke Lengsfeld, Thomas Neumeyer</i>	
5.1	Grundlagen des Härtingszyklus	161
5.2	Autoklav-Verfahren	165
5.3	Härtung im Ofen	169
5.4	Quickstep™-Technologie	170
5.5	Pressverfahren	171
5.5.1	Pressverfahren für duroplastische Formteile	171
5.5.2	Pressverfahren zur Herstellung thermoplastischer Bauteile	173
5.5.2.1	Verfahren zur Vorkonsolidierung	174
5.5.2.2	Thermoformen von konsolidierten Tape-Gelegen	176
5.5.2.3	Profilherstellung aus thermoplastischen UD-Tapes	179
5.6	Induktionsverfahren	180
5.7	Mikrowellenhärtung	182
5.8	Elektronenstrahlhärtung	184
6	Tooling-Technologie	191
	<i>Hauke Lengsfeld, Hilmar Apmann</i>	
6.1	Anforderungen	192
6.2	Tooling-Materialien	194
6.2.1	Metallische Werkstoffe	195
6.2.2	Faserverbundmaterialien GFK/CFK	198
6.2.3	Andere Materialien	203
6.3	Tooling-Herstellung	204
6.3.1	Direkte Formherstellung	204
6.3.2	Indirekte Formherstellung	206

6.4	Tooling-Konzepte und Beispiele	209
6.4.1	Hot-Form-Toolings	209
6.4.2	Aushärtewerkzeuge	211
6.4.2.1	Einseitig geschlossene Aushärtewerkzeuge.....	216
6.4.2.2	Beidseitig geschlossene Aushärtewerkzeuge....	216
6.4.3	Trennmittel und Reinigung.....	217
7	Prüfung von Prepregs	219
7.1	Charakterisierung des unverarbeiteten Prepregs.....	220
7.1.1	Prepreg-Flächengewicht, Harzgehalt und Faserflächengewicht.....	220
7.1.2	Prozentualer Harzfluss	221
7.1.3	Tack	222
7.1.4	Drapierbarkeit.....	223
7.1.5	Flüchtige Bestandteile - Volatiles.....	223
7.1.6	Viskosität.....	224
7.1.7	Water-Pickup-Test (WPU-Test).....	226
7.1.8	Mikroskopie Schnittkantentest	227
7.1.9	Zugprüfung an thermoplastischen UD-Tapes (Single-Ply-Test)	228
7.2	Charakterisierung am Laminat	229
7.2.1	Faservolumengehalt.....	229
7.2.2	Messung der Glasübergangstemperatur	230
7.2.3	Cured-Ply-Thickness (CPT)	232
8	Design und Produktion	235
	<i>Hauke Lengsfeld</i>	
8.1	Bauweisen-Konzepte	235
8.1.1	Positiv-/Negativ-Bauweise	235
8.1.2	Integral-/Differenzial-Bauweise	237
8.1.3	Open-Mould-Konzepte	240
8.2	Einflussgrößen und Wechselwirkungen	246
8.2.1	Einflussgrößen bei der Bauteilherstellung.....	246
8.2.2	Wechselwirkungen bei der Bauteilherstellung.....	248
9	Fazit der Autoren	259
	Index.....	261

Abkürzungs- verzeichnis

Ablegen	sequenzielles Aufbringen flachförmiger Halbzeuge in einzelnen Lagen
AFP	automated fiber placement, automatisches Tow-Legen
Aktivierung	Erwärmung eines Prepregs zur Erhöhung der Klebrigkeit
ALV	average layup velocity, mittlere Ablegegeschwindigkeit
ATL	automated tape laying, automatisches Tape-Legen
BMI	Bismaleinimide
BOX	Benzoxazin
CAD	computer aided design, rechnergestütztes Konstruieren
CAM	computer aided manufacturing, rechnergestützte Fertigung
CCM	continuous compression molding
CNC	computerized numerical control
CPT	cured ply thickness, Dicke einer ausgehärteten Einzellege
CTE	coefficient of thermal expansion, Wärmeausdehnungskoeffizient
CFK	Carbonfaserverstärkter Kunststoff
DGEBA	Diglycidylether des Bisphenol A
DDS	Diaminodiphenylsulfon
DD	double diaphragma
DFP	dry fiber placement
DICY	Dicyandiamid
DSC	differential scanning calorimetry, Differenzkalorimetrie
EP	Epoxid
FAW	fiber aerial weight, Faserflächengewicht
FEMI	Fertigungsmittel
FOD	foreign object damage
FVC	fiber volume content, Faservolumengehalt
FVG	Faservolumengehalt
FVK	Faserverbundkunststoffe
FVW	Faserverbundwerkstoff

GFK	glasfaserverstärkter Kunststoff
HD-Preg	high density prepreg
HM	high modulus
HMI	human machine interface
HS	high strength
HT-Faser	high tensile Faser
IM-Faser	intermediate modulus Faser
LKV	Laminier- und Klebevorrichtung
LFT	Langfaserverstärkte Thermoplaste
MAG	Multiaxialgelege
NC	numerical control
NGT	Nickel-Galvano-Tooling
OoA	out of autoclave
Overlap/Gap	Überlappung/Lücke zwischen zwei nebeneinander liegender Tapes
PA	Polyamid
PAW	prepreg aerial weight, Prepreg-Flächengewicht
PC	Polycarbonat
PE	Polyethylen
PEI	Polyetherimid
PEEK	Polyetheretherketon
PEKK	Polyetherketonketon
PES	Polythersulfon
PMMA	Polymethylmethacrylat
PP	Polypropylen
PPS	Polyphenylensulfid
Prepreg	preimpregnated fibers, vorimprägniertes Fasermaterial
Prepreg-Tow	schmales Prepreg-Band
Ply	Lage
ply book	Legebuch, beschreibt die Abfolge der Einzellagen in einem
RC	resin content = Harzgehalt im Prepreg
RF	resin flow
RTM	resin transfer moulding
SD	single diaphragma
Slittape	unidirektionales schmales Tape (Prepreg), welches aus einem breiten Faserband geschnitten wurde
SPS	speicherprogrammierbare Steuerung (SPS, engl.: programmable logic controller, PLC)
SQRTM	same qualified resin transfer moulding

Stacking	Laminataufbau, definierte Faserausrichtung und Abfolge
Staggering	relativer Abstand zwischen den Tapes von zwei Lagen der gleichen Orientierung
Staging	bezieht sich auf Grad der Vernetzung bzw. den Grad der Umsetzung eines reaktiven Harzsystems
Steering	Drapieren in der Ebene
Tack	Klebrigkeit, Anhaftung
TCP	tool center point
TPUD	thermoplastisches UD-Prepreg
TGMDA	Tetraglycidylmethylen-diamin
Tow	Bündel von Kohlenstofffaser-Filamenten
TP-Prepreg	Thermoplast-Prepreg
TS-Prepreg	Thermoset-Prepreg= reactive Harzmatrix
UD	unidirektional
UP	ungesättigte Polyesterharze
VC	volatile content
WPU	water pickup

1

Einleitung

Felipe Wolff-Fabris, Hauke Lengsfeld

■ 1.1 Werkstoffe

Die Entdeckung und Entwicklung neuer Werkstoffe hat die Menschheit gesellschaftlich, wirtschaftlich oder militärisch schon immer beeinflusst. Bereits in der ersten Hälfte der Mittleren Steinzeit, etwa 40 000 bis 8500 v. Chr. wurden gebrannte Tonfiguren hergestellt. Auch Metalle weisen eine sehr lange Geschichte auf. Die Kupferzeit bezeichnet die Jahre von der Jungsteinzeit bis zur Herstellung von Geräten und Schmuck (5000 bis 3000 v. Chr.), in der die Menschen Herr der Natur geworden sind und die ersten Schritte der Kunst gegangen sind. Auch nach der Kupferzeit wurden die Zeitalter nach Metallen benannt. Die Bronzezeit, nach einer zufällig entdeckten Legierung benannt, erstreckte sich von 3000 bis 1000 v. Chr. und die Eisenzeit von 1000 v. Chr. bis heute. Die Ver- und Bearbeitung von Werkstoffen ermöglichte die Weiterentwicklung der intrinsischen Vorstellungskraft der Menschheit. Ideen konnten in die physische, greifbare Welt übertragen werden.

In den letzten 150 Jahren fanden ein noch nie in der Geschichte gesehenes Bevölkerungswachstum sowie eine atemberaubende technische Entwicklung statt. Die industrielle Revolution, d. h. der Einsatz von Produktionsmaschinen im großen Umfang, leistete einen großen Beitrag dazu. Neue Werkstoffe wurden erforscht, entdeckt und sind heutzutage ein unverzichtbarer Teil unserer Gesellschaft. Durch den Einsatz neuer Aluminiumlegierungen konnten beispielsweise leichtere, größere und leistungsstärkere Flugzeuge hergestellt werden. Dank der äußerst hohen Temperaturbeständigkeit technischer Keramiken (bis zu 3000 °C) wurde die Raumfahrt erst möglich.

Natürliche Kunststoffe, wie Naturkautschuk oder Bernstein, sind schon seit Jahrhunderten bekannt. Erst in den letzten Jahrzehnten wurden unzählige synthetische Kunststoffe entwickelt, welche die jüngste Werkstoffklasse bilden. Einer der wichtigsten Meilensteine in der Kunststoffgeschichte war die Entwicklung eines Verfahrens im Jahr 1905 von Leo Hendrik Baekeland, in dem durch Druck und

Temperatur zwei Flüssigkeiten (Phenol und Formaldehyd) miteinander chemisch reagieren. Ein Feststoff wird somit erzeugt. Dieses Phenolharz, auch kommerziell bekannt als Bakelit, kam einige Jahre später auf den Markt und wurde beispielsweise als Material für Telefongehäuse eingesetzt.

Gegenüber Metallen und Keramiken erfordert die Formgebung von Kunststoffen viel weniger Energie. Weiterhin weisen Kunststoffe eine wesentlich geringere Dichte auf. Kunststoffe ersetzen Metalle und Keramiken aufgrund dieser Vorteile in zahlreichen Anwendungen und ermöglichen die Herstellung neuer Produkte. Wiederum haben wir Menschen ein neues Instrument zur Verfügung, um unsere fantasievollsten Ideen in die physische Welt zu übertragen. Von kabelloser Kommunikation bis hin zu selbstfahrenden Autos sind unserer Kreativität keine Grenzen gesetzt. Womöglich werden unsere Nachfahren irgendwann in die Vergangenheit schauen und sagen: Rund um das Jahr 2000 n. Chr. fing die Kunststoffzeit an.

Die Vor- und Nachteile von Metallen, Keramiken und Kunststoffen sind allgemein in Tabelle 1.1 dargestellt. Anhand der Daten zur Weltproduktion wird die immense Bedeutung von Kunststoffen deutlich.

Tabelle 1.1 Allgemeine Eigenschaften von Metallen, Keramiken und Kunststoffen

Material-klasse	Vorteile	Nachteile	Geschätzte Weltproduktion im Jahr 2012 [1] [2] [3] [4] [5]
Metall	<ul style="list-style-type: none"> ▪ hohe Zähigkeit ▪ hohe Steifigkeit und Festigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ hohe Dichte 	1615 Mio. t/217 Mio. m ^{3 a}
Keramik	<ul style="list-style-type: none"> ▪ hohe Temperaturbeständigkeit ▪ hohe Steifigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ geringe Zähigkeit 	200 Mio. t/76 Mio. m ^{3 b}
Kunststoff	<ul style="list-style-type: none"> ▪ niedrige Dichte ▪ einfache Verarbeitung 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ niedrige Temperaturbeständigkeit 	288 Mio. t/288 Mio. m ^{3 c}

^a: Rohstahl, Aluminium, Kupfer und Titan

^b: Glas, Haushalt und technische Keramik

^c: Annahme: $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$

Auf Molekularebene bestehen Kunststoffe aus sich wiederholenden chemischen Bausteinen und werden deshalb als Polymer bezeichnet. Das Wort Polymer kommt aus dem Griechischen und bedeutet „viele Bausteine“ (poly: viel, meros: Teil). Basierend auf der chemischen Struktur werden Polymere unter anderem in Thermoplasten und Duromeren aufgeteilt.

Thermoplaste bestehen aus sehr langen Molekülketten, welche aus den oben genannten Repetiereinheiten aufgebaut sind. Das feststoffartige Verhalten entsteht durch die Verschlaufung der einzelnen Ketten. Dazu zählen unter anderem Poly-

propylen (PP), Polystyrol (PS), Polyethylen (PE) und Polyamid (PA). Phenolharze, sowie Polyester- und Epoxidharze, sind Beispiele von sogenannten Duromeren. Duromere bestehen ebenfalls aus Molekülketten, die jedoch untereinander vernetzt sind. Dies bedeutet, dass die chemischen Bindungen nicht nur entlang der Ketten vorhanden sind, sondern auch zwischen den einzelnen Ketten. Eine umfangreiche Beschreibung von Thermoplasten und Duromeren kann in der Literatur [6] gefunden werden.

Kombination von Werkstoffen

Mit der Kombination von schon bestehenden Werkstoffen können neue und verbesserte technische Werkstoffe hergestellt werden. Neuartige Eigenschaftsprofile können den Kunststoffen durch den Einsatz von mineralischen oder metallischen Stoffen verliehen werden. Im weitesten Sinn sind alle Werkstoffe, die zwei oder mehrere Stoffen beinhalten, als Verbundwerkstoffe zu bezeichnen.

Besonders faserförmige Stoffe, d.h. Stoffe mit großem Aspektverhältnis (Länge/Durchmesser), können die mechanischen Eigenschaften der zu verstärkenden kontinuierlichen Phase (sogenannte Matrix) deutlich erhöhen. Die Fasern wirken wie eine Art Skelett, welches die Außenkräfte trägt. Die kontinuierliche Matrix verteilt diese Kräfte und hält die Fasern zusammen. Durch die Kombination von Matrix und Fasern können neue Eigenschaftsprofile erzielt werden, die nicht mit den einzelnen Komponenten zu erreichen wären. Wie Aristoteles vor über 2000 Jahren schrieb: „Das Ganze ist mehr als die Summe der einzelnen Teile“. Dies gilt auch als Wirkprinzip eines Faserverbundwerkstoffes (FVW).

Das Verstärkungsprinzip von FVW ist in der Natur längst bekannt. Holz, einer der ältesten Baustoffe, weist hervorragende spezifische Eigenschaften auf und ist bis heute in vielen Anwendungen unersetzbar. Holz besteht hauptsächlich aus folgenden Komponenten: Zellulose, Lignin und Polyose. Zellulose bildet Fibrillen in dem Zellgerüst und dient als Verstärkungsmittel. Die Zellulosefibrillen werden von einer Matrix aus Lignin zusammengehalten. Polyose dient hier als Haftvermittler (Verbindungsmittel) zwischen Zellulose und Lignin.

Um die Vorteile von Kunststoffen und Keramiken zu kombinieren, werden Polymere hauptsächlich mit keramischen Fasern verstärkt (Tabelle 1.1). Dazu zählen Glas- und Kohlenstofffasern (siehe Kapitel 2). Diese Faserverstärkung verleiht nicht nur bessere mechanische Eigenschaften, sondern erhöht auch die Wärmeformbeständigkeit von Kunststoffen. Somit eröffnen sich neue Anwendungsgebiete für Kunststoffe.

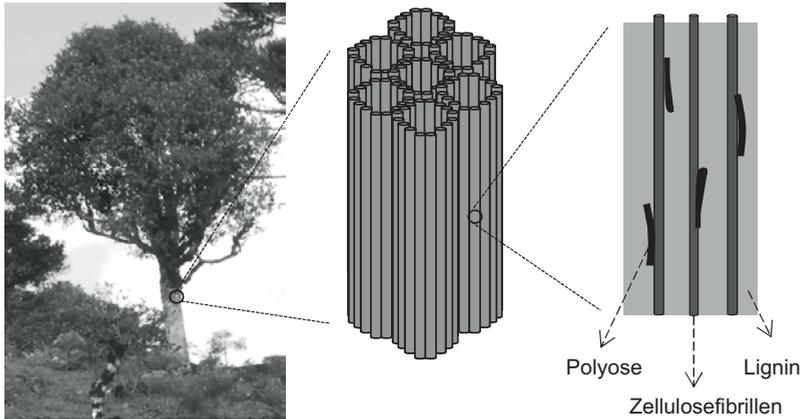


Bild 1.1 Schematischer Aufbau von Holz

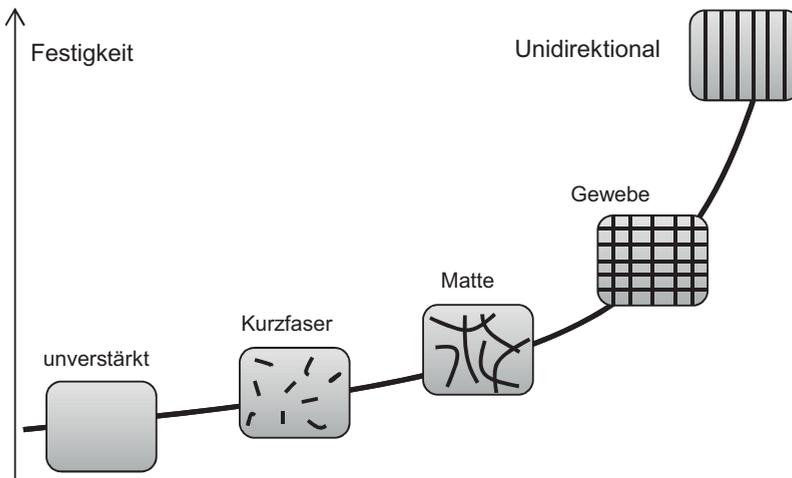


Bild 1.2 Einfluss der Verstärkungsart auf die Festigkeit eines Kunststoffes

Sowohl die Länge der einzelnen Fasern sowie deren Orientierung sind für die End-eigenschaften der Faserverbundwerkstoffe von immenser Bedeutung. In Bild 1.2 ist der Einfluss unterschiedlicher Faserverstärkungsarten auf die Festigkeit eines Kunststoffes schematisch dargestellt.

Der Markt für faserverstärkte Kunststoffe wächst stetig. Hierzu zählen sowohl Automobilbauteile auf Basis von kurzfaserverstärkten Thermoplasten, als auch Hochleistungsbauteile auf Basis von endlosfaserverstärkten Duromeren für die Luftfahrtindustrie.

■ 1.2 Endlosfaserverstärkte Polymere

1.2.1 Eigenschaftsprofil

Fasertyp, -anteil, -länge und -orientierung sind für die Verstärkung eines Kunststoffes entscheidend. Typischerweise unterteilt man diese Werkstoffe in kurz- (< 1 mm), lang- (von 1 bis 50 mm) und endlosfaserverstärkte Kunststoffe. Von endlosfaserverstärkten Kunststoffen spricht man bei Mehrkomponentensystemen aus einer endlosen hochfesten Faser (z. B. Glas- oder Kohlenstofffaser) und einer zäheren polymeren Matrix [7].

Um eine Verstärkung des Polymers durch die Fasern zu erhalten, müssen folgende Bedingungen erfüllt werden:

- Festigkeit und E-Modul des Fasermaterials müssen größer als die des Matrixpolymers sein.
- Die Matrix muss jedoch eine höhere Bruchdehnung als der Faserwerkstoff aufweisen.

Die Faser nimmt im Verbund die wesentlichen Lasten auf, was eine hohe Steifigkeit und Festigkeit erfordert. Für den Einsatz im Leichtbau sollte die Faser eine möglichst geringe Dichte aufweisen. In Kapitel 2 werden die wichtigsten Verstärkungsfasern und deren Eigenschaften näher erläutert.

Die Matrix muss unter anderem folgende wichtige Aufgaben erfüllen: sie dient der Formgebung, hält die Faser auf Abstand und überträgt die Kräfte von Faser zu Faser. Ebenfalls in Kapitel 2 werden die bedeutendsten Duromere vorgestellt, welche als Matrix für FVW eingesetzt werden können.

Die Erfüllung der oben genannten Bedingungen an Faser und Matrix reichen aber nicht aus, um die gewünschten mechanischen Eigenschaften aus der Kombination beider Werkstoffe zu erhalten. Besteht nur eine schwache Anbindung zwischen beiden Komponenten, kann weder die Faserfestigkeit noch die Kraftübertragung durch die Matrix genutzt werden. Die Faser-Matrix-Haftung an der Grenzfläche ist von signifikanter Bedeutung und spielt für die Qualität und die Endeigenschaften der FVW eine entscheidende Rolle.

Im Fall einer ausreichenden Haftung zwischen Matrix und Faser werden die mechanischen Eigenschaften des FVW hauptsächlich von der Faserorientierung beeinflusst. Grundsätzlich weisen FVW ein anisotropes Verhalten auf, d. h. die mechanischen Eigenschaften ändern sich mit der Belastungsrichtung. Im Fall einer Zugbelastung parallel zur Faserorientierung weist ein FVW die höchstmögliche Festigkeit und Steifigkeit auf. Bei einer Zugbelastung senkrecht zur Faser ist die Matrixverstärkung (Steifigkeit) allerdings nur gering und die Festigkeit nimmt sogar ab. Das mechanische Verhalten von FVW in Abhängigkeit der Faserorientierung ist in der Literatur gut beschrieben [8].

Die Anisotropie von FVW ist ein wesentlicher Unterschied zu anderen herkömmlichen Materialien, wie z. B. Aluminium oder unverstärktem Kunststoff, und muss bei dem Bauteildesign sorgfältig berücksichtigt werden. Die im späteren Bauteileinsatz vorherrschenden Belastungsrichtungen sowie Belastungsarten müssen für die Auslegung von FVW-Bauteilen und die Anpassung der Faserorientierung bekannt sein oder geschätzt werden. Nur so kann ein lastgerechtes Design von FVW-Bauteilen erfolgen sowie die Möglichkeiten und Vorteile dieser Werkstoffklasse genutzt werden. In Kapitel 8 werden verschiedene Bauweisen-Konzepte für die Herstellung von Hochleistungsbauteilen auf Basis von FVW im Detail beschrieben.

Tabelle 1.2 Typische spezifische Steifigkeit (E-Modul/ ρ) und spezifische Festigkeit (σ/ρ) ausgewählter Leichtbauwerkstoffe

Material	Spezifische Steifigkeit (GPa/g cm ⁻³)	Spezifische Festigkeit (MPa/g cm ⁻³)
Aluminiumlegierung	20 bis 30	150 bis 200
Titanlegierung	20 bis 25	300 bis 400
Glasfaserverstärktes Epoxid (unidirektional)	20 bis 25	600 bis 800
Glasfaserverstärktes Thermoplast (unidirektional)		
Glasfaserverstärktes Epoxid (quasi-isotrop)	10 bis 12	200 bis 250
Kohlenstofffaserverstärktes Epoxid (unidirektional)	70 bis 100	1200 bis 1800
Kohlenstofffaserverstärkter Thermoplast (unidirektional)	ca. 30 bis 100	Ca. 200 bis 1400
Kohlenstofffaserverstärktes Epoxid (quasi-isotrop)	30 bis 50	250 bis 300

Werkstoffbezogene Eigenschaften von FVW sowie von herkömmlichen Leichtbaumaterialien sind in Tabelle 1.2 zu sehen. Durch die sehr hohen spezifischen Eigenschaften, d. h. unter Berücksichtigung der Materialdichte, wird das riesige Potenzial von FVW für Leichtbauanwendungen deutlich.

Die korrekte Bestimmung der mechanischen Eigenschaften von FVW erfordert qualifiziertes und erfahrenes Personal sowie hochpräzises Equipment. Beispielsweise können bereits bei der Probenvorbereitung (z. B. Sägen) feine Risse im Prüfkörper entstehen, welche die Zugfestigkeit deutlich negativ beeinflussen. Auch die exakte Positionierung der Prüfkörper an einer Prüfmaschine (Faser- und Belastungsrichtung) ist von größter Bedeutung. Die Prüfmethode zur mechanischen Charakterisierung von FVW sowie eine detaillierte Beschreibung der Probenpräparation sind in der Literatur dargestellt [9].

1.2.2 Herstellung

Die Herstellungsmethode von FVW ist größtenteils von der Matrix abhängig. Thermoplastische Matrizes werden in der Regel aufgeheizt, aufgeschmolzen und in ein Werkzeug gespritzt oder gepresst. Durch die Abkühlung des Bauteils im Werkzeug erstarrt die Matrix. Es findet hierbei keine chemische Reaktion statt, so dass sehr kurze Zykluszeiten erreicht werden können. Die Endgeometrie des Bauteils wird durch die Spritzgussform bzw. das Presswerkzeug vorgegeben.

Harzsysteme (Duromere in ungehärtetem Zustand) dagegen sind chemisch reaktive Systeme und bestehen aus niedermolekularen Verbindungen. Ähnlich zu Thermoplasten werden Harze in ein Werkzeug oder in eine Presse gebracht. Die Erstarrung der Matrix findet aber nicht durch Abkühlung, wie bei Thermoplasten, sondern durch eine Vernetzungsreaktion (Aushärtung) statt. Sobald eine stabile dreidimensionale Struktur aufgebaut wurde, kann das Bauteil aus dem Werkzeug entfernt werden. Die Erstarrung eines faserverstärkten Duromers ist durch die erforderliche chemische Reaktion meist länger als bei thermoplastischen FVW. Dadurch sind die Herstellungszyklen für duromere Matrizes länger. Weiterhin handelt es sich um einen nicht reversiblen Prozess. Dies bedeutet, dass eine Nachverformung des Bauteils nicht möglich ist.

Bild 1.3 zeigt einen allgemeinen Verarbeitungsablauf von Thermoplast- und Thermoset-Matrix im Vergleich.

Ausgangszustand	Verarbeitung	Endzustand
Thermoplast <ul style="list-style-type: none"> ▪ Werkstoff mit hohem Polymerisierungsgrad 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ <u>keine chemische Reaktion</u> nur Schmelzung $T_{\text{melt}} \cong (1,5 \text{ bis } 2) \times T_g$ <ul style="list-style-type: none"> ▪ Konsolidierung & Abkühlung 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Polymerisierungsgrad wie Ausgangszustand ▪ neue äußere Gestalt ▪ nachträgliche thermische Verformung möglich
Thermoset (Duroplast) <ul style="list-style-type: none"> ▪ Werkstoff mit niedrigem Polymerisierungsgrad ▪ mehrkomponentiges System aus Harz u. Härter 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ <u>chemische Vernetzungsreaktion</u> $T_{\text{Härtung}} \cong T_g$	<ul style="list-style-type: none"> ▪ hoher Polymerisierungsgrad ▪ unlöslich, unschmelzbar ▪ neue äußere Gestalt ▪ keine Verformung möglich

Bild 1.3 Ablaufschema Verarbeitungsprozess Thermoplast und Thermoset im Vergleich

Harze weisen eine deutlich niedrigere Viskosität als geschmolzene Thermoplaste auf. Infolgedessen ist die Fließfähigkeit von Harzen größer, was die Herstellung von komplizierteren Bauteilgeometrien ermöglicht, da z. B. dünnere Wände oder längere Wege leichter benetzt werden können. Weiterhin sind niedrigere Prozessdrücke für die Herstellung von duromeren FVW erforderlich. Manche Prozesse, wie z. B. Harzinfusion für die Herstellung von Rotorblättern für Windkraftanlagen, finden sogar ohne Überdruck statt. Stattdessen wird das Harz durch Unterdruck (Vakuum) in das Werkzeug gesaugt. Auch die Konstruktion von Werkzeugen und Anlagen für die Herstellung von duromeren FVW ist einfacher, was niedrigere Anschaffungskosten bedeutet. Aus diesen Gründen werden endlosfaserverstärkte Bauteile hauptsächlich aus duromeren Matrices hergestellt. Die relevantesten Verfahren zur Herstellung von endlosfaserverstärkten Duromeren sind in Tabelle 1.3 dargestellt.

Tabelle 1.3 Vergleich unterschiedlicher Herstellungsverfahren

Verfahren	Personalaufwand	Investitionskosten	Automatisierungsgrad	Produktionsrate	Bauteilqualität/ Mech. Eigenschaften	Sonstiges	Anwendungsbeispiele
Handlaminieren	3	0	0	0	0	offenes Verfahren	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Prototypen und kleine Serien ▪ Schwimmbecken
Vakuuminfusion	3	0	0	1	1	für große Bauteile geeignet	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Rotorblätter für Windkraftanlagen ▪ Schiffsbau
Pultrusion	0	2–3	3	3	3	nur für Profile mit konstantem Querschnitt geeignet	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Rohre, Leitungen und Profile
Wickeln	0	1–2	3	3	3	keine komplexen Strukturen möglich	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Druckbehälter
RTM	1	2–3	2–3	3	2	großserientauglich	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Automobilbauteile ▪ Kleine bis mittlere Luftfahrtbauteile ▪ Sportartikel