

HANSER



Leseprobe

zu

„Faserverbundwerkstoffe“

von Hauke Lengsfeld et al.

Print-ISBN: 978-3-446-44882-7

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

Weitere Informationen und Bestellungen unter
<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-44882-7>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

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

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	Handlaminieren 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

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.

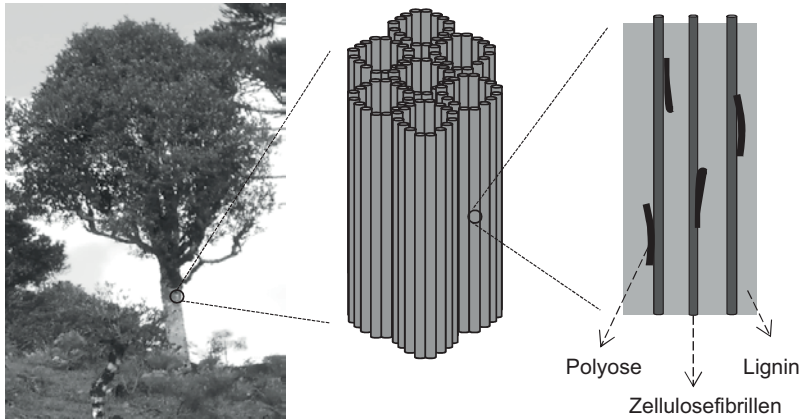


Bild 1.1 Schematischer Aufbau von Holz

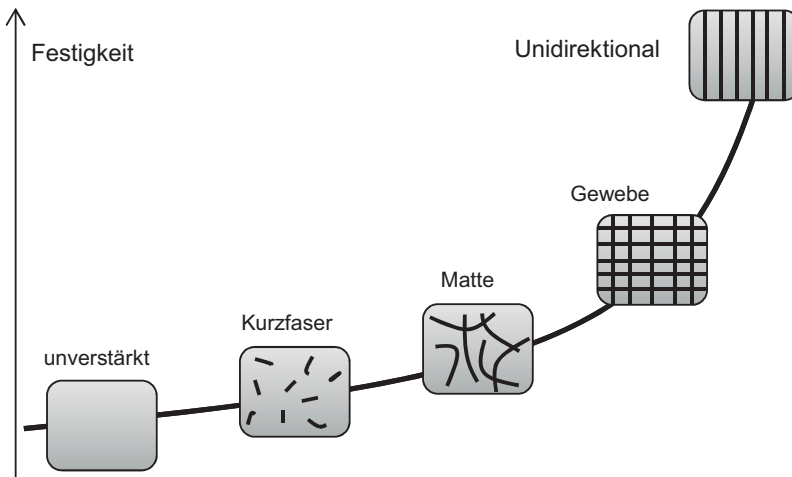


Bild 1.2 Einfluss der Verstärkungsart auf die Festigkeit eines Kunststoffes

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 Faser verstärkungsarten 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
<p>Thermoplast</p> <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
<p>Thermoset (Duroplast)</p> <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

Verfahren	Personalaufwand	Investitionskosten	Automatisierungsgrad	Produktionsrate	Bauteilqualität/ Mech. Eigenschaften	Sonstiges	Anwendungs- beispiele
Thermoset- Prepreg/ Autoklav	2	3	1 – 2	2	3	begrenzte Haltbarkeit des Prepregs, Her- stellung großer bis sehr großer Bauteile möglich	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bauteile für Renn- wagen ▪ Luftfahrtbauteile ▪ Reparatur
Thermoplast- Prepreg, in-situ Konsolidierung	1	3	3	2	3	Unbegrenzte Haltbarkeit des Prepregs kleine bis sehr große Bauteile	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Luftfahrt ▪ Sportartikel ▪ Automotive

0: gering 1: mittel 2: hoch 3: sehr hoch

Um die gewünschten Bauteileigenschaften und Produktionskosten zu erreichen, ist es zwingend erforderlich, die Materialien, den Prozess sowie das Bauteildesign gleichzeitig zu berücksichtigen. Diese drei Aspekte sind eng miteinander verbunden. Ein neues Bauteildesign erfordert beispielsweise eine Änderung im Herstellungsprozess sowie eine Anpassung des Harzsystems bzw. der Faserorientierung. Nur somit kann die optimale Bauteilperformance erreicht werden.

1.2.3 Anwendungsgebiete

FVW werden bereits in einer Vielzahl von Bereichen eingesetzt, in denen sehr leichte Werkstoffe mit besonders guten mechanischen Eigenschaften gefordert werden. Dazu zählen unter anderem der Energiesektor (Windkraftträder), die Luft- und Raumfahrt, das Militär und die Automobilbranche [10]. In den letzten Jahren zeichnet sich im Bereich der FVW, insbesondere bei den kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen, ein jährliches Wachstum von etwa 13 % ab, welches sich bis 2023 aber noch deutlich steigern soll.

Die Gründe hierfür sind einerseits das wachsende Umweltbewusstsein, sowohl in der Bevölkerung als auch bei den regierenden Stellen, und andererseits das Bestreben, den Treibstoffverbrauch im Transportwesen deutlich zu reduzieren [11]. Die Verminderung des Flugzeug- bzw. Fahrzeuggewichts bietet das größte Potenzial um Treibstoffverbrauch und CO₂-Ausstoß zu reduzieren. Deshalb sind Hersteller

gezwungen, nach Materialalternativen mit besseren spezifischen mechanischen Eigenschaften zu suchen. Durch den Einsatz von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK, carbonfaserverstärkter Kunststoff) ist, bei lastgerechtem Design, eine Bauteilgewichtsreduzierung von circa 70 % gegenüber Stahl und von circa 30 % gegenüber Aluminium möglich [12].

CFK-Bauteile werden weitgehend mittels Prepreg-Technologie hergestellt. Rund 54 % der Weltproduktion von Kohlenstofffasern werden für die Herstellung von Prepregs eingesetzt. Weitere circa 5 % werden als Gewebe oder Geflechte für Infiltrationsverfahren, wie z. B. RTM (engl.: resin transfer moulding), verarbeitet. Weitere wichtige Herstellungsprozesse von CFK sind Wickelverfahren (circa 15 %) und Pultrusion (circa 8 %) [10].

Rund 95 % der produzierten Kohlenstofffasern werden in CFK-Bauteilen eingesetzt. Deshalb spiegelt der Verbrauch von Kohlenstofffasern wider, wie aktiv ein bestimmtes Land oder eine Region in dem Bereich der CFK-Bauteile ist. Die Tabelle 1.4 zeigt den globalen Verbrauch an Kohlenstofffasern sowie den Bedarf nach Region und Anwendung. CFK-Bauteile für Luftfahrt-, Automobil- und Windkraftanwendungen werden vorwiegend in Europa produziert, während CFK-Massenprodukte für Sportartikel fast ausschließlich in Asien hergestellt werden. Tabelle 1.5 zeigt den globalen Bedarf an Kohlenstofffaser-basierten Composites nach Marktsegmenten. Deutlich zu erkennen ist, dass mehr als die Hälfte des Bedarfs für Luft- und Raumfahrtanwendungen inkl. Verteidigung verwendet wird.

Tabelle 1.4 Kohlenstofffaserbedarf nach Marktsegmenten und Regionen [13]

	Europa	Nordamerika	Asien	Andere
Luftfahrt und Verteidigung	46 %	33 %	16 %	5 %
Sport und Hobby	4 %	6 %	89 %	1 %
Windkraftanlagen	74 %	15 %	11 %	< 1 %
Automobil	56 %	26 %	18 %	< 1 %

Tabelle 1.5 Globaler Bedarf Kohlenstofffaser-Composites nach Marktsegmenten [14]

Luft- und Raumfahrt	Automotive	Freizeit	Windenergie	Bauwesen	Andere
56 %	18 %	11 %	8 %	2 %	1,2 %

Literatur zu Kapitel 1

- [1] USGS. *U.S. Geological Survey, Minerals Information*. (Online) U.S. Department of the Interior. <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/> (abgerufen am 09.06.2014).
- [2] ISPY Publishing: „*Glass Market Intelligence Report*“, Bolton: ISPY Publishing, 2013.
- [3] Ceramic Industry Advanced: *Raw & Manufactured Materials: 2014 Overview*. (Online) (Zitat vom 02.01.2014) <http://www.ceramicindustry.com/articles/93677-raw-manufactured-materials-2014-overview> (abgerufen am 09.06.2014).
- [4] Cerame Unie – The European Ceramic Industry Association: *Activity Report*. Brüssel: Cerame Unie, 2013.
- [5] Plastics Europe: *Plastics – the Facts 2013, An analysis of European latest plastics production, demand and waste data*. Brüssel: Plastics Europe, Association of Plastics Manufacturers, 2013.
- [6] G. W. Ehrenstein. *Polymer Werkstoffe – Struktur, Eigenschaften, Anwendung*. München: Carl Hanser Verlag, 2011.
- [7] H. Schürmann: *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden*. VDI-Buch. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2007.
- [8] G. W. Ehrenstein: *Faserverbund-Kunststoffe – Werkstoffe – Verarbeitung – Eigenschaften*. München: Carl Hanser Verlag, 2006.
- [9] V. Altstädt. *Prüfung von Verbundwerkstoffen*, in *Kunststoffprüfung*. W. Grellmann und S. Seidler (Hrsg.). München: Carl Hanser Verlag, 2005, S. 537 bis 589.
- [10] E. Witten, B. Jahn. *Composites-Marktbericht 2013 – Marktentwicklungen, Trends, Ausblicke und Herausforderungen*. AVK Industrievereinigung verstärkte Kunststoffe/Carbon Composites, 2013.
- [11] C.-S. Ernst, L. Eckstein, I. Olschewski. *CO₂-Reduzierungspotenziale bei Pkw's bis 2020*. Aachen: Abschlussbericht 113510, 2012.
- [12] F. Gojny. *Carbon Fibres & Composites: Ascent to Industrial Engineering Material – Market Outlook & Applications*, in *Carbonfasern: Herstellung – Technische Möglichkeiten – Marktpotenziale*. Meitingen: Cluster-Treff Bayern Innovativ, 2011.
- [13] Industry Experts. *Carbon Fibers & Carbon Reinforced Plastics (CFRP) – A Global Market*. 2013.
- [14] M. Sauer, M. Kühnel: *Composites-Marktbericht 2018 – Marktentwicklungen, Trends, Ausblicke und Herausforderungen*. AVK Industrievereinigung verstärkte Kunststoffe/Carbon Composites, 2018.

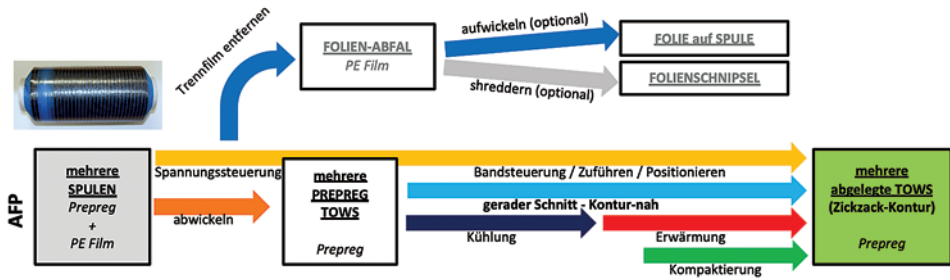


Bild 4.37 Schematische Abfolge der Prozessschritte beim AFP-Layup eines duroplastischen Prepregs.

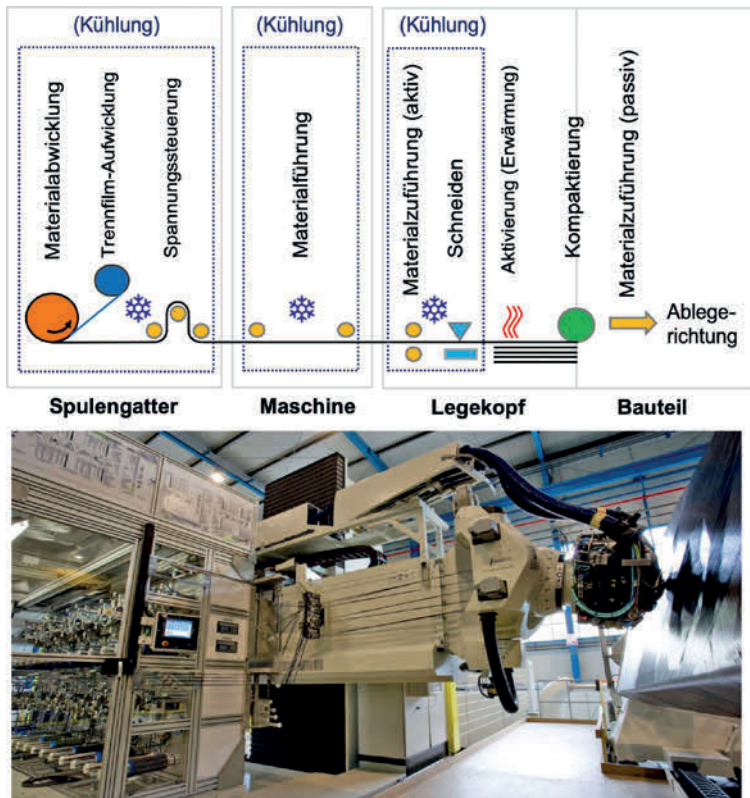


Bild 4.38 Oben: Schematische Darstellung der AFP-Teilprozesse und ihre Position innerhalb der AFP-Linie, unten: AFP-Anwendung in Spaltenkonfiguration [Bildquelle: M. Torres Diseños Industriales S. A. U.]

Schneidesystem

Das Scheidesystem hat einen bedeutsamen Einfluss auf die Gesamtproduktivität und Ablagegenauigkeit. Außerdem sind die Unterschiede, durch patentierte Herangehensweise der Anlagenhersteller, zwischen den AFP-Technologien sehr groß.

Stand der Technik bei industrieller AFP-Technologie mit Duromer-Materialien ist die Durchführung gerader – transversal zur Faserrichtung – Schnitte für jedes einzelne Tow. Dies führt zu dem typischen Zacken-Muster der AFP-Laminats. Hochkomplexe Zuschnitte, wie in der ATL-Technologie, sind nicht ohne weiteres möglich, da das Material beim Schneiden kein Trägerpapier hat. Somit ist keine konturgerechte, sondern nur eine *konturnahe* Ablage möglich (Bild 4.41). Die Diskrepanz zwischen der theoretischen und der späteren realen Ablage hängt von der Breite des Tows ab.

Der Bedeckungsfaktor ist der Prozentsatz der Towbreite, der die eigentliche Lagenkontur überschreitet. Der Bedeckungsfaktor beeinflusst gleichzeitig die Bereiche im Bauteil, die nicht mit Prepreg-Material bedeckt sind sowie die Bereiche außerhalb des eigentlichen Bauteils, in denen Materialüberschüsse bzw. Verschnittreste abgelegt werden (Bild 4.41). Dieser Effekt ist besonders zu berücksichtigen, wenn Innenlagen gelegt werden und der Materialüberschuss an der Außenseite noch auf dem Bauteil platziert ist. Es werden normalerweise Abdeckfaktoren von 0 %, 50 % oder 100 % verwendet, abhängig vom Bauteildesign und den zulässigen bzw. erforderlichen Spalt-/Überlappungseinschränkungen.

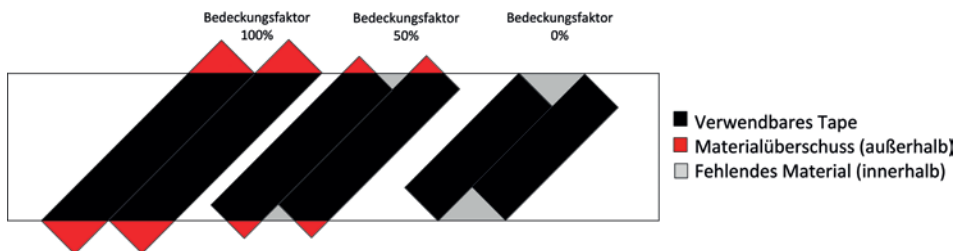


Bild 4.41 Schematische Darstellung des Bedeckungsfaktors und der charakteristischen gezackten AFP-Kontur

Die vom Maschinenhersteller abhängigen Konstruktionen und Kontrollroutinen beeinflussen deutlich die Haupteigenschaften des Schneidesystems. Dies sind zum Beispiel die minimale Ablagelänge, die maximale Schneidegeschwindigkeit beim Ablegen vs. die Cut/Add on the Fly-Kapazität sowie die Neustartlänge nach dem Schneiden (engl.: cut-restart).

Die *minimale ablegbare Länge* wird durch die mechanische Entfernung zwischen dem Schneidesystem und dem Ablagepunkt bestimmt. Diese Länge variiert je nach Ablegetechnologie zwischen etwa 90 und 140 mm und beeinflusst die Anpassung der späteren Ablage zur theoretischen Kontur, insbesondere bei komplexen Kontu-

Mit schnellhärtenden Prepreg-Systemen, deren Härtetemperaturen im Bereich 80 bis 150 °C liegen, werden z. B. von der Firma Secar Technologie GmbH, Österreich, in einem vollständig kontinuierlichen Pultrusionsprozess Platten, Winkel- und Hohlprofile für die unterschiedlichsten Industrie- und Luftfahrtanwendungen hergestellt (Bild 4.59).

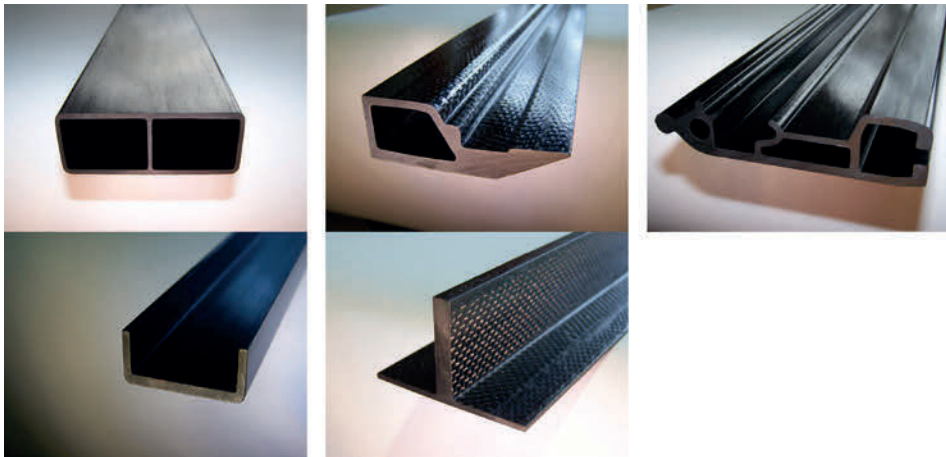


Bild 4.59 Pultrusionsprofile [Bildquelle: Secar Technologie GmbH]

Profile/Zwickelfüller

Die Technik hat inzwischen einen Reifegrad erreicht der es ermöglicht, nicht nur gerade, sondern auch gebogene Profile mit einem definierten Radius zu erzeugen. Gebogene wie auch im Querschnitt veränderliche Profile sind insbesondere in der Flugzeugindustrie gefragt, da sich auf diese Weise der Leichtbaugedanke durch FVW kostengünstiger umsetzen ließe. Derzeit werden Profile wie z. B. Spante oder Stringer in eigens für jedes Bauteil angepassten Formen hergestellt. Die entsprechenden Vorgelege werden mittels ATL/AFP-Technologie abgelegt, zugeschnitten, per Hot-Forming vorgeformt und anschließend in einem Tooling ausgehärtet. Hier könnte der Einsatz von Pultrusionstechnik mit angepassten Prepreg-Systemen zu einer deutlichen Vereinfachung und Kostenersparnis führen.

Neben ausgehärteten Profilen ist auch die Herstellung von dreieckigen Zwickelfüllern aus vorimprägniertem Material möglich und insbesondere für die Luftfahrtindustrie interessant. Der in Bild 4.60 dargestellte Füller dient zum Auffüllen der Kehlnaht, die beim Zusammenfügen von zwei L-förmigen Profilen zu einem T-Profil (Stringer) entsteht. Diese Kehlnaht würde beim Aushärten des Stringerprofils Porositäten und Änderungen im Faserverlauf verursachen. Daher wird diese häufig mit dem gleichen Material aufgefüllt (Bild 4.61).

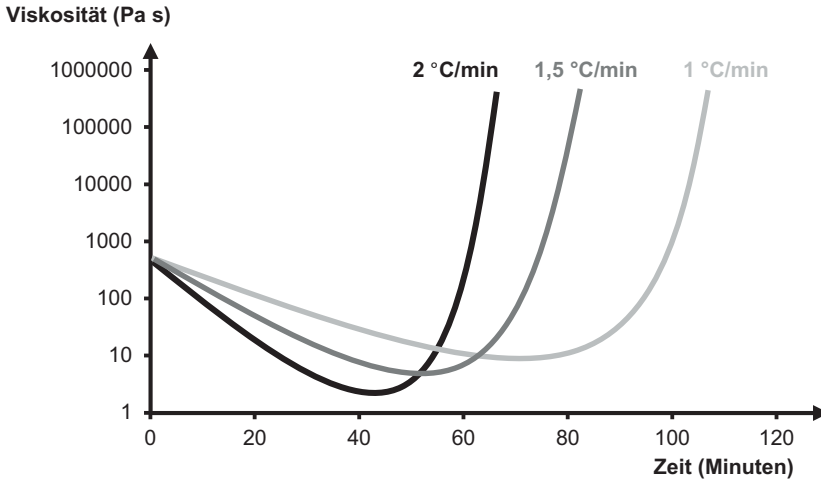


Bild 5.2 Einfluss der Aufheizrampe auf die Harzviskosität

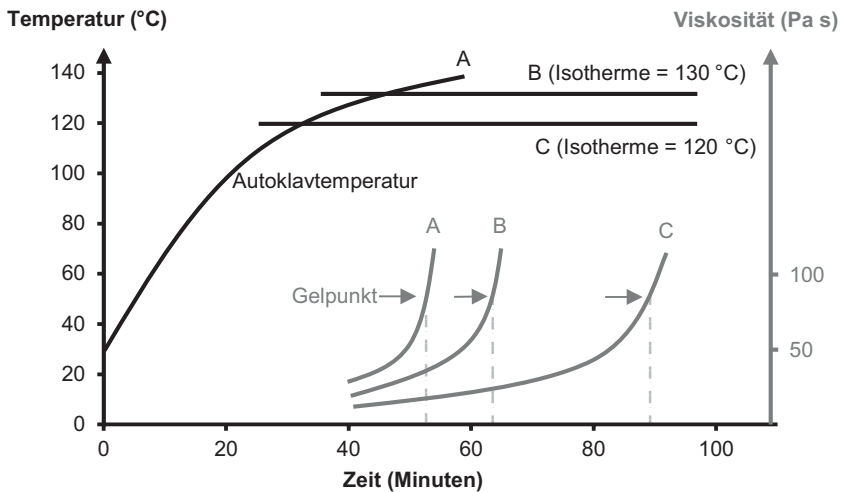


Bild 5.3 Einfluss der Isotherme auf den Gelpunkt [1]

Für die Aushärtung von Prepreg-Bauteilen mittels Autoklav, Ofen, Quickstep™-Technologie, Mikrowellen oder Elektronenstrahl wird typischerweise ein Vakuumsack-Aufbau eingesetzt. Durch Unterdruck wird Luft aus den Prepregs entfernt, um Fehler im fertigen Bauteil (wie z. B. Porosität oder Delaminationen) möglichst weit zu reduzieren. Weiterhin kann der Vakuumsack-Aufbau das überschüssige Harz des Laminats aufnehmen. Der Einsatz von Vakuumsäcken ermöglicht eine Erhöhung der Bauteilqualität sowie eine Verbesserung der Endeneigenschaften. Ein im Vakuumsack eingepacktes Prepreg-Laminat sowie die schematische Darstellung des Vakuumsack-Aufbaus ist in Bild 5.4 zu sehen.



Bild 6.6 Nickel-Galvano-Tooling (links) und Nickelguss-Tooling (rechts)
[Bildquelle: Premium Aerotec GmbH]

6.2.2 Faserverbundmaterialien GFK/CFK

Faserverbundmaterialien wie GFK und CFK bieten beim Formenbau eine Reihe von Vorteilen gegenüber metallischen Werkstoffen. Aufgrund der sehr viel geringeren Dichte von Faserverbundkunststoffen (FVK), in erster Linie CFK, lassen sich deutlich leichtere Toolings herstellen. Das niedrigere Eigengewicht eines Tooling vereinfacht die Handhabbarkeit und führt in der Regel zu einem gleichmäßigeren, schnelleren Aufheizen des Toolings und des auszuhärtenden Bauteils (Bild 6.7).



Bild 6.7 CFK-Tooling aus Gewebe-Prepreg [Bildquelle: Lufthansa Technik GmbH]

Wie bei den metallischen Werkzeugen sind die Oberflächen von FVK-Toolings meist unempfindlich gegenüber Trennmitteln und lassen sich bei kleineren Beschädigungen gut reparieren.

Tabelle 6.3 Vergleich von Metallen und CFK als Tooling-Material

Anforderung	Ziel	Nickel36	CFK (BMI-Matrix)
Anschaffungskosten	möglichst gering	Duplikate teuer	Duplikate: gleicher Preis wie erstes Tool, Material meist günstiger als Ni36
Oberflächenfinish	direkter Einsatz von Trennmittel möglich	schwierig zu bearbeiten, etablierte Technik	schwierig zu bearbeiten, etablierte Technik
Lebensdauer der Oberfläche	unbegrenzt	unbegrenzt bei entsprechender Wartung	unbegrenzt bei entsprechender Wartung
Dauerhaftigkeit, Anzahl Zyklen	1000 + Zyklen	unbegrenzt	1000 + Zyklen
Flexibilität bei Design-Änderungen	Material einfach zu verarbeiten und zu fräsen	schwierig zu schweißen und fräsen ohne erneutes Glühen	zusätzliches Material auflaminiert und erneutes Fräsen der Oberfläche
Tooling-Modifikationen	Tooling-Geometrie einfach anpassbar	Toleranzen in der Oberfläche bei kompletter Überarbeitung schwierig zu halten	einfach zu modifizieren ohne Toleranzverluste
Reparierbarkeit	Werkzeug mit einfachen Techniken reparierbar	Schweißen und erneutes Fräsen der Oberfläche	Ausgangsmaterial auflaminiert und erneutes Fräsen der Oberfläche

In Tabelle 6.3 werden Ni36 und CFK mit BMI-Matrix in Bezug auf ihren Einsatz als Tooling-Materialien miteinander verglichen.

Das Bild 6.11 zeigt ein GFK-Werkzeug zur Herstellung von Rotorblattkomponenten. Da bei diesen Bauteilen häufig Harzsysteme mit niedriger Aushärtetemperatur eingesetzt werden (bis circa 80 °C), ist die thermische Ausdehnung des Toolings meist gering, sodass GFK/Epoxy problemlos als Material eingesetzt werden kann.

Index

Symbole

- 2-Filmprozess 45
- 4,4'-Diaminodiphenylsulfon (DDS) 21
- 4,4'-Tetraglycidylmethylenediamin (TGMDA) 20
- 4-Filmprozess 45

A

- Ablegeprozess 84
- Ablege- und Bearbeitungstechnologien 65
- Ablegeverfahren 67
 - Abläufe 81
 - Ziele 80
- Abspanneffekt 255
- AFP
 - Ablagekopf 127
 - Definition 111
 - Funktionsprinzip 115
 - Maschinenarchitektur 125
 - Technologie 118
 - Teilsysteme 118
- Airpad 215
- Aktivierung 103, 122
- aliphatische Amine 21
- Alterung 18
- Anhydrid 21
- Anisotropie 6
- Aquacore 214
- Aramidfaser 17
- aromatische Amine 21
- Aspektverhältnis 3

ATL

- Ablagekopf 107
- Ablegetechnologie 109
- Definition 96
- Funktionsprinzip 99
- Maschinenarchitektur 105
- Maschinenkonfiguration 105
- Technologie 102
- Teilsysteme 102
- Atlas-Bindung 24
- Aufwickelstation 42
- Aushärte- und Formgebungsverfahren 66
- Aushärtewerkzeuge 211
- Autoklavhärtung 165
- Automatic-Fiber-Placement (AFP) 111
- Automatic-Tape-Laying (ATL) 96
- automatisierte Ablegeverfahren (ATL, AFP) 76
- automatisierter Zuschnitt 69

B

- Balken 93, 105, 126
- Batch-Verfahren 43
- Bauweisen-Konzept 235
- beidseitig geschlossenes
 - Aushärtewerkzeug 216
- Benzoxazinharz (BOX-Harz) 21
- Bismaleimidharze (BMI) 21
- Black-Metal 257
- BMI-Matrixharze 200
- Brandeigenschaften, Phenolharz, BOX-Harz 21

Bridging 123
 Brücke 93, 105, 125
 Bucheffekt 151

C

CAD-CAM-Kette 204
 Cantilever 93, 105, 126
 CFK-Schaum, Carbonschaum 195
 CFK-Tooling 205
 C-Holm 237
 closed mould 211
 CNC-Cutter 69
 Column 93, 105, 126
 Continuous-Mix-Verfahren 43
 Controlled-Flow-System, B-Stage 46
 Creel, Gatter 44
 Cured-Ply-Thickness (CPT) 57, 232
 Cuttermesser, Zuschnitt 71
 Cyanatesterharz 30

D

Dauerbetriebsfestigkeit 195
 Degradation 200
 Dicyandiamid (DICY) 21
 Diglycidylether (DGEBA) 20
 Dimensionsstabilität 200
 direkte Formherstellung 204
 Doppel-T-Stringer 236, 245
 Double-Diaphragma 149
 Drapierfähigkeit 88, 99, 114, 223
 Druckkalotte 236
 Druckstücksegmente 244
 Dry-Fiber-Placement (DFP) 30
 Duratool 195
 Duromere 3
 duromeres Harzsystem, Thermoset
 15
 Düsenauftrag 40

E

Eierkasten-Struktur, Unterkonstruktion
 196
 Eigensteifigkeit 87
 einseitig geschlossenes
 Aushärtewerkzeug 216
 Einwegmembran, Foliensack 211
 Elektronenstrahlhärtung 184
 Endkontur, Oberflächenfinish 204
 Epoxidharz 20
 Epoxy-Tooling-Block 195
 Exothermie 162

F

Fadenspannung 44
 Faltenwurf 151
 Faserflächengewicht 220
 Fasern 23
 Faserondulation 24
 Faserverbundmaterialien, Tooling 198
 Faservolumengehalt 229
 - FVC 57
 FAW 57
 Fertigungsmittel (FEMI) 191
 Fest-/Los-Lagerung 252
 Flachfasern 37
 flüchtige Bestandteile 223
 Flügelbeplankung 237
 Fördersystem
 - AFP-Technologie 120
 - ATL-Technologie 102
 Formoberfläche 204
 Formtreue 193
 Freischumpfen 196
 Führungssystem 102
 Füllmaterial 214

G

Galvano-Tooling 206
 Gantry 92, 105, 125
 Gatter 118
 Gelegebreite 152
 Gelpunkt 162

gesamte Ablagebreite 108, 128
 Gewebe-Prepreg 40
 – Unidirektional(UD)-Prepreg 15
 Gewebe, Textilien 24
 Glasfaser 23
 Glasübergangstemperatur 230
 glycidylierte Novolake 20

H

Hackling-Mechanismus 26
 Halbzeugklasse 18
 Handlaminiere, Hand-Layup 73
 Handlingseigenschaften, Toolings 193
 Härtekern 212, 244
 Hartkerntechnik 212
 hart/soft 216
 Härtungstechnologien
 – Autoklav 161
 – Out-of-Autoclave-Verfahren 161
 Härtungszeit 19
 Härtungszyklus 161
 Harzfilm 43
 Harzfluss 17, 221
 Harzgehalt ,16
 Harzviskosität 162
 Hautfeld 237
 Heißpressen 148
 Heizrampe 162
 HexTOOL 195
 HiTape, DFP 30
 Hochleistungsfaserverbundbauteile 13
 Hochtemperaturanwendung 30
 Hohlprofile 214
 Hot-Forming 148
 Hot-Form-Tooling 209
 Hot-Melt-Verfahren 40, 42
 Hybridbauweise 30

I

Imprägniereinheit 42
 Imprägnierung 87
 Imprägnierungsgrad 59, 227, 253
 indirekte Formherstellung 206

Induktionsverfahren 180
 Infusionstechnologie 15
 In-situ-Nachimprägnierung 253
 Integral/Differenzial-Bauweise 237
 Interleaf-Prepregs 26
 INVAR, Pernifer 195

K

Kalandriereinheit 42
 Kalibrierung 83
 Kamm- und Spreizstangen 45
 Kettfaden 24
 Klebrigkeit 85, 98, 113
 Kohlenstofffaser 23
 Kompaktierung 104, 123
 Konturfräsen 196
 Konturgenauigkeit 204
 Körperbindung 24
 Kühlung 120

L

Lagengleiten, interply slip 151
 Lagenkonfiguration 67
 lagerstabile Prepregs 18
 Lagerzeit 18
 Lamina 99
 Laminatporosität 163
 Laminier- und Klebevorrichtung (LKV)
 191
 Legebuchs 81
 Leinwand-Bindung 24
 Liniengeschwindigkeit 46
 Lösemittel-Verfahren 40, 47, 53
 – Tauchverfahren, Dip-Verfahren 40

M

manueller Zuschnitt 68
 Maschinenarchitektur 90
 Materialzuführung 119
 Matrixgehalt 57
 Matrixsysteme 18
 Matrixviskosität 151

- maximale Schneidgeschwindigkeit 122
 metallische Werkstoffe 195
 Mikrorissbildung 200
 Mikrowellenhärtung 182
 minimale ablegbare Länge 121
 Modulleitwerk 245
 monolithische Bauweise 238
 Multiaxiallegele, MAG, NCF 24
 Multitape 107
- N**
- Nachhärtung 19
 Nassdicke 253
 Negativform, Negativwerkzeug 193
 Nekuron 195
 Nesting, Verschachteln 72
 Neustartlänge 122
 Nickel-Galvano-Formen 207
 Nickel-Galvano-Tooling 198
 Nickelguss-Tooling 198
 Nickel-Stahl-Legierung 195
 Nomogramm 250
- O**
- Oberflächengüte 193
 Ofen-Härtung 169
 Offline-Programmierung 82
 Omega-Stringer 255
 Onlinezuschnitt 103
 open mould 211
 Open-Mould-Konzepte 240
 Organoblech 18
- P**
- Passhülse 252
 PAW 57
 Phenol-Formaldehyd-Harz 37
 Phenolharz 21
 ply book, Legeplan 73
 PMI-Hartschäume 255
 Polyadditionsreaktion 20
 Polyetheretherketon 18
 Polyetherimid 26
 Polyethersulfon 18
 Polypropylen 18
 Porenbetonstein, Ytong 195
 Porenbildung 256
 Portal 92, 105, 125
 Positivform 193
 – Positivwerkzeug 193
 Positiv-/Negativ-Bauweise 235
 Positiv-Werkzeug 199
 Post-Imprägnierzone 46
 Prä-Imprägnierungszone 44
 Prepreg 13
 – AFP 112
 – ATL 98
 – automatisierte Ablegeverfahren 84
 Prepreg-Flächengewicht 220
 Prepreg-Generationen 26
 Prepreg-Herstellverfahren 42
 Prepreg-Linie 42
 Prepreg-Systeme 13, 26
 Prepreg-Technologie, Prepreg-Verarbeitung 37
 Prepreg-Typen 17
 Prepreg-Varianten 55
 Presstechnologie 148
 Pressure-Strips 255
 Pressverfahren 171
 PRISM TX1100, DFP 30
 productivity
 – Floor-to-Floor 131
 Produktivität 130
 – flächige Ablegeleistung 134
 – Massenproduktivität 135
 – mittlere netto Ablegegeschwindigkeit (ALV) 133
 Profile 147
 Prozesssimulation 82
 Pultrusion 144
 Pulverbeschichtung 40
 Pulver-Verfahren 50, 52

Q

Quadraxialgelege 24
quasiisotrop 250
quasiisotroper Aufbau 199
Quersteife 237
Quickstep™-Technologie 170

R

Rakeltechnik 40
Reinigung 217
Robot 94, 106, 126
Rollenbreite 15
Rollengewicht 16
Rollenlänge 15
Rollmesser 46
Rotorblatt 30

S

Sackzuschnitt 70
Sandwichbauweise 238
Säule 93, 105, 126
Schlagzähigkeit 18
Schlitzblechmaske 244
Schneidesystem 102
– AFP-Technologie 121
Schneidetisch, cutting 70
Schneidschablone, Zuschnitt 68
Schneidstation 42
Schneidunterlage 70
Schnittbreitentoleranz 55
Schnittkantentest 227
Schnittqualität 86, 114
Schussfaden 24
Setzweg 253
Sickenhandloch 155
Single-Diaphragma 149
Single-Diaphragmatechnik 210
Single-Tape 107
Slit-Tape 55
slitting 86, 114
soft/hart 216
soft/soft 216
Solvent-Verfahren 47

spezifische Steifigkeit 6
Spulengatter 42
SQRTM 155
Steering 88, 99, 114
Stringer 237

T

Tack 61, 85, 222
– Klebrigkeit 45
tacky tape, Kitband 211
Tapebreite 89, 99, 107
Tapevorbereitung 103
Teil-Imprägnierung, Nassdicke 253
Textilien 23
thermische Ausdehnung 251
thermische Spannungen 199
thermisches Verhalten, Toolings 193
Thermoplaste 3, 15
thermoplastisches Halbzeug 18
Thermoset-Prepreg 39
Tischportal 94, 106, 126
Tooling
– Herstellung 204
– Konturen 194
– Konzepte 209
– Materialien 194
– Technologie 191
– Werkstoffe 195
Toolmaster BetaPreg 195
Topfzeit 162
Tow-Breite 114, 127
Tow-Preg 55, 56
Trägerfolien 90
Trägerpapier 45, 98
Trennfolie 90, 113
Trennmittel 217

U

Ultraschallcutter 69
unidirektionalen Prepregs 38
– UD-Prepreg 38
Unidirektional(UD)-Prepreg,
Gewebe-Prepreg 15
Urmmodell 206

V

Vakuumdichtigkeit 200
Vakuumsack-Aufbau 164
Verarbeitungstechnologie 65
Verbundwerkstoffe 3
Vernetzung, Härtung 19
Verschachtelung, Nesting, Zuschnitt 72
Verschlaufung 2
Verschnitt 114
Verstärkungsfaser, Fasern 24
Viskosität 224
Vliese und Wirrfasermatten 40
Vorkompaktierung 254

W

Wärmeausdehnungskoeffizienten 195
– CTE 193
Wasseraufnahme 226
Water-Pickup 60
Water-Pickup-Test 226
Webstil, Textilien 24
Wechselwirkungen 246
Weichkerntechnik 212
Werkstoffe 1
Werkzeuge, Toolings 191
Windenergieanlage 30
Wirtschaftlichkeit 130, 135

Z

Zähigkeitsmodifizier, Toughener 26
„zero-bleed“-Prepreg 17, 57
Zuschnitt von Prepreg, cutting 68
Zwickelfüller 147