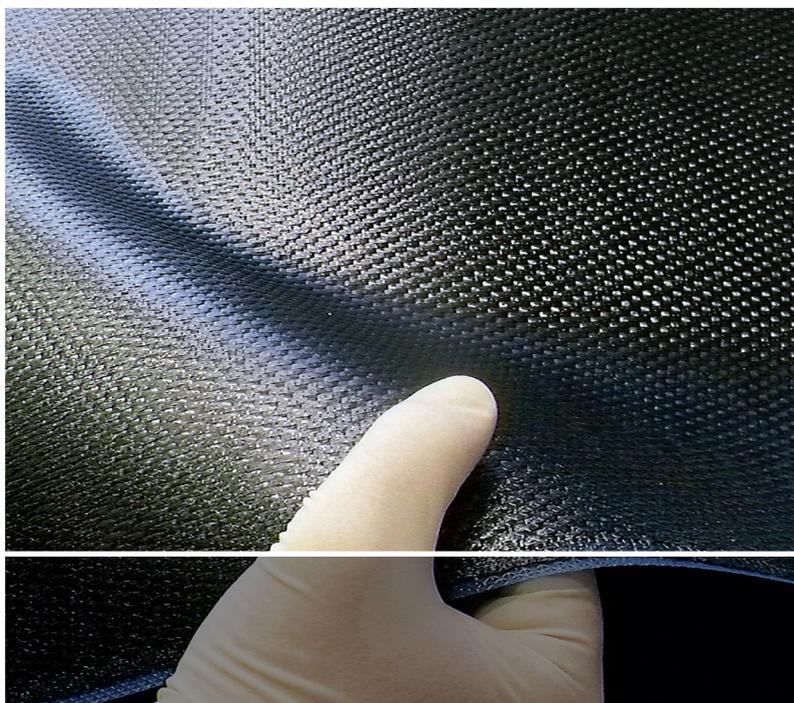


Hauke Lengsfeld • Felipe Wolff-Fabris  
Johannes Krämer • Javier Lacalle • Volker Altstädt

# Faserverbund- werkstoffe

Prepregs und ihre Verarbeitung



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](http://www.hanser-fachbuch.de/newsletter)**

## **Die Internet-Plattform für Entscheider!**

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

***Kunststoffe.DE***

Immer einen Click voraus!

Hauke Lengsfeld  
Felipe Wolff-Fabris  
Johannes Krämer  
Javier Lacalle  
Volker Altstädt

# **Faserverbundwerkstoffe**

Prepregs und ihre Verarbeitung

HANSER

Die Autoren:

*Hauke Lengsfeld*, Hexcel Composites GmbH, Stade

*Felipe Wolff-Fabris*, SKZ - Das Kunststoff-Zentrum/Europäisches Zentrum für Dispersionstechnologie (EZD), Selb

*Johannes Krämer*, BASF SE, Ludwigshafen

*Javier Lacalle*, M. Torres Deutschland GmbH, Stade

*Volker Altstädt*, Universität Bayreuth, Lehrstuhl für Polymere Werkstoffe

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.

Print-ISBN: 978-3-446-43300-7

E-Book-ISBN: 978-3-446-44080-7

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.

© 2015 Carl Hanser Verlag München

Herstellung: Jörg Strohbach

Coverbild: Thomas Neumeyer und Edin Njuhovic

Coverconcept: Marc Müller-Bremer, [www.rebranding.de](http://www.rebranding.de), München

Coverrealisierung: Stephan Rönigk

Satz: Manuela Treindl, Fürth

Druck und Bindung: Kösel, Krugzell

Printed in Germany

# Vorwort

Obwohl schon lange totgesagt, werden Prepregs in allen Segmenten der Composites-Industrie immer beliebter, wegen ihrer Vielseitigkeit, dem hohen Faservolumenanteil und dem großen Angebot an Faser-Matrix Kombinationen. Seit den frühen 70er-Jahren bis heute, werden CFK-Strukturbauteile weitgehend mittels Prepreg-Technologie hergestellt. Es ist daher für die Autoren an der Zeit, in diesem Buch über die Perspektiven und Trends aktuell zu berichten.

Duomere-Prepregs werden hergestellt, indem man Verstärkungsfasern oder Textilien mit speziell formulierten, vorkatalysierten Harzsystemen unter Verwendung einer Maschinen-technik 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-Imprägnier-techniken herzustellen. Mit einem flexiblen Trägerpapier bedeckt, sind Prepregs leicht handhabbar und bleiben für eine bestimmte Zeitdauer (Lagerfähigkeit) bei Raumtemperatur biegsam.

Weltweit ist der Markt für Prepregs seit 2012 um circa 10 % gewachsen und hat sich somit im Zeitraum von 2002 bis 2007 verdoppelt (laut: Lucintel's Global Prepreg Market 2008–2013: 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. 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 Kapitel 5 und 6 werden die Härtung der Preform zu einem Bauteil im Autoklav, im Ofen, mit der Quick-Step-Technologie unter anderem 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.

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 2014

*Volker Altstädt*

# Danksagung

Wir bedanken uns bei allen, die uns bei der Erstellung des 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 Hans Marquardt und Dr. Wolfgang Nemetz, Airbus Operations GmbH, Dr. Hilmar Apmann, Premium Aerotec GmbH, Michaela Kersch und Thomas Neumeyer, Universität Bayreuth, für die sachdienlichen Hinweise, Diskussionen und Bildmaterial sowie Mike Turner für die Geschichte der Prepreg-Entwicklung in England.

Ein besonderer Dank gilt den Firmen M. Torres und Hexcel Composites, die wesentliche Teile des Bildmaterials zur Verfügung gestellt haben.

Danke sagen wollen wir auch unseren Familien für ihre Geduld.



# Inhaltsverzeichnis

Vorwort.....	V
Danksagung .....	VII
Abkürzungsverzeichnis und wichtige Begriffe.....	XIII
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
<i>Felipe Wolff-Fabris</i>	
1.1 Werkstoffe .....	1
1.2 Endlosfaserverstärkte Polymere .....	4
1.2.1 Eigenschaftsprofil.....	4
1.2.2 Herstellung.....	6
1.2.3 Anwendungsgebiete.....	8
Literatur .....	9
<b>2 Prepregs und deren Ausgangsmaterialien .....</b>	<b>11</b>
<i>Felipe Wolff-Fabris, Hauke Lengsfeld, Johannes Krämer</i>	
2.1 Aufbau und Bereitstellung.....	13
2.2 Matrixsysteme .....	15
2.3 Fasern und Textilien .....	18
2.4 Prepreg-Systeme.....	20
Literatur .....	24
<b>3 Prepreg-Technologie.....</b>	<b>27</b>
<i>Hauke Lengsfeld, Mike Turner</i>	
3.1 Entwicklungsgeschichte.....	27
3.2 Einleitung: Herstellungsmethoden .....	29
3.2.1 Aufbau einer Prepreg-Anlage .....	31
3.2.2 Prepreg-Herstellverfahren .....	31
3.2.2.1 Hot-Melt-Verfahren.....	32
3.2.2.2 Lösemittel-Verfahren .....	37

3.2.3	Prepreg-Varianten .....	39
3.2.3.1	Slit-Tape.....	39
3.2.3.2	Tow-Preg .....	40
3.2.4	Einfluss von Herstellungsparametern .....	40
3.2.4.1	Harzgehalt .....	41
3.2.4.2	Imprägnierungsgrad .....	42
3.2.4.3	Tack .....	44
	Literatur .....	46
4	Prepregs: Verarbeitungstechnologie .....	47
	<i>Hauke Lengsfeld, Javier Lacalle</i>	
4.1	Einleitung.....	47
4.2	Zuschneiden von Prepregs (engl.: cutting).....	50
4.2.1	Manueller Zuschnitt .....	50
4.2.2	Automatisierter Zuschnitt .....	51
4.3	Handlaminieren von Prepregs (Hand-Layup) .....	55
4.4	Automatisierte Ablegeverfahren: ATL und AFP .....	58
4.4.1	Einleitung.....	58
4.4.1.1	Ziel der automatisierten Ablegeverfahren .....	60
4.4.1.2	Abläufe der automatisierten Ablegeverfahren.....	61
4.4.1.3	Prepregs für automatisierte Ablegeverfahren .....	65
4.4.1.4	Maschinenarchitektur.....	69
4.4.2	Automatic Tape Laying (ATL) .....	72
4.4.2.1	Einführung .....	72
4.4.2.2	Prepreg-Materialien für ATL.....	73
4.4.2.3	Funktionsprinzip des ATL-Verfahrens.....	74
4.4.2.4	ATL-Technologie und wichtige Teilsysteme .....	77
4.4.2.5	Auswahl der Maschinenkonfiguration für ATL-Verfahren.....	79
4.4.2.5.1	Maschinenarchitektur für ATL-Verfahren.....	79
4.4.2.5.2	Konfiguration des ATL-Ablagekopfes .....	81
4.4.3	Automatic Fiber Placement (AFP) .....	84
4.4.3.1	Einführung .....	84
4.4.3.2	Prepreg-Materialien für AFP.....	85
4.4.3.3	Funktionsprinzip des AFP-Verfahrens.....	87
4.4.3.4	AFP-Technologie und wichtige Teilsysteme .....	88
4.4.3.4.1	Maschinenarchitektur für AFP-Verfahren.....	93
4.4.3.4.2	Konfiguration des AFP-Ablagekopfes .....	94
4.4.4	Produktivität und Wirtschaftlichkeit der Ablegeverfahren .....	97
4.4.4.1	Ablegeproduktivität.....	97
4.4.4.2	Wirtschaftlichkeit der automatisierten Ablegeprozesse.....	100
4.5	Pultrusion.....	102

4.6	Hot Forming.....	106
4.7	Same-Qualified-Resin-Transfer-Moulding-Verfahren (SQRTM).....	112
	Literatur .....	114
5	Härtungstechnologien.....	117
	<i>Felipe Wolff-Fabris</i>	
5.1	Grundlagen des Härtingszyklus.....	117
5.2	Autoklavhärtung.....	121
5.3	Härtung im Ofen.....	124
5.4	Quickstep™-Technologie .....	125
5.5	Pressverfahren .....	127
5.6	Induktionsverfahren.....	128
5.7	Mikrowellenhärtung.....	129
5.8	Elektronenstrahlhärtung.....	132
	Literatur .....	136
6	Tooling-Technologie .....	137
	<i>Hauke Lengsfeld, Hilmar Apmann</i>	
6.1	Anforderungen .....	138
6.2	Tooling-Materialien .....	140
6.2.1	Metallische Werkstoffe .....	141
6.2.2	Faserverbundmaterialien GFK/CFK.....	144
6.2.3	Andere Materialien .....	147
6.3	Tooling-Herstellung.....	149
6.3.1	Direkte Formherstellung .....	149
6.3.2	Indirekte Formherstellung.....	150
6.4	Tooling-Konzepte und Beispiele.....	153
6.4.1	Hot-Form-Toolings .....	153
6.4.2	Aushärtewerkzeuge.....	155
6.4.2.1	Einseitig geschlossene Aushärtewerkzeuge.....	159
6.4.2.2	Beidseitig geschlossene Aushärtewerkzeuge.....	160
6.4.3	Trennmittel und Reinigung.....	161
	Literatur .....	161
7	Prüfung von Prepregs .....	163
	<i>Johannes Krämer</i>	
7.1	Charakterisierung des nicht gehärteten Prepregs.....	164
7.1.1	Prepreg-Flächengewicht, Harzgehalt und Faserflächengewicht .....	164
7.1.2	Prozentualer Harzfluss.....	164
7.1.3	Tack .....	166

7.1.4	Drapierbarkeit.....	167
7.1.5	Flüchtige Bestandteile – Volatiles .....	167
7.1.6	Viskosität .....	168
7.1.7	Water-Pickup-Test (WPU-Test) .....	170
7.1.8	Mikroskopie Schnitkantentest.....	171
7.2	Charakterisierung des gehärteten Prepregs .....	171
7.2.1	Faservolumengehalt.....	171
7.2.2	Messung der Glasübergangstemperatur .....	173
7.2.3	Cured Ply Thickness (CPT) .....	175
	Literatur .....	175
8	Design und Produktion .....	177
	<i>Hauke Lengsfeld</i>	
8.1	Bauweisen-Konzepte .....	177
8.1.1	Positiv/Negativ-Bauweise.....	177
8.1.1	Integral/Differenzial-Bauweise.....	179
8.1.2	Open-Mould-Konzepte.....	182
8.2	Einflussgrößen und Wechselwirkungen .....	187
8.2.1	Einflussgrößen bei der Bauteilherstellung .....	187
8.2.2	Wechselwirkungen bei der Bauteilherstellung .....	189
	Literatur .....	199
9	Fazit der Autoren.....	201
	Die Autoren .....	203
	Index .....	205

# Abkürzungsverzeichnis und wichtige Begriffe

Ablegen	sequenzielles Aufbringen flachförmiger Halbzeuge in einzelnen Lagen
AFP	automated fiber placement, automatisches Tow-Legen
Aktivierung	Erhitzung 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
CNC	computerized numerical control
CPT	cured ply thickness, Dicke einer ausgehärteten Einzellage
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
FVC	fiber volume content, Faservolumengehalt
FVG	Faservolumengehalt
FVK	Faserverbundkunststoffe
FVW	Faserverbundwerkstoff
GFK	glasfaserverstärkter Kunststoff
HM	high modulus
HMI	human machine interface
HS	high strength

HT-Faser	high tensile Faser
IM	intermediate modulus
IM-Faser	intermediate modulus Faser
LKV	Laminier- und Klebevorrichtung
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
PE	Polyethylen
PEI	Polyetherimid
PEEK	Polyetheretherketon
PES	Polyethersulfon
PP	Polypropylen
Prepreg	<b>preimpregnated</b> 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 (Umsetzungsgrad $\alpha$ )
Steering	Drapierung in der Ebene
Tack	Klebrigkeit, Anhaftung
TCP	tool center point
TGMDA	Tetraglycidylmethylen-diamin
Tow	Bündel von Kohlenstofffaser-Filamenten
UD	unidirektional
UP	ungesättigte Polyesterharze
VC	volatile content
WPU	water pickup