

# Faserverbundwerkstoffe

Prepregs und ihre Verarbeitung

Bearbeitet von

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

1. Auflage 2014. Buch. ca. 223 S.

ISBN 978 3 446 43300 7

Format (B x L): 17,2 x 24,5 cm

Gewicht: 541 g

[Weitere Fachgebiete > Technik > Werkstoffkunde, Mechanische Technologie > Materialwissenschaft: Verbundwerkstoffe](#)

schnell und portofrei erhältlich bei

  
DIE FACHBUCHHANDLUNG

Die Online-Fachbuchhandlung [beck-shop.de](http://beck-shop.de) ist spezialisiert auf Fachbücher, insbesondere Recht, Steuern und Wirtschaft. Im Sortiment finden Sie alle Medien (Bücher, Zeitschriften, CDs, eBooks, etc.) aller Verlage. Ergänzt wird das Programm durch Services wie Neuerscheinungsdienst oder Zusammenstellungen von Büchern zu Sonderpreisen. Der Shop führt mehr als 8 Millionen Produkte.



Leseprobe

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

Faserverbundwerkstoffe

Prepregs und ihre Verarbeitung

ISBN (Buch): 978-3-446-43300-7

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

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-43300-7>

sowie im Buchhandel.

# 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

# 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

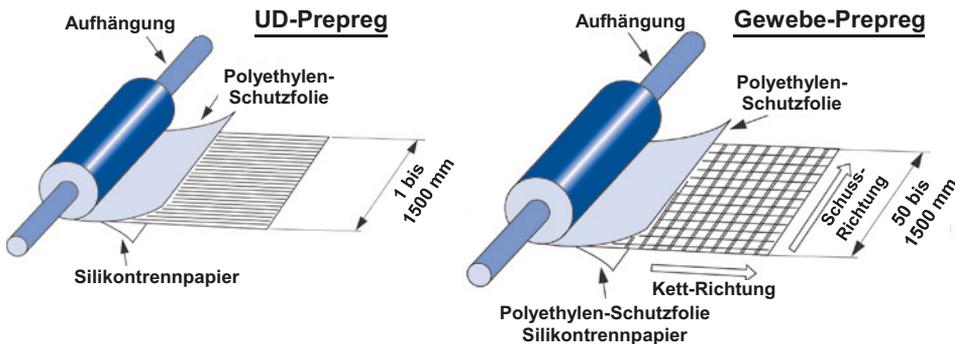
*Volker Altstädt*

Adaption von Webstühlen für Seide erreicht; diese Maschinen waren ursprünglich für die Herstellung von Seidengewändern für Adlige im Einsatz.

Die Form heutiger Prepreg-Materialien entwickelte sich mit den umgebenden Technologien in den vergangenen 50 Jahren weiter. So ist die Auswahl an Carbonfaser-Materialien heute erheblich größer durch das Hinzukommen von IM- und HS-Fasern. Zusätzlich wird seit einigen Jahren in zahlreichen Forschungs- und Entwicklungsprojekten die Verwendung von Naturfasern wie Flachs als Verstärkungsmaterial wieder vorangetrieben. Insgesamt hat sich die Carbonfaser-herstellende und -verarbeitende Industrie innerhalb einer relativ kurzen Zeitspanne zu einer hoch entwickelten Technologie weiterentwickelt. Von wenigen ausgewählten Materialien und Faserverbundbauteilen ausgehend, die in arbeitsintensiven manuellen Prozessen hergestellt wurden, handelt es sich nun um unterschiedliche Industriezweige, wie z. B. Luftfahrt, Raumfahrt, Automotive, leichte und steife Hochleistungsverbundbauteile, die nicht mehr ohne die heutigen modernen Prepreg-Materialien und automatisierten Prozesse vorstellbar sind.

## ■ 3.2 Einleitung: Herstellungsmethoden

Prepregs als Halbzeuge aus vorimprägnierten Fasern (Bild 3.1) sind ein wesentlicher Grundstein für qualitativ hochwertige und belastungsoptimal ausgelegte Faserverbundleichtbauteile. Aufgrund der heutigen Herstellverfahren und Prozessabläufe kann eine gleichbleibende Qualität der Prepregs z. B. beim FAW und Harzgehalt auf einem sehr hohen Niveau gewährleistet werden. Dies vereinfacht dem Anwender zum einen die Verarbeitung deutlich, und ermöglicht zum anderen die reproduzierbare Herstellung qualitativ hochwertiger Bauteile.



**Bild 3.1** Aufmachung von UD-Prepreg (links) und Gewebe-Prepreg (rechts) auf Rolle  
[Bildquelle: © Hexcel Corporation]

Prepregs bestehen immer aus einer Kombination einer meist hochviskosen Matrix und einem Faserflächengebilde als Verstärkungsmaterial. Sobald ein Verstärkungsmaterial mit einer Matrix getränkt wurde, spricht man typischerweise von einem Prepreg. Als Matrix können sowohl Thermoplaste wie auch Reaktionsharzsysteme, sogenannte Thermosets, verwendet werden (siehe auch Kapitel 2) [2]. Im Folgenden wird auf die Herstellung von Thermoset-Prepregs eingegangen.

Fasern als Substrat kommen in verschiedenster Aufmachung vor, z. B. als:

- uni-, bi- und multidirektionale Fasergebilde
- Gewebe
- Vliese und Wirrfasermatten

Je nach Substratstruktur muss die Verarbeitung, z. B. als Roving, über ein Fadengatter (Kamm) oder als Flächengebilde über eine Rollenabwicklung erfolgen.

Zur Herstellung von Prepregs stehen heutzutage eine Reihe unterschiedlicher Methoden und Maschinenkonzepte für Beschichtungsanlagen zur Verfügung, um verschiedene Fasermaterialien mit einer großen Bandbreite an Matrixharzen kombinieren zu können. Stand der Technik sind heute u. a. folgende Verfahren:

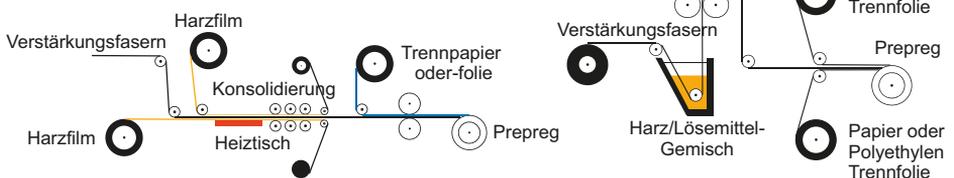
- Lösemittel-Verfahren (Tauch-Verfahren oder Dipping-Prozess, Bild 3.2)
- Hot-Melt-Verfahren (Bild 3.2)
- Beschichtung mittels Rakeltechnik (engl.: knife system)
- Pulverbeschichtung (engl.: powder scattering)
- Düsenauftrag (engl.: slot die system)

Verfahren wie z. B. die Pulverbeschichtung, ursprünglich für thermoplastische Matrices entwickelt, wurden angepasst auf die Verarbeitung von Thermosets, allerdings ist die Verbreitung für die Serienanwendung eher gering. Die beiden heute wesentlichen Imprägnierverfahren sind das Lösemittel- bzw. Hot-Melt-Verfahren [2].

### Schritt 1 – Filmherstellung



### Schritt 2 – Filmtransfer



**Bild 3.2** Herstellungsverfahren; links: Hot-Melt-Verfahren, rechts: Lösemittel-Verfahren

# 4

## Prepregs: Verarbeitungstechnologie

*Hauke Lengsfeld, Javier Lacalle*

### ■ 4.1 Einleitung

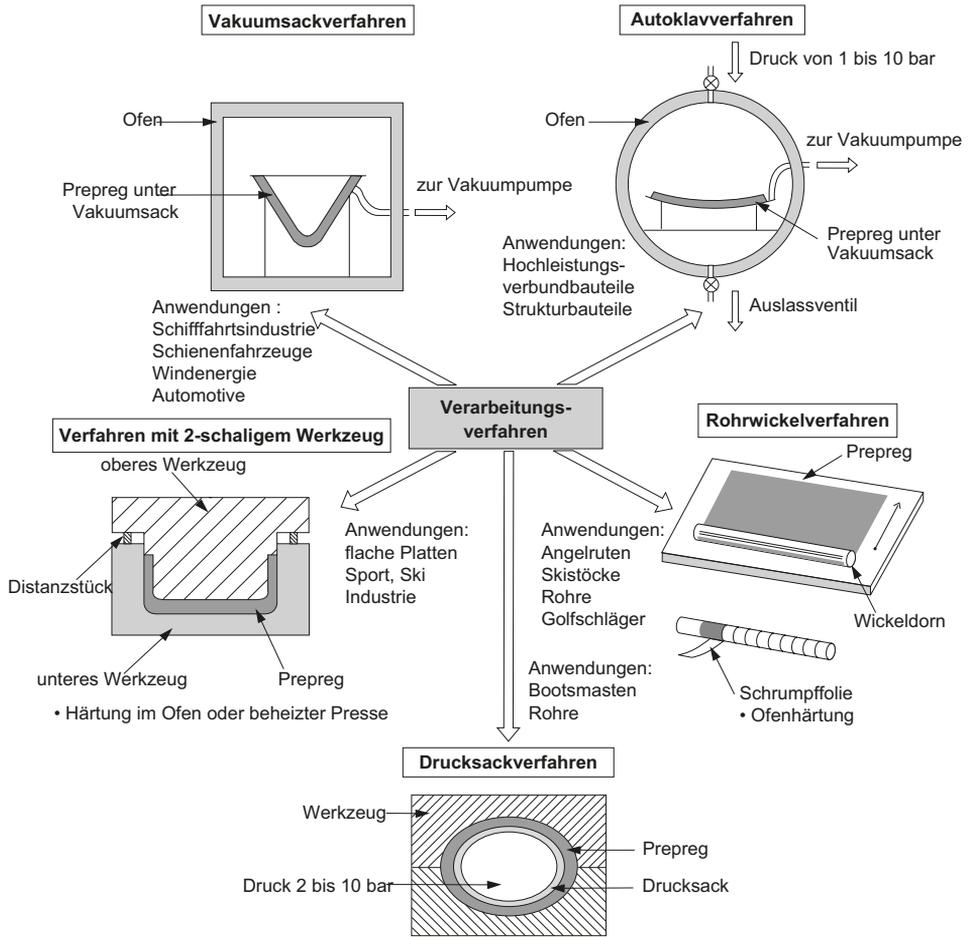
In diesem Kapitel sollen verschiedene Technologien zur Verarbeitung von Prepregs und der Verarbeitungsschritt vom Prepreg-Halbzeug zum Prepreg-Bauteil vorgestellt werden. Dazu werden manuelle und automatisierte Ablegeverfahren sowie Techniken zum Zuschneiden und Umformen von Prepreg-Materialien vorgestellt.

Die Vorteile der Faserverbundwerkstoffe (FVW) liegen darin, dass die Faserverstärkung gezielt auf einem Bauteil platziert werden kann, um so ein optimales Verhältnis der mechanischen Eigenschaften zum Gewicht zu erreichen.

Daher sind Herstellungsverfahren mittels Prepregs besonders effizient, da so die höchste Qualität und genaueste Platzierung der Faser im Bauteil erzielt wird. Dabei wird nicht nur eine hervorragende Bauteilqualität, sondern auch ein optimales Faservolumengehalt erreicht, da die Mengen Harz und Fasern im Prepreg-Halbzeug bereits genau aufeinander abgestimmt sind. Die Ablage der Lagenstruktur kann manuell oder mittels automatisierten Verfahren erfolgen.

Bei der Herstellung von Verbundwerkstoffbauteilen werden im Allgemeinen unter Laminier- oder Ablegeverfahren die Prozesse gekennzeichnet, in denen flachförmiges Halbzeug (z. B. Prepreg) lagenweise in einer bestimmten Sequenz, mit definierter Richtung und Kontur, auf einer Vorrichtung aufgebracht wird.

Die heute zur Verfügung stehenden Verfahren sind sehr vielfältig und zahlreich. Um einen besseren Überblick zu erhalten, können zwei unterschiedliche Betrachtungsweisen vorgenommen werden. Zunächst können die Verarbeitungsverfahren über den zur Formgebung und Aushärtung aufgebrachten Druck betrachtet werden. Daraus ergibt sich das in Bild 4.1 dargestellte Schema, das die gängigsten Verfahren zeigt:



**Bild 4.1** Aushärte- und Formgebungsverfahren für Prepregs  
[Bildquelle: © Hexcel Corporation]

Die andere Betrachtungsweise geht von den Ablege- und Bearbeitungstechnologien aus, mit denen Prepregs verarbeitet werden können (Bild 4.2). Diese Betrachtung bezieht dabei auch den übergeordneten Ablauf zur Herstellung eines Faserverbundbauteils mit ein und liefert eine differenzierte Unterteilung in die unterschiedlichen Techniken. Während die Einteilung über den aufgetragenen Druck wie in Bild 4.1 auch die Aushärtung vielfach miteinbezieht, wird die Aushärtung des Bauteils in Bild 4.2 von den Ablege- und Bearbeitungstechniken bewusst getrennt und als letzter Schritt durchgeführt und bezieht damit die in Bild 4.1 gezeigten Druck-Verfahren mit ein.

## ■ 4.4 Automatisierte Ablegeverfahren: ATL und AFP

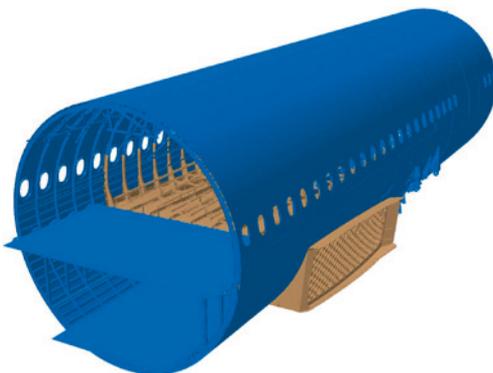
### 4.4.1 Einleitung

Das automatisierte Ablegen von vorimprägnierten Fasermaterialien ist heute die Schlüsseltechnologie zur Herstellung von großen Composite-Bauteilen in der Luft- und Raumfahrt. Automatisches Tapelegen wird seit vielen Jahren häufig in Verbindung mit anderen Technologien, wie z. B. Hot-Forming, verwendet – zur Produktion von Seitenleitwerkspanels, Flügelstrukturen, Rippen und Holmen. Aufgrund der zunehmenden Verwendung von Composite-Bauteilen sowohl in der Luftfahrt wie auch in der Automobilindustrie bei gleichzeitiger Zunahme der geometrischen Komplexität der Bauteile steigt auch der Einsatz und die Erforschung von automatisierten und hocheffizienten Ablegeprozessen weiter an. In Bild 4.16 und Bild 4.17 erkennt man sowohl die geometrische Komplexität wie auch die Größe der Composite-Bauteile.

Der Einsatz von automatischen Tapelegern (ATL) und Fiber-Placement-Anlagen (AFP) bietet bei der Verarbeitung von UD-Tapes gegenüber dem manuellen Laminieren erhebliche Qualitäts- und Produktivitätsvorteile:

- Lagenpositionierung und Wiederholgenauigkeit
- Ablegegeschwindigkeit
- gleichmäßiges und luftblasenfreies Vorkompaktieren etc.

Das maschinelle Ablegen mittels ATL und AFP ist im Bereich der Luftfahrtindustrie als Hauptabnehmer von Prepregs zur Herstellung von großen Bauteilen bzw. von Vorgelegen ein weitverbreiteter Standard. Beide Ablegeverfahren applizieren mit



**Bild 4.16** CFK-Rumpfstrukturen [Bildquelle: Airbus Operations GmbH]

Harz vorimprägnierte Endlosfasern auf einer Formoberfläche. Dennoch haben sowohl das AFP- als auch das ATL-Verfahren spezielle Merkmale, aufgrund dessen sie für unterschiedliche Zwecke optimal angewandt werden. Hauptkriterien sind die spezifische Bauteilgeometrie sowie die Herstellungsanforderungen wie beispielsweise:

- Bauteilkrümmung
- Höhe und Steigung der Rampen
- Materialdrapierung
- positive oder negative Ablegevorrichtung etc.

Bei geometrisch einfachen Konturen, wie z. B. bei Flügelschalen, Flügelbeplankungen, Panelen für Seiten- und Höhenleitwerke oder Flachholme, wird zumeist die ATL-Technologie eingesetzt. Bei Geometrien mit teilweise doppelt gekrümmtem Verlauf und variablen Laminatdicken, wie Stringern, Rumpfpanseln etc., eignet sich die AFP-Technologie aufgrund der größeren Flexibilität gegenüber der ATL-Technologie.

Eine Vielzahl an Bauteiltypen kann anhand automatisierter Verfahren abgelegt werden. Das Bauteilspektrum dieser Technologien erweitert sich ebenfalls aufgrund der ständigen Weiterentwicklung der Ablegeverfahren. Zu den Standardbauteiltypen für die ATL- und AFP-Technologie gehören unter anderem:

- *Panels und Schalen*: 2-D-Panels und Lamine sowie doppeltgekrümmte Rumpfpanseln, Tragflächen, Schalen für Seiten- und Höhenleitwerke etc.
- *Geschlossene Bauteile*: Rumpfssegmente, Heckkonus (engl.: tail cone) etc.
- Holme, Spante, Stringer etc.

Man erkennt, dass die Herstellprozesse einer Vielzahl unterschiedlicher Bauteile und deren Anforderungen gerecht werden müssen. Daher besteht die wesentliche Herausforderung darin, Anlagen- und Ablegetechnologien zu entwickeln bzw. zu installieren, die jede der unterschiedlichen Geometrie- und Prozess-Herausforderungen im Bereich monolithischer Strukturen und Sandwich-Bauteile-Geometrien legetechnisch abbilden können.

Aufgrund der notwendigen hohen mechanischen Eigenschaftsniveaus in der Luft- und Raumfahrt muss das verwendete Prepreg-Material mit hoher, reproduzierbarer Genauigkeit abgelegt werden. Die gesamte volumetrische Positionierungs- und Konturgenauigkeit liegen in der Regel unter  $\pm 2,5$  mm im gesamten Arbeitsbereich. Im Fall eines Rumpfssegmentes oder einer Tragflächenschale kann dieser bis 40 m Länge und 7 m breite betragen (Bild 4.17).

Die automatisierte Legetechnologie erlaubt gegenüber dem Hand-Layup wesentlich engere Toleranzen bzgl. Positionierung, Spalten und Überlappungen zwischen nebeneinander abgelegten Bahnen, was in einer höheren Bauteilbelastbarkeit resultiert. Gleichzeitig gilt es den Erwartungen an die Produktivität von automatischen Ablegetechnologien, je nach Bauteiltyp und -größe, gerecht zu werden.

Um porenfreie Bauteile und damit eine gute Laminatqualität zu erzielen, ist es wichtig, dass das Tooling dauerhaft vakuumdicht ist. Da zur Aushärtung von Prepregs im Autoklaven unter hohem Druck (7 bis 10 bar) gearbeitet wird (Aufbau eines Differenzdruckes, siehe Kapitel 5), darf der Autoklavendruck nicht in den Vakuumsack eindringen. Die innere Porenfreiheit des Laminates geht meist auch mit einer hohen Oberflächengüte des fertigen Bauteils auf der Formwerkzeugseite einher. Letzteres hilft, zeitintensive Nacharbeiten wie z. B. Schleifen und Spachteln der Oberfläche zu vermeiden. Somit beeinflusst die Qualität des Toolings auch dessen Wirtschaftlichkeit bei der Herstellung von Composite-Bauteilen.

Weitere wichtige Anforderungen sind Handhabungseigenschaften von Toolings. Dazu gehören z. B. gutes Entformungs- und Reinigungsverhalten, Reparaturmöglichkeiten in der Oberfläche, geringes Eigengewicht. Diese Parameter beeinflussen sich teilweise auch wechselseitig. Je einfacher das Bauteil entformt und die Tooling-Oberfläche gereinigt werden kann, desto weniger verschleißt diese und macht damit Reparaturen fast unnötig. Ein geringes Eigengewicht trägt nicht nur zu einer schnelleren Aushärtung bei, sondern reduziert auch die Kosten in der täglichen Handhabung des Toolings, z. B. Bewegen per Kran, Schienensystem oder einfachem Rollwagen. Der Bau eines Kransystems zur Handhabung erzeugt in der Regel wesentlich höhere Kosten als z. B. die Verwendung eines Schienensystems.

Zusätzliche wirtschaftliche Aspekte sind die Herstellkosten und Lebensdauer eines Toolings, die durch den Werkstoff selbst, dessen Verfügbarkeit und Dauerhaftigkeit beeinflusst werden. Insbesondere bei hoher zyklischer Temperatur- und Druckbelastung, wie sie in Autoklavprozessen auftreten, gilt es, die Dauerhaftigkeit des ausgewählten Werkstoffes zu berücksichtigen, um einen vorzeitigen hohen Verschleiß zu vermeiden.

## ■ 6.2 Tooling-Materialien

Zur Herstellung von Toolings für die Formgebung und Aushärtung von Prepreg-Materialien stehen eine Reihe unterschiedlicher Werkstoffe zur Verfügung, die sich je nach Einsatzgebiet gegebenenfalls auch miteinander kombinieren lassen.

Die Tabelle 6.2 gibt einen Überblick über gängige Tooling-Werkstoffe, die im Folgenden weiter erläutert werden.

**Tabelle 6.2** Beispiele für Tooling-Werkstoffe

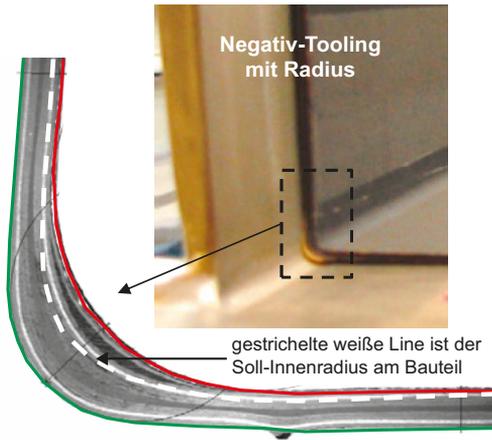
Werkstoff-Typ	Beschreibung	Type (Beispiele)
Metalle	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Stahl</li> <li>▪ Aluminium</li> <li>▪ Nickel-Stahl-Legierung (Ni36)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ S235 JR, S355 JR</li> <li>▪ ALMG 3/3.3535</li> <li>▪ INVAR36, Pernifer 1.39 12</li> </ul>
CFK (Epoxidharz)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Gewebe-Prepreg</li> <li>▪ quasiisotrope Prepreg-Matte</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Cycom<sup>®</sup>7620,</li> <li>▪ HexTOOL<sup>®</sup> M81</li> </ul>
CFK (BMI- oder BOX-Harz)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Gewebe-Prepreg</li> <li>▪ quasiisotrope Prepreg-Matte</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Duratool<sup>®</sup>5270</li> <li>▪ HexTOOL<sup>®</sup> M61</li> <li>▪ Toolmaster BetaPreg</li> </ul>
CFK-Schaum	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Carbonschaum</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Touchstone Cfoam<sup>®</sup>20</li> </ul>
GFK	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ trockenes Gewebe + Harz als Handlaminat oder per Infusion</li> </ul>	
weitere Materialien	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Holz</li> <li>▪ Epoxy-Tooling-Blöcke</li> <li>▪ Porenbetonsteine</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ OBO-Festholz, RETIstab</li> <li>▪ Nekuron, Rampf WB700,</li> <li>▪ OBO-Modulan, TB650 Serie</li> <li>▪ Ytong</li> </ul>

### 6.2.1 Metallische Werkstoffe

Metalle sind die einfachste und am häufigsten eingesetzte Werkstoffklasse für den Formenbau zur Verarbeitung von Prepregs. Dies liegt zum einen an der schnellen Verfügbarkeit wie auch an der sehr guten Bearbeitbarkeit von Metallen. Zum anderen zeichnen sich metallische Aushärtewerkzeuge aufgrund ihrer Robustheit durch eine hohe Dauerbetriebsfestigkeit aus, sodass diese problemlos für mehr als 1000 Zyklen genutzt werden können. Die Oberfläche der Werkzeuge sind gegenüber organischen Löse- und Trennmitteln völlig unempfindlich, und auch Beschädigungen, z. B. Kratzer oder Dellen, können in der Regel repariert werden.

Verwendung finden Metalle wie Stahl, Aluminium und Nickel-Eisen-Legierung, wobei Stahl und Aluminium aufgrund des Materialpreises und deren Dauerhaftigkeit am häufigsten eingesetzt werden. Beide Werkstoffe besitzen einen großen Wärmeausdehnungskoeffizienten (CTE) (Tabelle 6.4). Dieser muss bei der Konstruktion von Toolings insbesondere für hohe Aushärtetemperaturen berücksichtigt werden, um die Maßhaltigkeit des Toolings sicherstellen zu können. Je nach Anwendung und Tooling-Design kann eine Ausdehnung sogar erwünscht sein, um z. B. ein Freischrumpfen beim Abkühlen zu erreichen (Kapitel 8). Bei Raumtemperatur lassen sich mit Metallen Konturgenauigkeiten, selbst bei sehr großen Toolings (z. B. 20 × 5 m), von 0,3 bis 0,4 mm erreichen.

Nachteilig insbesondere beim Stahl ist das hohe Gewicht des Materials, was die Handhabung und den Wärmeübergang erschwert. Metallische Aushärtewerkzeuge werden in der Regel mithilfe von Konturfräsen und gegebenenfalls Vorformen, z. B.

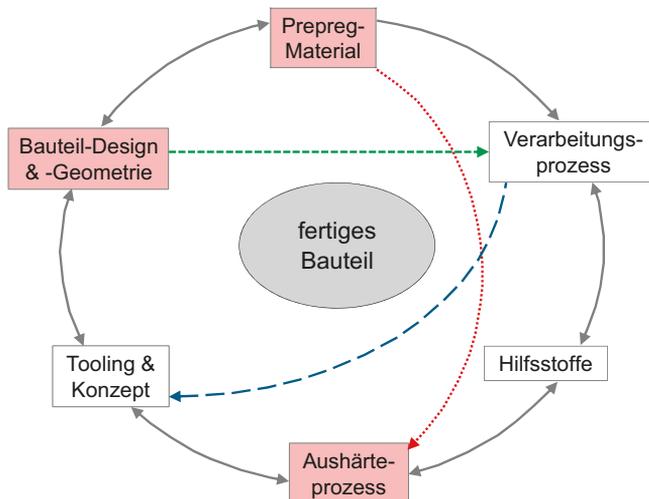
**Bild 8.30**

Schlichtbild Radiusbereich mit Abspanneffekt der inneren Lagen

mit anschließendem Hot-Forming zu einer Vorkompaktierung des Geleges beitragen, bevor der eigentlich Aushärteprozess beginnt. Eine weitere, jedoch nicht ganz unproblematische Maßnahme kann die Verwendung von Pressure-Strips (Gummi oder Silikoneckprofile) in den Radien darstellen. Mithilfe solcher Druckverstärker in Form von Rundschnüren kann der Autoklavendruck in diesem Bereich wirksam erhöht werden. Allerdings kommt es vielfach zu ungewollten zu tiefen Abdrücken im Laminat oder zur Wulstbildung im Randbereich der Pressure-Strips.

### Beschreibung von Wechselwirkungen am Beispiel einer Sandwichstruktur

Anhand einer Sandwichstruktur lassen sich der gegenseitige Einfluss von Bauteil-design, Material und Aushärteprozess und deren Auswirkung beschreiben.

**Bild 8.31** Einfluss von Design, Material und Aushärteprozess auf das Bauteil

**Bild 8.32**

Beispiel für Sandwichbauweise –  
Omega-Stringer mit Schaumkern

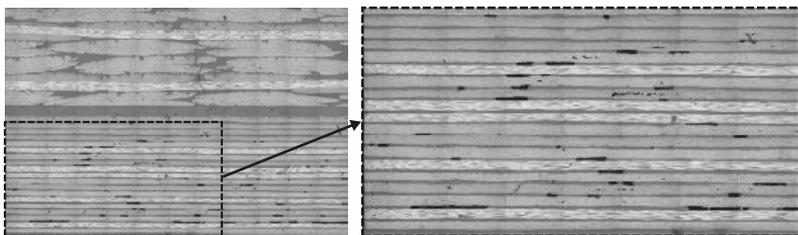
Zur Herstellung sogenannter Omega-Stringer (Bild 8.32) werden zur Formgebung beispielsweise PMI-Hartschäume (Firma Evonik) eingesetzt. Der Formschaum verbleibt nach der Aushärtung des Prepregs meist im Bauteil. Auf diese Weise können Stringer und zu versteifendes Hautfeld in einem Schritt ausgehärtet werden.

Die Zellstege bestimmter Hartschäume sind bei den zur Prepreg-Aushärtung notwendigen hohen Temperaturen (typischerweise 180 °C) und Drücken (7 bis 10 bar) nicht ausreichend formstabil. Daher wird der auf das Bauteil wirkende Druck z. B. auf 3 bar absolut reduziert.

Je nach Prepreg-Matrix wird in der Aufheiz- und Aushärtphase jedoch hoher Druck (7 bis 10 bar) benötigt, um Scherkräfte auf das Prepreg auszulösen und damit ausreichenden Harzfluss zu erzielen. Der Harzfluss sorgt dafür, dass eventuell zwischen den Prepreg-Lagen oder zwischen Prepreg und Schaum befindliche Luft mit überschüssiger Matrix herausgeschwemmt wird, um ein porenfreies Bauteil zu erhalten.

Der reduzierte Druck im Sandwichbauteil kann zu einem verminderten Harzfluss und in der Folge zur Entstehung von Poren besonders zwischen unidirektionalen Lagen führen (Bild 8.33). Diese Porenbildung wird zusätzlich von zu langsamem oder schnellem Aufheizen im Autoklaven sowie von einem ungeeigneten Vakuumaufbau begünstigt.

Ein speziell angepasster Autoklavenzyklus (Aufheizrampe, Druckbeaufschlagung) sowie die Verwendung von druckstabileren PMI-Schäumen können das Problem lösen. Eine andere Variante wäre die Verwendung eines metallischen Toolings zur Formgebung.

**Bild 8.33** Poren in den UD-Lagen eines Sandwichbauteils

# Index

## A

Ablegeprozess 64  
Ablege- und Bearbeitungstechnologien 48  
Ablegeverfahren 49  
- Abläufe 61  
- Ziele 60  
Abspanneffekt 196  
AFP  
- Ablagekopf 94  
- Ablegetechnologie 95  
- Definition 84  
- Funktionsprinzip 87  
- Maschinenarchitektur 93  
- Technologie 88  
- Teilsysteme 88  
Airpad 159  
Aktivierung 78, 92  
aliphatische Amine 16  
Alterung 14  
Anhydrid 16  
Anisotropie 5  
Aquacore 157  
Aramidfaser 14  
aromatische Amine 16  
Aspektverhältnis 3  
ATL  
- Ablagekopf 81  
- Ablegetechnologie 83  
- Definition 72  
- Funktionsprinzip 74  
- Maschinenarchitektur 79  
- Maschinenkonfiguration 79  
- Technologie 77  
- Teilsysteme 77  
Atlas-Bindung 19  
Aufwickelstation 31  
Aushärte- und Formgebungsverfahren 48  
Aushärtewerkzeuge 155

Autoklavhärtung 121  
Automatic Fiber Placement (AFP) 84  
Automatic Tape Laying (ATL) 72  
automatisierte Ablegeverfahren (ATL, AFP)  
58  
automatisierter Zuschnitt 51

## B

Balken 71, 80, 93  
Batch-Verfahren 32  
Bauweisen-Konzept 177  
beidseitig geschlossenes Aushärtewerkzeug  
160  
Benzoxazinharz (BOX-Harz) 17  
Bismaleimidharze (BMI) 17  
Black Metal 198  
BMI-Matrixharze 145  
Brandeigenschaften, Phenolharz, BOX-Harz  
17  
Bridging 92  
Brücke 71, 79, 93  
Bucheffect 108

## C

CAD-CAM-Kette 149  
Cantilever 71, 80, 93  
CFK-Schaum, Carbonschaum 141  
CFK-Tooling 150  
C-Holm 179  
closed mould 155  
CNC-Cutter 51  
Column 71, 79, 93  
Continuous-Mix-Verfahren 32  
Controlled-Flow-System, B-Stage 35  
Creel, Gatter 33  
Cured Ply Thickness (CPT) 41, 175  
Cuttermesser, Zuschnitt 53  
Cyanatesterharz 22

## D

Dauerbetriebsfestigkeit 141  
 Degradation 146  
 4,4-Diaminodiphenylsulfon (DDS) 16  
 Dicyandiamid (DICY) 16  
 Diglycidylether (DGEBA) 16  
 Dimensionsstabilität 146  
 direkte Formherstellung 149  
 Doppel-T-Stringer 178, 187  
 Double-Diaphragma 107  
 Drapierfähigkeit 67, 74, 86, 167  
 Druckkalotte 178  
 Druckstücksegmente 185  
 Dry-Fiber-Placement (DFP) 24  
 Duratool 141  
 Duomere 2  
 duomeres Harzsystem, Thermoset 13  
 Düsenauftrag 30

## E

Eierkasten-Struktur, Unterkonstruktion 142  
 Eigensteifigkeit 66  
 einseitig geschlossenes Aushärtewerkzeug  
 159  
 Einwegmembran, Foliensack 155  
 Elektronenstrahlhärtung 132  
 Endkontur, Oberflächenfinish 149  
 Epoxidharz 16  
 Epoxy-Tooling-Block 141  
 Exothermie 119

## F

Fadenspannung 33  
 Faltenwurf 109  
 Faserflächengewicht 164  
 Fasern 18  
 Faserondulation 19  
 Faserverbundmaterialien, Tooling 144  
 Faservolumengehalt 171  
 – FVC 41  
 FAW 41  
 Fertigungsmittel (FEMI) 137  
 Fest/Los-Lagerung 193  
 2-Filmprozess 35  
 4-Filmprozess 35  
 Flachfasern 27  
 flüchtige Bestandteile 167  
 Flügelbeplankung 179  
 Fördersystem  
 – AFP-Technologie 90

– ATL-Technologie 77

Formoberfläche 149  
 Formtreue 139  
 Freischrumpfen 141  
 Führungssystem 77  
 Füllmaterial 158

## G

Galvano-Tooling 151  
 Gantry 70, 79, 93  
 Gatter 88  
 Gelegebreite 109  
 Gelpunkt 118  
 gesamte Ablagebreite 82, 95  
 Gewebe-Prepreg 29  
 – Unidirektional(UD)-Prepreg 13  
 Gewebe, Textilien 19  
 Glasfaser 18  
 Glasübergangstemperatur 173  
 glycidylierte Novolake 16

## H

Hackling-Mechanismus 21  
 Halbzeugklasse 14  
 Handlaminierten, Hand-Layup 55  
 Handlungseigenschaften, Toolings 139  
 Härtekern 156, 186  
 Hartkerntechnik 156  
 hart/soft 160  
 Härtungstechnologien  
 – Autoklav 117  
 – Out-of-Autoclave-Verfahren 117  
 Härtungszeit 15  
 Härtungszyklus 117  
 Harzfilm 32  
 Harzfluss 14, 164  
 Harzgehalt 14, 41, 164  
 Harzviskosität 118  
 Hautfeld 179  
 Heißpressen 106  
 Heizrampe 118  
 HexTOOL 141  
 HiTape, DFP 24  
 Hochleistungsfaserverbundbauteile 11  
 Hochtemperaturanwendung 22  
 Hohlprofile 158  
 Hot Forming 106  
 Hot-Form-Tooling 153  
 Hot-Melt-Verfahren 30, 32  
 Hybridbauweise 22

- I
- Imprägniereinheit 31
  - Imprägnierung 66
  - Imprägnierungsgrad 42, 171, 194
  - indirekte Formherstellung 150
  - Induktionsverfahren 128
  - Infusionstechnologie 12
  - In-situ-Nachimprägnierung 194
  - Integral/Differenzial-Bauweise 179
  - Interleaf-Prepregs 21
  - INVAR, Pernifer 141
- K
- Kalandriereinheit 31
  - Kalibrierung 63
  - Kamm- und Spreizstangen 34
  - Kettfaden 19
  - Klebrigkeit 65, 73, 86
  - Kohlenstofffaser 18
  - Kompaktierung 78, 92
  - Konturfräsen 141
  - Konturgenauigkeit 149
  - Körperbindung 19
  - Kopfwechselkonfigurationen 83
  - Kühlung 90
- L
- Lagengleiten, interply slip 108
  - Lagenkonfiguration 49
  - lagerstabile Prepregs 14
  - Lagerzeit 14
  - Lamina 74
  - Laminatporosität 119
  - Laminier- und Klebevorrichtung (LKV) 137
  - Legebuchs 61
  - Leinwand-Bindung 19
  - Liniengeschwindigkeit 35
  - Lösemittel-Verfahren 30, 37
    - Tauchverfahren, Dip-Verfahren 30
- M
- manueller Zuschnitt 50
  - Maschinenarchitektur 69
  - Materialzuführung 89
  - Matrixsysteme 15
  - Matrixviskosität 108
  - maximale Schneidegeschwindigkeit 91
  - metallische Werkstoffe 141
  - Mikrorissbildung 145
  - Mikrowellenhärtung 129
  - minimale ablegbare Länge 91
  - Modulleitwerk 187
  - monolithische Bauweise 180
  - Multiaxialgelege, MAG, NCF 19
  - Multitape 81
- N
- Nachhärtung 15
  - Nassdicke 193
  - Negativform, Negativwerkzeug 139
  - Nekuron 141
  - Nesting, Verschachteln 54
  - Neustartlänge 91
  - Nickel-Galvano-Formen 152
  - Nickel-Galvano-Tooling 143
  - Nickelguss-Tooling 143
  - Nickel-Stahl-Legierung 141
  - Nomogramm 191
- O
- Oberflächengüte 139
  - Ofen-Härtung 124
  - Offline-Programmierung 62
  - Omega-Stringer 197
  - Onlinezuschnitt 77
  - open mould 155
  - Open-Mould-Konzepte 182
  - Organoblech 15
- P
- Passhülse 193
  - PAW 41
  - Phenol-Formaldehyd-Harz 27
  - Phenolharz 17
  - ply book, Legeplan 55
  - PMI-Hartschäume 197
  - Polyadditionsreaktion 16
  - Polyetheretherketon 15
  - Polyetherimid 21
  - Polyethersulfon 15
  - Polypropylen 15
  - Porenbetonstein, Ytong 141
  - Porenbildung 197
  - Portal 70, 79, 93
  - Positivform 139
    - Positivwerkzeug 139
  - Positiv/Negativ-Bauweise 177
  - Positiv-Werkzeug 144
  - Post-Imprägnierzone 35
  - Prä-Imprägnierungszone 34

- Prepreg 11
  - AFP 85
  - ATL 73
  - automatisierte Ablegeverfahren 65
- Prepreg-Flächengewicht 164
- Prepreg-Generationen 20
- Prepreg-Herstellverfahren 31
- Prepreg-Linie 31
- Prepreg-Systeme 11, 20
- Prepreg-Technologie, Prepreg-Verarbeitung 27
- Prepreg-Typen 14
- Prepreg-Varianten 39
- Presstechnologie 106
- Pressure-Strips 196
- Pressverfahren 127
- PRISM TX1100, DFP 24
- Produktivität 97
  - Ablegeproduktivität 97
  - flächige Ablegeleistung 99
  - Floor-to-Floor 100
  - Massenproduktivität 100
  - mittlere netto Ablegegeschwindigkeit (ALV) 98
  - Produktivitätskriterien 101
- Profile 105
- Prozesssimulation 62
- Pultrusion 102
- Pulverbeschichtung 30
  
- Q
- Quadraxialgelege 19
- quasiisotrop 191
- quasiisotroper Aufbau 144
- Quersteife 179
- Quickstep™-Technologie 125
  
- R
- Rakeltechnik 30
- Reinigung 161
- Robot 72, 80, 94
- Rollenbreite 13
- Rollengewicht 13
- Rollenlänge 13
- Rollmesser 36
- Rotorblatt 22
  
- S
- Sackzuschnitt 52
- Sandwichbauweise 180
- Säule 71, 79, 93
- Schlagzähigkeit 15
- Schlitzblechmaske 185
- Schneidesystem 77
  - AFP-Technologie 91
- Schneidetisch, cutting 52
- Schneidschablone, Zuschnitt 50
- Schneidstation 31
- Schneidunterlage 52
- Schnittbreitentoleranz 40
- Schnittkantentest 171
- Schnittqualität 66, 86
- Schussfaden 19
- Setzweg 194
- Sickenhandloch 112
- Single-Diaphragma 107
- Single-Diaphragmatechnik 154
- Single-Tape 81
- Slit-Tape 39
- slitting 66, 86
- soft/hart 160
- soft/soft 160
- Solvent-Verfahren 37
- spezifische Steifigkeit 6
- Spulengatter 31
- SQRTM 112
- Steering 67, 74, 86
- Stringer 179
  
- T
- Tack 44, 65, 166
  - Klebrigkeit 35
- tacky tape, Kitband 155
- Tapebreite 68, 74, 81
- Tapevorbereitung 78
- Teil-Imprägnierung, Nassdicke 193
- 4,4-Tetraglycidylmethyldiamin (TGMDA) 16
- Textilien 18
- thermische Ausdehnung 192
- thermische Spannungen 144
- thermisches Verhalten, Toolings 139
- Thermoplaste 3, 13
- thermoplastisches Halbzeug 15
- Thermoset-Prepreg 30
- Tischportal 72, 80, 93
- Tooling-Herstellung 149
- Tooling-Konturen 139
- Tooling-Konzepte 153
- Tooling-Materialien 140

- Tooling-Technologie 137  
Tooling-Werkstoffe 140  
Toolmaster BetaPreg 141  
Topfzeit 117  
Tow-Breite 86, 95  
Tow-Preg 39, 40  
Trägerfolien 69  
Trägerpapier 35, 73  
Trennfolie 69, 85  
Trennmittel 161
- U
- Ultraschallcutter 51  
unidirektionalen Prepregs 27  
- UD-Prepreg 27  
Unidirektional(UD)-Prepreg, Gewebe-Prepreg  
13  
Urmodell 151
- V
- Vakuumdichtigkeit 145  
Vakuumsack-Aufbau 121  
Verarbeitungstechnologie 47  
Verbundwerkstoffe 3  
Vernetzung, Härtung 15  
Verschachtelung, Nesting, Zuschnitt 54
- Verschlaufung 2  
Verschnitt 86  
Verstärkungsfaser, Fasern 19  
Viskosität 168  
Vliese und Wirrfasermatten 30  
Vorkompaktierung 196
- W
- Wärmeausdehnungskoeffizienten 141  
- CTE 139  
Wasseraufnahme 170  
Water-Pickup 43  
Water-Pickup-Test 170  
Webstil, Textilien 19  
Wechselwirkungen 187  
Weichkerntechnik 156  
Werkstoffe 1  
Werkzeuge, Toolings 137  
Windenergieanlage 22  
Wirtschaftlichkeit 97, 100
- Z
- Zähigkeitsmodifizier, Toughener 20  
„zero-bleed“-Prepreg 14, 41  
Zuschnitt von Prepreg, cutting 50  
Zwickelfüller 105