

# 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"> <li>▪ hohe Zähigkeit</li> <li>▪ hohe Steifigkeit und Festigkeit</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ hohe Dichte</li> </ul>                      | 1615 Mio. t/217 Mio. m <sup>3</sup> <sup>a</sup>           |
| Keramik         | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ hohe Temperaturbeständigkeit</li> <li>▪ hohe Steifigkeit</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ geringe Zähigkeit</li> </ul>                | 200 Mio. t/76 Mio. m <sup>3</sup> <sup>b</sup>             |
| Kunststoff      | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ niedrige Dichte</li> <li>▪ einfache Verarbeitung</li> </ul>          | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ niedrige Temperaturbeständigkeit</li> </ul> | 288 Mio. t/288 Mio. m <sup>3</sup> <sup>c</sup>            |

<sup>a</sup>: Rohstahl, Aluminium, Kupfer und Titan

<sup>b</sup>: Glas, Haushalt und technische Keramik

<sup>c</sup>: 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.

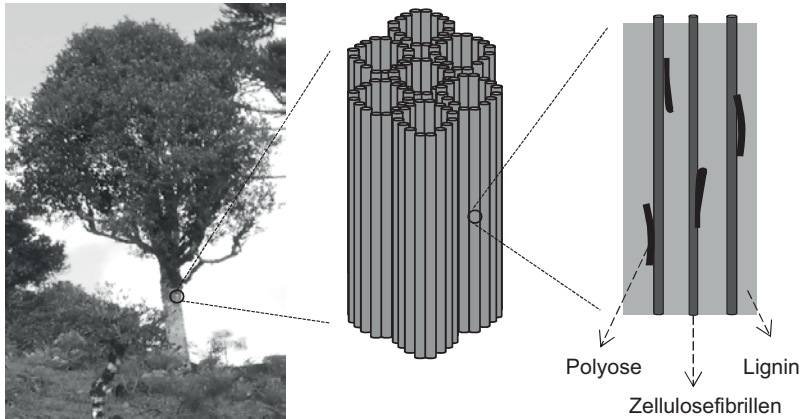
### **Kombination von Werkstoffen**

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.

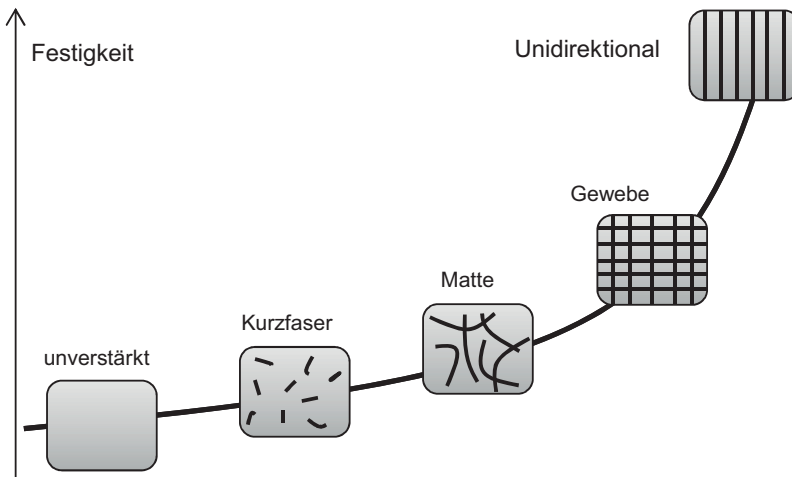
Besonders faserförmige Stoffe, d.h. Stoffe mit großem Aspektverhältnis (Länge/Durchmesser), können die mechanischen Eigenschaften der zu verstärkenden kontinuierlichen Phase (sogenannte Matrix) deutlich erhöhen. Die Fasern wirken wie eine Art Skelett, welches die Außenkräfte trägt. Die kontinuierliche 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 Endlofaserverstärkte 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 endlofaserverstärkte Kunststoffe. Von endlofaserverstärkten 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 Endigenschaften 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/ $\rho$ ) und spezifische Festigkeit ( $\sigma/\rho$ ) ausgewählter Leichtbauwerkstoffe

| Material   | Spezifische Steifigkeit (GPa/g cm <sup>-3</sup> ) | Spezifische Festigkeit (MPa/g cm <sup>-3</sup> ) |
|--|---|--|
| 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   |
|--|---|--|
| <b>Thermoplast</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Werkstoff mit hohem Polymerisierungsgrad</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <u>keine chemische Reaktion</u> nur Schmelzung</li> </ul> $T_{\text{melt}} \cong (1,5 \text{ bis } 2) \times T_g$ <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Konsolidierung &amp; Abkühlung</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Polymerisierungsgrad wie Ausgangszustand</li> <li>▪ neue äußere Gestalt</li> <li>▪ nachträgliche thermische Verformung möglich</li> </ul>   |
| <b>Thermoset (Duroplast)</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Werkstoff mit niedrigem Polymerisierungsgrad</li> <li>▪ mehrkomponentiges System aus Harz u. Härter</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ <u>chemische Vernetzungsreaktion</u></li> </ul> $T_{\text{Härtung}} \cong T_g$   | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ hoher Polymerisierungsgrad</li> <li>▪ unlöslich, unschmelzbar</li> <li>▪ neue äußere Gestalt</li> <li>▪ keine Verformung möglich</li> </ul> |

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



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

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 CO<sub>2</sub>-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]

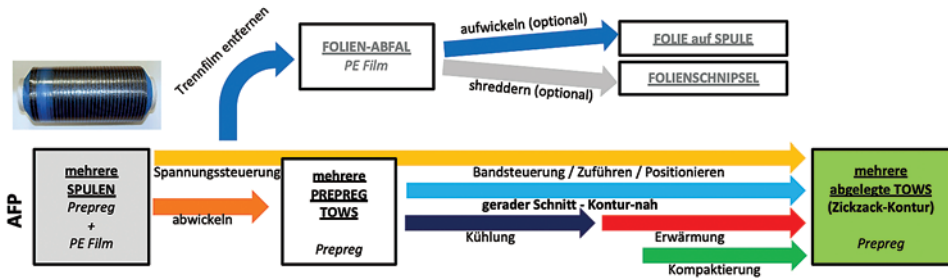
|                            | Europa | Nordamerika | Asien | Andere |
|----------------------------|--------|-------------|-------|--------|
| Luftfahrt und Verteidigung | 46 %   | 33 %        | 16 %  | 5 %    |
| Sport und Hobby            | 4 %    | 6 %         | 89 %  | 1 %    |
| Windkraftanlagen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

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

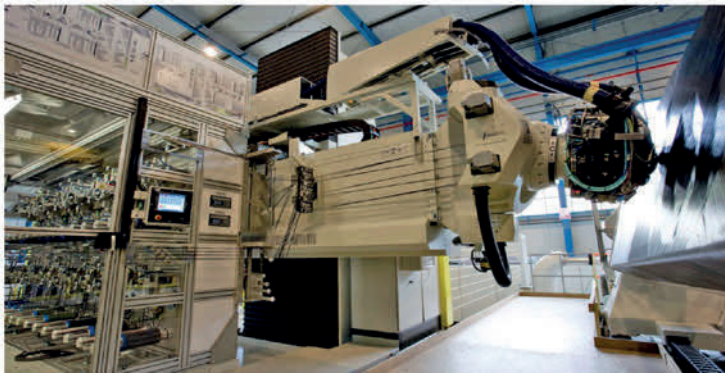
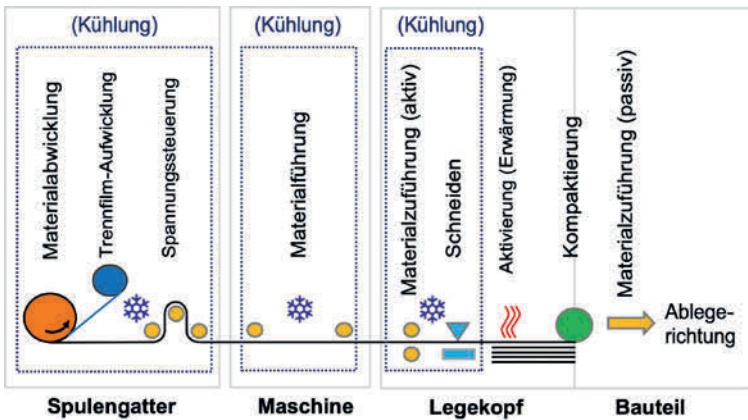
| Luft- und Raumfahrt | Automotive | Freizeit | Windenergie | Bauwesen | Andere |
|---------------------|------------|----------|-------------|----------|--------|
| 56 %                | 18 %       | 11 %     | 8 %         | 2 %      | 1,2 %  |

## 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. *CO<sub>2</sub>-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.



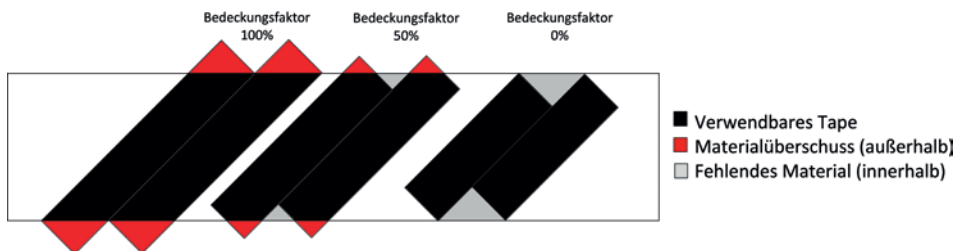
**Bild 4.38** Oben: Schematische Darstellung der AFP-Teilprozesse und ihre Position innerhalb der AFP-Linie, unten: AFP-Anwendung in Spaltenkonfiguration [Bildquelle: M. Torres Diseños Industriales S. A. U.]

## 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-Laminare. 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.

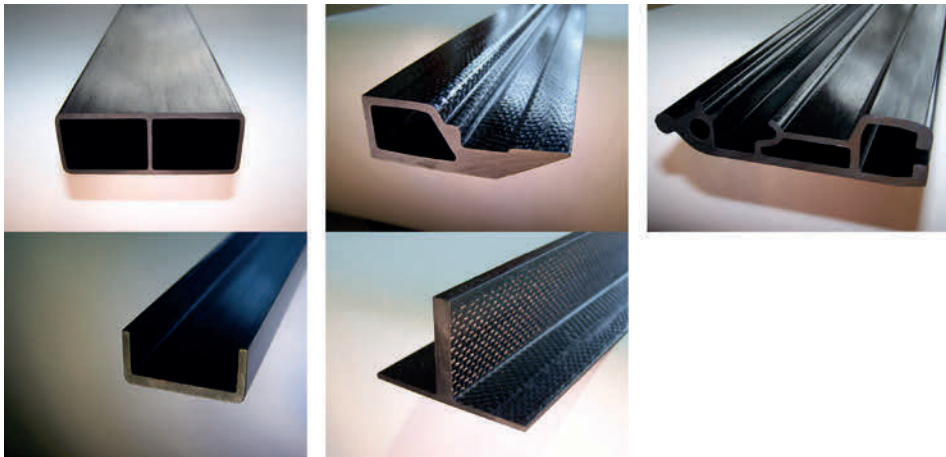


**Bild 4.41** Schematische Darstellung des Bedeckungsfaktors und der charakteristischen gezackten AFP-Kontur

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).

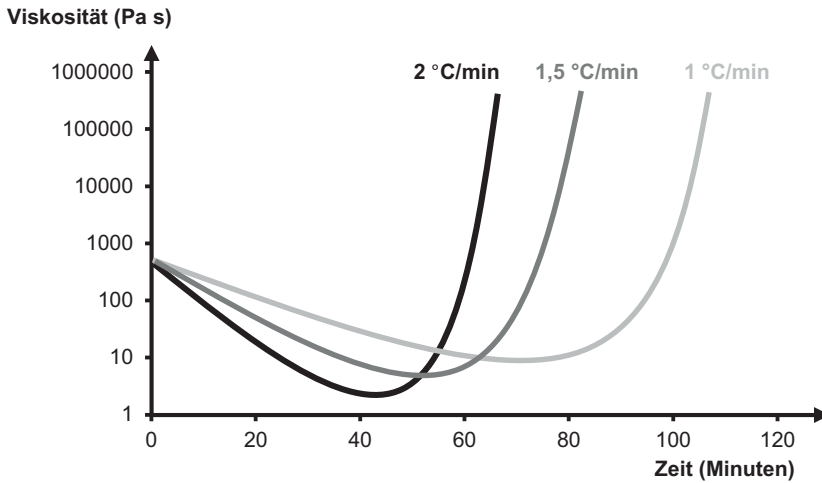


**Bild 4.59** Pultrusionsprofile [Bildquelle: Secar Technologie GmbH]

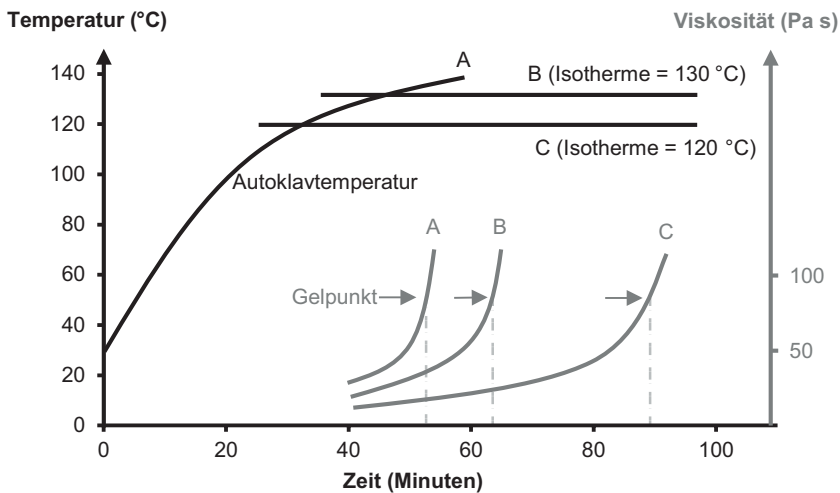
### Profile/Zwickelfüller

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.