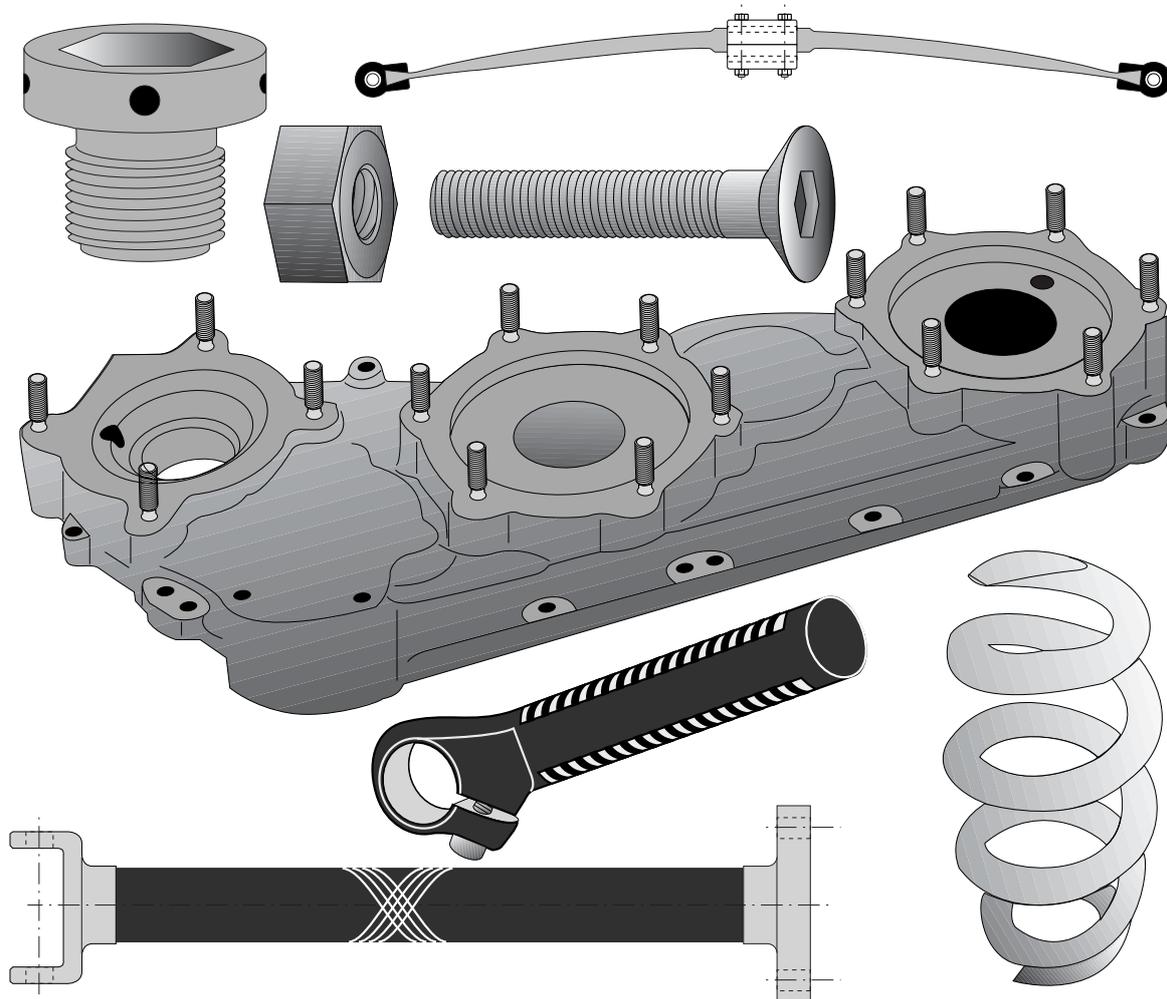


## 12.2.1.10 Fasertechnik.



Dieses Kapitel soll sich im Schwerpunkt mit **Maschinenelementen in Fasertechnik** beschäftigen. Kennzeichnend sind komplexe Geometrie mit Wanddickenunterschieden und Querschnittsprüngen, Hybridkonstruktionen, häufig mit Metallstrukturen zur Kraftübertragung oder als Schutz (z.B. gegen Erosion). Flächige Anwendungen wie Karosserieteile von Kraftfahrzeugen oder Zellenteile von Flugzeugen stehen hier nicht im Zentrum der Betrachtungen.

Das besondere an der Fasertechnik ist, dass die gewünschten Werkstoffeigenschaften erst bei der formgebenden Fertigung entstehen. In hochfesten Bauteilen sind diese gewöhnlich orientiert. Das ist vom Konstrukteur bereits bei der **Gestaltung** und den **Krafteinleitungen** zu berücksichtigen. In vielen Fällen ist eine Kombination mit metallischen Beschlägen oder Einsätzen, z.B. bei hohen Flächenpressungen (Bild 12.2.1.10-5), erforderlich. Eine besondere Herausforderung.

Dem Konstrukteur stehen heute eine große Zahl von **Verfahren** mit spezifischen Vor- und Nachteilen zur Verfügung. Diese Verfahren werden an Hand typischer Anwendungsbeispiele aufgezeigt. Sie werden von unterschiedlichen Halbzeugen (Bild 12.2.1.10-2) bzw. Harze/Matrices und Verstärkungsfasern, die auch kombiniert werden können, gebildet. Die Fasern werden entspr. ihrer Länge wie folgt eingeteilt: Kurzfaser 0,1-1 mm, Langfaser 1-50 mm, Endlosfaser > 50 mm.

**Vorteile** fasertechnischer Bauteile gegenüber metallischen sind:

- **Geringes Gewicht.**
- **Hohe spezifische Festigkeit und Steifigkeit** (bezogen auf die Dichte)
- **Isolierende Wirkung** gegen **Wärme** und/oder **elektrische Ströme** (bei C-Fasern nicht immer gültig).
- **Korrosionsfest** und **chemisch beständig**, z.B. weitgehend resistent gegen viele Hilfsmedien.
- **Schwingungsdämpfend.**
- **Ermüdungsverhalten mit Fail-Save-Charakteristik.** Keine Rissbildung mit direkter Bruchgefahr wie bei Metallen.
- **Nicht kerbempfindlich.**
- **Kein Kaltverschweißen** (Fressen), meist gutes Gleitverhalten.
- **Schalldämpfend.** z.B. geringe Schallabstrahlung bei Getrieben (Bild 12.2.1.10-9.1).

Es gibt jedoch auch **Nachteile** gegenüber metallischen Werkstoffen:

- **Anisotropes Verhalten.** Ungünstig bei mehrachsiger Belastung.
- Nur **niedrige Flächenpressung** zulässig.
- **Lange Taktzyklen** und hohe **Produktionskosten.** Häufig hoher Handarbeitsanteil.
- Notwendige **Erfahrung** und **Geschick.**
- **Elektrisch isolierend** (z.B. Gefahr bei Blitzschlag).
- Geringe **Temperaturstabilität.**
- **Reparierbarkeit** kann problematisch sein, z.B. bei Delamination.
- **Eigenschaftsveränderung** (reversibel) unter Betriebseinflüssen (Temperatur, Feuchtigkeit).
- Empfindlich gegen **Partikel-** und **Tropfenerosion.**
- Geringere Energieaufnahme bei Schlagbeanspruchung (z.B. Vogelschlag).
- Ungeschützt **Schädigung durch intensive Strahlung** (z.B. UV-Strahlung).
- **Quellen** in spezifischen Medien, z.B. in Wasser.
- **Recycling** mit Wiederverwendung problematisch.

**Bild 12.2.1.10-1** (Lit. 12.2.1.10-1, Lit. 12.2.1.10-3, Lit. 12.2.1.10-4 und Lit. 12.2.1.10-6): Gewöhnlich muss das **Fertigungsverfahren** entsprechend den Anforderungen des Werkstücks gewählt werden. Dabei spielt neben den spezifischen Materialeigenschaften wie Festigkeit und Steifigkeit die geeignete rationelle Fertigung eine wichtige Rolle (Diagramm oben). Dazu ist die enge Zusammenarbeit der Bauteilauslegung und Konstruktion mit der Fertigung (Anlagen, Vorrichtungen, Halbzeug) erforderlich. Beide sollten jeweils vom Gebiet des Anderen Sachkenntnis besitzen.

Im Folgenden werden für den Maschinenbau wichtige Verfahren beschrieben.

„A“ **Aufspritzen eines Langfaser-Harzgemischs:** Verwendet werden Glas-Langfasern denen das Duroplast Polyester zugesprüht wird. Dieses Verfahren wird für großflächige

dünnwandige Bauteile verwendet. Die Kompaktierung der Masse erfolgt in Handarbeit mit Rollern.

„B“ **Wickelverfahren** dient zur Herstellung hochfester Bauteile (z.B. Druckbehälter bis 700 bar, Torsionswellen, Bild 12.2.1.10-6). Es ist für vollautomatischen Großserieneinsatz geeignet. Der Kern/Wickeldorn muss bauteilspezifische Eigenschaften aufweisen. Dazu gehört die **Ausformbarkeit** (z.B. geteilt, aus-schmelzbar), wenn der Kern nicht als Diffusionssperre oder Medienschutz im Bauteil verbleibt. Darauf wird ein **harzgetränkter Faserstrang** (Rowing) entsprechend den Betriebsbelastungen orientiert gewickelt. Die Verfahrensparameter Wickelwinkel und Wickelkraft sind bauteilspezifisch und gegebenenfalls nach

Fortsetzung Seite 12.2.1.10-4

# Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden: Fasertechnik

## Fasertechnische Fertigungsverfahren, Vorteile und Schwächen.

Verfahrensspezifische Eignung von Herstellungskonzepten

Verfahren	Manufaktur	Manufaktur teilautomatisch	Vollautomatisierte Fertigungszellen	Voll verkettete Fertigungslinie
Prepreg Ablegen	■	■		
Vakuum Infusion	■	■		
Handlaminieren	■	■		
Imprägnierte Fasern Ablegen( D)	■	■	■	
Form-/ Fließpressen (E)		■	■	■
Harzübertragung (RTM, F)		■	■	■
Pultrusion (C)			■	■
Wickeln (B)			■	■

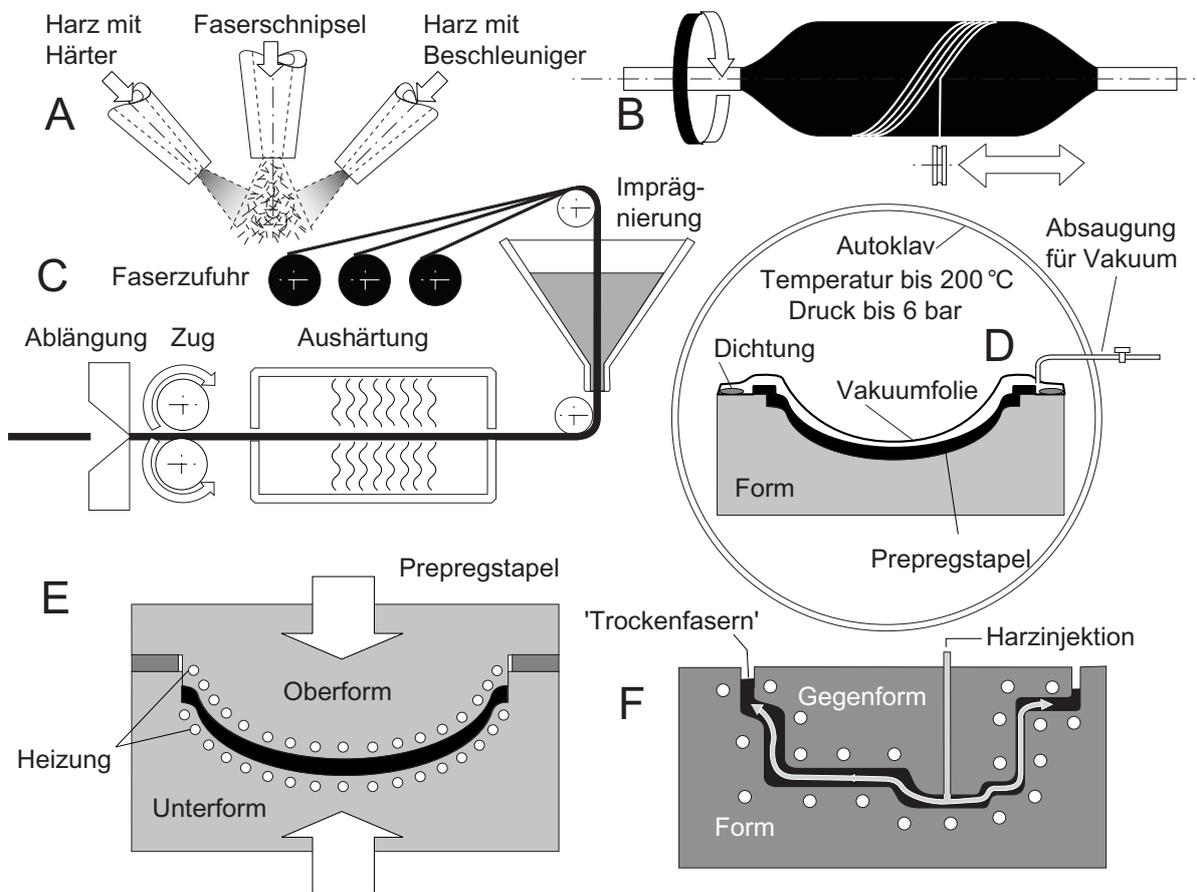


Bild 12.2.1.10-1

Fortsetzung von Seite 12.2.1.10-2

einer Optimierung festzuschreiben. Die Wickelbewegung kann mit Hilfe von Robotern auch bei komplexeren Geometrien (mit örtlich rotationssymmetrischem Querschnitt) realisiert werden (Lit. 12.2.1.10-3). Als Matrix lassen sich Duroplaste (Tränkbäd) oder Thermoplaste (Heizung erforderlich) verwenden.

„C“ **Pultrusion** (Strangziehen) ermöglicht mit einer Faserorientierung in Herstellungsrichtung hochfeste Bauteile mit komplexen Querschnittsgeometrien (Bild 12.2.1.10-5). Sie entstehen automatisch und in großer Zahl. Abhängig vom Halbzeug, z.B. als Gewebes Schlauch oder durch nachträgliches Umwickeln (Bild 12.2.1.10-5), lässt sich auch die **Querfestigkeit** optimieren. Das Halbzeug (Rowing, Gewebe) wird durch ein Duroplast-Tränkbäd gezogen oder mit Thermoplast vorimprägniert. Die **Aushärtung** des **Duroplasts** erfolgt in einem Durchlaufofen vor der Ablängung. Halbzeuge aus **Thermoplast** lassen sich anschließend in geheizten Formen weiterverarbeiten.

„D“ **Prepregverarbeitung** (Autoklaven-Verfahren): Das Zuschneiden und Auflegen der vorgetränkten Faserlagen (Prepregs) sowie Anbringen einer Vakuum-/Druckdichtung kann zeitaufwändig (lange Taktzeiten) arbeitsintensiv sein. Je nach Querschnittsdicke werden die Prepreglagen wiederholt mit einer Folie vakuumdicht abgedeckt und evakuiert. In diesen Zwischenschritten wird der Prepregstapel verdichtet, um Lufteinschlüsse oder vom Auflegen verbliebene Trennstellen zu vermeiden. Erforderlich sind **Geschick und Erfahrung**. Dabei spielt die Gestaltung der Formen für ein gutes Ergebnis eine wichtige Rolle (Bild 12.2.1.10-15). Im Autoklaven erfolgt bei harzabhängigen Temperaturen zwischen 120 °C und 180°C und Drücken bis 6 bar (Luft) die Aushärtung. So lassen sich bei hohem Faseranteil bis 60 % und exzellenter Qualität hochfeste Bauteile herstellen (Bild 12.2.1.10-7.1).

„E“ **Nasspresstechnik**: Dient zur Herstellung eher flächiger Bauteile, jedoch durchaus mit einer versteifenden Formgebung (z.B. Tankdeckel). In die beheizte Form werden **trockene**

**Faserlagen** entsprechend den Bauteilanforderungen (Gewebe, Gelege, Vorformlinge) positioniert. Solche Fasereinlagen lassen sich im Ganzen **vorkonfektionieren**. So entfällt weitgehend die Handarbeit für das Einlegen. Das macht auch große Stückzahlen realisierbar. Dann wird eine optimierte Harzmenge zugegeben und die Form mit festgelegter Geschwindigkeit geschlossen. Das vermeidet eine Beschädigung der Faserlagen durch den entstehenden Harzstrom. Die Werkzeugtemperatur liegt harzspezifisch zwischen 90°C und 140°C bei einem Pressdruck am Bauteil von 5 - 25 bar .

„F“ **Harzinjektionsverfahren** (Resin Transfer Moulding = RTM): Besonders die RTM-Variante hat sich heute für die Herstellung **hochfester, komplex geformter Bauteile** wie sie für Maschinenelemente typisch sind durchgesetzt. Es umfasst einen weiten Bereich der Fertigung bis zur automatisierten Großserie (Bild 12.2.1.10-11). Bei dem Verfahren werden **Trockengelege**, vorzugsweise vorkonfektioniert, in die geöffnete Form gelegt. Nach dem Schließen erfolgt gewöhnlich eine Evakuierung, was eine geeignete Dichtung der Formauflagen erfordert. Dann wird das Harz aus einem Vorratsbehälter in die beheizte Form gesaugt/gedrückt. Dieser Vorgang wird gestoppt, wenn genügend Harz aus der Absaugöffnung getreten ist bevor diese geschlossen wird. Die **Herausforderung für Konstruktion und Fertigung ist eine gleichmäßige vollständige Harzfüllung** der Form. bzw. des Fasergeleges (Bild 12.2.1.10-12). Wird hochreaktives Harz eingespritzt spricht man von **Resin Injection Moulding (=RIM)**. RIM hat deutlich kürzere Zykluszeiten als RTM (Stunden).

Für dieses Verfahren gilt im Besonderen was für alle Fasertechnik-Verfahren gilt. Ein **erstes positives Ergebnis in der Entwicklungsphase beweist noch längst nicht die Serientauglichkeit**. Erst wenn eine **größere Zahl Bauteile reproduzierbar hergestellt** wurde kann eine Serienproduktion ins Auge gefasst werden.

## Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden: Fasertechnik

*Selbst damit ist erfahrungsgemäß immer noch keine Sicherheit vor Fertigungsproblemen gegeben. In der späten Entwicklungsphase aber auch in der Serienfertigung ist es durchaus möglich, dass **unverhoffte Probleme** auftauchen, die erst zeitaufwändig gelöst werden müssen. Das führt nicht selten zur **Verzögerung ganzer Projekte** (z.B. Flugzeugbau), die existenzbedrohlich werden können. Erst wenn der Fertigungsprozess mit allen Effekten verstanden ist, lässt sich von einem stabilen Prozess sprechen, der unliebsame Überraschungen minimiert.*

**Bild 12.2.1.10-2** (Lit. 12.2.1.10-1 und Lit. 12.2.1.10-3): Dieses Bild zeigt Tendenzen und Trends, die dem Konstrukteur für **Auslegung und Auswahl des Fertigungsverfahrens** hilfreich sind. Dabei geht es nicht wie in Bild 12.2.1.10-12 primär um die Seriengröße als Kriterium der Eignung. Bestimmend sind die erzielbaren Bauteileigenschaften in Bezug auf Geometrie, sowie physikalischem und festigkeitsbezogenem Werkstoffverhalten.

„A“ und „B“ **Hochfeste Verbundwerkstoffe**: Von Interesse sind nicht in erster Linie Absolutwerte sondern spezifische Werte, die sich auf die Dichte/spez. Gewicht beziehen (Band 1 Bild 3-5). **Spezifische Festigkeit** (Reißlänge, Band 1 Bild 3-2 und Bild 3-5) und **spezifische Steifigkeit** stehen im Vordergrund. Verständlicherweise ist die schwerere Glasfaser hier der Kohlefaser unterlegen. Nicht aufgeführt ist die hochfeste organische Faser „Aramid“. Sie zeichnet sich durch eine besonders hohe elastische Dehnfähigkeit und Zähigkeit (Bruchdehnung) aus.

Das hat mehrere Gründe:

- **Spezifische Festigkeit** wird für niedriges Gewicht genutzt um Massenträgheit zu minimieren (z.B. bei Sportgeräten, Fahrzeugen, Robotern oder in der Raketentechnik). Das lässt sich beispielsweise bei Fahrzeugen zur Minimierung ungefederter Massen nutzen (z.B. Rad/Radaufhängung, Bild 12.2.1.10-5). Ein besonders wichtiges Argument ist eine mög-

lichst geringe Antriebsenergie (Kraftstoffeinsparung).

- Hohe spezifische Festigkeit ist besonders bei selbstbelasteten Bauteilen wie rotierenden Körpern (Bild 12.2.1.10-7.1) erwünscht.

- **Spezifische Steifigkeit** soll elastische Verformungen unter Betriebslast begrenzen. Beispiel sind **Getriebegehäuse** (Bild 12.2.1.10-9.2), deren Achsabstände möglichst konstant gehalten werden.

- **Schwingerermüdung**: Faserverbunde haben Vorteile gegenüber Metallen (Lit. 12.2.1.10-21). Das spielt in der Fasertechnikliteratur eine oft unterschätzte Rolle, wenn man die Bedeutung für Maschinenelemente betrachtet. Entscheidend ist die Faserstruktur. Sie hat zwei Effekte:

- Hohe Dämpfung durch innere Reibung.

- Kein schnelles Risswachstum quer zur Belastung. Die Ermüdung erfolgt durch den Bruch einzelner Fasern und Lösung des Verbunds/Schichten (**Delamination**). Damit steigt die Dämpfung, was zu einem 'Fail-Save-Verhalten' führt (Band 1, Bild 4.3-24).

In diesem Zusammenhang ist auch die **Schadenstoleranz** zu sehen. Kerben durch Handling oder Betrieb werden, was die Ermüdung anbetrifft, besser toleriert (geringe Kerbwirkung, Band 1 Kapitel 5.4.4). Das gilt jedoch nicht für **statische Druckspannungen wie bei Biegung und Knickung**. Hier ist die Druckseite (!) durch ein spontanes Versagen (Bruch) gefährdet. Dies kann bereits von einem kaum erkennbaren Einschlag/-druck ausgelöst werden (Band 1 Bild 3-12). Solche Schäden sind z.B. von Komponenten der Sportgeräte wie Fahrradrahmen oder Segelmasten bekannt.

**Impactverhalten** ist auch im Licht der **Schadenstoleranz** zu sehen. Dient es der **Gefahrenreduzierung** wobei das Bauteil zerstört wird, haben fasertechnische Werkstoffe Vorteile. Das lässt sich z.B. beim vogelschlaggefährdeten rotierenden Nasenconus (Spinner) von Flugtriebwerken nutzen (Lit. 12.2.1.10-21). Besonders

Fortsetzung auf Seite 12.2.1.10-7

## Was man von 'Fasertechnologie' wissen sollte.

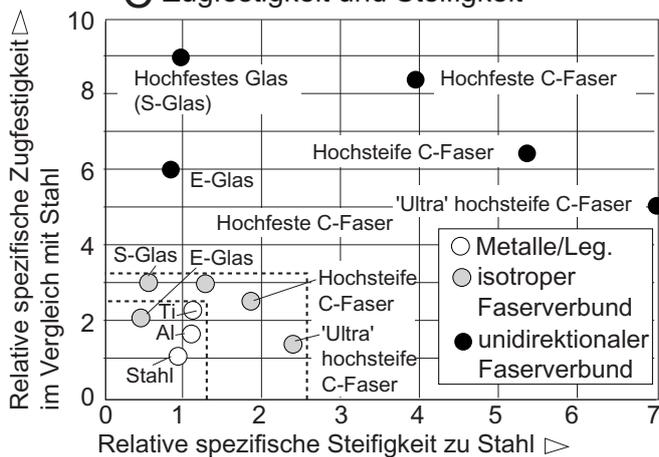
nach Angaben aus Lit. 12.2.1.10-1

### A Hochfeste Verbundwerkstoffe

erzielbare Eigenschaft	Kohlefaserverstärkter Kunststoff (CFK)		Glasfaserverstärkter Kunststoff (GFK)	
	Duroplast	Thermoplast	Duroplast	Thermoplast
Steifigkeit	++	+	0	0
Festigkeit	+	+	+	0
Gewicht	++	+	0	0
Kosten	--	-	-	-
Beispiel (Bildnr.)	12.2.1.10-6, -7	12.2.1.10-4	12.2.1.10-5	12.2.1.10-8

schlechter -- - 0 + ++ besser

### C Zugfestigkeit und Steifigkeit

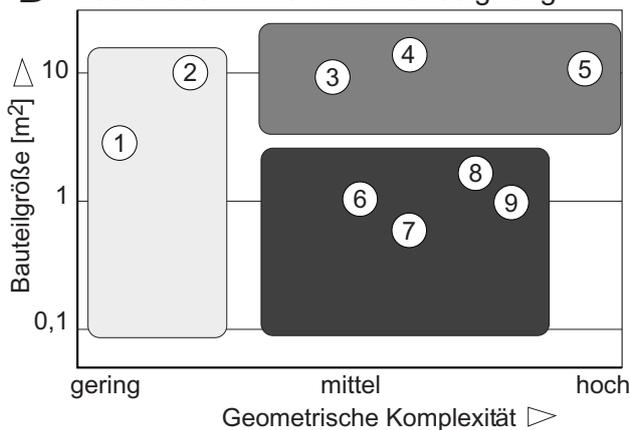


### B Komponenteneinfluss

Eigenschaften	Faser	Matrix
	<b>Mechanisch</b>	
Steifigkeit	-	+
Festigkeit	-	+
Ermüdung (dyn.)	-	+
Schadenstoleranz	+	-
Impactverhalten	+	-
Thermomechanik	+	-
<b>physikalisch chemisch</b>		
Elektrische	0	0
Temperaturbeständigkeit	++	--
Chemische Beständigkeit	++	--
Korrosionsverhalten	+	-
<b>Verarbeitung</b>		
	++	--

gering -- - 0 + ++ groß

### D Bauteilbestimmte Verfahrenseignung



- ① Pultrusion      Symmetrische Bauteile
- ② Wickeln
- ③ Ablage von Prepregs      Große und komplexe Bauteile
- ④ Vakuumunterstützt
- ⑤ Handlaminiere
- ⑥ Formpressen      Größenbegrenzte Bauteile
- ⑦ Ablage von Prepregs (Aush. im Autoklaven)
- ⑧ Harzübertragung (RTM)
- ⑨ Fließpressen

### E Faser-Matrix-Halbzeuge

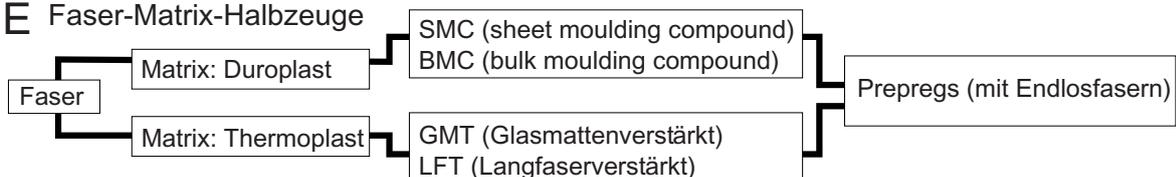


Bild 12.2.1.10-2

Fortsetzung von Seite 12.2.1.10-5

die crashgefährdeten Zellen von Sportfahrzeugen (z.B. Formel 1) nutzen die hohe Aufnahmeenergie des Faserverbunds (C-Faser-Epoxid) erfolgreich. Hier sei noch erwähnt, dass die Wirkung schusssicherer Westen und der Schutz gegen Einschläge (Bruchstücke, Projektile, Band 1 Bild 3-15) nicht auf einem Faser-Matrix-Verbund sondern auf dem Verhalten von **Trockenfasergelegen** beruhen (Lit. 12.2.1.10-22).

**Thermisches Verhalten, Thermomechanik und thermische Beständigkeit:** Grundsätzlich sind die **Betriebstemperaturen** bedingt durch die **organische Matrix** im Vergleich zu 'Konstruktionsmetallen' deutlich begrenzt. Dabei ist es wichtig, dass der Konstrukteur den großen Einfluss auch scheinbar geringer **Temperatursteigerungen** erkennt. So können bereits wenige °C die Lebensdauer deutlich verändern. Dies beruht sowohl auf Schädigung ('Alterung', Zersetzung) als auch plastischer Verformung (Kriechdehnung).

Der Temperatureinfluss gilt, was die **Reaktions- bzw. Verarbeitungszeit** anbetrifft auch für **Fertigungstemperaturen** (Aushärtung, 'Topfzeit', Gelierzeit, Lagerung). Es ist davon auszugehen, dass sich die Reaktionsgeschwindigkeit mit ca. 10 °C Temperaturanstieg (nach Arrhenius) verdoppelt. Eine besondere Herausforderung sind **hochreaktive Harze** (z.B. für kurze Zykluszeiten), die z.B. bei tiefen Temperaturen (Kühltruhe) gelagert werden müssen und selbst da nur eine kurze Zeit bis zur Verarbeitung erlauben.

Eine Besonderheit von C-Fasern und Aramidfasern ist im Gegensatz zu Glasfasern die **negative Wärmedehnung**, d.h. Schrumpfung bei Temperaturanstieg. Dies lässt sich durch die Orientierung von Faserlagen für eine gewünschte Wärmedehnung des Verbunds nutzen. So ist es beispielsweise möglich, die Wärmedehnung metallischen Beschlügen und Anbauten anzugleichen. Auch in Getriebegehäusen lassen sich die Achsabstände der Lagerungen der Wärmedehnung von Zahnrädern anglei-

chen (Bild 12.2.1.10-9.2). Für den **Werkzeugbau** wird diese Möglichkeit ebenfalls genutzt. Was die **Wärmeleitfähigkeit** anbetrifft, so ist diese für C-Fasern in Faserrichtung (unidirektional) hoch, für Glasfasern und Aramid jedoch vergleichsweise niedrig. Das gilt für C-Faserverbunde auch in Querrichtung.

Die geringe **elektrische Leitfähigkeit** von Glas- und Aramidfasern sowie CFK in Querrichtung hat unterschiedliche Folgen. Sie lässt sich für **isolierende Bauteile** nutzen. Anders bei **Blitzeinschlag** (z.B. in Flügel von Windenergieanlagen, Band 1 Bild 5.12.2-3). Hier kann es zu gefährlicher Überhitzung (Schädigung, holzähnliches Aufreißen/Delamination) und **Lichtbögen** (Brandschäden) kommen. Aus diesem Grund werden leitende metallische Gewebe in Oberflächennähe eingelegt (z.B. Flugzeugzellen) die Blitzableiterwirkung haben.

**Chemische Beständigkeit und Korrosionsverhalten** ist von Fasern (C-Faser, Glasfaser und Aramid) im Vergleich zu Metallen gut. Aramid kann reversibel bis zu 7 % Wasser aufnehmen und ist deshalb gegebenenfalls vor der Verarbeitung auf 3 % zu trocknen.

Besonderes Problem bei **Aramidfasern** ist die Empfindlichkeit gegenüber **UV-Strahlung**. Eine Schädigung macht sich äußerlich in einem bronzenen Farbton bemerkbar. Sonnenlicht ausgesetzt kann die **Festigkeit bis auf 25 % (!) absinken**. Das ist in der Fertigung bei der Lagerung zu berücksichtigen. Der Konstrukteur hat am Fertigteil eine schützende Beschichtung vorzusehen.

Das Korrosionsverhalten der Matrixharze ist insbesondere gegenüber Hilfsstoffen wie **Lösungs- und Reinigungsmitteln** problematisch. **Verarbeitung:** Hier spielt die Verarbeitung der Faser eine besondere Rolle. So müssen Lagen zugeschnitten und aufgebaut, komplexe Geometrien vorkonfektioniert (Bild 12.2.1.10-11) und Halbzeug wie Gewebe und Gestricke (sogar 3D) hergestellt werden.

„D“ **Verfahrenseignung:** Die gezielte Auswahl der bauteilspezifisch geeigneten Herstel-

Fertigungsspezifische Vor- und Nachteile.

Anwendung der Hybridisierung von Faserverbundkunststoffen

Endlosfaserverstärkt CFK/GFK	Endlosfaserverstärkter FVK und Metall	Endlosfaserverstärkt Kurz-/Langfaser/Kunststoff
Nutzung der kostengünstigen Glasfaser an gering belasteten Bauteilbereichen Versteifung hochbelasteter Bereiche mit Kohlefasern, um die elastische Verformung zu minimieren Örtliche Anpassung temperaturbedingter Effekte: Wärmedehnung, Wärmeleitung	Metalle zur Aufnahme hoher örtlicher Lasten bzw. Flächenpressung  Metalle in komplexen, mehrachsigen belasteten Zonen, z.B. Krafteinleitung an Wellenenden.	Endlosfaser nur in höchstbelasteten Zonen in Belastungsrichtung  Kurz- und Langfaserverstärkung bei mehrachsiger jedoch niedriger Belastung und aus Kostengründen.
Verfahren: - Prepregaufbau mit Vakuumunterstützung. - Handlaminieren	Verfahren: - RTM - Prepregaufbau mit Vakuumunterstützung. - Handlaminieren - Pressverfahren	Verfahren: - RTM - Pressverfahren
Beispiel: Bild 12.2.1.10-11	Beispiel: Bild 12.2.1.10-6	Beispiel: Bild 12.2.1.10-11

Faktoren die den Masseneinsatz von FVK begrenzen.

- **Kosten:** Eine Senkung verbessert sich mit dem Anteil der Bauteile (Nutzungsgrad). Eine 70% Reduzierung ist bei ca. 100 % der potenziellen, heute metallischen Anwendungen realisierbar.
- **Verfügbarkeit:** Nur wenn gewährleistet Großserieneinsatz.
- **Reparierbarkeit:** Praktikierbarkeit entsprechend Metallen. **Bild 12.2.1.10-3**
- **Recycling:** Unbefriedigend solange nur thermische Verwertung.

lung muss mehrere **Kriterien** berücksichtigen. Neben der Seriengröße (Bild 12.2.1.10-1) mit Taktzyklen und Kosten stehen die Bauteilgröße und die geometrische Komplexität. Dazu sind ausreichende **Verfahrenkenntnisse** notwendig (Bild 12.2.1.10-1) sowie die vorhandenen **Anlagen** und **Ressourcen** zu berücksichtigen. Selbstverständlich gehört, was das **Matrix-Faser-Halbzeug** anbetrifft, eine gewisse 'Begriffssicherheit' dazu („E“). Sie sollte u.A. Auswahl sowie zeit- und verfahrensgerechte Beschaffung gewährleisten.

## Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden: Fasertechnik

**Bild 12.2.1.10-3** (Lit. 12.2.1.10-1 und Lit. 12.2.1.10-3): FVK ermöglicht die **Auswahl geeigneter Fertigungsverfahren**. Dabei steht vermehrt die Tauglichkeit für eine günstige **Großserienproduktion** im Vordergrund (Bild 12.2.1.10-1). Die 'Massenfertigung' ist Folge eines entsprechenden Bedarfs der Anwendung. Hier sind nicht nur die **Kosten** relevant (Rahmen unten). Auch die **Verfügbarkeit** des Halbzeugs in Art und Menge (Fasern) sowie die Verarbeitbarkeit (Matrix/Harz: z.B. Lagerungsfähigkeit) spielt eine Rolle. So ist für die Anwendung von CFC in Großserien des Automobilbaus (z.B. Elektrofahrzeuge) der Aufbau einer Faserproduktion Voraussetzung. Weiteres wichtiges zu lösendes Kriterium ist die **Reparierbarkeit**. Dabei geht es nicht nur um den optischen Eindruck, sondern in vielen Fällen um **Festigkeit** und **Sicherheit**. Sie ist beispielsweise für den Großeinsatz an Zellen und Strukturen von Verkehrsflugzeugen von großer Bedeutung. **Recycling** tritt im Rahmen des Umweltbewusstseins und gerade bei Serienanwendungen (Elektrofahrzeuge) in den Fokus. Eine thermische Entsorgung ist problematisch. Eine Wiederverwendung zumindest der Fasern ist für hochbelastete Anwendungen nicht in Sicht.

Die **Hybridisierung** von Faserverbundwerkstoffen ist eine vom Konstrukteur nutzbare Möglichkeit bereichsspezifische Eigenschaften des Bauteils zu optimieren. Es besteht die Möglichkeit einer Kombination von Faserarten, -lagen (Orientierung) und Metallen (Tabelle oben). Das kann im Hinblick auf die Krafteinleitung, insbesondere Flächenpressung oder bei mehrachsigen Spannungszustand über metallische Ein- und Ansätze geschehen (Bild 12.2.1.10-5 und Bild 12.2.1.10-6). Gerichtete Eigenschaften wie hohe Festigkeit, hohe Steifigkeit und Wärmedehnung lassen sich mit Einlagen bzw. optimiertem Lagenaufbau ausgewählter Fasertypen (z.B. Hochmodulfaser oder Hochfestigkeitsfaser) realisieren.

**Bild 12.2.1.10-4** (Lit. 12.2.1.10-5, Lit. 12.2.1.10-16 und Lit. 12.2.1.10-17): Es ist offenbar gelungen ein seriene geeignetes Verfahren (Composite Flow Moulding = CFM) zu entwickeln, mit dem **hochfeste Schrauben** aus FVK, insbesondere CFK oder Hybrid CFK/GFK realisierbar sind. Bei diesem Verfahren wird das Vormaterial (thermoplastgetränkter Rowing) auf 200°C bis 400°C erhitzt. Während des axialen Pressens der Schrauben schieben sich Fasern schraubenförmig um den unidirektionalen Kern in das Gewinde ohne zerstört zu werden. Die Teile sind nach dem Abkühlen **ohne Nacharbeit** verwendbar. Die relativ lange Abkühlungsphase verhindert noch eine Großserienanwendung.

Solche Schrauben ('**Carbonschrauben**') werden am Markt angeboten. Der Faseranteil liegt bis über 60 %. Eine offenbar bestandene Herausforderung ist die **Krafteinleitung über das Gewinde** in den zugbeanspruchten Kern/Schaft. Als Matrix wird ein **Thermoplast** verwendet. Möglich sind unterschiedliche Systeme wie Polyetheretherketon (PEEK), Polyetherimid (PEI), Polyphenylsulfid (PPS) und Polyamid (PA). Die erzielten **Festigkeiten liegen deutlich über Schrauben aus einer Titanlegierung** (!, Balkendiagramm). Das Gewicht liegt merklich unter Stahlschrauben. Dabei tritt der verblüffende Effekt auf, dass mit zunehmender Dicke einer FVK-Schraube mehr Gewicht eingespart wird. Dies ist auf den Dichtevorteil des FVK zurückzuführen. Der Konstrukteur sollte also die Schrauben **im Rahmen der Bauteilgeometrie möglichst groß auslegen**. Besonders hervorzuheben ist, dass der FVK-Werkstoff nicht wie Titanlegierungen bei Schwingverschleiß (Fretting) zu einem extremen Schwingfestigkeitsabfall (bis um 70 %!, Band 1 Bild 5.9.3-8) neigt.

Die **Anwendung** erfolgt bereits im **Flugzeugbau**, der **Raumfahrt** und im **Rennsport**. Die Korrosionsfestigkeit und die hohe kerbunempfindliche Schwingfestigkeit eröffnen ein Potenzial in der **Medizin**. Es besteht eine US-

Schrauben aus FVK, insbesondere hochfeste aus langfaserverstärktem CFK für den Leichtbau.

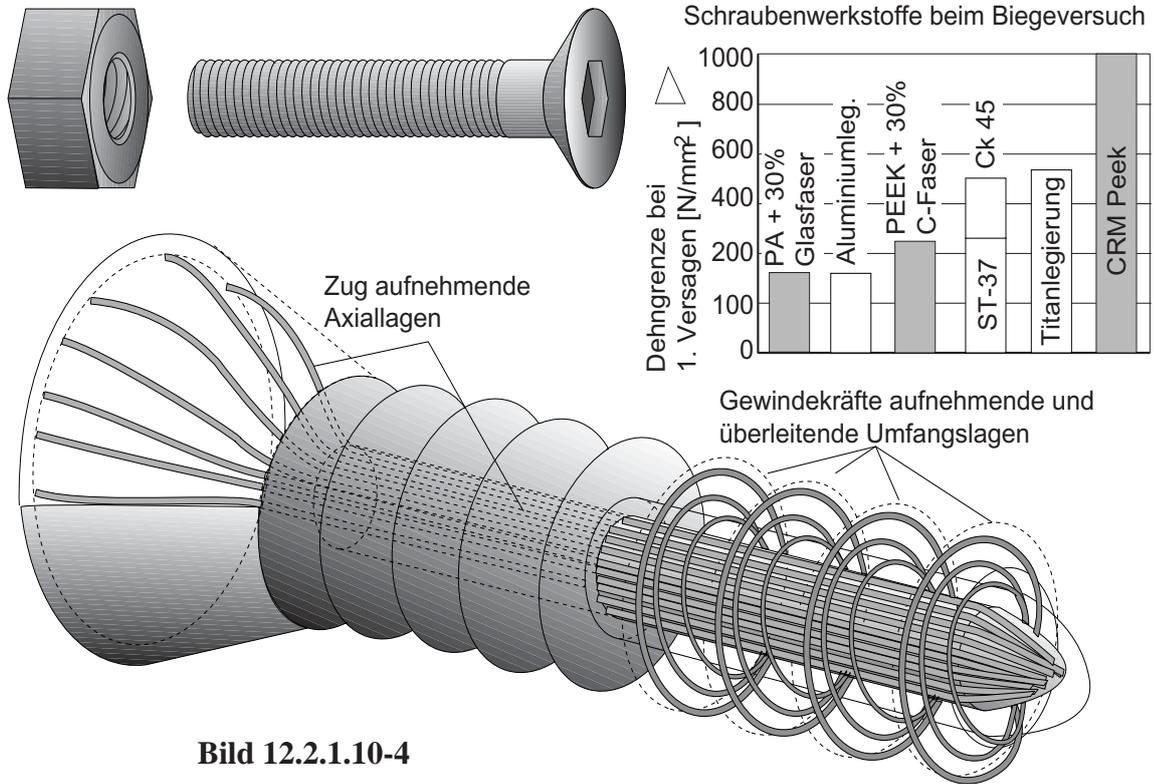


Bild 12.2.1.10-4

behördliche (FDA) Zulassung als implantierbar und biokompatibel.

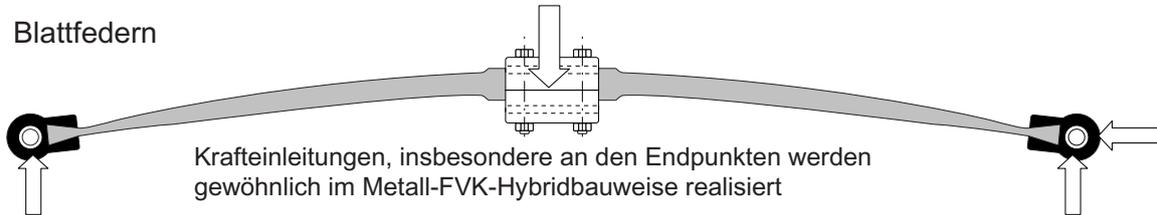
**Glasfaserverstärkte (GFK) Schrauben** bieten sich wegen ihrer Korrosionsfestigkeit ohne Elementbildung für das Verschrauben von Leichtmetallteilen aus Al- und Mg-Legierungen an. Sie sind in der Lage, sich **in Leichtmetalle** (Al-, Mg-Legierungen) einzuschneiden.

**Bild 12.2.1.10-5** (Lit. 12.2.1.10-10, Lit. 12.2.1.10-12 und Lit. 12.2.1.10-114): Die Anwendung von FVK für **elastische Federn** ist naheliegend. In erster Linie geht es um Federn von Fahrzeugen aber auch Kleinflugzeugen. Für diese Anwendungen bietet sich das **Pultrusionsverfahren** an (Bild 12.2.1.10-1). Damit lässt sich unausgehärtetes, unidirektional verstärktes, rundes und flaches Halbzeug herstellen, das zu Federn weiterverarbeitet wird.

**Blattfedern** (Skizzen oben) für den Ersatz von mehrlamelligen Ausführungen aus Stahl werden einstückig ausgeführt. Auf Grund ihrer höheren spezifischen Festigkeit (Reißlänge) haben sie deutliche Gewichtsvorteile (ca. 80 % leichter) und sind in der Lage, höhere elastische **Energie zu speichern**. Weiterer Vorteil ist die **Korrosionsfestigkeit**. Zur Anwendung kommen gewöhnlich unidirektionale GFK-Lagen

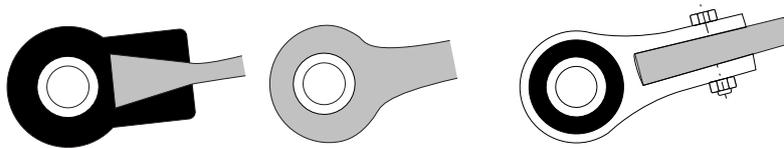
Federn aus FVK haben interessante Eigenschaften, Probleme sind die Fertigungskosten und Krafteinleitung.

Blattfedern



Krafteinleitungen, insbesondere an den Endpunkten werden gewöhnlich im Metall-FVK-Hybridbauweise realisiert

Varianten des Endbeschlags beeinflussen die Herstellung der Feder.



Spiralfedern

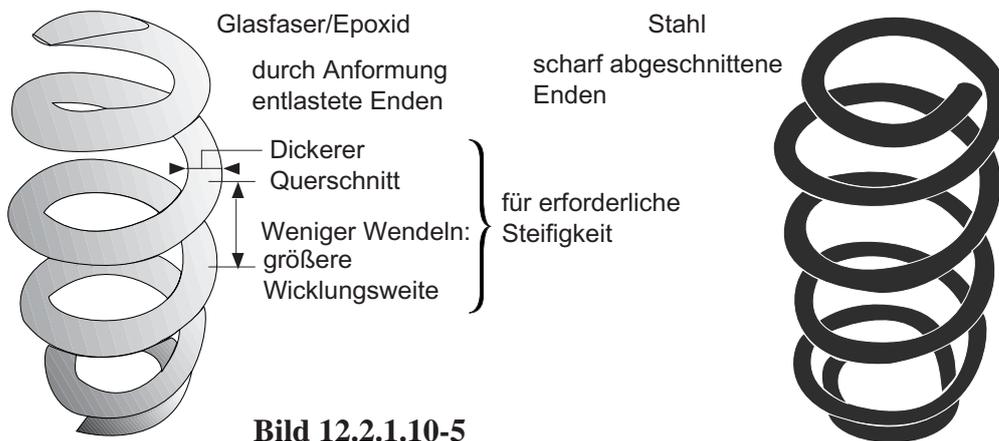


Bild 12.2.1.10-5

mit Epoxidharz-Matrix. Ein besonderes Augenmerk gilt der Krafteinleitung an den Federenden und in der Federmitte. Es handelt sich oft um **Hybridbauweisen** mit Formteilen aus Stählen. Dabei hat der Konstrukteur verschiedene Optionen wie Schwalbenschwanz und direkte oder indirekte Bolzenverbindung (Gabel). **Spiralfedern:** Auch hier steht das vergleichsweise niedrige Gewicht im Vordergrund. Das Ziel ist eine Gewichtseinsparung bis 80%. Weiterer unerwarteter Vorteil ist neben der **Korrosionsfestigkeit**, dass die FVK-Version sogar für höhere **Betriebstemperaturen** (!) geeignet sein soll (Lit. 12.2.1.10-11). Ein Nachteil von FVK sind die höheren **Produktionskosten** und die **Anisotropie**. Sie erschwert Konstruktion und Herstellung der komplexen Form. Nach einer Vielzahl von Entwicklungsansätzen,

meist mit besonderen Formkernen (z.B. aus Elastomer, Lit. 12.2.1.10-14 oder aus-schmelzbar, Lit. 12.2.1.10-12) innerhalb der Feder sind nun vielversprechende Technologien erkennbar. Mit der sog. **Radius-Pultrusion** (Lit. 12.2.1.10-24) lassen sich z.B. im Endlosverfahren schraubenförmige Profile herstellen. Die Form wird schrittweise über das entstehende Profil bewegt während bei konventioneller Pultrusion das getränkte Faserbündel durch die Form gezogen wird. Dank dieser neuen Technologie wird die Herstellung von Großserien im Kfz-Bau wahrscheinlicher.

Wellen aus FVK haben viele praktische Vorteile. Die Herausforderung ist die sichere Verbindung mit metallischen Wellenenden/Kupplungen. Sie bestimmt wechselseitig die Fertigungstechnik.

Der hohle Wellenschaft lässt sich sowohl separat als auch direkt mit den Flanschenden herstellen.

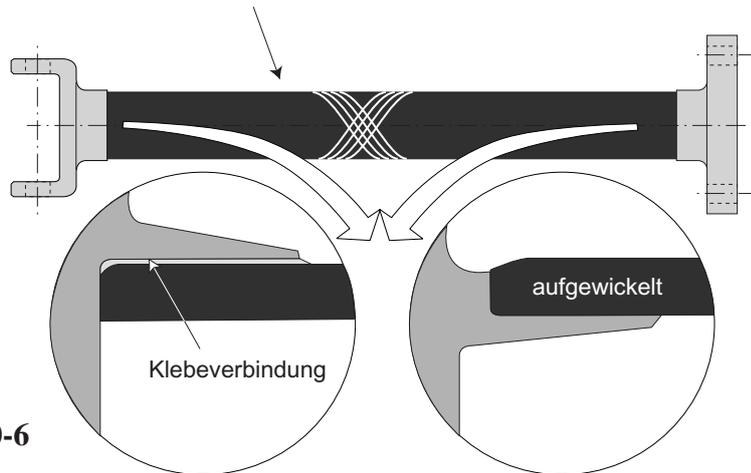


Bild 12.2.1.10-6

**Bild 12.2.1.10-6** (Lit. 12.2.1.10-7, Lit. 12.2.1.10-8 und Lit. 12.2.1.10-10): Heute werden Antriebswellen aus FVK für Boote und Motorsportfahrzeuge vielfach am Markt angeboten. An den Enden des hohlen FVK-Schafts mit vorzugsweise  $+45^\circ$  Faserverstärkung zur Aufnahme der Torsionsbelastung werden metallische Anschlüsse fixiert. Das Material der Hohlwelle besteht bei anspruchsvollen Anwendungen aus CFK. Genutzt werden Vorteile der Fasertechnik wie

- Hohe spezifische Steifigkeit und spezifische Festigkeit.
- Korrosionsfestigkeit, besonders bei Schiffsantrieben.
- Hervorragende Schwingfestigkeit mit erkennbarem Versagensbeginn, kein schneller Rissfortschritt bis Bruch.
- Schwingungsdämpfend, unterdrückt Vibrationen. Das vermindert Geräusche und Schwingverschleiß im Antriebsstrang.
- Hohe kritische Drehzahl (hohe Biegeeigenfrequenz). Es werden längere Wellen (Endlagerabstände) ohne Zwischenlager möglich.

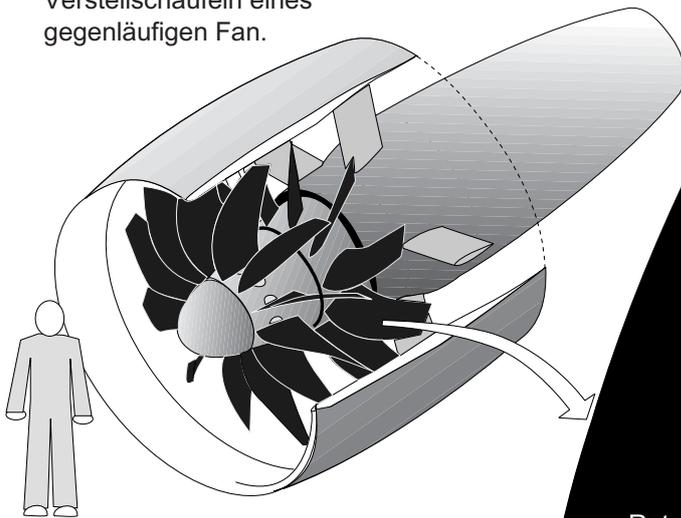
- Anwendungsspezifisch realisierbare Steifigkeits- und Festigkeitsverteilung.
- Im Vergleich zu einer metallischen Welle bei Bruch begrenzte Folgeschäden. Z.B. erfahrungsgemäß geringere Verletzungsgefahr.

Die Kupplungsanschlüsse sind mit der heutigen Technologie keine Schwachstellen.

**Bild 12.2.1.10-7.1** (Lit. 12.2.1.10-19, Lit. 12.2.1.1023 und Lit. 12.2.1.10-25): Diese **schwenkbare** Schaufel wurde Anfang der 90er-Jahre für ein konzipiertes Großtriebwerk mit gegenläufigen Fanstufen entwickelt. Es ist ein eindrucksvolles Beispiel der FVK-Technik für die Realisierung eines hochbelasteten, sicherheitsrelevanten und komplexen Bauteils. Genutzt werden sollte die gegenüber der Metallbauweise (Titanlegierung) hohe **spezifische Festigkeit und Steifigkeit**. Das ermöglicht entsprechend den Dichten (CFK  $1,7 \text{ kg/dm}^3$ , Ti  $4,5 \text{ kg/dm}^3$ ) ein deutlich niedrigeres **Gewicht**. Zusätzlich sind die hohe **Ermüdungsfestigkeit**, die **Schwingungs-**

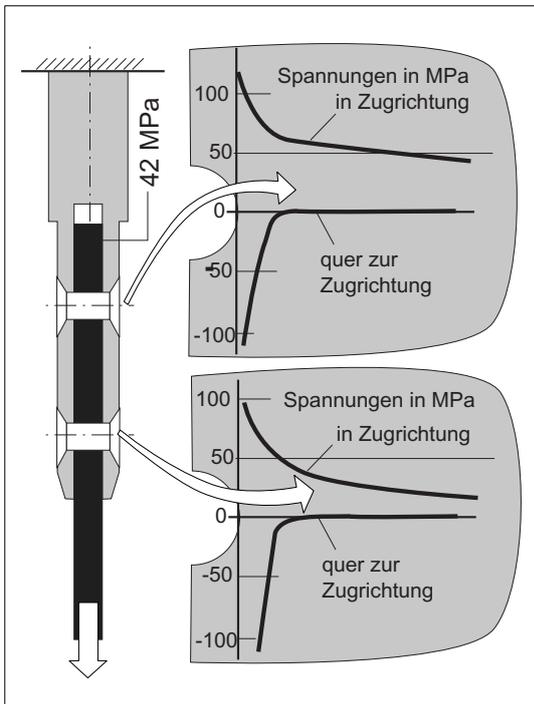
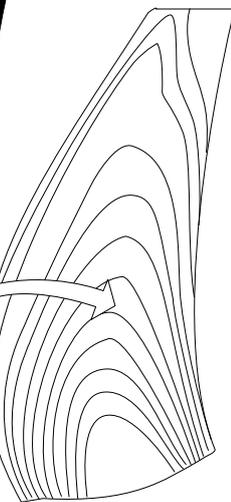
Beispiel für ein Maschinenelement in Metall/FVK-Hybridbauweise.

Verstellschaufeln eines gegenläufigen Fan.

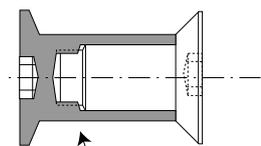


Das Blatt ist aus ca. 250 Prepreglagen aufgebaut.

Rotorblatt aus CFK



Schaufelfußbeschlag aus hochfester Titanlegierung



Schraubbolzen aus hochfestem Stahl

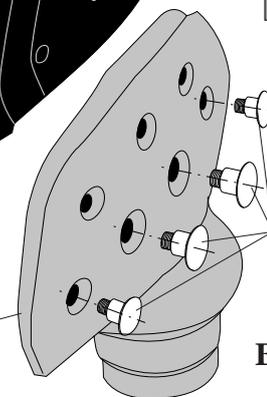


Bild 12.2.1.10-7.1

*dämpfung und die Kerbunempfindlichkeit wichtige positive Eigenschaften. Die Möglichkeit durch den Lagenaufbau die örtliche Steifigkeit des Blattes und damit die Schwingungsformen zu optimieren war besonderes*

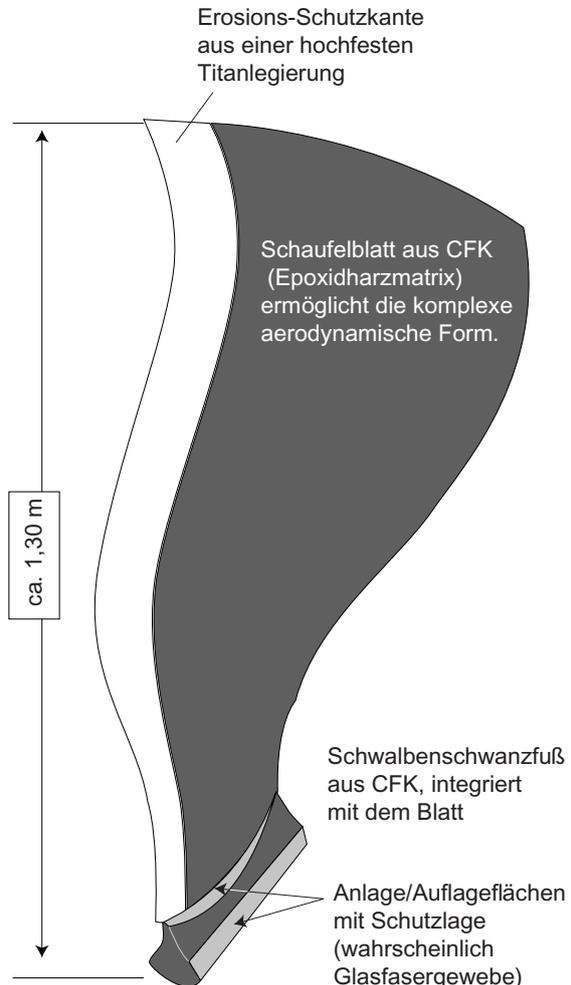
*Auslegungsbestandteil. Dazu gehörte neben Resonanzen auch die Vermeidung aeroelastischer Instabilität (Flattern, Band 1 Bild 3-9.2). Weiter sind Vorteile eines leichteren Containments nicht zu unterschätzen. Es*

dient im umgebenden Gehäuse eventuelle Schaufelbrückstücke aufzufangen (Band 1 Bild 5.2.2-1). Das Blatt ist in dem drehbaren, gabelförmigen Fuß aus einer hochfesten Titanlegierung mit **Schraubbolzen** fixiert. Konstruktionen mit einem Hohlblatt (Schaumstoffkern) und innenliegendem eingenieteten Metallschaft haben sich wegen frühzeitiger Lockerung nicht bewährt.

Das massive Schaufelblatt besteht aus mehreren hundert Einzellagen. Zum Einsatz kamen unidirektionale (UD) Kohlefaser-Epoxid-Prepregs. Die Lagen ergaben sich bei der computergestützten Konstruktion und (CAD) Auslegung des Schaufelblattes, insbesondere des Profils. Die Blattdicke beträgt an der Schaufelspitze ca. 2 mm, im Fußbereich ca. 30 mm. Die Lagen wurden in einer fortgeschrittenen Phase mit einer Schneidmaschine automatisch auf Basis der Konstruktionsdaten aus dem Halbzeug geschnitten. Sie wurden in einer zweischaligen Pressform soweit möglich symmetrisch positioniert. Das fertige Bauteil entstand dann in der erforderlichen hochgenauen Form ohne Nacharbeit. Presszyklus im Autoklaven bei 8 bar und 175 °C.

**Bild 12.2.1.10-7.1** (Lit. 12.2.1.10-19 und Lit. 12.2.1.10-27): Eine Technologie wie in Bild 12.2.1.10.7.1 beschrieben findet man heute im Großserieneinsatz in modernen großen Fantriebwerken. Offenbar setzt sie sich ca. 30 Jahre nach den ersten, jedoch wegen Vogelschlag gescheiterten Anwendungsversuchen, gegen hohle Titanschaufeln durch. Es ist davon auszugehen, dass dieser Erfolg nicht zuletzt auf Fortschritte bei der ertragbaren Energieaufnahme im Falle des Vogelschlags zurückzuführen ist. Es kommen 3D-Gewebe und Querverbindungen der Faserlagen ('Steppen') in Frage, um ein Versagen durch Delamination zu erschweren. Leider wird aus verständlichen Gründen hierzu wenig veröffentlicht. Die wenigen brauchbaren Veröffentlichungen lassen folgende Schlüsse zur Technologie zu.

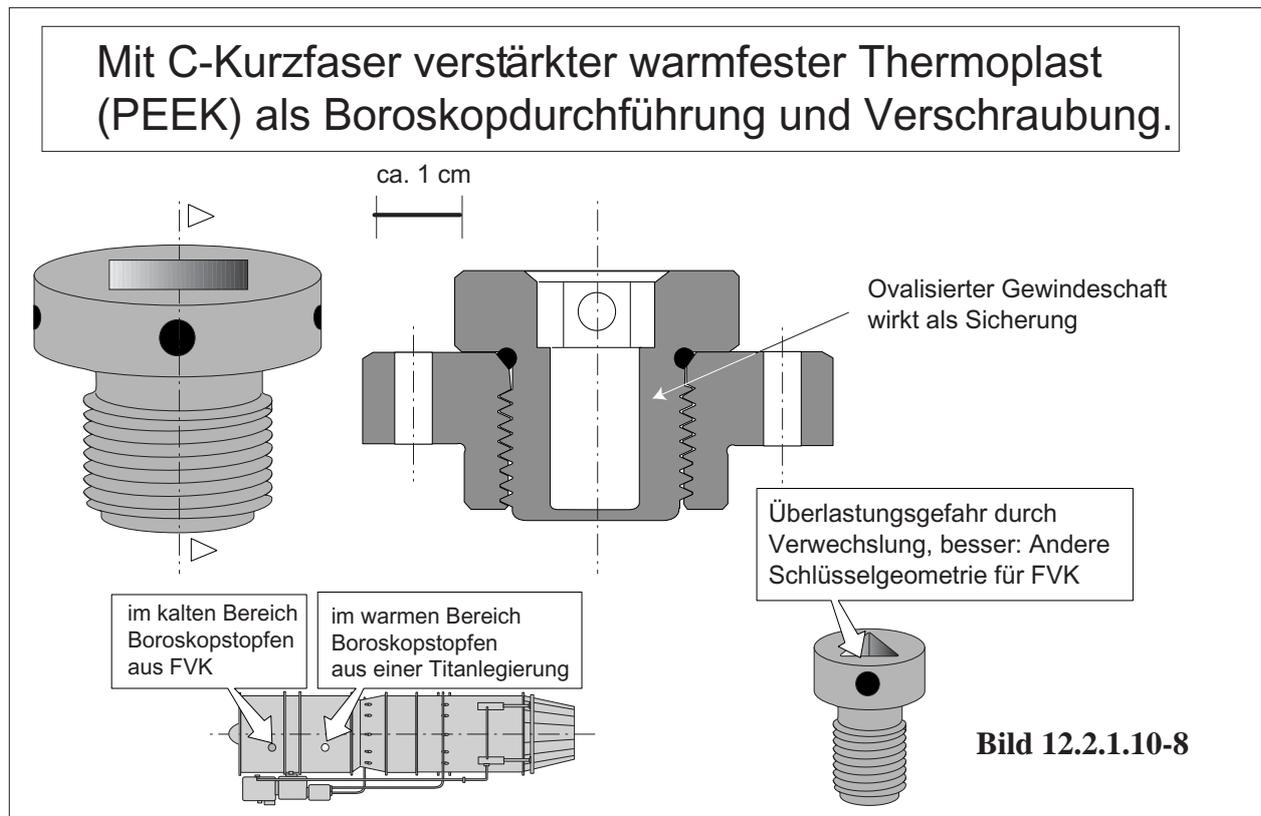
## FVK-Fanblatt eines modernen großen Flugtriebwerks.



**Bild 12.2.1.10-7.2**

Es handelt sich erkennbar um eine FVK-Metall-Hybridkonstruktion. Auffällig ist die breite metallische Schutzkante gegen **Partikelerosion** (Band 1 Kapitel 5.5.1.1) und **Tropfenschlag** (Band 1 Kapitel 5.5.1.2). Die FVK-Bauweise kommt der komplexen, aerodynamisch bedingt geschwungenen Schaufelgeometrie zu Gute. Die Schaufeln sind fest mit einem integrierten Schwalbenschwanzfuß ebenfalls in CFK in die Scheibe geschoben. Die Auflageflächen sind offenbar mit geeigneten Lagen (wahrscheinlich Glasgewebe) beschichtet. Dies dürfte als Verschleißschutz (Fretting, Band 1 Kapitel 5.9.3) gerade auch für die Nuten der Fanscheibe (hochfeste Titanlegierung!) und

# Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden: Fasertechnik



den Zwischenstücken (da eine Fußplattform fehlt) der Strömungsführung dienen.

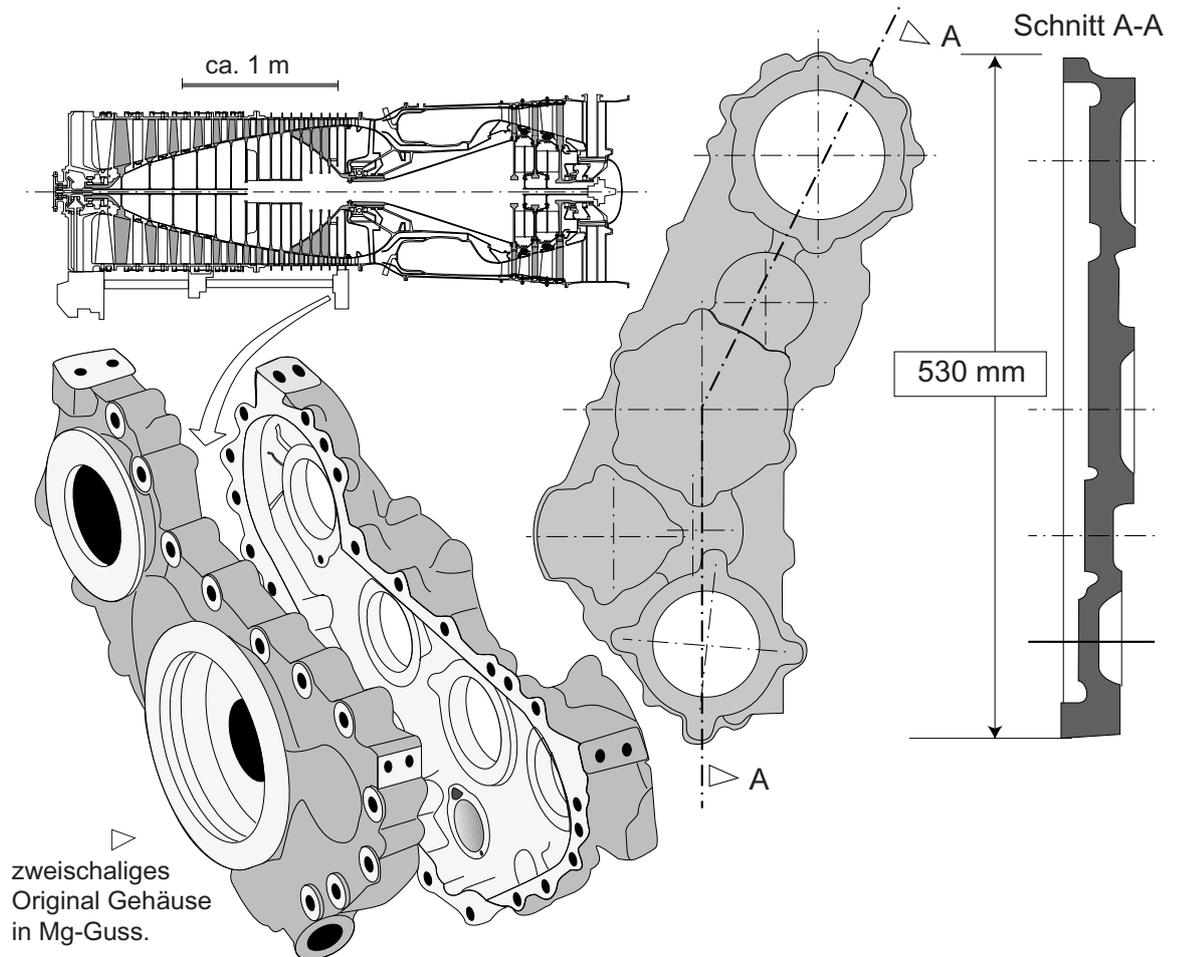
**Bild 12.2.1.10-8** (Lit. 12.2.1.10-23): Dieses zweiteilige Spritzgussteil wird aus einer C-Faser-verstärkten warmfesten Thermoplastmatrix (PEEK) hergestellt. Es ersetzt im vorderen (kälteren) Teil eines militärischen Turbotriebwerks die metallischen (hochfeste Titanlegierung) verschließbaren Öffnungen für Boroskope (Inspektionssonden). Diese Durchführungen bestehen aus zwei Teilen. Einem Auge, das am metallischen Außengehäuse verschraubt wird. In dieses wird nach der Inspektion das zweite Teil, ein abgedichteter Verschlussstopfen, geschraubt.

Neben der **Gewichtseinsparung** stand die **Kostenreduzierung** im Vordergrund. Während die Titanteile aufwändig aus dem Vollen gefräst werden, sind die Spritzgussteile vergleichsweise **kostengünstig**. Die **Sicherung** gegen Lösen bzw. Aufdrehen des Stopfens wurde auf einfache Weise mit der Ovalisierung des Gewindebereichs erreicht. Der niedrige E-

Modul ließ die notwendige **elastische Verformung** ohne Schädigung zu. Die **Fixierung der Eindruckkugeln** des Schlüsselvierkants wurde durch Radialbohrungen im Kopf, die bis zur Schlüsselöffnung reichen ermöglicht. Damit ließ sich das Spritzgusswerkzeug einfacher gestalten. **Dies ist ein schönes Beispiel für die Integration von Konstruktion, Technologie und Fertigung bei der Realisierung von FVK-Teilen.**

Das **Hauptproblem** zeigte sich jedoch erst bei der Serienanwendung. Im heißeren Triebwerksteil kamen weiterhin die geometrisch gleich aussehenden Metallteile mit einem deutlich höheren Anzugsmoment des Stopfens zum Einsatz. Wegen dem gleichen Schlüsselansatz kam es zu Verwechslungen des vorgeschriebenen Anzugsmoments. Die Kunststoffteile wurden überlastet (Bruch, Rissbildung). Das zeigt ein oft nicht beachtetes Problem beim Ersatz von Metallteilen durch FVK Teile. Der Konstrukteur hat dafür zu sorgen, dass **Verwechslungen nicht möglich** sind. Informationen allein genügen offensichtlich nicht.

Getriebegehäuse aus langfaserverstärktem CFK haben etliche Vorteile gegenüber konventionellen aus Al- oder Mg-Gusslegierungen.



Vordere Schale des realisierten Gehäuses in CFK-Pressmasse vor dem erfolgreichen Getriebetest auf einem Verspannungsprüfstand

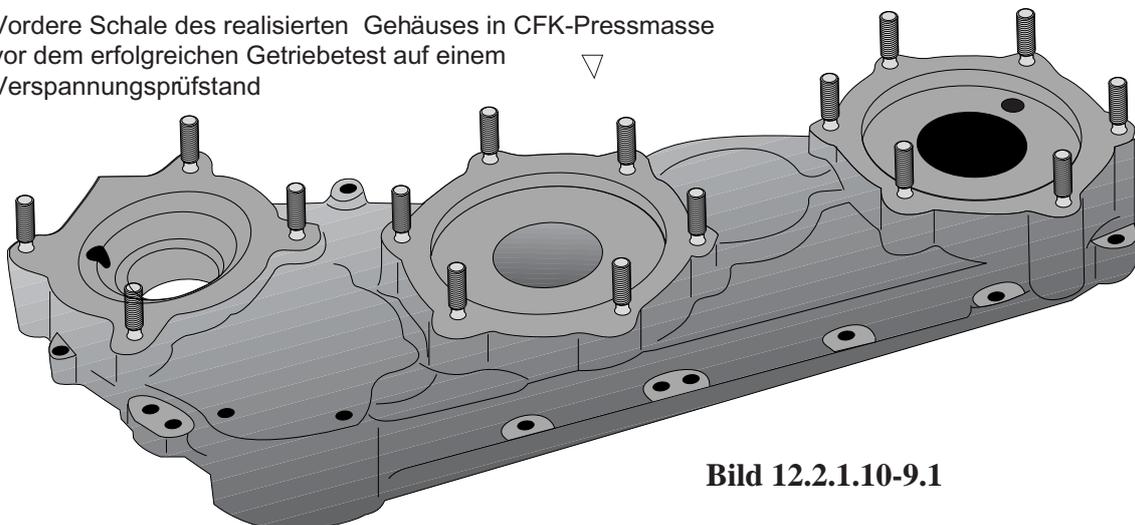


Bild 12.2.1.10-9.1

# Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden: Fasertechnik

**Bild 12.2.1.10-9.1 und Bild 12.2.1.10-9.2** (Lit. 12.2.1.10-21): Dieses Beispiel soll die vielfältigen Überlegungen beim Einsatz von FVK an einem Maschinenbauteil aufzeigen. Bereits in den 80er-Jahren wurde versucht, die Vorteile der Fasertechnik für **Gehäuse von Anbaugetriebenen** der Luftfahrtantriebe (Skizze oben links) zu nutzen. Diese Möglichkeit sollte in einem Forschungs- und Versuchsprogramm untersucht werden. Es handelte sich um relativ schmale mit einem Flansch verbundene Gehäusehälften. Dabei ging es darum **Nachteile der vorhandenen Metallversion** zu vermeiden.

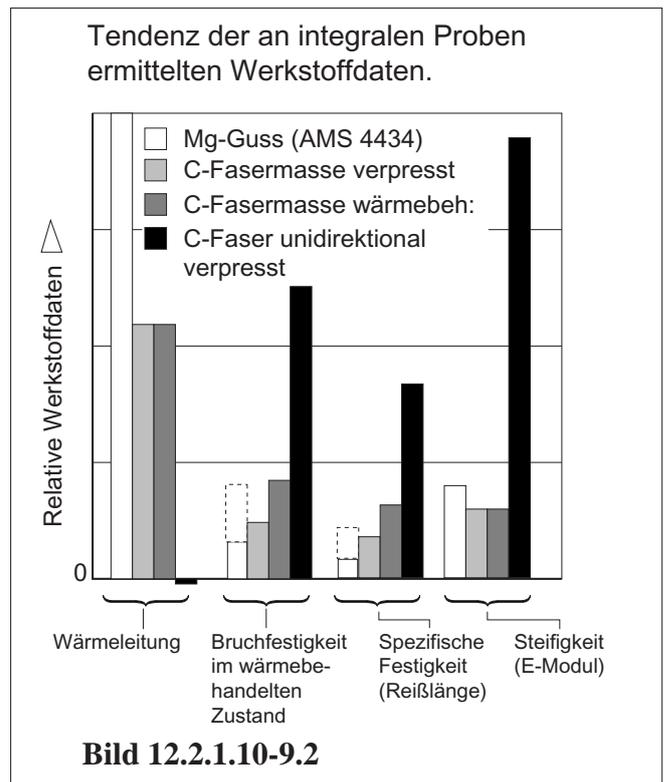
- **Korrosionsanfälligkeit**,
- **niedrige Schwingfestigkeit**,
- **radioaktive Belastung** des mit Thoriumoxid dispersiongehärteten Magnesium-Sandguss.
- **Durchgehende Porosität**, die aufwändig abgedichtet werden muss.
- **Hohe Wärmedehnung**, welche die Achsabstände der Zahnradwellen aus Stahl (Bild 12.2.1.10-10) im Betrieb merklich verändert.
- **Geringe Dämpfung** mit Neigung zu **Schwingungen und Vibrationen**. Dies ist auch der Grund für eine
- **intensive Schallabstrahlung**.
- **Überholung**: Probleme der für die Rissprüfung mit Eindringmittel notwendigen Entlackung. Dies führte wiederum zu Porosität mit Ölausschwitzungen.

Die **Auswahl** des Faser-Matrix-Werkstoffs musste den folgenden Kriterien genügen:

- **Niedriges Gewicht**,
- **isotropisches Werkstoffverhalten** wegen der mehrdimensionalen Spannungsverteilung.
- Realisierung einer **komplexen Gehäusegeometrie** (Skizzen Mitte) mit anspruchsvollem **Querschnittsverlauf** (Skizze oben rechts) bei minimaler Nachbearbeitung.
- Möglichst Anwendung von **Verschraubungen und Einsätzen** (Lagerhalterungen) der vorhandenen metallischen Version.
- Ausreichend kurze **Taktzeiten** für eine Seriengröße von ca. 1000 Stück.
- **Dauerbetriebstemperatur** < 70°C, örtliche

Spitzentemperatur bis 120°C.

- **Beherrschung der Wärmeabfuhr** trotz der vergleichsweise schlechten Wärmeleitfähigkeit des FVK. Möglicherweise müssen die Kapazität des Ölkühlers und/oder der Ölumlauflänge adaptiert werden.



**Material:** Es wurde eine mit 30 % C-Faser langfaserverstärkte (13 mm, siehe Def. Seite 12.2.1.10-1) hochreaktive Einkomponenten-Epoxid-Pressmasse (Bild 12.2.1.10-11) ausgewählt. Dies war notwendig, um eine ausreichend kurze Taktzeit zu erreichen. Sie sollte die provisorischen, aus FVK gefertigten, geheizten Pressformen nicht thermisch und mit der Presskraft überfordern. Die Masse wurde tiefgekühlt angeliefert und gelagert. Eine Temperierung erfolgte erst unmittelbar vor der Verarbeitung. Diese fand in einer mechanischen Presse mit Unter- und Oberwerkzeug bei 150°C und 50 bar Druck statt. So konnte lediglich eine kleine Zahl brauchbarer Gehäuse gefertigt werden. Aus einem wurden integrale Biegepro-

Fortsetzung auf Seite 12.2.1.10-19

Der Betriebstauglichkeitsnachweis erfolgt so weit wie möglich in Vergleichsversuchen mit der zu ersetzenden metallischen Variante.

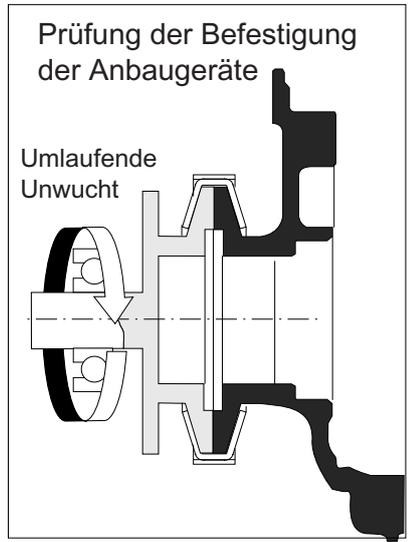
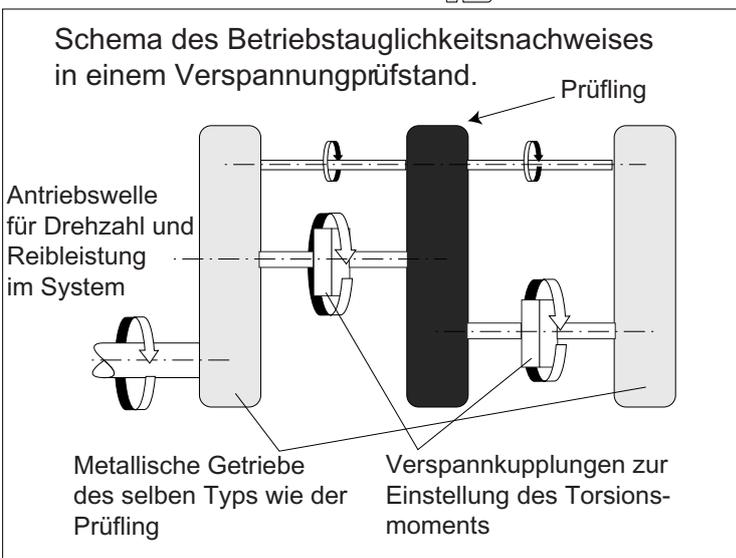
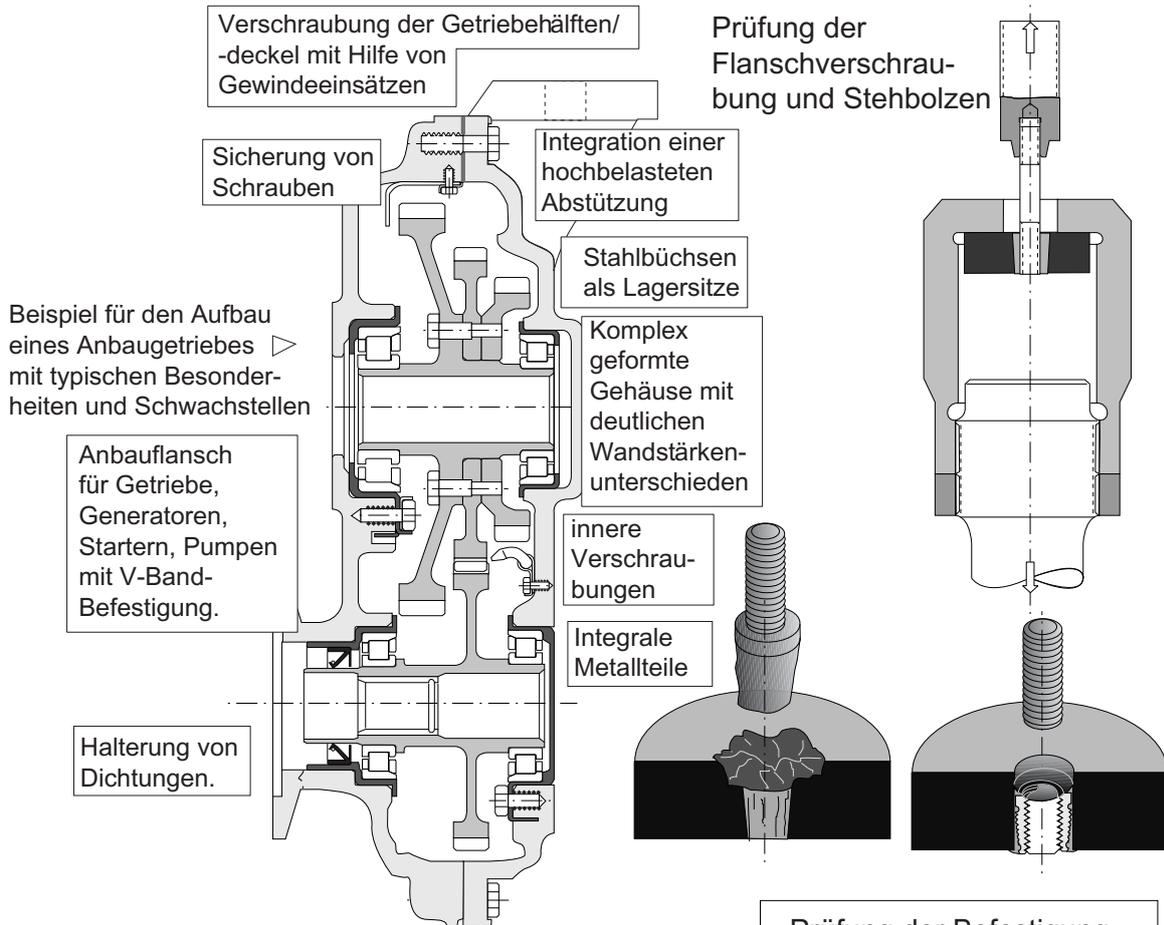


Bild 12.2.1.10-10

Fortsetzung von Seite 12.2.1.10-17

ben entnommen. Die Prüfergebnisse zeigt Bild 12.2.1.10-9.2. Das Belastungsverhalten wurde im Vergleich zur Mg-Legierung als ausreichend eingeschätzt. So war selbst gegenüber der leichten Mg-Legierung eine Gewichtsreduktion um bis zu 30 % zu erwarten.

**Bild 12.2.1.10-10** (Lit. 12.2.1.10-21 ): Die Abschätzung der Betriebstauglichkeit der Schraubenverbindungen erfolgte mit angepassten, separat hergestellten Proben. Dazu wurde ein Gehäuse vollkommen betriebsfertig hergestellt (Schnitt oben links). Die Erprobung fand in einem Verspannungsprüfstand gegen zwei Originalgehäuse **mechanisch und thermisch zyklisch** über 100 Stunden statt (Rahmen unten links). Dabei entsprachen Drehzahlen und Momente den Betriebslasten bis in einen maximal auftretenden Dauertemperaturbereich von 80 - 90°C. Die Temperaturen aller Lager wurden kontinuierlich überwacht. Das Gehäuse zeigt nach der Prüfung keine bedenklichen Veränderungen und wurde als betriebsgeeignet eingeschätzt.

Wie wichtig betriebsnahe Versuche sind, zeigte auch ein **bemerkenswerter Nebentbefund**. Es fiel auf, dass die unangenehm starke, hochfrequente **Schallabstrahlung** der metallischen Gehäuse bei FVK nicht auftrat. Das war auf Grund der **Dämpfungseigenschaften** auch leicht erklärlich.

Der **Befestigungsflansch** (V-Band), wie er für Generatoren und Pumpen verwendet wird, wurde einer gesonderten dynamischen Prüfung unterzogen. Dazu wurde der Gehäusedeckel auf eine Halteplatte mit dem Teilungsflansch gespannt. Der Befestigungsflansch wurde dann mit einem Unwuchterreger umlaufbiegebelastet (Rahmen unten rechts). Dieser Bereich ist erfahrungsgemäß bei den Originalgehäusen durch Schwingermüdung gefährdet (Band 1 Bild 6.4.2-6). Die Ergebnisse waren ermutigend. Als Schwachstelle erwies sich nicht die Aggregatbefestigung, sondern, eher unerwar-

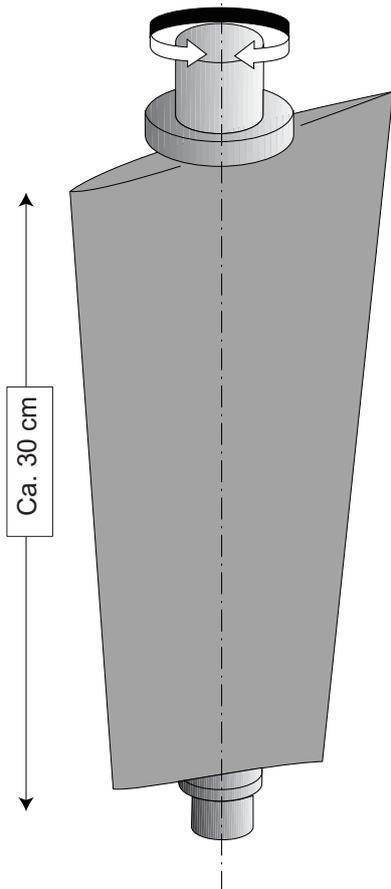
tet, das **Einschraubgewinde** am Aufspannflansch. Die Ergebnisse der entsprechenden Proben zeigten jedoch, dass mit einer Optimierung sogar bessere Werte als beim Originalgehäuse aus Mg-Guss zu erwarten sind.

Als Schwachstelle hatten sich die **Verschraubungen im FVK** herausgestellt. Deshalb wurden zur Optimierung separat verpresste **Gewindeeinsätze** (Skizzen oben rechts) mit eingeschraubten Bolzen erprobt. Die in den Metallgehäusen als Spirale (Typ Heli Coil ®) eingeschraubten Gewindeeinsätze wurden ersetzt. Es wurden am Markt erhältliche, für die vorgesehene Anwendung bewährte Gewindeeinsätze aus Messing verwendet. Sie wurden in die Bohrung geklebt. Die Prüfung erfolgte auf einem Hochfrequenzpulser in Axialrichtung. Kriterium für ein befriedigendes Verhalten war das Ermüdungsversagen des eingeschraubten Bolzens. Es zeigte sich, dass dazu die **Gewindebüchse ausreichend tief unter der Oberfläche** positioniert werden muss.

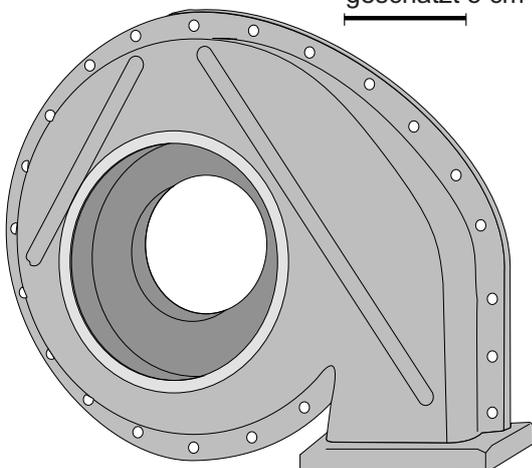
**Fazit:** Die Untersuchungen ergaben eine realistische Chance für die Serieneignung eines FVK Getriebegehäuses. Ein tatsächlicher Ersatz der vorhandenen Gehäuse war jedoch wegen der umfangreichen Zulassungsprozedur nicht vorgesehen. Trotzdem wird diese **Technologie gerade im Hinblick auf E-Mobilität und Leichtbau wieder an Bedeutung gewinnen**. Dabei kann auch die **elektrische Isolationswirkung von Interesse sein**. So lassen sich **Lagerschäden durch Stromdurchgang vermeiden** (Band 1, Bild 5.12.1-5). Ein weiterer, nicht zu unterschätzender Vorteil ist die **geringe Schallabstrahlung im Vergleich zu Leichtmetallgehäusen**. Das ist für den **Fahrkomfort sehr vorteilhaft**.

## Beispiele für RTM-Bauteile

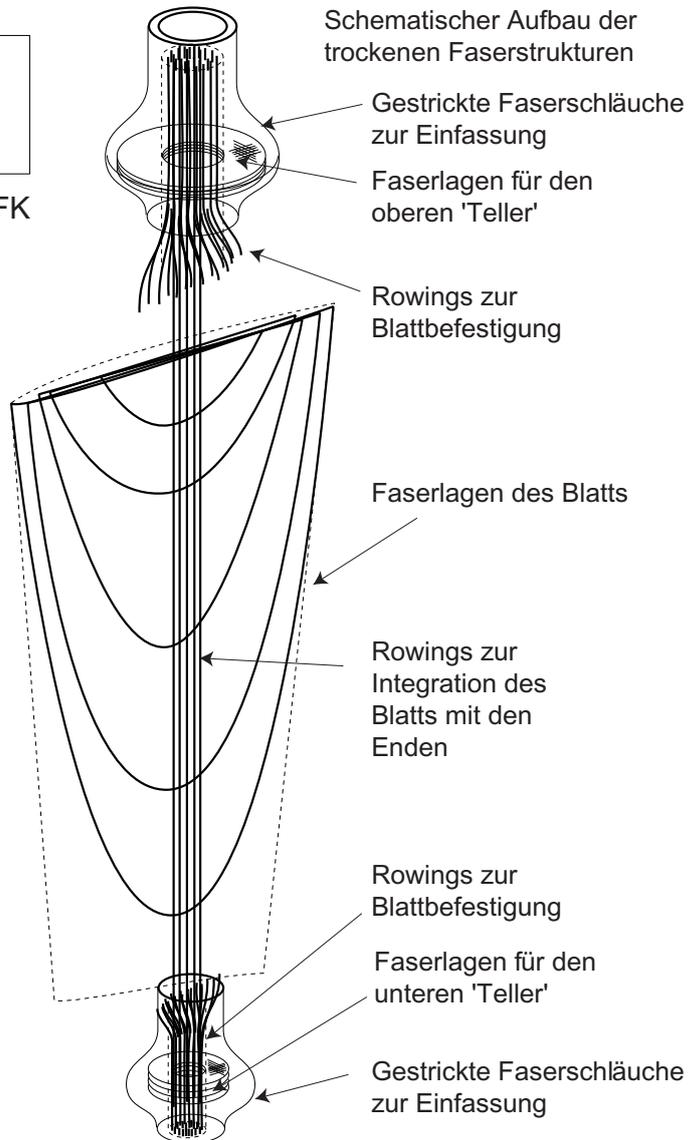
Drehbare Leitschaufel aus CFK



Gebälsegehäuse



Schematischer Aufbau der trockenen Faserstrukturen



Lenkerhörnchen für Sportfahräder

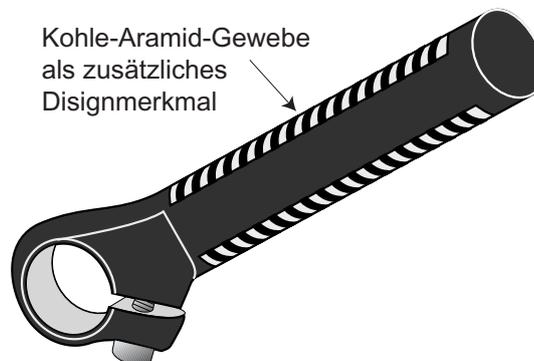


Bild 12.2.1.10-11

**Bild 12.2.1.10-11** (Lit. 12.2.1.10-1, Lit. 12.2.1.10-3, Lit. 12.2.1.10-6 und Lit. 12.2.1.10-23): Das **RTM Verfahren** (Bild 12.2.1.10-1 „F“) bietet sich für die Herstellung von Maschinenelementen mit typisch komplexen Formen und mehrachsigen Spannungszuständen an. Dabei wird ein **Trockenfaser-Vorformling** in eine dann zu verschließende Form gelegt. Anschließend wird Harz, gegebenenfalls nach vorheriger Evakuierung, eingespritzt. Der trockene Vorformling kann aus unterschiedlichen Fasern und Gelegen wie Geweben oder Gestricken aufgebaut sein (Skizze oben rechts). Diese richten sich nach den Angaben des Konstrukteurs, um die gewünschte Festigkeit und Steifigkeit zu erzielen. In die Form lassen sich verbleibende Kerne (z.B. Schäume) einlegen. Typisch sind Hybridbauweisen mit integrierten Metallformstücken die am Teil verbleiben. Beispielsweise eine Erosionsschutzkante (Bild 12.2.1.10-7.2) oder kraftübertragende Auflageflächen wie am unten rechts dargestellten Klemmgriff. Das Gebläsegehäuse unten links zeigt, dass sich auch dünnwandige Strukturen herstellen lassen.

Mit dem RTM-Verfahren werden heute Serien von über  $10^5$  relativ großer Bauteile (z.B. Flugzeugspanten) in Taktzeiten von wenigen Minuten hergestellt. Der Qualitätsnachweis erfolgt über die Prozessstabilität und an Hand von Stichproben. Auch eine 100% zerstörungsfreie Prüfung ist je nach Anwendungsfall möglich.

#### **Anwendungskriterien und Besonderheiten von Epoxid-Harzsystemen:**

##### **Einkomponentensysteme (1K):**

- Definierte Zusammensetzung, da keine Anmischung mit dem Härter vor Ort.
- Gekühlte Lagerung.
- Säuberung der durchflossenen Leitungen von Harzrückständen.
- Lange Aushärtungszeiten.

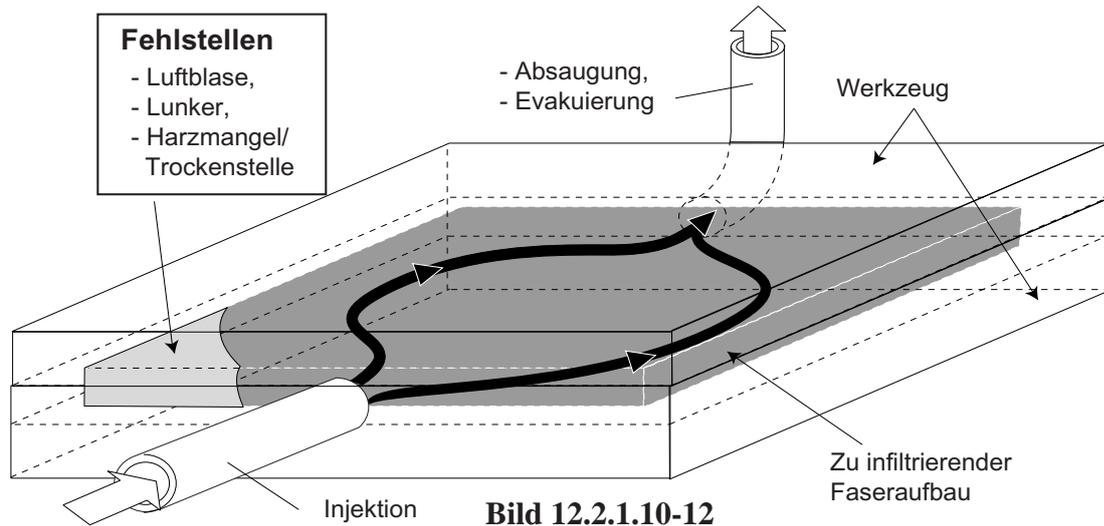
##### **Zweikomponentensysteme (2K) :**

- Kurze Aushärtungszeiten.
- Voraussetzung ist ein konstantes Mischungs-

verhältnis, auch bei unterschiedlichem Forminnendruck.

- Keine Aushärtung der Komponenten, d.h. lange Topfzeit’.
- Einsatz interner Trennmittel oder Additive möglich (siehe Kapitel 12.2.1.10.1 „Trennmittel“ ).

Eine der größten Herausforderungen bei Injektionsverfahren sind Position, Anordnung und Verlauf der 'Anschnitte' für Absaugung/Evakuierung/Austritt und Injektion.



**Bild 12.2.1.10-12:** Gerade bei Injektionsverfahren wie RTM ist ein betriebsnaher, selbstkritischer Nachweis des Serienverfahrens erforderlich. Erfahrungsgemäß können Defizite mit Zeitverzögerung und hohen Zusatzkosten ein ganzes Projekt gefährden. Besonders kritisch ist nach einem ersten erfolgreich hergestellten Bauteil der Schluss, das Verfahren zu beherrschen. Erst wenn eine Anzahl guter Teile hintereinander hergestellt werden konnten weist dies auf ein tragbares Risiko für eine

Serienproduktion hin. Trotzdem sind böse Überraschungen nicht ganz auszuschließen. Das Bild zeigt das Problem örtlich **ungenügender Harztränkung**. Dies zu vermeiden erfordert die Kenntnis der Harzverteilung und die dabei wirkenden werkzeugspezifischen Einflüsse. Hier können Computersimulationen hilfreich sein.

**Bild 12.2.1.10-13:** Wegen des hohen Drucks herrscht im luftgefüllten Autoklaven ein entsprechend großes **Sauerstoffangebot**. Damit besteht die Gefahr der **Selbstentzündung ungeeigneter Hilfsstoffe**. Aus diesem Grund sind diese zu überprüfen. Dazu gehören:

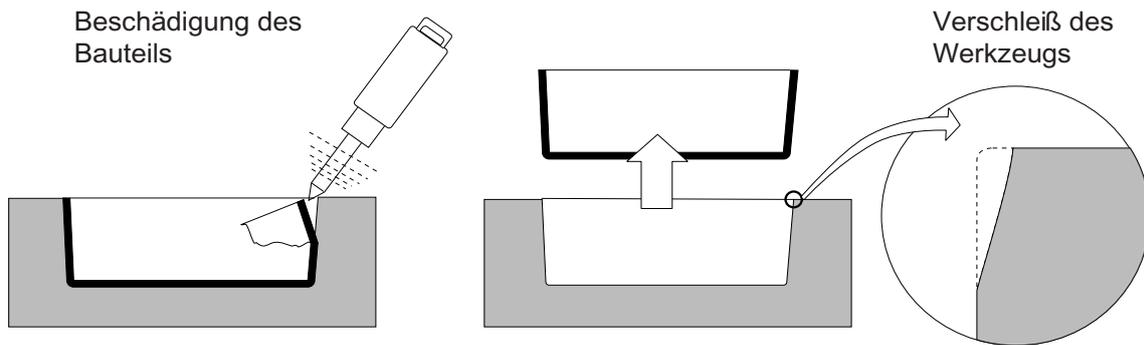
- Trennmittel,
- Folien,
- Dichtungen und Dichtungspasten.



Anmerkung: Nach Vorschlag von H. Hochleitner müsste sich der **Sauerstoffgehalt in der Autoklavenluft** auf einfache und preiswerte Weise **unter unbedenkliche 15 %** absenkeln lassen. Dafür bietet sich das bekannte **Vorschalten einer Membrantechnik** an.

## 12.2.1.10.1 Oberflächenbehandlung von Formwerkzeugen der FVK-Herstellung: Trennmittel, Reinigungsmittel und Verschleißschutz

### Probleme bei der Trennung von Werkzeug und Werkstück



Wer selbst in Entwicklung und Produktion von FVK-Bauteilen tätig war weiß von der großen Bedeutung der **Behandlung ausformbeanspruchter Werkzeugoberflächen** (Lit. 12.2.1.10-32). Es wundert deshalb, warum so wenig dazu in Unterlagen zur Lehre zu finden ist. Vielleicht liegt es daran, dass es sich um Know How handelt, welche Medien wie zu verarbeiten sind und welchen Einfluss sie auf Werkzeug und Bauteil haben.

**Trennmittel** beeinflussen die Fertigung von FVK-Bauteilen entscheidend. Dabei stehen ihre **Verschleißschutzwirkung**, das Verhindern von **Anklebungen** und die **Schmierwirkung/Gleitfähigkeit** zum Minimieren der Reibungskräfte beim Ausformen im Vordergrund. Weiter soll das Trennmittel eine optimale **Oberflächenqualität/Anmutung** (z.B. Glanz) des Bauteils ermöglichen. Vor dem Polieren erleichtern matte Trennschichten das Erkennen ungenügend behandelter Zonen.

Ein Trennmittel soll das Bauteil/Laminat über den **gesamten Aushärtungsvorgang fixieren**. Ein vorzeitiges Ablösen (**Pre-Release**) muss verhindert werden, um Ausschuss zu vermeiden.

- **Fertigungskosten** hängen nicht zuletzt von der **Taktzeit** ab. Diese wird vom Aufbringen und Polieren des Trennmittels sowie der späteren Reinigung von Form und Bauteil und der Zeit für die Ausformung bestimmt.

- Zusätzlich können hohe Kosten durch Reparatur oder Ersatz der **Werkzeuge/Formen** auf Grund von '**Verschleiß**' (Lit. 12.2.1.10-28) entstehen. Stumpfe Werkzeuge können die Bearbeitungsflächen schädigen (Kapitel 12.2.1.10.3).

- Schlechte Ausformung kann zur **Beschädigung der Bauteile** führen. Damit entsteht Nacharbeit oder gar Ausschuss.

- **Anhaftendes Trennmittel** kann eine **Nachbehandlung** des Bauteils wie Lackieren verhindern und muss gegebenenfalls **aufwändig entfernt** werden. Bei der Reinigung besteht die Gefahr der **Verschleppung des Trennmittels** (Band 4, Bild 18.3-2.1), wobei Bindefehler an anderen Bauteilen ausgelöst werden.

Man unterscheidet mehrere Trennsysteme:

- **Universelle Formtrennmittel** auf flüssiger oder pastöser Basis die getrocknet, bei manchen Systemen auch heiß gehärtet, und nachpoliert werden. Sie sind bei jedem Takt zu erneuern. Zu berücksichtigen ist, dass häufig die sichere, optimale **Trennwirkung der Form erst nach mehreren Taktzyklen** eintritt. Im günstigen Fall reicht sie dann auf Grund eines dünnen, verbleibenden Films auf der Werkzeugoberfläche für mehrere Entformungen (Lit. 12.2.1.10-31). Wichtig ist, dass

möglichst **wenig Trennmittel am Bauteil** verbleibt, um **Nachbehandlungen** nicht zu erschweren. Besonders problematisch können wegen der Verschleppungsgefahr und der Kontamination anderer Bauteile (z.B. Klebeflächen und Lackierungen) Trennmittel auf Silikonbasis sein (Band 4, Bild 18.3-2.1).

- **Semipermanente Formtrennmittel** können ohne Versiegelung der Form auskommen. Günstig für den Umweltaspekt sind solche auf Wasserbasis. Sie bilden nach kurzer Aushärtung einen widerstandsfähigen Polymerfilm (Lit. 12.2.1.10-30) der auf der Form verbleibt und **nicht auf das Bauteil übertragen** wird. Dieser ermöglicht bereits beim einmaligen Auftrag ein **mehrfaches Ausformen**. Ein weiterer Vorteil ist, dass eine Nachbehandlung wie Lackieren keine zusätzliche Reinigung erfordert. Es werden auch lufttrocknende Systeme angeboten die keine Heißaushärtung benötigen und bei denen die Gefahr eines unzulässigen Trennmittelaufbaus in der Form nicht besteht.

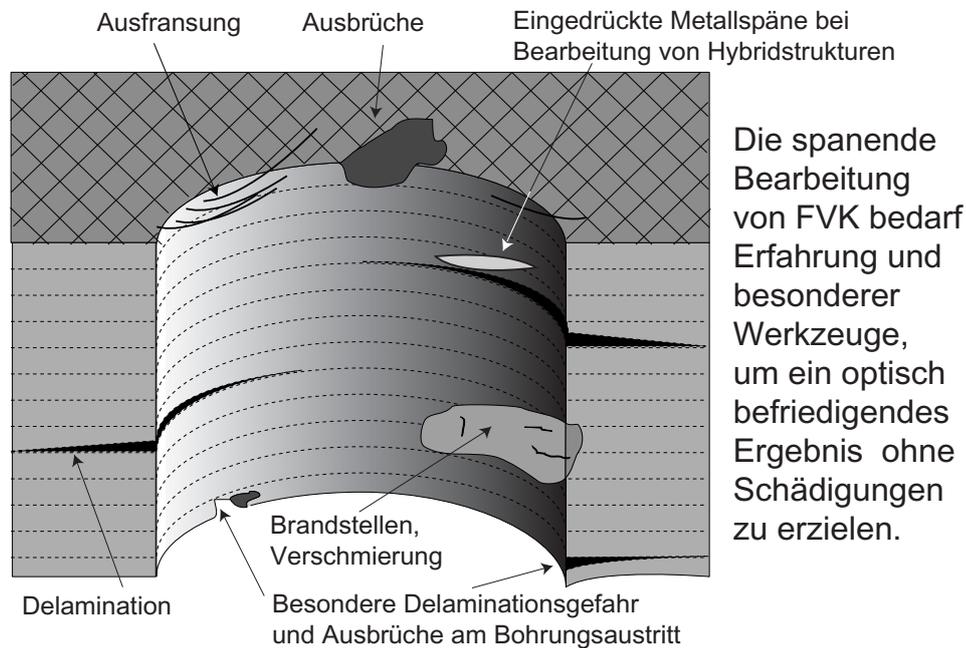
‘**Release Systeme**’ werden mit einem vorbereitenden Versiegler oft in mehreren Schichten aufgetragen. Ein solches System nutzt mehrere Hilfsstoffe: Reiniger, Versiegler, Primer und Trennmittel. Besonders bei großen Formteilen mit hohem Gewicht besteht die Gefahr des ‘**Pre-Release**’, einem vorzeitigen, beschädigungskritischen Ablösen des Bauteils in der Form.

- **Trennfolien** (Lit. 12.2.1.10-32) ermöglichen trennmittelfreies Arbeiten. Es handelt sich um tiefziehfähige Polymerfolien die mit einer **aufgedampften sehr dünnen Trennschicht** versehen sind. Das System lässt sich um ca. 300 % Dehnen. Die nach dem Entformen am Bauteil haftende Folie lässt sich **rückstandslos abziehen**. Das ermöglicht eine Prepregverarbeitung verschiedener Faser-Matrix-Systeme im Autoklaven bis zu 180°C. Vorteile einer auszuschließenden Trennmittelkontamination ist die **Weiterverarbeitung der Bauteile** (z.B. Lackieren, Verkleben) **ohne Nachbehandlung**. Zusätzlich wird eine Formenreinigung von Trennmittelresten gespart. Folien lassen sich bereits in der Form mit einer Schicht (z.B. Lackschicht) versehen. Diese kann mit hoher Oberflächenqualität auf das Bauteil übertragen werden und verbleibt dort nach dem Abziehen der Folie.

- **Metallbeschichtungen und metallverstärkte Beschichtungen** (Lit. 12.2.1.10-29): Alle Schichten erfordern zusätzlich eine Trennmittelbehandlung. Ziel ist, den **Verschleiß der Form zu verringern**, d.h. die Standzeit zu erhöhen. Die Schichten sind gerade für Formen aus FVK geeignet, weil die Abscheidungstemperatur niedrig ist. Galvanisch abgeschiedene Schichten eignen sich besonders auf Aluminiumwerkzeugen. Schichtneuentwicklungen (bis 150°C) sind für Werkzeuge aus FVK geeignet und enthalten metallische Verstärkungspartikel. Sie lassen sich lackartig aufzutragen. Diese 0,1 - 0,8 mm starken Schichten haben nicht die Nachteile galvanischer Schichten wie hohe Eigenspannungen/Wärmespannungen (Ablösungsgefahr) und Mikrorissigkeit.

# Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden: Fasertechnik

## 12.2.1.10.2 Spanende Bearbeitung von FVK-Bauteilen.



Die Zerspanung von FVK erfordert **Faser- und matrixspezifische Werkzeuge** und **Verfahrensparameter** (Lit. 12.2.1.10-35). Gewöhnlich wirken die **Fasern** (C-Faser, Glasfaser und Aramid) sehr verschleißend auf Schneidwerkzeuge, was zu einem **Standzeitproblem** führt. Die Qualität der Schnittfläche, insbesondere der Kanten hängt auch von der Art der **Faserlagen** (Gewebe, Gestricke, uni- oder mehrdirektional) ab. Besonders **Aramid** ist äußerst zäh und neigt zum Ausfransen. Auch die **Matrix** spielt eine wichtige Rolle. Die **schlechte Wärmeleitfähigkeit** führt zu örtlichen **Überhitzungen** ('Brandstellen') mit Erweichungen, bleibenden Schädigungen (Versprödung, Rissbildung), Verschmierung und Ablösen der Faserlagen (Delamination). Die Beherrschung der anspruchsvollen Zerspanbarkeit ist eine Voraussetzung für **Reparaturen** und flächige Verbindungen hochbelasteter FVK-Bereiche. Dies erfordert eine **Schäftung**, bei der beide Verklebungsflächen durch Zerspanen (Schleifen, Fräsen) hergestellt werden. Verlangt ist eine extrem gute Oberflächenqualität mit möglichst ungeschädigten Faserlagen und hoher Ebenheit. Das ist eine Voraussetzung für den Einsatz von FVK bei großen Verkehrsmaschinen. Hier ist immer mit örtlichen Beschädigungen wie Delaminationen (z.B. bei der Beladung mit einem Hebefahrzeug) zu rechnen. In letzter Zeit wurden in der Verfahrensentwicklung wichtige Fortschritte unter Verwendung automatischer Fräsbearbeitung mit Robotereinsatz (Lit. 12.2.1.10-34) gemacht.

Beim Zerspanen, insbesondere dem Bohren, werden prinzipbedingt **Fasern angeschnitten**. **Kohlefasern** verhalten sich wie Edelmetalle, sie sind **elektrisch leitend und korrosionsfest**. Das führt mit vielen Metallen zur **Elementbildung**. Beispielsweise sind Nieten (Al-Legierungen, Stähle) im Kontakt korrosionsgefährdet. Einzig **Titanlegierungen** werden nicht angegriffen.

**Wichtiger Hinweis:** Bei der Zerspanung von CFK entstehen **elektrisch leitende Partikel**. Dieser Staub kann in elektronische Geräte (z.B. Steuerungen) oder Elektromotoren über die Kühlung eindringen, sich ansammeln und zum Ausfall führen. Deshalb sind geeignete Absaugungen (Schutz vor Staubexplosion, Band 1 Kapitel 5.11.1) und Filter vorzusehen. Die Bauteile müssen staubfrei sein. Das gilt auch bei der Auslieferung bearbeiteter Teile, um solche Probleme im späteren Betrieb zu vermeiden.

Zerspanungswerkzeuge (Bohrer, Fräser) für FVK sind hoher Verschleißbeanspruchung ausgesetzt. Dies erfordert eine geeignete Geometrie und extreme Härte der Schneiden.

Beispiel:  
Kernbohrer mit  
hartstoffbesetzter  
Schneide

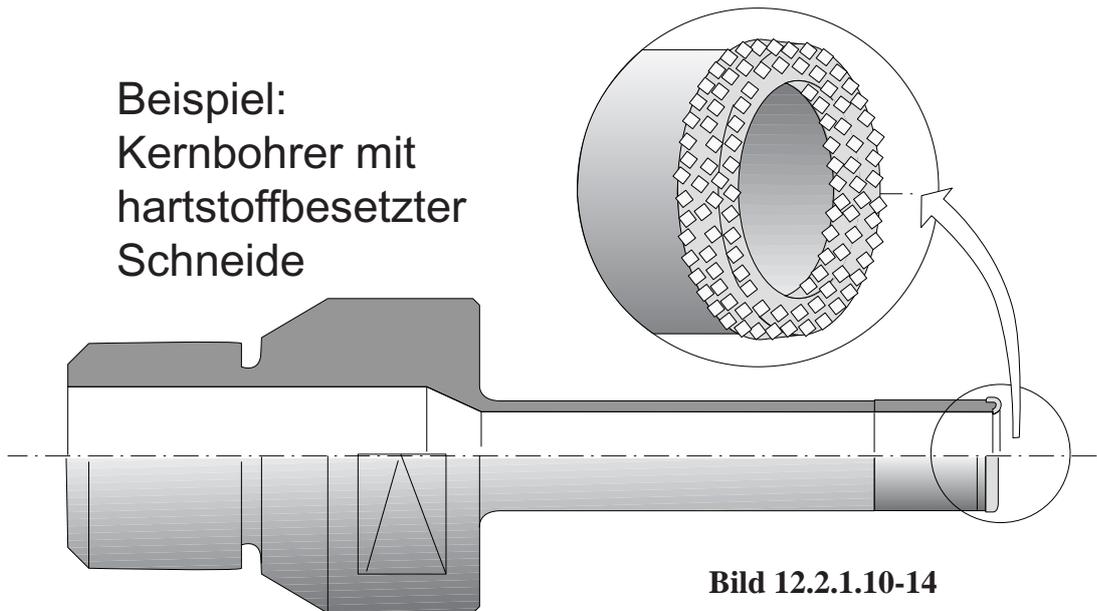


Bild 12.2.1.10-14

**Bild 12.2.1.10-14** (Lit. 12.2.1.10-34 und Lit. 12.2.1.10-36): Die spanende Bearbeitung von FVK erfordert **spezifisch angepasste Schneidwerkzeuge** wie Bohrer und Fräser.

Wichtig sind die Schneidfähigkeit und der Spantransport. Je besser das Werkzeug schneidet, umso weniger Wärme entsteht. Das reduziert auch Anhaftungen an den Schneiden, die wiederum eine Wärmeenergie unterstützen. Auch die Verschmierung von Harz wird geringer.

Eine besondere Herausforderung sind **FVK-Metall-Hybridstrukturen** (Lit. 12.2.1.10-37) bei denen beide Werkstoffarten in einem Arbeitsgang zerspannt werden müssen. Hier ist ein Eindringen von Metallspänen in die Bearbeitungsfläche zu vermeiden.

Am Markt werden unterschiedliche Werkzeuge angeboten, welche die Forderungen berücksichtigen.

- **Kernbohrer**: Die Schnittkante des hohlen Bohrers ist gewöhnlich mit **Hartstoffpartikeln**, insbesondere **Diamantsplittern** belegt. Es gibt jedoch auch Ausführungen mit **Hartmetallschneiden** und besonderer Schneidengeometrie.

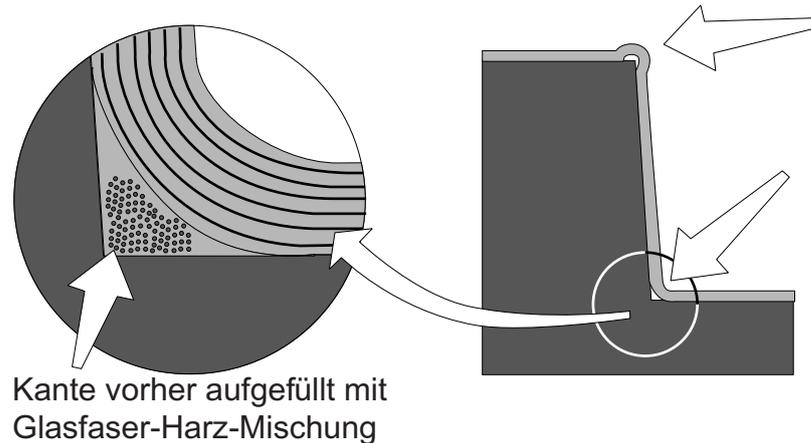
- **Spiralbohrer mit Sichelspitze** oder Schnittwinkeln  $\leq 100$  Grad ermöglichen auch am Bohrungsausstritt ein delaminationsfreies Ergebnis.

- **Hochleistungs-Kühlkanalbohrer** mit mehreren schneidenden Führungsphasen gewährleisten schadenfreie, hochgenaue Bohrungen.

- **Fräser** mit besonderer, multipler Verzahnung nutzen hartstoffbeschichtetes Hartmetall. Das ermöglicht eine vibrationsarme Bearbeitung bei langen Standzeiten.

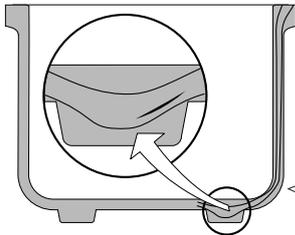
## 12.2.1.10.3 Konstruktive Gestaltung von FVK-Bauteilen und Formwerkzeugen.

### Ungünstige Gestaltung der Ecken provoziert Fertigungsfehler und Bauteilschwachstellen



Die **Konstruktion** des FVK-Bauteils bestimmt entscheidend **potenzielle Probleme des Fertigungsprozesses**. Eine Voraussetzung für die Realisierung ist es deshalb, bestimmte Grundregeln einzuhalten (Lit. 12.2.1.10-3). Im Folgenden liegt der Schwerpunkt auf der **Formgebung** der Bauteile in Hinblick auf die **Formwerkzeuge**. So sind z.B. zu scharfe Ecken und Kanten häufige Ursache für nicht ausgefüllte Bereiche, Ablösungen der Faserlagen, Harzansammlungen mit Ausbrüchen, Rissen und Verzug. Mit der geeigneten Formgebung lassen sich fertigungsbedingte Fehler und Schwachstellen in den Bauteilen weitgehend vermeiden (Bild 12.2.1.10-15). Die Gestaltung muss natürlich die bauteilspezifische Fertigungstechnologie berücksichtigen. Diese dürften z.B. bei RTM-Werkzeugen (z.B. gute Infiltration des gesamten Formvolumens, Bild 12.2.1.10-12) anders sein als für Laminataufbauten (z.B. Kantengestaltung). Hierzu ist Erfahrung des Konstrukteurs notwendig.

## Konstruktive Gestaltung nutzt Lehren aus Schäden und Problemen.

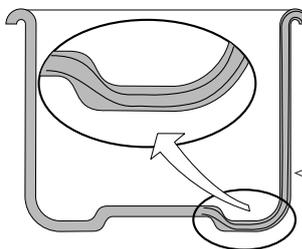


Schwindungsrisse durch Eigenspannungen in Harzansammlungen vermeiden

◁ **Ungünstig**

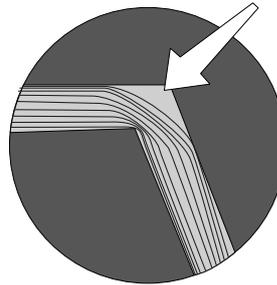
### Regeln:

- Wandstärken so dünn wie möglich.
- Gleichmäßiger Lagenaufbau.
- Bei Harzansammlungen besteht Rissgefahr durch Schrumpf-/Ecken und Kanten mit ausreichenden Radien.

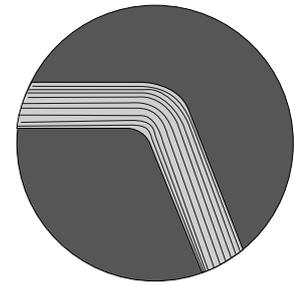


- Geringere Rissgefahr im Harz,
- besserer Kraftfluss,
- höhere Formsteifigkeit
- geringeres Gewicht

◁ **Günstig**



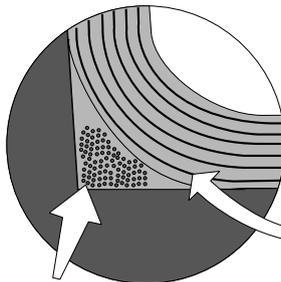
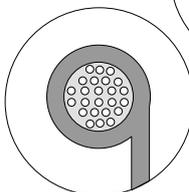
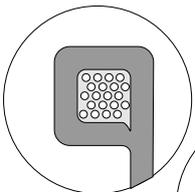
△ **Ungünstig**



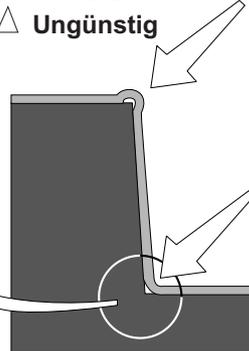
△ **Günstig**

Zu kleine Radien begünstigen das Abheben der Faserlagen und damit Lunker. Diese lassen sich mit vorher längs der Kante eingelegten Rovings vermeiden.

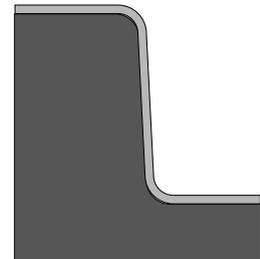
▽ Eingebettete Versteifungen



Kante vorher aufgefüllt mit Glasfaser/Harz-Mischung

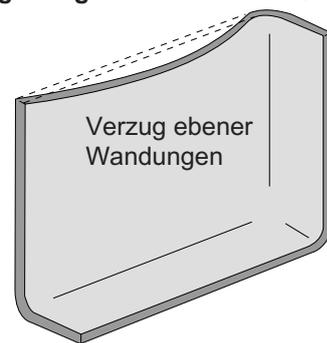


△ **Ungünstig**



△ **Günstig**

Wirksamkeit der Kantenversteifung



Wenn Hinterschnidungen unvermeidbar, Werkzeugtrennebenen vorsehen.

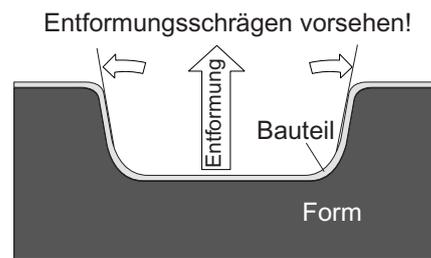
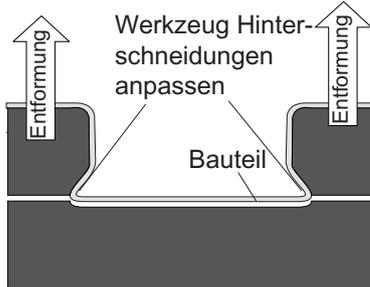


Bild 12.2.1.10-15

## Literatur zu Kapitel 12.2.1.10

- 12.2.1.10-1** R.Lässig, M.Eisenhut, A.Mathias, R.T.Schulte, F.Peters, T.Kühmann, T.Waldmann, W.Bergemann, „Serienproduktion von hochfesten Faserverbundbauteilen“, Studie, Sept. 2012, [www.rolandberger.de/.../Roland\\_Berger\\_Serienproduktion\\_hochfest](http://www.rolandberger.de/.../Roland_Berger_Serienproduktion_hochfest), Seite 1-70.
- 12.2.1.10-2** J.Enz, C.Sigolotto, „Vom Flugzeugbau über den Unimog zu Premium-Fahrzeugen“, „CFK-Strukturbauteile im Automobilbau - Carbon Composites eV“, ACE 1/07 (2007), [www.carbon-composites.eu/sites/carbon...eu/.../02\\_V\\_af\\_07.pdf](http://www.carbon-composites.eu/sites/carbon...eu/.../02_V_af_07.pdf), Seite 1-9.
- 12.2.1.10-3** W.H.Müller, „Verbundwerkstoffe in der Herstellung; Kenngrößen der Einzelschicht und des Laminats; Gestaltungshinweise“, April 2011, [www.ifm.tu-berlin.de/.../Verbundwerkstoffe/.../VL4\\_Herstellung\\_](http://www.ifm.tu-berlin.de/.../Verbundwerkstoffe/.../VL4_Herstellung_), Seite 1-64.
- 12.2.1.10-4** A.Schmidt, „Neue Fertigungsverfahren für die Großserienfertigung von Faserverbundwerkstoffen im Automobilbau“, Stand Oktober 2012, [http://www.zimt.unisiegen.de/fertigungsautomatisierung/index.php/Neue\\_Fertigungsverfahren\\_f%C3%...](http://www.zimt.unisiegen.de/fertigungsautomatisierung/index.php/Neue_Fertigungsverfahren_f%C3%...), Seite 1-13.
- 12.2.1.10-5** „Schrauben aus Kunststoff übertrumpfen solche aus Titan“, VDI Nachrichten, 20.01.2006, <http://www.vdi-nachrichten/Schrauben-aus-Kunststoff-uebertrumpfen-solche-aus-Titan/259...>, Seite 1-5.
- 12.2.1.10-6** S.Torstrick, M.Meyer, M.Wiedemann, „Endkonturnahe Fertigung von CFK-Bauteilen in hoher Stückzahl“, 2011, [www.dlr.de/.../DLR\\_Wissenschaftstag\\_2011\\_Endkonturnahe\\_Fertigung](http://www.dlr.de/.../DLR_Wissenschaftstag_2011_Endkonturnahe_Fertigung), Seite 1-16.
- 12.2.1.10-7** M.R.Khoshravan, A.Paykani, „Design of a Composite Drive Shaft and its Coupling for Automotive Application“, Journal of Applied Research and Technology, 10.Dez. 2012, [cibermetica.ccadet.unam.mx/vol10.../design\\_2p...](http://cibermetica.ccadet.unam.mx/vol10.../design_2p...), Seite 826 - 834.
- 12.2.1.10-8** „High Performance Carbon Fiber Driveshafts“, „Advanced Composite Products & Technology, Inc.“, 2008, <http://www.acpt.com/Products/Composite-Driveshafts.aspx>, 2 Seiten.
- 12.2.1.10-9** „Simulationsanwendungen von ESI für die Fertigung von Verbundfaserbauteilen“, lightweightdesign, 22.02.2012, <http://app.gwv-fachverlage.de/lwd/index.php;do=show/site=lwd/sid=106735801750d850593c10822619...>, 2 Seiten.
- 12.2.1.10-10** B.B.Deshmukh, „Design and Analysis of Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) Leaf Spring.“, Nov. 2011, <http://ieeeplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=6120559&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee...>, 2 Seiten.

- 12.2.1.10-11** D.A.Budan, T.S.Manjunatha, „Investigation on the Feasibility of Composite Coil Spring for Automotive Applications.“, ‘World Academy of Science, Engineering and Technology 46 2010’, <https://www.waset.org/journals/waset/v46/v46-119.pdf>, Seite 662 - 666.
- 12.2.1.10-12** B.Copping, „Audi saves weight with plastic coil Spring.“, 2012, Zeitschrift ‘Plastic News China’, [http://plasticnews.com/china/english/printer\\_en.html?id=1333118378](http://plasticnews.com/china/english/printer_en.html?id=1333118378), 1 Seite.
- 12.2.1.10-13** R.Aldi, „Static Fixturing and Testing of Torsional Shafts in Combined Loading.“, April 2009, [www.asee.org/.../Static-Fixturing-and-Testing-of...](http://www.asee.org/.../Static-Fixturing-and-Testing-of...), Seite 1-14.
- 12.2.1.10-14** A.M.Wahl, „The design and manufacture of a spring using composite materials.“, Fa. Lightweight Structures B.V., 2012, [www.lightweight-structures.com/...design-and-m...](http://www.lightweight-structures.com/...design-and-m...), Seite 1-10.
- 12.2.1.10-15** K.S.Kim, W.T.Kim, D.G.Lee, „Optimal tubular adhesive-bonded lap joint of the carbon fiber epoxy composite shaft“, Zeitschrift ‘Composite Structures’ Volume 21, Issue 3, 1992, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0263822392900166>, Seiten 163 - 176.
- 12.2.1.10-16** L.Budde, „Technische Innovationen und Trends in der Fügetechnik - Alternativen und/oder Ergänzungen zu Schrauben?“, Vortrag, 15.05.2003, [www.fds-online.de/publikationen/vortrag1.pdf](http://www.fds-online.de/publikationen/vortrag1.pdf), Seite 63.
- 12.2.1.10-17** „Carbonschrauben“, Firmenangaben Stand Dez. 2012, <http://www.carbon-team.de/Ishop,showrub,2004g,d,,carbonschraube,,,.htm>, Seite 1-3.
- 12.2.1.10-18** „Pultrusion“, Stand oct. 2012, <http://en.wikipedia.org/wiki/Pultrusion>, Seite 1-3.
- 12.2.1.10-19** J.Frischbier, S.Sikorski, „Crisp-Faserverbund-Fanschaufel - Strukturmechanik und Bauweisentechnologie“, Plenarvortrag Nr. 90-174 der ‘DGLR Jahrestagung, Friedrichshafen, 1.-4. Okt. 1990, [www.gbv.de/dms/tib-ub-hannover/211510491.pdf](http://www.gbv.de/dms/tib-ub-hannover/211510491.pdf), Seite 1-9.
- 12.2.1.10-20** A.Rossmann, W.Feist, H.Zech., „Gearbox Casings of Fibre-Reinforced Plastic for Aero Engines“, Vortrag, 1977, Seite 1-18
- 12.2.1.10-21** A.Rossmann, “Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken - Problemorientierte Triebwerkstechnik Band 3“, 2000, ISBN 3-00-017733-7, Kapitel 14.
- 12.2.1.10-22** A.Rossmann, “Die Sicherheit von Turbo-Flugtriebwerken - Problemorientierte Triebwerkstechnik Band 2“, 2000, ISBN 3-00-008429-0, ,Kapitel 8.2.
- 12.2.1.10-23** S.Sikorski, “Anforderungen an FVK-Bauteilen in Flugtriebwerken“, Berlin, Vortrag am 11. Juni zur Konferenz an der ILA 8.-13.06.2010, 8 Folien.

## Fertigung: Verfahrensspezifische Probleme und Schäden: Fasertechnik

- 12.2.1.10-24** “Feder-Werkstoffe, Faserverbund wird salonfähig“, [http://www.drahtmagazin.de/draht-fachartikel/faserverbund\\_wird\\_salonfaehig\\_134\\_de/](http://www.drahtmagazin.de/draht-fachartikel/faserverbund_wird_salonfaehig_134_de/), Stand Jan. 2013, 2 Seiten.
- 12.2.1.10-25** S.Sikorski, J.Frischbier, “Betriebsfestigkeit von Leichtbauverdichterschaukeln aus CFK“, [www.mtu.de/technologies/.../Frischbier\\_Betriebsfestigkeit.pdf](http://www.mtu.de/technologies/.../Frischbier_Betriebsfestigkeit.pdf), Seite 1-10.
- 12.2.1.10-26** S.Sandner, R.Hornfeck, “Experimentelle Untersuchung von Spannungen und Festigkeitseigenschaften an bauteilnahen CFK-Proben und Abgleich mit numerischen Berechnungsverfahren“, Dez. 2009, Abschließender Forschungsbericht, [opus-bayern.de/ohm-hochschule/volltexte/2010/6/1](http://opus-bayern.de/ohm-hochschule/volltexte/2010/6/1), Seite 1-51.
- 12.2.1.10-27** H.Kyobei, K.Konji, S.Jun, S.Junichi, “Development of GE90-115B Turbofan Engine“, IHI Engineering Review Vol 37. No. 1, Feb. 2004. [www.ihico.jp/ihico/file/.../10006\\_.pdf](http://www.ihico.jp/ihico/file/.../10006_.pdf), Seite 1-8.
- 12.2.1.10-28** M.Meyer, S.Bürkner, M.Engelhart, D.Jonke, H.Fietzek, O.Rohr, “Verschleißschutz auf CFK-Formen“, [www.dlr.de/fa/Portaldata/17/Resources/dokumente/.../2004\\_14.pdf](http://www.dlr.de/fa/Portaldata/17/Resources/dokumente/.../2004_14.pdf), Seite 1-10.
- 12.2.1.10-29** “Metallbeschichtung für Formen in der FVK-Verarbeitung“, 24.09.2012, Zeitschrift ‘Kunststoff Magazin online’ <http://www.kunststoff-magazin.de/Formenbau/Formprotect/Metallbeschichtung-fuer-Formen-in-der-FV...>, Seite 1.
- 12.2.1.10-30** “Konventionelle Release-Systeme“, „Semi-permanente Lösungen für hohe Effizienz“, „Interne Formtrennmittel für spezielle Anwendungen“, Firmenangaben Stand Anfang 2013, [http://www.chemtrend.com/de/mach\\_anwendung/verbundwerkstoffe/...4](http://www.chemtrend.com/de/mach_anwendung/verbundwerkstoffe/...4) Seiten.
- 12.2.1.10-31** “Anwendung: Trennmittel“, Firmenangaben, Stand Anfang 2013, <http://www.muench-chemie.com/produkt-Trennmittel-Mikon-...>, 4 Seiten..
- 12.2.1.10-32** A.-G.Becker, “Trennmittelfreie FVK-Bauteilfertigung durch...-Trennfolie“, 20.03.2012, Messemitteilung, <http://idw-online.de/pages/de/news?print=1&id=468844>, 2 Seiten.
- 12.2.1.10-33** M.Emonts, H.Janssen, “Neue Technologien der Faserverbundtechnik“, 13.12.2011, Fraunhofer OPT, [www.wzlforum.rwth-aachen.de/cms/.../vortrag\\_Emonts\\_Janssen.pdf](http://www.wzlforum.rwth-aachen.de/cms/.../vortrag_Emonts_Janssen.pdf), Seite 1-27.
- 12.2.1.10-33** Ch.Fuchs, „Herstellung von CFK-Leichtbaukomponenten in Autoklav- und Injektionstechnik“, [www.tuev-sued.de/uploads/images/.../24\\_fuchs\\_d.pdf](http://www.tuev-sued.de/uploads/images/.../24_fuchs_d.pdf), Seite 1-10.
- 12.2.1.10-34** “Lösungen und Ideen-Optimierung in der Zerspanung“, Fa. Hufschmied Zerspanungssysteme, Okt. 2012, [www.carbon-composites.eu/sites/...eu/.../03hufschmied\\_ralph.pdf](http://www.carbon-composites.eu/sites/...eu/.../03hufschmied_ralph.pdf), Seite 1-51.

- 12.2.1.10-35** K.Haubert, “Besonderheiten in der Zerspanung von FVK-Bauteilen“, J.Kraus, „Spezieller Hochleistungsfräser für duroplastische FVK-Bauteile“, M.Danielczick, L.Banduch, J.Kraus, „Kompressionswerkzeuge als Schlüssel zum Erfolg“, Zeitschrift ‘MM Maschinenmarkt’, 2011, <http://www.maschinenmarkt.vogel.de>, [compositesworld/articles/.../](http://www.compositesworld.com/articles/.../), Jeder Beitrag 2 Seiten.
- 12.2.1.10-36** „Prozesssicheres Bohren und Fräsen von faserverstärkten Kunststoffen“, 2013, [www.maschinenmarkt.vogel.de](http://www.maschinenmarkt.vogel.de), 1 Seite.
- 12.2.1.10-37** „Neue Bohrwerkzeuge für die prozesssichere Bearbeitung von CFK/GFK und SPPW“, 2013, <http://www.pressebox.de/pressemitteilung/spanabhebende-praezisionswerkzeuge-gmbh/Jetzt-Neue-Boh...>, Seite 1 und 2.