

1.2.2 Der industrielle Einsatz von Faser-Kunststoff-Verbunden

Faser-Kunststoff-Verbunde (FKV) sind eine seit nunmehr über 50 Jahren im industriellen Maßstab eingesetzte Werkstoffklasse. Primäre Merkmale von FKV sind hohe Festigkeit und Steifigkeit in Verbindung mit relativ geringer Dichte. Bei FKV kann durch gezieltes Ausnutzen anisotroper Eigenschaften eine Auslegung von Bauteilen so erfolgen, dass eine Minimierung der Masse von Strukturen oder Bauteilen ermöglicht wird [1]. Ferner schafft die Flexibilität der FKV bezüglich der Gestaltung von Materialaufbau und Geometrie besonders gute Voraussetzungen für einen hohen Grad an Funktionsintegration [2]. Die folglich realisierbare Integralbauweise, gekoppelt mit dem Leichtbauvermögen, begründet das elementare Leistungspotenzial der FKV und damit einen wesentlichen komparativen Vorteil gegenüber den Konkurrenzwerkstoffen in einer Reihe von industriellen Anwendungsfeldern und zunehmend auch im Sport- und Freizeitbereich. Neben diesen übergeordneten Vorzügen von FKV kommt ein breites Spektrum weiterer, durch die zu wählende Materialkonfiguration maßgeschneiderter Eigenschaften von FKV hinzu, wie etwa Korrosions- und Witterungsbeständigkeit, extrem günstiges Ermüdungsverhalten, Transparenz für elektromagnetische Wellen, geringe thermische Ausdehnung, gute Dämpfungseigenschaften sowie hohes Energieabsorptionsvermögen [3].

1.2.2.1 Luft- und Raumfahrt, Wehrtechnik

Wegen der spezifischen Werkstoffcharakteristika konnten sich FKV zuerst in Hochtechnologie-sektoren wie zum Beispiel der Raumfahrtindustrie oder der Wehrtechnik etablieren. So ist die aktuell größte CFK-Struktur das Stealth Boat Visby der schwedischen Marine mit einer Länge von über 70 m ein besonderes Beispiel der Verarbeitung von faserverstärkten Kunststoffen.

Auch im zivilen Flugzeugbau werden FKV zunehmend angewendet, da u.a. eine signifikante Steigerung der Leistungsfähigkeit zu erzielen ist. Die Herstellung von Seitenleitwerken, Verkleidungen von Rumpf oder Tragflächen, sowie Klappensystemen aus FKV

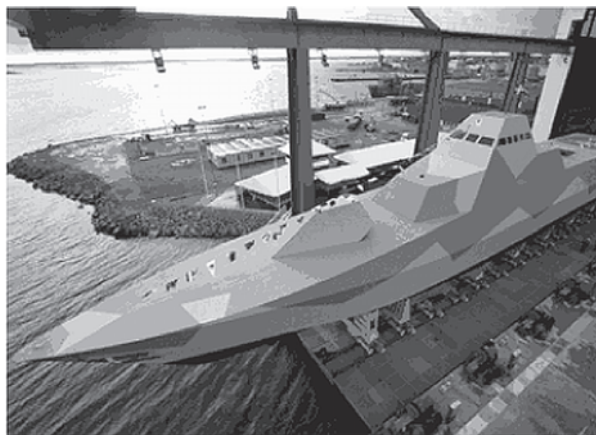


Bild 1.1: Stealth Boat „Visby“ der schwedischen Marine [4]

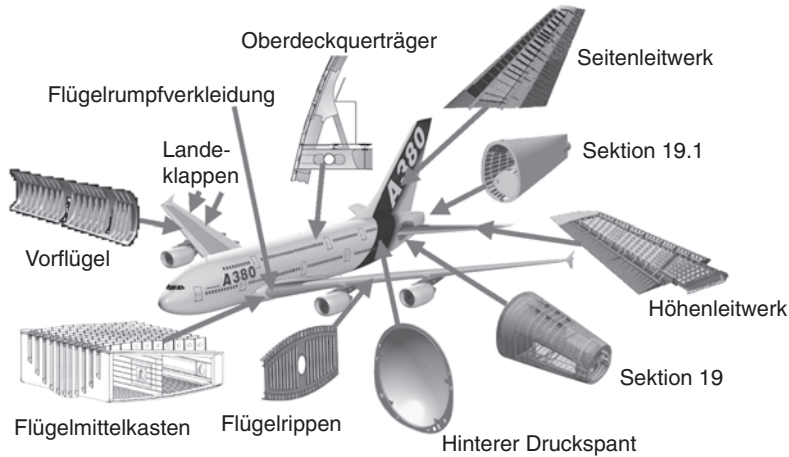


Bild 1.2: FKV- Strukturen des Airbus A380 [7]

sind weltweit Stand der Technik beim Bau moderner Passagierflugzeuge. Erste Höhepunkte des Trends in der Luftfahrtindustrie sind der Airbus A320 bzw. Airbus A330/340, die jeweils einen FKV-Anteil am Strukturgewicht von rund 15 bis 20% aufweisen [5, 6]. Aufgrund der Anforderungen an Größe, Nutzlast, Geschwindigkeit und Reichweite werden heute große Anteile des Strukturgewichts mittels CFK realisiert. So wird dieser bei dem bereits im Bau befindlichen Airbus A380 etwa 30% betragen. Für die geplante Boeing 7E7 werden sogar 50% angegeben.

1.2.2.2 Migration in andere Branchen

Aufgrund der Vorzüge des Materials migrierte die FKV-Technologie auch in andere Industriesektoren neben der Luft- und Raumfahrt. Die Eignung der FKV, einen Beitrag zur Lösung der akuten sozio-technologischen Problemstellungen der 70er, 80er und 90er Jahre (Veränderung der Lage auf den Energiemärkten, zunehmendes Umweltbewusstsein) zu leisten, war ein wesentlicher Faktor der stetig zunehmenden Anwendung in verschiedensten Industriesektoren [8].

Der verschärfte Wettbewerb auf den Weltmärkten und der damit erzeugte zusätzliche Innovationsdruck hinsichtlich der Verbesserung der technologischen und ökonomischen Produktcharakteristika stellt bei der Entwicklung neuer Produkte immer höhere Anforderungen an die zu verwendenden Werkstoffe. Dieser Problematik kann in bestimmten Industriebereichen nur durch die Anwendung neuartiger Werkstoffe im Allgemeinen und FKV im Speziellen begegnet werden. In Bild 1.3 sind die übergeordneten ökonomischen und ökologischen Gründe für den ansteigenden industriellen Einsatz von FKV zusammengestellt.

Die daraus resultierende aufstrebende Entwicklung des FKV-Weltmarktes seit 1970 ist in Bild 1.4 veranschaulicht, wobei die Hochschätzung auf das Jahr 2010 eher konservativ erscheint.

Aufgrund der dargelegten industriellen Erfordernisse einerseits und des Leistungspotenzials der Materialklasse andererseits haben sich im letzten Jahrzehnt die Anwendungsfelder von FKV stark erweitert. Es sind dies im Wesentlichen:

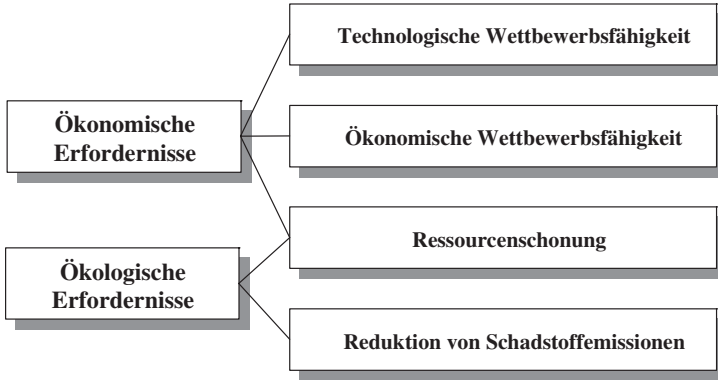


Bild 1.3: Übergeordnete Gründe für den industriellen Einsatz von FKV nach [9]

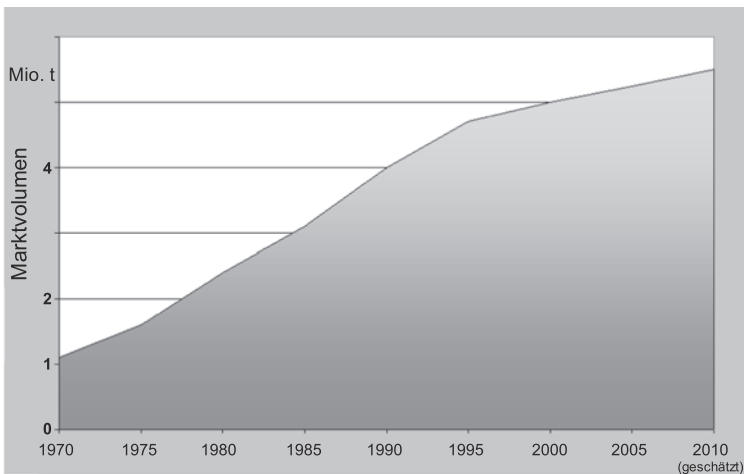


Bild 1.4: Entwicklung des FKV-Weltmarktes seit 1970 [10–12]

- Verkehrstechnik und Transport,
- Elektro-/Elektronikindustrie,
- Maschinenbau,
- Bauwesen,
- Chemie und Apparatebau: Lagerbehälter, Rohrleitungen,
- Energietechnik, Offshore,
- Sport u. Freizeit.

Die Gliederung der Anwendungen in Branchen ist nicht einheitlich. Die hier verwendete Zuordnung basiert auf den Marktdaten nach [12]. Die genannten Anwendungsfelder stellen in Europa zusammen über 96% des FKV-Gesamtmarktes dar, Bild 1.5. Innerhalb des be-

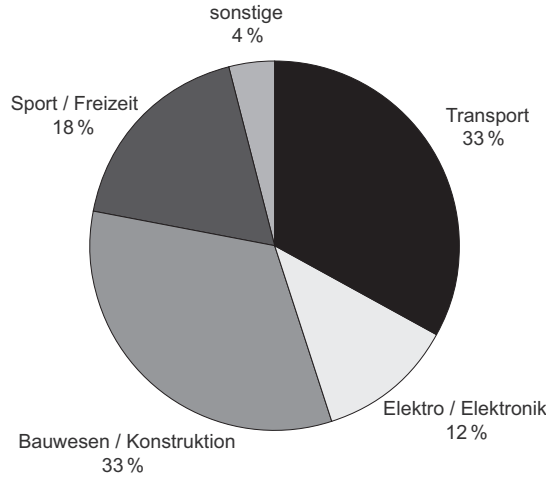


Bild 1.5: Verteilung des europäischen FKV-Marktes nach Anwendungsfeldern 2002 [12]

deutendsten Anwendungssektors Transport (Marktanteil ~ 33%) ist der Automobilbau der weitaus größte Teilbereich.

Verkehrstechnik und Transport setzen sich aus den Industriezweigen Luftfahrt, Automobil, Schienenfahrzeuge und Schiffbau zusammen.

Ein weiteres Beispiel im Bereich Verkehrstechnik ist der Einsatz von FKV in Schienenfahrzeugen. Damit können neben erheblichen Gewichts- und Formvorteilen auch Herstellkosten durch Integration gesenkt werden, Bild 1.6.

Anwendungen der Elektro- und Elektronikbranche sind u.a. Trockentrafos, Hochspannungsschaltstangen oder Kryostate.

Ein typisches Beispiel aus dem Bereich Bauwesen und Konstruktion ist der Brückenbau, Bild 1.7. Die abgebildete Konstruktion wurde anlässlich der Schweizer Expo 2002 für



Bild 1.6: ICE mit FKV-Außenhaut [13]



Bild 1.7: Brückenkonstruktion aus GFK [14]

Fußgänger voll funktionstauglich aufgebaut und ist bisher von mehreren 100000 Besuchern benutzt worden [14].

In der hier verwendeten Einteilung des Marktes ist der Maschinenbau zum Teil in den Bereichen Verkehrstechnik und Offshore, aber weitestgehend Bestandteil des Sektors Bauwesen/Konstruktion zugeordnet. Als Anwendungen kommen beispielsweise hochbelastete CFK-Blatffedern zum Einsatz, aber auch große Bauteile wie Abgaskanäle in der Klimatechnik, Bild 1.8.

Der Bereich Offshore ist von der Anzahl an Anwendungsfeldern begrenzt, stellt aber mengenmäßig einen nicht unerheblichen Teil der Gesamtproduktion dar. Die Anwendungen sind hauptsächlich der Energietechnik zugehörig, einerseits Offshore-Windparks, Bild 1.9, zum anderen Förderleitungen für Bohrinnseln, Bild 1.10, wobei die Plattformen mittlerweile auch schon als Unterwasserstationen geplant sind.

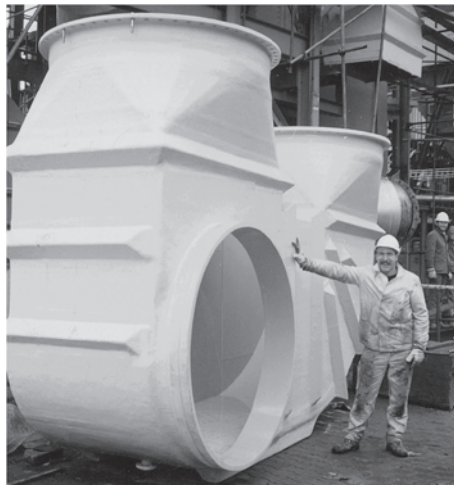


Bild 1.8: Abgaskanal aus GF-UP [15]



Bild 1.9: Utgrunden-Windpark in Schweden [16]

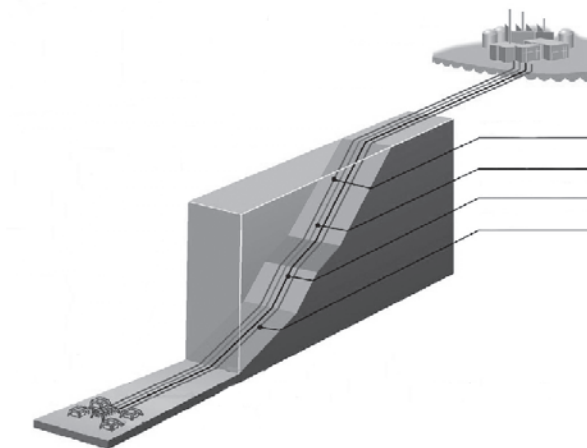


Bild 1.10: Bohrinsel – Modell mit Förderleitungen [17]

1.2.2.3 Entwicklungen des FKV-Marktes

Derzeit beherrschen Werkstoffe mit duroplastischer Matrix den FKV-Markt. In Europa betrug 1997 der Anteil duroplastischer FKV am Gesamtmarkt rund 70% gegenüber 30% thermoplastischer FKV [18]. Generell kann ein Trend hin zu thermoplastischen Matrixwerkstoffen festgestellt werden. So betrug 1999 deren Anteil schon 42%. Bei den duroplastischen FKV stellen die mittels Pressverfahren verarbeitbaren SMC- (Sheet Molding

Compound) oder BMC-Pressmassen (Bulk Molding Compound) den Hauptanteil, vor allem im Fahrzeugbau und in der Elektronikindustrie. Die Gruppe der thermoplastischen FKV wird von kurzfaserverstärkten Thermoplasten (Spritzguss) dominiert, die zwar prinzipiell auch zu den FKV gezählt werden, aufgrund der Werkstoffeigenschaften jedoch eher in die Kategorie der unverstärkten Kunststoffe einzuordnen sind. An zweiter Stelle bei den thermoplastischen FKV stehen die GMT- (glasmattenverstärkte Thermoplaste) bzw. LFT-Pressmassen (diskontinuierlich langfaserverstärkte Thermoplaste). Eine Übersicht über die Aufteilung des europäischen FKV-Marktes nach Matrixsystemen und den Verarbeitungsverfahren gibt Bild 1.11.

Aus der Übersicht des derzeitigen FKV-Marktes geht hervor, dass – unter Vernachlässigung der kurzfaserverstärkten Kunststoffe – vor allem duroplastische glasfaserverstärkte Pressmassen (SMC, BMC) industriell dominieren, aber thermoplastische (GMT, LFT) in den letzten Jahren beachtliche Zuwachsraten zeigen und ihren Anteil von absolut 4% auf über 6% gesteigert haben.

Hinsichtlich der eingesetzten Verstärkungssysteme wird der FKV-Markt noch von den Glasfasern beherrscht. Jedoch kann eine deutliche Verlagerung zu noch höheren Eigenschaftsprofilen und damit im Wesentlichen zu Kohlenstofffasern als Verstärkungsstrukturen festgestellt werden. Andere Faserarten (z. B. Naturfasern) haben nur in der Automobilindustrie und vor allem für Teile ohne höhere strukturelle Belastung Relevanz [1].

Die früher übliche Unterscheidung zwischen technischen und Hochleistungsverbundwerkstoffen ist überholt. Heute weisen die Verbundwerkstoffe ein Leistungsspektrum auf, das in der Breite von keiner anderen Werkstoffgruppe erreicht wird. Dabei sind Festigkeit und Steifigkeit im Bereich von 50 bis 2000 MPa, bzw. 10 bis 400 GPa einstellbar. Diskontinuierlich glasfaserverstärkte Pressmassen mit mineralischen Füllstoffen und unidirektionale mit 60 Vol.-% Kohlenstofffasern verstärkte Prepregs bilden dabei beispielhaft die Extreme. Entsprechend bewegen sich auch die Werkstoffkosten zwischen etwa 2 €/kg und 200 €/kg.

Entscheidend für den Einsatz bleiben jedoch das Anforderungsprofil des Bauteils und die Kosten, die wesentlich auch von den Verarbeitungsverfahren und der Seriengröße bestimmt werden. Der Markt und das Image der Verbundwerkstoffe haben in den letzten Jahren in der breiten Öffentlichkeit wesentlich gewonnen durch den zunehmenden Einsatz im Sport- und

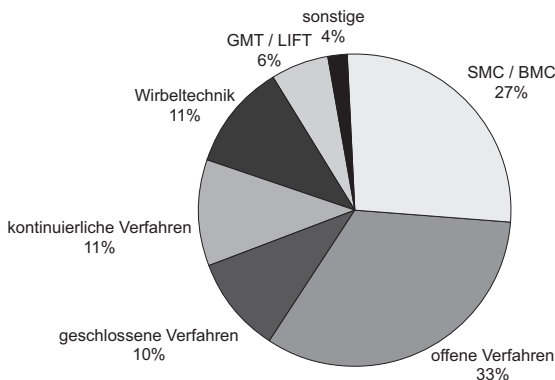


Bild 1.11: GFK-Produktion in Europa 2002 nach Fertigungsverfahren [12]

Freizeitbereich, wo sich allein mit dem Begriff „Carbon“ für Kohlenstofffaseranteile z. B. in Rennrädern, Golf- und Tennisschlägern die Kostensensitivität vermindert hat.

Neben den bisher diskutierten Konstruktionswerkstoffen haben sich inzwischen Kohlenstofffasern in Pressmassen bzw. Compounds mit einem Anteil von etwa 50% der Gesamtproduktion als Funktionswerkstoffe einen bedeutenden Markt erobert. Dabei wird ihre gute Wärmeleitfähigkeit und die elektromagnetische Abschirmung in elektronischen Bauteilen genutzt, was bei dem heute stark zunehmenden Einsatz der drahtlosen Daten- und Informationsübertragung von großer Bedeutung und Umweltrelevanz ist.

1.2.3 Technisch-wirtschaftliche Entwicklung der Kohlenstofffasern

1.2.3.1 Status und Trends

Kohlenstofffasern als Verstärkungskomponente sind für Faser-Kunststoff-Verbunde von herausragender Bedeutung nicht nur hinsichtlich deren Eigenschaften, sondern sie bieten auch das entscheidende Potenzial für die Weiterentwicklung des Leichtbaus in breitem Umfang über die Verkehrstechnik hinaus im Sinne der Ressourcenschonung. Aus diesem Grund soll hier in einem Überblick auf die aktuelle technisch-wirtschaftliche Entwicklung eingegangen werden. Ein Vergleich mit anderen Verstärkungsfasern zum Aufbau und den Eigenschaften erfolgt in Abschnitt 2.1. Als Quellen für die im Folgenden dargestellten Trends wurden eine Fachkonferenz [19] und Informationen verschiedener Faserhersteller zugrunde gelegt [20, 21].

1.2.3.2 Marktentwicklung

Der derzeitige Stand der Verwendung von Kohlenstofffasern ist gekennzeichnet durch einen kontinuierlich gestiegenen Verbrauch – derzeit etwa 16000 t/a – allerdings bei merklich höheren Kapazitäten.

Die erzielbaren Preise sind daher nicht immer kostendeckend. Somit besteht auch allgemein bei den Herstellern keine Neigung, durch Preissenkungen das Mengenwachstum zu unterstützen. Andererseits gibt es bei reifen Anwendungen keinen Grund für aggressives Preisverhalten. Ferner findet man Einsatzbeispiele, wo z. B. die Eigenschaftskombination aus hoher Festigkeit und gleichzeitiger elektrischer Leitfähigkeit oder die Zugabe von Kohlenstofffasern in geringer Menge zu Glasfasern als Hybrid-Verstärkung bereits eine wesentliche Steifigkeitsverbesserung erbringt, so dass der Einsatz wirtschaftlich sinnvoll ist.

1.2.3.3 Mengenentwicklung

Die folgenden Diagramme zeigen die Entwicklung von Bedarf und Produktionskapazität. Bemerkenswert in diesem Zusammenhang ist, dass in China weitere CF-Kapazitäten von etwa 5000 t bis zum Jahr 2010 aufgebaut werden sollen. Im Rahmen der Darstellung des Gesamtbedarfs in die drei Sektoren Industrial, Sport Leisure und Aerospace fällt auf, dass im Bereich Industrial im Jahr 2001 rund 50% der Menge in Compounds verarbeitet wurden, d. h. der Werkstoff z. B. in seiner funktionalen Eigenschaft der elektromagnetischen Abschirmung verwendet wurde. Mit dem prognostizierten Verbrauch von etwa 10800 t in

2005 in diesem Gebiet steigt der Compoundanteil um rund 20%, während er für Windenergie und Druckbehälter um über 90% bzw. über 80% steigt. Das würde für diese beiden Anwendungen allein etwa 1400 t Kohlenstofffasern bedeuten.

Dabei ist in Bild 1.13 zu berücksichtigen, dass es sich bei dem großen Anteil in Asien für den Bereich Freizeit und Sport nicht um dort hergestellte Mengen handelt.

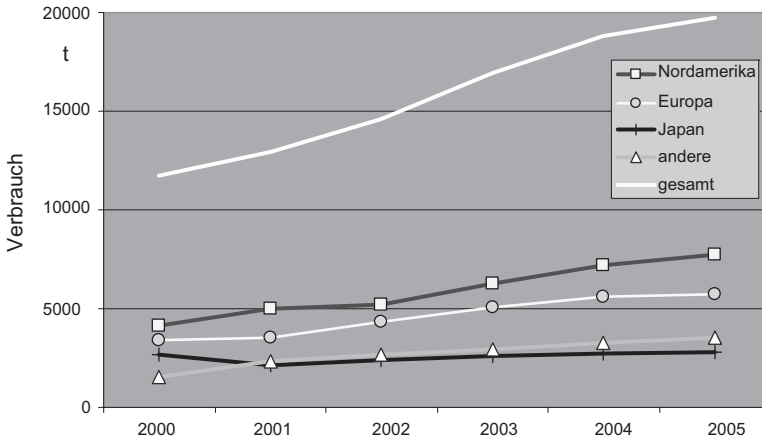


Bild 1.12: Kohlenstoffaserverbrauch 2003 nach Region und Anwendung (teilweise geschätzt) (nach [20])

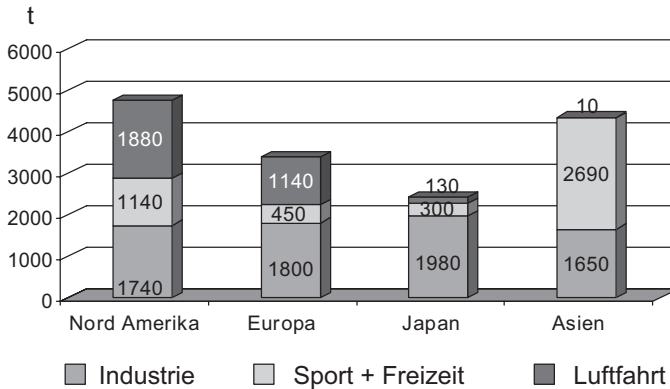


Bild 1.13: Nachfrageentwicklung an PAN-basierten Kohlenstofffasern nach Region (nach [19])

1.2.3.4 Einsatzgebiete

Das klassische Einsatzgebiet der Kohlenstofffasern ist die Luft- und Raumfahrt. Auf die Entwicklung im Bereich der zivilen Luftfahrt wurde eingangs bereits mit dem Airbus A 380 hingewiesen. Die Entwicklungen im militärischen Flugzeugbau zeigen beispielhaft die Anwendung und Planung in den USA, wobei sich die Kurve als Summe der Mengen für die verschiedenen Typen, bzw. Baureihen ergibt und nicht stetig verläuft. Auffallend ist

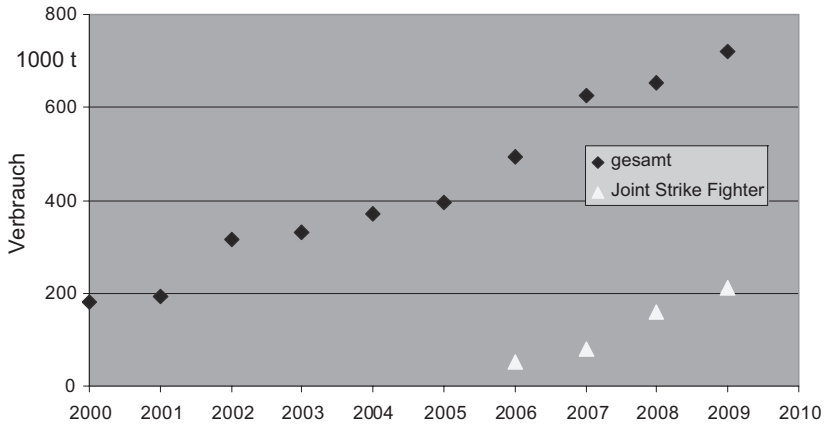


Bild 1.14: CF-Verbrauch aller US-Streitkräfte (DoD)

der bis 2006 steigende Anteil von etwa 30% allein für den Joint Strike Fighter, dem z.Zt. größten Rüstungsprojekt der USA.

Ein sehr interessantes und in letzter Zeit relevant gewordenes Anwendungsbeispiel bietet die Energietechnik mit dem kommerziellen Einsatz von Kohlenstofffasern in Schwungrädern. Sie erlauben die Überbrückung von Netzausfällen mit erheblicher Leistung, z.T. über Stunden. Aufgrund der extrem hohen Festigkeit der Fasern kann in Anlagen mit geringem Bauraum wesentlich höhere spezifische Energie gespeichert werden als mit anderen Werkstoffen. Dabei befindet sich aus Sicherheitsgründen der Schwungradteil im Erdboden. Die Rotoren laufen im Vakuum und sind über 20 Jahre wartungsfrei.

Im Bauwesen haben sich aufgeklebte CFK-Laschen zur Verstärkung und Rehabilitation von Bauwerken weltweit durchgesetzt. Es sind ferner eine Reihe von kleineren Brücken mit großen Plattenelementen als GFK-Konstruktionen in Betrieb. Die nach dem letzten großen Erdbeben 1992 in Kalifornien begonnene vorbeugende Ummantelung von Brückenpfeilern mit CFK-, bzw. CF/GF-Hybridlaminaten ist weitgehend abgeschlossen. Es überrascht daher nicht, wenn für dieses Gebiet nur eine leichte Zunahme des CF-Einsatzes geschätzt wird.

Ein sehr attraktives Feld sowohl für die Hersteller von Kohlenstofffasern als auch für potenzielle Anwender ist der Fahrzeugbau. So hat sich im Formel 1-Rennsport die CFK-Zelle aus Gewichts- und vor allem Sicherheitsgründen durchgesetzt, wobei hier die Werkstoffkosten von untergeordneter Bedeutung sind. Daraus abgeleitet werden erste Hochleistungsfahrzeuge (McLaren-SLR) von DaimlerChrysler in kleinen Stückzahlen mit CFK-Karosserie produziert. Im Hinblick auf die Preise der Fahrzeuge spielt hier der Werkstoff jedoch eine eher untergeordnete Rolle. Allerdings hat sich die Automobilindustrie weltweit in einer Reihe von Projekten zunehmend mit den Fragen des Einsatzes von CFK befasst, zumal GFK inzwischen einen festen Bestandteil in Fahrzeugen bildet. Es wird daher wesentlich von dem weiteren Trend zum Leichtbau und der Preisentwicklung bei den Kohlenstofffasern abhängen, wann CFK in die größeren Serien einziehen wird. Allerdings wird dann ein Zeitraum über eine Reihe von Jahren erforderlich sein, allein wenn man bedenkt, dass nur 1 kg CFK in jedem Fahrzeug bereits etwa eine Verdoppelung der vorhandenen CF-Kapazität bedeuten würde.

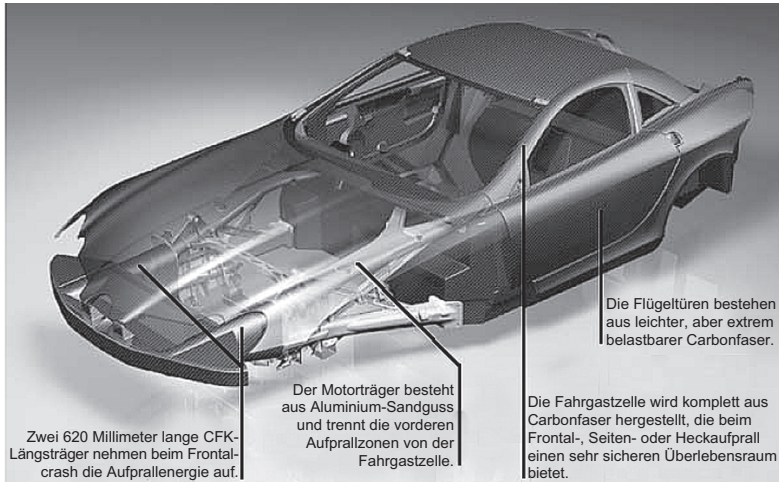


Bild 1.15: SLR mit CFK-Struktur [22]

1.2.3.5 Weitere Anwendungen

Ein weiteres sehr aussichtsreiches Anwendungspotenzial bietet sich im Offshore-Bereich. Hier beginnt man die Förderung in Wassertiefen deutlich über 1000 m zu beginnen. In diesen Tiefen wird der Einsatz zunehmend schwerer, bzw. wegen der Gewichte der Anker- und Förderleitungen aus Stahl nicht mehr möglich. Mit dem Einsatz von CFK für eine Förderplattform mit 4 Ankern (1000 m) zu 210 t und 6 Risern (1500 m) zu 30 t würden dabei allein über 1000 t CF benötigt [19]. Bei einem Durchbruch dieses Einsatzes könnte es daher zu einem sprunghaften Anstieg des Bedarfs kommen.

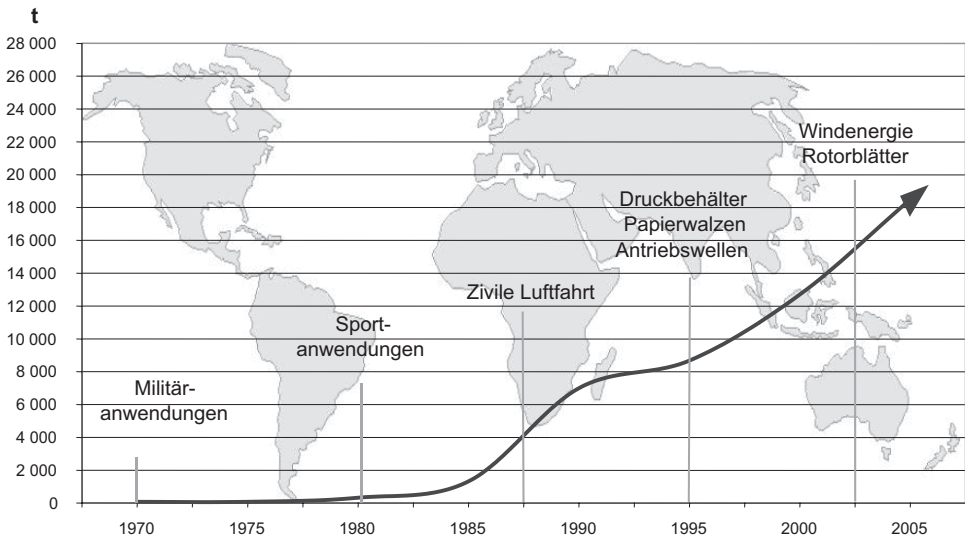


Bild 1.16: Weltweiter Bedarf an Kohlenstofffasern in Abhängigkeit von neu entstehenden Anwendungen [20]

Ein weiteres Marktsegment stellt die Windenergie dar. Besonderes Einsatzpotenzial liegt dann vor, wenn aus technischen Gründen keine anderen Werkstoffe mehr eingesetzt werden können. So sind bei Windenergieanlagen mit Rotorblattlängen von etwa 50 m und mehr nur noch Kohlenstofffasern wegen ihrer herausragenden gewichtsspezifischen Ermüdungsfestigkeit geeignet.

Zu Bild 1.16 kann die Vorhersage der Entwicklung des Verbrauchs von Kohlenstofffasern durch die Hersteller mit einer Zunahme von 9 bis 12% pro Jahr ergänzt werden.

1.2.4 **Ökonomische Bewertung der FKV-Verarbeitungstechnologien**

Wie schon in der Einleitung angedeutet, konnte die technologische Überlegenheit der FKV hinsichtlich ökonomischer Aspekte nur ansatzweise verifiziert werden, da gerade die Herstellkosten durch die vergleichsweise hohen Material- bzw. Verarbeitungskosten der FKV-Technologien sehr oft über denen der Verarbeitung traditioneller Werkstoffklassen liegen. Technologieentscheidungen wurden in der Vergangenheit auf Basis einer Kostenvergleichsrechnung im Sinne einer statischen Vollkostenanalyse vorhandener Technologie mit einem Substitut getroffen. Langfristige Mehrwerte, die gerade neue Werkstoffklassen bieten, sind nicht leicht quantifizierbar und dadurch auch schwer kommunizierbar. Es besteht daher bei der ökonomischen Bewertung oder bei Rentabilitätsvergleichen der FKV-Technologien mit klassischen Herstellungsverfahren die folgende Grundproblematik:

- Die statischen Methoden der Wirtschaftlichkeitsanalysen im Sinne einer Kostenvergleichsrechnung sind typischerweise temporär begrenzt auf die Herstellung bzw. Entwicklung der Substitute;
- qualitative Elemente wurden häufig nicht quantifiziert bzw. die Daten reichen aufgrund der Neuheit meist nicht aus, verlässliche Aussagen über längere Zeiträume zu treffen;
- die meist neuartigen Herstellungsverfahren sind in Bezug auf die relevanten Prozessparameter noch nicht ausreichend untersucht bzw. diese sind nicht bekannt;
- es fehlen aussagekräftige Langzeitstudien über Serienfertigung und Betrieb sowie Einsatzkosten der neuen Bauteile.

Diese und andere Gründe haben in der Vergangenheit dazu geführt, dass Wirtschaftlichkeitsanalysen inhärent punktuelle Momentaufnahmen darstellten, was diese Technologie häufig als nachteilig erscheinen ließ. Ganzheitliche Ansätze haben auf anderen Gebieten schon lange Einzug gehalten. Als Beispiel stellte die Ökobilanzierung eine Methodik dar, über langfristige ökologische Folgen jedes Bauteils und allen damit verbunden und zu-rechenbaren Prozessen zu bilanzieren. Als logische Konsequenz sind auch ökonomische Aspekte über den Herstellungsprozess hinaus bilanzierbar und sollten bei der Entscheidungsfindung eine Rolle spielen.

Die folgenden Ausführungen sollen einen Weg aufzeigen, wie dieses Dilemma überwunden werden kann und eine zielgerichtete Aussage zum wirtschaftlichen Nutzen einer FKV-Entwicklung auch quantitativ darstellbar ist.