

2 Stand der Kenntnisse

2.1 Faserverbundkunststoffe

2.1.1 Einführung

Verbundwerkstoffe sind mehrkomponentige Werkstoffsysteme, die aus mindestens zwei Komponenten zusammengesetzt sind [FR03, SF03, VDI91]. Dabei werden die Eigenschaften des Verbundwerkstoffes maßgeblich durch die Eigenschaften der Einzelkomponenten, wie z. B. mechanische oder thermische Kennwerte, bestimmt. Eine bedeutende und etablierte Entwicklung von Verbundwerkstoffen sind die so genannten Faserverbundkunststoffe (FVK)¹. Diese Werkstoffgruppe besteht im Allgemeinen aus einem faserförmigen Werkstoff, der in eine polymere Matrix eingebettet wird [FZR95, FR03, SF03]. Bereits im Jahr 1916 wurde R. Kemp in den USA ein Patent zur Herstellung eines Flugzeuges aus FVK erteilt [Ehr06]. Die Entwicklung von Flugzeugbauteilen aus FVK ist auch heute noch Inhalt von wissenschaftlichen und industriellen Untersuchungen [Fun01, NB97]. Seit den frühen 1950er und 1960er Jahren [SF03, Sch05] werden FVK z. B. in zahlreichen Anwendungen in der Luft- und Raumfahrt [BN98, Kra05], der Medizintechnik [Bon94], dem Fahrzeug- [DWSB08, EDR07, Fra04, Hoe00, Len04, Mic09, SP07], dem Maschinen- und Apparatebau [Hoe00] sowie dem Bauwesen verwendet [Ber03, Kol08, Noi96]. Weitere relevante Anwendungen von FVK sind hochwertige Sport- und Freizeitartikel [DWSB08] sowie Bauteile für Windkraftanlagen [Len04]. Die Abbildung 2.1 zeigt die Marktentwicklung von FVK in den USA seit 1960. Insbesondere seit den 1980er Jahren ist ein starkes Marktwachstum zu verzeichnen, da zu diesem Zeitpunkt die so genannten Hochleistungs-FVK, wie z. B. kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK) oder glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK)² entwickelt wurden [NB97].

Seitdem werden FVK insbesondere im Bereich der Luft- und Raumfahrt sowie dem Fahrzeugbau in großem Umfang eingesetzt [BN98, Rob07]. So betrug der Massenanteil von CFK am Strukturgewicht von Verkehrsflugzeugtypen 1970 ca. 5 % und erreichte 1990 ca. 10 % [Bre05, Ehr06]. Bei modernen Flugzeugtypen wie dem A380 oder dem A400M (beide Typen entstammen dem Flugzeughersteller Airbus) beträgt der Mas-

¹Synonym werden für Faserverbundkunststoffe die Bezeichnungen Faser-Kunststoff-Verbunde oder faserverstärkte Kunststoffe verwendet [Ehr06, Ene98, NB97, Sch91]. In der englischen Fachliteratur ist für FVK die Bezeichnung „fibre-reinforced composites“ üblich [Ehr01, SF03].

²Glasfaserverstärkter Kunststoff wird insbesondere im Bereich der Sport- und Freizeitartikel auch als „Fiberglas“ bezeichnet. Dieser Anglizismus ist von „fibreglass“ (BE) bzw. „fiberglass“ (AE) abgeleitet.

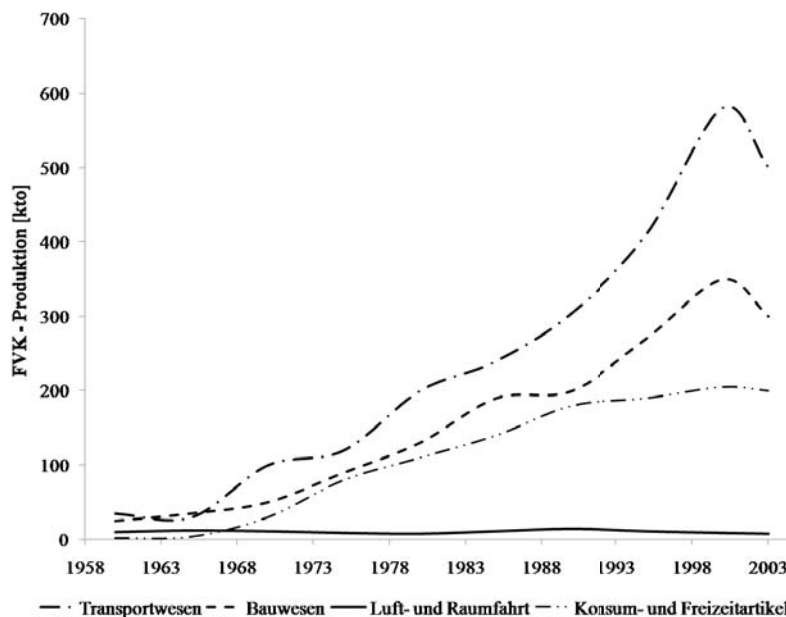


Abbildung 2.1: Marktentwicklung der Faserverbundkunststoffe in den USA [Ehr06]

senanteil bereits über 20 % und soll bei den zurzeit in der Entwicklung befindlichen Verkehrsflugzeugtypen B787 (Boeing) und A350 (Airbus) auf über 35 % anwachsen [Bre05]. Diese Zunahme des Massenanteils von CFK am Strukturgewicht ist in Abbildung 2.2 dargestellt. Der weltweite Verbrauch von Kohlenstofffasern betrug im Jahr 2006 26.000 Tonnen, wobei im Jahr 2010 mit einem Absatz von 38.000 Tonnen gerechnet wird [Ehr06, Zie07]. Zum Vergleich wurden im Geschäftsjahr 2006 ca. 2,4 Mio. Tonnen Glasfasern verbraucht [Zie07].

Die Abbildung 2.1 zeigt den Anteil der Hauptanwendungsgebiete im Transport- und Bauwesen, Konsum- und Freizeitartikel sowie der Luft- und Raumfahrt im Vergleich. Der Anteil von Anwendungen in der Luft- und Raumfahrt ist trotz bedeutender Forschungsaktivitäten und -investitionen nur von geringer Bedeutung [BN98, Kra05]. Seit den 1970er Jahren stieg der Absatz an FVK zur Herstellung von hochwertigen Konsum- und Freizeitartikeln um nahezu 1.000 %. Dieser Anstieg ist zum einen auf die guten Leichtbau- und Festigkeitseigenschaften und zum anderen auf Marketingaspekte zurückzuführen. In dieser Branche werden heutzutage große Umsätze und Gewinne realisiert, wobei die Fertigung der Produkte in manuellen Fertigungsprozessen den Stand der Technik repräsentiert. Von den Herstellern von Konsum- und Freizeitartikeln aus FVK werden weiterhin Produktionszuwächse von mehr als 10 % erwartet, sodass die Bedeutung dieses Marktes sowie der Anteil am gesamten FVK-Markt weiter zunehmen wird [DWSB08].

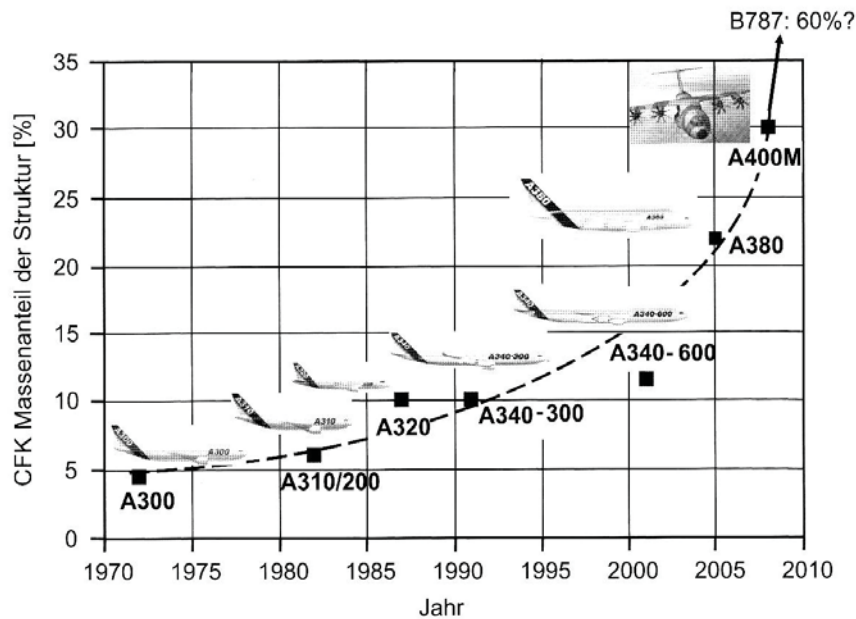


Abbildung 2.2: Einsatz von CFK-Strukturen im Flugzeugbau [Bre05, Ehr06]

2.1.2 Eigenschaften von Faserverbundkunststoffen

FVK sind heute aus einer Reihe von Gründen etabliert, dazu zählen [Ehr06, FR03, NMB04]

- die hohe spezifische Festigkeit und Steifigkeit,
- gute Dämpfungseigenschaften,
- die Möglichkeit zur belastungsorientierten Bauteilgestaltung durch die gezielte Orientierung der Verstärkungsfasern,
- die gezielte Einstellbarkeit der thermischen Ausdehnung und elektrischen Leitfähigkeit sowie
- eine gute dynamische Beständigkeit .

In Abbildung 2.3 ist der qualitative Vergleich technischer Eigenschaften von CFK, Stahl und Aluminium dargestellt [Sch91]. Trotz der geringeren Dichte des CFKs im Vergleich zu Stahl und Aluminium sind sowohl der E-Modul als auch die Zugfestigkeit deutlich höher [FR03, Sch91].

CFK zeigt die Eigenschaft eines negativen thermischen Ausdehnungskoeffizienten, d. h. es zieht sich unter Temperatureinfluss zusammen. Die metallischen Werkstoffe zeigen dagegen die typische Ausdehnung mit steigender Temperatur [BS94, Hor02, Roh96].

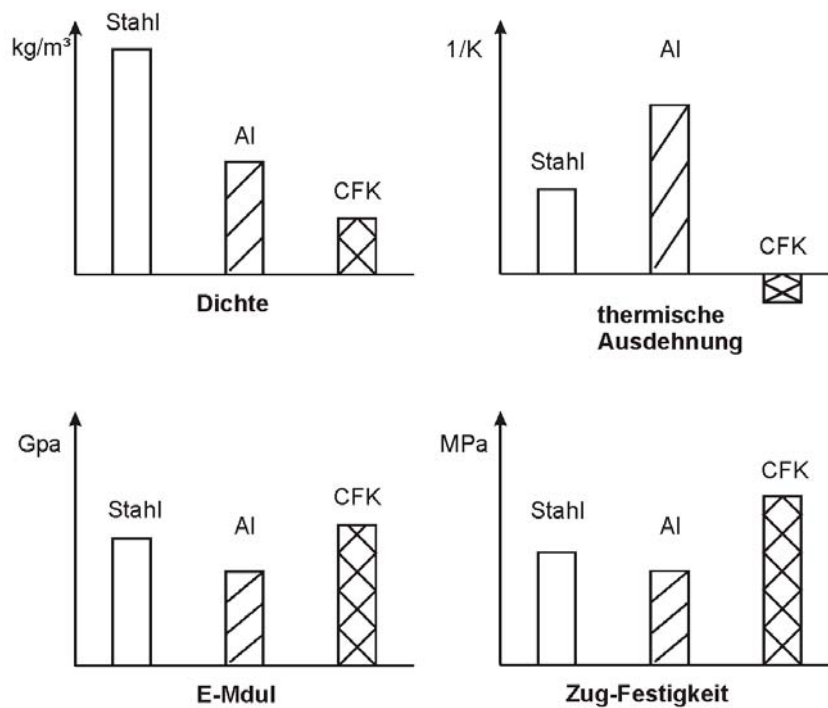


Abbildung 2.3: Qualitativer Vergleich verschiedener Eigenschaften von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen mit Stahl und Aluminium nach Schulte [Sch91]

In Tabelle 2.2 ist der Vergleich der Kennwerte einiger organischer, metallischer und mehrkomponentiger Werkstoffe dargestellt. Die hohe spezifische Festigkeit bzw. der hohe spezifische E-Modul sind der Grund für die etablierte Anwendung von FVK. Diese beiden Kennwerte berechnen sich aus dem Quotienten von Streckgrenze und Dichte bzw. E-Modul und Dichte [Sch91].

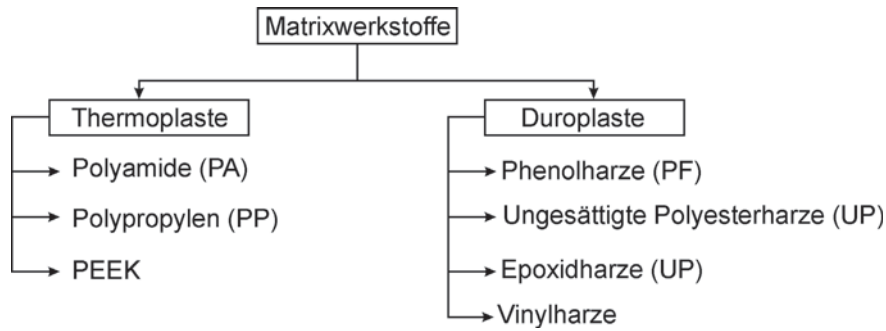


Abbildung 2.4: Einteilung der Matrixwerkstoffe

2.1.3 Aufbau von Faserverbundkunststoffen

Ein so genanntes FVK-Laminat besteht im Wesentlichen aus den Komponenten [DIN87, Ehr06, Sch91, SF03]

- eines polymeren Matrixwerkstoffes und
- den eingebetteten Verstärkungsfasern .

Dabei hat der polymere Matrixwerkstoff die Aufgaben [Ehr06, FR03]

- die Kräfte in die Fasern einzuleiten,
- diese Kräfte von Faser zu Faser zu übertragen,
- sowie die geometrische Lage der Fasern zueinander und
- den Schutz der Fasern vor Umgebungseinflüssen sicherzustellen .

Polymere Matrixsysteme

Als Matrixwerkstoffe werden zurzeit sowohl Thermoplaste als auch Duroplaste verwendet, siehe Abbildung 2.4. Duroplastische Matrixsysteme werden heutzutage aufgrund der besseren mechanischen Kennwerte in der Mehrzahl der Anwendungen verwendet [Che90, Sch91, NMB04].

Dabei sind *Duroplastische Matrixsysteme*³ chemisch aushärtende Verbindungen, die nach der Aushärtung nicht erneut umgeformt werden können [Ehr06, FR03, Gar00, NMB04, Sch91]. Die Aushärtung dieser Polymere erfolgt typisch durch Polykondensation oder -addition. Beispiele für duroplastische Matrixsysteme sind Epoxid- (EP), ungesättigte Polyester- (UP), Vinylester- (VE) und Phenolharze (PI) [Ehr06, Sch91].

Thermoplastische Matrixsysteme sind im Gegensatz zu Duroplasten unter Temperatureinfluss wiederholt plastisch verformbar. Dadurch ist sowohl das Warmumformen

³Nach Bargel u. a. [BS94, Hor02] werden die Begriffe Duroplast und Duromere synonym verwendet.

von Halbzeugen als auch die Rückführung von Produktionsabfällen in einen erneuten Fertigungsablauf möglich [BS94, Ehr06, Sch91, Sch95, Wög03]. Einige Beispiele für thermoplastische Matrixsysteme sind Polypropylen (PP), Polyamid (PA), Polysulfon (PSU), Polyetherketon (PEK) und Polyetheretherketone (PEEK) [FR03, Sch91].

Industriell relevante duroplastische Matrixsysteme sind Epoxid- oder Polyesterharze, während bei den thermoplastischen Matrixsystemen Polyamid (PA) in zahlreichen Anwendungen verwendet wird [DIN89d, HKN⁺02, Hoh92]. Diese Matrixsysteme werden im Folgenden erläutert

- *Epoxidharze (EP)* härten durch eine so genannte Polyadditionsreaktion aus. Aufgrund ihrer hohen statischen und dynamischen Festigkeit werden typischerweise EP-Harze zur Herstellung von Hochleistungs-FVK verwendet [Car95, Ehr06, Loh88, Rit95, Sch05, SSSH02, Ste97]. Bei der Verarbeitung von EP-Harzen ist ein exaktes Mischungsverhältnis von Harz und Härter zu beachten, um die mechanischen und thermischen Eigenschaften nicht negativ zu beeinträchtigen [Ehr06, Fun01], siehe Anhang 8.1. In Anhang 8.2 ist der typische molekulare Aufbau eines EPs dargestellt.
- *Ungesättigte Polyesterharze (UP)* härten durch eine Polymerisationsreaktion aus. Sie sind preiswert und unempfindlich gegenüber Mischungsfehlern bei der Verarbeitung. Daher werden UP-Harze heutzutage in zahlreichen Anwendungen eingesetzt [Car95, Loh88, SSSH02, SE88]. Die mechanische Festigkeit und Steifigkeit ist im Allgemeinen geringer als bei EP-Harzen, siehe Tabelle 2.1 [Ehr01, Loh88, SE88].
- *Polyamide (PA)* härten typischerweise durch eine Polykondensationsreaktion aus. Bereits seit 1937 werden PA großtechnisch hergestellt und in zahlreichen Anwendungen verwendet [NMH94, SSSH02]⁴. Die mechanischen, dynamischen und thermischen Eigenschaften der PA werden wesentlich durch die Aufnahme von Wasser bestimmt. PA zeichnen sich durch hohe Schlagzähigkeit und hohe Abriebsfestigkeit aus. Trotz hoher Ermüdungsfestigkeit bei Langzeitbeanspruchungen nimmt die Festigkeit bei langer Beanspruchung ab [SSSH02]. Dieses für PA typische Werkstoffverhalten wird als nicht-isochron⁵ bezeichnet.

In Tabelle 2.1 sind die Eigenschaften polymerer Matrixwerkstoffe gegenübergestellt. Weitere Informationen zur molekularen Struktur sowie den relevanten Bindungsformen von polymeren Werkstoffen sind in Anhang 8.3 sowie in der entsprechenden Fachliteratur ausführlich dargestellt und werden an dieser Stelle nicht weiter ausgeführt [BS94, Ehr06, GF91, Hor02, SSSH02].

⁴Polyamide sind insbesondere unter den Handelsnamen Nylon (Firma DuPont) oder Perlon (Firma IG Farben) bekannt [SSSH02].

⁵von griech. isos = gleich und chronos = Zeit [BS94, SSSH02]