

1 Einleitung

1.1 Hinführung zum Thema

Als im 19. Jahrhundert durch den vermehrten Einsatz von motorisierten Beförderungsmitteln die Mobilität der Bevölkerung stetig zunahm, wurde das alltägliche Leben revolutioniert. Entfernungen, für die man früher mehrere Tage benötigte, werden heute in wenigen Stunden zurückgelegt. Waren zu Anfang des 19. Jahrhunderts lange Seereisen gefährlich und für einen Großteil der Bevölkerung unerschwinglich, so kann man nun per Flugzeug das gleiche Ziel bequem und kostengünstig erreichen. Der Individualverkehr zu Land war von dieser Entwicklung besonders betroffen. Während vor 200 Jahren nahezu alle Strecken zu Fuß bewältigt wurden, wird heutzutage vorrangig das Auto genutzt. Dies führt jedoch neben der höheren Lebensqualität zu Herausforderungen in der Zukunft. Steigende Emissionen, Rohstoffknappheit und zunehmende Energiekosten sind schon jetzt Themen vieler Diskussionen. Nicht zuletzt die Meldungen über den Klimawandel bringen die Problematik einem breiten Publikum näher. Laut „Shell PKW-Studie 2004“ wird die Zahl der Personenkraftwagen in Deutschland jedoch weiter wachsen und bis zum Jahr 2030 um etwa 10% auf über 50 Millionen Fahrzeuge ansteigen, obwohl die deutsche Bevölkerung im gleichen Zeitraum um etwa zwei Millionen Personen abnehmen wird [She04]. Ähnliche Szenarien ergeben sich für den amerikanischen und den asiatischen Raum. Der Fortschritt der neuen Mobilität entwickelt sich somit zunehmend zur weltweiten Herausforderung. Im Umfeld von endlichen Rohstoffvorkommen wird eine schonende Nutzung der Ressourcen unumgänglich. Um das Ziel der nachhaltigen Mobilität zu erreichen, sind mehrere Ansätze zu verfolgen. Neben Effizienzsteigerungen in der Energienutzung und einer umweltbewussten Fahrweise ist vor allem das Senken der Fahrwiderstände zu forcieren. Letztere hängen von mehreren Parametern wie zum Beispiel Luftwiderstandsbeiwert c_W und dem Reibbeiwert f_R ab [Klu06]. Vor allem wird die Fahrwiderstandskraft F_w von der Fahrzeugmasse m_g beeinflusst, die sowohl in die Rollreibungs- als auch in die Trägheits- und in die Hangabtriebskraft eingeht.

$$F_w = \underbrace{\rho_L \cdot A \cdot c_W \cdot \frac{v^2}{2}}_{\text{Luftwiderstand}} + \underbrace{m_g \cdot a \cdot f_R}_{\text{Rollreibung}} + \underbrace{m_g \cdot b}_{\text{Trägheit}} + \underbrace{m_g \cdot \sin(\alpha)}_{\text{Hangabtrieb}} \quad (1.1)$$

Die Fahrzeugmasse m_g an sich wird wiederum von vielseitigen Faktoren bestimmt. Durch strengere gesetzliche Verordnungen, Sicherheitseinrichtungen wie Airbags und elektronische Fahrhilfen (ABS, ESP), Komfortsysteme wie elektrische Sitzverstellung und Klimaanlage und gesteigerte Kundenansprüche bezüglich Agilität hat sich zwar der Mehrwert der Fahrzeuge in den letzten Jahren deutlich verbessert, allerdings wirkte sich diese Entwicklung negativ auf die Fahrzeugmasse aus. In Bild 1.1 kann man erkennen, wie sich die Fahrzeugleermasse bei verschiedenen Generationen des Modells „Volkswagen Golf GTI“ entwickelt hat. Im Lauf von 30 Jahren und fünf Modellen nahm sie um 76% zu. Um den-

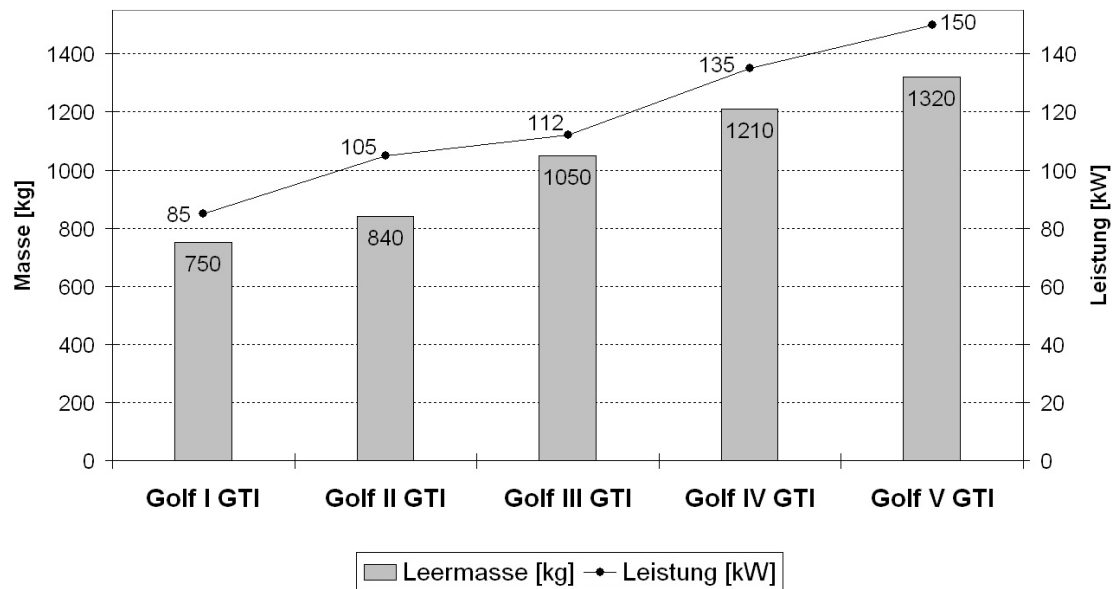


Bild 1.1: Masse und Leistung des Volkswagen Golf, Modell I bis V (Quelle: Volkswagen AG)

noch die geforderten Fahrleistungen zu erreichen, wurde das gestiegene Gewicht mit einer höheren Motorleistung kompensiert (+76%). Der Vorteil des besseren Wirkungsgrades des modernen Motors wird hierbei durch die notwendige höhere Leistung nahezu aufgebraucht. Wird in diesem Fall eine signifikante Gewichtsreduktion erzielt, so könnte ein kleinerer und leichter Motor bei gleichbleibender Fahrzeugagilität eingesetzt werden. Sekundäre Leichtbaupotentiale durch dann kleiner zu dimensionierende Nebenaggregate, Fahrwerksteile und Bremsen würden geschaffen werden, wodurch das Gesamtgewicht weiter gesenkt und somit der Treibstoffverbrauch optimiert wird. Das Resultat wäre folglich eine verbesserte Emissions- und Schadstoffbilanz [Tim92]. Anhand dieses Beispiels wird ersichtlich, dass konsequenter Leichtbau ein Schritt in Richtung verantwortungsbewusstes Transportwesen und somit hin zur nachhaltigen Mobilität ist.

Die Gewichtsreduktion kann dabei mit verschiedenen Ansätzen erzielt werden, wie die Einteilung der diversen Leichtbauprinzipien zu Konstruktions-, Stoff-, Fertigungs- und Systemleichtbau verdeutlicht [Kle00].

Beim Konstruktionsleichtbau werden durch optimierte Geometrien Leichtbaupotentiale generiert [Duk98]. Meist leisten hierzu automatisierte Topologieoptimierungswerkzeuge Hilfestellung. Durch den Einsatz eines höherwertigen Werkstoffes wird beim stofflichen Leichtbau eine Senkung des Gewichtes erzielt [Lew97]. Der Fertigungsleichtbau zielt auf eine Optimierung der Fertigungs- und vor allem der Fügeverfahren. Unter Systemleichtbau wird schließlich verstanden, inwiefern einzelne Bauteile vielseitige Funktionen übernehmen und dadurch andere Bauteile entfallen können. In der Praxis findet sehr oft das Prinzip des stofflichen Leichtbaus Anwendung. So konnte beispielsweise beim Airbus A300 durch den Einsatz von Faserverbundwerkstoffen die Masse des Seitenleitwerkmittelkastens von $652,27kg$ in Aluminiumbauweise auf $499,84kg$ reduziert werden [Tam83]. Bei anderen Beispielen sind Gewichtsreduktionen im Bereich von 15 – 30% im Vergleich zu Aluminium aufgeführt [Hal83, Lem80, Pat00, Sea86]. Alle Fälle hatten gemein, dass jeweils eine gesamte Struktur oder eine vollständige Baugruppe für Faserverbundeinsatz konzipiert wurde. Beim Automobilbau liegt aber die Problematik vor, dass die Umstellung einer vollständigen Rahmenstruktur von Aluminium- auf Faserverbundbauweise einen finanziellen Aufwand bedeutet, der derzeit nur im hochpreisigen Supersportwagensegment akzeptiert wird. Um dennoch von den Vorteilen dieser modernen Werkstoffe zu profitieren, wird vermehrt dazu übergegangen, für jedes Bauteil den richtigen Werkstoff zur Erfüllung der spezifischen Anforderungen zu finden [Bax04, Fri98, Mül95, Wal96]. Der weit verbreitete Satz „*form follows function*“ kann somit umgewandelt werden zu „*material follows function*“. Das Resultat ist eine Mischung unterschiedlicher Werkstoffe innerhalb einer Fahrzeugstruktur, was als *Hybridbauweise* oder *Multi-Material-Design* bezeichnet werden kann [Fer05, Lip95]. Essentiell ist jedoch die Frage der Kriterien, nach denen die Werkstoffeignung zur Erfüllung der Bauteilanforderungen definiert wird, da hiervon der Erfolg der Leichtbaumaßnahme abhängt. Bei den Faser-Kunststoff-Verbunden ist dabei vor allem die Anisotropie der Fasereigenschaften hervorzuheben. Die sich daraus ergebenden Möglichkeit, die Verbundkennwerte maßschneidern zu können, führt bei prädestinierten Bauteilen zu besonderen Gewichtsvorteilen verglichen mit Alternativwerkstoffen. Im Folgenden soll deshalb ein praxistauglicher Lösungsansatz erarbeitet werden, mithilfe dessen durch Analyse der Spannungszustände anisotrop belastete und damit für den Einsatz von Faserverbundwerkstoffen besonders geeignete Bauteile identifiziert werden können.

1.2 Übersicht zur vorliegenden Arbeit

In der Einleitung wird zum Thema der Arbeit hingeführt, wobei ausgehend von der Entwicklung der individuellen Mobilität über die Umwelt- und Klimadiskussion die Notwendigkeit des automobilen Leichtbaus dargestellt wird.

Das zweite Kapitel zeigt eine umfassende Übersicht zum Thema Faserverbundwerkstoffe. Dabei werden neben den Prinzipien der Faserverstärkung relevante Fasern und Matrixsysteme sowie Fertigungsverfahren vorgestellt. Des Weiteren wird auf faserverbundspezifische Struktureigenschaften und die Anforderungen des Automobilbaus eingegangen.

Der dritte Abschnitt ist der Untersuchung ausgewählter mechanischer Eigenschaften von Faserverbundwerkstoffen gewidmet. In einer theoretischen Betrachtung werden hierzu die Einflüsse diverser Parameter auf den E-Modul herausgearbeitet. Anhand von Zugprüfungen werden im Anschluss faserverbundspezifische Kennwerte ermittelt und bewertet.

In Kapitel 4 wird das Thema der Auswahl von Bauteilen für den Einsatz von Faserverbundwerkstoffen näher betrachtet. So werden, ausgehend von den charakteristischen Eigenschaften dieses Werkstofftyps, Kriterien erarbeitet, die eine anforderungsspezifische Selektion von Bauteilen ermöglichen.

Um die Bauteileignung für anisotrope Faserverbundwerkstoffe bewerten zu können, wird in Kapitel 5 ein Kennwert definiert, der eine Aussage zur strukturellen Belastung des Bauteils liefert. Mit dieser Information wird eine Auswahl von Bauteilen mit hohem faserverbundspezifischem Leichtbaupotential ermöglicht.

Der im vorangegangenen Abschnitt definierte Anisotropie-Kennwert wird im sechsten Kapitel implementiert, wobei diverse zusätzliche Datenoperationen zur Gewährleistung einer hohen Informationsqualität durchzuführen sind. Der resultierende Algorithmus ist so geartet, dass alle Lastfälle, die ein definiertes Basisformat vorweisen, bewertet werden können.

Im siebten Kapitel werden die Möglichkeiten der Anwendung des Anisotropie-Analyse-Algorithmus auf automobile Strukturen in der Praxis näher erörtert. Des Weiteren wird zur Darstellung der Prozesskette eine Karosserie bewertet, ein Bauteil ausgewählt und dieses dimensioniert, gebaut sowie geprüft. Durch den Vergleich mit dem Serienbauteil in Aluminium-Strangpressprofil-Bauweise wird das Leichtbaupotential quantitativ dargestellt. Eine Bewertung des Analyse-Verfahrens rundet dieses Kapitel ab.

Abschließend folgt im neunten Abschnitt eine Zusammenfassung der Arbeit sowie ein Ausblick auf zukünftige Aufgabengebiete.

2 Faserverbundwerkstoffe

2.1 Hintergrund

Als Verbundwerkstoffe bezeichnet man im Allgemeinen Kombinationen von mindestens zwei verschiedenen Phasen, wobei verschiedene Stoffgruppen wie Metalle, Kunststoffe, Gläser oder Keramiken zum Einsatz kommen. Dabei werden Eigenschaften erreicht, die von einer einzelnen Stoffgruppe nicht realisiert werden können. Verbundwerkstoffe lassen sich primär nach der Art der zusammengefügteten Stoffgruppen charakterisieren, sekundär nach der räumlichen Anordnung. Die erste Einteilung beinhaltet beispielweise Verbunde zwischen Glas und Metall (Drahtglas) sowie Glas und Kunststoff (Verbundglas). Die zweite Einteilung führt zur Unterscheidung in Schicht- (z.B. Glare), Teilchen- und Faserverbundwerkstoffe [Sch81, Hor94].

Die in den letzten Jahrzehnten vor allem in der militärischen und zivilen Luft- und Raumfahrt zunehmend eingesetzten Faserverbundwerkstoffe sind dabei keine Erfindung der Neuzeit. Bereits im alten Ägypten machte man sich die Vorteile dieser Werkstoffgruppe zu Nutze, indem man Keramiken durch Naturfasern wie Stroh, Flachs und Hanf verstärkte und somit Festigkeitssteigerungen um etwa 200% erreichte [And01, Str64]. Später wurden beim Bau von Häusern Lehmwände mit Weidenästen verstärkt, was deutlich verbesserte mechanische Kennwerte mit sich brachte [Ebi39]. Zu Beginn des 20. Jahrhunderts wurde mit dem Patent zur Herstellung von Phenolharzen durch L.H. Baekeland (1907) das Zeitalter der faserverstärkten Kunststoffe eingeläutet. Im Jahre 1935 folgte der Beginn der großtechnischen Herstellung von Glasfasern, 1955 schlossen sich Kohlenstofffasern und schließlich 1971 Aramidfasern an [Ehr92, Mal93]. Mit dem Segelflugzeug „Phönix“ der Akademischen Fliegergruppe (Akaflieg) Stuttgart wurde 1957 der Jungfernnflug des ersten vollständigen Faserverbundflugzeuges gefeiert [Deutsches Museum, München]. Seitdem wurden nicht zuletzt durch die verbesserten mechanischen Eigenschaften und die gesunkenen Preise der Faserverbundwerkstoffe neben der Luft- und Raumfahrt viele neue Einsatzgebiete erschlossen. So ist diese Werkstoffgruppe mittlerweile in der Medizin- und Messtechnik nicht mehr wegzudenken. Aber auch in der Sicherheitstechnik sowie im Hochleistungs- und Breitensport sind Faserverbunde weit verbreitet. Meist wird dabei das Leichtbaupotential sowie die optisch ansprechende Strukturoberfläche als Motivation für die Anwendung genannt. Auch die Möglichkeiten der Integralbauweise führen zu Vorteilen gegenüber alternativen Materialien. Die werk-

stofftechnischen Gründe für den Einsatz von Faserverbunden ergeben sich dabei nach Krevelen [Kre83] und Ehrenstein [Ehr92] aus folgenden vier Paradoxa der Werkstoffe:

Paradoxon des festen Werkstoffs

„Die wirkliche Festigkeit eines festen Stoffes ist sehr viel geringer als die theoretisch berechnete.“

(F. Zwicky, 1923)

Experimentell ermittelte Werte von Werkstoffparametern wie E-Modul und Festigkeit weichen deutlich von den berechneten Werten des theoretisch Möglichen ab. Die Berechnung basiert auf der atomaren Bindungsenergie, wobei die Ableitung der Energie proportional zum theoretisch möglichen E-Modul ist und die maximale Bindungsenergie mit der theoretischen Festigkeit korreliert. Die Differenzen zwischen theoretischen und experimentellen Werten werden sowohl durch Fehlstellen im molekularen, mikro- und makroskopischen Aufbau der Werkstoffe als auch durch nicht optimale Molekularstrukturen verursacht. Beispielhaft sind dabei kohlenstoffbasierte Werkstoffe. Diamanten erreichen einen E-Modul von circa 1.100.000 *MPa*, wohingegen Kohlenstoff-Fasern, welche wie Diamanten zu fast 100% aus Kohlenstoff bestehen, einen E-Modul von etwa 140.000 *MPa* bis 600.000 *MPa* vorweisen können. Begründet ist diese Differenz in unterschiedlichen Anordnungen auf molekularer Ebene [Hil74]. Diamanten stellen eine nahezu ideale Gitterstruktur mit wenigen Fehlstellen dar, wohingegen Kohlenstofffasern durch eine faserlängsgeschichtete Graphitstruktur gekennzeichnet sind. Je nach Prozessführung bei der Faserherstellung können die Orientierungen der Graphitschichten und die eingetragenen Fehlstellen beeinflusst werden, was eine signifikante Relevanz für die mechanischen Kennwerte beinhaltet. So führt Graphitisieren mit Verstrecken der Faser zur Reduzierung der Fehlstellen und zur Optimierung der Molekularstruktur, woraus höhere E-Moduln resultieren.

Paradoxon der Faserform

„Ein Werkstoff in Faserform hat eine vielfach größere Festigkeit als das gleiche Material in anderer Form und je dünner die Faser, umso größer ist die Festigkeit.“

(A.A. Griffith)

Dieses Paradoxon ist vor allem in der Wahrscheinlichkeit für strukturelle Fehler begründet, welche die mechanischen Eigenschaften beeinflussen. Fasern werden generell aus einer Schmelze oder Lösung gesponnen, wobei sich aufgrund der Oberflächenspannung

kreisrunde Querschnitte mit glatten Außenflächen bilden. Das Auftreten von Defekten ist dabei prozessbedingt gering [Kre83, Ehr92], woraus die größere Festigkeit der Faserform resultiert. Mit reduziertem Durchmesser nimmt die Fehlerwahrscheinlichkeit ab, weshalb die Festigkeitswerte steigen.

Paradoxon der Einspannlänge

„Je kleiner die Einspannlänge, umso größer ist die gemessene Festigkeit.“

(N. N.)

Mit verkürzter Einspannlänge nimmt die Wahrscheinlichkeit, dass sich in dem untersuchten Bereich eine Fehlstelle befindet, ab. So ergibt sich einer der Vorteile von Faserverbundwerkstoffen, da durch die Einbettung der Fasern in einen Matrixwerkstoff die reale Einspannlänge gegen Null geht. Fehler kommen somit im Verbundwerkstoff weitaus weniger zum Tragen, wodurch die gemessene Festigkeit erhöht ist.

Paradoxon der Verbundwerkstoffe

„Ein Verbundwerkstoff kann als Ganzes Spannungen aufnehmen, die die schwächere Komponente zerbrechen würden, während von der stärkeren Komponente im Verbund ein höherer Anteil seiner theoretischen Festigkeit übernommen werden kann, als wenn sie alleine belastet würde.“

(G. Slayter, 1962)

Diese Aussage ist durch die Auswirkungen von Imperfektionen auf den Werkstoff geprägt. Im Verbund ergibt sich die Situation, dass im Falle eines lokal begrenzten Defektes, somit eines verfrühten Versagens des Einzelelementes, die Gesamtheit weiter trägt. Spannungsspitzen werden umgelagert und Mikrorisse breiten sich langsamer aus. Durch diesen Effekt werden die Einflüsse von Fehlstellen reduziert und die Festigkeitswerte gesteigert [Kre83].

2.2 Verstärkungsfasern

Eine Faser ist ein im Verhältnis zur Länge dünnes und flexibles Gebilde. Die Definition nach Storer [Sto87] besagt, dass eine Endlosfaser ein polykristalliner oder amorpher Körper ist, welcher kontinuierlich innerhalb einer Probe oder eines Bauteils verläuft und

dessen Enden außerhalb des vorliegenden Spannungsfeldes liegen. Der minimale Durchmesser ist nicht begrenzt, der maximale Durchmesser liegt bei etwa 0,25 mm. Fasern grenzen sich von Stäben wegen ihrer kleineren Biege- und Knicksteifigkeit ab, von Drähten unterscheidet sie der geringere Durchmesser. In Natur und Technik kommen Fasern meist in einem größeren Verbund vor, sie bilden eine bestimmte Struktur. Fasern an sich können keine Druck-, sondern nur Zugkräfte aufnehmen, da sie bei Druckbeanspruchung der aufgetragenen Last ausweichen und knicken. In der Praxis müssen sie folglich in eine Matrix eingebettet werden, um ein Ausknicken zu verhindern und somit Druckkräfte aufnehmen zu können.

Es wird im Allgemeinen zwischen Kurz- (<5 mm), Lang- (5–20 mm) und Endlos-Faserverstärkungen (>20 mm) unterschieden. Die Faserlänge beeinflusst dabei die Verstärkungswirkung der Fasern. Dies resultiert aus dem Effekt, dass bei kurzen Fasern die Oberfläche zur Einleitung von Kräften über Scherspannungen zu klein ist, um die Zuggrenze zu erreichen. Erst ab der sogenannten „kritischen Faserlänge“ liegt die Faserspannung im Bereich der Faserfestigkeit. Mithilfe des Gleichgewichtes der Scherflächenkraft und der Faserkraft in Faserlängsrichtung (siehe Gleichung 2.1) wird die Bestimmung der kritischen Faserlänge möglich. So beschreibt der erste Term die Kraft, welche durch die Scherspannung über die Oberfläche in die Faser eingeleitet wird. Der zweite Term stellt die Bruchlast der Faser dar.

$$\underbrace{\overbrace{d_f \cdot \pi \cdot l}^{\text{Oberfläche}} \cdot \tau_B}_{\text{Scherflächenkraft}} = \underbrace{\overbrace{\left(\frac{d_f}{2}\right)^2 \cdot \pi}_{\text{Querschnittsfläche}} \cdot \sigma_B}_{\text{Bruchlast}} \quad (2.1)$$

Damit ergibt sich die kritische Faserlänge l_C zu Gleichung 2.2, wobei σ_B die Zugfestigkeit der Faser und τ_B die Oberflächenscherfestigkeit der Faser-Matrix-Verbindung darstellen. σ_B und τ_B sind sowohl von den Werkstoffen als auch den Fertigungsprozessen abhängig. Aus diesem Grund kann die kritische Faserlänge nicht allgemeingültig sondern nur einzeln für jede Kombination aus Fasern, Matrix und Fertigungsverfahren bestimmt werden.

$$l_C = \frac{\sigma_B \cdot d_f}{4 \cdot \tau_B} \quad (2.2)$$

Die mittlere Faserspannung $\bar{\sigma}_f$ ergibt sich dabei nach Ehrenstein [Ehr92] zu:

$$\bar{\sigma}_f = \sigma_{fmax} \cdot \left(1 - \frac{l_C}{2 \cdot l}\right) \quad (2.3)$$

In Bild 2.1 ist dieser Zusammenhang grafisch dargestellt. Es zeigt sich, dass die Faserspannung σ_f bei kurzen Fasern unter der Zuggrenze σ_{fmax} bleibt. Erst ab der kritischen Faserlänge l_C wird die Maximalspannung der Faser erreicht. Wird die Faserlänge

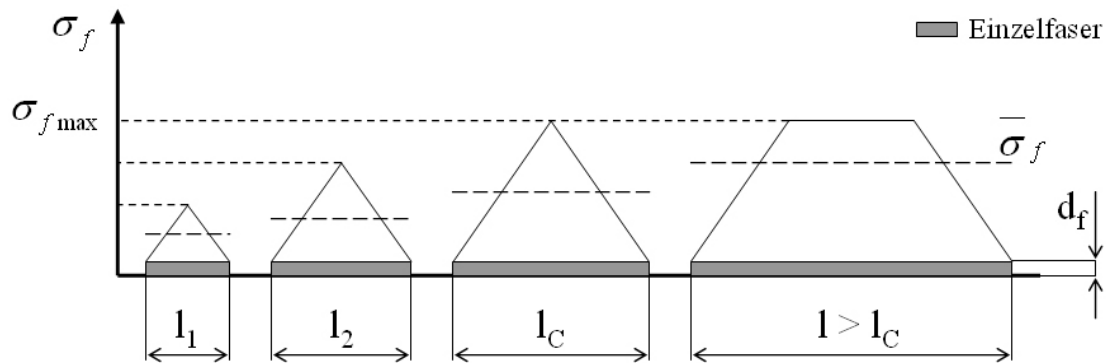


Bild 2.1: Darstellung der kritischen Faserlänge l_C anhand der maximalen Faserspannung σ_{fmax} in Abhängigkeit der Faserlänge l . [Ehr92]

weiter erhöht, so steigt die mittlere Faserspannung $\bar{\sigma}_f$ bis sie sich bei endlosen Faser-
verstärkungen der maximalen Faserspannung σ_{fmax} nähert. Man kann erkennen, dass
erst in diesem Fall die Verstärkungswirkung optimal genutzt wird. Dieser Effekt kann
anhand von mechnischen Kennwerten von kurz-, lang- und endlofaserverstärkten Ver-
bundwerkstoffen in der Praxis nachvollzogen werden. So zeigen Endlofaser-Werkstoffe
im Vergleich zu Kurzfaserverbunden höhere Werte sowohl für E-Modul als auch für
Festigkeiten [Sch05].

Besonders deutlich werden die Unterschiede der mechanischen Eigenschaften, wenn die
Anisotropie der Verstärkungsfasern durch eine definierte Orientierung gezielt genutzt
wird. So sind die signifikanten Leichtbaupotentiale von Faserverbundwerkstoffen erst
dann zu erschließen, wenn die Fasern in Lastrichtung im Bauteil verlaufen. Dies ist
darin begründet, dass bei Faserverbundwerkstoffen in Faserlängsrichtung die mechani-
schen Kennwerte maximal sind. Aufgrund der unterschiedlichen Einbringungsverfahren
der diversen Verstärkungsfasern in den Verbundwerkstoff sind definierte Orientierungen
derzeit nur bei Endlofasern möglich.

Die im Automobilbau üblichen hohen Anforderungen an die Eigenschaften von Struktur-
bauteilen sind deshalb bei Einsatz von Kunststoffen nur in Verbindung mit gerichteten
Endlofasern zu erreichen. Kurz- und langfaserverstärkte Pressmassen wie SMC (shield
moulding compound, langglasfaserverstärkte Polyesterpressmasse) werden hingegen vor
allem bei Außenhautbauteilen wie Heckklappen eingesetzt, da hier zum einen geringere
mechanische Eigenschaften notwendig sind und zum anderen meist Transparenz in Bezug
auf Funkstrahlung (mit Glasfasern erreichbar) gefordert wird um Antennen integrieren
zu können.

Im Anschluss wird auf die gängigsten endlosen Verstärkungsfasern eingegangen. Diese
sind im Speziellen:

- Aramidfasern

- Basaltfasern
- Glasfasern
- Kohlenstofffasern
- Polyethylenfasern

Weitere Fasertypen wie zum Beispiel Borfasern oder Naturfasern (Flachs, Hanf, Jute) werden hier nicht beachtet, da sie im Strukturbereich derzeit eine nur untergeordnete Rolle spielen.

2.2.1 Aramidfasern

Geschichtlicher Hintergrund

1971 wurden Aramidfasern als erste Hochleistungs-Polymerfasern von DuPont unter dem Markennamen *Kevlar* in den Markt eingeführt. Die eigentliche Bezeichnung des Werkstoffs ist aromatisches Polyamid, jedoch findet meist die Kurzform „Aramid“ (nach *aromatisches Polyamid*) Verwendung.

Herstellung

Aramidfasern werden als flüssig-kristalline Lösung versponnen und nachfolgend unter Temperatureinfluss gereckt. Daraus resultiert ein hoher Orientierungsgrad und somit anisotropes Verhalten [Sch05].

Varianten

Die beiden Marktführer DuPont und Teijin bieten jeweils eine Standardfaser und eine Hochleistungsfaser mit erhöhtem E-Modul an. Die Bezeichnungen hierfür sind Teijin *Twaron* LM (Low Modulus) und DuPont *Kevlar* 29 für die Standardfasern sowie Teijin *Twaron* HM (High Modulus) und DuPont *Kevlar* 49 für die Varianten mit hohem E-Modul.

Ausgewählte Eigenschaften

Aramidfasern weisen eine Vielzahl von charakteristischen Eigenschaften auf. Die wichtigsten sind im Folgenden dargestellt:

- Hohes Arbeitsaufnahmevermögen

- Negativer Wärmeausdehnungskoeffizient, analog zu Kohlenstofffasern
- Geringe Quer- und Druckfestigkeit
- Empfindlich gegenüber ultravioletter Strahlung
- Entflammbar, jedoch selbstverlöschend
- Druckfestigkeit nur ca. 30% der Zugfestigkeit

Eine Auswahl an Werkstoffparametern zeigt Tabelle 2.1.

Parameter	Zeichen	LM	HM	Einheit
Dichte der Faser	ρ_F	1,45	1,45	g/cm^3
Faserparalleler E-Modul der Faser	$E_{F,\parallel}$	85.000	130.000	MPa
Fasersenkrechter E-Modul der Faser	$E_{F,\perp}$	2.900	4.100	MPa
Querkontraktionszahl der Faser	ν_F	0,30	0,35	–
Zugfestigkeit der Faser	$R_{m,z,F}$	3.600	3.300	MPa
Bruchdehnung der Faser	$\epsilon_{m,F}$	4	2,8	%
Paralleler Wärmeausdehnungskoeffizient	$\alpha_{\parallel}$	$-2,5 \cdot 10^6$	$-3,5 \cdot 10^6$	$1/K$
Senkrechter Wärmeausdehnungskoeffizient	$\alpha_{\perp}$	$16 \cdot 10^6$	$20 \cdot 10^6$	$1/K$
Zersetzungstemperatur	T_{max}	550	550	$^{\circ}C$
Maximale Wasseraufnahme	M	7	7	$Gew - \%$
Faserparallele Wärmeleitfähigkeit	λ	0,03	0,04	$W/m \cdot K$

Tabelle 2.1: Kennwerte Aramidfasern [Lov91]

Einsatzbereiche

Aramidfasern werden aufgrund ihrer sehr guten Eigenschaften bezüglich Schlagbeanspruchung vor allem bei militärischen Anwendungen, beim Personenschutz und bei crash- sowie splitterkritischen Bauteilen eingesetzt. Ein weiteres Feld sind abrieb- und verschleißfeste Bauteile. Die bekanntesten Beispiele für den Einsatz von Aramidfasern sind schussichere Westen und militärische Helme.

2.2.2 Basaltfasern

Geschichtlicher Hintergrund

Die ersten Versuche, Fasern aus Basaltgestein herzustellen, fanden 1923 in den USA statt. Während des Zweiten Weltkrieges wurden die Anstrengungen durch Frankreich, Deutschland, Großbritannien, Italien und vor allem die USA weiter forciert, jedoch gelang der Durchbruch erst um 1970 in der Ukraine. Bis 1995 waren sowohl Forschung,

Entwicklung als auch Produktion der Basaltfasern geheim und den russischen Militär- sowie Raumfahrtbehörden unterstellt. Danach war die Geheimhaltung aufgehoben und die Fasern somit für die zivile Nutzung freigegeben.

Herstellung

Die Herstellung der Fasern erfolgt, indem geschmolzenes Basaltgestein versponnen wird. Im Zuge des Prozesses werden – je nach Anwendungsgebiet – Schichten auf die Faser aufgebracht, um die Faser-Matrix-Haftung zu verbessern und die Faser vor und während der Verarbeitung zu schützen.

Varianten

Da es sich zum aktuellen Zeitpunkt bei der Herstellung um einen Prozess mit nur einem einzigen Rohstoff, dem Basaltgestein, handelt und dieser nicht weiter modifiziert wird, unterscheiden sich die auf dem Markt erhältlichen Varianten vor allem durch die Qualität des Herstellungsprozesses und die aufgetragene Schichte. Hochmodulige oder hochfeste Derivate, wie man sie von anderen Fasertypen kennt, sind derzeit nicht verfügbar.

Ausgewählte Eigenschaften

Basaltfasern sind aufgrund der besseren mechanischen Eigenschaften bei ähnlichen Werkstoffkosten eine gute Alternative zu Glasfasern. Da sie wie Glasfasern mineralischen Ursprungs sind, zeigen sie innerhalb der Faser isotropes Verhalten, was sich in gleichen Kennwerten längs und quer zur Faser äußert. Sie zeichnen sich unter anderem durch folgende Eigenschaften aus:

- Großer Temperatur-Einsatzbereich von -260°C bis 980°C bei einer Schmelztemperatur von 1450°C
- Hohe Härte von 8-9 auf der Moh-Skala (Diamant=10)
- Hohe chemische Beständigkeit
- Nicht brennbar
- Ungiftig, nicht krebserregend (carcinogen)
- Unempfindlich gegenüber ultravioletter Strahlung

Die wichtigsten Kennwerte sind in Tabelle 2.2 aufgeführt.

Parameter	Zeichen	Wert	Einheit
Dichte der Faser	ρ_F	2,75	g/cm^3
Faserparalleler E-Modul der Faser	$E_{ ,F}$	89.000	MPa
Fasersenkrechter E-Modul der Faser	$E_{\perp,F}$	89.000	MPa
Querkontraktionszahl der Faser	ν_F	0,2	–
Zugfestigkeit der Faser	$R_{m,z,F}$	4.800	MPa
Bruchdehnung der Faser	$\epsilon_{m,F}$	3,1	%
Faserparalleler Wärmeausdehnungskoeffizient	$\alpha_{ ,F}$	$5,5 \cdot 10^{-6}$	$1/K$
Fasersenkrechter Wärmeausdehnungskoeffizient	$\alpha_{\perp,F}$	$5,5 \cdot 10^{-6}$	$1/K$
Dauerhafte Temperaturbeständigkeit	$T_{max,F}$	980	$^{\circ}C$
Schmelztemperatur	T_S	1450	$^{\circ}C$
Maximale Wasseraufnahme	M_F	0,1	$Gew - \%$
Faserparallele Wärmeleitfähigkeit	λ	0,04	$W/m \cdot K$

Tabelle 2.2: Kennwerte Basaltfasern (Quelle: TechnoBasalt, Ukraine)

Einsatzbereiche

Basaltfasern sind aufgrund der ähnlichen Eigenschaften eine direkte Konkurrenz zu Glasfasern. Eingesetzt werden sie bisher vor allem im Transportwesen, sowohl militärisch als auch zivil.

2.2.3 Glasfasern

Geschichtlicher Hintergrund

Nachdem Glasfasern erstmals im 18. Jahrhundert von Glasbläsern aus dem Thüringischen Wald als so genanntes Engels- oder Feenhaar zu Dekorationszwecken hergestellt wurden, begann die industrielle Fertigung im Jahr 1896 mit der Gründung der Glasfabrik von Hermann Schuller im thüringischen Haselbach. Seitdem wurden Glasfasern einsatzspezifisch weiterentwickelt, wodurch mittlerweile eine Vielzahl an Glasfaserderivaten auf dem Markt erhältlich ist [Moh92].

Herstellung

Das Verfahren, mit dem erstmals Fasern mit definierten Durchmessern hergestellt werden konnten, wurde in den dreißiger Jahren des 20. Jahrhunderts als Stabtrommelabziehverfahren patentiert. Heutzutage werden Glasfasern meist im Schmelzspinnverfahren hergestellt. Dabei wird der geschmolzene Grundwerkstoff durch etwa 1-2mm große Spinnndüsen geleitet und mit hoher Geschwindigkeit abgezogen. Nach dem Spinnvorgang erfolgt die Beschichtung mit einem Haftvermittler, der so genannten Schlichte.