

**Konstruktion und technologische Umsetzung
von hochbeanspruchten Lasteinleitungssystemen
für neuartige Leichtbaustrukturen
in Faserverbundbauweise**

Der Fakultät Maschinenwesen
der
Technischen Universität Dresden

zur

Erlangung des akademischen Grades
Doktoringenieur (Dr.-Ing.)
vorgelegte Dissertation

Dipl.-Ing. Olaf Helms
geb. am 11. September 1974 in Lausanne/Schweiz

Tag der Einreichung: 01. September 2006

Tag der Verteidigung: 12. Dezember 2006

Promotionskommission

Vorsitzender: Prof. Dr. rer. nat. habil. K.-H. Modler

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. W. Hufenbach
Prof. Dr.-Ing. habil. P. Offermann
Prof. Dr.-Ing. habil. L. Kroll

Mitglieder: Prof. Dr.-Ing. habil. U. Füssel
Priv.-Doz. Dr.-Ing. habil. E. Mäder

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik (ILK) der Technischen Universität Dresden.

Meinem hochverehrten Lehrer, Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Werner Hufenbach, Direktor des Instituts für Leichtbau und Kunststofftechnik, möchte ich für die Anregung zu dieser Arbeit, ihre Betreuung und die Übernahme des Referats meinen besonderen Dank aussprechen. Seine stets wohlwollende Unterstützung sowie die zahlreichen Diskussionen, verbunden mit wertvollen Hinweisen und Anregungen, haben wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. P. Offermann, Institut für Textil- und Bekleidungstechnik der TU Dresden, gebührt mein Dank für das der Arbeit entgegengebrachte Interesse und für die Bereitschaft zur Übernahme des Korreferats.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. L. Kroll, Institut für Allgemeinen Maschinenbau und Kunststofftechnik der Technischen Universität Chemnitz, möchte ich mich für die hilfreichen Hinweise und Anregungen sowie für die Übernahme des externen Gutachtens bedanken.

Mein besonderer Dank gilt darüber hinaus Herrn Dr.-Ing. M. Gude für die anregenden wissenschaftlichen Diskussionen und die freundschaftliche Unterstützung beim Fortgang der Arbeit. Ferner möchte ich mich herzlich bei meinen Kolleginnen und Kollegen des Instituts für Leichtbau und Kunststofftechnik der TU Dresden und hier vor allem bei Herrn Dr.-Ing. M. Lepper und Herrn Dipl.-Ing. A. Ulbricht bedanken.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Problemstellung und Zielsetzung	3
3	Stand der Technik	6
3.1	Direktverschraubungen	6
3.2	Gewindeinsätze	8
3.3	Bolzenverbindungen	10
3.4	Schlaufensysteme	12
3.5	Faserverbundzugstäbe	13
4	Methodische Konstruktion im Leichtbau	15
4.1	Konzeption von Leichtbausystemen	18
4.2	Entwurf in beanspruchungsgerechter Mischbauweise	21
4.3	Festigkeitsnachweis mittels physikalisch begründeter Versagenskriterien	28
5	Verbindungen mit endlosfaserverstärkten Thermoplastnieten	33
5.1	Warmformung von Nietlöchern	34
5.2	Endlosfaser-Thermoplast-(EFT-)Nietverfahren	39
5.3	Prozessstudien und Festigkeitsuntersuchungen	42
6	Hochfeste Verankerungen durch Faserverbund-Zugstäbe	45
6.1	Faserverbundgerechte Bauweisen	45
6.2	Verbundstabfertigung mittels Thermoplast-Pultrusion	48
6.3	Vorrichtung zur umformtechnischen Montage	50
6.4	Festigkeitsberechnungen und Verifikation	52

7	Textile Hohlstrukturen mit integrierten Lasteinleitungselementen	57
7.1	Konzeption von Schlauchblasstrukturen in Mischbauweise	57
7.2	Gestaltung und Dimensionierung von formschlüssigen Verbindungen	60
7.3	Halbzeugauswahl und Preforming	62
7.4	Herstellung von Demonstratorstrukturen	66
8	Integrative Lasteinleitungssysteme für Leichtbau-Aktuatoren	68
8.1	Anwendung der erweiterten Schichtentheorie zur Vorauslegung	69
8.2	Konzeption formschlüssiger Lasteinleitungen	72
8.3	Gestaltung und Auslegung von fasergerechten Rohrgewinden	74
8.4	Fertigung und Prüfung von Prototypen	79
8.5	Mischbauweise mit Gewindekontur- und Schlaufenverbindung	80
9	Lasteinleitungen für hochbeanspruchte Faserverbund-Kolbenstangen	84
9.1	Entwurf fasergerechter Lasteinleitungen	84
9.2	Dimensionierung neuartiger CFK-Kolbenstangen	86
9.3	Technologische Umsetzung und Erprobung	88
10	Zusammenfassung	93
11	Literaturverzeichnis	95

Abkürzungen

APC	Action Plane Criterion
BD	Bidirektional
CAD	Computer Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
CAM	Computer Aided Manufacturing
CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
EP	Epoxidharz
EFT	Endlosfaserverstärkter Thermoplast
FB	Faserbruch
FEM	Finite-Elemente-Methode
FKV	Faser-Kunststoff-Verbund
FMC	Failure Mode Concept
FVW	Faserverbundwerkstoff
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
GMT	Glasmatteverstärkter Thermoplast
HGTT	Hybridgarn-Textil-Thermoplast
IUD	Idealisiert unidirektional
KEE	Krafteinleitungselement
LEE	Lasteinleitungselement
LFT	Langfaserverstärkter Thermoplast
LW	Lastwechsel
MSV	Mehrschichtverbund
PA	Polyamid
PEEK	Polyetheretherketon
PP	Polypropylen
RTM	Resin Transfer Moulding
SMC	Sheet Moulding Compound
UD	Unidirektional
VA	Verwoben, ausgeglichen
VARI	Vakuum Assisted Resin Infusion
ZFB	Zwischenfaserbruch

1 Einleitung

Der hohe Globalisierungsdruck und die damit einhergehende Wettbewerbssituation in der Verkehrstechnik sowie im Maschinen- und Anlagenbau einerseits und die Notwendigkeit zur Energieeinsparung andererseits erfordern zwangsläufig die Entwicklung von innovativen wirtschaftlichen Leichtbausystemen. Derartige Systeme müssen immer komplexere strukturelle und funktionelle Anforderungen erfüllen, wofür die beanspruchungsgerechte Mischbauweise mit aufgabenspezifischer Werkstoffzuordnung geradezu prädestiniert ist. Dabei kommt der Kombination von metallischen Werkstoffen mit hochfesten und hochsteifen Faserverbundwerkstoffen eine herausragende Stellung für innovative Leichtbauanwendungen zu.

So weisen metallische Konstruktionswerkstoffe vor allem für mehrachsig beanspruchte Komponenten mit komplexer Geometrie technische und wirtschaftliche Vorteile auf. Diese Metallkomponenten gestatten, über Funktionsflächen wie z. B. Montage-, Gleit- und Dichtflächen hohe äußere Lasten aufzunehmen und diese gleichmäßig in die Faserverbundstrukturen einzuleiten. Demgegenüber bieten insbesondere Faser-Kunststoff-Verbunde (FKV) mit Endlosfaserverstärkung aufgrund der hohen spezifischen Festigkeiten und Steifigkeiten bei großflächigen und gestreckten Tragwerken ein erhebliches Gewichtseinsparungspotential sowie technologische und gestalterische Vorteile.

Die frühzeitige werkstoffübergreifende Berücksichtigung der Verbindungstechnik zwischen Metall- und Faserverbundkomponenten in einem interaktiven Konstruktionsprozess erlaubt die beanspruchungsgerechte Gestaltung und technologische Umsetzung von Faserverbund-Leichtbauweisen mit integrativen Lasteinleitungssystemen. Für die Einleitung großer Kräfte und Momente in FKV-Strukturen eignen sich insbesondere formschlüssige Verbindungssysteme wie etwa Schlaufen-, Kontur- oder Profilverbindungen. Derartige Lasteinleitungssysteme in Leichtbauweise bieten gegenüber klassischen Füge-systemen sowohl höhere Verbindungsfestigkeiten bei geringem Bauraumbedarf als auch besondere Vorteile hinsichtlich der Herstellungs- und Wartungskosten.

Im Vordergrund der Entwicklung hochbeanspruchter Lasteinleitungen steht die systematische Abstimmung möglicher Fertigungs- und Montagetechnologien auf die bestgeeigneten Konstruktionswerkstoffe, wobei den verwendeten Matrices der Verbundwerkstoffe besondere Bedeutung zukommt. Während duroplastische FKV-Strukturen mit integrativen Füge-zonen vor allem durch unterschiedliche Urformverfahren gefertigt werden können, erlaubt der Einsatz von endlosfaser- und textilverstärkten Thermoplasten auch die nachträgliche warmumformtechnische Herstellung von beanspruchungsgerechten Last-

einleitungssystemen. So können etwa mittels Press- oder Pultrusionsverfahren umformbare Thermoplast-Verbundhalbzeuge hergestellt werden, die zudem eine technologische Umsetzung von großserientauglichen und wirtschaftlichen Verbindungssystemen für komplexe Strukturen in Mischbauweise gestatten.

Die vorliegende Arbeit leistet einen wesentlichen Beitrag zur methodischen Konstruktion von hochbeanspruchten Lasteinleitungssystemen für FKV-Strukturen mit duroplastischen und thermoplastischen Matrixsystemen. Das Hauptaugenmerk wird dabei auf Verbindungssysteme für Mischbauweisen gerichtet, die eine gegenseitige konstruktive Abstimmung der metallischen Lasteinleitungselemente und der Faserverbundstruktur unter besonderer Berücksichtigung der technologischen Umsetzbarkeit erfordern. Zur vollständigen Ausschöpfung des hohen Leichtbaupotentials von Faserverbundwerkstoffen kommen darüber hinaus verfeinerte Berechnungsmodelle und neuartige physikalisch begründete Versagenskriterien zur Anwendung, mit denen die in Fügezonen im Allgemeinen herrschenden 3D-Spannungszustände realistisch bewertet werden können. Anhand ausgewählter Anwendungsbeispiele aus dem Fahrzeugbau, dem allgemeinen Maschinenbau sowie der Luft- und Raumfahrttechnik wird für hochbelastete Verbindungssysteme Metall/FKV die erforderliche Abstimmung in einem interaktiven Gestaltungsprozess von werkstoffgerechten Bauweisen mit zugehörigen Fertigungs- und Montageschritten aufgezeigt.

Für das warmumformtechnische Fügen wird im Rahmen der Arbeit ein neuartiges Endlosfaser-Thermoplast-(EFT-)Nietverfahren entwickelt, das eine bestmögliche werkstoff- und strukturangepasste Krafteinleitung bei flächigen Textilverbunden erlaubt. Dazu werden auch automatisierte, prototypische Fügevorrichtungen konstruiert und erprobt sowie umfangreiche Belastungsversuche an gefügten Demonstratoren durchgeführt. Ein weiteres prädestiniertes Anwendungsgebiet für warmumformtechnische Fügeprozesse eröffnet sich durch die erarbeiteten thermoplastischen FKV-Zugankersysteme mit hochfesten formschlüssigen Lasteinleitungssystemen. Zur Herstellung von innovativen Hohlstrukturen aus textilverstärkten Thermoplasten mit integrierten metallischen Funktionselementen eignet sich demgegenüber ein im Rahmen der Arbeit modifiziertes Schlauchblasverfahren.

Am Beispiel eines Leichtbau-Hydraulikaktuators in Mischbauweise werden integrative Lasteinleitungssysteme für zylinderförmige FKV-Strukturen interaktiv entworfen und hergestellt. Einen Schwerpunkt bildet die Gestaltung, Auslegung und Fertigung eines innovativen wickeltechnisch herstellbaren Rohrgewindes zur Übertragung hoher Axiallasten. Mit einem eigens entwickelten Press-Wickel-Verfahren wird ferner die Integration von hochbelastbaren Schlaufen und speziellen Wellenkonturen bei FKV-Kolbenstangenstrukturen technologisch umgesetzt.

Die in dieser Arbeit konstruierten und erprobten Lasteinleitungssysteme verfolgen das Ziel, sowohl den Fertigungsaufwand für die einzelnen Strukturkomponenten deutlich zu reduzieren als auch besonders zeitsparende Fügeverfahren und Montageprozesse bereit zu stellen. Sie besitzen damit Pilotcharakter für weitere Anwendungen im Hochleistungsbereich. Dabei sollen besonders originäre Lösungen mit hohem wirtschaftlichen Verwertungspotential in entsprechende Patente einfließen.

2 Problemstellung und Zielsetzung

Das hohe Leichtbaupotential von Mischbauweisen lässt sich insbesondere durch die enge interaktive Verzahnung der Entwurfsprozesse für Metallkomponenten und Faserverbundstrukturen gezielt ausnutzen, was allerdings derzeit noch oft vernachlässigt wird. Der Einsatz von konventionellen Fügeverfahren wie etwa Kleb-, Schraub-, Niet- und Bolzenverbindungen engt hierbei Gestaltungsfreiräume ein und führt häufig infolge der großen Fügeflächen zu erheblichen Bauraumproblemen. Zudem sind derartige Verbindungstechniken bei Mischbauweisen in aller Regel durch einen großen fertigungs- und montagetechnischen Aufwand gekennzeichnet.

Spezielle Verbindungstechniken für FKV-Strukturen müssen vielmehr auf die vorliegenden richtungsabhängigen Werkstoffeigenschaften sowie die typischen Fertigungs- und Füge-möglichkeiten abgestimmt werden. Dabei sind vor dem Hintergrund des Produktlebenszyklusses kosteneffiziente Leichtbaulösungen zu erarbeiten, die bei möglichst niedrigem Gewicht und geringem Bauraum eine ausreichende Verbindungsfestigkeit sowie schnelle Montage- und Wartungsprozesse gewährleisten. Vor allem bei Hochleistungssystemen stehen sich die verschiedenen konstruktiven und technologischen Maßnahmen zur Erreichung dieser Teilziele entgegen, was eine methodische Suche nach bestmöglichen Kompromissen unter technischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen erfordert.

Prädestinierte Beispiele für derartige Hochleistungssysteme stellen etwa die komplexen Flugzeugfahrwerke dar, bei denen der Einsatz von Faserverbundwerkstoffen deutliche Gewichts- und Kostenvorteile verspricht. In Abb. 2.1 ist beispielsweise das Bugfahrwerk eines Regionalflugzeugs mit den wesentlichen Modulen „Main Fitting“, „Drag Brace“, „Torque Link“ und „Retract Actuator“ exemplarisch dargestellt.

Beim Entwurf von hochbeanspruchten Modulen und Komponenten sind zunächst durch Abstrahieren wesentliche Tragfunktionen zu ermitteln und geeignete Tragwerke zu konzipieren. Als besonders hilfreich bei der Auswahl von geeigneten Verbundwerkstoffen und der Festlegung von Faseranordnungen erweisen sich Tragwerksprinzipien, die eine definierte Aufteilung einzelner Tragfunktionen erlauben. Neben Stabtragwerken und Schubfeldträgern, bei denen Grundelemente nur einfache Zug-/Druck- oder Schublasten übertragen, sind hierfür auch Platten-, Schalen- und Space-Frame-Tragwerke zur Aufnahme überlagerter Belastungen prädestiniert. Bei dem in der Regel mehrschichtigen Aufbau faserverstärkter Tragwerke steht die Zuordnung der einzelnen Schichten zu den jeweiligen Tragfunktionen im Vordergrund des frühen Entwurfsprozesses. Im Weiteren sind unter

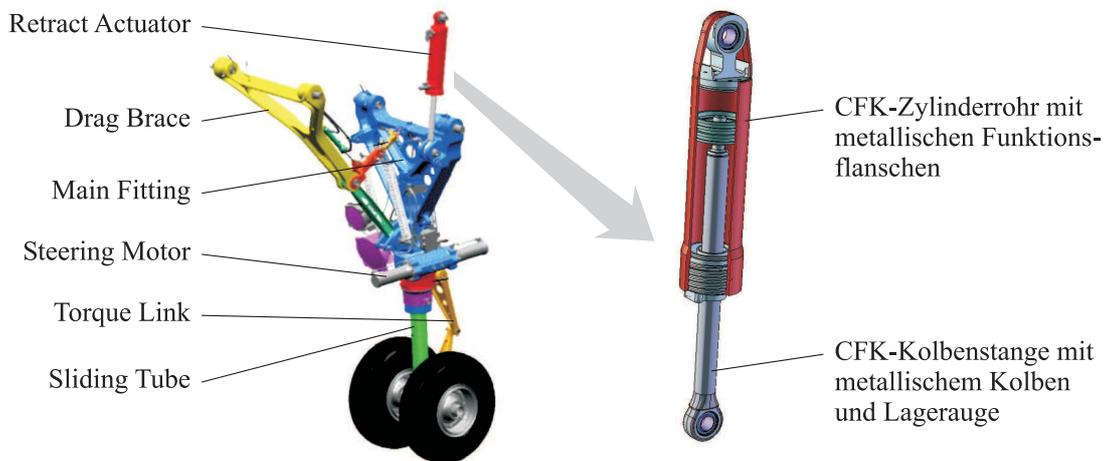


Abb. 2.1: Bugfahrwerkssystem der Liebherr-Aerospace Lindenberg GmbH und Leichtbau-Hydraulikaktuator in CFK-Metall-Mischbauweise

Berücksichtigung der Fertigungs- und Montagemöglichkeiten die Kräfteinleitungssysteme derart zu gestalten, dass die wirkenden Lasten gleichmäßig in die Faserverbundstruktur eingeleitet werden. Die oben beschriebene Vorgehensweise beim Entwerfen hochbeanspruchter Module wird in den weiterführenden Kapiteln unter anderem am Beispiel des in Abb. 2.1 als CAD-Entwurf dargestellten Leichtbau-Hydraulikaktuators (Retract Actuator) näher erläutert.

Für die detaillierte rechnerische Auslegung von Bauteilquerschnitten und geeigneten Schichtaufbauten bei hochbelasteten Faserverbundkomponenten ist die genaue Kenntnis der Werkstoffkennwertfunktionen sowie der Belastungs- und Bauraumbedingungen erforderlich. Oft wird aufgrund der komplizierten Geometrie und der multiaxialen Faserverstärkung ein räumlicher Spannungszustand induziert, der vor allem in der Fügezone sehr komplex ist. Für den durchzuführenden realistischen Festigkeitsnachweis sind im Allgemeinen verfeinerte Berechnungsmethoden in Kombination mit physikalisch begründeten Versagenskriterien heranzuziehen. Diese Festigkeitskriterien neuer Generation erlauben ferner auch grundsätzliche werkstoffmechanische Fragestellungen bei dynamischen und hochdynamischen Belastungen zu klären. Im Rahmen der Strukturauslegung sind auch verschiedene prozessbedingte Einflüsse zu berücksichtigen wie etwa veränderte Faserorientierungen nach Ur- und Umformvorgängen. Aufgrund dieser technologischen Einflüsse sowie den notwendigen Idealisierungen bei den Berechnungsmodellen ist das Konstruktionsergebnis mit Hilfe von betriebsnahen Belastungsversuchen zu verifizieren.

Bei der Entwicklung vieler Leichtbausysteme werden häufig strenge Bauraumanforderungen an die Verbindungstechnik gestellt, um etwa spezielle Designvorgaben oder Packaging-Konzepte verwirklichen zu können. Im Allgemeinen wird bei Füge- und Lasteinleitungen für Faserverbund-Strukturen gegenüber metallischen Strukturen mehr Bauraum benötigt. Durch größere notwendige Fügezonen sowie durch großvolumigere Verbindungs-

elemente wird ein Teil der durch Einsatz von Faserverbundwerkstoffen erzielten Gewichtseinsparungen wieder eingebüßt. Aus diesem Grund lassen sich besondere Gewichtseinsparungen bei gestreckten bzw. großflächigen Tragwerken erzielen, die große Abstände zwischen den einzelnen Lasteinleitungssystemen aufweisen – etwa bei Langhub-Hydraulikaktuatoren sowie bei langen Antriebs- und Getriebewellen. Unter dieser Prämisse sind bereits bei der Konzeption von Leichtbausystemen mit Faserverbundwerkstoffen die Bauteilgeometrien und die kinematischen Zusammenhänge derart abzustimmen, dass durch den effizienten FKV-Werkstoffeinsatz ein minimales Bauteilgewicht erreicht werden kann.

Ein weiteres Ziel im Rahmen des interaktiven Entwurfsprozesses von FKV-Leichtbaustrukturen ist die Auswahl, Modifikation und Konzeption von geeigneten Fertigungsverfahren und Montageprozessen. Mit den hier erarbeiteten Fertigungsverfahren für Zylinderstrukturen und Kolbenstangen mit integrativen Lasteinleitungsgeometrien sowie den warmumformtechnischen Fertigungs- und Fügeprozessen wird ein Beitrag zur wirtschaftlichen Herstellung von hochbeanspruchten, komplexen Leichtbausystemen neuer Generation geleistet. Die in dieser Arbeit entwickelten konstruktiven Lösungsvorschläge sowie deren technologische Umsetzung bestätigen eindrucksvoll, dass nur durch die enge Verzahnung des Konstruktionsprozesses mit der Fertigungskonzeption das Leichtbaupotential endlosfaserverstärkter Verbunde für Hochleistungssysteme voll ausgeschöpft werden kann.

3 Stand der Technik

Die Vielfalt gängiger Fügeverfahren für faserverstärkte Kunststoffbauteile spiegelt das weite Spektrum an unterschiedlichen Fügeaufgaben in den verschiedenen Industriezweigen wider. In vielen Großserienanwendungen sind vornehmlich weniger feste kurz- und langfaserverstärkte Thermoplaste, die sich durch Spritzgieß- oder Pressverfahren in kurzen Zykluszeiten herstellen lassen, zu fügen. Hierbei steht häufig die effiziente Prozessintegration in den automatisierten Fertigungs- und Montageablauf im Vordergrund. Bei der Entwicklung von Verbindungssystemen für Hochleistungsstrukturen aus endlosfaser- und textilverstärkten Kunststoffen werden demgegenüber eher strukturmechanische Gesichtspunkte und die beanspruchungsgerechte Gestaltung fokussiert. Im Folgenden werden einige wesentliche Fügeverfahren und Verbindungssysteme sowohl für kostengünstige Serienprodukte als auch für spezielle Hochleistungsbauteile kurz vorgestellt und deren Einsatzgrenzen aufgezeigt.

3.1 Direktverschraubungen

Ein weit verbreitetes Fügeverfahren für unverstärkte sowie kurz- oder langfaserverstärkte Spritzgussbauteile ist die Direktverschraubung. Verschiedene Hersteller für Verbindungselemente bieten dafür benötigte gewindefurchende Metallschrauben an, die in strukturintegrierte Kernlöcher eingedreht werden können (vgl. z. B. [39, 57]). Die Auszugsfestigkeit derartiger Schraubverbindungen wird häufig durch die Abscherfestigkeit des gefurchten Kunststoffgewindes bestimmt. Für die bestmögliche Ausnutzung der vergleichsweise geringen Abscherfestigkeit des Kunststoffs wird die Querschnittsfläche der einzelnen Kunststoffgewindegänge maximiert. Dafür werden diese Schrauben in der Regel mit kleinen Flankenwinkeln ($\beta = 30^\circ$, bei ISO-Spitzgewinde: $\beta = 60^\circ$), großen Gewindesteigungen P und mit einem großen Verhältnis von Nenndurchmesser d zu Kerndurchmesser d_3 ausgeführt (vgl. Abb. 3.1 a).

Die weitreichenden Formgebungsmöglichkeiten bei Spritzgusskomponenten erlauben eine einfache Integration beanspruchungs- und montagegerechter Anschlussgeometrien für Direktverschraubungen. Abb. 3.1 b zeigt schematisch eine beanspruchungsgerechte Direktverschraubung mit angeformten Domen. Derartige Verschraubungsdome erlauben eine große Einschraubtiefe und damit hohe Auszugsfestigkeiten sowie geringe relaxati-

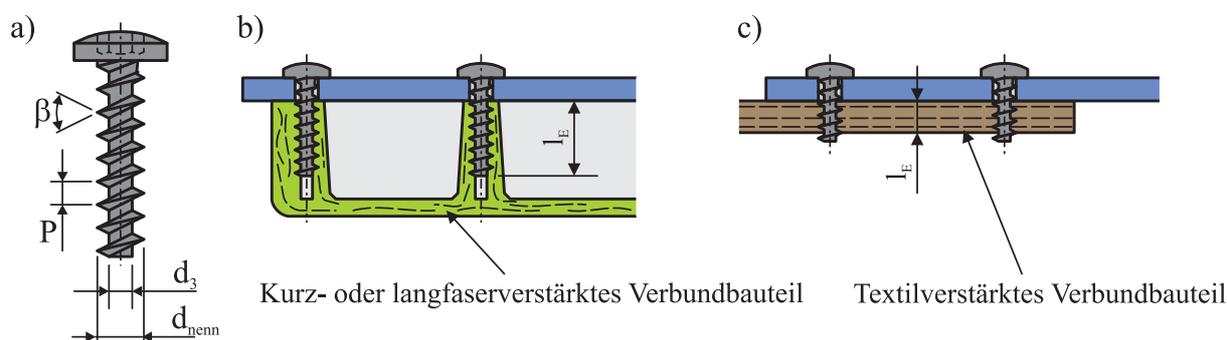


Abb. 3.1: Direktverschraubungen bei faserverstärkten Kunststoffverbunden: a) Schraubengeometrie, b) Verschraubung einer kurz- oder langfaserverstärkten Komponente mit angeformten Domen, c) Verschraubung einer textilverstärkten Komponente

onsbedingte Vorspannkraftverluste. Bei presstechnisch hergestellten glasmatteverstärkten Thermoplast-(GMT-)Komponenten und „Sheet Moulding Compound“-(SMC-)Bauteilen können in begrenztem Umfang Domstrukturen mit Langfaserverstärkung ausgeformt werden. Die Langfaserverstärkung bewirkt dabei jedoch eine nur geringfügige Steigerung der Auszugsfestigkeit. Bei duroplastischen SMC-Bauteilen verursacht das Gewindefurchen aufgrund des Sprödbbruchverhaltens häufig festigkeitsmindernde Matrixbrüche im Gewindebereich [58,60].

Mit Hilfe von ersten Einschraub- und Auszugsversuchen konnte im Rahmen dieser Arbeit die grundsätzliche Eignung von Direktverschraubungen auch für textilverstärkte Thermoplaststrukturen nachgewiesen werden. Dafür wurden Hybridgarn-Gewebe aus Polypropylen und Glasfasern (GF-PP, Twintex-Gewebe der Fa. Saint-Gobain Vetrotex mit ca. 35 % Faservolumenanteil) zu 8 mm starken Flachproben verarbeitet. Die benötigten Kernlöcher wurden durch Bohren spanend hergestellt und Schrauben (Delta-PT der Fa. EJOT) zügig eingedreht. Die dabei entstehende reibbedingte Erwärmung der Fügezone begünstigte die Gewindeausbildung in der GF-PP-Struktur (Abb. 3.2). Auszugsversuche ergaben bei verschiedenen Schraubendurchmessern reproduzierbare Gewindeabscherfestigkeiten

$$\tau_A = \frac{F_A}{\pi \cdot d_{nenn} \cdot l_E} \quad F_A : \text{ Auszugskraft} \quad (3.1)$$

von etwa 40 MPa (Geometrie siehe Abb. 3.1). Für SMC-Werkstoffe (Polyester mit 30 % Glasfaservolumenanteil) werden ähnlich große Werte angegeben, wogegen bei GMT-Werkstoffen (GF-PP, 30 % Glasfaservolumenanteil) die Werte mit 26 MPa deutlich niedriger ausfallen [60].

Wenngleich bei textilverstärkten Thermoplasten vergleichsweise hohe Gewindeabscherfestigkeiten erzielt werden können, ist diese Werkstoffgruppe aufgrund eingeschränkter Formgebungsmöglichkeiten nur bedingt für Direktverschraubungen geeignet. Denn das



Abb. 3.2: Direktverschraubung in textilverstärktem Thermoplast, ausgeformtes Gewinde (links) und abgescherte Gewindegänge nach einem Auszugsversuch (rechts)

eingeschränkte Drapiervermögen der textilen Verstärkung begrenzt in der Regel das Ausformen von gewünschten Verschraubungsdomen (vgl. Abb. 3.1 c). Ein lokales Aufdicken der Verbundstruktur mit textilen Patches führt zu einem deutlich erhöhten Aufwand bei der Preform-Herstellung bzw. bei der Verarbeitung. Günstiger ist hier eine kombinierte presstechnische Herstellung von Hybridgarn-Textil-Thermoplast-(HGTT-)Strukturen mit lokalen Aufdickungen aus Langfaser-Thermoplast-(LFT-)Pressmassen [2]. Sofern aufgrund von Fertigungsrestriktionen oder Bauraumbedingungen keine geeigneten Anschlussgeometrien für Direktverschraubungen realisiert werden können, bieten häufig spezielle Gewindeeinsätze effiziente fügetechnische Lösungen.

3.2 Gewindeeinsätze

Gewindeeinsätze bzw. Gewinde-Inserts erfüllen typischerweise eine verbindungstechnische Adapterfunktion zwischen Kunststoffbauteil und metallischer Schraube mit Regelgewinde (z. B. ISO-Spitzgewinde). Gewindebohrungen mit derartigen für metallische Werkstoffe optimierten Gewindegeometrien lassen sich mittels spanender Bearbeitung auch in FKV-Strukturen herstellen [65]. Analog den Direktverschraubungen werden für ausreichende Auszugsfestigkeiten jedoch große Einschraubtiefen benötigt, die in der Regel durch zusätzliches Aufdicken der Fügezone realisiert werden müssen. Spezielle Gewindeeinsätze mit werkstoffangepassten Funktionsflächen für die kraft-, form- oder stoffschlüssige Verankerung im Kunststoffbauteil erlauben demgegenüber eine gleichmäßigere räumliche Verteilung von Schraubenkräften auch bei geringen Wandstärken. Häufig angewandte Verankerungsprinzipien sind in Abb. 3.3 dargestellt.

Zur Aufnahme hoher Schraubenkräfte werden diese Gewindeeinsätze in der Regel aus metallischen Werkstoffen wie etwa Messing oder verzinkten Stählen hergestellt (vgl. Abb. 3.3 a-c). Bei weniger beanspruchten Strukturen werden zur Vereinfachung von Recycling-Prozessen auch Inserts aus kurzfaserverstärktem Kunststoff eingesetzt [40]. Weitere Gewichtseinsparungen sind ferner durch Einsatz spezieller Inserts aus endlosfaserverstärktem

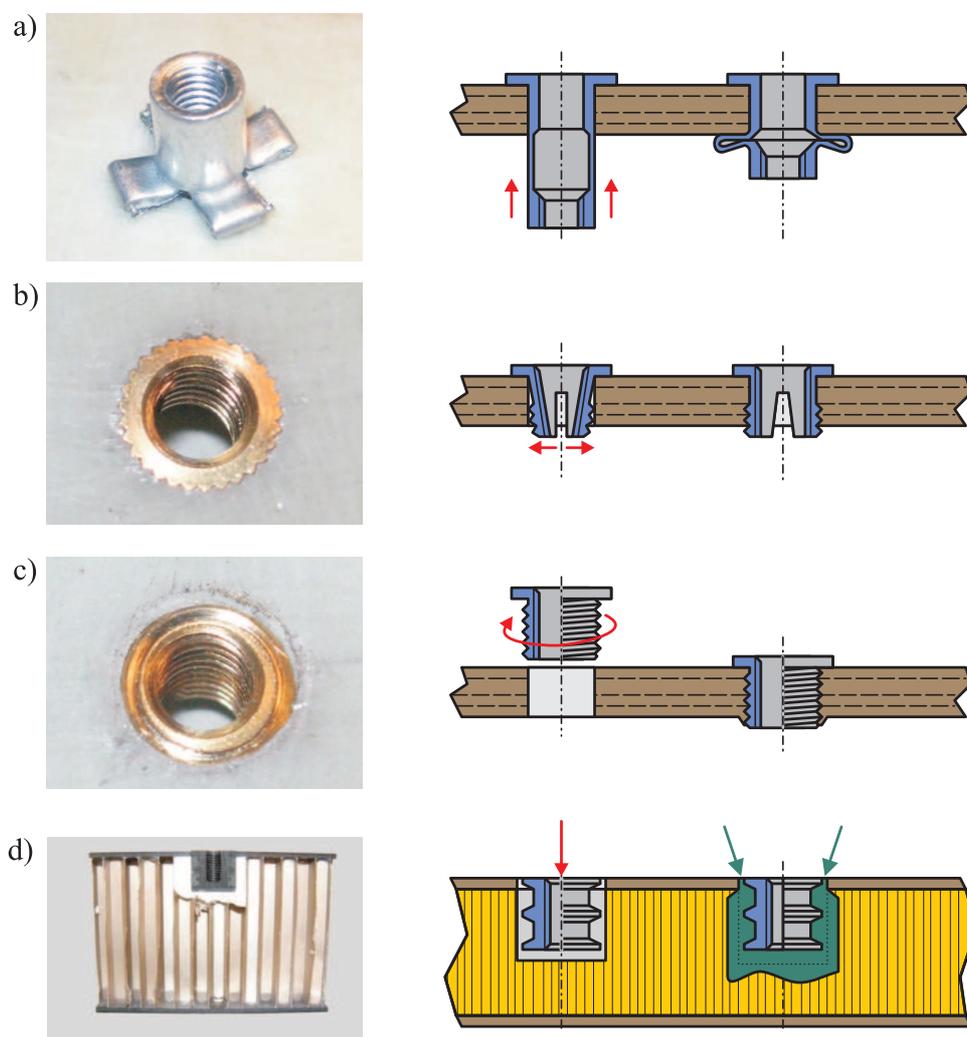


Abb. 3.3: Gewindeeinsätze für endlosfaserverstärkte Verbund- und Sandwichstrukturen [40,55]:
a)-c) Blindnietmutter, Insert mit Spreizverankerung und gewindefurchender Insert (Böllhoff) sowie d) Insert mit Vergussverankerung in einer Waben-Sandwichstruktur (icotec)

Thermoplast, die im „Composite Flow Moulding“-Verfahren hergestellt werden können, erzielbar (vgl. Abb. 3.3 d, [55]) .

Ein weitgehend werkstoffunabhängiges, hochfestes Verankerungsprinzip stellt die Blindnietmutter dar (Abb. 3.3 a). Andere Insertsysteme mit formschlüssiger Verankerung in der Bohrungswand eignen sich auch für Sacklöcher z. B. in Spritzguss-Komponenten. Die formschlüssige Verankerung in der Bohrungswand erfordert dabei eine ausreichende Umformbarkeit der Kunststoffstruktur. Die Herstellung der Verankerungsgeometrien in thermoplastischen Bauteilen erfolgt durch Gewindefurchen, Aufspreizen (Abb. 3.3 b, c) oder Warmeinbetten. Beim Warmeinbetten wird der thermoplastische Kunststoff im Boh-

rungsrandbereich z. B. durch Ultraschall plastifiziert und beim gleichzeitigen Einpressen des Inserts an dessen Geometrie angeformt [40].

Für die experimentelle Ermittlung von Auszugsfestigkeiten bei textilverstärkten Thermoplasten wurden verschiedene Inserts der Fa. Böllhoff in Probekörperplatten aus glasgewebeverstärktem Polypropylen (Twintex, 35 % Faservolumenanteil) eingebracht. Höchste Verbindungsfestigkeiten sind dabei mit Inserts erreicht worden, die durch Gewindefurchen verankert wurden (Böllhoff-Quicksert [53]). Mit etwa 27 MPa sind die Abscherfestigkeiten zwar deutlich niedriger als bei Direktverschraubungen. Das Insertsystem ermöglicht jedoch durch seinen größeren Außendurchmesser die Erzielung einer insgesamt etwas höheren Verbindungsfestigkeit als die Direktverschraubung bei gleichem Schraubendurchmesser (vgl. Abb. 3.4). Die Verankerungsgeometrie des untersuchten Insertsystems „Quicksert“ der Fa. Böllhoff ist dabei auf kurzfaserverstärkte Thermoplastbauteile abgestimmt, so dass eine Anpassung der selbstfurchenden Gewindegeometrie auf den Einsatz in textilverstärkten Thermoplaststrukturen auch höhere Abscherfestigkeiten erwarten lässt.

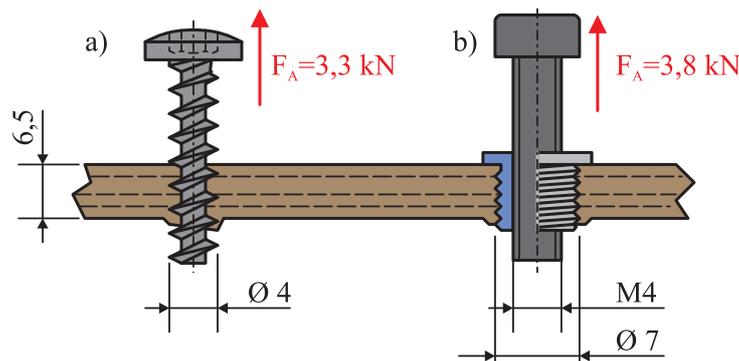


Abb. 3.4: Experimenteller Vergleich der Auszugskräfte bei a) einer Direktverschraubung und b) einem gewindefurchenden Insertsystem

Direktverschraubungen und viele Insertsysteme stellen in Verbindung mit dem Gestaltungsfreiraum bei Spritzgussbauteilen besonders geeignete großserientaugliche Verbindungssysteme dar. Eine Anwendung dieser Verbindungselemente für hochbeanspruchte, flächige Textilverbundstrukturen ist jedoch nur in Ausnahmefällen angeraten, da die Verbindungskräfte vorwiegend senkrecht zur Verstärkungsrichtung eingeleitet werden (out of plane). Während solche punktuell aufgebrachtene Querkräfte in der Regel ungünstige interlaminaire Schubspannungen in der Fügezone induzieren, können mit tangential wirkenden (in plane) Lasten – wie etwa bei Bolzenverbindungen – die hervorragenden Verbundeigenschaften viel besser ausgenutzt werden.

3.3 Bolzenverbindungen

Der Einsatz metallischer Passbolzen ist insbesondere im Flugzeugbau für die Verbindung von metallischen Funktionskomponenten mit duroplastischen FKV-Strukturen weit

verbreitet (Abb. 3.5 links). Ein wesentlicher Vorteil von Bolzenverbindungen ist neben den hohen möglichen Verbindungsfestigkeiten insbesondere die gute Reproduzierbarkeit. Durch die Verwendung vieler, verteilt angeordneter Bolzen werden auch bei dünnwandigen Strukturen hochwertige Fügeergebnisse erzielt. Für verschiedene Bauteilanforderungen und Montagerandbedingungen stehen Bolzen aus unterschiedlichen Werkstoffen mit bedarfsangepassten Setzköpfen und Schließverfahren zur Verfügung. Im Luftfahrzeugbau haben sich insbesondere Titan-Bolzen der Legierung Ti6Al4V mit selbstsichernden Muttern und Schließringen bestens bewährt [11, 61]. Letztere gewährleisten eine definierte axiale Vorspannung der Fügezone, wodurch allfälligen Delaminationen und Lochleibungsbrüchen effizient begegnet wird. Oft erweisen sich allerdings nicht die Lochleibungsfestigkeiten sondern die Kerbspannungen als primär versagenskritisch, da im Unterschied zu den meisten metallischen Werkstoffen bei vielen duroplastischen FKV Kerbspannungsspitzen kaum durch Pseudoplastizität abgebaut werden können.

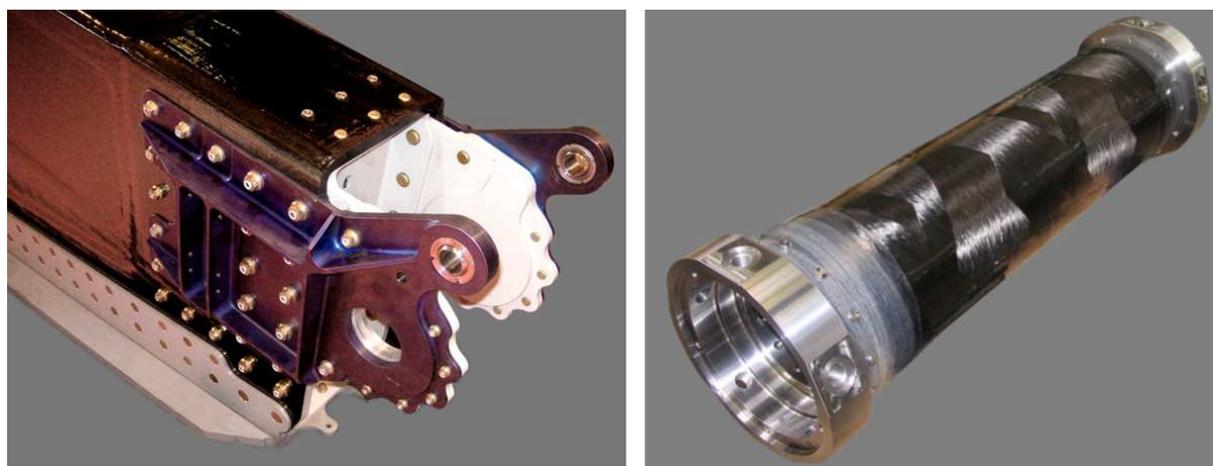


Abb. 3.5: Hochbeanspruchte Bolzenverbindungen bei CFK-Strukturen mit metallischen Funktionselementen, links: „Flap Track Beam“ für einen Airbus A 380 [38]; rechts: Antriebswelle für ein Spezialschiff [16]

Voraussetzung für die Herstellung hochwertiger Bolzenverbindungen ist ein maßgenaues und deckungsgleiches Fräsen der Bolzenlöcher im metallischen Lasteinleitungselement und in der Faserverbundkomponente [38]. Derartig gefertigte Bolzenverbindungen erlauben ferner auch die sichere Montage von hochbeanspruchten Schiffsantriebswellen aus CFK mit metallischen Kupplungsflanschen (Abb. 3.5 rechts). Hierbei erfolgt ebenfalls das gleichzeitige präzise Bohren deckungsgleicher Bolzenlöcher nach dem Ausrichten der FKV- und der Metallkomponenten. Der Einsatz kegelförmiger Bolzen in konisch geriebelten Bohrungen erlaubt darüber hinaus eine radiale Vorspannung der Verbindung, wobei die Bolzen durch eine zusätzliche Faserverbund-Bandage gesichert werden [16].

Aufgrund des hohen Fertigungs- und Montageaufwands kommen diese Verbindungen selten bei Großserienanwendungen wie etwa im Automobilbau zum Einsatz. Darüber hinaus stehen einer wirtschaftlichen Serienproduktion die für die spanende Bearbeitung von FKV benötigten kostenintensiveren Diamant-Werkzeuge entgegen.

3.4 Schlaufensysteme

Bei hochfesten Schlaufensystemen werden in der Regel metallische Lasteinleitungselemente durch eine vorwiegend unidirektional (UD-)verstärkte Verbundstruktur umschlossen, wodurch eine formschlüssige Lastübertragung ermöglicht wird. Derartige Schlaufensysteme gestatten eine besonders faserverbundgerechte Bauteilgestaltung und erlauben somit die Einleitung von höchsten Zug- und Drucklasten in schlanke, stabähnliche Leichtbaustrukturen [10]. In der Regel werden diese Faserverbundkomponenten aufgabenspezifisch gestaltet und durch Urformung etwa mittels Wickel- oder Presstechnik unter Verwendung von duroplastischen Harzsystemen hergestellt. Abb. 3.6 zeigt exemplarisch einen Hydraulikaktuator mit faserverstärkten Zugschlaufen für die Flanschverbindungen als CAD-Entwurf sowie wickeltechnisch hergestellte Zugschlaufen zur steifen Verbindung der Zangenarme einer Leichtbaufügezange für Niet- und Clinchprozesse [75].

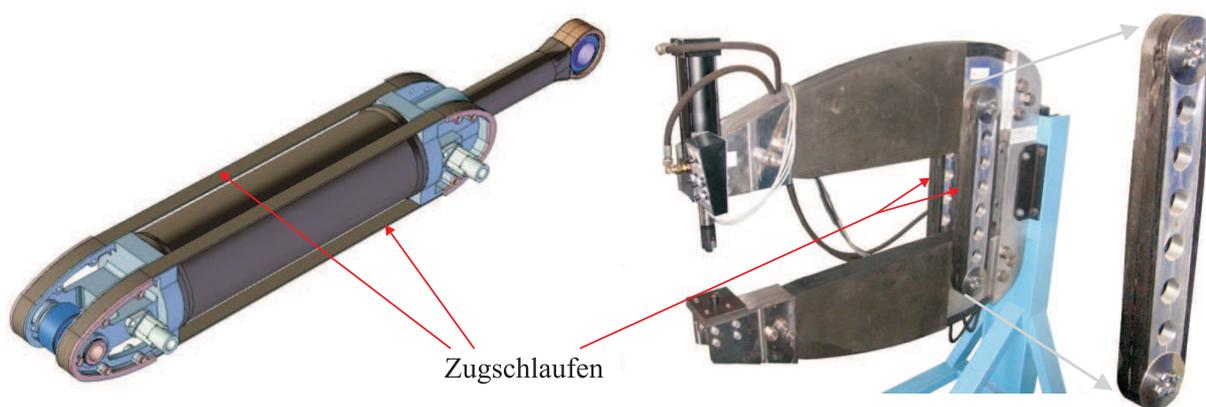


Abb. 3.6: Leichtbau-Hydraulikaktuator mit Zugschlaufen (CAD-Entwurf) für die Flanschverbindungen (links) und am ILK entwickelte Leichtbau-Fügezange mit wickeltechnisch hergestellten Zugschlaufen zur Verbindung der Zangenarme (rechts)

Darüber hinaus dienen eingebettete schlaufenähnliche Faseranordnungen zur Verstärkung von Bolzenlöchern bei flächigen Faserverbund-Strukturen. Die Herstellung derartiger Komponenten erfolgt typischerweise mit Hilfe textiler Preformverfahren wie etwa dem „Tailored Fibre Placement“ (TFP-Verfahren [9]) sowie gängigen Harzinjektionstechniken wie z. B. dem „Resin Transfer Moulding“-(RTM-) oder dem „Vakuum Assisted Resin Infiltration“-(VARI-)Verfahren. Als Beispiel für schlaufenförmig verstärkte Bolzenlöcher ist in Abb. 3.7 eine prototypische Kinematikkomponente für ein Cabrioverdeck dargestellt, die mittels TFP- und RTM-Verfahren aus kohlenstoffaserverstärktem Kunststoff hergestellt wurde.

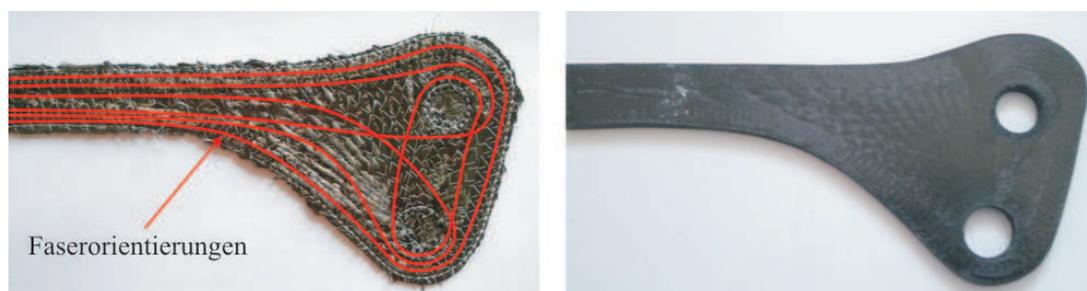


Abb. 3.7: TFP-Preform mit schlaufenartiger Faserorientierung (links) sowie daraus gefertigte prototypische Leichtbau-Kinematikkomponente für ein Cabrio-Verdeck (rechts)

3.5 Faserverbundzugstäbe

Bei schlanken, stark zugbeanspruchten Bauteilen weisen faserverstärkte Kunststoffe mit vornehmlich unidirektionaler Faserorientierung ein außerordentlich hohes Leichtbaupotential auf. Zu dieser Bauteilgruppe zählen etwa Leichtbauzuganker wie sie in der Bautechnik, zum Abspannen von Masten oder für die Flanschverbindung bei Leichtbau-Hydraulikzylindern zum Einsatz kommen. Während für Zugstangen aus metallischen Werkstoffen vergleichsweise einfache beanspruchungsgerechte Lasteinleitungssysteme verfügbar sind, konnte sich bislang für FKV-Zuganker noch kein universelles Verankerungssystem durchsetzen. Bei Stahlstangen werden etwa durch Endanstauchen hochfeste formschlüssige Verbindungen realisiert [41]. Darüber hinaus sind für solche metallischen Stäbe auch hochwertige stoffschlüssige Löt- oder Schweißverbindungen möglich. Bei Faserverbundzugstäben besteht demgegenüber das Problem, die hohen Kräfte gleichmäßig in die lasttragenden Verstärkungsfasern einzuleiten, wobei unidirektional verstärkte Kunststoffe quer zur Verstärkungsrichtung nur geringe Festigkeiten aufweisen. Die für eine hochfeste, formschlüssige Verbindung notwendige Faserumlenkung ist insbesondere bei kontinuierlich – etwa mittels Pultrusion (Abb. 3.8) – gefertigten, duroplastischen FKV-Zugstäben nachträglich nur schwer zu realisieren.

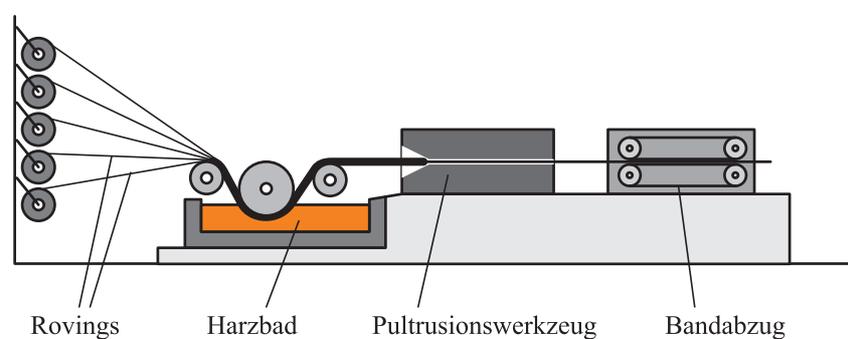


Abb. 3.8: Schema der kontinuierlichen Fertigung von UD-verstärkten Verbundstäben im Duroplast-Pultrusionsverfahren

In der Bautechnik wurden daher verschiedene, in der Regel kraft- und stoffschlüssig wirkende Vergussverankerungssysteme für endlosfaserverstärkte Verbundstäbe mit duroplastischer Matrix entwickelt (Abb. 3.9 a). Der Einsatz von pultrudiertem Stabmaterial mit konstantem Querschnitt ermöglicht hier die einfache Herstellung von Zugstabsystemen in unterschiedlichen Längen [49,77]. Typisch für Vergussverankerungen ist die Verteilung der Zuglast auf mehrere dünne Faserverbundstäbe an Stelle eines Stabes mit großem Durchmesser, um die Klebfläche zwischen Stäben und Vergussmasse zu maximieren. Mit Hilfe der Kegelpressung werden Druckspannungen in der Klebverbindung induziert, um die Abscherfestigkeit zu vergrößern. Der Einsatz derartiger Vergussverankerungen beschränkt sich aufgrund der aufwändigen Montage der Krafteinleitungselemente bislang auf wenige Hochleistungsanwendungen.

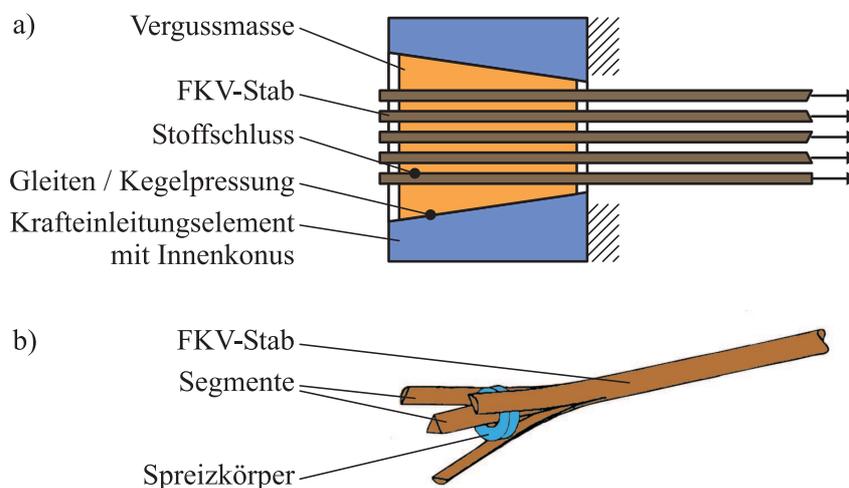


Abb. 3.9: Vergussverankerungen für FKV-Stäbe: a) Kraft- und stoffschlüssig wirkende, konische Vergussverankerung für bautechnische Aufgaben; b) Realisierung einer formschlüssigen Verankerung durch Aufspreizen des Stabendes

In [28] ist ein Lösungsansatz dargestellt, der durch eine Aufspaltung und Auffächerung des Stabendes einen Formschluss mit der Vergussmasse ermöglicht (Abb. 3.9 b). Die Aufspaltung des Stabes führt jedoch zu einer erheblichen Vorschädigung des Stabendes. Darüber hinaus induziert die Auffächerung zusätzliche Biegebeanspruchungen in den einzelnen Segmenten.

Mit den o. a. Verbindungstechniken kann das Potential beanspruchungsgerechter Mischbauweisen für wirtschaftliche Leichtbaulösungen selten ausgeschöpft werden. Viele bisherige Entwicklungen zur Verbindung von endlosfaser- und textilverstärkten Kunststoffstrukturen beschränken sich auf die Adaption von Fügeverfahren für klassische Konstruktionswerkstoffe, wobei die FKV-spezifischen Gestaltungs- und Fertigungsmöglichkeiten häufig unberücksichtigt bleiben. Daher stellen ganzheitliche Betrachtungen im Rahmen eines interaktiven Konstruktionsprozesses, bei dem Faserverbund- und Metallkomponenten aufeinander abgestimmt sowie strukturmechanische, fertigungs- und montagetechnische Gestaltungsaspekte berücksichtigt werden, Schwerpunkte dieser Arbeit dar.

4 Methodische Konstruktion im Leichtbau

Zur effizienten Erarbeitung von hochwertigen konstruktiven Lösungen bei unterschiedlichen technischen Aufgabenstellungen kommen branchenübergreifende und produktneutrale Konstruktionsprozesse, wie sie beispielsweise in [8, 17, 20, 30, 48, 50] erläutert werden, zur Anwendung. Derartige Prozesse bilden auch eine Grundlage für die zielgerichtete Entwicklung von Leichtbaustrukturen für Hochleistungsanwendungen. Ausgangspunkt bei der Anwendung und bei der aufgabenspezifischen Anpassung des allgemeinen Konstruktionsprozesses ist die nachfolgende Gliederung in Hauptphasen und Arbeitsergebnisse [50]:

1. Klären der Aufgabenstellung zur informativen Festlegung
2. Konzipieren zur prinzipiellen Festlegung
3. Entwerfen zur gestalterischen Festlegung
4. Ausarbeiten zur herstellungstechnischen Festlegung.

Bei der Konstruktion von Leichtbauprodukten lassen sich allerdings aufgrund der Abhängigkeiten zwischen gewählten Bauweisen, Werkstoffen und Verarbeitungsverfahren die Festlegungen hinsichtlich Gestalt und Herstellungstechnik nicht seriell getrennt treffen. Bei vielen Entwicklungsaufgaben im Leichtbau eignet sich eher ein iteratives Vorgehen, bei dem diese vier Phasen auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen mit zunehmender Konkretisierung mehrfach durchlaufen werden. Folglich werden im ersten Iterationsdurchlauf nur die wesentlichen Festlegungen hinsichtlich der Hauptfunktionen des Gesamtsystems getroffen. In weiteren Iterationsschleifen stehen dann zunehmend Nebenfunktionen im Vordergrund der Betrachtungen. Insbesondere bei der Konstruktion von Hochleistungsprodukten ist auch ein Hinterfragen und Anpassen der Aufgabenstellung notwendig, da etwa im Grenzbereich der Machbarkeit Kompromisse zwischen Leistungsdaten und Kosten gefunden werden müssen. Für den iterativen Konstruktionsprozess bei Leichtbauprodukten beinhaltet etwa die VDI-Richtlinie 2221 [48] geeignete Hinweise. In Abb. 4.1 sind exemplarisch einige typische Arbeitsschritte beim Konstruieren von Leichtbauprodukten angegeben.

Bei der Konstruktion von grundsätzlich neuen und sehr komplexen Leichtbausystemen sind in der Regel in relativ kurzen zeitlichen Abständen prinzipielle, gestalterische und

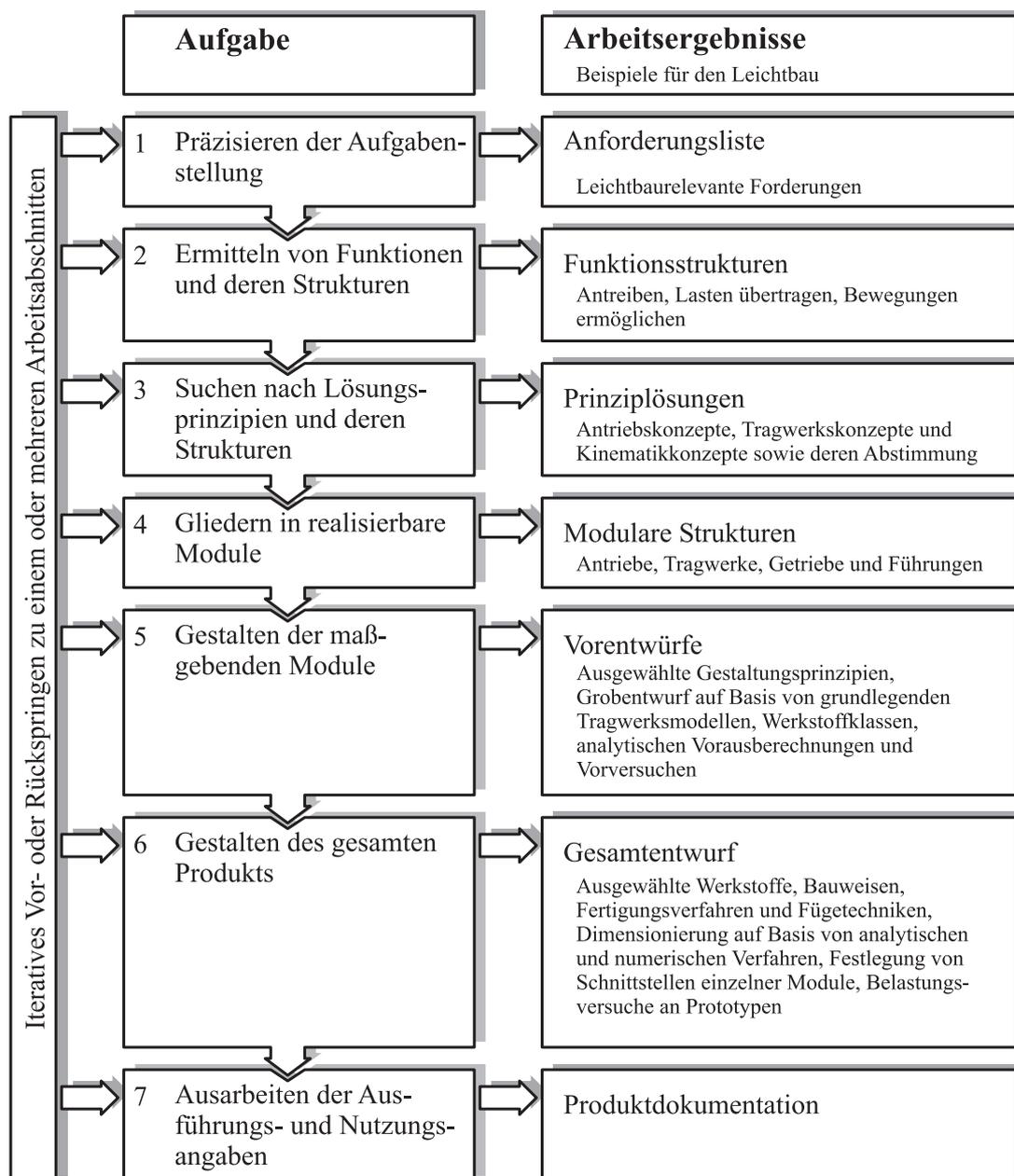


Abb. 4.1: Seriell orientierte Vorgehensweise beim Konstruieren von Leichtbauprodukten in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 2221 [48]

fertigungstechnische Festlegungen zu treffen, wobei die dabei notwendige direkte Abstimmung kaum mehr durch Iterationsschleifen plausibel dargestellt werden kann. Hierfür ist ein von vornherein parallel ausgerichteter Konstruktionsprozess prädestiniert, der eine kontinuierliche Interaktion zwischen den Haupttätigkeiten

- Klärung und Anpassung der Aufgabenstellung,
- Synthese des Leichtbausystems sowie
- Synthese des Herstellungsprozesses

gestattet. Die Vorgehensweise bei dem hier erarbeiteten interaktiven Konstruktionsprozess ist in Abb. 4.2 dargestellt.

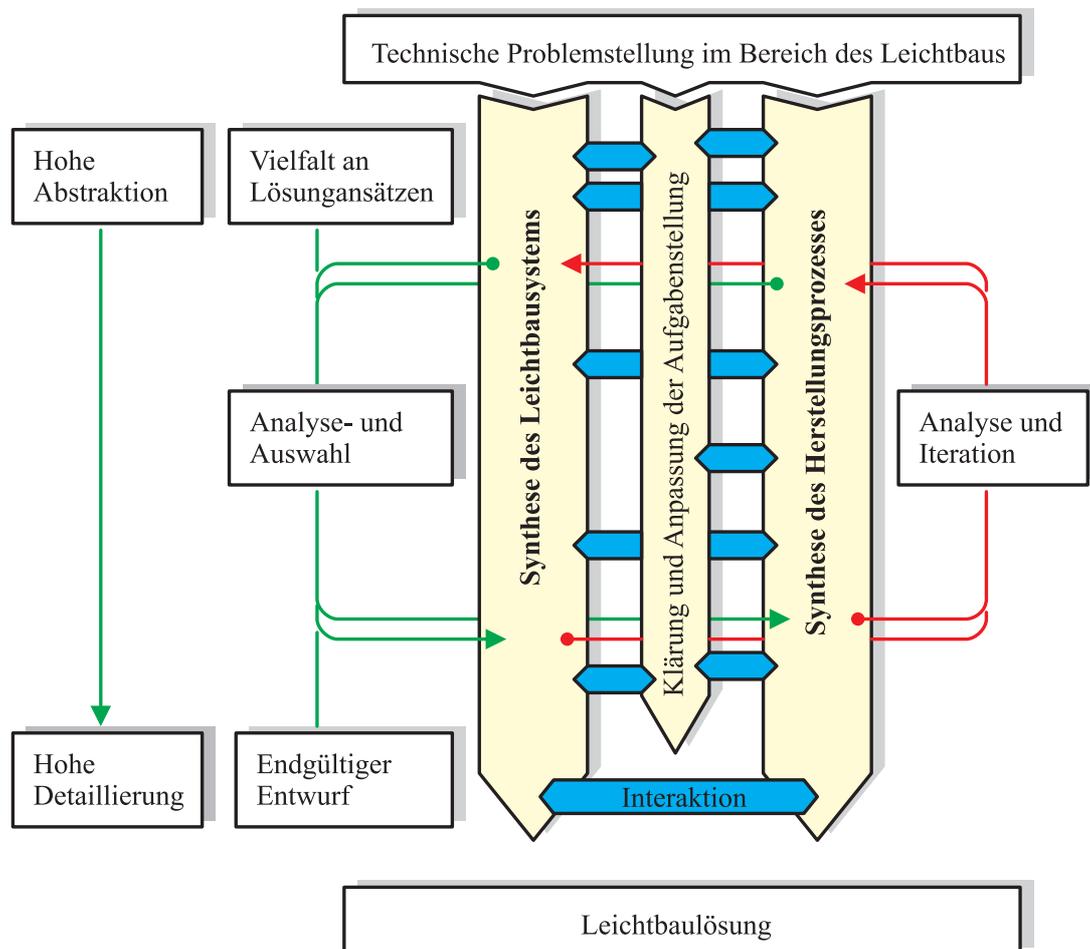


Abb. 4.2: Parallel ausgerichtete Vorgehensweise bei der interaktiven Konstruktion von Leichtbausystemen

4.1 Konzeption von Leichtbausystemen

Die Wettbewerbsfähigkeit eines Produkts hängt maßgeblich von seinen Funktionsmerkmalen und den in verschiedenen Produktlebensphasen entstehenden Kosten ab. In vielen Fällen können dabei durch innovative Leichtbaulösungen hinsichtlich Funktion und Kosten synergetische Effekte erzielt werden. Dies ist bereits bei der Erstellung einer Anforderungsliste zu berücksichtigen, wobei als Orientierung die in [50] aufgeführte Leitlinie für unterschiedliche Produkte mit übergeordneten Hauptmerkmalen dient. Häufig sind implizite Leichtbauforderungen in den Forderungen nach einem hohen dynamischen Leistungsvermögen und nach niedrigem Energiebedarf enthalten (vgl. Tabelle 4.1). Derartige Aufgabenstellungen liegen typischerweise bei Komponenten im Bereich von verkehrstechnischen Systemen (Luftfahrzeugen, Kraftfahrzeugen oder schnellen Schienen- und Wasserfahrzeugen) sowie bei Maschinen für schnelle Verfahrens-, Fertigungs- und Montageprozesse vor. Im Bereich anderer Leichtbauprodukte werden für Bauteile, Baugruppen oder technische Systeme funktionsbestimmende Maximalgewichte explizit festgeschrieben. So etwa darf eine robotergeführte Fügezange für Clinch- oder Nietaufgaben die zulässige Nutzlast des Roboters nicht überschreiten.

Tab. 4.1: Leichtbauweisen fordernde Hauptmerkmale

Hauptmerkmal	Beispiele assoziierter Leichtbauforderungen
Kräfte	Forderung nach Gewichtseinsparung, um weitere zugehörige Systemkomponenten wie etwa Tragwerke, Fundamente oder Antriebe kleiner und preiswerter ausführen zu können
Energie	den Energiebedarf zu senken oder um verfügbare Energien effizienter zu nutzen
Sicherheit	Vorschriften oder Richtlinien zur Arbeitssicherheit zu erfüllen
Ergonomie	Handhabung eines Produkts zu vereinfachen oder um Schallemissionen zu reduzieren (Funktionsintegrativer Leichtbau)
Transport	Transportkosten zu senken oder vorhandene Transportwege nutzen zu können

Einige Hauptmerkmale sind hilfreich beim Erkennen von Leichtbauforderungen während andere der Erfassung wirtschaftlicher und technischer Grenzen für den Einsatz von Leichtbauweisen und Leichtbauwerkstoffen dienen. Im frühen Konstruktionsprozess sind daraus abgeleitete restriktive Fragestellungen zu klären (Tabelle 4.2).

Durch Substitution konventioneller Systemkomponenten durch Leichtbaukomponenten

Tab. 4.2: Leichtbauweisen entgegenstehende Hauptmerkmale

Hauptmerkmal	Beispiele restriktiver Fragestellungen
Geometrie	Stehen Bauräume für den effizienten Gestaltleichtbau zur Verfügung? Sind Anschlussmaße mit Leichtbauweisen vereinbar?
Fertigung	Sind geeignete Fertigungsverfahren für die angestrebten Leichtbauweisen verfügbar?
Kontrolle	Stehen geeignete Möglichkeiten zur Qualitätssicherung der Leichtbaukomponenten zur Verfügung?
Gebrauch	Sind die verfügbaren Leichtbauwerkstoffe ausreichend beständig gegenüber thermischen oder medialen Lasten? Welche mechanischen Missbrauchsbelastungen sind zu erwarten?
Instandhaltung	Können geeignete Reparaturmaßnahmen angeboten werden?
Recycling	Sind vorgesehene Bauweisen mit gesetzlichen Verwertungsaufgaben vereinbar?
Kosten	Welche Mehrkosten sind für eine Leichtbauweise wirtschaftlich vertretbar?
Zeit	Können erforderliche Taktraten mit vorgesehenen Fertigungsverfahren eingehalten werden? Sind längere Entwicklungszeiten für ein Leichtbauprodukt wirtschaftlich zu rechtfertigen?

bei Beibehaltung von Bauräumen und Anschlussgeometrien lassen sich selten wirtschaftliche Vorteile erzielen. Erst eine ganzheitliche, durchgängige Leichtbaukonstruktion ermöglicht – insbesondere bei Betrachtung des gesamten Produktlebenszyklusses – bedeutende Kosteneinsparungen. Leichtbauspezifisch aufbereitete Anforderungslisten unterstützen vor allem bei Neukonstruktionen die Erarbeitung derartiger durchgängiger Leichtbaukonzepte. Im Rahmen von Anpassungskonstruktionen, bei denen neue Entwurfsvarianten zu bestehenden Prinziplösungen erarbeitet werden, dienen die Anforderungslisten ebenfalls als Entscheidungshilfe.

Bei der Konzeption eines Leichtbausystems werden mit Hilfe der Abstraktion zunächst Hauptfunktionen und deren Struktur ermittelt. Die prinzipielle Festlegung der Lösung erfolgt durch Zuordnung geeigneter Wirkprinzipien und Aufstellung der Wirkstruktur. Typische Funktionsstrukturen von Leichtsystemen basieren auf Tragwerks-, Antriebs- und Bewegungsfunktionen sowie deren Interaktion. Abb. 4.3 zeigt exemplarisch eine Prinzip-

lösung für ein Bugfahrwerk mit Tragwerks-, Antriebs- und Kinematikkonzept.

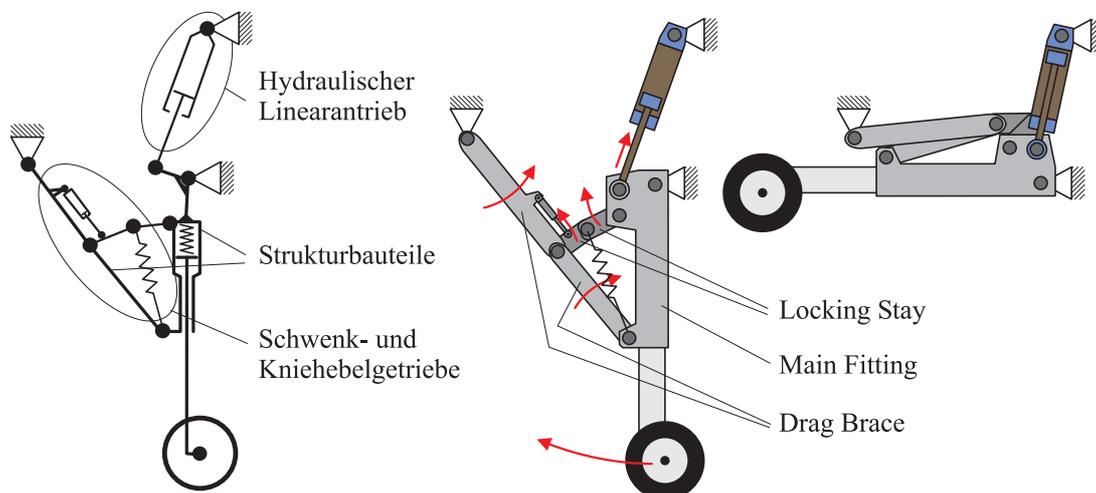


Abb. 4.3: Prinziplösung und Gestaltentwurf eines Bugfahrwerks unter Berücksichtigung von Tragwerks-, Antriebs- und Kinematikkonzepten

Tab. 4.3: Funktionen und Prinziplösungen bei einem Flugzeugfahrwerk

Teilfunktion	Wirkprinzip	Prinziplösung für Teilfunktion
Antreiben	Fluiddruck auf eine Kolbenfläche	Hydraulischer Linearantrieb
Führen und Verriegeln	Kreisführung von Fahrwerkskomponenten mittels Gelenklager, Verriegelung durch Erreichen von Totpunktlagen	Schwenken des Main Fittings, Verriegelung durch Reihenschaltung zweier Kniehebelgetriebe
Lasten übertragen	Mechanisches Tragwerk	Tragwerk für Zylinderrohr, Kolben, Kolbenstange, Main Fitting, Drag Brace, Locking Stay, Gelenkbolzen

Zur Konzeption von technischen Systemen lassen sich Funktionen hinsichtlich des Stoff-, Energie- und Signalumsatzes gliedern [30, 50]. Für eine effektive methodische Konstruktion vor allem bei komplexen Leichtbausystemen ist eine Aufteilung der Gesamtfunktion in Teilfunktionen (Haupt- und Nebenfunktionen) zwingend erforderlich. In Tabelle 4.3 sind ausgewählte Zusammenhänge zwischen Funktionen und Prinziplösungen bei einem Fahrwerk zusammengefasst.

Für die eingehende Bewertung von Leichtbaukonzepten werden über die erarbeiteten Anforderungslisten hinaus häufig erste Entwurfsergebnisse benötigt, so dass grundsätzliche Informationen hinsichtlich der zu erwartenden Hauptabmessungen, Bauraumbedingungen und Werkstoffkosten berücksichtigt werden können. Aus diesem Grund ist eine scharfe Trennung von Konzept- und Entwurfsphase nur selten möglich und sinnvoll.

4.2 Entwurf in beanspruchungsgerechter Mischbauweise

Die Entwurfsphase ist ein iterativer Prozess aus Synthese und Analyse, wobei zunächst auf hohem Abstraktionsniveau mehrere Gestaltentwürfe erarbeitet (Grobgestalten) und dann schrittweise nach Bewertung und Auswahl detailliert und ergänzt werden (Feingestalten). Beim Entwurf von Leichtbausystemen werden auf Basis der erarbeiteten Konzepte insbesondere Antriebe, Getriebe und Tragstrukturen angeordnet und dimensioniert sowie geeignete Bauweisen, Werkstoffe, Fertigungs- und Fügeverfahren festgelegt. Wesentliche Arbeitsschritte bei der Gestaltung zeigt Abb. 4.4.

Bei den gestalterischen Festlegungen werden neben der Anforderungsliste die bekannten Grundregeln der Gestaltung sowie weitere Gestaltungsprinzipien und Gestaltungsrichtlinien berücksichtigt. Die Grundregeln des Gestaltens lassen sich prägnant durch die Schlagworte

eindeutig, einfach, sicher

charakterisieren und dienen als Leitfaden und Bewertungshilfe bei vielen gestalterischen Vorgängen. Im Leichtbau werden Tragwerke idealerweise so gestaltet, dass allen Strukturkomponenten eindeutige Tragfunktionen zugeordnet werden können. Durch die „baukastenähnliche“ Verwendung von elementaren Tragwerksmodellen wie etwa Stabtragwerken, Rahmentragwerken und Schubfeldträgern, können bereits bei der Grobgestaltung eindeutige Zuordnungen für strukturmechanische Aufgaben festgelegt werden. Die Nutzung derartiger elementarer Tragwerke erleichtert ferner die Auswahl von geeigneten Werkstoffklassen sowie von beanspruchungsgerechten Faserorientierungen bei Verbundbauteilen. Im Einklang mit den Grundregeln des Gestaltens erlaubt die Synthese von Strukturbauteilen aus elementaren Tragwerken nicht nur eine eindeutige strukturmechanische Aufgabenverteilung sondern auch eine zuverlässigere (sichere) Berechnung und Dimensionierung.

In Ergänzung zu den allgemeinen Grundregeln dienen konkretere Gestaltungsprinzipien einer effizienten Entwurfsphase und einem hochwertigen Konstruktionsergebnis. Diese Gestaltungsprinzipien (in [17] auch als „Konstruktionsprinzipien“ bezeichnet) sind als produktneutrale Lösungsvorschläge für häufig geforderte Teilfunktionen zu verstehen. Im Unterschied zu den Grundregeln der Gestaltung sind vorteilhafte Gestaltungsprinzipien aufgabenspezifisch auszuwählen. Für den Entwurf von Leichtbaustrukturen sind etwa nachfolgend aufgeführte Prinzipien von besonderer Bedeutung:

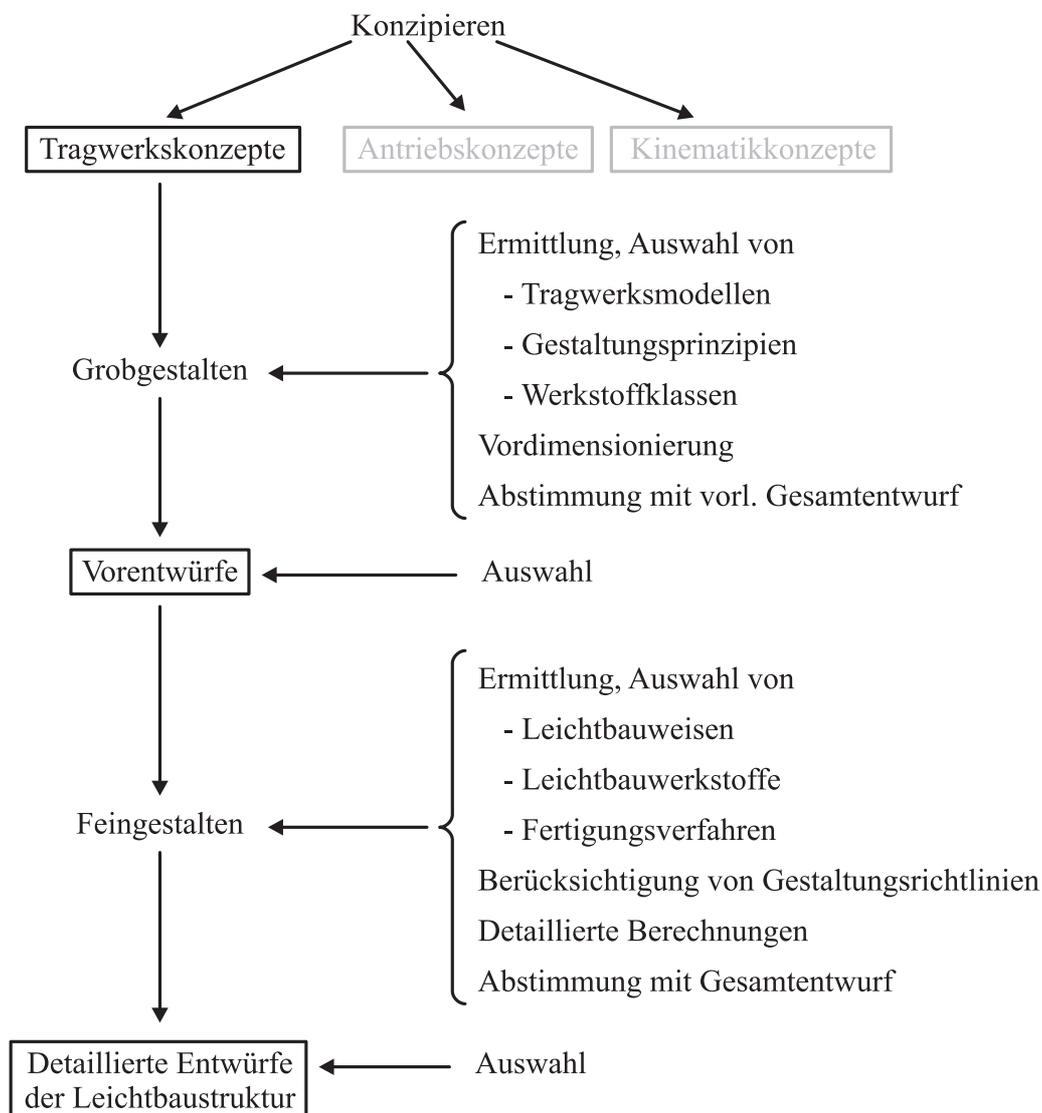


Abb. 4.4: Wesentliche Arbeitsschritte beim Entwerfen von Leichtbaustrukturen

- Prinzip der Strukturtrennung (Differentialbauweise) oder der Strukturintegration (Integralbauweise)
- Prinzipien der Kraftleitung
 - * Prinzip der direkten und kurzen Kraftleitung
 - * Prinzip der gleichen Gestaltfestigkeit
 - * Prinzip des Kraftausgleichs
 - * Prinzip der definierten Kraftverzweigung
 - * Prinzip der abgestimmten Verformungen

- Prinzip des Vermeidens von Überbestimmtheiten
- Prinzip der Zuordnung von Funktionswerkstoffen

Verschiedene Gestaltungsprinzipien dienen vereinzelt auch konträren Teilzielen, so dass geeignete Kompromisse zu ermitteln sind. So etwa führt die Strukturtrennung zu geometrisch einfacheren und somit kostengünstig herstellbaren Bauteilen, während die Strukturintegration in der Regel durch spezielle Geometrien eine effizientere Montage gestattet. Im Leichtbau entstehen daher oft sogenannte „integrierende Bauweisen“ als wirtschaftlich vorteilhafte Kompromisse.

Die Gestaltungsprinzipien der Kraftleitung unterstützen synergetisch einen einfachen und eindeutigen Aufbau von Tragstrukturen. Am Beispiel der in Abb. 4.5 skizzierten robotergeführten Leichtbau-Fügezange für Clinch- und Nietprozesse sollen einige, für Leichtbauprodukte besonders bedeutsame, Prinzipien der Kraftleitung exemplarisch erläutert werden. Eine derartige Fügezange erfüllt unter anderem das Prinzip des Kraftausgleichs, da neben der Stempelkraft auch die gleichgroße, entgegengerichtete Matrizenkraft in die Struktur eingeleitet wird. Durch diesen Kraftausgleich innerhalb der Zangenstruktur wird keine Last auf die leicht ausgeführte Roboterstruktur übertragen.

Die Zangenstruktur folgt ferner dem Prinzip der direkten und kurzen Kraftleitung, denn damit ist die strukturelle Kette der Nachgiebigkeiten sehr kurz ausgeführt. Da für hochwertige Niet- oder Clinchverbindungen auch bei hohen Fügekräften eine präzise Ausrichtung von Stempel und Matrize zu gewährleisten ist, werden diese Werkzeuge durch die hochsteife Fügezange direkt verbunden. Der Roboter selbst wird dabei nicht in den Hauptlastpfad einbezogen.

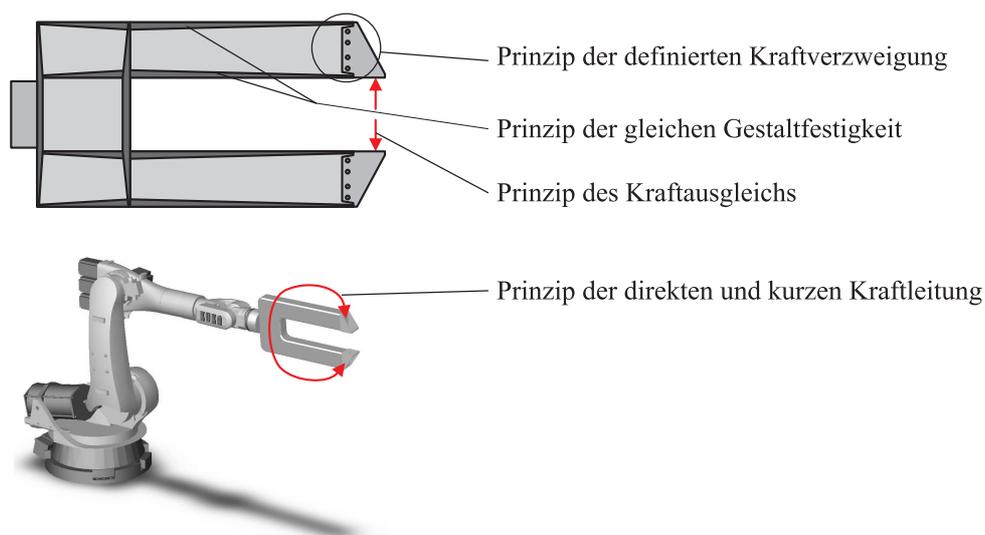
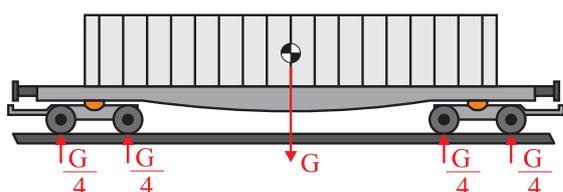


Abb. 4.5: Anwendung von Gestaltungsprinzipien bei einer Leichtbau-Fügezange

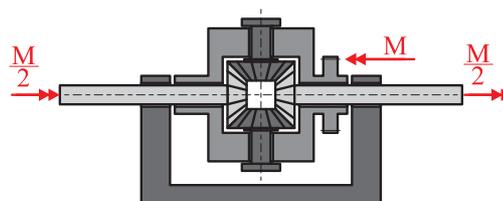
Die Auslegung der Leichtbau-Fügezange folgt darüber hinaus dem Prinzip der gleichen Gestaltfestigkeit, wobei als grundlegendes Tragwerksmodell ein Schubfeldträger betrachtet

wird. Die Reaktionskräfte der Fügwerkzeuge induzieren in den Zangenarmen im Wesentlichen linear anwachsende Biegemomente und konstante Querkräfte. Dementsprechend werden im Bereich der Gurte die Querschnittsflächen und bei Faserverbundwerkstoffen auch die Faserorientierungen an den Verlauf der Biegespannungen angepasst. Der Schubfluss kann mit rechteckigen Schubfeldern konstanter Dicke übertragen werden. Insgesamt ergibt sich hierdurch eine beanspruchungsgerechte Grundstruktur mit hohem Werkstoffausnutzungsgrad.

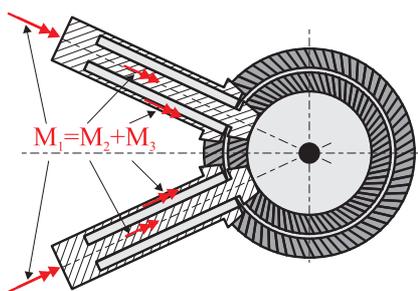
Durch eine gezielte Verzweigung von Kraftflüssen können gemeinsam wirkende Tragwerkskomponenten gleichmäßig ausgelastet und lokale Überlastungen vermieden werden. Definierte Kraftverzweigungen basieren im Allgemeinen auf Getrieben mit mehreren Freiheitsgraden oder auf parallel geschalteten Elastizitäten (vgl. Abb. 4.6). So etwa können bei längeren Eisenbahnwagen durch gelenkig angebundene Drehgestelle Gewichtskräfte gleichmäßig auf vier Achsen verteilt werden. Bei Fahrzeugen dienen Differentialgetriebe beispielsweise der gleichmäßigen Verteilung der Antriebsmomente auf mehrere Antriebsräder.



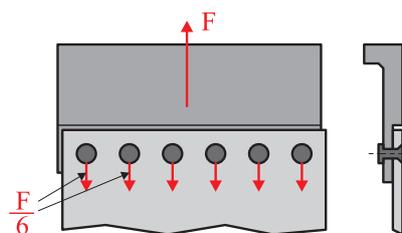
a) Kraftverteilung über Drehgestelle bei einem Eisenbahnwagen



b) Momentenverteilung durch ein Differentialgetriebe bei einem Kraftfahrzeug



c) Drehmomentaufteilung durch koaxiale, torsionselastische Wellen bei einem Hubschraubergetriebe



d) Kraftverzweigung bei einer Nietverbindung

Abb. 4.6: Definierte Lastverzweigungen durch Getriebe mit mehreren Freiheitsgraden (oben) und durch parallel geschaltete Elastizitäten (unten)

Eine definierte Kraftverzweigung wird auch bei der in Abb. 4.6 c schematisch dargestellten Sammelstufe für neuere Hubschraubergetriebe durch paarweise angeordnete, koaxiale, torsionselastische Antriebswellen verwirklicht. Diese Drehmomentaufteilung (Torque Split) ermöglicht die parallele Momentenübertragung mit jeweils zwei Kegelradpaarungen, wodurch bei betriebsbedingten elastischen Lagerverschiebungen im Bereich des Zahneingriffs

gleichmäßigere Tragbilder erzielt werden können. Bei Fügeaufgaben gewährleisten abgestimmte Elastizitäten eine weitgehend konstante Verteilung der Verbindungskräfte auf die einzelnen Lasteinleitungs- oder Verbindungselemente (Abb. 4.6 d). Ein derartig verzweigter Kraftfluss erlaubt aufgrund der einhergehenden hohen Werkstoffausnutzung häufig das Strukturgewicht zu reduzieren.

Für hoch beanspruchte Verbindungen und Fügezonen ist im Weiteren das Gestaltungsprinzip der abgestimmten Verformungen von zentraler Bedeutung. Durch geeignete Gestaltung von Komponenten, günstige Anordnung von Lastpfaden und gezielte Werkstoffauswahl können in Fügezonen besonders kleine Relativverformungen erzielt werden. Dadurch lassen sich bei kraftschlüssigen Verbindungen verschleißfördernde Relativbewegungen unterdrücken sowie bei stoff- und formschlüssigen Verbindungen schädigende Spannungsspitzen minimieren (vgl. Abb. 4.7). Auf das Prinzip der abgestimmten Verformungen wird bei der Entwicklung von Konturverbindungen in Kapitel 8 näher eingegangen.

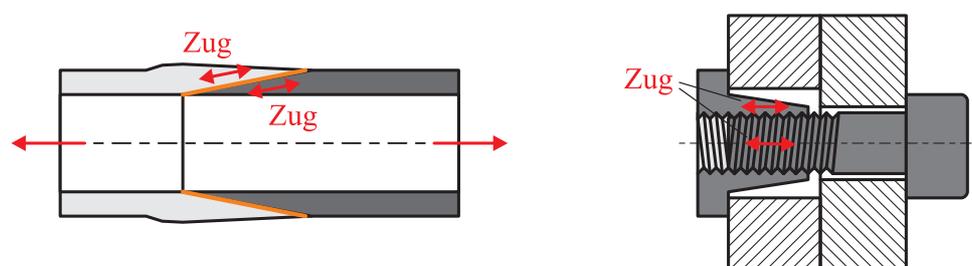


Abb. 4.7: Abgestimmte Verformungen durch Schäftung bei einer Klebverbindung (links) und durch eine angepasste Zugmutter bei einer Schraubverbindung (rechts)

Das Gestaltungsprinzip des Vermeidens von Überbestimmtheiten steht im Einklang mit der Grundregel der Eindeutigkeit. Dieses Prinzip lässt sich häufig durch Gewährleistung definierter Nachgiebigkeiten in Montagezonen und Lasteinleitungsbereichen verwirklichen (vgl. Abb. 4.8).

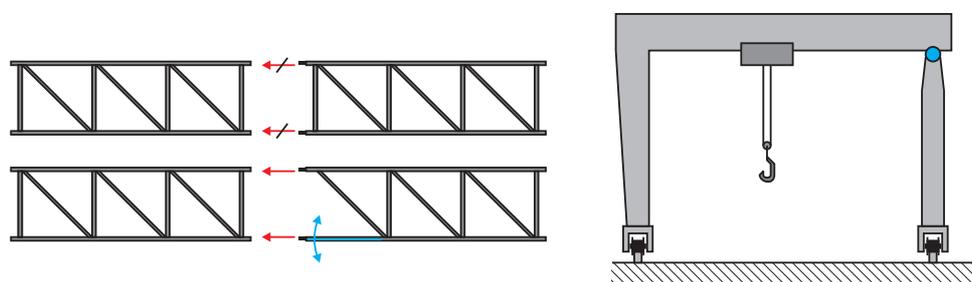


Abb. 4.8: Vermeidung von Überbestimmtheiten durch Gelenke und definierte Nachgiebigkeiten (blau): Modifikation einer Steckverbindung für einen Fachwerkträger (links) und statisch bestimmte Abstützung eines Portalkrans (rechts)

Für den Strukturleichtbau mit Faserverbundwerkstoffen ist die Zuordnung von Funktionswerkstoffen zu speziellen Bauteilfunktionen ein wesentliches Gestaltungsprinzip, da sich

Verbundwerkstoffe kaum für mechanisch beanspruchte Funktionsflächen eignen. Daher werden für viele Funktionsflächen metallische Elemente eingesetzt, die die hohen äußeren Lasten aufnehmen und werkstoffgerecht in die Faserverbundstruktur einleiten.

In einer frühen Entwurfsphase (Grobgestalten) sind Leichtbausysteme in Bereiche unterschiedlicher Leichtbaurelevanz zu gliedern. Wirtschaftlich interessante Mischbauweisen ergeben sich dann durch den gezielten Einsatz von Leichtbauwerkstoffen und -bauweisen für wesentliche Module oder Baugruppen. So kann bei rotierenden Strukturen wie etwa Zentrifugen, Lüfterrotoren und Antriebswellen das Massenträgheitsmoment durch gezielte Masseinsparungen am Umfang effizient reduziert werden. Bei langen auskragenden Strukturen, die im Wesentlichen durch ihr Eigengewicht belastet werden, können Leichtbaumaßnahmen vorteilhaft auf die von den Auflagern entfernten Strukturbereiche konzentriert werden. Wenngleich die Werkstoffauswahl allgemein eher der Entwurfsphase zuzuordnen ist, wird diese Vorgehensweise zum wirtschaftlichen Leichtbau auch als Konzeptleichtbau [15] bezeichnet.

Aufgrund der geringen Dichte und der hervorragenden mechanischen Eigenschaften sind insbesondere kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK) für hoch beanspruchte Bauteile in Leichtbauweise besonders prädestiniert. Auch die hohe Korrosionsbeständigkeit von CFK bietet in vielen Anwendungsfällen deutliche Vorteile gegenüber metallischen Werkstoffen, wobei jedoch Kontaktkorrosion (etwa zwischen Kohlenstoffasern und Aluminium) durch geeignete Pufferschichten auszuschließen ist. Die außergewöhnlich hohen Festigkeiten und Steifigkeiten werden jedoch nur in Faserrichtung erreicht, wogegen quer zur Faserrichtung die entsprechenden Werte sehr gering sind. Zur Verstärkung multiaxial beanspruchter Struktursektionen werden daher zunehmend textile Halbzeuge wie etwa Gewebe, Multiaxialgelege oder Multiaxialgestricke mit entsprechenden Faserorientierungen eingesetzt [33]. Für einen quasiisotropen Schichtaufbau aus CFK ergeben sich dann gewichtsbezogene Steifigkeitswerte, die in etwa auch von gängigen Aluminiumlegierungen erreicht werden. Bei komplexen räumlichen Spannungszuständen besitzen demgegenüber metallische Werkstoffe aufgrund des isotropen Werkstoffverhaltens und relativ hoher mechanischer Kennwerte deutliche Vorteile. In der Regel ist daher eine werkstoffspezifische Funktionsteilung bei Leichtbaustrukturen erforderlich. Komplex beanspruchte Bereiche werden hierbei eher metallisch ausgeführt, wogegen flächig oder eindimensional beanspruchte Sektionen häufig aus angepassten faserverstärkten Kunststoffen bestehen, z. B. hybride Schubfelder, Gurte, Zuganker, Druckbehälter. In der Regel übernehmen hier die metallischen Elemente die Aufnahme äußerer Lasten, um diese möglichst gleichmäßig in die Faserverbundkomponenten einzuleiten. Damit bilden die metallischen Komponenten auch die notwendigen Funktionsflächen wie z. B. Montageflächen oder Gleit-, Lauf- und Dichtflächen. In Analogie zu klassischen Holz-Metall-Mischbauweisen werden derartige metallische Funktionselemente vereinzelt auch als Beschläge ausgeführt (vgl. weiterführende Abb. 4.10). Die Faserverbundkomponenten übernehmen dann die „Lastfernübertragung“ zwischen diesen metallischen Komponenten.

Exemplarisch ist in Abb. 4.9 eine Hubschrauber-Getriebegehäusekomponente dargestellt, die in Zusammenarbeit mit der ZF Luftfahrttechnik GmbH zur Erzielung hoher Leicht-

baugrade in Mischbauweise ausgeführt wurde. In die CFK-Tragstruktur sind dabei Aluminium-Lagersitze integriert, wodurch ein schneller Lagerwechsel ohne Beschädigung der CFK-Oberfläche möglich ist. Durch eine stoffschlüssige Klebverbindung sind ferner schädigende Schwingreibeffekte weitgehend ausgeschlossen. Die Verklebung ist mit einem luftfahrtspezifizierten Klebstoff auf Epoxydharzbasis ausgeführt, der auch bei Temperaturen bis 120 °C eine sichere Verbindung gewährleistet. Aufgrund der thermischen Lasten bei Hubschraubergetriebekomponenten kommt der thermomechanischen Auslegung besondere Bedeutung zu. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die thermische Dehnung von Aluminium etwa viermal größer ist als die des eingesetzten multiaxialen CFK-Verbunds. In diesem Fall sind die Aluminium-(Al-)Komponenten gänzlich von CFK-Werkstoff umschlossen, so dass sich bei einer betriebsbedingten Erwärmung lediglich unkritische Druckspannungen zwischen Aluminium und CFK ausbilden.



Abb. 4.9: Hubschrauber-Getriebegehäusekomponente in CFK-Bauweise mit metallischen Lagersitzen und Insertelementen

Die Klebverbindung ermöglicht darüber hinaus eine ausgesprochen gleichmäßige Einleitung äußerer Lasten in Tragstrukturen und stellt damit ein besonders werkstoffgerechtes Fügeverfahren für viele FKV-Komponenten dar. Des Weiteren bewirken derartige Verbindungen besondere Vorteile hinsichtlich des Dämpfungsverhaltens von Leichtbaustrukturen. Allerdings stößt diese Verbindungstechnik aufgrund der nicht zu hohen Festigkeit und wegen der oft aufwändigen Oberflächenvorbehandlung und Klebstoffverarbeitung häufig an ihre technischen und wirtschaftlichen Einsatzgrenzen.

Neue beanspruchungsgerechte formschlüssige Verbindungen können hingegen zur Erhöhung der Verbindungsfestigkeit bei gleichzeitiger Senkung der Herstellungskosten beitragen. Zu derartigen Verbindungssystemen zählen neben den weit verbreiteten Bolzen- und Schrau-

fenverbindungen auch die bislang weniger beachteten Konturverbindungen (Abb. 4.10, siehe hierzu auch Kapitel 8).

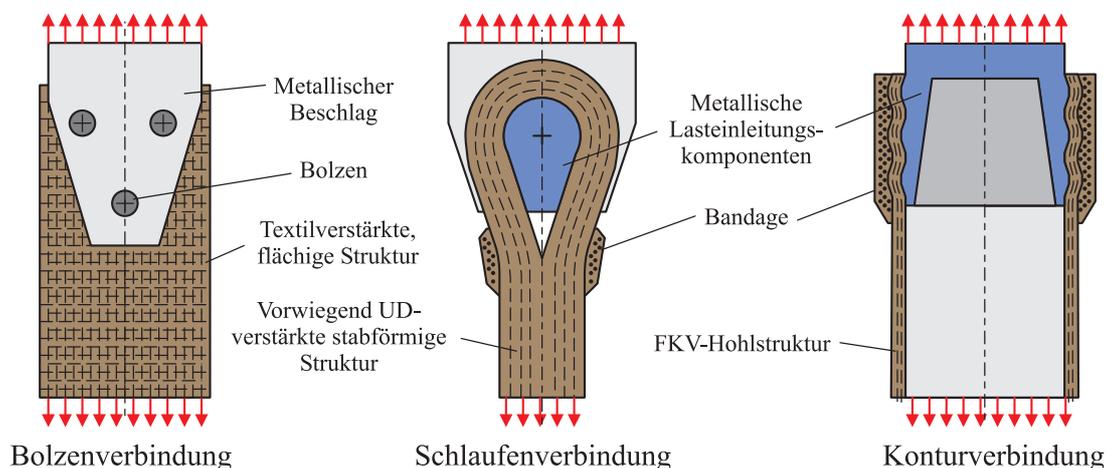


Abb. 4.10: Beispiele von grundlegenden Konzepten für die beanspruchungsgerechte formschlüssige Lasteinleitung bei flächigen, stab- und rohrförmigen FKV-Strukturen

4.3 Festigkeitsnachweis mittels physikalisch begründeter Versagenskriterien

Ein methodischer Entwurfsprozess gliedert sich in Synthese- und Analyseschritte, die insbesondere bei der Konstruktion von Leichtbaustrukturen im Rahmen der iterativen Optimierung mehrfach durchlaufen werden. Dabei kommt im Rahmen der Gestaltung und Dimensionierung aufgabenabhängig der Spannungs-, Verformungs-, Verzerrungs-, Versagens- oder Stabilitätsanalyse hervorgehobene Bedeutung zu. Zur Ermittlung und Bewertung von Beanspruchungsgrößen werden analytische und numerische Berechnungsverfahren eingesetzt sowie Belastungsversuche an Probekörpern, Versuchsmustern und Prototypen durchgeführt.

Programmsysteme auf Basis analytischer Lösungsverfahren erlauben hier eine schnelle Durchführung von Parameterstudien, wobei allerdings die Betrachtungen auf elementare Tragwerke (Scheibe, Platte, Schale) beschränkt sind. Finite-Elemente-(FE-)Berechnungsprogramme gestatten hingegen auch bei komplexen Bauteilgeometrien und unterschiedlichen Materialpaarungen eine realistische Strukturanalyse. Die Ermittlung von parametrischen Zusammenhängen ist hierbei sehr aufwendig, da jede Gestaltvariation in der Regel eine zeitintensive Netzgenerierung erfordert. Die meisten FE-Systeme erlauben auch die Simulation von Festkörperkontakten und bieten damit eine notwendige Voraussetzung für die wirklichkeitsnahe Berechnung formschlüssiger Verbindungssysteme. Für einzelne verbindungstechnische Problemstellungen wurden am ILK bereits analytische Berechnungsmodelle entwickelt und implementiert. Dazu zählt etwa das Software-System zur Kerb-

spannungsanalyse von mehrschichtigen Verbundplatten mit Ausschnitten, Einschlüssen und Bolzen [13,33]. Insbesondere bei dynamisch belasteten Leichtbaustrukturen in Faser-verbund/Metall-Mischbauweise stößt die strukturmechanische Simulation an technische und wirtschaftliche Grenzen, daher ist hierbei die Durchführung ergänzender betriebsnaher Belastungsversuche unumgänglich.

Zur Bewertung der Beanspruchungsgrößen sind bei FKV-Strukturen realistische Versagenskriterien heranzuziehen, die sowohl dem richtungsabhängigen Festigkeitsverhalten als auch den auftretenden Moden für Faserbruch (FB) und Zwischenfaserbruch (ZFB) Rechnung tragen. Im Unterschied zu den oft verwendeten pauschalen interaktiven Versagenskriterien für UD-Verbunde, z. B. nach SACHAROW, TSAI/WU oder GOLDENBLAT/KOPNOW, die verschiedenste Bruchmechanismen in einer Bruchbedingung verknüpfen, ermöglichen die neuen physikalisch begründeten Versagenskriterien nach HASHIN/PUCK oder CUNTZE eine Beschreibung der auftretenden Bruchmoden [14,31–34].

Bei dem als Extremwertaufgabe formulierten Versagenskriterium nach HASHIN/PUCK werden die zwei ZFB-Bedingungen für $\sigma_n \geq 0$ und $\sigma_n < 0$ in Abhängigkeit von den Schubspannungen τ_{n1} und τ_{nt} bzw. der Normalspannung σ_n in der faserparallelen Wirkebene angegeben (Action Plane Concept, APC). Zur Identifikation der Bruchebene (Bruchwinkel Θ_B) wird die Wirkebene für die versagenskritische $(\sigma_n, \tau_{nt}, \tau_{n1})$ -Spannungskombination gemäß der Bruchhypothese nach HASHIN/PUCK ermittelt (Abb. 4.11).

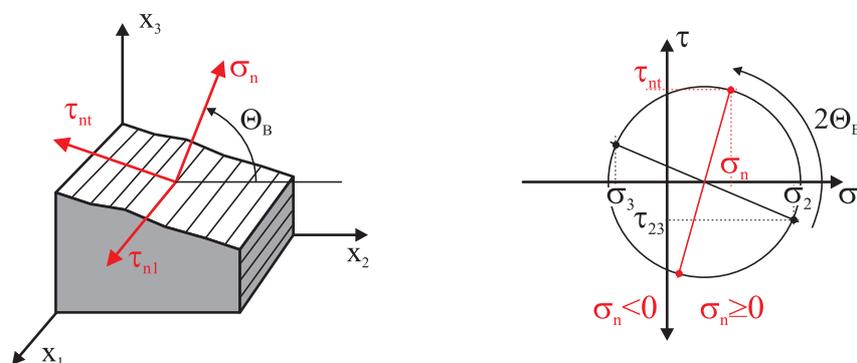


Abb. 4.11: Bruchebenenbezogene Definition der Spannungen nach HASHIN/PUCK und grafische Darstellung der Transformation für einen ausgewählten Spannungszustand

Die phänomenologischen Betrachtungen zeigen, dass eine senkrecht zur Bruchebene wirkende Quer-Druckspannung einem Schubversagen entgegenwirkt, während eine Quer-Zugspannung einen Zwischenfaserbruch begünstigt. Aus diesem Grund hat PUCK unterschiedliche Bruchbedingungen für positive und negative Normalspannungen σ_n angegeben:

$$\begin{aligned}
\sigma_n \geq 0 : \quad & \max_{\Theta} \left[\left(\frac{\sigma_n}{R_{\perp}^{(+)}} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{nt}}{R_{\perp\perp}^A} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{n1}}{R_{\perp\parallel}} \right)^2 \right] = 1 \\
\sigma_n < 0 : \quad & \max_{\Theta} \left[\left(\frac{\tau_{nt}}{R_{\perp\perp}^A - \mu_{\perp\perp} \sigma_n} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{n1}}{R_{\perp\parallel} - \mu_{\perp\parallel} \sigma_n} \right)^2 \right] = 1 \quad (4.1)
\end{aligned}$$

mit den Festigkeiten $R_{\perp}^{(+)}$, $R_{\perp\parallel}$, dem Bruchwiderstand $R_{\perp\perp}^A$ und den Steigungsmaßen $\mu_{\perp\perp}$, $\mu_{\perp\parallel}$.

Die Lösung der Extremwertaufgabe (4.1) erlaubt zwar die genaue Ermittlung der Bruchwinkel für die jeweiligen Bruchmoden, jedoch ergeben sich gewisse Nachteile bei der ingenieurmäßigen Handhabung des HASHIN/PUCK-Kriteriums. Im Fall der inhomogenen Bedingung für $\sigma_n < 0$ bereitet auch die Ermittlung des Reservefaktors einige Schwierigkeiten.

Eine einfachere Handhabung bietet das nicht als Extremwertaufgabe formulierte bruchmodebezogene Versagenskriterium (FMC: Failure Mode Concept) nach CUNTZE [3–5]. Dieses Kriterium unterscheidet ebenfalls zwischen Faserbruch (Zug- und Druckversagen) sowie Zwischenfaserbruch mit den drei Subbruchmoden Zug-, Druck- und Schubversagen (Abb. 4.12). Obgleich das Kriterium nach CUNTZE relativ einfache Bruchansätze verwendet, konnten hiermit sehr gute Ergebnisse beim „World-Wide Failure Exercise“, einem internationalen Vergleichswettbewerb für Festigkeitshypothesen, erzielt werden [19].

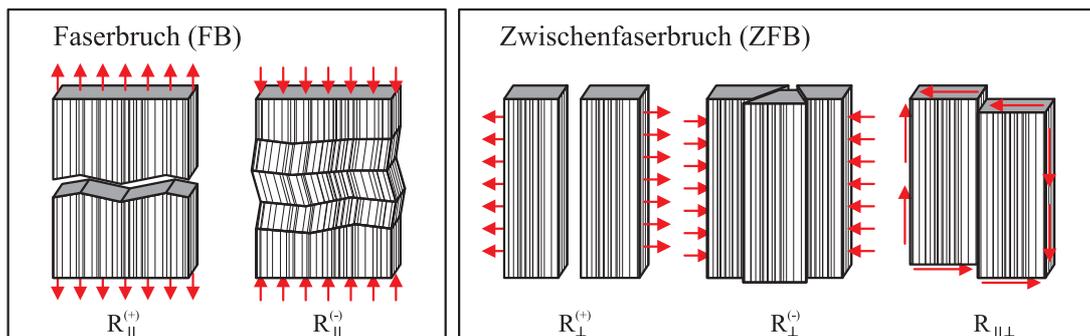


Abb. 4.12: Bruchmoden und zugehörige Basisfestigkeiten nach CUNTZE

CUNTZE nimmt an, dass sich mikromechanische Wechselwirkungen insbesondere bei kombinierter Belastung nicht eindeutig voneinander unterscheiden lassen. Die Bruchbedingungen für die einzelnen Bruchmoden sind unter Verwendung der folgenden speziellen Invarianten formuliert:

$$\begin{aligned}
I_1 &= \sigma_1 \\
I_2 &= \sigma_2 + \sigma_3 \\
I_3 &= \tau_{21}^2 + \tau_{31}^2 \\
I_4 &= (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + 4 \cdot \tau_{23}^2
\end{aligned} \tag{4.2}$$

Diese Größen sind in Bezug auf beliebige Drehung um eine ausgewählte 1-Achse invariant, die zweckmäßigerweise in Richtung einer ausgezeichneten Materialachse (faserparallele Achse) angeordnet wird. Für jeden Bruchmode wird unter Verwendung der Basisfestigkeiten und weiterer Werkstoffparameter eine separate Bruchbedingung

$$F(I_1; I_2; I_3; I_4; R_{\parallel}^{(+)}; R_{\parallel}^{(-)}; R_{\perp}^{(+)}; R_{\perp}^{(-)}; R_{\perp}^{\parallel}; b_{\perp}^{\tau}; b_{\perp\parallel}) = 1 \tag{4.3}$$

formuliert. Sie lauten für die fünf Bruchmoden:

Faserbruch	Zwischenfaserbruch
$F_{\parallel}^{\sigma} = \frac{I_1}{R_{\parallel}^{(+)}} = 1$	$F_{\perp}^{\sigma} = \frac{I_2 + \sqrt{I_4}}{2 \cdot R_{\perp}^{(+)}} = 1$
$F_{\parallel}^{\tau} = \frac{-I_1}{R_{\parallel}^{(-)}} = 1$	$F_{\perp}^{\tau} = (b_{\perp}^{\tau} - 1) \cdot \frac{I_2}{R_{\perp}^{(-)}} + \frac{b_{\perp}^{\tau} \cdot \sqrt{I_4}}{R_{\perp}^{(-)}} = 1$
	$F_{\perp\parallel} = \frac{\sqrt{I_3}}{R_{\perp\parallel}} + b_{\perp\parallel} \cdot \frac{I_2}{R_{\perp\parallel}} = 1$

(4.4)

mit den Koeffizienten b_{\perp}^{τ} und $b_{\perp\parallel}$ als werkstoffabhängige Parameter, die aus multiaxialen Bruchversuchen zu bestimmen sind.

Zur Berechnung der Werkstoffanstrengung ist es zunächst notwendig, die Reservefaktoren bezüglich der einzelnen Bruchmoden zu bestimmen. Der Reservefaktor $f_{Res}(\sigma)$ eines Spannungszustands $\sigma = (\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \tau_{23}, \tau_{23}, \tau_{23})^T$ ist dabei der positive Faktor, für den das Produkt $f_{Res} \cdot \sigma$ zum bruchauslösenden Spannungszustand wird.

Der resultierende Reservefaktor $f_{Res}^{(res)}$ lässt sich anschließend aus den einzelnen Reservefaktoren der Bruchbedingungen (Gl. 4.4) wie folgt berechnen:

$$f_{Res}^{(res)} = \left[(f_{Res}^{\parallel\sigma})^{-\dot{m}} + (f_{Res}^{\parallel\tau})^{-\dot{m}} + (f_{Res}^{\perp\sigma})^{-\dot{m}} + (f_{\perp}^{Mb})^{-\dot{m}} + (f_{Res}^{\perp\tau})^{-\dot{m}} + (f_{Res}^{\perp\parallel})^{-\dot{m}} \right]^{-1/\dot{m}} \tag{4.5}$$

mit dem Mehrfachbruchfaktor

$$f_{\perp}^{Mb} = 2R_{\perp}^{(+)} \left(\sigma_2^{(+)} + \sigma_3^{(+)} \right) \quad (4.6)$$

und dem Ausrundungskoeffizienten m , wobei für UD-CFK $m \approx 3$ gilt [4].

Eine detaillierte Bewertungen der bruchtypbezogenen Versagenskriterien mit Anwendungsbeispielen für verschiedene Faserverbundsysteme ist etwa in [14, 19, 33, 34, 51] angegeben. Da das Versagenskriterium nach CUNTZE sowohl bei der praktischen Handhabung Vorteile bietet als auch die auftretenden Bruchmoden bei Faserverbundwerkstoffen realistisch erfasst, wird in dieser Arbeit vornehmlich auf diese Bruchhypothese zurückgegriffen. Zur schnellen Auswertung der Beanspruchungszustände bei den unterschiedlichen Anwendungsbeispielen wurden am ILK entwickelte Subroutinen für die verwendeten FE-Softwaresysteme auf Basis des CUNTZE-Kriteriums eingesetzt.

5 Verbindungen mit endlosfaserverstärkten Thermoplastnieten

Der zunehmende Einsatz endlosfaser- und textilverstärkter Thermoplaste für hochbeanspruchte Leichtbaustrukturen im Fahrzeug- und Maschinenbau führt zu einem Bedarf an neuen werkstoff- und beanspruchungsgerechten Verbindungssystemen. Hochbeanspruchte Faserverbundstrukturen werden bislang vielfach mit herkömmlichen metallischen Verbindungselementen wie etwa Nieten und Passbolzen gefügt, die in aller Regel für metallische Fügepartner entwickelt worden sind. Dabei induzieren diese Verbindungssysteme in spannungsfertigen (z. B. gebohrten oder gefrästen) Nietlöchern häufig versagenskritische Kerbspannungszustände. Darüber hinaus wirken die Klemmkräfte herkömmlicher metallischer Verbindungssysteme typischerweise quer zu den Hauptverstärkungsrichtungen, wodurch vor allem bei Thermoplastmatrizes aufgrund der Relaxations- und Retardationsneigung oft ein Vorspannkraftverlust mit Lockerung der Verbindung eintritt.

Ein weit verbreitetes Fügeverfahren für unverstärkte und kurzfaserverstärkte thermoplastische Kunststoffbauteile ist beispielsweise das Thermoplastnieten (Abb. 5.1). Das Fügen derartiger Spritzgussbauteile mit strukturintegrierten Nietschäften ist z. B. im Automobilbau eingeführt und hat sich dort als wirtschaftliches Fügeverfahren bewährt. Der meist metallische Fügepartner ist mit einem entsprechenden Lochmuster versehen, in das die Nietschäfte eingesteckt werden. Durch die warmumformtechnische Schließkopfformung kommt es zur formschlüssigen Verbindung, wobei unterschiedliche Methoden für die Plastifizierung der Nietschäfte Anwendung finden (z. B. Ultraschall, Heizelemente und Heißluft). Mehrere Firmen bieten hierfür entsprechende Nietautomaten für das Fügen von Spritzgussbauteilen mit integrierten Nietschäften an [45–47, 69].

Die neuen textilverstärkten Thermoplaste weisen gegenüber kurzfaserverstärkten Thermoplasten, konventionellen faserverstärkten Duroplasten und metallischen Konstruktionswerkstoffen entscheidende Unterschiede hinsichtlich der möglichen Fügeverfahren auf. Während z. B. das Strukturkleben bei vielen Thermoplasten aufwendige Vorbehandlungen erfordert, lassen sich hier hochwertige schweißtechnische Verbindungen realisieren. Anders als bei faserverstärkten Duroplasten können ferner Befestigungslöcher in textilverstärkten Thermoplaststrukturen auch schmelz- bzw. umformtechnisch erzeugt werden, so dass Textilfasern aus dem Lochbereich an den Bohrungsrand verlegt werden. Dies führt zu einer erheblichen Steigerung der Lochleibungsfestigkeit.

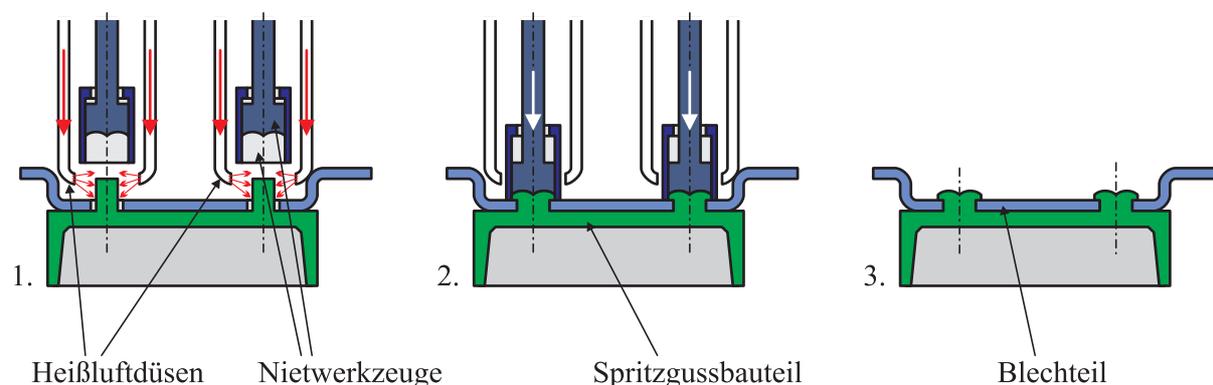


Abb. 5.1: Verfahrensschritte beim klassischen Thermoplastnieten: 1. Plastifizieren mit Hilfe von Heißluft, 2. Nietkopfformung durch kaltes zweiteiliges Werkzeug, 3. verbleibende formschlüssige Verbindung

Ein vielversprechender Ansatz zum Fügen hochbeanspruchter textilverstärkter Thermoplaststrukturen ist das hierauf basierende und zum Patent [24, 74] angemeldete Endlosfaser-Thermoplast-(EFT-)Nietverfahren. Dieses modifizierte Thermoplastnietverfahren nutzt zum einen die Warmumformbarkeit und die Schweißbarkeit der thermoplastischen Matrix vorteilhaft aus und erzeugt zum anderen einen kraftflussgerechten Faserverlauf in der Fügezone. Die Entwicklung stellt ferner einen schnellen, wirtschaftlichen Prozess sowie eine technologische Umsetzung im industriellen Maßstab in Aussicht.

5.1 Warmformung von Nietlöchern

Die meisten textilen Bindungen von flächigen Verstärkungshalbzeugen gewährleisten eine begrenzte seitliche Beweglichkeit der Verstärkungsfäden, so dass in Fügezonen Fäden aus dem Lochbereich in den Lochrandbereich verlagert werden können. Durch diese Konzentration und die zusätzliche Streckung von Verstärkungsfasern im Randbereich eines Nietlochs oder Bolzenauges können Verbindungsfestigkeiten wirkungsvoll gesteigert werden [66]. Während bei der Verarbeitung herkömmlicher duroplastischer Matrixsysteme eine derartige Faserverschiebung schon vor der Konsolidierung erfolgen muss, ermöglichen flächige textilverstärkte Thermoplaststrukturen grundsätzlich auch eine nachträgliche Lochformung. Dafür ist eine ausreichend große Umgebung der Fügestelle zu plastifizieren, um die notwendige seitliche Beweglichkeit der Verstärkungsfasern erneut frei zu geben (Abb. 5.2). In Abhängigkeit von der textilen Fadenarchitektur und der Größe der plastifizierten Umformzone können auf diese Weise auch Löcher mit 90°-Senkung für bündig abschließende Verbindungselemente oder unrunde Löcher zur Verdrehsicherung hergestellt werden.

Für die Warmformung von Befestigungslöchern sind prinzipiell alle Faser-Thermoplast-Kombinationen geeignet. Bei Großserianwendungen wie etwa im Automobilbau haben

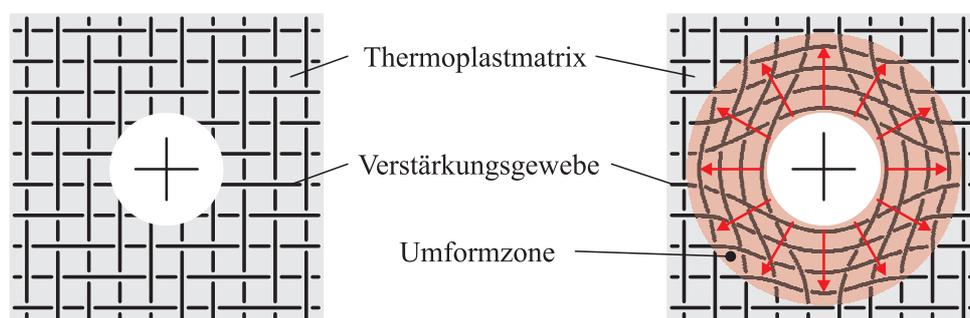


Abb. 5.2: Schematische Darstellung der Faseranordnung bei einem gebohrten (links) und einem warmgeformten Nietloch (rechts)

sich Strukturen aus vergleichsweise preiswerten, presstechnisch verarbeitbaren Glasfaser-Polypropylen-(GF-PP-)Verbunden mit Gewebeverstärkung bereits bestens bewährt. Daher wurden diese Verbunde auch für die weiteren Untersuchungen zur Fügetechnik ausgewählt und Versuchsvorrichtungen darauf abgestimmt.

Für das gezielte thermische Plastifizieren einer Umformzone eignen sich bei GF-PP-Verbunden vor allem das Anblasen mit Heißluft sowie das Aufsetzen einer Heizkomponente. Abb. 5.3a zeigt ein grundlegendes Konzept für den Lochformprozess mit Hilfe einer Heizkomponente, eines Dornwerkzeugs und eines Ringstempels. Dieses Verfahrenskonzept ermöglicht einen einfachen Aufbau einer Vorrichtung z. B. mit drei pneumatischen Linearantrieben und einer elektrisch beheizten, temperaturgeregelten Heizkomponente. Das direkte Aufsetzen und Abheben einer Heizkomponente zur lokalen Plastifizierung der Thermoplast-Verbundstruktur kann beim Abheben vereinzelt zu unerwünschten Schmelzeanhaftungen führen. Dieses Problem kann beispielsweise durch Wärmeeintrag mit Heißluft umgangen werden, was schematisch für eine Lochformung mit Hilfe einer Heißluftheizung in Abb. 5.3b und 5.3c dargestellt ist.

Für experimentelle Untersuchungen wird das o. a. Konzept zur Lochformung mit Hilfe einer Kontaktheizung modifiziert, um einen wirksamen Wärmeeintrag von beiden Seiten der flächigen Textil-Verbund-Struktur zu ermöglichen (siehe Abb. 5.4). Dafür wird diese Struktur zwischen zwei ringförmigen beheizten Klemmelementen aufgenommen und durch einen Pneumatiktrieb von oben fixiert. Die beiden ringförmigen Klemm-Heiz-Elemente werden elektrisch durch Düsenheizbänder beheizt. Im Folgenden wird das Dornwerkzeug konzentrisch durch das obere Klemm-Heizelement und durch die hohle Kolbenstange des Klemmantriebs mit Hilfe eines weiteren Pneumatiktriebs vorgeschoben. Der Ringstempel gibt in seiner unteren Position zunächst Volumen für eine vereinfachte Umformung der Fügezone frei und ermöglicht durch einen dritten Pneumatiktrieb nach der Zufuhr des Dornwerkzeugs eine erneute Verdichtung der Umformzone. Durch das Entformen erst nach ausreichender Abkühlung und Verfestigung der Umformzone, kann ein Anhaften von Matrixwerkstoff an den Vorrichtungskomponenten weitgehend vermieden werden.

Für einen erste Funktionsnachweis wird eigens eine Versuchsvorrichtung konstruiert und

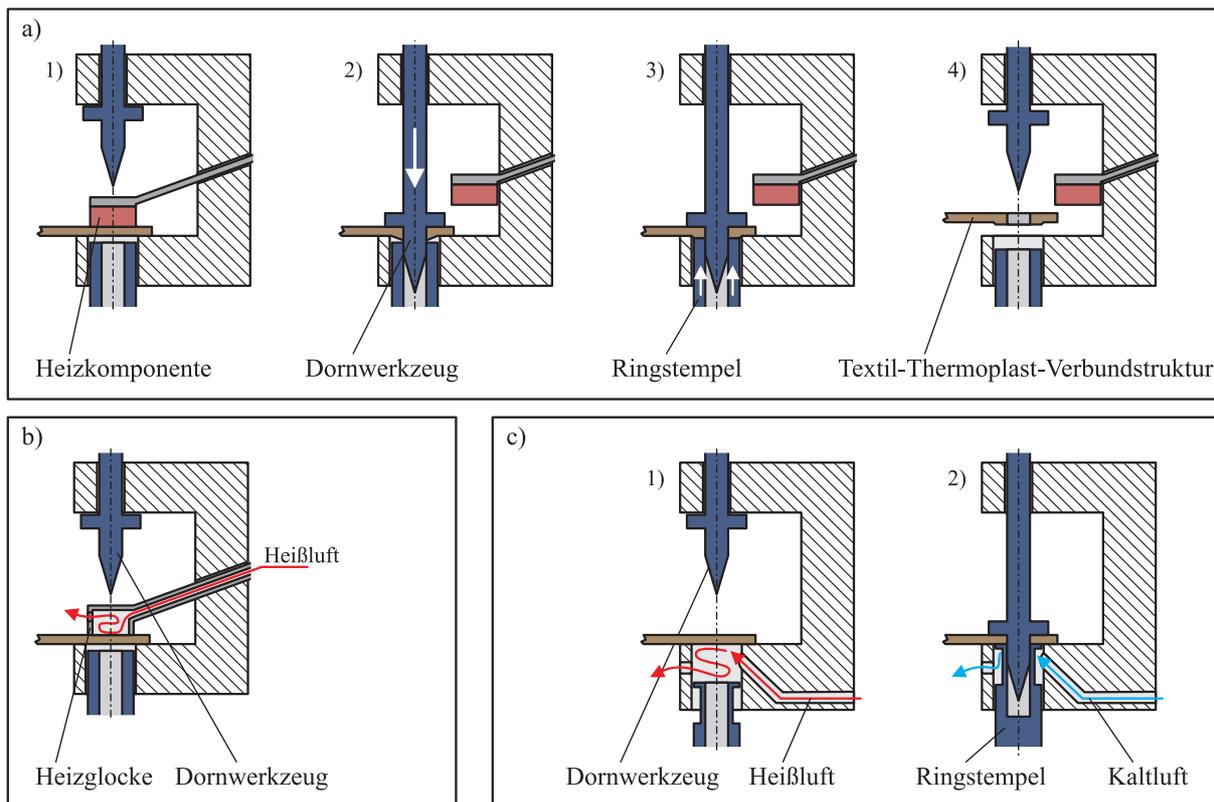


Abb. 5.3: Konzepte unterschiedlicher Lochformungsprozesse:

- a) Aufsetzen einer Heizkomponente,
- b) Heißluftzufuhr durch eine Heizglocke,
- c) Heißluftzufuhr durch den Ringstempelschacht

gebaut. Die Probekörper für die Lochformungsversuche werden aus handelsüblichem Hybridgarn-Textil-Thermoplast-(HGTT-)Gewebehalbzug (Twintex) im institutseigenen Autoklaven hergestellt. Die Spezifikation der Probekörper ist Tab. 5.1 zu entnehmen. Das hohe Fadengewicht sowie der beim Plastifizieren des Matrixwerkstoffs verursachte Volumenschwund führen beim Twintex-Material zu einem signifikant gekrümmten Faserverlauf in der konsolidierten Verbundstruktur. Diese ausgeprägte Faserkrümmung begünstigt die seitliche Beweglichkeit der Faserstränge und damit eine einfache Lochformung. Bei einem Durchmesser der plastifizierten Umformzone von etwa 30 mm konnten mit der eigens entwickelten Versuchsvorrichtung zylindrische Löcher mit einem Durchmesser von 10 mm geformt werden.

Zum Vergleich der Lochleibungsfestigkeiten wurden Referenzprobekörper mit gleich großen

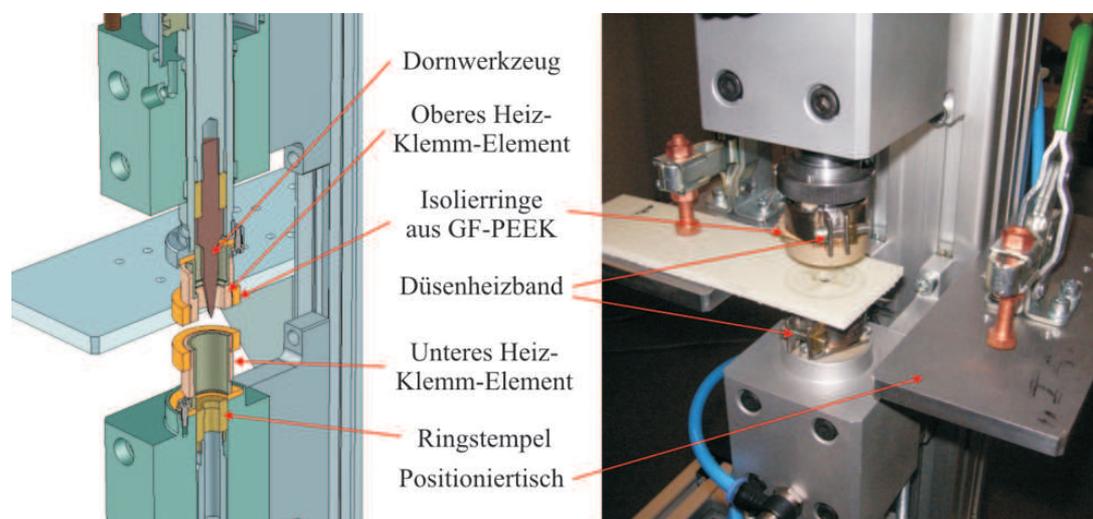


Abb. 5.4: Versuchsvorrichtung zur warmumformtechnischen Herstellung von Niet- und Bolzenlöchern

Tab. 5.1: Spezifikation der Probekörper für Lochformungsversuche und Bolzenzugversuche

Halbzeug, Hersteller:	Twintex, Saint-Gobain Vetrotex
Faserverstärkung:	Gewebe, Köper, E-Glas, 35 % Vol.
Matrix:	Polypropylen (PP)
Fadengewicht, Flächengewicht:	1500 tex, 700 g/m ²
Laminat:	[(0°/90°) _{Gewebe}] ₁₀
Abmessungen der Probekörper:	150 mm × 50 mm × ca. 5 mm

gebohrten Löchern versehen. Die Lochleibungsfestigkeiten wurden mittels eines Bolzenzugversuchs in einer Universalprüfmaschine ermittelt. Ein Stahlbolzen mit leichtem Übermaß fixierte dabei jeweils das Probekörperende mit warmgeformtem oder gebohrtem Loch bei etwas seitlichem Spiel in einer gabelförmigen Prüfkörperaufnahme, wobei das gegenüberliegende Ende in einer Klemmbackenaufnahme eingespannt wurde. Die im Bolzenzugversuch aufgezeichneten Kraft-Weg-Verläufe zeigen Lochleibungsfestigkeiten für die gebohrte Löcher von etwa 155 MPa und für die warmgeformten Löcher von etwa 220 MPa (vgl. Abb. 5.5). Die erhebliche Festigkeitssteigerung von ca. 50 % ist dabei auf die deutlich günstigere Faserorientierung und die höhere Faserdichte im Randbereich der warmgeformten Bolzenlöcher zurückzuführen.

Eine besonders effiziente Herstellung von derartigen hochbelastbaren Niet- und Bolzenlöchern ergibt sich durch eine Integration des Lochformprozesses in den presstechnischen Fertigungsablauf von Textil-Thermoplast-Verbundstrukturen. Dafür können beispielsweise in

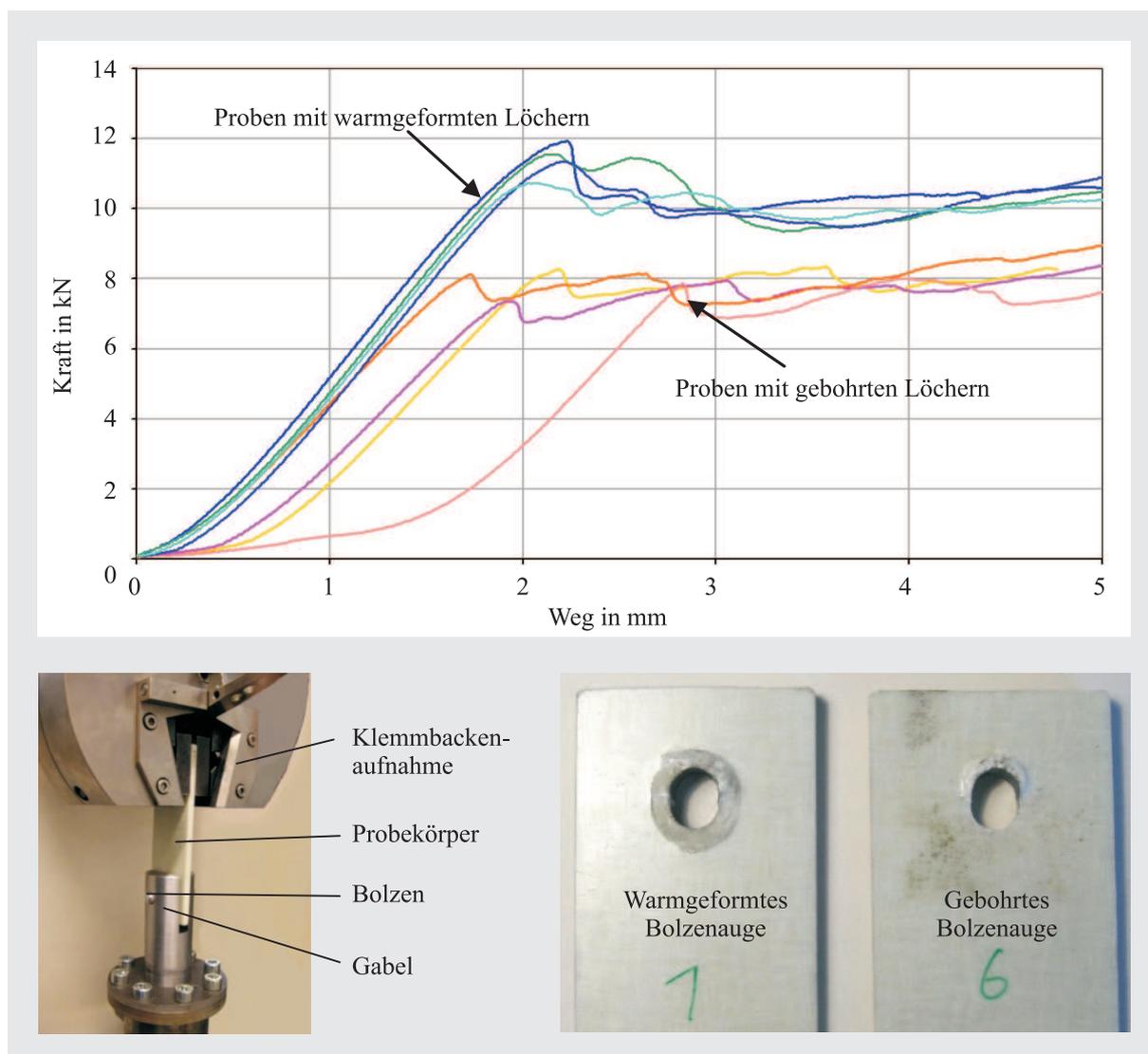


Abb. 5.5: Bolzenzugversuch an Textil-Thermoplast-Probekörpern mit gebohrten und warmgeformten Bolzenaugen: Versuchsaufbau, durch Lochleibung geschädigte Probekörper aus GF-PP-Gewebe und Kraft-Weg-Diagramm

Ober- und Unterwerkzeug paarweise gegenüberliegend aktive Dornwerkzeuge und Ringstempel positioniert werden, so dass eine gesonderte Wärmezufuhr beim Pressprozess nicht mehr notwendig ist.

5.2 Endlofaser-Thermoplast-(EFT-)Nietverfahren

An verschiedenen Forschungsstellen wurden bereits Untersuchungen zum Einsatz hochfester Leichtbau-Niete aus endlofaserverstärktem Thermoplast für Fügeaufgaben, insbesondere bei Luft- und Raumfahrtanwendungen, durchgeführt. Dabei wurden im wesentlichen teure Hochleistungswerkstoffe wie etwa kohlenstofffaserverstärktes Polyetheretherketon (CF-PEEK) betrachtet. Einige grundsätzliche Fertigungs- und Verarbeitungsverfahren sind etwa in den Patenten [79, 80] angegeben.

Derartige endlofaserverstärkte Verbindungselemente bieten vor allem in Kombination mit Textil-Thermoplast-Verbundstrukturen die Möglichkeit zur Gestaltung von besonders werkstoff- und beanspruchungsgerechter Fügezonen, da die Festigkeiten der Fügepartner und der Verbindungselemente im Einklang stehen. Das weitreichende Potential für die Konzeption effizienter Fügeprozesse gestattet ferner den Einsatz derartiger Verbindungssysteme bei Leichtbau-Serienanwendungen. Abb. 5.6 zeigt exemplarisch ausgewählte prinzipielle Verbindungssysteme auf Basis von endlofaserverstärkten Thermoplastnieten. Neben der Möglichkeit zur warmumformtechnischen Nietloch- und Nietkopfherstellung dient dabei auch die Schweißbarkeit der Thermoplaste zur Herstellung hochfester form- und stoffschlüssiger Verbindungen.

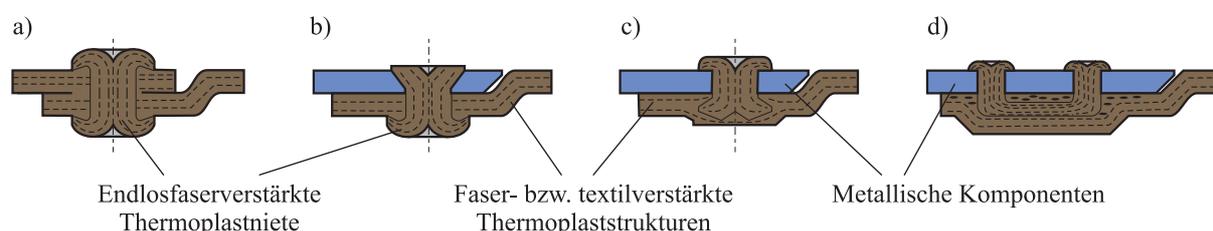


Abb. 5.6: Konzepte für Verbindungssysteme auf Basis von endlofaserverstärkten Thermoplastnieten

Beim Fügen zweier Textil-Thermoplast-Verbundstrukturen (Abb. 5.6 a) erlaubt das Fügen mittels eines Endlofaser-Thermoplast-(EFT-)Niets unter Verwendung gleicher Matrixsysteme die Herstellung einer form- und stoffschlüssigen Niet-Schweiß-Verbindung. Zusätzliches Potential für effiziente Fügeprozesse bietet hier die Möglichkeit, bei abgestimmten Matrixsystemen die Umformvorgänge für Nietlöcher und Nietköpfe grundsätzlich zu einem Arbeitsgang zusammenzufassen. Darüber hinaus können durch den Stoffschluss z. B. mediendichte Verbindungen erzeugt und allfällige Schwingreibeffekte in der Fügezone vermieden werden. Darüber hinaus vereinfachen derartige werkstoffgleich gefügte Baugruppen auch die sortenreine Trennung beim Recycling.

Für das Fügen thermoplastischer Verbundstrukturen mit metallischen Komponenten sind die EFT-Niete ebenfalls geeignet (Abb. 5.6 b). Für derartige Verbindungssysteme bieten sich beispielsweise Niete mit vorgeformten Setzköpfen an, die in separat gebohrte bzw. geformte Nietlöcher eingesetzt und warmumformtechnisch mit Schließköpfen versehen werden. Wegen der getrennten Lochung der Fügepartner kann sich jedoch die Gewährleistung

deckungsgleicher Lochmuster als schwierig erweisen. Wirtschaftlich nachteilig ist ferner die Vielzahl der hier erforderlichen getrennten Prozessschritte.

Effizientere Fügeprozesse sind u. a. durch die fertigungstechnische Integration von endlosfaserverstärkten Nitelementen in die Textil-Verbundstruktur zu erzielen (Abb. 5.6 c und d). Derartige Elemente mit speziell angepasster Verankerungsstruktur können dafür in ein Formwerkzeug eingelegt und durch Spritz- und Pressmassen mit Langfaseranteil form- und stoffschlüssig eingebettet und mit der Textilverbundstruktur verbunden werden.

Für die Herstellung von Nietrohlingen aus endlosfaserverstärktem Thermoplast in großen Stückzahlen ist das Thermoplast-Pultrusionsverfahren geradezu prädestiniert (vgl. Kapitel 6). Dieses Verfahren ermöglicht die automatisierte Verarbeitung etwa von Hybridgarnen oder UD-Tapes zu hochfesten axial faserverstärkten Stabhalbzeugen. Durch die Ergänzung der Thermoplast-Pultrusion zur Thermoplast-Flecht-Pultrusion können ferner besonders schubfeste Stabhalbzeuge mit zusätzlicher $\pm 45^\circ$ -Faserverstärkung gefertigt werden (vgl. [1]). Die Weiterverarbeitung von pultrudierten Halbzeugen kann mittels Komposit-Fließpressen („Composite Flow Moulding“, CFM) vorgenommen werden und erlaubt etwa die anschließende Anformung von Setzköpfen bzw. von teller- oder winkelförmigen Verankerungsstrukturen (Abb. 5.7, vgl. z. B. [56]).

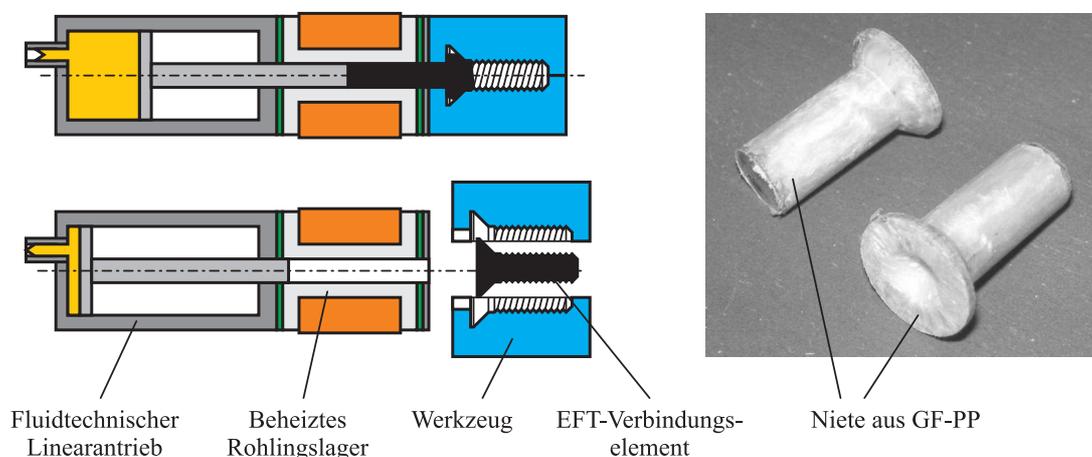


Abb. 5.7: Prinzip des Komposit-Fließpressens (links) und Niete aus endlos-glasfaserverstärktem Polypropylen (rechts)

Für einfache Setzkopfgeometrien werden dabei niedrige Umformkräfte benötigt, die einen vereinfachten CFM-Prozess mit pneumatischem Antrieb ermöglichen. Die Schließkopfformung wird analog zum klassischen Thermoplastnieten durchgeführt, wobei der Nietenchaft mit Heißluft plastifiziert und der Kopf mit einem pneumatisch angetriebenen Stempel geprägt wird (vgl. auch Abb. 5.1). Für grundsätzliche Verfahrensuntersuchungen zur Setzkopf- und zur Schließkopfformung wurden hierzu eigens konzipierte, pneumatisch betriebene Umformvorrichtungen aufgebaut. Die hiermit gefertigten EFT-Nietverbindungen wurden für Funktions- und Festigkeitsuntersuchungen erfolgreich eingesetzt (vgl. Abb.

5.8).

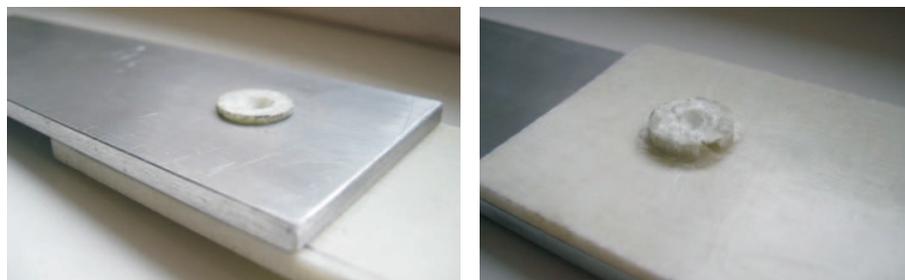


Abb. 5.8: EFT-Nietverbindung zwischen Aluminium- und Textilstruktur: Setzkopfseite (links) und Schließkopfseite (rechts)

Zur Bereitstellung schneller Fügeprozesse für eine Serienfertigung wurde im Rahmen dieser Arbeit ein automatisierter zweistufiger Prozess für die kombinierte Nietloch- und Nietkopfformung entwickelt und erprobt (vgl. Abb. 5.6 a und [74]). Wesentliche Schritte dieses Prozesses sind in Abb. 5.9 schematisch dargestellt.

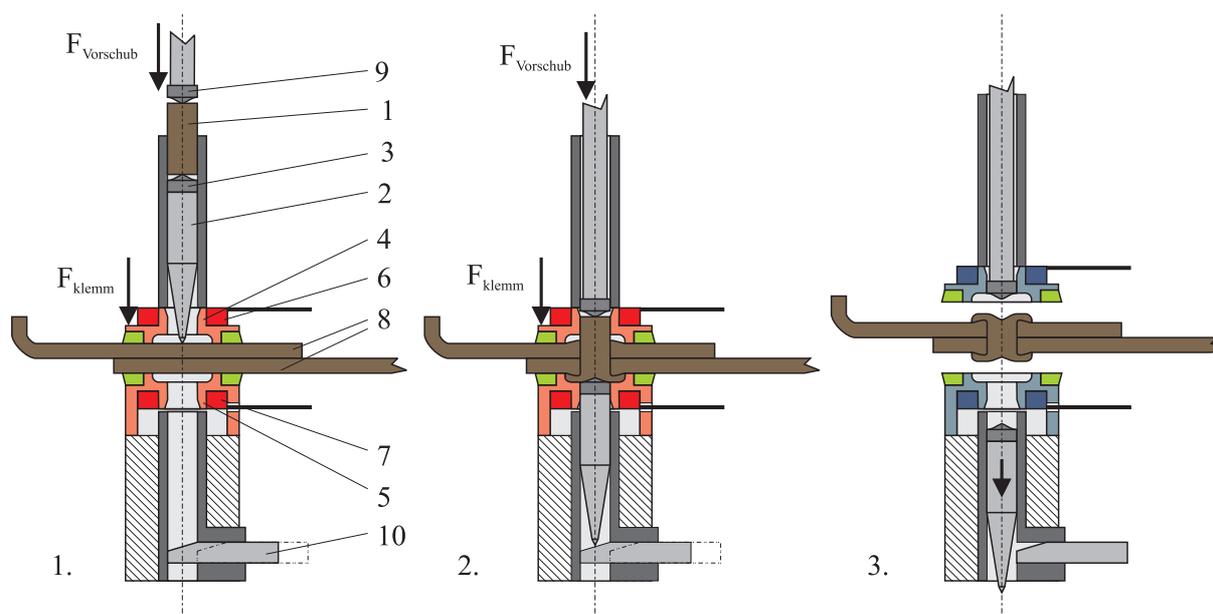


Abb. 5.9: Prozessschritte des EFT-Nietverfahrens:

1. Klemmen und thermisches Plastifizieren der Fügezone,
2. Lochformung mittels Dornwerkzeug und Nietkopfausbildung,
3. Kühlung und Entformen

Bei diesem Verfahren werden die für einen Überlappstoß angeordneten flächigen Fügepartner (8) zwischen zwei Klemm-Heiz-Werkzeugen (4, 5) fixiert und temperiert, so dass die textilverstärkten Thermoplastbauteile in der Fügezone plastifizieren. Die Lochformung in den Textil-Thermoplast-Strukturen erfolgt durch Vorschub eines losen Dornwerkzeugs (2), wobei ein dem Dornwerkzeug unmittelbar nachgeführter zylindrischer Nietrohling (1)

aus axial endlosfaserverstärktem Thermoplast in die lokal thermisch erweichte Fügezone eingebracht wird. Die axiale Positionierung des Niets erfolgt durch Festlegen des Dornwerkzeugs mit Hilfe des Riegels (10) in einer Endposition, so dass die untere Kalotte zur Nietkopfausbildung bündig verschlossen ist. Die Ausformung der Nietköpfe erfolgt nach kurzer Erwärmung in den Kalotten der Klemm-Heiz-Werkzeuge mittels der axialen Stauchkraft zwischen dem hinteren Ende des Dornwerkzeugs (3) und dem Nietkopfwerkzeug (9), das auch der gemeinsamen Zufuhr von Dornwerkzeug und Nietrohling dient. Abgeschlossen ist der Fügeprozess nach Abkühlung und Erstarrung der Matrix, wobei die Abkühlraten durch eine Luft- oder Wasserkühlung gesteigert werden können. Der Auswurf des Dornwerkzeugs erfolgt schließlich durch Öffnen des Riegels.

5.3 Prozessstudien und Festigkeitsuntersuchungen

Die technologische Umsetzung des oben beschriebenen EFT-Nietverfahrens erfolgt durch Konstruktion und Bau einer automatisierten Versuchseinrichtung zum Fügen von Probekörperstrukturen. Der Einsatz einer speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) erlaubt hierbei die wiederholgenaue Betätigung der drei pneumatischen Antriebe sowie der Heiz- und Kühlfunktionen. Mit der entwickelten EFT-Nietvorrichtung werden Probekörperstrukturen für Zug-Scher-Versuche reproduzierbar hergestellt (Abb. 5.10 und 5.11).



Abb. 5.10: Automatisierte EFT-Nietvorrichtung mit pneumatischen Antrieben, geregelter Heizung, Luftkühlung und SPS-Elektronik

Die für Fügeversuche benötigten Nietrohlinge werden aus glasfaserverstärktem Polypropylen mit der in Kapitel 6.2 beschriebenen Labor-Pultrusionsanlage hergestellt. Die Fer-

tigung geeigneter Plattenstreifen aus Hybridgarngewebe für den EFT-Nietprozess erfolgt im Autoklav-Verfahren. Spezifikationen der Probekörperstrukturen und Nietrohlinge sind der Tabelle 5.2 zu entnehmen.

Tab. 5.2: Spezifikation der Probekörper für Prozess- und Belastungsversuche

Plattenstreifen	
Halbzeug, Hersteller:	Twintex, Saint-Gobain Vetrotex
Faserverstärkung:	Gewebe, Köper, E-Glas, 35 % Vol.
Matrix:	Polypropylen (PP)
Fadengewicht, Flächengewicht:	1500 tex, 700 g/m ²
Laminat:	$[(0^\circ/90^\circ)_{\text{Gewebe}}]_8$ und $[[(0^\circ/90^\circ)_{\text{Gewebe}} / (\pm 45^\circ)_{\text{Gewebe}}]_2]_s$
Abmessungen der Probekörper:	150 mm × 50 mm × ca. 4 mm
Nietrohlinge	
Halbzeug, Hersteller:	Twintex, Saint-Gobain-Vetrotex
Faserverstärkung:	UD, E-Glas, 50 % vol.
Matrix:	Polypropylen (PP)
Abmessungen der Probekörper:	d 10 mm × ca. 20 mm

Die in Zugscherversuchen ermittelten Verbindungsfestigkeiten liegen im Bereich von 9 bis 10 kN (vgl. Abb. 5.12), wobei als Erstversagen ein Bruch der stoffschlüssigen Traganteile auftritt. Der verbleibende Formschluss führt bei weiterer Belastungssteigerung zu einem erneuten Ansteigen der Kraft. Nach einer Schrägstellung des Niets kommt es durch Abscheren der Nietköpfe zum endgültigen Versagen der Verbindung. Ein derartiges sukzessives Versagensverhalten begünstigt den Einsatz der EFT-Verbindungen auch für die Überwachung und Instandhaltung sicherheitsrelevanter Bauteile. Mit einer symmetrischen mehrschnittigen Verbindung kann das Schrägstellen des Niets vermieden und die Schweißkontaktfläche wirkungsvoll vergrößert werden, was in der Regel zu einer weiteren Steigerung der Verbindungsfestigkeit führt.

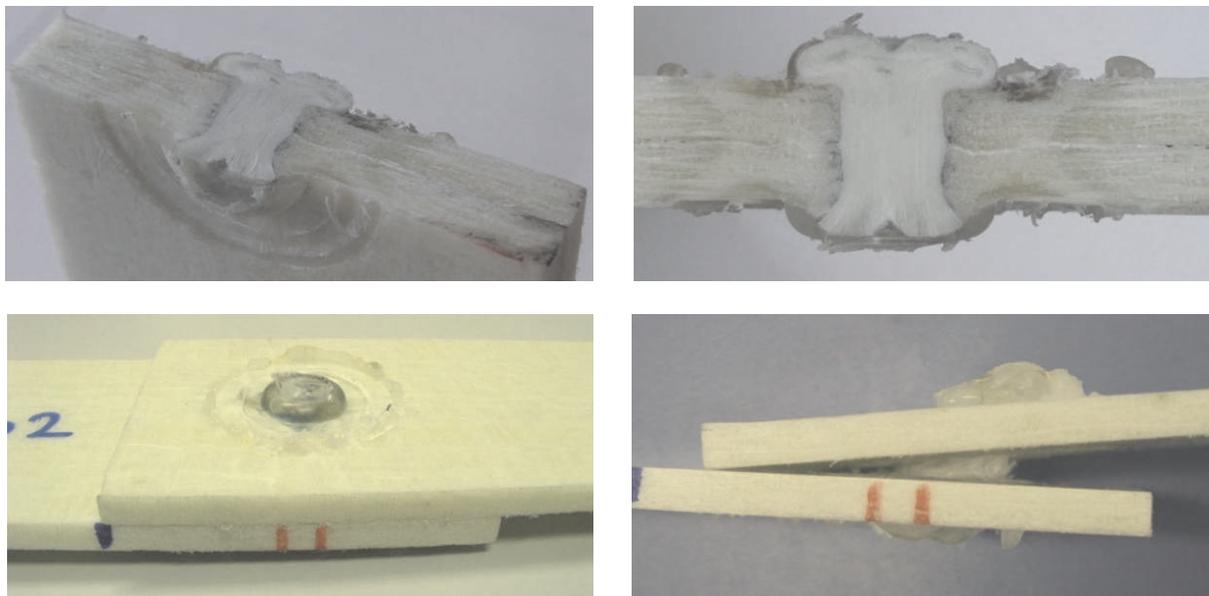


Abb. 5.11: EFT-Nietverbindungen; Längsschnitte durch die Fügezone sowie Probekörper vor und nach dem Belastungsversuch

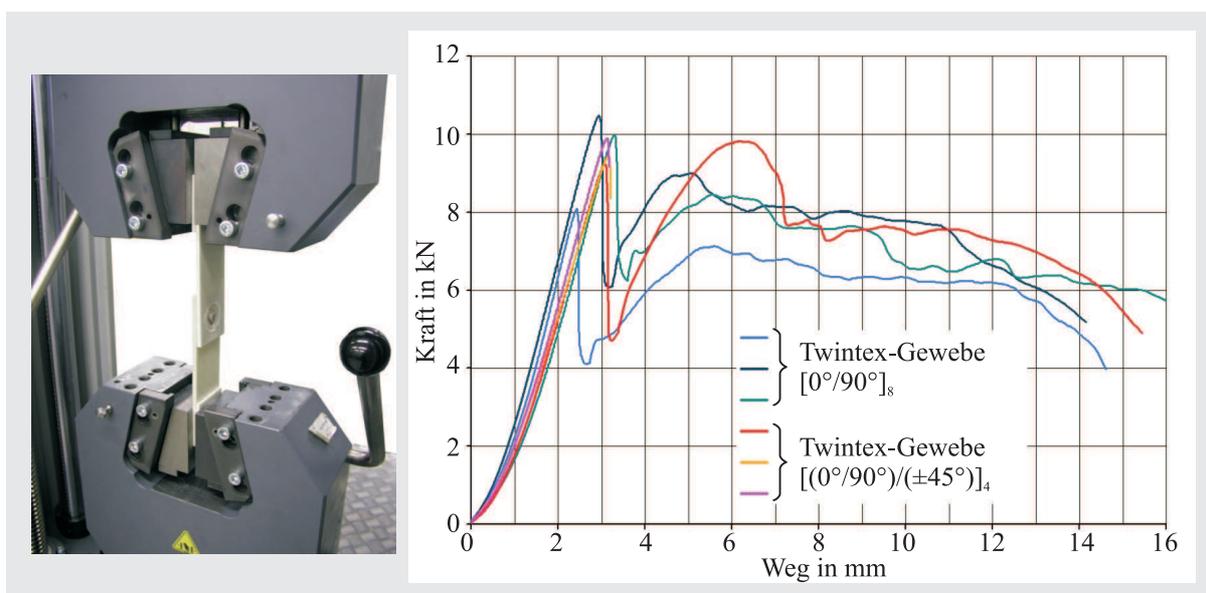


Abb. 5.12: Zugscherversuche an Probekörpern mit EFT-Nietverbindungen

6 Hochfeste Verankerungen durch Faserverbund-Zugstäbe

6.1 Faserverbundgerechte Bauweisen

Der Einsatz von thermoplastischen Matrixsystemen für hochbelastete Faserverbundzugstäbe eröffnet durch die Warmumformbarkeit und Schweißbarkeit neue form- und stoffschlüssige Verankerungsmöglichkeiten. Bei der in Kapitel 3.5 dargestellten konischen Vergussverankerung für Faserverbundstäbe ist die übertragbare Last maßgeblich von der zumeist relativ schwachen stoffschlüssigen Verbindung zwischen Faserverbundstab und Vergussmasse abhängig. Durch eine geeignete umformtechnische Konturformung oder Profilierung des Stabendes (Abb. 6.1 bis 6.3) wird zum einen die für einen Stoffschluss notwendige Kontaktfläche zwischen Stab und Vergussmasse deutlich vergrößert und zum anderen die Geometrie für einen Formschluss angepasst, was insgesamt auf sehr hohe Verbindungsfestigkeiten führt.

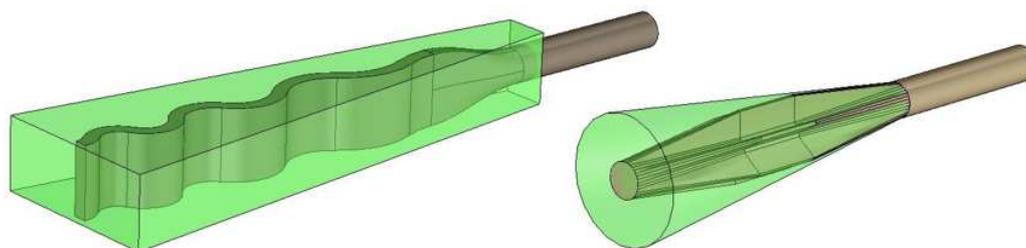


Abb. 6.1: Schematische Darstellung von Vergussverankerungen bei umformtechnisch vorbereiteten Faserverbundstäben durch Konturformung (links) und Profilierung (rechts)

Während bei Zugstäben mit duroplastischer Matrix der Stoffschluss zwischen Vergusskörper und Stabende durch adhesives Anhaften bewirkt wird, ermöglichen thermoplastische Faserverbundstäbe bei Einsatz abgestimmter Matrixsysteme auch eine schweißtechnische Verbindung zu den Vergusskörpern. In Abb. 6.2 ist links ein Zugstabsystem mit UD-verstärktem Flachprofil (GF-PP) und schweißtechnisch gefügten Mehrwinkel-Keilelementen (PP) dargestellt. Nach dem Gestaltungsprinzip der abgestimmten Verformungen werden die Keilwinkel zum Stabende hin größer ausgeführt, wodurch eine sehr gleichmäßige

Schubspannungsverteilung in den Klemmelementen erreicht wird. In Analogie dazu dient bei der Mehrwinkel-Konusverbindung (Abb. 6.2 rechts) ein rotationssymmetrischer Vergusskörper mit mehreren Konuswinkeln der Einleitung hoher Lasten in einen Rundstab. Hierbei kann durch eine sternförmige Profilierung des Stabendes durch Warmumformung die Haftfläche zum Klemmkörper wirkungsvoll vergrößert werden.

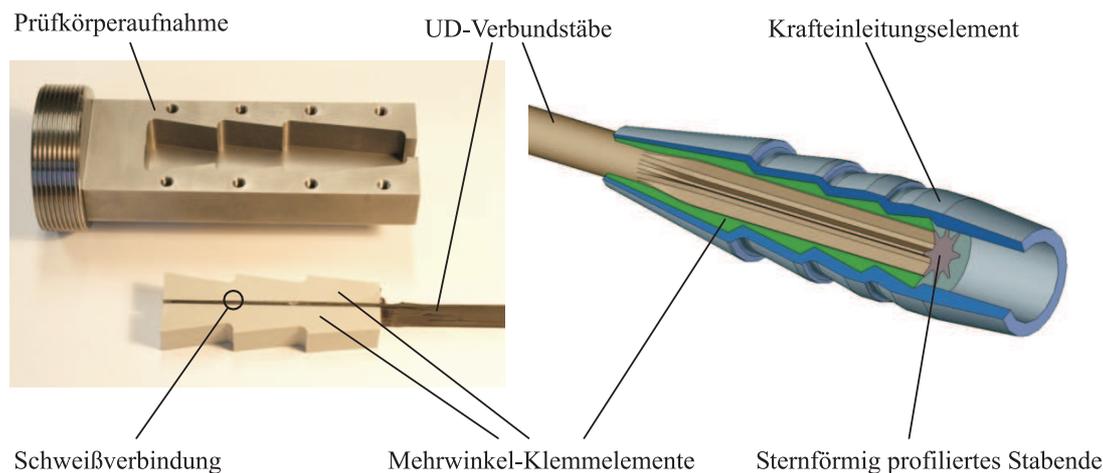


Abb. 6.2: Lasteinleitungen mit stoffschlüssig gefügten Mehrwinkel-Klemmelementen: Mehrwinkel-Keilverbindung bei einem Flachprofil (links) und Mehrwinkel-Konusverbindung bei einem profilierten Stabende (rechts)

Bei großen Stückzahlen können derartige Klemmelement im Spritzgießverfahren hergestellt werden, wobei durch eine Kurz- oder Langfaserverstärkung oder eine mineralische Füllung die Druckfestigkeit der Klemmelemente gesteigert und ein zusätzlicher Mikroformschluss mit dem Stabende erzeugt werden kann. Darüber hinaus kommen verschiedene Pressverfahren wie etwa Composite-Flow-Moulding für die Klemmelementherstellung in Betracht. Alle diese Verfahren ermöglichen vorteilhaft eine direkte und damit konturge-naue Anformung des Vergusskörpers an das profilierte Stabende. Durch das Anschmelzen der Verbundstab-Oberfläche kann ferner eine feste, stoffschlüssige Verbindung erzielt werden. Der Vergusskörper dient neben der gleichmäßigen Einleitung von Zuglasten auch dem Schutz des Faserverbundstabs vor Schwingreibverschleiß, da direkter Kontakt zu metallischen Krafteinleitungselementen auf diese Weise vermieden wird.

Eine formschlüssige Verbindung lässt sich beispielsweise durch Querpresse eines thermisch plastifizierten Faserverbundstabendes realisieren, wobei etwa eine Wellenkontur aufprägt wird. (Abb. 6.3 oben). Ein keilartiger Klemmechanismus bewirkt darüber hinaus einen Kraftschluss und stützt vorteilhaft die umformtechnisch erzeugte Wellenkontur. Bei geeigneter Materialpaarung wird ferner ein Stoffschluss zwischen Klemmkörper und Zugstab realisiert.

Der Einsatz von Schlaufenverbindungen ist ein weiteres vielfach bewährtes Prinzip zur Einleitung von hohen Kräften in FKV-Strukturen (Abb. 6.3 unten). Profile mit thermoplastischen Matrices ermöglichen auch hier die nachträgliche warmumformtechnische

Ausbildung schlaufenähnlicher Bauteilgeometrien, wobei die umformtechnische Herstellung einer geschlossenen Schlaufe relativ schwierig ist. Abb. 6.3 zeigt unten eine einfacher herstellbare offene Schlaufengestalt, die formschlüssig und durch Umschlingungsreibung auch kraftschlüssig mit einem metallischen Krafteinleitungselement verbunden ist.

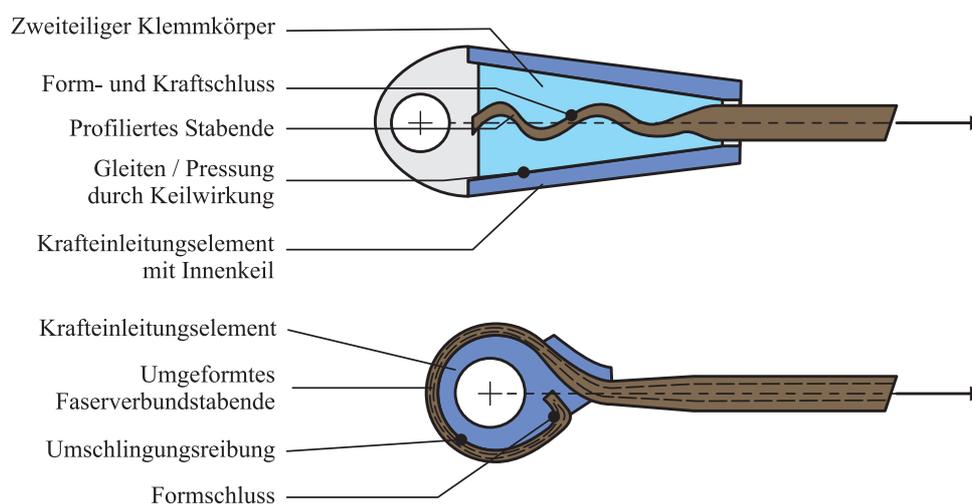


Abb. 6.3: Umformtechnische Verbindungssysteme für thermoplastische Faserverbundstäbe mit wellen- und schlaufenförmig ausgebildeten Stabenden

Ähnlich dem Endanstauchen bei metallischen Profilen, kann auch bei thermoplastischen Verbundstäben durch spezielle Umformverfahren eine lokale Vergrößerung des Durchmessers erreicht werden. Mögliche Verfahren sind u. a. das Aufspreizen, Torsionsstauchen oder Axialstauchen (Abb. 6.4). Bei den beiden letzten Fertigungsverfahren kann die Faseranordnung jedoch nur bedingt gesteuert werden.

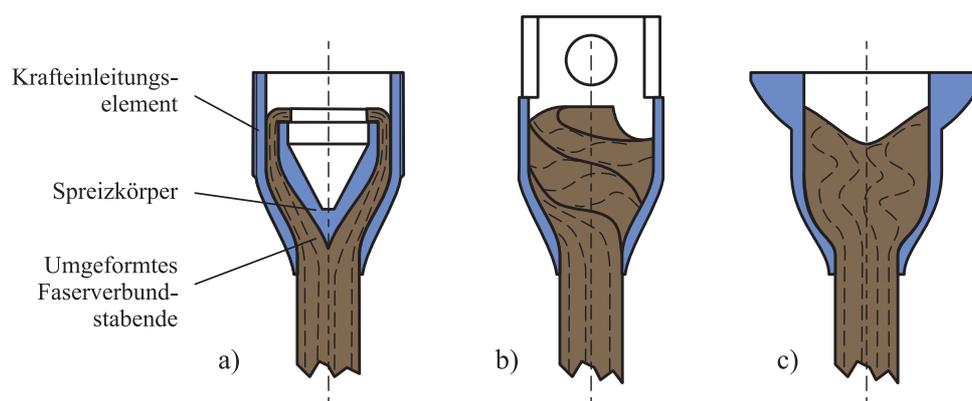


Abb. 6.4: Varianten formschlüssiger Verbindungen mit umformtechnisch vergrößertem Durchmesser:
 a) Aufspreizung, b) Torsionsstauchen, c) Axialstauchen

Eine sehr günstige Faseranordnung im Krafteinleitungsbereich ermöglicht dagegen vor allem das Aufspreizverfahren (Abb. 6.4 a und 6.5). Dabei wird zur radialen Aufweitung ein

Spreizkörper zentrisch in das Stangenende eingeschoben. Hinter dem Spreizkörper wird das Stangenmaterial wieder zusammengeführt, verdichtet und konsolidiert, wodurch der Spreizkörper formschlüssig und ggf. auch stoffschlüssig in das Stangenende integriert ist. Die entstandene Aufdickung am Stangenende findet einen formschlüssigen Halt in einer trichterförmigen Innenkontur des metallischen Krafteinleitungselements. Das hier entwickelte Verbindungssystem lässt sich in modifizierter Form auch auf zug- und druckbeanspruchte Hohlstäbe aus endlosfaserverstärkten Thermoplasten übertragen. Mit Hilfe eines zweiteiligen Krafteinleitungselements wird dabei eine axiale Vorspannung der Fügezone erreicht, was auch eine Aufnahme wechselnder Lasten ermöglicht (Abb. 6.5 unten).

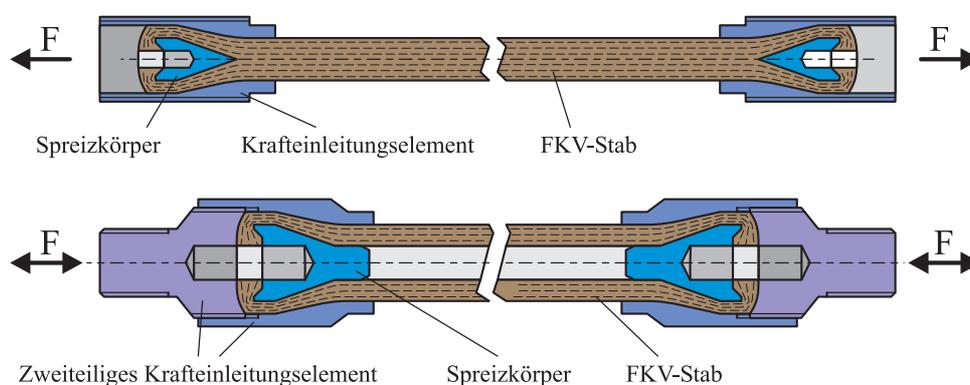


Abb. 6.5: Schematische Darstellung von Faserverbund-Stabsystemen mit warmumformtechnisch aufgespreizten Stabenden

6.2 Verbundstabfertigung mittels Thermoplast-Pultrusion

Als wirtschaftliches Fertigungsverfahren für unidirektional faserverstärkte Leichtbauzugstäbe eignet sich besonders die Thermoplast-Pultrusion. Dabei werden typischerweise band- oder strangförmige hybride Faserhalbzeuge, die neben den Verstärkungsfasern auch einen Thermoplastanteil aufweisen, zu endlosfaserverstärkten Kunststoffprofilen verarbeitet. Als Faserhalbzeuge kommen etwa Hybridgarne und Tapes zum Einsatz, die vor allem für textile Preformverfahren oder die Tape-Legetechnik entwickelt wurden. Die Pultrusion faserverstärkter Thermoplastprofile ist unter verschiedenen Aspekten untersucht und optimiert worden (siehe etwa [1, 27]). Mittlerweile wird dieses Verfahren für einige industrielle Anwendungen eingesetzt. Durch den weitgehend automatisierten Ablauf des Fertigungsprozesses kann hiermit eine wirtschaftliche Herstellung sehr steifer und hochfester prismatischer Verbundstäbe erzielt werden.

Der prinzipielle Aufbau einer industriellen Thermoplast-Pultrusionsanlage ist in Abb. 6.6 dargestellt. Das hybride Faserhalbzeug (2) wird ähnlich wie bei der Duroplast-Pultrusion (vgl. Abb. 3.8) auf einem Spulenständer (1) bereitgehalten. In einer Vorheizstation (3)

wird der thermoplastische Kunststoff durch Heißluftzufuhr plastifiziert. In einem unmittelbar nachfolgenden beheizten, düsenförmigen Pultrusionswerkzeug (4) werden die nun mit Schmelze benetzten Verstärkungsfasern verdichtet und profiliert. In einem nachgeschalteten Richt-Kühlwerkzeug (5) erkaltet und erstarrt die Thermoplast-Matrix, gleichzeitig wird der Verbund gerichtet und kalibriert. Der Abzug des Profils kann z. B. mit einem Doppelbandabzug (6) erfolgen.

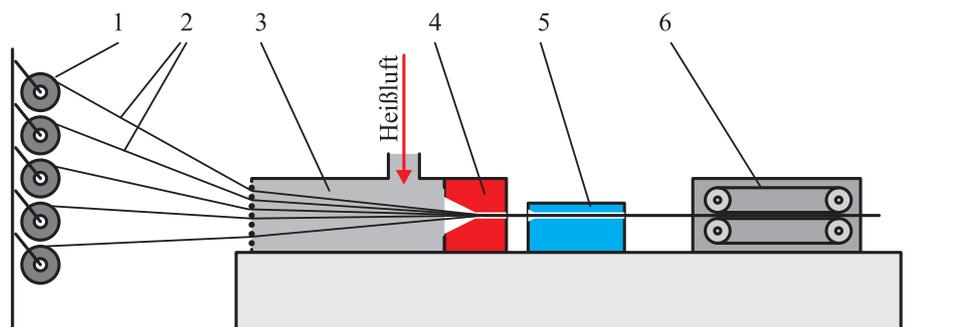


Abb. 6.6: Seitenschema einer Thermoplast-Pultrusionsanlage

Den schematischen Aufbau der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Labor-Pultrusionsanlage zeigt Abb. 6.7. Entwicklungsziel war hierbei die reproduzierbare Verarbeitung unterschiedlicher hybrider Faserhalbzeuge zu Verbundstab-Probekörpern. Bei dieser diskontinuierlich arbeitenden Pultrusionsanlage wurde auf einen Spulenständer und auf einen Bandabzug verzichtet. Die hybriden Faserhalbzeuge (2) werden stattdessen als Zuschnitte in einem Magazin (1) bereitgehalten. Der Abzug des Faserverbundstrangs wird mit einem kettengetriebenen Schlitten (6) für Längen bis ca. 1 500 mm ermöglicht. Die Anordnung der heißluftbetriebenen Vorheizstation (3), des beheizten Pultrusionswerkzeugs (4) sowie des Richt-Kühl-Werkzeugs (5) entspricht üblichen Anlagen.

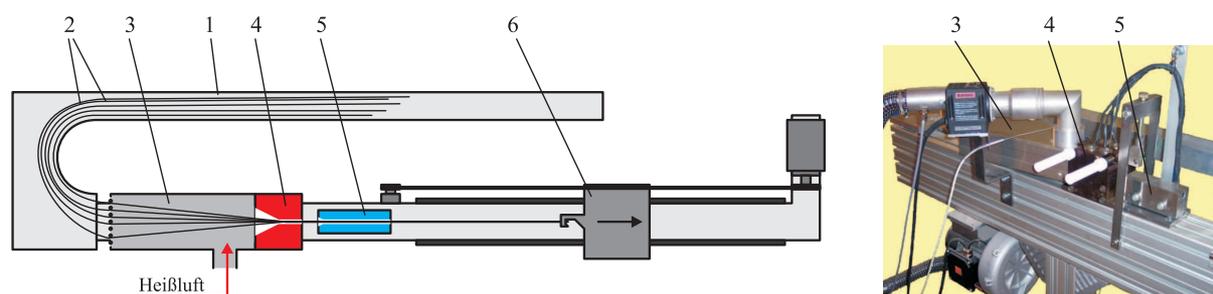


Abb. 6.7: Draufsicht und Detailansicht der entwickelten Pultrusionsvorrichtung

Für die Labor-Pultrusionsanlage wurde u. a. ein spezielles Pultrusionswerkzeug mit Füllschacht konstruiert, das zu Beginn des Fertigungsablaufs das Befüllen ermöglicht und in guter Näherung einen Kreisquerschnitt erzeugt (Abb. 6.8).

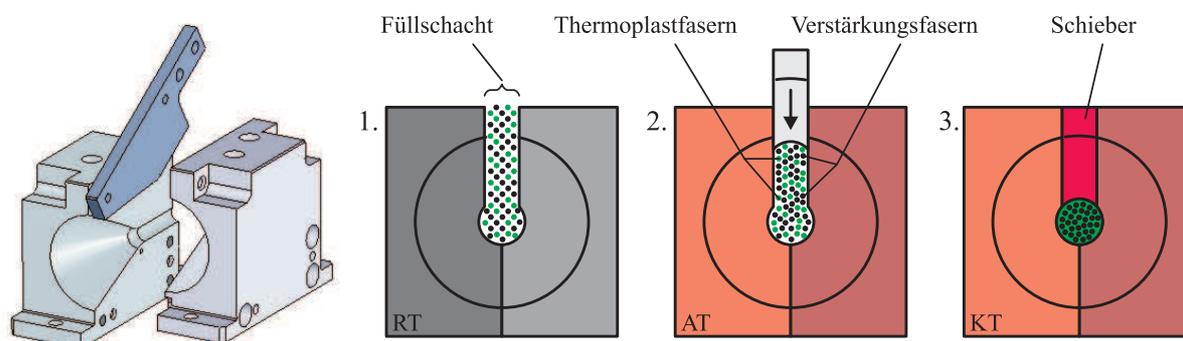


Abb. 6.8: Pultrusionswerkzeug, 1. Füllvorgang bei Raumtemperatur (RT), 2. Verdichtung bei Aufheiztemperatur (AT), 3. Pultrusionsprozess bei Konsolidierungstemperatur (KT)

6.3 Vorrichtung zur umformtechnischen Montage

Das für die Zugstabverankerung prädestinierte Aufspreizverfahren (vgl. Abb. 6.5) wird detaillierten theoretischen und experimentellen Untersuchungen unterzogen. Zur Herstellung von Zugstab-Probekörpern (Abb. 6.9) für Festigkeitsuntersuchungen sowie zur Darstellung eines im industriellen Maßstab einsetzbaren Montageprozesses wurde eine automatisierte Montagevorrichtung konstruiert und gebaut.

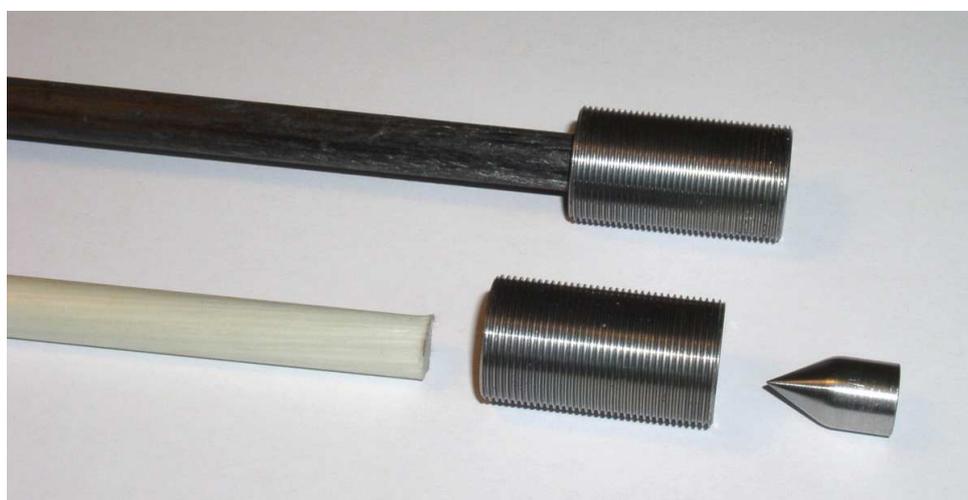


Abb. 6.9: Zugstangen-Probekörper mit Lasteinleitungselementen vor und nach der Montage

Abb. 6.10 zeigt schematisch wesentliche Stufen des umformtechnischen Fügeprozesses bei Verwendung eines metallischen Spreizkörpers. Die Stange (1) wird hierbei kraftschlüssig in einer Klemmvorrichtung (10) gegen axiales Verschieben gesichert. Der etwa mit einer Heizpatrone (5) temperierte Heizkörper (4) ist als linearer Schieber (9) ausgeführt, der das Krafteinleitungselement (2) (KEE) aufnimmt und koaxial zur Stange führt. Der

über die Führungsstange (7) vorgeschobene Spreizkörper (3) und das Stempelwerkzeug (8) sind ebenfalls lineargetrieben und koaxial zur FKV-Stange geführt.

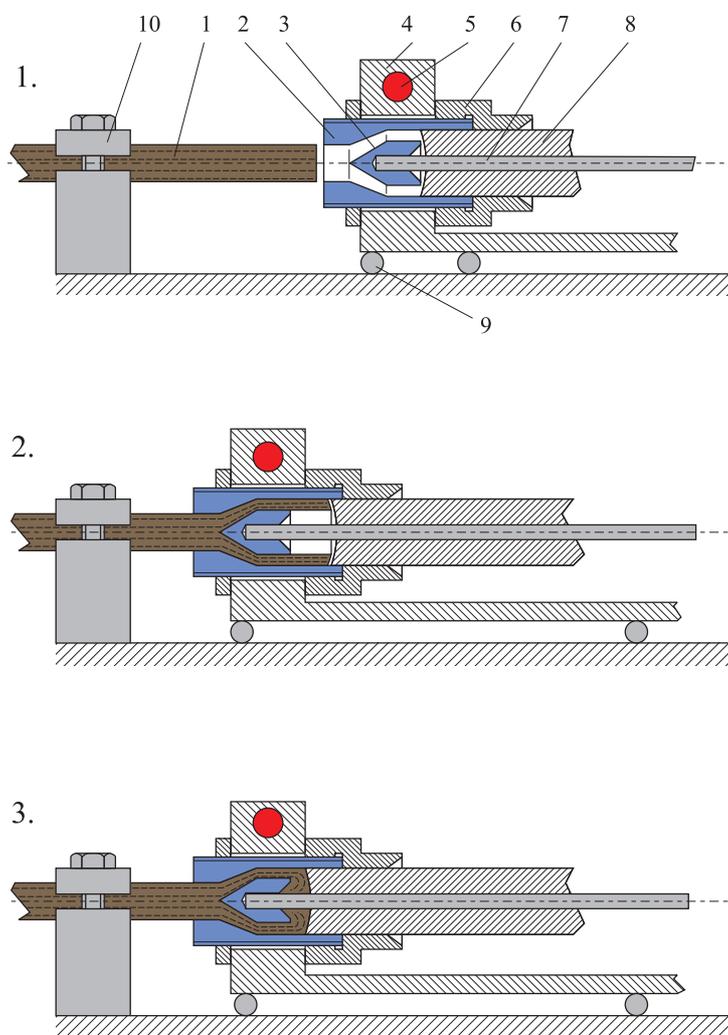


Abb. 6.10: Wesentliche Schritte des Montagevorgangs von Lasteinleitungen, 1. Positionieren und Zentrieren des Spreizkörpers, 2. Plastifizieren und Aufweiten des Stangenendes, 3. Formschlüssige Integration des Spreizkörpers und Abkühlen

Um eine möglichst rotationssymmetrische Aufweitung des FKV-Stangenendes zu erzielen, ist eine steife konzentrische Vorpositionierung des Spreizkörpers (3) im KEE erforderlich. Diese Zentrierung wird durch das vorläufige Einführen des Stempelwerkzeugs gewährleistet. Das KEE wird durch die Heizpatrone auf eine Temperatur etwas oberhalb der Erweichungstemperatur der verarbeiteten Thermoplastmatrix erwärmt. Das KEE wird nach Erreichen dieser Prozesstemperatur über das Stangenende geschoben, wobei das Stangenende auf den zentrierten, mitgeführten Spreizkörper trifft. Der Wärmefluss aus dem KEE führt dabei zum Plastifizieren der thermoplastischen Matrix. Bei weiterem Vorschub fließt das Stangenmaterial durch den kelchförmigen Ringraum zwischen KEE

und Spreizkörper. Zur formschlüssigen Einbettung des Spreizkörpers, wird das über den Spreizkörper hinausstehende Stangenmaterial durch das Stempelwerkzeug (6) neu verdichtet und angelegt. Während die Klemmkräfte auf den Spreizkörper (3) und auf den Stempel (8) gehalten werden, wird durch eine geringe Rückfahrkraft auf den Schlitten (9) die Fügezone etwas vorgestreckt, um eine gestreckte Faseranordnung zu gewährleisten. Nach dem Abkühlen des Systems wird das KEE vom Heizkörper gelöst und die Klemmvorrichtung (10) geöffnet.

Die nach diesem Prinzip eigens entwickelte Montagevorrichtung ist in Abb. 6.11 dargestellt. Vorteilhaft gegenüber typischen Metall-Umformverfahren sind hier vor allem die deutlich niedrigeren Umformkräfte. Die linearen Zufuhrbewegungen von KEE, Spreizkörper und Formstempel können somit problemlos von Pneumatikantrieben vorgenommen werden. Um die äußeren Abmessungen der Vorrichtung klein zu halten, wurde ein koaxialer pneumatischer Doppelantrieb entwickelt, der die Pneumatikantriebe (11) und (12) zusammenfasst. Dabei wird die Kolbenstange des hinteren Antriebs (12) koaxial durch den vorderen Zylinder (11) und dessen Kolbenstange hindurchgeführt. Somit stehen zwei ineinander laufende Kolbenstangen zur Verfügung, die die unabhängigen Zufuhrbewegungen von Spreizkörper und Stempel mit minimalem Bauraumbedarf ermöglichen. Die geregelte Erwärmung des Heizkörpers erfolgt mit einer elektrischen Heizpatrone (5). Durch eine Wasserkühlung erfolgt zum Prozessende die Verbundkonsolidierung innerhalb von wenigen Sekunden. Mit Hilfe der beschriebenen Montagevorrichtung können mit einer hohen Reproduzierbarkeit Zugstabsysteme für weiterführende Belastungsversuche hergestellt werden.

6.4 Festigkeitsberechnungen und Verifikation

Die komplexen Spannungsverteilungen im Krafteinleitungsbereich sowie die Reib- und Gleitvorgänge zwischen FKV-Komponente und Metallteilen lassen sich vorteilhaft mit modernen Finite-Elemente-(FE-)Berechnungsprogrammen erfassen. Die hierfür erforderlichen richtungsabhängigen Werkstoffkennwerte (Steifigkeiten, Festigkeitsparameter) wurden mit Hilfe von Rohrprobekörpern in Ein- und Mehraxial-Bruchversuchen ermittelt.

Zu den wesentlichen Geometrieparametern bei den untersuchten Krafteinleitungen zählen der Spitzenwinkel des Spreizkörpers sowie der maximale Spreizdurchmesser. Ziel der Parameterstudien war, eine bestmögliche Ausnutzung des Tragvermögens der Fasern sicherzustellen. Eine Bewertung der zu erwartenden Versagensvorgänge wurde dabei mit dem neuen bruchmodenbezogenen Versagenskriterium nach CUNTZE vorgenommen (vgl. Abb. 6.12). Da die Reibwerte in der Fügezone einen Einfluss auf die Tragfähigkeit der Verbindung aufweisen, wurde eine virtuell-experimentelle Kennwertanpassung für die ausgewählte Werkstoffpaarung (PA12 und Stahl) vorgenommen. Der Abgleich von experimentellen Belastungsversuchen und FE-Berechnungen ergab einen Reibwert von $\mu = 0,15$. Hierauf aufbauend konnten Bruchmoden und Versagensorte nach CUNTZE ermittelt werden, wobei

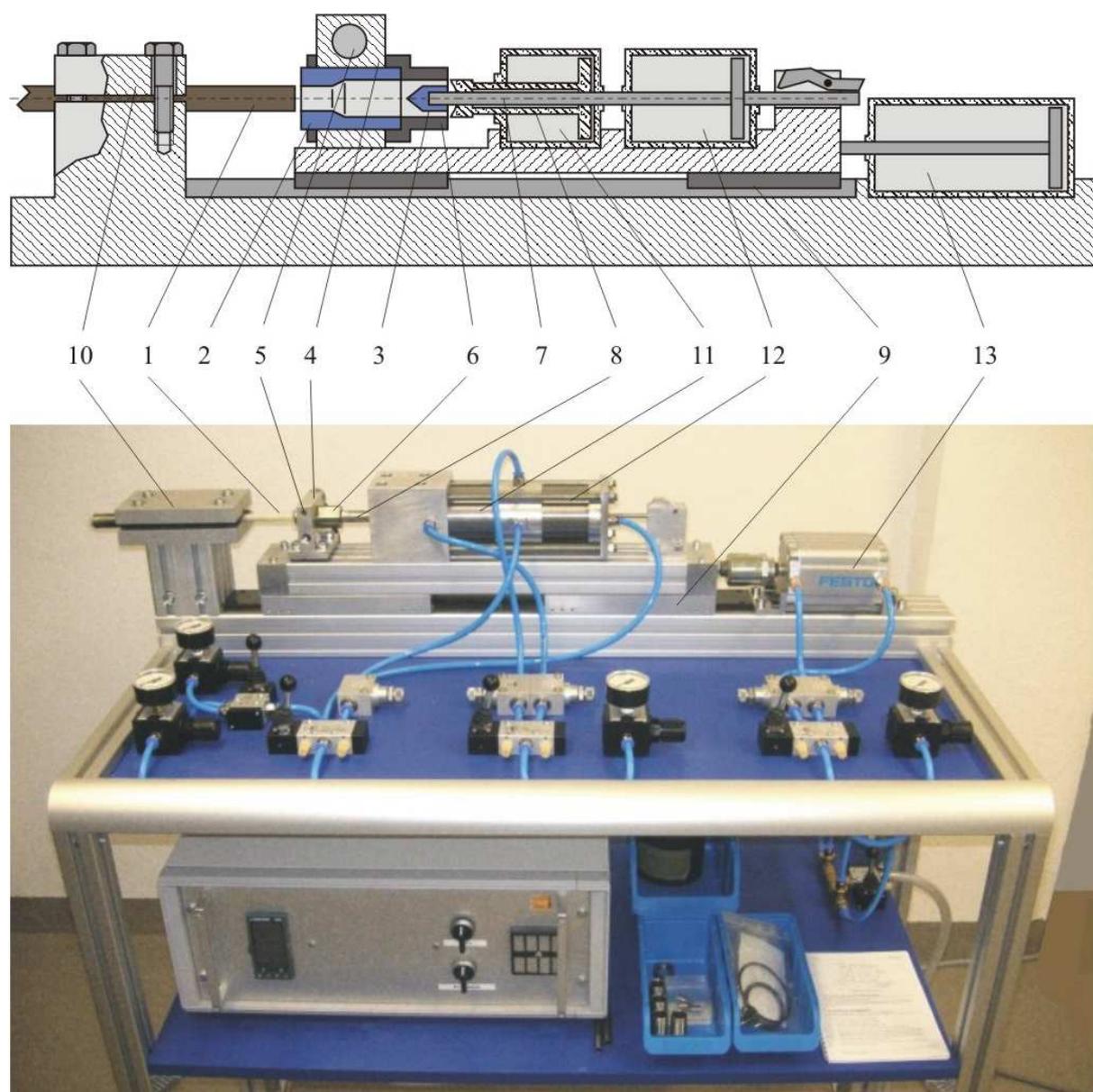


Abb. 6.11: Montagevorrichtung für das Leichtbau-Zugstabsystem mit Faserverbundstab (1), Krafteinleitungselement (2), Spreizkörper (3), Heizkörper (4), Heizpatrone (5), Stempelführung (6), Spreizkörperführungsstange (7), Stempel (8), Linearführung (9), Klemmvorrichtung für FKV-Stab (10) und Pneumatikantrieben (11, 12, 13)

eine sehr gute Übereinstimmung mit den beobachteten Bruchphänomenen festgestellt werden konnte. Die umfangreichen Parameterstudien bestätigen, dass größere Spreizdurchmesser und kleinere Spitzenwinkel zu niedrigeren Werkstoffanstregungen führen (vgl. Abb. 6.12).

In quasistatischen Belastungsversuchen an Verbund-Zugstab-Prototypen mit unterschied-

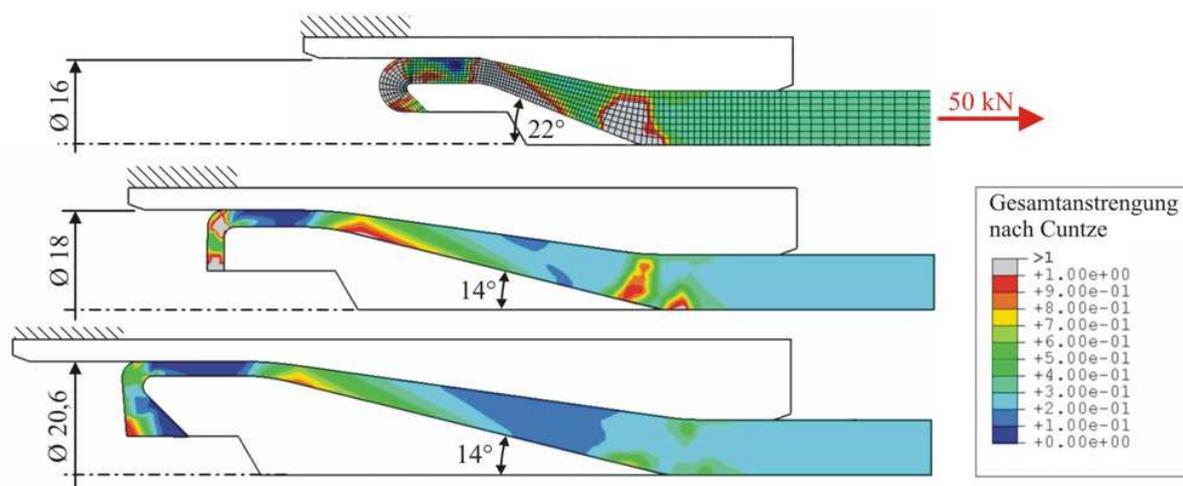


Abb. 6.12: Parameterstudien zur Optimierung des Lasteinleitungssystems mittels FEM, Ausgangskonfiguration (oben) sowie Variation von Spitzenwinkel und Spreizdurchmesser

lichen Faser-Matrix-Kombinationen konnte grundsätzlich Versagen sowohl im konischen Bereich als auch auf der Spreizkörper-Rückseite beobachtet werden. Bei höheren Faserfestigkeiten (etwa bei S-Glas, T700) war das Versagen durchweg auf Matrixbrüche an der Spreizkörperrückseite zurückzuführen. Um das Festigkeitspotential der Fasern besser ausnutzen zu können, ist daher eine Vergrößerung des Aufspreizdurchmessers nötig. Ein kleinerer Spitzenwinkel vermindert dagegen ungünstige Faserumlenkungen und führt somit zur Erhöhung der Verbindungsfestigkeiten.

Bei Verbund-Zugstäben aus S-Glasfasern und PA12 mit einem Durchmesser von 10 mm konnten Bruchlasten von 47 kN erzielt werden (vgl. Abb. 6.13). Neben der Konturoptimierung lässt auch der Einsatz von hochfesten Matrixwerkstoffen wie etwa Polyetheretherketon (PEEK) eine weitere Steigerung der Bruchlasten erwarten.

Abb. 6.14 stellt Ergebnisse der Belastungsversuche an Zugstabdemonstratoren mit Mehrwinkel-Klemmverbindung dar. Die geringe Anfangssteifigkeit des Systems spiegelt den Verspannungsvorgang der PP-Klemmelemente in den entsprechenden Kulissen der Prüfkörperaufnahmen wider. Die über die Keiflächen erzeugte Klemmkraft führt zu einer optimalen Unterstützung der Schweißverbindung. Hierdurch können in den Verbund-Zugstab maximale Kräfte eingeleitet werden, wodurch im Allgemeinen ein Faserbruch im ungestörten Stababschnitt auftritt.

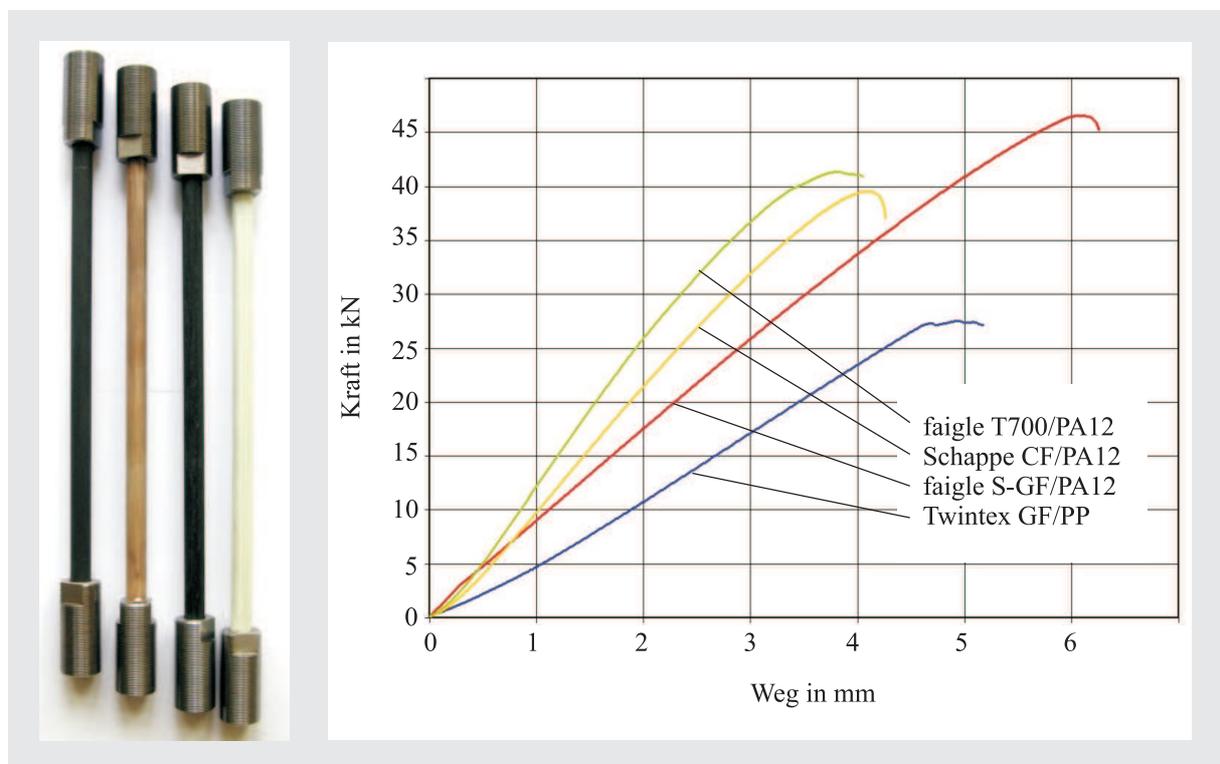


Abb. 6.13: Ergebnisse der Belastungsversuche an Verbund-Zugstäben aus unterschiedlichen Faser-Matrix-Kombinationen

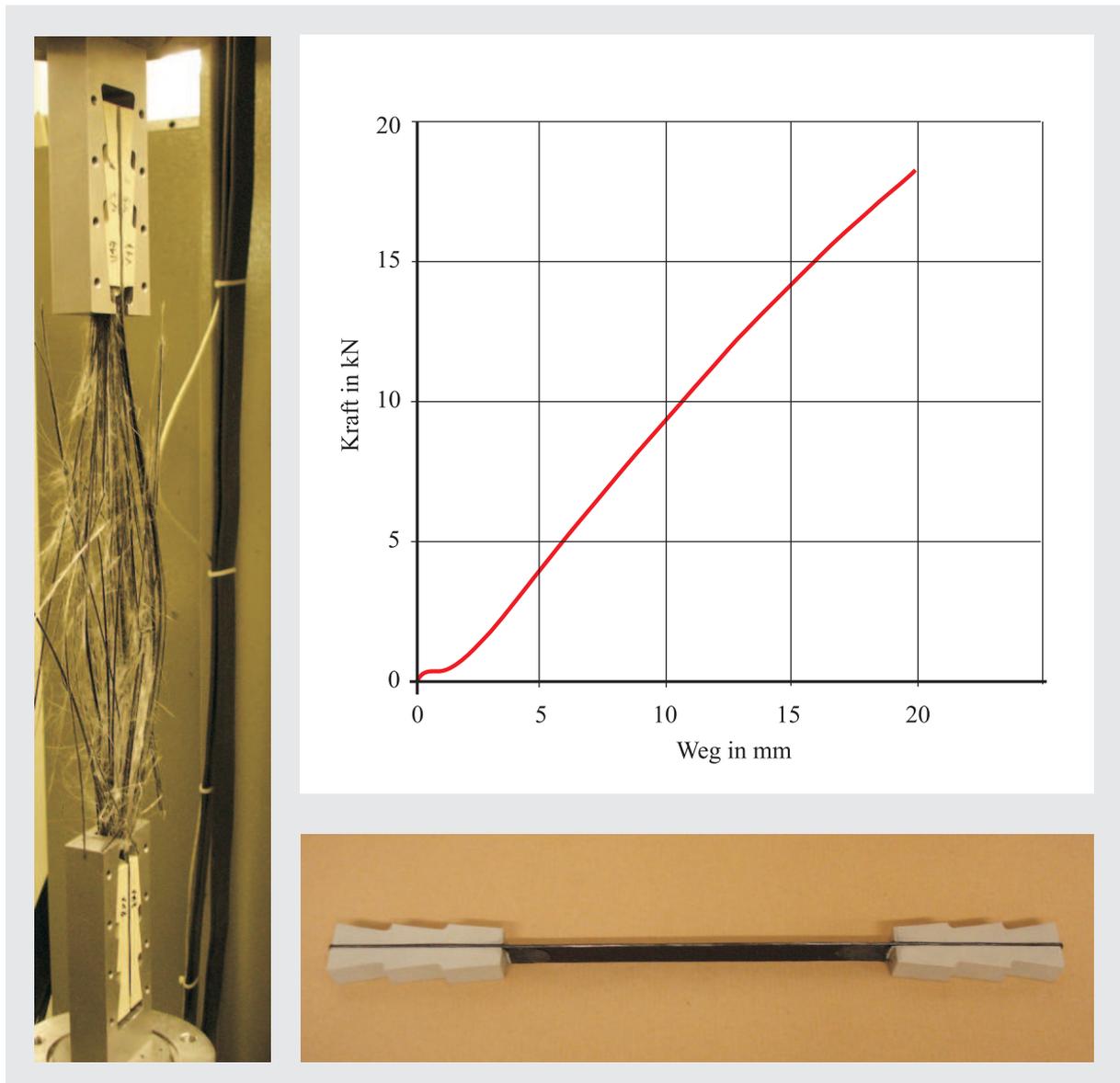


Abb. 6.14: Ergebnisse eines Belastungsversuchs an einem Zugstabdemonstrator aus GF-PP mit schweißtechnisch gefügten PP-Mehrwinkel-Klemmelementen

7 Textile Hohlstrukturen mit integrierten Lasteinleitungselementen

Bei textilverstärkten Hochleistungsstrukturen lassen sich durch die formschlüssige Integration von metallischen Funktionselementen direkt im Fertigungsprozess bedeutende technische und wirtschaftliche Vorteile erzielen. Durch Modifikation des bekannten Schlauchblasverfahrens wird beispielsweise die Herstellung von Hohlstrukturen aus textilverstärktem Kunststoff mit ringförmig umgebenden metallischen Lasteinleitungselementen ermöglicht. Derartige Mischbauweisen erlauben neben der Integration hochfester Verbindungen auch eine Vereinfachung der Montage, wobei insbesondere bei Verwendung thermoplastischer Matrices kurze Prozesszeiten realisiert werden können.

7.1 Konzeption von Schlauchblasstrukturen in Mischbauweise

Bei dem in dieser Arbeit entwickelten Schlauchblas-Integral-(SBI-)Verfahren entsteht die hybride Hohlstruktur in einer speziellen geschlossenen Negativform, die die ringförmigen Lasteinleitungselemente präzise zueinander positioniert und die konturgenaue Abformung der Faserverbundaußenflächen gewährleistet (vgl. Abb. 7.1 und 7.2). Eine textile schlauchförmige Preform wird dabei im Formwerkzeug so eingelegt, dass sie die ringförmigen Lasteinleitungselemente durchdringt und dabei gleichzeitig einen Blasschlauch aus elastischem Kunststoff (z. B. Silikon) umhüllt. Durch Aufweiten des Blasschlauchs mittels Innenüberdruck wird die textile Preform an die Formoberflächen des Werkzeugs und an die Kontaktflächen der Lasteinleitungselemente angeschmiegt und verpresst. In diesem Zustand erfolgt die Konsolidierung der Faserverbundstruktur, wobei verschiedene Matrixsysteme und Infiltrationsprozesse zur Auswahl stehen.

Besondere Vorteile bietet das Schlauchblasverfahren bei der Verarbeitung von Hybridgarn-Textil-Thermoplast-(HGTT-)Halbzeugen. Derartige Preformen, die neben den Verstärkungsfasern auch den thermoplastischen Matrixwerkstoff in Form fein verteilter Thermoplastfasern enthalten, erlauben eine schnelle Konsolidierung durch kurzes Aufschmelzen und Abkühlen des Thermoplasts. Eine Evakuierung des Formwerkzeugs ist dabei nicht

zwingend erforderlich, wodurch in vielen Fällen mit vergleichsweise einfachen und preiswerten Werkzeugsystemen gefertigt werden kann (Abb. 7.1).

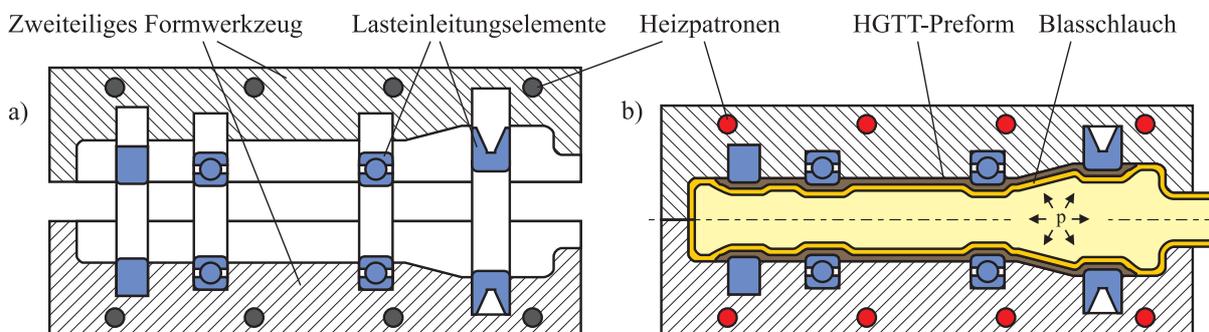


Abb. 7.1: Schlauchblas-Integralfertigung von Hohlstrukturen aus HGTT-Preformen und metallischen Lasteinleitungselementen

Bei der Fertigung von Schlauchblaskomponenten aus HGTT-Halbzeugen ergeben sich gewisse Nachteile hinsichtlich des Volumenschwunds beim Aufschmelzen des Thermoplastanteils. Bei gängigen hybriden Preformen ist die Schichtstärke etwa dreimal größer als die verbleibende Wandstärke des konsolidierten Bauteils. Insbesondere bei dickwandigen Bauteilen ergeben sich dadurch schwer handhabbare Preformen mit geringem Drapiervermögen.

Beim Schlauchblasverfahren mit duroplastische Harzsystemen werden entweder vorimprägnierte Preformen verarbeitet oder „trockene“ Preformen mittels Resin-Transfer-Moulding-(RTM-)Verfahren infiltriert. Für den RTM-Prozess wird das Formwerkzeug nach außen abgedichtet, so dass Luft aus der Preform evakuiert und Reaktionsharz injiziert werden kann (Abb. 7.2). Um ein Kollabieren des Glasschlauchs bei der Harzinjektion zu vermeiden, wird der Blasdruck größer als der Injektionsdruck gewählt. Der Einsatz von Reaktionsharzen ermöglicht über den Formschluss hinaus auch ein klebtechnisches (stoffschlüssiges) Fügen der metallischen Lasteinleitungselemente. Ferner ist die Schichtstärke der Preform nur geringfügig größer als die verbleibende Wandstärke des Bauteils, wodurch die Herstellung von Bauteilen mit größeren Wanddicken gegenüber Thermoplastverbunden vereinfacht wird.

Besonders niedrigviskos eingestellte Harzsysteme gewährleisten beim RTM-Prozess eine schnelle und vollständige Infiltration der Faserpreform. Um dabei die endbearbeiteten Funktionsflächen der metallischen Lasteinleitungselemente nicht mit Reaktionsharz zu benetzen, ist eine z. T. aufwändige Abdeckung dieser Flächen erforderlich. Eine vollständige Abdichtung dieser Funktionsflächen ist aufgrund der verzweigten Spaltverläufe bei üblichen zwei- oder mehrteiligen Formwerkzeugen kaum realisierbar, so dass sich oft eine nachgeschaltete spanende Endbearbeitung zur Gewährleistung harzfreier Funktionsflächen als vorteilhaft erweist (Abb. 7.3).

Dagegen kommt es bei der Verwendung von HGTT-Preformen lediglich zu geringem Austrieb von überschüssigem Matrixwerkstoff, da der erforderliche Matrixanteil bereits im

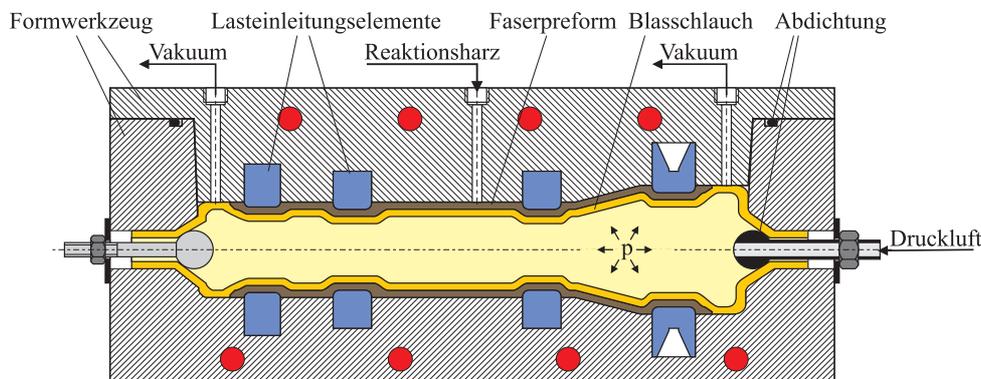


Abb. 7.2: Prinzipdarstellung des Schlauchblas-Integralverfahrens mittels RTM

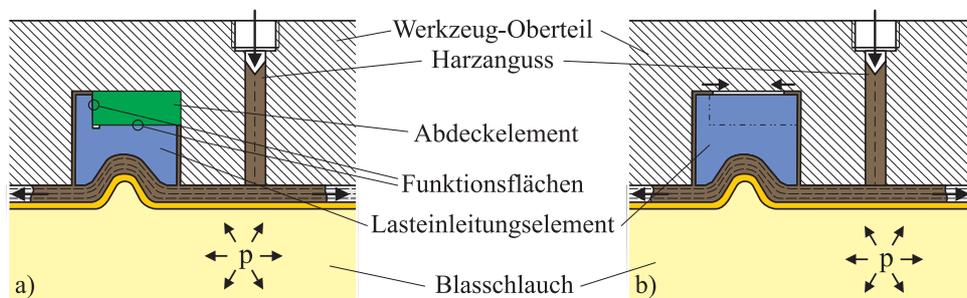


Abb. 7.3: Sicherstellung harzfreier Funktionsflächen bei Schlauchblas-Integralverfahren mit Duroplasten a) Abdeckung der Funktionsflächen, b) spanende Endbearbeitung

Hybridgarn-Spinnprozess eingestellt wird. Auch aufgrund der höheren Viskositäten von Thermoplastschmelzen reichen häufig eng tolerierte Spaltdichtungen, um matrixfreie Außenflächen im Bereich der Lasteinleitungselemente zu gewährleisten.

Die Schlauchblas-Integraltechnik erlaubt durch den Einsatz von Hochleistungs-Faserverbundwerkstoffen wie etwa kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen die Realisierung eines wirkungsvollen Stoffleichtbaus bei Hohlstrukturen, Profilen und Rahmentragwerken. Dabei erfordert dieses Verfahren aufgrund der Anisotropie und der erreichbaren Steifigkeiten gängiger Textilverbunde sowie der fertigungstechnisch limitierten Wandstärken auch besondere Maßnahmen zum Gestaltleichtbau (vgl. Abb. 7.4). Die Substitution etwa von Stahl-Strukturen durch Schlauchblasstrukturen aus CFK ist unter Beibehaltung der Geometrie nur selten möglich, da mit multiaxialen Textilverbunden kaum die Werkstoffsteifigkeit von Stahl erreicht werden kann. Vielmehr sind durch Maximierung der Strukturdurchmesser ausreichend hohe Flächenträgheitsmomente bei verfahrensgerechten Wandstärken zu gewährleisten. Die damit einhergehende Vergrößerung der Stützdurchmesser im Bereich der Lasteinleitungselemente erlaubt ferner eine gleichmäßigere Lastübertragung mit niedrigeren Flächenpressungen und führt durch reduzierte metallische Querschnitte zu weiteren erheblichen Gewichtseinsparungen. Weitere ausgewählte Faserverbundkomponenten mit ringförmigen Lasteinleitungselementen, die für eine Schlauchblas-Integralfertigung prädes-

tiniert sind, zeigt Abb. 7.5.

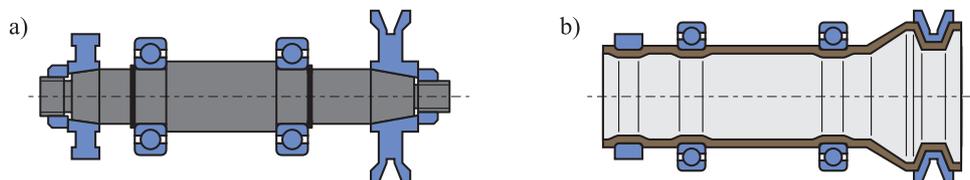


Abb. 7.4: Schematische Darstellung von Getriebewellen a) klassische metallische Bauweise, b) Gestaltleichtbau einer Schlauchblas-Integralstruktur

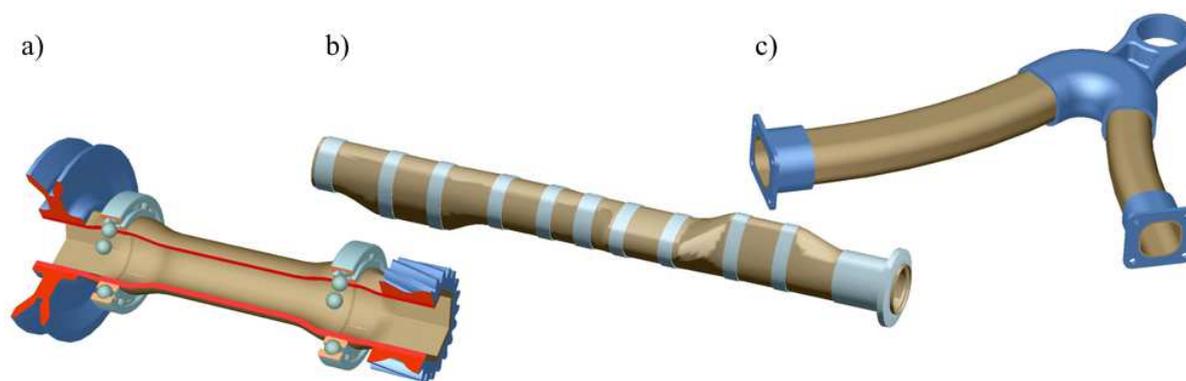


Abb. 7.5: CAD-Entwürfe prädestinierter Faserverbund-Schlauchblaskomponenten mit metallischen Lasteinleitungselementen a) Getriebewelle, b) Nockenwelle, c) Achsträger

7.2 Gestaltung und Dimensionierung von formschlüssigen Verbindungen

Wesentliche Geometrieparameter von Lasteinleitungssystemen sowie Art und Anordnung günstiger Faserverstärkung im Bereich der Fügezone ergeben sich sowohl nach fertigungstechnischen als auch nach strukturmechanischen Gesichtspunkten. So etwa ermöglicht ein unrunder, z. B. polygon- oder sternförmig profilierter Kontaktbereich zwischen Lasteinleitungselement und Faserverbundstruktur die formschlüssige Übertragung hoher Torsionsmomente und eine gleichmäßige Lastverteilung auf mehrere Kontaktflächen (Abb. 7.6). Bei Lasteinleitungselementen mit nicht rotationssymmetrischer Außenkontur wie etwa bei Kurvenscheiben oder kastenförmigen Space-Frame-Komponenten kann durch ähnliche Anpassung der Kontaktgeometrie das metallische Bauteilvolumen minimiert werden (Abb. 7.6).

Für die Einleitung von Längskräften und Biegemomenten in FKV-Schlauchblaskomponenten sind gegenüber den Profilverbindungen unlaufende formschlüssige Konturen bestens



Abb. 7.6: Entwurf von Profilverbindungen zur Übertragung hoher Torsionsmomente: a) Faserverbundgerecht verrundetes Sternprofil, b) Kurvenscheibe mit angepasstem Profil

prädestiniert (Abb. 7.7, vgl. auch die Ausführungen zu Konturverbindungen bei Hydraulikzylindern in Kap. 8). Durch Einsatz von Lasteinleitungselementen mit Gewindekonturen auf der Innenseite entstehen im Schlauchblasprozess hochbelastbare Faserverbund-Hohlstrukturen mit zugehörigem Außengewinde.

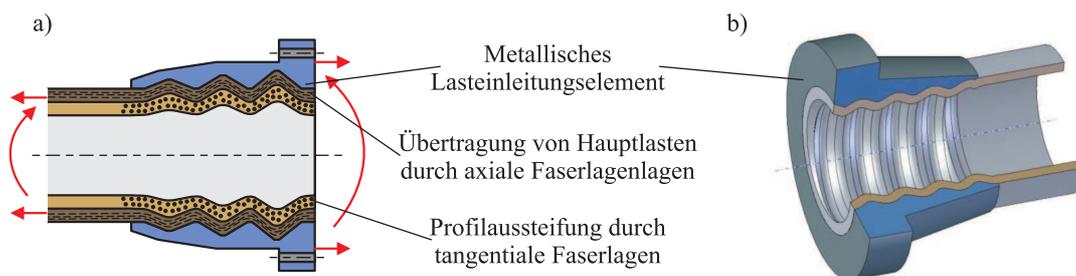


Abb. 7.7: Entwurf von Konturverbindungen zur Übertragung von Längskräften und Biegemomenten: a) Umlaufende Rund-Trapez-Kontur, b) Rund-Trapez-Gewindekontur

Zur Übertragung hoher Kräfte ist die Faserverbund-Hohlstruktur mit einem beanspruchungsgerechten Lagenaufbau mit unterschiedlichen Faserorientierungen für die „Lastfernübertragung“ sowie für die Aussteifung der einzelnen Fügezonen auszuführen. Während für die Aufnahme von Zug-, Druck- und Biegebelastungen Schichten mit vorwiegend axialer Faserorientierung benötigt werden, kommen bei torsionsbelasteten Strukturen $\pm 45^\circ$ -Lagen vorteilhaft zum Einsatz. Durch geeignete Kombinationen derartiger Faserlagen können ferner die in der Praxis häufig auftretenden mehrachsigen Belastungen beanspruchungsgerecht aufgenommen werden. Im Betrieb treten dabei erhebliche Flankenpressungen mit radialen Lastanteilen in den Fügezonen auf, was eine lokale Aussteifung dieser Bereiche mit zusätzlichen tangential orientierten Faserlagen auf der Innenseite der Faserverbund-Hohlstruktur erfordert. Sofern diese Aussteifung einen niedrigeren Wärmeausdehnungskoeffizient als das ringförmig umgebende Lasteinleitungselement aufweist, kann durch Aufschumpfen der metallischen Komponente auf das Faserverbundbauteil beim Abkühlen nach der Konsolidierung ein hochfester Verbund erzielt werden. Diese radiale Vorspannung gewährleistet dabei Spielfreiheit und wirkt unerwünschten Relativbewegungen entgegen.

Zur gleichmäßigen Verteilung der zu übertragenden Last auf mehrere Kontaktflächen sind die lokalen Steifigkeiten und Beanspruchungsrichtungen der Fügepartner aufeinander abzustimmen. Nach dem Konstruktionsprinzip der abgestimmten Verformungen [22] werden die Lastpfade so gestaltet, dass weitgehend gleiche betriebsbedingte elastische Verformungszustände bei beiden Komponenten auftreten.

Die Gestaltung und Auslegung von Kontur- und Profilverbindungen erfolgte mit Hilfe von umfangreichen FE-Berechnungen, wobei die jeweiligen Werkstoffanstressungen mit Hilfe des neuen bruchmodebezogenen Versagenskriteriums nach CUNTZE bewertet wurden. Werkstoffanstressungen und Deformationen für eine zugbelastete Konturverbindung bei einer Pkw-Space-Frame-Komponente sind exemplarisch in Abb. 7.8 angegeben.

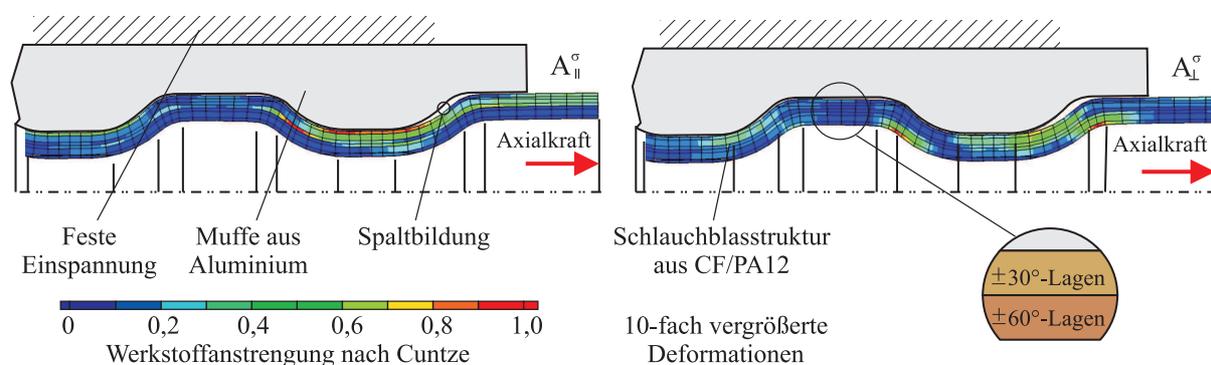


Abb. 7.8: FE-Analyse einer zugbelasteten Konturverbindung: Aufbau der Fügezone und ausgewählte Werkstoffanstressungen nach CUNTZE

7.3 Halbzeugauswahl und Preforming

Beim „Preforming“ werden nach strukturmechanischen und prozesstechnischen Gesichtspunkten geeignete textile Halbzeuge konfektioniert, kombiniert und vorfixiert [21, 26, 52]. Im Schlauchblasprozess werden textile Preformen mit beanspruchungsgerechten Faserorientierungen benötigt, die ein konturgenaues Anschmiegen der Faserlagen an die Oberflächen von Werkzeug und Lasteinleitungselementen gestatten. Eine gute radiale Drapierbarkeit unterstützt dabei die Abformung von Hohlstrukturen mit veränderlichen Querschnitten und Bauteilumfangsmaßen. Bei Bauteilgeometrien, die ein ausgeprägtes Drapieren der textilen Halbzeuge erfordern, können häufig nicht für alle Bereiche der Struktur optimale Faserorientierungen erzielt werden. Daher müssen beim Preform-Design in der Regel geeignete Kompromisse zwischen optimaler Faserorientierung und guter Drapierbarkeit ermittelt werden. Abb. 7.9 zeigt ausgewählte Gestaltungsaspekte für die beim Schlauchblasprozess benötigte Preform.

Für die blastechische Herstellung von quasi nahtlosen Hohlstrukturen (vgl. Abb. 7.9) sind schlauchförmige textile Halbzeuge wie etwa Flecht-, Gewebe- oder Rundgestrickschläuche

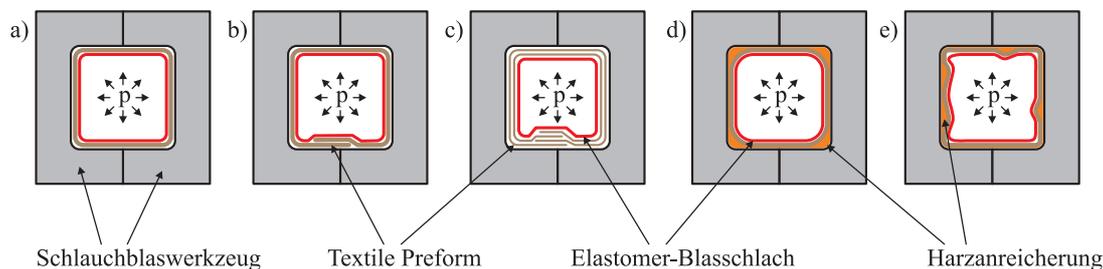


Abb. 7.9: Konzeption von Preformen für den Schlauchblasprozess: a) Nahtlose, schlauchförmige Preform, b) einlagige Preform mit Überlappstoß, c) mehrlagige Preform mit Überlappstoß, d) Harzanreicherungen aufgrund mangelnder Drapierbarkeit, e) Faltenbildung bei zu großer Preform

besonders geeignet (siehe auch Abb. 7.12). Das Rundflechtverfahren dient prinzipiell der Herstellung von Schlauchhalbzeugen mit einer drapierbaren biaxialen Fadenorientierung von etwa $\pm 20^\circ$ bis $\pm 70^\circ$ zur Schlauch-Achse (vgl. Abb. 7.10).

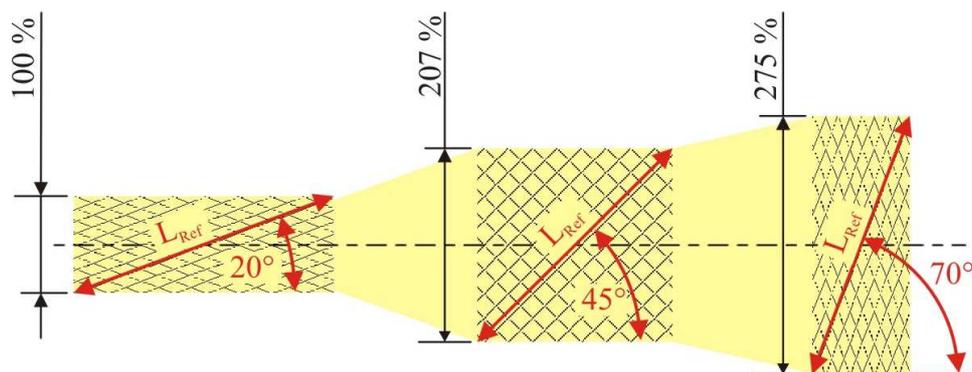


Abb. 7.10: Drapiervermögen eines biaxialen Flechtschlauchs und Einfluss auf den Fadenwinkel

Durch flechttechnische Integration von zusätzlichen axialen Stehfäden können auch triaxiale Schlauchhalbzeuge ($+\alpha, -\alpha, 0^\circ$) hergestellt werden. Diese zusätzlichen 0° -Fäden dienen zur Verstärkung insbesondere biege- und zugbeanspruchter Strukturen. Beim radialen Aufweiten des triaxialen Geflechts werden diese Fäden jedoch axial gestaucht, wodurch die Verstärkungswirkung z. T. wieder eingebüßt wird (Abb. 7.11).

Das axiale Verstärken von Schlauchblasstrukturen kann auch durch spezielle Gewebesläuche mit elastischen Umfangsfäden sowie durch Strickschläuche mit 0° -Verstärkungsfäden und umlaufenden Maschenfäden erzielt werden (vgl. Abb. 7.12 und 7.13, [63, 64]). Der Elastomerefaden bzw. der Maschenfaden dient hierbei zur gleichmäßigen Positionierung der axialen Verstärkungsfäden auf dem Schlauchumfang und ermöglicht eine hohe Drapierflexibilität in radialer Richtung. Gewebesläuche mit zugsteifen Umfangsfäden eignen sich demgegenüber eher für Strukturen mit etwa konstantem Querschnittsverlauf. Der Schlauchdurchmesser muss hierbei relativ genau auf die Bauteilgeometrie abgestimmt

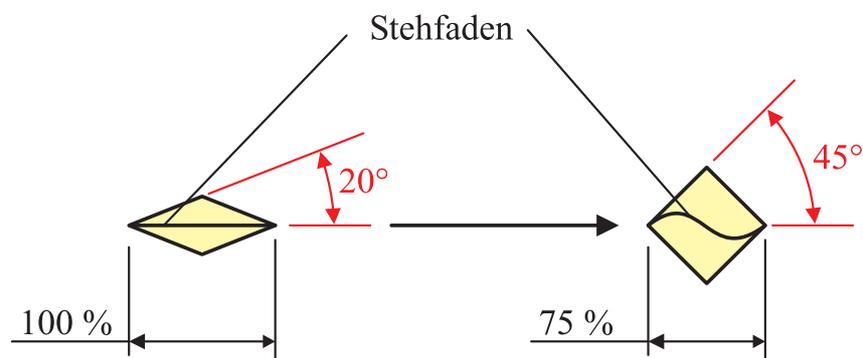


Abb. 7.11: Stauchung der axialen Verstärkungsfäden beim radialen Aufweiten eines triaxialen Geflechts

sein, da es sonst zur Faltenbildung oder zu lokalen Harzanreicherungen in der Struktur kommt (vgl. Abb. 7.9).

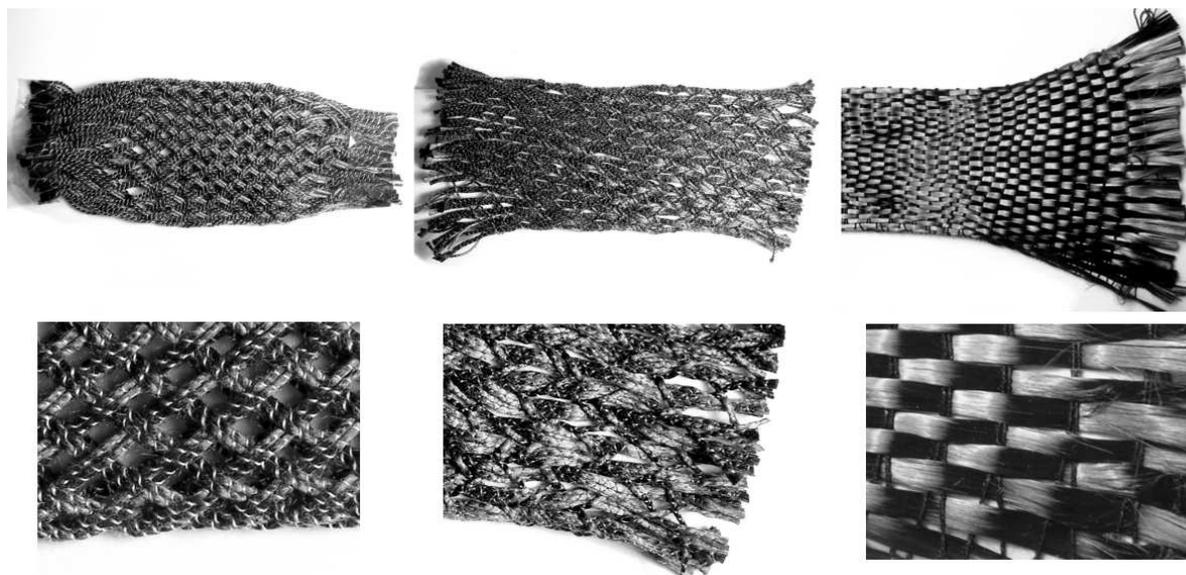


Abb. 7.12: Textile Kohlenstofffaser-Schläuche: Biaxialer und Triaxialer HGTT-Flechtgelauch (CF-PA12), UD-Gewebeschauch mit elastischen Umfangsfäden (von links nach rechts)

Für die Herstellung von Schlauchblasstrukturen eignen sich über die schlauchförmigen Textilien hinaus auch flächige Halbzeuge wie etwa Gewebe, Gelege und Gestricke. Diese Flächengebilde erhalten einen Zuschnitt, der der geometrischen Abwicklung der Hohlstruktur zuzüglich einer Nahtzugabe entspricht. Durch Schichtung unterschiedlicher textiler Halbzeuge sowie durch Variation der Halbzeugausrichtung können auch hiermit weitgehend beanspruchungsgerechte Faserverstärkungen erzeugt werden. Die Nähetechnik bietet dabei die Möglichkeit zur Vorfixierung der Faserlagen sowie zum gezielten Einbringen



Abb. 7.13: Strickschlauch mit UD-Verstärkung (Quelle: ITB, TU Dresden)

von z-Verstärkungen. Diese flächigen Textilhalbzeuge werden anschließend zur textilen Schlauch-Preform gewickelt, wobei sich durch die Nahtzugabe ein längslaufener Überlappstoß bildet (vgl. auch Abb. 7.9). Eine Vorfixierung dieser Preform erfolgt beispielsweise durch Aufschieben der metallischen Lasteinleitungselemente, durch Nähetechnik oder durch Heften, was das Einlegen der Preform in das Formwerkzeug vereinfacht [18, 36, 67].

Für die Herstellung beanspruchungsgerechter flächiger Preformen mit variabel-axialer Faserverstärkung ist darüber hinaus das „Tailored Fibre Placement“ (TFP) [9] prädestiniert. Durch das gezielte nähtechnische Vorfixieren der einzelnen Faserstränge können mit diesem Verfahren komplexe, lokal angepasste Verstärkungen z. B. im Bereich der Fügezonen erzeugt werden.

Bislang kommen hochbelastete textilverstärkte Thermoplaste nur in begrenztem Umfang im Bereich von Sportgeräten, im Luftfahrzeugbau oder in speziellen industriellen Anwendungen zum Einsatz. Daher ist die Auswahl der auf dem Markt verfügbaren Textil-Thermoplast-Halbzeuge noch begrenzt. Für die flechttechnische Verarbeitung geeignete Hybridgarne aus Kohlenstofffasern und Polyamid 12 (CF-PA12) werden beispielsweise von der französischen Firma Schappe Techniques hergestellt und unter dem Markennamen TPFL vertrieben. Ferner bietet die Firma Saint-Gobain-Vetrotex Hybridrovings aus E-Glasfasern und Polypropylen (GF-PP) unter dem Handelsnamen Twintex an, die insbesondere zu flächigen Gewebhalbzeugen verarbeitet werden. In [6, 7] werden erfolgreiche Untersuchungen zur Herstellung von Multiaxialgestrieken aus diesem Hybridmaterial erläutert. Das Angebot an textilen Halbzeugen für die herkömmliche Verarbeitung mit Kunstharzen ist deutlich größer. Hier kann z. B. auf eine breite Palette von Flechtschläuchen oder Gewebeschläuchen mit elastischen Umfangsfäden zurückgegriffen werden [42, 43].

7.4 Herstellung von Demonstratorstrukturen

Die Eignung des Schlauchblasprozesses für die Serienfertigung von Leichtbaustrukturen in Mischbauweise konnte mit der Herstellung einer Getriebewelle als Demonstratorkomponente verdeutlicht werden (Abb. 7.14). Diese Getriebewelle mit metallischen Funktionselementen wurde als HGTT-Hohlstruktur aus hybriden Kohlenstofffaser-Polyamid-12-(CF-PA12-)Flechtschläuchen (Hersteller: Schappe Techniques) konzipiert und im SBI-Verfahren technologisch umgesetzt. Für die ringförmig umschließenden metallischen Lasteinleitungs- und Funktionselemente wurden zwei Kugellager (Stahl), ein Stirnzahnrad (Stahl) und eine Riemenscheibe (Aluminium) ausgewählt.

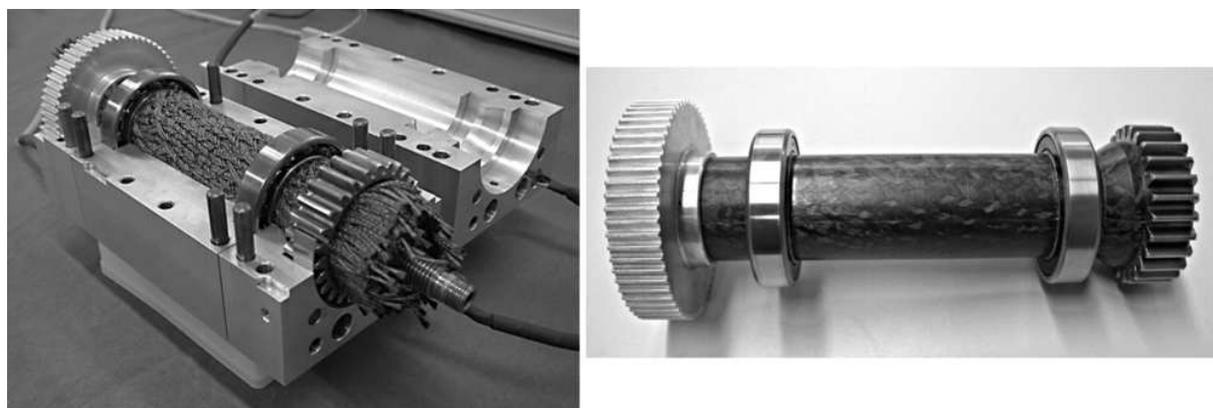


Abb. 7.14: Fertigung einer Getriebewelle aus einem hybriden Flechtschlauch und metallischen Lasteinleitungselementen

Das mehrteilige Schlauchblaswerkzeug mit einer horizontalen und mehreren vertikalen Teilungsebenen wurde aus Aluminium gefertigt. Während die horizontale Teilungsebene das Einlegen von Preform und Lasteinleitungselementen sowie das Entformen der konsolidierten Getriebewelle gewährleistet, dienen die vertikalen Teilungsebenen der einfacheren Herstellung der geometrisch komplexen Negativform. Das Schlauchblaswerkzeug wurde ferner mit zwei Heizparonen und einem Thermoelement für eine definierte Temperaturführung ausgestattet sowie mit speziellen Druckanschlüssen für den Elastomer-Blasschlauch versehen. Die Wellenbohrungen von Zahnrädern und Riemenscheiben wurden für die formschlüssige Übertragung von Drehmomenten sechseckig ausgespart. Die handelsüblichen Wälzlager sind für den SBI-Prozess entfettet worden, da die Verarbeitungstemperatur für PA 12 von etwa 190 °C zur Pyrolyse des Schmierstoffs führen würde.

Orientierende Zugversuche erfolgten an rohrförmigen Probekörperstrukturen aus CF-PA12, die in einem weiteren modularen Schlauchblas-Werkzeug mit metallischen Lasteinleitungselementen hergestellt wurden (Abb. 7.15 a). Die äußeren Anschlussmaße der Metallkomponenten wurden auf verfügbare Prüfkörperaufnahmen abgestimmt (Außendurchmesser 40 mm). Die mittels SBI-Verfahren gefügten Rohrprobekörper wurden aus zwei bzw. drei coaxial ineinander positionierten Flechtschläuchen hergestellt (siehe auch Tab. 7.1). In Abhängigkeit von der verarbeiteten Lagenzahl und der Geometrie der Fügezone wurden

Verbindungsfestigkeiten bis zu 22 kN ermittelt (vgl. Abb. 7.15). Eine weitere Festigkeitssteigerung kann durch zusätzliche aussteifende Faserlagen in den Fügezonen mit Faserorientierungen $> 60^\circ$ und durch angepasste Konturen erreicht werden. Weiterführende technologische und experimentelle Untersuchungen an vergleichbaren Hohlstrukturen in Mischbauweise zeigen, dass mit Hilfe des SBI-Verfahrens eine hohe Reproduzierbarkeit auch bei kurzen Zykluszeiten erzielbar ist.

Tab. 7.1: Spezifikation der geprüften SBI-Probekörper

Halbzeug, Hersteller:	TPFL, Schappe Techniques
Faserverstärkung:	Kohlenstofffaser, 55 % Vol.
Matrix:	Polyamid 12 (PA12)
Textiles Halbzeug:	Triaxialer Flechtschlauch mit 67 % UD-Anteil
Gewicht:	130 g/m
Querschnitt der Probekörper:	Durchmesser $D \approx 40$, Wandstärke $s \approx 1,4$ bzw. $2,1$

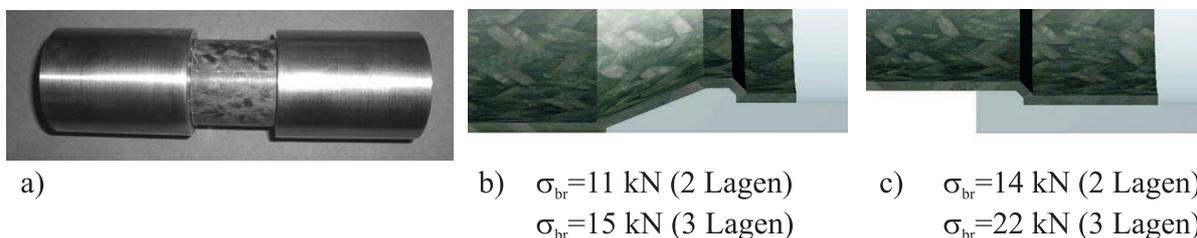


Abb. 7.15: a) Typische Probekörperstruktur für Zugversuche, b) und c) Beispiele von geprüften Konturverbindungen und zugehörige Verbindungsfestigkeiten

8 Integrative Lasteinleitungssysteme für Leichtbau-Aktuatoren

Bei Leichtbau-Hydraulikaktuatoren mit großen Hübten können Gewichtseinsparungen insbesondere durch den Einsatz von kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff für die entsprechend langen Zylinderrohre und Kolbenstangen erzielt werden (vgl. Abb. 8.1, siehe auch Kapitel 9). Neben den hier vorliegenden faserverbundgerechten Zylindergeometrien begünstigen auch die möglichen großflächigen Kräfteinleitungen sowie die langen Lastpfade den Einsatz von CFK. Kolben und Zylinderflansche stellen demgegenüber komplexe Funktionskomponenten dar, bei denen sich der Einsatz metallischer Werkstoffe anbietet. Denn mit Komponenten aus Stahl-, Aluminium- oder Titanlegierungen können auf engem Bau- raum über diverse Funktionsflächen wie etwa Montage-, Gleit- und Dichtflächen hohe konzentrierte Lasten aufgenommen und gleichmäßig in die Verbundstruktur eingeleitet werden.

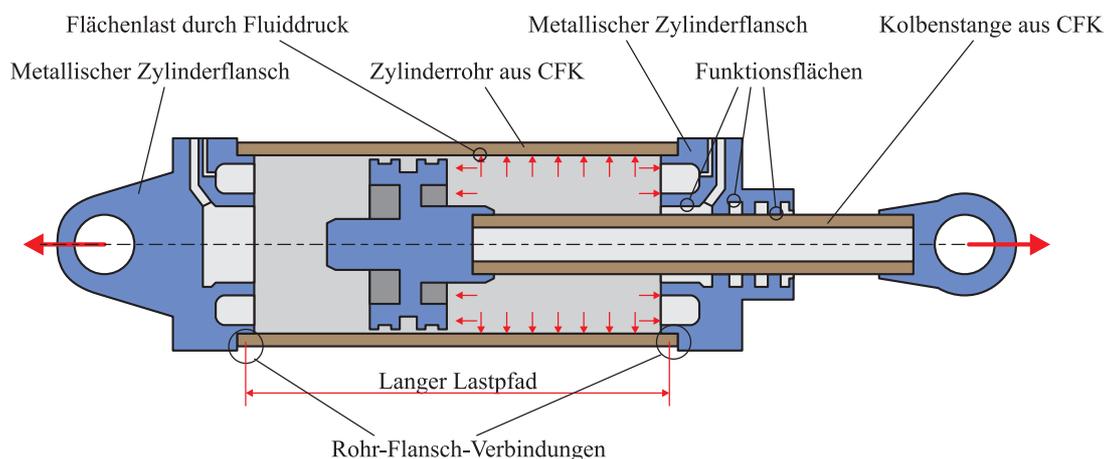


Abb. 8.1: Prinzipdarstellung eines Hydraulikaktuator in Mischbauweise für Leichtbauanwendungen

Im Rahmen einer methodischen Leichtbau-Konstruktion sind für den Hydraulik-Aktuator in Mischbauweise beanspruchungsgerechte Flansch-Verbindungssysteme zu entwerfen, wobei für die Auslegung und Detaillierung der Fügezonen umfangreiche FE-Simulationen erforderlich sind. Zur Vorauslegung der mehrlagigen Rohrstrukturen bietet demgegenüber

die erweiterte Schichtentheorie auf analytischer Basis besondere Vorteile, da die zeitintensive Netzgenerierung entfällt.

8.1 Anwendung der erweiterten Schichtentheorie zur Vorauslegung

Die Berechnungsgrundlage der erweiterten Schichtverbundanalyse bildet das mechanische Strukturverhalten der orthotropen Einzelschicht (etwa in Form der UD-, i-UD bzw. VA-Basisschicht [34]). Der mehrschichtige Faserverbund oder Textilverbund wird daher gedanklich in repräsentative Basisschichten mit ausgezeichneten Materialhauptachsen zerlegt, um hierauf die Grundgleichungen der Mechanik anisotroper Zylinderschalen anzuwenden. Neben dem verallgemeinerten Elastizitätsgesetz für die orthotrope Einzelschicht zählen hierzu die in Zylinderkoordinaten formulierten Gleichgewichtsbedingungen

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{r\varphi}}{\partial \varphi} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\varphi}{r} + F_r &= 0, \\ \frac{\tau_{r\varphi}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{\partial \tau_{\varphi z}}{\partial z} + \frac{2\tau_{r\varphi}}{r} + F_\varphi &= 0, \\ \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{\varphi z}}{\partial \varphi} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\tau_{rz}}{r} + F_z &= 0 \end{aligned} \quad (8.1)$$

mit F_r , F_φ und F_z als Volumenkräfte sowie die kinematischen Beziehungen

$$\varepsilon_r = \frac{\partial u}{\partial r}, \quad \varepsilon_\varphi = \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \varphi} + \frac{u}{r}, \quad \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z}, \quad (8.2)$$

$$\gamma_{\varphi z} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial \varphi}, \quad \gamma_{rz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial r}, \quad \gamma_{r\varphi} = \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial \varphi} + \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v}{r} \quad (8.3)$$

mit u , v und w als Verschiebungen in r -, φ - und z -Richtung.

Basierend auf dem Stoffgesetz für monokline Anisotropie ergeben sich in Zylinderkoordinaten folgende Spannungs-Dehnungs-Beziehungen für die in der Schichtebene verstärkte Einzellage:

$$\begin{pmatrix} \sigma_r \\ \sigma_\varphi \\ \sigma_z \\ \tau_{\varphi z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & C_{24} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & C_{34} \\ C_{14} & C_{24} & C_{34} & C_{44} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \varepsilon_r \\ \varepsilon_\varphi \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{\varphi z} \end{pmatrix} \quad (8.4)$$

$$\begin{pmatrix} \tau_{rz} \\ \tau_{r\varphi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{55} & C_{56} \\ C_{56} & C_{66} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \gamma_{rz} \\ \gamma_{r\varphi} \end{pmatrix} \quad (8.5)$$

mit C_{ij} ($i, j = 1, 2 \dots 6$) als Steifigkeitskomponenten.

Aus den oben angegebenen Grundgleichungen lassen sich für viele technische Problemstellungen bei mehrschichtigen Zylinderverbunden analytische Lösungsansätze entwickeln, wobei grundsätzlich zwischen rotationssymmetrischen und nicht rotationssymmetrischen Belastungen zu unterscheiden ist. Der detaillierte Lösungsweg für die rotationssymmetrischen Belastungsfälle Zug/Druck in Längsrichtung, Torsion, Innen- und Außendruck, Zentrifugalkraft, radialer Wärme und Medientransport sowie für die nicht rotationssymmetrischen Belastungen querkraftfreie und querkraftbehaftete Biegung (durch Einzelkraft, Linien- und Flächenlast) ist in [31] beschrieben.

Bei dem hier betrachteten MSV-Zylinderverbund unter der drehsymmetrischen Belastung „Innenüberdruck“ vereinfachen sich aufgrund von $\frac{\partial}{\partial \varphi}(\dots) \equiv 0$ und der Randbedingungen die problemangepassten Differentialgleichungen, so dass die Spannungen und Verzerungen nur noch von r abhängig sind. Hieraus ergeben sich unter Vernachlässigung von Volumenkräften sowie thermischen und medialen Effekten folgende wesentliche Ausgangsgleichungen [31, 33]:

Gleichgewichtsbedingung

$$\sigma_r'(r) + \frac{\sigma_r(r) - \sigma_\varphi(r)}{r} = 0 \quad (8.6)$$

Kinematische Beziehungen

$$\begin{aligned} \varepsilon_r &= u'(r), & \varepsilon_z &= K_c, \\ \varepsilon_\varphi &= \frac{1}{r}u(r), & \gamma_{\varphi z} &= K_d \cdot r \end{aligned} \quad (8.7)$$

mit K_c als Dehnung in Axialrichtung und K_d als Drillung.

Diese Gleichungen und das Stoffgesetz (8.4) und (8.5) erlauben für eine beliebig orientierte Einzelschicht des Zylinderverbundes die folgende EULERSche Differentialgleichung zu gewinnen

$$\begin{aligned} C_{11} \cdot r^2 \cdot u''(r) + C_{11} \cdot r \cdot u'(r) - C_{22} \cdot u(r) = \\ - (C_{13} - C_{23}) \cdot K_c \cdot r - (2C_{14} - C_{24}) \cdot K_d \cdot r^2. \end{aligned} \quad (8.8)$$

Für die Lösung dieser inhomogenen linearen Differentialgleichung ist zwischen den Strukturfällen $C_{11} \neq C_{22}$ und $C_{11} = C_{22}$ zu unterscheiden. Der letztere Fall kennzeichnet einen Zylinderverbund mit transversaler Isotropie, bei dem die Isotropie in der Querschnittsfläche vorliegt. Ein Beispiel hierfür sind die in Kap. 8.2 beschriebenen rein axial verstärkten Schichten, die der Aufnahme der Hauptzuglasten dienen. Die Lösung der gewöhnlichen Differentialgleichung erlaubt die Funktion $u = u(r)$ zu bestimmen, wobei die darin enthaltenen Integrationskonstanten mit Hilfe der Rand- und Übergangsbedingungen für jede einzelne Schicht des MSV-Zylinders ermittelt werden. Hiermit lassen sich dann die Verzerrungen und mittels des Stoffgesetzes auch die räumlichen Spannungen $\sigma_r, \sigma_\varphi, \sigma_z, \tau_{\varphi z}$ berechnen [31].

Zur Vorauslegung des CFK-Zylinderrohres für den Leichtbau-Aktuator wurde auf Basis der erweiterten Schichtentheorie ein Programmsystem erstellt, das gegenüber FE-Systemen eine schnelle Durchführung von Parameterstudien mehrschichtiger Zylinderschalen gestattet.

Exemplarisch sind für zwei Schichtaufbauten in Abb. 8.2 die Spannungen in Faserrichtung und quer zur Faserrichtung (σ_1 bzw. σ_2) entlang der Wanddicke angegeben. Deutlich zu erkennen sind hier die Spannungsunstetigkeiten an den Schichtgrenzen, deren Höhe durch die Auswahl eines beanspruchungsgerechten Schichtaufbaus stark reduziert werden konnte (Abb. 8.2 rechts). Erst eine derartige iterative Vorgehensweise zur Reduzierung der Spannungsunstetigkeiten erlaubt das Leichtbaupotential optimal für die hier herrschenden Belastungen auszuschöpfen.

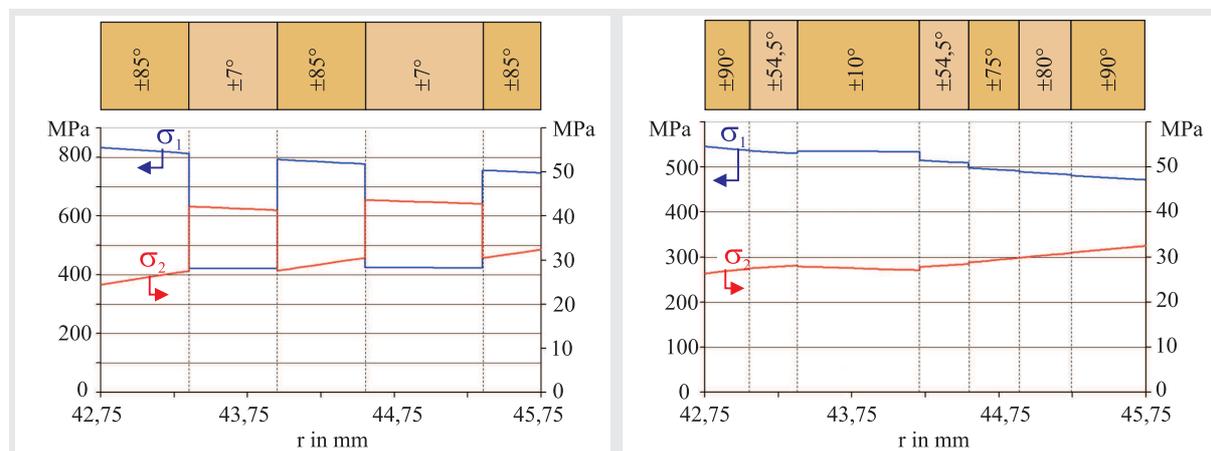


Abb. 8.2: Mittels erweiterter Schichtentheorie ermittelte Spannungen in Faserrichtung σ_1 und quer zur Faserrichtung σ_2 bei innenüberdruckbelasteten Verbundrohren mit unterschiedlichen Schichtaufbauten

8.2 Konzeption formschlüssiger Lasteinleitungen

Die herrschenden hohen Beanspruchungen bei Leichtbau-Aktuatorkomponenten aus Faser-Kunststoff-Verbund (FKV) stellen besondere Anforderungen an die verwendeten Verbindungstechniken, da Lasten typischerweise quer zur Verstärkungsrichtung eingeleitet werden müssen. Daher sind durch eine werkstoffgerechte Gestaltung der Fügezone der vergleichsweise niedrigen Verbundfestigkeit und -steifigkeit quer zur Faserrichtung Rechnung zu tragen, wobei der Einsatz konventioneller Verbindungssysteme hier in der Regel nicht zielführend ist. Die Entwicklung neuer beanspruchungsgerechter formschlüssiger Verbindungen führt bei Leichtbau-Hydraulikaktuatoren zur deutlichen Erhöhung der Verbindungsfestigkeit bei gleichzeitiger Senkung der Herstellungskosten. Dabei bieten spezielle lösbare Verbindungen besondere Vorteile hinsichtlich einfacher Montage- und Wartungsarbeiten.

Bei der Rohr-Flansch-Verbindung führt die axiale Druckkomponente der Hydraulikflüssigkeit im Wesentlichen zu einer Zugbelastung. Für die formschlüssige Einleitung von Zugkräften in zylindrische Faserverbundstrukturen bieten sich vornehmlich Schlaufenverbindungen, Bolzenverbindungen und Konturverbindungen an (Abb. 8.3, siehe auch [22]).

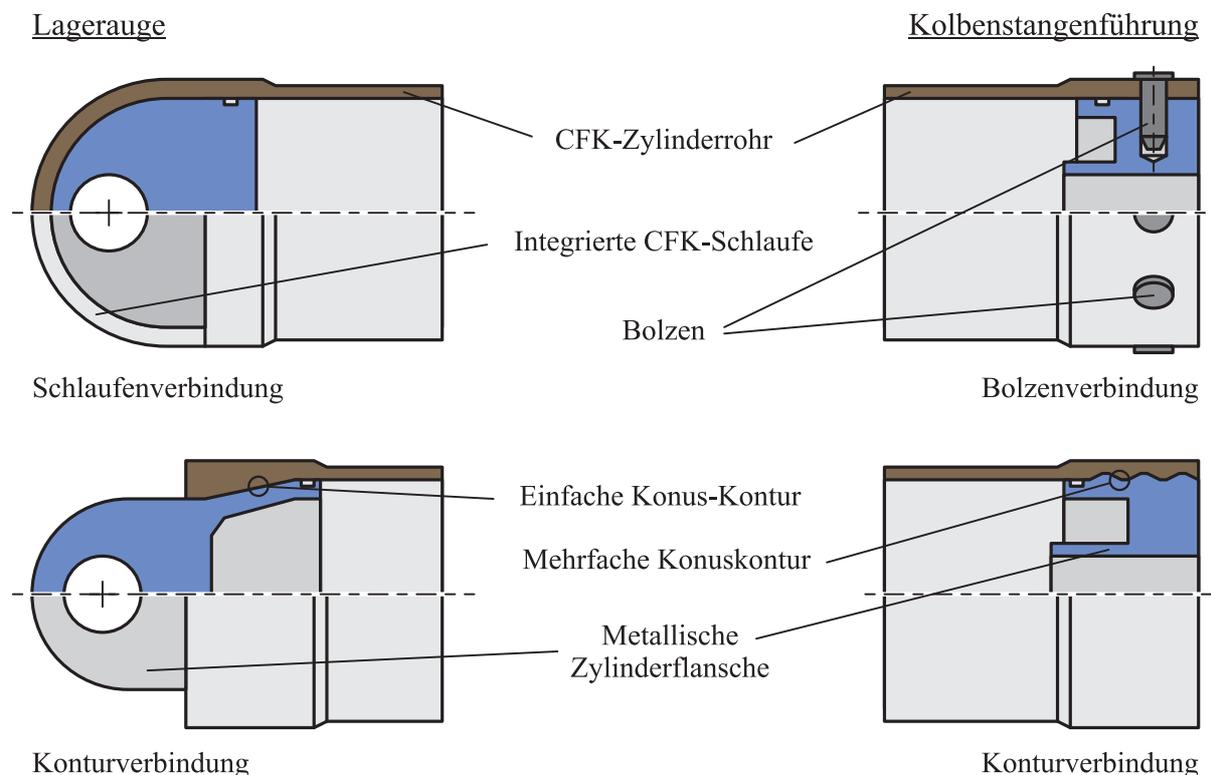


Abb. 8.3: Faserverbundgerechte Entwurfsvarianten für formschlüssige Flanschverbindungen bei Leichtbau-Hydraulikzylindern

Zur wirtschaftlichen Herstellung von hochbeanspruchten zylinderförmigen Faserverbund-

Leichtbaukomponenten ist die Wickeltechnik geradezu prädestiniert. Hierdurch lassen sich FKV-Hohlstrukturen mittels Ablage von harzgetränkten Faserlagen auf einem rotierenden Wickelkern herstellen, wobei die Innenkontur der FKV-Struktur eine weitgehend genaue negative Abformung der Wickelkernoberfläche darstellt. Diese Abformung erlaubt darüber hinaus auch die fertigungstechnische Integration von Lasteinleitungsstrukturen, wie etwa von speziellen umlaufenden Konturen oder Schlaufensystemen für faserverbundgerechte, formschlüssige Verbindungen. Während wickeltechnisch integrierte Schlaufen das kraftflussgerechte Umschließen von Befestigungsäugen ermöglichen (vgl. auch Kap. 3.4), erlauben hochfeste Gewindekontur-Verbindungen eine besonders einfache Montage von Flanschkomponenten (vgl. Abb. 8.3). Gegenüber den Bolzenverbindungen ergeben sich bei Kontur- und Schlaufenverbindungen deutlich niedrigere Kerbspannungsüberhöhungen.

Der prinzipielle Aufbau einer Konturverbindung ist in Abb. 8.4 dargestellt, wobei je nach Aufgabenstellung unterschiedliche Gestaltvarianten zum Einsatz kommen. Zur Übertragung der hohen Axiallasten ist technologisch sicherzustellen, dass sich die axial orientierten Fasern an die Wellkontur anschmiegen. Bei der Übertragung von axialen Kräften führt die flache Wellkontur in der Fügezone durch Flankenpressungen zu einer erheblichen tangentialen Belastung der CFK-Struktur. Da die Festigkeit der axialen Faserlagen allerdings in tangentialer Richtung geringe Werte aufweist, ist die Fügezone durch zusätzliche Umfangswicklungen zu stützen.

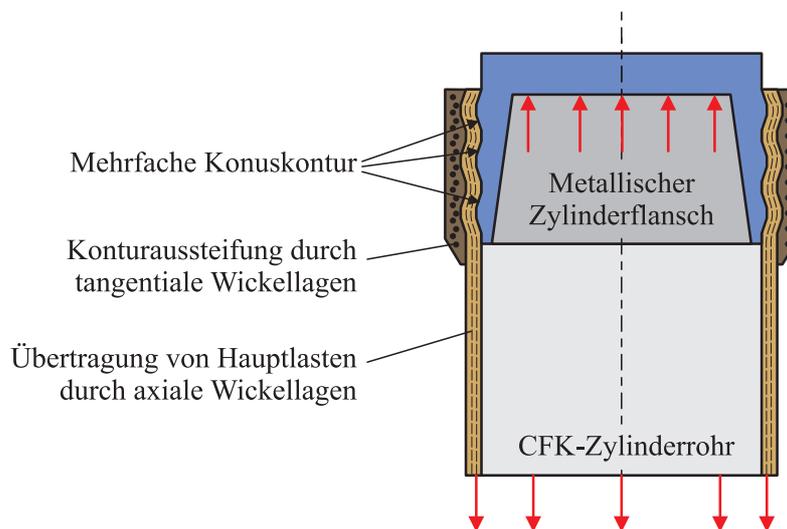


Abb. 8.4: Prinzipdarstellung einer Wellkonturverbindung mit axialen und tangentialen Wickellagen zur Übertragung hoher Axiallasten

Durch die Verwendung wickeltechnisch integrierter Gewindekonturen können metallische Lasteinleitungselemente lösbar mit der FKV-Struktur gefügt werden. Dieses am ILK entwickelte und patentierte [72] hochfeste Lasteinleitungssystem ermöglicht neben der Herstellung besonders leichter Hydraulikaktuatoren z. B. auch die Gewichtsreduzierung bei steifen Space-Frame-Strukturen und Papierwalzen.

8.3 Gestaltung und Auslegung von fasergerechten Rohrgewinden

Wesentliche Geometrieparameter des CFK-Rohrgewindes sowie Art und Anordnung der Faserverstärkung im Bereich der Fügezone ergeben sich sowohl nach fertigungstechnischen als auch nach strukturmechanischen Gesichtspunkten. Um eine preiswerte spanende Formgebung von Wickelkernen und metallischen Lasteinleitungselementen zu gewährleisten, werden Gewindedurchmesser sowie Gewindekontur und -steigung zunächst als konstant vorgegeben. Für die Entformung des Wickelkerns nach der Konsolidierung wird der Kerndurchmesser des Gewindes geringfügig größer gewählt als der Innendurchmesser der rein zylindrischen Bauteilsektion. Zur optimalen Ausnutzung der Tragfähigkeit von mehrschichtigen Zylinderstrukturen ist eine besonders gleichmäßige Verteilung der zu übertragenden Last auf alle Gewindegänge zwingend erforderlich. Dafür sind die lokalen Steifigkeiten und Beanspruchungsrichtungen der Fügepartner aufeinander abzustimmen. Nach dem Konstruktionsprinzip der abgestimmten Verformungen werden die Lastpfade daher so gestaltet, dass weitgehend gleiche betriebsbedingte elastische Verformungszustände bei beiden Komponenten auftreten. Dazu sind in Abb. 8.5 für die Konturverbindung eine ungünstige und eine beanspruchungsgerechte Ausführung exemplarisch dargestellt.

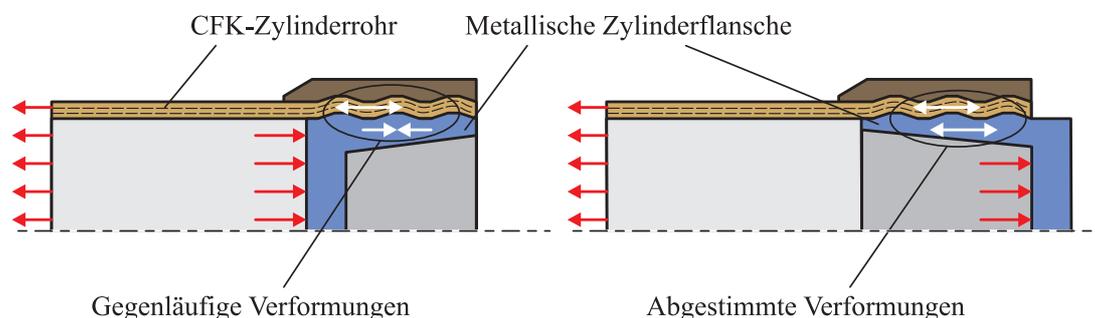


Abb. 8.5: Konturverbindungen mit ungünstigen gegenläufigen Verformungen (links) und mit günstigen abgestimmten Verformungen (rechts)

Bei den Konturverbindungen sind in Analogie zu geschäfteten Klebverbindungen kontinuierliche Übergänge der Bauteilsteifigkeiten anzustreben, wobei metallische Komponenten häufig zu steif und Faserverbundstrukturen zu nachgiebig ausfallen. Bei metallischen Komponenten kann der bauteilspezifische Steifigkeitsverlauf grundsätzlich durch Anpassung der Wandstärke eingestellt werden. Da mit solchen Wandstärkenreduzierungen insbesondere bei Stahlwerkstoffen jedoch schnell fertigungstechnische Grenzen erreicht werden, kommen hier Titan- oder Aluminiumlegierungen aufgrund der niedrigeren E-Moduli vorteilhaft zum Einsatz. Während im Wickelprozess eine Schichtdickenveränderung bei den bauteilsteifigkeitsbestimmenden axialen Faserlagen kaum möglich ist, kann durch eine geeignete Kombination etwa von axialen und tangentialen Faserlagen der Bauteilsteifigkeitsverlauf abgestimmt werden (Abb. 8.6). Darüber hinaus kann bei der CFK-Komponente die Bauteilsteifigkeit durch eine Variation der Gewindeparametern wie etwa Gewinde-

steigung und Flankenwinkel sowie durch Einsatz von hochmoduligen Fasern angepasst werden.

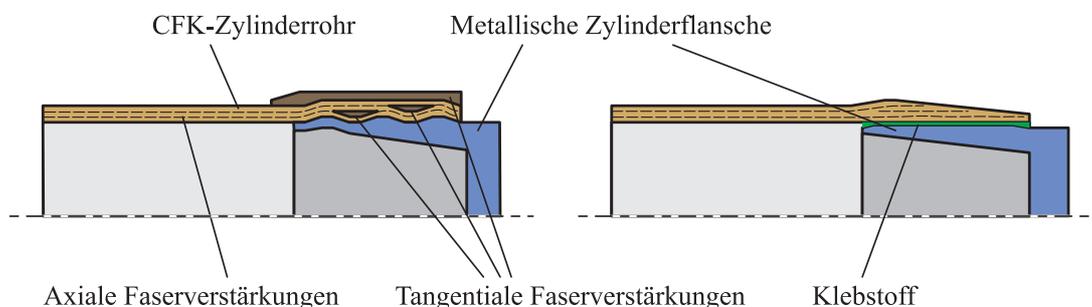


Abb. 8.6: Maßnahmen für kontinuierliche Übergänge der Bauteilsteifigkeiten bei einer Konturverbindung (links) und einer Klebverbindung (rechts)

Eine weitere Methode zur Gewährleistung einer gleichmäßigen Lastverteilung auf die vorhandenen Gewindegänge ist die Abstimmung der unter Last deformierten Kontaktgeometrien. Bei gleichen Gewindesteigungen besteht oft das Problem, dass im belasteten Zustand die zugbelastete Faserverbundkomponente aufgrund ihrer höheren axialen Nachgiebigkeit eine größere Gewindesteigung als die weniger deformierte metallische Struktur aufweist. Durch eine geringfügige Vergrößerung der Gewindesteigung des metallischen Bauteils kann demgegenüber eine übereinstimmende Gewindesteigung unter Last und damit eine sehr gleichmäßige Lastverteilung auf die Gewindegänge erreicht werden. Damit sich die Aktuatorbaugruppe im unbelasteten Zustand montieren lässt, wird lediglich die Gewindesteigung auf der lasttragenden Seite der Gewindegänge vergrößert. Dadurch ergibt sich zwischen Faserverbund- und Metallkomponente ein Spaltmaß s das im unbelasteten Zustand mit der Koordinate x linear steigt und bei Nennlast zu Null wird (siehe Abb. 8.7). Mit Hilfe von FE-Simulationen konnten die besonders gleichmäßigen Lastverteilungen bei derartigen kombinierten Gewindesteigungen bestätigt werden. Aufgrund des hierfür notwendigen hohen Fertigungsaufwands werden in dieser Arbeit jedoch Gewindegeometrien mit einheitlicher Steigung fokussiert.

Bei der Gestaltung von geeigneten Gewindeprofilen, sind insbesondere die Gestaltungsrichtlinien „werkstoff-, fertigungs-, beanspruchungs-, ausdehnungs- und toleranzgerecht“ zu berücksichtigen [30, 50]. Dazu wurden zunächst drei verschiedene Gewindeprofile mit übereinstimmender Steigung $P = 10$ mm, Gewindetiefe $t = 2$ mm und Kerndurchmesser $D = 86,5$ mm näher untersucht (Abb. 8.8). Bei rein metallischen Spindel-Mutter-Kombinationen haben sich Trapezgewinde für die Übertragung hoher Lasten bewährt. Bei wickeltechnisch hergestellten Verbundstrukturen bietet sich auch das deutlich werkstoff- und fertigungsgerechtere Rundgewinde für die Lastübertragung an. Darüber hinaus wird in diesem Zusammenhang auch ein Rund-Trapez-Gewinde als Gestaltkombination der klassischen Gewindeprofile untersucht.

Die für die Auslegung benötigten FE-Modelle beschreiben eine CFK-Zylinderrohr mit ausgebildeten Gewindegängen und dem zugehörigen metallischen Gewindeflansch, wobei

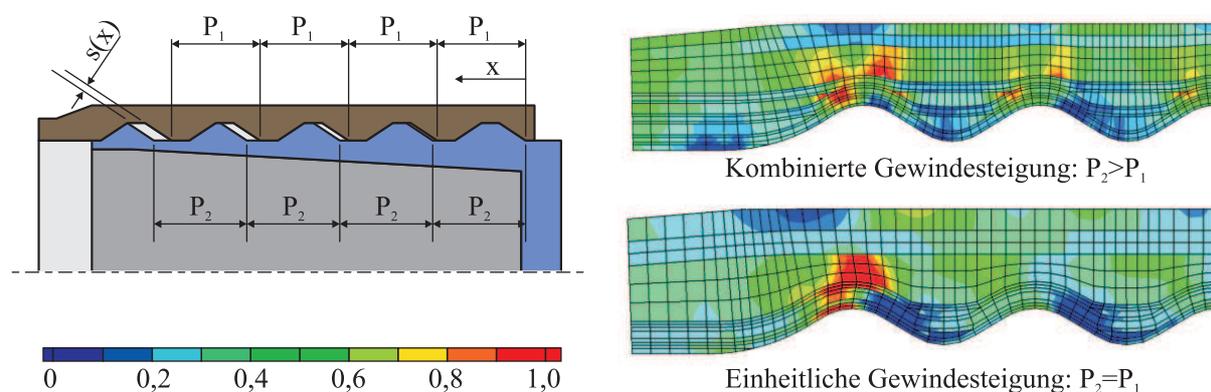


Abb. 8.7: Schraubverbindung mit kombinierter Gewindesteigung: Gewindegeometrien mit $s(x) = k \cdot x$ (links) und Werkstoffanstrengung nach CUNTZE für ZFB infolge Zugbelastung bei kombinierter und einheitlicher Gewindesteigung (rechts)

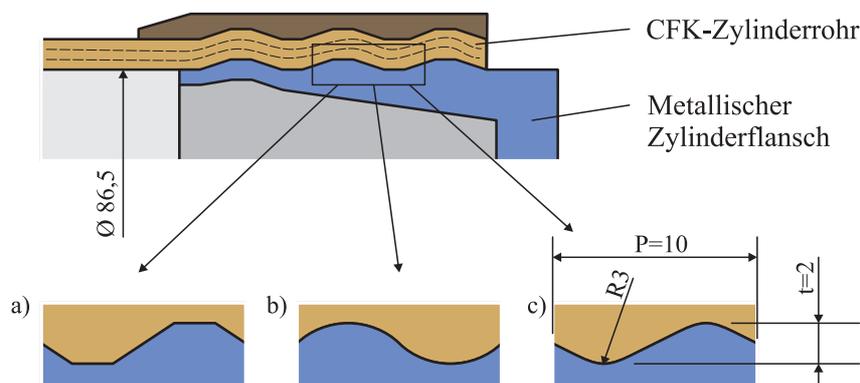


Abb. 8.8: Untersuchte Gewindequerschnitte a) Trapezgewinde, b) Rundgewinde, c) Rund-Trapezgewinde

die Komponenten durch geeignete Kontaktelemente gekoppelt sind. Als Lastrandbedingung ist der Hydraulikdruck in Höhe von 310 bar vorgegeben. Bei der Entwicklung eines beanspruchungsgerechten Laminataufbaus werden neben den wickeltechnischen Restriktionen insbesondere die unterschiedlichen mechanischen Lasten im zylindrischen Bereich und dem Gewindebereich berücksichtigt. Zwei modellierte CFK-Laminataufbauten sind in Abb. 8.9 exemplarisch dargestellt, wobei sich der Schichtaufbau 2 $[90/\pm 10/90/\pm 54,5/\pm 10/\pm 54,5/90]$ mit den dargestellten Schichtdickenverläufen als vorteilhaft erweist. Die Lagen mit dem Verstärkungswinkel von $\pm 10^\circ$ (2, 4) und $\pm 54,5^\circ$ (3) werden im Gewindebereich fortgesetzt und mit zusätzlichen tangentialen Wicklungen (5) im Gewindegrund angeschmiegt und verdichtet. In diesem Bereich entfallen die innen liegenden 90° -Lagen (6), da sie hier keinen wesentlichen Beitrag zur Übertragung der Hauptlasten in axialer Richtung leisten würden. Hingegen werden die außen liegenden 90° -Lagen (1) im Gewindebereich verstärkt, um die durch Flankenpressung induzierten hohen tangentialen Kräfte aufzunehmen. Zur Kompensation von lokalen Biegeeffekten im äußeren Bereich

dieser Bandage werden hier beim Schichtaufbau 2 weitere $\pm 10^\circ$ -Lagen (2) eingeführt. Als Referenz für vergleichende Untersuchung und zur Bewertung der Gewindeprofile dient der Schichtaufbau 1.

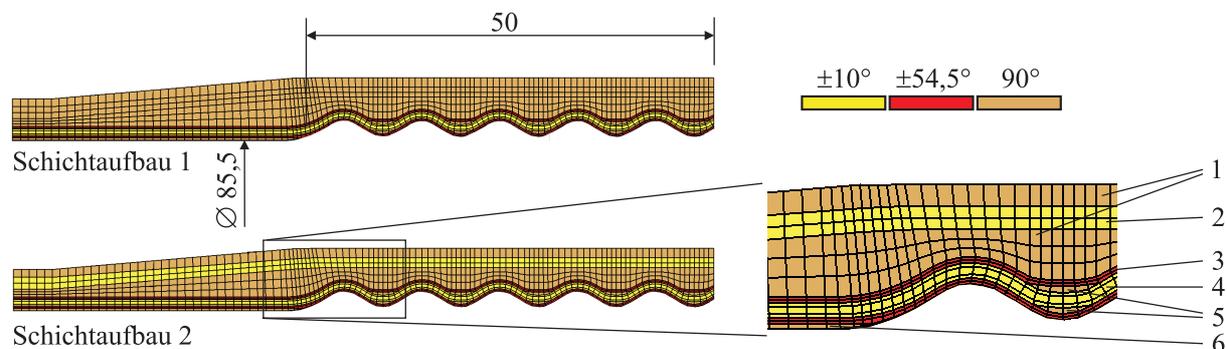


Abb. 8.9: Exemplarische Schichtaufbauten in der Fügezone mit Rund-Trapez-Gewinde

Die durch FE-Berechnungen ermittelten Flächenpressungen im Gewindebereich sind für das Trapez- und das Rund-Trapez-Gewinde in Abb. 8.10 exemplarisch dargestellt. Beim Trapezgewinde sowie beim Rundgewinde ergeben sich infolge betriebsbedingter Deformationen und den daraus resultierenden ungünstigen Linienkontakten zwischen Metall- und CFK-Komponente hohe umlaufende Flächenpressungen. Aufgrund der geringeren und gleichmäßigeren Flächenpressung beim Rund-Trapezgewinde (Abb. 8.10 links) sowie der hier vorliegenden faserverbundgerechteren Geometrie wurde diese Variante für die weiteren Betrachtungen sowie die technologische Umsetzung ausgewählt.

Rund-Trapez-Gewinde

Trapezgewinde

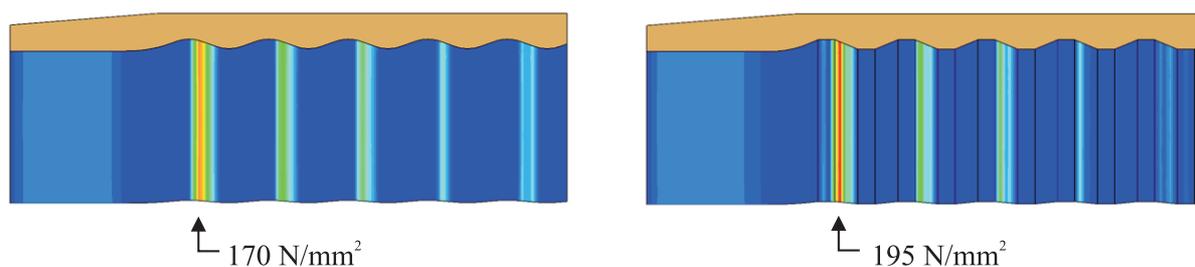


Abb. 8.10: Vergleich der Flächenpressungen zwischen Trapezgewinde und Rund-Trapez-Gewinde für den Schichtaufbau 1

Die Auslegung des Rund-Trapez-Gewindes erfolgte auf Basis umfangreicher nichtlinearer FE-Berechnungen, wobei die bruchmodebezogenen Werkstoffanstressungen nach CUNTZE mit Hilfe einer am ILK implementierten Subroutine zur Bewertung räumlicher 3D-Spannungszustände ermittelt wurden (siehe auch Kap. 4.3). Die Anstrengung A_{\parallel}^{σ} , die aus der Beanspruchung einer unidirektional verstärkten Einzelschicht in Bezug auf Faserbruch unter Zugbeanspruchung resultiert, erreicht beim Schichtaufbau 1 im Bereich des ersten Gewindeganges den maximalen Wert von 0,45 für die innen liegende $+10^\circ$ -Lage und nimmt in den folgenden Gewindegängen kontinuierlich ab.

Die Anstrengung A_{\parallel}^{τ} als Beanspruchungsmaß bei Druckbelastung in Faserrichtung weist an den druckbelasteten Flanken erhöhte Werte auf, die mit $A_{\parallel}^{\tau} = 0,176$ aber im unkritischen Bereich liegen. In Bezug auf ZFB infolge Zugbelastung ist beim Schichtaufbau 1 in einem großen Bereich der äußeren Tangentialwicklungen eine kritische Werkstoffbeanspruchung mit $A_{\perp}^{\sigma} \geq 1$ zu erkennen (siehe Abb. 8.11). Die hierfür verantwortlichen Spannungsüberhöhungen sind in der lokalen Aufweitung der CFK Struktur und den damit verbundenen Biegeeffekten begründet. Durch die zusätzliche $\pm 10^{\circ}$ -Lage können diese Biegeeffekte beim Schichtaufbau 2 deutlich reduziert werden. Die innen liegenden $\pm 54,5^{\circ}$ -Lagen weisen insbesondere auf der druckbelasteten Gewindeflanke im ersten Gewindegang hohe Druckspannungen senkrecht zur Faserrichtung auf, wobei die zugehörigen Anstrengungen A_{\perp}^{σ} auf einem noch unkritischen Niveau liegen. Die lokal sehr hohen Schubspannungen in den inneren $\pm 10^{\circ}$ -Lagen mit einer Werkstoffanstrengung von $A_{\perp\parallel} \geq 1$ im ersten Gewindegang ist auf lokale Biegeeffekte und die hiermit einhergehenden Schubspannungen τ_{31} zurückzuführen.

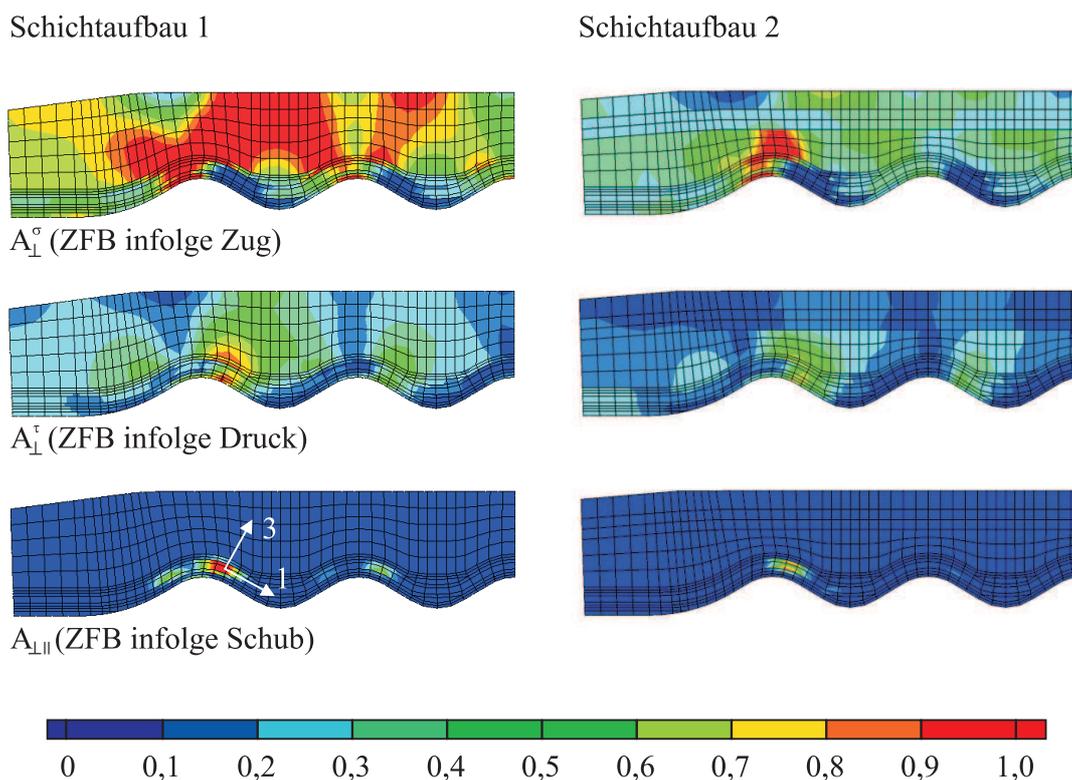


Abb. 8.11: Werkstoffanstrengungen für die Zwischenfaserbruch-Moden beim Rund-Trapez-Gewinde

Eine weitere Reduzierung der hohen versagenskritischen Werkstoffanstrengungen quer zur Faserrichtung in den äußeren Tangentialwicklungen konnte für das gewählte Gewindeprofil durch eine beanspruchungsgerechte Anpassung des Schichtaufbaus und der Verringerung der Wandstärke des metallischen Flansches im Bereich der ersten Gewindegänge erreicht werden.

8.4 Fertigung und Prüfung von Prototypen

Für die wickeltechnische Fertigung von prototypischen Rohrstrukturen (Abb. 8.12) mit beidseitigem integrativen Gewinde wurde ein spezieller mehrteiliger Wickelkern konstruiert und hergestellt, der sowohl die definierte Ablage der erforderlichen Faserlagen mit Hilfe einer 5-Achsen-Wickelmaschine als auch eine schrittweise Entformung der konsolidierten CFK-Struktur erlaubt. Die Simulation des Wickelprozesses mit Hilfe des „Computer Aided Manufacturing“- (CAM-) Softwaresystems CADWind ermöglichte im Vorfeld der Fertigung die Abstimmung wickeltechnisch realisierbarer Fadenwinkel hinsichtlich des vorausberechneten Schichtaufbaus (vgl. auch Abb. 8.13). Auf Basis der Simulationsergebnisse wurde anschließend ein CNC-Programm für die Steuerung des Wickelprozesses erstellt.

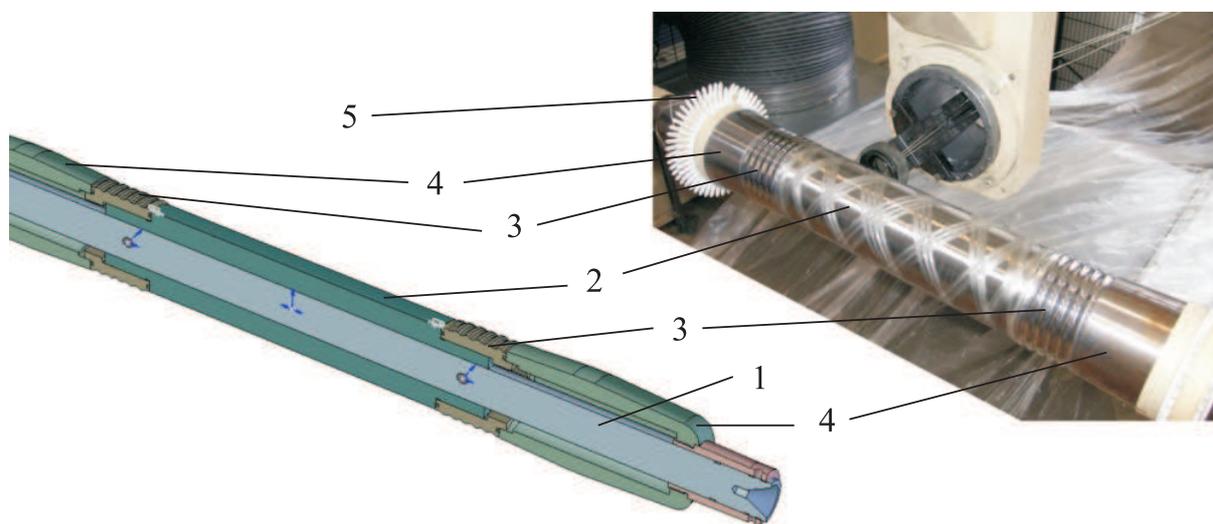


Abb. 8.12: Wickeltechnische Fertigung einer prototypischen Zylinderstruktur mit integrativen Gewinden zur Einleitung hoher Axiallasten

Nach der Konsolidierung der Faserverbundstruktur wird der Wickelkern für die Entformung schrittweise demontiert. Während das rein zylindrische Basissegment (2) bei der Entformung der CFK-Struktur fest mit der Achse (1) verstiftet bleibt, werden die Kapfen (4) mit den Faserführungshilfen (5) sowie die Gewindesegmente (3) nacheinander entfernt. Eine wickeltechnisch gefertigte prototypische CFK-Zylinderstruktur mit integrativen Rohrgewinden ist in Abb. 8.14 dargestellt.

Zur Verifikation der rechnerischen Auslegung des Lasteinleitungssystems wurden zahlreiche statische Belastungsversuche durchgeführt. Dafür sind spezielle metallische Flanschkomponenten in die Rohrenden eingeschraubt worden, die eine Verbindung mit verfügbaren Prüfkörperaufnahmen ermöglichen. Die experimentell ermittelten Zuglasten für das Erstschichtversagen im Bereich von 180 kN sowie die zugehörigen Schadensbilder bestätigen eindrucksvoll die erzielten Simulationsergebnisse (vgl. auch Abb. 8.11). Die in Abb.

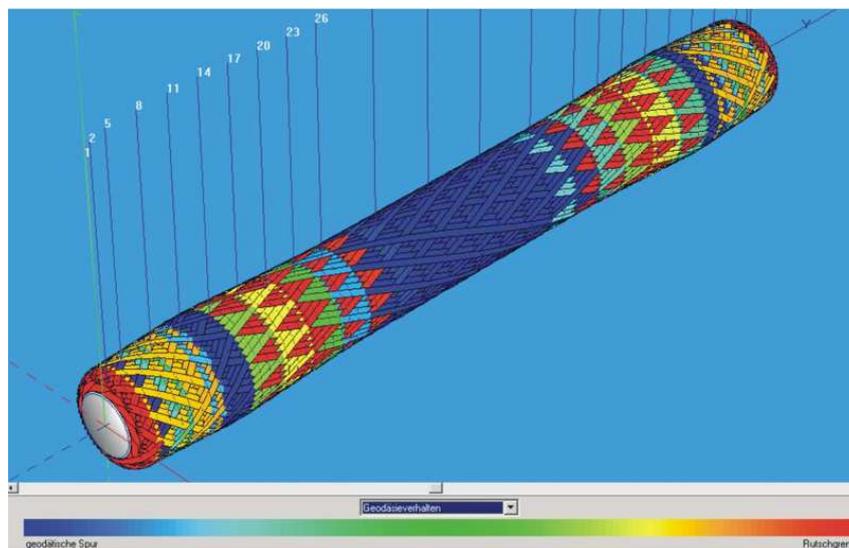


Abb. 8.13: Analyse der unerwünschten Abgleiteneffekte bei einer $\pm 10^\circ$ Lage

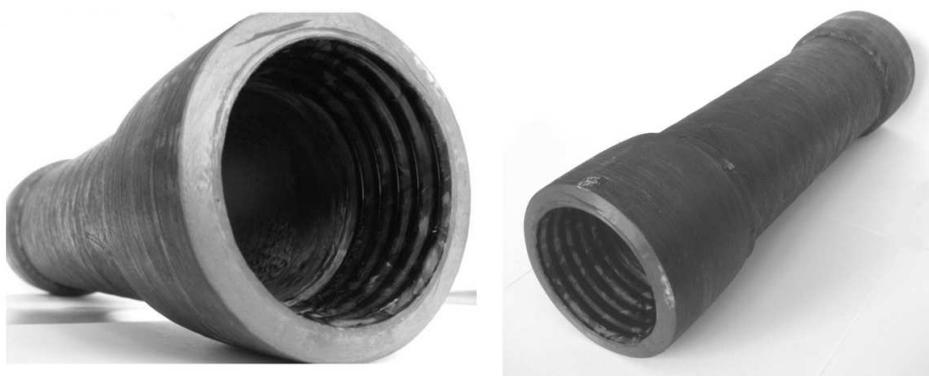


Abb. 8.14: Prototypische Rohrstruktur aus CFK mit integrativen Rohrgewinden

8.15) gekennzeichneten Zwischenfaserbrüche stimmen mit den theoretisch ermittelten Bruchverläufen sehr gut überein.

8.5 Mischbauweise mit Gewindekontur- und Schlaufenverbindung

Die kombinierte Verwendung von integrativen Gewinde- und Schlaufenverbindungen für die formschlüssige Aufnahme der Flanschbauteile ermöglicht ein besonders niedriges Bauteilgewicht und eine einfache Montierbarkeit des Aktuators (Abb. 8.16). Die bei Zugbelastung des Hydraulikantriebs und vor allem beim Anfahren der äußeren Endlage des

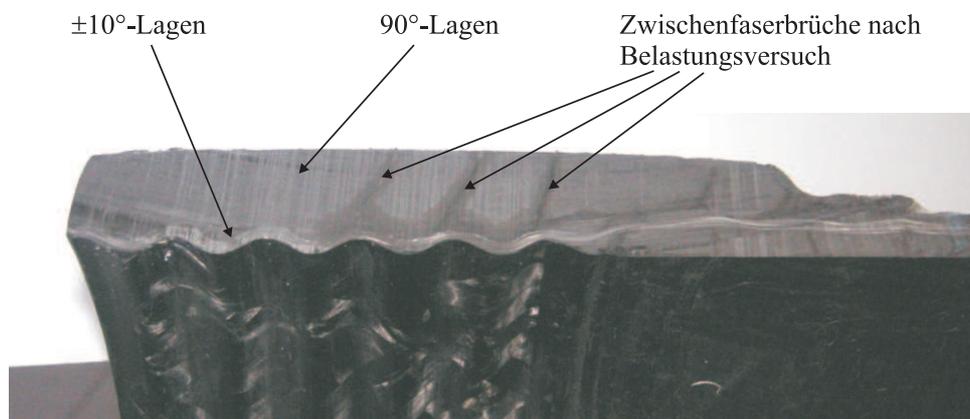


Abb. 8.15: Schadensbild des CFK-Zylinders im Gewindebereich (Längsschnitt)

Kolbens auftretenden hohen Axialkräfte zwischen den Zylinderflanschen (2, 3) werden im Wesentlichen durch weitgehend axial orientierten Faserlagen (6) übertragen (vgl. Abb. 8.16). Diese Faserstränge sind im Bereich des Rohrgewindes auf den Umfang der Rohrstruktur verteilt und schmiegen sich dort an die Gewindekontur an. Im rein zylindrischen Bereich des Faserverbundbauteils (1) werden diese axialen Verstärkungsfasern zu einer faserverbundgerechten Schlaufenstruktur zusammengeführt. Auch für die endkonturnahe Fertigung einer derartigen Gewinde/Schlaufen-Faserverbundstruktur ist die Wickeltechnik bestens prädestiniert. Das Entformen des konsolidierten Bauteils wird durch einen komplexen mehrteiligen Wickelkern (7-13) ermöglicht (Abb. 8.17).

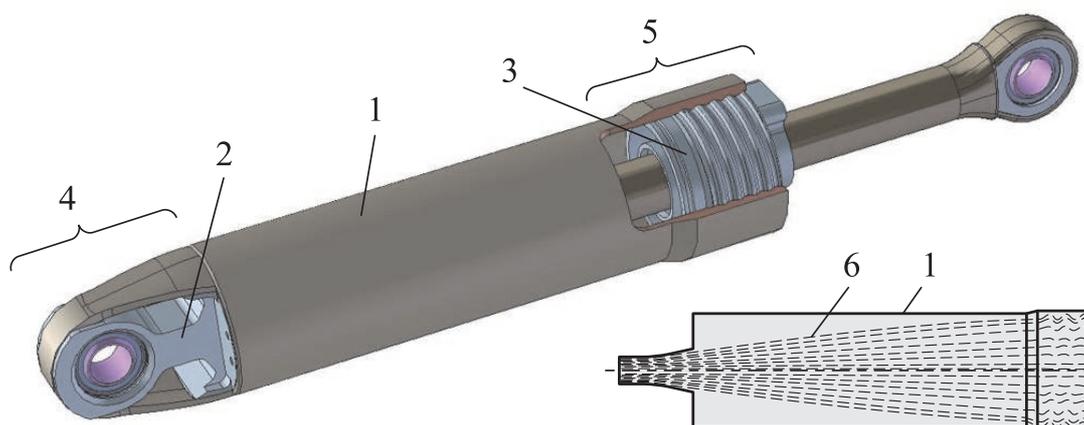


Abb. 8.16: Leichtbau-Hydraulikaktuator in Mischbauweise mit integrativer Gewindekontur- und Schlaufenverbindung sowie Faseranordnung zur Übertragung der Axialkräfte

Diese integrierende Bauweise erlaubt eine schnelle Montage und eine kostengünstige Wartung der Aktuatorbaugruppe (vgl. Abb. 8.17 unten). Dabei wird das schlaufenseitige Lasteinleitungselement (2) gewindeseitig in das Faserverbundzylinderrohr eingeführt, durch das Zylinderrohr in seine Endlage geschoben und dort mit Hilfe von Montageelementen

(14, 15) fixiert. Anschließend kann eine vormontierte Einheit aus Kolben, Kolbenstange und metallischem Flanschbauteil (3) in das Zylinderrohr eingeführt werden. Das Flanschbauteil (3) wird schließlich durch Einschrauben formschlüssig mit dem Zylinderrohr (1) verbunden.

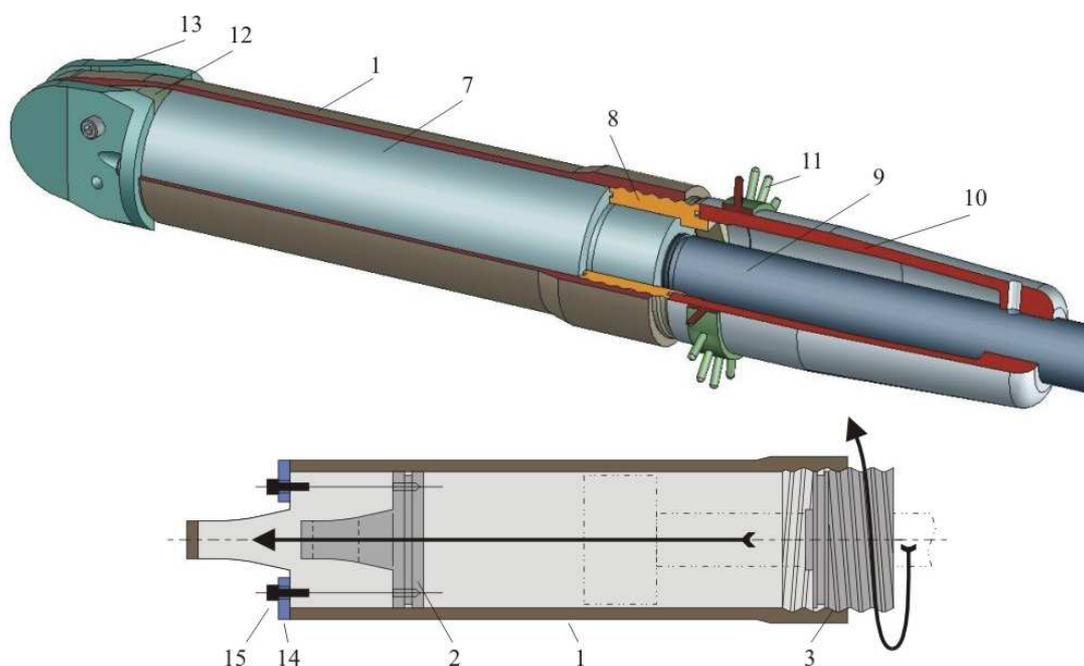


Abb. 8.17: Mehrteiliger Wickelkern für die Fertigung einer CFK-Zylinderstruktur mit integrativer Gewinde- und Schlaufenstruktur sowie schematische Darstellung des Montagevorgangs

Eine Weiterentwicklung des Leichtbau-Aktuators mit dem Ziel einer noch höheren Werkstoff- und Bauraumausnutzung ist in Abb. 8.18 als CAD-Entwurf dargestellt. Die Doppelschlaufenstruktur erlaubt hierbei gemäß dem Prinzip der definierten Lastverzweigung, die hohen Axialkräfte gleichmäßiger auf den Umfang des Zylinderrohrs zu verteilen. Der benötigte Drosselventilblock kann bei dieser Ausführung mittig zwischen den Schlaufen-sektionen angeordnet werden, womit die Schlauchführung vereinfacht wird.

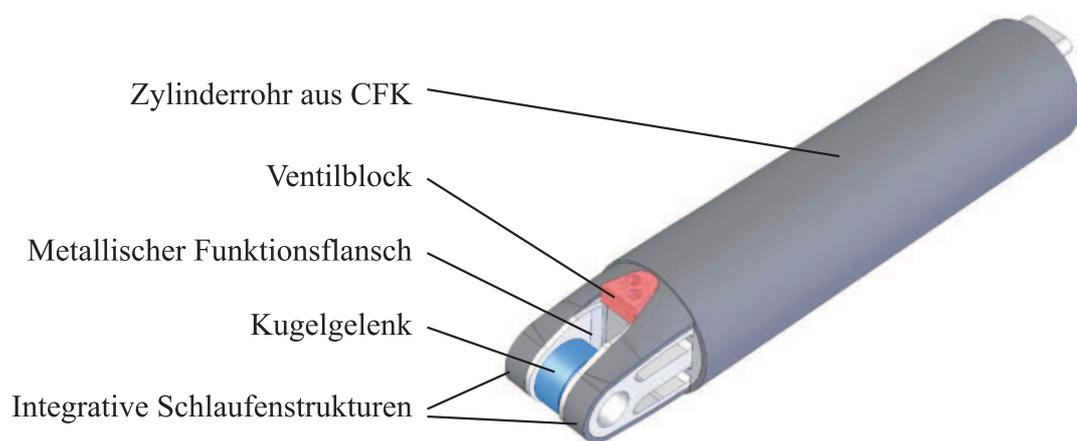


Abb. 8.18: Hochfeste Flanschverbindung mit vierfacher Lastverzweigung durch eine Doppelschlaufenstruktur

9 Lasteinleitungen für hochbeanspruchte Faserverbund-Kolbenstangen

Bei Leichtbau-Hydraulikaktuatoren mit größeren Arbeitshüben bieten sich neben den Zylinderrohren (vgl. Kapitel 8) insbesondere Kolbenstangen für den Einsatz von CFK an. Die hier betrachteten Kolbenstangen übertragen die Arbeitskräfte vom Kolben des Aktuators zu einer äußeren Montageschnittstelle wie etwa Gewindeanschluss oder Kugelgelenk. Die Arbeitskräfte des Zylinders führen hauptsächlich zu einer Zug- bzw. Druckbelastung der Stangenstruktur, wobei in Abhängigkeit der Einbaubedingungen des Aktuators gegebenenfalls auch Biegebelastungen zu berücksichtigen sind. Hohe Biegesteifigkeiten der Stangenstruktur dienen ferner der Stabilität gegenüber Knicken, was im Wesentlichen durch axial orientierte hochfeste und hochsteife Kohlenstofffasern zu gewährleisten ist. An den Enden werden darüber hinaus metallische Funktionselemente für die Montage und die Einleitung der hohen äußeren Lasten benötigt, wobei aufgrund des vergleichsweise geringeren Stangendurchmessers hier die Lasten sehr konzentriert in die Faserverbundstruktur einzuleiten sind. Zumindest eine der Montageschnittstellen ist dabei derart auszuführen, dass eine Montage mit dem kolbenstangenseitigen Zylinderflansch ermöglicht wird.

9.1 Entwurf fasergerechter Lasteinleitungen

Als strukturelle Basis einer beanspruchungsgerecht gestalteten Faserverbund-Kolbenstange eignet sich eine im Wesentlichen axial endlosfaserverstärkte Rohrstruktur, die eine werkstoffgerechte Aufnahme der auftretenden Zug-, Druck- und Biegebelastungen gestattet. Ein verbreitetes Fertigungsverfahren für unidirektional verstärkte Faserverbundrohre ist die Duroplastpultrusion. Mit Hilfe des Pultrusionsverfahrens können zwar sehr maßhaltige, hochwertige CFK-Rohre hergestellt werden, die konzentrierte Einleitung hoher Zuglasten ist hier allerdings sehr schwierig (vgl. Kapitel 3.5). Die Wickeltechnik ermöglicht prinzipiell bei Verwendung geeigneter Wickelkerne die Herstellung von Rohrstrukturen mit axialen Faserlagen. Hierzu ist für die radiale Verdichtung jedoch das Aufbringen weiterer Faserlagen etwa mit tangentialer Komponente notwendig. Auf sehr schlanken Wickelkernen sind gleichmäßige Wandstärken jedoch kaum zu gewährleisten, da sich die axialen Fasern leicht in Umfangsrichtung verschieben.

Für die Herstellung maßhaltiger, UD-verstärkter Kolbenstangenkomponenten eignet sich vielmehr ein Pressverfahren, mit dem eine Querverdichtung vorpositionierter axialer Faserlagen durchgeführt werden kann. Die presstechnische Formgebung besitzt ferner den Vorteil, dass geeignete Anschlussgeometrien wie etwa umlaufende Wellenkonturen oder Schlaufen für die formschlüssige Einleitung hoher Lasten relativ einfach abgeformt werden können. Abb. 9.1 zeigt den prinzipiellen Aufbau ausgewählter Lasteinleitungssysteme für hochbeanspruchte Faserverbund-Kolbenstangen.

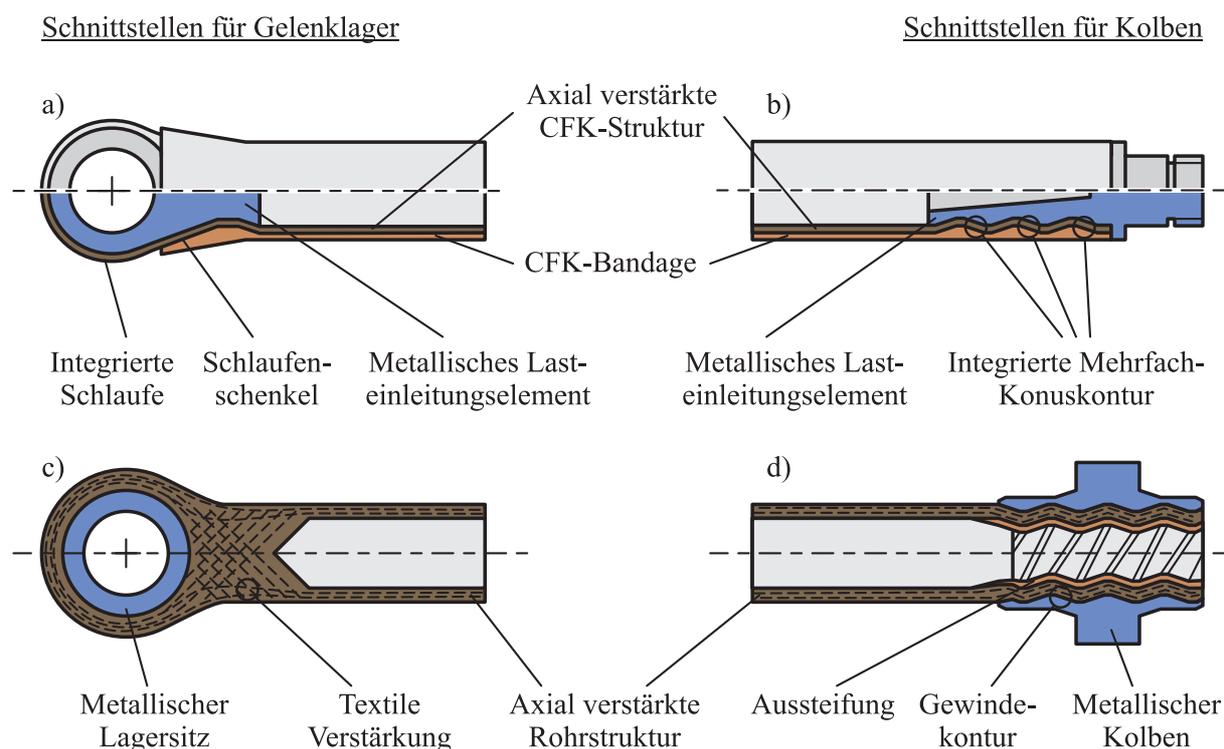


Abb. 9.1: Faserverbundgerechte Gestaltentwürfe für formschlüssige Lasteinleitungen bei Kolbenstangen in Mischbauweise

Die in Abb. 9.1 rechts dargestellten Konturverbindungen zeigen Montageschnittstellen, die ein Einführen der Kolbenstange in den kolbenstangenseitigen Zylinderflansch ermöglichen, da in diesem Bereich der Stangendurchmesser nicht überschritten wird. Die links dargestellten Schlaufenstrukturen sind für die Aufnahme von Gelenklagern prädestiniert.

Mit Hilfe der in Abb. 9.1 a dargestellten Schlaufenverbindungen können sehr hohe Zugkräfte in die Stangenstruktur eingeleitet werden, während die Druckkräfte durch eine Keilkontur übertragbar sind. Über die keilförmigen Kontaktflächen zwischen dem Lasteinleitungselement und den Schlaufenschenkeln werden dabei die Druckkräfte formschlüssig in die Stangenstruktur eingeleitet. Für die Befestigung des Kolbens bietet in diesem Zusammenhang eine innere Konturverbindung Vorteile, da sich die axialen Verstärkungsfasern aus dem Schlaufenbereich am kolbenseitigen Ende an das wellenförmige Lasteinleitungselement anschmiegen können (Abb. 9.1 b). Die etwa wickeltechnisch aufgebrachtene $\pm 45^\circ$ -

und 90°-Faserlagen dienen im Bereich der Fügezonen als Bandage und im freien Stangenbereich sowohl dem Schutz des empfindlichen UD-Verbundes als auch der Aufnahme von Querkräften und hydraulischen Drucklasten.

Für die beanspruchungsgerechte Verstärkungen des Lasteinleitungsbereichs eignen sich ferner angepasste textile Preformen, die sich etwa im „Tailored Fibre Placement“-Verfahren herstellen lassen (Abb. 9.1 c). Analog zum Leichtbau-Hydraulikzylinder und zur textilverstärkten Hohlstruktur können auch durch das Anformen eines Faserverbundgewindes hohe axiale Kräfte aufgenommen werden, wobei eine zusätzliche innere Aussteifung der Fügezone erforderlich ist (Abb. 9.1 d).

9.2 Dimensionierung neuartiger CFK-Kolbenstangen

Die Hauptabmessungen der betrachteten Kolbenstange sowie die Anschlussgeometrien werden im Rahmen der Aktuatorkonstruktion u. a. in Abhängigkeit geforderter Hübe, Kräfte und Einbaubedingungen bestimmt. Während im vorliegenden Fall diese Größen durch ein vorgegebenes Referenzsystem festgelegt sind, richten sich die maßgeblichen Gestaltparameter der Kontur- und der Schlaufenverbindung sowie Art und Anordnung der Faserverstärkung nach fertigungstechnischen und strukturmechanischen Gesichtspunkten.

Im Hinblick auf eine effiziente presstechnische Fertigung wird für die axial faserverstärkte Basiskomponente eine zweischalige Bauweise vorgesehen. Der über die Länge dieser Struktur nahezu konstante Querschnittsflächeninhalt erlaubt die Verarbeitung durchlaufender Faserstränge. Eine derartige Bauweise ermöglicht die formschlüssige Aufnahme der Lasteinleitungselemente beim Fügen zweier Schalenstrukturen und gewährleistet somit einen kurzen und direkten Kraftfluss. Ein detaillierter Entwurf der Kolbenstange und der dafür benötigten halbschalenförmigen Basiskomponente ist in Abb. 9.2 dargestellt.

Bei ersten prototypischen Kolbenstangen erfolgt die Kolbenbefestigung mittels einer Rundkonturverbindung und einem relativ kurzen und steifen Lasteinleitungselement, wobei FE-Simulationen und Belastungsversuche hohe Spannungskonzentrationen im Bereich des ersten Wellenkonturelements ergeben haben. Die notwendige Optimierung dieser Konturverbindung erfolgte insbesondere unter Berücksichtigung des Prinzips der abgestimmten Verformungen, da hier die Betriebslasten möglichst gleichmäßig auf mehrere Kontaktflächen zu verteilen sind (vgl. auch CFK-Gewinde, Kapitel 8.3). Die dafür notwendige Abstimmung der lokalen Bauteilsteifigkeiten erfolgte sowohl durch eine gezielte Wandstärkenreduzierung im Bereich der metallischen Komponente als auch durch Ermittlung einer geeigneten Konturgeometrie. Zur detaillierten Gestaltung und Dimensionierung der Konturverbindung kommen umfassende Finite-Elemente(FE-)Berechnungen in Kombination mit dem neuen physikalisch begründeten Versagenskriterium nach CUNTZE zum Einsatz (vgl. auch Kapitel 4.3). Für die Konturverbindungen erweisen sich mehrfache Rund-Trapez-Geometrien mit relativ flachen Flankenwinkeln (ca. 12° bis 15° zur Mittelachse) als

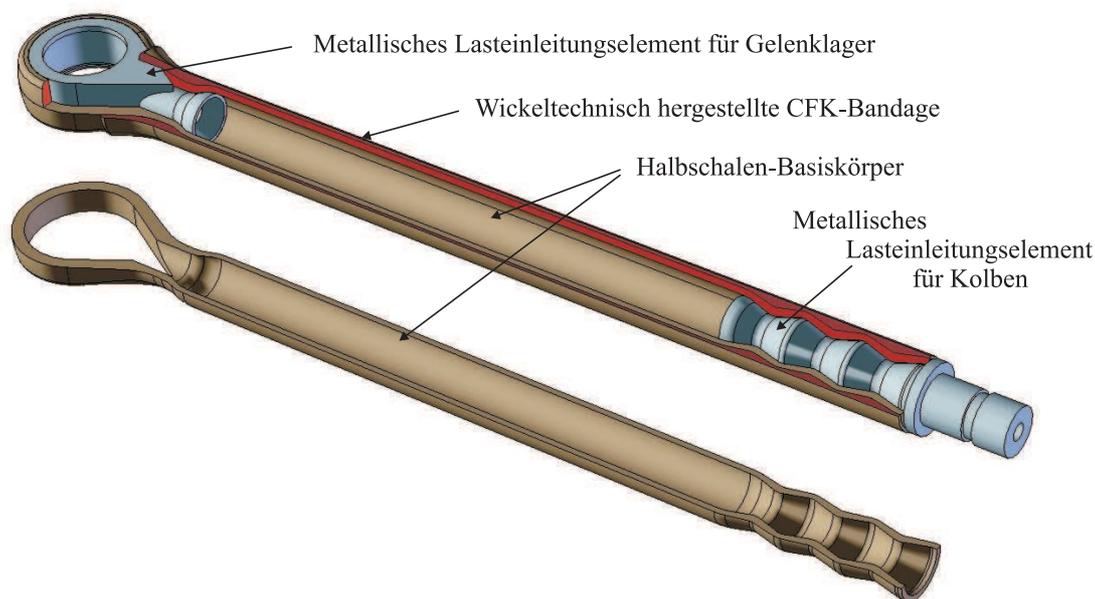


Abb. 9.2: Entwurf einer Leichtbau-Kolbenstange in Mischbauweise mit integrierter Schlaufenstruktur und optimierter Rund-Trapez-Konturverbindung

besonders vorteilhaft, da sie aufgrund der hohen verbleibenden axialen Bauteilsteifigkeit im Fügebereich auf günstige Lastverteilungen führen.

Bei der Schlaufenverbindung wird durch große Radien und stetige Querschnittsverläufe der kraftflussgerechte Übergang vom Rohrquerschnitt zum Schlaufenbereich sichergestellt. Die faserverbundgerechte, etwa „tropfenförmig“ gestaltete Schlaufe schließt das metallische Lastenleitungselement formschlüssig ein und nimmt über große Kontaktflächen sowohl Zug- als auch Druckkräfte auf. Ein Aufspalten der Verbund-Kolbenstange infolge der Keilwirkung bei Druckbelastung ist mit Hilfe der wickeltechnisch aufgetragenen CFK-Tangentialbandage zu verhindern. Die bislang untersuchten Prototypen wurden mit etwa rechteckigen Schlaufenquerschnitten ausgeführt. Umfangreiche FE-Berechnungen und die ermittelten experimentellen Ergebnisse führten dagegen auf eine optimierte Gestalt mit verrundetem Schlaufenquerschnitt, der eine wirkungsvolle fasergerechte Bandagierung gestattet. Im Rahmen der Optimierung ermittelte Werkstoffbeanspruchungen und Verschiebungen im Schlaufenbereich sind exemplarisch in Abb. 9.3 dargestellt.

Eine optionale zusätzliche stoffschlüssige Verbindung zwischen den Lastenleitungselementen und der Faserverbund-Struktur kann klebtechnisch erzielt werden, wobei durch eine elastische Klebschicht Formabweichungen der Fügepartner infolge thermischer und betriebsbedingter elastischer Dehnungen auszugleichen sind.

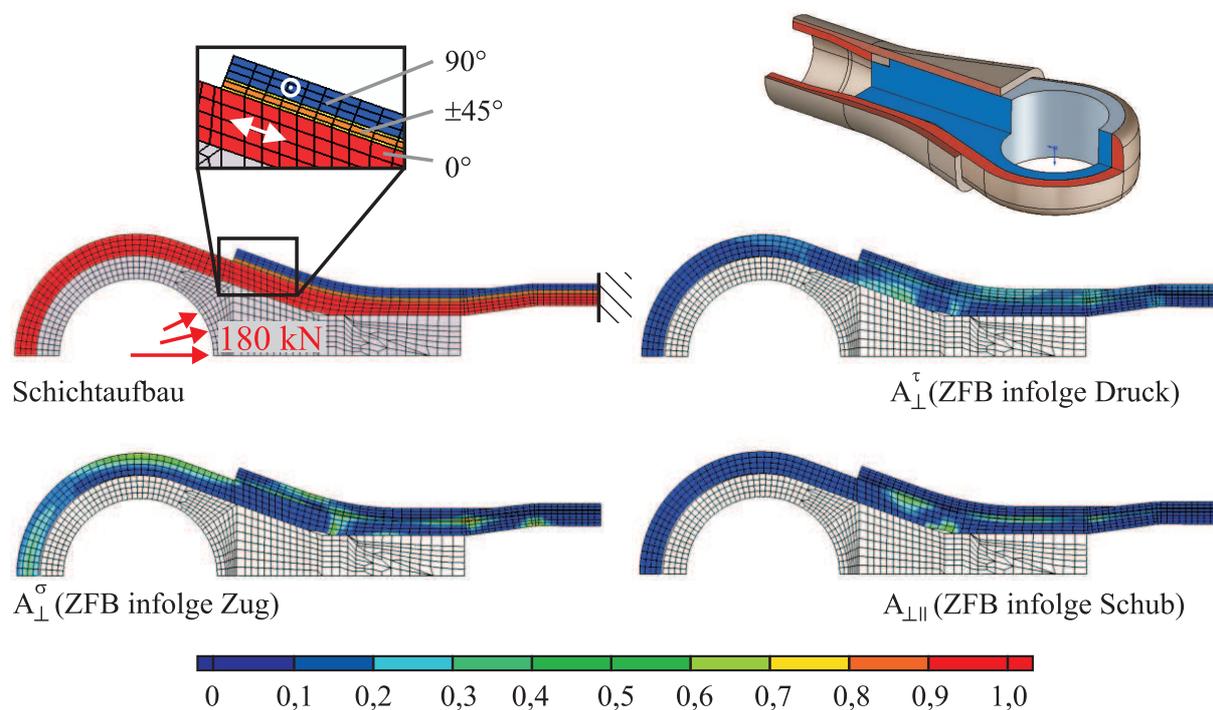


Abb. 9.3: Optimierung des FKV-Schlaufenbereichs: CAD-Modell, Schichtaufbau und Werkstoffanstrengung nach CUNTZE für ZFB

9.3 Technologische Umsetzung und Erprobung

Die reproduzierbare Fertigung von prototypischen Faserverbund-Kolbenstangen mit integrierten Schlaufen- und Konturverbindungssystemen erfolgt in vier Arbeitsschritten. Durch die presstechnische Verdichtung wickeltechnisch vorpositionierter, harzgetränkter Faserstränge entstehen halbschalenförmige Basiskomponenten mit integrierten Kontur- und Schlaufengeometrien (Abb. 9.4). Dabei wird ein ausreichender Bewegungsraum für das Fadenauge einer Wickelanlage durch anfängliches Entfernen der Werkzeugmodule mit Tauchkante (4) gewährleistet. Nach der seitlichen Zufuhr dieser Tauchkantenmodule erfolgt die presstechnische Verdichtung des Verbundwerkstoffs durch den oberen Formstempel (5). Während der Verdichtung wird überschüssiges Harz durch Spalte aus der Formkavität heraus gepresst. Dieses Verfahren erlaubt die Herstellung hochwertiger axial verstärkter Verbundkomponenten mit Faservolumengehalten von über 65 %. Während erste Prototypen mit Rund-Konturverbindungen gefertigt wurden, konnten durch eine anschließende Änderung des Werkzeugs auch Basiskomponenten mit optimierter Rund-Trapez-Kontur realisiert werden. Die Verstärkung dieser Komponenten erfolgte mit besonders steifen und festen Kohlenstofffasern des Typs Torayca M40J ($E_{F||} = 377 \text{ GPa}$, $R_{F||} = 4000 \text{ MPa}$).

Die halbschalenförmigen Basisstrukturen (6) wurden paarweise klebtechnisch zu einer

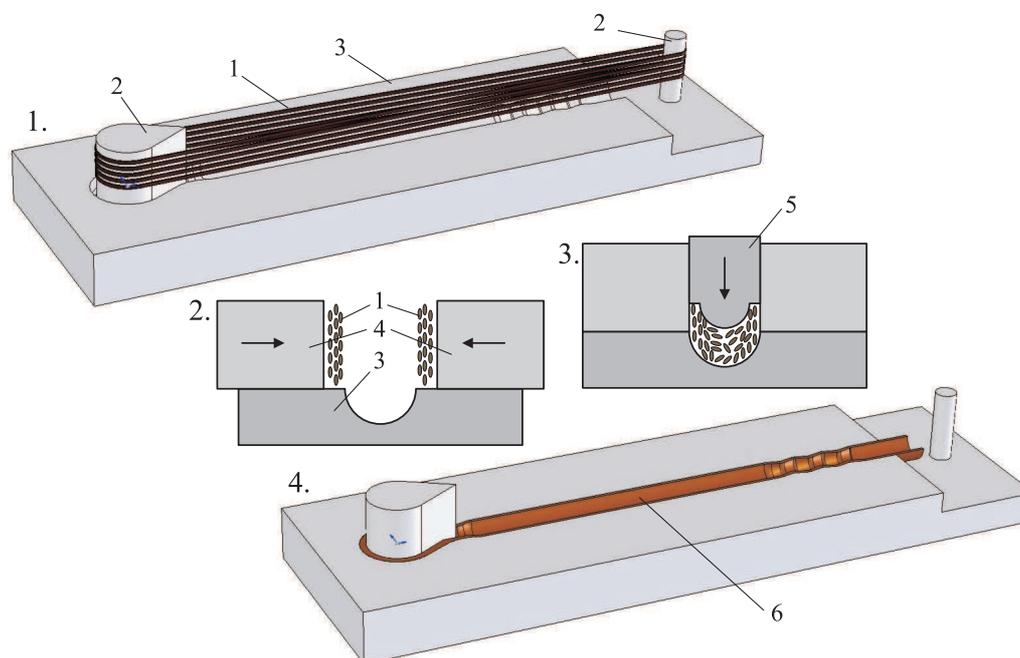


Abb. 9.4: Schematische Darstellung der presstechnischen Fertigung von halbschalenförmigen CFK-Basisstrukturen für Leichtbau-Kolbenstangen

Rohrstruktur gefügt, wobei die metallischen Lasteinleitungselemente (115CrV3 , $R_m = 750\text{ MPa}$) formschlüssig aufgenommen wurden. Durch einen Wickelprozess sind im Weiteren die axial verstärkten Rohrstrukturen mit 90° - und $\pm 45^\circ$ -Lagen bandagiert worden. Für erste Prototypen mit Rund-Konturverbindung (vgl. Abb. 9.5 B) wurden dabei Fasern des Typs Tenax HTS 5631 ($E_{F\parallel} = 240\text{ GPa}$, $R_{F\parallel} = 4000\text{ MPa}$) verarbeitet. Für weitere Prototypen mit Rund-Trapez-Konturverbindung (vgl. Abb. 9.5 D) kamen die steiferen M40J-Fasern zum Einsatz. Die Herstellung einer präzisen zylindrischen Funktionsfläche erfolgte durch spitzenloses Außenrunds Schleifen. Die für Gleit- und Dichtaufgaben erforderliche verschleißfeste Oberfläche wird durch metallisches Beschichten bzw. durch kleb- oder presstechnisches Fügen eines Liners aus höherfesten Stahlwerkstoffen gewährleistet.

Die zur Verifikation der rechnerischen Auslegung durchgeführten statischen und dynamischen Belastungsversuche und die dabei erzielten Bruchlasten sind in Tabelle 9.1 zusammengefasst. Die geprüften Lasteinleitungssysteme und zugehörige Bruchbilder sind ferner in Abb. 9.5 und 9.6 dargestellt. Erste prototypische Kolbenstangen mit Schlaufenstruktur (A) und Rund-Konturverbindung (B) wurden mit statischen Zug- und Druckkräften beaufschlagt, wobei für beide Belastungen ähnliche Versagensbilder im Bereich der Rund-Konturverbindung (II) beobachtet und etwa gleiche Bruchlasten von etwa 140 kN ermittelt wurden (Versuchsreihen 1 und 2).

Um die Lasten des Kolbens gleichmäßiger einzuleiten, wurden weitere prototypische Kolbenstangen mit einer optimierten Rund-Trapez-Konturverbindung (D) ausgeführt (Abb.

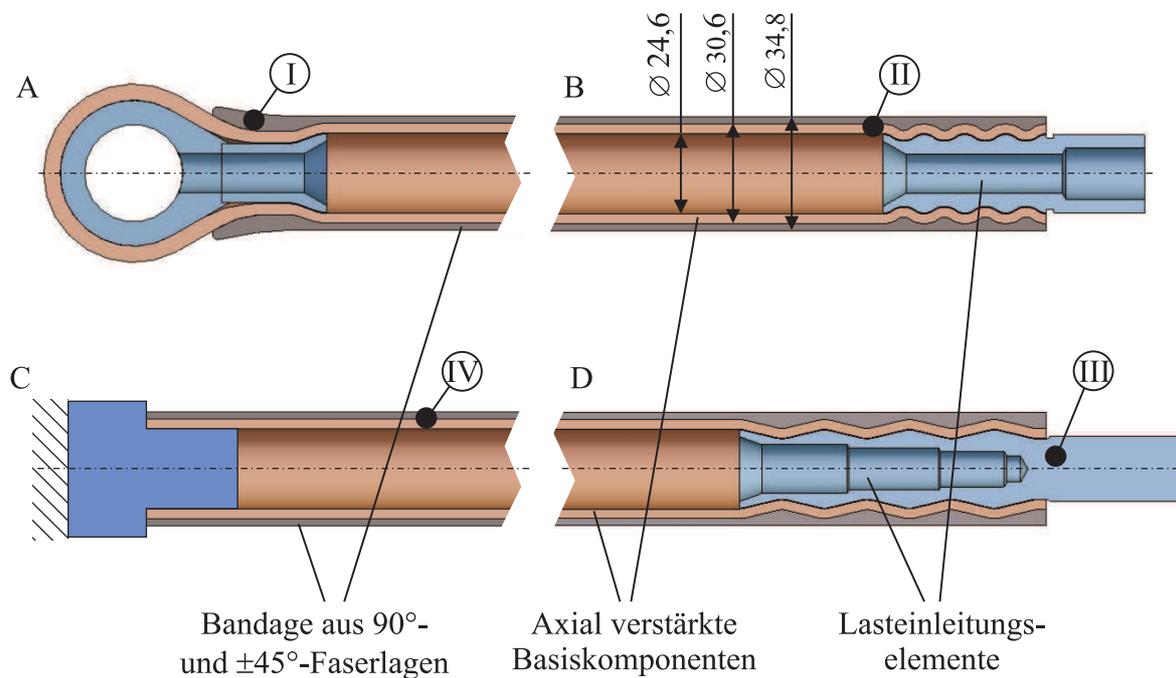


Abb. 9.5: Geprüfte Lasteinleitungssysteme für Faserverbund-Leichtbaukolbenstangen: Lageraue mit Schlaufenstruktur (A), Rund-Konturverbindung (B), Prüfflansch für Druckversuche (C), optimierte Rund-Trapez-Konturverbindung (D)

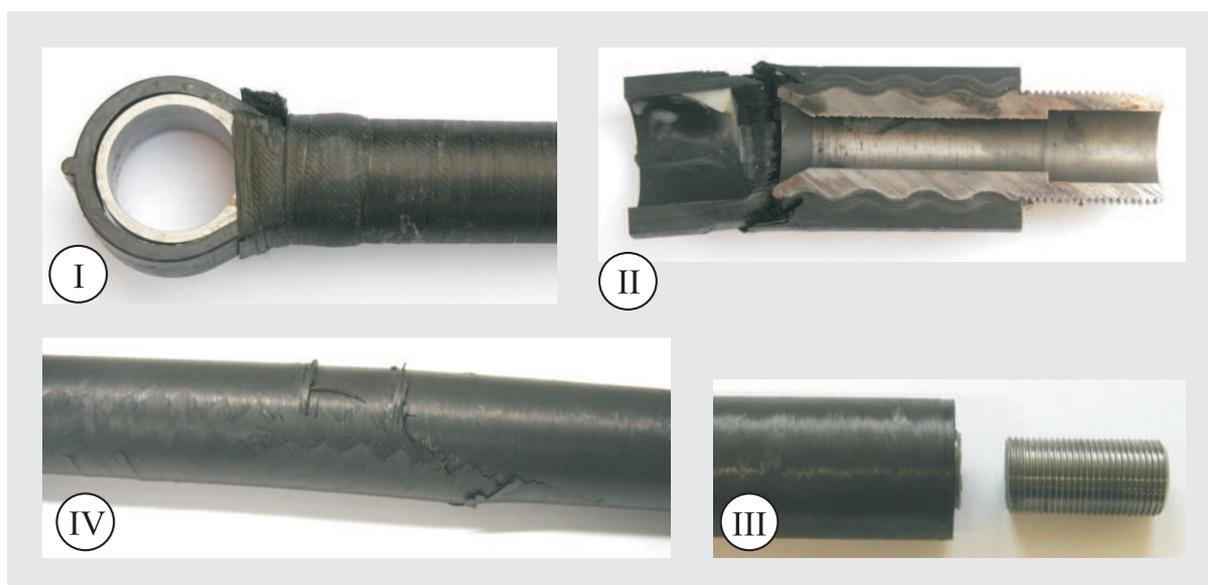


Abb. 9.6: Schadensbilder bei Faserverbund-Kolbenstangen (vgl. hierzu Abb. 9.5)

Tab. 9.1: Ausgewählte experimentelle Ergebnisse (vgl. dazu Abb. 9.5 und 9.6)

Vers.- reihe	Bau- variante	Fasertyp axial/tang.	Belastung	Bruchlast [kN]	Versa- gensort
1	A B	M40J/HTS	Zug, quasistatisch	140	II
2	A B	M40J/HTS	Druck, quasistatisch	140	II
3	A D	M40J/M40J	Druck, quasistatisch	120	I
4	C D	M40J/M40J	Druck, quasistatisch	155	IV
5	A D	M40J/M40J	Zug-Schwell, 80 kN, 80 000 LW; anschl. Zug, quasistatisch	92	III

9.5), wobei auch für die wickeltechnisch aufgebrauchten Faserlagen die steifere Faser M40J verwendet wurde. Bei diesen Kolbenstangen trat unter quasistatischer Druckbelastung ein Versagen im Bereich der Schlaufenschenkel (I) bei Lasten von 120 kN auf (Versuchsreihe 3, Tab. 9.1). Dies ist auf eine Vorschädigung der spröderen M40J-Fasern beim Bandagieren der Schlaufenzone, insbesondere im Bereich der sehr kleinen Umlenkungsradien, zurückzuführen. Ein Entwurf mit fasergerecht verrundeter Gestalt im Schlaufenbereich wurde mit Hilfe von FE-Simulationen erarbeitet (siehe auch Abb. 9.3). Für weitere Druckversuche wurden die in vorangegangenen Belastungsversuchen geschädigten Schlaufenbereiche entfernt und durch einfache Prüfflansche (C) ersetzt (Versuchsreihe 4). Bei Drucklasten von etwa 155 kN ist ein erstes Versagen der Stangenstruktur im ungestörten Bereich (IV) eingetreten. In weiterführenden dynamischen Bauteiltests wurden die Leichtbau-Kolbenstangen mit den in Luftfahrtspezifikationen vorgegebenen 80 000 Lastwechseln (LW) und einer oberen Zugkraft von 80 kN schwellend belastet (Versuchsreihe 5). In statischen Zugversuchen sind anschließend Restfestigkeiten von 92 kN ermittelt worden, wobei das Versagen im metallischen Lasteinleitungselement auftrat (III).

Sowohl die Simulationsrechnungen als auch die durchgeführten Belastungsversuche bestätigen eindrucksvoll, dass diese neuartigen Lasteinleitungssysteme für statisch- und dynamisch hochbelastete Kolbenstangen in Faserverbund-Leichtbauweise sehr gut geeignet sind. Eine prototypische Leichtbau-Kolbenstange mit derartigen Lasteinleitungen und die

dafür mit hoher Reproduzierbarkeit gefertigten Basisstrukturen sind in Abb. 9.7 dargestellt. Die hier entwickelte Bauweise besitzt ferner Pilotcharakter für weitere hochbelastete stabförmige FKV-Leichtbaukomponenten.



Abb. 9.7: Prototypische Leichtbau-Kolbenstange in Mischbauweise (oben) und halbschalenförmige Basisstrukturen (unten)

10 Zusammenfassung

Bei vielen Hochleistungsprodukten der Verkehrstechnik sowie des Maschinen- und Anlagenbaus kann erst mit der Entwicklung und technologischen Umsetzung innovativer Leichtbausysteme ein wirtschaftlich bedeutender Wettbewerbsvorsprung erzielt werden. Besondere Vorteile bieten dabei beanspruchungsgerechte Mischbauweisen, die durch Kombination von endlosfaser- bzw. textilverstärkten Kunststoffen mit metallischen Komponenten eine hohe Funktionalität bei geringem Bauteilgewicht ermöglichen. Dabei ist zur vollen Ausschöpfung des hohen Leichtbaupotentials von Mischbauweisen grundsätzlich die Lastfernübertragung durch die Faserverbundkomponenten zu gewährleisten, während die metallischen Komponenten dazu dienen, über geeignete Funktionsflächen äußere Lasten aufzunehmen und gleichmäßig in die Faserverbundstrukturen einzuleiten (Lastnahübertragung). Eine wesentliche Voraussetzung für eine derartige strukturmechanische Aufgabenteilung ist die Bereitstellung beanspruchungs-, fertigungs- und montagegerechter Verbindungssysteme, wofür die vorliegende Arbeit am Beispiel repräsentativer komplexer Anwendungen einen wertvollen Beitrag leistet und Verallgemeinerungen aufzeigt.

Der zielsichere Entwurf und die schnelle technologische Umsetzung von hochbeanspruchten Systemkomponenten in Mischbauweise konnte erst durch die aufgabenspezifische Anwendung angepasster Konstruktionsmethoden erreicht werden. So wurden mit Hilfe der Abstraktion wesentliche Funktionen identifiziert sowie in einem interaktiven Entwurfsprozess abhängige Gestaltungsaspekte wie etwa Tragwerkskonzept, Halbzeugauswahl, Fertigungsverfahren und Dimensionierung abgestimmt. Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte Dimensionierung stützte sich im Wesentlichen auf analytisch basierte Berechnungsprogramme und einschlägige FE-Softwaresysteme in Kombination mit dem neuen bruchmodebezogenen Versagenskriterium nach CUNTZE. Die ausgewählten repräsentativen Leichtbau-Systemkomponenten: Textilverbund mit Endlosfaser-Thermoplast-Nietverbindung, Faserverbundzugstab, textile Hohlstruktur und Hydraulikaktuator sowie die zugehörigen Verfahren wurden technologisch umgesetzt und erprobt, wobei die Berechnungsergebnisse voll bestätigt werden konnten.

Zur Festigkeitssteigerung von Verbindungssystemen bei textilverstärkten Thermoplasten wurde ein neuartiges **Endlosfaser-Thermoplast-(EFT-)Nietverfahren** entwickelt, mit dem die besondere Eignung warmumformtechnischer Fügeprozesse für derartige Verbundstrukturen aufgezeigt wurde. Mittels Warmformung von Niet- und Bolzenlöchern in gewebeverstärkten Thermoplaststrukturen (GF-PP) konnte dabei die Lochleibungsfestig-

keit gegenüber herkömmlichen Bohrungen um 50 % gesteigert werden. Im Rahmen der Prozessentwicklung wurde im Weiteren erstmalig eine automatisierte, prototypische Nieteinrichtung konstruiert und gebaut, die mit hoher Reproduzierbarkeit Nietlöcher formt, UD-Nietrohlinge einsetzt und Nietköpfe prägt.

Ein neuartiger warmumformtechnischer Montageprozess wurde ebenfalls zur Herstellung von hochfesten **Faserverbund-Zugstabsystemen** mit metallischen Lasteinleitungselementen entwickelt und erprobt. Hierzu wurden eigens mittels Thermoplast-Pultrusion gefertigte Faserverbundstäbe verwendet. Einen wesentlichen Schwerpunkt bildete die Entwicklung einer zugehörigen, automatisierten Montagevorrichtung, die in kurzen Zykluszeiten hochfeste formschlüssige Verbindungen zwischen FKV- und Metallkomponenten herstellt. Derartige Leichtbau-Zugstabsysteme ermöglichen gegenüber klassischen metallischen Lösungen eine signifikante Gewichtseinsparung von über 50 %.

Für die Fertigung von unterschiedlichen **textilen Hohlstrukturen** mit formschlüssig integrierten metallischen Funktionselementen kam das eigens modifizierte Schlauchblasverfahren zum Einsatz, mit dem besonders kurze Prozesszeiten und eine einfache Handhabung realisierbar sind. Wesentliche Vorteile bieten hier die neuen Hybridgarn-Textil-Thermoplast-Halbzeuge, da diese für die Konsolidierung lediglich unter Blasdruck auf die Schmelztemperatur des Matrixwerkstoffs erwärmt werden müssen. Die technologische Umsetzung erfolgte am Beispiel einer komplex geformten Getriebewelle aus kohlenstofffaserverstärktem Polyamid mit integrierten metallischen Zahnrädern und Wälzlagern. So konnten formschlüssige Lasteinleitungssysteme mit geeigneten Faserorientierungen und polygonförmigen Kontaktgeometrien für die Übertragung von sehr hohen Torsionsmomenten realisiert werden.

Der interaktive Konstruktionsprozess wurde abschließend unter Verwendung gewonnener Erkenntnisse beispielhaft für die ganzheitliche Entwicklung eines hochbeanspruchten Leichtbausystems „**Luftfahrt-Hydraulikaktuator**“ mit neuartigen **CFK-Zylinderrohren** und **-Kolbenstangen** angewendet. Mit der Gestaltung und der wickeltechnischen Fertigung von CFK-Zylinderrohren mit fasergerechten, integrativen Rohrgewinden ist dabei ein hochfestes, lösbares Verbindungssystem für die schnelle Montage von metallischen Funktionsflanschen bereitgestellt worden. Die zugehörigen Leichtbaukolbenstangen wurden mit Schlaufen- und Konturverbindungssystemen ausgeführt, wobei die axial verstärkten Basiskomponenten durch das eigens modifizierte Pressverfahren einen sehr hohen Faservolumenanteil von über 65 % aufweisen. Umfangreiche Fertigungsstudien und Belastungsversuche bestätigten die vorausberechneten Bruchlasten und das Gewichtseinsparpotential des neuartigen Luftfahrt-Hydraulikaktuators von etwa 40 % gegenüber derzeit im Flugzeugbau eingesetzten Aktuatoren in Stahlbauweise.

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten hochbeanspruchten Lasteinleitungssysteme sowie die aufgezeigte methodische Vorgehensweise im Konstruktionsprozess besitzen Pilotfunktion für zukünftige Leichtbaustrukturen mit höchstem Innovationspotential. Zur weiteren industriellen Verwertung wurden die hier erarbeiteten Leichtbaulösungen und deren technologische Umsetzung durch mehrere Patentanmeldungen geschützt [70–74].

11 Literaturverzeichnis

- [1] Bechtold, G.: Pultrusion von geflochtenen und axial verstärkten Thermoplast-Halbzeugen und deren zerstörungsfreie Porengehaltsbestimmung. Dissertation, Universität Kaiserslautern, 2000
- [2] Brüssel, R.; Ernst, H.; Geiger, O.; Henning, F.; Krause, W.: Tailored LFT serienreif entwickelt – Ergebnisse aus dem Forschungsvorhaben „SMART PART“. Tagungsband: 6. Internationale AVK-TV Tagung für verstärkte Kunststoffe und Formmassen, Baden-Baden, 07.-08. Oktober 2003, S. A9.1-A9.13
- [3] Cuntze, R. et al.: Neue Bruchkriterien und Festigkeitsnachweise für unidirektionalen Faserkunststoffverbund unter mehrachsiger Beanspruchung – Modellbildung und Experimente. VDI-Fortschritt-Berichte, Reihe 5, Nr. 506, VDI Verlag, Düsseldorf, 1997
- [4] Cuntze, R.: Progressive Failure of 3D-Stressed Laminates – Multiple Nonlinearity Treated by the Failure Mode Concept (FMC). Proceedings of the DURACOSYS Conference, Brüssel, Juli 1999
- [5] Cuntze, R.; Freund, A.: The Predictive Capability of Failure Mode Concept based Strength Criteria for Multidirectional Laminates. Part A, Composites Science and Technology 64 (2004), S. 343-377
- [6] Diestel, O.; Godau, U.; Offermann, P.: Biaxially reinforced multilayer weft knitted fabrics – a new textile structure for composite reinforcement. Proceedings 30th International SAMPE Technical Conference, San Antonio, 1998, S. 40-47
- [7] Diestel, O.; Offermann, P.: Thermoplastische GF/PP-Verbunde aus biaxial verstärkten Mehrlagengestriicken – Werkstoff zur Verbesserung der passiven Fahrzeugsicherheit? Technische Textilien / Technical Textiles 43 (2000) 4, S. 274-277
- [8] Ehrlenspiel, K.: Integrierte Produktentwicklung – Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit. München, Wien: Carl Hanser, 2003
- [9] Feltin, D.; Gliesche-K.; Mattheji, P.: Weiterentwicklung der Herstellung beanspruchungsgerechter Vorformlinge. Tagungsband: Techtexil-Symposium 3.2 (1997), Frankfurt, 12.-14. Mai 1997, S. 1-8

-
- [10] Flemming, M.; Ziegmann, G.; Roth, S.: Faserverbundbauweisen – Halbzeuge und Bauweisen. Springer-Verlag, Heidelberg, 1996
- [11] Gevers; Meier: Auswahl von Verbindungselementen für den Einsatz in Faserverbundstrukturen. Luftfahrttechnisches Handbuch (LTH), 23 100-03, 1994
- [12] Grothaus, R.; Kroll, S.: Entwicklung einer Fügezange in Ultraleichtbauweise. Tagungsband: Industrielle Anwendung der Faserverbundtechnik IV, Aachen, 10. April 2001, S. 19-31
- [13] Grüber, B.: Beitrag zur Strukturanalyse von anisotropen Schichtverbunden mit elastischen Einschlüssen und Bolzen. Dissertation, Technische Universität Dresden, Dez. 2004
- [14] Gude, M.: Zum nichtlinearen Deformationsverhalten multistabiler Mehrschichtverbunde mit unsymmetrischem Strukturaufbau. Dissertation, Technische Universität Dresden, 2000
- [15] Haldenwanger, H.-G.: Zum Einsatz alternativer Werkstoffe und Verfahren im konzeptionellen Leichtbau von PKW-Rohkarosserien. Dissertation, Technische Universität Dresden, 1997
- [16] Helwig, F.: Produktinformation und persönliche Mitteilungen. Centa Antriebe Kirschey GmbH, Haan, Juni 2005
- [17] Hering, E., Modler, K.-H. (Hrsg.): Grundwissen des Ingenieurs. Leipzig: Fachbuchverlag, 2002
- [18] Herzberg, C.; Rödel, H.; Födisch, J.; Märker, M.: Nähen von Verstärkungstextilien für Composite am Beispiel von Hochleistungstotoren. Tagungsband: Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2000, Leipzig, 18.- 21. September 2000
- [19] Hinton, M. J.; Soden, P. D.; Kaddour, A. S.: Failure Criteria in Fibre Reinforced Polymer Composites – The World-Wide Failure Exercise. Elsevier, Kidlington, UK, 2004
- [20] Hintzen, H.; Laufenberg, H.; Kurz, U.: Konstruieren, Gestalten, Entwerfen. Braunschweig, Wiesbaden: Vieweg, 2000
- [21] Hufenbach, W.; Kroll, L.: Neue Leichtbaulösungen durch kraftflussgerechte textile Verstärkungen. Tagungsband des Dresdner Leichtbausymposiums 2002, Dresden, 13.- 15. Juni 2002
- [22] Hufenbach, W.; Kroll, L.; Gude, M.; Helms, O.; Ulbicht, A.; Grothaus, R.: Integrative Rohrgewinde in Wickeltechnik für hochbeanspruchte Verbindungen bei Leichtbaustrukturen. Tagungsband: Schraubenverbindungen - Berechnung, Gestaltung, Anwendung; VDI-Fachtagung, Dresden, 5./6. Oktober 2005

-
- [23] Hufenbach, W.; Kroll, L.; Helms, O.: Faserverbundgerechte Lasteinleitungen für Hochleistungszugstäbe. *Konstruktion* (2005) 7/8, S. 61-63
- [24] Hufenbach, W.; Kroll, L.; Helms, O.: Leichtbaustrukturen in Mischbauweise. *Kunststoffe* 94 (2004) 10, S. 296-299
- [25] Hufenbach, W.; Lustig, V.; Gude, M.; Koch, I.: Ermüdungsverhalten von faserverstärkten Verbundstrukturen unter mehrachsiger Zug/Druck-Torsionsbelastung. Tagungsband: 15. Symp. Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde, DGM-Tagung 06.-08. April Kassel, S. 551-556
- [26] Hufenbach, W.; Offermann, P.; Kroll, L.: Review der DFG-Forschergruppe FOR 278: Textile Verstärkungen für Hochleistungsrotoren in komplexen Anwendungen. 6. Dresdner Textiltagung „Textile Zukunft unserer Lebenssphären“, Dresden, 19.-20. Juni 2002
- [27] Jürss, D.: Thermoplastpultrusion - Strangziehen von endlosfaserverstärkten Profilen mit thermoplastischem Matrixwerkstoff. Dissertation, RWTH Aachen, 1995
- [28] Klein, P. O.; Meier, U.: Verankerung für Kohlenstofffaserverbunddrähte. Patent CH 693 102 A5, 21. Dezember 1998
- [29] Klopp, K.; Laourine, E.; Wulfhorst, B.; Gerhard-Abozari, E.; Hying, K.: Konventionelle und einseitige Nähetechnologie für technische Textilien und Faserverbundwerkstoffe. *DWI Reports* 124 (2001), S. 439-445
- [30] Koller, R.: Konstruktionslehre für den Maschinenbau – Grundlagen zur Neu- und Weiterentwicklung technischer Produkte. Berlin, Heidelberg: Springer, 1994
- [31] Kroll, L.: Zur Auslegung mehrschichtiger anisotroper Faserverbundstrukturen. Dissertation, Technische Universität Claustal, 1992
- [32] Kroll, L.; Hufenbach, W.: Physically Based Failure Criterion for Dimensioning of Thick-Walled Laminates. *Applied Composite Materials* (1997) 4, S. 321-332
- [33] Kroll, L.: Berechnung und technische Nutzung von anisotropiebedingten Werkstoff- und Struktureffekten für multifunktionale Leichtbauanwendungen. Habilitationsschrift, Technische Universität Dresden, 2005
- [34] Langkamp, A.: Bruchmodebezogene Versagensmodelle für faser- und textilverstärkte Basisverbunde mit polymeren, keramischen sowie metallischen Matrices. Dissertation, Technische Universität Dresden, 2002
- [35] Michaeli, W.; Dyckhoff, J.; Jehrke, M.: Starke Krümmung – Herstellen von Hohlkörpern aus textilen Halbzeugen im Formwerkzeug mit Hilfe von Druckluft. *Der Maschinenmarkt* 100 (1994) 23, S. 32-35

- [36] Mitschang, P.; Weimer, C.: Entwicklung und Anwendung der Nähetechnik im Bereich der Faser-Kunststoff-Verbunde. Tagungsband: Denkendorfer Kolloquien, Konfektion technischer Textilien, Denkendorf, 8.-9. November 2000, S. 1-10
- [37] Mitschang, P.; Weimer, C.: Nähetechnik bietet groe Potenziale – Anwendung der Nähetechnik für Faser-Kunststoff-Verbundwerkstoffe. BW Technics, (2000) 1, S. 12-16
- [38] Nagel, F.: Produktinformation und persönliche Mitteilungen. EADS Deutschland GmbH, Augsburg; Fachmesse JEC Paris, März 2005
- [39] N. N.: Produktinformation, Ejot Holding GmbH & Co. KG, Bad Berleburg-Berghausen
- [40] N. N.: Produktinformation, Wilhelm Böllhoff GmbH & Co. KG, Bielefeld
- [41] N. N.: Produktinformation, Navtec Corporation, Guilford, Connecticut, USA
- [42] N. N.: Produktinformation. Eurocarbon B. V., Sittard, Niederlande
- [43] N. N.: Produktinformation. Siltex GmbH & Co. KG, Julbach,
- [44] N. N.: Konstruktionshandbuch. Fiberline Composites A/S, Kolding, Dänemark
- [45] N. N.: Produktinformation, Maschinenfabrik Spaichingen GmbH, Spaichingen
- [46] N. N.: Produktinformation, KVT Bielefeld GmbH, Bielefeld
- [47] N. N.: Produktinformation, KLN Ultraschall GmbH, Heppenheim
- [48] N. N.: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. VDI-Richtlinie 2221, Berlin: Beuth, 1993
- [49] Noisternig, J.-F.; Jungwirth, D.: CFK-Schrägseile – fit für die Anwendung. *Das Bauzentrum* (1998) 10, S. 14-19
- [50] Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K. H.: Konstruktionslehre – Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung, Methoden und Anwendung. Berlin, Heidelberg: Springer, 2003
- [51] Puck, A.: Festigkeitsanalyse von Faser-Matrix-Kombinationen – Modelle für die Praxis. München, Wien: Hanser, 1996
- [52] Schneider, M; Wulfhorst, B.: Bedeutung der Flechttechnologie für die Konstruktion von Faserverbundwerkstoffen. Tagungsband: 35. Internat. Chemiefasertagung, Verbundwerkstoffe, Österreichisches Chemiefaserinst., (1996), S. 1-16
- [53] Schulz, D.: Auszugsfestigkeiten von Gewindeeinsätzen in Twintex-Strukturen. Versuchsbericht Nr. 10424, Wilhelm Böllhoff GmbH & Co. KG, Bielefeld, 07. Aug. 2004

-
- [54] Sickinger, C.; Wilmes, H.; Herbeck, L.; Herrmann, A.; Köhnke, B.; Wockatz, R.: Strukturelles Nähen – Eine Maßnahme zur Realisierung von Hochleistungsfaserverbundstrukturen. Tagungsband: Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2000, Leipzig, 18.- 21. September 2000
- [55] Tognini, R.; Stadler, R.: Produktinformation und persönliche Mitteilungen, Icotec AG, Altstätten, Schweiz; Fachmesse JEC Paris, März 2005
- [56] Tognini, R.: Das Composite-Fließpressen: Ein neues Verfahren zur Net-Shape-Fertigung von endlosfaserverstärkten Bauteilen mit thermoplastischer Matrix dargestellt am Beispiel einer Schraube für die translaminäre Wirbelfixation. Dissertation, ETH-Zürich, 2001
- [57] Tome A.; Ehrenstein G. W.; Dratschmidt F.: Günstig auf lange Sicht? Direktverschraubungen in Kunststoff. *Plastverarbeiter* 49 (1998) 11, S. 124-127
- [58] Tome A.; Ehrenstein G. W.: Direktverschraubungen in GMT. Tagungsband: 2. Internationale AVK-TV Tagung für verstärkte Kunststoffe und Formmassen, Baden-Baden, 12.-13. Oktober 1999, S. B7.1-B7.10
- [59] Töpker, J.; Schulz, J.; Haberstroh, E.; Michaeli, W.: Krafteinleitungselemente und Verbindungstechniken bei endlosfaserverstärkten, thermoplastischen Hohlprofilen. 3. Internat. AVK-TV Tagung für verstärkte Kunststoffe und duroplastische Formmassen, 12.-13. September 2000
- [60] Trinter, F.; Ehrenstein, G. W.: Festigkeit von Direktverschraubungen mit gewindeerzeugenden Metallschrauben an Bauteilen aus SMC und GMT. Tagungsband: 23. Internationale AVK-Tagung, Arbeitsgemeinschaft Verstärkte Kunststoffe, Mainz, 5.-7. November 1990, S. A16.1-A16.9
- [61] Turlach, G.: Werkstoffe der Verbindungselemente für den industriellen Leichtbau. Bänder, Bleche, Rohre 29 (1988) 6, S. 162-170
- [62] Turlach, G.: Korrosion der Schrauben im Leichtbau beeinflusst Dauerhaltbarkeit – Kaltverfestigung verbessert Oberflächenschutz. Bänder, Bleche, Rohre 30 (1989) 6, S. 36-37
- [63] Ünal, A.; Offermann, P.: Einfluss der Bindung auf die Verformungsverhältnisse von Verstärkungsgestriken. *Melliand-Textilberichte* 86 (2005) 4, S. 258-260
- [64] Ünal, A.; Offermann, P.: Entwicklung von Glasfasergestriken für die Bewehrung von Holzbauteilen unter Berücksichtigung der gestreckten Maschenstruktur. 7. Dresdner Textiltagung, Textile Zukunft unserer Lebenssphären, Technische Universität Dresden, 16.-17. Juli 2004
- [65] Weinert, K.; Kempmann, C.: Gewindefertigung in faserverstärkten Kunststoffen. *Kunststoffe* 94 (2004) 7, S. 44-48

- [66] Wiedemann, J.: Leichtbau – Band 2: Konstruktion. Springer-Verlag, Heidelberg, 1989
- [67] Wulfhorst, B.; Moll, K.-U.: Neuartige textile Fügeverfahren für Faserverbundwerkstoffe. Neue Verbundtextilien und Composites textilarmierter Werkstoffe, 7. Int. Tectextil Symposium 95, Band 3.1, Frankfurt a. M., 1995

Patente

- [68] Fries, H.: Querbeanspruchte Verbindungselemente aus pultrudiertem faserverstärkten Kunststoff. Deutsches Gebrauchsmuster, DE 298 03 614 U1, eingetragen 20.05.98
- [69] Gillner, A.: Vorrichtung und Verfahren zum Verformen von thermoplastischem Material zum Verbinden zweier Bauteile. Deutsches Patent, DE 197 00 518 C2, erteilt 16.03.2000
- [70] Hufenbach, W.; Helms, O.: Hohlstruktur aus faserverstärktem Kunststoff mit Lasteinleitungselementen. Internationales Patent, PCT/DE 2005/000859, offengelegt 10.11.05
- [71] Hufenbach, W.; Helms, O.: Verankerung von faserverstärkten Zugstangen. Deutsches Patent, DE 10 2004 038 082 A1, offengelegt 23.03.06
- [72] Hufenbach, W.; Kroll, L.; Gude, M.; Helms, O.; Ulbricht, A.: Zylinder aus Faserverbundwerkstoff mit metallischen Flanschkomponenten sowie Verfahren zur Herstellung. Deutsches Patent DE 10 2005 048 120.5, angemeldet 06.10.05
- [73] Hufenbach, W.; Kroll, L.; Gude, M.; Helms, O.; Ulbricht, A.: Stabförmige Faserverbundstruktur mit Lasteinleitungselementen sowie Verfahren zur Herstellung. Deutsches Patent, DE 10 2005 048 119.1, angemeldet 06.10.05
- [74] Hufenbach, W.; Kroll, L.; Helms, O.: Verfahren und Anordnung zur Herstellung genieteteter Verbindungen zwischen flächigen Strukturen aus verstärkten Thermoplasten. Deutsches Patent, DE 10 2004 038 084, erteilt 17.01.07
- [75] Hufenbach, W.; Kroll, L.: Hochleistungs-Leichtbauzange. Deutsches Patent, DE 196 51 329 A1, offengelegt 18.06.1998
- [76] Loher, U.; Hombrechtikon, J.; Tognini, R.; Wegener, T.; Wintermantel, E.: Verfahren zur Herstellung von Bauteilen aus faserverstärkten Thermoplasten sowie nach dem Verfahren hergestelltes Bauteil. Deutsches Patent, DE 44 45 307 C1, erteilt 12.09.96
- [77] Meier, U.: Verankerung für Hochleistungsfaserverbundwerkstoff-Drähte. Europäisches Patent EP 0 710 313 B1, erteilt 03.05.00

- [78] Mitschang, P.: Faser-Kunststoff-Verbund-Bauteile mit Inserts. Deutsches Patent, DE 198 34 772 C2, erteilt 17.10.02
- [79] O'Connor, J. E.: Thermoplastic composite fasteners. Europäisches Patent, EP 0 268 957 A1, erteilt 01.06.88
- [80] Rainville, G. A.; Israeli, L.: Composite fasteners and method for fastening structural components therewith. US-Patent, US 5 361 483, erteilt 08.11.94

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Olaf Helms
Geburtsdatum: 11. September 1974
Geburtsort: Lausanne, Schweiz
Eltern: Dr.-Ing. Dirk Helms und Adelheid Helms, geb. Krampe
Familienstand: ledig
Staatsangehörigkeit: deutsch

Schulbildung

1981 – 1985 Grundschule „Am Aalfang“, Ahrensburg
1985 – 1988 Gymnasium „Stormarnschule“, Ahrensburg
1988 – 1994 Gymnasium „Emil von Behring“, Großhansdorf
25. Juni 1994 Abitur

Wehrdienst

1994 – 1995 2./Flugabwehrraketengruppe 39, Stadum

Studium

1995 – 2000 Maschinenbaustudium an der
Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
Jan. – Juli 2000 Anfertigung der Diplomarbeit bei der
DaimlerChrysler AG, Sindelfingen
17. Juli 2000 Abschluss als Diplom-Ingenieur

Industriepraktika

Juli – Sep. 1995 Mercedes-Benz AG, Werk Hamburg
Sep. – Okt. 1997 Aluminium- und Bonzegießerei Hermann Sieg GmbH, Hamburg
Sep. – Dez. 1999 Sun Hydraulics Corporation, Sarasota, USA

Berufstätigkeit

1997 – 1999 Tätigkeiten als studentische Hilfskraft an den Instituten
für allgemeine Mechanik, für Maschinenelemente und Maschinen-
gestaltung sowie für fluidtechnische Antriebe und Steuerungen
der RWTH Aachen
seit Sep. 2000 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Leichtbau und
Kunststofftechnik der TU Dresden