

Kurzfassung der Dissertation

Eine der wesentlichen Herausforderungen beim Leichtbau mit Faserverbundwerkstoffen besteht heute darin, Bauteile mit der geforderten mechanischen Leistungsfähigkeit großserienfähig mit geringen Zykluszeiten und Kosten herzustellen. Ein Ansatz dazu ist es, die vergleichsweise teuren Verstärkungsfasern nur lokal, im Bereich hoher Lasten anzuordnen (maßgeschneiderte Verstärkungseinleger aus Endlosfasern) und diese in großserientaugliche Verarbeitungsverfahren wie dem Spritzgießverfahren zu integrieren. Beispiele für derartige Bauweisen wären die partielle Verstärkung von Befestigungsbohrungen von spritzgegossenen Flanschen oder der Lagersitz in einem spritzgegossenen Getriebegehäuse. Auf diese Weise können Materialeigenschaften wie die Steifigkeit und Festigkeit von kurz- oder langfaserverstärkten Spritzgießbauteilen signifikant gesteigert werden.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit maßgeschneiderten Verstärkungseinlegern aus Endlosfasern, welche in spritzgegossene Platten integriert werden und damit den Lastleitungsbereich partiell verstärken. Mit Hilfe experimenteller Untersuchungen werden relevante, prozessbedingte Regelgrößen sowie werkstoffliche Einflussgrößen betrachtet.

Der erste Teil der Arbeit beschäftigt sich mit dem Herstellungsprozess der Verstärkungseinleger. Hierfür wird insbesondere das Tailored-Fibre-Placement (TFP)-Verfahren und der anschließende Konsolidierungsprozess untersucht. Die Ergebnisse dieses Abschnittes sind definierte Prozessparameter für eine wirtschaftliche Herstellung derartiger Verstärkungseinleger aus Endlosfasern sowie die daraus resultierenden mechanischen Eigenschaften. Des Weiteren werden mittels dem thermoplastischen Wickelprozess hergestellte Verstärkungseinleger untersucht und hinsichtlich des Versagensverhaltens den TFP-Verstärkungseinlegern gegenübergestellt.

Der zweite Abschnitt der vorliegenden Arbeit beschäftigt sich mit der Werkstoffkombination aus Verstärkungseinleger und Spritzgießumgebung. Dabei werden die Faservolumengehalte der Spritzgießumgebung variiert und das Versagensverhalten dieser Werkstoffkombination betrachtet.

Innerhalb des dritten und letzten Abschnittes der Arbeit werden funktionale Zusammenhänge zwischen den untersuchten Regelgrößen seitens des Verstärkungseinlegers und seitens der Spritzgießumgebung abgeleitet und in Form von Gestaltungsempfehlungen dargestellt.

Die Erkenntnisse der vorliegenden Forschungsarbeit bieten ein grundlegendes Verständnis für maßgeschneiderte Verstärkungseinleger, welche in eine Spritzgießumgebung integriert sind. Darüber hinaus liefert diese Arbeit Kenntnisse über die werkstofflichen Eigenschaften und prozessbedingten Zusammenhänge einer derartigen Bauweise.

Abstract

One of the main challenges of lightweight design with fibre reinforced composites is to manufacture components with the required mechanical performance in series production with short cycle times at low cost. Possible approaches are to align the cost-intensive reinforcing fibres locally along the load paths (crating tailored reinforcing inserts) and to integrate them in a large-scale production process such as injection moulding with short-fibre-reinforced thermoplastics. Examples for such construction can be a local reinforcement of fastening bore of injected flanges or an area of a roller bearing seat in gearbox housings. In this way, material properties such as tensile strength and stiffness of unreinforced as well as short or long fibre reinforced injection molded components can be significantly increased.

The present work deals with tailored reinforcement inserts made of continuous fibres, which are applied to a bolt-loaded open-hole injection plate. In this way a partially reinforcement of the load introduction area of the plate can be achieve. The conducted experimental investigations allow to consider the relevant process parameters as well as the influencing variables of the material.

The first part of this work deals with the manufacturing process of the reinforcement inserts. For this purpose, the Tailored-Fibre-Placement (TFP) technology and their consolidation process are being investigated. The results of this section are defined process parameters for an economical production of such reinforcing inserts based on continuous fibres, as well as the resulting mechanical properties. Furthermore, reinforcement inserts produced using the thermoplastic winding process are examined and compared with the TFP reinforcement inserts regarding their failure behavior

The second section of the work deals with the combination of reinforcement insert and injection molding. Therefore, the fibre volume content of the injection molding material is varied and the failure behavior of this material combination is considered.

In the third and last section of the thesis, functional relationships between the control variables on the part of the reinforcement insert and the injection moulding are derived and presented as design recommendations.

The results achieved in this thesis offer a better understanding of tailored reinforcement inserts combined with injection moulding. In addition, this thesis provides knowledge of the material characteristics and process-related properties of such constructions.

1 Einleitung

Faserkunststoffverbunde (FKV) finden in vielen technischen Anwendungen ihren Einsatz. Bedingt durch die hohe Festigkeit und Steifigkeit bei gleichzeitig sehr geringer Dichte, sind sie ein geeigneter Leichtbauwerkstoff. Dabei zeichnen sie sich durch die Kombination von hochfesten und steifen Verstärkungsfasern mit einer polymeren Matrix geringer Dichte aus. Es kann beim Matrixmaterial zwischen Duromeren und Thermoplasten gewählt werden, wobei die Auswahl unter anderem einen Einfluss auf das später eingesetzte Herstellungsverfahren hat. Beim Einsatz thermoplastischer Matrixsysteme entfällt die Aushärtung, weil es nur zu einer physikalischen Erstarrung der zuvor aufgeschmolzenen Polymerketten kommt und somit keine chemische Vernetzungsreaktion stattfindet. Aus diesem Grund ergeben sich weitgehend kürzere Zykluszeiten und eine bessere Lagerfähigkeit.

Einen wirtschaftlichen Prozess für die Verarbeitung von thermoplastischen Kunststoffen stellt das Spritzgießverfahren dar. Hier können mit hoher Automatisierbarkeit komplexe Geometrien bei kurzen Zykluszeiten realisiert werden. Allerdings weisen Spritzgießkomponenten auch bei Zugabe von Kurz- oder Langfasern limitierte mechanische Eigenschaften auf und sind damit für mechanisch hochbeanspruchte Bauteile oftmals nicht geeignet. Lasteinleitungsbereiche, wie Bohrungen und Ausbrüche, stellen eine besondere Schwachstelle dar. Grund hierfür sind neben der Querschnittsreduzierung und damit einhergehenden Spannungsüberhöhungen am Lochrand auch Bindenähte, die durch den Zusammenfluss von mindestens zwei Massenströmen hinter den Ausbrüchen entstehen.

Eine Möglichkeit Lasteinleitungsbereiche von Spritzgießkomponenten partiell zu verstärken, bietet der Einsatz von prozessintegrierten Verstärkungselementen aus Endlosfasern. Diese können beispielsweise mittels der Tailored-Fibre-Placement (TFP)-Technologie, dem Wickelverfahren oder mittels 3D Druck hergestellt werden. Ähnlich wie bereits fest etablierte metallische Normteile, wie beispielsweise Buchsen, werden diese Verstärkungseinleger anschließend in den Spritzgießprozess integriert. Anders als metallische Inserts bieten Verstärkungselemente aus Endlosfasern eine signifikante Steigerung der Festigkeit und Steifigkeit. Des Weiteren wird das Versagensverhalten der kurzfaserverstärkten Bauteile vom spröden Totalversagen hin zum gutmütigen Fail-Safe Versagen verändert.

Im Vordergrund dieser Arbeit stehen die Untersuchung des materialspezifischen Werkstoffverhaltens von Verstärkungselementen aus Endlosfasern, deren Kombination mit einem kurzfaserverstärkten Thermoplast sowie die Weiterentwicklung der Verarbeitungstechnologie. Die hierbei erlangten Erkenntnisse und die daraus abgeleiteten Gestaltungs- und Fertigungsempfehlungen bilden die Grundlage für eine weitere Entwicklung eines genormten Baukastensystems für FKV-Verstärkungseinleger.

1.1 Motivation

Tragende Strukturen erfordern in der Regel Verbindungskonzepte, die das Ein- und Ausleiten erforderlicher Kräfte ermöglichen. Bolzen- und Nietverbindungen stellen hierbei eine klassische Methode zum Fügen von FKV Einzelkomponenten dar. Ein wesentlicher Nachteil von Bolzenverbindungen ist die Festigkeitsreduzierung der Fügepartner. Dabei beeinflusst zum einen die Querschnittsreduzierung, zum anderen die Kerbwirkung durch die Bohrung die Festigkeit negativ. Bei Spritzgießbauteilen wird dies durch die Entstehung einer Binde-naht, bedingt durch die Trennung und das anschließende Zusammentreffen der Massenströme hinter den Ausbrüchen, verstärkt. Der Versagensort kann in der Regel in dem beschriebenen Binde-naht-Bereich lokalisiert werden, vgl. Abbildung 1 a) und b).

Die Zugabe von Kurz- oder Langfasern ermöglicht es zu einem gewissen Anteil die Festigkeit und Steifigkeit der Lasteinleitungsbereiche zu erhöhen. Gleichzeitig muss mit einem spröderen Totalversagen der Verbindung gerechnet werden. Eine Abhilfe für das spröde Versagen schaffen konstruktive Lösungen wie das Ausführen einer zweiten Nietreihe, die ein gutmütigeres Fail-Safe-Versagen ermöglicht, vgl. Abbildung 1 c). Dabei wird die Last nach dem Versagen der ersten Nietreihe von der zweiten aufgefangen bis abschließend das Totalversagen eintritt.

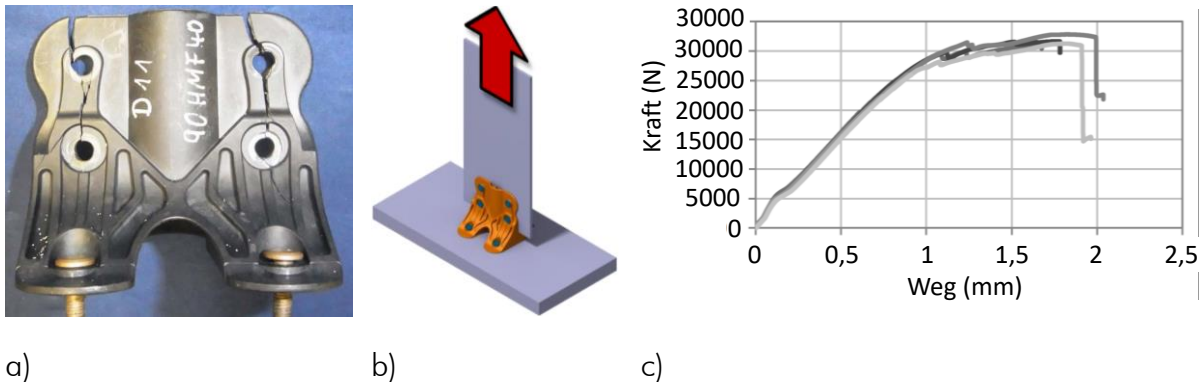


Abbildung 1: Mechanische Prüfung eines spritzgegossenen, kurzfaserverstärkten Halteelementes a) Darstellung Versagensmodus Spaltbruch am Beispiel des T-Brackets, b) Prüfaufbau und c) Kraft-Weg-Diagramm mit abruptem Totalversagen [GAI16]

Weitere konstruktive Lösungen für eine Erhöhung der Festigkeit von Bolzenverbindungen sind das Einhalten von minimalen Randabständen sowie der Nietabstände zueinander. Auch die Gestaltung der Faserrichtung im Bauteil sowie eine Erhöhung der Wandstärke kann zu einer gewünschten Steigerung der Festigkeit der Lasteinleitungsbereiche führen.

Nicht in jedem Fall ermöglicht es der Bauraum oder der Leichtbauaspekt die notwendigen Randabstände einzuhalten oder Wanddicken zu erhöhen. Dies führt in der Regel zu einem frühzeitigen Versagen der Verbindung. Anstelle von gutmütigen Fail-Safe Versagen, bei dem die Verbindung nach dem ersten Kraftabfall noch eine Rest-Tragfähigkeit aufweist, handelt es sich hierbei häufig um ein schlagartiges Totalversagen der Verbindung in seine Einzelteile.

Hieraus kristallisiert sich der Bedarf an standardisierten Verstärkungseinlegern aus Endlosfasern, die die Lasteinleitungsbereiche von thermoplastischen, kurzfaserverstärkten Spritzgießbauteilen verstärken sowie den Versagensmodus hin zu einem gutmütigen Fail-Safe Versagen verändern.

1.2 Zielsetzung der Arbeit und Systemgrenze

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung und Erprobung von maßgeschneiderten Verstärkungseinlegern aus Endlosfasern, die Lasteinleitungsbereiche von kurzfaserverstärkten Spritzgießbauteilen verstärken und zu einem gutmütigen Lochleibungsversagen des Bauteils führen.

Zu Beginn wird eine anforderungsgerechte Geometrie der Verstärkungseinleger basierend auf dem Modell des auf *Innendruck belasteten dickwandigen Rohres* [JAK87] betrachtet, vgl. Abbildung 2. Dabei werden die relevanten Geometrieinflüsse auf die Leistungsfähigkeit des Verstärkungseinlegers analysiert. Hieraus werden zwei Geometrien für den Verstärkungseinleger abgeleitet, die in weiterführenden experimentellen Untersuchungen näher betrachtet werden. Dabei wird ein Verstärkungseinleger-Typ mittels der TFP-Technologie gestickt und anschließend in einem Imprägnierprozess konsolidiert. Der zweite Verstärkungseinleger-Typ wird mittels einem thermoplastischen Wickelverfahren aus vorimprägnierten Tapes hergestellt.

Die Imprägnierqualität im Konsolidierungsprozess hat einen direkten Einfluss auf die mechanische Leistungsfähigkeit des Verstärkungseinlegers und hängt von den Prozessparametern des Verarbeitungsverfahrens ab. In diesem Zusammenhang werden mit Hilfe experimenteller Untersuchungen die relevanten Prozessparameter für einen wirtschaftlichen Konsolidierungsprozess identifiziert. Hierbei stehen neben der Ermittlung der mechanischen Leistungsfähigkeit, wie Festigkeit und Steifigkeit, die Prozesszeiten im Vordergrund der Untersuchung. Auf diese Weise kann der nachgeschaltete, hochautomatisierte Spritzgießprozess, der kurze Zykluszeiten vorgibt, mit hohen Losgrößen an Verstärkungseinlegern bedient werden.

Innerhalb der Untersuchungen zur Integration des Verstärkungseinlegers in einen kurzfaserverstärkten Thermoplast, steht die Analyse über einen anforderungsgerechten Kurzfaserteil des Spritzgießmaterials im Vordergrund. Dabei wird das Versagensverhalten des Spritzgießmaterials ohne und mit Verstärkungselementen abhängig von dem Kurzfaserteil gegenübergestellt.

Aus der Analyse der oben beschriebenen Regelgrößen werden zum Schluss dieser Arbeit Gestaltungs- und Fertigungsempfehlungen für die Bauweise von maßgeschneiderten Verstärkungseinlegern, die in ein kurzfaserverstärktes Spritzgießmaterial integriert sind, abgeleitet.