

Kurzfassung

Unidirektionale (UD) faserverstärkte Kunststoffe eignen sich hervorragend für die Herstellung von extrem leichten und sehr steifen Strukturen. Die Faserverbundwerkstoffe finden ihren hauptsächlichsten Einsatz in der Luft- und Raumfahrt, in der Automobil- sowie auch in der Maschinenbauindustrie. Hochbelastete Bauteile wie beispielsweise Antriebswellen, Druckbehälter für die Speicherung von Wasserstoff oder Raketenmotorgehäuse werden heutzutage aus unidirektionalen Faser-kunststoffverbunden (FKV) gefertigt. Die Wickeltechnik, die Pultrusion und das automatisierte Ablegen sind die geeigneten Prozesse für die Fertigung von Bauteilen aus unidirektionalen faserverstärkten Halbzeugen. In den letzten Jahrzehnten steigt die Nachfrage für Bauteile aus UD Verbundwerkstoffen kontinuierlich an; dadurch bedingt nimmt die Forderung nach höheren Produktionsraten und niedrigeren Herstellungskosten kontinuierlich an Bedeutung zu.

Die Imprägnierung der trockenen Verstärkungsfasern mit dem flüssigen Matrixwerkstoff ist eine der wichtigsten Prozessschritte bei der Herstellung von Halbzeugen und Bauteilen aus Faserverbundwerkstoffen. Ein ideales Halbzeug zeichnet sich dadurch aus, dass die Rovings vollständig mit Harz getränkt sind, es einen möglichst geringen Porengehalt aufweist und einen definierten Faservolumenanteil besitzt. Die Imprägniergüte im Halbzeug ist von großer Bedeutung für die Qualität des Bauteils. Wenn diese Imprägnierung mit entsprechend hoher Geschwindigkeit erfolgt, kann dies einen gravierenden Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit des gesamten Prozesses haben.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Konzept für eine Imprägniereinheit mit einer sinusförmigen, geschlossenen Kavität für den Einsatz im duromeren Nasswickelverfahren entwickelt (Siphon-Imprägniereinheit), die dadurch gekennzeichnet ist, dass Fasern und Harz kontinuierlich in Abhängigkeit einer definierten Prozessgeschwindigkeit diesem Imprägniermodul zugeführt werden. Im Gegensatz zu herkömmlichen Harzbädern ist die entwickelte Imprägniereinheit ein geschlossenes System ohne bewegliche Teile. Innerhalb der Imprägnierungskavität existieren keine Stellen, an denen sich das Harz im Prozess ansammeln kann und dort über die Zeit ungewollt reagiert. Dadurch können konstante Prozessbedingungen unabhängig von der Materialtopfzeit gewährleistet werden. Darüber hinaus ist der Aufwand für die Vorberei-

tung und die Reinigung durch den Einsatz von Einwegartikeln (Polytetrafluorethylen (PTFE)-Schläuche) minimiert. Die entwickelte Imprägniereinheit besteht aus der Imprägnierungskavität und dem Harzeinspritzblock. Die spezielle Ausformung des Harzeinspritzblockes ermöglicht die Ausbildung der Harzschicht zwischen Fasern und Kavität. Der Hauptteil der Einheit besteht aus der sinusförmigen Imprägnierkavität, in die die PTFE-Schläuche eingesetzt werden.

Das Prinzip des Imprägniervorgangs innerhalb der Einheit kann auf drei unterschiedliche Zonen physikalisch-mathematisch diskretisiert werden:

1. Eintrittszone: Rovings und Harz werden kontinuierlich der Einheit zugeführt. Es bildet sich eine Harzschicht zwischen der Kavitätswand und dem Roving aus. Die Dicke der Harzschicht ist abhängig von allem von der Harzdosierung.
2. Imprägnierungszone: Der Roving wird entlang der gekrümmten Kavität gezogen und es bilden sich Scherkräfte zwischen dem Roving und der Harzschicht aus. Ein Anstieg der Zugkräfte bewirkt einen Druckanstieg an den Krümmungen. Dieser Überdruck impliziert einen Harzfluss quer durch das poröse Faserbündel. Dies führt zu einer Durchtränkung des Rovings.
3. Kontaktzone: Abhängig von der Prozessgeschwindigkeit ergeben sich entlang den Krümmungen unterschiedliche Harzschichtdicken, welche in Prozessrichtung abnehmen und ein Minimum erreichen. Kommen die Filamente in Kontakt mit der Kavitätswand, führt dies zu einem weiteren Anstieg der Druckkräfte durch auftretende Kontaktreibung. Hierbei wird eingeschlossene Luft aus dem imprägnierten Faserbündel herauspresst.

Für die Betrachtung der Imprägniermechanismen in der sinusförmigen Kavität wurde ein mathematisches Modell aufgestellt. Dieses Modell implementiert alle wesentlichen physikalischen Phänomene, die während des Prozesses auftreten. Grundlegende Untersuchungen wurden durchgeführt, um ein tieferes Verständnis der Parameter Faserkompaktierung, Kapillarwirkung und Fadenspannungssteigerung zu gewinnen. Die Lösung des Imprägnierungsmodells erfolgte mit Hilfe der Programmiersprache MATLAB. Vier unterschiedliche Imprägnierungskavitäten wurden in einem breiten Prozessfenster simuliert. Versuche auf einem Imprägnierungsprüfstand zeigten, dass das Simulationsprogramm den Imprägnierungsverlauf präzise nachbilden

kann. Basierend auf den Ergebnissen der Modellierung wurde eine neue und optimierte Imprägniereinheit konstruiert und gefertigt. Die Ergebnisse der Funktionstests mit dieser Einheit zeigten, dass hiermit eine sehr gute Tränkung von 24k Kohlenstoff-faser-Rovings mit einem Epoxidharz unter industriellen Prozessbedingungen erreicht wird.

Die Einheit wurde mit einer 2 Komponenten (2K) -Harzdosieranlage gekoppelt, die in Abhängigkeit der Prozessgeschwindigkeit kontinuierlich Harz und Härter mischt und zudosiert. Zudem bietet ein solches System die Möglichkeit aktiv und präzise den Faser-Harz-Anteil zu beeinflussen. Dadurch können auch Harzsysteme mit einer sehr kurzen Topfzeit verarbeitet werden. Das entwickelte Imprägnierungssystem wurde auf dem vom Institut für Verbundwerkstoffe (IVW) entwickeltem Ringwickelkopf eingesetzt. Hiermit wurden Typ III Druckbehälter hergestellt. Die Ergebnisse der Behälterprüfung haben gezeigt, dass die gesetzlichen Anforderungen bezüglich Berstdruck erreicht wurden. Dabei konnte eine sehr gute Impägniergüte nachgewiesen werden.

Durch den Einsatz des entwickelten Imprägnierungssystems ist sowohl ein effizienter Einsatz des Matrixwerkstoffs, eine Minimierung der Nutzung von Lösungsmitteln als auch eine Reduzierung des Arbeitsaufwands für Vorbereitung und Reinigung im Vergleich zu einem traditionellen Harzbad festzustellen. Um die Auswirkung der Nutzung der Imprägniereinheit auf die Herstellungskosten eines konkreten Bauteils zu zeigen, wurde eine techno-ökonomische Analyse durchgeführt. Die Studie hat gezeigt, dass durch die Verwendung des entwickelten Systems die Herstellungskosten für Wickelbauteile reduziert werden können und gleichzeitig die Produktivität gesteigert wird.

Der entwickelte Imprägnierprozess ist geeignet für kontinuierliche Verarbeitungsprozesse, wie beispielsweise die Wickeltechnik, die Pultrusion oder die Herstellung von Prepregs. Die Umsetzung eines Simulationstools für den Imprägnierverlauf ermöglicht die Auslegung von Imprägniereinheiten basierend auf den jeweiligen Prozessanforderungen. Damit ist es möglich für gegebene Materialparameter, wie Garnfeinheit und Harzviskosität, die optimale Geometrie der Imprägniereinheit festzulegen und wichtige Prozessparameter, beispielsweise die maximale Prozessgeschwindigkeit, vorherzubestimmen.

Abstract

Unidirectional (UD) composites are the most competitive materials for the production of high-end structures. Their field of application spreads from the aerospace up to automotive and general industry sector. Typical examples of components made of unidirectional reinforced composite materials are rocket motor cases, drive shafts or pressure vessels for hydrogen storage. The filament winding technology, the pultrusion process and the tape placement are processes suitable for the manufacturing using UD semi-finished products. The demand for parts made of UD composites is constantly increasing over the last years. A key feature for the success of this technology is the improvement of the manufacturing procedure.

Impregnation is one of the most important steps in the manufacturing process. During this step the dry continuous fibers are combined with the liquid matrix in order to create a fully impregnated semi-finished product. The properties of the impregnated roving have a major effect on the laminate quality, and the efficient processing of the liquid matrix has a big influence on the manufacturing costs.

The present work is related to the development of a new method for the impregnation of carbon fiber rovings with thermoset resin. The developed impregnation unit consists of a sinusoidal cavity without any moving parts. The unit in combination with an automated resin mixing-dosing system allows complete wet-out of the fibers, precise calibration of the resin fraction, and stable processing conditions.

The thesis focuses on the modeling of the impregnation process. Mathematical expressions for the fiber compaction, the gradual increase of the roving tension, the static pressure, the capillarity inside the filaments of the roving, and the fiber permeation are presented, discussed, and experimentally verified. These expressions were implemented in a modeling algorithm. The model takes into account all the relevant material and process parameters. An experimental set-up based on the filament winding process was used for the validation of the model. Trials under different conditions have been performed. The results proved that the model can accurately simulate the impregnation process. The good impregnation degree of the wound samples confirmed the efficiency of the developed impregnation unit. A techno economical analysis has proved that the developed system will result to the reduction of the manufacturing costs and to the increase of the productivity.