

Harzinjektionsverfahren. Um Faser-Kunststoff-Verbunde effizient herzustellen, müssen Werkzeug und Prozess präzise auf die eingesetzten Materialien abgestimmt werden. Dies gilt nicht nur für die Harzsysteme, sondern auch für die Verstärkungstextilien. Mit innovativen Systemen kann das hydrodynamische Tränkungsverhalten der Textilien ermittelt werden. Damit lässt sich ihr Prozessverhalten umfassend beschreiben.

Präzise Charakterisierung von Verstärkungstextilien

DAVID BECKER
PETER MITSCHANG

Bei der industriellen Fertigung von Faser-Kunststoff-Verbunden (FKV) gehören Harzinjektionsverfahren wie das Resin Transfer Molding (RTM) zu den vorherrschenden Herstellungsverfahren. Dabei wird ein textiler Vorformling (Preform, **Bild 1**) durch Über- oder Unterdruck mit einem duroplastischen Harzsystem getränkt, das anschließend aushärtet. FKV bieten durch ihre sehr guten mechanischen Eigenschaften und die weitreichenden Möglichkeiten zur lastorientierten Auslegung ein sehr hohes Leichtbaupotenzial und vielfältige Anwendungsmöglichkeiten. Das größte Hindernis für eine Substitution von konventionellen Werkstoffen wie Metallen durch FKV, ist dabei in den hohen Kosten zu sehen. Da in nächster Zeit keine bemerkenswerten Preisrückgänge bei den Halbzeugen erwartet werden, sind deshalb in den nächsten Jahren vor allem Prozessentwicklungen erforderlich [1]. Dazu gehören insbesondere eine fundierte Werkzeug- und Prozessauslegung, die auf verlässlichen Simulationen sowie auf einer zuverlässigen Qualitätssicherung basiert. Beides erfordert stabile Systeme zur Ermittlung von Materialkennwerten, einerseits als Input für die Simulation und andererseits zur Absicherung eines gleich bleibenden Materialverhaltens im Prozess. Bei Kenntnis der Materialdaten kann die Imprägnierung durch eine Fließsimulation beschrieben werden (**Bild 1**).

ARTIKEL ALS PDF unter www.kunststoffe.de
Dokumenten-Nummer KU111624

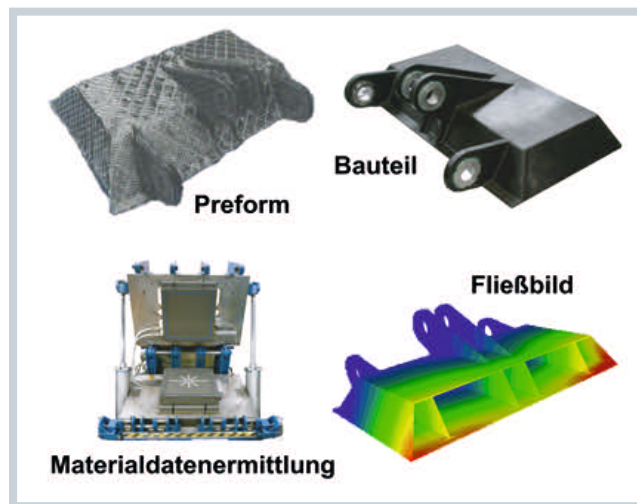


Bild 1. Permeabilitätsdaten, die mit dem System „2D-Capa-Perm“ des IVW ermittelt wurden, waren die Grundlage für die Fließsimulation eines Landeklappenträger der FACC AG (Bilder: IVW)

Kompaktierungsgrad beeinflusst Permeabilität

Bei FKV bilden die Eigenschaften von Faserstruktur und Matrixpolymeren die Eingangsparameter für eine Fließsimulation. Das Matrixpolymer – in diesem Falle ein duroplastisches Harzsystem – beeinflusst den Prozess durch sein Fließverhalten, das durch das Zusammenspiel der rheologischen und reaktionskinetischen Viskositätseigenschaften in seiner Zeit- und Temperaturabhängigkeit sehr komplex ist. Ein weiterer maßgeblicher Einflussfaktor ist das Tränkungsverhalten der Textilien. Oft ist hierbei nur von der Permeabilität die Rede, welche die Durchlässigkeit des Textils für das Harzsystem quantifiziert. In vielen Fällen reicht die Kenntnis der Permeabilität auch aus, um verlässliche Simulationen zu erhalten. Zur Permeabilitätsbestimmung stehen bereits hoch entwickelte und zuverlässige Messsysteme be-

reit [2]. Durch Studien können Effekte der Materialdrapierung und der Kompaktierung im Werkzeug berücksichtigt werden. Der Kompaktierungsgrad, meist quantifiziert durch den Faservolumengehalt (FVG), hat dabei einen sehr großen Einfluss auf die Permeabilität. **Bild 2** zeigt beispielhaft μ CT-Aufnahmen eines in Epoxidharz eingebetteten Glasfasergewebes bei zwei verschiedenen FVG. Es ist deutlich zu sehen, wie der für den Matrixfluss verfügbare Porenraum (schwarz) reduziert wird. Gleichzeitig ändert sich die Struktur des Gewebes, hier zu sehen an der Garnhöhe, die sich von durchschnittlich ca. 0,17 mm auf ca. 0,13 mm verringert. Diese Veränderungen verursachen einen starken Rückgang der Permeabilität [3]. Wenn im Verarbeitungsprozess Änderungen des FVG während der Imprägnierung auftreten, werden demnach zur Prozessbeschreibung weitere Informationen zum Kompaktierungsverhalten des Textils benötigt, →

die bisherige Systeme nicht bereitstellen können.

Aktuell favorisierte RTM-Varianten wie das Compression RTM (CRTM) zeichnen sich insbesondere durch kurze Imprägnierwege aus. Diese werden dadurch erreicht, dass das Textil durch die Dicke imprägniert wird. Die veränderlichen Drücke, die über das Werkzeug und das Harz auf das Textil übertragen werden, erzeugen prozessbedingt auch Änderungen des FVG. In Bild 3 ist dieses Phänomen beispielhaft für das CRTM dargestellt, bei anderen Harzinjektionsverfahren mit Dickenimprägnierung tritt es in analoger Weise auf.

Hydrodynamische Kompaktierung bei Harzinjektionsverfahren

Während der Injektion erlaubt das nicht vollständig geschlossene Werkzeug eine flächige Verteilung des Harzes über der Preform. Schließt sich das Werkzeug, wird das Harz in das Textil gedrückt. Dabei entstehen drei Zonen. Zone 1 ist eine Reinharzzone, in der ein homogener Harzdruck herrscht. In Zone 2, die von der Reinharzgrenze x_0 und der Fließfront x_f begrenzt wird, strömt das Harz durch das Textil. Der effektive Druck, der auf eine Einzellege wirkt, ergibt sich dabei zum einen aus der Druckdifferenz, die durch den Fließwiderstand der Einzellege selbst entsteht. Zum anderen kommt die Druckdifferenz hinzu, die durch den Fließwiderstand aller vorhergehenden Lagen entsteht, da diese sich an der Einzellege abstützen. Das Diagramm zeigt dies qualitativ. In Zone 3, in der sich trockenes Textil befindet, wirkt auf das Textil effektiv die

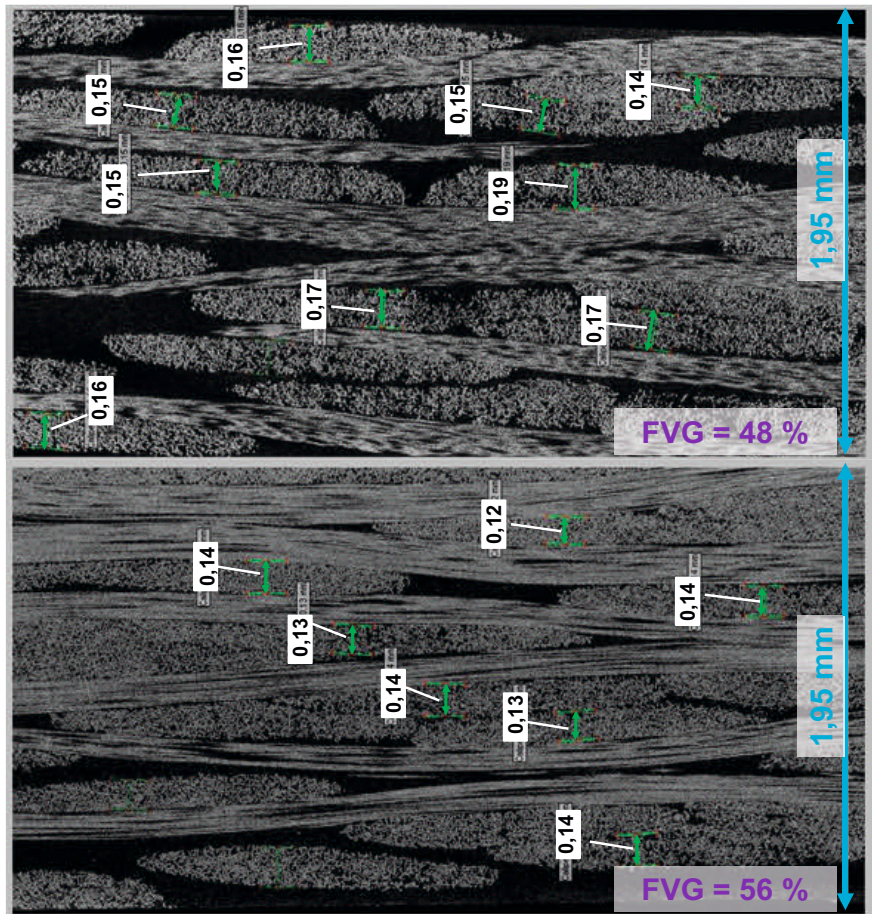


Bild 2. Die Kompaktierung führt zu einer Strukturveränderung des Glasfasergewebes in der Epoxidharz-Matrix. Für den Matrixfluss steht bei einem Faservolumengehalt von 56 % (unteres Bild) weniger Porenraum (schwarz) zur Verfügung als bei einem Faservolumengehalt von 48 % (oberes Bild). Gleichzeitig verringert sich die durchschnittliche Garnhöhe von ca. 0,17 mm auf ca. 0,13 mm

Druckdifferenz zwischen dem Reinharzdruck in Zone 1 und dem atmosphärischen Druck in Zone 3. Das Textil wird dabei gegen das Unterwerkzeug gedrückt (x_w).

In diesem Falle reicht es nicht aus, die Dickenpermeabilität in Abhängigkeit des FVG zu kennen. Es muss auch bekannt sein, welcher FVG sich bei welchem effektiven Druck einstellt. Der effektive Druck ist allerdings wiederum von der Permeabilität abhängig, die durch Kompaktierung stark beeinflusst wird. Permeabilität, effektiver Druck und FVG beeinflussen sich also gegenseitig und stehen in einem komplexen Zusammenhang. Diese Zusammenhänge bestimmen das hydrodynamische Kompaktierungsverhalten. Bisherige Ansätze zur numerischen Modellierung des Phänomens greifen häufig auf Permeabilitäts- und Kompaktierungswerte zurück, die getrennt voneinander ermittelt wurden. Auf diese Weise wird jedoch die gegenseitige Beeinflussung nicht berücksichtigt. Erste Versuche haben gezeigt, dass beispielsweise die Strömung einen Einfluss auf das Kompaktierungsverhalten hat, den die Kompaktierungsversuche auf einer Universalprüfmaschine nicht abbilden können.

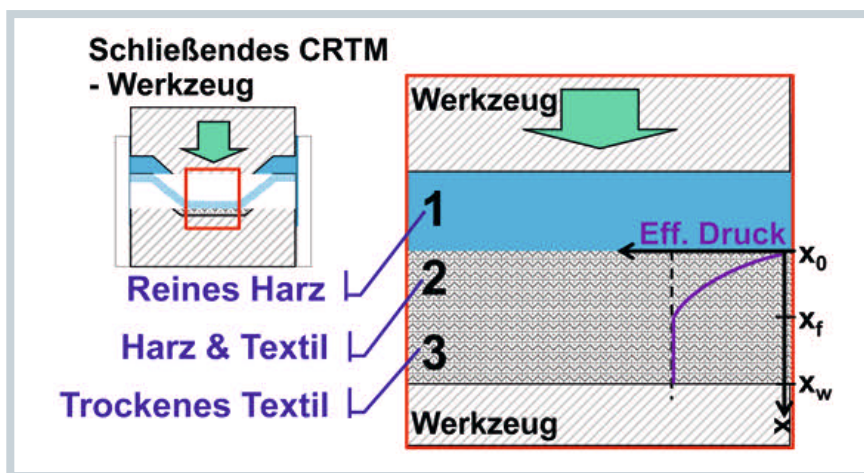


Bild 3. Beim CRTM verteilt sich das Harz zunächst flächig über der Preform. Durch Schließen des Werkzeugs wird das Harz in das Textil gedrückt. Dabei entstehen drei Zonen. Zone 1 ist eine Reinharzzone, in der ein homogener Harzdruck herrscht. In Zone 2 strömt das Harz durch das Textil. In Zone 3 befindet sich trockenes Textil

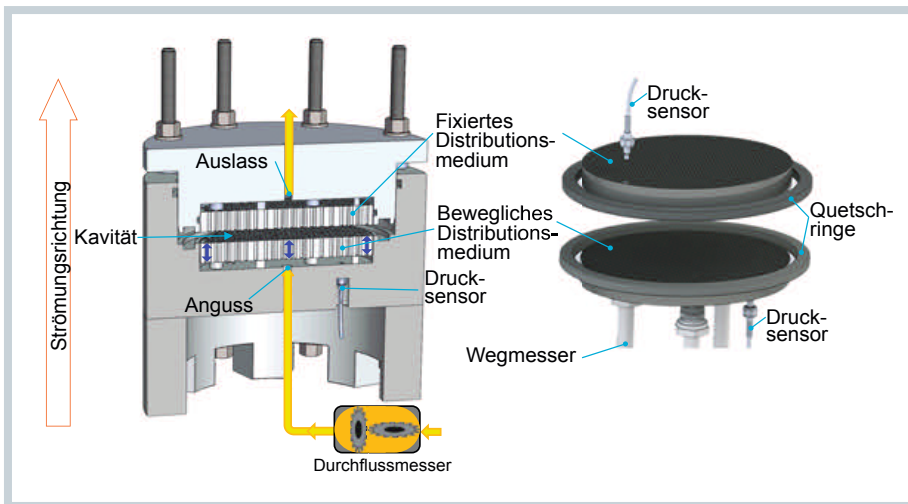


Bild 4. Mit dem neu entwickelten Messsystems (links) kann das hydrodynamische Tränkungsverhalten realitätsnah nachgebildet werden. Das rechte Bild zeigt die Kavität und die Sensoren ohne Messzelle

Bild 5. Hauptbestandteile des Messsystems „HyKoPerm“



Software Messelektronik Messzelle

Messzelle erfasst das hydrodynamische Textilverhalten

Bei der Institut für Verbundwerkstoffe GmbH (IVW), Kaiserslautern, wurde deshalb ein neues System aufgebaut, mit dem die Prozessbedingungen realitätsnah nachgebildet werden und das hydrodynamische Textilverhalten vollständig erfasst wird. Dieses neu entwickelte System mit der Bezeichnung HyKoPerm kann alle benötigten Kennwerte simultan ermitteln und so die Interdependenzen erfassen. Hierzu verfügt die Messzelle (**Bild 4**) über eine Kavität zur Probenaufnahme, die durch zwei Distributionsmedien umfasst wird. Diese Distributionsmedien stellen eine flächige und gleichmäßige Durchströmung in Dickenrichtung sicher. Quetschringe verhindern Leckströme in Ebenenrichtung. Drucksensoren in der oberen und unteren Verteilerkammer erfassen kontinuierlich den Druckabfall am Textil. Als Messfluid wird Rapsöl verwendet, weil es bei Raumtemperatur eine ähnliche Viskosität und Oberflächenspan-

nung aufweist wie ein typisches Harzsystem bei Verarbeitungstemperatur.

Ein Durchflussmesser am Eingang liefert Informationen zum Volumenstrom, sodass die Dickenpermeabilität kontinuierlich berechnet werden kann. Die Berechnung erfolgt mit Hilfe des Gesetzes von Darcy, das Volumenstrom (q), Druckabfall (Δp), Viskosität (η), durchströmte Querschnittsfläche (A), Fließlänge (Δx) und Permeabilität (K) in Beziehung setzt:

$$K = \frac{q \cdot \eta \cdot \Delta x}{A \cdot \Delta p}$$

Der innovative Kern des Systems liegt in der beweglichen Lagerung des unteren Distributionsmediums. Diese ist so ausgelegt, dass das Distributionsmedium immer am Textil anliegt und jeder Bewegung folgt, ohne selbst die Messung zu beeinflussen. Wenn die Druckdifferenz zu einer Kompaktierung des Textils führt, folgt das Distributionsmedium dieser Bewegung. Dies wird durch drei Wegmesser (LVDTs) erfasst. So kann zu jedem Zeitpunkt der aktuelle FVG berechnet werden. Die →

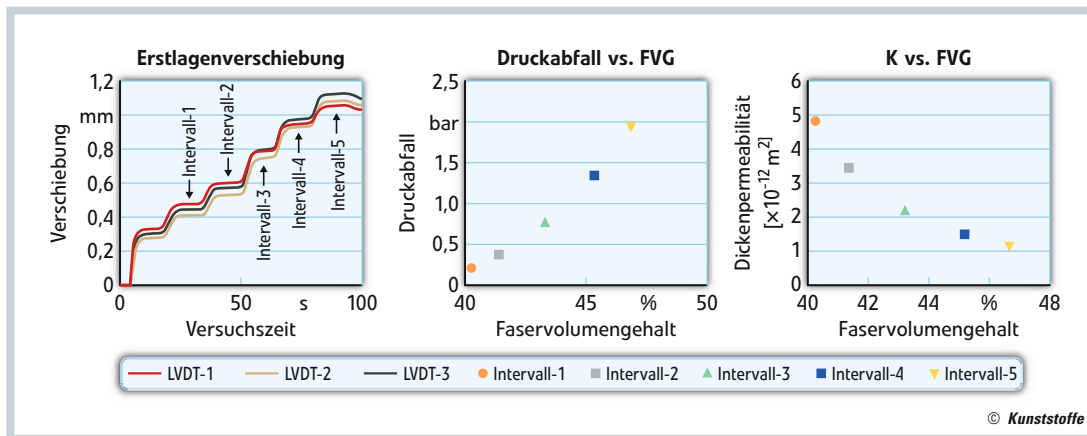


Bild 6. Durch die Erstlagenverschiebung (linkes Diagramm) erhöht sich der Faservolumengehalt (mittleres Diagramm). Der Lagenaufbau wurde in fünf Schritten kompaktiert. Durch diese Kompaktierung reduziert sich die Dickenpermeabilität von Intervall zu Intervall (rechtes Diagramm)

Berechnung der Dickenpermeabilität, die auf die Fließlänge – in diesem Falle die Höhe des Lagenaufbaus – zurückgreift, kann so korrigiert werden. Außerdem kann durch die messtechnische Erfassung der Verschiebung die Dickenpermeabilität zum aktuellen FVG zugeordnet werden. Verschiedene initiale Kavitätshöhen können eingestellt werden, um die Vorkompaktierung des Textils im Werkzeug nachzubilden. Das Gesamtsystem „HyKo-Perm“ ist in Bild 5 dargestellt.

Reproduzierbare Kennwertermittlung

Durch eine programmgesteuerte Regeleinrichtung erlaubt es die LabVIEW-basierte Software, diverse Druckdifferenzen und Volumenströme am Textil gezielt einzustellen. Eine hohe Effizienz in der Messung wird durch frei wählbare Programme erreicht, die nacheinander verschiedene Druck- und Volumenstromstufen anfahren und selbständig prüfen, wann sich ein stationärer Strömungszustand eingestellt hat. Für jede Stufe kann so eine Mittelung der erfassten Dickenpermeabilitätswerte erfolgen. Damit liefert jeder Versuch eine Vielzahl von Datengruppen und zeigt Zusammenhänge zwischen Druckdifferenz, Fließgeschwindigkeit, FVG, Viskosität und vor allem Dickenpermeabilität auf. Es werden also vollständige Datensätze gewonnen, die das hydrodynamische Tränkungsverhalten beschreiben und dabei alle inhärenten Interdependenzen berücksichtigen. Durch die stufenweise Erhöhung der Druckdifferenz in Intervallen kommt es zu einer kontinuierlichen durch das Fluid getriebenen Steigerung der Kompaktierung (Bild 6) – hier dargestellt durch die Erstlagenverschiebung (linkes Diagramm) und die daraus resultierende Erhöhung des FVG (mittleres Diagramm). In diesem Fall wurde der Lagenaufbau ausgehend von ei-

nem FVG von ca. 37 % bei 0 bar Druckdifferenz auf ca. 47 % bei 2 bar Druckdifferenz in fünf Schritten kompaktiert. Durch diese Kompaktierung hat sich die Dickenpermeabilität von Intervall zu Intervall um schließlich etwa 80 % reduziert (rechtes Diagramm). Dies bedeutet anschaulich, dass der Imprägniervorgang überproportional an Geschwindigkeit einbüßt, da die Kompaktierung steigt und die Permeabilität sinkt.

Potenziale für FKV-Fertigung

Auf diese Weise lassen sich Materialien reproduzierbar untersuchen, etwa zur Generierung von Daten für eine Simulationsdatenbank. Diese kann als Basis für die Konstruktion des Werkzeugs sowie dessen Peripherie, aber auch für die Material- und Prozessparameterauswahl dienen. Zudem ist der Einsatz des Systems in der Qualitätssicherung möglich. Hier kann schnell und mit wenig Aufwand geprüft werden, ob die in der Serienfertigung eingesetzten Materialien ein gleich bleibendes Prozessverhalten aufweisen. Lieferungen mit zu großen Abweichungen, die im Prozess zu reduzierter Qualität oder gar Fehlstellen und Ausschuss führen würden, können so bereits beim Wareneingang abgewiesen werden. Dies erlaubt eine genauere Taktung der Fertigung, sodass sich die Effizienz und damit die Wirtschaftlichkeit erhöht. Gleichzeitig bietet das System weit reichende Möglichkeiten zur Erforschung der Einflüsse von prozess- und textilbezogenen Parametern auf das hydrodynamische Tränkungsverhalten. Diese Ergebnisse können schon bei der Textilauswahl und der Prozessentwicklung miteinbezogen werden [4]. ■

DANK

Die Autoren möchten sich bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft bedanken, für die Förderung

des Projekts „Einfluss der Preformtechnik auf die 3-D-Permeabilität und den Fließfrontverlauf bei Flüssigimprägnierverfahren“ (Mi-647/15-2).

LITERATUR

- 1 Lässig, R.; u.a.: Serienproduktion von hochfesten Faserverbundbauteilen. Roland Berger Strategies, VDMA, 09/2012
- 2 Arnold, M.; Rieber, G.; Mitschang, P.: Permeabilität als Schlüsselparameter für kurze Zykluszeiten. *Kunststoffe* 102 (2012) 3, S. 45-48
- 3 Rieber, G.: Einfluss von textilen Parametern auf die Permeabilität von Multifilamentgeweben für Faserverbundkunststoffe. TU Kaiserslautern 2011
- 4 Becker, D.; Brzeski, M.; Linster, D.; Mitschang, P.: Preform compaction and deformation during through-the-thickness impregnation. ICCM19, Montreal, 28.07.2013-02.08.2013

DIE AUTOREN

DIPL.-WIRTSCH.-ING. DAVID BECKER, geb. 1987, ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Kompetenzfeld „Imprägnier- und Fügetechnologien“ an der Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, Kaiserslautern.

PROF. DR.-ING. PETER MITSCHANG, geb. 1960, ist technisch-wissenschaftlicher Direktor der Abteilung Verarbeitungstechnik an der Institut für Verbundwerkstoffe GmbH und Universitätsprofessor für „Verarbeitungstechnik der Faser-Kunststoff-Verbunde“ an der Technischen Universität Kaiserslautern.

SUMMARY

PRECISION CHARACTERIZATION OF REINFORCEMENT FABRICS

RESIN INJECTION PROCESS. Efficient production of fiber-polymer composites requires that the tool and process be precisely matched to the materials used. This applies not only to the resin system, but also to the reinforcing textiles. Innovative systems enable the hydrodynamic impregnating performance of the textiles to be determined. This affords a way of comprehensively describing their processing behavior.

Read the complete article in our magazine

Kunststoffe international and on www.kunststoffe-international.com