

Markus Henne und Lukas Wielatt

# Beschleunigen nicht nur im Wildwasser

Verbundwerkstoffe



Institut für Werkstofftechnik  
und Kunststoffverarbeitung

Institut für Werkstofftechnik  
und Kunststoffverarbeitung (IWK)  
HSR Hochschule für Technik Rapperswil  
Oberseestrasse 10, Postfach 1475  
CH-8640 Rapperswil  
T +41 (0)55 222 47 70  
F +41 (0)55 222 47 69  
iwk@hsr.ch  
www.iwk.hsr.ch

# Beschleunigen nicht nur im Wildwasser

**Verbundwerkstoffe.** Am Beispiel eines Wildwasserpaddels wurden verschiedene Möglichkeiten zur Reduktion der Formfüll- und Aushärtezeit des Resin Transfer Molding (RTM)-Prozesses untersucht. Neben der Materialwahl lag der Schwerpunkt auf der Entwicklung einer geeigneten Werkzeugtechnik. Aus dem Projekt sind verschiedene serienreife Technologien für das RTM-Verfahren hervorgegangen, die sich industriell einsetzen lassen.

**MARKUS HENNE  
LUKAS WIELATT**

**B**ei bewegten und beschleunigten Systemen kommen aus energie-technischen Gründen vermehrt Leichtbauweisen zur Anwendung. Aufgrund der hohen gewichtsspezifischen Festigkeit und Steifigkeit bietet sich der Einsatz von Faserverbundwerkstoffen an. Als Produktbeispiele zu nennen sind Komponenten aus dem Automobilrennsport, der Luft- und Raumfahrt, stark beschleunigte Komponenten aus der Maschinenindustrie, Sportboote, Skier und Snowboards usw. Für die Herstellung schalenförmiger, langfaserverstärkter Kunststoffstrukturen kommen folgende Fertigungsverfahren zur Anwendung:

- Handlaminieren für Kleinstserien mit geringen Qualitätsanforderungen,

- Harzinjektionsverfahren für tragende, qualitativ hochwertige Bauteile für mittlere Serien (unter anderem Resin Transfer Molding – RTM),

- Prepreg-Autoklav-Verfahren für hochstrukturelle Bauteile und für Spezialanwendungen (insbesondere Luft- und Raumfahrt).

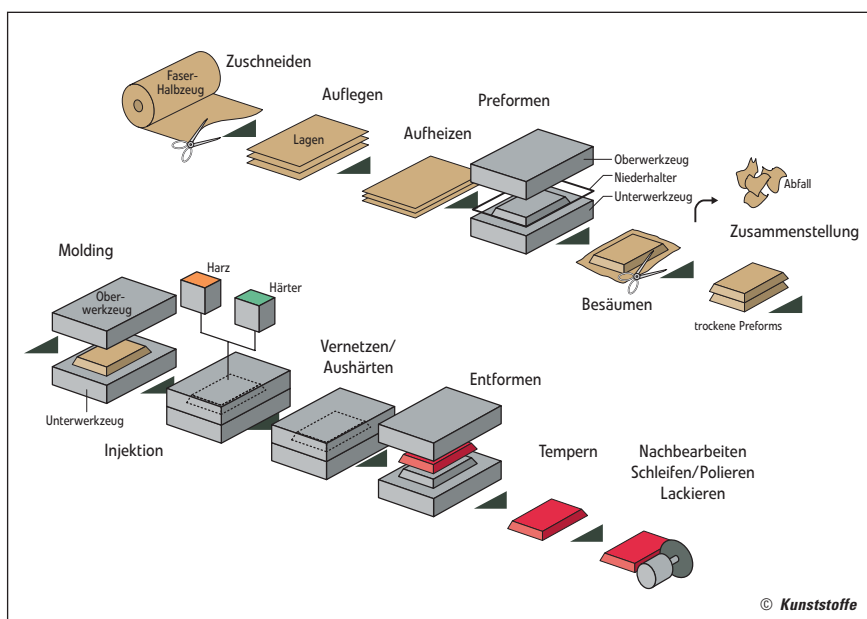
Die aufwendige Materialbewirtschaftung von Prepregs und der hohe Investitionsbedarf bei Autoklaven sprechen im Falle von Hightech-Anwendungen aufgrund des zunehmenden Kostendrucks für die einfachere, aber qualitativ nahezu ebenbürtige RTM-Technologie (Bild 1).

Wie der Prozessablauf zeigt, ist dem eigentlichen Infusionsprozess ein Preformingprozess zur Herstellung von dreidimensionalen Fasergebildn vorgelagert. Im Bild wird das Preforming der trockenen Verstärkungsfasern durch einen Umformprozess durchgeführt. Alternativ dazu können solche Strukturen auch durch Flechten, Stricken oder mit Nähetechniken hergestellt werden. Nach dem Einle-

gen der Verstärkungsfasern in ein zweiteiliges Werkzeug wird ein reaktives 2-Komponenten-Harzsystem (typischerweise Epoxide) in die Form injiziert. Das niederviskose Harz fließt unter Druck durch die Fasern und tränkt diese. Nach der Injektion härtet das Harz unter einer exothermen chemischen Reaktion aus, und das konsolidierte Bauteil kann entnommen werden.

Verschiedene Studien weisen einhellig darauf hin, dass die RTM-Technologie vermehrt für die Herstellung von strukturellen Faserverbundbauteilen zur Anwendung kommt. Eine effiziente Prozessführung setzt aber eine geeignete Werkzeugtechnik voraus. Diese ist heute jedoch noch nicht vollumfänglich verfügbar. Das ist einer der Hauptgründe, warum dieser Prozess bis heute noch nicht den großen Durchbruch geschafft hat.

Bild 2 zeigt den RTM-Prozessablauf mit den heute benötigten Zeitschritten sowie das Potenzial zur Reduktion der Zykluszeit bei optimaler Prozessführung. Es ist



**Bild 1. Schematische Darstellung des RTM-Prozesses**

zu erkennen, dass bei konventioneller Fertigungstechnologie die Injektion und das Aushärten des Harzes 70 % der gesamten Zykluszeit beanspruchen. Das Einlegen des Preforms, das Entformen und die Reinigung der Form teilen sich den Rest der Zeit. Die Injektionszeit bestimmt maßgebend die Wahl des Reaktionsharzes. Je kürzer die Injektionszeit, desto schneller aushärtende Harze können verarbeitet werden. Darum werden in der hier vorgestellten Untersuchung vor allem Prozessschritt 3 und 4 näher untersucht.

Details zu den theoretischen Überlegungen zur RTM-Prozessoptimierung können im Bericht „Massnahmen zur Reduktion der Formfüllzeit“ [1] nachgelesen werden. Die Untersuchung kommt zu folgenden Erkenntnissen:

■ Bei der Wahl der Faserstruktur muss ein Kompromiss zwischen den mecha-

nischen Eigenschaften und der Imprägnierfähigkeit gemacht werden.

■ Durch das Einbringen von Lagen mit höherer Permeabilität kann die Fließgeschwindigkeit deutlich erhöht werden.

■ Die Temperatur hat auf das Verhalten des Harzsystems entscheidenden Einfluss. Bei hohen Temperaturen wird das Harz/Härter-Gemisch niedrigviskoser, was die Injektion begünstigt. Gegenläufig wird aber die Aushärtung beschleunigt.

■ Durch werkzeugtechnische Maßnahmen, wie beispielsweise die Kaskadeninjektion, lassen sich sehr lange Fließwege vermeiden und somit die Injektionszeit verkürzen.

Um die Erkenntnisse der beschriebenen Studie umzusetzen und zu verifizieren, wird ein Wildwasserpaddel als typisches

Faserverbundbauteil aus dem Sportbereich gewählt. Das Bauteil wird für einen Einsatz im Wildwasser mechanisch ausgelegt und bezüglich des Fertigungsverfahrens optimiert.

## Gestaltung des Wildwasserpaddels

Ein zentrales Gestaltungsmerkmal des neu entworfenen Paddels ist die zweiteilige Bauart mit Stoß in der Mitte des Schafts. Herkömmliche Paddel in dreiteiliger Bauweise werden am Übergang von Blatt zu Schaft aus drei Teilen zusammengefügt (Bild 3).

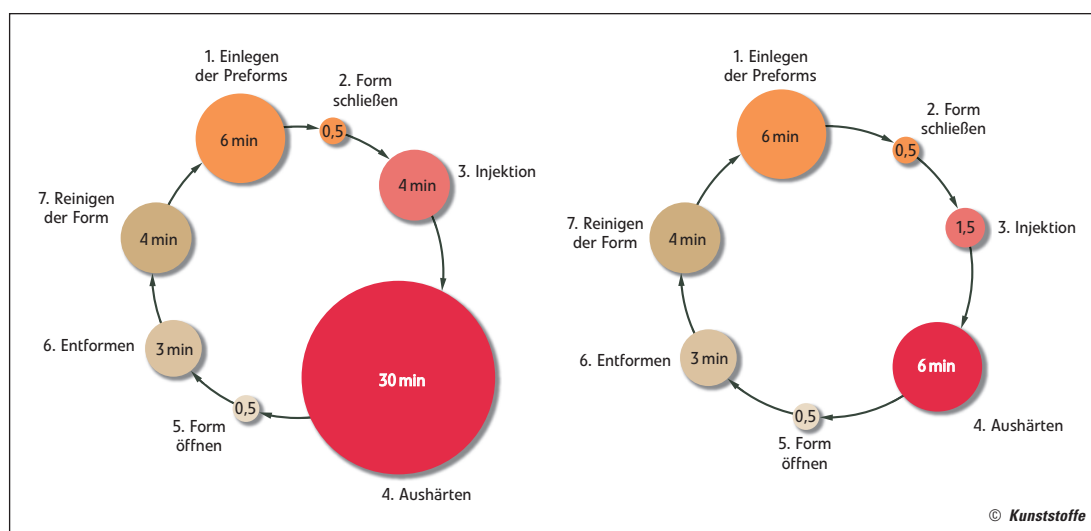
Der Übergang von Paddelblatt zum Schaft ist stark beansprucht, was im Falle der dreiteiligen Bauweise zu Spannungsspitzen und großen Verformungen an der Verbindungsstelle führen kann. Im Falle der zweiteiligen Bauweise kommt die Verbindungsstelle in einem wenig beanspruchten und wenig bewegten Bereich zu liegen, was Vorteile bezüglich Festigkeit und Handling mit sich bringt.

Die Geometrie des Paddelblatts wird durch folgende Gegebenheiten definiert:

■ Damit beim Paddeln kein Torsionsmoment im Schaft entsteht, sind die Blätter in Richtung des Schafts in zwei flächengleiche Hälften geteilt. Das Blatt ist ungleichseitig gestaltet, um den ergonomiebedingten asymmetrischen Eintauchwinkel auszugleichen.

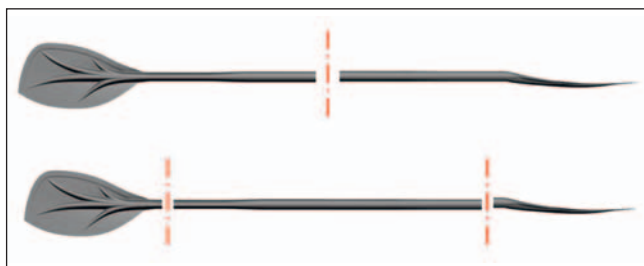
■ Durch die schmale Gestaltung der Blattinnenseite (Blattoberseite in der Ansicht von Bild 3) wird eine bootsnahe Paddelführung ermöglicht.

■ Das breite Blatt im unteren Bereich sorgt für gutes Ansprechverhalten im Wasser und zu einer Verkürzung des gesamten Paddels (volle Kraftüber-



**Bild 2. Zykluszeiten im RTM-Prozess heute (links) und zukünftig (rechts)**





**Bild 3. Paddel in zweiteiliger (oben) und dreiteiliger (unten) Bauart**

tragung auch bei geringer Eintauchtiefe).

- Die Zonen mit Kontakt zum Grund und Boot werden mit großen Radien versehen.

Die ausgeprägte Mittelrippe im Blattzentrum erlaubt eine optimale Führung im Wasser. Die Rippe verläuft als Verlängerung des Schafts in das Blatt und nimmt die Torsions- und Biegemomente auf. Bionisch geformte Rippen ermöglichen eine steife Aufspannung der Flächen, wie sie bei Blattstrukturen oder Entenfüßen vorliegen.

Steifigkeits- sowie Festigkeitsberechnungen und Überlegungen betreffend Füllverhalten im RTM-Prozess definieren den Aufbau des Preforms. Aufgrund der komplexen Form und der hohen Festig-

die Mittelrippe der Paddelfläche verläuft. Der Silikonkern wird mit Flechtschläuchen überzogen, auf welche die strukturellen unidirektionalen Lagen aufgerollt werden. Abgeschlossen wird der Preform wieder mit einem Flechtschlauch, der das gesamte Faserpaket zusammenhält (Bild 6). Die große spezifische Wärmedehnung des Silikons führt während des Prozesses zu einer Kompression der Fasern in Dickenrichtung, was sich positiv auf die mechanischen Eigenschaften des Faserverbundwerkstoffs auswirkt.

Für den RTM-Prozess ist die Viskosität des Harzsystems ein entscheidender Faktor, dessen Relevanz mit steigendem Faservolumengehalt zunimmt. Ein ideales Harz hat während der Injektion eine kons-

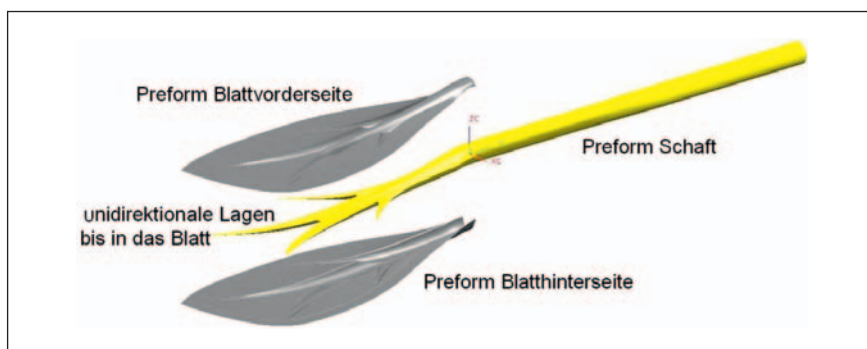
stant niedrige Viskosität. Sobald die Injektion abgeschlossen ist, sollte das Harz schlagartig gelieren und aushärten. In einer vorgängigen Studie [1] wurden verschiedene Harzsysteme untersucht und verglichen. Das Harzsystem Araldite HY564/Aradur XB3458 (Hersteller: Huntsman) wird aufgrund des Viskositäts- und Aushärteverhaltens und der guten mechanischen Eigenschaften ausgewählt.

### Prozessoptimierung durch Simulation

In dieser Arbeit wurde eine neue Software zur Simulation von Harzinjektionsvorgängen entwickelt, die auf der Idee der zellulären Automaten basiert [2]. Der hier verwendete zelluläre Automat wurde speziell für schalenförmige Bauteile (2,5-dimensional) entwickelt, wie sie bei faserverstärkten Kunststoffstrukturen oft vorliegen. Ein entscheidender Vorteil der Simulation mit zellulären Automaten gegenüber der Finite Elemente Methode ist, dass der Benutzer während der Rechnung in die Simulation eingreifen und die Randbedingungen ändern kann. So kann die RTM-Injektion manuell einfach optimiert werden [3].

Die Formfüllzeit ist neben der Permeabilität auch abhängig von der Länge der Fließwege. Da der Schaft aus Qualitätsgründen in Längsrichtung imprägniert werden muss (eine Querimprägnierung führt zu einem unkontrollierten Zusammenfließen der Füllfronten), bietet sich eine Kaskadeninjektion an. Mit dieser Injektionsstrategie können die Fließwege kurz gehalten werden.

Die Injektion beginnt beim Injektionspunkt 1, der sich am Ende der Schaftseite befindet (Bild 7). Der Harzfluss im



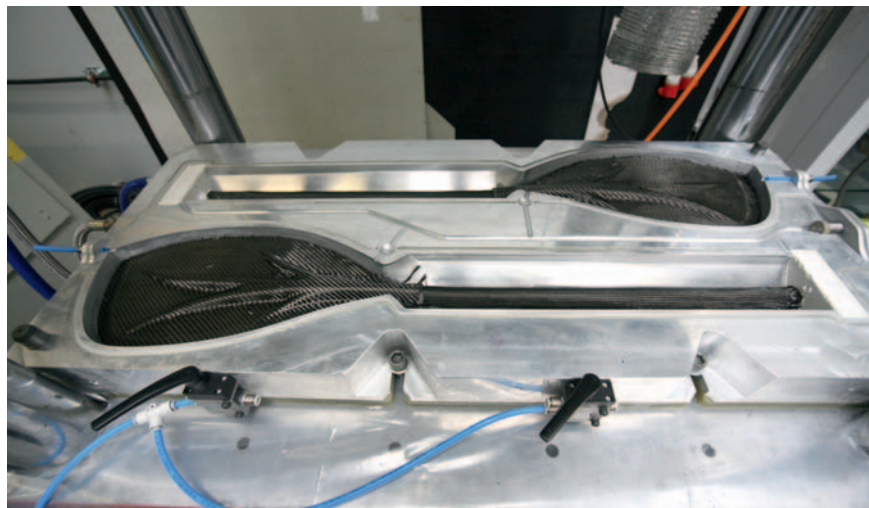
**Bild 4. Zusammenstellung der Preformteile**

keitsanforderungen werden die Preforms aus verschiedenen Teilen mit abgestuften Überlappungen zusammengesetzt. Bild 4 zeigt die verschiedenen Teile des Preforms.

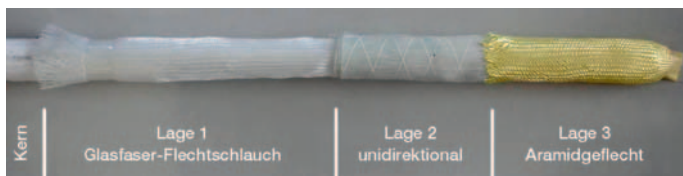
Alle Teile des Preforms werden nach CAD-Daten auf einem Schneidisch gefertigt. Die Wanddicken werden basierend auf den Ergebnissen der Festigkeitsanalyse festgelegt: 1,5 mm in Schaft und Blatt, 2,5 mm in den Verstärkungsrippen.

Für die Paddelblätter werden schalenförmige Preforms für die Vorder- und Rückseite mit einer Randzonenverstärkung versehen (Bild 5).

Im Gegensatz zum monolithischen Blatt ist der Schaft als rohrförmiger Körper ausgebildet. Für die Fertigung wird ein Silikonkern verwendet, der bis in



**Bild 5. Preform mit Randzonenverstärkung am Blatt (hier Kohlefaser-Variante) eingelegt in das zweiteilige Aluminiumwerkzeug**



**Bild 6. Aufbau Schaft-Preform (hier Glasfaser-Variante)**

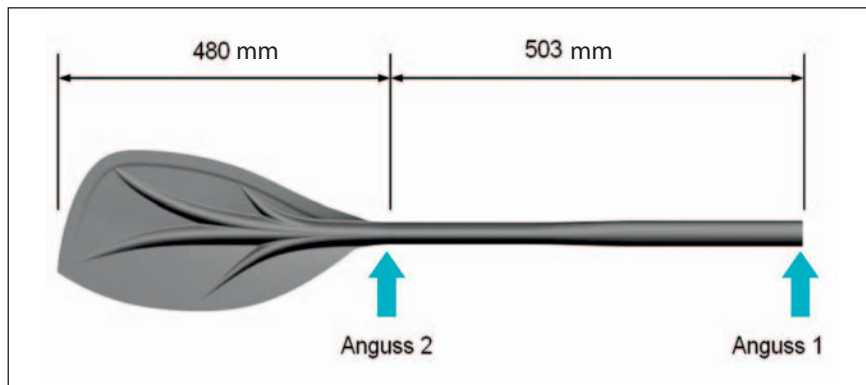
Die Tauchkantentechnologie ermöglicht eine einfache und schnelle Belegung des Werkzeugs mit den Preforms sowie eine endkonturnahe Fertigung. Zum schnellen und vollständigen Füllen der Form wird die Kavität vor der Injektion

langen, dünnwandigen Schaft wird durch die unidirektionalen Faserlagen begünstigt, die bis in die Rippen des Paddelblatts laufen. Sobald die Füllfront den Injektionspunkt 2 erreicht (Übergang Schaft-Schaukel), wird dieser geöffnet und frisches Harz injiziert. Bild 8 zeigt den Verlauf der Ventilsteuerung der Angusspunkte, den Volumenstrom sowie den Druckverlauf. Mit der hier skizzierten Injektionsstrategie wird erwartet, dass die Injektions- und Aushärtezeit auf unter 10 Minuten gesenkt werden kann.

Die Resultate aus der Füllsimulation in Bild 9 zeigen, dass das Bauteil problemlos gefüllt werden kann. Mit der gewählten Injektionsstrategie sind keine Luft-einschlüsse zu erwarten.

### Werkzeugtechnik

Die Werkstoffwahl des RTM-Werkzeugs beeinflusst die Qualität der produzierten Bauteile und andererseits die Wirtschaftlichkeit des ganzen Prozesses. Für das Pad-



**Bild 7. Injektionspunkte**

delwerkzeug wird Aluminium verwendet. Aluminiumwerkzeuge haben eine ausreichende Standzeit für mittlere Stückzahlen, weisen hervorragende Wärmeleitungseigenschaften auf und garantieren eine gute Oberflächengüte der Bauteile. Das Paddel wird in zwei Hälften in einem Familienwerkzeug gefertigt. Bild 10 zeigt die untere Hälfte des Tauchkantenwerkzeugs.

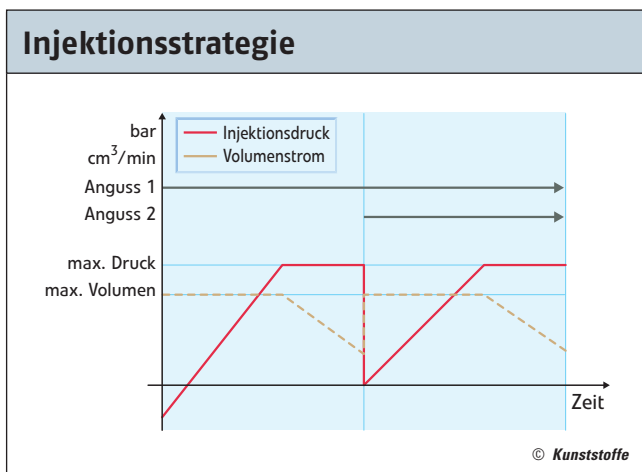
evakuiert. Das Harz wird, wie bei der Injektionsstrategie beschrieben, über ein Kaskadenangussystem injiziert. Die Angusspunkte sind gemäß der Prozesssimulation platziert und mit dem zentralen Angusskanal verbunden. Die Angusskanäle verlaufen in der Trennebene und werden über ein eigens dafür entwickeltes Ventilsystem (Bild 11) ein- und ausgeschaltet.

Für eine effiziente RTM-Prozessführung wurde ein spezieller 2K-Mischkopf entwickelt, der direkt an einer oder mehreren Positionen auf dem RTM-Werkzeug angebracht werden kann (Bild 12). Nach einer Injektion reinigt sich der Injektionskopf selbst, d.h. die Wegwerfteile (statische Mischer, Schlauchverbindungen zwischen Injektionswerkzeug und RTM-Werkzeug) und mühseligen Reinigungsschritte entfallen. Zwischen den Injektionen werden Harz und Härter getrennt rezirkuliert. Der Injektionskopf wurde in Zusammenarbeit mit ATP Kunststofftechnik AG in Marbach/Schweiz entwickelt und vor Kurzem in das Produktprogramm von ATP aufgenommen.

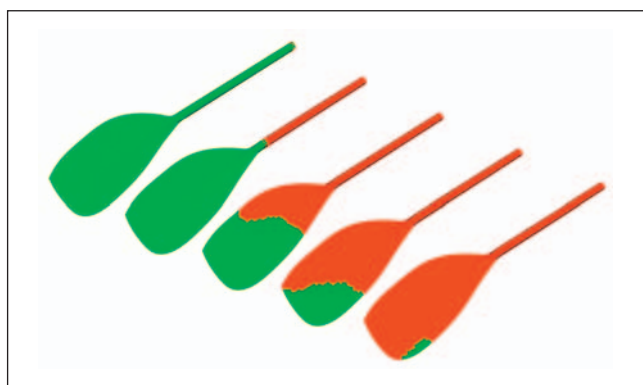
Temperiert wird das Werkzeug über zwei Wasserkreisläufe in Ober- und Unterwerkzeug. Die leistungsfähige Heizung und die hohe Wärmeleitfähigkeit vom Aluminium lassen einen variothermen Prozess zu. Das Werkzeug ist durch druckfeste Faserverbundplatten-Werkzeugträger (2000 kN Presse) isoliert.

### Prozessversuche

Aufgrund der oben ausgeführten Überlegungen wurde die Prozessführung wie folgt festgelegt:



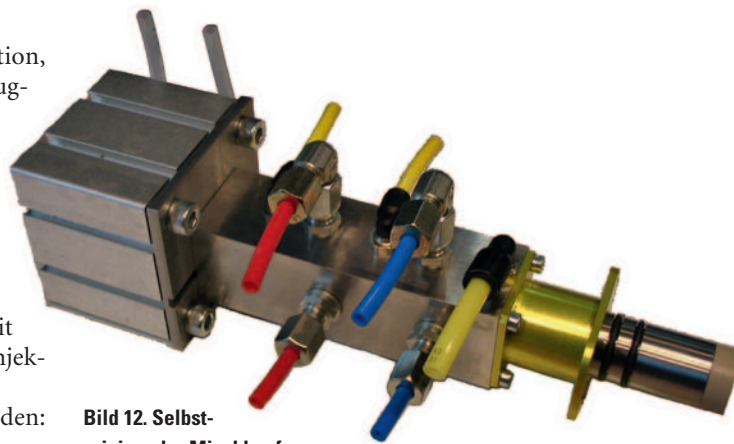
**Bild 8. Schematische Darstellung der Injektionsstrategie**



**Bild 9. Verlauf der Füllfront durch die Zellen während der Injektion**

1. Injektionsanlage auf Rezirkulation, Harztemperatur 60°C, Werkzeugtemperatur 70°C.
2. Preform einlegen, Membranventile öffnen.
3. Presse schließen (2000 kN), Membranventile schließen.
4. Vakuum 150 mbar, Temperiergerät auf 90°C stellen.
5. Druckabhängige Injektion mit 3,9 g/s und einem maximalen Injektionsdruck von 20 bar.
6. Nachdem 220 g injiziert wurden: Membranventile öffnen.
7. Vakuum bei Harzaustritt an Vakuumpunkten abstellen.
8. Bei 450 g Harzmenge Vakuumschläuche abklemmen.
9. Nachdrücken mit 50 bar (Minimierung des Schwunds).
10. Aushärten.
11. Presse öffnen, Bauteil entformen.

Mit einem vorgefertigten Preform lässt sich das Werkzeug leicht belegen. Wird nach dem vorgängig beschriebenen Prozessablauf gearbeitet, können mit der vorgeschlagenen Prozessführung und der verwendeten Werkzeugtechnik die Injektion, Aushärtung und Entformung in 10 Minuten durchgeführt werden. Beide Ka-



**Bild 12. Selbstreinigender Mischkopf**

vitäten werden zu 100 % gefüllt. Die Benetzung der Fasern und die resultierende Bauteiloberfläche sind hervorragend. Trotz kleinerer Hinterschnitte und der Krümmung des Schafts im Blattbereich lässt sich der Silikonkern gut entformen. Die Nachbearbeitung zum fertigen Bauteil (Paddel) sind minimal.

### Ausblick

Mit dem Projekt sind große Fortschritte in Richtung Wirtschaftlichkeit des RTM-Prozesses erzielt worden. Die verkürzte Zykluszeit ermöglicht eine viel größere

Anzahl Abformungen pro Werkzeug und somit größere Stückzahlen.

Die gewonnenen Erkenntnisse fließen in die laufenden und kommenden Industrieprojekte ein und werden zu einer vermehrten Anwendung des RTM-Prozesses führen. ■

### DANK

Wir danken der Werner Steiger Stiftung, die das Projekt finanziell unterstützt hat.

### LITERATUR

- 1 Bürzle, W.; Henne, M.: Massnahmen zur Reduktion der Formfüllzeit, HSR, 2006
- 2 Richter, K.; Rost, J.-M.: Komplexe Systeme. Fischer Taschenbuch Verlag, 2004
- 3 Henne M.: Simulation of LCM Process with Cellular Automats, Proceeding SAMPE Students Conference, HSR, November 2006

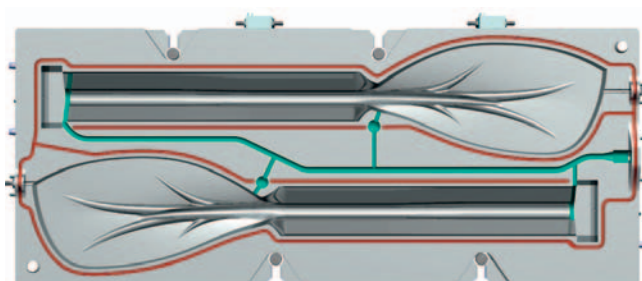
### DIE AUTOREN

PROF. DR. SC. TECHN. MARKUS HENNE, geb. 1972, ist stellvertretender Institutsleiter und Dozent für Maschinentechnik am Institut für Werkstofftechnik und Kunststoffverarbeitung (IWK) der Hochschule für Technik in Rapperswil; markus.henne@hsr.ch  
 DIPL.-ING. (FH) LUKAS WIELATT, geb. 1979, ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am IWK; lukas.wielatt@hsr.ch

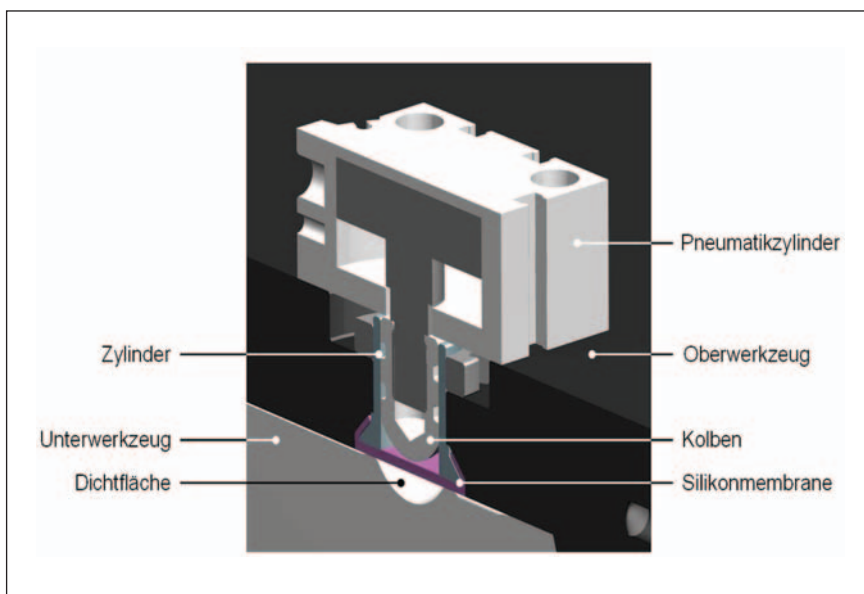
### SUMMARY KUNSTSTOFFE INTERNATIONAL

## Fast Forward – Not only in White-Water Canoeing

**COMPOSITES.** A whitewater paddle served as a model for studying various ways of reducing the mold-filling and curing time of resin transfer molding (RTM). In addition to the choice of material, the focus was on developing a suitable tool technology. The project has spawned different production-ready technologies for RTM that can be used industrially.



**Bild 10. Familienwerkzeug mit Angussystem (blau), Vakuum (grün) und Dichtungen (rot)**



**Bild 11. Schnitt durch Membranverschlusssystem im offenen Zustand**