

# Massnahmen zur Reduktion der Formfüllzeit

In einem ersten Teil (KS 9/06) zeigten die Autoren, wie durch die Verwendung hochpermeabler Verstärkungsmaterialien und hochreaktiver, niedrigviskoser Harzsysteme die Formfüllzeit bei RTM-Prozessen verkürzt werden kann. Im Folgenden wird gezeigt, dass auch die korrekte Werkzeugauslegung und eine optimierte Prozessführung einen wesentlichen Anteil an der Zykluszeitverkürzung haben.

Zur Senkung der Formfüllzeit sind nicht nur die beiden Komponenten Faserstruktur und Matrix von Bedeutung. Ein grosses Augenmerk ist auch auf die Werkzeugtechnik und die damit verbundenen Parameter zu legen. Nachfolgend werden einige werkzeugtechnische Optimierungsmöglichkeiten zur Senkung der Formfüllzeit vorgestellt.

## Vacuum Assisted RTM (VARTM)

Beim VARTM-Prozess werden die beiden Prozessvarianten, die Vakuum- und die Druckinjektion miteinander kombiniert. Neben der unter Druck stattfindenden Injektion wird die Kavität zusätzlich evakuiert, um einen maximalen Fliessfrontfortschritt zu erzielen.

## Linienanguss, mehrere Punktangüsse

Ein einzelner Punktanguss hat den Nachteil, dass nur ein beschränkter Massenstrom erzeugt werden kann. Da sich die Fliessfront flächig ausbreitet, nimmt die Fliessgeschwindigkeit mit zunehmendem Abstand vom Injektionspunkt ab. Mit Linienangüssen oder mehreren Punktangüssen ist es möglich, eine wesentlich grössere Harzmenge in der gleichen Zeit zu injizieren.

## Kaskaden-Injektion

Durch die Kaskaden-Injektion kann die durchschnittliche Fliessgeschwindigkeit des Harzes erhöht werden. Hierzu werden entlang des Fliessweges mehrere Injektionsdüsen angebracht. Sobald die Fliessfront eine Düse passiert hat, was mit geeigneten Sensoren detektiert werden kann, wird die alte Düse ver-

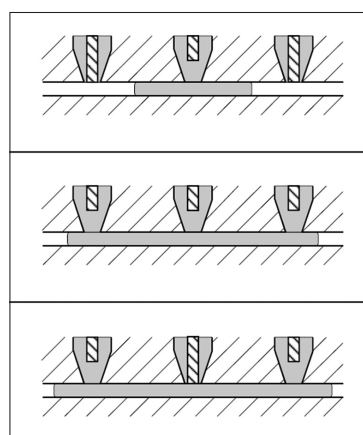


Abb. 11: Prozessablauf der Kaskadeninjektion.

schlossen und die neue geöffnet. Der Prozessablauf ist in Abbildung 11 ersichtlich. Durch diese Massnahme lassen sich praktisch beliebig lange Fliesswege erzielen, was den Einsatz vor allem für grössere Bauteile begünstigt. [4]

## Querimprägnierung durch harzführende Schichten

Vergleicht man die Permeabilitätswerte unterschiedlicher Faserstrukturen, so fällt auf, dass eine lockere Fasermatte eine viel höhere Durchlässigkeit hat als beispielsweise ein Gewebe. Diese Tatsache lässt sich ausnutzen, indem solche hochpermeablen Lagen in der Mitte des Laminats eingelegt werden. Durch diese Lagen eilt das Harz vor und bewirkt eine Querimprägnierung in den benachbarten Lagen. Da Fasermatten geringere mechanische Eigenschaften aufweisen, sollten diese Lagen möglichst in der Mitte des Bauteils eingelegt werden (Sandwichaufbau). Dadurch wird die Biegesteifigkeit und -festigkeit kaum beeinflusst.

## Harzverteilung über Kanalsystem

Beim SCRIMP-Prozess (vakuumunterstützte Infusion, nur einseitige Formhälfte) wird das Harz durch eine Verteilerstruktur in einer Folie gleichzeitig auf der einen Laminatseite über die ganze Bauteilfläche verteilt.

Indem in den Werkzeughälften Fliesskanäle vorgesehen werden, lässt sich diese Methode auf den RTM-Prozess übertragen. Diese Fliesskanäle verbleiben jedoch nach der Vernetzung auf dem Bauteil. Ist dies nicht zulässig, müssen die Fliesskanäle ausserhalb vom Bauteil liegen und durch eine Nachbearbeitung entfernt werden.

## Permeabilitätsänderung während der Injektion (ARTM)

Der ARTM-Prozess (Advanced RTM) beschreibt einen kombinierten RTM und Pressvorgang. Wie anfangs aufgezeigt ist die Permeabilität der Faserstruktur stark von deren Porosität abhängig. Dieser Zusammenhang kann ausgenutzt werden, indem während der Injektion die Werkzeughälften noch nicht ganz zusammengefahren werden. Nach der Injektion wird das Werkzeug mit einer geregelten Presse zusammengefahren und überschüssiges Harz wird durch die Entlüftungen abgeführt. Dies macht jedoch eine aufwändige Dichtungstechnik notwendig, was die Werkzeugkosten in die Höhe treibt. Die Vorteile sind die Umsetzung hoher Faservolumenanteile bei vergleichsweise langen Fliesswegen bei kurzen Zykluszeiten. [5]

Der Zusammenhang wird an einem Beispiel verdeutlicht:

**Wilfried Bürzle und Prof. Dr. Markus Henne,**  
Institut für Werkstofftechnik und Kunststoffverarbeitung (IWK), Hochschule für Technik, CH-8640 Rapperswil

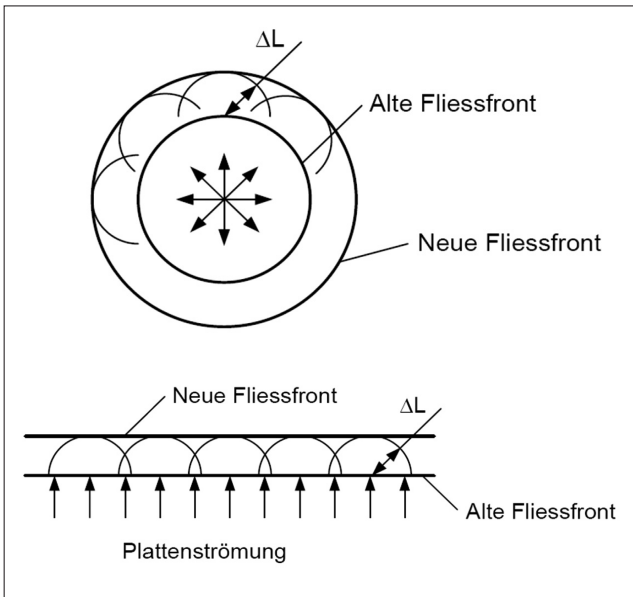


Abb. 12: Konstruktion bei isotroper Fließfront .

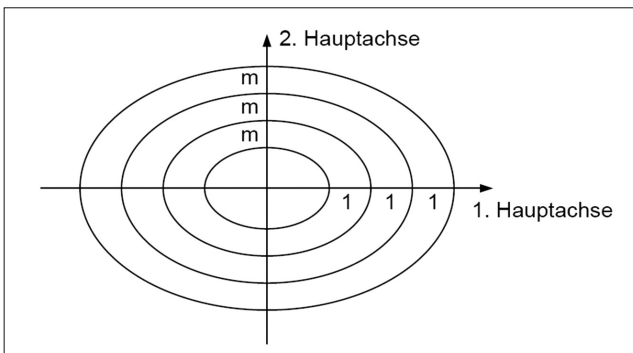


Abb. 13: Konstruktion des elliptischen Verlaufs.

Flächiges Bauteil  
 Faservolumengehalt: 23 %  
 Wandstärke: 3 mm  
 Herstellung mit  
 Fasermatte Unifilo, 450 g/m<sup>2</sup>  
 Permeabilitäts-  
 werte:  $K_x = K_y = 1,13E-9 \text{ m}^2$

Während der Injektion wird das Werkzeug auf 3,5 mm zusammengefahren. Dadurch ergeben sich für die Injektion neue Werte:

Faservolumengehalt: 19,8 %  
 Permeabilitäts-  
 werte:  $K_x = K_y = 1,72E-9 \text{ m}^2$

Die neuen Permeabilitätswerte wurden mit der Formel (2) bestimmt.

Durch eine Erhöhung der Kavität um 0,5 mm beziehungsweise 17 % wird die Permeabilität um ca. 52 % erhöht.

**Grafische Füllbildmethode**

Einer der kritischsten Punkte in der RTM-Technik ist die korrekte Werkzeugauslegung. Dies bedeutet, dass die Angüsse und Entlüftungen an den richtigen Stellen angebracht sein müssen. Erschwerend kommt hinzu, dass der Fließfrontverlauf oft nicht einmal mit grosser Erfahrung vorhergesagt werden kann. Auch aus diesen Gründen wird die RTM-Technik bis heute industriell nur teilweise genutzt.

In den letzten Jahren wurden auf der Finiten Elemente Methode (FEM) basierende Software-Programme entwickelt, die eine Simulation des Formfüllvorganges ermöglichen. Die Optimierung dieser Programme auf zuverlässige und genügend exakte Resultate ist teilweise immer noch Gegenstand der Forschung. Überdies stehen dem Anwender in der Regel solche Programme nicht zur Verfügung, da sie für viele kleine und mittlere Unternehmen schlichtweg zu teuer sind.

Aus diesen Gründen wurde im Zusammenhang mit dieser Arbeit eine einfache grafische Füllbildmethode entwickelt. Hauptziel ist es, dem Anwender die komplexe Werkzeugauslegung zu erleichtern. Diese Methode ermöglicht es, mit einfachen geometrischen Konstruktionen den Füllvorgang qualitativ zu bestimmen. Zudem können frühzeitig mögliche Luftpneinschlüsse im Bauteil erkannt werden. Zur Anwendung der Methode müssen jedoch einige Voraussetzungen erfüllt sein:

- Flächige Faserverbundstruktur, Harzfluss in Dickenrichtung wird vernachlässigt.
- Permeabilitätswerte müssen bekannt sein.
- Das Harz wird als Newton'sches Fluid angenommen.

Aufbauend auf dem Gesetz von Darcy können die Grundgleichungen der Füllbildmethode hergeleitet werden. Betrachtet werden zwei Fließwege  $L_x$  und  $L_y$  in Hauptfließrichtung der Faserstruktur.  $K_y$  bezeichnet den Permeabilitätswert in der angegebenen Hauptachsenrichtung.

Grundgleichungen der Füllbildmethode:

$$\text{Isotrop: } L_x = L_y \quad (3)$$

$$\text{Orthotrop: } \frac{L_y}{L_x} = \sqrt{\frac{K_y}{K_x}} = m \quad (4)$$

Bei Änderungen der Wandstärke  $H$  oder Porosität  $\phi$  müssen die Formeln ergänzt werden. Es gilt stellvertretend:

$$\frac{L_1}{L_2} = \sqrt{\frac{K_1}{K_2}} \cdot \frac{\phi_1 \cdot H_1}{\phi_2 \cdot H_2} \quad (5)$$

Ist die Form des Fließfrontverlaufes nicht bekannt, kann sie aufgrund der Permeabilitätswerte mit den folgenden Zusammenhängen zugeteilt werden.

$$\text{Isotrop wenn: } 0,9 \leq \sqrt{\frac{K_y}{K_x}} \leq 1,1$$

$$\text{Orthotrop wenn: } \sqrt{\frac{K_y}{K_x}} < 0,9 \text{ oder } \sqrt{\frac{K_y}{K_x}} > 1,1$$

**Vorgehen bei isotroper Fließfront**

1. Bauteil in Grundkonturen zerlegen (Abwicklung).
2. Angusspunkt bzw. Angusslinie bestimmen.
3. Fließfrontverlauf konstruieren.

Es gilt allgemein:  
 Jeder Punkt der alten Fließfront ist Ausgangspunkt eines Kreises mit Radius  $\Delta L$ . Die neue Fließfront ergibt sich als Umhüllende dieser Kreise.

**Vorgehen bei orthotroper Fließfront**

1. Bauteil in Grundkonturen zerlegen (Abwicklung).
2. Angusspunkt bzw. Angusslinie bestimmen.
3. Hauptachsenrichtungen der Faserstruktur im Bauteil festlegen und einzeichnen.

**Dank**

Herzlicher Dank gilt allen unterstützenden Personen, Stiftungen, Instituten und Firmen.  
 • Förderung des Projektes durch die Werner Steiger Stiftung  
 • Dipl.-Ing. HTL Christian Gwerder, Dycon AG, Reinach  
 • Richard Steger, CEO Scobalith AG, Winterthur  
 • Dr. Dirk Wilde, Alcan Composite Structures, Altenrhein  
 • Christian Breyer, Alcan Technology Services, Neuhausen am Rbf.  
 • Prof. Dr. Martina Hirayama und  
 • Dipl.-Chem. FH André Kaufmann, Zürcher Hochschule Winterthur

4. Hauptachsen im Verhältnis  $x/y = 1/m$  einteilen.
5. Erste Ellipse konstruieren, die Grösse ist sinnvoll abzuschätzen.
6. Weitere Ellipsen einzeichnen. Das Vorgehen wird in Abbildung 12–16 schematisch aufgezeigt.

**Vorgehen bei rosettenförmiger Fließfront**

Im Falle eines rosettenförmigen Permeabilitätsverlaufes ist ein isotropes oder orthotropes Ersatzmodell anzuwenden.

**Reale Effekte**

Bei realen Harzinjektionsprozessen ist der Harzfluss in der Faserstruktur von einigen Effekten überlagert. Am Rand des Bauteils findet ein so genanntes «race tracking» bzw. Vorlaufen des Harzes statt, wie in Abbildung 17 dargestellt.

Die Grösse dieser «Vorläufer» kann in der Füllbildmethode nur qualitativ berücksichtigt werden. Als Abhilfe dienen die folgenden Massnahmen:

- Fasern im Randbereich des Werkzeuges sorgfältig einlegen.
- Anbringen von Dichtungsstreifen am Rand.

**Anwendungsbeispiel**

Anhand eines realen Bauteils wird der Prozess der Werkzeugauslegung mittels der Füllbildmethode illustriert.

Bauteil: Seitenpanele eines Elektroleichtfahrzeugs (Abb. 18)

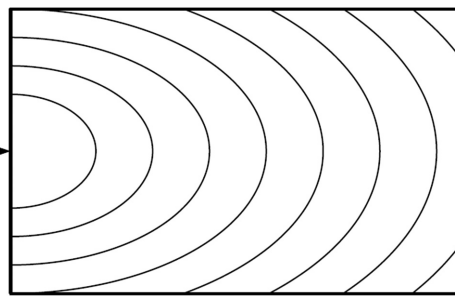
Abmasse: ca. 1350 x 850 mm

Wandstärke: 2,5 mm

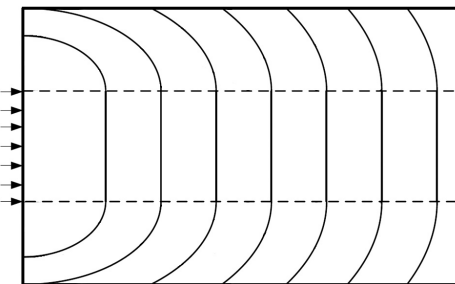
Werkstoff: Glasfasermatte, Unifilo, 450 g/m<sup>2</sup>

Zur Werkzeugauslegung werden zwei unterschiedliche Injektionsstrategien angewendet. Bei der ersten Variante wird über einen Punktanguss injiziert (Abb. 19). Bei der zweiten Variante wird die Kaskaden-Injektion mit drei bzw. zwei Injektionsdüsen angewendet (Abb. 20 und 21). Da die Permeabilitätswerte der Faserstruktur bekannt sind, kann das Fließverhalten als isotrop angenommen werden.

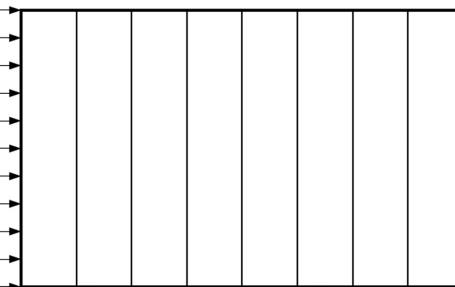
**Abb. 14:** Punktanguss.



**Abb. 15:** Kleiner Linienanguss.



**Abb. 16:** Vollständiger Linienanguss.



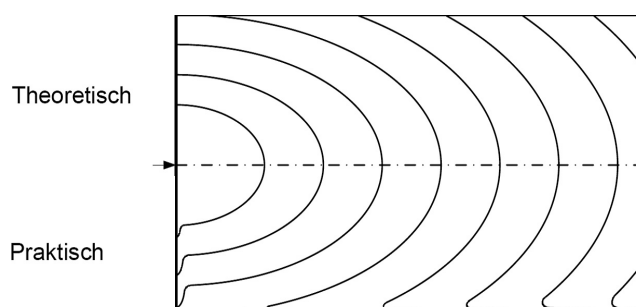
- Fließfronten sollten möglichst flach zusammenlaufen, keine spitzen Winkel.
- Umströmungen von Ecken sind kritisch.
- Entlüftungen möglichst in Ecken positionieren, damit Luft dorthin gefördert werden kann.
- Es ist zu berücksichtigen, dass Randeffekte durch die grafischen Methoden nicht berücksichtigt werden.

Die Resultate der Füllbild-Studien zeigen, dass sich für die Seitenpanele die Kaskaden-Injektion mit zwei Angusspunkten am besten eignet. Die Fließwege und somit auch der Druckbedarf sind geringer als bei der Injektion über einen Angusspunkt. Zudem kann das Bauteil durch die Kaskaden-Injektion in kürzerer Zeit gefüllt werden. Des Weiteren muss die Fließfront keine Ecken oder Radien umströmen. Zu beachten ist ebenso, dass die Entlüftungen bei allen Füllbildern an den gleichen Stellen angebracht werden müssen.

Das Füllbild der Kaskaden-Injektion zeigt eine mögliche Problemstelle auf, bei der sich zusätzliche Luft einschließen könnten, die schwer zu entlüften wären (Abb. 20). Aus diesem Grund wurde ein zweites Füllbild zur Kaskaden-Injektion erstellt (Abb. 21).

Bei der Auswertung der Füllbilder sollte vor allem auf die Robustheit des Prozesses geachtet werden. Dies bedeutet, dass selbst bei einer grossen Abweichung des Füllbildes vom realen Verlauf die Prozesssicherheit gewährleistet werden kann. Deshalb ist den folgenden Punkten besondere Beachtung zu schenken.

**Abb. 17: Vergleich reale/theoretische Fließfront.**



Selbstverständlich könnten noch unzählige andere Varianten simuliert werden. Der Anwender muss hier selbst entscheiden, wann eine sinnvolle und praktikable Lösung gefunden wurde, bei der auch die zur Verfügung stehenden Mittel berücksichtigt wurden.

**Schlussfolgerungen**

Mit der RTM-Technik werden heute schon qualitativ hochwertige und hoch beanspruchte Faserverbundbauteile hergestellt. Durch die sehr komplexe Werkzeugauslegung und Prozessbeherrschung wird diese Technik industriell nur teilweise genutzt. Ein weiterer entscheidender Punkt sind die Prozesskenntnisse des Anwenders. Häufig lassen diese Vorsicht walten und beschränken sich bei der Anwendung auf eine konservative Prozessauslegung mit wenigen Punktangüssen und vor allem mit langsam aushärtenden Harzen. Durch die dadurch entstehenden langen Injektionszeiten können zwar Luft einschließen sehr gut vermieden werden, die Zykluszeiten

steigen dadurch aber markant an, was den Prozess wirtschaftlich uninteressant macht.

Das Potenzial und die Grenzen zur Reduktion der Formfüllzeit und

somit zur Verkürzung der Zykluszeit wurden in dieser Arbeit untersucht. Aufgezeigt wurden vier Optimierungsmöglichkeiten, deren wichtigste Erkenntnisse nachfol-

gend noch einmal erwähnt werden:

- Bei der Wahl der Faserstruktur muss ein Kompromiss zwischen den mechanischen Eigenschaften und dem Fließverhalten gewählt werden.
- Durch Lagen höherer Permeabilität kann die Fließfront vorangetrieben werden.
- Die Temperatur hat auf das Verhalten des Matrixsystems 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 Kaskaden-Injektion, lassen sich sehr lange Fließwege erzielen.
- Mit einer einfachen geometrischen Füllbildmethode lassen sich frühzeitig die optimalen Positionen der Angusspunkte und Entlüftungsstellen bestimmen.

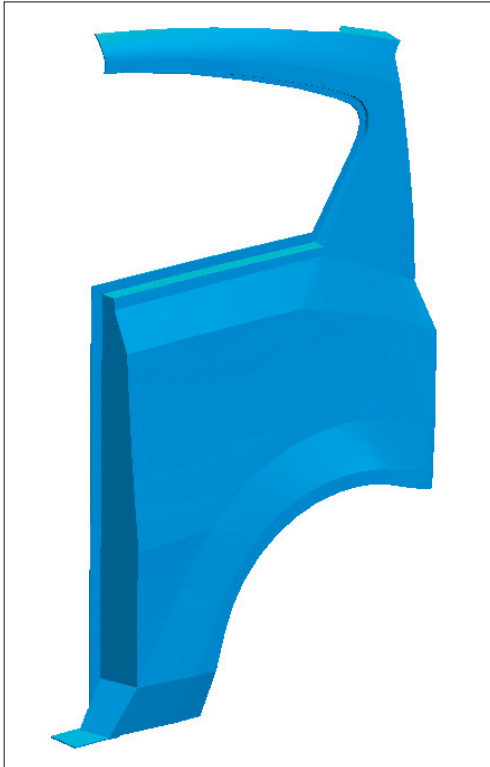


Abb. 18: 3-D-Ansicht der Seitenpaneele.

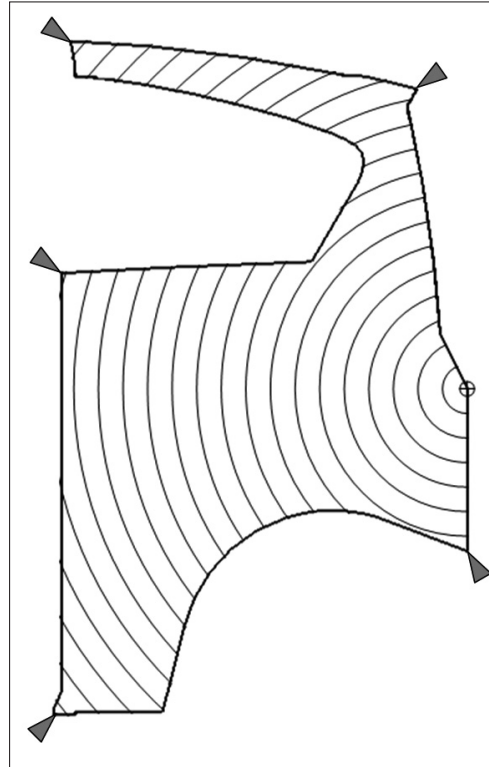


Abb. 19: Füllbild, Punktanguss.

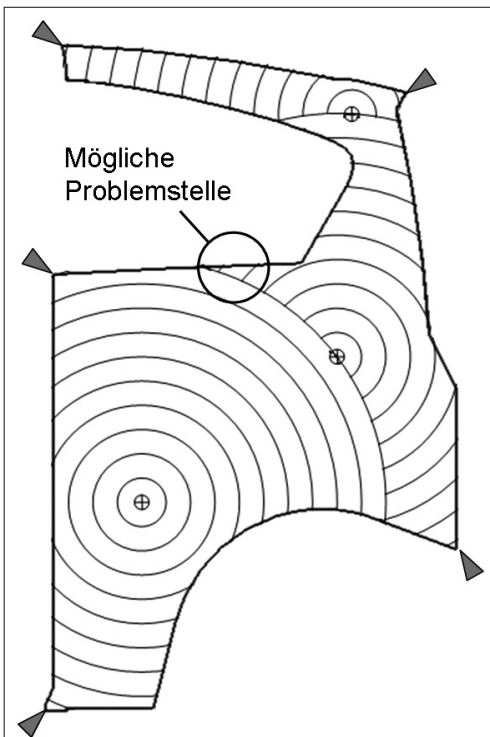


Abb. 20: Füllbild, Kaskaden-Injektion.

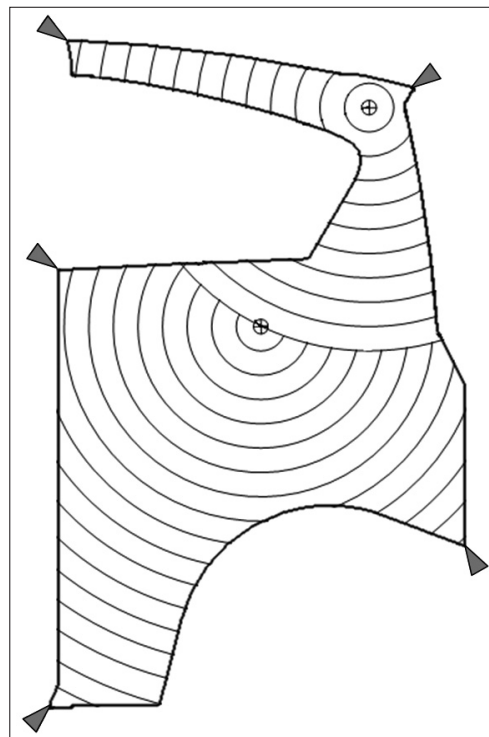


Abb. 21: Füllbild 2, Kaskaden-Injektion

▶ Entlüftungsstellen ⊕ Angusspunkte.

Durch diese Massnahmen ist es möglich, die Zykluszeit auf unter 10 Minuten zu senken. Dadurch wird der Prozess für die Herstellung kleinerer bis mittlerer Serien zunehmend interessanter, da ebenfalls die Produktionskosten minimiert werden.

Was es dazu braucht, sind vertiefte Prozesskenntnisse und etwas Mut des Anwenders, etwas Neues auszuprobieren, damit das Potenzial dieser Technik voll ausgeschöpft werden kann.

Für allfällige weitere Fragen oder für eine Unterstützung bei der RTM-Prozessauslegung steht das «Institut für Werkstofftechnik und Kunststoffverarbeitung» der Hochschule für Technik in Rapperswil jederzeit gerne zur Verfügung.

Literatur:

- [4] M. Hintermann, Erforschung eines neuen Injektionsprozesses für offene und geschlossene Faserverbund-Strukturen, Dissertation ETH Nr. 12522, 1998.
- [5] M. Neitzel, P. Mitschang, Handbuch Verbundwerkstoffe, Hanser Verlag, München, 2004.