

Fließfrontennachverfolgung in Hochdruck Resin Transfer Molding Werkzeugen mittels Phased Array Ultraschalluntersuchungen

Linus LITTNER¹, Yannick BERNHARDT¹, Marc KREUTZBRUCK¹, Richard PROTZ²,
Maik GUDE²

¹ Institut für Kunststofftechnik, Universität Stuttgart, Stuttgart

² Institut für Leichtbau und Kunststofftechnik, Technische Universität Dresden, Dresden

Kontakt E-Mail: linus.littner@ikt.uni-stuttgart.de

Kurzfassung. Bei der Herstellung von faserverstärkten Kunststoffen (FKV) mittels Resin Transfer Molding (RTM) können unterschiedliche charakteristische Defekte und Fehler auftreten, wie z. B. Faserfehlorientierungen und Faserwelligkeiten. Insbesondere beim Hochdruck RTM (HD-RTM) werden die Faserverschiebungen bei der Infiltration durch lokale Spitzen in der Fließgeschwindigkeit erzeugt. Mit zunehmender Wanddicke der FKV-Bauteile steigt die Wahrscheinlichkeit solcher herstellungsbedingter Defekte, was zu einer signifikanten Verringerung der mechanischen Eigenschaften führt. Um diesen Effekt zu minimieren bzw. zu vermeiden, muss der Herstellungsprozess gut beherrscht werden. Simulative Ansätze ermöglichen zwar eine grundlegende Auslegung des Formfüllprozesses, aufgrund der vielen Einflussgrößen kann hiermit das reale Verhalten nicht exakt abgebildet werden.

Der Fokus dieser Arbeit liegt in der Fließfrontennachverfolgung in einem HD-RTM Werkzeug mittels Phased Array Ultraschall. Hierfür wurden Untersuchungen bei der Herstellung von Prüfkörpern aus glasfaserverstärktem Polyurethanharz (PU) mit einer Wanddicke von 10 mm und einer Faserorientierung von $\pm 45^\circ$ durchgeführt. Im Konkreten wurde dabei ein Phased Array Ultraschallprüfkopf verwendet, mit dessen Hilfe über einen Zeitraum von 200 Sekunden einzelne Linienscans aufgenommen wurden. Durch unterschiedliche Orientierungen des Phased Array Prüfkopfs und somit der Linienscans konnte eine näherungsweise flächige Nachverfolgung der PU-Fließfront vorgenommen werden.

Mit den Ergebnissen ist es möglich, die lokalen Fließgeschwindigkeiten des Matrixsystems bei der Formfüllung zu ermitteln, welche vor allem beim HD-RTM Verfahren einen maßgeblichen Einfluss auf die Entstehung von herstellungsbedingten Defekten haben. Zudem konnte der Verlauf der Fließfront abgebildet werden. Die Ergebnisse dieser Arbeit können dazu genutzt werden, die Vorhersagequalität von simulativen Methoden zum Formfüllverhalten zu verbessern.

1. Einführung

Faserverbundwerkstoffe (FVK) gehören seit mehreren Jahrzehnten zu den Hochleistungswerkstoffen im Bereich des Leichtbaus. Ihre gewichtsspezifischen Eigenschaften sind der Hauptgrund für ihren Einsatz in der Windenergie, der Luft- und Raumfahrt und im Motorsport. Die gewichtsspezifische Festigkeit bzw. der gewichtsspezifische E-Modul sind deutlich höher als bei den meisten metallischen Legierungen und ermöglichen so eine einzigartige Effizienz. Die Eigenschaften eines FVK werden u.a. stark von den Fasern, dem Matrixmaterial und dem Laminataufbau beeinflusst



[1]. Für die Herstellung von FKV gibt es eine Vielzahl von Formgebungsverfahren, die je nach Bauteilgeometrie und Stückzahl eingesetzt werden. Zu den typischen Verfahren gehören das Handlaminieren, das Wickeln, die Pultrusion, das Autoklavieren und das Resin Transfer Molding (RTM). Das RTM ist ein Harzinjektionsverfahren, bei dem hauptsächlich niedrigviskose duroplastische Harzsysteme wie Epoxidharze oder Polyurethane verwendet werden. Zur Verstärkung der Bauteile wird ein endkonturnahes Faserhalbzeug, auch Preform genannt, in eine geschlossene Form eingespannt. Dabei wird das Harzsystem in einer Mischkammer vorgemischt und anschließend mit hohem Druck (1-20 bar) in die Form gespritzt. Zusätzlich wird ein Vakuum angelegt, um die Diffusion des Harzes zu erhöhen. Dadurch umschließt das einströmende Matrixsystem die zuvor trockene Faserstruktur vollständig und härtet anschließend aus. Von den bereits genannten Verfahren hat das RTM das größte Potenzial, den Anforderungen nach einer großen Produktionsmenge gerecht zu werden, wie sie z.B. im Automobilsektor gefordert werden. Dies liegt vor allem daran, dass sich mittels RTM dreidimensionale, komplexe und große Verbundwerkstoffteile mit geringen Toleranzen und hohem Automatisierungspotenzial herstellen lassen.

Als Weiterentwicklung des RTM gilt das Hochdruck Resin Transfer Molding (HD-RTM). Durch die Erhöhung des Injektionsdrucks auf bis zu 200 bar und der daraus resultierenden Steigerung der Fließgeschwindigkeiten des Harzsystems ermöglicht das HD-RTM den Einsatz von schnell aushärtenden duromerbasierten Harzen, wodurch eine drastische Reduktion der Zykluszeit erreicht wird. Neben diesem Vorteil ergibt sich allerdings folgende Problematik. Bedingt durch die hohen Fließgeschwindigkeiten steigt die Wahrscheinlichkeit von Defekten in Form von Faserfehlorientierungen und Faserwelligkeiten, die auf lokale Spitzen in der Fließgeschwindigkeit zurückzuführen sind. Um solche Defekte zu minimieren bzw. zu vermeiden, sind präzise Kenntnisse über die Prozessparameter unabdingbar. Simulative Ansätze ermöglichen zwar eine grundlegende Auslegung des Formfüllprozesses, aufgrund der vielen Einflussgrößen kann hiermit das reale Verhalten jedoch nicht exakt abgebildet werden. Aus diesem Grund gibt es bereits verschiedene Ansätze, die Prozessüberwachung im RTM und HD-RTM mit unterschiedlichen Sensoren durchzuführen.

Einer der ersten Ansätze von Kranbuehl et al. [2] nutzte dielektrische Sensoren um die Viskosität und den Aushärtegrad des Harzes zu überwachen. Weitere Studien [3–5] zeigen ebenfalls den erfolgreichen Einsatz von dielektrischen Sensoren zur Charakterisierung des Harzsystems sowie zur Visualisierung der Fließfront im RTM Prozess und der damit verbundenen Prozessoptimierung. Mithilfe eines aus Elektroden aufgebauten Flächensensor-Arrays ist es Matsuzaki et al. [6, 7] gelungen, über die Bestimmung der elektrischen Impedanz die Effekte der Prozessparameter auf das Formfüllverhalten des VaRTM (Vacuum assisted Resin Transfer Molding) Prozesses zu erhalten. Dabei wurde der Einfluss der Viskosität und der Temperatur des verwendeten Epoxy Harzes auf die Form der Fließfront untersucht. Des Weiteren wurden von Ding et al. und Di Fratta et al. [8, 9] Drucksensoren zur Analyse des RTM-Prozesses verwendet. Über diesen Ansatz konnte ebenfalls die Permeabilität des Faserhalbzeugs experimentell ermittelt werden, um so die bereits existierenden simulativen Ansätze zu validieren.

Die Übertragbarkeit der bereits aufgeführten Ansätze zur Überwachung des HD-RTM-Prozesses auf einen industriellen Maßstab werden im Wesentlichen durch zwei Faktoren limitiert. Zum einen werden innen liegende Sensoren wie Drucksensoren benötigt, die bereits bei der Auslegung des Werkzeugs berücksichtigt werden müssen. Zum anderen hinterlassen diese innen liegenden Sensoren Markierungen auf dem fertigen Bauteil, was gerade bei FKV-Bauteilen im Sichtfeld unerwünscht ist. Verschiedene Ansätze, die den Einsatz von Ultraschallsensoren beschreiben, bieten hier den Vorteil, dass diese auch von außen am Werkzeug angebracht werden können. So haben unter anderem Shepard und Smith [10] die Einsatzmöglichkeiten von Ultraschallsensoren zur Überwachung des Aushärtevorgangs in RTM-Werkzeugen erforscht, indem Sie den Einfluss des Aushärtegrads auf die Schallgeschwindigkeit einer transmittierenden Schallwelle untersuchten. Stöven et al. [11] konnten zudem durch die Auswertung der Laufzeit von zwei auf beiden Seiten der Kavität angebrachten Ultraschallsensoren Rückschlüsse auf das dreidimensionale Fließverhalten des Harzes ziehen.

Bei der Übertragung dieser beiden Ansätze auf den HD-RTM-Prozess ergibt sich allerdings das Problem, dass die Werkzeuge aufgrund der hohen Prozessdrücke deutlich robuster ausgelegt werden müssen und so eine mehrere Zentimeter dicke Stahlschicht

durchdrungen werden muss, um Informationen aus dem Inneren der Kavität zu erhalten. Dies führt zu einem vergrößerten Einfluss von Fehlinformationen und dadurch zu einem schlechteren Signal-Rausch-Verhältnis (Signal-to-Noise Ratio - SNR). Zudem ermöglichen herkömmliche Ultraschallsensoren aufgrund ihrer Baugröße eine beschränkte örtliche Auflösung, wodurch eine genaue Rekonstruktion der Fließfront bzw. die Bestimmung einer lokalen Fließgeschwindigkeit erschwert wird. Es wird demnach ein Verfahren benötigt, welches außenliegend am Werkzeug eingesetzt werden kann und zudem Informationen über die Fließfront sowie deren Fließgeschwindigkeit mit einer guten örtlichen Auflösung wiedergeben kann.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit dem Einsatz von linearem Phased Array Ultraschall zur in-situ Überwachung der Fließfront. Diese kann beim HD-RTM-Prozess als Kenngröße für Prozessstabilität und so zur einfachen Prozessüberwachung angenommen werden [12, 13]. Zu diesem Zweck werden bei der Herstellung eines Demonstratorbauteils verschiedene Prozessparameter ermittelt und diese mit den Ergebnissen einer Formfüllsimulation verglichen.

2. Versuchsdurchführung

Für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche wurde die Herstellung einer Prüfstruktur aus einer glasfaserverstärkten Polyurethanstruktur mit einem Faservolumengehalt von 49 % und einer Wanddicke von 10 mm begleitet. Die Prozessparameter sind aus Tabelle 1 zu entnehmen.

Tabelle 1: Prozessparameter des HD-RTM-Prozess

Bezeichnung	Abstand [pt]
Angussrate	30 g/s
Prozessdruck	ca. 130 bar
Werkzeugtemperatur	80 °C
Harztemperatur beim Anguss	52 °C
Schusszeit	ca. 145 s

Die Ultraschalluntersuchungen wurden mit einem Phased Array Prüfkopf mit 64 Elementen, einem Einzelementabstand (Pitch) von 0,85 mm und einer Frequenz von 2 MHz durchgeführt. Der geringe Abstand zwischen den Einzelschwingeren ermöglicht eine hohe örtliche Auflösung, was für den hier untersuchten Anwendungsfall einen entscheidenden Vorteil gegenüber konventionellen Methoden der Prozessüberwachung bietet. Des Weiteren ist durch die Zusammenschaltung mehrerer Elemente (Apertur) und die Anwendung von Rekonstruktionsalgorithmen wie die Synthetic Aperture Focusing Technique (SAFT) oder die bei PAUT häufiger eingesetzte Total Focusing Method (TFM) eine zusätzliche Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses möglich. Die Versuchsdurchführung mit dem PAUT-Prüfkopf beruht auf dem Prinzip, dass die Fließfront von den Einzelementen des Prüfkopfs nacheinander detektiert wird. Um dabei die maximale Informationsmenge zu generieren, soll hierzu die Geschwindigkeit der Fließfront als auch die Form der Fließfront durch die horizontale bzw. vertikale Ausrichtung des Prüfkopfs erreicht werden (vgl. Abb. 1). Die Ultraschallmessungen wurden über einen Zeitraum von 200 Sekunden mit je zehn Messungen pro Sekunde durchgeführt. Zur

Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses wurden je acht Einzelemente sequenziell angesteuert und jede Einzelmessung je 32-fach gemittelt.

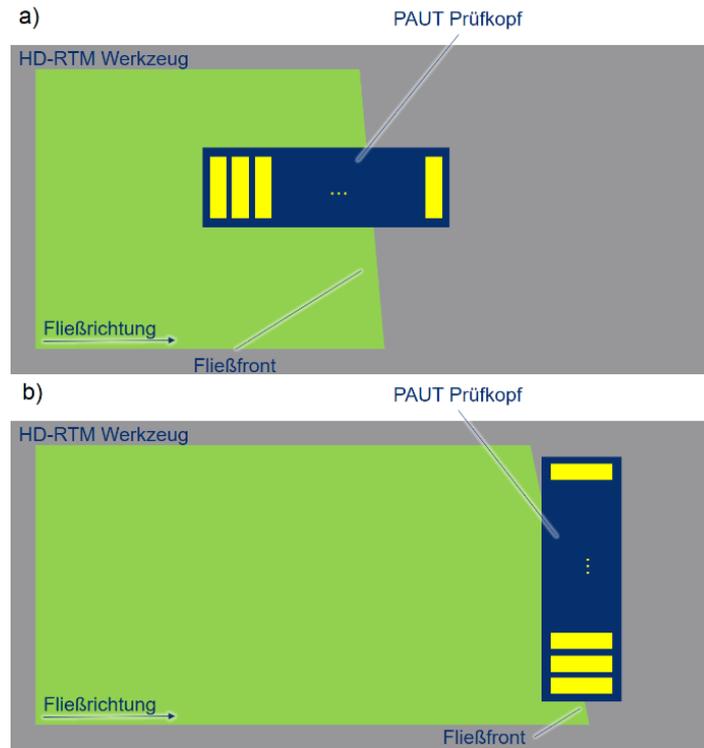


Abb. 1: Messprinzip der Fließfrontendetektion. Jedes Element (gelb) detektiert individuell die Fließfront. Prüffall a) dient zur Ermittlung der Fließgeschwindigkeit und Prüffall b) zur Ermittlung der Form der Fließfront.

Für die Ultraschallmessungen war das HD-RTM-Werkzeug seitlich zugänglich (vgl. Abb. 2). Die Dicke des Werkzeugs an der Messstelle betrug 60 mm. Zudem wurde für die Versuche eine 20 mm dicke PMMA-Vorlaufstrecke eingesetzt, durch welche ein thermischer Schutz des PAUT-Prüfkopfs vor dem auf 80 °C temperierten Werkzeug erreicht wurde.

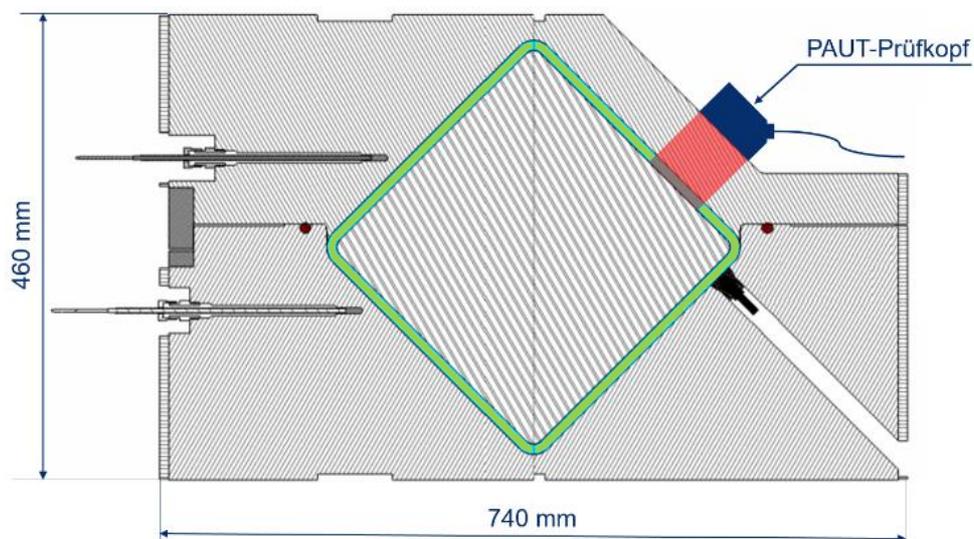


Abb. 2: Schnittansicht des HD-RTM-Werkzeugs mit der Kavität (grün) und dem Messbereich des PAUT-Prüfkopfes (rot).

Um die Parameter im Verlauf des Formfüllprozesses zu bestimmen, wurden entlang der Prüfstruktur drei Messpositionen definiert. Diese befinden sich entlang der Fließrichtung in 193 mm, 300 mm und 429 mm Abstand. An den Messpositionen wurde je eine horizontale und eine vertikale Ultraschalluntersuchung durchgeführt (vgl. Abb. 3).

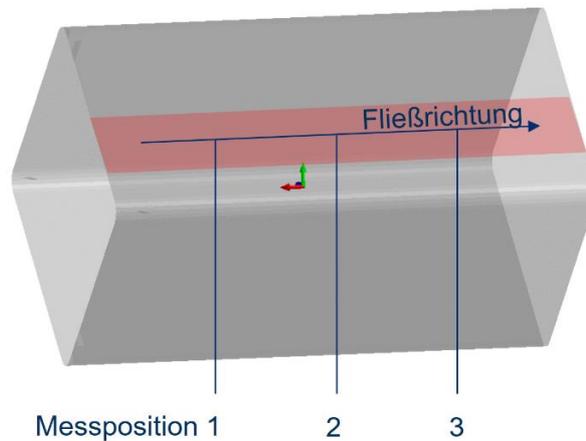


Abb. 3: Darstellung der bei der Herstellung untersuchten Vierkant-Prüfstruktur, des Auswertebereichs (rot) sowie der drei Messpositionen

Als Vergleich für die Ultraschalldaten wurden die Ergebnisse einer für die Werkzeugauslegung durchgeführten Formfüllsimulation herangezogen. Hierbei wurde mithilfe der Simulationssoftware PAM-RTM ein Schalenmodell aufgebaut und eine Simulation mit den Prozessparametern aus Tabelle 1 durchgeführt. Da die Formfüllsimulation primär zur Auslegung des Angussystems durchgeführt wurde, wurde eine homogene Permeabilität des Faserhalbzeugs von $1,6 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2$ sowie eine Harzviskosität von $200 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ angenommen. Eine variable Kompaktierung der Fasern wurde dabei nicht berücksichtigt, wodurch eine entsprechende Abweichung von den experimentell ermittelten Daten zu erwarten ist.

3. Versuchsauswertung

Die Ankunft der Harzfront wurde über die Charakterisierung des Reflexionsverhaltens R des Ultraschallsignals an der Grenzfläche zwischen dem Werkzeug und der Kavität ermittelt. Für R gilt

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (1)$$

wobei sich die akustischen Impedanz Z_1 bzw. Z_2 mit

$$Z = \rho \cdot c \quad (2)$$

mit der Dichte ρ und der Schallgeschwindigkeit c berechnet. Mithilfe von Formel 1 und Formel 2 wurde das Reflexionsverhalten der Grenzfläche von Werkzeug zu Kavität bestimmt (vgl. Tabelle 2). Hierbei wurde der Einfluss der Fasern vernachlässigt und lediglich die Kennwerte für Stahl, Luft und dem eingesetzten Polyurethan (PUR) bei jeweils $80 \text{ }^\circ\text{C}$ zur Berechnung herangezogen. Dabei wurden folgende Werte für R berechnet, wobei der Wert -1 einer Totalreflexion an der Grenzfläche entspricht.

Tabelle 2: Werkstoffeigenschaften zur Bestimmung des Reflexionsverhaltens

Werkstoff	ρ [kg/m ³]	c [m/s]	Z [kg/m ² s]	R
Luft	0,99	377	373	-0,999
Stahl	7850	5907	$46,37 \cdot 10^6$	
PUR	1124	1670	$1,88 \cdot 10^6$	-0,922

Aus der Berechnung folgt, dass der Anteil der reflektierten Schallenergie an der Grenzfläche zur trockenen Faser um ca. 8% höher ist, als an der Grenzfläche zu mit Harz getränkten Fasern. Übertragen auf die Ultraschallmessung bedeutet dies, dass die Amplitude des Echos dieser Grenzfläche nach Erreichen der Harzfront abnimmt. Für die Auswertung wurde daher für jedes PAUT-Element der Verlauf dieser Amplitude im Verlauf der Formfüllung betrachtet (vgl. Abb. 4). Zur verbesserten Auswertung wurden die Ergebnisse mithilfe eines Gauß-Filters geglättet. Zudem wurde aus dem Verlauf eine Änderungsrate der Amplitude über fünf Messschritte berechnet.

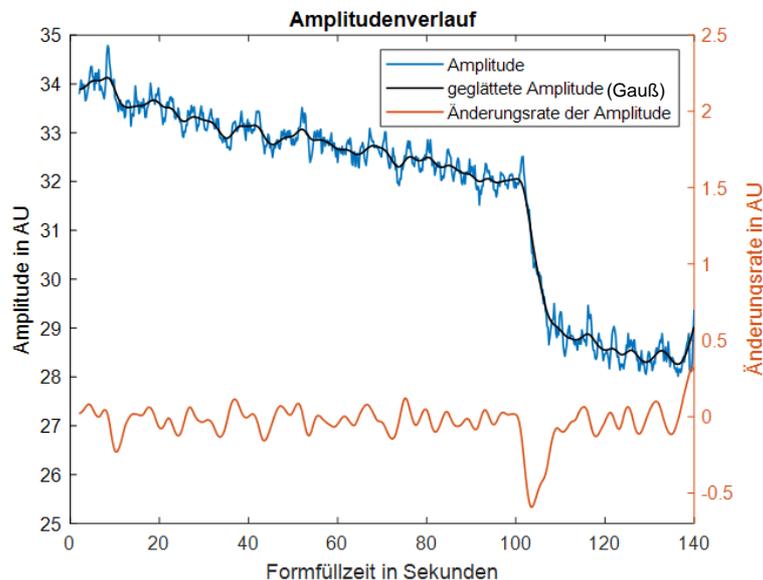


Abb. 4: Amplitudenverlauf eines PAUT-Elements über die Formfüllzeit

Bei der Auswertung des Amplitudenverlaufs sind zwei Phänomene zu beobachten. Zum einen ist eine stetige Abnahme der Amplitude aufgrund des Temperaturanstiegs und der damit verbundenen Zunahme der akustischen Dämpfung in der Vorlaufstrecke zu beobachten. Darüber hinaus ist bei ca. 106 Sekunden ein starker Abfall der Amplitude um ca. 9% zu beobachten, der auf einen durch die Fließfront bedingten Sprung des Reflexionsverhaltens der untersuchten Grenzfläche zurückzuführen ist. Die gemessene Änderung der reflektierten Amplitude liegt demnach sehr nahe an dem berechneten Wert von ca. 8%. Der Zeitpunkt des Amplitudenabfalls wird für jedes Element bestimmt und als Eintreffen der Fließfront gewertet. Hierzu wird der Zeitpunkt des Minimums der Änderungsrate ermittelt. Die Position der Elemente im Prüfkopf sowie die globale Position des Prüfkopfs erlauben so die Rekonstruktion der Fließgeschwindigkeit bei einer horizontal ausgerichteten Messung. Bei einer vertikal ausgerichteten Messung kann der Zeitpunkt des Eintreffens der Fließfront registriert werden. Durch das Miteinbeziehen der im horizontalen Versuch ermittelten Fließgeschwindigkeit lässt sich so die Form der Fließfront rekonstruieren.

4. Ergebnisse und Diskussion

Die aus den Messdaten rekonstruierten Ergebnisse werden im Folgenden mit den aus der Simulation ermittelten Daten verglichen. Hierzu wird zum einen die Ankunftszeit, ab welcher die Fließfront an den jeweiligen Messpunkten detektiert werden konnte, sowie die Fließgeschwindigkeit verglichen. Die Ergebnisse sind Tabelle 3 zu entnehmen.

Tabelle 3: Simulierte und gemessene Ankunftszeiten sowie Fließgeschwindigkeiten der Fließfront

Messpunkt	1	2	3
Ankunftszeit Simulation	43,5 s	66,4 s	89,8 s
Ankunftszeit Messung	46,8 s	74,3 s	98,2 s
Fließgeschw. Simulation	4,66 mm/s	4,67 mm/s	4,56 mm/s
Fließgeschw. Messung	3,81 mm/s	5,02 mm/s	6,45 mm/s

Beim Vergleich der Ankunftszeit der Fließfront ist bereits eine entsprechende Abweichung zwischen Simulation und Messung festzustellen. Dabei ist bereits an Messposition eins ein Nacheilen der gemessenen Fließfront im Vergleich zur Simulation um 3,3 Sekunden festzustellen. Über den Verlauf der Fließfront ist zudem ein zunehmendes Nacheilen der gemessenen Fließfront um bis zu 8,4 Sekunden an Messposition drei zu erkennen.

Während die Fließgeschwindigkeit in der Simulation weitestgehend konstant mit einer geringen Abnahme an Messposition drei bleibt, kann bei den gemessenen Werten ein signifikanter und nahezu linearer Anstieg beobachtet werden. Gerade zu Beginn wird in der Simulation die Fließgeschwindigkeit an Messposition eins überschätzt, wodurch sich auch die abweichenden Ankunftszeiten der Fließfront erklären lassen.

Ein weiterer Unterschied ergibt sich bei der Betrachtung der Form der Fließfront. Für die Auswertung der Form der Fließfront werden die grafischen Simulationsergebnisse betrachtet (vgl. Abb. 5), in welcher die Fließfront (lila) von links kommend zu erkennen ist. Zudem wird für den Vergleich die aus den Ultraschalldaten ermittelte Fließfront (gelb) auf die Darstellung gelegt, damit ein direkter Vergleich möglich ist. Zu beachten ist, dass die zeitlichen Unterschiede zwischen Messung und Simulation in dieser Ansicht nicht berücksichtigt sind.

Bereits bei Messstelle eins kann eine geringe Abweichung der bei der Simulation ermittelten ebenen Fließfront erkannt werden. Diese Abweichung der Form ist ebenfalls an Messposition zwei zu erkennen, wobei hier in den Messdaten eine stärker ausgeprägte wellige Form der Fließfront zu erkennen ist. Diese kann unter anderem durch erklärt werden, dass sich bei dem verwendeten Faserhalbzeug durch das Flechtmuster keine konstante Permeabilität einstellt, wie es in der Simulation angenommen wurde. Ein zusätzlicher Unterschied lässt sich an Messposition drei darstellen, an der die Messergebnisse ein deutliches Nacheilen der Fließfront zum Rand hin erkennen lassen. Eine Erklärung ist eine erhöhte Kompaktierungen des Faserhalbzeugs im Randbereich der Kavität, welche bei zunehmender Dicke des Fließwegs eine Reduzierung der Fließgeschwindigkeit zur Folge hat. Das im Verlauf der Formfüllzeit verstärkte Nacheilen der Fließfront im Randbereich bietet auch eine Erklärung für die Verzögerung der gemessenen Ankunftszeiten der Fließfronten an der Messposition (vgl. Tabelle 3).

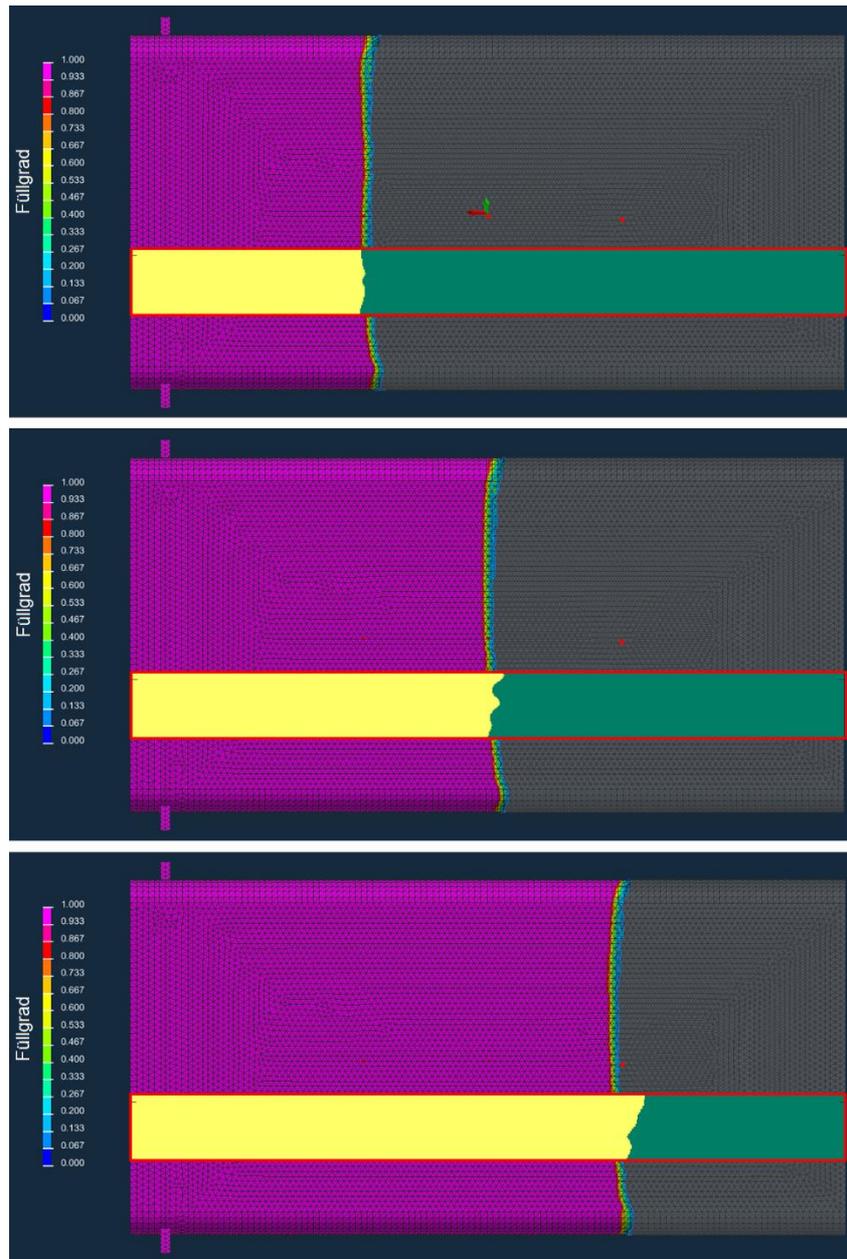


Abb. 5: Ergebnisse der Formfüllsimulation und Ergebnisse der Ultraschallmessungen im Vergleich zur Formfüllsimulation an den Messpositionen eins (Oben), zwei (Mitte) und drei (Unten)

5. Fazit und Ausblick

Es wurde gezeigt, dass mit der hier vorgestellten Messmethode sowohl die Ankunftszeit, die Geschwindigkeit als auch die Form einer Fließfront im HD-RTM-Prozess dargestellt werden kann. Durch einen Vergleich mit den Ergebnissen einer Formfüllsimulation konnte zudem nachgewiesen werden, dass diese Methode sowohl zur Optimierung von Simulationen als auch zur Prozessüberwachung eingesetzt werden kann. Ein besonderer Vorteil ergibt sich aus der hohen örtlichen Auflösung der Ergebnisse, die aus den eingesetzten Phased Array Prüfköpfen resultieren. Durch diese ist trotz eines lokal beschränkten Messbereichs Rückschlüsse auf das globale Fließverhalten möglich. Um die aus diesen Ergebnissen herausgearbeitete Theorie zu bestätigen, wäre hier eine umfangreichere Prozessüberwachung z.B. mit zusätzlichen Einzelschwinger-Prüfköpfen für eine globalere Betrachtung denkbar. Ebenfalls könnte ein Vergleich des Faservolumengehalts an verschiedenen Positionen der hergestellten Prüfstrukturen Aufschlüsse auf die bei der Herstellung vorliegenden Kompaktierung liefern.

Eine Beschränkung der Zuverlässigkeit der ermittelten Ergebnisse, gerade die der Fließfrontform, ergibt sich aus der Stabilität des betrachteten Formfüllprozesses. Da zur Ermittlung der Form der Fließfront mindestens zwei Formfüllvorgänge begleitet werden müssen, würde sich bei einem Prozess mit einem variierenden Formfüllvorgang Ungenauigkeiten ergeben, die zu einer fehlerhaften Interpretation der Ergebnisse führen kann.

Die weitere Grenze der hier vorgestellten Methodik beziehen sich in erster Linie auf die Auswertbarkeit des Ultraschallsignals. Hierbei ist das Signal-Rausch-Verhältnis ein maßgeblicher Wert. Mit der Abnahme dieses Werts werden zusätzliche Schritte wie das Erhöhen der Apertur oder das Durchführen von Glättungsfunktionen notwendig, die zu einer Verringerung der realisierbaren Ortsauflösung führen. Aus diesem Grund sollte bei der weiteren Optimierung dieser Methode großen Wert auf die Verbesserung des SNR gesetzt werden, in dem z.B. der Einsatz von Mess- und Auswertungsalgorithmen wie TFM untersucht werden. Diese versprechen darüber hinaus auch eine Verbesserung der Tiefenaflösung, wodurch eine dreidimensionale Auswertung der Fließfront über die Bauteildicke denkbar ist.

6. Danksagung

Die hier vorgestellten Ergebnisse entstanden im Rahmen des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft e.V. (DFG) geförderten Forschungsprojekts 428323347.

Weiterer Dank gilt den Projektpartnern des ILK der Technischen Universität Dresden, des IPC der Technischen Universität Hamburg und des IFL der Technischen Universität Braunschweig.

Referenzen

- [1] SCHÜRMAN, H. *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007. ISBN 978-3-540-72189-5.
- [2] KRANBUEHL, D.E., P. KINGSLEY, S. HART, G. HASKO, B. DEXTER AND A.C. LOOS. In situ sensor monitoring and intelligent control of the resin transfer molding process. In: *Polymer Composites*, 1994, **15**(4), 299–305. Doi:10.1002/pc.750150408
- [3] HEGG, M.C., A. OGALE, A. MESCHER, A.V. MAMISHEV AND B. MINAIE. Remote Monitoring of Resin Transfer Molding Processes by Distributed Dielectric Sensors. In: *Journal of Composite Materials*, 2005, **39**(17), 1519–1539. Doi:10.1177/0021998305051083
- [4] SCHWAB, S.D., R.L. LEVY AND G.G. GLOVER. Sensor system for monitoring impregnation and cure during resin transfer molding. In: *Polymer Composites*, 1996, **17**(2), 312–316. Doi:10.1002/pc.10616
- [5] POUCHIAS, A., P.R. CUNNINGHAM, J. STEIN AND M. KAZILAS. Online flow monitoring system development for the resin transfer moulding process. In: *18th European Conference on Composite Materials*, 2018.
- [6] MATSUZAKI, R., S. KOBAYASHI, A. TODOROKI AND Y. MIZUTANI. Control of resin flow/temperature using multifunctional interdigital electrode array film during a VaRTM process. In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2011, **42**(7), 782–793. Doi:10.1016/j.compositesa.2011.03.004
- [7] MATSUZAKI, R., S. KOBAYASHI, A. TODOROKI AND Y. MIZUTANI. Full-field monitoring of resin flow using an area-sensor array in a VaRTM process. In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2011, **42**(5), 550–559. Doi:10.1016/j.compositesa.2011.01.014
- [8] DI FRATTA, C., G. KOUTSOUKIS, F. KLUNKER AND P. ERMANNI. Fast method to monitor the flow front and control injection parameters in resin transfer molding using pressure sensors. In: *Journal of Composite Materials*, 2016, **50**(21), 2941–2957. Doi:10.1177/0021998315614994
- [9] DING, L., C. SHIH, Z. LIANG, C. ZHANG AND B. WANG. In situ measurement and monitoring of whole-field permeability profile of fiber preform for liquid composite molding processes. In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2003, **34**(8), 779–789. Doi:10.1016/S1359-835X(03)00121-0

- [10] SHEPARD, D.D. AND K.R. SMITH. Ultrasonic cure monitoring of advanced composites. In: *Sensor Review*, 1999, **19**(3), 187–194. Doi:10.1108/02602289910279094
- [11] STÖVEN, T., F. WEYRAUCH, P. MITSCHANG AND M. NEITZEL. Continuous monitoring of three-dimensional resin flow through a fibre preform. In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2003, **34**(6), 475–480. Doi:10.1016/s1359-835x(03)00059-9
- [12] OLIVERO, K.A., H.J. BARRAZA, E.A. O'REAR AND M.C. ALTAN. Effect of Injection Rate and Post-Fill Cure Pressure on Properties of Resin Transfer Molded Disks. In: *Journal of Composite Materials*, 2002, **36**(16), 2011–2028. Doi:10.1177/0021998302036016244
- [13] RUIZ, E. AND V. ACHIM. RTM Process analysis and on-line characterization. In: *17th Int. Conf. on Composite Materials*, 2009.