

# Ultraschallbasierte Prozessüberwachung am Beispiel eines T-RTM Prozesses

Marcel ACHZET<sup>1</sup>, Thomas SCHLECH<sup>1</sup>, Florian F. LINSCHIED<sup>1</sup>, Jan FABER<sup>2</sup>,  
Markus G. R. SAUSE<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universität Augsburg, Augsburg

<sup>2</sup> DLR, Augsburg

Kontakt E-Mail: marcel.achzet@mrm.uni-augsburg.de

## Kurzfassung.

Eine in den Prozess integrierte Qualitätsüberwachung bietet einen maßgeblichen Vorteil für nachhaltige und effiziente Fertigungsverfahren, wovon gerade komplexe Fertigungsprozesse zur Verarbeitung hochpreisiger oder aufwändig hergestellter Materialien profitieren. Ein derartiges Überwachungssystem wurde am Beispiel eines T-RTM Prozesses zur Herstellung faserverstärkter Kunststoffe mittels eines in das Formwerkzeug integrierten Sensornetzwerks untersucht. Der Fokus der Untersuchungen lag insbesondere auf der Datenauswertung des Netzwerks aus Ultraschallsensoren. Prozessrelevante Größen, wie die Fließfrontdynamik und der Polymerisationsgrad konnten aus den Daten der einzelnen Sensoren gewonnen werden. Für eine effiziente, flächendeckende Auswertung wurde ein Rekonstruktionsalgorithmus entwickelt und speziell auf die Fließfrontdynamik im T-RTM Prozess angewandt. Ein Vergleich mit den Ergebnissen der gefertigten Bauteile sowie Validierungsversuche an einfachen Plattenwerkzeugen bestätigen die Ergebnisse des Rekonstruktionsalgorithmus und zeigen, dass für die Benetzung des Halbzeugs kritische Stellen mit Hilfe der Messungen visualisiert und effizient identifiziert werden können.

## 1. Einführung

Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK) sind bekannt für ihre außergewöhnlichen mechanischen Eigenschaften. Die im Vergleich zu Metallen hohen Herstellungskosten begrenzen jedoch eine breite industrielle Anwendung, sodass sie noch immer überwiegend für Hochleistungsanwendungen wie zum Beispiel in der Luft- und Raumfahrt oder in der Sport- und Oberklasse im Automobilbereich eingesetzt werden. Die strukturellen Belastungen, denen das Material im Einsatz ausgesetzt ist, führen zu Sicherheitsanforderungen, die während der ganzen Einsatzdauer eingehalten werden müssen. Dies erfordert neben gründlicher Wartung eine Sicherung der Produktionsqualität. Damit ist für effiziente Fertigungsverfahren innovativer, ökonomischer CFK-Bauteile eine integrierte Prozessüberwachung essenziell, um nachgelagerte, aufwendige Kontrollen zu ersetzen [1, 2].

Die Prozessüberwachung bzw. Werkstoffprüfung mit Ultraschallsensoren ist ein in der Industrie etabliertes Verfahren und soll mit den hier vorgestellten Auswertemethoden am Beispiel eines thermoplastischen Resin Transfer Molding (T-RTM) Prozesses optimiert werden. Im Rahmen des Projekts CosiMo (Composites for Sustainable Mobility) wurde an der



Konzeptionierung und Optimierung des Prozesses geforscht. Hierbei wurde zur Prozessüberwachung der Bauteilqualität ein in das T-RTM Werkzeug integriertes Sensornetzwerk aus Ultraschall-, Druck-, Temperatur- und dielektrischen Sensoren entwickelt. Der Fokus der hier vorgestellten Ergebnisse liegt auf der Datenauswertung des Netzwerks aus Ultraschallsensoren, wobei Faber et al. [3] ergänzend zu Stieber et al. [4] einen Gesamtüberblick zur sensorbasierten Prozessüberwachung liefert.

Bei der Konzeption der Prozessüberwachung wurde das Augenmerk vor allem auf die Evaluierung der Fließfrontdynamik und des Polymerisationsgrades gelegt, da diese Größen wichtige Informationen über die Güte des Werkstücks liefern. Die relevanten Prozessinformationen können dabei durch die Identifizierung geeigneter Merkmale extrahiert werden. Allerdings beschränken sich die Informationen räumlich auf die Sensorpositionen. Für eine effiziente, flächendeckende Auswertung wird ein Rekonstruktionsalgorithmus vorgestellt, dessen Prinzip auf verschiedene Prozessvariablen angewandt werden kann.

## **2. Material und Methodik**

### *2.1 T-RTM Prozess*

Der klassische RTM Prozess ist ein etabliertes Herstellungsverfahren für faserverstärkte Bauteile. Dabei wird zunächst eine aus Fasern bestehende Preform in ein zweiteiliges Formwerkzeug eingelegt. Nachdem das Werkzeug auf einen definierten Spaltabstand zugefahren ist, wird unter Druck Harz injiziert. Der Spalt unterstützt dabei die vollständige Imprägnierung der Fasern. Anschließend wird das Werkzeug vollständig geschlossen, sodass das Harz unter Druck und Hitzezufuhr zu einem Bauteil in gewünschter Endkontur aushärtet. Beim T-RTM Prozess wird anstelle des Harzes  $\epsilon$ -Caprolactam injiziert, das unter Zugabe von Aktivator und Katalysator zu Polyamid 6 polymerisiert. Detaillierte Untersuchungen zur Polymerisation und Messungen des Polymerisationsgrades wurden von Kurt et al. [5] durchgeführt.

Angesichts fluktuierender Prozessparameter und dem während des Prozesses geschlossenen Formwerkzeug ist bei der Optimierung des Herstellungsprozesses eine integrierte Prozessüberwachung von entscheidendem Vorteil. Durch unvollständige Imprägnierung bzw. Polymerisation wurden vor allem Trockenstellen als typische Fehlstellen am Bauteil identifiziert, was die Bedeutung einer sorgfältigen Evaluierung der Fließfrontdynamik und des Polymerisationsgrades unterstreicht.

### *2.2 Sensorik und Datenaufnahme*

Für das Sensornetzwerk wurden insgesamt 57 Ultraschallsensoren in ein Werkzeug für die Fertigung eines Schikanebauteils integriert. Abbildung 1 zeigt schematisch das in das Werkzeug integrierte Netzwerk der Ultraschallsensoren. Dazu wurden die Sensoren in einem feinmaschigen, äquidistanten Basisraster angeordnet, wobei dieses an Stellen komplexer Geometrie durch zusätzliche Sensoren ergänzt wurden. Der Großteil der Sensoren wurde für eine Puls-Echo Messung innerhalb des Werkzeugs an der Oberseite des Bauteils integriert, da aufgrund des experimentellen Aufbaus die Fließfrontausbreitung vorrangig an der Oberseite stattfindet. Die restlichen 10 Sensoren sind auf der Rückseite gegenüberliegend zu ausgewählten Sensoren der Oberseite verbaut um in Transmission zu messen.



Abbildung 1: Schematische Darstellung des in das Schikanenwerkzeug integrierten Netzwerks aus Ultraschallsensoren. Die Positionen der Sensoren sind mit blauen Punkten markiert. Die rechte Abbildung zeigt dabei das obere Schikanenwerkzeug und die linke Abbildung das untere auf der zusätzlich der mit einem schwarzen Punkt markierte Injektionspunkt markiert ist.

Für die Datenaufnahme wurde das Messsystem von F. Linscheid erweitert, um in Transmissions- und Impuls/Echomodus messen zu können [3]. Standardmäßig wurden die Sensoren auf der Oberseite des Schikanenwerkzeugs als Sender und Empfänger im Puls-Echo-Modus und auf der Unterseite als passiver Empfänger im Transmissionsmodus betrieben. Bei einzelnen Versuchen wurden alle Sensoren in den Puls-Echo-Modus geschaltet, was eine aktive Beschallung der gegenüberliegenden Bauteiloberflächen erlaubt und so Zugang zu weiteren Informationen gewährt.

Das Messprinzip zur Detektion von Fließfront und Polymerisationsgrad ist in Abbildung 2 dargestellt. Die ausgesendeten Ultraschallwellen durchlaufen das Werkzeug, bis sie an der Grenzfläche zwischen Werkzeug (Stahl) und Kavität mit eingelegter Preform (Luft) größtenteils reflektiert werden. Beim Eintreffen der Fließfront ändern sich die Reflexionsbedingungen. Der Anstieg der akustischen Impedanz durch Benetzung der Preform führt zu einer deutlich stärker ausgeprägten Signaltransmission an der Grenzfläche und somit gleichzeitig zu einer Abnahme der Intensität des reflektierten Pulses. Bevor der transmittierte Wellenteil den Sensor auf der gegenüberliegenden Seite erreicht, passiert er eine weitere Grenzfläche an der unteren Oberfläche der Kavität, die wiederum zu einer Teilreflexion der Welle führt. Am oberen Teil des Werkzeugs kann die Welle mehrfach reflektiert werden, wodurch die Hauptechokaskade im erfassten Signal entsteht. Aufgrund der hohen Dämpfung der imprägnierten Preform haben sich die Echos, die von der Reflexion am unteren Teil der Preform herrühren, als schwer extrahierbar erwiesen. Es konnten jedoch erfolgreich Transmissionssignale detektiert werden, die zusätzliche Informationen über die Fließfront liefern.

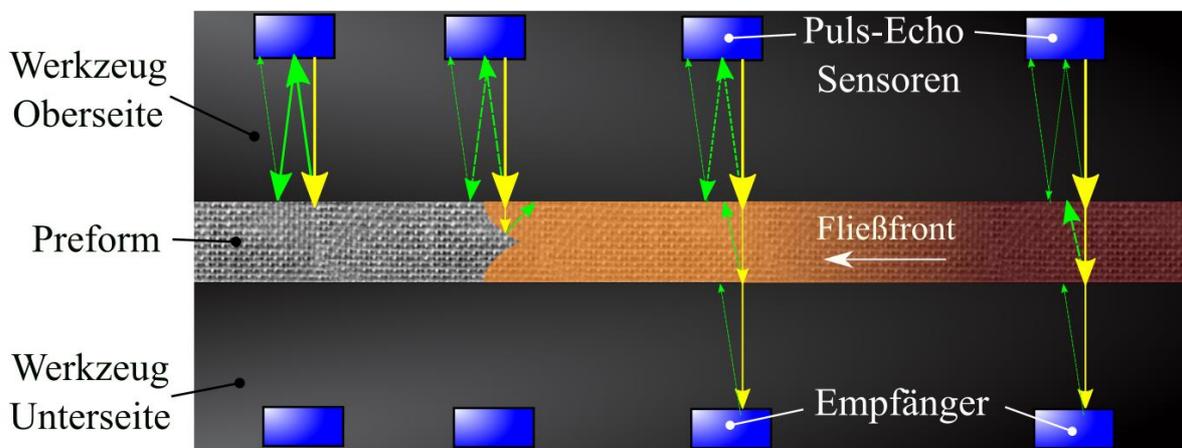


Abbildung 2: Schematische Abbildung des Messprinzips zum T-RTM Prozess. Die ausgesendeten bzw. reflektierten Ultraschallwellen sind durch gelbe bzw. grüne Pfeile illustriert, wobei die Intensität der Wellen qualitativ durch die Größe der Pfeile dargestellt wird. (In Anlehnung an [2]).

Die empfangenen Ultraschallsignale werden dabei mit einem 1 MHz Hochpass gefiltert, um 40 dB mit einem Instrumentenverstärker verstärkt und anschließend mit 20 MS/s digitalisiert. Abbildung 3 zeigt ein exemplarisches Set der aufgenommenen Ultraschallsignale.

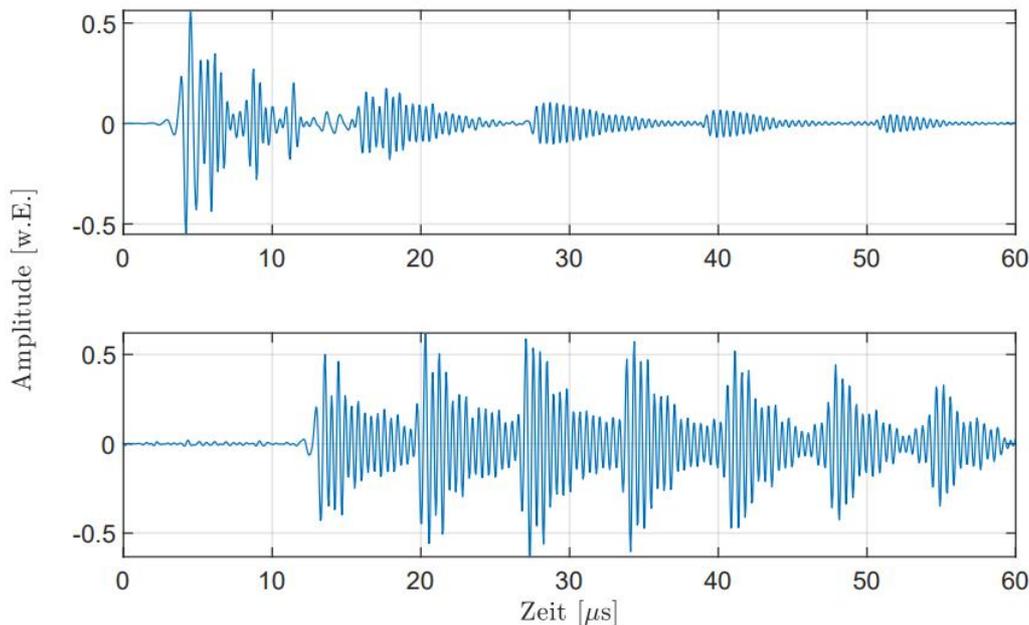


Abbildung 3: Exemplarische Ultraschallsignale, aufgenommen am T-RTM Versuch zum Zeitpunkt einer vollständigen Benetzung der Preform. Oben das Impuls-Echo-Signal, unten das Transmissionssignal.

### 3. Auswertung

Für die Auswertung der Ultraschallsignale wurden zunächst geeignete Merkmale identifiziert, um den Umgang großer Datenmengen und damit den Zugang zu wichtigen Prozessinformationen zu vereinfachen. Dementsprechend wurde ein Algorithmus entwickelt, der die aufgenommenen Rohdaten einliest und automatisch die vordefinierten Merkmale aus den Signalen berechnet. Als sehr robust hat sich dabei ein Merkmal erwiesen, das mit der Stärke des zweiten Echos der Kaskade korreliert. Zur Berechnung des Merkmals wird eine Fast Fourier Transformation (FFT) auf das Ultraschallsignal innerhalb eines vordefinierten Gates angewandt. Das Gate wird automatisiert um den Peak des zweiten Echos positioniert. Dabei ist der Anfang bzw. das Ende des Gates an den Punkten definiert, an denen das Signal links und rechts des Peaks um die Hälfte der Peak-Prominence abgefallen ist. Die Peak-Prominence ist dabei definiert als der minimale Abfall, den das Signal vom Standpunkt des Peaks durchlaufen muss bevor es wieder auf einen noch höheren Wert ansteigt [6]. Dieses Verfahren hat sich im Vergleich der analogen Positionsbestimmung mittels der Peak-Höhe als besonders stabil erwiesen. Die Signalstärke wird nun definiert als die durchschnittliche Amplitude der Frequenzen, die innerhalb einer Bandbreite von  $\pm 1$  MHz um das Maximum liegen. Abbildung 4 zeigt drei typische Verläufe dieses Merkmals extrahiert aus Sensoren an verschiedenen Positionen.

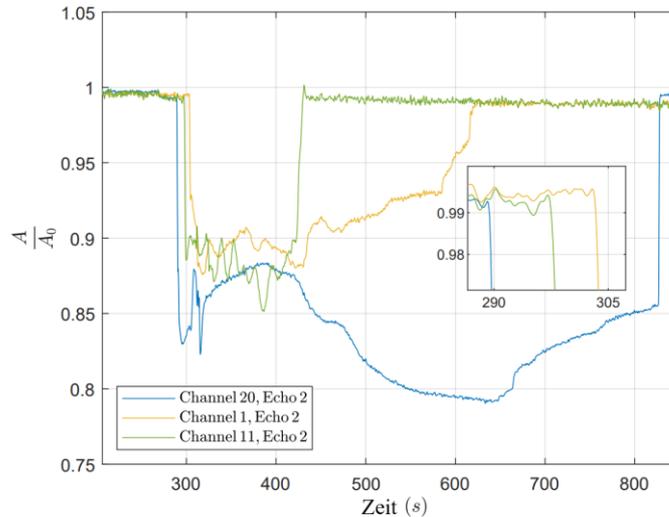


Abbildung 4: Normierte Stärke des zweiten Echos, extrahiert aus den Signalen von drei unterschiedlichen Sensoren aufgetragen über die Prozesszeit nach dem Schließen des Formwerkzeugs bei  $t = 200s$ .

### 3.1 Fließfrontdetektion

Die Amplitude der Echos aus den Ultraschallsignalen ist weitgehend durch den Reflexions- bzw. Transmissionskoeffizienten,  $R$  bzw.  $T$ , an der Grenzfläche zwischen Werkzeug und Kavität bestimmt. Beim orthogonaler Einschallung und einem Übergang von einem Medium A zu einem Medium B sind die Koeffizienten dabei gegeben durch

$$R = \frac{Z_B - Z_A}{Z_B + Z_A}, \quad T = \frac{2 \cdot Z_B}{Z_B + Z_A}, \quad Z_n = c_n \rho_n,$$

wobei  $Z_n$  als Produkt von Schallgeschwindigkeit  $c_n$  und Dichte  $\rho_n$  die akustische Impedanz im Medium  $n$  angibt [7].

Der beträchtliche Unterschied der akustischen Widerstände von trockener Preform und Formwerkzeug und die schlechte Kopplung der trockenen Fasern an die Oberfläche führen zu einem sehr hohen Reflexionsindex der näherungsweise mit  $R \approx 1$  angenommen werden kann. Die Imprägnierung der Fasern führt zu einem erheblichen Anstieg der akustischen Impedanz und einer besseren Kopplung an die Oberfläche der Kavität. Dadurch sinkt der Reflexionsindex abrupt, was sich in einer Abschwächung der Intensität des Echos bemerkbar macht. Dies ermöglicht eine Detektion der Fließfront anhand der Abnahme der Signalstärke. Anhand des extrahierten Merkmals aus Abbildung 4 ist diese Abnahme bei allen Signalverläufe nach circa 295 s deutlich zu sehen. Die Ankunftszeit der Fließfront wurde dabei mit einem Signalstärkeabfall auf 95 % des ursprünglichen Wertes definiert. Dieser feste Schwellwert wurde als Kompromiss gewählt, um einerseits eine möglichst frühe Detektion des Signalabfalls zu ermöglichen, andererseits jedoch auch Fehlidentifikationen der Fließfrontankunft, die durch stärkere Fluktuationen im Signal ausgelöst werden kann, zu vermeiden. Diese den Sensoren zugeordneten, örtlichen Ankunftszeiten werden in Abschnitt 3.3 für eine Rekonstruktion der gesamten Fließfront verwendet.

Der weitere zeitliche Verlauf des beschriebenen Features nach dem Abfall kann meist in eine von drei Kategorien eingeteilt werden. Exemplarisch sind die drei Kategorien in Abbildung 4 dargestellt. Dabei kommt es entweder zu einem abrupten, bzw. allmählichen Wiederanstieg oder einem Sättigungsverhalten. Der abrupte bzw. allmähliche Anstieg des grünen bzw. gelben Graphen kann auf eine Ablösung der Preform von der Werkzeugoberfläche hindeuten, die durch Materialschrumpf und sich lösende Spannungen verursacht werden kann. Dieses Ablösen ist ein unerwünschter Effekt, der zu örtlichen Forminnendruckabfällen und

damit zu Blasenbildung und unvollständiger Polymerisation führen kann. Analog zur Fließfrontrekonstruktion könnte in zukünftigen Arbeiten die Ablösung als flächendeckendes, sich ausbreitendes Ereignis mit einer Abwandlung des hier beschriebenen Algorithmus rekonstruiert werden.

Der blaue Graph aus Abbildung 4 hingegen zeigt bis zu 650 s einen eher konvergierenden Verlauf. Dies deutet auf eine über den ganzen Prozess hinweg bestehende Kopplung zwischen Preform und Werkzeugoberfläche. Der leicht abfallende Sättigungsverlauf repräsentiert dabei Veränderungen der Materialparameter und damit die fortschreitende und über die Zeit zum Erliegen kommende Polymerisation.

### 3.2 Überwachung der Polymerisation

Ein wichtiger Indikator der Bauteilqualität ist neben der Fließfrontausbreitung der Polymerisationsgrad, dessen Überwachung zu einer Optimierung der Prozesszeit und -effizienz beitragen kann. Für eine Bewertung des Polymerisationsgrades anhand der US-Daten wurden verschiedene Methoden untersucht. Bei der Betrachtung der Transmissionssignale ist es möglich, per Kreuzkorrelation die Durchgangszeit der Schallwellen durch das zu imprägnierende Gelege zu extrahieren [2, 8]. Diese Durchgangszeit bzw. die daraus berechnete Schallgeschwindigkeit, die exemplarisch in Abbildung 5 dargestellt ist, zeigt das Sättigungsverhalten der Schallgeschwindigkeit über die Prozesszeit, anhand derer der Polymerisationsgrad abgeschätzt werden kann. Dazu wird an den linearen Verlauf des Graphs eine Gerade angepasst. Der Zeitpunkt, an dem die Abweichung zwischen Graph und Gerade einen definierten Grenzwert überschreitet, wird der eintretenden Sättigung zugeordnet [9].

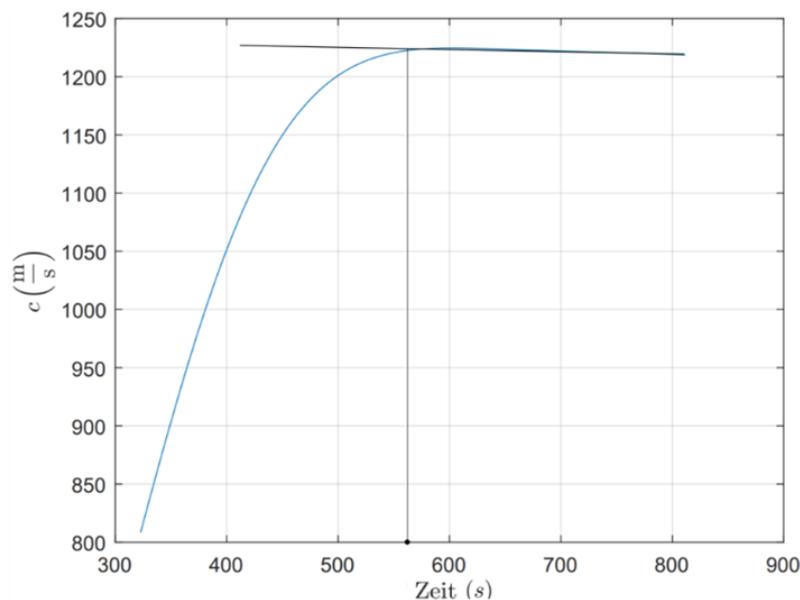


Abbildung 5: Berechnung der Schallgeschwindigkeit über die Prozesszeit nach der Injektion. Der Zeitpunkt der eintretenden Sättigung der Polymerisation kann auf circa 560 s nach Injektion abgeschätzt werden.

Nach dem Injektionsbeginn bei circa 300 s kann so die Polymerisationszeit auf circa 4 min bestimmt werden. Gute Übereinstimmung zeigt der Vergleich mit dem Verlauf des blauen Graphen aus Abbildung 4 der ebenfalls um 560 s allmählich den Sättigungswert erreicht.

### 3.3 Fließfrontrekonstruktion

Für viele dynamische Prozessvariablen, die sich kontinuierlich im Raum ändern, ist eine flächendeckende Evaluierung für eine sorgfältige Prozessüberwachung zielführend. Deshalb ist es erstrebenswert, ortsspezifische Sensorinformationen als Stützpunkte zu verwenden und

deren Information räumlich zu interpolieren. Die Entwicklung und Validierung basiert auf Daten aus Infusionsversuchen mit einem transparenten Werkzeug, das eine optische Nachverfolgung der Fließfront ermöglicht. Exemplarisch wird der so entwickelte Algorithmus auf Basis der Graphentheorie im nächsten Schritt auf die Fließfrontdynamik im T-RTM Prozess angewendet. Neben der Identifikation kritischer Stellen beim Herstellungsprozess konnte damit eine globale zeitabhängige Rekonstruktion der Fließfront über die gesamte Prozesslaufzeit ermöglicht werden.

### 3.3.1 Algorithmus und Validierung

Die Grundlage der Fließfrontrekonstruktion bildet die Graphentheorie, die zusammen mit den lokalen Sensorinformationen und geometrischen Maßen eine effiziente, auf komplexe Geometrien anwendbare Interpolationen liefern kann. Ein Graph besteht dabei aus Eckpunkten  $E_i$  und den Verbindungslinien bzw. Kanten  $K_i$ , denen ein Gewicht, beispielsweise die geometrische Länge  $d_i$  zugeordnet werden kann [10]. Effiziente Algorithmen ermöglichen dabei umfassende Analysen wie eine Berechnung des kürzesten Wegs zwischen beliebigen Eckpunkten unter Berücksichtigung der verwendeten Gewichte.

Zur Veranschaulichung der theoretischen Grundlagen wird in Abbildung 6 ein einfaches, rechteckiges Werkzeug betrachtet.

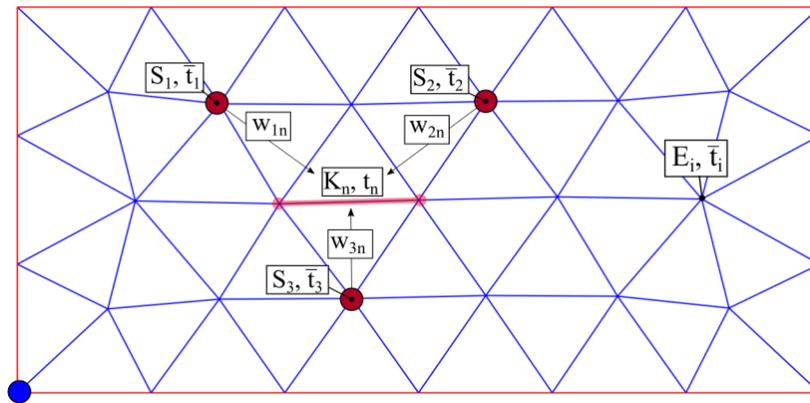


Abbildung 6: Schematische Zeichnung eines an ein rechteckiges Werkzeug angepasstes Dreiecksgitters mit relevanten Größen der Graphentheorie.

Mit Hilfe eines geeigneten Gitters werden die geometrischen Informationen durch die Koordinaten der Eckpunkte  $E_i$  und den Verbindungslinien bzw. Kanten  $K_i$  mit der Länge  $d_i$  parametrisiert. Die drei Sensoren  $S_{i=1...3}$  liefern dazu die örtlichen, absoluten Ankunftszeiten  $\bar{t}_{1...3}$  der Fließfront. Für eine vollständige Fließfrontrekonstruktion ist es nun notwendig, die Ankunftszeiten  $\bar{t}_i$  an den Eckpunkten  $E_i$  ohne Sensoranbindung vorherzusagen, indem den Kanten geschickt die Durchgangszeiten  $t_n$  der Fließfront als zeitliche Gewichte zugeordnet werden. Der Einsatz von Konzepten der Graphentheorie ermöglicht hierfür eine einfache Identifizierung des schnellsten Wegs zwischen Eck- bzw. Injektionspunkt und den zugehörigen absoluten Ankunftszeiten. Eine Gewichtungsmatrix  $w_{in}$  bestimmt bei der Berechnung von  $t_n$  an der Kante  $K_n$  den Einfluss des Sensors  $S_i$  und korreliert in erster Näherung mit dem Inversen des geometrischen Abstands  $d_{in}$  gemäß der Formel

$$w_{in} = \begin{cases} \left(\frac{1}{d_{in}}\right)^x & , w_{in} \leq w_{max} \\ w_{max} & , w_{in} > w_{max} \end{cases} \quad (1).$$

Mit Hilfe der Variablen  $x$  bzw.  $w_{max}$  kann der Einflussbereich entsprechend den experimentellen Parameter wie der Sensor- bzw. Gitterdichte angepasst werden.  $w_{max}$  verhindert dabei

Divergenzen und damit eine Übergewichtung benachbarter Kanten. Die Herausforderung besteht nun darin, den Sensoren geeignete Absolutwerte  $v_i$  zuzuordnen, sodass die zeitlichen Gewichte  $t_n$  unter Berücksichtigung der geometrischen Längen  $d_n$  über

$$t_n = \frac{d_n}{v_n}, \quad v_n = \frac{w_{in} v_i}{\sum_i w_{in}} \quad (2)$$

berechnet werden können. Zusammengefasst ist die Berechnung der Ankunftszeiten  $\bar{t}_i$  an den Eckpunkten eine Funktion von  $v_i$ ,  $w_{in}$  und  $d_n$ , wobei  $w_{in}$  und  $d_n$  aus den geometrischen Rahmenbedingungen abgeleitet werden können. Mit Hilfe der gemessenen Ankunftszeiten  $\bar{t}_{i=1\dots3, \text{Gemessen}}$  als Randbedingungen können die Parameter  $v_i$  gefunden werden, die die Fehlerfunktion

$$f(v_i) = \left( \bar{t}_{i, \text{Gemessen}} - \bar{t}_i(v_i, w_{in}, d_n) \right)^2 \quad (3)$$

minimieren. Aus Formel (2) lässt sich für  $v_i$  die Einheit  $[m/s]$  ableiten, sodass für die Startwerte die durchschnittliche Geschwindigkeit der Fließfront, gegeben durch  $\bar{v}_i = d_i / \bar{t}_{i, \text{Gemessen}}$ , gute Ergebnisse liefert.

Für die Validierung des Algorithmus wurden Daten eines Vakuuminfusionsprozesses (Vacuum Assisted Process - VAP) genutzt. Durch die Verwendung von Kameras und eines transparenten circa 30x60cm großen Werkzeugs aus Plexiglas kann die gemessene Fließfrontdynamik mit der Rekonstruktion auf Basis der Messungen abgeglichen werden. Dazu wurde ein entsprechendes Dreiecksgitter an das Werkzeug angepasst, für dessen Eckpunkte die Ankunftszeiten  $\bar{t}_{i, \text{Beobachtet}}$  der Fließfront aus den aufgenommenen Bildreihen extrahiert werden. Als Ausgangsparameter für die Fließfrontrekonstruktion dienen die Ankunftszeiten von ausgewählten Eckpunkten, die spätere Sensordaten repräsentieren. Dieses Vorgehen ermöglicht dabei eine effiziente Untersuchung des Einflusses der Sensorpositionierung. Mit den berechneten Ankunftszeiten  $\bar{t}_{i, \text{Berechnet}}$  kann mittels der Formel

$$F = \frac{\sum_i |\bar{t}_{i, \text{Beobachtet}} - \bar{t}_{i, \text{Berechnet}}|}{\text{Anzahl der Eckpunkte}} \quad (4),$$

die zeitliche Abweichung pro Eckpunkt berechnet werden, die als Maß für die Genauigkeit der Animation dient. Für eine zweckmäßige Fließfrontanimation sollten die Anfangsparameter, dargestellt in Abbildung 7 sorgfältig aufeinander abgestimmt werden und Rahmenbedingungen wie erwünschte Auflösung und verfügbare Rechenleistung angepasst werden. Abbildung 8 stellt in einem Konturenplot die beobachtete und die auf Grundlage von 15 Sensoren berechnete Fließfrontrekonstruktion gegenüber. Dabei wurde ein regelmäßiges Dreiecksgitter mit 384 Eckpunkten verwendet, sodass nach Formel 4 eine durchschnittliche Genauigkeit von unter  $\pm 3$  s an den Eckpunkten erzielt wurde, was in Anbetracht der Prozesszeit von 5 min und der gekräuselten Fließfront als gutes Ergebnis beurteilt werden kann.

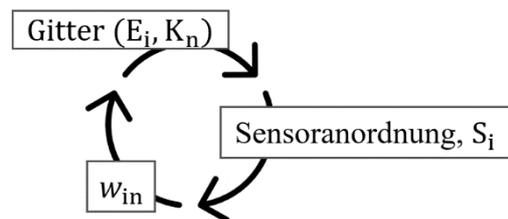


Abbildung 7: Wichtige Parameter der Fließfrontrekonstruktion

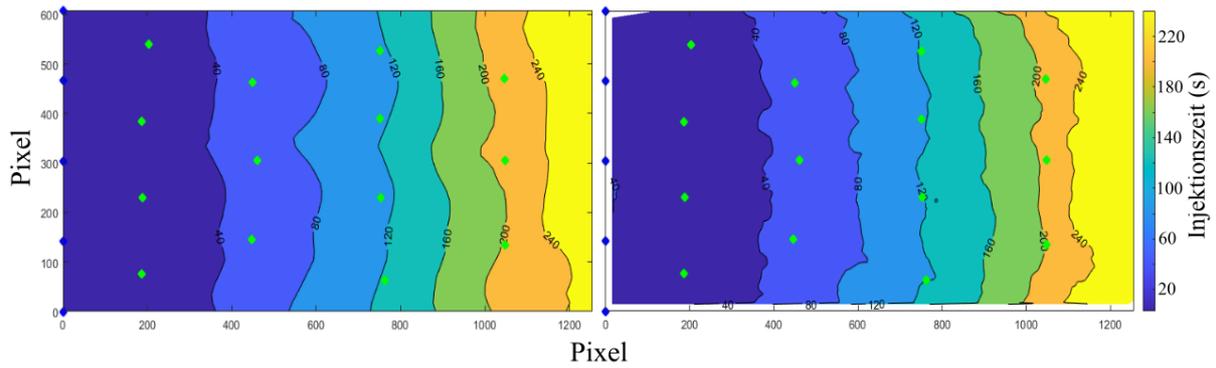


Abbildung 8: Gegenüberstellung des berechneten Fließfrontverlaufs (links) und des beobachteten (rechts). Die Konturen kennzeichnen die Fließfront zu den angegebenen Zeiten in Sekunden nach der Injektion. Die grünen Punkte stellen die Sensoren dar, die blauen die Injektionspunkte.

Mit Hilfe der Parameterstudien aus den Validierungsversuchen wurde im nächsten Schritt die Fließfrontrekonstruktion auf den T-RTM Prozess angewandt.

### 3.3.2 Anwendung auf den T-RTM Prozess

Zunächst wurde analog zu den Validierungsversuchen ein geeignetes Dreiecksgitter an das Schikanenewerzeug aus Abbildung 1 angepasst, wobei aus 38 Sensoren zuverlässig die Ankunft der Fließfront bestimmt werden konnte. Mit diesen konnte eine passende Gewichtungs-funktion  $w_{in}$  gewählt werden.

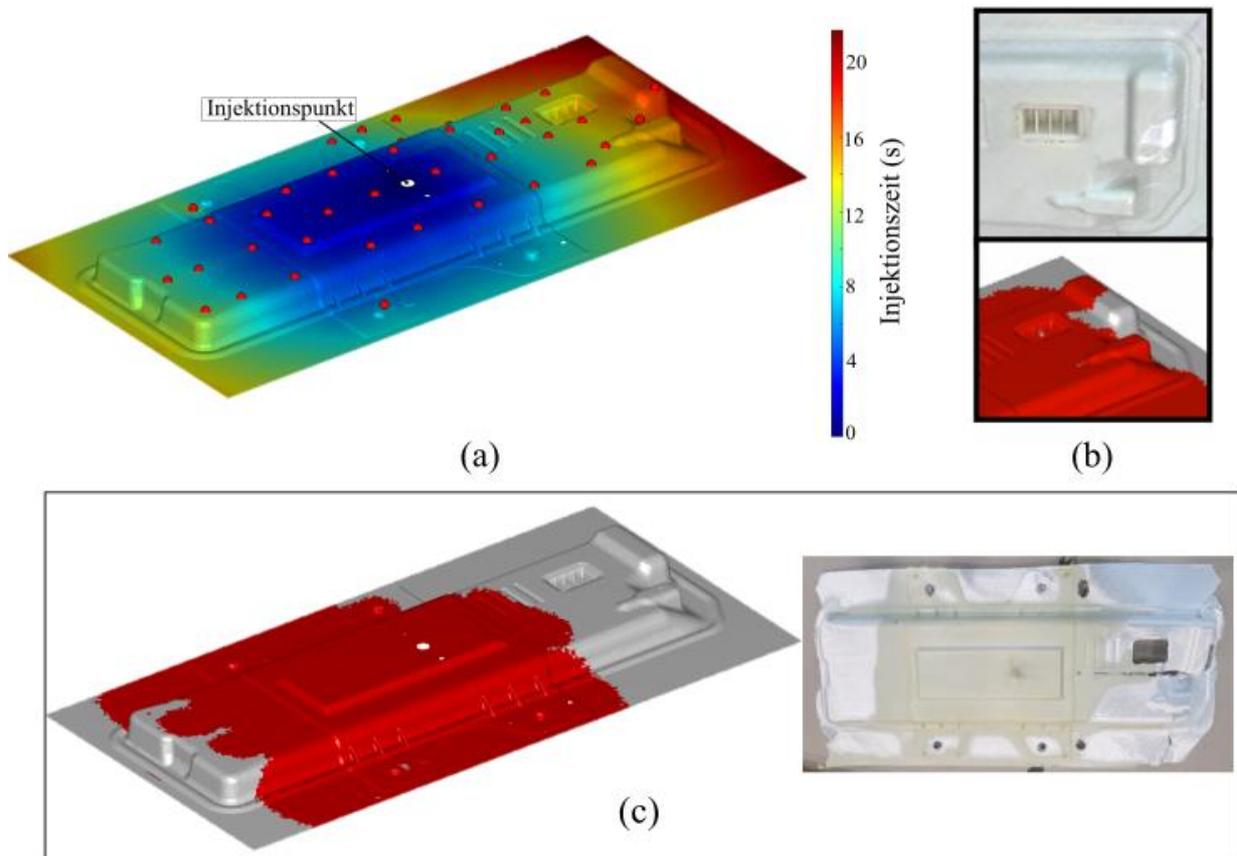


Abbildung 9: (a) Farbliche Darstellung des Zeitverlaufs der Fließfront. Die Sensorpositionen sind dabei mit roten Punkten gekennzeichnet. (b) Momentaufnahme der Fließfrontrekonstruktion (unten) im Vergleich zu einer Trockenstelle am realen Bauteil (oben). (c) Momentaufnahme der Fließfrontrekonstruktion (links) im Vergleich zu einem zum gleichen Zeitpunkt abgebrochenen Fehlversuch.

Die Ergebnisse der Fließfrontrekonstruktion sind in Abbildung 9 zusammengefasst. In Abbildung 9 (a) ist eine gehemmte bzw. favorisierte Ausbreitungsrichtung der Fließfront in positiver bzw. negativer x-Richtung zu erkennen, was durch einen Vergleich zu einem vorzeitig abgebrochenem Fehlversuch, dargestellt in Abbildung 9 (c) bestätigt wird. Zudem ist in allen Abbildungen eine frühe Benetzung der Laschen erkennbar. Abbildung 9 (b) zeigt, dass auch kleinere, kritische Stellen in der Rekonstruktion identifizierbar sind. So korreliert eine oft beobachtete Trockenstelle im fertigen Bauteil mit auffällig langen Imprägnierungszeiten, die mittels der Fließfrontrekonstruktion bestimmt werden konnten.

Unabhängig von dem Rekonstruktionsalgorithmus bzw. der Messtechnik, können jedoch räumlich begrenzte Effekte, wie beispielsweise die in Abbildung 9 (c) beobachteten, lokalen Fließkanalbildungen bei einem ungünstig gewähltem Sensornetzwerk unerkannt bleiben. Damit ist eine an die Geometrie angepasste und ausreichend dichte Platzierung der Sensoren eine wichtige Voraussetzung für eine zuverlässige Prozessüberwachung durch das Sensornetzwerk, deren Grenzen in weiteren Versuchen bestimmt werden sollen.

#### 4. Zusammenfassung und Ausblick

Die hier vorgestellten Ergebnisse verdeutlichen das Potential eines in der Prozessüberwachung angewendeten Sensornetzwerks. Mit adaptierten Auswertemethoden können Ultraschallsensordaten als Stützpunkte für eine großflächige Interpolation genutzt werden. Solch eine auf Grundlage des Sensornetzwerks erstellte Interpolation kann vor allem bei geschlossenen Werkzeugen ohne Möglichkeiten visueller Kontrollen eine automatisierte Prozessüberwachung und eine nachgelagerte Diagnose bei fehlerhaften Bauteilen erleichtern. Des Weiteren kann die Rekonstruktion der Fließfront anhand der Sensordaten die Input-Basis für Arbeiten an echtzeitfähigen Modellen und einer adaptiven Prozesssteuerung bis hin zu einer Prozessregelung bilden.

Es hat sich gezeigt, dass für eine präzise Rekonstruktion eine geeignete Abstimmung der Startparameter wichtig ist. Trotz vereinfachter Gewichtsfunktion  $w_{in}$ , die sich als Parameter mit größtem Einfluss herausgestellt hat, konnten gute Ergebnisse erzielt werden. So kann der erarbeitete Algorithmus durch eine Anpassung von  $w_{in}$  an geometrische Feinheiten weiter optimiert werden. Die Grundlagen des Algorithmus sind dabei keineswegs beschränkt auf Fließfrontsimulationen und könnte auf verschiedenste Prozessvariablen und beliebige Geometrien angewendet werden. Im Falle des untersuchten T-RTM Prozesses könnte so die in Abschnitt 2.1. kurz beschriebene Ablösung der Preform vom Werkzeug analog zur Fließfrontanimation mit dem Sensornetzwerk interpoliert und dargestellt werden.

#### Referenzen

1. Beaumont, P.W.R. and C.H. Zweben, *Comprehensive composite materials II*. 2017: Elsevier Science.
2. Liebers, N., *Ultraschallsensorgeführte Infusions- und Aushärteprozesse für Faserverbundkunststoffe*. 2018, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt eV.
3. Faber, J., et al., *Sensor-based process monitoring of in-situ polymerization in T-RTM manufacturing with caprolactam*. 2021.
4. Stieber, S., et al. *Towards real-time process monitoring and machine learning for manufacturing composite structures*. in *2020 25th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*. 2020. IEEE.
5. Kurt, S., et al., *Determination of the residual monomer concentration of  $\epsilon$ -caprolactam in polyamide-6 using thermogravimetric analysis coupled with Fourier transform infrared spectroscopy gas analysis*. *Journal of Applied Polymer Science*, 2021. **138**(30): p. 50730.
6. MATLAB, *Signal Processing Toolbox, findpeaks()*. 9.9.0.1467703 (R2020b): The MathWorks Inc.
7. Krautkrämer, J. and H. Krautkrämer, *Werkstoffprüfung mit Ultraschall*. 2013: Springer-Verlag.

8. Wendemuth, A., *Grundlagen der digitalen Signalverarbeitung: ein mathematischer Zugang*. 2006: Springer-Verlag.
9. Lionetto, F. and A. Maffezzoli, *Monitoring the cure state of thermosetting resins by ultrasound*. *Materials*, 2013. **6**(9): p. 3783-3804.
10. Volkmann, L., *Fundamente der Graphentheorie*. 2013: Springer-Verlag.