

In-Situ Laminatdickenmessung während der Infusion und Aushärtung von Faserverbundkunststoffen

Nico LIEBERS *

* Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Braunschweig
nico.liebers@dlr.de

Kurzfassung. Zur kostengünstigen Herstellung von großen Faserverbundstrukturen bieten sich Infusionsverfahren an, da hier nur eine feste, formgebende Formhälfte benötigt wird, während die zweite Formhälfte durch eine flexible Membran realisiert wird. Aufgrund vieler variierender Parameter wie u.a. dem lokal schwankenden Flächengewicht des Faserhalbzeugs, Fließeigenschaften des Harzes, Temperaturverteilung, können große Dickenschwankungen im Bauteil selbst bzw. von einem Prozess zum nächsten auftreten, somit auch das Bauteilgewicht. Diese großen Fertigungstoleranzen wirken sich negativ auf spätere Fügeprozesse, der Strukturauslegung und Leichtbaugüte der Struktur aus, da die Toleranzen hier berücksichtigt werden müssen. Die Dicke ist u.a. durch Regulieren der Menge des in das Fasermaterial infiltrierten Harzes und durch Druck beeinflussbar. Konventionelle Methoden zur Dickenmessung lassen sich häufig nicht in das industrielle Fertigungsumfeld, wie beispielsweise in einen Autoklaven, integrieren. Nach derzeitigem Stand der Technik kann die Dicke erst nach Durchlaufen des Infusions- und Aushärtungsprozesses am fertigen Bauteil gemessen werden. Die optimalen Prozessparameter zum Erreichen einer gezielten Bauteildicke muss also in einer aufwendigen Versuchsreihe gefunden werden. Aufgrund der unvermeidbaren Prozessschwankungen, welche nicht im laufenden Prozess erfasst und berücksichtigt werden können, werden die fertigungsbedingten Dickentoleranzen nicht vermindert, dies ist nur durch eine in-situ-Dickenmessung möglich.

Es wird bereits Ultraschall verwendet, um die Aushärtung während des Prozesses zu überwachen. Dabei wird das Bauteil über seine Dicke durchschallt und aus der Laufzeit die aktuelle Schallgeschwindigkeit des Harzes berechnet, die mit zunehmender Vernetzung steigt. Bei den Infusionsprozessen wird jedoch die Schalllaufzeit ebenfalls von der variablen Laminatdicke beeinflusst, so dass aus dem Messsignal die Dickenänderung und Aushärtungsfortschritt nicht voneinander getrennt ermittelt werden können. In diesem Beitrag wird eine Methode vorgestellt, mit deren Hilfe beide Parameter während des gesamten Herstellungsprozesses gemessen bzw. berechnet werden können und erste Versuchsergebnisse vorgestellt.

1 Einführung

Faserverbundmaterialien bieten aufgrund ihrer hohen gewichtsspezifischen Eigenschaften ein großes Potential zur Gewichtseinsparung und finden daher immer breitere Anwendung in Luft- und Raumfahrt, Automobilbau und Windkraft. Neben den günstigen mechanischen Eigenschaften bieten diese Materialien auch eine breite konstruktive Gestaltungsfreiheit, jedoch steht diesem auch eine aufwendige und komplexe und je nach Anwendungsfall



kostenaufwendige Herstellung der Strukturen entgegen. Die Herstellungsverfahren lassen sich nur schwer und häufig für einen spezifischen Anwendungsfall automatisieren, der sich nicht immer direkt auf andere Geometrien und Materialpaarungen übertragen lässt, so dass die Fertigungsverfahren oft noch einen hohen manuellen Arbeitsanteil aufweisen [1]. Der Weg zur fortschreitenden Automatisierung birgt noch einen hohen Forschungs- und Entwicklungsbedarf, um die ablaufenden Vorgänge genauer zu verstehen, vorhersagen, erfassen und gezielt steuern zu können.

Ein wichtiger Aspekt dabei ist die Prozessüberwachung mit Hilfe von Sensorik, wodurch Prozessabweichungen erfasst und aktiv korrigiert werden können und Prozessparameter gezielt zur Qualitätsverbesserung eingestellt werden können. Des Weiteren dienen Sensoren zum besseren Verständnis der ablaufenden physikalischen und chemischen Vorgänge und können zum Abgleich von Prozesssimulationen eingesetzt werden. Ultraschall hat sich dabei als eine wertvolle Methode erwiesen, verschiedene wichtige Prozessparameter überwachen zu können und dabei gut in das Umfeld der industriellen Herstellung von Faserverbundstrukturen integrierbar zu sein. Ultraschall wird unter anderem zur Überwachung des Injektionsfortschritts [2, 3, 4, 5], von Porositäten [3, 6] und der Harzaushärtung [7, 8, 9] verwendet. Hier soll gezeigt werden, dass Ultraschall auch zur Überwachung der veränderlichen Laminatdicke bei Infusionsverfahren verwendet werden kann.

2 Faserverbundprozesse

In der Luftfahrtindustrie werden häufig sogenannte Prepreg-Materialien eingesetzt, die teilweise mit Hilfe von Ablegemaschinen automatisiert verarbeitet werden. Die Prepregs (kurz für engl. „pre- impregnated“, vorimprägniert) sind textile Halbzeuge, die bereits vom Hersteller unter reproduzierbaren Bedingungen mit Harz imprägniert sind und nach der Formgebung unter Druck in einem Autoklav ausgehärtet werden können. Neben den hohen Material- und Investitionskosten für die Anlagen ist die notwendige Tiefkühlagerung mit relativ kurzer Haltbarkeit und die eingeschränkte Formbarkeit der Faserhalbzeuge nachteilig.

Eine kostengünstige Alternative stellen Injektionsverfahren dar, die durch Kombination der großen Auswahl an Ausgangsmaterialien und der besseren Formbarkeit der Fasertextilien sehr vielfältig angewandt werden können. Hier werden trockene Textilhälfte zunächst zugeschnitten, in Form gebracht und fixiert, so dass ein sogenannter Preform entsteht. Im Anschluss wird Harz mit Hilfe von Druck eingebracht und schließlich ausgehärtet. Bei dem häufig verwendeten RTM-Verfahren (Resin Transfer Molding) werden die Preforms zwischen zwei feste Formhälften eingebracht und z.B. mit Hilfe einer Presse zugehalten, so dass das Harz unter Druckbeaufschlagung in das Fasermaterial fließen kann. Das Verfahren eignet sich vor allem für kleine Bauteile hoher Stückzahl und hohen Qualitätsanforderungen und zumindest Teilschritte lassen sich vergleichsweise gut automatisieren, so dass es bereits in der Automobilindustrie Anwendung findet.

Für kleine bis mittlere Serien und große Bauteile ist das RTM-Verfahren durch die aufwendigen Formwerkzeuge unrentabel bzw. für große Abmessungen technisch schwer realisierbar, so dass für diese häufig Vakuuminfusionsverfahren angewendet werden. Bei diesen wird nur eine feste Formhälfte verwendet und die zweite durch eine flexible Membran ersetzt. Dadurch wird eine Formhälfte eingespart, aber auch der Formenbau deutlich vereinfacht.

In Abbildung 2.1 wird der prinzipielle Fertigungsaufbau für eine Infusion dargestellt. Das Fasermaterial wird entweder in einem vorangehenden Schritt in Form

gebracht oder direkt auf der Infusionsform. Der Preform liegt auf dem Formwerkzeug auf, welches mit einem Trennmittel zur Gewährleistung der Entformbarkeit des Bauteils behandelt wurde. Auf dem Fasermaterial wird ein Abreißgewebe platziert, so dass die Vakuummembran und andere Hilfsmittel vom Bauteil entfernt werden können. Durch das Abreißgewebe entsteht auf der formwerkzeugabgewandten Seite eine definierte, raue Oberfläche. Bei Verwendung von Vakuummembranen mit trennender Oberfläche wird das Abreißgewebe nicht zwingend benötigt. Zur Beschleunigung und Unterstützung des Harzflusses können spezielle Gewebe mit hoher Permeabilität und Verteilerkanäle auf dem Preform verteilt werden. Des Weiteren werden Kanäle zur Harzzufuhr und Evakuierung angebracht und schließlich der gesamte Aufbau mit der Membran und Dichtung vakuumdicht verschlossen und die entstandene Kavität evakuiert. Danach wird durch Öffnen der Harzzuleitung die Infusion eingeleitet. Auf den Harzvorratsbehälter wirkt der Atmosphärendruck, so dass durch den Druckunterschied zwischen Umgebung und Bauteil das Harz in die Fasern fließt. Zur Erhöhung des Drucks, z.B. für qualitativ hochwertige Bauteile mit hohem Faservolumenanteil, muss der Atmosphärendruck erhöht werden, was in einem Autoklaven realisiert werden kann. Eine reine Druckerhöhung auf die Harzleitung führt zum Hochdrücken der Membran und schließlich einer Blasenbildung, so dass das Harz nicht in die Fasern fließt.

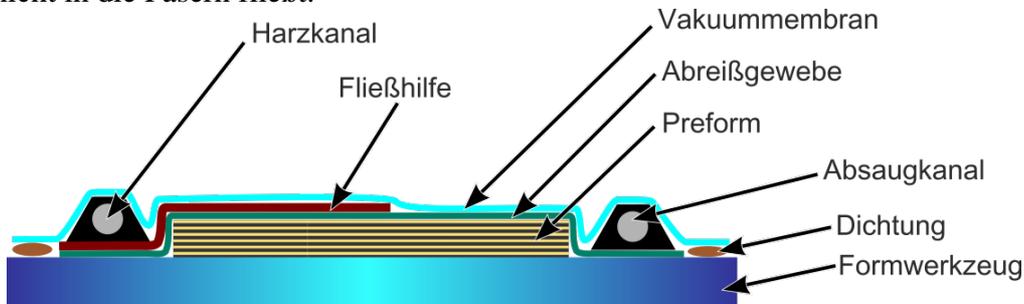


Abb. 2.1. Infusionsaufbau

3 Dickenänderung während der Infusion und Aushärtung Prozessüberwachung

Durch Evakuierung der so entstandenen Kavität werden der Preform und die Fertigungshilfsmittel durch den auf die Membran wirkenden Atmosphärendruck kompaktiert. Der Kompaktierungsdruck p_{comp} ergibt sich auch der Differenz des Atmosphärendrucks p_{atm} und des Vakuumdrucks p_{vac} (Gleichung 3.1), unter Vernachlässigung der Membransteifigkeit [10].

$$p_{comp} = p_{atm} - p_{vac} \quad (3.1)$$

Die Kompaktierung ist weiterhin abhängig von Material der Art des Faserhalbzeugs, des Aufbaus des Preforms und der Zeit. Auch erhöht eine wiederholtes Entspannen und Kompaktieren den Kompaktierungsgrad weiter, was vermutlich in einem zunehmend parallelem Anordnen der Fasern begründet liegt [11, 12, 13]. Zudem kann die Geometrie einen Einfluss nehmen, beispielsweise wird die Kompaktierung in kleinen, konkaven Radien durch die begrenzte Dehnfähigkeit der Vakuummembran begrenzt. Der Prozessschritt des Kompaktierens beeinflusst also entscheidend die Ausgangsdicke des Preforms und damit dessen Faservolumengehalt V_f und Permeabilität K . Der Faservolumengehalt ergibt sich aus dem Flächengewicht, der Dichte des Fasermaterials und der Preformdicke (Gleichung 3.2).

$$V_f = \frac{FG_{Preform}}{\rho_{Faser} \cdot d_{Preform}} \quad (3.2)$$

Nach der Kompaktierung kann die Infusion des Harzes in den Preform erfolgen. Durch den Druckunterschied zwischen Injektionsdruck p_{inj} und Vakuumdruck p_{vac} beginnt das Harz durch die Injektionsleitung und Verteilerkanäle bis zum Preform zu fließen. Der Injektionsdruck ergibt sich aus den auf dem Harzvorratsbehälter wirkenden Atmosphärendruck p_{vac} und dem hydrostatischen Druck der Harzsäule aufgrund des Höhenunterschieds zwischen den Enden der Harzleitung (Abb. 3.1) abzüglich von Druckverlusten aufgrund von Reibung:

$$p_{inj} = p_{atm} - \rho_{Harz} \cdot g \cdot \Delta h - p_{Verlust} \quad (3.3)$$

Der Harzfluss durch das Fasergewebe lässt sich mit Hilfe des Gesetzes von Darcy beschreiben, welches das Fließen inkompressibler Fluide durch poröse Medien beschreibt. Die Fließgeschwindigkeit u_x ergibt sich dabei aus der Permeabilität K , der Viskosität ν und dem Druckgradienten dp/dx [14].

$$u_x = -\frac{K}{\eta} \frac{dp}{dx} \quad (3.4)$$

Bei Vakuuminfusionsprozessen ergibt sich durch die flexible Membran die Besonderheit, dass die Kompaktierung lokal aufgrund der sich ändernden Druckverhältnisse zeitlich verändert. In Abbildung 3.1 wird dies verdeutlicht. In der Region (a) liegt der Preform noch unimpregniert und in seiner ursprünglichen Dicke nach der Kompaktierung vor. In der Region (b) unmittelbar an der Fließfront kommt es aufgrund von Lubrifikation der Fasern und damit einhergehender geringerer Reibung zu weiterer Kompaktierung, da hier noch ein Druck nahe p_{vac} anliegt. In der Region (c) kommt es zu einer Entspannung des Fasermaterials, da sich hier der Druck erhöht. Die getränkten Fasern relaxieren sich dabei weniger stark als im trockenen Zustand [11, 15]. Aufgrund der zur Harzleitung hin reduzierten Kompaktierung und der damit einhergehend zunehmenden Permeabilität, kommt es zu einem nichtlinearen Druckgradienten [14].

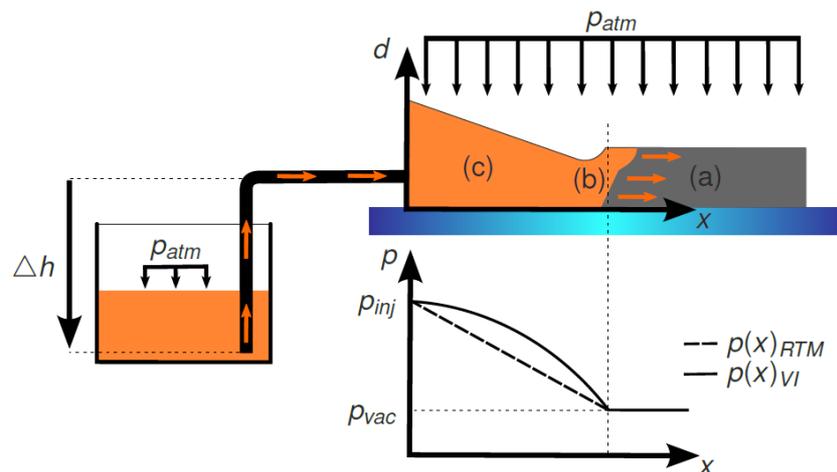


Abb. 3.1. Druckverhältnisse und Dickenentwicklung während der Infusion [14, 11, 15]

Am Ende der Infusion liegt ein über die Länge von Harzleitung zur Absaugung abnehmendes Dickenverteilungsprofil vor. Zum Erreichen einer vollständigen Imprägnierung muss diese anfängliche Dickenüberhöhung in Kauf genommen werden. Dies ist vor allem bei herausfordernden Bauteilen mit langen Fließwegen, hoher Permeabilität, hoher Harzviskosität und schneller Aushärtung unumgänglich. Solange das Harz noch nicht zu weit ausgehärtet und noch fließfähig ist, kann die inhomogene

Faservolumengehaltsverteilung ausgeglichen werden bzw. überschüssiges Harz aus dem Bauteil geleitet werden.

4 Prozessüberwachung mit Ultraschall

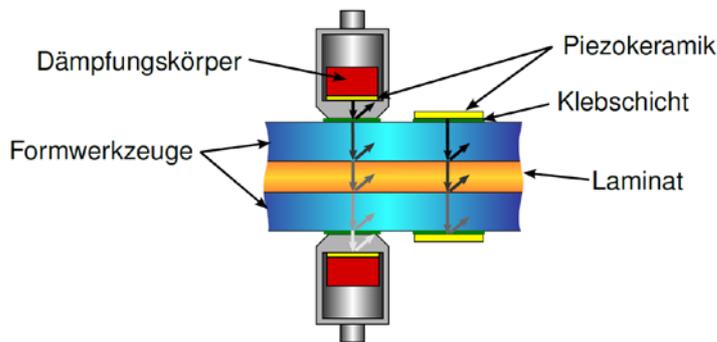
Ultraschall hat gegenüber anderen Prüfverfahren zur Überwachung der Vorgänge während der Infusion und Aushärtung den großen Vorteil, dass es keinen direkten Kontakt zum Harz bzw. Bauteil benötigt. Häufig eingesetzt werden dielektrische und resistive Sensoren, die über die Änderung der elektrischen Eigenschaften bei Benetzung des Sensors und während der Harzaushärtung beruhen [16, 17, 18, 19]. Die Sensoren müssen demnach aufwendig in die Formwerkzeuge eingebracht werden und beeinträchtigen dabei die Bauteiloberfläche und die Vakuumdichtheit der Formen. Neben dem direkten Kontakt zum Harz müssen die Elektroden dieser Sensoren gegen ein Kurzschließen durch die Kohlenstofffasern geschützt werden, was den Aufwand weiter erhöht. Häufige Anwendung finden ebenfalls optische Fasern, die allerdings in das Bauteil eingebettet werden und damit für viele Anwendungen nicht zulässig sind.

Die Ultraschallmethode besitzt demgegenüber den Vorteil, dass sie ohne direkten Kontakt zum Bauteil betrieben werden kann, da die Schallwellen in das Formwerkzeug eingekoppelt und von dort aus in das Laminat eindringen können. Damit sind die Sensoren wesentlich einfacher in die Produktion integrierbar und können auch in kritischen Bereichen eingesetzt werden, da sie die Oberfläche nicht beeinträchtigen. Die Überwachung der Harzaushärtung beruht auf der mit der Aushärtung eingehenden elastischen Module, so dass die Schallgeschwindigkeit des Harzes ansteigt [7]. Dabei wird bei Durchschallung des Laminats über seine Dicke ein Mittelwert über die Dicke bestimmt, was gegenüber den dielektrischen und resistiven Verfahren, bei welchen die Eindringtiefe nur wenige Mikrometer beträgt, einen weiteren Vorteil darstellt. Die Harzaushärtung kann aufgrund des schlechten Wärmetransports und großer frei werdender Reaktionswärme im Innern des Laminats im Vergleich zur Oberfläche stark abweichen.

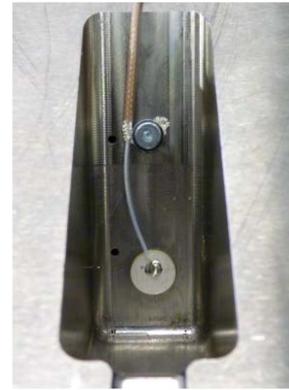
Zur Auhärtekontrolle mit Ultraschall existieren bereits kommerzielle Messsysteme und Prüfköpfe. Im praktischen Einsatz, vor allem unter harten Umgebungsbedingungen eines Autoklaven mit hohen Temperaturunterschieden, sind jedoch gehäuft Signalverluste aufgetreten [20]. Diese konnten auf die Ankopplung der Prüfköpfe zur Werkzeugwand zurückgeführt werden. Durch die Temperaturanstiege lässt der Anpressdruck auf die Kopplungsstelle nach und die Einkopplung ist Alterung unterworfen. Auch konstruktive Maßnahmen, wie Aufbringen der Anpresskraft über Federn oder Austausch des Kopplungsmediums, wie es in [21] beschrieben ist, konnten die Zuverlässigkeit der Messung nicht ausreichend erhöhen.



Abb. 4.1. Konventionelle Prüfköpfe zur Aushärtungsüberwachung mit Ultraschall



(a) Vergleich der Grenzflächen



(b) Piezokeramik am Formwerkzeug zur Prozessüberwachung [22]

Abb. 4.2. Vergleich konventioneller Prüfköpfe mit Piezokeramiken zur Prozessüberwachung

Gelöst wurde das Problem durch direktes Aufbringen von piezoelektrischen Elementen auf die Formaußenseite (Abbildung 4.2b) [22], so dass die Ultraschallwellen direkt im Formwerkzeug erzeugt werden und damit die kritische Grenzfläche zwischen Prüfkopfvorlauf und Werkzeugwand entfällt (Abbildung 4.2a). Dabei konnten deutlich höhere Schallamplituden eingekoppelt und höhere Messsensivitäten bei hoher Zuverlässigkeit erreicht werden. Neben diesen Vorteilen, sind diese Sensoren deutlich kleiner und damit einfacher integrierbar, kostengünstiger und durch Einsatz von geeigneten Klebstoffen und Lötmitteln temperaturbeständiger.

5 Ultraschallmethode zur Bestimmung der Laminatdicke

5.1 Methoden zur Bestimmung der Laminatdicke

Messtechnisch sind eine Vielzahl an Möglichkeiten gegeben, die Laminatdicke zu messen, jedoch entfallen viele, da sie nicht oder nur sehr aufwendig in die Produktionsumgebungen integriert werden können. Prinzipiell bieten sich induktive und kapazitive Wegmessung an, wie auch optische Abstandsmessungen, wie sie auch in einigen Untersuchungen zur Laminatdickenentwicklung während des Infusionsvorganges eingesetzt werden [11, 24, 25, 13, 26]. In den meisten Fällen der Einsatz optischer Methoden nicht möglich, da ein optischer Zugang nicht gewährleistet ist und auch durch u.a. thermische Expansion die Lage der Referenzfläche (Formoberfläche) nicht konstant ist. Auch kapazitive und induktive Abstandssensoren oder Wegaufnehmer benötigen eine Halterung, die einen Referenzabstand zur Oberfläche herstellt, die jedoch meist technisch nicht realisierbar oder unzulässig sind. Bei Infusionsverfahren in großen Öfen oder Autoklaven sind die genannten Messmethoden meist nur sehr aufwendig einsetzbar.

5.2 In-Situ Laminatdickenmessung mit Ultraschall

Aufgrund der guten Erfahrungen der Ultraschallsensorik in der Umgebung der industriellen Faserverbundfertigung zur Fließfront- und Aushärtungsüberwachung ist die Idee entstanden, die Übertragung der Ultraschallwellen durch das Laminat ebenfalls zu nutzen, um Informationen über dessen Dickenentwicklung zu erhalten. Ein Ultraschallsensor, der bei einem Vakuuminfusionsverfahren auf der Vakuummembran platziert wird, vollzieht die Bewegungen durch die veränderliche Laminatdicke mit, wodurch die

Schallübertragungszeiten in Abhängigkeit der Laminatdicke stehen. Die Zeit, die der Schall zum durchqueren des Laminats benötigt, hängt von der Schallgeschwindigkeit und somit vom Aushärtungszustand und der Temperatur des Harzes ab, so dass diese Größen nicht allein aus der Übertragungszeit abgelesen werden können. Zur Bestimmung der Laminatdicke muss also die aktuelle Schallgeschwindigkeit bestimmt werden oder bekannt sein.

Im einfachsten Falle ist während der Infusion die Schallgeschwindigkeit nahezu konstant bis alle Fließbewegungen abgeschlossen sind. Dies ist der Fall, wenn das Harz bei Infusionstemperatur keine bis nur geringe Aushärtung vollzieht, beispielsweise bei einer großen Differenz zwischen Infusions- und Aushärtungstemperatur. Eine weitere einfache Methode ist die Aufnahme von Basislinien bei einer Serie von Bauteilen, wenn diese unter annähernd gleichen Bedingungen hergestellt werden. Dies betrifft vor allem die Vorbereitung des Harzes, den Preform und Temperaturen. Dann wird in mindestens einem Vorversuch an einer oder mehreren Stellen die Schallübertragungszeiten aufgezeichnet und mit dem am fertigen Bauteil ermittelten Dicke korreliert. Bei den darauffolgenden Prozessen können die Basislinien dann als Orientierung zur Einstellung der Prozessparameter dienen. In Abbildung 5.1 sind beispielhaft drei Basislinien dargestellt, denen eine erreichte Dicke zugeordnet wurde. Es handelt sich dabei um einen Versteifungsstringer, der im Autoklaven bei erhöhten Druck hergestellt wurde [23]. Bis ca. 40 Minuten erfolge die Infusion zur Tränkung des gesamten Bauteils, was in diesem Fall durch eine Kamera überwacht wurde. Im Anschluss wurde der Infusionsdruck gesenkt, um überschüssiges Harz zurück in den Vorratsbehälter zu drücken. Bei ca. 70 Minuten wurde die Harzleitung geschlossen, so dass kein Harz mehr in oder aus dem Bauteil fließen konnte. Dabei diente der erste Versuch, bei welchem eine Dicke von 2,50 mm erreicht wurde, als Referenz für die maximal zulässige Dicke. Bei den anschließenden Prozessdurchgängen konnte sich an dieser Referenz orientiert werden, so dass die maximal zulässige Dicke nicht überschritten wurde. Bei den beiden folgenden Versuchen konnte das Bauteil zwar schneller vollständig imprägniert und somit früher Das Herausdrücken des überschüssigen Harzes eingeleitet werden. Wie im Diagramm jedoch zu sehen ist, kam es bei den darauffolgenden Prozessen sogar zu einer stärkeren Aufdickung. Mit Hilfe der Basislinie konnte jedoch der Injektionsdruck so angepasst werden, dass die Dicke in den akzeptierten Toleranzbereich gebracht werden konnte.

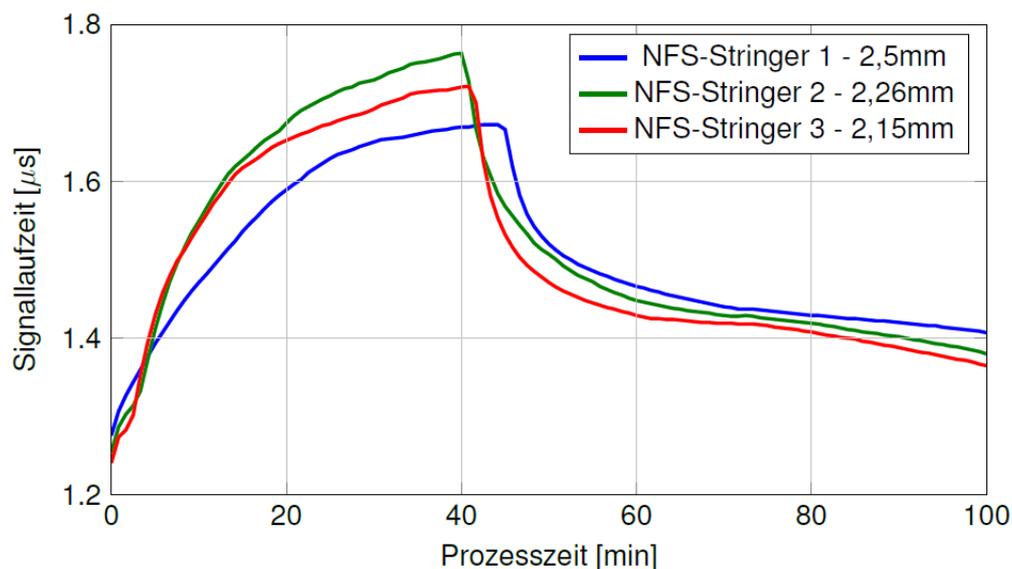


Abb. 5.1. Signallaufzeit-Basislinien zur Dickeneinstellung

5.3 Absolute Messung der Schallgeschwindigkeit und Laminatdicke

Um diese Vorversuche zur Aufnahme der Basislinien zu umgehen und ohne Kalibrierung oder Basislinien auf die Dicke schließen zu können, wird ein weiterer Messparameter benötigt, um Schallgeschwindigkeit und Laminatdicke trennen zu können. Unter Annahme folgender Bedingungen kann die Laminatdicke mit der in Abbildung 5.2 dargestellten Messanordnung, wobei in den Sensorvorlauf ist eine definierte Aussparung der Höhe Δd eingebracht wird, während des gesamten Prozesses gemessen werden:

- Die Aussparungshöhe ist bekannt und im Vergleich zur Laminatdicke klein $\Delta d \ll d_1$
- Die Messstellen liegen nahe beieinander.
- Eine Laminatdickenänderung bewirkt an beiden Messstellen die gleiche Dickenänderung, der Sensorvorlauf ist also stets parallel zur Formwerkzeugoberfläche
- Der Reaktionsverlauf an beiden Messstellen ist gleich, damit auch die Änderung der Schallgeschwindigkeit
- Aufgrund der geringen Dickenunterschiede zwischen den beiden Messstellen im Vergleich zur Laminatdicke ist der Einfluss des Faservolumengehalts vernachlässigbar
- An beiden liegt somit die gleiche mittlere Schallgeschwindigkeit über die Laminatdicke vor

Der Sensor wird dabei direkt auf dem Laminat unterhalb der Vakuummembran aufgebracht, so dass in die zusätzliche Kavität der Aussparung Harz während der Infusion fließen kann. Durch die Verwendung von Abreißgewebe als oberste Lage können der Sensor und die Harzansammlung vom Bauteil entfernt werden. Im Folgenden wird gezeigt, wie mit Hilfe der Messanordnung sowohl die Schallgeschwindigkeit als auch die Laminatdicke bestimmt werden können.

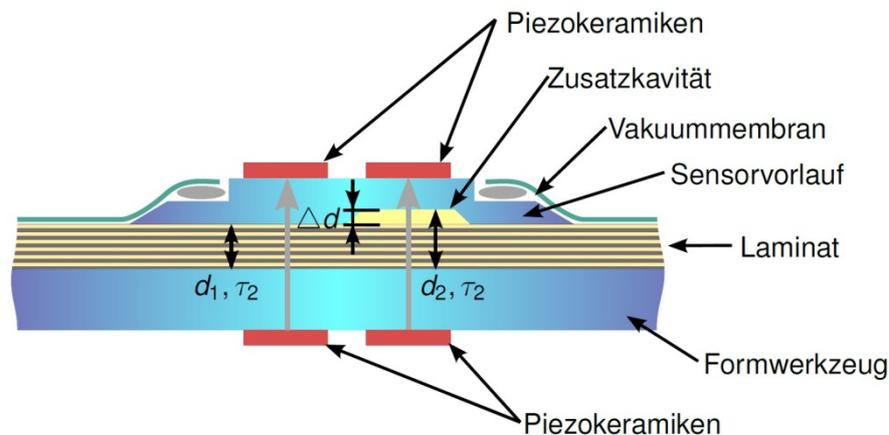


Abb. 5.2. Prinzip der Online-Dickenmessung mit Ultraschall

Unter der Voraussetzung, dass die Höhe der Aussparung im Vergleich zu der Laminatdicke klein ist ($\Delta d \ll d_1$) und an beiden Messstellen Unterschiede im Vernetzungsverlauf vernachlässigt werden können, kann die gleiche Schallgeschwindigkeit c für beide Laufstrecken angenommen werden, da durch die geringe Dickenvariation keine signifikanten Unterschiede im Reaktionsverlauf zu erwarten sind. Infolgedessen können die beiden Dicken aus den jeweils gemessenen Übertragungszeiten τ_1 und τ_2 bestimmt werden. Der Vorteil der beschriebenen Messanordnung liegt darin, dass ohne Kalibrierung oder Referenzkurven in Abhängigkeit des Harzsystems und des Temperaturzyklus die Absolutwerte der Laminatdicke und Schallgeschwindigkeit während des Fertigungsprozesses bestimmt werden können.

5.4 Erste Ergebnisse

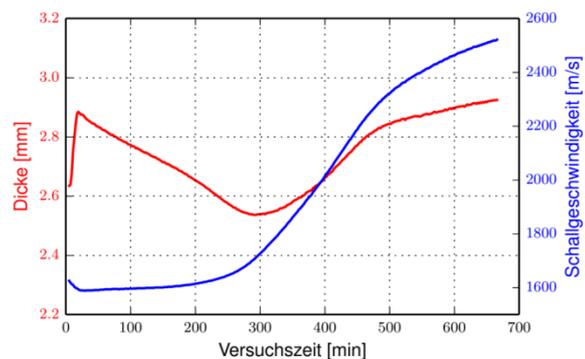
Zur Validierung des Messprinzips und der praktischen Umsetzbarkeit wurde ein Sensorvorlauf aus Aluminium angefertigt. Der Prototyp wurde bewusst mit einer hohen Aussparungshöhe von $\Delta d = 2$ mm versehen, um große Laufzeitunterschiede an den beiden Messstellen zu provozieren. Auf dem Sensorvorlauf wurden piezoelektrischen Elemente aufgebracht und mit Kabeln verbunden.

In einem einfachen Infusionsaufbau unter Umgebungsatmosphäre wurde der Sensor erprobt. Der Sensor wurde dabei auf ein Laminat aus sechs Lagen biaxialem Kohlenstofffasergelege und Abreissgewebe platziert und in die Vakuumfolie eingesiegelt (Abbildung 5.3a). Als Harz diente SR1710 mit dem Härter 8852, welches im DP-RTM-Verfahren infundiert wurde. In Abbildung 5.3b sind die Ergebnisse der berechneten Dicke und Schallgeschwindigkeit aufgeführt. Die Schallgeschwindigkeit zeigt dabei einen den Erfahrungen entsprechenden Verlauf, nur zu Anfang ergibt sich ein Einschwingeffekt als die Harzfront noch nah am Sensor war.

Bei der Dickenmessung ergibt sich leider nur am Anfang bis ca. 250 min ein plausibler Verlauf der Dicke. Danach kommt es zu einer unerwarteten, scheinbaren Dickenzunahme. Dieser könnte darauf zurück zu führen sein, dass der Sensor nicht genau genug auf dem Formwerkzeug patziert wurde und infolgedessen die korrespondierenden Sensorpaare nicht genau zueinander positioniert waren. Auch kann ein Verkippen, also das Einhalten der Parallelität des Sensors zur Formoberfläche nicht sichergestellt werden. Ein weiterer Grund könnte der sein, dass sich die Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit des Faservolumengehalts während der Aushärtung ändert, da das Harz zunehmend mit den Fasern mechanisch gekoppelt ist.



(a) Erprobungsversuch an Prototypen des Laminatdickensensors



(b) Laminatdicke und Schallgeschwindigkeit

Abb. 5.3. Erste Vorversuche

Diese Aspekte gilt es weiter zu untersuchen und durch Optimierung der Sensoranordnung abzustellen. So könnten die Positionierungsprobleme durch eine Impuls-Echo oder Sende-Impuls-Anordnung abgestellt werden. Der Einfluss des Verkippens könnte durch annulare Sensoren mit geringerem Abstand reduziert werden. Den Einfluss des Faservolumengehalts in Abhängigkeit des Aushärtungszustands muss weiter untersucht werden, wobei vor allem die Dickenmessung während der Infusion, also im fließfähigen Zustand des Harzes von größtem Interesse ist. Nichtsdestotrotz kann die mit der vorgestellten Messanordnung die Schallgeschwindigkeit ohne Kenntnis der Dicke abgeschätzt werden, so dass auf den Aushärtungszustand geschlossen werden kann.

6 Zusammenfassung

Es wurde gezeigt, dass Vakuuminfusionsverfahren eine kostengünstige, flexible Methode zur Herstellung von duroplastischen Faserverbundwerkstoffen sind. Dabei wird eine feste Form und eine flexible Vakuummembran verwendet. Durch Evakuieren des Fasermaterials fließt das Harz in das Bauteil durch den sich ausbildenden Druckgradienten zwischen Atmosphäre und Vakuum. Es besteht jedoch die Besonderheit, dass aufgrund der flexiblen Membran, die Dicke durch die Form nicht vorgegeben wird, sondern durch die sich während der Infusion örtlich und zeitlich inhomogenen Druckverhältnisse veränderlich ist. Um die Dicke gezielt - beispielsweise über Regelung des Injektionsdrucks - einstellen zu können, ist es notwendig diese während des Infusionsprozesses in-situ messen zu können. Durch die Randbedingungen industrieller Herstellung von Faserverbunden sind viele klassische Verfahren zur Dicken- und Abstandsmessungen nicht einsetzbar. Darunter können hohe Temperaturen und Drücke (Infusion im Autoklaven) auftreten. Ultraschall wird bereits erfolgreich zur Fließfront- und Aushärtungsüberwachung unter diesen Bedingungen eingesetzt. Es wurden verschiedene Ansätze gezeigt, mit denen die Laminatdicke mit Hilfe von Ultraschall gemessen werden kann und erste Ergebnisse präsentiert. Durch Einsatz der in-situ Laminatdickenmessung konnten bereits erfolgreich die Anzahl der sonst notwendigen Vorversuche und die Toleranzen der Dicken reduziert werden.

7 Referenzen

- [1] H. Eickenbusch, O. Krauss, and K. Drechsler. Kurzanalyse nr. 3: Kohlenstofffaserverstärkte kunststoffe im fahrzeugbau - ressourceneffizienz und technologien. VDI ZRE Publikationen, 2013, 05.2013.
- [2] H. L. Liu, X.-C. Tu, J. O. Lee, H.-B. Kim, and W. R. Hwang. Visualization of resin impregnation through opaque reinforcement textiles during the vacuum-assisted resin transfer molding process using ultrasound. *Journal of Composite Materials*, 48(9):1113–1120, 2014.
- [3] Jochen Hermann Töpker. Ultraschallmesstechnik zur Online-Erfassung und Analyse des Injektions- und Härtungsablaufs beim Resin transfer moulding: Ultrasonic measurement technique for online control and analysis of the impregnation and curing process by Resin transfer moulding. Mainz, Aachen, 1 edition, 2003.
- [4] T. Stöven, F. Weyrauch, P. Mitschang, and M. Neitzel. Continuous monitoring of three-dimensional resin flow through a fibre preform. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 34(6):475–480, 2003.
- [5] S. Thomas, C. Bongiovanni, and S. R. Nutt. In situ estimation of through-thickness resin flow using ultrasound. *Composites Science and Technology*, 68(15-16):3093–3098, 2008.
- [6] H. Jeong and D. K. Hsu. Experimental analysis of porosity-induced ultrasonic attenuation and velocity change in carbon composites. *Ultrasonics*, 33(3):195–203, 1995.
- [7] J. McHugh. Ultrasound technique for the dynamic mechanical analysis (DMA) of polymers. Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin, 2008.
- [8] A. Maffezzoli, E. Quarta, V. A. M. Luprano, G. Montagna, and L. Nicolais. Cure monitoring of epoxy matrices for composites by ultrasonic wave propagation. *Journal of Applied Polymer Science*, 73(10):1969–1977, 1999.
- [9] I. Alig, D. Lellinger, J. Sulimma, and S. Tadjbakhsch. Ultrasonic shear wave reflection method for measurements of the viscoelastic properties of polymer films: Review of scientific instruments. *Review of Scientific Instruments*, 68(3):1536–1542, 1997.

- [10] Pavel Simacek, Dirk Heider, John W. Gillespie, and Suresh Advani. Post-filling flow in vacuum assisted resin transfer molding processes: Theoretical analysis. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 40(6-7):913–924, 2009.
- [11] Bekir Yenilmez, Murat Senan, and E. Murat Sozer. Variation of part thickness and compaction pressure in vacuum infusion process. *Composites Science and Technology*, 69(11-12):1710–1719, 2009.
- [12] Bekir Yenilmez and E. Murat Sozer. Compaction of e-glass fabric preforms in the vacuum infusion process, a: Characterization experiments. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 40(4):499–510, 2009.
- [13] Young Roak Kim, Stephen P. McCarthy, and Jerome P. Fanucci. Compressibility and relaxation of fiber reinforcements during composite processing. *Polymer Composites*, 12(1):13–19, 1991.
- [14] N. C. Correia, F. Robitaille, A. C. Long, C. D. Rudd, P. Šimáček, and S. G. Advani. Analysis of the vacuum infusion moulding process: I. analytical formulation. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 36(12):1645–1656, 2005.
- [15] Q. Govignon, S. Bickerton, J. Morris, and P. A. Kelly. Full field monitoring of the resin flow and laminate properties during the resin infusion process. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 39(9):1412–1426, 2008.
- [16] A. McIlhagger, D. Brown, and B. Hill. The development of a dielectric system for the on-line cure monitoring of the resin transfer moulding process. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 31(12):1373–1381, 2000.
- [17] M.C Kazilas and Cranfield University. Acquisition and Interpretation of Dielectric Data for Thermoset Cure Monitoring. Cranfield University, 2003.
- [18] N. Pantelalis and E. Bistekos. Process monitoring and control for the production of cfrp components.
- [19] C. Garschke, C. Weimer, P. P. Parlevliet, and B. L. Fox. Out-of-autoclave cure cycle study of a resin film infusion process using in situ process monitoring. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 43(6):935–944, 2012.
- [20] N. Liebers. Effective and flexible ultrasound sensors for cure monitoring for industrial composite production, 2012.
- [21] Fengler, P., W. Stark, J. Döring, and J. McHugh. Coupling of hidden ultrasound sensors to a moulding tool. *The online Journal of Nondestructive Testing*, 2004 (Vol. 9 Nr. 3).
- [22] N. Liebers, F. Schadow, and F. Raddatz. Überwachung eines herstellungsprozesses, 27.04.2012.
- [23] A. Stahl, J. Nickel, M. Kühn, and N. Liebers. Quality-controlled manufacturing of composite structures. *ATZ (Springer)*, 2010(06), 2010.
- [24] H. M. Andersson, T. S. Lundström, B. R. Gebart, and P. Synnergren. Application of digital speckle photography to measure thickness variations in the vacuum infusion process. *Polymer Composites*, 24(3):448–455, 2003.
- [25] Q. Govignon, S. Bickerton, J. Morris, and J. Lin, editors. A stereo photography system for monitoring full field thickness variation during resin infusion, 2006.
- [26] Peng Wang, Sylvain Drapier, Jérôme Molimard, Alain Vautrin, and Jean-Christophe Minni. Characterization of liquid resin infusion (lri) filling by fringe pattern projection and in situ thermocouples. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 41(1):36–44, 2010.