

AUTOREN



**DIPL.-ING. ARNE STAHL**  
ist wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung Funktionsleichtbau des DLR-Instituts für Faserverbundleichtbau und Adaptronik in Braunschweig.



**DIPL.-ING. JÖRG NICKEL**  
ist Schwerpunktleiter Bodengebundener Verkehr am DLR-Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik in Braunschweig.



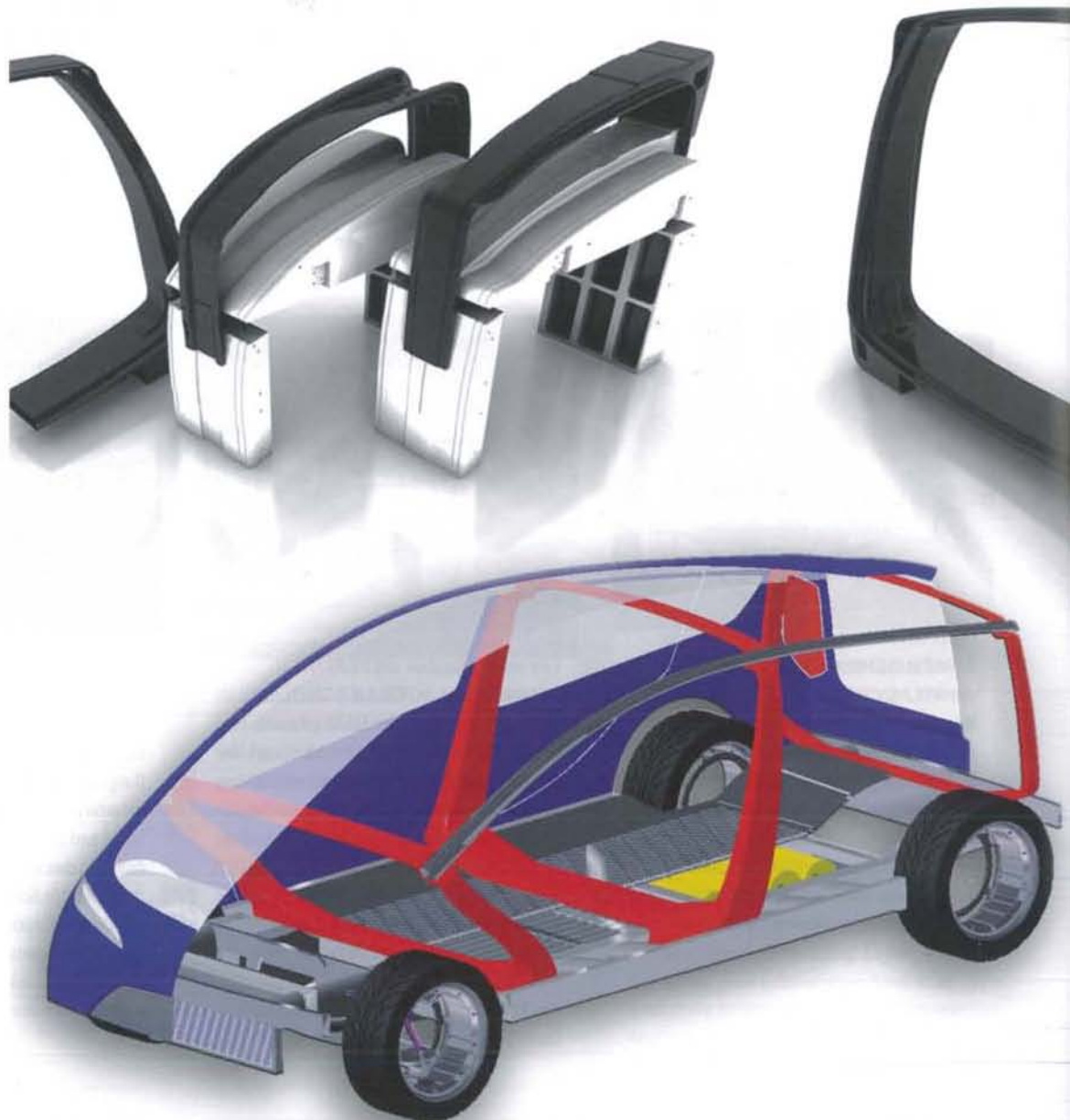
**DIPL.-ING. (FH) MICHAEL KÜHN**  
ist technischer Mitarbeiter in der Abteilung Faserverbundtechnologie des DLR-Instituts für Faserverbundleichtbau und Adaptronik in Braunschweig.



**DIPL.-ING. NICO LIEBERS**  
ist wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung Faserverbundtechnologie des DLR-Instituts für Faserverbundleichtbau und Adaptronik in Braunschweig.

# QUALITÄTSGESICHERTE FERTIGUNG VON FASERKUNSTSTOFFVERBUND-BAUTEILEN

Im Forschungsthema „Neuartige Fahrzeugstrukturen“ (NFS) des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) werden in Braunschweig optimierte Fertigungskonzepte für Spant- und Spaceframe-Bauweisen erforscht. Mit der im Projekt „Online-Qualitätssicherung im Autoklaven“ (OnQA) entwickelten und speziell auf die NFS-Projektanforderungen angepassten intelligenten Prozesssteuerung mittels Ultraschall wird eine deutliche Erhöhung der Bauteilqualität, das heißt reduzierte Dickentoleranz erreicht.



- 1 FASERKUNSTSTOFFVERBUND-FAHRZEUGSPANT
- 2 INFUSIONSTECHNOLOGIE FÜR DIE SPANTFERTIGUNG
- 3 HERAUSFORDERUNG: WANDSTÄRKENTOLERANZ
- 4 ONLINE-PROZESSREGELUNG MITTELS ULTRASCHALL
- 5 FUNKTIONSPRINZIP DER ULTRASCHALL-DICKENMESSUNG
- 6 ULTRASCHALL-DICKENMESSUNG IN DER SPANTFERTIGUNG
- 7 FAZIT UND AUSBLICK

## 1 FASERKUNSTSTOFFVERBUND-FAHRZEUGSPANT

Als möglicher Lösungsansatz für die Herausforderungen an die künftige individuelle Mobilität wird am DLR-Institut für Fahrzeugkonzepte eine innovative Fahrzeugstruktur in Spant- und Space-Frame-Bauweise für ein Fahrzeug der oberen Mittelklasse entwickelt [1]. Kennzeichnend ist neben dem modularen Aufbau eine problemlose Integration alternativer Antriebskonzepte im Bodenbereich, der durch seitliche Crashcompartments geschützt wird, die im Wesentlichen die Lasten aus dem Seitenaufprall aufnehmen. Auf die Bodenstruktur ist das Space-Frame-Grundgerüst aus drei Ringspannten anstelle der A-, B- und C-Säule aufgesetzt.

Bei der Gesamtentwicklung der Spant- und Space-Frame-Bauweise liegt der Fokus zunächst auf den Ringspannten mit ihrer erhöhten Komplexität hinsichtlich Auslegung und Dimensionierung. Als Beispiel wurde der B-Spant ausgewählt, der im konventionellen Automobil die B-Säule ersetzt. Die Spante werden in der vorliegenden DLR-Konzeption in Faserverbundbauweise dargestellt.

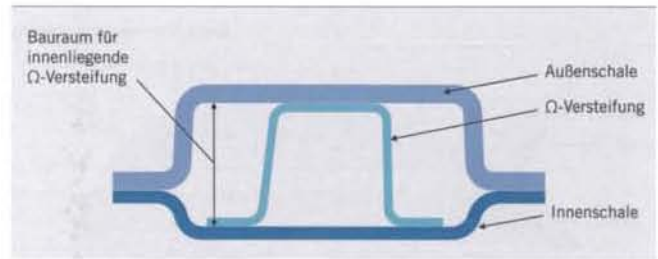
Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK) sind mit zirka 25 bis 50 Euro/kg zwar vergleichsweise kostenintensiv, verfügen aber über die erforderliche Steifigkeit und Energieabsorption bei geringem Gewicht. Nach Konzeption, Topologieoptimierung, Konstruktion und statischer sowie dynamischer Berechnung steht der Bau von Prototypen für Validierungstests.

Die Entwicklung der erforderlichen Fertigungskonzepte und Werkzeuge sowie der Prototypenbau erfolgen beim DLR-Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik in Braunschweig. Dabei müssen die Vorgaben aus Konstruktion und Berechnung fertigungsgerecht und qualitätsgesichert umgesetzt werden. Konstruktiv wurde der Spant aus zwei Schalen mit einer innenliegenden  $\Omega$ -Versteifung ausgeführt, ❶. Das innenliegende  $\Omega$ -Profil muss zur Gewährleistung einer optimalen Passung innerhalb enger Wandstärkentoleranzen gefertigt werden.

## 2 INFUSIONSTECHNOLOGIE FÜR DIE SPANTFERTIGUNG

Zur Fertigung von CFK-Bauteilen steht eine Vielzahl von Verfahren zur Verfügung. Für komplexe Bauteile, wie zum Beispiel Spante, steht mit der Infusionstechnologie unter Verwendung moderner Preformverfahren eine attraktive, automatisierbare und kostengünstige Herstellungsvariante zur Verfügung. Im Gegensatz zum Prepregverfahren mit harzprägnierten Faserlagen werden bei Infusionsverfahren trockene Faserhalbzeuge mit einem niedrig viskosen Harzsystem injiziert. Damit können durch kostensenkende Textiltechnologien (zum Beispiel Vernähen oder Drapieren) komplexe Geometrien dargestellt werden.

Geeignet für die hier betrachteten Spante ist das SLI-Verfahren (Single-Line-Injection), ❷, [2], bei dem nur eine massive, formge-



❶ Querschnitt durch das Spantprofil

bende Werkzeughälfte benötigt wird („Open Mould“). Die andere Formhälfte wird durch eine luftdichte Membran ersetzt. Der notwendige Konsolidierungsdruck wird durch einen Autoklaven aufgebracht. Durch die druckunterstützte Injektion lassen sich auch wenig permeable (harzdurchlässige) Preforms mit Harz tränken und große Fließwege ohne Fließhilfe realisieren. Der Verzicht auf fließfördernde Fertigungshilfsmittel ermöglicht mittels Druckblechen (engl.: Caul Plates) auch membranseitig eine hohe Oberflächengüte.

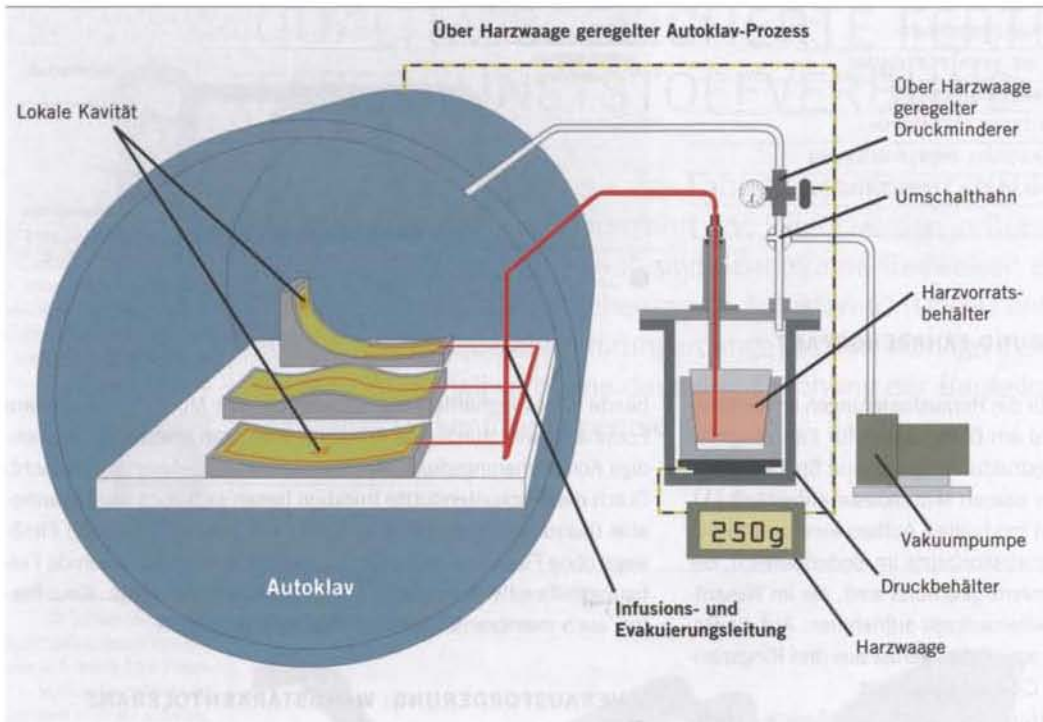
## 3 HERAUSFORDERUNG: WANDSTÄRKENTOLERANZ

Bei der Infusion von trockenen Faserhalbzeugen im „Open Mould“-Verfahren ist insbesondere die Streuung der Laminatdicke infolge von Flächengewichtsschwankungen des Halbzeugs problematisch. Die engen Dickentoleranzen können häufig nur durch lokale, massive Formstücke eingehalten werden. Eine weitere Möglichkeit, die Dickentoleranzen einzuhalten, leitet sich verfahrensbedingt aus dem SLI-Verfahren ab. Durch die Regelung des Injektionsdrucks lässt sich die Harzmenge im Bauteil einstellen mit entsprechenden Auswirkungen auf den Faservolumengehalt und die Bauteildicke.

## 4 ONLINE-PROZESSREGELUNG MITTELS ULTRASCHALL

Bei der heutigen Autoklavprozessierung werden lediglich die Luftbeziehungsweise Werkzeugtemperatur sowie der Autoklavdruck erfasst. Diese für die Bauteilqualität signifikanten Prozessgrößen werden nach einem festgelegten Zyklus exakt abgefahren. Die Bauteilqualität kann erst nach dem Durchlaufen des gesamten Autoklavzyklus geprüft werden. Folglich können die zahlreichen möglichen Fehlerquellen im Prozess nur sehr mühsam lokalisiert werden und die Prozessparameter müssen iterativ mit hohem Kosten- und Zeitaufwand optimiert werden. Bei diesem Vorgehen kann nicht auf Schwankungen der Ausgangsprodukte – zum Beispiel Flächengewicht des Faserhalbzeuges und Vernetzung des Reaktionsharzes – reagiert werden. Um einen hohen Vernetzungsgrad und somit eine hohe Bauteilqualität sicherzustellen, werden daher die Zykluszeiten mit hohen Sicherheitsfaktoren zu Lasten der Produktivität aufschlägt. Zudem durchlaufen Ausschussteile, die zum Beispiel aufgrund einer unvollständigen Injektion entstehen und nicht während des Prozesses detektiert werden, den gesamten Zyklus und werden erst nach der Entnahme als Ausschuss sichtbar. Um eine qualitätsgesicherte, zuverlässige und produktive Fertigung zu erreichen, ist eine intelligente Prozessregelung notwendig.

Im Rahmen des Projektes OnQA werden unter anderem sensorgeführte Regelungen entwickelt, die sowohl Produktivität als auch Qualität optimieren. Eine der wichtigsten Messmethoden ist dabei



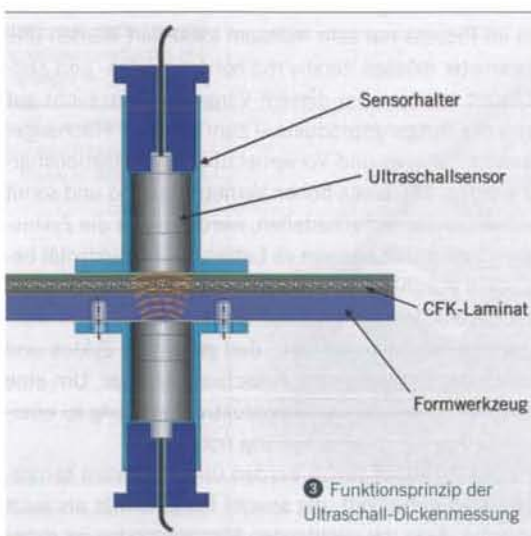
2 Prinzip des SLI-Verfahrens

die Ultraschalltechnologie, die Rückschlüsse auf den Injektions- und Harzvernetzungsfortschritt sowie Poreneinschlüsse und die Laminatdicke erlaubt [3]. Die in die Fertigungsanlagen integrierbaren Sensoren erfordern keinen direkten Kontakt mit dem Bauteil, da sie die Werkzeugwand durchschallen können, sodass die Bauteiloberfläche nicht durch Sensorabzeichnungen beeinträchtigt wird. Vor allem beim „Open Mould“-Injektionsverfahren ist die Laminatdicke eine besonders kritische Größe, die beim konventionellen Verfahren eine hohe Toleranz aufweist, mit Hilfe der Ultraschallmesstechnik jedoch auf ein sehr niedriges Niveau von  $\pm 100 \mu\text{m}$  gesenkt werden kann. Bei diesem neuen Ansatz zur Prozesskontrolle kann anhand dieser Qualitätsgröße der Injektionsvorgang über den Differenzdruck

zwischen Autoklav und Injektionsanlage sensorgesteuert geregelt werden. Bei der Aushärtung, dem nächsten Prozessschritt, wird das Ultraschallsignal dazu genutzt, um die vollständige Vernetzung und somit den Zeitpunkt des Entformens zu bestimmen.

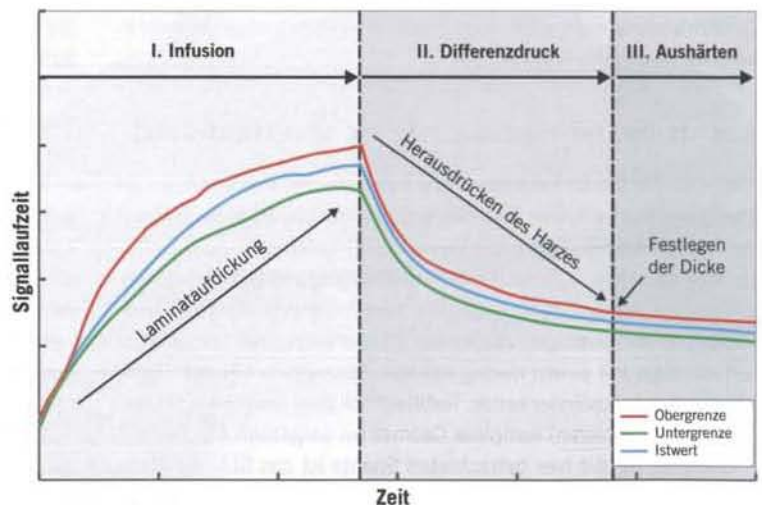
### 5 FUNKTIONSPRINZIP DER ULTRASCHALL-DICKENMESSUNG

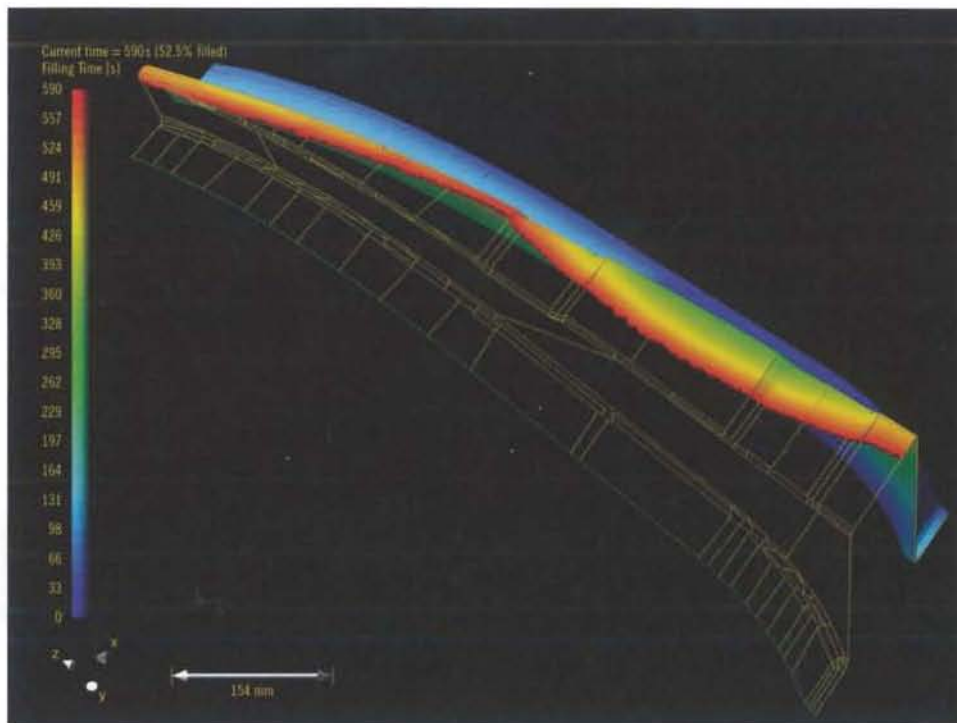
Zur Fertigungsüberwachung wird im Durchschallungsverfahren gearbeitet, das heißt mit einem separaten Ultraschallsender und -empfänger, 3. Dies hat den Vorteil eines starken, leicht auswertbaren Messsignals, das relativ unempfindlich gegenüber Störeinflüssen



3 Funktionsprinzip der Ultraschall-Dickenmessung

4 Prozessdiagramm der Ultraschall-Dickenmessung





5 Fließsimulation eines Spantbauteils zur Festlegung der Sensorpositionen

ist. Die Sensoren werden in Formwerkzeug und Vakuumaufbau mit speziell entwickelten Adaptern integriert [4]. Um die Einflüsse des Werkzeugs zu minimieren, wird vor der Messung an jeder Messstelle ein Referenzsignal aufgenommen, sodass bei der Messung nur die Änderung von Schalllaufzeit und Signalstärke durch das Laminat erfasst wird. Da die Signallaufzeit unter anderem vom zurückgelegten Weg und der material- und temperaturabhängigen Schallgeschwindigkeit beeinflusst wird, muss die Dickenbestimmung stets unter gleichen Prozessbedingungen erfolgen. Für eine exakte DickenEinstellung müssen zudem Referenzkurven aufgenommen und

die erreichten Dicken am fertigen Bauteil bestimmt werden. Die Referenzkurven dienen so als Regelvorgabe der Prozessparameter zur kontrollierten und gezielten Einstellung der Laminatdicke, 4, [5].

### 6 ULTRASCHALL-DICKENMESSUNG IN DER SPANTFERTIGUNG

Schon im Designprozess des Werkzeugs wird die Qualitätssicherung berücksichtigt und die Integration der Sensoren sehr frühzeitig festgelegt. Da die Sensoren erst ein Signal liefern, wenn die

## Vom KONZEPT bis zur SERIE

Wir unterstützen unsere Kunden vom ersten Kontakt bis zum Einbau unserer Produkte. Egal ob Sie etwas bestellen möchten, technische Beratung für Ihre Anwendung benötigen oder einfach nach dem richtigen Ring suchen, Rotor Clip ist für Sie da vom Konzept bis zur Serie.

Weitere Informationen unter:  
www.rotorclip.com - Email: rcgmbh@rotorclip.com - Tel.: 06126-22736-11





6 Spantwerkzeug mit Vakuumaufbau und integrierten Sensoren

Kavität mit Harz gefüllt ist und beide Sensoren gleichzeitig ansprechen sollen, wird zur Ermittlung der optimalen Sensorpositionen eine Fließsimulation durchgeführt, 5, mit deren Hilfe der Verlauf der Harzfließfront während der Infusion simuliert werden kann. Dazu werden die in das Werkzeug integrierten Angusskanäle während der Simulation in ihrer Position und Ausdehnung variiert, um einen optimalen Infusionsverlauf zu ermöglichen.

Zwei Ultraschallsensoren sind direkt im Aluminiumwerkzeug verschraubt, sodass die Sensorflächen parallel zur Werkzeugoberfläche liegen. Nachdem ein Referenzsignal aufgenommen wurde und der Lagenaufbau auf dem Werkzeug fertiggestellt ist, wird das zweite Paar Sensoren direkt gegenüber den werkzeugseitigen Sensoren platziert, 6. Um eine gleichmäßige Oberfläche und eine homogene Druckverteilung auf das Laminat zu gewährleisten, wird ein Druckblech direkt auf dem Laminat abgelegt und von der Vakuumfolie angepresst. Während der ersten Infusion werden die Ultraschallsignale aufgenommen und die Laufzeiten mit der Bauteildicke korreliert. Die aufgenommene Referenzkurve wird bei der nachfolgenden Infusion (4 Phase I) zur Einstellung der Bauteildicke herangezogen. Nach dem Einleiten der Infusion wird die aktuelle Kurve des Ultraschallsignals durch Regelung des Differenzdruckes zwischen Infusionsanlage und Autoklav an die Referenzkurve angeglichen (3 Phase II). Für ein dickeres Bauteil wird der Faservolumengehalt leicht vermindert, indem mehr Harz infiltriert wird; für ein dünneres Bauteil wird Harz herausgedrückt. Bei Erreichen der Sollstärke wird die Infusion gestoppt und der Aushärtezyklus eingeleitet (4 Phase III).

## 7 FAZIT UND AUSBLICK

Bei den betrachteten NFS-Spantbauteilen mit Wandstärken von 2,1 bis 4,2 mm konnte durch Anwendung der Ultraschall-Dickenmessung eine reproduzierbare Dicke mit einer Toleranz von durchschnittlich 81 µm realisiert werden. Die Technik ist für alle FKV-

Bauteile, die im Open- oder Closed-Mould-Verfahren hergestellt werden, anwendbar und erlaubt eine gezielte Kontrolle und Regelmöglichkeit, um eine gleichbleibende Bauteilqualität zu gewährleisten und Ausschuss zu reduzieren. Zudem ist eine einfache Implementation in vorhandene Werkzeuge möglich. Infolge der Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit von E-Modul und Dichte lassen sich Rückschlüsse auf den erreichten Aushärtegrad ziehen. Damit ist außerdem eine Verkürzung der Prozesszeiten verbunden.

Weitere geplante Entwicklungsschritte zielen auf eine Automatisierung des Regelkreises sowie die Umstellung auf ein Impuls-Echo-Verfahren, bei dem nur noch ein Sensor benötigt wird. Dadurch werden Anwendung und Betriebssicherheit deutlich verbessert.

### LITERATURHINWEISE

- [1] Schöll, R.; Friedrich, H.: Innovative Fahrzeugstruktur in Spant- und Space-Frame- Bauweise. In: ATZ 01 (2009), S. 52-58
- [2] Herrmann, A. S.; Sigle, C.: Das Single-Line-Injection-Verfahren zur Herstellung von Hochleistungsverbunden. In: DGLR-Jahrestagung (1999), S.1-7
- [3] Mc Hugh, J.: Ultrasound Technique for the Dynamic Mechanical Analysis of Polymers. Berlin, Technische Hochschule, Dissertation, 2007
- [4] Patent zurzeit in Anmeldung
- [5] Patent zurzeit in Anmeldung



DOWNLOAD DES BEITRAGS  
www.ATZonline.de



READ THE ENGLISH E-MAGAZINE  
order your test issue now: SpringerAutomotive@abo-service.info