

# FORSCHUNGSPLOTTFORM FÜR ENDKONTURNAHE FASERVERBUNDBAUTEILE IM AUTOMATISIERTEN FERTIGUNGSPROZESS

A. Hindersmann, W. Exner, N. Liebers, M. Opitz, S. Torstrick, H. Ucan,  
DLR- Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik,  
Lilienthalplatz 7, 38108 Braunschweig, Deutschland

## Zusammenfassung

Die stetig steigenden Kraftstoffpreise und die Forderung nach umweltverträglichen Transportmitteln betreffen auch die Luftfahrtindustrie. Neben der Verbesserung in der Triebwerkstechnologie sind Einsparungen am Flugzeuggewicht ein Weg, um diesen Anforderungen gerecht zu werden. Erzielt werden kann dies durch den Einsatz von Faserverbundwerkstoffen, wie an den Prestigeprojekten Boeing B787 und Airbus A350 zu erkennen ist. Als Folge steigt die Anzahl der Einzelkomponenten und Baugruppen aus Faserverbundwerkstoffen. Anders als in der Automobilindustrie resultieren im Flugzeugbau die hohen Stückzahlen aus der Menge der benötigten Bauteile. So besteht ein Rumpf aus 140 bis 200 Spanten und bei 500 Flugzeugen pro Jahr sind somit bis zu 100.000 Spante notwendig. Erschwerend ist hierbei, dass die Spante lediglich geometrische Ähnlichkeiten aufweisen und nicht gleich sind. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, ist die Bereitstellung eines automatisierten Herstellungsverfahrens zwingend notwendig. Das Resin Transfer Molding (RTM) Verfahren in Verbindung mit einer Presse bietet durch sein großes Automatisierungspotenzial eine Möglichkeit, auch komplexe Bauteile wie einen Flugzeugspant herzustellen. Der Gesamtprozess muss die Anforderungen des Harzsystems wie Aushärtetemperatur und Aushärtezeit erfüllen. Gleichzeitig muss die Injektionszeit sowie die Aufheiz- bzw. Abkühlzeit des Formwerkzeugs an die hohen Stückzahlen angepasst werden. Dies kann durch die Nutzung eines Temperofens erreicht werden, wodurch der Injektionsprozess vom Aushärteprozess getrennt wird und ein Werkzeugtransfersystem die Anlagenverketzung sicherstellt.

Des weiteren müssen die nachgeschalteten Prozesse wie Endkonturbesäumung und zerstörungsfreie Prüfung zur Verringerung der Gesamtprozesszeit reduziert oder vermieden werden. Zur Vermeidung der nachträglichen Besäumung muss das Formwerkzeugkonzept und die Feinbesäumung der Preform auf diese Anforderung abgestimmt werden, wie auch die Herstellung von Bauteilfamilien. Der Einsatz von Sensorik zur Überwachung der Prozessparameter, wie die Kontrolle des Harzaushärtegrads oder der Temperatur, ermöglicht eine Reduktion des Prüfungsaufwands am fertigen Bauteil.

## 1. EINLEITUNG

Das Resin Transfer Molding Verfahren (RTM) stellt eine Möglichkeit dar für kommende Flugzeuggenerationen kostengünstig und qualitativ hochwertige Bauteile herzustellen. Gerade für vergleichsweise kleine Komponenten, wie Flugzeugspante, ist es sinnvoll das häufig verwendete Prepregmaterial durch trockene Faserhalbzeuge abzulösen. Da beim Einsatz von z.B. Multiaxialgelegen sich hohe Umformgrade erzielen lassen ohne das ein langwieriges Ablegen von einzelnen Rovings erforderlich ist. Außerdem können bei diesen vergleichsweise kleinen Bauteilen geschlossene Formwerkzeuge verwendet werden, wodurch das Siegel mit einer Vakuumfolie entfällt. Im Gegensatz zum RTM-Verfahren ist die Automatisierung bei den vorimprägnierten Halbzeugen durch die Tapelegemaschinen weit fortgeschritten. Derzeit werden automatisierte Fertigungsstrecken für das RTM-Verfahren lediglich in der Automobilindustrie aufgebaut, jedoch sind die damit hergestellten Bauteile wenig komplex.

Das Ziel der EVo- Prozesskette (Endkonturnahe Volumenbauteile) ist es, eine serienfertigungsnahe und automatisierte Fertigungsstraße für komplexe Bauteile im RTM-Verfahren bereitzustellen. Diese Anlage soll nicht nur den Bereich der Luftfahrzeugbauteile, sondern auch die im Bereich der Automobilindustrie benötigten Komponenten abdecken. Als Zielbauteil und als Hilfsmittel zur Definition der Anforderungen wird ein Luftfahrzeugspant angenommen. Der ausgewählte Spant mit Z-Profil besitzt eine Bogenlänge von ca. 2m und einen nicht durchgängigen Radius von etwa 3m.

Neben dem automatisierten Preforming ist eine Schlüsseltechnologie die automatisierte Injektion von Harzsystemen und deren Aushärtung. Im Bereich der Luftfahrt wird im Wesentlichen nur das Harzsystem Hexcel RTM 6 genutzt werden. Für eine Serienproduktion ist dieses Harzsystem aber aufgrund der benötigten Zykluszeit schwierig zu nutzen. Durch Maßnahmen, wie ein geeignetes Werkzeug- bzw. Prozesskonzept und entsprechende Sensorik zur Harzüberwachung, kann jedoch die Möglichkeit geschaffen werden die Prozesszeit

zu verkürzen.

## 2. STAND DER TECHNIK

Das Resin Transfer Molding Verfahren (RTM) zählt zu den Injektionsverfahren. Diese zeichnen sich im Allgemeinen dadurch aus, dass das Harzsystem und das Fasermaterial erst während des Bauteilherstellungsprozesses zusammengebracht werden und somit der Konstruktionswerkstoff bei der Bauteilfertigung entsteht. Hierdurch wird die Möglichkeit gegeben unterschiedliche Materialpaarungen von Fasermaterialien und Harzsystemen zu generieren.

Die Form des Bauteils wird in der Regel durch ein massives Formwerkzeug vorgegeben, das aus zwei oder mehr Werkzeugteilen besteht, die eine Kavität bilden (closed mold) in der sich die Preform befindet.[1] Es müssen nicht zwangsläufig zwei starre Werkzeughälften verwendet werden. Ein Werkzeugteil kann auch aus einer flexiblen Vakuumsfolie (open mold) bestehen, hierdurch ergibt sich zwar mehr Flexibilität, jedoch geschieht dies auf Kosten der Oberflächenqualität auf der Folienseite. Dieses Verfahren kann zur Verbesserung der Laminatqualität im Autoklaven eingesetzt werden, wodurch das Harz mit erhöhtem Druck in die Preform injiziert wird. Schwankungen im Flächengewicht des Fasermaterials, die zu Unterschieden in der Bauteildicke des Laminats führen und damit den Faservolumengehalt beeinflussen, können so ausgeglichen werden. Beim closed mold Verfahren hingegen schwankt der Faservolumengehalt mit dem Flächengewicht des Fasermaterials, dafür ist die Bauteildicke konstant.

Bei beiden Varianten gilt, dass durch Abdichten und Evakuieren des Formwerkzeugs ein Druckunterschied zwischen Formwerkzeug und Harzvorrat aufgebaut wird. Somit kann das Harz in das Formwerkzeug gedrückt werden und durchtränkt die Preform. Zusätzlich kann der Harzvorrat mit Überdruck beaufschlagt werden, wodurch hauptsächlich die Laminatqualität verbessert wird.

Beeinflusst wird das Verfahren durch die Viskosität des Harzsystems und die Permeabilität des Fasermaterials. Die Temperatur des Formwerkzeugs bzw. des Harzes bestimmen, neben der Durchlässigkeit (Permeabilität) des Fasermaterials, die Fließwege.[2] Durch Erhöhung der Temperatur wird meist die Viskosität des Harzes gesenkt wodurch prinzipiell längere Fließwege möglich sind, aber durch eine höhere Temperatur wird auch die Vernetzungsgeschwindigkeit beschleunigt. Somit müssen die maximalen Fließwege bei der Werkzeugauslegung berücksichtigt bzw. der Temperaturverlauf während der Injektion angepasst werden.

### 2.1. Automatisierte Anlagentechnik

Die Frage, ob eine 100%-Automatisierung sinnvoll ist oder nicht, hängt von vielen Faktoren ab. Von Lohnkosten abgesehen sind Komplexität des zu fertigenden Bauteils, Flexibilität der Anlage und zu erreichende Stückzahl wesentliche. Die Sicherstellung einer reproduzierbaren Qualität ist ein weiterer Faktor. Im Faserverbundbereich ist manuelles Arbeiten z.B. beim Drapieren von Halbzeugen derzeit unvermeidbar. Angetrieben vom Druck der Kosteneinsparung wird vor allem im Automobilbereich an automatisierten Verfahren gearbeitet

und dabei Erfahrung aus der Blechumformung und der Spritzgießtechnologie genutzt. Eine automatisierte Fertigung flächiger Bauteile, z.B. PKW-Dächer oder Kotflügel ist bereits Stand der Technik. Der Einsatz von CFK in diesen Bauteilklassen ist dabei jedoch häufiger eine Designfrage oder Demonstration der Machbarkeit, denn Notwendigkeit auf Grund von Gewichtseinsparungsbedarf oder extremer Anforderungen hinsichtlich spezifischer Festigkeit und Steifigkeit, wie es in der Luftfahrt der Fall ist. Der Automationsbedarf in der Luftfahrtindustrie ist zwar zunehmend kostengetrieben, aber vor dem Hintergrund, daß die Fertigungskosten eines Flugzeugs nur etwa 5% der Gesamtkosten über die üblichen 30 Jahre Betriebszeit ausmachen, wird schnell deutlich, daß hier andere Gründe für einen hohen Automationsgrad im Vordergrund stehen.[3] Reproduzierbarkeit, rückverfolgbare und robuste Fertigungsprozesse bei bester Ausnutzung des Leichtbaupotentials sind die Treiber für eine automatisierte Fertigung von Faserverbundbauteilen in der Luftfahrtindustrie.

Um zu einem stabilen und reproduzierbaren RTM-Prozess zu gelangen, muss sichergestellt sein, dass die Ausgangsparameter immer dieselben sind. Neben den rheologischen Eigenschaften der Matrix ist vor allem die Beschaffenheit des Preformlings hinsichtlich Geometrie und Permeabilität relevant. Dies kann durch automatisiertes, endkonturnahes Preforming erreicht werden. Weitere Vorteile der „Near-Netshape“-Bauweise ist die erhebliche Reduzierung nachgeschalteter Bearbeitungsverfahren, wie Konturfräsen und Schnittkanten-versiegelung. Betrachtet werden verschiedene Feinschnittverfahren, z.B. mittels Laser, hinsichtlich Industrialisierbarkeit, Effizienz und Bauteilqualität.

Zur ganzheitlichen Bewertung von Prozessstabilität, Wirtschaftlichkeit und Qualität ist eine Betrachtung einzelner Prozessschritte nicht hinreichend. Prozessdaten der Teilanlagen und Sensordaten der inline-Qualitätssicherung werden in einer übergeordneten Systemsteuerung zusammengeführt und in einem digitalen Life Data Sheet dokumentiert. Die Beeinflussung der Teilanlagenparameter untereinander hinsichtlich Bauteilqualität sowie Optimierung der Gesamtprozesskette in Bezug auf Bauteilqualität, Produktivität und Bauteilkosten stehen im Fokus der Forschungsplattform.

Parallel zur realen Anlage wird eine Ablaufsimulation nach Automotive-Standard aufgebaut und mit Daten der realen Teilanlagen gefüttert. So kann die Produktivität und Flexibilität der Anlage virtuell erweitert werden und eine Kostenbetrachtung für weitere Bauteile in beliebigen Stückzahlen kann ohne den kostenintensiven Aufbau redundanter Anlagenteile erfolgen.

### 2.2. Temperiermethoden

Die Möglichkeiten der Temperierung von Formwerkzeugen zur Aushärtung von Faserverbundbauteilen sind vielfältig. Grundlage jeder Werkzeugtemperierung bilden die Wärmeübertragungsmechanismen: Wärmestrahlung, Wärmeleitung und Konvektion, die thermische Energie von einem System (Temperieranlage) auf das andere

(Werkzeug bzw. Bauteil) übertragen. Je nach Anwendungsfeld werden verschiedene Technologien eingesetzt. In der Luftfahrt sind häufig je nach Innendruck beaufschlagbare Umluftöfen im Einsatz, sogenannte Autoklaven. Diese ermöglichen eine maximale Flexibilität bei der Aushärtung von FV-Bauteilen bei einer hohen Größen- und Variantenvielfalt von Bauteilen und Materialien. Bauteile in nur einer Konfiguration und hoher Stückzahl werden hingegen in einer Pressenumgebung gefertigt. Dabei erfolgt die Temperierung je nach Material- und Bauteilanforderungen elektrisch mittels Heizpatronen über die Pressenbacken, durch induktive Erwärmung des Formwerkzeugs oder direkt durch Ankopplung von Mikrowellenstrahlung am Bauteil selbst.[4] Da die Prozessierung des Harzsystems (Konsolidierung) maßgeblich die Bauteileigenschaften bestimmt, spielt die korrekte Temperaturführung am Bauteil eine besonders große Rolle. Aktuelle Aufzeichnungen der Prozesstemperatur zeigen jedoch eine Abweichung zwischen Soll- und Ist-Temperatur. In BILD 1 ist der Temperaturverlauf beispielhaft für die Aushärtung eines Omegastringers im Autoklav abgebildet, der deutlich die Phänomene: zeitliche Verzögerung sowie lokale und globale Variationen während des Prozesses sichtbar macht.

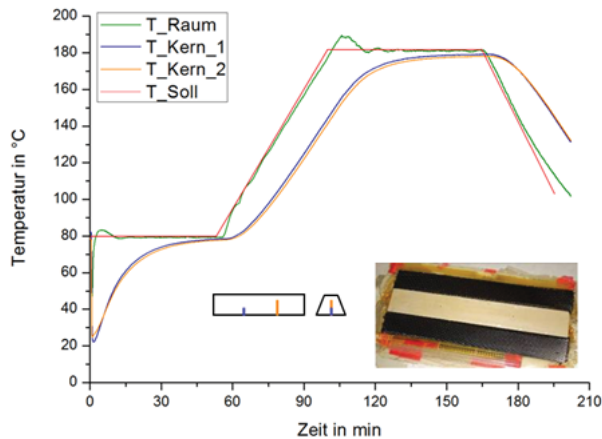


BILD 1. Messung der Bauteiltemperatur bei Aushärtung im Autoklav

Ein weiterer Punkt ist die während der Reaktion des Harzes freiwerdende Energie, auch Exothermie genannt, die zu einer Überhitzung führen kann. All diese Erscheinungen zeigen deutlich, dass eine Aushärtung des Bauteils unter gleichen Härtingsbedingungen nicht gewährleistet ist. Die Folge kann eine nicht richtlinienkonforme Aushärtung sein, da vorgegebene Qualitäts- und Sicherheitsanforderungen nicht eingehalten werden.

Mit dem Ziel der optimierten, d.h. korrekten und beschleunigten Aushärtung von Faserverbundbauteilen muss eine bauteilangepasste und harzkinetikbasierte Temperierung der Formwerkzeuge erfolgen. D.h. neben schnellen Aufheizvorgängen sind die allseitige und oberflächennahe Temperierung, das Halten mit geringen Temperaturschwankungen und die aktive Kühlung sicherzustellen. Eine Möglichkeit zur Realisierung dieser Anforderung liefert die Fluidtemperierung. Es handelt sich hierbei um einen Kreislauf (BILD 2) bestehend aus Temperiereinheit (1), Verbindungsschläuchen (2) und

dem zu beheizenden Formwerkzeug (3), der mit einem Wärmeträgermedium durchströmt wird.

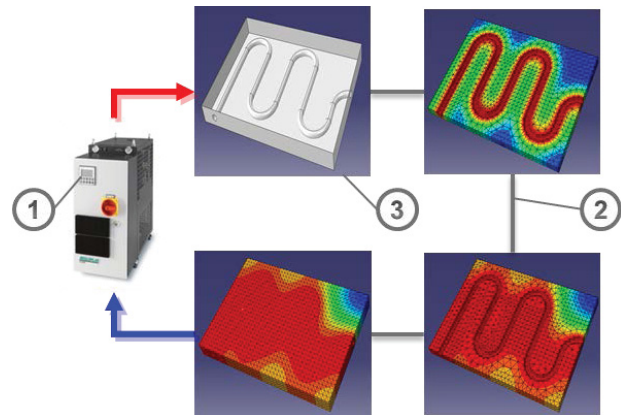


BILD 2. Schematische Darstellung zum Kreislauf Fluidtemperierung

Im Wärmetauscher der Temperiereinheit wird das Fluid auf die vorgegebene Temperatur gebracht und mittels Pumpe durch den Kreislauf gefördert. Im Werkzeug selbst befinden sich Temperierkanäle, die mit dem Fluid durchströmt werden, wobei in Folge der Temperaturdifferenz zwischen Fluid und Werkzeug eine Temperierung stattfindet. Als Trägermedium wird im Bereich der Faserverbunde bevorzugt Wasser verwendet, welches unter Druck eine Werkzeugtemperatur bis 220°C mit Heiz- und Kühlraten bis 10K/min ermöglicht. Gegenüber Öl als Medium hat es etwa die doppelte Wärmekapazität und Wärmeübergangszahl sowie eine über den Arbeitstemperaturbereich konstant bleibende Viskosität, was die Lebensdauer des Formwerkzeugs maximiert und den Wartungsaufwand der Anlagentechnik minimiert. Aus Sicht der Arbeitssicherheit ist Wasser unkritisch und führt bei Leckage nicht zur Kontamination des Fasermaterials. Auch für die Umwelt bestehen keine Bedenken.[5]

In ersten Vorversuchen konnten die Möglichkeiten der Fluidtemperierung bzgl. Temperaturhomogenität bei klassischen Zyklen und deren Flexibilität bei mehrteiligen Formwerkzeugen gezeigt werden. Das eigentliche Potential kann jedoch bei der Verwendung hochreaktiver Harzsysteme bzw. der Aushärtung mit isothermen Prozessen verdeutlicht werden. Im Gegensatz zu anderen Temperiertechnologien wird bei der Reaktion des Harzsystems freiwerdende Energie direkt in den Kreislauf übergeben und mittels aktiver Kühlung abgeführt. BILD 3 zeigt den Temperaturverlauf bei der Aushärtung einer 5mm dicken und unverstärkten RTM6-Harzplatte im Vergleich zwischen konservativer Ofenerwärmung und der Verwendung einer Fluidtemperierung.

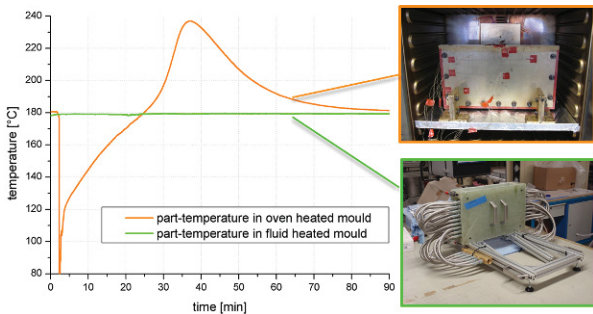


BILD 3. Vergleich der Bauteiltemperatur bei isothermer Härtung (180°C) mit (grün) und ohne (orange) aktiver Temperierung

Voraussetzung für diese genaue Temperierung ist eine Minimierung der Formwerkzeugmasse und eine bauteilangepasste Positionierung der Temperierkanäle im Formwerkzeug. Bei Berücksichtigung der energetischen Interaktion zwischen Bauteil, Formwerkzeug und autarker Fluidtemperierung kann so eine Senkung des Energieverbrauchs und der Prozesszeit erreicht werden. Beispielhaft wurde hierfür die Temperierung eines RTM-Formwerkzeugs untersucht. In der klassischen Ausführung erfolgt der Wärmefluss über die Pressenbacken der Formwerkzeugober- und unterseite. Die Vergleichs-Ausführung beruht auf einer formwerkzeugintegrierten Fluidtemperierung. Der numerische Vergleich ergab, dass eine Beschleunigung des Prozesses um 50% und eine Energieeinsparung von bis zu 30% möglich ist.

**2.3. Harzimprägnierung**

Die Injektionsstrategie ist stark von den Bauteilen abhängig. So müssen die Fließwege, die Permeabilität des Fasermaterials, der Binder zur Fixierung der Einzellagen, das Voreilen an Bauteil- bzw. Werkzeugkanten und die Harzviskosität in Abhängigkeit der Temperatur berücksichtigt werden. Durch eine Fließsimulation können diese Effekte betrachtet werden und somit eine Vorauslegung des Angussystems erfolgen. Allerdings müssen gerade zur Bestimmung der Permeabilität experimentelle Untersuchungen durchgeführt werden, da diese vom Lagenaufbau, Fasermaterial, Webart und Umformgrad abhängt. Der Umformgrad wird durch die Drapierung des Fasermaterials hervorgerufen und ist lokal sehr unterschiedlich, dadurch ist diese Einflussgröße schwierig zu berücksichtigen. [6]

Es können bei der Injektion die Angusstypen Punktanguss, Linienanguss und Ringanguss unterschieden werden. Für längliche Bauteile eignet sich meist ein Linienanguss entlang der größeren Bauteillänge, so dass der Fließweg für das Harzsystem möglichst kurz ist. Bei Punktangüssen werden je nach Größe des Bauteils mehrere Angusspunkte verwendet. Bei ihrer Positionierung im Werkzeug muss das Zusammenfließen der Harzfronten berücksichtigt werden um Lufteinschlüsse im Bauteil zu vermeiden. Beim Ringanguss wird entlang aller Bauteilkanten ein Harzkanal vorgesehen.

Um das Porenvolumen innerhalb eines Bauteils möglichst gering zu halten gibt es die Möglichkeit die Imprägnierung mit überhöhtem Druck durchzuführen und somit das

Gasvolumen zu verkleinern. Hierbei gilt, je größer die Druckdifferenz zwischen dem Druck vor der Injektion (Evakuierung des Bauteils) und dem Injektionsdruck, desto geringer ist das Porenvolumen.

**2.4. Standardzyklus RTM 6**

Das technische Datenblatt erlaubt verschiedene Temperaturzyklen zur Aushärtung von HexFlow RTM6.[7] Hierbei können sowohl die Härtungstemperatur (160-180°C), als auch die Härtungszeiten (60-195min) variiert werden. Um eine vollständige Harzaushärtung zu erreichen, sollte jedoch eine Härtungstemperatur von 180°C gewählt werden. Für einen sehr verbreiteten Zyklus wird das Harz zunächst auf 80°C erwärmt und entgast. Mit dieser Temperatur wird es auch in das 120°C warme Faserhalbzeug injiziert. Nachdem das Bauteil vollständig getränkt ist, wird mit einer Heizrate von 0,5-2,5°C/min eine Härtungstemperatur von 180°C angefahren. Die eigentliche Harzaushärtung findet anschließend mindestens 90min bei dieser Temperatur statt. BILD 4 zeigt diesen „Standardzyklus“ schematisch.

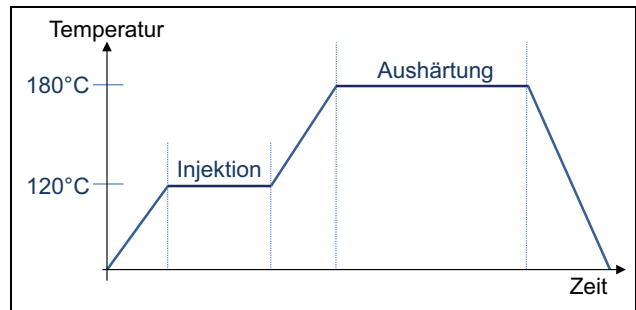


BILD 4. Standardzyklus für die Aushärtung von HexFlow RTM6

**3. PROZESSABLAUF**

Als Grundlage für die Dimensionierung der Forschungsplattform dient ein Flugzeugspant. Dieses Versteifungselement für Flugzeugrümpfe ist im BILD 5 dargestellt.

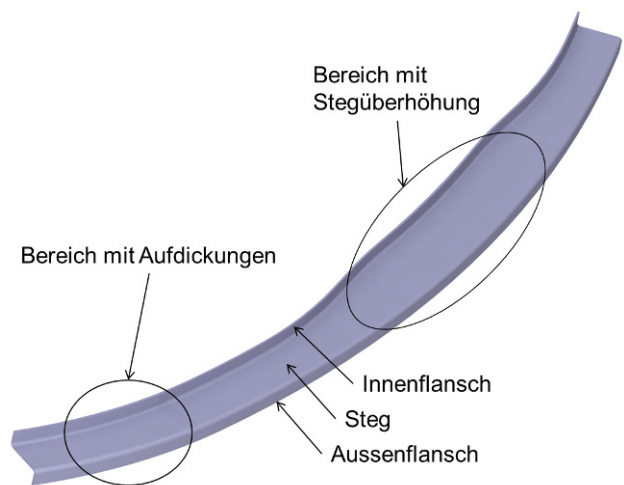


BILD 5. Zielbauteil Z-Spant für die Dimensionierung der Forschungsplattform

Die Bogenlänge beträgt etwa 2m und der Radius des Aussenflansches liegt zwischen 1200mm und 3000mm, wobei die Radienänderung im Bereich der Aufdickung beginnt. Die Steghöhe deckt einen Bereich von 80mm bis 113mm ab, wohingegen die Flanschbreiten mit 28mm konstant sind. Als Fasermaterial wird Multiaxialgelege (MAG) und Unidirektionales Gelege (UD) verwendet. Die Laminatdicke schwankt je nach Bereich von ca. 2,5mm bis ca. 4,4mm.

Der gesamte Prozessablauf kann prinzipiell in den Preforming- und den Injektionsbereich unterteilt werden. Das BILD 6 zeigt hierzu die Gesamtanlage mit ihren modular aufgebauten Teilanlagen. Im Preformingbereich beginnt die Prozesskette mit der Materialbereitstellung. Ausgehend von Fasermaterial, das auf Rollen konfektioniert ist, können automatisch auf einem Conveyorbandcutter verschiedenste Zuschnitte generiert werden. Bis zu sechs Materialrollen sind in den Speichergestellen untergebracht und werden dem Cutter automatisch zugeführt. Eine Kantenregelung und eine Synchronisierung zwischen Umdrehungsgeschwindigkeit der Rollenaufnahme und dem Conveyorband sorgen für eine verzugsfreie Abwicklung des Fasermaterials auf den Cuttertisch.

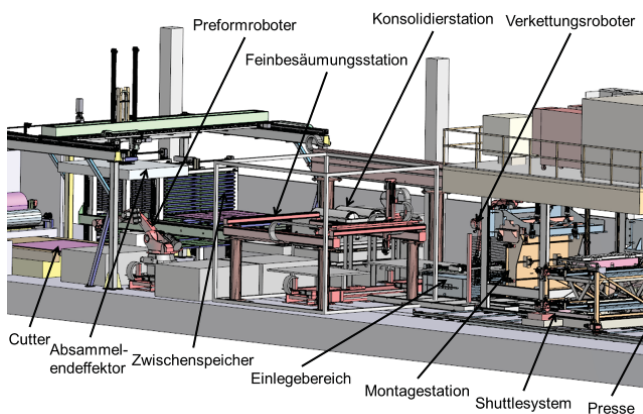


BILD 6. Gesamtanlage für den automatisierten RTM-Prozess

Die generierten Zuschnitte können mit Hilfe eines Endeffektors, der mit Sauggreifern bestückt ist, vom Tisch abgesammelt und dem Zwischenspeicher zugeführt werden. Im Zwischenspeicher ist auch die Einlagerung von Sandwichkernen oder von Subpreformen, z. B. Flechtpreformen oder kontinuierlich gefertigten Preformen, möglich. Der Endeffektor dient nicht nur zum Einlagern, sondern kann die benötigten Einzelzuschnitte bei Bedarf an die Umformstation übergeben. Als Schnittstelle dient ein Tisch auf dem die Zuschnitte eben abgelegt und hier vom Umformroboter abgeholt werden. Der diskontinuierliche Umformprozess sorgt für die Formgebung der Einzellagen in die vorgegebene Geometrie.

Eine Konsolidierstation kompaktiert die Einzellagen und erwärmt die Preform für die Binderaktivierung. Nach der Kompaktierung wird die Preform an die Feinbesäumungsstation übergeben, in der die Preform mit einem Ultraschallmesser umfangsbesäumt und so auf die Endkontur geschnitten wird. Die Schnittstelle zwischen Preformingbereich und Injektionsbereich wird durch den Einlegebereich geschaffen. Hier legt ein

Verkettungsroboter die besäumte Preform in das bereitgestellte untere Kernwerkzeug ein. Ein Schienensystem transportiert das bestückte Kernwerkzeug in die Werkzeugmontagestation, wo durch das Aufsetzen des oberen Kernwerkzeugs das Formwerkzeug verschlossen und über ein Shuttlesystem in die Presse transferiert wird. Heizplatten und eine thermische Isolation erwärmen das Formwerkzeug auf Injektions- bzw. Aushärtetemperatur. Die Injektionsanlage und die Vakuumpumpe werden automatisch an das Formwerkzeug angeschlossen. Es können sowohl Ein- als auch Zweikomponentenharzsysteme verarbeitet werden. Des Weiteren ist die Beimischung von internem Trennmittel möglich.

Über Ultraschallsensoren kann der Aushärtegrad des Harzsystems bestimmt, sowie eine gemittelte Temperatur gemessen werden. An diesen Messstellen sind auch Thermoelemente zur Sensierung der Temperatur untergebracht. Drucksensoren innerhalb des Formwerkzeugs überwachen den Formeninnendruck in der Nähe des Harzein- und Harzaustritts.

Zur Temperung bzw. vollständigen Aushärtung wird das Formwerkzeug mit dem Bauteil in den Temperofen gefahren. Die Entformung erfolgt nach dem Rücktransport mit dem Shuttlesystem im Einlegebereich, wo auch die Reinigung, das Eintrennen und anbringen neuer Dichtungen durchgeführt wird.

### 3.1. Anforderungen an den RTM-Prozess

100.000 Bauteile pro Jahr, das bedeutet etwa 20 Teile pro Stunde. Derzeitige RTM-Harze mit Luftfahrtzulassung sind heißhärtende 1-Komponenten-Epoxidsysteme mit Aushärtezeiten von 90min und mehr. Hinsichtlich Automation und kurzer Taktzeiten stellt die reine Aushärtezeit des Harzes aber nur eine Herausforderung dar. Die Reaktivität eines vorgemischten Harzsystems erfordert eine gekühlte Lagerung und eine Temperierung unter kontrollierten Bedingungen. Dies stellt bei Anlagenstillstand ein Problem dar, da das Harzhärtergemisch in der Anlage zu reagieren beginnt und im schlimmsten Fall im Harztank oder den harzführenden Leitungen aushärtet. Um dies zu vermeiden, wurde z.B. im Projekt „Auto-RTM“ eine Vereisung am Injektionskopf genutzt. Im Projekt EVO verbleibt die Injektionsdüse im Formwerkzeug und die Harzleitung kann in einen Abfallbehälter freigepumpt werden. Bei Nutzung eines Zweikomponentensystems sind die nicht vorgemischten Komponenten alleine nicht reaktiv und können auch bei Anlagenstillstand in den Leitungen verbleiben. Dies ist in der Automobilindustrie bereits Stand der Technik als Weiterentwicklung des RIM-Verfahrens (Reaction- Injection-Moulding). Ebenfalls im Automotive Bereich etabliert ist das sog. Hochdruck- oder HD-RTM. Der Begriff Hochdruck bezieht sich dabei im Wesentlichen auf den hohen Druck im Mischkopf, unter dem die beiden Komponenten miteinander vermischt werden. Ein hoher Injektions- und Forminnendruck kann genutzt werden, um die ggf. beim Mischen entstehenden Luftblasen klein zu drücken. Um HD-RTM sinnvoll einsetzen zu können, muß das Fasermaterial im Werkzeug geklemmt werden, was allerdings nicht mit der Endkonturbauweise vereinbar ist. Ein weiterer Vorteil von 2K-Systemen ist die mehr oder weniger frei einstellbare Reaktionszeit. Es können Aushärtezeiten von wenigen Sekunden erreicht werden,

was für eine Produktion hoher Stückzahlen unabdingbar ist. Der für die Luftfahrt entscheidende Vorteil der vorgemischten Harzsysteme ist die prozess-technisch erreichbare höhere Genauigkeit der Zusammensetzung und vor allem deren Überprüfbarkeit. So muß gewährleistet sein, daß der sprichwörtlich erste Tropfen eines Injektionsvorgangs dieselbe Zusammensetzung hat wie der letzte. Zwar ist dies auch bei modernen Mischköpfen der Fall, jedoch kann die Zusammensetzung im laufenden Prozeß nicht hinreichend qualitätsgesichert überprüft werden.

### 3.2. Verkürzung der Prozesszeit

Die Standardtemperaturzyklen zur Aushärtung von RTM6 enthalten große Sicherheitspuffer. So sieht der in Kapitel 2.4 vorgestellte Zyklus eine Härtungsdauer von mindestens 90min bei 180°C vor. Die Dynamische Differenzkalorimetrie (DSC) zeigt hingegen, dass die Reaktion des Harzes bereits nach etwa 45min abgeschlossen ist. Dieser eklatante Unterschied beruht in erster Linie auf den verschiedenen Härtungsbedingungen. In der DSC kann auf Grund der kleinen Proben (10-15mg) sichergestellt werden, dass das Harz zu jeder Zeit homogen auf 180°C erwärmt ist. In einem realen Bauteil sieht die Temperaturverteilung jedoch deutlich inhomogener aus. In Abhängigkeit von der Bauteilgröße und dem Temperierverfahren kann einige Zeit vergehen bevor das gesamte Bauteil homogen erhitzt ist. Zudem kann es, wenn die Aushärtung erst einmal im Gange ist, durch die auftretende Exothermie lokal zu Überhitzungen kommen. Dies kann vor allem bei dicken Bauteilen und bei Werkzeugen, die die Wärme nicht effizient abführen, zur thermischen Schädigung des Bauteils führen.

Die homogene Temperaturverteilung im Laminat wird durch Sicherheitspuffer in den vorgeschlagenen Härtungszyklen gesichert, wohingegen die Exothermie durch eine entsprechende Auslegung des Formwerkzeugs oder den Härtungszyklus kompensiert wird. Auf diese Art und Weise kann sichergestellt werden, dass jedes Bauteil vollständig ausgehärtet ist. Für eine Serienproduktion, bei der viele Bauteile unter den gleichen Bedingungen gehärtet werden, sind solche Sicherheitsfaktoren jedoch nicht notwendig. Durch eine Untersuchung des Reaktionsablaufes, zum Beispiel durch im Prozess integrierte Sensorik (siehe Kapitel 3.4) können die Aushärtezeiten drastisch verkürzt werden.

Neben der Verkürzung von unnötigen Haltezeiten, ist eine Beschleunigung des Prozesses auch die Reduzierung, beziehungsweise durch den Wegfall von Aufheizphasen möglich. Dies kann zum Beispiel durch eine erhöhte Injektionstemperatur des Bauteils und des Harzes erreicht werden. Durch eine erhöhte Harztemperatur kann gleichzeitig die Viskosität des Harzes reduziert werden, was wiederum zu einer Verkürzung der Injektionszeiten führt. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass gleichzeitig die Reaktionsgeschwindigkeit erhöht wird, was zu einer zunehmenden Vernetzung und somit Viskositätssteigerung führt. Für das 1 Komponenten RTM6 besteht nur ein geringer Spielraum bezüglich der typischen Injektionstemperatur von 80°C. Eine Erhöhung dieser Temperatur birgt das massive Risiko einer frühzeitigen Reaktion im Topf. Eine Abhilfe kann hier durch die Verwendung von 2 Komponenten RTM6 geschaffen werden. Das ebenfalls kommerziell erhältliche 2

Komponenten System bietet die Möglichkeit der Temperaturerhöhung ohne das Risiko einer vorzeitigen Reaktion. Hierfür muss jedoch eine 2 Komponenten Mischanlage zur Verfügung stehen. Der Wegfall von zeit- und energieaufwendigen Aufheizrampen führt zu wesentlich effizienteren Aushärteprozessen. Allerdings muss hierbei auch immer die Qualität des Bauteils mit in Betracht gezogen werden. Es ist allgemein bekannt, dass die inneren Spannungen in einem Bauteil mit Steigerung der Härtungstemperaturen zunehmen.

Neben den verkürzten Haltezeiten und der Verwendung eines Isothermen Härtungszyklus, ist die Trennung von Härtung und Tempern ein wesentlicher Aspekt der EVO-Produktionsstrecke. Durch einen nachgeschalteten Ofen kann so die Belegungszeit der Presse drastisch verkürzt werden. In der Presse selbst müssen somit nur die eigentliche Injektion und das Gelieren des Harzes geschehen. In dem nachgestellten Ofen kann anschließend die Aushärtung vervollständigt werden. Um eine Verformung des Bauteiles auszuschließen, muss hierbei entweder in einem freistehenden Temperprozess die Glasübergangstemperatur durch eine langsame Temperaturrampe vor sich her getrieben werden oder bei einem isothermen Tempern das Bauteil unterseitig gestützt werden.

### 3.3. Formwerkzeugkonzept

Das Formwerkzeug besteht aus den Werkzeugkernen, den Heizplatten und Auslegearmen mit Transportrollen. Die Werkzeugkerne bilden die Geometrie des Bauteils ab und beinhalten das Angussystem. Zur Minimierung der Wärmeausdehnung sind diese Werkzeugteile aus Invarstahl (Ni36 Legierung).

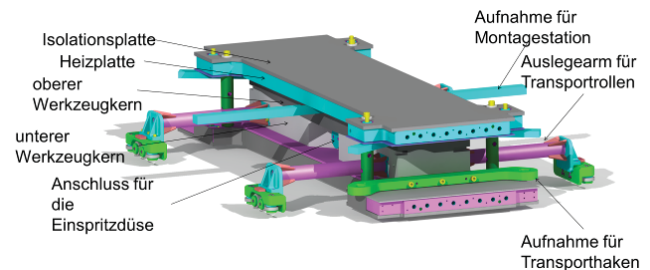


BILD 7. Aufbau des Formwerkzeugs

Da das Zielbauteil, ein Flugzeugspant, nach der Aushärtung keiner Nachbearbeitung unterzogen werden soll und somit keine Möglichkeit besteht Reinharzränder zu entfernen oder eine gesamte Umfangsbesäumung durchzuführen besteht das Angussystem aus einzelnen Zinnen die entlang der Bogenlänge des Spants verteilt sind. Die Zinnen stehen hierfür senkrecht zu den Gurten des Spants und ermöglichen durch ihre geringen Abmessungen (siehe BILD 8) ein einfaches entfernen nach der Aushärtung.

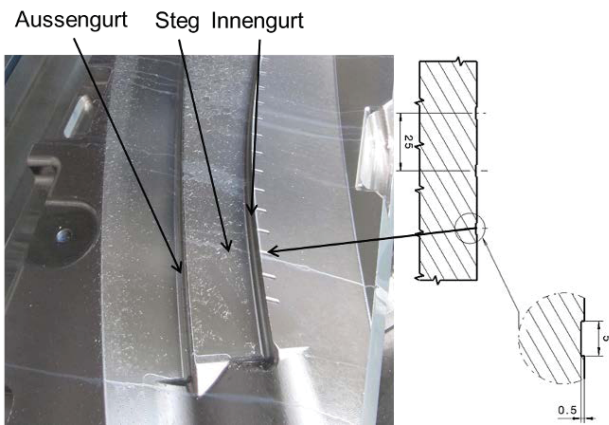


BILD 8. Abmessungen der Zinnen des Angussystems und deren Position am Formwerkzeug

Unterstützt wird die Entfernung der Angussreste durch Abreißgewebe, das auf die Preform aufgelegt wird und nach der Aushärtung vom Bauteil abgezogen wird. Die Versorgung der Zinnen mit Harz wird über einen Vorverteilungs- und einen Verteilungskanal, deren Anordnung in BILD 9 dargestellt ist, sichergestellt. Der Vorverteilungskanal sorgt für eine gleichmäßige Verteilung des Harzes entlang des Verteilungskanals und somit kann eine homogene Harzversorgung der Zinnen erfolgen. Auf der Absaugseite ist die Verteilung der Zinnen identisch und diese sind über einen Sammelkanal mit dem Anschluss für die Harzfalle bzw. der Vakuumpumpe verbunden.

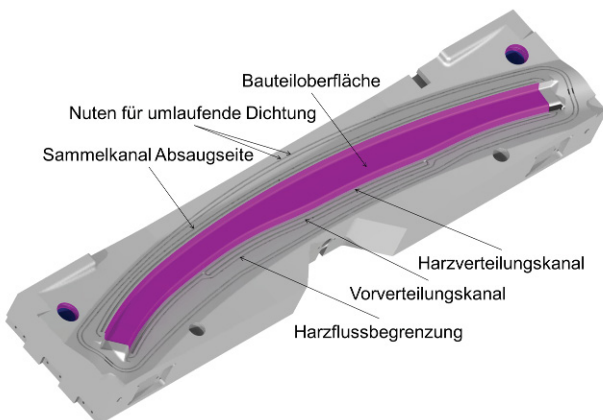


BILD 9. Aufbau des unteren Kernwerkzeugs mit Harzverteilungskanälen

Eine Fließsimulation hat gezeigt, dass die in BILD 8 angegebenen Abmessungen für die Zinnen benötigt werden.

Um eine ausreichende Kompaktierung des Stegs und der Gurte sicherzustellen ist die Spantgeometrie in einem Winkel von 20° zur Pressgrundfläche angeordnet. Optimal wäre ein Winkel von 45°, jedoch wird durch die gebogene Spantform das Formwerkzeug erhöht. Daraus folgt eine Steigerung des Werkzeuggewichts, welches zusätzlich erwärmt werden muss. Neben der Kompaktierung werden durch das Verkippen des Spants auch Entformungsschrägen geschaffen, die das Entformen und öffnen des Werkzeugs erleichtern.

Die Heizplatten sind fest in der Presse montiert, wodurch ein An- und Abkoppeln der wasserführenden und unter Druck stehenden Leitungen vermieden wird. Zudem müssen die Heizplatten bei einem Werkzeugwechsel nicht gekühlt werden, wodurch Prozesszeit und auch Energie gespart wird. Damit das Bauteil und die Kernwerkzeuge dem Temperofen zugeführt werden können, sind die Auslegearme und die Transportrollen seitlich am Werkzeug angebracht. Die Auslegearme sind notwendig, da die Pressflächen 2,5m x 2m messen und das Schienensystem seitlich angebracht ist. Die Größe der Pressflächen ermöglicht es auch zwei Spantwerkzeuge gleichzeitig zu verwenden und somit die Produktionsmenge zu verdoppeln. Da Spante für ein Flugzeug zwar eine geometrische Ähnlichkeit aufweisen, z.B. Z-Spant, aber in ihrer Bogenlänge, ihrer Steghöhe und Gurtbreite variieren, ermöglicht das Werkzeugkonzept durch ein einfaches Austauschen der Kernwerkzeuge die benötigte Flexibilität. Dies bedeutet, dass nicht für jeden einzelnen Flugzeugspant eine eigene Produktionsstrecke aufgebaut werden muss.

Das Kernwerkzeugkonzept erfordert eine Montagestation, in der das Kernwerkzeug zusammengesetzt wird. Dafür sind am oberen Kernwerkzeug die Aufnahmen für die Montagestation angebracht. Außerdem müssen die Kernwerkzeuge zu einander positioniert werden, zu diesem Zweck sind vier Stifte und entsprechende Bohrungen im Gegenwerkzeug vorgesehen sind. Zwei Stifte sorgen hierbei für eine Vorzentrierung und die anderen für die eigentliche Zentrierung. Damit die Vakuumpumpe und der Injektionskopf automatisch angekoppelt werden können muss das Werkzeug in der Presse ausgerichtet werden. Dazu sind im Pressentisch bzw. in den Heizplatten drei Bolzen vorgesehen deren Gegenpart am unteren Kernwerkzeug befestigt ist.

Bei der Überführung des Werkzeugs aus der Presse zum Temperofen muss sichergestellt werden, dass der Aushärtprozess nicht gestört wird. Als Bewertungskriterium wird hierfür die Bauteiltemperatur herangezogen, deren Istwert um maximal +/-5% vom Sollwert abweichen darf. Hieraus ergibt sich außerdem die maximal zulässige Verfahrzeit des Werkzeugs ohne eine Temperierung. Zur Bestimmung beider Werte kann mittels transientscher Thermalsimulation das Abkühlen des Werkzeugs in Abhängigkeit möglicher Randbedingungen, wie Umgebungstemperatur der Fertigungsräume und Konvektionskoeffizient an der Werkzeugoberfläche analysiert werden. (BILD 10)

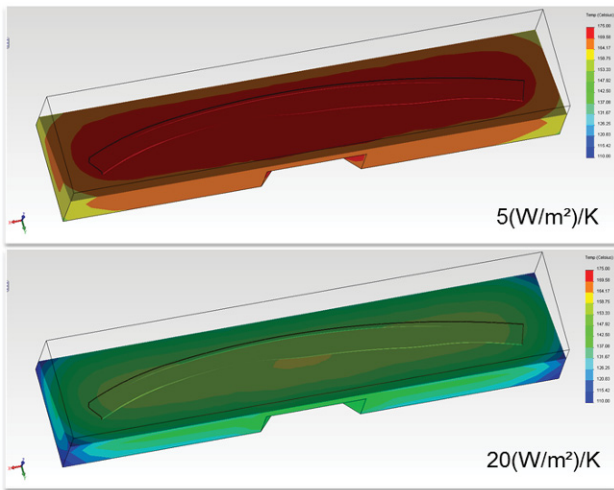


BILD 10. Einfluss des Konvektionskoeffizienten auf die sich einstellende Bauteiltemperatur und -verteilung nach 3600s (Werkzeug im Schnitt)

An markanten Punkten erfolgt eine Überwachung der minimalen Bauteiltemperatur mittels Sensoren an der inneren Werkzeugwand. Aus dem so generierten Parameterraum (BILD 11) kann durch Vorgabe der Bauteil-Grenztemperatur die maximal zulässige Zeit außerhalb der Presse bestimmt werden. Hieraus leitet sich der maximale Prozessweg zwischen Presse und Temperofen innerhalb der Fertigungskette ab bzw. eine Anpassung der Werkzeugtemperierung durch eine zusätzliche Isolierung oder aktive Beheizung.

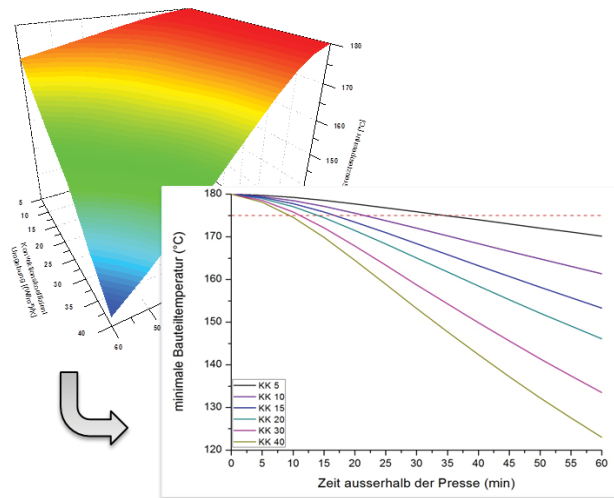


BILD 11. Zeit (min) bis zum Erreichen der vorgegebenen Bauteil-Grenztemperatur (TB) für verschiedene Konvektionskoeffizienten KK zur Umgebung (W/m<sup>2</sup>)/K

### 3.4. Prozesssensorik zur Qualitätssicherung

Die Temperatur gilt als einer der wichtigsten Prozessparameter in der Fertigung von Faserverbundbauteilen. Bei der Injektion und Aushärtung dieser Bauteile hängen Fließeigenschaften und Aushärtungsgeschwindigkeit im hohen Maße von der Temperatur des Harzes ab, so dass zur Überwachung der Prozesstemperatur Temperatursensoren in das Formwerkzeug integriert werden. Auf diese Weise kann

über den gesamten Fertigungsverlauf kontinuierlich die Temperatur an verschiedenen Bereichen des Formwerkzeuges überwacht werden. Das Ziel hierbei ist eine Effizienzsteigerung des Produktionsprozesses und ein verbesserter Nachweis der Produktqualität.[8]

Zur Temperaturerfassung werden Thermoelemente des Typs K eingesetzt. Sie zeichnen sich durch eine hohe Empfindlichkeit und durch einen größeren Messbereich gegenüber den weitverbreiteten Thermoelementen des Typs J aus. Diese haben den Nachteil, dass einer ihrer beiden Leiter aus Eisen besteht und somit die Gefahr besteht, dass deren Kontakte rosten können. Auf diese Weise kommt es zu einer Störung der Messkette, die zu Messfehlern führen kann. Um weitere Störeinflüsse entlang der Messkette von der Messspitze bis zur Messkarte zu vermeiden, werden neben geeigneten Ausgleichleitungen Multipol-Steckersysteme des Herstellers LEMO eingesetzt, die für diesen speziellen Einsatz mit Kontakten aus Nickel und Nickel-Chrom ausgelegt wurden.[9]

Die Hard- und Softwareebene der Temperaturüberwachung am Formwerkzeug bestehen aus Komponenten der Firma National Instruments. BILD 12 zeigt die modular aufgebaute Softwareoberfläche der Temperaturerfassung, die in der Softwareumgebung LabVIEW programmiert wurde. Sie bietet neben der Erfassung der aktuellen Temperaturen und ihrem zeitlichen Verlauf, die Möglichkeit Abweichungen vom eingestellten Temperatur-Sollwert Skalar und durch LED's anzuzeigen. Alle erfassten Messdaten werden parallel gespeichert, ausgewertet und können für die kontinuierliche Überwachung des Fertigungsprozesses genutzt werden. Das Ergebnis ist ein Datenmanagement auf Grundlage von Echtzeitdaten zur Qualitätssicherung und zur Nachverfolgbarkeit der Produkt- und Prozessqualität.

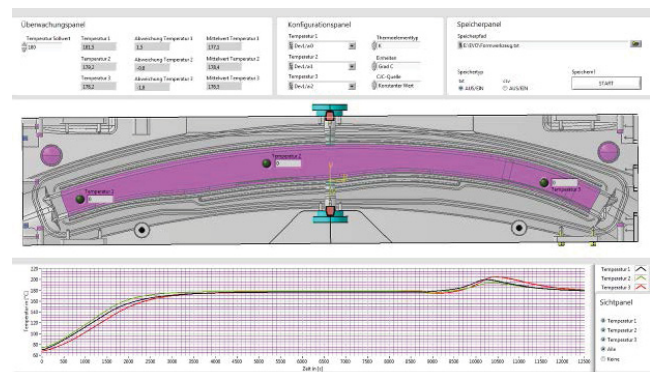


BILD 12. Softwareoberfläche der Temperaturüberwachung am Formwerkzeug

Trotz ihrer hohen Bedeutung für den Injektions- und Aushärtungsprozess ist die Temperatur eine Messgröße, die nur indirekt Rückschlüsse auf die Bauteilqualität zulässt. Mit Hilfe der Temperatur wird sowohl während des Injektionsvorganges die Viskosität bzw. die Fließfähigkeit des Harzes eingestellt als auch die Aushärtungsreaktion aktiviert und deren Ablaufgeschwindigkeit kontrolliert. Da jedoch lediglich Temperaturdaten vom Formwerkzeug vorliegen, kann die Temperatur im Inneren des Harzes z.B. durch frei werdende Reaktionswärme abweichen. Schon kleine Temperaturabweichungen können einen entscheidenden



Einfluss auf Viskosität und Reaktionsgeschwindigkeit ausüben.

Aus dieser Tatsache heraus sind Sensoren interessant, die möglichst direkte Aussagen über die Harzeigenschaften während des Fertigungsprozesses treffen können. Zur Online-Überwachung der Harzaushärtung werden im Stand der Technik unter anderem kapazitive, resistive und Ultraschall-Sensoren verwendet. Die kapazitiven und resistiven Sensoren beruhen auf dem Phänomen, dass proportional zur Aushärtung sich die dielektrischen Eigenschaften bzw. der ohmsche Widerstand des Harzes verändern. Diese Methoden haben jedoch den Nachteil, dass die Sensoren Kontakt zum Harz benötigen – dabei die Bauteiloberfläche beeinträchtigen – und gleichfalls gegen ein Kurzschließen durch die Kohlenstofffasern geschützt werden müssen. Zudem wird hier die Harzaushärtung oberflächlich und nicht in der Mitte des Bauteils bestimmt. Folglich sind die Einsatzorte und Aussagekraft dieser Sensoren stark eingeschränkt.

Mit Hilfe von Ultraschall lässt sich dagegen der Aushärtegrad des Harzes über die Bauteildicke bestimmen, wobei kein direkter Kontakt zum Harz notwendig ist. Die Ultraschallwellen werden von einem Sender erzeugt, in das Formwerkzeug eingekoppelt, durchlaufen die Bauteildicke bis sie dann von der zweiten Formhälfte zum Sensor übertragen und dort sensiert werden. Mit zunehmender Aushärtung werden die Schallwellen schneller vom Harz übertragen, so dass durch Auswertung der Laufzeiten der Vernetzungsfortschritt bestimmt werden kann.

Durch Auswertung der beiden Signale des Empfängers und Senders, der nach dem kurzen Sendepuls ebenfalls als Sensor genutzt wird, sind weitere wichtige Prozessgrößen erfassbar. Neben der Aushärtung lassen sich so die morphologischen Zustandsänderungen des Harzes – Gelierung und Verglasung, das Erreichen der Harzfront an der Messstelle als auch die Werkzeugtemperatur bestimmen. Die Zustandsänderungen zeigen sich im Kurvenverlauf der Schallgeschwindigkeit und Signalamplitude, deren exakte Korrelation derzeit noch genauer untersucht wird. Die Harzfront kann deutlich sowohl im Signal des Senders als auch in dem des Empfängers erkannt werden. Durch Laufzeitbestimmung des Echos, welches an der Grenzfläche zwischen Werkzeugwand und Bauteil reflektiert wird, lässt sich die Temperatur des Werkzeugs bestimmen, dank des annähernd linearen Zusammenhangs zwischen Schallgeschwindigkeit und der Temperatur.

Im Stand der Technik werden meist Ultraschallprüfköpfe verwendet, die über Halterungen oder Gewindebohrungen in das Formwerkzeug integriert werden. Vorversuche ergaben jedoch, dass die Prozessüberwachung hierbei teilweise unzuverlässig ist. Als Ursache wurde die akustische Kopplung zwischen Prüfkopf und Formwerkzeug gefunden, die vor allem bei großen Temperaturen und Temperaturunterschieden störanfällig ist. Aus dieser Erkenntnis wurden Sensoren untersucht und entwickelt, die besser geeignet sind für die Prozessüberwachung. Als eine gute Alternative ergaben die Untersuchungen dünne Piezokeramiken, welche durch eine dünne Klebschicht direkt am Werkzeug

angebracht werden (BILD 13). Auf diese Weise wird der Schallimpuls effektiv und zuverlässig in das Werkzeug eingekoppelt, so dass ein ca. 5-fach stärkeres Signal im Vergleich zu den Prüfköpfen gemessen werden kann. Die Piezokeramiken haben zudem den Vorteil, dass sie durch ihren kleinen Bauraum leichter im Formwerkzeug zu integrieren sind dadurch auch flexibler bei der Platzierung an komplexen Stellen sind. Nicht zuletzt ist ein wesentlicher Kostenvorteil der Keramiken gegenüber der konservativen Prüfköpfe zu erwähnen.



BILD 13. Ultraschallsensoren zur Prozessüberwachung Zusammenfassung und Ausblick

#### 4. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die Forschungsplattform EVO dient der Validierung und der Verifikation von automatisierten RTM- Prozessen. Somit können Serienfertigungsabläufe Faserverbundbauteile mit hohen Stückzahlen ermittelt werden und Aussagen über die Bauteilkosten gemacht werden. Mögliche Engpässe, wie z.B. ein zu langsamer Umformprozess im Preformingbereich oder ein unnötig langanhaltender Injektionsprozess, werden bereits vor der Umsetzung in den realen Industrieprozess erkannt und werden so vermieden. Hierzu zählen auch die Themen Prozessstabilität oder -robustheit und die damit verbundenen Auswirkungen auf die Bauteilqualität.

Durch den modularen Aufbau der Anlage können alternative Werkzeugkonzepte und damit auch verschiedenste Bauteile und Prozesse erprobt werden. Neben den monolithischen Faserverbundbauteilen ist die Anlagenperipherie auch in der Lage Prozesse für Sandwichbauteile darzustellen.

Die eingesetzte Sensorik dient zwar primär der Kontrolle des Prozesses beim Einfahren, ermöglicht aber durch ihren passiven Charakter eine prozessbegleitende Qualitätssicherung ohne den Fertigungsablauf zu stören. Außerdem kann die Sensorik auch zu einer Reduktion des nachgeschalteten Prüfaufwandes genutzt werden, da der Aushärtegrad des Harzsystems und der Temperaturzyklus bestimmt und dokumentiert werden kann.

Für zukünftige Flugzeug- und Automobilgenerationen können die entsprechenden Fertigungs- und Prozessabläufe durch die Forschungsplattform EVO ermittelt und somit der Serienprozess schneller umgesetzt werden.

- [1] Potter, K.: Resin Transfer Moulding. Chapman & Hall, 1997
- [2] AVK-Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e.V. (Hrsg.): Handbuch Faserverbundkunststoffe. Grundlagen, Verarbeitung, Anwendungen. 3. Vollständig überarbeitete Auflage. Vieweg & Teubner/GWV Fachverlage, Wiesbaden, 2010
- [3] Sterzenbach, R., Conrady, R.; Luftverkehr: Betriebswirtschaftliches Lehr- und Handbuch; Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH; München, 3. Auflage 2003
- [4] Kleineberg, M. et al: Leitfaden für die Auslegung von Formwerkzeugen unter Berücksichtigung verschiedener Herstellverfahren, 2010
- [5] Regloplas AG: Handbuch der Temperierung mittels flüssiger Medien, Hüthig Verlag 2006
- [6] Kruckenberg, T.; Paton, R.: Resin Transfer Moulding for Aerospace Structures. Kluwer Academic Publisher Dordrecht, 1998.
- [7] Technisches Datenblatt, HexFlow RTM6, Hexcel, 2007
- [8] Körtvelyessy, L.: *Thermoelement Praxis*. Vulkan Verlag Essen, 1981.
- [9] Bernhard, F.: *Technische Temperaturmessung*. Gebundene Ausgabe. Springer Verlag Berlin, 2003.