Industrialisierung der Prozesskette Harzinfusion

M. Kleineberg, L. Herbeck, C. Schöppinger
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Strukturmechanik
INVENT GmbH

Kurzfassung
Vorgestellt werden Konzepte zur industriellen Umsetzung der Harzinfusionstechnik für die qualitätsgesicherte Fertigung von qualifizierten, luftfahrtgeeigneten Faserverbundbauteilen. Die vorgestellten Ansätze wurden im Rahmen der Zusammenarbeit mit Airbus, EADS und insbesondere Fairchild Dornier entwickelt und zum Teil bereits in der Serienfertigung erprobt. In den einzelnen Prozessschritten steht neben der Absicherung des Qualitätsniveaus besonders die Möglichkeit der Kostenreduktion im Vordergrund.

1. Einleitung

In der Luft- und Raumfahrt ist die Einführung neuer Fertigungstechnologien aufgrund der kostspieligen und aufwendigen Zulassungsverfahren nur für Verfahren mit außerordentlich hohem Potential sinnvoll. Bei der Beurteilung dieses Potentials steht im zivilen und militärischen Flugzeugbau neben der Optimierung der strukturellen Leistungsfähigkeit zunehmend die Senkung der Fertigungskosten im Vordergrund, da sich der internationale und insbesondere der europäische Wettbewerb in dieser politisch äußerst sensiblen Branche deutlich verschärft.

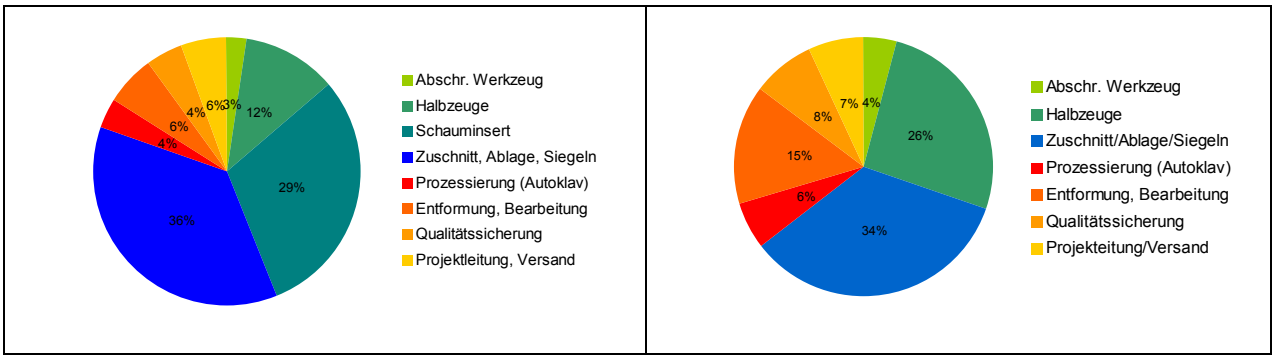
Als mögliche Antwort auf den steigenden Kostendruck gilt die Harzinfusionstechnik, welche eine deutliche Reduktion der Fertigungskosten bei möglichst hoher struktureller Leistungsfähigkeit der hergestellten Faserverbundbauteile in Aussicht stellt.

Einer der ersten Serieneinsätze der Harzinfusionstechnik bestand in der Fertigung von Verkleidungsteilen für die auf Strahltriebwerke umgerüstete Fairchild Dornier Do 328 Jet, deren Prototyp im Januar 1998 zum ersten mal abhob. Dieser zum damaligen Zeitpunkt mutige Schritt wurde möglich, da sowohl die Kostenstruktur der Fertigung als auch die reproduzierbare Qualität der Bauteile überzeugend dargestellt werden konnte. Im Rahmen der Ausrüstung von mehr als 100 Flugzeugen mit jeweils 6 Bauteilen wurde deutlich, dass neben dem eigentlichen Harzinfusionsverfahren eine Vielzahl weiterer Faktoren für den Erfolg eines Fertigungskonzeptes entscheidend sind. Die Analyse des gesamten Fertigungsprozesses zeigte, dass neben dem Infusionsprozess die Aspekte

Fertigungswerkzeug und Handhabung/Preforming ebenfalls erheblichen Einfluss auf die Qualität und Wirtschaftlichkeit des Fertigungskonzeptes haben.

2. Prozessanalyse

Die Reproduzierbarkeit der Bauteilqualität auf möglichst hohem Niveau ist für eine erfolgreich Fertigung genauso entscheidend wie die Qualität selbst. Darüber hinaus können die Fertigungskosten bei fehlender Reproduzierbarkeit durch steigende Ausschussraten sehr schnell außer Kontrolle geraten. Da viele fertigungsrelevante Problemstellungen jedoch bauteilspezifisch sind, ist der derzeitige Stand der Nasstechnologie durch die Sammlung und Aufbereitung neuer Erkenntnisse geprägt. Eine stetige Anpassung des Fertigungskonzeptes zur gezielten Vermeidung erkannter Fertigungsrisiken sollte aber auch heute schon wirtschaftlicher sein als die Akzeptanz einer überhöhten Ausschussrate, selbst wenn die Anpassung eine kostenintensive Aktualisierung der Zulassung nach sich zieht. Bei entsprechender Aufbereitung der Erkenntnisse in Form optimierter Fertigungsanweisungen lassen sich darüber hinaus viele Risiken für nachfolgende Vorhaben bereits im Vorfeld vermeiden. Ein erfolgversprechender Ansatz zur Verbesserung der Reproduzierbarkeit besteht insbesondere in der Automatisierung geeigneter Fertigungsabläufe, da auf diese Weise die Vielfalt der möglichen Fehler deutlich eingegrenzt werden kann. Da die für den Bereich Luftfahrt typischen kleinen Wiederholungsraten nur wenig Spielraum für große Investitionen in eine produktspezifische Anlagentechnik erlauben, muss die Eignung der einzelnen Prozessschritte zur Automatisierung sehr genau analysiert werden.
Besonders Aufschlussreich ist der Vergleich der vorhergesagten Kosten mit den tatsächlich im Serienbetrieb anfallenden Kosten, die sich aus einmaligen und wiederkehrenden Kosten zusammensetzen. Bei Kleinstserien (1-5 Bauteile) dominieren die einmaligen Kosten für Vorrichtungen und Fertigungswerkzeuge, so dass bei diesen Kostentreibern auch das größte Rationalisierungspotential besteht. Wächst die Gesamtfertigungslosgröße verschiebt sich die Kostendominanz zunehmend in Richtung wiederkehrender Kosten für Personal (Serienbetreuung), Halbzeuge und Zukaufteile.



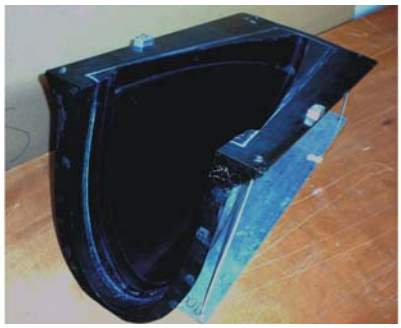
Bugfahrwerksklappen Fairchild 728	TW-Pylon Verkeleidungsteile Do 328 Jet

Bild 2.1: Kostentreibervergleich bei seriennaher Fertigung

Die Analyse der bisher unter Serienbedingungen durchgeführten Projekte zeigt, dass sowohl bei den Verkleidungen für die Do 328 Jet als auch bei den Bugfahrwerksklappen für die Fairchild 728 der größte Kostenanteil auf die Fertigungsvorbereitung entfällt. Der nächst größere Kostenanteil befindet sich im Bereich der Halbzeuge und Zukaufteile wobei der Kostenanteil für die Schaumkerninserts (Fairchild 728) gesondert betrachtet werden muss, da es sich jeweils um Einzelanfertigungen mit angepassten Vorrichtungen handelt. Der niedrige Kostenanteil der Fertigungswerkzeuge erklärt sich aus der für die Berechnung angesetzte Abschreibungslosgröße von 250 Flugeinheiten, welche allerdings bei keinem der beiden Projekte erreicht wurde. Die Anteile der weiteren Kostentreiber sind zwar nicht zu vernachlässigen aber auch nicht projektprägend. Dies gilt allerdings nur, solange die vom Infusionskonzept abhängige Ausschussrate der Produktion unter 1% und damit zu vernachlässigen ist. Auch eine risikoreiche Endbearbeitung der Bauteile mit hohem manuellen Anteil kann zu einer drastischen Verschlechterung der Gesamtbilanz führen. In jedem Fall ist es sinnvoll und notwendig, dem für die Fertigung verantwortlichen Personal neben eindeutigen und verständlichen Fertigungsanweisungen auch Einblick in die Zusammenhänge zwischen der jeweiligen Tätigkeit und der späteren Bauteilqualität zu gewähren. Letztendlich kann durch eine entsprechende Aufwertung des Fertigungspersonals der Detaillierungsgrad der Vorschriften reduziert werden, was einer besseren Verständlichkeit sehr zuträglich ist.

3. Fertigungswerkzeuge

Die Fertigungsmittel spielen bei der Konzipierung einer Fertigungsstrategie für eine qualitätsgesicherte Fertigung von zulassungspflichtigen Teilen eine entscheidende Rolle. Der Aufwand zur Herstellung der Fertigungsmittel und die damit verbundenen Investitionen richten sich in erster Linie nach der Bauart, der Größe und der Komplexität der zu fertigenden Bauteile. Darüber hinaus sind Kriterien wie Maßgenauigkeit und Standzeit wesentliche Kostenfaktoren. Zur Verdeutlichung der prinzipiellen Vor- und Nachteile unterschiedlicher Fertigungswerkzeugkonzepte sollen die Erkenntnisse aus der Serienfertigung der Verkleidungsteile "Fairing Flap Bearing" für die Fairchild Dornier Do 328 Jet dargestellt werden. Im Rahmen dieser Fertigung wurden drei unterschiedliche Fertigungsmittelkonzepte eingesetzt, an denen die jeweiligen Vor- und Nachteile für dieses konkrete Bauteil mit relativ hoher Komplexität bei geringen Gesamtabmaßen explizit dargestellt werden können.



Al-Werkzeug (integral gefräst) CFK-Werkzeug (SLI) Nickel-Galvano-Werkzeug

Integralgefräste Aluminium Fertigungsmittel

Vorteil: Integral gefräste Aluminiumwerkzeuge haben den Vorteil, dass sie relativ kurzfristig aus dem Vollen herausgearbeitet werden können. Fertigungsbasis war in diesem Fall ein CAD 3D Modell des Bauteiles, welches direkt zur Erstellung des Fräsprogramms genutzt wurde. Die aufwendige Ausarbeitung von Zeichnungsableitungen konnte somit komplett entfallen. Ein weiterer Vorteil ist die hohe Standzeit (mehr als 1000 Abformungen) und die Möglichkeit Reparaturen (Schweißen, Löten) durchzuführen.

Nachteil: Der Wärmeausdehnungskoeffizient des Aluminiumwerkzeuges (α=23,8*10^{-6}) weicht stark von dem Ausdehnungskoeffizienten des quasiisotropen Bauteillaminates (α=ca. 1*10 $^{-6}$) ab, was in diesem Fall zu einem Einklemmen des Bauteiles beim Entformen bzw. zu Maßabweichungen führen kann. Ebenfalls Nachteilig wirkt sich bei vielen Anwendungen das zumeist hohe Gewicht integral gefräster Werkzeuge aus, da dies zu Händlingsproblemen und aufgrund der großen spezifischen Wärmekapazität zu ausgedehnten Aufheiz- und Abkühlphasen führt.

Faserverbund-Fertigungsmittel

Vorteil: Faserverbundwerkzeuge sind im Vergleich zu Metallwerkzeugen sehr leicht und verfügen über einen sehr geringen Wärmeinhalt. Dieser Vorteil äußert sich aufgrund kurzer Aufheiz- und Abkühlzeiten in kurzen Autoklavzykluszeiten und in einem vereinfachten Werkzeughändling. Positiv ist darüber hinaus der mit den zu fertigenden Bauteilen übereinstimmende Wärmeausdehnungskoeffizient. Die Kosten für Faserverbundwerkzeuge fallen im Vergleich zu integral gefrästen Aluminiumwerkzeugen im allgemeinen geringer aus.

Nachteil: Nachteilig wirkt sich bei Faserverbundwerkzeugen die geringere Standzeit des Werkzeuges (ca. 100-300 Abformungen) aus, da mit zunehmender Alterung auch mit steigender Porosität zu rechnen ist und der Verschleiß beim Entformen zunimmt. Reparaturen sind oft nur mit hohem Aufwand möglich, da die Vakuumdichtigkeit sichergestellt sein muss. Die Herstellung von Faserverbundwerkzeugen erfolgt überwiegend

durch die Abformung einer Modellstruktur, die z.B. integral aus Blockmaterial herausgearbeitet wird und somit weitere Kosten erzeugt.

Nickel-Galvano-Fertigungsmittel

Vorteil: Nickel-Galvanowerkzeuge zeichnen sich durch höchste Oberflächengüte und große Standzeiten aus. Die elektrochemisch abgeschiedenen Metallschalenwerkzeuge weisen außerdem ein geringes Gewicht auf, da keine Materialanhäufungen wie bei integral gefrästen Werkzeugen entstehen. In Folge der geringen Massenansammlung können die Aufheiz- und Abkühlzeiten kurz gehalten werden, was sich wiederum positiv auf die Autoklavzykluszeiten auswirkt. Bewährt haben sich Nickel-Galvanowerkzeuge auch in Anwendungen, bei denen es auf höchste Genauigkeit ankommt, da die Möglichkeit besteht die Werkzeuge über spezielle Einstellschrauben nachzujustieren. Nickel-Galvanowerkzeuge lassen sich löten und schweißen und sind somit reparierbar.

Nachteil: Der größte Nachteil von Nickel-Galvanowerkzeugen liegt im Preis und der langwierigen Herstellung. Da der Galvanoprozeß nur sehr langsam abläuft muss mit einer Herstellungszeit von 1 bis 2 Monaten gerechnet werden, um eine Wandstärke von üblicherweise 4 bis 6 mm zu erreichen. Der Wärmeausdehnungskoeffizient liegt mit $\alpha=13*10^{-6}$ (Nickel) in der Größenordnung von Stahl und ist somit akzeptabel aber nicht optimal. Die Herstellung erfolgt ähnlich der Herstellung von Faserverbundwerkzeugen durch das Abformen einer Modellstruktur.

Bei typischen Primärbauteilen im Flügel- und Leitwerksbereich sowie im Rumpfbereich herrschen Bauteile mit geringer geometrischer Komplexität (Holme, Rippen, Beplankung) und großen (zumindest in einer Dimension) Abmessungen vor, so dass sich hier besonders der Einsatz geschweißter Blech-Fertigungswerkzeuge bewährt hat. Diese Werkzeuge werden aus Gründen der thermischen Dehnungskompatibilität zumeist aus einem sehr schwer zu bearbeitendem Ni36 Stahl gefertigt und sind entsprechend kostenintensiv. Darüber hinaus ist das Massenverhältnis von Fertigungswerkzeug zu Bauteil üblicherweise 100:1 und höher, was bei der Temperierung zu berücksichtigen ist. Die guten Serienerfahrungen mit der Standzeit und der Maßhaltigkeit scheinen die hohen Investitionen jedoch zu rechtfertigen.

Bedarf zeigt sich zur Zeit besonders bei kostengünstigen Fertigungswerkzeugen für die Einzelteilfertigung um trotz reduzierter Investitionsressourcen Prototypen und Konzeptdemonstratoren herstellen zu können. Da das Lernpotential bei der noch sehr jungen Harzinfusionstechnologie sehr hoch ist, liegt auch im Bereich der Fertigungswerkzeuge der Schlüssel zu einer effektiven Fertigung in der Sammlung,

Aufbereitung und Rückführung von Erfahrungswerten. Dies führte zum Beispiel bei den dargestellten Fertigungswerkzeugen "Fairing Flap Bearing" dazu, dass die Harzverteilung und der Anschluss für die Harzleitung in den massiven Bereich des Fertigungswerkzeuges verlegt wurden, um auf diese Weise die Aufbringung der Vakuumfolie zu vereinfachen. Das Konzept wurde bei der Gestaltung des Fertigungswerkzeuges für die Bugfahrwerksklappen der Fairchild 728 übernommen und trug so dazu bei, das bereits die erste Abformung alle Qualifikationsanforderungen erfüllte und zur Auslieferung kam.

4. Handhabung/Preforming

Die bei der Harzinfusionstechnologie durch die Verwendung von trockenen Faserhalbzeugen gewonnen Freiheitsgrade bei der Gestaltung komplexer Geometrien bedingen die Entwicklung von materialschonenden Handhabungstechniken, da ein unqualifizierter Umgang beim Transport und Drapieren zu einer deutlichen Degradation des Halbzeuges und damit der mechanischen Eigenschaften des zu fertigenden Bauteiles führt. Ziel ist hier die Entwicklung von Techniken zur Umgestaltung und Drapierung von Faserhalbzeugen zu einer weniger empfindlichen, maßgenauen Faserpreform, welche die Sicherstellung der strukturellen Eigenschaften bei möglichst geringer Streuung der Leistungsfähigkeit gewährleistet.

Für die Erstellung und Fixierung der Preform haben sich neben nähtechnischen Optionen auch Matrix kompatible Binder bewährt, die über ihre Klebwirkung eine Konsolidierung der Preform ermöglichen. Sowohl für die Nähtechnik als auch für die Bindertechnik gilt, dass sie für den Einsatz in fliegenden Strukturen einer an die strukturelle Relevanz des betreffenden Bauteiles angepassten Qualifikation zu unterziehen sind, da sie die Materialeigenschaften in erheblichem Maße positiv aber bei nicht fachgerechtem Einsatz auch negativ beeinflussen können. Die Nähtechnik bietet den Vorteil, dass sie weitestgehend chemisch kompatibel zu allen Matrixsystem ist, während die eingesetzten Binder auf das jeweils zum Einsatz kommende Matrixsystem abzustimmen sind. Dagegen zeigt die Erfahrung, dass sich komplexe bzw. hoch integrale Preforms einfacher mit binderbeschichteten Halbzeugen aufbauen lassen, da eine dreidimensionale Vernähung mit erheblichem Aufwand verbunden ist und eine ebene Vernähung mit anschließender Umformung nur bei sehr dünnen Preforms ondulationsfrei durchgeführt werden kann.

Eine weitere Möglichkeit zur Umgestaltung und Fixierung von Einzellagen basiert auf der Nutzung von unterdruckgesteuerten Trägervorrichtungen. Hierbei wird von Positivformen ausgegangen, die über eine luftdurchlässige Oberfläche verfügen.

Bild 4.1: Vakuumhandhabungstechnik

Mit Hilfe dieser luftdurchlässigen Oberfläche werden die auf der Form applizierten Lagenzuschnitte angesogen und so auf dem Trägerwerkzeug fixiert. Nachdem der gesamte Lagenaufbau auf dem Trägerwerkzeug abgelegt und durch Unterdruck fixiert ist, wird er mit dem Träger ins Fertigungswerkzeug überführt und dort positionsgenau abgelegt. Die Trennung des Lagenaufbaus erfolgt durch die Erhöhung des Innendrucks im Trägerwerkzeug bis sich die Lagen ablösen. Danach kann das Trägerwerkzeug entnommen und für den nächsten Ablagevorgang vorbereitet werden. Vorteilhaft wirkt sich bei dieser Vorgehensweise aus, dass keine Fremdmaterialien im späteren Bauteil verbleiben, wodurch die Zulassung erheblich vereinfacht wird. Da die Fixierung der Lagen nur bei anliegendem Unterdruck gewährleistet ist, gibt es bei dieser Vorgehensweise kein eigenstabiles Preformstadium. Das Einsatzgebiet für diesen Ansatz liegt daher eher im Bereich der Großbauteile mit geringer Komplexität.

Während das maßgenaue Trimmen definierter Zuschnitte auf einem 2D Schwingmesser-Cutter als ausgereift bezeichnet werden kann bereitet der qualitätsgesicherte Transport und die Positionierung insbesondere kleinerer und komplex gestalteter Zuschnitte derzeit noch erhebliche Probleme. Ein Unsicherheitsfaktor beim Einsatz von in Harzinfusionsverfahren hergestellten Bauteilen ist derzeit auch noch in der geringen Erfahrung mit verfahrensspezifischen Risiken (z.B. Ondulationen, überschreiten der Ablagetoleranz, Winkelabweichungen etc.) und den damit verbundenen Unsicherheiten bei der Bauteilauslegung zu sehen. Da der insbesondere auf den Halbzeugen und der Prozessvorbereitung basierende, kostenseitige Vorteil der Harzinfusionstechnik gegenüber der Prepregtechnologie jedoch außer Frage steht, ist eine Aufbereitung dieser Thematik mit dem Ziel der Absicherung und Steigerung der Leistungsfähigkeit in jedem Fall sinnvoll.

5. Infusionsprozess

Neben der Infiltrierung und Temperierung des Fertigungsaufbaus im Ofen, Autoklaven oder massiven Werkzeug ist die Aufbereitung des Harzsystems bei allen Harzinfusionstechniken wesentlicher Bestandteil des Fertigungsprozesses. Während im Labormaßstab eine manuelle Temperierung, Mischung und Entgasung durchaus zielführend ist, kann schon in der Entwicklungsphase eine automatische Regelung und Erfassung der Verfahrensparameter von Vorteil sein. Unabhängig vom jeweiligen Fertigungsverfahren gilt jedoch, dass sich alle Prozessparameter nachweislich innerhalb der Toleranzgrenzen bewegen müssen, um den Qualitätssicherheitsanforderungen einer Serienfertigung genügen zu können.

Die bisherigen Erfahrungen haben gezeigt, dass sich ein möglichst einfaches und übersichtliches Anlagenkonzept sehr positiv auf den störungsfreien Betrieb und die Investitionskosten auswirkt. Komponenten wie Pumpen, Ventile, Anschlüsse, Dichtungen etc. sind in den seltensten Fällen für einen Einsatz mit einem aktivierten Epoxidharzsystem geeignet und stellen daher potentielle Fehlerquellen dar. Insbesondere die Reinigung mit Lösungsmitteln ist bei vielen Materialien problematisch. Neben der fehlenden chemischen Beständigkeit der Anlagenkomponenten sind besonders ausgehärtete Harzrückstände für Fehlfunktionen wie verstopfte Leitungen oder nicht schließende Ventile verantwortlich, was bedeutet, dass der Reinigung der Anlagentechnik erhöhte Aufmerksamkeit geschenkt werden muss. Als Alternative zu einer umfangreichen Reinigung hat sich der Einsatz von Einwegkomponenten bewährt, die trotz zusätzlicher Entsorgung eine sinnvolle Perspektive darstellen. Auch die Dichtigkeit der Anlagentechnik lässt sich mit Einwegkomponenten einfacher gewährleisten, was in erheblichem Maße zur notwendigen Betriebsicherheit beiträgt.

Die eigentliche Aufgabe der Infusionsanlage besteht darin, die für den Prozess benötigte Menge an Harz zu jeder Zeit und mit der optimalen Viskosität zur Verfügung zu stellen. Da der Vernetzungsgrad des Harzsystems mit zunehmendem Wärmeeintrag steigt, liegt das Ziel der Anlagenoptimierung darin, nur die jeweils zu fördernde Menge an Harz zu temperieren. Die Art der Temperierung ist dabei abhängig von den geometrischen Verhältnissen für die Wärmeübertragung, der zu übertragenden Energiemenge und der dafür zur Verfügung stehenden Zeit. Die Entscheidung für eine direkte elektrische Heizung oder eine indirekte Heizung über eine Gegenstromanlage hängt daher sehr stark von den auslegungsspezifischen Randbedingungen ab. Ein besonderes Problem stellt die Messung des Harzvolumenstroms dar, da hier nach Möglichkeit auf berührungsfreie Messprinzipien zurückgegriffen werden sollte. Da die Fließgeschwindigkeit des Harzes sehr stark variiert,

werden hohe Ansprüche an den Messbereich von Volumenstrommessgeräten gestellt. Aus diesem Grund haben sich in vielen Bereichen Messmethoden durchgesetzt, die auf der zeitlich getakteten Messung der Harzmasse oder des Harzvolumens im Vorratsbehälter basieren. Ziel der Datenerfassung ist letztendlich die Prozessautomatisierung, um die Reproduzierbarkeit der Fertigung weiter zu steigern. Darüber hinaus bietet ein rechnergesteuerter Prozessablauf die für eine qualitätsgesicherte Fertigung wichtige Möglichkeit der unabhängigen Fehlererkennung und -protokollierung. Durch die Implementierung der Prozesserfahrungen in die Prozesssteuerung können bereits kleinste Abweichungen vom Idealprozess automatisch erkannt und einem entsprechenden Fehler zugeordnet werden. In bestimmten Fällen kann daraufhin eine geeignete Gegenmaßnahme zur Stabilisierung des Prozesses eingeleitet werden. Konsequenter Weise ist die Prozesskontrolle erst dann durchgängig gewährleistet, wenn eine zentrale Koordination von Harzaufbereitung und Bauteilinfiltration bzw. -temperierung erfolgt. Da die bauteilseitige Prozessgestaltung hinsichtlich Infusionsmanagement und Temperierung in erheblichem Maße durch das eingesetzte Harzinfusionsverfahren bestimmt wird (closed Mould RTM, VARI, VAP, SLI etc.) sind hier individuelle Lösungen zu entwickeln. Für das am Institut für Strukturmechanik entwickelte Slingle Line Injection (SLI) Verfahren wurde eine integrierte Prozessteuerung dargestellt, die sowohl die Autoklav- als auch die Infusionsanlagen Parameter erfasst. Auf diese Weise wurde es möglich, die Einleitung des Aushärtens mit dem Infusionsstatus des Fertigungsaufbaus zu koppeln. Darüber hinaus lässt sich insbesondere bei der Wiederholung eines Zyklusses sehr schnell identifizieren, wie sich eine Variation der Parameter auf die Prozesszeit auswirkt. Aufschlussreich ist ebenfalls die Zuordnung von Bauteilabweichungen hinsichtlich Faservolumengehalt und Porengehalt zu charakteristischen Abweichungen vom Soll-Prozess. Auch eine Variation des Fertigungswerkzeuges hinsichtlich thermischer Masse oder Infusionsmangement lässt sich direkt anhand des Prozessprotokolls evaluieren.

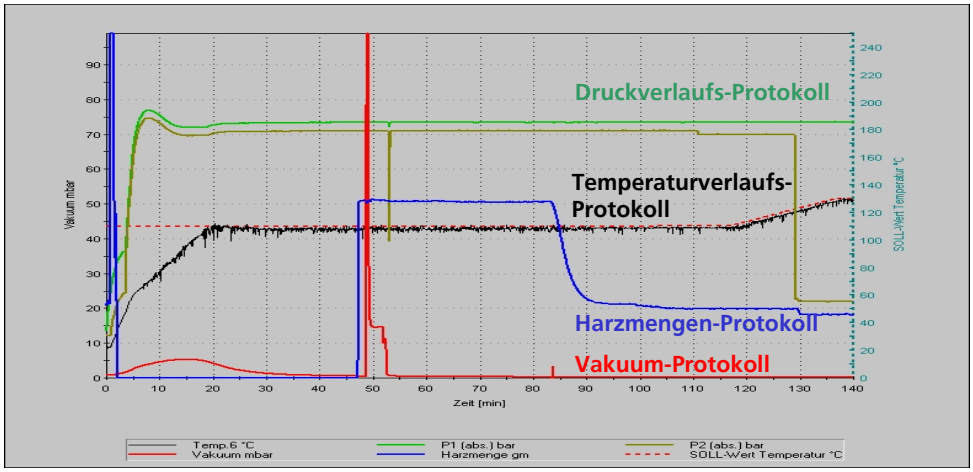


Bild 5.1: Infusionsprotokoll SLI Prozess im Autoklaven

6. Resümee

Die Bestrebungen zur Industrialisierung der Prozesskette Harzinfusion haben ein Niveau erreicht, bei dem es möglich ist, einen technisch abgesicherten und wirtschaftlich sinnvollen Verfahrensablauf zu gewährleisten. Das Potential der Harzinfusionstechnik zur Senkung der Herstellungskosten konnte voll bestätigt werden und ermöglicht eine durchgreifende Rationalisierung der Fertigung von Faserverbundbauteilen.

Das Leistungsniveau der mit Harzinfusionsverfahren gefertigten Bauteile ist derzeit allerdings noch nicht ausreichend, um Primärbauteile in UD-Prepreg-Technologie gewichtsneutral zu substituieren. Die Ursache für diesen Umstand ist nach dem derzeitigen Stand der Erkenntnisse weniger verfahrenstechnisch bedingt sondern beruht auf dem geringeren Potential der noch nicht voll ausgereiften Halbzeuge. Dabei ist sowohl im Bereich der Faserhalbzeuge als auch im Bereich der Matrixsysteme noch Optimierungspotential vorhanden. Ein Grund für die nur schleppend fortschreitende Weiterentwicklung ist insbesondere bei den Matrixsystemen vermutlich auf den fehlenden Wettbewerb konkurrierender Systeme auf dem zur Zeit noch wenig lukrativen Markt zurückzuführen. Eine gezielte Verbesserung der auslegungsrelevanten Materialeigenschaften sollte durch eine Kooperation der Anwender mit den Faserhalbzeugherstellern und Harzformulierern dennoch kurzfristig möglich sein, wenn klare kommerzielle Perspektiven für die Zukunft der Harzinfusionstechnologie aufgezeigt werden.

Die größte Anstrengung ist letztendlich vom Flugzeugbauer selbst zu leisten, da dieser basierend auf seiner Systemkompetenz die Anforderungen für die Qualifikation einer neuen Technologie festlegen und verantworten muss. Der Druck aus der wachsenden Globalisierung der Luftfahrtbranche macht diese Entscheidung nicht leichter, lässt aber auch kaum Spielraum für die Ausräumung sämtlicher Bedenken und Risiken. Letztendlich zählt auch hier nur das Vertrauen in die eigene Leistungsfähigkeit.