

Teilprozesse sinnvoll auslagern

Effizienzsteigerung im Flugzeugbau durch Auslagerung und Automatisierung des klebtechnischen Toleranzausgleichs

LUFTFAHRT – Für pastöse Kleb- und Dichtstoffe gibt es in der Strukturmontage im Flugzeugbau verschiedene Anwendungen – das klebtechnische Fügen von Bauteilen sowie das Versiegeln von Kanten und Oberflächen, um Feuchtigkeitseinträge und damit die Gefahr von Korrosion oder Veränderungen der Bauteilsteifigkeit zu vermeiden. Doch auch für den Ausgleich fertigungsbedingter Bauteiltoleranzen in der Montage werden entsprechende Produkte eingesetzt. Im Rahmen des Forschungsprojekts „Fast-Flexmont2“ („Erforschung agiler Produktionstechnologien für CFK-Boxstrukturen“) wurde für die Rudergabelmontage in Seitenleitwerksboxen ein ausgelagerter Prozess zum automatisierten Toleranzausgleich (Shimming) mit dem Ziel der Reduzierung von Fertigungszeiten und Materialabfällen entwickelt.

Das Seitenleitwerk eines Flugzeugs (**Bild 1**) befindet sich im Regelfall am hinteren Ende und besteht aus einem feststehenden Element zur Stabilisierung des Flugzeugs in Flugrichtung und einem beweglichen Element, dem Seitenruder, zum Steuern um die Hochachse. Das Ruder ist über Rudergabeln mit dem feststehenden Element des Seitenleitwerks verbunden. Durch die Rudergabeln führt die Ruderachse, über welche sich das Ruder

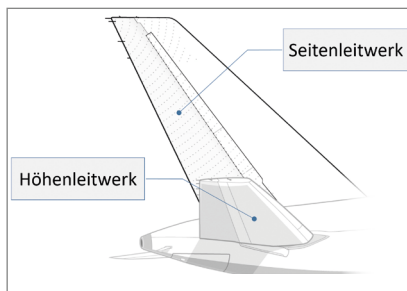


Bild 1: Das Leitwerk, der hintere Teil eines Flugzeugs (Bild: Fraunhofer IFAM)



Von Björn Reichel,
Gruppenleiter Montagetechnologien und



Benjamin Diehl,
Stellvertretender Gruppenleiter Montagetechnologien

Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM |
Standort Stade | Automatisierung und Produktionstechnik
www.ifam.fraunhofer.de/stade

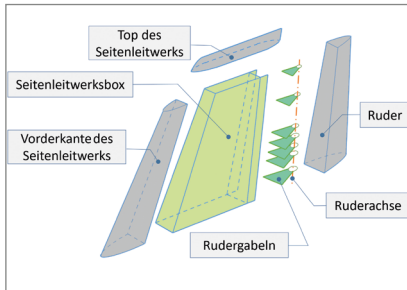


Bild 2: Schematische Darstellung des Aufbaus eines Seitenleitwerks (Bild: Fraunhofer IFAM)

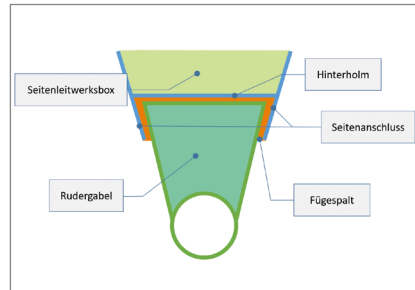


Bild 3: Schematische Darstellung des Rudergabel-Montagebereichs aus der Draufsicht auf das Seitenleitwerk

(Bild: Fraunhofer IFAM)

drehen lässt (**Bild 2**). Die Rudergabeln wiederum sind fest mit der Seitenleitwerksbox verbunden. Das Projekt „Fast-Flexmont2“ zielt dabei auf den Ausgleich des Fügespalts und die Montage von Rudergabeln an den Hinterholm der Seitenleitwerksbox ab (**Bild 3**).

Aktuelle Fertigungsverfahren im Flugzeugbau weisen einen sehr hohen Anteil manueller Tätigkeiten auf. Auch die Rudergabelmontage erfolgt ausschließlich händisch und teilweise in repetitiven Prozessschritten. Dabei bedarf es – aufgrund der hohen Komplexität während der Positionierung und Ausrichtung der zu integrierenden Bauteile sowie des Flüssigkeitsauftrags des „Shims“ zum Füllen des Fügespalts zwischen den Komponenten – erfahrener Mitarbeitender. Vor dem finalen Fügen werden zur Sicherstellung der Fertigungsqualität und zu Dokumentationszwecken die Einzelteile nach mehrstündigem Aushärten wieder getrennt und bewertet. Unzureichende Qualität des Shimmens macht mitunter eine mehrfache Wiederholung der Teilprozessschritte erforderlich.

Bei der Positionierung und Ausrichtung der Bauteile orientiert sich der Prozess mit sehr hohen Genauigkeitsanforderungen an der maßgebenden Ruderachse. Daraus resultieren in der Positionierung vier Freiheitsgrade. Es sind eine translatorische und drei rotatorische Bewegungen nötig, um die Anschlussflächen der Bauteile in Sollposition zu bringen. Ab einem Spalt von 0,3 mm ist dabei das Shimming notwendig, wobei die maximale Shim-Stärke von 2,5 mm nicht überschritten werden darf. Für die präzise Positionierung der Bauteile sind neben langjähriger Erfahrung der Mitarbeitenden auch aufwändige Vorrichtungen zum Abstecken, Einstellen und Fixieren erforderlich. Aufgrund der sich nach oben verjüngenden Bauform des Seitenleitwerks

werden Rudergabeln verschiedener Größen verbaut. Dies führt wiederum dazu, dass die auszuführenden Prozessschritte auf unterschiedliche Abmessungen adaptierbar sein müssen.

Automatisierungskonzept

Hinsichtlich Kostenminimierung, Ressourceneinsparungen und gleichzeitiger Produktionsratensteigerung sind viele Fertigungsprozesse in der Flugzeugproduktion unter Beibehaltung der manuellen Arbeitsweise nur noch begrenzt optimierbar. Da die wirtschaftlichen Faktoren im Flugzeugbau dennoch stetig weiter steigen, um die Konkurrenzfähigkeit im internationalen Markt zu gewährleisten, besteht der Lösungsansatz in der Implementierung automatisierter Prozesse – unter Einbeziehung einer durchgängigen Digitalisierung – zum Erreichen einer effizienteren Produktion.

Neben der Automatisierung ganzheitlicher Produktionslinien bietet die Auslagerung von Teilprozessen – und damit die Entkopplung vom Gesamtprozess – eine weitere Möglichkeit, in bereits bestehenden Strukturen schnell und mit geringerem Aufwand zum Erfolg zu gelangen. Auch im fokussierten Anwendungsfall von „Fast-Flexmont2“ wurde eine solche Parallelisierung verwirklicht. Das Ergebnis ist eine Fertigungszelle, bestehend aus einem Leichtbaurobter, einer Dosieranlage und einer neu entwickelten Station zum automatisierten Toleranzausgleich (**Bild 4**). Darüber hinaus erlaubt die Verknüpfung der Fertigungszelle mit der virtuell durchgeführten Montage, die Produktionstechnik hinsichtlich Änderungen an Bauteilen und Fertigungsvorgaben einfacher und schneller zu adaptieren.

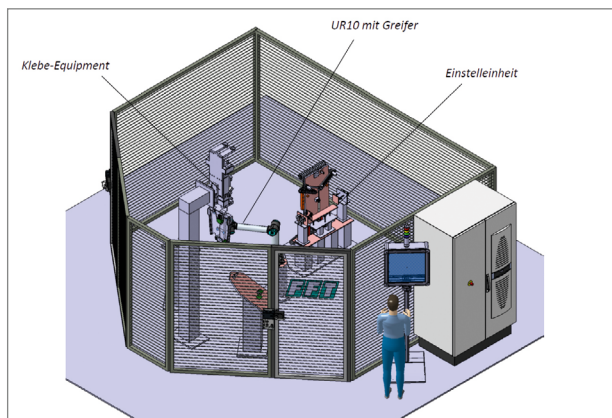


Bild 4: Konzept einer automatisierten Shim-Station

(Bild: FFT Produktionssysteme GmbH)

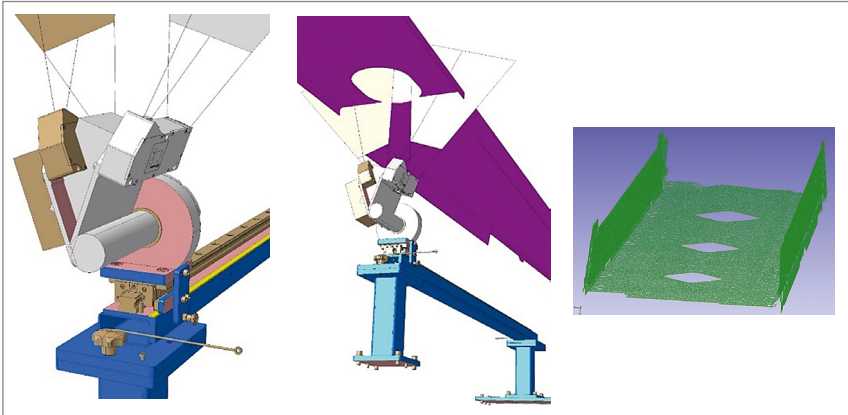


Bild 5: Linearführung mit Sensor-Messsystem (links und Mitte)

(Bild: FFT Produktionssysteme GmbH) **und Punktwolke (rechts)** (Bild: Fraunhofer IFAM)

Digitale Montage und Klebspaltermittlung

Zur Optimierung der Prozessabläufe ist die datentechnische Verknüpfung von Einzelprozessen ein probates Mittel. Die im Laufe der Fertigung erhobenen Informationen zu Produkt und Produktion bilden eine durchgängige Wertschöpfungskette ab und ermöglichen durch die Wiederverwertbarkeit von Daten unter anderem die Reduzierung von Produktionskosten und Fertigungszeiten.

Dementsprechend wurden im Anwendungsbeispiel die geometrischen Konturen der Fügepartner vermessen und als digitales Abbild für die anstehenden Arbeiten aufbereitet. Der Vorteil besteht darin, dass die Daten die existierenden Bauteile abbilden und sämtliche Fertigungstoleranzen beinhalten.

Hierfür werden Messdaten mittels zweier 2D-Lasersensoren, welche in einem Winkelversatz zueinander angebracht sind, aufgenommen und in eine homogene Punktwolke transformiert. Im Anschluss erfolgt die automatisierte Erstellung eines Oberflächenmodells. Bei der Betrachtung der Rudergabelmontage sind für die weitere Bearbeitung drei Flächen relevant: Die Kontaktflächen des Hinterholms und die zwei konisch zulaufenden Seitenanschlussflächen (**Bild 5, rechts**).

Über Referenzpunkte der Seitenleitwerksbox sind die Sollpositionen der im Anwendungsfall betrachteten Einbauteile bekannt, die an der Ruderachse ausgerichtet werden. Aus der zuvor aufgenommenen Punktwolke erzeugt ein neu entwickeltes

Softwaremodul die entsprechenden virtuellen Montageabschnitte. Die Anschlussbereiche, in denen im weiteren Verlauf Bauteile montiert werden, durchlaufen eine Berechnung der Ebenenparameter aus den drei mit einem RANSAC-Algorithmus ermittelten Anschlussflächen.

In der gewonnenen digitalen Umgebung werden die Bauteile mittels einer Best-Fit-Ermittlung virtuell montiert. Auf Grundlage der nun vorliegenden Daten berechnet das Softwareprogramm an verschiedenen definierten Bereichen der Anschlussflächen die mittlere Dicke des Fügespalts, um das Dosiervolumen des Shim-Auftrags zu bestimmen.

Die digital erzeugten Parameter werden der Anwendung entsprechend aufbereitet und anschließend dem Automatisierungsprozess zugeführt. Anhand des ermittelten Spaltvolumens lassen sich die Einstellwerte zur Applikationsdauer des Dosiergeräts und die Verfahrensgeschwindigkeit des Leichtbauroboters an die Automatisierungsanlage übertragen. Zudem werden die Ebenenparameter der Anschlussflächen in der ausgelagerten Shim-Station zur Einstellung der Anpressflächen und zur Nachbildung der Montageumgebung am Hinterholm der Seitenleitwerksbox genutzt.

Bedarfsgerechte Applikation von Klebstoffen

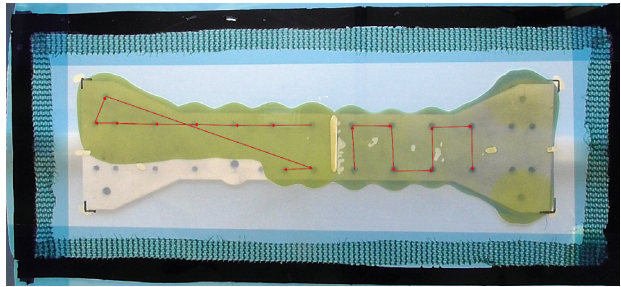
Zum automatisierten, spaltspezifischen Auftrag des Shim-Materials sind zwei Ansätze vorstellbar. Einerseits lässt sich die Montagesituation von vornherein fixiert herstellen und mittels Injektionsverfahren der Fügespalt prozesssicher ausfüllen. Andererseits sind der Auftrag des Ausgleichmaterials auf das Bauteil und das anschließende Fügen der Bauteile zueinander in klassischer Verfahrensfolge möglich.

Shim-Injektionsverfahren

Für die im Rahmen des Vorhabens durchgeführte Ermittlung der optimalen Injektionsreihenfolge durch vorhandene Bohrlöcher im Bauteil wurde ein spezifischer Versuchsaufbau konzipiert. Ein Frästeil aus Aluminium stellte die Kontaktfläche der Ruder gabel dar. Das Gegenstück bestand aus einer Glasscheibe, sodass der Injektionsprozess durch die Bohrlöcher in Echtzeit aufgezeichnet und der Shim-Verlauf somit genau dokumentiert werden konnte. Für die Injektion kam ein Handdosierer mit 200-ml-Kartuschen des Shim-Materials zum Einsatz.

Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass eine von innen nach außen fortlaufende Fließfront des flüssigen Shim-Materials Lufteinschlüsse verhindern kann (**Bild 6**). Die Herausforderung hierbei liegt jedoch in den vorgegebenen ungleichmäßig verteilten

Bild 6: Ermittlung des Fließverhaltens bei einem Injektions-Shim-Verfahren
(Bild: Fraunhofer IFAM)



Injektionspunkten. Daraus resultieren unterschiedliche Füllmengen pro Injektionspunkt und der „Squeeze-Out“ (Herauspressen des Klebstoffüberschusses) an den Bauteilkanten erfolgt nicht regelmäßig, was eine Detektion zur Qualitätssicherung des Füllvorgangs deutlich erschwert. Zudem wurden die Untersuchungen an einer gleichbleibend glatten Oberfläche durchgeführt. Aufgrund von Fertigungstoleranzen der Bauteile ist aber nicht immer von einem entsprechenden stetigen oder gar homogenen Spaltmaß auszugehen. Im Zuge der Injektionsversuche fällt ebenfalls auf, dass Lufteinschlüsse stets dort zu erwarten sind, wo die Fließfront auf Engstellen zuläuft und die Luft nicht gleichmäßig entweichen kann.

Das Fazit dieser Untersuchung ist, dass bei gleichmäßigen Spalten mit ebenen Oberflächen das Injektionsverfahren eine gute Alternative zu klassischen Applikationsabläufen sein kann. Insbesondere die einfache Handhabung ist unter Beachtung von Strategien der Injektionsreihenfolge auch in automatisierte Abläufe relativ schnell integrierbar.

Aufgrund hoher Bauteilkomplexitäten und der Toleranzbehaftung wurde das Verfahren bei der Rudergabelmontage jedoch nicht weiter berücksichtigt, sondern auf das einseitige Applizieren der Toleranzausgleichsmasse und das anschließende Verpressen des Shim-Materials ausgelegt.

Shim-Auftragsverfahren

Beim Shim-Auftragsverfahren sind für den Spaltausgleich – wegen der fertigungsbedingt einzigartigen Bauteile – die Anschlussflächen beider Fügepartner relevant. Das Shim-Material ist zwischen beiden Fügeflächen formschlüssig zu verpressen. Für die Ausgestaltung des automatisierten Shim-Prozesses ist die Kenntnis der im Prozess auftretenden Kräfte von wesentlicher Bedeutung. In Versuchen wurden die Viskosität des Shim-Materials und die damit im Zusammenhang stehenden notwendigen Fügedrücke betrachtet.

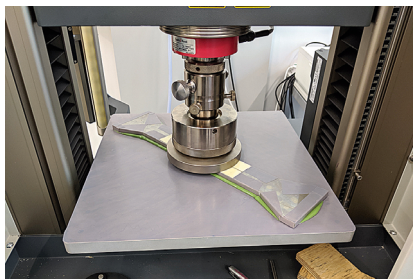


Bild 7: Durchführung eines Druck-Shim-Versuchs mit einer Zug-Druck-Prüfmaschine

(Bild: Fraunhofer IFAM)

Zur Sicherstellung der Verwendbarkeit des eingesetzten Materials für den automatisierten Auftrag wird dessen Standverhalten berücksichtigt. Dabei werden auf Musteroberflächen Klebstoffraupen verschiedener Querschnittsgrößen sowie Geometrien aufgetragen und in verschiedenen Winkellagen über einen definierten Zeitraum aufgestellt. Versuche über einen Zeitraum von 10 min haben kein nennenswertes Verlaufen bzw. Verformen der Klebstoffraupe ergeben. Die Prozesszeiten in der Anwendung sind

deutlich unter 10 Minuten, was einerseits sicherstellt, dass einem automatisierten Applizieren und Bewegen der mit Shim-Material beauftragten Bauteile nichts entgegensteht und andererseits bei Störungen im Prozess das Material sich nicht unkontrolliert in der Fertigungsanlage verteilt.

Allerdings steigen die erforderlichen Fügekräfte mit zunehmender Viskosität ebenfalls an. Aus diesem Grund ist neben der Betrachtung der Standfestigkeit des Shim-Materials eine Untersuchung des erforderlichen Drucks beim Verpressen dringend notwendig (**Bild 7**).

In weggesteuerten Druckversuchen wird der Anpressdruck mit unterschiedlichen Prüfgeschwindigkeiten aufgezeichnet. Dabei zeigt sich bei sehr geringen Spaltbreiten von 0,01 mm erwartungsgemäß ein exponentieller Anstieg des Fügedrucks bis auf 10.000 N in Abhängigkeit von der Vorschubgeschwindigkeit. Jedoch lässt dieser binnen kurzer Zeit aufgrund der Materialrelaxation deutlich nach. In Anbetracht der beim Montieren der Rudergabeln minimal zu erwartenden Spaltbreite von 0,3 mm sind in dem Bereich maximale Kräfte unter 1.000 N festzustellen.

Automatisierter Shim-Auftrag

Für die Applikation des Shims kommt eine stationäre Dosieranlage (**Bild 8**) zum Einsatz, die sich bei einem konstanten Dosiervolumenstrom betreiben lässt. Die Auftragsmenge auf dem Bauteil wird über die Geschwindigkeit des Auftrags geregelt. Dabei übernimmt ein Leichtbauroboter die Aufnahme und Führung des Bauteils unter der Dosieranlage. Der Auftrag der Raupe erfolgt ohne spezielle Auftragsdüse direkt aus dem Mischrohr. Das maximale Dosiervolumen beträgt 20 ml/min und ist bei Bedarf

durch geringfügige Anpassungen an der Dosieranlage weiter steuerbar.

Für eine blasenfreie Applikation und das anschließende Verpressen des Shims wird eine Raupe mittig auf den Fügeflächen aufgebracht. Das Auftragsvolumen wird über die Geschwindigkeit des Leichtbauroboters entlang des Pfads geregelt. Dabei hängt die Menge des aufzutragenden Shims maßgeblich von der Bauteilform und der festgelegten Spaltstärke ab. Deshalb ist eine Diskretisierung der Applikation nötig. Das Ergebnis der Geschwindigkeits-Weg-Berechnung wird als Parameter im Pfadplan des Roboters berücksichtigt.

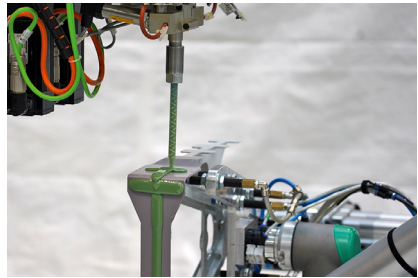


Bild 8: Der Leichtbauroboter führt eine Rudergabel zur Shim-Applikation unter die Dosieranlage (Bild: Fraunhofer IFAM)

Als Qualitätsmerkmal für das Verpressen des Shims wird ein definierter Squeeze-Out an den Bauteilkanten erzeugt. Hiermit ist die ausreichende Menge an Shim-Material sichergestellt. Um einen überschüssigen Materialauftrag zu gewährleisten, erfordert es einen Korrekturfaktor des Auftragsvolumens zwischen 1,0 und 1,5. Damit sich ein gleichmäßiger Squeeze-Out einstellt, ist dieser Korrekturfaktor wiederum von der aufzutragenden Materialmenge abhängig.

Das dem Shim-Prozess nachgelagerte manuelle Entfernen überschüssiger Materialmengen verursacht in der aktuellen Serienfertigung einen hohen Zeitaufwand. Durch die Automatisierung des eigentlichen Shim-Prozesses lässt sich der Aufwand bereits deutlich minimieren, jedoch nicht gänzlich ausschließen.

Automatisierte Entfernung des Squeeze-Out

Da es sich beim vollständig ausgehärteten Shim um ein sehr sprödes Material handelt, besteht beim Entfernen des überflüssigen Materials die Gefahr der Beschädigung im Fügebereich durch Materialabplatzungen. Die Implementierung eines vollautomatisierten Schleifprozesses ist mit großem Aufwand verbunden und birgt das Risiko, durch Staub- und Spanbildung die Shim-Anlage sowie die Shim-Dosierstation zu verunreinigen.

Aus diesen Gründen liegt eine Entfernung des überschüssigen Materials bereits im nicht ausgehärteten Zustand nahe. Verschiedene Versuchsreihen mit unterschiedlichen Werkzeugen bzw. Geometrien zeigen, dass sich das noch nicht ausgehärtete



Bild 9: Ergebnisse einer Versuchsreihe zum automatisierten Entfernen von Squeeze-Out (v.l.n.r. mittels Spachtel, Dorn bzw. Druckluft) (Bild: Fraunhofer IFAM)

Material am saubersten mit einem schmalen Spachtel entfernen lässt, ohne den übrigen Shim negativ zu beeinflussen (**Bild 9**).

Da sich dieses Werkzeug sehr gut eignet, soll es auch in Verbindung mit einem Leichtbauroboter zum Einsatz kommen. Ein entsprechender Endeffektor mit integriertem Spachtelwerkzeug wurde im Rahmen des Forschungsprojekts entwickelt, gefertigt und getestet. In der Auslegung lag der Fokus dabei auf der Entwicklung eines taktilen sowie kraftgesteuerten Prozesses.

Auslagerung des Aushärteprozesses

Nach dem automatisierten Shim-Auftrag und dem Entfernen überschüssigen Materials ist vor der Integration der Rudergabel in die Seitenleitwerksbox der Aushärteprozess zu durchlaufen. Die lange Aushärtezeit des Materials – im Anwendungsfall vier Stunden – würde das Bauteil blockieren und somit weitere Einbauten einschränken.

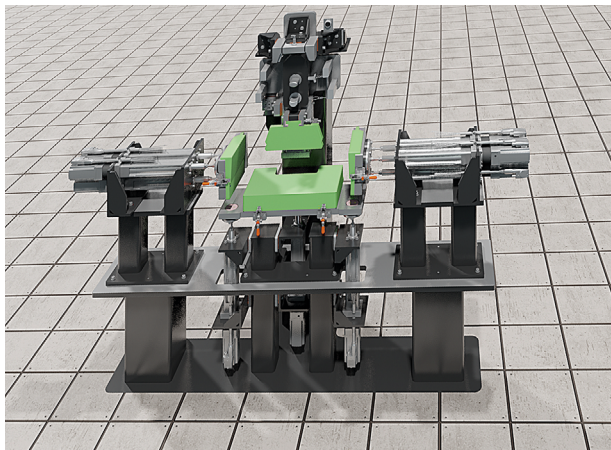


Bild 10: Virtuelles Modell der Shim-Aushärtestation
(Bild: Fraunhofer IFAM)

Eine Auslagerung des Aushärteprozesses ermöglicht nicht nur die zeitparallele Abarbeitung weiterer Prozesse an der Leitwerksbox, sondern auch – durch einen frühzeitig ausgeführten Bauteil-Toleranzausgleich – eine zeitoptimierte Zustellung der geschliffenen Rudergabeln für die Montage an der Seitenleitwerksbox und damit eine Reduktion der Produktionszeit.

Voraussetzungen hierfür sind die Verknüpfung der Prozesse und eine kontinuierliche Datendurchgängigkeit. Die im Zuge der virtuellen Montage ermittelten Ebenenparameter dienen der Aushärtestation (**Bild 10**) als Einstellgrößen für die dem Originalbauteil nachempfundenen Anschlussflächen. Die prozessbegleitende Aufnahme sowie das Bereitstellen relevanter Daten mithilfe einer Anlagensteuerung erlauben das Monitoring und die sichere Prozessführung mittels eines übergeordneten Prozessmanagements.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Die beschriebenen Ergebnisse wurden in Kooperation mit Airbus Operations GmbH und FFT Produktionssysteme GmbH im Rahmen des Luftfahrtforschungsprojekts „Fast-Flexmont2“ („Erforschung agiler Produktionstechnologien für CFK-Boxstrukturen“; FKZ: 20W1728C) erarbeitet. Das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz förderte dieses Projekt aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages.