

Automatisierte Klebprozesse für metallische Großstrukturen

Moderne Produktionsverfahren für Strukturklebungen von Rumpfschalen im Flugzeugbau

LUFT- UND RAUMFAHRT – Die im Luftfahrtsektor seit Jahrzehnten industrie- weit dominierende und bewährte Fügetechnologie des Nietens wird zunehmend durch konkurrierende Fügeverfahren ergänzt. Ein Beispiel dafür sind geklebte Strukturen, die bei CFK-Bauweisen schon weitverbreitet sind und nun auch verstärkt in Aluminium-Rumpfstrukturen Einzug halten. Den vielfältigen Vorteilen der Fügetechnologie Kleben steht ein aktuell verhältnismäßig hoher manueller Arbeitsaufwand in der Fertigung gegenüber, der durch die Entwicklung hochautomatisierter Produktionsprozesse reduziert wird.

Im grundlegenden Aufbau von Flugzeugrumpfen nahezu aller namhaften Hersteller hat sich seit Mitte des 20. Jahrhunderts die Halbschalenbauweise gegen alternative Ansätze wie die Fachwerk- oder Monocoquebauweise durchgesetzt. Dabei wird die Außenhaut des Rumpfs von innen mit Stringern in Rumpflängsrichtung und mit Spanten in Rumpfumfangsrichtung versteift (**Bild 1**). Diese Bauweise ermöglicht ein geringes Strukturgewicht bei gleichzeitig hoher gewichtsspezifischer Festigkeit, dem klassischen Zielkonflikt des Leichtbaus. Der beschriebene differenzielle Aufbau

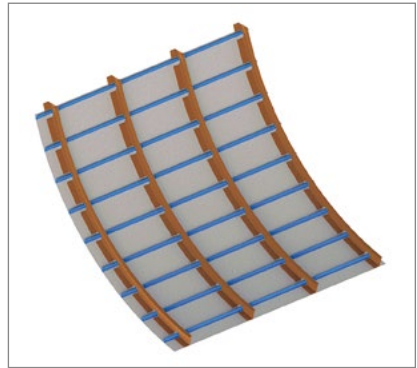


Bild 1: Klassischer Aufbau eines Flugzeugrumpfs in Halbschalenbauweise mit Außenhaut (grau), Stringern (blau) und Spanten (braun) (Bild: Fraunhofer IFAM)



Von Pascal Baur,
Projektleiter | Abteilung Fügetechnologien



Christoph Schwarz,
Projektleiter | Abteilung Fügetechnologien

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

des Rumpfs erfordert eine verhältnismäßig hohe Anzahl von Fügeverbindungen, die üblicherweise überwiegend als Nietverbindungen ausgeführt werden. In den vergangenen Jahren ist in Forschung und Entwicklung eine Tendenz zur Etablierung alternativer Fügeverfahren zu beobachten, die in verschiedenen Bereichen der Flugzeugstruktur das Potenzial haben, kostenintensive Nietverfahren zu ergänzen oder ganz zu ersetzen. Neben anderen Verfahren, wie z.B. dem Reibbrühschweißen, spielt dabei die Klebtechnik eine entscheidende Rolle. Diese Technologie hat mit der Entwicklung neuer Langstreckenflugzeuge mit hohem Anteil carbonfaserverstärkter Kunststoffe (CFK) zunehmend Einzug in die Primärstruktur von modernen Verkehrsflugzeugen gehalten und soll nun auch verstärkt bei klassischen Aluminiumstrukturen Anwendung finden, wo sie in Kombination mit einer drastisch reduzierten Anzahl von Nietverbindungen speziell im Rumpfbereich ihre Vorteile ausspielen kann. Auch in diesem Bereich gibt es bereits qualifizierte Klebsysteme und industrielle Anwendungen, die bisher allerdings eher ein Nischendasein fristen.

Strukturklebungen im metallischen Flugzeugbau

Dabei sind die Vorteile vielfältig: Die flächige Krafteinleitung einer Klebverbindung ermöglicht eine gleichmäßige Spannungsverteilung über die gesamte Fügefläche und die Fügepartner werden nicht durch Nietbohrungen geschwächt, was lokale Spannungsspitzen reduziert. Hieraus ergeben sich teilweise erhebliche Leichtbaupotenziale in der Primärstruktur von Verkehrsflugzeugen, die zukünftig einen nicht zu unterschätzenden Beitrag zur ökologischen Transformation des Luftfahrtsektors leisten werden. Im Gegensatz zum Schweißen kommt das Kleben ohne thermische Beeinflussung der Bauteile und ihrer Gefügestruktur aus. Außerdem kann der Klebstoff weitere Funktionen neben der Herstellung struktureller Festigkeit zwischen den Fügepartnern übernehmen, für die – wie im Fall der Strukturabdichtung – bisher zusätzliche Arbeitsschritte notwendig waren. Mit Blick auf den gesamten Lebenszyklus von Flugzeugen trägt die Klebtechnik zudem dazu bei, die Recyclingfähigkeit zu verbessern, indem der Materialmix reduziert wird.

Neben der zerstörungsfreien Prüfung der Festigkeit von Klebungen im Betrieb des Flugzeugs ist der aktuell noch hohe manuelle Arbeitsaufwand in der Produktion ein großes Hemmnis für die verstärkte Etablierung geklebter Bauweisen. Vor einem Einsatz dieser Füge-technologie in den Volumenprogrammen großer Flugzeughersteller besteht somit die Herausforderung der Entwicklung automatisierter bzw. teilautomatisierter Produktionsprozesse, mit welchen die angestrebten Ratenerhöhungen der kommenden Jahre zu wettbewerbsfähigen Kosten realistisch erscheinen.

Zielstellung des Projekts „ATON“ („Metallrumpf Technologien ökologisch nachhaltig“) war die Entwicklung hochratenfähiger Produktionsverfahren für zylindrische Rumpfschalen. Die einzelnen Prozessbausteine zum hochautomatisierten Kleben umfassten die Anwendungsfälle Stringer, Fensterrahmen und Dopplerbleche zur lokalen Verstärkung der Außenhaut in besonders stark beanspruchten Bereichen. Dieser Beitrag fokussiert sich auf den Stringer-Anwendungsfall.

Verwendung fanden 1K-Epoxid-Klebfilme, die von zwei Lagen Linern vor Umgebungseinflüssen geschützt und bei zweistelligen Minusgraden gelagert wurden, wodurch die Vernetzungsreaktion gehemmt wurde. Der Zuschnitt erfolgte nach der Konditionierung bei Raumtemperatur und ließ sich sowohl manuell als auch auf automatisierten Schneidmaschinen durchführen. Nach der Aufbringung auf die Fügepartner erfolgte ein Härtingszyklus, in dem der Verbund bei über 100 °C ausgehärtet wurde. Erst dadurch erreichte der dann vollständig vernetzte Klebstoff seine Endfestigkeit.

Vorteilhaft wirkte sich beim Einsatz dieser heißhärtenden Klebfilme im Vergleich zu pastösen Systemen aus, dass die Einhaltung eines Mischungsverhältnisses oder die Einstellung einer definierten Klebschichtdicke nicht berücksichtigt werden musste. Hingegen war die Erzeugung einer guten Oberflächenhaftung im unausgehärteten Zustand für einen robusten Klebprozess unerlässlich. Sie ließ sich im Wesentlichen durch die drei Parameter Temperatur, Anpressdruck und Anpressdauer beeinflussen.

Vorversuche und Anforderungsdefinition als Grundlage für das Automatisierungskonzept

Vor der Konzeptphase war deshalb eine umfassende Materialcharakterisierung der relevanten Klebfilme erforderlich. Dazu wurde eigens ein Versuchsaufbau für Stirnabzugsprüfungen angefertigt (**Bild 2**). Der Klebfilm wurde zwischen zwei temperierten Prüfkörpern mit einer definierten Kraft über eine bestimmte Dauer angedrückt.



Bild 2: Stirnabzugversuche mit unzureichender (links) und guter Oberflächenhaftung (rechts)

(Bild: Fraunhofer IFAM)

Direkt im Anschluss wurde die Stirnabzugprüfung durchgeführt. Die dabei ermittelten Abzugkräfte dienten als Maß zur Charakterisierung der Oberflächenhaftung des Klebfilms. Mithilfe der Versuchsergebnisse ließen sich Prozessfenster für die drei Einflussgrößen definieren, die in die Konzeptfindung eingeflossen sind.

Das Anforderungsprofil des zu entwickelnden Prozesses setzte sich aus einer Vielzahl unterschiedlicher Aspekte zusammen, hier eine Auswahl der wichtigsten: In Anbetracht der zu erwartenden Produktionssteigerungen der kommenden Jahre war die Hochratenfähigkeit des zu entwickelnden Konzepts eine zentrale Anforderung, was im zivilen Flugzeugbau monatlichen Produktionsraten von 75 Maschinen und mehr entspricht. Das erscheint aus der Perspektive anderer Industriezweige, wie z.B. der Automotive-Branche, nicht sonderlich ambitioniert, stellt für den zivilen Flugzeugbau jedoch ein nie dagewesenes Produktionsvolumen dar. Gleichzeitig ergab sich daraus – in Kombination mit dem sich immer gravierender auswirkenden Fachkräftemangel – die Notwendigkeit eines möglichst hohen Automatisierungsgrads.

Weitere Anforderungen resultierten aus der Struktur der zu produzierenden metallischen Rumpfschalenelemente. Hier kam angesichts der hohen Bauteilvarianzen der zu verklebenden Stringer der Flexibilität eine besondere Bedeutung zu. Die maximale Länge der Stringer erreichte in der exemplarisch für das Projekt ausgewählten Seitenschale etwa 6 m. Es galt jedoch auch zu berücksichtigen, dass die grundsätzliche Eignung der Technologie für deutlich längere Schalen mit teilweise über 10 m Länge gegeben sein muss. Zudem können die Stringer unterschiedliche Querschnittsgeometrien und unterschiedliche Längen aufweisen. Details, die auf den ersten Blick nicht sonderlich bedeutsam erschienen, waren darüber hinaus die Dickensprünge der Außenhaut des Flugzeugrumpfs, die sich in Form von kleinen Stufen in der Klebfläche des Stringers widerspiegeln. Diese Geometrien ermöglichen im Sinne des Leichtbaus ein beanspruchungsgerechtes Design, erhöhen jedoch die Komplexität eines automatisierten Bauteilhandlings deutlich. So verlaufen einzelne Stringer in Längsrichtung im Extremfall über ein halbes Dutzend solcher Dickensprünge, die in Form und Lage für jeden Stringer unterschiedlich sind.

Vom Konzept zur Automatisierungszelle

Im nächsten Schritt der Konzeptfindung wurde ein Workflow mit der Abfolge aller Prozessschritte definiert, die auf dem Weg zur fertig integrierten Struktur durchlaufen werden mussten. Dafür war zunächst abzuwägen, auf welchen der beiden Fügepartner (Hautfeld oder Stringer) der Klebfilmauftrag erfolgen sollte. Schnell stellte sich heraus, dass ein Klebfilmauftrag auf den Stringer die überlegene Lösung hinsichtlich

erreichbarer Prozesszeiten und Reduktion komplex referenzierter Ablageprozesse darstellte. Zudem wurden verschiedene kinematische Systeme für das Bauteilhandling miteinander verglichen. Im Ergebnis waren Industrieroboter allen konkurrierenden Ansätzen, wie z.B. Portalanlagen, insbesondere bezüglich Flexibilität und Kosten, überlegen. Daraus ließ sich für den Gesamtprozess eine hardwareseitige Unterteilung in zwei funktionale Einheiten ableiten:

- die Bereitstellungseinheit mit Bevorratung, Klebfilmapplikation und Bereitstellung des Stringers sowie
- der roboterbasierte Ablageprozess.

Die Bereitstellungseinheit hatte mehrere Teilfunktionen: Sie übernahm die Bevorratung eines Satzes Stringer, im konkreten Anwendungsfall 14 Stück. Anschließend erfolgte ein Aufheizen der Klebfläche auf Basis der in den Vorversuchen ermittelten Parametern, um eine hinreichende Haftung des Klebfilms auf dem Stringer während des Bauteilhandlings zu gewährleisten. Danach erfolgte die eigentliche Klebfilmapplikation. Schließlich wurde der Stringer dem Robotergreifer in definierter Position übergeben. Es schloss sich der roboterbasierte Ablageprozess an. Dieser beinhaltete ein Greifen des Stringers aus der Bereitstellungseinheit, das Anfahren einer Vorposition, eine sensorbasierte Referenzierung und die abschließende Stringerablage mit definiertem Anpressdruck.

Auslegung einer effizienten Automatisierungszelle

Die konstruktive Gestaltung der Klebfilmapplikationsstation orientierte sich an der zuvor definierten vollautomatisierten Prozesskette. Grundlage war ein horizontales Paternostersystem, welches für einen Satz Stringer dimensioniert wurde. Damit wurden die Stringer einzeln zur Auswurfposition gefördert und anschließend mittels

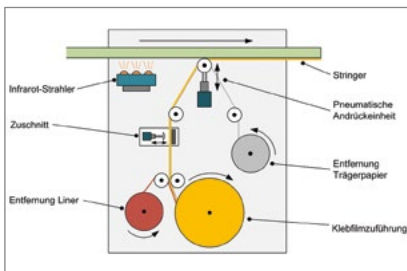


Bild 3: Schematische Funktionsweise der Klebfilmaufbringung (links) und reale Klebfilmapplikation auf den Stringer (rechts) (Bild: Fraunhofer IFAM)

eines Rollensystems in Längsrichtung über die Klebfilmapplikationsstation (**Bild 3**) gefördert. In dieser Station waren verschiedene Teilfunktionen gebündelt, die für den Klebfilmauftrag erforderlich waren. Zunächst wurde die Klebfläche des durchlaufenden Stringers von einem vorgelagerten Infrarot-Strahler erwärmt. Anschließend erfolgte die Klebfilmapplikation auf den Stringer, bei der mit einer pneumatisch gelagerten Andruckrolle eine definierte Kraft auf das Bauteil aufgebracht wurde, um gute Haftung zu garantieren. Die integrierten Teilfunktionen umfassten weiterhin einen Schneidkopf zum Ablängen der Klebfilmbahn und ein Rollensystem zum beidseitigen Entfernen des Liners. Es schloss sich eine Übergabestation an, in welcher der Stringer an die mittels optischer Sensorik erfasste korrekte Position gefördert wurde. Aus dieser Vorrichtung wurde der Stringer vom Roboterendeffektor gegriffen und weiterverarbeitet.

Die Gestaltung des Greifers selbst stellte das Entwicklungsteam allein aufgrund der Dimensionen vor besondere Herausforderungen und es wurden unterschiedliche Konzepte diskutiert. Schließlich musste der Greifer mindestens so lang sein, wie die bis zu 6 m langen Stringer. Es erschien unrealistisch und nicht zweckmäßig, den Greifer mit nur einem Industrieroboter zu bewegen. In Anbetracht dessen, dass die Prozesse grundsätzlich für deutlich längere Stringer geeignet sein sollten, war dies umso relevanter. Deshalb wurde der Ansatz einer kooperierenden Stringerablage verfolgt, bei welcher zwei synchron arbeitende Industrieroboter den Greifer führten (**Bild 4**).

Die Grundstruktur des Greifers bestand aus einer etwa 6 m langen CFK-Traverse mit rechteckigem Querschnitt. Sie wurde von einem Verbundpartner eigens für das Projekt „ATON“ entwickelt und gefertigt. Diese Bauweise kombinierte ein geringes Struk-



Bild 4: Der 6 m lange Stringergreifer wird von zwei kooperierenden Industrierobotern geführt
(Bild: Fraunhofer IFAM)

Bild 5: Blick auf die Automatisierungszelle mit der Stringer-Bereitstellungseinheit (im Vordergrund) und Industrierobotern zum Bauteilhandling (im Hintergrund)

(Bild: Fraunhofer IFAM)



turgewicht mit hoher Steifigkeit und war somit ideal für die beschriebene Anwendung geeignet. Als Schnittstellen zu den Robotern waren zwei Flansche in die Traverse integriert, von denen einer mit einer in Längsrichtung schwimmenden Lagerung ausgestattet war. An der Unterseite der Traverse waren in regelmäßigen Abständen Greifmechanismen installiert, die die Stringer aufnahmen. Die Mechanismen wiesen in Aufsetzrichtung eine passive Ausgleichsmechanik auf, die durch Federpakete realisiert waren. So ließ sich eine definierte Andruckkraft auf den Stringer aufbringen. Zudem ermöglichte diese Bauweise eine Ablage der Stringer auf unterschiedlichen Höhenniveaus, bedingt durch die Dicken sprünge der Außenhaut.

Um die minimalen Lagetoleranzen einzuhalten, war darüber hinaus eine sensorbasierte Referenzierungslösung integriert: Nach dem Anfahren einer Vorposition erfassten stirnseitig am Greifer montierte Laserlinienscanner hochpräzise gefräste Formmerkmale der Klebvorrichtung für jede Ablageposition. Auf Basis dieser Information wurde eine Lagekorrektur berechnet und von den Robotern ausgeführt. So erreichte der Prozess eine Genauigkeit im Zehntelmillimeterbereich, die den hohen Ansprüchen luftfahrttypischer Toleranzvorgaben entsprach.

Fügetechnologie mit Zukunft

Das Projekt leistet einen wichtigen Beitrag, um die technologische Lücke zwischen dem Stand der Technik und einem zukünftigen serienmäßigen Einsatz geklebter metallischer Rumpfschalen zu schließen. Es wird aufgezeigt, wie eine zeitgemäße und effiziente Automatisierungslösung für die Produktion zylindrischer Rumpfschalen aussehen kann (**Bild 5**). Neben der Weiterentwicklung des hier dargestellten Prozesses

wird ein zukünftiger Forschungsschwerpunkt die Entwicklung hochautomatisierter Klebprozesse für sphärisch gekrümmte Rumpfschalen sein, die in Cockpit- und Hecksektion des Flugzeugrumpfs verbaut sind. Im Zusammenspiel mit anderen Technologiebausteinen lässt sich so die produktionstechnische Grundlage für eine zukünftige Flugzeuggeneration schaffen, die ökonomisch und ökologisch neue Maßstäbe setzt.



Die beschriebenen Ergebnisse wurden vom Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM in Stade in Kooperation mit Airbus Operations GmbH, Airbus Aerostructures GmbH, FFT Produktionssysteme GmbH & Co. KG und Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU im Rahmen des Luftfahrtforschungsprojekts „ATON“ („Metallrumpf Technologien ökologisch nachhaltig“; FKZ: 20W1904F) erarbei-

tet. Das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz förderte dieses Projekt aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages.