

# FLUGZEUGSYSTEME - LÖSUNGSANSÄTZE FÜR DIE HERAUSFORDERUNGEN DER ZUKUNFT

G.F. Rayczyk, P. Rapp, A. Straub, A. Volz

Liebherr-Aerospace Lindenberg GmbH

## Zusammenfassung

In den vergangenen Jahren stiegen die Herausforderungen an die Flugzeugkomponentenhersteller einerseits durch technologische Entwicklungen wie beispielsweise das ‚More Electric Aircraft‘ und andererseits durch die Kundenbedürfnisse wie die verstärkte Integration von Systemen jenseits konventioneller Grenzen. Dieser Artikel beschäftigt sich mit einigen aktuellen Problemstellungen und der Frage, wie mögliche Lösungen in Verbindung mit dem Luftfahrtforschungsprogramm (LuFo) des BMWi herausgearbeitet werden können.

## 1. EINFÜHRUNG

Die europäischen Forschungsziele des ‚Advisory Council for Aeronautics Research in Europe‘ (ACARE) für 2020 sind in den folgenden fünf Themenkomplexen verankert:

- Environment (Umweltschutz)
- Safety (Flugsicherheit)
- Quality and affordability (Qualität und Marktfähigkeit)
- Security (Schutz vor Angriffen)
- Air Transport Efficiency (effizienter Lufttransport)

Verständlicherweise können die Komponenten und Systeme von deutschen Luftfahrtausrüstern wie der Liebherr-Aerospace Lindenberg GmbH nicht allein alle diese genannten Themenbereiche abdecken. Jedoch können sie einen entscheidenden Beitrag zur Erreichung der Ziele leisten. In der Vergangenheit wurden diese Fragestellungen zum Teil durch Forschungsprojekte zum Thema ‚More Electric Aircraft‘ beantwortet, wie zum Beispiel im LuFo-Projekt „EOSYS“ und im europäischen Projekt „POA“ [1].

Allerdings zeigten diese Programme auch, dass einige Technologien mehr Entwicklungsaufwand benötigen und ihrerseits wieder andere Probleme aufwarfen. Man erkannte, dass das More (oder All) Electric Aircraft nicht die einzige Antwort auf alle Fragen sein kann, aber zumindest einen entscheidenden Beitrag zur Erreichung der Forschungsziele leisten könnte.

Dieser Artikel möchte aufzeigen, wie die deutsche Industrie und im speziellen Liebherr-Aerospace und seine Partner nach alternativen Lösungen mithilfe des Luftfahrtforschungsprogramms (LuFo) suchen. Die aufgeführten Beispiele legen den Fokus auf die ACARE-Themen Umweltschutz, Flugsicherheit, Qualität und Marktfähigkeit.

## 2. KORROSIONSSCHUTZ UND DER SCHUTZ DER UMWELT („ENVIRONMENT“)

Eine der wichtigsten Aufgaben der letzten Jahre ist die Reduzierung von Cadmium-Verbindungen an Flugzeug-

Komponenten, um Schadstoffe zu minimieren. Um dies zu erreichen, versucht Liebherr-Aerospace mit seinen Partnern<sup>1</sup> im Rahmen des LuFo-Projekts InnoPRO alternative Beschichtungen zu finden.

Die galvanische Zink-Nickel-Beschichtung auf hochfesten Luftfahrtstählen wird im Vergleich mit anderen alternativen Schichten, als aussichtsreichster Cadmium-Ersatz beurteilt [2].

Es sind zwei Zink-Nickel-Versuchsbäder mit unterschiedlicher Prozesstechnik in Betrieb:

1) Zink-Nickel-Bad mit Nickelanodentechnik (Abb. 1)

2) Zink-Nickel-Bad mit Membrananodentechnik



Abb. 1 : Zink-Nickel-Versuchsbad bei Liebherr-Aerospace während der Einfahrphase

Im Vergleich zum Zink-Nickel-Bad mit Nickelanodentechnik zeigt das Zink-Nickel-Membrananodenbad einen geringeren Chemikalienverbrauch und produziert weniger Nebenprodukte. Zudem wird die Cyanidbildung verhindert. Die Nickelanodentechnik wird deshalb untersucht, weil komplizierte Fahrwerkstrukturen zur galvanischen Abscheidung gleichmäßiger Schichtstärken Hilfsanoden

<sup>1</sup> Galvano Consult GmbH, IFINKOR gGmbH, Steinbeis Transferzentrum

benötigen, die nicht ausschließlich in Membrantechnik ausgeführt werden können. In der Zukunft könnte ein Mischbetrieb denkbar sein.

Es konnten folgende Erkenntnisse während der Badeinfahrphasen gewonnen werden:

- die Badtemperatur von ca. 30 °C bleibt während des Dauerbetriebes innerhalb der spezifizierten Toleranzen.
- gestrahlte Oberflächen zeigen keinen reproduzierbaren Zink-Nickel-Schichtaufbau.
- eine automatische Badzusatz-Dosierung reduziert den Aufwand, eine manuelle Einzeldosierung ist jedoch ebenfalls möglich.
- um Badkorrekturen schneller durchführen zu können, müssen die Analysenmöglichkeiten erweitert werden.

Bei den ersten Prüfkörpern wurden Vorversuche zur Zink-Nickel-Schichtcharakterisierung mit folgenden Analysemethoden durchgeführt:

- Zink-Nickel-Schichthärteprüfung
- Oberflächenmorphologie
- Bruchflächenanalyse an Wasserstoffversprödungs-Prüfkörpern
- Freies Korrosionspotential (Ruhepotential)
- Lineare Polarisation zum Zink-Nickel-Schichtauflöseverhalten
- GDOES Tiefenprofilanalyse
- Metallographie
- Oberflächenrauheit

Die Ergebnisse zeigen, dass die Untersuchungsmethoden für eine vergleichende Zink-Nickel-Schichtcharakterisierung geeignet sind. Die Zink-Nickel-Schichteigenschaften aus dem Liebherr-Aerospace Nickelanodenbad und aus dem Membrananodenbad von GC Galvano Consult unterscheiden sich nur geringfügig.

Diese Forschungen werden es uns ermöglichen, Lösungen zu finden, die die Auswirkungen der Herstellung von Flugzeugkomponenten auf die Umwelt reduzieren.

### 3. FLUGSTEUERUNGS-SYSTEME UND FLUGSICHERHEIT („SAFETY“)

Viele Luftfahrtstrukturanbieter haben erkannt, dass die Zukunft bei Flugzeugkomponenten immer mehr in Richtung integrierter Systeme gehen wird [2]. Im Falle von Business- und Kurzstreckenflugzeugen ist dies bereits Realität, wie Liebherr-Aerospace bereits mit der Entwicklung des kompletten Flugsteuerungssystems für den Superjet 100 und dem Fahrwerkssystem für die Bombardier C-Series unter Beweis gestellt hat. Große Flugzeughersteller wie beispielsweise Comac folgen diesem Trend im Hinblick auf noch komplexere Systeme.

Die Herausforderung liegt darin, eine komplexe Anforderung in einem einfachen und möglichst leichten System zu integrieren, wobei ein Höchstmaß an Sicherheit gewährleistet werden soll. In Projekten wie den LuFo-Vorhaben HC-FBX und SAFER Flight suchen

Liebherr-Aerospace und weitere Partner<sup>2</sup> nach Systemarchitekturen und Komponenten die notwendig sind, um dies zu erreichen.

Das schließt zum Beispiel auch die Verwendung von einfachen Ideen aus dem Automobilbereich mit ein, wie zum Beispiel dem Ersatz des komplexen ARINC-Bus durch deterministische Bus-Protokolle wie „Flexray“ (Abb. 2). Aufgrund ihrer Eigenschaften können solche Bus-Systeme entweder das Gewicht von Signalverkabelungen reduzieren oder den Durchsatz an Informationen im Vergleich zu heutigen Systemen erhöhen.

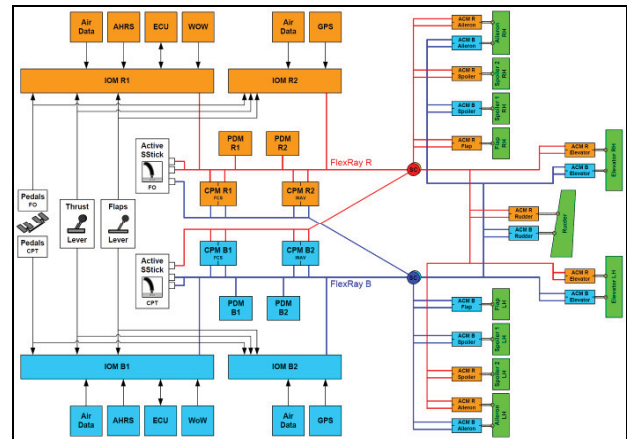


Abb. 2: FCS Architekturentwurf mit Flexray (ILS, Uni. Stuttgart)

In einem modernen Flugsteuerungssystem kann dies mit der Verwendung von „Remote Electronic Units“ (Miniaturavionik direkt auf dem Aktuator) kombiniert werden, wobei neue Vorteile entstehen:

- Reduzierung der benötigten Verkabelung zwischen der Avionikzentrale (normalerweise unter dem Cockpit) und den Aktuatoren in den äußersten Bereichen der Tragflächen und dem Leitwerk
- Reduzierung der Avionik in der Avionikzentrale selbst

In Verbindung mit der Entwicklung neuer Komponenten sucht Liebherr-Aerospace ebenfalls nach verbesserten Architekturen. Es wird nach Konzepten zur Steigerung der Flugsicherheit durch die Verwendung einfacher Architekturen geforscht.

Das schließt zum Beispiel auch die Bedeutung des so genannten „Direct Mode“ in Fly-by-wire-Systemen ein, welcher als Notsystem fungiert, wenn alle anderen Systeme (z.B. das Standardverfahren „Normal Mode“) ausgefallen sind. In diesem Modus werden die Befehle des Piloten direkt an die Flugsteuerungssysteme weitergeleitet.

Moderne Flugzeugtypen neigen eher als ältere Modelle dazu dynamisch instabil zu werden. Aus diesem Grund muss ein modernes Flugsteuerungssystem Redundanzen bei der Erfassung der Fluglageänderungen besitzen und trotzdem so einfach wie eine mechanische Verbindung (dem klassischen „Direct Mode“) zwischen Pilot und Flugsteuerung funktionieren.

<sup>2</sup> Eurocopter GmbH, SET GmbH, DLR Braunschweig, ILS Universität Stuttgart

Damit soll auch im „Direct Mode“ ein gewisses Maß an automatischer Computersteuerung ermöglicht werden. Liebherr-Aerospace stellt sich der Herausforderung ein Flugsteuerungssystem zu entwickeln, welches in dieser kritischen Situation so einfach wie möglich funktioniert, aber auch komplexen Anforderungen gewachsen ist. Ein Lösungsansatz wäre z.B. die Integration der Fluglagesensorik direkt in der Avionik.

In der Zukunft werden Forschungen wie diese, noch einfachere und sicherere Flugsteuerungssysteme hervorbringen.

#### 4. CFK UND QUALITÄTSSTANDARDS („QUALITY“)

Gewichtsreduzierung ist ein beständiges Thema im Luftfahrtbereich – ganz besonders im Bereich struktureller Elemente wie dem Fahrwerk. Die große Herausforderung ist es, Gewicht zu reduzieren und gleichzeitig Festigkeit und Steifigkeit zu gewährleisten oder sogar zu erhöhen.

Die ausgereiftesten Lösungen für dieses Problem sind ultrahochfeste Stähle (UHSS) und Titan, welche sich möglicherweise bei größeren Flugzeugen durchsetzen könnten, während Aluminium noch den Bereich der Kurzstreckenflugzeuge beherrscht. Jedoch haben europäische und nationale Forschungen gezeigt, dass auch Kohlefaser-Verbindungen (CFK) das Potential haben, die angestrebten Festigkeiten und Steifigkeiten bei gleichzeitiger Verringerung des Gewichts zu erreichen.

Im LuFo-Projekt FASY hat Liebherr-Aerospace mit seinen Partnern eine vielversprechende Lösung für dieses Problem entwickelt, wobei Fahrwerkskomponenten in CFK hergestellt und ausgiebig getestet wurden.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Entwicklung von dickwandigen Strukturen aus CFK nicht einfach mit der Erfahrung aus dünnwandigen Strukturen erreicht werden kann. Trotz der Tatsache, dass grundlegende Festigkeitstests erfolgreich waren, ist es offensichtlich, dass eine Fertigung von Fahrwerken aus CFK weitere neue Denkansätze benötigen wird. Drei wichtige Aspekte dabei sind: Kosten, Prozesse und Zertifizierungen.

**Kosten** – Obwohl eine Fahrwerkskomponente aus CFK 20-40% Gewicht gegenüber einer Struktur aus Metall einsparen kann, sind die Herstellungskosten noch deutlich höher. Allerdings hat CFK andere Vorteile, wie die schnelle Verfügbarkeit des Werkstoffs, weniger Bedarf an Korrosionsschutz und die Verringerung des Produktionsabfalls. Eine Kostenanalyse des gesamten Prozesses (vom Rohmaterial bis zum fertigen Produkt) sowie die Analyse der Aufwendungen für die Zulassung als Klasse 1 Bauteil sind nötig, um eine wirkliche Abschätzung über Gewinne oder Verluste machen zu können.

**Prozesse** – Die Komplexität von Fahrwerkskomponenten macht es schwierig, einen komplett reproduzierbaren Herstellungsvorgang zu erlauben. Wichtiger ist die Tatsache, dass man heute noch nicht genau weiß, wie solche Strukturen zu konstruieren sind, da die meisten numerischen Methoden und Verfahren für dünnwandige Strukturen entworfen wurden. Es ist also noch eine

Menge Arbeit notwendig, um die theoretischen Grundlagen für ein Fahrwerk aus CFK zu legen, bevor eine Produktion möglich ist.

**Zertifizierungen** – Neben Festigkeit und Steifigkeit muss ein Fahrwerk auch eine große Anzahl an Tests durchlaufen, um es für den fliegenden Betrieb zu qualifizieren. Bei metallischen Komponenten beinhalten diese Tests Blitzschlagschutz, Belastungsgrenzen und Ermüdungsverhalten. Bei der Verwendung neuer Materialien stehen solche Tests auch im Vordergrund, um zum Beispiel folgende Fragen beantworten zu können:

- Was passiert, wenn CFK-Strukturen von einem Blitz getroffen werden?
- Wie können Wartungsteams Beschädigungen am Fahrwerk erkennen, wenn diese unsichtbar im Material entstehen (bei CFK durchaus möglich)?
- Ist das Ermüdungsverhalten bei 3-dimensional belasteten CFK Bauteilen entscheidend?

In verschiedenen Forschungsprojekten mit Beteiligung der Liebherr-Aerospace konnten einige dieser Fragen mit innovativen Lösungsansätzen beantwortet werden.

Zum Beispiel wurden im LuFo-Projekt ARISTOKAT Blitzschutzprobeplatten aus CFK mit verschiedenen Lagenaufbauten definiert, hergestellt und getestet (Abb. 3).



Abb. 3: Probeplatten mit verschiedenem Blitzschutzlagenaufbau

Die Platten wurden einem Blitztest unterzogen. Bei zwei Blitzen von ca. 60kV Spannung und einem dabei auftretenden Strom von ca. 200kA auf dieselbe Stelle ist eine deutliche Schädigung an der Oberfläche zu erkennen (Abb. 4). Aufgrund der Dickwandigkeit der Platten erreicht die Schädigung aber nur etwa 2% der Tiefe in Dickenrichtung. Die Blitzschutzplatten wurden nach den Blitztests auf einer vollautomatischen Ultraschallprüfmaschine bezüglich Schadensgröße und Schadenstiefe untersucht.



Abb. 4: Beschädigung nach einem Blitztest

Die Ergebnisse der Ultraschallauswertung sind in Tab. 1 dargestellt. Hierbei fällt auf, dass Prüfkörper PK01, welcher als Referenz ohne zusätzliche Blitzschutzlagen ausgerüstet war, keine wesentlich größere Schädigung als die anderen Platten aufweist.

Dies zeigt auf, dass der größte Einfluss durch das eigentliche Laminat entsteht und zusätzlich aufgebrachte Lagen an der Oberfläche nur zu einem geringen Anteil schützenden Einfluss haben.

Bei der Komplexität der einzelnen Fahrwerkskomponenten muss, anders als bei den gängigen flächigen CFK Elementen, auf die Drapierbarkeit des verwendeten Blitzschutzmaterials geachtet werden.

Plattennummer	Oberflächengröße des Schadens [mm <sup>2</sup> ]	Tiefe der interlaminairen Schädigung [mm]	Größe der interlaminairen Schädigung [mm <sup>2</sup> ]	Geschädigtes Volumen [mm <sup>3</sup> ]
PK01	23424	0,6	5580	3348
PK02	27090	1,25	5087	6358
PK06	17045	0,4	15843	6337
PK07	32774	0,6	7327	4396
PK11	19581	0,8	2892	2314
PK12	29720	0,7	4236	2965

Tab. 1: Ergebnisse der Blitzschutzuntersuchung

Dies bedeutet, dass expandierte Folien oder Netze aus Kupfer oder Aluminium, welche einen guten Schutz bieten, eventuell nicht zum Einsatz kommen können, da sie für die Anwendung nicht verarbeitbar sind.

CFK-Gewebe mit eingeflochtenen Aluminium-Fäden ist gut drapier- und verarbeitbar. Diese Methode wurden bei den Prüfkörpern PK06 und PK07 eingesetzt und anschließend im Blitztest überprüft. Die Tiefe der Schädigung war hierbei in einem guten Bereich.

In weiteren Versuchen müssen repräsentative Prüfkörper auf Restfestigkeit getestet werden, welche alle Elemente enthalten, die auch am späteren Bauteil zu finden sind.

Damit ist einsichtig, dass umfassende Forschung notwendig ist, als reine Funktionstests, um ein möglichst hohes Maß an Qualität erreicht wurde.

## 5. FERTIGUNGSPROZESSE UND MARKTFÄHIGKEIT („AFFORDABILITY“)

Eine der größten Herausforderungen vor denen die deutsche Luftfahrtindustrie steht, ist nicht die Konkurrenz innerhalb Europas oder gegenüber den USA sondern die technologischen und preislichen Wettkämpfe mit Indien, Japan und China.

Es gibt zwei wichtige Ansätze für einen Ausweg aus dieser Situation. Erstens, die Industrie muss versuchen ihre Spitzenposition in der technologischen Entwicklung durch innovative Entwicklungen weiter auszubauen. Die neuen Wettbewerber haben zwar die finanziellen, infrastrukturellen und politischen Mittel, um sich im

Luftfahrtbereich zu etablieren, aber nicht die notwendige jahrelange Erfahrung auf diesem Gebiet. Zweitens ist es erforderlich die Kosten zu reduzieren. In Zeiten von ungünstigen Dollarkursen konnte man eine Abnahme der Wettbewerbsfähigkeit in Europa feststellen. Um diesen Effekt zu minimieren hat Liebherr-Aerospace Initiativen wie das LuFo-Projekt KONKRET gestartet, um bestehende Fertigungsprozesse zu optimieren oder neue zu untersuchen.

Ein Beispiel für die Arbeiten innerhalb dieses Projektes ist die Suche nach alternativen Produktionsverfahren für Ventilblöcke. Zusammen mit unseren Partnern<sup>3</sup> vergleichen wir konventionelle Methoden der Herstellung von Ventilblöcken mit Verfahren wie beispielsweise SCHWOB [4] aus einem frühen LuFo-Projekt.

In einem ersten Schritt wurden konventionelle Ventilblöcke der Firma Liebherr-Aerospace bezüglich ihrer Komplexität sowie des zu erwartenden Leichtbaupotentials bewertet und zwei Benchmark-Ventilblöcke festgelegt (Abb. 5).

Diese sind Grundlage für die Technologieuntersuchungen und werden auf zwei Lastniveaus (3000 PSI, 5000 PSI) in entsprechende Leichtbau-Ventilblöcke überführt.

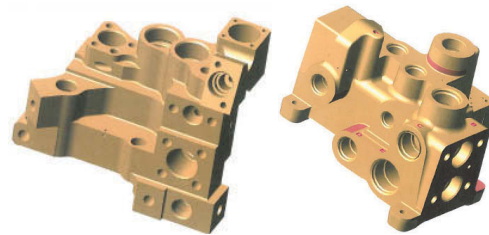


Abb. 5: Ventilblock A aus Titan und Ventilblock B aus Aluminium

Im Team mit den Projektpartnern wurden die Spezifikationen für ein alternatives Verfahren festgelegt:

- Erfüllung der Hydraulik-Schaltfunktion gemäß Hydraulik-Schaltplan
- Gewichtsreduktion, Ist-Stand: Ventilblock A: 4,42 kg, Ventilblock B: 1,94 kg
- Beibehaltung oder Reduktion des Bauraums
- Druckbeständigkeit
- Öl- und Medienbeständigkeit, -dichtheit
- Thermische Beständigkeit (-60 °C bis 130 °C)
- Einbindung in Hydrauliksystem (Anschlüsse)
- Kosteneffiziente und reproduzierbare Serienfertigung

Zusätzlich zu diesen Anforderungen sind die verwendeten Materialien sowie die angewandte Fertigungstechnologie von entscheidender Bedeutung.

### 5.1. Auswahlverfahren der Fertigungstechnologie

Die in der Praxis bekannte Herstellung von Ventilblöcken ist die mechanische Bearbeitung von metallischen

<sup>3</sup> Airbus Operations GmbH und TU Chemnitz

Blockmaterialien, welche gleichzeitig in weiteren Betrachtungen als Referenzverfahren angesetzt wird. In Abb. 6 sind potentielle Herstellungsverfahren für Ventilblöcke zusammengefasst, wobei Umformverfahren (Nr. 4, 5, 6 und 7), generative Verfahren (Nr. 3, 6 und 9), Fügeverfahren (Nr. 2, 8, 10 und 11) sowie Verfahrenskombinationen zur Anwendung kommen.

Es wurde bereits eine Vorauswahl geeigneter Verfahren getroffen, welche in den Punkten Leichtbau, Miniaturisierung, Wirtschaftlichkeit und Qualität Erfolg versprechen. Folgende Verfahren wurden dabei ausgewählt:

- Fügen von metallischen Halbzeugen
- Selektives Laserschmelzen
- Feinguss
- Lasersintern einer Sandgussform
- Thermoplastische Faserverbunde
- Hybridvariante

Diese werden nun analysiert, und auf ihr Potenzial hin bewertet.



Abb. 6: Zusammenstellung relevanter Fertigungstechnologien für hydraulische Ventilblöcke

Auch wenn es einfach erscheinen mag, ein bestehendes Herstellungsverfahren durch eine neues zu ersetzen, so haben doch auch diese neuen Methoden wiederum neue Herausforderungen. Das Schichtverfahren zum Beispiel erzeugt raue Oberflächen, von denen sich in den Ventilkänen Mikropartikel lösen und in das Fluid übergehen können. Viele dieser Technologien funktionieren bei einem Betriebsdruck von 3000 psi, aber nicht bei einem höheren Druck von 5000 psi, der in neueren Flugzeugmodellen zu finden ist. Selbstverständlich ist eine verfügbare Möglichkeit im Labormaßstab keine Garantie für eine kostenreduzierte Lösung für eine industrielle Produktion in einer Firma wie Liebherr-Aerospace.

Dennoch werden solche Prozessneuerungen immer wichtiger für größere Luftfahrtfirmen, da sie die Einführung kostenreduzierender Maßnahmen ermöglichen.

## 6. FAZIT

Dieser Artikel hat aufgezeigt, dass es eine Vielzahl von Herausforderungen für die deutsche Luftfahrttausrüstungsindustrie gibt und wie mit Hilfe von Forschungsprojekten

und Partnerschaften gemeinsam an Lösungsansätzen gearbeitet wird.

## 7. LITERATUR

- [1] L. Faleiro: "Summary of the European Power Optimised Aircraft (POA) project", Paper 244, 25th International Congress of the Aeronautical Sciences, ICAS 2006.
- [2] T. R. Münninghoff, M. M. Lohrengel: „Keimbildungskinetik bei technischen Zn- und ZnNi-Legierungen“,; Galvanotechn. 101 (2010)3, S. 509-514
- [3] L. Faleiro, B. Schievelbusch, T. Seung: „Integrated Equipment Systems for a more electric aircraft – hydraulics and pneumatics“, Paper 177, 24th International Congress of the Aeronautical Sciences, ICAS 2004.
- [4] T. Seung: „Rundum Optimierung eines Hydraulikventilblocks“, DGLR Jahrestagung, 2005.

## 8. ANMERKUNG

Diese Vorhaben wurden mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie gefördert.