

POSITION-PICK-OFF UNIT NEUER GENERATION

I. Schäfer
Harmonic Drive AG
Hoenbergstr. 14
65555 Limburg/ Lahn
Deutschland

Zusammenfassung

Die derzeit in den single-aisle und wide body Programmen verwendete PPU basiert auf einem Entwurf aus den 70er Jahren. Im Rahmen des LUFO-Projekts „Higher“ wird eine PPU neuer Generation entwickelt.

Neben der Verwendung eines Modulkonzepts zur Realisierung verschiedener Untersetzungen und Applikationsvarianten ist der Einsatz von kompakten Harmonic Drive Getrieben umgesetzt worden. Als Sensor ist die Verwendung von magnetoresistiven Sensoren untersucht und bewertet worden, da diese in vergleichbaren Anwendungen sehr gutes Verhalten gezeigt haben.

Mit dieser Architektur eröffnen sich neue Möglichkeiten der Signalerfassung (Position und Drehzahl), der Signalverarbeitung und –weiterleitung (digital) und darüber hinaus auch Möglichkeiten, erweiterte Funktionalitäten in die PPU zu integrieren.

Vorgestellt wird, neben einem kurzen Abriss der Forderungen an die PPU, die technischen Varianten in der MR-Sensorik und Integrationslösungen. Die sich damit ergebenden Varianten in der Systemarchitektur und der Signalaufbereitung werden ebenfalls vorgestellt.

1. EINLEITUNG

Die zuverlässige Erkennung des aktuellen Flugzustandes und der korrekten Funktion aller Systeme ist ein wesentliches Element zur Gewährleistung des hohen Sicherheitsstandards in der Luftfahrt. Hier sind gerade die Start- und Landephase von höchster Bedeutung, da hier auch statistisch gesehen die meisten Zwischenfälle zu erwarten sind.

Für den sicheren Start und die sichere Landung werden bei allen Verkehrsflugzeugen entsprechende Hochauftriebssysteme verwendet, d. h. Vorflügel und Landeklappen. Diese werden über einen zentralen Antrieb im Flugzeugrumpf verstellt, der seine Energie über Torsionswellen über die Flügelspannweite zu den einzelnen Klappenelementen transportiert.

Die aktuelle Position dieser Auftriebshilfen muss dabei zuverlässig und schnell erkannt werden. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf der sicheren Erkennung von Asymmetrien oder Fehlfunktionen, da diese ein Eingreifen des Piloten erforderlich machen.

Diese Position wird über sogenannte „position pick-off units“ (PPU) erfasst. Dabei handelt es sich um Geräte, die sowohl am Antrieb im Rumpf als auch an den äußeren Enden der Torsionswelle installiert sind und die entsprechenden Positionen erfassen. Hierzu wird die Drehung der Positionswelle mittels Untersetzungsgetriebe in eine Winkelinformation im Bereich 0 ... 360° übersetzt,

welche dann mittels Synchros erfasst und an den Slat and Flap Control Computer (SFCC) als analoges Signal übermittelt wird.

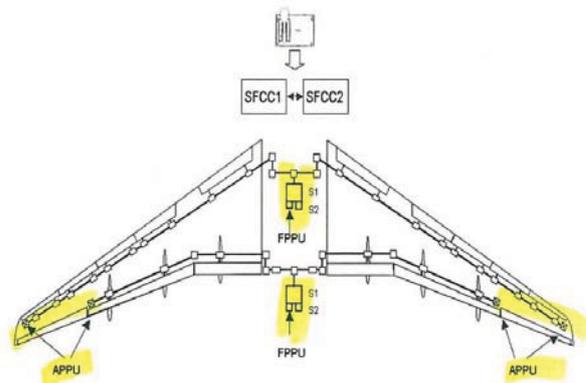


BILD 1: Lage der PPU's im Flugzeug

Der Aufbau und die grundsätzliche Architektur der PPU hat sich dabei seit ihrem ersten Einsatz in den single aisle Programmen nicht verändert. Es ist offensichtlich, dass Fortschritte in der Sensortechnologie, Datenübertragung und Getriebetechnik hier Verbesserungen möglich machen. Dieses wurde im Rahmen des LUFO-geförderten Projektes „Higher“ untersucht.

2. FUNKTIONALE ANFORDERUNGEN

Zu Beginn dieser Arbeiten galt es zunächst, die funktionalen Anforderungen an die PPU zu definieren. Hierbei war es wichtig, alle Aspekte, die die Wahl einer bestimmten Technologie oder Architektur festlegen, weitgehend zu vermeiden, um so zu einem objektiven trade-off gelangen zu können. Dazu gehören auch Überlegungen, die ein Hochauftriebssystem mit verteilten Antrieben betreffen. Auch hier muss die lokale Position in geeigneter Form erfasst und an den SFCC weiter geleitet werden.

Aus diesen Arbeiten konnten als wesentliche Anforderungen ermittelt werden:

1. Reduktion der Eingangsumdrehungen
Hierbei kann von einem Untersetzungsbereich von 100:1 bis hinauf zu 1000:1 ausgegangen werden, wenn ausgangsseitig auf eine Umdrehung reduziert wird.
2. Genauigkeit
Die schnelle Erfassung und die hohe Untersetzung erfordern eine hochgenaue Messung der abtriebsseitigen Position mit einem Fehler von wenigen Winkelminuten. Dazu sollte die Untersetzung möglichst spielfrei und präzise erfolgen, d. h. die Übertragungsgenauigkeit muss entsprechend hoch sein.
3. Resistenz gegen Umgebungsbedingungen
Da die PPU's zum Teil im Außenbereich des Flügels untergebracht sind, müssen die dort herrschenden Umweltbedingungen ertragen werden können. Dies sind neben dem Temperaturbereich auch Forderungen an Vibration, Dichtigkeit und Resistenz gegen Flüssigkeiten, die hier zur Anwendung kommen können (Enteisung, Hydraulik, etc.)
4. Redundanz
Aus der Systemarchitektur wird schnell ersichtlich, dass eine doppelte Erfassung des gemessenen Winkels innerhalb jeder PPU erforderlich ist.
5. Zuverlässigkeit
Aufgrund der hohen Anzahl von verbauten Einheiten muss die Zuverlässigkeit der einzelnen PPU's sehr hoch sein. Nur so lassen sich geringe Ausfallraten und damit niedrige Wartungskosten erreichen.
6. Gewicht
Die heutigen PPU's haben ein sehr gutes Gewichtsniveau erreicht. Jede neue Variante muss mindestens diesen Wert erreichen oder unterschreiten.
7. Wirtschaftlichkeit
Schlussendlich muss jede Lösung eine Verbesserung der Wirtschaftlichkeit darstellen. Aufgrund der hohen Zuverlässigkeit und niedrigen Wartungsaufwände mit dem bestehenden System kann dies nur durch geringere Systemkosten erreicht werden.

3. TECHNOLOGIEÜBERLEGUNGEN

Basierend auf den generellen Anforderungen an die PPU wurde anschließend untersucht, welche technologischen Fortschritte hier Eingang finden können und sollten um dadurch zu einer besseren Lösung zu gelangen.

2.1. Mechanischer Teil

Auf der mechanischen Seite sind hier zunächst Fortschritte in der Getriebetechnik zu nennen. Getriebebauteile mit der erforderlichen Präzision lassen sich heute in kleineren Abmessungen herstellen. Dies erlaubt auch, die Gehäuseteile kompakter zu gestalten.

Bei den Getriebeprinzipien wurden die derzeit üblichen Varianten betrachtet, dazu zählen:

- Stirnradstufen
Diese bieten in den geforderten Abmessungen keine ausreichend hohen Untersetzungen, was zu einer Erhöhung der Gesamtstufenzahl und damit höheren Kosten führt.
- Planetengetriebe
Hier sind mit drei- bzw. vierstufigen Aufbauten die geforderten Untersetzungen möglich. Eine möglichst hohe Spielfreiheit, insbesondere in den letzten Stufen, hat aber nachteiligen Einfluss auf die Kosten. Darüber hinaus ist die Montage aufwändig.
- Wolfromgetriebe
Hierbei handelt es sich um eine Sondervariante der Planetengetriebe, die höhere Untersetzungen erreichen. Der niedrige Wirkungsgrad führt dabei aber zu größeren Bauteilen.
- Harmonic Drive Getriebe
Dieses wird schon seit Jahren erfolgreich verwendet. Neben der Präzision und Spielfreiheit bietet es auch hohe Untersetzungen in einer Stufe. Nachteilig sind die (zumindest bei kleinen Stückzahlen) nur wenigen verfügbaren Untersetzungen.

Um der hohen Varianz in der Gesamtuntersetzung Rechnung zu tragen wurden die verschiedenen Prinzipien in einem modularen Konzept integriert, welches auf einem Harmonic Drive Getriebe als letzter Stufe und einer Planetenvorstufe basiert.

Mit dem Harmonic Drive Getriebe als letzter Stufe kann die Integration des Sensors für alle Varianten gleich gehalten werden, wobei die Gesamtuntersetzung durch die Planetenvorstufe bzw. andere Untersetzungen im Harmonic Drive Getriebe (bei gleichen Schnittstellen) realisiert. Damit kann der Untersetzungsbereich von 50:1 ... 1000:1 abgedeckt werden. Noch höhere Untersetzungen wären über ein zweistufiges Harmonic Drive Getriebe möglich, hiermit könnten Gesamtuntersetzungen von bis zu 10000:1 erreicht werden.

Die Spielfreiheit in der letzten Getriebestufe erlaubt es weiterhin, die Anforderungen an die Vorstufe zu reduzieren, da der hier vorliegende Fehler über die letzte

Stufe entsprechend der Übersetzung des Harmonic Drive Getriebes reduziert wird.

Technologisch sind die ausgewählten Varianten von einem hohen Reifegrad, da diese schon in anderen Anwendungen in der Luft- und Raumfahrt erfolgreich eingesetzt worden sind. Damit sind auch schon positive Erfahrungen im Hinblick auf die Verwendbarkeit unter schwierigen Umweltbedingungen vorhanden.

2.2. Sensorteil

Die bisherige PPU basiert auf dem Prinzip der Übermittlung von analogen Signalen. Dies hat sowohl Vor- als auch Nachteile. In der Analyse der verwendbaren Sensortechnologie hat diese Betrachtung allerdings erheblichen Einfluss und soll daher zunächst erörtert werden.

Die Verwendung digitaler Signale erfordert den Einsatz entsprechender Elektronik direkt am Ort der PPU. Damit sind Bauteile, die für diese Umgebung geeignet sind, einzusetzen. Neben Aspekten wie EMV- und Blitzschutz ist hier auch der extreme Temperaturbereich zu berücksichtigen. Die digitale Signalverarbeitung würde es aber erlauben, gewisse Kontrollalgorithmen direkt vor Ort zu implementieren, so dass die PPU eine reduzierte Selbstdiagnosefähigkeit (BIT: built-in test) gewinnen würde. Mit Hilfe dieser Vorverarbeitung kann man auch die zu übermittelnde Datenmenge reduzieren, falls dies sinnvoll ist. Für die Datenübertragung selbst sollte dabei auf eines der im Flugzeug etablierten Protokolle zurück gegriffen werden, um die vorhandene Infrastruktur nutzen zu können.

Analoge Signale sind dem gegenüber empfindlicher gegenüber externen Störeinflüssen, was die Auswertung im SFCC komplexer gestaltet. Dafür ist die PPU selbst einfach und wenig komplex im Aufbau.

Bei den weiteren Analysen konnte als ein wichtiger Aspekt das Systemgewicht identifiziert werden: Aufgrund der analogen Signale werden für jeden PPU-Kanal insgesamt fünf Leitungen (zwei zur Versorgung, drei Signalkabel) benötigt. Eine Erhöhung dieser Anzahl ist aus Gewichtsgründen nicht akzeptabel, eine Reduktion hingegen wäre erwünscht.

2.2.1. Synchros

Die bisherigen PPU's verwenden zur Positionserfassung Synchros. Diese zeichnen sich durch eine hohe Robustheit und die langjährige Erfahrung aus. Ursprünglich wurden Synchros schon zur Positionserfassung bei den Schleusentoren im Panamakanal eingesetzt und wurden dann vor allem zur Ansteuerung von Drehstrommotoren verwendet. Eine wichtige Eigenschaft für den Einsatz bei den PPU's ist die Tatsache, dass mit drei Signalleitungen eine zuverlässige Positionsinformation geliefert werden kann. Diese liefern jeweils um 120° phasenversetzte Sinussignale, vergleichbar mit einer Drehstrommaschine. Aus diesen kann dann im SFCC die entsprechende Winkelinformation abgeleitet werden.

Um eine gute Signalqualität zu erreichen, müssen Erregerwicklung, Sekundärwicklung und Luftspalt gut abgestimmt sein. Gerade bei niedrigen Erregerfrequenzen sind hierbei enge Toleranzen einzuhalten, um ein auswertbares Signal zu erhalten.

Nachteilig ist die Tatsache, dass Synchros heutzutage nur noch in wenigen Fällen eingesetzt werden und von daher nur in geringen Stückzahlen gefertigt werden. Dies wirkt sich nachteilig auf die Kosten aus.

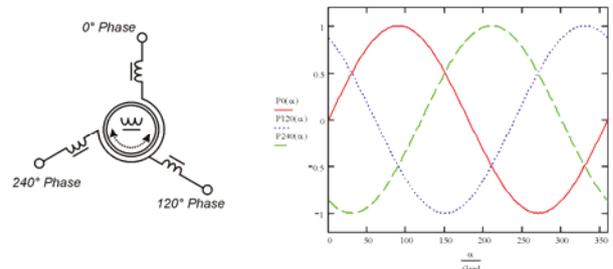


BILD 2: Aufbau und Signal eines Synchros

2.2.2. Resolver

Dem gegenüber sind Resolver in einer Vielzahl von Varianten und Baugrößen die Standardlösung für die Positionserfassung in kritischen Umgebungen. Hier wird die Position auch über zwei Sinussignale erfasst, die um 90° gegeneinander versetzt sind. Normalerweise werden Resolver daher mit sechs Leitungen (zwei für die Erregerwicklung, zweimal zwei für die Signalleitung) ausgestattet, wobei man allerdings auch jeweils eine Leitung aus dem A- und B-Kanal zusammen fassen kann. Allerdings ändert sich die Auswertelogik im SFCC im Vergleich zum Einsatz eines Synchros.

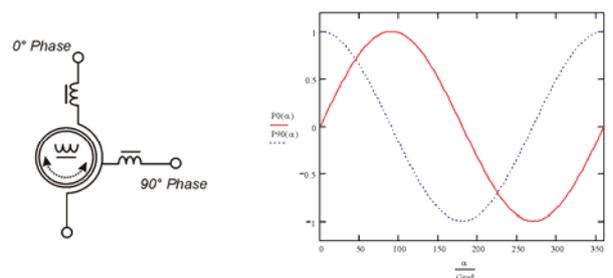


BILD 3: Aufbau und Signal eines Resolvers

2.2.3. RVDT

Das Meßprinzip bei einem RVDT (rotary variable differential transducer) basiert zwar ebenfalls auf einer induktiven Kopplung zwischen Erregerspule und Sekundärwicklung, hier wird diese allerdings über einen Weicheisenkern realisiert. Als Positionsinformation wird hier ebenfalls die Amplitude verwendet, wobei durch entsprechenden Abgleich eine hohe Stabilität gegenüber Frequenz- und Amplitudenschwankungen auf der Primärseite erreicht wird. Hauptnachteil ist, dass eine Linearität nur über einen eingeschränkten Winkelbereich erreicht werden kann, d. h. man kann nur einen Bruchteil der 360° (ca. nur 1/10) nutzen, was die Anforderungen an

den mechanischen Teil aufgrund höherer Unterstellungen steigert.

2.2.4. Encoder

Eine weitere Alternative stellen Encoder dar. Diese benötigen aber in jedem Fall eine Auswerteelektronik vor Ort, um die gemessenen Signale der einzelnen Spuren auszuwerten und zu einer Gesamtposition zusammen zu fassen. Optische Encoder dürften in der Regel an den Umgebungsbedingungen scheitern bzw. zu aufwändig werden. Magnetische Encoder benötigen dem gegenüber Kompensationsschaltungen, um die externe Störungen zu neutralisieren.

2.2.5. MR-Sensor

Magneto-resistive (MR-) Sensoren bieten aufgrund Ihres Meßprinzips der Magnetfeldrichtung statt der Magnetfeldstärke systembedingt eine hohe Robustheit gegenüber Störungen von außen. Obwohl der magneto-resistive Effekt bereits seit 150 Jahren bekannt ist, konnte er erst mit der Dünnschichttechnik industriell nutzbar gemacht werden. Hinter dem Begriff MR-Sensor verstecken sich grundsätzlich drei verschiedene Arten der Messung, wobei allen gemeinsam ist, dass sich der elektrische Widerstand des Sensors unter Einfluss eines Magnetfelds ändert.

Der anisotrope magneto-resistive (AMR) Effekt tritt in ferromagnetischen Materialien auf, wobei sich deren spezifischer Widerstand mit dem Winkel zwischen Magnetfeldrichtung und Stromrichtung ändert. Die Änderung beträgt wenige Prozent, ist aber schon bei schwachen Magnetfeldern vorhanden.

Beim Tunnel-magneto-resistive Effekt (TMR) ändert sich der Tunnelwiderstand zwischen zwei ferromagnetischen Schichten in Abhängigkeit des Winkels der Magnetisierung der beiden Lagen.

Der Giant-magneto-resistive Effekt (GMR, Nobelpreis 2007) liefert die größten Widerstandsänderungen bis zu 50%. Dabei wird der elektrische Widerstand von zwei dünnen ferromagnetischen Schichten, getrennt durch eine dünne nicht-magnetische Schicht, in Abhängigkeit vom Winkel der Magnetisierung geändert. Geschickte Anordnung von mehreren Schichten erlaubt eine gezielte Anpassung an die Anforderungen.

Zunächst kann zwischen aktiven und passiven Sensoren unterschieden werden. Bei den aktiven Sensoren wird eine magnetische Maßverkörperung auf dem sich drehenden Teil angebracht, die direkt ausgewertet werden kann. Bei den passiven Sensoren ist der Magnet mit im Sensor enthalten und wird durch eine externe, Maßverkörperung in seinem Magnetfeld beeinflusst (z. B. Zahnrad).

Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal ist, ob die Messung am Wellenende oder am Wellenumfang erfolgt. Bei der Messung am Wellenende ist es bei den betrachteten aktiven Lösungen prinzipbedingt nur möglich, auf 180° eindeutig aufzulösen, was durch einen Hilfsensor kompensiert werden kann oder im mechanischen Teil berücksichtigt werden muss.

aktiv

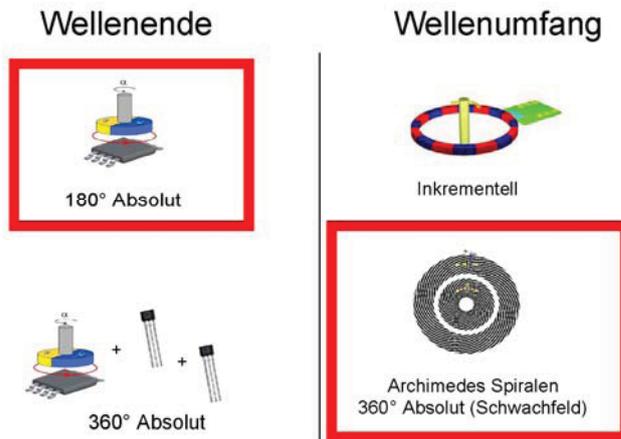


BILD 4: MR-Sensoren aktive Meßprinzipien

Aus den verschiedenen Varianten wurden zwei aktive Meßprinzipien als die geeignetsten ausgewählt. Diese unterscheiden sich sowohl in der Anordnung als auch im aufgelösten Winkel. Beide Varianten werden gleichzeitig in der PPU verwendet, womit auch eine prinzipielle Dissimilarität im Sensor erreicht wird.

passiv

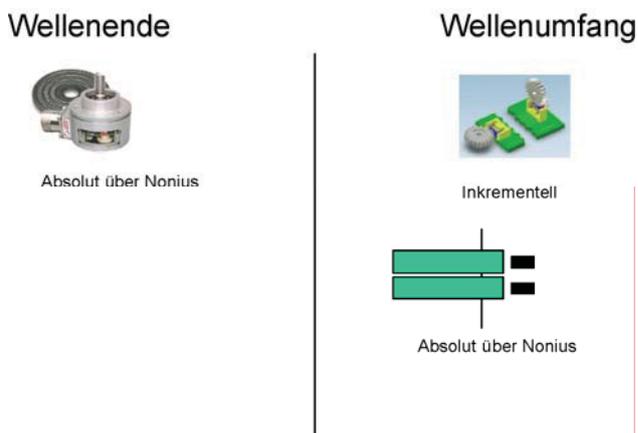


BILD 5: MR-Sensoren passiven Meßprinzipien

2.2.5.1. Signalvarianten

Für die Signalverarbeitung und -aufbereitung wird das MR-Signal intern digitalisiert. Trotzdem ist es möglich, hieraus wieder ein analoges Signal zu generieren, um Schnittstellenkompatibilität zu bestehenden Systemen zu ermöglichen.

Trotzdem erscheint es offensichtlich sinnvoller, die bereits digital vorliegenden Informationen auch digital weiter zu verarbeiten. Idealerweise werden diese dann auf ein

flugzeugseitig vorhandenes Protokoll, z. B. AFDX, transportiert.

3. INTEGRATIONSASPEKTE

Mit der Verfügbarkeit der Positionssignale in digitaler Form kann dieses z. B. über das AFDX-Protokoll transportiert werden. Damit wird die Zahl der Leitungen von fünf auf vier reduziert, was aufgrund der Länge dieser Leitungen einen erheblichen Gewichtsvorteil darstellt. Ist mehr als eine PPU innerhalb des Flügels vorhanden, kann man sogar einen gemeinsamen Datenbus nutzen statt der einzelnen Anbindung jeder PPU. Aus Redundanzgründen ist es dabei allerdings erforderlich, dass jede PPU mit zwei Busschnittstellen versehen ist und auch innerhalb der PPU eine entsprechende Trennung der beiden Kanäle erfolgt.

Konstruktiv hat es sich als sinnvoll erwiesen, die beiden Hauptelemente Getriebekopf und Sensorkopf als einzelne Module zu behandeln (GBU: Gearbox Unit und ASU: Angular Sensor Unit), da hiermit eine noch größere Flexibilität an die verschiedenen Anwendungen erreicht werden kann.

4. ERGEBNISSE

Derzeit befindet sich eine Demonstrator-Einheit im Aufbau, welche die verschiedenen Aspekte und Entwurfsentscheidungen repräsentiert und so die erfolgten Analysen durch eine funktionstaugliche Hardware ergänzt.

Die funktionalen Forderungen aus Abschnitt 2 werden dabei erfüllt. Der erfolgte Entwurf stellt eine modularen Aufbau dar, der schnell an unterschiedliche Anforderungen angepasst werden kann.

Bezüglich des Systemgewichts lassen sich mit heute eingesetzten Komponenten bereits Gewichtsreduktionen im Bereich von 10% realisieren. Mit weiter gehenden Lösungen im Bereich der Elektronik, welche die Vorentwicklung erfolgreich abgeschlossen haben, sind insgesamt ca. 40% Reduktion im Vergleich zur heutigen Lösung erreichbar.

Bezüglich der Zuverlässigkeit werden vergleichbare Werte zu heutigen Lösungen erreicht, wobei es aufgrund des höheren elektronischen Anteils eine Verschiebung der Fehlerfälle in Richtung Elektronik gibt.

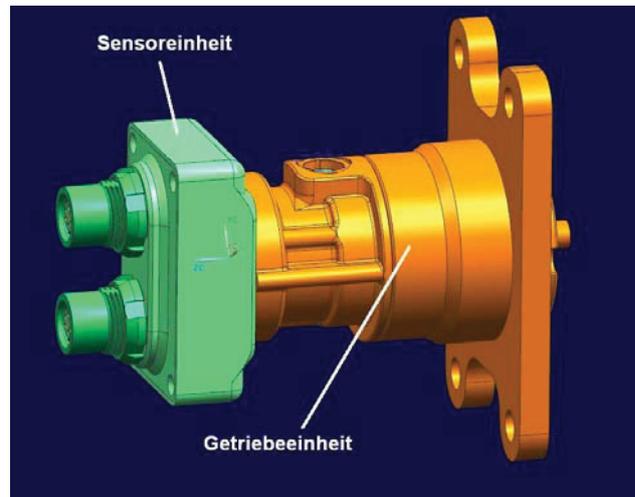


BILD 6: Darstellug der PPU-neu

DANKSAGUNG

Das dargestellte Vorhaben wurde im Rahmen des Luffahrtforschungsprogramms IV durch das Bundesministerium für Wirtschaft gefördert.

In der Erstellung und Diskussion wurde ein intensiver Austausch mit Airbus Deutschland gepflegt, ohne den die erreichten Ergebnisse nicht möglich gewesen wären.