

Öffentlicher Abschluss-Bericht

Zuwendungsempfänger: Industrieanlagen-Betriebsgesellschaft mbH	Projektnummer: 20W0604
--	----------------------------------

Vorhabenbezeichnung:

**Integralprojekt: INREOG – Effizienzsteigerung der Qualifikation von Flugzeug-
mustern durch den Einsatz innovativer Verfahren**

Laufzeit des Vorhabens:

01.01.2007 - 31.12.2011 (vorfristiger erfolgreicher Abschluss zum 30.09.11)


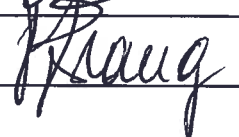
Berichtszeitraum:

01.01.2007 - 30.09.2011

Zuwendungsgeber : Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi)
vertreten durch
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR),
Projektträger Luftfahrtforschung

Zusammenfassung / Hauptergebnisse des Berichtszeitraumes:

Computergestützte Verfahren und Simulationen können nach derzeitigem Stand einen Großstrukturversuch für die Luftfahrttauglichkeitsnachweise im Sinne der Ermüdungsfestigkeit und Schadenstoleranz nicht ersetzen, wohl aber effizienzsteigernd unterstützen und ergänzen.
Eine Reihe von innovativen Technologien im Kontext der computergestützten Unterstützung von Luftfahrt-Großstrukturversuchen konnte – auch mit Hilfe einer ersten INREOG-Erweiterung - anhand eines solchen Großstrukturversuches entwickelt und erfolgreich validiert werden.
Zusätzlich wurde im Rahmen der zweiten Erweiterung die konzeptionelle Grundlage für eine individuell optimierbare transportable modulare Testinfrastruktur für Luftfahrt-Großstrukturversuche gelegt.

	Name	Unterschrift	Datum
Erstellt durch Prepared by	Eichelbaum	<i>i.v.</i> 	31.05.2012
Überprüft durch Reviewed by	Pfrang	<i>Pfrang</i> 	31.5.2012

INHALTSVERZEICHNIS	Seite
1 Verlauf und Ergebnisse der technisch-wissenschaftlichen Arbeit.....	3
1.1. Haupt-Ergebnisse der technisch-wissenschaftlichen Arbeit	3
1.2. Verlauf / Ergebnisse der technisch-wissenschaftlichen Arbeit.....	6
AP 1000 Projektmanagement.....	6
AP 1100 Projektleitung / AP1200 Schnittstellenmanagement:.....	6
AP 1300 Qualitätssicherung:	7
AP 2000 Innovative Verfahren zur Lebensdauerberechnung und Schadens-analyse.....	7
AP 2100 Lebensdauerberechnung:	7
AP 2200 Beanspruchung	9
AP 2300 Schadenserkenkung.....	10
AP 3100 Konzeption und Planung.....	11
AP 3200 Umsetzung	15
AP 3300 Validierung	22
AP 3400 Weiterentwicklung von Verfahren	23
AP 4000 Konzept der mobilen modularen Infrastruktur	27
AP 4100 Hydraulik und Ölversorgung:	28
AP 4200 Pneumatik und Luftversorgung:	30
AP 4300 Kühlmodul:	31
AP 4400 Elektrik und Spannungsversorgung	31
AP 4500 Strong Floor:.....	32
AP 4600 Bewertung des Konzeptes:	39
AP 5100/AP5200 Einzel- und Gesamtbewertung	40
2 Vergleich mit der Arbeits-, Zeit- und Kostenplanung	42
3 Zielerreichung des Vorhabens	43
4 Für das Vorhaben relevante FE-Ergebnisse von dritter Seite	45
5 Änderungen der Zielsetzung.....	45

ANLAGEN

Anlage A: Zeitpläne:

Anlage B: Organisation: Überblick über die Arbeitspakete unter Einbeziehung beider Erweiterungen

1 Verlauf und Ergebnisse der technisch-wissenschaftlichen Arbeit

Dieser Abschlussbericht stellt den gesamten Verlauf des INREOG-Vorhabens vom Start am 01.01.2007 bis zu dem erfolgreichen und gegenüber der Planung sogar etwas vorfristigen Abschluss zu Ende September 2011 dar und beinhaltet somit bereits den zehnten und letzten gemäß Bewilligungsbescheid zu erstellenden Zwischenbericht für das zweite Halbjahr 2011.

Die im Anhang A angefügten Zeitpläne stellen die zeitlichen Abläufe einerseits der INREOG-Basis zusammen mit der ersten Erweiterung und andererseits der zweiten Erweiterung für die Konzeption der modularen, mobilen Infrastruktur für Großstrukturversuche dar.

Die im Anhang B enthaltene Arbeitspaketstruktur umfasst bereits neben dem Basis-Vorhaben beide bewilligte Verlängerungen bzw. Erweiterungen.

1.1. Haupt-Ergebnisse der technisch-wissenschaftlichen Arbeit

Kern des Vorhabens „Effizienzsteigerung der Qualifikation von Flugzeugmustern durch den Einsatz innovativer Verfahren“ war die Effizienzsteigerung der Qualifikation der Ermüdungsfestigkeit der Struktur von Flugzeugmustern durch den Einsatz von rechnergestützten Simulationen. Hierbei stellte die Beantwortung der bewusst ins Extrem geführten Frage, ob solche rechnergestützten Simulationen den Gesamtzellenermüdungsversuch als versuchsgestützte Nachweisführung gänzlich ersetzen können, ein erstes Teilziel dar. Im Verlauf dieses INREOG-Vorhabens konnte nachgewiesen werden, dass die Materialermüdungsvorgänge in solch komplexen Strukturen wie einer Gesamt-Flugzeugstruktur mit Rechner gestützten Simulationen nicht verlässlich realistisch abgebildet werden können. Dieses erste Ergebnis traf den Antragssteller nicht überraschend und diente als Einstieg in die weiterführende Frage, in welchen Bereichen rechnergestützte Simulationen die versuchsgestützte Nachweisführung der Ermüdungsfestigkeit und Schadenstoleranz der Gesamt-Flugzeugstruktur gezielt unterstützen und somit im Verbund von Versuch und Simulation signifikante Effizienzsteigerungen erzielen können.

Diese weiterführende Frage konnte in verschiedenen Bereichen positiv beantwortet werden und es wurden die folgenden Ergebnisse – gestützt auf Validierungen anhand des Großstrukturversuches A400M MFT - im Bereich der Versuchsunterstützung durch rechnergestützte Simulation erzielt:

Optimierung der Einbindung von Unterauftragnehmern im Bereich des mechanischen Versuchsaufbaus durch rechnergestützte Vor-Konstruktion im Hause des Testinstituts:

Für Luftfahrt-Großstrukturversuche bindet die IABG geeignete Unterauftragnehmer insbesondere für die Detailkonstruktion, Fertigung und den Aufbau des Belastungsgerüsts, der Lasteinleitungsgeschirre und der Dummy-Strukturen ein. Diese Arbeitsteilung mit jenen im Stahlbau versierten Unternehmen hat seit jeher bereits einen Beitrag für die effiziente Umsetzung von zulassungsrelevanten Gesamtzellenermüdungsversuchen geleistet.

Durch eine maßvolle Optimierung der Übergabe-Schnittstelle zwischen dem architektonischen Vor-Entwurf der IABG einerseits und der darauf aufbauenden Detail-Konstruktion und Auslegungsberechnung der Unterauftragnehmer andererseits konnte eine weitere Effizienzsteigerung des Gesamtprozesses der Entwicklung des Belastungsgerüsts, der Lasteinleitungsgeschirre und der Dummy-Strukturen erzielt werden.

Vor-Optimierungen von Steuerungsparametern vor Inbetriebnahme des Großstrukturversuches im Bereich der Drosselkurven und Ventilstromsteuerung:

Jeder Großstrukturversuch beinhaltet eine umfangreiche und komplexe Prüflingsstruktur und eine große Anzahl konzentrierter Lasteinleitungen größtenteils über Hydraulik-Aktuatoren. Ein solches System ist niemals frei von Eigenform-Anregungen, Lastkoppungen und ähnlichen Effekten, die die geforderte sehr hohe Nachfahrergenauigkeit beeinträchtigen.

Mit Hilfe einer rechnergestützten Simulation des gesamten Versuchsaufbaus bestehend aus dem Strukturmodell des Prüflings und der Lasteinleitungsstrukturen, dem hydrodynamischen Modell der hydraulischen Belastungsanlage und einer Schattenprogrammierung der Steuerungs-Software des Control- & Monitoring Systems gelang der IABG im Rahmen dieses Vorhabens der Nachweis einer Effizienzsteigerung und Erhöhung der Versuchsgeschwindigkeit auf Basis einer rechnergestützten Vor-Optimierung signifikanter Steuerungsparameter sowohl im Bereich der Drosselkurven-Optimierung als auch der Vorsteuerung der Ventilstromaufschaltung der hydraulischen Steuerblöcke.

Effizienzsteigerung in der Auslegung des pneumatischen Belastungssystems durch rechnergestützte Simulation der Kabinendruck-Befüllungszeiten:

In der konzeptionellen Vorauslegung des Versuchsaufbaus eines Luftfahrt-Großstrukturversuches stellt die Dimensionierung der pneumatischen Belastungsanlage einen spezifischen Teilschritt dar. Für die vollständige Befüllung des zur Frage stehenden Kabinenvolumens des Prüflings (ggf. in Abhängigkeit des Grades der erreichten Volumenreduktion) auf das vom Flugzeughersteller vorgegebene Luftdruck-Niveau steht der pneumatischen Belastungsanlage lediglich ein limitierter Zeitraum zur Verfügung, der sich aus dem zeitlichen Ablauf jener Lastfälle im Steigflugsegment des vom Flugzeughersteller vorgegebenen Belastungsprogrammes ergibt.

Im Rahmen dieses Vorhabens ist es der IABG gelungen, mit Hilfe einer rechnergestützten Simulation des Befüllungsvorganges der pneumatischen Belastungsanlage diese in iterativen Schritten hinsichtlich ihrer Leistungsdimensionierung zu optimieren. Dies kann als signifikanter Schritt zur Steigerung der Energie-Effizienz der Versuchsdurchführung von Großstrukturversuchen verstanden werden.

Effizienzsteigerung der versuchsbegleitenden Schadensanalyse im Rahmen der rechnergestützten Betriebsfestigkeitsanalyse durch das System „FATIFRAC“:

Im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens wurde ein neues Lebensdauer- bzw. Schadensbewertungskonzept (FATIFRAC) entwickelt. Dieses beinhaltet sowohl die Berechnung der Anriss- („FATI“gue) sowie der Rissfortschrittslebensdauer („FRAC“ture) auf Basis lokaler Spannungen. Die Güte der Berechnungsergebnisse hängt dabei wesentlich von den der Bewertung zugrundeliegenden Werkstoffkennwerten ab, welche für zwei unterschiedliche Aluminium-Legierungen im Rahmen des Projektes ermittelt wurden. FATIFRAC stellt eine geeignete Methode dar, um bei Vorliegen der entsprechenden Werkstoffparameter, Belastungen sowie Geometrie die Entwicklung eines festgestellten Schadens an Großstrukturen qualitativ zu berechnen, um daraus gezielter Reparaturmaßnahmen ableiten zu können. Zudem können aus diesen Abschätzungen Entscheidungsgrundlagen für Handlungsempfehlungen bezüglich erforderlicher Anpassungen der Versuchsführung abgeleitet werden. Derzeit unterliegt das Modell der Restriktion, dass eine entsprechend hohe Anzahl an unterschiedlichen Werkstoffkennwerten erforderlich ist. Für eine erfolgreiche Anwendung im Großstrukturversuch sollten daher zukünftig generische Modelle entwickelt werden, welche eine Ableitung der benötigten Werkstoffkennwerte aus einer kleinen Menge an einfachen Probenversuchen in einem reduzierten Versuchsprogramm ermöglichen.

Zur Bewertung der Nachfahrgüte bezüglich Ihres Einflusses auf die örtlichen Schädigungsvorgänge in der untersuchten Flugzeugstruktur wurden im Zusammenhang mit der Entwicklung von FATIFRAC auf den Anwendungsfall hin optimierte Programme programmiert und an ersten Beispieldaten erprobt. Dies bildet die Grundlage, um bei zukünftigen Versuchen anhand von kontinuierlichen Onlinemessungen einen schädigungs-basierten Soll-Ist-Vergleich durchzuführen, der eine Interpretation der Nachfahrgüte hinsichtlich der nachgewiesenen Lebensdauer ermöglicht.

Erste Konzeptarbeiten zur weiteren Effizienzsteigerung durch eine modulare und mobile Testinfrastruktur für Luftfahrt-Großstrukturversuche:

Im Rahmen der zweiten Erweiterung des INREOG-Vorhabens wurden die Einzelkonzepte für die Testinfrastrukturen Hydraulikversorgung, Pneumatikversorgung, Stromversorgung und Strong Floor für eine modulare mobile an verschiedenen Orten, ggf. in unmittelbarer Nähe zum Flugzeughersteller, nutzbare Testinfrastruktur für Luftfahrt-Großstrukturversuche erarbeitet und einer vorläufigen Konzeptbewertung unterzogen.

Die Ergebnisse sind so viel versprechend, dass im Rahmen eines daran anschließenden Folge-Vorhabens Optimierung und Validierung dieses innovativen Testinfrastruktur-Konzeptes vorgesehen sind.

1.2. Verlauf / Ergebnisse der technisch-wissenschaftlichen Arbeit

Hier folgend wird der Verlauf der technisch wissenschaftlichen Arbeiten pro Arbeitspaket dargelegt:

AP 1000 Projektmanagement

AP 1100 Projektleitung / AP1200 Schnittstellenmanagement:

Das INREOG Vorhaben wurde am 01.01.2007 gestartet. Als eine der ersten Aufgaben der Projektleitung wurden detaillierte Arbeits- und Terminpläne für die einzelnen Arbeitspakete erstellt und im Rahmen des Schnittstellen-Managements aufeinander abgestimmt. Zusätzlich wurde die Universität der Bundeswehr Neubiberg als Unterauftragnehmer im Rahmen der Arbeiten zum AP2000 eingebunden. Im weiteren Verlauf wurden der Projektfortschritt und der Mittelabfluss fortlaufend überwacht.

Aufgrund von zeitlichen Verschiebungen des für die Validierung der INREOG-Technologien vorgesehenen Großstrukturversuches A400M MFT wurde am 25.11.2008 ein Antrag auf Streckung und Verlängerung des INREOG-Vorhabens gestellt. Dieser Antrag wurde am 03.06.2009 bewilligt. Neben der zeitlichen Streckung konnten weitere Einzel-Technologie-Themen, in das INREOG-Vorhaben im Rahmen einer Erweiterung aufgenommen werden, die im Nachgang zur ursprünglichen INREOG-Antragstellung kreativ entwickelt worden waren und inzwischen zur Validierungs- bzw. Anwendungsreife weiterentwickelt werden konnten.

AP 1300 Qualitätssicherung:

Alle Aktivitäten des Vorhabens wurden durch eine kontinuierliche Qualitätssicherung begleitet, turnusmäßige Projektaudits durchgeführt sowie dem QM-Standard entsprechende Dokumentationen erstellt.

Ein generelles Umwelt- und QM-Audit durch einen externen Auditor gemäß ISO EN 14.001 wurde im zweiten Halbjahr 2010 bestanden.

AP 2000 Innovative Verfahren zur Lebensdauerberechnung und Schadensanalyse

AP 2100 Lebensdauerberechnung:

Zu Beginn der Arbeiten wurde eine umfassende Literaturrecherche zu bestehenden Möglichkeiten und Konzepten der Lebensdauerberechnung durchgeführt. Basierend auf den gewonnen Erkenntnissen wurden die unterschiedlichen Lebensdauerberechnungsmethoden bewertet (vgl. Tabelle 1).

	Nennspannungskonzept NK	Strukturspannungskonzept SK	Ermüdungsfestigkeit LSA	Bruchmechanik BM
Anwendbarkeit auf „fehlerfreie“ Materialien	++	++	++	-
Unterscheidung verschiedener Schadensmechanismen	++	+	++ (Unterscheidung Schub- und Normalspannung)	-- (Daten fast ausschließlich Mode I)
Berücksichtigung von Fertigungseinflüssen	-	-	++	-
Übertragbarkeit neue Strukturen / Werkstoff	+	--	++/+	++/+
Berechnung der Rissfortschrittsentwicklung	--	--	-	++
FE-Kopplung	-	++	++	- Rissmodellabhängig

Tabelle 1: Bewertung unterschiedlicher Lebensdauerberechnungskonzepte

Die Arbeiten zeigten, dass eine Kombination eines Ermüdungsfestigkeitsnachweises auf Basis lokaler Spannung (LSA) mit einem Bruchmechanischen Ansatz (BM) erfolgversprechend ist. Weiterführend wurde mit FATIFRAC ein neues Berechnungskonzept für den rechnerischen Festigkeitsnachweis im Flugzeuggroßstrukturversuch erarbeitet. Der wesentliche Vorteil dieses Konzeptes liegt in der getrennten Betrachtung der Anriss- und Rissfortschrittsphase auf Basis des lokalen Spannungszustandes, wodurch die Methode zum Beispiel voll integrierbar in eine Finite Elemente Berechnung ist.

Darüber hinaus wurden umfassende schwingfestigkeitsversuche an zwei Al-Flugzeuglegierungen durchgeführt. Bei den Versuchen wurden folgende Einflüsse untersucht:

- Quasistatische Festigkeitseigenschaften
- Einfluss der Mittelspannung (R=0, R=-1)
- Einfluss der Stützwirkung
- Einfluss des Lastkollektivs auf die Schwingfestigkeit
- Einfluss des Truncation- und Omission Levels auf die Schwingfestigkeit
- Rissfortschrittsverhalten (R=-1, R=0)

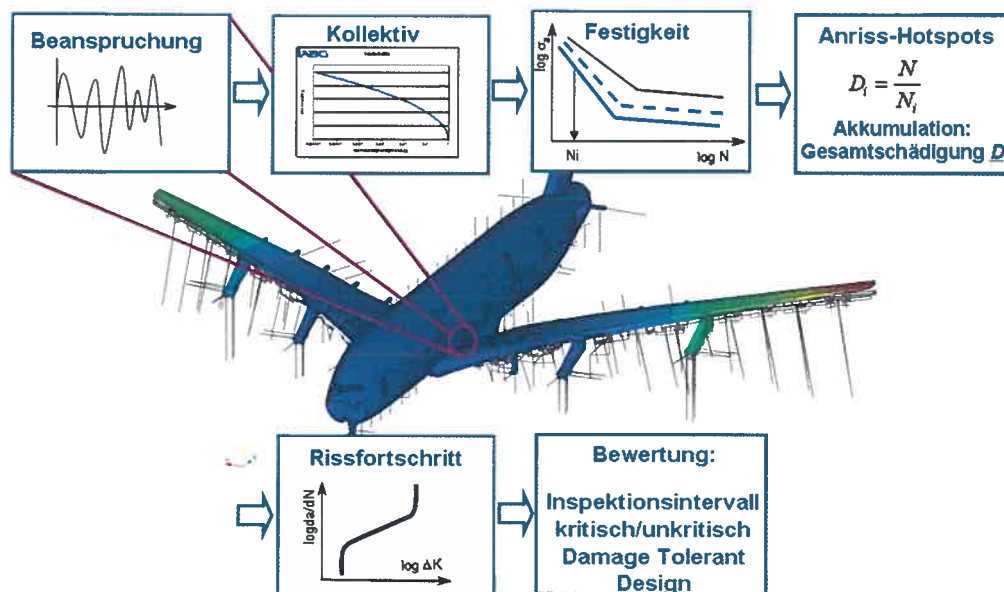


Bild 1: IABG – Lebensdauerberechnungskonzept FATIFRAC

Die beiden Al-Legierungen unterscheiden sich erheblich in ihrem mechanischen Verhalten und decken somit ein breites Werkstoffspektrum ab.

Zur Untersuchung der Einflüsse von Lastkollektiv, Truncation und Omission auf die Lebensdauer unter Belastung mit variabler Amplitude wurden Versuche mit unterschiedlichen Kollektivformen sowie unterschiedlichen Omission und Truncation Levels durchgeführt und statistisch ausgewertet. Die Ergebnisse bilden die Datenbasis zur Kalibrierung der Lebensdauerberechnungsmethode sowie zur Bewertung des Einflusses der Nachfahrgüte sowie von Programmanpassungen im Lebensdauerversuch.

Auf dem Gebiet der Lebensdauerberechnung wurden einzelne Softwaremodule für das Berechnungskonzept FATIFRAC (vgl. vorherige Zwischenberichte) erstellt. Die Module wurden sowohl in Matlab™ und VisualBasic™ programmiert.

Die Module umfassen folgende Funktionalitäten:

- Schadensakkumulation
- Lastkollektivbewertung
- Schwingfestigkeitsbewertung
- Sensitivitätsanalyse Bruchmechanik

AP 2200 Beanspruchung

In AP 2200 fanden im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens sowohl Messungen der lokalen Beanspruchung im Bereich der Flügelwurzel eines Gesamtzellenermüdungsversuches als auch die Entwicklung eines Softwaretools zur Bewertung von Levelcrossing-Kollektiven hinsichtlich Ihrer strukturschädigenden Wirkung statt. Das Softwaretool umfasst neben einer automatisierten Generierung von Rainflow-Kollektiven aus vorgegeben Levelcrossing-Kollektiven unter bestimmten Annahmen auch eine Umbewertung der Rainflow-Kollektive unter Einbeziehung der Mittelspannungsempfindlichkeit sowie eine Schadensakkumulation gemäß einschlägiger Auslegungsrichtlinien. Das Softwaretool ermöglicht damit die automatisierte und zeitsparende Bewertung von gemessenen oder vorgegebenen Last- oder Beanspruchungskollektiven hinsichtlich der Kollektivschärfe.

AP 2300 Schadenserkennung

Im Bereich der Schadenserkennung wurden im vorliegenden Forschungsvorhaben unterschiedliche Methoden zur Schadenserkennung und –verfolgung untersucht:

- Potentialsondenmessung mit Markerload-Blöcken
- Grauwertkorrelation
- Electronic Speckle Pattern Interferometrie (ESPI)
- Lock-In-Thermographie

Zur Kalibrierung und Verifikation der Risslängenbestimmung mittels Potentialsonde wurden Rissfortschrittsversuche an CCT-Proben mit Markerload-Blöcken durchgeführt.

Durch die Kalibrierung für die gewählte Probengeometrie kann der Rissfortschritt während folgender Versuche kontinuierlich und automatisiert mit ausreichender Genauigkeit verfolgt werden. Das Verfahren eignet sich aber nur für den Einsatz in Laborversuchen und kann nicht für die Rissdetektion und –verfolgung in Struktur- oder Gesamtzellenermüdungsversuchen verwendet werden, es sei denn im Belastungsprogramm können entsprechende Lastfälle eingefügt werden, die eine Bewertung des Rissbildes erlauben um ggf. den Anrisszeitpunkt ermitteln zu können.

Die untersuchten Messverfahren Grauwertkorrelation, ESPI und Lock-In-Thermographie sind zerstörungsfrei sowie in-situ tauglich und somit grundsätzlich geeignet für die Versuchsüberwachung. Zur Untersuchung der Eignung der verschiedenen Verfahren wurden umfangreiche Versuche an Rissfortschrittsproben durchgeführt. Ein Vergleich der Messverfahren zeigte, dass lediglich die aktive Lock-In-Thermographie bezüglich operativer Kompatibilität sowie Genauigkeit für den Einsatz in Großstrukturversuchen tauglich ist.

Um die Eignung der Lock-In Thermographie zur Detektion und Verfolgung von Rissen bei Versuchen an Luftfahrtstrukturen und an alternativen Werkstoffen zu untersuchen, wurden mit diesem Verfahren zusätzlich Schwingfestigkeitsversuche an bauteilähnlichen Proben aus glasfaserverstärktem Aluminium (GLARE) durchgeführt.

In einem letzten Schritt wurden Messungen mit einer Aktiven-Lock-In Thermographie-Kamera in einem Gesamtzellenermüdungsversuch durchgeführt. Im Zuge des Ermüdungsversuches wurde ein künstlich eingebrachter Defekt mit dem Kamerasystem betrachtet, sowie der Rissfortschritt während unterschiedlicher Flugtypen verfolgt.

Der Fokus der Untersuchungen lag dabei auf folgenden Fragestellungen:

- Welche Last-Zeit-Verläufe (Flugtypen) sind geeignet für die Anwendung der aktiven Lock-In Thermographie?
- Haben Temperaturunterschiede in der Prüfhalle durch Tag-Nacht-Zyklen bzw. veränderliche Prüflingstemperatur Einfluss auf das Messergebnis?
- Ist ein automatisierter Einsatz für große Strukturen möglich?
- Ist das Messverfahren geeignet für beschichtete Großstrukturen?

Das Kamerasystem wurde für die Messungen am Testgerüst angebracht und machte somit die Bewegungen des Prüflings nicht mit. Damit sollte untersucht werden, ob die damit auftretenden Relativverschiebungen der Messstelle gegenüber dem Kamerasystem Einfluss auf die Auswertbarkeit des Schadensbildes hat.

In den Aufnahmen der Auswertung dieser Langzeitmessung sind neben den Nieten und dem applizierten DMS mit Anschlusskabel noch verschiedene Aufkleber mit Beschriftungen zu erkennen. Der Riss selbst ist nicht zu erkennen, jedoch zeigen sich insbesondere in den Bildern des D-Modus deutlich die Wärmepole an den Rissspitzen. Hierdurch ist die Ausdehnung des Risses, auch ohne direkt sichtbaren Riss, sehr genau bestimmbar. Die aktive Lock-In-Thermographie zeigte sich somit als mögliches Messsystem zur Schadensverfolgung an Großstrukturversuchen. Zur serienreifen Anwendung sind jedoch noch weitere Entwicklungsschritte gerade bei der automatisierten Schadensauswertung nötig.

AP 3000 Effizienzsteigerung der Qualifikation von Flugzeugmustern

AP 3100 Konzeption und Planung

Die Arbeiten zur Effizienzsteigerung der Qualifikation von Flugzeugmustern wurden beispielhaft an dem zur Validierung zur Verfügung stehenden Lebensdauerversuch mit dem Airbus A400M durchgeführt. Daher mussten die generellen Testanforderungen dieses Versuches entsprechend analysiert und für das Technologievorhaben aufbereitet und umgesetzt werden.

Der Versuch wurde mit einer Flugzeug-Gesamtzelle durchgeführt, wobei folgende Strukturteile durch Dummies ersetzt waren:

- Haupt- und Bugfahrwerk
- Engine Pylon
- Landeklappen

Weitere Herausforderungen waren die Einbeziehung der Laderampe und des Ladetores in das Prüfobjekt und deren Betätigung und Belastung während des Lebensdauertests, sowie die Innendruckbelastung des Rumpfes.

Zur Simulation der komplexen Belastungszustände des Flugzeuges während der Lebensdauersimulation und der statischen Messungen wurde eine hydraulische Belastungsanlage, bestehend aus 97 Hydraulikzylindern konzipiert. Zusätzlich werden 2 Original Prüflingsaktuatoren inklusive ihrer Originalversorgung eingesetzt, welche die Laderampe während der Flugsimulation öffnen und schließen. In der folgenden Tabelle sind die wichtigsten Belastungsdaten und Definitionen der Belastungszylinder dargestellt.

Die Verteilung der Lasten von den Hydraulikzylindern in die Teststruktur (Rumpf, Flügel, Leitwerk, Fahrwerke, etc.) erfolgte mit zum Teil sehr komplexen Lastgeschirren.

Die statisch bestimmte Lagerung des Prüflings im Versuchsaufbau erfolgte mit Hilfe von 6 Pendelstützen. Diese Pendelstützen sind ebenfalls Teil des Belastungssystems, sie sind jedoch passiv und mit einem Kraftaufnehmer ausgerüstet.

Das Testobjekt wurde in 3 Einzelsektionen (Rumpfnasensektion, Rumpfmittelsektion& heck und Flügel) angeliefert und musste in den Versuchsaufbau integriert und dort auch endmontiert werden.

Aufgrund der räumlich engen Platzverhältnisse in der Testhalle war im Vorlauf die Erstellung eines detaillierten Bewegungsmodells zur kollisionsfreien Planung des Einbaus von Rumpf und Flügel in den Testaufbau erforderlich.

Ziel des experimentellen Lebensdauernachweises war die Simulation von 2,5 Leben. Das Belastungsprogramm war ein Flight-by-Flight Programm und deckte die späteren typischen Einsatzmissionen des Flugzeuges ab.

Alle Einzelschritte der Konzeption und Planung sowie der hierauf folgenden technischen Umsetzung des Großstrukturversuches wurden systematisch auf Effizienzsteigerungspotentiale hin analysiert, entsprechende Verbesserungsmethoden entwickelt und die dafür erforderlichen Arbeitsschritte umgesetzt. Die wesentlichen Zielsetzungen waren hierbei im Aufbau und in der Nutzung Aufwände und Kosten zu sparen, sowie die technologische Leistungsfähigkeit bzw. Innovation zu verbessern.

Folgende Punkte wurden aufgegriffen und bearbeitet, die gemäß der Zielrichtung des Vorhabens zu methodischen Verbesserungen und Effizienzsteigerungen führten

1. Aufteilung von Detailkonstruktion, Berechnung, Fertigung und Aufbau des Versuchengerüsts auf Basis des IABG-Vorentwurfs (mit teilweise neu entwickelten numerischen Tools) auf mehrere Lieferanten (Preis-Leistungs-Optimierung) mit entsprechendem

Ausbau des notwendigen Schnittstellenmanagements. Die Vergabe erfolgte schließlich an zwei Unterauftragnehmer gesplittet in Belastungsgerüst sowie Lasteinleitungsschirre und Dummies.

In der Konzeptphase wurde ein neues Auslegungstool zur Erstellung von Lasteinleitungskonzepten entwickelt, um durch Standardisierung die Effizienz zu steigern und die erstellten Lasteinleitungen einheitlich zu visualisieren. Damit konnten frühzeitig die Interaktionen, wie zum Beispiel Freigängigkeit, mit anderen Gewerken geprüft und gegebenenfalls schnell reagiert werden. Dieses Excel-Berechnungsmodell wurde entwickelt, um den Anforderungen in Bezug auf u.a. Lasthöhe, Lastrichtung, Schnittstellen und Lastverteilung gerecht zu werden. Nach einem standardisierten Prozess wird das Lastgeschirr vorausgelegt. Die computergestützte Vordimensionierung umfasst eine Stabwerksrechnung, die entsprechend der Last und Geometrie unter Verwendung von Standardprofilen erfolgt, eine Massenermittlung, sowie eine Visualisierung des Lasteinleitungssystems.

Abschließend wird die Schnittstelle zum CAD System CATIA verwendet. Dort können mit den importierten Modelldaten im Gesamtsystem des Versuchsaufbaus noch weitergehende Untersuchungen, wie z.B. Kollisionsuntersuchungen und Konzeptoptimierungen, durchgeführt werden. Eventuelle Modifikationen, z.B. Änderung der Lasten oder Geometrien, müssen nicht aufwendig im CAD System durchgeführt werden, sondern können im parametrisierten Tool eingegeben und schnell analysiert werden. Durch dieses Berechnungsmodell wird der Aufwand für die Konzepterstellung und die spätere Ausführung erheblich reduziert und es werden Fehler bei Auslegung und Änderungen deutlich minimiert.

2. Methodisch verbesserte Auslegung der Schnittstellen zwischen Lasteinleitungsdummies und der Original-Teststruktur zur Vermeidung von Schäden an der Lasteinleitung und zur Aufwandsreduktion (CAD&FEM-Analysen, Betriebsfestigkeitsanalysen). Typische Beispiele hierfür sind die VTP & MLG Lasteinleitungsanschlüsse.

3. Optimierung zwischen Masse und Konstruktions- sowie Fertigungsaufwand bei den Lasteinleitungsstrukturen mit der Zielrichtung, die Massen im Hinblick auf Probleme bei der Lastreproduktion zu minimieren und die Energiebilanz zu verbessern, Beispiel hierfür sind die Topologie optimierten Konstruktionen der Pylondummies.

4. Analyse der technischen Möglichkeiten zur Einleitung mehrerer Lasten simultan über einen Teststrukturpunkt zur Optimierung der Simulation von Leitwerkslasten. Dieser Punkt stellte eine besondere Herausforderung dar, aufgrund der hohen Lasten, engen geometrischen Verhältnisse und der Einbausituation.

5. Aufwandsreduktion durch Integration von Flugzeug-Aktuatoren bei der Lastsimulation. Hier bot sich die Möglichkeit der Verwendung der zwei Originalaktuatoren für die Betätigung der Laderampe an.

6. Optimierung der X-Lastsimulation in Bezug auf Realitätsnähe und Aufwand, speziell um eine gleichmäßige Verteilung der Lasten über das Flugzeugdeck, aufgrund der hier wirkenden hohen Massenkräfte aus der Beladung des Flugzeuges zu erreichen.

7. Lösungskonzepte für spezielle Teststrukturkomponenten (Laderampe). Im Falle der Laderampe besteht die besondere Herausforderung, je nach simuliertem Flugsegment, die Rampe im laufenden Versuch zu öffnen und zu schließen.

Zur Innendrucksimulation wurde ein System zur Volumenreduktion mit Hilfe einer genauen CAD Analyse, inkl. Betrachtung des Ein- und Ausfahrvorganges in den Rumpf entwickelt und optimiert.

Diese Volumenreduktionswagen können nachdem sie durch die Frachtrampe reingezogen wurden, nachträglich im Rumpf auseinandergefahren werden um maximal das Volumen auszufüllen. Durch das Einbringen der Volumenreduktion konnten ein erheblicher Anteil der Energieeinsparung bei der Erzeugung von Druckluft erreicht werden und die Bedruckungszeit des Prüflings deutlich reduziert werden. Dies ermöglichte eine höhere Versuchsgeschwindigkeit.

AP 3200 Umsetzung

Konstruktionsphase

Mit Abschluss der Konzept- und Planungsphase erfolgte die technische Umsetzung aller vorausgegangenen Untersuchungen und Festlegungen. In der Konstruktionsphase erfolgte die Detailkonstruktion und Berechnung / Nachweis der Gerüstkomponenten, Lastgeschirre und Dummies unter Beachtung aller Komponenten eines Versuchsaufbaus und im Hinblick auf Standardisierung, Einsatzsicherheit, kostengünstige Herstellbarkeit, effizienten Materialeinsatz und Automatisierungsmöglichkeiten.

Die Auswahl verschiedener Lieferanten für die einzelnen Komponenten Belastungsgerüst, Lastgeschirre und Dummies führten u. a. zu einer Reduzierung der Kosten. Diese erstellten die Detailkonstruktionen, Berechnungen und Nachweise auf der Basis der CAD Vorentwürfe. Weiterhin die zur Fertigung notwendigen Unterlagen, für den rechnerischen Nachweis der Festigkeit und weiterer Anforderungen, wie z.B. der statischen Bestimmtheit. Dabei wurde von allen Beteiligten ein festgelegtes Release des CAD Systems verwendet, um den Datenaustausch zu standardisieren und sicherer zu gestalten.

Die Ausführung des Hauptfahrwerksdummies (MLG) gestaltete sich sehr komplex, da die Geometrie und Lagerung des originalen Fahrwerks weitestgehend abgebildet hat und die Einleitung aller im Betrieb auftretenden Kräfte berücksichtigt werden musste.

Während der Konstruktionsphase wurde darauf geachtet sich wiederholende Teile und Baugruppen zu standardisieren und somit die Aufwände bei Detailkonstruktion und Nachweis zu reduzieren. Dies kam insbesondere bei den Rumpflastgeschirren zur Anwendung.

Im Bereich der Schnittstellen insbesondere zum Prüfling wurde die Nachweisführung optimiert, indem die analytischen Methoden durch numerische Berechnungen validiert wurden (Roloff Matek/ Bolzenkontaktrechnung). Hierdurch konnte teilweise auf die aufwendige numerische Berechnung verzichtet werden.

Durch die Verwendung des einheitlichen CAD Systems konnte die Prüfung der gelieferten Konstruktion im Gesamtbild aller Gewerke (Freigängigkeit / Montageablauf) effizient durchgeführt werden. Dabei konnten eventuelle Kollisionen erkannt und behoben sowie Montageabläufe geprüft werden.

Die Verbindung zwischen Flugzeugflügel und den Flügellastgeschirren wurde durch geklebte Elastomerklotze hergestellt, da dort keine diskreten Punkte vorhanden sind und die Lasten möglichst großflächig in die Struktur eingeleitet werden sollen. Da sich Flügelgeometrie und Material bei verschiedenen Flugzeugmustern unterscheiden, wurde eine universelle Klebevorrichtung zur Realisierung von verschiedenen Konfigurationen benutzt. Das ermöglicht dem Flugzeughersteller die nahezu freie Positionierung dieser Lastangriffspunkte am Flügel und der IABG die schnelle Umsetzung dieser Klebung.

Zur Anpassung der für die Klebung notwendigen Schablonen mit deren Hilfe die Positionen am Flügel exakt markiert werden und anschließend die Klebevorrichtung eingerichtet wird, wurde auf eine parametrische Konstruktionsweise im CAD zurückgegriffen. Damit können die Anforderungen durch Import der Schnittstellenkoordinaten schnell für jede einzelne Klotzgruppe umgesetzt werden. Das wiederum verringert den Aufwand der Konstruktion erheblich, gerade weil viele verschiedene Schablonen erstellt werden müssen.

Fertigungsphase

In der Fertigungsphase lag das Augenmerk auf einer qualitätsgesicherten Fertigung mit einer exakten Termin- und Kostenkontrolle. Dies erforderte eine sehr detaillierte Planung mit der Möglichkeit einer schnellen Reaktion und Umsteuerung im Falle von Termin- oder Qualitätsproblemen.

Aufbauphase

Parallel zur Fertigungsphase wurde nach einem detaillierten Aufbau- und Flächenmanagementplan mit der Installation des Versuchsaufbaus begonnen. Nach dem vorab festgelegten Teilaufbau-Szenario wurde der Prüfling angeliefert. Hier wurden die Randbedingungen des installierten Versuchsaufbaus und der jeweils gelieferten Prüflingsteile berücksichtigt. Durch diese exakte Vorplanung der Bewegungsabläufe wurde der Prüfling kollisionsfrei und sicher mittels Hallen- und Mobilkran in den Versuchsaufbau integriert.

Im Anschluss wurde die Endmontage durchgeführt. Nach erfolgter Prüflingsendmontage konnten alle Lastgeschirre, Dummies und restliche Gerüstkomponenten installiert und der Versuchsaufbau durch Installation aller Versuchsanlagen, wie z.B. der hydraulischen und pneumatischen Belastungsanlage, der Steuerungs- und Regelungsanlage und der Messanlage, abgeschlossen werden. Für die gesamte Aufbauphase wurde eine detaillierte Termin- / Ablaufplanung durchgeführt. Diese Planung wurde durch die Nutzung von Tools zur Ermittlung des jeweiligen kritischen Pfades und zur schnellen Anpassung von Umplanungen erstellt und umgesetzt.

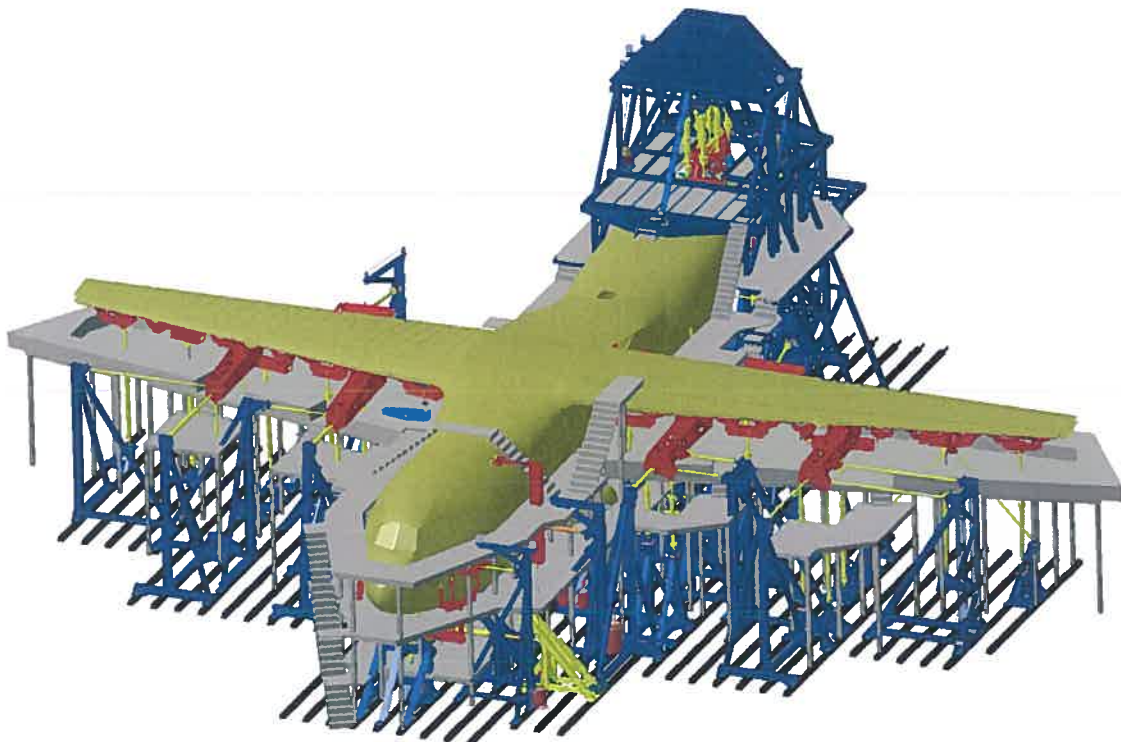


Bild 2: Schematischer Versuchsaufbau des Validierungsversuchs

Inbetriebnahmephase

Nach erfolgter Versuchsaufbauphase wurde mit der Inbetriebnahme des Validierungsversuchs begonnen. Nach dieser festgelegten Prozedur wurde mit den Inbetriebnahmen der einzelnen Teilsysteme begonnen, mit dem Ziel die geplante Effizienzsteigerung zu erreichen und manuelle Einzelschritte weiter zu automatisieren.

Zu Beginn steht eine genaue Prüfung aller Hydraulikzylinder hinsichtlich elektrischer und hydraulischer Funktion. Hierzu wird jeder Zylinder manuell gefahren und dabei die Zylinderausfahrtrichtung mit dem Steuerungssignal verglichen und so die korrekte Richtung des Kraftvektors und Zuordnung innerhalb der Steuerungsanlage sichergestellt.

Für die spätere Ermittlung der dynamischen Leistungsfähigkeit des pneumatischen Bedruckungssystems werden vorab Druckluftleckagen am Prüfling gesucht und abgedichtet.

Bei dem darauffolgenden Drucktest wird das Pneumatiksystem mit maximalem Prüflingsinnendruck gefahren und die Einstellungen der Hauptklappen kann unter Druck aufgezeichnet und später analysiert werden. Bei diesem Test werden erste Ergebnisse bezüglich der Leistungsfähigkeit der pneumatischen Belastungsanlage ermittelt und die Energieeinsparung durch die optimierte Volumenreduktion kann abgeschätzt werden.

Während der Drucktests werden auch Parameter ermittelt, die für die Überprüfung des mathematischen Modells des Versuchsaufbaus benötigt werden. Diese dienen später der Optimierung der zeitlichen Abfolge des Belastungsprogramms.

Vor der anschließenden Inbetriebnahme des Hydrauliksystems werden die mechanischen Lastbegrenzer der Hydraulikzylinder eingestellt. Die Einstellwerte werden so gewählt, dass einerseits die Prüflingsstruktur vor Fehlbelastung geschützt wird und andererseits trotz reduzierter Belastung die Regelungsparameter der Hydraulikzylinder angepasst werden können.

Beim erstmaligen Fahren der Zylinder werden die gemessenen Zylinderparameter mit den numerisch ermittelten Werten verglichen und durch Rückspielen in das Modell den tatsächlichen Randbedingungen angepasst. Dies kann zum Beispiel notwendig sein bei komplex verrohrten Zylindern und separat installierten Hydraulikblöcken, welche im mathematischen Modell nicht genau abgebildet wurden.

Mit dem angepassten Modell werden simulativ die hydraulischen Drosselventilvorgaben ermittelt, welche für den Notentlastungsvorgang des Prüflings benötigt werden. Das verwendete Modell ermöglicht eine zügige und strukturierte Einstellung aller 97 Drosselventile und die Simulation der erzeugten Kräfte auf die Prüflingsstruktur. Anschließend können die Ergebnisse experimentell durch gleichzeitiges Abschalten aller Hydraulikzylinder im belasteten Zustand mit steigender Intensität verifiziert werden. Dies führt zu einer prüflingsschonenden und effizienten Einstellung der Ventile.

Für die weitere Anpassung des numerischen Modells werden die Kolbenspeicher in Betrieb genommen und optimiert. Die Ergebnisse werden im numerischen Modell eingepflegt und bilden die Basis für die spätere dynamische Inbetriebnahme. Hierbei werden die zeitlichen Parameter des Belastungsprogramms hinsichtlich Geschwindigkeit und Energieeinsparung angepasst. In diesem Zusammenhang sorgt der Kolbenspeicher mit seinem Rechenmodell für ausreichende Reserven bei Spitzenlasten.



Bild 3: Pumpenanlage

Das Rechentool ermittelt den maximal notwendigen Grundbedarf an Hydrauliköl, welches von den relativ trägen Pumpen geliefert wird und berücksichtigt hierbei die zur Verfügung stehende Ölmenge in den Kolbenspeichern bei Lastspitzen, z.B. Lastfällen mit großen Amplituden und Kräften. Die Berechnung ermittelt auch die im Anschluss notwendige Zeit zum wiederbefüllen der Kolbenspeicher. Durch die Verwendung von Kolbenspeichern und Simulation der fluiden Prozesse werden Kapazitätseinsparungen von bis zu 30% - 40% gegenüber Systemen ohne Kolbenspeicher & Simulationsmodell bei identischer durchschnittlicher Versuchsgeschwindigkeit erreicht.

Vor Start des Ermüdungsprogramms werden die zu erwartenden Auslegungsspannungen des Prüflings mit den experimentellen Messergebnissen verglichen. Hierzu wird eine umfangreiche Messkampagne gestartet in der hunderte von Messungen mit über 3.600 Dehnmessstreifen aufgezeichnet werden. Hierbei werden neben Ermüdungslasten auch statische Lastfälle gefahren, die mit anderen Versuchen und Berechnungsergebnissen verglichen werden. Dies wird aufgrund der notwendigen Detailkenntnisse und Ressourcen von den Bauteilverantwortlichen selbst übernommen.

Mit Abschluss der Messungen und positiver Rückmeldung bezüglich der Ergebnisse ist die Inbetriebnahmephase erfolgreich abgeschlossen. Für zukünftige Anwendungen sind weitergehende Automatisierungen der Regloptimierung angedacht und mit dem Aufbau einer fortschrittlichen Messstellendatenbank zwecks Automatisierung der Konfiguration des Messrechners mit den Messstellendaten verbunden. Diese Entwicklungen bieten zukünftig Potential für die bessere Ausnutzung von Ressourcen.

Belastungskontrolle & Lastsimulationsphase

Nach erfolgreichem Abschluss der Inbetriebnahme konnte mit der Lastsimulationsphase, d.h. mit dem eigentlichen Versuchsbetrieb begonnen werden. Ziel war eine möglichst schnelle und genaue Lastsimulation. Hierzu waren in der Anfangsphase des Versuches weitere Optimierungen und Anpassung des Belastungsprogramms an die Versuchsrandbedingungen erforderlich.

Bei der Optimierung der Versuchsgeschwindigkeit wurden bei der SRÜ-Anlage Anpassungen erforderlich, da in bestimmten Lastsegmenten der Laständerungsgradient zu steil oder zu flach war. Die Regelparameter und Zeitvorgaben wurden daher neu berechnet, auf den Steuerrechner übertragen und erprobt. Dieser Schritt ist in der Regel mehrmals notwendig um letztlich ein Optimum bezüglich Geschwindigkeit und Genauigkeit bei der Lastreproduktion zu erreichen. Für diese Optimierung sind spezielle numerische Tools erforderlich, die von der IABG entwickelt wurden und bei dem Versuch zum Einsatz kamen. Diese Tools wurden weiter ausgebaut um in möglichst kurzer Zeit die Optimierungsschritte effizient abschließen (Aufwandseinsparungen) zu können.

Um die hohen Anforderungen bei der dynamischen Nachfahrgenauigkeit der Zylinder gewährleisten und überwachen zu können werden vielfältige Überwachungsgrenzen eingesetzt. Diese unterscheiden sich nach relativen und absoluten Grenzen und dienen der Überwachung. Nach Analyse der Daten können die Abweichungen bewertet und gegeben falls durch erweiterte Regleroptimierung, mechanische Anpassungen oder sonstige Methoden behoben werden.

Ein weiterer wichtiger Punkt in der Lastsimulationsphase war die Optimierung der Betätigung und Belastung der Laderampe und des Ladetors. In jedem Flug müssen beide Bauteile mindestens einmal geöffnet und geschlossen werden. Dieser Vorgang parallel zur Lastsimulation des Gesamtflugzeuges stellte eine zusätzliche Herausforderung dar, da die Öffnungs- und Schließvorgänge absolut sicher und gemäß Spezifikationen (Schließgeschwindigkeit, Verriegelung, Überwachung, etc.) durchgeführt werden müssen.

Letztlich führten die geschilderten Optimierungen zu Zeit- und Energieeinsparungen und lieferten den gewünschten Beitrag zur Effizienzsteigerung bei der Qualifikation von Flugzeugmustern.

In der Versuchsdurchführungsphase zeigte sich auch ein weiteres Effizienzsteigerungspotential bei der Pneumatikversorgung für die Innendrucksimulation im Rumpf.

Unterstützt durch numerische Simulationen wurden die Druckniveaus in den Luftkesseln und dem Pneumatikkreis analysiert und neu eingestellt um mit möglichst wenig Energie die Drucksimulation im Rumpf genau und schnell durchzuführen. Dieser Schritt brachte eine nicht unerhebliche Energieeinsparung.

Der Versuch selbst, läuft vollautomatisiert im 24-Stunden-Betrieb. Lediglich eine Person befindet sich in der Steuerkabine in Bereitschaft, um bei Störungen oder sonstigen Ereignissen entsprechende Maßnahmen einzuleiten. Unterstützt wird diese Bereitschaft durch eine Videoüberwachung speziell im Bereich der Laderampe und des Ladetors sowie an frei wählbaren Punkten an der Teststruktur, z.B. zur Schadensfrüherkennung oder zur Schadensbeobachtung.

Während des laufenden Versuches werden die zur Verfolgung der Belastungen und Aktionen gemessenen Lastdaten (Sollwert, Istwert, Ventilstrom, Überwachungs-DMS) kontinuierlich für eine bestimmte Zeitdauer in einem Überlaufspeicher erfasst. Somit besteht die Möglichkeit bei Bedarf bestimmte Überprüfungen nachträglich durchzuführen. Zusätzlich zu diesem Tool wird noch eine so genannte Not-aus-Schleife eingesetzt. Dieses Tool erfasst alle Versuchsdaten eine Zeit lang vor und nach einem Not-aus und ermöglicht somit die Suche nach der Ursache eines Notausfall. Alle sonstigen Aktionen (z.B. manuelle Stopps, Sonderinspektionen) werden im Steuerrechner protokolliert. Alle diese Daten werden kontinuierlich ausgewertet und im Bedarfsfall entsprechende Maßnahmen eingeleitet um einen störungsfreien Versuchsbetrieb zu gewährleisten.

Nach Abschluss der Optimierungen werden die statischen und die dynamischen Strukturantworten gemessen und verglichen. Dies dient zur Verifikation der Qualität der Lasteinleitung bei maximaler Geschwindigkeit. Da vereinzelt ein Zylinderverbund trotz guter Einzelergebnisse in Summe eine Abweichung erzeugen kann, ist eine solche Untersuchung notwendig um die gemessenen statischen Strukturantworten mit den Ermüdungsereignissen in Einklang zu bringen und keine Fehlinterpretationen zu ermöglichen.

Diese Messungen werden hochfrequent durchgeführt und mit weit über einhundert Messkanälen bis zu mehrere Stunden aufgezeichnet. Für die Extraktion und Interpretation dieser umfangreichen Daten wurden von der IABG komplexe Programme mit der Signalverarbeitungssoftware (FAMOS) geschrieben. Die Messdaten können anschließend in anderen Tools weiterverarbeitet werden. Die hierdurch generierten Daten sind Lastfallbezogen und werden mit den IABG Tools halbautomatisch bewertet. So können schnell Abweichungen festgestellt und analysiert werden. Mit den Ergebnissen kann das mathematische Modell zwecks Verbesserung der Sollwertvorgaben optimiert werden.

Abschlussphase

Der Validierungsversuch wird noch weit über das Ende des Technologievorhabens hinaus laufen. Die im Rahmen des Vorhabens entwickelten und validierten Technologien und Tools werden bei dieser Fortsetzung mit gewissen Anpassungen weiter zur Verwertung kommen.

Ein spezieller Rückbau von Anlagen oder Tools ist daher, bis auf wenige Ausnahmen, nicht erforderlich. Alle Ergebnisse des Vorhabens wurden in einer umfangreichen internen technischen Dokumentation festgehalten und stehen für weitere Verwertungen im Rahmen anderer Strukturtests an Flugzeugen, unmittelbar oder später, zur Verfügung.

AP 3300 Validierung

In den vorherigen Kapiteln sind die technischen Details der untersuchten Effizienzsteigerungspotentiale näher erläutert. Im Rahmen des für die Validierung zur Verfügung stehenden A400M Gesamtzellenermüdungsversuchs konnten alle Potentiale einer Prüfung und Optimierung unterzogen werden. Die Validierungsuntersuchungen und sonstigen Entwicklungen führten insgesamt zu einem sehr positiven Gesamtergebnis. Generell kann festgestellt werden, dass Tools und Verfahren neu- oder weiterentwickelt wurden, die zu einer Leistungs- und Qualitätssteigerung bei der Qualifikation von Flugzeugmustern führten, und Aufwands- und Kosteneinsparungspotentiale aufzeigten.

Hierzu einige Beispiele von Rechenmodellen, Verfahren und Tools die letztlich zu einer Steigerung der Versuchsqualität (Genauigkeit, Geschwindigkeit, Aussagefähigkeit) und Aufwandsreduktionen (durch Steigerung der Versuchsgeschwindigkeit, Fehlerreduktion und weniger Nacharbeiten) führten:

- Rechen- und CAD-Modelle zur optimierten Auslegung der Versuchsgerüste, Lastgeschirre und Dummies
- Rechenmodelle zur (FEM- und MKS-Modelle) zur Ermittlung und Optimierung der Regelparameter
- Modelle und Tools zur Versuchssteuerung und Überwachung
- Modelle und Tools zur schnellen online Messdatenerfassung und Auswertung
- Tools zur Erfassung, Dokumentation und Bewertung von Inspektionsergebnissen und Schäden an der Testzelle
- Tools für die Planung komplexer Bewegungsvorgänge beim Gerüstaufbau und Prüflingsmontage bzw. Demontage

Alle Entwicklungsschritte und Ergebnisse wurden kontinuierlich erfasst und in entsprechenden technischen Dokumentationen festgehalten.

AP 3400 Weiterentwicklung von Verfahren

1. Automatische Anpassung der Ventil-Vorsteuerung bei den Belastungszylindern

Es wurden Messungen eines laufenden Strukturversuchs hinsichtlich der Abweichungen der Ventil-Aufschaltspannung von der ausgeregelten Spannung analysiert.

Mit den daraus abgeleiteten Kriterien für die zu modifizierenden Kraftkopplungen verschiedener servo-hydraulischer Zylinder wurde ein Algorithmus entwickelt, der es ermöglicht, die Kopplungen so zu modifizieren, dass die Differenz zwischen Aufschaltspannung und ausgeregelter Spannung in Abhängigkeit gegebener Parameter minimiert wird. Anschließend wurde für ausgewählte Zylinder die Kraftkopplung mit Hilfe des entwickelten Algorithmus' modifiziert. Nachfolgend wurden die Differenzen zwischen den gemessenen Kräften und den Soll-Kräften, normiert auf die Referenzkraft des jeweiligen Hydraulikzylinders vor bzw. nach der Optimierung verglichen. Die so normierten Differenzkräfte zeigen hinsichtlich der Mittelwerte, der Standardabweichungen und insbesondere hinsichtlich der maximalen Kraftabweichungen signifikante Verbesserungen.

Die Anwendung einer weiteren Optimierungsiteration auf die bereits einmal optimierten Kopplungen zeigt, dass eine weitere Optimierung nicht mehr nötig ist, d.h. das relative Optimum ist bereits nach dem ersten Iterationsschritt erreicht.

2. Untersuchung zur Verbesserung der Belastungserfassung durch Signalbündelung im Umkreis der Messstellen

A. Ausgangslage:

Die bisherigen Leistungseckdaten der Belastungserfassung waren dadurch charakterisiert, dass eine gleichzeitige Erfassung von 7.000 Kanälen nachgewiesen werden konnte.

Allerdings wirkten sich die unterschiedlichen Phasen- und Frequenzgänge der Filter von verschiedenen Messketten (z.B. Dehnungsmessstellen und Belastungskräfte) bisher begrenzend für eine (quasi-) kontinuierliche Datenerfassung aus, d. h. für verschiedene Messketten wurden verschiedene Signallaufzeiten und Amplitudengänge registriert.

Neben den reinen Filterlaufzeiten mussten zusätzlich die Laufzeiten bei der Übertragung der Messdaten auf dem CAN-Bus berücksichtigt werden:

Einschränkungen für die quasikontinuierliche Datenerfassung bei Anwendungen mit gemischt dezentraler (Messköpfe) und zentraler Datenerfassung (Kräfte) bestanden also im Wesentlichen an folgenden Brennpunkten:

- Unterschiedlicher Frequenzgang der Amplitude
- Unterschiedliche Signallaufzeiten durch Filter und CAN-Bus

Die erfolgreiche Behebung dieser Einschränkungen ist in „C. Ergebnisse“ dargelegt.

B. Durchführung:

Im ersten Schritt wurden erforderliche Modifikationsmaßnahmen im eingesetzten Messdatenerfassungssystem zur Anpassung der Signalverarbeitung aller eingesetzten Verstärkertypen definiert.

Ziel dieser Modifikation war die Gewinnung einer Abtastrate und Filterkonfiguration, für die die Signalverarbeitung (dominant die Signalfilterung) aller beteiligten Messketten möglichst identische Phasen- und Frequenzgänge aufweist. Die im Wesentlichen Firmware- und Software betreffenden Modifikationen wurden bereitgestellt. Hierzu gehörten modifizierte Filteralgorithmen und Laufzeitverzögerungen zur Anpassung des individuellen Verhaltens der verschiedenen Messverstärker-Typen. Zu einer ersten Validierung wurden diese modifizierten Firmware- und Softwarestände in das Messdatenerfassungssystem an einem Großstrukturversuch implementiert.

Im zweiten Halbjahr 2010 waren nunmehr die messtechnischen Voraussetzungen gegeben, an einem bestehenden Großversuch ca. 7.000 Messkanäle gleichzeitig mit einer höheren Abtastrate synchron zu erfassen. Jedoch musste wegen eines Versuchsstillstands die diesbezügliche Messung bis zur nächsten aktiven Versuchsphase verschoben werden. Anfang 2011 konnte diese dann durchgeführt und die Optimierungen verifiziert werden. Die simultane und amplitudenrichtige Erfassung wurde hierbei nachgewiesen.

Bei einem anderen Großstrukturversuch wurden ca. 4.000 Messkanäle installiert und in Betrieb genommen. Zur Untersuchung von Messungen mit noch höheren Abtastraten musste neben der Firm- und Software auch die Hardware modifiziert werden. Für die Untersuchung wurden ca. 50% der Messkanäle derart ausgerüstet, dass eine sehr hohe Abtastrate realisiert werden konnte.

C. Ergebnisse:

Es konnte nachgewiesen werden, dass durch eine Anpassung der vorhandenen Messanlage sowohl auf der Seite der Hardware, als auch auf der Seite der Firmware beide interessierenden Gruppen von Messkanälen in der Lage sind, Daten mit einer mittleren Abtastrate synchron zu erfassen. Die erfolgreiche Verifikation zeigte nun, dass die unter A. beschriebenen Einschränkungen (unterschiedliche Frequenzgänge und Signallaufzeiten) auf ein Minimum reduziert werden konnten und damit für die Messgenauigkeit keine Rolle mehr spielen.

Die Gesamtzahl der Messkanäle betrug bei dem zur Verifikation genutzten Versuch rund 7.000. Bei einem anderen Großstrukturversuch mit rund 4.000 Messkanälen wurde beim Lieferanten eine Erhöhung der Abtastrate auf das vereinbarte sehr hohe Niveau beauftragt. Die grundsätzliche Funktion wurde an einzelnen Messkanälen nachgewiesen. Es ist davon auszugehen, dass damit die Funktionalität bei allen Messkanälen erreicht wird.

Eine vollständige Verifikation konnte bis zum Berichtsabschluss noch nicht erfolgen, da der Prüfling aufgrund von Testunterbrechungen nicht zur Verfügung stand.

3. Modellgestützte Abbildung der Innendrucksimulation zur Verbesserung der Simulation der Druckdifferenz im Versuchsablauf

Das neu entstandene Simulationsmodell wurde anhand folgender Untersuchungen erfolgreich angewendet:

- Ermitteln der Zeiten für die Befüll- und Entleervorgänge mit unterschiedlichen Sollvorgaben für die Druckgradienten und Gegenüberstellung der Abweichung der Soll- und Istwerte für die Befüllzeiten und die Zelleninnendrucke;
- Auswirkung der Verringerung des effektiven Zellenvolumens durch Einbringen von Styroporblöcken (Volumenreduktion) auf die Befüll- und Entleerzeiten;

- Auswirkung der Änderung des Durchmessers der Hochdruckleitung vom Kessel zum Einlassventil auf die Befüllzeiten;
- Auswirkung der Verwendung von Schalldämpfern nach den Einlass- bzw. Auslassventilen auf die Befüll- und Entleerzeiten;

Die so ermittelten Befüll- und Entleerzeiten finden unmittelbar Anwendung in der Flugprofiloptimierung.

In der Validierung wird ein gemessener Zelleninnendruck einem simulierten Zelleninnendruck gegenübergestellt. Simulation und Messung zeigen eine sehr gute Übereinstimmung.

Weiterhin wurden verschiedene Störfälle der Pneumatikanlage hinsichtlich des Versagens der Ein- bzw. Auslassventile simuliert. Die berechneten Verläufe des Zelleninnendrucks zeigen, dass zu keinem Zeitpunkt die Gefahr einer Überschreitung des maximalen Zelleninnendrucks besteht, solange zumindest eins von zwei vorhandenen Auslassventilen funktionsfähig bleibt. Dieses Ergebnis ist besonders wichtig für die erfolgreiche CE-Zertifizierung des Prüfstandes. Die Ausstattung der IABG-Großversuche erfolgt aus Sicherheitsgründen immer mit mindestens zwei Auslassventilen.

4. Entwicklung eines den Versuchsanforderungen angepassten Führungsgrößenfilters zur Erhöhung der Nachfahrgüte bei erhöhten Lastfolgefrequenzen

Die Analyse der Abweichungen der gemessenen Kraftverläufe und der Sollkraftverläufe zeigen, dass die Laständerungen nicht vollständig synchron verlaufen und somit zwischen den Kraftverläufen der Zylinder unterschiedliche Phasendifferenzen entstehen, welche die Kraftkopplungen beeinflussen. Bei den ersten Versuchen mit einem zylinderselektiven Führungsgrößenfilter stellte sich heraus, dass durch die so generierten Phasenkorrekturen keine für alle Flugphasen durchgehenden Verbesserungen generiert werden konnten. Bei den parallel laufenden Arbeiten zur Optimierung der Ventilvorsteuerung hingegen konnten vielversprechende Gewinne in der Nachfahrgenauigkeit realisiert werden, da in diesem Fall die Kraftkopplungen zwischen den Zylindern in geeigneter Weise modifiziert werden. Aufgrund dessen wurde auf die Validierung des hierbei entwickelten Führungsgrößenfilters zugunsten der vertieften Optimierung der Ventil-Vorsteuerung verzichtet.

AP 4000 Konzept der mobilen modularen Infrastruktur

AP 4000 als Bestandteil der 2. Erweiterung von INREOG umfasste die Planung und Auslegung einer mobilen modularen Testinfrastruktur zur weiteren Effizienzsteigerung bezüglich

- technischer Leistungsfähigkeit,
- Flexibilität und
- Wirtschaftlichkeit

bei der Qualifikation von Flugzeugmustern.

Neben den technischen Anforderungen sind weitere generelle Anforderungen an das Prüfsystem (Betrieb bei ggf. wechselnden klimatischen Bedingungen, Einhaltung von lokalen rechtlichen Rahmenbedingungen, unterschiedliche Eigenschaften der elektrischen Versorgungsnetze usw.) zu berücksichtigen. Diese Ansprüche wurden mittels einer Variantenbetrachtung in ein kosten- und nutzenmäßig optimiertes System umgesetzt. Im Vordergrund der Arbeiten stand hierbei die Auslegung der wichtigsten Komponenten der Versuchsinfrastruktur, bestehend aus Hydraulikversorgung, Pneumatikversorgung, Stromversorgung und dem Strong Floor (steife Unterstruktur mit Ankerschienen zur Lagerung des mechanischen Versuchsaufbaus und der hydraulischen Belastungsanlage). Die Modularität und Mobilität der Testinfrastruktur und die damit verbundene Skalierbarkeit bieten den Vorteil, dass entsprechend der Flugzeuggröße, den Versuchsanforderungen und den Test-Standortkriterien eine effiziente Anpassung möglich ist. Dies führt zu einem Wettbewerbsvorteil gegenüber fest installierten Versuchsanlagen in einem kompakten Testlabor und ermöglicht zugleich die bessere und evtl. schnellere Rückführung der doch erheblichen Investitionen. Es folgt die Beschreibung der durchgeführten Untersuchungen/ Planungen je Systemkomponente.

AP 4100 Hydraulik und Ölversorgung:

Erstellung des Lastenheftes: Das Lastenheft beschreibt die Anforderungen an die mobile Hydraulikversorgung, spezifiziert u.a. die geforderten technischen Parameter, die besonderen Anforderungen bezüglich der Aufstellung im Freien sowie der unterschiedlichen Betriebsarten und ist Basisdokument des Beschaffungsprozesses und der Prüfungen und Abnahmen.

Vergleich der Systemvarianten: Es wurden 5 verschiedene Systemvarianten bzgl. der erzielbaren Wirkungsgrad-Verbesserung gegenüber der Standardkonfiguration (Verstellpumpen im Parallelbetrieb) untersucht:

1. Konventionelles System: Zentrale elektrische Einspeisung, Druckluftbereitstellung und Drucköl-Erzeugung

Analog zu vergleichbaren festinstallierten Anlagen wird eine zentrale Mittelspannungseinspeisung, Blindstromkompensation und Transformation auf Niederspannung für die gesamte Technik (Hydraulik, Kühlung, Pneumatik) vorgesehen. Die Hydraulikölversorgung sowie die Druckluftversorgung sind ebenfalls in jeweils eine Gesamtanlage konzentriert. Dieses Gesamtsystem ist zwar in seiner Leistung regulierbar, jedoch nicht skalierbar und vergleichsweise schlecht zu mobilisieren; einzelne Komponenten sind aus dem Verbund herausgenommen nicht funktionsfähig. Diese Variante wurde lediglich als Norm zur vergleichenden Betrachtung der Wirkungsgrade herangezogen; mit der angestrebten Gesamtfunktionalität innerhalb des Forschungsvorhabens INREOG ist ein derartiger Standard-Aufbau nicht kompatibel.

2a. Teilmodulares System: Zentrale elektrische Einspeisung, dezentrale Hydraulik /Kühlung-Module, zentrale Druckluftversorgung

Die Mittelspannungseinspeisung, die Blindstromkompensation sowie die Transformation auf Niederspannungsniveau werden weiterhin durch eine zentrale Einrichtung übernommen. Die Druckluftversorgung ist ebenfalls bis zur erforderlichen Leistungsgrenze mit einem Modul realisiert.

Die Hydrauliköl-Versorgung mit der erforderlichen Kühlung ist dagegen vollständig modularisiert und in einer Containereinheit untergebracht. Diese Container sind autark, mobil und einfach skalierbar; durch eine entsprechende intelligente Steuerung sind je nach Anwendungsfall mehrere Container im Verbund betreibbar. Die Leistungsregulierung erfolgt zum einen über die Kaskadierung der Container selbst, sowie innerhalb der Module über Verstellpumpen.

2b. Teilmodulares System: wie vor, jedoch mit dezentraler Blindstromkompensation
Wird die Leistungsregulierung der Druckölversorgung über Konstantpumpen und Frequenzumrichter realisiert, bietet sich ebenfalls die Möglichkeit, die Blindstromkompensation über die jeweils in den Hydraulikmodulen vorhandene FU durchzuführen. Ansonsten ist der Aufbau identisch zum im Abschnitt 2a beschriebenen.

3. Vollständig modularisiertes System

Die in 2a und 2b beschriebenen Systeme haben den Nachteil, dass eine örtlich getrennte Aufstellung der Hydraulikcontainer nur begrenzt möglich ist, da nur eine einzelne Vorrichtung zur Mittelstromeinspeisung vorhanden ist. Wird diese ebenfalls gesplittet in Einzelanlagen je Druckölversorgungsanlage, wird eine vollständige Mobilität der Container erreicht; es besteht dabei weiterhin die Möglichkeit, die Leistungsregulierung über Verstellpumpen oder aber über FU zu gewährleisten.

Insbesondere die Kaskadenschaltung von Verstellpumpen erlaubt dabei eine Reduktion des Energiebedarfs um mehr als 10%. Der Einsatz von Frequenzumrichter gesteuerten Konstantpumpen spart lediglich unter 5% ein, bietet jedoch den zusätzlichen Vorteil des möglichen Betriebs der Anlage an allen weltweit vorzufindenden Versorgungsnetzen weitgehend unabhängig von Mittelspannungsniveau und Netzfrequenz, s.a. AP 4400.

Die Mobilitätsanforderung wurde mit der Unterbringung aller notwendigen Komponenten der Aggregate in Standard-Containern realisiert, wofür entsprechende konstruktive Anpassungen entwickelt wurden. Hierdurch ist zur Inbetriebnahme lediglich die Medienversorgung (Elektrik, Kühlung, Drucköl) einzurichten. Zusätzlich wurden Verfahren und Vorrichtungen zur sicheren Lagerung der Komponenten über ggf. mehrere Jahre konzipiert.

Durch die große Menge an Hydrauliköl im System (notwendig zur Einhaltung der zur Entgasung nötigen Verweilzeit in den Haupttanks) wurde ein erweitertes Sicherheitskonzept erforderlich (u.a. Fail Safe - Absperrklappen in den Ausgleichsleitungen, ausreichend dimensionierte Ölwannen je Container).

Zum wartungsfreundlichen Betrieb wurde ein transportabler Gitterrost-Laufgang um alle auf 1 m OKB aufgeständerten Container vorgesehen. Beruhend auf dem BImSchG, TA Lärm wurde eine zur Gewährleistung der Einhaltung des maximal zulässigen Schalldrucks um die Anlage eine entsprechende Einhausung entworfen.

Alle Auslegungsarbeiten wurden erfolgreich abgeschlossen und die Beschaffung einer Anlage aus Eigenmitteln der IABG im 2. Halbjahr 2011 ausgelöst.

Ein kritischer Punkt bei modularen Druckölversorgungen ist die Steuerung z.B. für Lastenausgleichsvorgänge, die bei einem dezentralen Setup komplexer ist als bei herkömmlichen Anlagen. Die hierzu entworfene zentrale Pumpensteuerung erlaubt den Betrieb von mehreren separaten Hydraulikcontainern und erkennt automatisch den gegenwärtigen Ausbauzustand, d. h. die Anzahl und Leistungsdaten der angeschlossenen Module. Die Spezifikation der Steuerungen/Anbindung an die IABG-SRÜ-Anlage beschreibt das Konzept im Detail.

AP 4200 Pneumatik und Luftversorgung:

Zur Belastung des Flugzeugrumpfs ähnlich derjenigen, die ausgelöst wird durch den reduzierten Außendruck auf Reiseflughöhen, wird der Innenraum im Testbetrieb zyklisch mit Druckluft beaufschlagt. Hieraus ergibt sich der spezifizierte Druckluft-Bedarf. Dieser deckt dann die Anforderungen für eine Auswahl an Flugzeugrümpfen bzw. Rumpfsegmenten ab.

Analog zur Drucköl-Versorgung wurde wiederum die modulare Containerbauweise gewählt, wobei sowohl ein autarker als auch konzertierter Betrieb möglich ist. Dies ermöglicht einen kosteneffizienten und skalierbaren Einsatz der Komponenten. Die Planung berücksichtigt weiterhin die Anpassbarkeit des Druckluftversorgungssystems an die Aufstellungsbedingungen an wechselnden Einsatzorten (klimatisch, rechtlich, baulich), insbesondere an umweltschutzrechtliche Vorgaben und Vorschriften.

Zusätzliche technische Ausstattungen, die zur Mobilisierung der Druckluftversorgungen entwickelt und konzipiert wurden, umfassen u.a. staub- und seewasserdichte Absperungen an allen Mediendurchgängen, Transportsicherungen sowie Verfahren und Vorrichtungen zur sicheren dauerhaften Lagerung.

Alle Auslegungsarbeiten wurden erfolgreich abgeschlossen und die Beschaffung einer Anlage aus Eigenmitteln der IABG im 2. Halbjahr 2011 eingeleitet.

AP 4300 Kühlmodul:

Die Kühlmodule (1 Stck. je Hydraulikcontainer) wurden als geschlossene Systeme mit Öl-Wasser-Wärmetauschern und V-Rückkühlern mit optionaler adiabatischer Wassersprühkühlung entworfen. Analog zu den vorhergehenden Anlagenkomponenten wurden auch für die Kühlmodule besondere Vorkehrungen für mögliche Zwischenlagerung / Konservierung projektiert.

Zusätzlich wurde eine Möglichkeit zur Wärmerückgewinnung aus dem Sekundärkreislauf der Kühlanlage geplant und integriert, die ggf. zur Heizung der Prüfhalle genutzt werden kann.

Die Module sind anwendungs- und konstruktionsbedingt wetterfest; deshalb wurde auf den Einbau in einen ISO-Container zu Gunsten einer Stahlgrundrahmen-Konstruktion verzichtet. Das System kann jedoch zum Transport in einen Container verladen werden und stellt somit eine kosteneffektive Lösung dar.

Alle Auslegungsarbeiten wurden erfolgreich abgeschlossen und die Beschaffung einer Anlage aus Eigenmitteln der IABG im 2. Halbjahr 2011 eingeleitet.

AP 4400 Elektrik und Spannungsversorgung

Zur Berücksichtigung wechselnder Einsatzorte, damit unterschiedlicher klimatischer Bedingungen sowie Netzverhältnisse (Mittelspannungsniveau 10/12/20/24 kV, 50 Hz bzw. 60 Hz Netzfrequenz), wurden verschiedene Varianten untersucht.

Insbesondere die Ausrüstung mit Frequenzumformern (entweder als Regeleinrichtung pro Container oder als zentrale Spannungsversorgung) bietet maximale Flexibilität bei gleichzeitiger leichter Erhöhung des Gesamtwirkungsgrades (siehe Abschnitt AP 4100). Alle Komponenten wurden wiederum in Containerbauweise konzipiert.

Beim möglichen Einsatz der Prüf-Infrastruktur in Gebieten mit nicht zuverlässigen Netzverhältnissen und ggf. unbekannter Vorschriftenlage ist optional ein zwischen MS-Einspeisung und Pumpen-Spannungsversorgungen angeordneter Vorschalt-Container entworfen worden, der ausschließlich die für das jeweilige EVU notwendig zugänglichen Komponenten (i. W. eine MS-Schalteinheit) enthält und an dem die Verantwortlichkeit des EVU endet.

Alle Auslegungsarbeiten wurden erfolgreich abgeschlossen und die Beschaffung einer Anlage aus Eigenmitteln der IABG im Jahr 2011 eingeleitet.

AP 4500 Strong Floor:

Konzeption und Definition des Anlagen-Layouts

In der Konzeptphase zur Entwicklung des Spannbodens wurden mehrere Entwürfe für seine Tragstruktur auf ihre Zweckmäßigkeit hin untersucht. Hierbei wurde von wenigen bekannten Daten, die die zu prüfende Struktur betreffen, ausgegangen. Hierzu zählten das Gewicht und die äußeren Abmessungen des Prüflings (Spannweite und Rumpflänge des Flugzeugs, Höhe und Breite von Rumpf und Flügeln) sowie die maximal einzuprägende Last und das daraus abgeleitete Flügelwurzelmoment.

Der Prüfling und die Versuchseinrichtung bestehend u.a. aus Gerüsten, Hydraulikzylindern einschließlich Verrohrungen und Lastgeschirren muss auf dem Spannboden Platz finden. Die Reaktionskräfte der in den Prüfling einzuprägenden Lasten und das Gewicht des Prüfaufbaus samt Prüfling müssen von dem Spannboden aufgenommen werden können. Während die Flugzeuglasten und deren Reaktionskräfte auf den Spannboden in dem Verbund aus Versuchsaufbau, Prüfling und Spannboden einen Eigenspannungszustand bilden, der sich als solcher im Gleichgewicht befindet, werden die Gewichtskräfte an den Unterbau weitergegeben. Der Unterbau kann beim Einbau des Strong Floor in eine bestehende Halle ein vorhandener Hallenboden oder bei Aufstellung im Freien ein vorbereiteter Baugrund sein.

Eine Reihe von Konzeptentwürfen mit Konstruktionen aus Stahl und aus Stahlbeton wurde untersucht. Bis auf den ersten der im Folgenden erläuterten Entwurfsvarianten wurden Berechnungen mit Hilfe der Finite Elemente Methode (FEM) durchgeführt, um die Verformungen des Spannbodens, die Beanspruchungen im Spannboden und die Lasten an der Schnittstelle zum Unterbau zu ermitteln. Die FEM bietet sich an, weil sie in der Lage ist, die Strukturen und ihr Verhalten realitätsnah unter Berücksichtigung vieler Parameter nachzubilden. Insbesondere wird im Zusammenhang mit den Berechnungen am Spannboden das geometrisch nichtlineare Verhalten infolge des Abhebens von seiner Unterlage berücksichtigt, was unter allen Umständen vermieden werden muss.

Variante 1 - Trägerrost

Die Idee für diese Variante fußt darauf, dass prinzipiell auch ein massiver Trägerrost aus Stahl als Basis für den Aufbau des gesamten Versuches dienen könnte.

Es werden gewalzte Stahlträger (HE1000M) in einem Trägerrost angeordnet. Die Stege der Träger sind erhöht, so dass sich eine Gesamtbauteilhöhe von über 1,5 m ergibt.

Der Trägerrost ruht auf zwei Lagerstreifen parallel zur Flugzeuglängsachse im Bereich der Fahrwerke.

Vorgegeben ist ein geschätztes Wurzelbiegemoment im Tragflügel ca. 3m seitlich der Rumpfachse, welches auch vom Trägerrost aufgenommen werden muss.

Dieses wird mit einer zuvor analysierten Anzahl von Trägern abgedeckt. In dieser Abschätzung wird angenommen, dass das Eigengewicht des Trägerrosts und das Gewicht des Prüflings sowie der Lastgeschirre für die Biegebeanspruchung des Trägerrosts vernachlässigbar sind.

Die Momentenlinie des Tragflügels spiegelt sich im Trägerrost wider. Sie hat näherungsweise einen parabelförmigen Verlauf. Die Trägerlängen werden so gewählt, dass die erforderlichen Widerstandsmomente abgedeckt sind.

Die Biegeverformungen zwischen der Trägermitte und dem äußersten Trägerende werden zuvor abgeschätzt. Die Zylinderwege der hydraulischen Zylinder zur Einprägung der Lasten in den Prüfling setzen sich aus den Relativbewegungen der Anlenkpunkte am Prüfling und am Spannboden bzw. Gerüst zusammen. Es wird angestrebt, die Zylinderwege möglichst klein zu halten, um die benötigten Mengen zu pumpenden Hydraulikdrucköls zu minimieren.

Gerüste bewegen sich mit dem Trägerrost mit. Es ist mit der Anfachung von Eigenfrequenzen im Versuchsbetrieb zu rechnen, was eine effiziente Regelung für hohe Versuchsgeschwindigkeiten praktisch ausschließt. Der Ansatz wird auch wegen der extremen zu erwartenden Energiekosten nicht weiter verfolgt.

Variante 2 - Trägerrost mit Betongewichten

Die hohen Verformungen des elastischen Stahlträgerrosts können reduziert werden zum Beispiel durch integrierte Betongewichte. Ob diese Entwurfsvariante Ziel führend ist, soll kurz rechnerisch analysiert werden.

Die Grundplatte wird konstruktiv als Trägerrost aus IPBv1000 ausgeführt. Der Trägerrost ruht im mittleren Drittel seiner langen Seite auf einer Betonschicht. Der an zwei Seiten darüber hinaus kragende Trägerrost lagert auch an den Enden auf einer Betonschicht auf.

Die Betonschicht in Form einzelner Segmente ist mit dem Trägerrost verbunden. Die Segmente liegen lose auf dem Untergrund auf und sind in der Lage, vertikale Kräfte in den Boden weiterzuleiten.

Diese Variante nutzt die Gewichtskraft der Betonblöcke gegen das Abheben von Trägern. Außerdem kragt der Trägerrost nicht frei über die Betonblöcke hinaus, sondern ist an seinem Rand aufgelagert. Hierdurch reduzieren sich die Verformungen und die Spannungen im Trägerrost gegenüber einer Konstruktion ohne Gewichte, die nur auf zwei Linienlagern gestützt ist. Ein Nachteil ist die große Masse an Stahl und Beton, die örtlich zu großen Bodenpressungen führen kann.

Variante 3 - Stabwerksrahmen

Aus den Nachteilen der Entwurfsvarianten 1 und 2 lässt sich schließen, dass eventuell Ziel führend wäre, einen integrierten Versuchsrahmen zu entwerfen, in dem Trägerrost und Stabwerksrahmen des Versuchsgerüsts integriert sind und sich somit gegenseitig versteifen. Um eine Stahlbaulösung zu erreichen, wird in einem weiteren Entwurf die Biegesteifigkeit des Spannbodens mit einer Stabwerkskonstruktion erhöht.

Die Ergebnisse für Variante 3 zeigen keine grundsätzliche Verbesserung gegenüber Variante 2, weil die Deformationen nicht geringer sind und damit die dadurch bedingten Auswirkungen auf Auslegung des Versuchsgerüsts, Regelung und Energieverbrauch praktisch identisch sind.

Variante 4 - Segmentierter Aufspannboden

Das Konzept dieser Entwurfsvariante ist abgeleitet von dem bekannten in die Bodenplatte der Halle fest integrierten Spannboden, der sich bisher als ideal im Hinblick auf die Anforderungen des Ermüdungsversuches erwiesen hat. Um der Forderung nach Modularität und Mobilität Rechnung zu tragen, wurde das monolithische Spannfeld in Stahlbetonblöcke segmentiert.

Im Fall des teilweisen Abhebens des Aufspannbodens wird die Zugkraft S_v mit dem Eigengewicht des Aufspannbodens und den hydraulischen Kräften im abgehobenen Bereich sowie den Querkräften im Aufspannboden in das Gleichgewicht gebracht. Auf Grund des veränderlichen Kontaktbereiches des Aufspannbodens mit dem Hallenboden stehen die äußeren Kräfte und die Verformungen in nichtlinearer Beziehung. Für die Abschätzung der Biegemomente und der Querkräfte im Aufspannboden wird ein Finite Elemente Modell verwendet. Das Materialverhalten wird darin linear elastisch angenommen.

Auf Grund des hohen Gewichts des Aufspannbodens und seiner flächigen Lagerung auf starrem Untergrund ergeben sich nur sehr geringe vertikale Verformungen.

Die vergleichsweise kleinen Verformungen in den Vorentwürfen des Aufspannbodens aus Betonsegmenten gaben letztlich den Ausschlag für die Wahl dieses Konstruktionsprinzips für die Realisierung. Fertigteile in dieser Größe und entsprechendem Gewicht können auf der Straße mit dem Lastkraftwagen transportiert und auf der Baustelle mit dem Kran positioniert werden. Die Segmente können über Zuganker in dafür vorgesehenen Spannkanälen miteinander verspannt werden.

Die Segmente sind auf einem ebenen tragfähigen Untergrund in einem rechteckförmigen Raster anzuordnen. Der Untergrund besteht aus einer in Ortbeton hergestellten Sauberkeitsschicht, die auf dem gewachsenen, planierten und verdichteten Boden aufliegt. Die Sauberkeitsschicht dient als tragfähiger Unterbau, der die beim Einbau auftretenden örtlichen Beanspruchungen ohne große Setzungen aufnehmen kann. Die bei der Herstellung und beim Verlegen unvermeidlichen Imperfektionen bedingen die Einplanung von Fugen zwischen den Segmenten. Die Höhenlage der Segmente wird beim Einbau mit unter den Segmenten befindlichen Stellfüßen stufenlos justiert. Der Zwischenraum zur Sauberkeitsschicht wird nach dem Verlegen durch Einfüllöffnungen, die von der Oberseite der Segmente zur Unterseite geführt sind, mit Beton verpresst.

Da die Segmente bei Bedarf einen biegesteifen Verbund herstellen sollen, werden nach dem Verlegen die Fugen zwischen den Segmenten in dafür vorgesehenen vertikal verlaufenden, leistenförmigen Aussparungen mit Betonmörtel ausgegossen. Die Oberflächen der Aussparungen sind mit einem Trennmittel benetzt. Somit lässt sich die Vergussmasse bei einem Rückbau von den Segmenten lösen. Über diese Betonleisten können Druck- und Schubkräfte zwischen den Segmenten übertragen werden. Die Schubkräfte werden auf Grund von Reibschluss aufgebaut. Ihre Größe ist durch die Größe der Vorspannkräfte, wenn die Segmente durch Vorspannungen gegeneinander gepresst werden, und die Größe der Druckkräfte bei einer Biegebelastung begrenzt.

In den Fugen können keine Zugspannungen übertragen werden. Hierdurch wird die Biegesteifigkeit im Bereich der Fugen deutlich verringert. Um aber eine große Biegesteifigkeit zu erzielen, können die Segmente miteinander verspannt werden. Hierdurch wird im Idealfall die durch Biegung hervorgerufene Zugzone im Betonsegment und auch in der Fuge zwischen den Segmenten überdrückt. Eine hinreichend große Biegesteifigkeit ist wünschenswert, wenn Zuglasten aus dem Versuchsaufbau das Gewicht eines Segments übersteigen und die Spannschienen die das Gewicht übersteigende Last aufnehmen müssten oder auch nur zur Verringerung der Verformungsbewegungen.

Wenn eine Einspannwirkung an die Nachbarsegmente erzielt werden soll, werden die Segmente miteinander verspannt.

Für die Aufnahme der verbleibenden Zugkräfte zwischen den Segmenten oder wenn die Segmente nicht miteinander verspannt sind, werden die Ankerschienen und Querverbinder herangezogen. Die Hauptaufgabe der Ankerschienen besteht darin, die Lasten aus dem Versuchsaufbau in den Aufspannboden einzuleiten. Die Ankerschienen werden mit Spannankern vertikal gegen das Segment gepresst. Die Unterseite der Ankerschienen und die Oberseite der Segmente – sie besteht dort, wo die Schienen aufliegen aus einem in das Segment einbetonierten Blech, welches auf der Unterseite mit angeschweißten Schubdübeln versehen ist – werden mit Strahlmitteln vorbehandelt.

Die Dimensionierung der Ankerschienen und ihrer Verankerung erfolgte für Lasten, die nach bisheriger Erfahrung in Flugzeugversuchen an den Gerüstfußpunkten in den Spannboden eingeleitet werden.

Die Ankerschiene ist in besonderer Weise den zyklischen Beanspruchungen eines Ermüdungsversuchs ausgesetzt. Bei der Wahl geeigneter Profile zeigte sich, dass ein standardisiertes handelsübliches Walzprofil gegenüber einem aus Bändern geschweißten Profil Vorteile aufweist. Die Kerbwirkung in den Schweißnähten zusammengesetzter Profile führte zu deutlich höheren lokalen Spannungen in den Fügstellen zwischen den Stegen und den Gurten als an den vergleichbaren Stellen eines ähnlich großen Walzprofils. Das Walzprofil weist an den Übergängen große Rundungsradien auf, die den Kerbeffekt wesentlich reduzieren.

Für eine wirtschaftliche Auslegung der Schiene hat es sich darüber hinaus gezeigt, dass durch Berücksichtigung der Stützwirkung des Mörtelbetts, welches die Schiene umgibt, die Beanspruchungen in der Schiene deutlich gesenkt werden. Moderne Berechnungsprogramme, welche die Finite Elemente Methode nutzen, ermöglichen die Berücksichtigung nichtlinearer Effekte, die sich aus dem Materialverhalten und aus den geometrischen Randbedingungen ergeben.

Mit einer Modellierung der Ankerschiene und des Betons, in der insbesondere ein Spalt zwischen der Schiene und dem Mörtelbett berücksichtigt wurde, konnte die Festigkeit der Schiene gegen Ermüdung nachgewiesen werden.

Mit der Definition der Segmente ergibt sich der Entwurf für ein ganzes Spannfeld, auf dem ein Versuchsaufbau Platz findet. Für zwei Flugmuster-Versuchsstände wurden vom Fachplaner Spannfelder nach den erläuterten Vorgaben konstruiert.

Zur Absicherung der Gebrauchstauglichkeit der geplanten Spannböden und zur Kontrolle der vom Fachplaner ermittelten Beanspruchungsgrößen werden Rechenmodelle erstellt, mit denen das Verhalten der Spannböden unter Lasten, die bei Flugmuster-Versuchen auftreten, simuliert. Von Simulation wird hier gesprochen, weil sich die Kraftflüsse während eines Belastungsvorgangs durch das Öffnen und Schließen von Kontakten sowie durch Gleitbewegungen von Bauteilen verändern können.

Zur Untersuchung, ob und wenn, in welchem Maß miteinander verspannte Segmente das Verformungsverhalten des Strong Floor günstig beeinflussen, werden in den Rechenmodellen die Bereiche, in denen die Segmente verspannt sind, variiert.

In zwei Versuchsmuster-Aufbauten zeigt sich in den Simulationen für einen Bemessungslastfall ein Einfluss der miteinander verspannten Segmentbereiche auf die maximale vertikale Verformung.

Ohne Vorspannung bilden sich bei Biegebeanspruchung zwischen den Segmenten klaffende Fugen aus. Bei Einleitung der Spannkkräfte in größerer Entfernung von der Maximalbeanspruchung verringert sich die Wirkung der Spannkkräfte auf Grund der Reibung insbesondere zwischen den Segmenten und dem Boden.

Gegenüber früheren Abschätzungen hat sich die Maximalverformung in diesen Simulationen auch ohne Vorspannung schon verringert. Die Berücksichtigung der mit den Segmenten verspannten Schienen führt beim Schwinden des Betons zum teilweisen Zusammenrücken der Segmente, da die Schienen dabei gestaucht werden.

Die rechnerischen Simulationen ermöglichten so, eine optimierte Konfiguration miteinander verspannter Betonsegmente hinsichtlich der Anzahl zu verspannender Segmente und hinsichtlich der zu erwartenden Verformungen des Strong Floors zu finden.

Anhand der oben erläuterten Analysen konnte die Wirksamkeit verspannter Segmentbereiche gezeigt werden.

Nachdem zuvor gezeigt wurde, dass sich die Formänderungen der Betonsegmente infolge von Schwindvorgängen auf das Verformungsverhalten des Strong Floors ungünstig auswirken, kann man sich auf die Betrachtung von Konfigurationen unter Berücksichtigung des Schwindens beschränken.

Auf Grund einer Vielzahl komplexer Belastungszustände ist die Bewertung hinsichtlich der Kritikalität nur mit Hilfe der rechnerischen Analysen möglich. Wegen des großen Rechenaufwandes, der mit dem beschriebenen Modell verbunden ist, kann praktischer Weise aber nur eine Auswahl von Fällen berechnet werden.

Für die Kontrolle der Gebrauchsfähigkeit des Strong Floors für einen Flugmuster-Versuch wurde deshalb eine begrenzte Anzahl von konkreten Lastfällen untersucht.

In den betrachteten Fällen blieben die Verformungswege kleiner als 2 mm, was auch bei einem integralen Spannboden normal ist.

Definition der Schnittstellen zwischen den Anlagen und der Testhalle (Hydraulik, Pneumatik, Lüftung, Elektrik, Wasser, Fördertechnik, Gebäude-Schnittstellen etc.)

Aus strukturmechanischer Sicht ist keine direkte Kopplung des Strong Floors an die tragende Struktur der Systemhalle gegeben. Zwischen den Segmenten des Strong Floors und dem angrenzenden Hallenboden ist eine Fuge angeordnet. Auf diese Weise wird das Ausfließen von Hydraulik-Öl in den Untergrund verhindert. Dieses Öl, welches in Schadensfällen aus der Hydraulikanlage austreten kann, wird in einem um den Strong Floor herumlaufenden Kanal gesammelt. Um eine Gefährdung des Grundwassers durch sickern des Öl sicher auszuschließen, wird zusätzlich unterhalb des Strong Floors als Sperrschicht eine ölresistente Folie angeordnet.

Unterstützung bei der Koordinierung und Überwachung sämtlicher Arbeitsabläufe in der Auslegungs-, Planungs-, Vergabe-, Fertigungs- und Aufbauphase für den Lastboden

Die in den vorhergehenden Abschnitten erläuterten Arbeiten zur Konzeptuntersuchung und Auslegungsanalyse eines modularen, mobilen und skalierbaren Spannungsfeldes für Großstrukturversuche mündeten zunächst in ein Konzept, das von einem Ingenieurbüro für Bauplanung im Rahmen eines separaten IABG-Auftrages in einen konstruktiven Entwurf umgesetzt wurde. Ferner wurde das Ingenieurbüro von der IABG mit der Auslegung des Spannungsfeldes auf der Basis der von IABG vorgegebenen Belastungen und Vorauslegungen beauftragt.

In der Phase der Konstruktion und Auslegung war die Betreuung durch die Bearbeiter dieser Forschungsaufgabe unerlässlich, um sicher zu stellen, dass alle Ergebnisse dieser Forschungsarbeit in die konkrete Umsetzung einfließen konnten. Die Annahmen, Zusammenhänge mit dem späteren Versuch sowie die notwendigen Randbedingungen mussten den Konstrukteuren erläutert werden und die fertig gestellten Konstruktionen und Lastenhefte mussten auf Konsistenz mit den hier ausgeführten Ergebnissen überprüft werden.

Abstimmung mit der Ausführungsüberwachung für die Testhalle und den involvierten Entwicklern

In der Fertigungs- und Aufbauphase wurden vereinzelt Überprüfungen vorgenommen, um Fehler weitestgehend auszuschließen. Dabei wurde die ebenfalls von der IABG beauftragte Bauüberwachung wissenschaftlich-technisch unterstützt und insbesondere bei ad hoc Fragestellungen beraten. Diese betrafen im Wesentlichen Ausführungsdetails mit konzeptioneller Auswirkung. Insgesamt kann in der Rückschau konstatiert werden, dass die Aufwendungen der Entwickler in der Ausführungsüberwachung gering waren, die Bedeutung der durchgeführten Beratungen und Überprüfungen für das Gesamtergebnis allerdings Ausschlag gebend war.

AP 4600 Bewertung des Konzeptes:

Die kritische Evaluation der entwickelten Einzelkonzepte und die Betrachtung des resultierenden Gesamtsystems lässt das entwickelte Konzept als außerordentlich zielführend und erfolgreich erscheinen, und legt unbedingt eine Validierung anhand eines realen Flugzeugmusters nahe. Diese Validierung soll im bereits beantragten Folgeprojekt MOTIF durchgeführt werden.

Im Jahr 2011 wurden die entwickelten Systeme aus einem IABG-Investitionstitel beschafft. Sie sind zum Teil geliefert bzw. in Fertigung mit Lieferdatum im ersten Halbjahr 2012. Die Lieferungen beinhalten den jeweiligen Aufbau und Installation. Es kann somit davon ausgegangen werden, dass für die im Vorhaben MOTIF geplanten weiterführenden Arbeiten grundsätzlich funktionsfähige Systeme vorhanden sind.

Nachfolgend ist das im vorliegenden Kapitel beschriebene Gesamtsystem noch einmal im betriebsbereiten Zustand zusammenfassend visualisiert (siehe Bild 4).

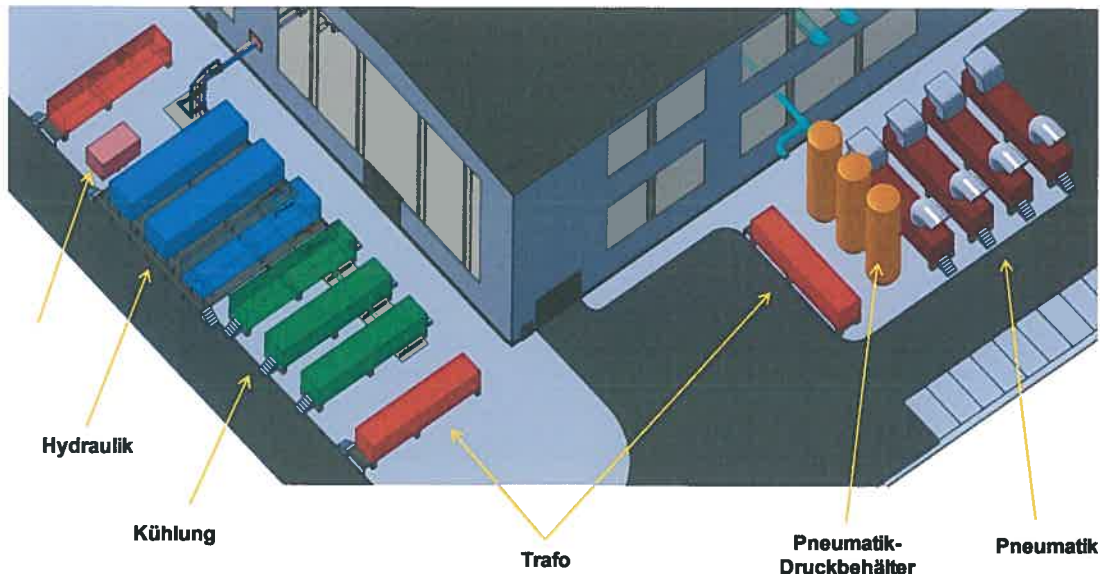


Bild 4: Mobile modulare Infrastruktur für Großstruktur-Versuche, Außenanlagen

Ein weiterer geplanter und entworfener Anlagenteil ist die Wärmerückgewinnung der Abwärme der Hydraulikanlagen, bspw. zur Heizung der Versuchshalle. Da diese Abwärme nicht stetig zur Verfügung steht, müssen entsprechende Einrichtungen vorgesehen werden, um Wärmemengen zu speichern, hier in Form eines Pufferspeichers.

AP 5100/AP5200 Einzel- und Gesamtbewertung

Das Vorhaben führte auf einer Reihe von wichtigen Teilgebieten bei der Qualifikation von Flugzeugmustern zu einer Verbesserung bzw. Absicherung der eingesetzten Technologien und somit zu einer deutlichen Effizienzsteigerung. Wichtiger Punkt waren hierbei insbesondere die Verbesserung und Validierung der verschiedenen numerischen Tools und Nachweise. Hierzu zählen:

- ⇒ Rechen- und CAD-Modelle zur optimierten Auslegung von Versuchsgeländern, Lastgeschirren und Dummies

Durch eine Aufteilung der Vorkonstruktion und Berechnung, mit z.T. neu entwickelten Entwurfs- und Optimierungstools durch die IABG und der Detailkonstruktion bei Unterauftragnehmern mit klar definierten CAD-Modellen und Schnittstellen, wurde eine Verbesserung der Effizienz im Hinblick auf Qualität und Kosten erzielt.

- ⇒ Rechenmodelle zur Auslegung der Versuchsanlagenkomponenten Hydraulik, Pneumatik und Infrastruktur

Die Versuchsanlagenkomponenten mit neuen Auslegungstools insbesondere in Hinblick auf geringen Energieverbrauch bei gleichzeitiger zuverlässiger Verfügbarkeit und Leistungseffizienz optimiert. Die Auslegungen und Verfahren führten zu einer Reduzierung des Stromverbrauchs.

- ⇒ Rechenmodelle (FEM und MKS-Modelle) zur Ermittlung und Optimierung der Regelungsparameter

Die von der IABG schon früher eingeleitete neuartige Berechnung und Optimierung der Regelungsparameter für die Versuchssteuerung wurde weiterentwickelt und neue Innovationen auf diesem Gebiet eingearbeitet. Dies führte zu einer Verbesserung des Versuchsbetriebs im Hinblick auf Versuchsgeschwindigkeit und Genauigkeit der Lastsimulation.

- ⇒ Modelle und Tools zur Versuchssteuerung und Überwachung

Hierzu wurde eine Reihe von innovativen Ideen, die sich aus Voruntersuchungen ergeben hatten, in die Modelle und Tools zur Versuchssteuerung eingearbeitet. Sie führten zu einer Effizienzsteigerung des Versuchsbetriebs im Hinblick auf Zuverlässigkeit, Vereinfachtes Handling, Fehlersuche und Behebung und weitere Teilautomatisierung.

- ⇒ Tools zur schnellen online Messdaten-Erfassung

Die Fähigkeiten zur schnellen online Messdaten-Erfassung wurden entwickelt und optimiert insbesondere im Hinblick auf Geschwindigkeit (Abtastrate), Genauigkeit und Synchronisation, sowie Bedienung und Auswertung. Durch diese Entwicklungen können nunmehr dynamische Messkampagnen mit einigen 1.000 Messkanälen realisiert werden. Diese Fähigkeiten sind bereits bei kurzfristig geplanten Großversuchen gefordert.

- ⇒ Tools zur Erfassung, Dokumentation und Bewertung von Inspektionsergebnissen und Schäden an der Testzelle

Die Tools wurden weiter verbessert insbesondere im Hinblick auf schnellere und sichere Dateneingabe, bessere Auswertung, Vernetzung mit anderen Datenbanken z.B. beim Flugzeughersteller und zur Reduktion des Aufwandes.

Zur Frage, ob ein rein numerischer Lebensdauernachweis ohne experimentellen Nachweis möglich ist wurde kein Ansatz gefunden. Die Ereignisse (z.B. Schäden) und Erkenntnisse/Maßnahmen (Modifikationen, Reparaturen) vom experimentellen Lebensdauernachweis sind derart umfangreich und wichtig, dass auf den experimentellen Nachweis, trotz verbesserter numerischer Verfahren nicht verzichtet werden kann. Durch die verbesserten Rechenverfahren zur Strukturauslegung werden die Strukturen zwar optimiert, aber auch immer mehr ausgereizt, was zu einem höheren Risiko (Schadensanfälligkeit) führen kann, wie die Erkenntnisse von neueren Versuchen zeigen. Hinzu kommt, dass sich die Bauweisen und Werkstoffe in einer ständigen Weiterentwicklung befinden und Erkenntnisse von früheren Flugzeugmodellen nicht oder nur bedingt auf die Neuen übertragbar sind. Typisches Beispiel hierfür ist die Einführung der Faserverbundbauweise bei den Primärstrukturen Rumpf und Flügel. Faserverbundbauweisen zeigen zwar generell ein gutes Ermüdungsverhalten, aber in vielen Fällen werden die Faserverbundbauteile noch gemischt mit Metallkomponenten oder metallisch gefügt, was vom Ermüdungsverhalten eine gute Lösung darstellt.

Zur Bewertung der Ergebnisse hinsichtlich Aufwand vs. Aussagefähigkeit kann klar gesagt werden, dass die untersuchten Tools und Verfahren zu keinem höheren Aufwand beim experimentellen Lebensdauernachweis führen aber zu einer Verbesserung der Qualität und Aussagefähigkeit. Auch konnte die Zuverlässigkeit und Reproduzierbarkeit insgesamt gesteigert werden. Weitere technische und wirtschaftliche Bewertungen wurden bereits in den obigen Kapiteln ausgeführt bzw. werden in dem folgenden Kapitel erläutert und sind in der umfangreichen Dokumentation des Vorhabens enthalten.

2 Vergleich mit der Arbeits-, Zeit- und Kostenplanung

Über den gesamten Verlauf des INREOG-Vorhabens entstandenen Kosten, die im nichtöffentlichen Bericht detailliert dargestellt sind.

Somit erzielt die IABG über den Gesamtverlauf einen vollständigen Mittelabfluss gemäß der im Projektverlauf angepassten Planung. Die Planungsanpassungen erfolgten am 03.06.2009 im Rahmen der ersten Erweiterung und Verlängerung des Vorhabens und 25.11.2010 im Rahmen der zweiten Erweiterung und Verlängerung. Beide Planungsanpassungen beruhten auf zeitlichen Anpassungen an ein für die Technologie-Validierung vorgesehenen Flugzeug-Großstrukturversuch und umfassten neben der zeitlichen Streckung des INREOG-Vorhabens auch eine Erweiterung um jene zusätzlichen Ideen, welche aufgrund des zusätzlichen Zeitrahmens förderwürdig in einem Technologievorhaben anwendbar geworden waren.

3 Zielerreichung des Vorhabens

Für die Musterzulassung von Passagier- und Transportflugzeugen sind nach den geltenden Zulassungsrichtlinien Nachweise ausreichender Festigkeit und Lebensdauer der Flugzeugstruktur zu führen, die bis heute neben umfangreichen rechnerischen Analysen, mit Gesamtzellen als Experimentalnachweis realisiert werden. Eine Technologie für einen rein rechnerischen Nachweisweg konnte wie erwartet nicht gefunden werden und dürfte auch bei den Zulassungsbehörden auf erhebliche Widerstände stoßen.

Darüber hinaus wurden einzelne Technologien zur Effektivitätssteigerung beim Betriebsfestigkeitsnachweis von Flugzeugstrukturen durch die Integration des rechnerischen Lebensdauernachweises und anderer Modifikationen bzw. zur Optimierung der experimentellen Verfahren unter Berücksichtigung der rechnerischen Verfahren und anderer Modifikationen ausgearbeitet und validiert.

Dabei konnten die folgenden Schritte erfolgreich abgeschlossen werden:

- ⇒ Analyse des derzeitigen Standes der Lebensdauerberechnung komplexer Großstrukturen und Vergleich mit der Vorgehensweise beim experimentellen Nachweis;
- ⇒ Generierung und Validierung von Integrationsansätzen angepasster Rechenverfahren in den Versuch;
- ⇒ Analyse aller Phasen der Realisierung eines aktuellen Strukturversuches zur Aufdeckung weiteren Optimierungspotentials und dessen Umsetzbarkeit;
- ⇒ Erfassung aller Ergebnisdaten und Wertung der Ergebnisse bezüglich der Zielsetzung dieses Vorhabens.

Der IABG ist somit der Nachweis gelungen, dass durch Integration rechnerischer Verfahren und neuer rechnergestützter Hardwarekomponenten die Effizienz der Versuchsvorbereitung und der Versuchsdurchführung bei Strukturversuchen an Flugzeuggesamtzellen deutlich gesteigert werden kann, ohne dass Mehrkosten beim Testinstitut entstehen, aber ggf. Einsparungspotentiale beim Flugzeughersteller möglich sind.

Aufbauend auf den langjährigen Erfahrungen der IABG bei der Durchführung von Flugzeugstrukturtests an Gesamtzellen und durch die erfolgreichen Technologievorhaben, konnte neben der Beschleunigung des Testaufbaues die Testperformance insgesamt auf ein Niveau gesteigert werden, die heute Weltspitze darstellt und die IABG somit eine führende Rolle einnimmt.

Die Erfolge des Vorhabens – bezogen auf die Hauptarbeitspakete – können wie folgt zusammen gefasst werden:

⇒ Integration rechnergestützter Verfahren

Der derzeitige Stand der Lebensdauerermittlung wurde analysiert und es wurde festgestellt, auf welche Strukturen diese Verfahren anwendbar sind, wobei der Schwerpunkt auf komplexen Großstrukturen wie Flugzeugzellen gelegt wurde. Die Vorgehensweise bei der Berechnung wurde mit der experimentellen Vorgehensweise eines Gesamtzellenversuches verglichen und es konnten erste Ansätze zur Integration der Lebensdauerberechnung in den Strukturversuch generiert werden. In wie weit dies auf die neuen Strukturwerkstoffe (CFK) zutrifft, muss weiter untersucht werden. Es ist aber eher zu erwarten, dass mit Einführung der neuen Strukturwerkstoffe der experimentelle Anteil und auch der Berechnungsaufwand zunächst zunehmen werden bis genügend Erfahrungen aus Entwicklung, Fertigung und Service vorliegen.

Ferner wurde das Optimierungspotential durch rechnergestützte Online-Verfolgung der Beanspruchung und der Schadensfortschreitung untersucht und Wege zur Realisierung aufgezeigt. Hier ist jedoch noch technologische Weiterentwicklung erforderlich, um die Zuverlässigkeit und die Kostensituation zu verbessern.

⇒ Optimierungsansätze in den Realisierungsphasen eines Strukturversuches

Der gesamte Prozess bei der Durchführung eines komplexen Strukturversuches wurde über alle Phasen von der Planungsphase über die Konstruktionsphase, die Fertigungsphase der Belastungssysteme, die Aufbauphase, die Inbetriebnahme-Phase, die Phase der Belastungskontrolle, die dynamische Lastsimulationsphase bis hin zur Abschlussphase daraufhin untersucht, ob und wie die Teilprozesse im Hinblick auf moderne Berechnungsverfahren oder andere Methoden verbessert, anders strukturiert und dabei in der Effizienz gesteigert werden können. Es wurde eine Reihe von Verbesserungen entwickelt, umgesetzt und validiert. So konnten z.B. durch die Entwicklung neuer oder Verbesserung vorhandener CAD-Tools im Konstruktionsbereich, durch neue Tools und Strategien bei der Versuchssteuerung und Überwachung und durch verbesserte Auslegungstools bei der Versuchsinfrastruktur deutliche Verbesserungspotentiale im Hinblick auf die Qualität, Performance und Wirtschaftlichkeit erzielt werden.

Die Ergebnisse des Vorhabens nutzen

- ⇒ den Flugzeugherstellern direkt wegen der schnelleren, sicheren und kosteneffektiveren Abwicklung der Strukturversuche an ihren Flugzeugen,
- ⇒ mittelbar den Auftrag gebenden Flugzeugherstellern, da sie durch die enge personelle Verzahnung bei der Versuchsabwicklung Zeit- und Kosten sparende Verfahren kennen lernen und gleichzeitig deren Wirksamkeit durch intensive Beobachtung qualifizieren können,
- ⇒ der IABG im Hinblick auf die Migration in andere Geschäftsfelder auf denen sie mit Versuchen tätig ist (Automobilentwicklung).

Der Umsetzungshorizont beträgt ca. 3 Jahre nach erfolgreichem Abschluss des Vorhabens, teilweise aber auch schon kurzfristiger.

Auf Basis der Ergebnisse des Vorhabens werden neue Teilmodule erstellt, die bei zukünftigen Vorhaben der experimentelle Lebensdauernachweis von Flugzeuggroßstrukturen Anwendung finden werden, um diese möglichst schneller und kostengünstiger abwickeln zu können. Da die Integration der sich sehr schnell entwickelnden Computertechnik und der damit verbundenen numerischen Tools in die komplexe Versuchstechnik bei Großstrukturen nicht als abgeschlossen angesehen werden kann, ergibt sich hier ggf. ein Potential der Effizienzsteigerung, dessen vollständige Erschließung aber auch zukünftig Anschlussentwicklungen notwendig machen wird. Es muss auch in Zukunft das Ziel sein auf dem Gebiet der sehr aufwendigen experimentellen Nachweistechnik bei Großstrukturen, Kosten und Aufwand mindernde Ansätze zu finden und zu realisieren, um die Wettbewerbsfähigkeit aufrecht zu erhalten bzw. ggf. noch auszubauen.

4 Für das Vorhaben relevante FE-Ergebnisse von dritter Seite

FE-Ergebnisse von dritter Seite liegen nicht vor bzw. sind nicht bekannt.

5 Änderungen der Zielsetzung

Eine generelle Änderung der Zielsetzung des Vorhabens hat sich nicht ergeben. Im Laufe der Forschungstätigkeiten im Rahmen der ersten Phase von INREOG ergaben sich jedoch zusätzliche Innovationsideen, die die erzielbaren Ergebnisse noch deutlich steigern können.

Daher wurden im Rahmen eines 1. Erweiterungsantrages folgende Punkte in das Vorhaben aufgenommen:

- ⇒ Automatische Anpassung der Ventil-Vorsteuerung bei den Belastungszyklindern
- ⇒ Untersuchung zur Verbesserung der Belastungserfassung durch Signalbündelung im Umkreis der Messstellen
- ⇒ Modellgestützte Abbildung der Innendrucksimulation zur Verbesserung der Simulation der Druckdifferenz im Versuchsablauf
- ⇒ Entwicklung eines der Versuchsanforderung angepassten Führungsgrößenfilters zur Erhöhung der Nachfahrgüte bei erhöhten Lastfolgefrequenzen

Im weiteren Verlauf der Forschungstätigkeiten des INREOG-Vorhabens ergaben sich weitere Innovationsideen, welche unmittelbar an die Fragestellungen des INREOG zur Effizienzsteigerung der Flugzeugstruktur-Qualifizierungstests anknüpfen. Daher wurde im Rahmen eines 2. Erweiterungsantrages folgender Punkt in das Vorhaben aufgenommen:

- ⇒ Mobile modulare transportable Infrastruktur für die Durchführung von Großstrukturversuchen

Fazit:

All diese Änderungen zur Zielsetzung konnten abgestimmt und auch erfolgreich umgesetzt werden. Dieser Bericht beinhaltet bereits alle Ergebnisse aus dem somit erweiterten Vorhaben.

Anlage A
Zum
Abschlussbericht
und Zwischenbericht
I/2011

Zeitpläne: Überarbeiteter Stand

Zuwendungsgeber : **Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi)**
vertreten durch
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR),
Projekträger Luftfahrtforschung



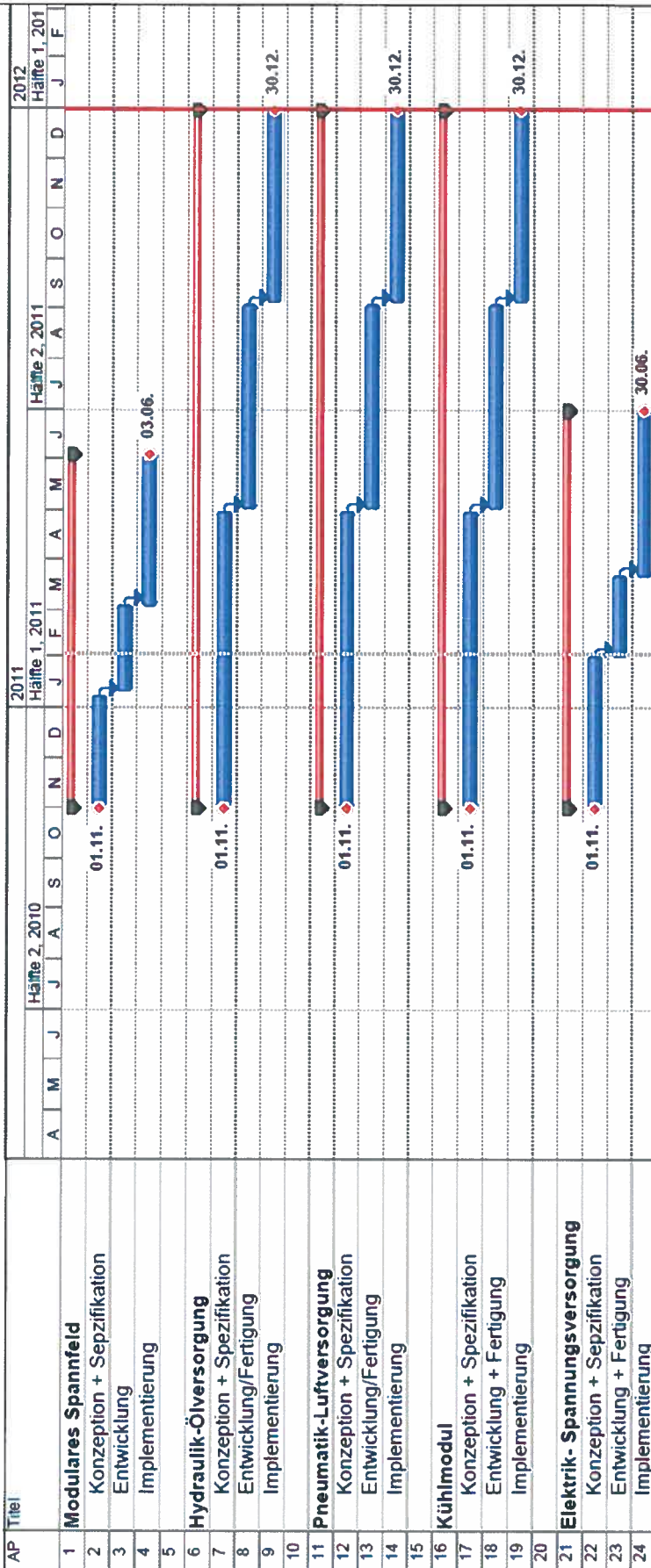
INREOG - Effizienzsteigerung der Qualifikation von Flugzeugmustern

Anlage A

Projektnummer: 20W0604, alter Stand inkl. erster Erweiterung

Nr.	Vorgangsname	2007			2008			2009			2010			2011			2012			
		S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M
1	AP 1000 Projektmanagement																			
2	AP 1100 Projektleitung																			
3	AP 1200 Qualitätsmanagement																			
4																				
5	AP 2000 Innovative Verfahren zur Lebensdauerberechnung																			
6	AP 2100 Lebensdauerberechnungen																			
7	AP 2200 Beanspruchungsverfolgung																			
8	AP 2300 Schadensverfolgung																			
9																				
10	AP 3000 Effizienzsteigerung der Qualifikation von Flugzeugmustern																			
11	AP 3100 Konzeption und Planung																			
12	AP 3200 Technische Umsetzung																			
13	AP 3300 Verifikation																			
14	AP3400 Weiterentwicklung von Verfahren																			
15																				
16	AP 4000 Bewertung																			
17	AP 4100 Einzelbewertung																			
18	AP 4200 Gesamtbewertung																			

Projektnummer: 20W0604, Terminplan der zweiten Erweiterung



Anlage B
Zum
Abschlussbericht
und Zwischenbericht
I/2011

Organisation: Arbeitspaket-Struktur

Zuwendungsgeber : **Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi)**
vertreten durch
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR),
Projekträger Luftfahrtforschung

