

LUFO IV.4



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

VERBUND FLYSMART

SCHLUSSBERICHT Teilvorhaben Smart Aircraft

Full-Authority Fly-By-Wire für Flugzeuge der Kategorie CS23

Förderkennzeichen 20V1108A

Dokumentenummer 0041011-102 PAB

Airbus DS Airborne Solutions GmbH (ADAS)

Sebaldsbrücker Heerstraße 235
28309 Bremen

Verantwortlicher

Dr. Reimund Kücke
email: reimund.kueke@airbusds-airborne.com

INHALTSVERZEICHNIS

1	KURZDARSTELLUNG	1
1.1	Voraussetzungen, unter denen das Projekt durchgeführt wurde	1
1.2	Planung des Vorhabens	2
1.3	Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde	2
1.4	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	3
2	EINGEHENDE DARSTELLUNG.....	5
2.1	Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen mit einer Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele	5
2.1.1	Aufgabenstellung	5
2.1.2	Arbeitsplan	9
2.1.3	Anforderungen an das FBW-System	14
2.1.4	Erweiterungen des FBW-Systems	19
2.1.5	Erprobungsträger Diamond DA42	25
2.1.6	Flugregelung und Flugführung	30
2.1.7	Flugerprobung	34
2.1.8	Ergebnisse und Ausblick	44
2.2	Wichtige Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	46
2.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	46
2.4	Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans	47
2.5	Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	48
2.6	Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen	48
2.7	Referenzen	50
2.7.1	Literatur	50
2.7.2	Abkürzungen	50

1 KURZDARSTELLUNG

Auf Basis der Bekanntmachung des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie vom 3. Februar 2011 zur Förderung von Forschungs- und Technologievorhaben im Rahmen des nationalen zivilen Luftfahrtforschungsprogramms – Vierter Programmaufruf 2012 bis 2015 (LUFO IV.4) wurde das Verbundvorhaben FLYSMART bewilligt. Es bestand aus drei Leitprojekten (FBW-23, AP-23, ESI-23) zum Einsatz von Avioniksystemen in Flugzeugen der allgemeinen Luftfahrt mit der Zielsetzung Sicherheit, Flexibilität und Komfort der allgemeinen Luftfahrt zu steigern und somit die in der ACARE Vision 2020 formulierten Ziele zu unterstützen.

1.1 Voraussetzungen, unter denen das Projekt durchgeführt wurde

Zielsetzung

Das Teilvorhaben SMART AIRCRAFT war Bestandteil des Leitprojektes Full Authority Fly-By-Wire for CS23 Aircraft (FBW-23) im LUFO IV.4 Verbundvorhaben FLYSMART.

Zielsetzung des Vorhabens SMART AIRCRAFT war es, im ausgewählten Bereich der professionellen General Aviation die Technologiereife (Technology Readiness Level 6) in kritischen Technologiefeldern für den Einsatz eines Full Authority FBW System für zukünftige semi- und vollautomatische¹ Arbeitsflugzeuge zu erreichen.

Ein Full Authority Fly-by-Wire-System für die Flugzeugklasse CS23, skalierbar von Class I bis III, ist ein grundlegend neuer Ansatz. Ein solches Fly-by-Wire System ist hochgradig vernetzt. Es umfasst alle Komponenten zur Primärsteuerung, Sekundärsteuerung, Autopilotfunktion mit Vortriebssteuerung (4D Bahnfolgung), Fahrwerk, Bremsen, Bugradlenkung, elektrische Energieverteilung sowie eine rein elektromechanische Aktuatorik (all electric aircraft). Ebenso hoch ist die funktionelle Integration mit Flugsteuerung, Autopiloten, ATOL, autonomes Mission Management inkl. Autorouter.

In SMART AIRCRAFT sollte mit der Einrüstung des vollen Funktionsumfangs des FBW-Systems auf dem Erprobungsträger Diamond DA42 unter realistischen Bedingungen nachgewiesen werden, dass neben dem automatischen Streckenflug auch kritische Flugphasen wie der automatische Start und die automatische Landung von einem solchen FBW-System sicher durchgeführt werden können.

¹ Optional pilotierte Arbeitsflugzeuge

1.2 Planung des Vorhabens

Projektstruktur	<p>Die oben beschriebene Aufgabenstellung wurde innerhalb des Vorhabens SMART AIRCRAFT in drei Hauptarbeitspaketen bearbeitet:</p> <ul style="list-style-type: none">▪ AP1100 - Grundlegende Requirements zum FBW-System Systematische Anforderungserfassung, -analyse und -synthese mit Fokus auf CS23 Arbeitsflugzeuge.▪ AP1200 - Grundlagen FBW-Plattformtechnologie Entwicklung von plattformrelevanter Technologie, der Entwicklung von Systemfunktionen sowie der Realisierung einer integrierten Navigationskomponente.▪ AP1300 - FBW-Validierungsplattform Validierung unterschiedlicher Realisierungszustände des FBW-Systems auf dem von FP7 SAFAR übernommenen Erprobungsträger Diamond DA42. Schrittweise Integration der in diesem Projekt neu entwickelten Technologien, Komponenten, Systemfunktionen in das FBW-System und deren Erprobung im Test Rigg und in Flugversuchen.
Projektzeitplan	<p>Die Laufzeit betrug 42 Monate. Das Vorhaben begann am 1.1.2012 und wurde am 30.06.2015 erfolgreich abgeschlossen.</p>

1.3 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Technischer Stand	<p>Standardmäßig wird bei Flugzeugen der allgemeinen Luftfahrt (CS23) die klassische, mechanische Flugsteuerung ohne Kraftverstärkung kombiniert mit den Funktionen eines typischen Autopiloten eingesetzt. Autorität und Dynamik des Autopiloten sind aus Sicherheitsgründen begrenzt. Die ultimative Sicherheitskomponente stellt immer der Pilot dar. Die Fähigkeiten einer konventionellen Flugsteuerung, ein CS23-Flugzeug präzise zu stabilisieren und zu führen, sind somit eng begrenzt.</p> <p>Bei den großen Transportflugzeugen (CS25) hatten entsprechende Standardisierungsbestrebungen bereits vor Jahrzehnten zur Entwicklung der "Integrierten Modulare Avionik" Plattformen (IMA) geführt. Diese Plattformen sind jedoch für den Einsatz in der General Aviation zu teuer und zu voluminös. Da das systemspezifische Redundanzkonzept der IMA nicht auf Plattformebene sondern auf der Systemebene implementiert ist, muss jede Applikation bei Wechsel des Flugzeugtyps mit erheblichem Kostenaufwand immer wieder neu entwickelt und qualifiziert werden.</p>
-------------------	--

FBW für CS23

Ein Full-Fly-by-Wire-System für die Flugzeugklasse CS23, skalierbar von Class I bis III, basierend auf einer FBW-Plattformtechnologie ist ein neuartiger, innovativer Ansatz. Ein solches FBW-System ist hochgradig vernetzt. Es umfasst alle Komponenten zur Primär-, Sekundär-, Fahrwerks-, Bremssteuerung, Bugradlenkung sowie einer „all electric“, elektromechanischen Aktuatorik. Die FBW-Plattform stellt dabei ein Netzwerk mit flexibler Hardware- (inkl. Sensorik und Aktuatorik), Kommunikations- und Software-Architektur dar. Kernpunkt ist dabei die Middleware, die alle Aufgaben wie Signalverarbeitung, Netzwerkkommunikation, Fehler- / Redundanzmanagement sowie das gesamte Plattformbetriebsmanagement übernimmt.

1.4 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Vorhaben SMART AIRCRAFT war nur deshalb möglich, da im Verbund FLYSMART, Leitprojekt FBW-23 relevante Technologien, Komponenten und Verfahren für ein Full Authority FBW-System durch unterschiedliche Partner kompetent bearbeitet und auf der Systemebene eines CS23 Flugzeug zusammengeführt werden konnten. Damit ließ sich das vernetzte Gesamtsystem FBW für CS23 Flugzeuge schnell und effizient umsetzen.

Verbundpartner

Innerhalb des Verbundes arbeitete die ADAS eng zusammen mit:

- Smart Embedded Technologies GmbH (SET) - Partner zwecks Realisierung eines effizienten und kostengünstigen Blitzschutzes für die FlexRay basierte FBW-Plattform (AP1230).
- Universität Stuttgart (USTUTT) - Partner zwecks Weiterentwicklung der dort entwickelten FBW-Plattformtechnologie (ILS – Institut für Luftfahrtssysteme) für den industriellen Einsatz auf CS23-Arbeitsflugzeugen sowie der Entwicklung von Flugführung und Flugregelung für das gesamte Flugregime eines CS23-Flugzeuges (IFR – Institut für Flugmechanik und Flugregelung). ADAS arbeitete mit der USTUTT in den Arbeitspaketen AP1110, AP1120, AP1130, AP1210, AP1220, AP1240, AP1330, AP1340 und AP1350 zusammen.
- AvioTech GmbH (AVIO) - Unterbeauftragung zwecks Unterstützung bei der Zusammenarbeit mit der USTUTT in den Bereichen AP1110, AP1120, AP1210, AP1220 und AP1230. Die Arbeitsschwerpunkte der AVIO lagen bei der Optimierung des automatischen Spezialisierungsverfahrens des FBW-System sowie dessen Anpassung an die Besonderheiten des Erprobungsträgers DA42. AVIO ist ein Spin-Off-Unternehmen der

USTUTT. ADAS unterstützte diese Unternehmensgründung durch eine gezielte Unterbeauftragung.

Partnerprojekte

Außerhalb des Verbundvorhaben FLYSMART arbeitet ADAS in folgenden Partnerprojekten an verwandten Fragestellungen, die alle Beiträge zu einer späteren wirtschaftlichen Verwertung liefern:

- eSAFE – Emergency Safe Return (2013-2016), TAKE-OFF Realisierung von automatischen Rückführungen von CS23 Flugzeugen auf Basis der in SMART AIRCRAFT entwickelten Technologien. Im Rahmen der bilateralen Zusammenarbeit zwischen ADAS und der Fa. Diamond Aircraft Industries GmbH mit Sitz in Wiener Neustadt, Österreich konnte eine ausgedehnte Flugerprobung für SMART AIRCRAFT wie auch eSAFE durchgeführt werden.
- CERT-FBW-23 – Certification Technologies for FBW on EASA CS23 Aircraft (2014-2017), LUFO V.1 Skizzieren der Zertifizierung von FBW auf CS23 Flugzeugen, Detaillierung eines Musterprüfprogramms und der Entwicklung von Softwaretechnologien, die eine automatische DO178C konforme Erstellung (Test Case Generierung, Code Generierung) der FBW-Software ermöglicht.
- EMSEC – Echtzeitdienste für die maritime Sicherheit – Security (2013-2016), Deutsches Sicherheitsforschungsprogramm Validierung von CS23 Flugzeugen als Sensorplattform für eine kostengünstige, aber leistungsfähige luftgestützte Seeverkehrserfassung.

2 EINGEHENDE DARSTELLUNG

2.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen mit einer Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

2.1.1 Aufgabenstellung

Vision

In absehbarer Zukunft werden sogenannte „Small Sized Aircraft“ mit hochentwickelter Avionik automatisch fliegen [WALL2011, WARW-2011]. Grundlage hierfür wird eine intelligente automatische Flugführung sein, die in allen Flugphasen die volle Autorität über das Flugzeug besitzt. Der Pilot kann zwar steuernd eingreifen, aber selbst in diesem Fall sorgt die Avionik im Hintergrund neben der klassischen Flugbereichsbegrenzung dafür, dass der Flug gefahrlos und korrekt auch bzgl. Terrain, Luftverkehr, Luftraum, Flugleistungsabfall und Ressourcenverfügbarkeit (z.B. Treibstoff) unter IMC ausgeführt wird. Basis einer derartigen Steuerung ist der automatische Flug einschließlich ATOL. Sie wird in Zukunft das Fliegen mit Passagieren durch einfach ausgebildete Piloten kostengünstig ermöglichen [NTSB2010, KON2011, LAZA1984]. Der Transport von Gütern kann ohne Piloten auch automatisch erfolgen. In jedem Fall erfordert dies einerseits ein automatisches ATM mit datenlinkbasierter Air Traffic Management Infrastruktur, die mit SESAR langfristig umgesetzt werden wird, andererseits eine voll elektronische, absolut ausfallsichere Steuerung für Small Sized Aircraft.

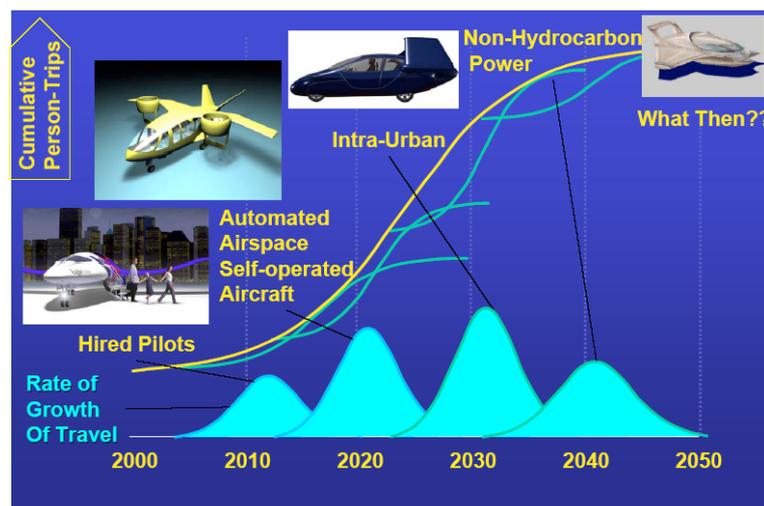


Abb. 2-1: Zukunftsprognose der NASA über die Entwicklung eines On-Demand, hochverteilten Lufttransportsystems mit Punkt-zu-Punkt Verbindungen (NASA, SATS-Small Aircraft Transportation System [SATS2002]).

Vor diesem Hintergrund wird erwartet, dass sich ein neuer Markt zu automatischen Steuerungen für Small Sized Aircraft, also im Wesentlichen Flugzeuge CS23, Class I, II, III entwickeln wird (siehe Abb. 2-2). Flugzeuge der CS23 Class IV wurden bewusst ausgenommen, da ihre Sicherheitsanforderungen mit denen der CS25 vergleichbar sind.

Marktentstehung

Die Entwicklung dieses neuen Marktes für CS23 Flugzeugen mit FBW-Ausrüstung wird in zwei Richtungen erfolgen. Einerseits erlaubt die FBW-Technologie den Individuelllufttransport anfänglich bei Lufttaxis bzgl. Sicherheit und Komfort zu verbessern. Insbesondere die Einbindung in ein zukünftiges ATM System (SESAR, NextGen) ist nur mit einem FBW-System und den damit verbundenen intelligenten ATM Funktionen möglich. Ohne FBW koppelt sich die General Aviation sukzessive von den Fortschritten in zukünftigen ATM Systemen ab. Langfristig kann der Individuelllufttransport (Tür-zu-Tür Transport) sogar, mit den Fähigkeiten des automatischen Fluges revolutioniert werden, da ein Betrieb mit und ohne Piloten realisierbar ist.

Natürlich lässt sich ein solches Personal Air Transport System (siehe auch FP7-pplane – the personal plane project) nicht von heute auf morgen im Markt einführen. Dies hängt einerseits von der Verfügbarkeit eines geeigneten datenlinkbasierten ATM-Systems ab, andererseits aber auch von den verfügbaren Steuerungstechnologien, deren Akzeptanz bei den Nutzern und sowie den spezifischen Transportkosten. Nur ein schrittweises Vorgehen wird bei der Einführung dieser Technologie erfolgreich sein:

- **SCHRITT 1 - Aerial Work**
Zuerst findet die Einführung dieser Technologie für hochwertige optional pilotierte CS23 Arbeitsflugzeuge statt, mit dem Ziel einer mittelfristigen Produkteinführung bis 2020. Die dort gewonnene Erfahrung wird wichtiges Vertrauen schaffen für den nächsten Schritt.
- **SCHRITT 2 – (Personal) Air Transportation**
Weiterentwicklung dieser Technologie für den automatischen Personenlufttransport mit Piloten², mit Produkteinführung ab ca. 2025, und für den automatischen Güterlufttransport (ohne Pilot) ab ca. 2030. Dieses Ziel entspricht auch dem langfristiges Forschungsziel des EU FP7 Work Programme Transport.

² Die Basissteuerung ist voll automatisch inkl. ATOL. Der Pilot kann via Stick eingreifen, wird aber vom Steuerungssystem geschützt bzgl. Flug-Envelope, Terrain, ATM (Luftverkehr), Luftraum, Ressourcenbegrenzung wie Treibstoff. Im Normalfall fliegt das Flugzeug automatisch. Greift der Pilot ein, so wird online / onboard immer eine „automatische“ Route zum Ziel berechnet, auf die im Fall des Ansprechens einer Begrenzung/Schutzfunktion automatisch umgeschaltet wird.

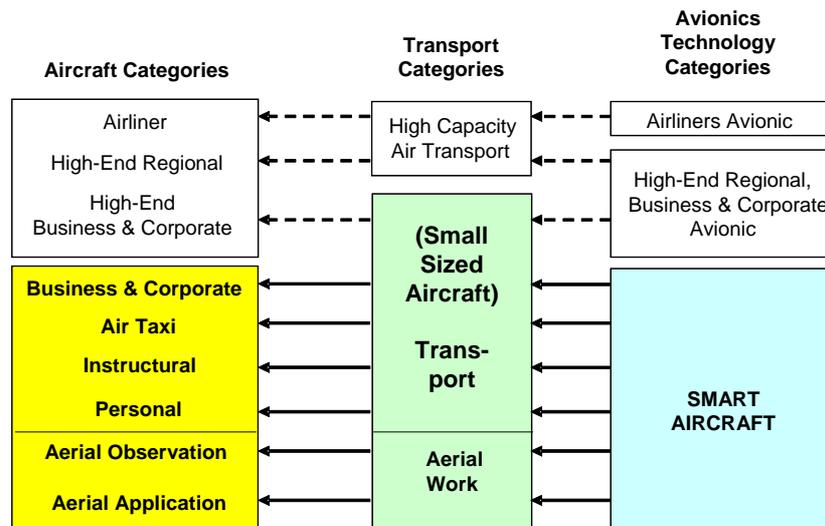


Abb. 2-2: Fokus des Verbundvorhabens SMART mit den Zielrichtungen Aerial Work und Small Sized Aircraft Transport

Forschungsziel

Zielsetzung des Vorhabens SMART AIRCRAFT war es, im ausgewählten Bereich der professionellen General Aviation die Technologiereife für den oben angegebenen SCHRITT 1, also für semi- und vollautomatische³ Arbeitsflugzeuge, voranzutreiben und die Grundlage für einen Markteintritt ab 2020 zu schaffen. Hierbei konnte SMART AIRCRAFT auf einem sehr hohen technischen Niveau aufbauen. Im Rahmen des von RDE, einer Vorgänger-Organisation der ADAS geführten EU-FP7 Projektes SAFAR (2008-2011) wurde für Flugzeuge der Klasse CS23, Class I...III, ein erstes FBW-Basissystem entwickelt.

Im EU-Projekt SAFAR lag der Schwerpunkt in der Entwicklung der FBW-Plattformtechnologie. Hier wurde erstmals eine seit 2003 entwickelte Plattformtechnologie für fehlertolerante Netzwerke auf FBW-Systeme für die allgemeine Luftfahrt übertragen [REI2011]. Dabei stellt die FBW-Plattform ein Netzwerk mit flexibler Hardware- (inkl. Sensorik und Aktuatorik), Kommunikations- und Software-Architektur dar. Kernpunkt ist dabei die Middleware, die alle Aufgaben wie Signalverarbeitung, Netzwerkkommunikation, Fehler- / Redundanzmanagement sowie das gesamte Plattformbetriebsmanagement übernimmt.

Für Applikationen wie die Flugregelung, die Flugführung oder die Steuerung der Bordsysteme bleiben Netzwerkkomplexität, Fehlertoleranz und Redundanz verborgen. Gegenüber diesen Applikationen bildet die Middleware die Plattform als ein virtuelles, nicht verteiltes Simplexsystem ab. Die Applikationen schrumpfen so wieder auf ihre ureigene Aufgabe. Die Komplexität des Netzwerks einschließlich Fehlertoleranz etc. bildet sich in der Middleware ab. Durch die Einführung von Abstraktionsebenen

³ Optional pilotierte Arbeitsflugzeuge

war es im Rahmen von SAFAR erstmals gelungen, die Middleware so aufzubauen, dass sie sich mittels Spezialisierung automatisch generieren (instanzieren) lässt - ein klarer Vorteil im Vergleich zu heutigen FBW-Entwicklungen. Damit lässt sich der Entwicklungsaufwand für ein FBW-System zukünftig signifikant reduzieren – eine absolute Voraussetzung für Markteinführung von FBW in der hier betrachteten kostensensitiven Klasse der CS23 Flugzeuge.

Vor diesem Hintergrund konzentrierte sich das Vorhaben SMART AIRCRAFT auf folgende Arbeitsschwerpunkte:

- **Grundlegende Anforderungen an das FBW-System**
Erfassung von Anforderungen auf Missions- und Flugzeugebene. Erfassung der Systemanforderungen für die Anwendung eines FBW-Systems auf einem optional pilotierten Arbeitsflugzeug zur Seeverkehrserfassung. Konkretisierung der Anforderungen an das FBW-System für den in FBW-23 betrachteten Flugzeugtyp (Diamond DA42) hinsichtlich notwendiger FBW-Module, Sensoren, Funktionen und Schnittstellen zum Flugzeug. Berücksichtigung der kurzfristig zu erfüllenden Anforderungen für die innerhalb des Vorhabens durchzuführende Testflugkampagne auf Basis einer Erprobungserlaubnis.
- **Grundlagen FBW-Plattformtechnologie**
Entwicklung von plattformrelevanter Technologie, der Entwicklung von Systemfunktionen sowie die Realisierung einer integrierten fehlertoleranten Navigation. Der Prozess der Generierung der Middleware per Spezialisierung und die damit verbundene Tool-Suite muss im Hinblick auf industrielle Anwendbarkeit gründlich überarbeitet werden. Ansatz ist hierbei die Optimierung der Middleware und die daraus resultierende, sich für die Tool-Suite günstig auswirkende Modelloptimierung.
- **FBW-Validierungsplattform**
Validierung unterschiedlicher Realisierungszustände des FBW-Systems auf dem von FP7 SAFAR übernommenen Erprobungsträger DA42. Schrittweise Integration von in diesem Projekt neu entwickelten Technologien, Komponenten, Systemfunktionen in das FBW-System und deren Erprobung im Test Rigg (Iron Bird) und in Flugversuchen. Erweiterung der FBW-Plattform so dass das gesamte Flugregime eines CS23 Flugzeuges inklusiv automatischem Start und automatischer Landung von der Plattform beherrscht wird. Realisierung der notwendigen Zusatzfunktionen wie Brems-, Bugrad- und Klappensteuerung wie eine robuste Bodenabstandsmessung und fehlertolerante, hochpräzise Inertialnavigation gestützt durch Satellitennavigation (GPS & SBAS).

2.1.2 Arbeitsplan

Im Verbund FLYSMART konzentrierten sich die Arbeiten der ADAS auf das Leitprojekt FBW-23 - Full Authority Fly-By-Wire for CS23 Aircraft (siehe Abb. 2-3).

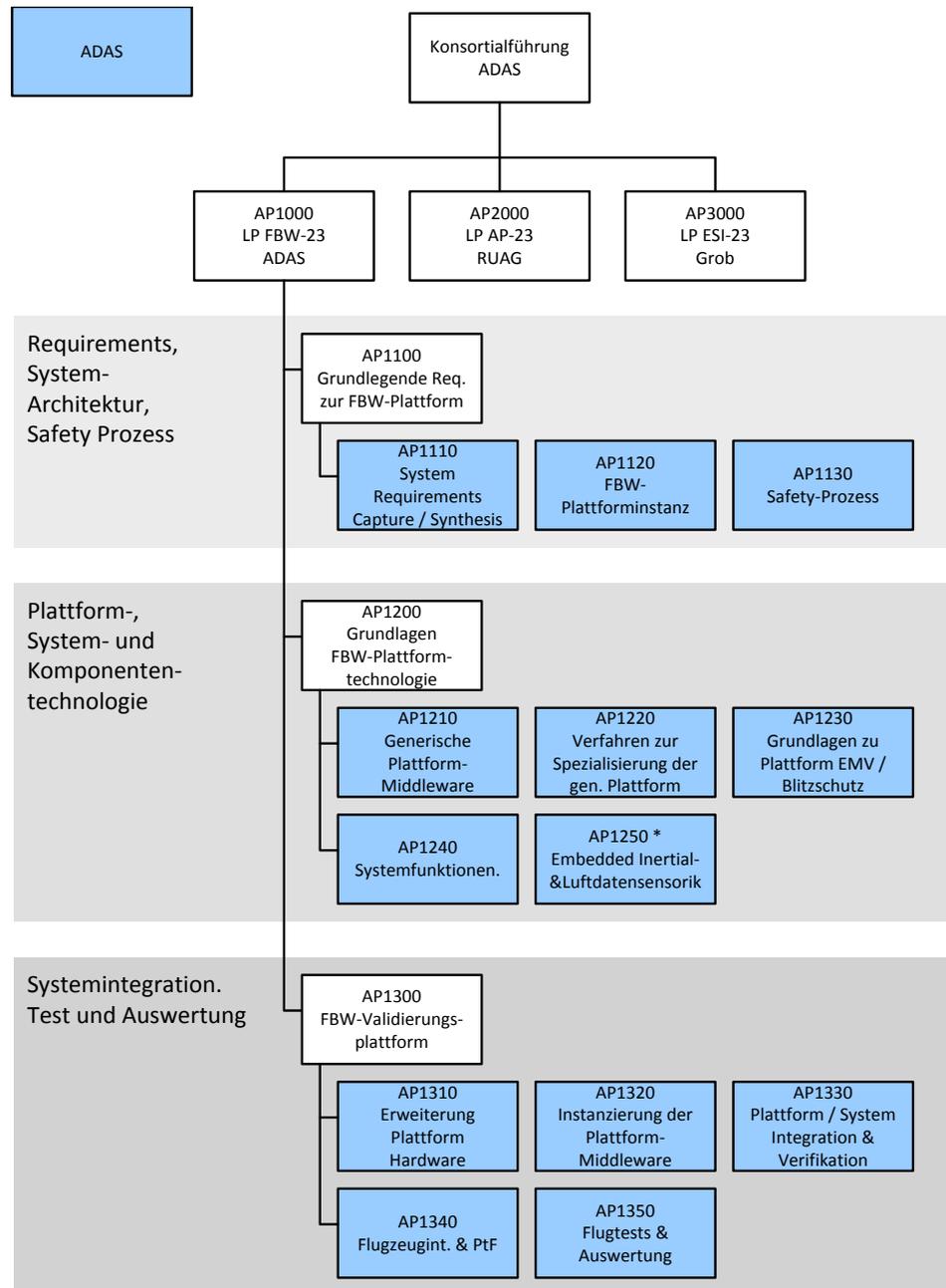


Abb. 2-3: Projektstrukturplan des Leitprojektes FBW-23 als Bestandteil des Verbundvorhabens FLYSMART. Die Beteiligungen der ADAS sind blau markiert.

Als potentieller, zukünftiger Ausrüster und Systemintegrator von hochwertigen CS23 Arbeitsflugzeugen übernahm die ADAS innerhalb des Leitprojektes FBW-23 die industrielle Führungsrolle. Mit ihrer Beteiligung an allen Arbeitspaketen im Leitprojekt FBW-23 stellte ADAS sicher, dass Technologien / Komponenten so entwickelt wurden, dass sie später einer wirtschaftlichen Verwertung einfach zugeführt werden können. Dabei galt es die folgenden übergeordneten Ziele zu erreichen, die in Summe die industrielle Realisierung von hochwertigen CS23 Arbeitsflugzeugen ermöglicht:

- Weiterentwicklung der FBW-Plattformtechnologie bis hin zur industriellen Anwendbarkeit für CS23 Flugzeuge,
- Entwicklung der Flugführungs- und Flugregelungsfunktionen für das gesamte Einsatzbereich von CS23 Arbeitsflugzeugen,
- Demonstration einer repräsentativen Konfiguration eines Full Authority FBW-Systems auf einem CS23 kompatiblen Erprobungsträger.

Im Folgenden sind die Arbeitsschwerpunkte der ADAS beschrieben. Die Organisationen, die die Arbeitspakete technologisch / administrativ führten, sind in einem Klammersausdruck ausgewiesen.

AP1100 - Grundlegende Requirements zum FBW-System

Systematische Anforderungserfassung, -analyse und -synthese mit Fokus auf CS23 Arbeitsflugzeuge.

- AP1110 – System Requirements Capture / Synthesis (ADAS)
Detaillierung der Anforderungen an zukünftige CS23-Arbeitsflugzeuge auf Basis repräsentativer Einsatzszenarien, Ableitung der Anforderungen an die zu erarbeitende FBW-Plattform-Kerntechnologie und die zu realisierenden Systemfunktionen, Fixierung der funktionalen und nichtfunktionalen (Sicherheits-, Zulassungs-, Qualifikationsaspekte etc) Anforderungen.
- AP1120 - FBW-Plattforminstanz (ADAS)
Konkretisierung der Anforderungen an das FBW-System für den in FBW-23 betrachteten Flugzeugtyp (DA42) hinsichtlich notwendiger FBW-Avionik, Anforderungen an die Systemfunktionen und an die ergänzenden Aggregate (Sensoren, Aktuatoren).
- AP1130 - Safety-Prozess (ADAS)
Entwurf eines Zertifizierungs- und Zulassungsprozesses für CS23 FBW, der die Verfahrenstechnologie FBW-Plattforminstanzierung durch Spezialisierung eines generische FBW-Plattformansatzes berücksichtigt. Schaffung von Berechnungsgrundlagen und Analyseverfahren zum Nachweis der Zuverlässigkeit / Ausfallsicherheit der

FBW-Avionik sowie der Systemfunktionen, Skizzierung eines allgemein einsetzbaren Zulassungsprozesses incl. möglicher Optionen für ein Tailoring.

AP1200 - Grundlagen FBW-Plattformtechnologie

Entwicklung von plattformrelevanter Technologie, der Entwicklung von Systemfunktionen sowie der Entwicklung einer integrierten Navigationskomponente.

- **AP1210 - Generische Plattform-Middleware (ILS)**
Unterstützung des ILS bei der Überarbeitung des existierenden Schichtenmodells der FBW-Plattform. Fokus ist hier die Vereinheitlichung und Vereinfachung der Einbindung externer Geräte, Signale und Daten, um die spätere Spezialisierung / Anpassung auf unterschiedliche Flugzeugtypen zu vereinfachen. ADAS Aktivitäten konzentrierten sich auf Erstellung der Anforderungen für das Plattform-Management, die Überarbeitung der Konzeption des Schichtenmodells, sowie bei der Realisierung des Schichtenmodells. ADAS wurde hierbei durch AVIO unterstützt.
- **AP1220 - Verfahren zur Spezialisierung der generischen Plattform (ILS)**
Unterstützung des ILS bei der Weiterentwicklung der Tool-Suite zur Automatisierung des Spezialisierungsprozesses. Hierbei geht es um eine Verbesserung der Repräsentanz der Instanziierungsregeln und einer intuitiven Benutzerschnittstelle für den Systementwickler, um eine effiziente Anpassung der FBW-Plattform durch Spezialisierung an die konkrete FBW-Installation zu erleichtern. ADAS wurde bei dieser Aufgabe durch die AVIO unterstützt
- **AP1230 - Grundlagen zu Plattform EMV / Blitzschutz (SET)**
Unterstützung des Partners SET bei Ausarbeitung eines luftfahrttaugliches Blitzschutz / EMV-Konzeptes für den FlexRay-Bus, welches speziell im Bereich CS23 Class I, II, III bei minimalem Hardware- und Integrationsaufwand den EMV / Blitzschutzstandards der Luftfahrt genügt. Entwurf eines geeigneten Zertifizierungsverfahrens.
- **AP1240 – Systemfunktionen / Applikationen (ADAS)**
Erarbeiten eines Konzeptes zur weitgehenden Automatisierung von Systemen wie Fahrwerkssteuerung, Bugradlenkung, Bremsen und Antriebseinheiten (Engine), partielle Realisierung ausgewählter Systemfunktionen. Unterstützung des ILS/IFR bei Realisierung von Flugsführung und Regelung für das gesamte Flugregime, Unterstützung bei der Erstellung des flugmechanischen Modells.
- **AP1250 - Embedded Inertial- und Luftfahrtsensorik (IMAR)**
Dieses Arbeitspaket wurde gestrichen. Stattdessen wurden für die Ausrüstung des Erprobungsträgers aus Gründen der Sicherheit und

Risikominimierung für die bodennahe Flugerprobung kommerziell verfügbare luftfahrttaugliche Komponenten verwendet.

AP1300 - FBW-Validierungsplattform

Validierung unterschiedlicher Realisierungszustände des FBW-Systems auf dem von FP7 SAFAR übernommenen Erprobungsträger DA42. Schrittweise Integration der in diesem Projekt neu entwickelten Technologien, Komponenten, Systemfunktionen in das FBW-System und deren Erprobung im Test Rigg und in Flugversuchen.

- **AP1310 - Erweiterung Plattform Hardware (ADAS)**
Basierend auf den Anforderungen aus AP1120 erfolgte hier die Anpassung und Erweiterung der bestehenden Signalerfassung und -verarbeitung sowie die Durchführung von umfassenden Unit-Tests als Vorbereitung für die Systemintegration. Elektronikmodule wie CPM und ACM (inkl. Aktuatoren) wurden ohne Änderung aus SAFAR übernommen.
- **AP1320 - Instanziierung der Plattform-Middleware (ILS)**
Unterstützung des ILS bei der Erstellung der gesamten Middleware für die unterschiedlichen Ausbaustufen des FBW-Systems.
- **AP1330 - Plattform-Instanz/System Integration & Verifikation (ILS)**
Unterstützung des ILS bei der Teil-/Gesamtintegration/-verifikation der FBW-Plattforminstanz und der Integration der Systemfunktionen mittels HIL / Closed Loop Systemtests auf der Labortestumgebung. ADAS wurde hierbei durch AVIO unterstützt.
- **AP1340 - Flugzeugintegration & Permit to Fly (ADAS)**
Für die verschiedenen Ausbaustufen des FBW-Systems erfolgte hier die sukzessive Erweiterung der FBW-Hardware (zusätzliche Sensorik und Aktuatorik (z.B. Bremsen), Steuerungselemente für den Piloten / Safety Piloten) in den Erprobungsträger DA42, die Durchführung von Systemtests und Bodentests und die experimentelle Zulassung des Erprobungsträgers unter Beibehaltung des mechanischen Backup-Steuersystems. Die Einrüstung erfolgte durch DAI in Wiener Neustadt, Österreich, mit Unterstützung der ADAS.
- **AP1350 - Flugtest & Flugtestauswertung (ADAS)**
Für die verschiedenen Ausbaustufen des FBW-Systems wurden projektbegleitende Flugversuche (in Summe ca. 100h) durchgeführt und ausgewertet. Schwerpunkte bei der Auswertung waren der Vergleich der Flugversuchsdaten mit den Erwartungen aus der Closed-Loop-Simulation sowie die Bewertung von FBW-System/Komponenten/ Systemfunktionen bzw. FBW-Plattform-Design und -Technologiereife.

In Abb. 2-4 findet sich der Zeitplan des Leitprojektes FBW-23. Das Teilvorhaben SMART AIRCRAFT stellte eine Teilmenge von FBW-23 dar.

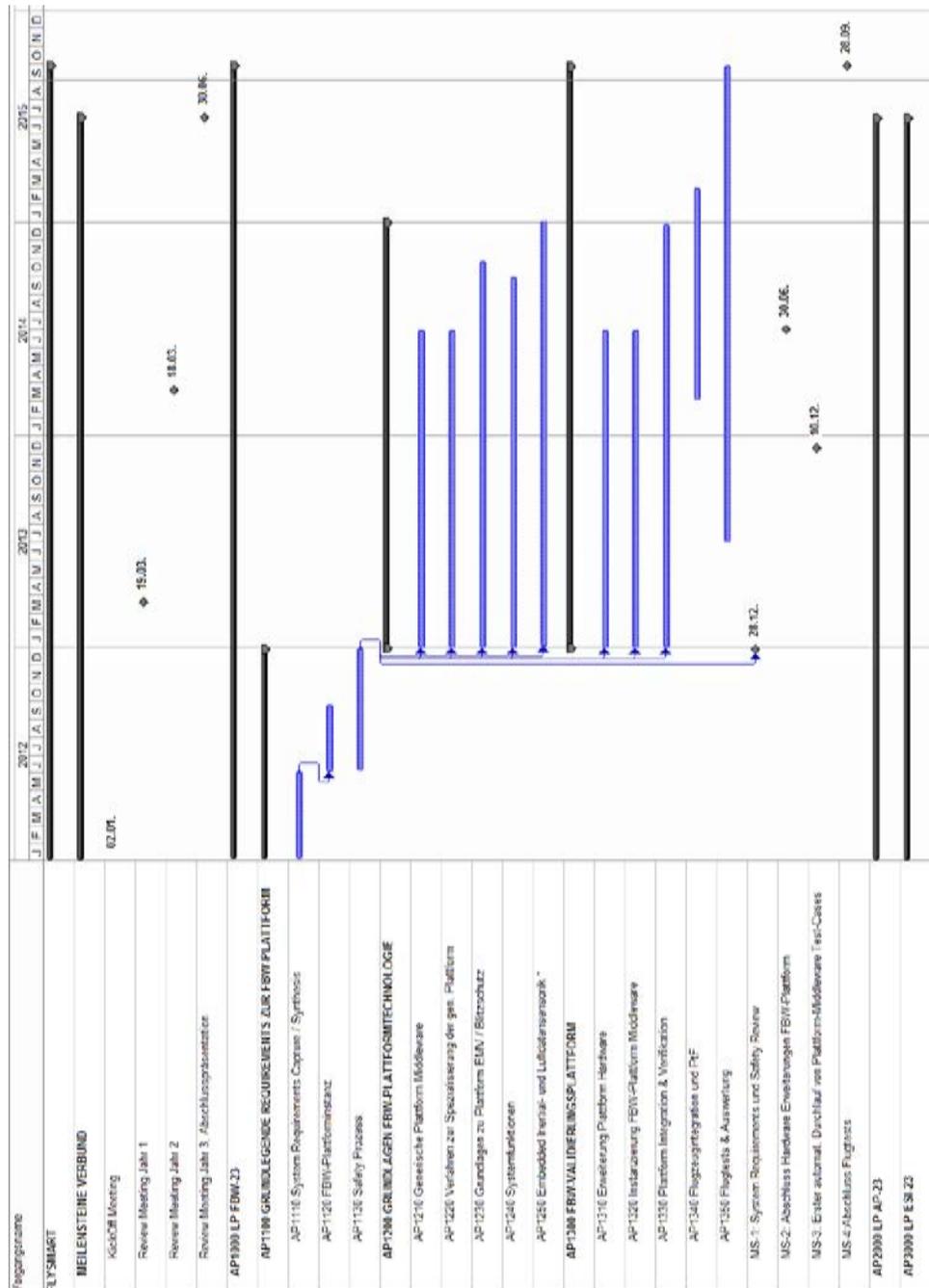


Abb. 2-4: Gantt-Chart des Leitprojektes FBW-23 inkl. der Meilensteine als Bestandteil des Verbundvorhabens FLYSMART

Die Laufzeit des Vorhabens SMART AIRCRAFT war auf 42 Monate begrenzt. Das Vorhaben begann am 1.1.2012 und wurde am 30.06.2015 erfolgreich beendet. Im Rahmen des Partnerprojektes eSAFE wurden die Flugerprobung noch bis Ende September 2015 bei DAI durchgeführt.

Meilensteine

Über vier Meilensteine wurde der Projektfortschritt überprüft:

- MS1 - Systemanforderungen und Safety Prozess (2012M12)
Konsolidierte Anforderungsbeschreibung auf Flugzeug- und FBW-Ebene. Entwurf einer Zertifizierungs- und Zulassungsrichtlinie für FBW in CS23 Flugzeugen.
- MS2 - Abschluss der Hardware Erweiterungen FBW-Plattform (2013M09)
HW-Realisierung der zusätzlichen Funktionalität bzgl. Klappen-, Bugrad-, Bremsen- und Antriebssteuerung
- MS3 – Erster automatischer Durchlauf von Plattform-Middleware Test-Cases (2013M12)
Die spezialisierte Instanz des FBW-Systems wurde erstmalig automatisch mit der Tool-Suite generiert.
- MS4 – Abschluss Flugtests (2015M09)
Durchführung der projektbegleitenden Flugtests. Durchführung der abschließenden Flugerprobung mit der finalen Ausbaustufe des FBW-Systems. Demonstration aller realisierten Systemfunktionen im Flug.

2.1.3 Anforderungen an das FBW-System

Missionsanforderungen

Die durchgeführten Forschungsarbeiten waren eng gekoppelt an die zu erwartenden Einsatzszenarien für ein Full-Authority FBW-System. Als Anwendung mit der höchsten wirtschaftlichen Realisierungschance wurde das Szenario „Optional pilotierte Flugzeuge für die weiträumige Seeverkehrsüberwachung“ ausgewählt.

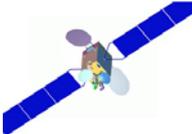
AWZ

Untersuchungen des Megatrends der weltweiten Ressourcenverknappung zeigen, dass die Bedeutung der maritimen ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ, auch bekannt unter dem Begriff 200 / 350 Seemeilenzone) zukünftig zunehmen wird. Neben der Sicherstellung der nationalen Integrität durch Überwachung der blauen Grenze gegen illegale Eindringlinge und Schmuggler gilt es die im internationalen Seerechtsübereinkommen der Vereinten Nationen [UNCLOS1982] festgelegten souveränen Rechte zu der dort neu eingeführten AWZ der Küstenstaaten zu wahren. Zu den souveränen Rechten gehören die Erforschung und Ausbeutung, Erhalt und Bewirtschaftung der lebenden und nichtlebenden natürlichen Ressourcen der Gewässer über dem Meeresboden, maßgeblich durch Fischerei, des Meeresbodens und seines Untergrun-

des durch Meeresbergbau sowie andere Tätigkeiten zur wirtschaftlichen Nutzung wie der Energieerzeugung. Andere Staaten genießen nach Art. 58 und 87 des UN-Seerechtsübereinkommens innerhalb der AWZ eines jeden Küstenstaates die Freiheit der Hohen See.

Maritime Überwachung Bisher können die souveränen Rechte der Küstenstaaten nur bedingt gewahrt werden, da ein maritimes weiträumiges Lagebild mangels verfügbarer Technologie nicht erstellt werden kann. Radarüberwachung mittels terrestrischer Küstenstation erlaubt die Erfassung von ca. 10% der AWZ (Reichweite ca. 20 nm). Gegenwärtige Satellitentechnik bietet keine zeitnahen Überwachungsmöglichkeiten, da die existierenden Satelliten auf polaren Bahnen operieren und sie deshalb Repetitionszyklen typischerweise in der Größenordnung von 24h und größer besitzen. Luftgestützte Beobachtungssysteme wie Maritime Patrol Aircraft (MPA) werden seit Jahrzehnten für die militärische Seeüberwachung eingesetzt (z.B. Lockheed P-3 Orion, Boeing P-8 Poseidon), stellen aber wegen ihrer unattraktiven Kostenstruktur keine Lösung für eine flächendeckende Überwachung der AWZ rund um die Uhr dar.

OPV Optional pilotierte CS23 Flugzeuge (OPV) – Arbeitsflugzeuge, die sowohl bemannt wie auch unbemannt betrieben werden können - bieten sich hier als interessante, kostengünstige und leistungsstarke Lösung für die weiträumige Seeverkehrserfassung an. Insbesondere im unbemannten Betrieb bieten solche OPVs (siehe Leistungsdaten in Abb. 2-5 am Beispiel Diamond DA42) Flugzeiten von bis zu 14 h bei einer Nutzlastkapazität von 190 kg. Damit können hohe Standzeiten im maritimen Einsatzgebiet mit hoher Aufklärungsleistung realisiert werden.

	Wing Span:	13,42 m	
	Length:	8,51 m	
Height:	2,65 m		
Basic Empty Weight:	1.460 kg		
Max. Gross Weight:	2.000 kg		
Max. Altitude (m/u):	5.500 /8.500m		
Diesel/Heavy Fuel Twin Engine			
Range:	> 1.500 nm		
Endurance (m/u):	6 / 14 hrs		
Payload Capability:	> 190 kg		
Cruise Speed:	90-200 kts		
Electrical Power for payloads:	4x 1 kW		
Operational Costs:	300 EUR/h		

m/u := manned / unmanned

Abb. 2-5: Leistungsdaten einer optional pilotierten Diamond DA42

Die Kommunikation zwischen Flugzeug und maritimer Leitwarte wird dabei über schmal- und breitbandige drahtlose Datenkommunikation (Line-Of-Sight und Beyond-Line-Of-Sight) sichergestellt.

Die Erfassung des Seeverkehrs, sowohl der kooperativen wie der nicht-kooperativen Verkehrsteilnehmer, geschieht mit einem maritimen Radar. Dabei können bei einer Flughöhe von 10.000 ft / 3.050 m in Rundumsicht Detektionsreichweite von ca. 100 nm erreicht werden. Die gerichtsverwertbare Identifikation geschieht nach Lokalisierung verdächtiger Seeverkehrsteilnehmer dann mit elektrooptischen Sensoren im sichtbaren und im infraroten Wellenlängenbereich zu jeder Tages- und Nachtzeit. AIS-Empfänger, die die maritimen AIS-Transpondersignale der Seeverkehrsteilnehmer auswerten, komplettieren die maritime Aufklärungssensorik. In Abb. 2-6 sind die unterschiedlichen Einsatzmöglichkeiten von maritim eingesetzten optional pilotierten Arbeitsflugzeugen skizziert.

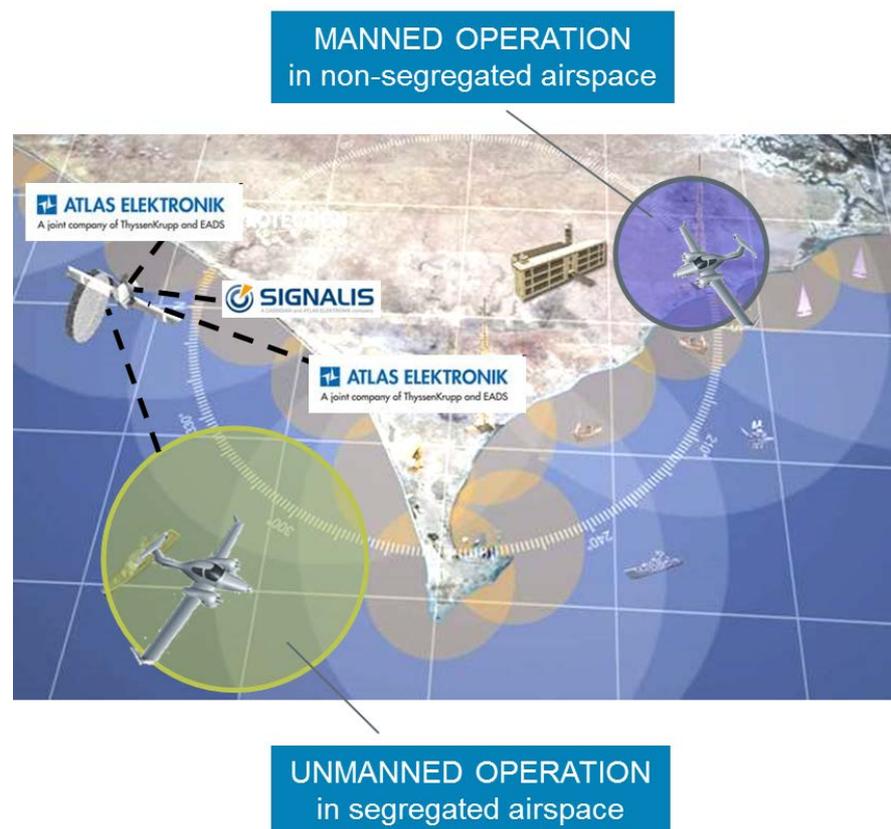


Abb. 2-6: Einsatz optional pilotierter Flugzeuge für die weiträumige Seeverkehrserfassung. Die unterschiedlichen Betriebsmodi eines OPV erlauben einen breitbandigen Einsatz.

Im unbemannten Betrieb können OPVs typischerweise ca. 100 nm vor der Küstenlinie im gesperrten Luftraum ihre Stärken ausspielen. Dabei werden die OPVs weitgehend automatisch betrieben. Küstennah bietet sich der bemannte Betrieb der OPVs im nichtgesperrten Luftraum an. Hier sind die Flexibilität der Piloten bzgl. des existierenden Luftverkehrs und die kognitive Fähigkeiten der Beobachter an Bord bzgl. der komplexen Aufklärungssituation gefragt.

Neben der Leistungsfähigkeit und der Flexibilität im Einsatz sind die niedrigen Betriebskosten (Betrieb und präventive Wartung) der OPVs, die sich direkt von denen der zu Grunde liegenden CS23 Basisflugzeuge ableiten lassen, ein zentraler Wettbewerbsvorteil.

Es ist davon auszugehen, dass auch zukünftig ein attraktives Kosten/Leistungsverhältnis für diese Art der CS23 Arbeitsflugzeuge existieren wird. Der permanente Wettbewerbsdruck dem die General Aviation unterliegt, sorgt dafür.

FBW in OPVs

Die unterschiedlichen Betriebsmodi verlangen dabei eine unterschiedliche Ausprägung des FBW-Systems. Für den unbemannten Betrieb von OPVs ist der Einsatz von Full-Authority FBW-Systemen unverzichtbar. Nur über ein hochsicheres/hochverfügbares FBW-System kann ein solches Arbeitsflugzeug überhaupt ferngeführt werden. Der Betrieb muss in allen Flugphasen vom automatischen Start über das automatische Abfliegen von 4D-Trajektorien im Streckenflug bis hin zur automatischen Landung mit hoher Verfügbarkeit vom FBW-System durchgeführt werden. Dabei muss das FBW-System auch beim Auftreten von Einzelfehlern weiterhin einen sicheren Betrieb garantieren. Gegenüber einem katastrophalen Ausfall eines CS23 Class II Flugzeuges von 10^{-5} Ereignissen / Flugstunde muss ein solches FBW-System um den Faktor 100 besser sein, d.h. es dürfen nur Fehler im FBW-System von 10^{-7} Ereignissen / Flugstunde auftreten, die zu einem katastrophalen Ausfall des Flugzeuges führen würden. Dies gilt natürlich auch für die notwendigen Unterstützungssysteme wie z.B. die Energieversorgung.

Beim bemannten Betrieb eines OPVs, wenn nur mit dem FBW-System via Stick und Schubhebel gesteuert werden kann, gilt das oben gesagte ebenfalls. Existiert ein mechanisches Backup-System zur Steuerung des Flugzeuges, sind die Sicherheitsanforderungen an das FBW-System deutlich geringer, da im Fehlerfall der Pilot mit Hilfe des mechanischen Backup-Systems übernehmen kann.

Im Leitprojekt FBW-23 wird zur Konzeption des FBW-Systems der Betriebsmodus unbemannter Betrieb bzw. FBW-Primärsteuerung ohne mechanisches Backup zu Grunde gelegt. Unabhängig davon werden alle Flugversuche mit einem mechanischen Sicherheitsbackup geflogen.

Luftfahrttechnische Zulassungsanforderungen im Rahmen einer Supplemental Type Certification

Die Nachrüstung eines FBW-Systems für Flugzeuge der CS23 Kategorie Class I, II, III im Rahmen einer Supplemental Type Certification (STC) setzt die Zertifizierbarkeit des FBW-Systems gemäss EASA / FAA Vorgaben voraus. Hierbei ist zu beachten, dass das FBW-System aus einer generischen, flexiblen und fehlertoleranten HW / SW Avionik-Plattform besteht. Ein FlexRay-Bus mit Blitzschutzkomponenten verbindet die verschiedenen Micro-Controller basierten Rechnermodule.

Verschiedene Anwendungen werden als SW-Komponenten eingebunden, z.B. die Flugregelung und Flugführung, oder die Basisfunktionalitäten, wie z.B. das Redundanzmanagement. Das FBW-System soll die mechanische Flugsteuerung ersetzen und den Sicherheits- und Zulassungsanforderungen entsprechen.

Die Zertifizierungsanforderungen ergeben sich aus

- Commission Regulations (EU) No 748/2012; annex 1 part 21, chap. 21.A20
- Acceptable Means of Compliance and Guidance Material (AMC), chap. 21.A20

Die 'Certification Requirements' (CR) für das FBW-System werden zusammengestellt auf der Basis

- Certification Specifications for Normal, Utility, Aerobatic and Commuter Category Aeroplanes; CS-23
- zusätzlicher 'Special Conditions' mit Angabe der Nachweisart (MoC), Nachweisebene und der Verifikationsdokumente

Die zentrale Anforderung bezüglich Sicherheit mit den geforderten Nachweisen (Compliance) bildet die Anforderung CS 23.1309. Das Advisory Circular AC No: 23.1309-1E liefert die Verbindung zu den Rahmenrichtlinien für den Systementwurf mit den unterlagerten Prozessen zur Erstellung von sicherheitskritischer Hardware und Software.

- ARP 4754
Guidelines for Development of Civil Aircraft and Systems
- RTCA / DO-178 C
Software Considerations in Airborne Systems and Equipment Certification
- RTCA / DO-331
Model-based Development and Verification

- RTCA / DO-254
Design Assurance Guidance for Airborne Electronic Hardware
- RTCA / DO-160
Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment

Die Certification Requirements stehen in direktem Zusammenhang mit der System Spezifikation für das in ein Flugzeug zu integrierende FBW-System. Die Life Cycle für System, HW und SW orientieren sich an den gegebenen Standards und den im Rahmen der Sicherheitsanforderungen verifizierten ‚Design Assurance Level‘ (DAL) aus AC 23.1309 für die verschiedenen Flugklassen.

CERTT-FBW23

Im Forschungsvorhaben LUFO V.1 CERTT-FBW23 werden die Anforderungen an Zulassungsbasis und –verfahren für ein CS23 FBW-System vertieft untersucht. Ergebnisse werden in 2017 vorliegen.

2.1.4 Erweiterungen des FBW-Systems

Konzeption des Erprobungsträgers

Plattformtechnologie

Das FBW-System stellt im Wesentlichen eine Instanz einer allgemeinen Avionik-Plattform mit hoher Flexibilität bzgl. Struktur, Hardware, Kommunikation und Software dar. Kernstück ist eine in allen Modulen der Plattform implementierbare Middleware, die alle Aspekte der Kommunikation, Fehlermanagement der Plattform inkl. Sensoren und Aktuatoren, byzantinische Agreementbildung sowie das gesamte Betriebsmanagement der Plattform abdeckt. Die Applikationen sehen durch die Middleware nur ein virtuelles Simplex Ein-Prozessorsystem, also nichts von der Komplexität der Plattform mit Verteilung, Fehlertoleranz und Redundanz. Die Middleware für eine spezifische Anwendung (gesamtes FBW-System) ergibt sich durch Spezialisierung. Diese Spezialisierung wird mit einer Tool-Suite durchgeführt. Dabei eröffnet die Tool-Suite weitere Möglichkeiten der Prozessautomatisierung, nämlich die weitgehend automatische Erstellung von Entwicklungsdokumenten und Testcases (nicht Bestandteil von FLYSMART) zum FBW-System (Applikationen sind ausgenommen). Dies stellt zur heutigen Technik eine signifikante Innovation dar und ist Grundlage einer deutlichen Reduktion des Entwicklungsaufwandes zukünftiger FBW-Systeme.

Mit Hilfe dieser FBW-Plattformtechnologie lassen sich CS23-Flugzeuge kostengünstig mit Full-Authority FBW ausrüsten, die den Piloten in allen Flugphasen aktiv unterstützen kann. Im FP7 SAFAR Vorhaben wurde erstmalig das FBW-Plattformkonzept auf ein CS23 Flugzeug eingerüstet. Vergleicht man den Funktionsumfang des SMART AIRCRAFT –

Erprobungsträgers (Abb. 2-7) mit dem FP7 SAFAR Versuchsträger (Abb. 2-8), sind die unterschiedlichen Zielrichtungen erkennbar.

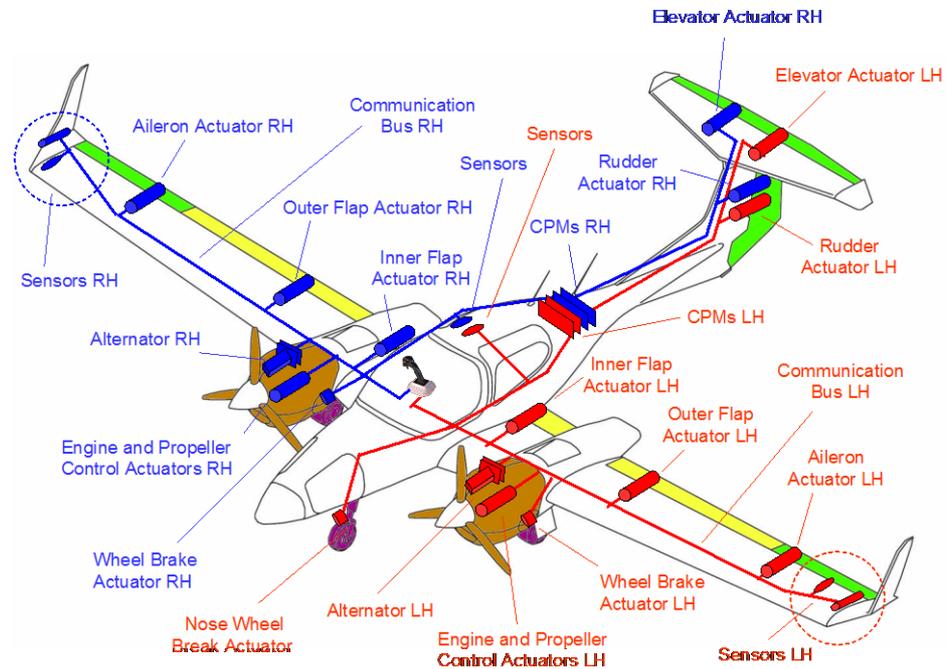


Abb. 2-7: Ausrüstung des SMART AIRCRAFT – Erprobungsträgers zur Demonstration des FBW-Systems für alle Flugphasen des Flugzeuges. Neben dem vollständig eingerüsteten FBW-System existiert als Backup ein mechanisches Steuerungssystem.

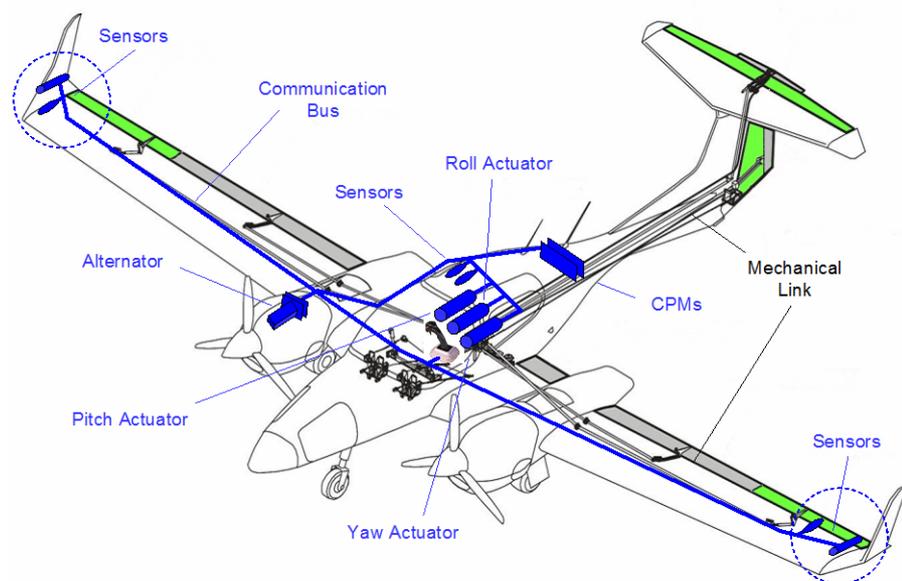


Abb. 2-8: SAFAR Erprobungsträger und dessen FBW-Ausrüstung zur Validierung der FBW-Basistechnologien..

Basistechnologien In FP7 SAFAR wurde die FBW-Basistechnologie prototypisch entwickelt. Der Schwerpunkt lag auf der automatischen Instanziierung des FBW-Systems. Die FBW-Basistechnologie wurde erstmalig auf ein CS23 Flugzeug, dem SAFAR Erprobungsträger auf Basis Diamond DA42 eingerüstet und im Streckenflug validiert. Trotz erkennbarer Defizite, die der damaligen Flugregelung zugeordnet werden konnten, erfüllte das FBW-Basissystem alle Erwartungen.

Komplettsystem SMART AIRCRAFT setzte auf den Ergebnissen von SAFAR auf, zielte jedoch auf eine vereinfachte, industrialisierte Instanziierung und Spezialisierung des FBW-Systems. Mit der Einrüstung des vollen Funktionsumfangs des FBW-Systems auf dem Erprobungsträger DA42 sollte unter realistischen Bedingungen nachgewiesen werden, dass neben dem automatischen Streckenflug auch kritische Flugphasen wie der automatische Start und die automatische Landung von einem solchen FBW-System sicher durchgeführt werden können. Dazu musste die bereits aus SAFAR bestehende FBW-Einrüstung insbesondere um die Komponenten erweitert werden, die für eine erfolgreiche Durchführung von ATOL notwendig sind.

Folgende Instrumentierung des Erprobungsträgers wurde festgelegt. SAFAR Instrumentierung wurde entsprechend ausgewiesen:

Aktuatorik

- Höhen-, Seitenruder und der Querruder (SAFAR)
- Landeklappensystem
- Antriebseinheiten (SAFAR)
- Fahrwerk
- Bugradlenkung
- zusätzliche elektromechanische Bremszylinder (links/rechts)

Sensorik

- Air Data Probes / 5-Loch Sonden (SAFAR)
- Landeklappenposition
- GPS gestützte Inertialnavigation
- Weight on wheels
- Fahrwerksposition
- Präzisionshöhenmessung über Grund
- Position der Bremskolben, aktueller Bremsdruck Bremszylinder

Einfluss auf die Avionik Plattform

Um diese zusätzliche Sensoren / Aktuatoren, die teilweise in Duplex- oder Triplex-Konfiguration ausgeführt wurden, an das FBW-System anbinden zu können, musste das aus SAFAR existierende FBW-System entsprechend erweitert werden.

Modulare Hardware

Der Hardware des FBW-Systems (Hersteller ist der Verbundpartner SET) liegt ein skalierbares Modulkonzept aus Modultypen unterschiedlicher Funktionalität zu Grunde (siehe Abb. 2-9). Über redundante FlexRay-Datenbusse können die einzelnen Module zu einem hochsicheren FBW-System verbunden werden. So kann auf unterschiedlichste Anforderungen für ein CS23 FBW-System flexibel reagiert werden. Alle Module wurden gemäß DO-254 entworfen, sind gegen Blitz / Elektromagnetische Interferenzen (EMI) geschützt und besitzen ein robustes, kompaktes Gehäuse, um Umweltaforderungen gemäß DO-160 zu erfüllen. Besonderer Wert wurde auf eine der CS23 angepassten, niedrigen Kostenstruktur gelegt.



Abb. 2-9: Funktionsmodule des FBW-Systems bestehend aus Rechneinheit (CPM), Schnittstelleneinheit (IOM), Energieverteilungseinheit (PDM), Aktuatoreinheit (ACM) und Netzwerkerweiterungseinheit (SCM)

Modulfamilie

Im Einzelnen besteht die FBW Hardware Modulfamilie aus fünf Modultypen:

- Core Processing Module (CPM) werden für die Berechnung der zentralen FBW Funktionen genutzt. CPMs bestehen aus jeweils zwei unabhängigen und mechanisch klar getrennten Rechnerboards und kommunizieren mit

den anderen Modulen über jeweils redundante FlexRay-Datenbusse.

- **Input / Output Module (IOM)**
dienen zum Anschluss externer Sensoren / Aktuatoren. IOMs bestehen aus jeweils zwei unabhängigen und mechanisch klar getrennten Rechnerboards inkl. der separater Input / Output Interfaces. IOMs lassen sich für Simplex- und Duplex-Betrieb konfigurieren. Neben FlexRay sind z.B. CAN, ARINC 429, RS232, Ethernet, sowie digitale und analoge Ein- und Ausgänge verfügbar.
- **Power Distribution Module (PDM)**
dienen dem sicheren Ein- und Ausschalten von elektrischen Verbrauchern an Bord und erlauben so eine dynamische Verteilung der elektrischen Versorgung von Bordgeräten je nach Bedarf, Kritikalität und Verfügbarkeit der elektrischen Energie. PDMs wurden in SMART AIRCRAFT nicht eingesetzt.
- **Star Coupler Module (SCM)**
werden für die Realisierung unterschiedlicher Netzwerktopologien genutzt. Dabei werden Netzwerksegmente zu Knoten zusammengefasst und über das SCM voneinander galvanisch entkoppelt. Durch diese Strukturierung des FBW-Netzwerkes lassen sich Netzwerksegmente mit unterschiedlichen Blitzschutzklassen realisieren.
- **Actuator Control Module (ACM)**
werden für die Ansteuerung von mechanischen Steuerelementen (z.B. den Steuerflächen) genutzt. Sie sind in Control-Monitor Architektur aufgebaut. Die Energieversorgung erfolgt über redundante Versorgungsleitung. Die Einbindung in FlexRay Netzwerke ist über redundante FlexRay-Interfaces möglich. Die Aktuatorpositionen werden über redundante Drehgeber erfasst. Eine integrierte elektromechanische Kupplung erlaubt es, Aktuatoren rückwirkungsfrei mechanisch und elektrisch vom Flugzeug zu trennen.

In Abb. 2-10 ist das auf dem Erprobungsträger eingerüstete FBW-System skizziert. Es besteht aus zwei unabhängigen Verarbeitungssträngen / FlexRay-Datenbussen (blau und rot), die jeweils über zwei unabhängige Datenkanäle verfügen. In jedem Verarbeitungsstrang arbeiten 2x CPMs (entspricht vier unabh. Rechneinheiten), 2x IOMs und 1x SCM. Jeder Verarbeitungsstrang greift auf eine Duplex-Schnittstelle der ACMs zu, die in Duplex-Konfiguration (2x ACM pro Steuerfläche) die Steuerung der Höhen-, Seiten und Querruder durchführen. Die Kontrolle von Landeklappen, Fahrwerk und Bremsen wurde jeweils über redundante IOMs durchgeführt. Dies gilt auch für die Sensorik. Auch hier

verfügt jeder Verarbeitungsstrang über die vollständigen Daten von redundanten Sensoren.

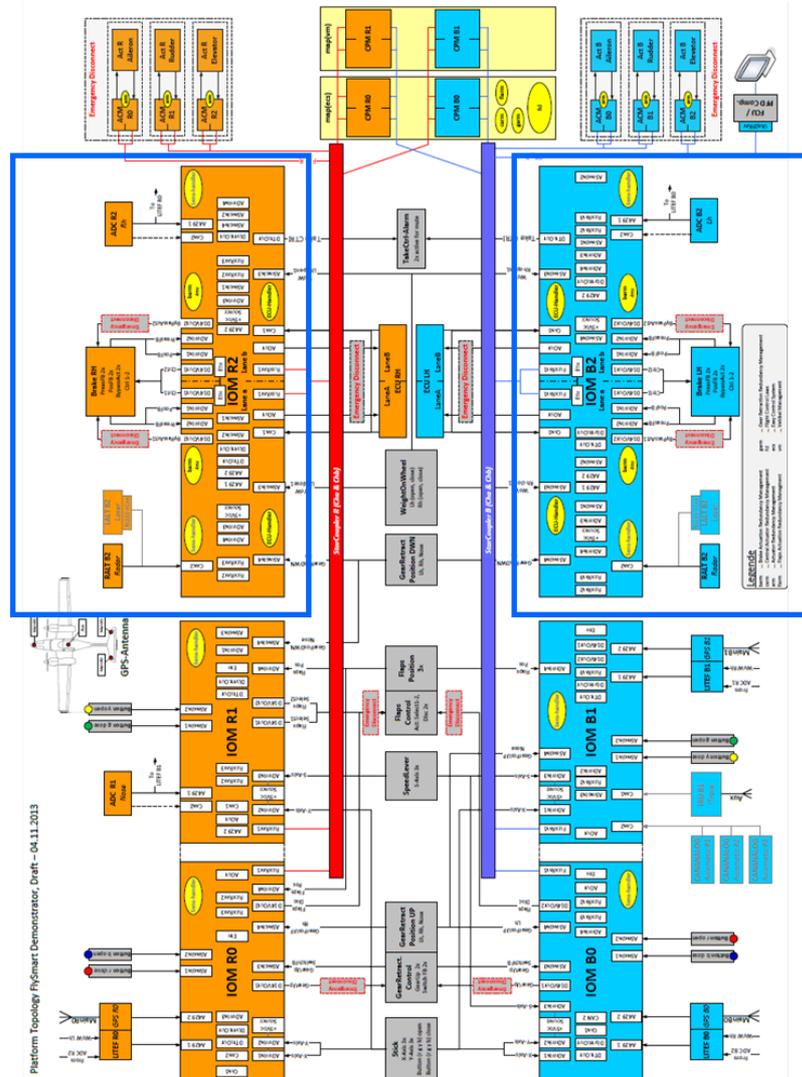


Abb. 2-10: FBW-Plattformtopologie wie in SMART AIRCRAFT verwendet. Die zu SAFAR durchgeführten Erweiterungen sind mit blauen Umrandungen hervorgehoben.

Die redundanten Verarbeitungsstränge des FBW-Systems wurden durch zwei jeweils unabhängige Versorgungsstränge mit Energie versorgt. Dies stellt sicher, dass beim Ausfall von Einzelkomponenten im FBW-System oder in der Energieversorgung der reguläre Betrieb aufrechterhalten wird.

Mit einem solchen hoch-redundanten FBW-System lassen sich Fehleraten gegenüber katastrophischen Auswirkungen von 10^{-7} Ereignisse /

Flugstunde realisieren. Damit wurde das für Flugzeuge der CS23 Class II gesetzte Zuverlässigkeitsziel erreicht.

2.1.5 Erprobungsträger Diamond DA42

Mit dem Erprobungsträger sollte die Anwendbarkeit des FBW-Systems unter realistischen Umweltbedingungen untersucht werden. Hierfür stand eine von DAI beigestellte zweimotorige DA42 zur Verfügung.

Betriebssicherheit	Oberste Priorität bei der Einrüstung des FBW-Systems, der zugehörigen Sensoren / Aktuatoren und der notwendigen Unterstützungssysteme wie Energieversorgung und Testsystem besaß die Sicherstellung der Betriebssicherheit des Erprobungsträgers. Dies setzte eine rückwirkungsfreie Installation des FBW-Systems in dem Erprobungsträger voraus, so dass jederzeit vom Piloten eine Übernahme der primären Steuerungsfunktionen durch das mechanische Steuergestänge, Landeklappen und Bremsen möglich war. Das Abkoppeln des FBW-System wurde durch das unabhängige Notfallsystem Emergency Disconnect (EmD) realisiert (siehe hierzu 2.1.7).
Funktionalität	Mit der Einrüstungen sollte die Durchführung von FBW gesteuerten Flügen ermöglicht werden. Dabei sollte der Erprobungsträger sowohl manuell über Stick / Schubhebel wie auch automatisch durch Vorgabe einer Trajektorie mit dem FBW-System geflogen werden. Besonderes Augenmerk wurde auf die automatische Durchführung kritischer Flugphasen wie die des Start und der Landung gelegt.
Minimale Eingriffe	Durch die Einbauten sollte das gutmütige Flugverhalten des Erprobungsträgers und dessen Bedienbarkeit (bei deaktiviertem FBW-System) nicht beeinflusst werden, um Eingewöhnung und Arbeitslast der Testpiloten während der Flugerprobung so niedrig wie möglich zu halten. Eingriffe in die bestehende Struktur und Ausstattung des Erprobungsträgers sollten so gering wie möglich gehalten werden, um die Nachweisführung zur Erlangung einer Erprobungserlaubnis einfach zu gestalten.
Umsetzung	Aus den oben genannten Gründen wurde die Positionierung des FBW-Systems im Schwerpunktbereich des Flugzeuges direkt hinter den Pilotensitzen vorgenommen wie in Abb. 2-11 dargestellt. Weitere Vorteile dieser Einbauposition waren kurze Kabellängen zu den Aktuatoren sowie zu den Bedienelementen im Cockpit und eine damit verbundene geringe Störanfälligkeit. Die einfache Zugänglichkeit der FBW Einrüstung sowie der Steckverbinder erleichterte während Einbau und Erprobung das Überprüfen und Austauschen von Komponenten. Über dedizierte

Teststecker konnten auf zentrale analoge und digitale Steuergrößen zugegriffen werden.

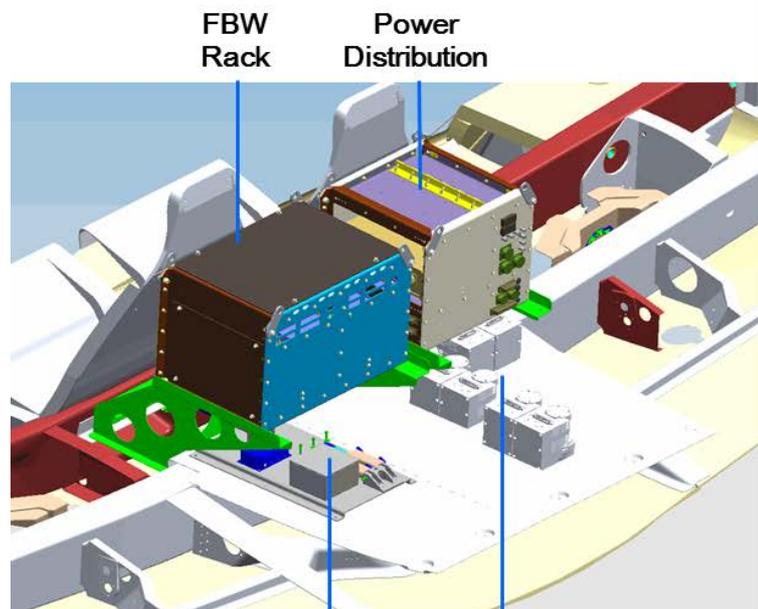
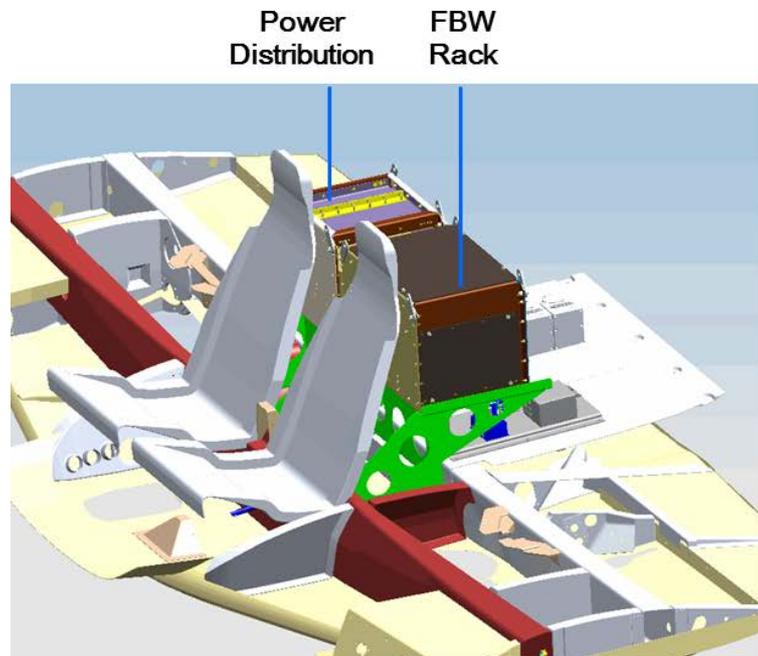


Abb. 2-11

Brems-
system Aktuatoren für
Höhen-, Seiten-, Querruder

FBW-Einrüstungen

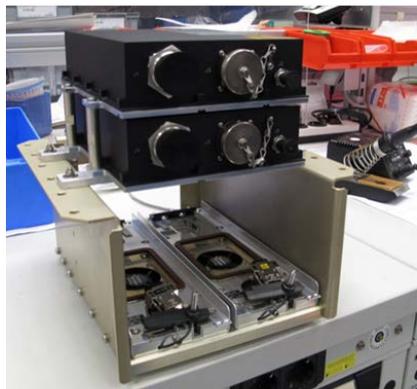
Die FBW-Einrüstungen wurden in funktionale Einheiten unterteilt, um eine einfache Handhabung bzgl. Gewicht und Größe zu erreichen. Abb. 2-12 zeigt die einzelnen Funktionsblöcke während der Bauphase.



Avionics



Power Distribution



Navigation (INS+GPS)



Testsystem

Abb. 2-12: Realisierte Funktionsblöcke des im Erprobungsträger eingerüsteten FBW-Systems

Im Folgenden sind die eingerüsteten Funktionsblöcke im Detail beschrieben:

- Avionics (siehe Abb. 2-12)
In diesem Rack wurde die gesamte Signalerfassung und Signalverarbeitung zusammengefasst. Hier sind die IOMs und CPMs (4x CPM, 4x IOM, 2x SCM) entsprechend zu den redundanten Verarbeitungssträngen (Lanes) angeordnet. Die Verteilung der Signale von / zu den Steckern und zu den Modulen wurde in einer gesonderten Ebene über Verteilermodule durchgeführt. Es wurden ausschließlich luftfahrttaugliche, mechanisch arretierbare Stecker und Verbinder verwendet.
- Power Distribution (siehe Abb. 2-12)
Die Power Distribution Unit übernimmt der Verteilung der elektrischen Energieversorgung auf die Avionik-Subsysteme. Hierbei wurde von zwei primären Stromquellen ausgegangen (rechter / linker Generator), - entsprechend wurde die Stromversorgung in zwei Lanes aufgeteilt. Die einzelnen Verbraucher sind über „Cir-

cuit Breaker“ abgesichert. Dies erlaubte es, Teilsystem für die Tests oder während der Inbetriebnahme gezielt zu schalten. Die Stromversorgung wurde über ein Subpanel im Cockpit bedient. Hier konnte (getrennt pro Lane) die Stromversorgung für die Aktuatoren und FBW-Elektronik geschaltet werden. Das Notfallsystem wurde als vierfach redundanter Notausschalter ausgelegt. Es koppelte das FBW-System vollständig vom Erprobungsträger ab und stellte die originären primären Steuerfunktionen durch das mechanische Steuergestänge, Klappenschalter und Bremspedale wieder her.

- Höhen-, Seiten-, Querruderansteuerung
Im Zentralbereich des Erprobungsträgerrumpfs in der Nähe der Flügelholme wurden sechs FBW-Aktuatoren ACM über Hebelmechanismen mit den Gestängen von Höhen-, Seiten- und Querruder verbunden. Nach Nachweis des sicheren Entkuppelns der Aktuatoren über das Öffnen der elektromagnetischen Kupplungen wurde auf die Sicherung gegen eine mögliche Aktuatorblockade durch zusätzliche Rutschkupplungen verzichtet.
- Antriebseinheiten
Die beiden Dieselmotoren werden im Normalbetrieb durch redundante ECUs geregelt. Diese erhalten ihre Sollwerte durch das Verstellen von Potentiometern in den Schubhebeln. Diese Potentiometer wurden durch Relais auf ihre Sollwertvorgabe durch das FBW-System umgeschaltet. Bei Betätigen des EmD wurden alle Relais stromlos geschaltet und die originale Flugzeugkonfiguration wiederhergestellt.
- Bremsen
Zur Ansteuerung der Bremsen durch das FBW-System wurden zusätzliche Bremszylinder, die von jeweils einem Linearmotor angetrieben wurden in die bestehende Bremskreisläufe für die rechte und linke Radbremse des Fahrwerks integriert, um ein differentielles Bremsen zu ermöglichen. Die Regelung des Bremsdrucks wurde über eine unterlagerte Positionsregelung der Linearmotoren realisiert. Die FBW-Bremsfunktionen konnten durch das Öffnen (stromlos Schalten) von Bypass-Ventilen deaktiviert werden.
- Navigation (siehe Abb. 2-12)
Die Komponenten der drei GPS-/SBAS-gestützten Inertialeinheiten sind mit den drei Airdata-Computern zwischen den Holmen der Tragflächen in unmittelbarer Nähe des Schwerpunktes, auf zwei Subracks verteilt angeordnet. Zur Verwendung kamen kommerziell verfügbare Komponenten, die speziell für Landeanflüge ausgelegt sind und über entsprechende ETCO verfügen .
- Air Data
Die drei Airdata-Probes sind als 5-Loch-Sonde ausgelegt. Damit

konnte neben der barometrischen Höhe und der Geschwindigkeit gegen Luft auch die Anstell- und Schiebewinkel bestimmt werden. Die Sonden wurden jeweils in den Winglets der Tragflächen und in der Flugzeugnase eingebaut. Die Messwerte für die Drücke und die Temperatur wurden an die in den Navigationssub-racks verbauten Airdata-Computer weitergeleitet und dort verarbeitet

- **Weight on Wheels**
Im Hauptfahrwerk wurden an jedem Rad zusätzliche Schalter für die Erfassung des Weight on Wheels eingebaut. Anordnung und Funktion ist baugleich zu den schon im Flugzeug verwendeten Schaltern.
- **Landeklappen**
Die im Cockpit angeordneten Schalter für die Bedienung der Landeklappen wurden durch Relais de-/aktiviert und durch die Schaltfunktionen des FBW-Systems nachgebildet. Für die Erfassung der Landeklappenstellung wurden dreifach redundante Weggeber verwendet. Bei Betätigen des EmD wurden alle Relais stromlos geschaltet und die originale Flugzeugkonfiguration wurde wiederhergestellt.
- **Höhenmessung**
Die präzise Erfassung der Flughöhe über Grund ist für die automatische Landung von zentraler Bedeutung. Hier kamen dissimilare Sensoren zum Einsatz. Über zwei unabhängige Radarhöhenmesser, die in unterschiedlichen Frequenzbändern arbeiteten konnte unabhängig von den Sicht-/ Wetterverhältnissen die Höhe bestimmt werden. Zusätzlich tasteten zwei identische Laserhöhenmesser den Abstand zur Landebahn mit hoher Genauigkeit ab. Das FBW-System triggerte die Laserhöhenmesser zu unterschiedlichen Zeiten, um eine zeitliche Entkopplung zu schaffen.
- **Test System (siehe Abb. 2-12)**
Mit dem Testsystem konnten die Systemzustände des FBW-Systems sowie der Datenverkehr auf den redundanten FlexRay-Datenbussen erfasst, gespeichert und einer Analyse zugeführt werden. Darüber hinaus wurden über das Testsystem der Download und die Verifikation von Firmware-Updates der intelligenten FBW-Module durchgeführt. Ein Ethernet Gateway erlaubte den Zugang via verschlüsselter Interverbindungen. So war ein Debuggen des FBW-System auf dem Erprobungsträger in Wiener Neustadt durch das ILS in Stuttgart jederzeit möglich.

Abb. 2-13 zeigt das eingerüstete und integrierte FBW-System im Erprobungsträger DA42.

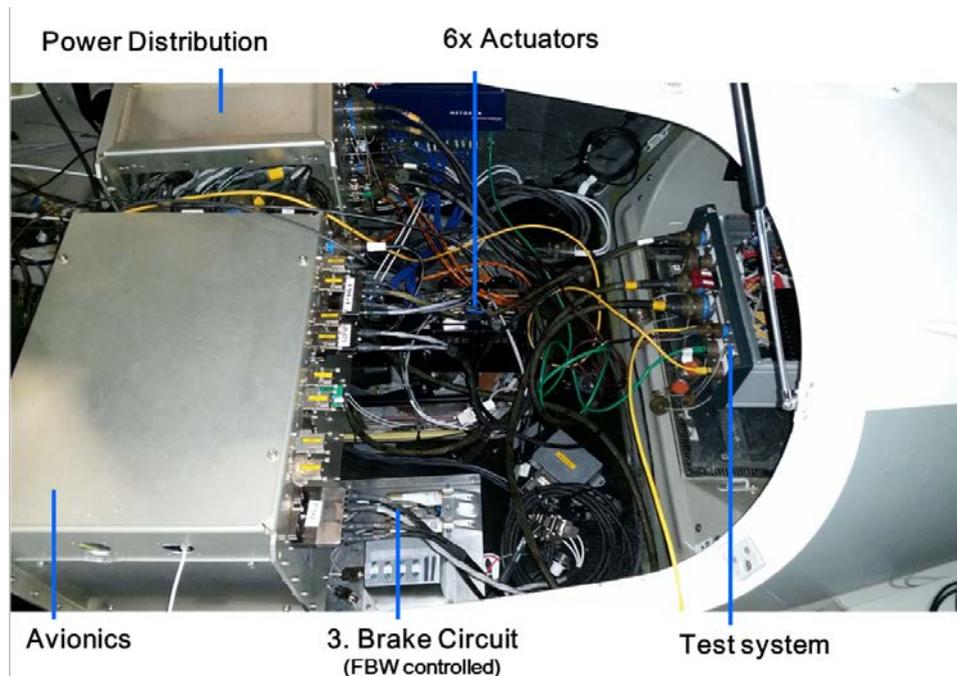


Abb. 2-13: Eingerüstetes FBW-System im Erprobungsträger DA42, angeordnet im Schwerpunkt des Flugzeuges hinter den Pilotensitzen

Testdurchführung

Für die oben beschriebenen Funktionsblöcke wurden Testprozeduren spezifiziert und nach Realisierung der Funktionsblöcke die entsprechenden Tests auf elektrischer und funktionaler Ebene durchgeführt. Anschließend folgten Test bzgl. der datentechnischen Integrität im Test Rigg des ILS. Nach Einbau der Funktionsblöcke im Erprobungsträger fanden abschließende Tests der eingerüsteten Funktionsblöcke wie auch des gesamten FBW-Systems statt. Unterstützt wurde dies durch die Fernwartungsfunktion des oben beschriebenen Testsystems.

Die mechanische Stabilität und Festigkeit der FBW-Einbauten wurde durch DAI mittels eines Crashtests verifiziert.

2.1.6 Flugregelung und Flugführung

Anforderungen

Für die Flugführung wurde die Entwicklung einer Spline basierten 4D-Solltrajektorienplanung bestehend aus Positions- und Geschwindigkeitsvorgaben für einen kompletten ATOL-Missionszyklus mit weltweiter Abdeckung durchgeführt. Beim 4D-Trajektorienfolgeregler (Position und Geschwindigkeit) sollte neben einer sehr hohen Tracking Performance ein für den Piloten komfortables und angenehmes Flugverhalten realisiert werden. Auf Grund der ATOL-Funktionalität musste der Regler mit verschiedenen Flugzeugkonfigurationen und in einem weiten Bereich

der Flugvelopes arbeiten. Dabei sollten für alle Bedingungen eine hohe Stabilität und Dämpfung insbesondere der schnellen Dynamiken (Anstellwinkelschwingung, Taumelschwingung, Rollbewegung) garantiert werden. Darüber hinaus musste der Regler gerade angesichts des bemannten Flugs in Bodennähe alle Anforderungen mit sehr hoher Zuverlässigkeit und Robustheit erfüllen. Alle Aktivitäten bzgl. Flugregelung und Flugführung wurden vom IFR führend durchgeführt mit Unterstützung von ADAS und DAI.

Trajektorienplaner

Um beim Übergang zu lokalen kartesischen Koordinatensystemen die notwendige Präzision zu gewährleisten, wurde ein UTM-Koordinatensystem verwendet, welches einen transientenfreien Wechsel zwischen den verschiedenen Zonen ermöglicht. Die ATOL-Funktionalität auf Trajektorienplanungsebene wird durch eine Planungsfunktionalität für Holding-Patterns mit angepasstem Abfangmanöver, einem Anflugmodus und einer auf die tatsächliche Leistungsfähigkeit des Flugzeugs skalierbaren Steigflugplanung gewährleistet. Die Fliegbarkeit des gesamten Vorgabeverlaufs wird durch die Berücksichtigung der fahrzeug-spezifischen, dynamischen Beschränkungen erreicht. Die Trajektorienplanung ist mit Splines dritter Ordnung realisiert, wodurch die Repräsentation und Verarbeitung der Solltrajektorien relativ wenige Ressourcen auf der Bordhardware in Anspruch. Somit ist es möglich, Änderungen an der Trajektorie durch die Piloten im Cockpit vorzunehmen.

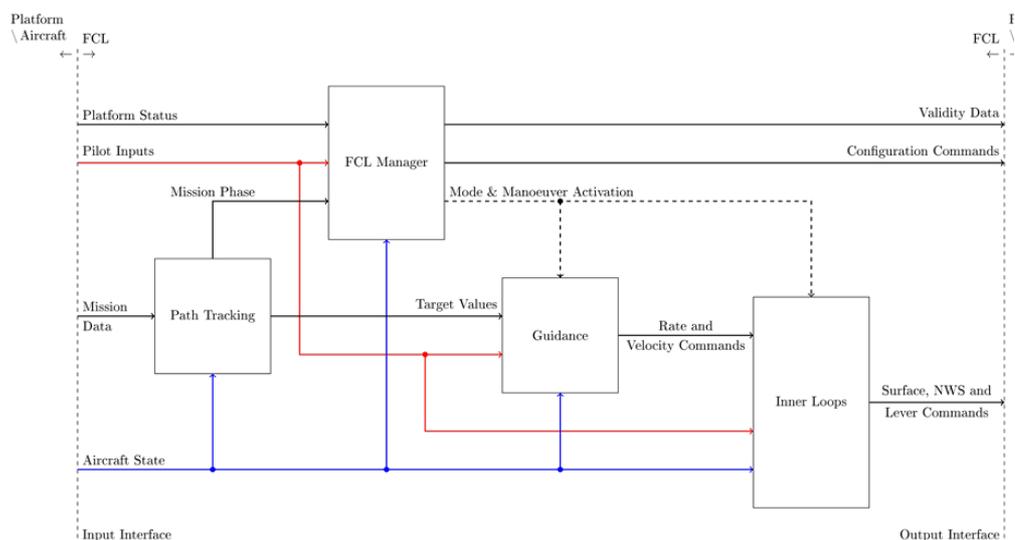


Abb. 2-14: Aufbau der Flight Control Laws

Flight Control Laws

Um die oben beschriebenen Anforderungen an den Regler möglichst optimal zu erfüllen, wurde ein hierarchischer Aufbau gewählt. Der Path Tracker berechnete aus der aktuellen Position und der Solltrajektorie Ablagen. Der Pilotenkomfort konnte durch den Einsatz einer vorausschauenden Funktion, welche den zukünftigen Verlauf der Trajektorie einbezieht, erheblich verbessert werden. Die Guidance minimierte die

Ablage von der Solltrajektorie und kommandierte Sollwerte für Drehraten und Fluggeschwindigkeit an die Inneren Loops, welche diese mit Hilfe der zur Verfügung stehenden Aktuatorik einregelten. Der FCL Manager determinierte den Modus und das Manöver, legte darauf basierend den Zustand der Guidance und der Inneren Loops fest und kommandierte Änderungen der Konfiguration. Dabei wurden im Zusammenhang mit ATOL Piloteneingaben zur Freigabe der Landebahn berücksichtigt. Auf Basis der Systemverfügbarkeit und des Flugverlaufs löste der FCL Manager Sicherheitsfeatures wie ein Go-Around Manöver oder eine Degradierung in den Direct Mode aus. Alle Funktionen wurden so entworfen und programmiert, dass der in Anspruch genommene Ressourcenbedarf für das FBW-System minimal war. Durch ein übersichtliches Design mit einer möglichst geringen Anzahl an Modi konnte die Implementierung sicher und effizient gestaltet werden. Der Aufwand einer möglichen Zertifizierung wurde dadurch reduziert.

Guidance

Die Minimierung der Trajektorienablage wurde mit kaskadierten Reglern realisiert, welche eine Begrenzung verschiedener Zustände wie Lage, Raten und Geschwindigkeit ermöglichen. Durch den Einsatz von kinematischen Vorsteuerungen konnten Kopplungen zwischen Bewegungsachsen (z.B. Kurvenkompensation) berücksichtigt und die Trackingperformance verbessert werden. Um die negativen Effekte auf die Performance eines im Falle einer Sättigung auftretenden Integratorüberlaufs zu verhindern, wurden alle kreisförmigen Manöver mit einer Anti-Windup Logik ausgestattet. Die Grundstruktur der Guidance war für alle Missionsabschnitte, ausgenommen des Flares, annähernd identisch. Für den Flare wurde ein spezielles Regelgesetz entworfen, welches basierend auf der gemessenen Höhe über Grund Vorgaben für die Sinkrate und den Nickwinkel berechnete. Dadurch ergibt sich ein robustes Flaremanöver, welches auch im Falle auftretender Störungen, wie zum Beispiel Böen, zu guten Ergebnissen führte.

Inneren Loops

Die Inneren Loops regeln die kommandierten Drehraten und Fluggeschwindigkeit mit Hilfe der aerodynamischen Steuerflächen und der Schubhebelstellung ein. Für die Regelung der Drehraten wurden Mehrgrößenregler mit I-Anteilen entworfen, welche neben dem Folgeverhalten auch eine Anpassung der Dämpfung und der Frequenz der schnellen Dynamiken ermöglichen. Weiterhin wurden Kopplungen zwischen den Bewegungsachsen (Roll-Gierkopplung) explizit berücksichtigt. Die Verstärkungsfaktoren waren über die kommandierte Fluggeschwindigkeit gescheduled und wurden im Falle einer Konfigurationsänderung angepasst, um eine gleichbleibende Dynamik sicherzustellen. Dabei wurden die Integratoren derartig neu initialisiert, dass keine Sprünge an den Steuerflächen auftraten. Alle Gainsets der Ratenregler wurden als optimale linear-quadratische Regler (LQR) entworfen. Im Falle einer Stellflächensättigung kam ein neuartiges, optimales Mehrgrößen-Anti-Windup-Verfahren zum Einsatz. Durch eine explizite Struktur konnte

dies mit minimalem Ressourcenbedarf realisiert werden. Die Auslegung des Anti-Windup-Verfahrens beruhte auf der Lösung von linearen Matrix Ungleichungen.

Schubregelung

Die Schubregelung bestand aus einem Regler und einer Vorsteuerung. Die Vorsteuerung beruhte auf der ressourcenschonenden Invertierung eines relativ detaillierten und genauen Motor-Propeller-Modells, wodurch die Trackingperformance verbessert und Nichtlinearitäten explizit berücksichtigt wurden. Der Regler wurde mit einem Frequenzfilter so eingestellt, dass im Normalbetrieb eine geringe Triebwerksaktivität impliziert wurde und der Regler im Falle kritischer Böen trotzdem mit der notwendigen Bandbreite reagierte.

Bugradregelung

Für alle Bodenoperationen während Start und Landung wurde ein Regler entworfen, welcher die Mittellinie mit Hilfe des gekoppelten Bugradausschlags (NWS) und der Seitenruderstellung einregelt. Die durch das Feder-Dämpfersystem im Steuergestänge und der Friktion des Bugrads verursachten Verzögerungen in der Ansteuerung des Bugradausschlags wurde durch den Einsatz eines Smith-Prediktors berücksichtigt. Beim Start verursachten die gleichlaufenden Motor-Propeller-Antriebe ein relativ großes Giermoment. Um die notwendige Autorität um die Gierachse sicherzustellen, wurde differentieller Schub eingesetzt.

2.1.7 Flugerprobung

Die Flugerprobung diente der Untersuchung des Flugverhaltens eines CS23 Flugzeuges mit aktiviertem FBW-System unter realistischen Flugbedingungen für die Flugphasen automatischer Start, automatischer Streckenflug und automatische Landung. Als Erprobungsträger wurde als repräsentatives CS23 Flugzeug eine Diamond DA42 genutzt. Die Flugerprobung wurde am Flughafen Wiener Neustadt, Österreich (LOAN) vom Test Flight Department der DAI durchgeführt.

Da das FBW-System nicht qualifiziert war, wurde die Flugerprobung des Erprobungsträgers im Rahmen einer Erprobungsbewilligung (Permit to Fly - PtF) durch die österreichische Luftfahrtbehörde AustroControl GmbH durchgeführt.

Permit to Fly

Die Erlangung der Flugfreigabe des Erprobungsträgers unter PtF für den gesamten Flight Envelope erforderte den Nachweis der Betriebssicherheit.

Notfallsystem

Für das unabhängige Notfallsystem Emergency Disconnect (EmD), welches dem Sicherheitspiloten jederzeit eine Übernahme der vollen Steuerautorität mittels der manuellen Steuerung ermöglicht, wurden die notwendigen Nachweise erbracht. Dies umfasste im Wesentlichen ein System Safety Assessment (SSA), bei welchem anhand einer „Failure Modes and Effects Analysis“ (FMEA) und anschließender „Fault Tree Analysis“ (FTA) die maximalen Auftretenswahrscheinlichkeiten kritischer, ausfallbedingter Failure Conditions ermittelt wurden.

In Abb. 2-15 sind die möglichen Betriebsmodi des Erprobungsträgers und deren Betriebsübergänge durch das Notfallsystem EmD dargestellt.

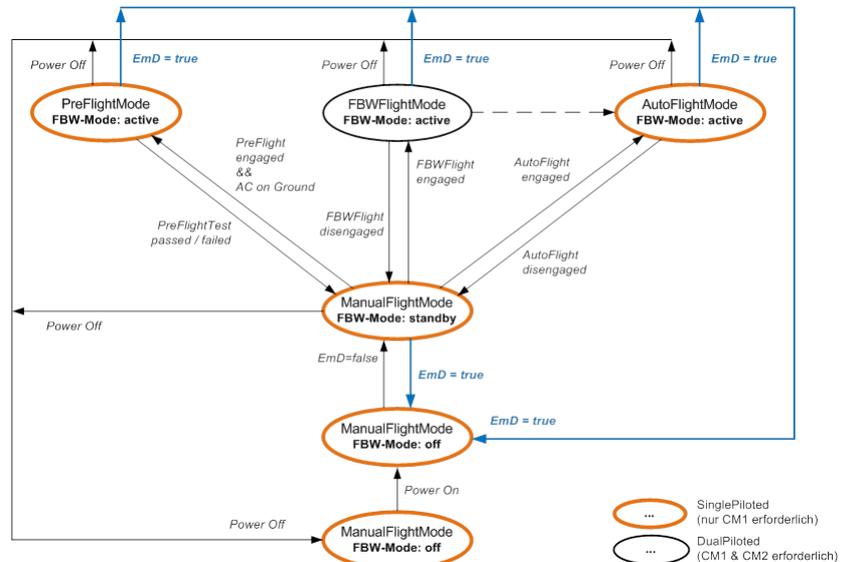


Abb. 2-15: Betriebsmodi des Erprobungsträgers DA42

Im ManualFlightMode steuert der Sicherheitspilot (Crew Member CM1) den Erprobungsträger über das bestehende mechanische Gestänge. Im PreFlight-, FBWFlight- und AutoFlightMode steuert das FBW-System den Demonstrator gemäß der zugrunde liegenden Flight Control Laws. Beim FBW-Mode „off“ verfügt der Sicherheitspilot mittels manueller Steuerung über die volle Steuerautorität aller Ansteuerungen. Im FBW-Mode „standby“ verfügt der Sicherheitspilot mittels manueller Steuerung über die volle Steuerautorität der primären Stellflächen und der Bremsen. Im FBW-Mode „active“ steuert das FBW-System den Erprobungsträger. Der Sicherheitspilot verfügt nur über sehr begrenzte oder gar keine Autorität bzgl. der Ansteuerungen. Wie Abb. 2-15 zeigt, ist der Sicherheitspilot jederzeit in der Lage mittels des sogenannten Emergency Disconnects (EmD=true) in den Betriebsmode ManualFlightMode (FBW-Mode: off) zu wechseln und so die volle Autorität bzgl. aller Ansteuerung mittels der manuellen Steuerung zu erlangen.

Deaktivierung FBW

In Abb. 2-16 ist die prinzipielle Umsetzung des Emergency Disconnects dargestellt. Über einen Push-Button lässt sich die Energieversorgung aller Ansteuerungen des FBW-Systems mittels unabhängiger Relais auf der VCC- und auf der GND-Side unterbrechen und somit das gesamte System in den Betriebsmodus ManualFlightMode (FBW-Mode: off) – kurz: ManualFlight – überführen.

Für Höhen-, Seiten- und Querruder führt die Unterbrechung der Energieversorgung zu einem Entkuppeln der in den Aktuatoren verbauten elektromagnetischen Kupplungen, so dass das Steuergestänge uneingeschränkt mittels der manuellen Steuerung bedient werden kann. Die Entkopplung des FBW gesteuerten Bremszylinders erfolgt über das Öffnen der Bypassventile. Bei der Klappen und Fahrwerkssteuerung

sorgt die Energieabschaltung zum Abfallen der Umschaltrelais, so dass die manuelle Bedienung wieder freigegeben ist.

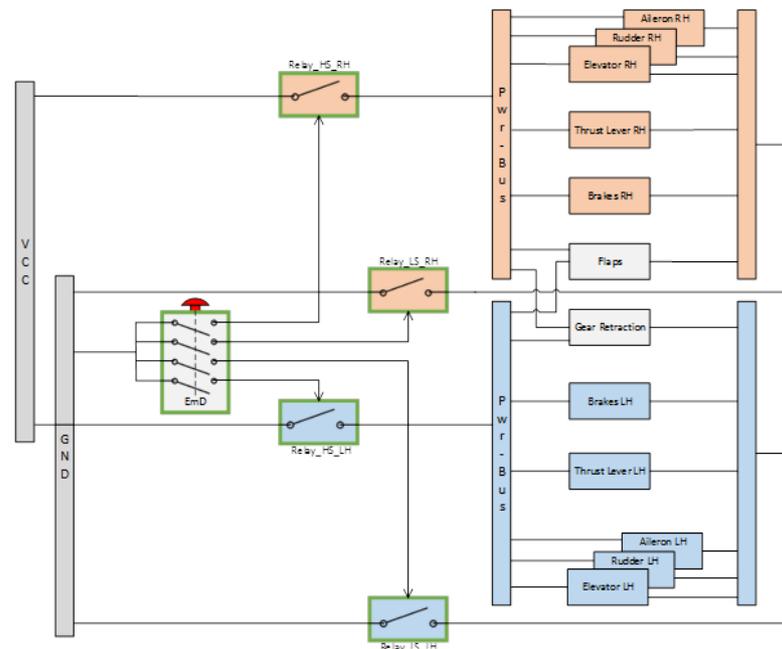


Abb. 2-16: Prinzipskizze des Emergency Disconnect

Zur Bewertung und zum Nachweis der Ausfallsicherheit des EmD wurden die maximalen Auftretenswahrscheinlichkeiten kritischer Failure Conditions (Failure Effects auf Flugzeugebene) ermittelt. Da das EmD ausschließlich in Hardware (unabhängig von der Software des FBW-Systems) realisiert wurde, konnte dies mittels eines System Safety Assessments, welches aus einer FMEA und anschließender FTA bestand, erfolgen.

Kupplungsöffnung

Die kritische Komponente zum Entkoppeln der Aktuatorik von der Primärsteuerung ist die elektromechanische Kupplung. Trotz intensiver Recherchen konnte hier keine speziell für die Anwendung in der Luftfahrt entwickelte Kupplung gefunden werden. Dies stellt bei der Durchführung der SSA eigentlich kein Problem dar (auch für Standardkomponenten aus der industriellen Anwendung lassen sich verlässliche Werte für die Ausfallrate anhand von Normen/Standardwerken ermitteln). Um die ermittelten Ergebnisse jedoch zu untermauern, wurde das sichere Entkoppeln der elektromechanischen Kupplung (insbesondere unter Last) für eine repräsentative Anzahl (einen Lebenszyklus) von Entkopplungsversuchen nachgewiesen werden.

Unterstützung der Testpiloten

In einem mehrstufigen Prozess wurden die Testpiloten auf die Durchführung der Flugerprobung vorbereitet. Am Anfang standen Schulungen

bzgl. des Verständnisses und der Funktionsweise des FBW-Systems. Es folgten Trainingssequenzen im HIL-Simulator des ILS, um die Testpiloten mit der Handhabung und dem Verhalten des Erprobungsträgers vertraut zu machen.

Für die Durchführung der Testflüge wurde eine klare Aufgabenteilung im Cockpit vereinbart (siehe Abb. 2-17).



Abb. 2-17: Cockpit Ausrüstung des Erprobungsträgers DA42 mit zusätzlicher Multi Functional Flight Control Unit. (links – Sicherheitspilot, rechts – FBW-Pilot)

Der FBW-Pilot (rechts) bediente das FBW-System. Der Sicherheitspilot (links) konnte jederzeit über das Notfallsystem EmD das FBW-System entkoppeln und die volle Steuerautorität mittels der manuellen Steuerung übernehmen.

Im Cockpit wurden die Testpiloten bei der Durchführung der Testflüge über die Multi Functional Flight Control Unit (MFFCU) unterstützt. Vordefinierte Testflüge konnten über das MFFCU durch den FBW-Piloten aktiviert und dann automatisch durchgeführt werden. Im MFFCU wurden der Test Crew alle notwendigen Informationen über Zustand des FBW-Systems, des Flugzeuges und des Testfluges angezeigt. Abb. 2-18 zeigt zwei Beispiele der Bedienoberfläche.

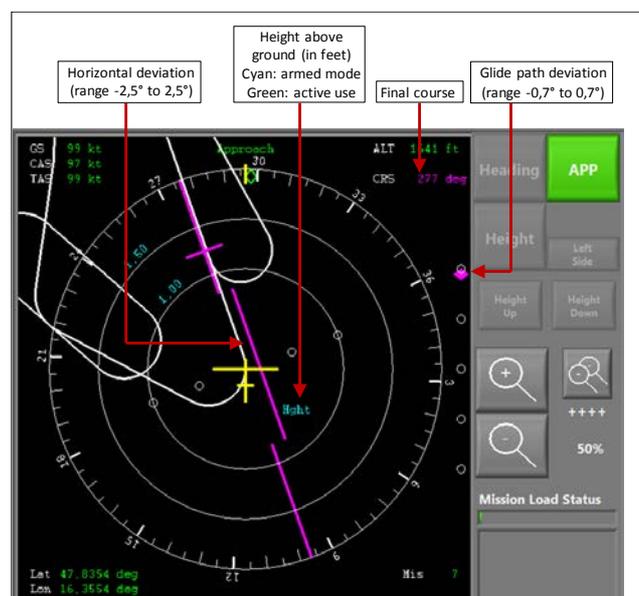
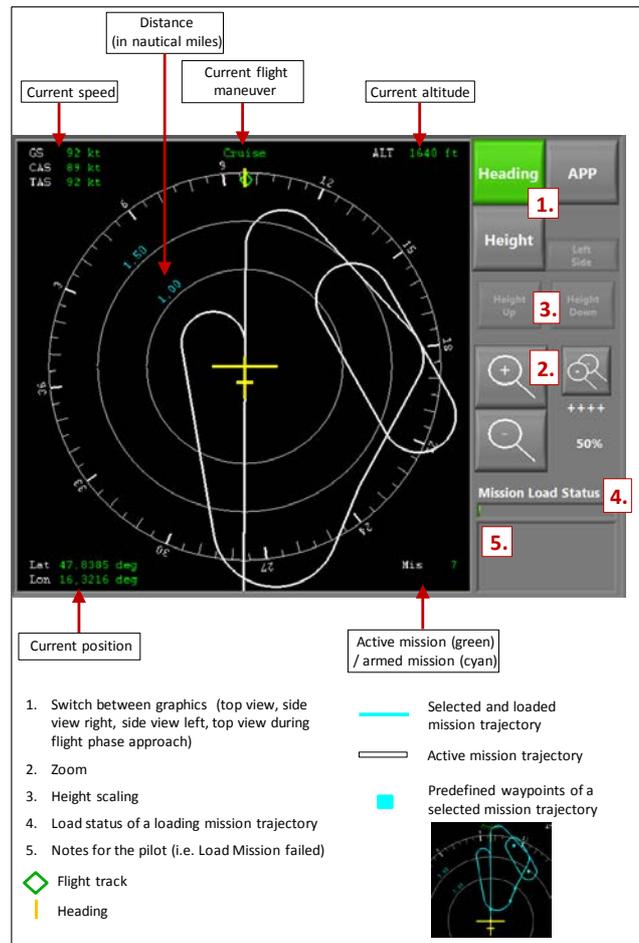


Abb. 2-18: Darstellungen des MFFCU zur Unterstützung der Testpiloten. Oben Streckenflug, unten Landeanflug für eine automatische Landung.

Folgende Funktionen wurden im MFFCU realisiert:

- Auswahl automatisch abzufliegender Missionen
- Sicherstellung der korrekten Übermittlung der Mission an das FBW-System
- Aktivierung automatisch abzufliegender Missionen
- Überwachung des Flugzustandes im automatischen Flug
- FBW-Systemkonditionen
- Überwachung von Fehlerzuständen des FBW-Systems
- Überwachung der Trimmlagen der primären Steuerflächen
- Darstellung der Mission und des Missionsfortschrittes
- Interface zum AutoRouter (TAKE OFF Vorhaben eSAFE)

Flugerprobungsprogramm

In der Flugerprobung wurde die Leistungsfähigkeit des FBW-Systems unter realistischen Bedingungen auf dem Erprobungsträger DA42 im Flug untersucht. Das zu Grunde liegende Flugerprobungsprogramm (Abb. 2-19) berücksichtigte neben den zu untersuchenden Technologiefeldern automatischer Start, automatischer Streckenflug und automatische Landungen auch die Besonderheiten der Flugerprobung bei einem mittelständisch organisierten Flugzeughersteller wie DAI.

Bis Ende 2013 wurde die SAFAR FBW Einrüstung des Erprobungsträgers genutzt (Abb. 2-8), um Defizite in der Flugregelung zu beheben und die Voraussetzungen für einen präzisen automatischen Streckenflug zu schaffen. Ab Anfang 2014 begann der Neuaufbau des FBW-Systems im Erprobungsträger, der Anfang 2015 mit der Erteilung des PtF und der damit verbundenen Freigabe des Flugerprobungsprogramms abgeschlossen werden konnte.

Das Flugerprobungsprogramm wurde dabei in drei Phasen unterteilt. Im Laufe des Erprobungsprogramms nahmen Autorität des FBW-Systems, Kritikalität der durchzuführenden Manöver und des damit verbundenen schnellen Eingreifens der Testpiloten zu:

- Phase 1 – Erprobung von FBW-Teilfunktionen
Erprobungsflüge oberhalb der Sicherheitsflughöhe von TBD
Während dieser Phase wurden sukzessive die zentralen Funktionen des FBW-Systems in Betrieb genommen und validiert. Alle Konfigurationsänderungen wie Fahrwerk ein- und ausfahren,

Landeklappen ein- und ausfahren, wurden manuell von den Testpiloten durchgeführt. Flugregelungs- und Flugführungsfunktionen wurden validiert und optimiert. Bodentests für die Vorbereitung von ATOL wurden durchgeführt. Das Notfallsystem wurde intensiv im Flug getestet.

- Phase 2 – Erprobung der kompletten FBW-Funktionalität
Erprobungsflüge oberhalb der Sicherheitsflughöhe von TBD
In dieser Phase übernahm das FBW-System die volle Kontrolle über den Erprobungsträger. Die Konfigurationsänderungen (Fahrwerk / Landeklappen) wurden jetzt auch vom FBW-System durchgeführt. Die Testpiloten nahmen Feineinstellungen bei den Konfigurationsänderungen und den Trimmeinstellungen vor. Die manuelle Übernahme des Erprobungsträgers durch die Piloten wurde für alle Konfiguration (Fahrwerk / Landeklappen) sowie Geradeausflug, Kurvenflug, Sinkflug und Steigflug durchgeführt.
- Phase 3 – Erprobung der kompletten FBW-Funktionalität
Sukzessives Absenken der Sicherheitsflughöhe
Das Absenken der Sicherheitsflughöhe bis zum Aufsetzen des Erprobungsträgers auf der Landebahn ist in zweierlei Hinsicht kritisch. Die Regelung des Erprobungsträgers wurde hier erstmalig in Bodennähe / im Bereich des Bodeneffektes durchgeführt. Durch die niedrige Flughöhe verkürzten sich die Reaktionszeiten erheblich. Die Georeferenzierung des Navigationssystems und der Präzisionshöhenmessung über Grund wurde getestet. Nach Durchführung automatischer Landungen wurden automatische Starts erprobt. Abschließend wurden Komplettmissionen durchgeführt (AutoStart, AutoCruising, AutoLanding).

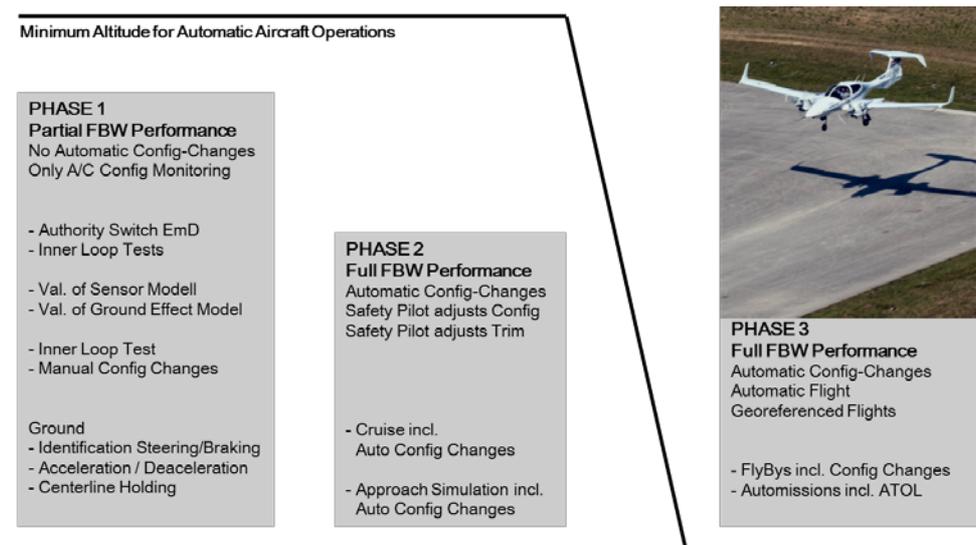


Abb. 2-19: Flugerprobungsprogramm mit Fokus auf Durchführung automatisierter Flüge

In Abb. 2-20 ist die Referenzmission dargestellt. Ausgehend vom Flughafen Wiener Neustadt (LOAN) wurde in östlicher Richtung (unbewohntes Gebiet im Anschluss an die Landebahn, keine Bebauung) automatisch gestartet. Nach Erreichen der geplanten Flughöhe wurde in Richtung Eisenstadt geflogen. Dort wurden Warteschleifen automatisch geflogen bis der Landeanflug Richtung Wiener Neustadt durch den Testpiloten freigegeben wurde. Danach wurde aus der Warteschleife aus und in den Landeanflug eingefädelt und automatisch gelandet. Das Abbremsen erfolgte manuell durch den Testpiloten.

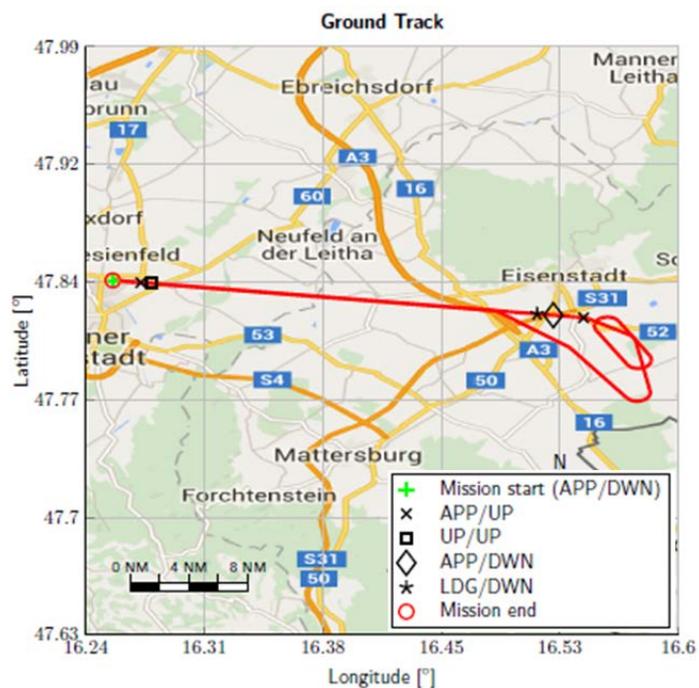


Abb. 2-20: Referenzmission AutoFlight
 Alle Flugphasen (Start, Aufstieg, Streckenflug, Warteschleife, Anflug, Abstieg, Landung). Ausgangs- und Endpunkt der Referenzmission war der Flughafen Wiener Neustadt (LOAN). Die Konfigurationsänderungen sind über Symbole auf der Trajektorie markiert.

Die folgenden Abbildungen stellen exemplarisch anhand der aufgezeichneten Daten aus Flugerprobung die Leistungsfähigkeit des FBW-Systems und der implementierten Flugregelung und Flugführung dar.

4D Trajektorie

Abb. 2-21 zeigt den gemessenen Verlauf der Positionsfehler (horizontal und vertikal) eines Testflugs. Im dargestellten Zeitraum wurde eine Kurve ausgeleitet, die Konfiguration geändert, der Sinkflug eingeleitet und das Flare-Manöver initiiert. Aufgrund der relativ böigen Bedingungen wird das System immer wieder angeregt und durch den Regler wieder auf die Bahn zurückgelenkt. Nur beim Ausfahren von Fahrwerk (Abweichungen ca. 7m lateral) und Landeklappen (Abweichungen ca. 7m in

der Höhe) steigen die Abweichungen zur Plantrajektorie auf an. Ansonsten liegen die Abweichungen im unteren einstelligen Meterbereich.

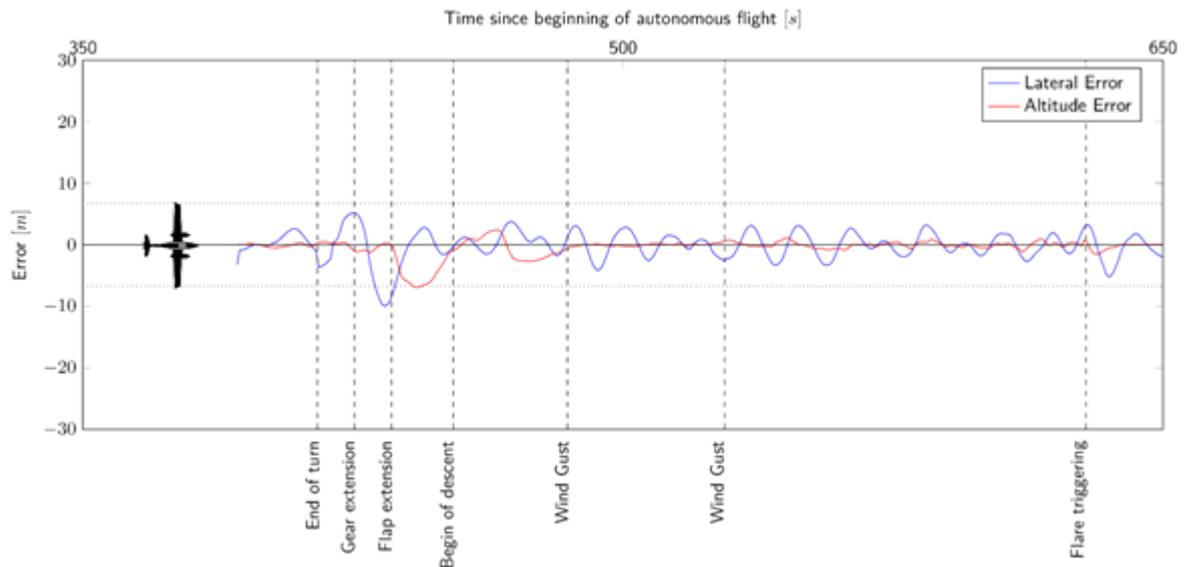


Abb. 2-21: Positionsfehler mit Kurvenflug, Einleitung des Abstiegs und Konfigurationsänderungen

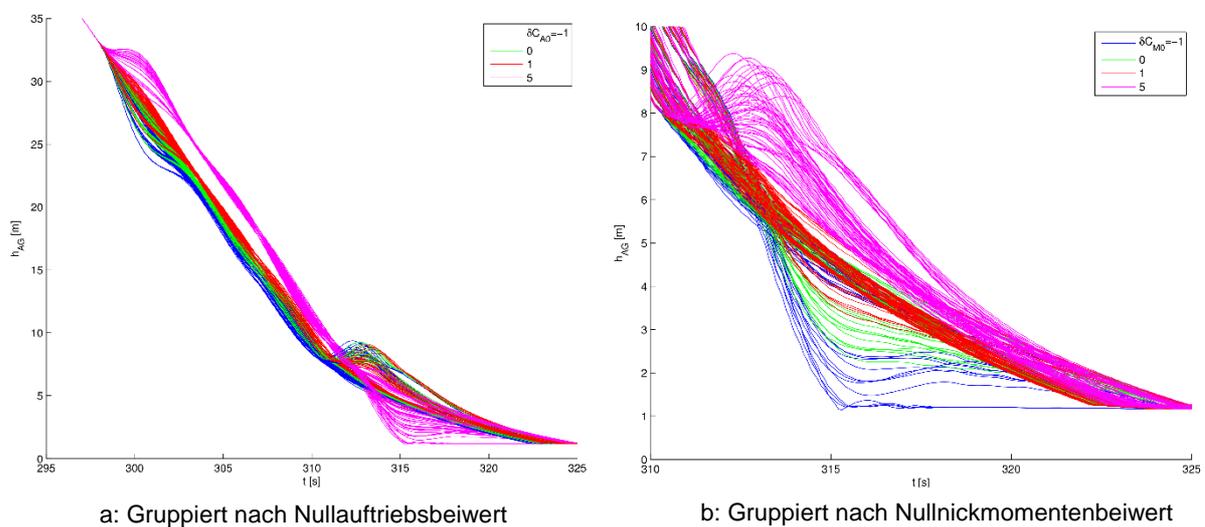


Abb. 2-22: Höhe über Grund während Flare, Monte-Carlo Simulation mit Variation der Bodeneffektparameter

Bodeneffekt

Die Robustheit des Reglers gegenüber Abweichungen im Weight and Balance und parametrischen Unsicherheiten in den Ruderwirksamkeiten und im Bodeneffekt wurde in zahlreichen Monte-Carlo-Simulationen untersucht und nachgewiesen. Weiterhin wurden auch unterschiedliche Windsituationen (Turbulenz, Böen, Windumkehr) berücksichtigt. Abb.

2-22 zeigt exemplarisch die Ergebnisse für eine starke Variation von fünf ausgewählten Bodeneffektparametern über alle Permutationen im Bereich -100% (Umkehrung des nominalen Modells) und 500% (fünffach stärkerer Bodeneffekt).

Automatisches Landen Die folgenden Darstellungen basieren auf Messdaten der ersten automatisch durchgeführten Landung (2015-08-26). Abb. 2-23 zeigt die Zeitverläufe des Nickwinkels, der Nickwinkelvorgabe, der Sinkrate, der Höhe über Grund und der Schubhebelstellung vom Beginn des Flares bis zum Aufsetzpunkt.

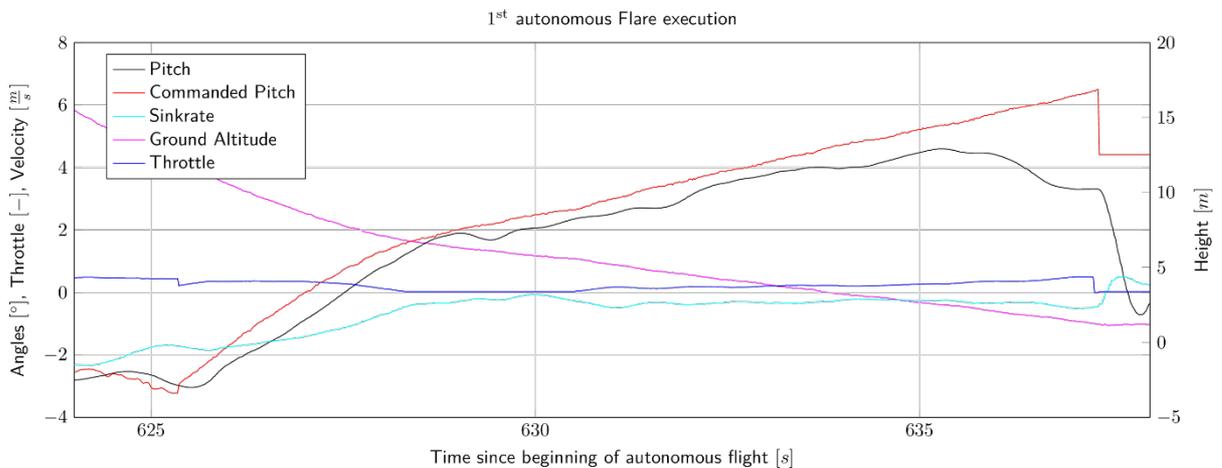


Abb. 2-23: Automatischer Flare-Regler

Abb. 2-24 zeigt die Zeitverläufe der Abweichung von der Mittellinie und der Geschwindigkeit über Grund während des Ausrollvorgangs. Die Ab

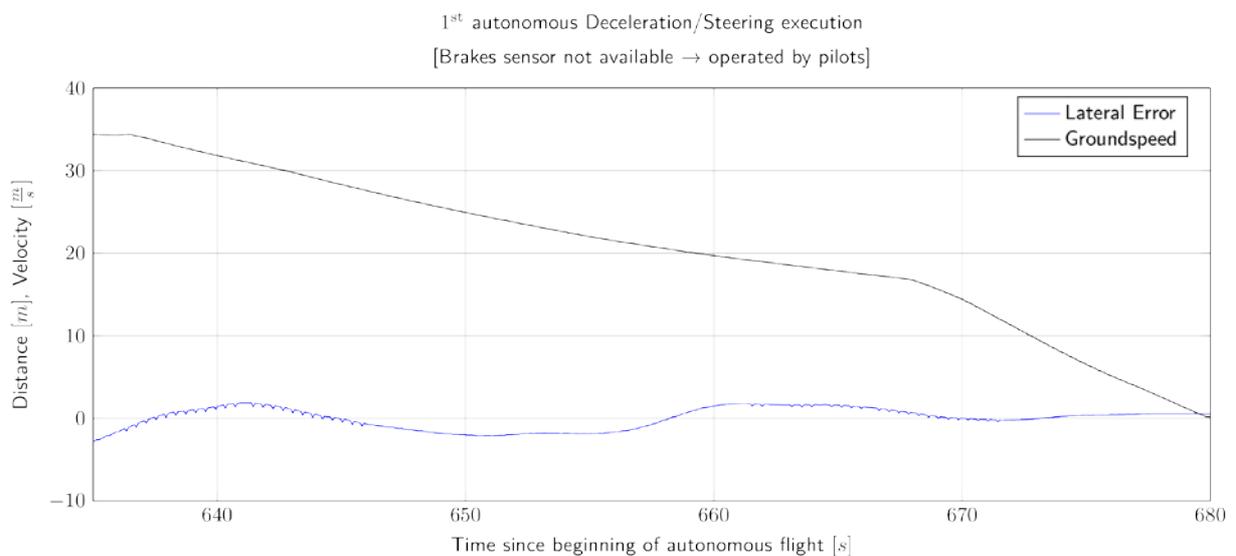


Abb. 2-24: Automatische Einregelung der Mittellinie

2.1.8 Ergebnisse und Ausblick

Das hier vorgestellte Full Authority Fly-By-Wire System für Flugzeuge der Kategorie CS23 stellt einen grundlegend neuen, innovativen Ansatz bei der Entwicklung von hochsicheren (fail-operational) Avioniken dar. Bestehend aus einem System hochgradig vernetzter FBW-Module umfasst es alle Komponenten zur Primärsteuerung, Sekundärsteuerung bis hin zu Landeklappen-, Fahrwerk-, Brems- und Bugradsteuerung. Funktional werden im FBW-System Flugsteuerung, Autopilotfunktionen mit Vortriebssteuerung / 4D-Bahnfolgung, automatischer Start, automatischer Streckenflug und automatische Landung realisiert.

Im ausgewählten Bereich der professionellen General Aviation für zukünftige semi- und vollautomatische Arbeitsflugzeuge wurde die Technologiereife (TRL 6) in kritischen Technologiefeldern des Einsatzes eines Full Authority FBW System erreicht.

FBW Plattform	Kernstück ist eine in allen Modulen der Plattform implementierbare Middleware, die alle Aspekte der Kommunikation, Fehlermanagement der Plattform inkl. Sensoren und Aktuatoren, byzantinische Agreementbildung sowie das gesamte Betriebsmanagement der Plattform abdeckt. Die Applikationen wie Flugsteuerung oder Flugführung sehen durch die Middleware nur ein virtuelles Simplex Ein-Prozessorsystem, also nichts von der Komplexität der Plattform mit Verteilung, Fehlertoleranz und Redundanz. Die Middleware für eine spezifische Anwendung (gesamtes FBW-System) ergibt sich durch Spezialisierung. Diese Spezialisierung wird mit einer Tool-Suite durchgeführt, die im Hinblick auf industrielle Anwendbarkeit gründlich überarbeitet wurde.
FBW Module	Das skalierbare Modulkonzept mit fünf komplementären Modultypen (CPM, IOM, SCM, ACM, PDM) erwies sich als so flexibel, dass die geforderte zusätzliche Funktionalität für die Durchführung von ATOL einfach aufgerüstet werden konnte.
Erprobungsträger	Auf den Erprobungsträger Diamond DA42 wurde der volle Funktionsumfang des FBW-Systems, die zugehörigen Sensoren / Aktuatoren und notwendige Unterstützungssysteme wie Energieversorgung und Testsystem rückwirkungsfrei installiert. Das FBW-System hatte dabei voll autorisierten Zugriff auf Höhen-, Seiten-, Querruder, Antriebseinheiten, Landeklappen, Fahrwerk, Bremsen und Bugradsteuerung. Durch die Einrüstung eines unabhängigen Notfallsystems konnte das komplette FBW-System vom Erprobungsträger abgekoppelt werden, so dass für den Testpilot jederzeit eine Übernahme der primären Steuerfunktionen durch das mechanische Steuergestänge, den manuellen Betrieb von Landeklappen und Bremsen möglich war.

Flugerprobung	<p>Die Flugerprobung fand am Flughafen Wiener Neustadt (LOAN), Österreich statt. Da das FBW-System nicht qualifiziert war, wurde die Flugerprobung des Erprobungsträgers im Rahmen einer Erprobungsbewilligung (Permit to Fly) durch die österreichische Luftfahrtbehörde AustroControl GmbH durchgeführt. Unter realistischen Bedingungen konnte nachgewiesen werden, dass neben dem automatischen Streckenflug auch kritische Flugphasen wie der automatische Start und die automatische Landung vom FBW-System sicher durchgeführt wurden. Die eingesetzten Regelalgorithmen erzielten für den gesamten untersuchten Flugbereich die gewünschte Stabilität und Präzision sowie ein für die Piloten komfortables und angenehmes Flugverhalten. Automatischer Start und automatische Landung wurden ohne bodenseitige Unterstützungssysteme auf Basis von GPS/SBAS gestützter Inertialnavigation und dissimilarer Präzisionshöhenmessung durchgeführt.</p>
Zielerreichung	<p>Mit dem Teilvorhaben SMART AIRCRAFT im Leitprojekt FBW-23 des LUFO IV.4 Verbundes FLYSMART wurden vollumfänglich alle gesetzten Ziele erreicht. Der Nachweis von Funktionsumfang und Leistungsfähigkeit des FBW-Systems wurde für die relevanten kritischen Technologiefelder unter realistischen Bedingungen in der Flugerprobung erbracht.</p>
Ausblick	<p>Im laufenden LUFO V.1 Vorhaben CERTT-FBW23 werden Vorschläge für die Zertifizierung von FBW für CS23 Flugzeuge, Detaillierung eines möglichen Musterprüfprogrammes und Festlegung zentraler Eckpunkte für die Software-Zertifizierung (z.B. Design Assurance Level) erarbeitet.</p> <p>In den Vorhaben LUFO V.1 Vorhaben SeSyC und CERTT-FBW23 finden für die FBW-Plattform gegenwärtig erste Untersuchungen bzgl. der automatischen Erstellung von Dokumenten und Testcases statt.</p> <p>Diese gilt es in einem weiteren Schritt in die bestehende Tool-Suite zu integrieren (LUFO V.2 Vorschlag AAA – Automatic SW-Generation, Automatic Documentation, Automatic Verification). Nur wenn der Softwareerstellungsprozess hochautomatisiert und zulassungskonform abläuft, können die Zulassungskosten niedrig gehalten und eine kostengünstige Anpassung an unterschiedliche CS23 Flugzeugtypen durchgeführt werden.</p> <p>Im Bereich der Flugregelung und Flugführung muss die Robustheit der Algorithmen für ATOL weiter erhöht werden. Dies gilt insbesondere für Start und Landung unter extremen Bedingungen und Unsicherheiten (z.B. Seitenwind, Allwetterbetrieb, Landebahnen mit großen Neigungen und Unregelmäßigkeiten im Belag). Automatische Abbruchverfahren müssen implementiert werden. Flugreglerstrukturen und automatische Entwurfsverfahren sollten dabei eine einfache Anpassung an unterschiedliche CS23 Flugzeuge ermöglichen.</p>

2.2 Wichtige Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die wichtigen Positionen bei der Durchführung des Projektes waren Personalkosten (66 %), Materialkosten (14 %), Fremdleistungen (18 %) und Reisekosten (2%). Der hohe Anteil an Materialkosten wurde durch die luftfahrtaugliche Einrüstung des FBW-Systems und der notwendigen Unterstützungssysteme hervorgerufen.

Der zeitliche Mittelabfluss 2012 (9 %), 2013 (46 %), 2014 (30 %) und 2015 (15 %) zeigt den typischen Projektverlauf. Nach der Spezifikation fließen die Mittel im Wesentlichen in die Konzeption und Implementati-on. Abschließend folgen noch Aufwendungen für Anpassung und Auswertung.

In Klammern sind jeweils die Anteile bezogen auf das Gesamtbudget des Vorhabens ausgewiesen.

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Kritische Masse

Nur im Rahmen des Verbundvorhabens FLYSMART bestand die Möglichkeit den hochinnovative Ansatz von SMART AIRCRAFT für FBW-Systeme in CS23-Flugzeugen anzugehen. Die hierfür erforderlichen Technologien, Ansätze, Prozesse und Vorgehensweisen wurden – vor allem auch organisationsübergreifend im Verbund, soweit abgesichert, dass im Anschluss die Grundlage für eine zeit-, kosten- und aufwands-deterministische Entwicklung von Produkten sichergestellt ist, auf deren Basis die wirtschaftliche Ergebnisverwertung erfolgen kann. Durch das Einbinden von Partnern längs der Entwicklungs- und Wertschöpfungskette wurde kritische Masse mit arbeitsteiligen Schwerpunkten in diesem Bereich aufgebaut, die ohne FLYSMART nicht existierend würde.

Risikoreduktion

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt sind die wirtschaftlichen und technologischen Risiken und Unwägbarkeiten zu groß, um unmittelbar in eine eigenfinanzierte und kostenintensive Produktentwicklungsphase einzutreten. Vielmehr ist es nötig an verschiedenen Stellen Risikoabschätzung/-reduktion und Technologieabsicherung/-demonstration zu betreiben.

So stellten die in SMART AIRCRAFT durchgeführten prototypischen Umsetzungen und Demonstrationen sicher, dass die technologischen Vorstellungen und Konzepte funktionsfähig sind, keine versteckten Probleme grundsätzlicher Natur mehr enthalten, und die geforderten Verwertungsziele erreicht werden können.

Neben den funktionalen Anforderungen wurde in SMART AIRCRAFT sichergestellt, dass auch den sicherheits- und zulassungsrelevanten Randbedingungen gebührend Rechnung getragen wurde.

2.4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

ADAS geht davon aus, dass wie bereit in ACARE 2020 [ACARE 2008] beschrieben, der Bedarf nach Punkt-zu-Punkt Verbindungen im Luftverkehr weiter zunehmen wird. Insbesondere in Ländern mit großer Ausdehnung und schlechter terrestrischer Verkehrsinfrastruktur stellt der Small Sized Aircraft Transport eine interessante Möglichkeit dar, die Mobilität zu vertretbaren Kosten zu steigern.

Ähnlich sieht dies auch die NASA [SATS2002] die zukünftig neben dem traditionellen Lufttransport durch Großflugzeuge verstärkt den Einsatz von „Small Sized Aircraft“ sieht, um dem zukünftigen Transportbedarf zu entsprechen.

Natürlich lässt sich ein solches Personal Air Transportation System nicht von heute auf morgen einführen. Zuverlässige Technologien müssen vorher ihre Alltagstauglichkeit bewiesen haben. Deshalb plant die ADAS durch eine schrittweise Vorgehensweise bei der Vermarktung die Ergebnisse von SMART AIRCRAFT wirtschaftlich zu verwerten:

Mittelfristig

SCHRITT 1 - Aerial Work

Einführung des SMART AIRCRAFT für semi- und vollautomatische Arbeitsmissionen (Luftarbeit) mit dem Ziel der Produkteinführung ab 2020.

Mittelfristig sieht die ADAS einen großen Bedarf an hochwertigen Arbeitsflugzeugen. Als Eintrittsmarkt wird der Bereich der Maritimen Sicherheit und hier speziell die Bekämpfung der illegalen Fischerei mit Hilfe luftgestützter, weiträumiger Seeaufklärung gesehen.

Langfristig

SCHRITT 2 - Personal Air Transportation

Weiterentwicklung dieser Technologie für den Personenlufttransport, Produkteinführung für den semiautomatischen Transport ab 2025, für den vollautomatischen Lufttransport ab ca. 2030. Dies ist auch ein langfristiges Forschungsziel des EU FP7 Work Programme Transport.

2.5 Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Es sind keine Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens durch andere Stellen bekannt.

Alleinstellung

Vielmehr muss angemerkt werden, dass die Thematik eines Full-Authority FBW-Systems für CS23 Flugzeuge gegenwärtig nur in Deutschland intensiv verfolgt wird. Mit den Vorhaben FP7 SAFAR, LUFO IV.4 FLYSMART und der LUFO V.1 Folgeaktivität CERTT-FBW23 konnte ein kontinuierlicher Kompetenz- und Wissensaufbau über die letzten acht Jahre realisiert werden, der gegenwärtig in einer Alleinstellung der deutschen Luftfahrtforschung in diesem Bereich mündet. International wurde diese Alleinstellung der europäischen und deutschen Forschungsaktivitäten mit der Nominierung des SAFAR / FLYSMART FBW-23 Teams für den Flight Global Achievement Awards 2013 in der Kategorie „Innovator of the Year“ bestätigt [FGA2013].

2.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen

ADAS wird die Ergebnisse des Leitprojektes FBW-23 in FLYSMART mit den Partnern Universität Stuttgart ILS/IFR und DAI auf Einladung der Europäischen Kommission auf den Aerodays 2015, 20. – 23. Oktober 2015 in London vorstellen. Titel und Abstract des Vortrages lauten:

AeroDays 2015

Fly-By-Wire for CS23 Aircraft – Core Technology for General Aviation and RPAS

Reimund Kueke*, Werner Dahlke*, Reinhard Reichel**, Sebastian Polenz**, Peter Mueller**, Walter Fichter***, Alexander Joos***, Federico Pinchetti***, Johannes Stephan***, Martin Volck****, Florian Steckel****

* Airbus DS Airborne Solutions GmbH, Bremen, Germany

** University of Stuttgart, ILS - Institut für Luftfahrtsysteme, Stuttgart, Germany

*** University of Stuttgart, IFR - Institut für Flugmechanik und Flugregelung, Stuttgart, Germany

**** Diamond Aircraft Industries GmbH, Wiener Neustadt, Austria

FP7-SAFAR and its German and Austrian follow-on activities FLYSMART, CERTT-FBW23 and eSAFE focus on the development of a future avionics architecture for small aircraft to improve safety, to enhance comfort for pilots and

passengers and to pave the way for an easy integration of such aircraft into future ATMs.

On the platform side the primary aim was to develop and approve a highly flexible avionics platform enabling an efficient realization of fault tolerant systems such as a Fly-By-Wire system capable of hosting extensive applications in a cost-effective manner regarding the natural limitations for CS23 aircraft. The essence of the platform is a largely automated generated middleware abstracting the management including communication, redundancy resp. fault tolerance of a highly fault tolerant system to the applications by means of a knowledge based approach in a tool-suite. Furthermore a perspective is presented showing the extension of the approach to automate the generation of certification relevant design and verification documents and activities.

The major functional objective was to develop ATOL controllers including on-board path planning algorithm that enable worldwide full automatic mission execution. The control laws guide the aircraft in all configurations and within the whole flight envelope with reduced complexity to facilitate future certification. An interactive pilot interface deals with basic ATC clearances, warnings and alarms. A full approach and landing sequence, including holding patterns and configuration changes, is demonstrated in flight on a Diamond DA42. It is executed automatically without any ground-based support until a full stop is reached.

Industrial implementations of such avionics will be seen first in a new category of CS23 aircraft – called optionally piloted aircraft which can be operated manned as well as unmanned.

Eine gemeinsame Veröffentlichung in den Proceedings der Aerodays 2015 ist geplant.

2.7 Referenzen

2.7.1 Literatur

ACARE2008	ACARE 2008 Addendum to the Strategic Research Agenda ACARE, 2008, p. 53
FGA2013	http://ec.europa.eu/research/transport/projects/items/safar_en.htm
KON2011	Gernot Konrad Eine Perspektive für die Allgemeine Luftfahrt mit Schwerpunkt Flugsteuerung und Flugführung Dissertation (zur Begutachtung eingereicht) Universität Stuttgart - Institut für Luftfahrtsysteme, 2011
LAZA1984	R.S.Lazarus et. al. Stress, Appraisal and Coping Springer Publishing Company, 1984, New York
NTSB2010	Safety Study Introduction of Glass Cockpit Avionics into Light Aircraft National Transport Safety Board, NTSB/SS-10/01, 2010
REI2011	R. Reichel, S. Görke, Eine generische X-by-Wire Plattform, in Press, VDI Mechatronik Tagung, März 2011, Dresden
SATS2002	Future Flight A Review of the Small Aircraft Transportation System Concept Special Report 263, Transportation Research Board, 2002
UNCLOS1982	United Nations Convention on the Law of the Sea – UNCLOS 10.12.1982, Montego Bay, Jamaika
WALL2011	Robert Wall Automated GA – European Researchers see Prospects for Deep Changes in General Aviation Aviation Week, May 16, 2011, p. 62
WARW2011	Graham Warwick Choose the Future – Aviation is at an inflection point where investment decisions are need to enable long-term relevance Aviation Week, July 18, p. 44

2.7.2 Abkürzungen

ACARE	Advisory Council for Aeronautics Research in Europe
ACM	Actuator Module
ADAS	Airbus DS Airborne Solutions GmbH (Koordinator, Verbundpartner)
AIS	Automatic Identification System
AP-23	FLYSMART Leitprojekt Modular Autopilot for CS23 Aircraft
ATC	Air Traffic Control
ATM	Air Traffic Management

ATOL	Automatic Take Off and Landing
AVIO	Aviotech GmbH
AVIO	Aviotech GmbH, Unterauftragnehmer
AWZ	Ausschließliche Wirtschaftszone
CERTT-FBW23	LUFO V.1 Vorhaben Certification Technologies for FBW on EASA CS23 Aircraft
CPM	Core Processing Module
CS	Certification Specification
DAI	Diamond Aircraft Industries GmbH
DAI	Diamond Aircraft Industries GmbH
DAL	Design Assurance Level
EASA	European Aviation Safety Agency
EMSEC	Deutsches Sicherheitsforschungsprogramm Echtzeitdienste für die maritime Sicherheit – Security
eSAFE	Österreichisches TAKE-OFF Vorhaben Emergency Safe Return, 2013-2016
ESI-23	FLYSMART Leitprojekt Electronic Standby Instrument for CS23 Aircraft
FAA	Federal Aviation Administration
FBW	Fly-by-Wire
FBW-23	FLYSMART Leitprojekt Full Authority Fly-By-Wire for CS23 Aircraft
FP7	7th European Framework Programme
GPS	Global Positioning System
HIL	Hardware in the Loop
HW	Hardware
IFR	Institut für Flugregelung, Universität Stuttgart (Verbundpartner)
ILS	Institut für Luftfahrtsysteme, Universität Stuttgart (Verbundpartner)
IMC	Instrument Meteorological Conditions
IOM	Input-Output Module
LUFO	Deutsches Luftfahrtforschungsprogramm
LUFO IV.4	Viertes deutsches Luftfahrtforschungsprogramm, vierter Aufruf
LUFO V.1	Fünftes deutsches Luftfahrtforschungsprogramm, erster Aufruf
MPA	Maritime Patrol Aircraft
NextGen	Next Generation Air Transport System (US Air Traffic System)
NTSB	National Transportation Safety Boards
OPV	Optionally Piloted Vehicle
PDM	Power Distribution Module
PtF	Permit to Fly
RDE	Rheinmetall Defence Electronics GmbH

RPAS	Remotely Piloted Aircraft System
SAFAR	FP7 Project Small Aircraft Future Avionics Architecture, 2008-2011
SATS	NASA Untersuchung Small Aircraft Transportation System
SBAS	Satellite Based Augmentation System
SCM	Star Coupler Module
SESAR	Single European Sky ATM Research (European Air Traffic System)
SeSyC	LUFO V.1 Vorhaben Secure System Concepts
SET	Smart Embedded Technologies GmbH (Verbundpartner)
SW	Software
TAKE-OFF	Österreichisches Luftfahrtforschungsprogramm
TRL	Technology Readiness Level