DIEHL
Aerospace

	Dok. Nr./Pub. No.	FKZ-20M2101D_SKAIB_Schlussbericht	
	Ausgabe/Issue	000_01	
	Seite/Page	1/20	
	Datei/File Name	FKZ-20M2101D_Skaib_Schlussbericht.docx	

Schlussbericht

SKAIB
Skalierbare Brennstoffzellensysteme
Elektrische Antriebe

Teilvorhaben der Diehl Aerospace
„**MOGUL II**
Modulare Regel- und Überwachungseinheit für zukünftige Brennstoffzellen-, Kühl- und Versorgungssysteme

FKZ: 20M2101D
Nationales Luftfahrtforschungsprogramm
01.10.2022 – 30.06.2026.

© Copyright by Diehl Aerospace GmbH
Dieses Dokument ist Eigentum der Diehl Aerospace GmbH. Eine Nutzung des Dokuments ist nur in unveränderter Form und unter Nennung der Diehl Aerospace GmbH statthaft.
This document is property of Diehl Aerospace GmbH. Use of this document is only permitted without changes and with referencing Diehl Aerospace GmbH.

SUPPLIER ADDRESS AND CODE

Headquarters:
Diehl Aerospace GmbH
Alte Nußdorfer Straße 23
88662 Überlingen

Site Frankfurt:
Diehl Aerospace GmbH
An der Sandelmühle 13
60439 Frankfurt
FSCM-Code: D2439

Site Überlingen:
Diehl Aerospace GmbH
Alte Nußdorfer Straße 23
88662 Überlingen
FSCM-Code: D4829

Site Nürnberg:
Diehl Aerospace GmbH
Donaustrasse 120
D-90451 Nürnberg
FSCM-Code: D1347

© Copyright by Diehl Aerospace GmbH
Dieses Dokument ist Eigentum der Diehl Aerospace GmbH. Eine Nutzung des Dokuments ist nur in unveränderter Form und unter Nennung der Diehl Aerospace GmbH statthaft.
This document is property of Diehl Aerospace GmbH. Use of this document is only permitted without changes and with referencing Diehl Aerospace GmbH.

REVISIONSVERZEICHNIS		
Version	Datum	Beschreibung
001_01	04.05.2026	Entwurf
002_01	20.07.2026	Version zum Review
003_01	30.07.2026	Einarbeitung von Kommentaren
000_01	20.08.2026	Finale Version

© Copyright by Diehl Aerospace GmbH
Dieses Dokument ist Eigentum der Diehl Aerospace GmbH. Eine Nutzung des Dokuments ist nur in unveränderter Form und unter Nennung der Diehl Aerospace GmbH statthaft.
This document is property of Diehl Aerospace GmbH. Use of this document is only permitted without changes and with referencing Diehl Aerospace GmbH.

INHALTSVERZEICHNIS

Absatz	Titel	Seite
1	**EINLEITUNG**	**8**
1.1	**Kurzdarstellung**	**8**
1.1.1	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	9
1.1.2	Planung und Ablauf des Vorhabens	10
1.1.3	Wissenschaftlicher und technischer Stand	12
1.1.3.1	Verwendete Fachliteratur	13
1.1.4	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	13
1.1.4.1	Zusammenarbeit mit den Verbundpartnern	13
1.1.4.2	Zusammenarbeit mit den Unterauftragnehmern	13
2	**AUSFÜHRLICHE DARSTELLUNG**	**14**
2.1	**Ergebnisse des Vorhabens**	**14**
2.1.1	HAP2 Thermal Management System und Komponenten	14
2.1.2	AP2.1 Entwicklung eines Zulassungskonzepts	14
2.1.3	AP2.2 Aufbau und Verifikation von Komponenten für Engine Test Bed	15
2.1.4	AP2.3 Aufbau und Verifikation von Komponenten für FTD + SoF	16
2.1.5	AP2.4 Komponenten, System- Modellentwicklung und Simulation	17
2.2	**Positionen des zahlenmmäßigen Nachweises**	**18**
2.3	**Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit**	**18**
2.4	**Voraussichtliche Nutzung der Ergebnisse**	**19**
2.5	**Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts bei anderen Stellen**	**20**
2.6	**Veröffentlichung der Ergebnisse**	**20**

© Copyright by Diehl Aerospace GmbH
Dieses Dokument ist Eigentum der Diehl Aerospace GmbH. Eine Nutzung des Dokuments ist nur in unveränderter Form und unter Nennung der Diehl Aerospace GmbH statthaft.
This document is property of Diehl Aerospace GmbH. Use of this document is only permitted without changes and with referencing Diehl Aerospace GmbH.

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Nr. Titel Seite

Abbildung 1: Projektstrukturplan nach dem Änderungsantrag 11

Abbildung 2 Zulassungskonzept Mathworks® Workflow 14

Abbildung 3 Zulassungskonzeptplan für PSAC 15

Abbildung 4 Anpassung Werkzeugkette und Aufbau und Verifikation von Komponenten für „Engine Test Bed“ 16

Abbildung 5 Vorbereitung Aufbau und Verifikation von Komponenten für „Safety of Flight“ einschließlich DAs-Werkzeugkette 17

© Copyright by Diehl Aerospace GmbH
Dieses Dokument ist Eigentum der Diehl Aerospace GmbH. Eine Nutzung des Dokuments ist nur in unveränderter Form und unter Nennung der Diehl Aerospace GmbH statthaft.
This document is property of Diehl Aerospace GmbH. Use of this document is only permitted without changes and with referencing Diehl Aerospace GmbH.

TABELLENVERZEICHNIS

Nr. Titel Seite

Tabelle 1: Abkürzungen 7

© Copyright by Diehl Aerospace GmbH
Dieses Dokument ist Eigentum der Diehl Aerospace GmbH. Eine Nutzung des Dokuments ist nur in unveränderter Form und unter Nennung der Diehl Aerospace GmbH statthaft.
This document is property of Diehl Aerospace GmbH. Use of this document is only permitted without changes and with referencing Diehl Aerospace GmbH.

ABKÜRZUNGEN

A/C	Aircraft
ACICD	Aircraft Interface Configuration Document
AiB	Airbus
AP	Arbeitspaket
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
DAG	Diehl Gilching
DAs	Diehl Aerospace GmbH
HW	Hardware
IMA	Integrated Modular Avionik
IOM	Input/Output Modul
MTR	Modulares Test Rig
PCS	Propulsion Control System
PMS	Propulsion Monitoring System
POD	Triebwerksgondel
RTOS	real time operation system
SW	Software
TMS	Thermal Management System
TMSC	TMS Controller

Tabelle 1: Abkürzungen

© Copyright by Diehl Aerospace GmbH
Dieses Dokument ist Eigentum der Diehl Aerospace GmbH. Eine Nutzung des Dokuments ist nur in unveränderter Form und unter Nennung der Diehl Aerospace GmbH statthaft.
This document is property of Diehl Aerospace GmbH. Use of this document is only permitted without changes and with referencing Diehl Aerospace GmbH.

1 EINLEITUNG

Zuwendungsempfänger:	Diehl Aerospace GmbH
Förderkennzeichen:	FKZ-20M2101D
Laufzeit des Teilprojekts:	01.01.2022-30.06.2026
Berichterstatter:	Lance Steinmacher / Tobias Gut

Der vorliegende Abschlussbericht beschreibt die Forschungsarbeiten der Diehl Aerospace GmbH (DAs) im Rahmen des Nationalen Luftfahrtforschungsprogramms LuFo VI-2 Verbundvorhaben SKAiB mit dem Teilvorhaben der Diehl Aerospace Modulare Regel- und Überwachungseinheit (Mogul II).

Das diesem Schlussbericht zugrunde liegende Forschungsvorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) resp. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWE) unter dem Förderkennzeichen 20M2101D gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Berichterstatter. Die Form des Berichtes entspricht den Nebenbestimmungen auf Kostenbasis des Bundesministeriums für Bildung und Forschung an Unternehmen der gewerblichen Wirtschaft für Forschungs- und Entwicklungsvorhaben (NKBF98, §8 Stand April 2006).

1.1 Kurzdarstellung

Im Rahmen des Verbundvorhabens SKAiB (Skalierbare Brennstoffzellensysteme und elektrische Antriebe) innerhalb des 6. Nationalen Luftfahrtforschungsprogramms (LuFo VI-2) wurde gemeinsam mit der Diehl Aviation Gilching GmbH (DAG) und der Diehl Aviation Laupheim GmbH (DAL) ein Zulassungskonzept für den Steuerrechner erarbeitet. Das Konzept umfasst sowohl die generische Hardware- und Softwareplattform als auch die Werkzeugkette zur Erzeugung der Rechnerkonfiguration.

Das LuFo VI-Verbundvorhaben SKAiB (Skalierbare Brennstoffzellensysteme für elektrische Antriebe) verfolgte das Ziel, die technologische Grundlage für den Einsatz hochskalierter wasserstoffbasierter Brennstoffzellensysteme in zukünftigen elektrischen Luftfahrtantrieben zu schaffen. Im Mittelpunkt stand die Entwicklung und Validierung von Komponenten und Systemen für Brennstoffzellen-Antriebsstränge im Megawattbereich sowie deren Integration in eine luftfahrttaugliche Gesamtarchitektur. Dabei sollten insbesondere die Anforderungen hinsichtlich Leistung, Sicherheit, Zuverlässigkeit, Zulassbarkeit und Skalierbarkeit adressiert werden

Die Diehl Aerospace GmbH (DAs) beteiligte sich mit ihrem Teilvorhaben MOGUL II (Modulare Regel- und Überwachungseinheit für zukünftige Brennstoffzellen-, Kühl- und Versorgungssysteme) am Verbundvorhaben SKAiB. Schwerpunkt der Arbeiten war die Weiterentwicklung einer modularen Steuerungs- und Überwachungsplattform für das Thermal Management von Brennstoffzellensystemen in der Leistungsklasse von rund 1,2 bis 1,5 MW. Hierfür wurden bestehende Technologien und Erkenntnisse aus dem Vorgängerprojekt TEWES weiterentwickelt und hinsichtlich Reifegrad, Funktionalität und luftfahrtrechtlicher Zulassungsfähigkeit ausgebaut.
Die Arbeiten der Diehl Aerospace umfassten die Entwicklung eines Zulassungskonzepts für Hard- und Software einschließlich der automatisierten Werkzeugkette, die Anpassung und Verifikation der Steuerrechnerplattform für Labor- und Flugvalidierung, die Durchführung von Funktions- und EMV-

© Copyright by Diehl Aerospace GmbH
Dieses Dokument ist Eigentum der Diehl Aerospace GmbH. Eine Nutzung des Dokuments ist nur in unveränderter Form und unter Nennung der Diehl Aerospace GmbH statthaft.
This document is property of Diehl Aerospace GmbH. Use of this document is only permitted without changes and with referencing Diehl Aerospace GmbH.

Untersuchungen sowie die Unterstützung der Modellbildung und Simulation des Gesamtsystems. Darüber hinaus wurden Konzepte zur Erreichung der Anforderungen an Sicherheit und Flugtauglichkeit („Safety of Flight“) erarbeitet.
Gemeinsam mit den Verbundpartnern Airbus, Diehl Aviation Gilching, Diehl Aviation Laupheim und weiteren Beteiligten leistete SKAiB einen wesentlichen Beitrag zur Technologieentwicklung für wasserstoffbasierte elektrische Antriebssysteme. Die Projektergebnisse bilden eine wichtige Grundlage für die weitere Entwicklung, Validierung und spätere Industrialisierung emissionsarmer beziehungsweise emissionsfreier Luftfahrtsysteme und stärken die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Luftfahrtindustrie im Zukunftsfeld des elektrischen Fliegens

Die Werkzeugkette aus dem Projekt TEWES wurde weiterentwickelt und funktional verifiziert. Sie generiert aus Prozess-, Regel- und Schnittstellendefinitionen ladbare Konfigurationen, welche die generische Plattform für das Kühlsystem instanziieren. Dabei wurden Tools der DAs sowie von Drittanbietern (z. B. MathWorks® zur automatischen Codegenerierung) integriert. Ein Hauptfokus der DAs im Arbeitspaket 2.1 lag auf der Zertifizierbarkeit der gesamten Werkzeugkette, um die automatisierte Erzeugung zulassungsfähiger Software zu ermöglichen.

Weiterhin unterstützte DAs die Partner bei der Entwicklung der Konzepte für die Zulassung der Systeme.

1.1.1 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Verbundvorhaben SKAiB wurde im Rahmen des zweiten Programmaufrufs des sechsten nationalen Luftfahrtforschungsprogramms (LuFo) mit einer Gesamtlaufzeit vom 01.01.2022 – 30.06.2026 durchgeführt.

Das Verbundvorhaben SKAiB war auf die Entwicklung skalierbarer Brennstoffzellensysteme für zukünftige elektrische Luftfahrtantriebe ausgerichtet. Ausgangspunkt des Vorhabens war die steigende Bedeutung emissionsarmer bzw. emissionsfreier Antriebstechnologien zur Erreichung der nationalen und internationalen Klimaschutzziele sowie die zunehmende Fokussierung der Luftfahrtindustrie auf wasserstoffbasierte Antriebskonzepte. Die Arbeiten bauten dabei auf bereits laufenden Technologieentwicklungen der Verbundpartner sowie auf den Ergebnissen vorausgegangener Forschungsprojekte, insbesondere des LuFo-Vorhabens TEWES, auf.

Die Durchführung des Vorhabens erfolgte in einem interdisziplinären Verbund aus Airbus, Diehl Aerospace GmbH, Diehl Aviation Gilching GmbH, Diehl Aviation Laupheim GmbH sowie weiteren Forschungspartnern. Die Zusammenarbeit ermöglichte die Zusammenführung komplementärer Kompetenzen in den Bereichen Brennstoffzellentechnologie, Thermal Management, Luftfahrtsysteme, Modellbildung, Regelungstechnik und Avionik. Die technische Auslegung der Arbeiten basierte auf einem kontinuierlichen Austausch zwischen den Projektpartnern sowie einer abgestimmten Definition von Systemanforderungen, Schnittstellen und Verifikationsmethoden

Ziel war es, die CO_2-Emission zu reduzieren. Hierfür war ein Ansatz, die Entwicklung von leistungsfähigen, sicheren und energieeffizienten Systemen und die Entwicklung von elektrischen Antriebstechnologien unter Verwendung von Wasserstoff. Die Hauptinnovation des Verbundvorhabens SKAiB (Skalierbare Brennstoffzellensysteme für elektrische Antriebe) war eine Hochskalierung der Brennstoffzellensystemleistung, um eine für einen Hauptantrieb erforderliche Gesamtleistung erreichen

© Copyright by Diehl Aerospace GmbH
Dieses Dokument ist Eigentum der Diehl Aerospace GmbH. Eine Nutzung des Dokuments ist nur in unveränderter Form und unter Nennung der Diehl Aerospace GmbH statthaft.
This document is property of Diehl Aerospace GmbH. Use of this document is only permitted without changes and with referencing Diehl Aerospace GmbH.

zu können. Hierbei sollte der Reifegrad des Systems und der Komponenten so weit entwickelt werden, dass eine Flugfähigkeit mittels Zulassungskonzepten und Verifikationstest nachgewiesen werden kann.

Mit der Ankündigung von Airbus, ihre Wasserstoffaktivitäten stark in die Zukunft zu verschieben, hat sich der Fokus von SKAjB ein wenig verändert und das Ziel wurde hierdurch in die Zukunft geschoben. Daraus ergab sich ein vorläufiger Stopp des Vorhabens durch den Projektträger. Durch eine Anhörung mit einer anschließenden schriftlichen Darstellung wurde dargelegt, dass durch SKAiB und weitere Forschungsvorhaben die DAs ihre Kompetenz erweitert, um weiterhin in Zukunft ein verlässlicher Partner der Luftfahrtindustrie für qualifizierte Regel- und Überwachungs-Rechnerplattformen zu bleiben und auch im Bereich des voll-elektrischen Fliegens zu werden.
Die in SKAiB erlangten Technologien können zum Beispiel für einen elektrischen Antriebsstrang für Regionalflugzeuge vorangetrieben werden. Hierbei kann ebenfalls die Leistungsverteilung und die Gesamtantriebstrangsteuerung sowie die Treibstoffführung mit betrachtet werden.
Mit der Weiterentwicklung eines Controllers sowie der Werkzeugkette zur Generierung von Konfigurationen und (Auto-) Kodierungsunterstützung, um Systemfunktionen auf dem Controller implementieren zu können, zeichnet sich für die DAs zusätzlich die Möglichkeit ab, im Rahmen von eines „Next-Generation“ Hybrid-elektrisches Regionalflugzeug (z.B. ATR Evo) die IMA-Technologien als Enabler für effiziente Instanziierung von Control- und Monitoring Systeme einzubringen.
Zusätzlich zum vorherigen Punkt wird die DAs die Ergebnisse von SKAiB nutzen, um eine Vielzahl von Applikationen, die nicht die Brennstoffzellenkühlung betreffen, ebenfalls auf die DAs Plattform integrieren zu können. Dadurch ergibt sich für Systemanbieter sowie für Flugzeughersteller die Möglichkeit ihre Applikationen effizienter und kostengünstiger umsetzen zu können, als dies mit bisherigen Methoden möglich ist.
Die Rechnerplattform, bestehend aus einer generischen Hard- und Software, bietet des Weiteren die Möglichkeit über eine Konfiguration instanziiert zu werden und zusätzlich spezifische Applikationen unterschiedlicher Systemfunktionen zu integrieren. Dadurch ist es möglich, dass mehrere voneinander separierte Applikationen gleichzeitig und unabhängig gerechnet werden, ohne sich gegenseitig zu beeinflussen.
Diese Rechnerplattform ist generischer Natur und unabhängig von Luftfahrzeugklasse und Luftfahrzeughersteller.

Mit der Weiterentwicklung eines Controllers sowie der Werkzeugkette zur Generierung von Konfigurationen und (Auto-) Kodierungsunterstützung, um Systemfunktionen auf dem Controller implementieren zu können, zeichnet sich für die DAs zusätzlich die Möglichkeit ab, im Rahmen von eines „Next-Generation“ Hybrid-elektrisches Regionalflugzeug (z.B. ATR Evo) die IMA-Technologien als Enabler für effiziente Instanziierung von Control- und Monitoring Systeme einzubringen.

.

1.1.2 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die einzelnen Arbeitspakete sind in Abbildung 1: Projektstrukturplan nach dem Änderungsantrag dargestellt.

In AP1.1 wurden die Anforderungen und Konzepte für das Flugregelungs- und Flugsteuerungssystem erarbeiten.

© Copyright by Diehl Aerospace GmbH
Dieses Dokument ist Eigentum der Diehl Aerospace GmbH. Eine Nutzung des Dokuments ist nur in unveränderter Form und unter Nennung der Diehl Aerospace GmbH statthaft.
This document is property of Diehl Aerospace GmbH. Use of this document is only permitted without changes and with referencing Diehl Aerospace GmbH.

In AP1.2 wurden die Testszenarien und Evaluationskriterien erarbeitet. Basierend auf den Testszenarien hat die DAs die Testspezifikationen für den DAL A RCM-FC sowie die Verifikationsstrategie (u.a. EMV-Tests) für solch ein Modul erarbeitet.

In AP2.1 unterstützte die DAs die Umsetzung der Flugregelungs- und Flugsteuerungssysteme.

In AP2.2 wurde ein leistungsfähiges Funktionsmuster DAL RCM-FC entwickelt, das in der Lage ist, die komplexe Backup-Funktionalität sowie weitere Applikationen zu integrieren. Es wurde ein neues CPU-Board als auch eine neue IO-Karte entwickelt. Wegen der erwarteten Leistungsanforderungen wurde eine Multicore-CPU-Architektur bestehend aus zwei CPUs untersucht, da in dieser Leistungsklasse keine Single Core Prozessoren auf dem Markt verfügbar sind.

In AP2.3 wurde die zugehörige Toolkette weiterentwickelt und angepasst.

In AP3.2 hat die DAs ihren eigenen Teststand für die Verifikation des DAL A RCM-FC aufgebaut.

In AP4.1 ist der DAL A RCM-FC in den Teststand von AHD und AHF integriert und getestet worden.

In AP4.2 erfolgte die Verifikation der DAL A RCM-FC Komponenten sowie die EMV-Untersuchungen.

In AP4.3 erstellte die DAs die Dokumentation für ein mögliches späteres Permit to Fly des RMC-FC und unterstütze die Evaluierungsdokumentation.

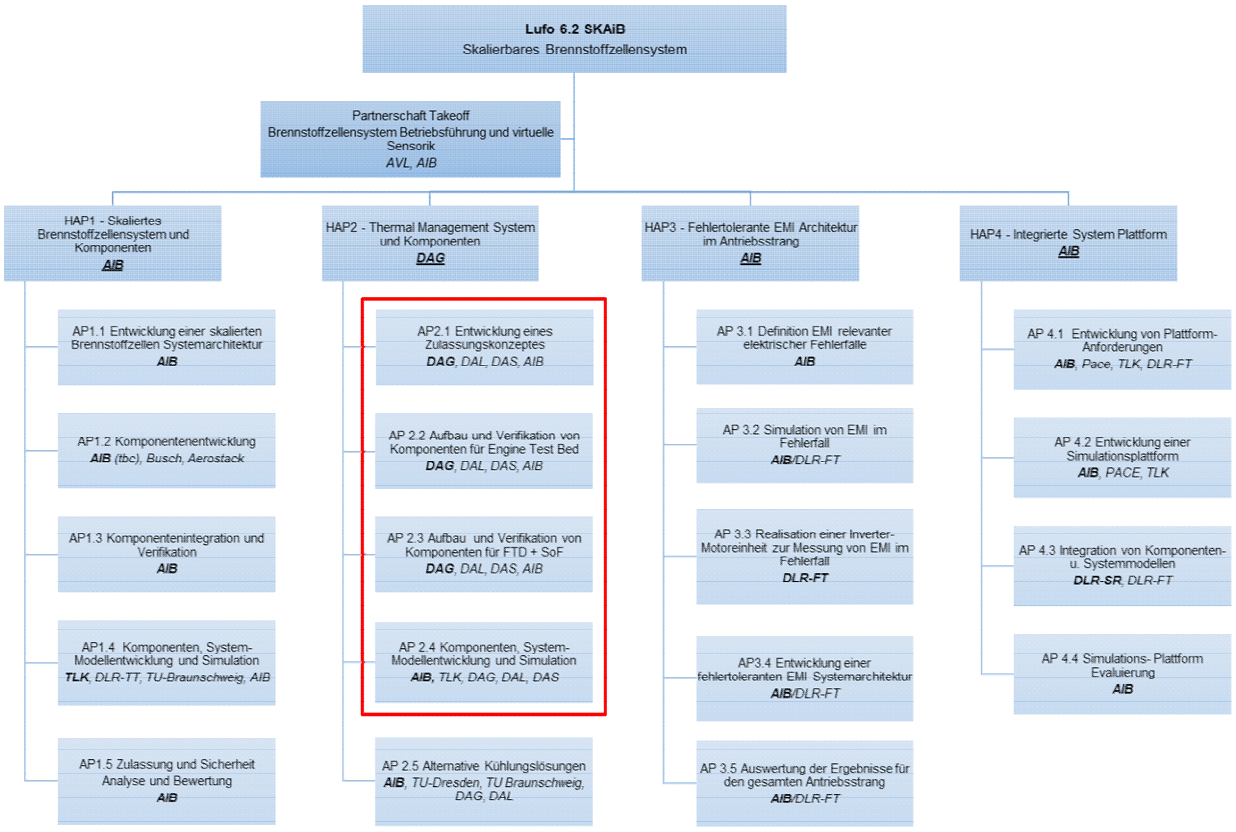

Abbildung 1: Projektstrukturplan nach dem Änderungsantrag

© Copyright by Diehl Aerospace GmbH
Dieses Dokument ist Eigentum der Diehl Aerospace GmbH. Eine Nutzung des Dokuments ist nur in unveränderter Form und unter Nennung der Diehl Aerospace GmbH statthaft.
This document is property of Diehl Aerospace GmbH. Use of this document is only permitted without changes and with referencing Diehl Aerospace GmbH.

1.1.3 Wissenschaftlicher und technischer Stand

Zum Zeitpunkt des Projektstarts des LuFo VI-2 Verbundvorhabens SKAiB (Skalierbare Brennstoffzellensysteme für elektrische Antriebe) bestand weltweit ein hoher Forschungs- und Entwicklungsbedarf im Bereich wasserstoffbasierter elektrischer Antriebssysteme für die Luftfahrt. Während Brennstoffzellensysteme bereits in stationären und mobilen Anwendungen eingesetzt wurden, existierten für den Einsatz in Luftfahrzeugen im Leistungsbereich von mehr als einem Megawatt noch keine ausreichend validierten und hinsichtlich Luftfahrttauglichkeit bewerteten Gesamtsysteme. Insbesondere die Skalierung von Brennstoffzellensystemen auf die für Regionalflugzeuge erforderlichen Leistungsbereiche stellte eine wesentliche technologische Herausforderung dar.

Eine besondere Herausforderung bestand dabei im Bereich des Thermal Managements. Hochleistungs-Brennstoffzellensysteme erzeugen erhebliche Verlustwärmen, deren sichere und effiziente Abfuhr für einen zuverlässigen Betrieb zwingend erforderlich ist. Zwar waren in Literatur und Patentlandschaft verschiedene Kühl- und Versorgungskonzepte für Brennstoffzellen beschrieben, jedoch lagen keine für die Luftfahrt geeigneten, validierten Lösungen für Brennstoffzellensysteme der Leistungsklasse von etwa 1 bis 1,5 MW vor. Ebenso fehlten Steuerungs- und Überwachungssysteme, die sowohl die hohen Anforderungen an Dynamik und Zuverlässigkeit als auch die luftfahrtrechtlichen Anforderungen an Safety, Availability und Zulassbarkeit erfüllen konnten.
Im Rahmen vorangegangener nationaler und europäischer Forschungsprojekte wurden bereits wesentliche Grundlagen für den Einsatz von Brennstoffzellen in Luftfahrzeugen geschaffen. Die Diehl Aerospace GmbH verfügte insbesondere durch die Projekte Go4H2, Go4Hy2, HighV, EnaBle sowie die Forschungsaktivitäten im Bereich energieautarker Kabinensysteme über umfangreiche Erfahrungen im Umfeld elektrischer Energiesysteme und Brennstoffzellentechnologien für die Luftfahrt. Darüber hinaus konnte auf langjährige Kompetenzen im Bereich integrierter modularer Avioniksysteme (IMA) und sicherheitskritischer Rechnerplattformen zurückgegriffen werden.
Für das Teilvorhaben der Diehl Aerospace bildeten insbesondere die Ergebnisse des LuFo VI-1 Projekts TEWES die Ausgangsbasis. In diesem Vorhaben wurde eine modulare Steuerungs- und Überwachungsplattform einschließlich einer Werkzeugkette zur automatisierten Generierung von Regel- und Steuerungssoftware entwickelt. Die Plattform erlaubte die flexible Konfiguration von Hard- und Softwarekomponenten und wurde bereits für Brennstoffzellenanwendungen im Leistungsbereich bis etwa 1 MW untersucht. Allerdings befand sich die Technologie noch nicht auf einem Reifegrad, der eine Anwendung in flugnahen Validierung oder eine zukünftige Zulassung ermöglicht hätte. Wesentliche Fragestellungen hinsichtlich Skalierbarkeit, Zertifizierbarkeit, elektromagnetischer Verträglichkeit, Safety-of-Flight-Anforderungen sowie automatisierter und zulassungskonformer Softwareerzeugung waren noch offen.
Vor diesem Hintergrund verfolgte SKAiB das Ziel, den technologischen Reifegrad der Brennstoffzellen-Kühlsysteme und der zugehörigen Steuerungs- und Überwachungssysteme deutlich zu erhöhen. Die Arbeiten konzentrierten sich auf die Entwicklung und Validierung eines skalierbaren Thermal-Management-Systems für Brennstoffzellensysteme im Megawattbereich, die Entwicklung entsprechender Zulassungskonzepte sowie die Verifikation der Technologien in Labor- und Flugvalidierungstestumgebungen. Die Diehl Aerospace brachte hierzu ihre Expertise in den Bereichen Rechnerplattformen, Regelungs- und Überwachungssysteme, modellbasierte Entwicklung sowie luftfahrtspezifische Entwicklungs- und Zulassungsprozesse ein.

Aus wissenschaftlich-technischer Sicht bestand der wesentliche Innovationsgehalt des Vorhabens in der Überführung bereits vorhandener Grundlagenentwicklungen in Richtung luftfahrttauglicher, skalierbarer

© Copyright by Diehl Aerospace GmbH
Dieses Dokument ist Eigentum der Diehl Aerospace GmbH. Eine Nutzung des Dokuments ist nur in unveränderter Form und unter Nennung der Diehl Aerospace GmbH statthaft.
This document is property of Diehl Aerospace GmbH. Use of this document is only permitted without changes and with referencing Diehl Aerospace GmbH.

und zulassungsfähiger Systeme. Dabei sollten insbesondere die in TEWES entwickelten Steuerrechner, die automatisierte Werkzeugkette zur Konfigurationserzeugung sowie die zugrunde liegenden Regelungs- und Überwachungskonzepte auf die neue Leistungsklasse von etwa 1,2 bis 1,5 MW weiterentwickelt und für den Einsatz in zukünftigen wasserstoffelektrischen Luftfahrzeugen vorbereitet werden. Damit stellte SKAiB einen wichtigen Zwischenschritt auf dem Weg zu emissionsfreien elektrischen Antriebssystemen für die Luftfahrt dar.

1.1.3.1 Verwendete Fachliteratur

- DO-178B / ED-12B: Software Considerations in Airborne Systems and Equipment Certification – RTCA / EUROCAE
- DO-254 / ED-80: Design Assurance Guidance for Airborne Electronic Hardware – RTCA / EUROCAE

1.1.4 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

1.1.4.1 Zusammenarbeit mit den Verbundpartnern

Die DAs hat im Verbundvorhaben SKAiB mit den Verbundpartnern Airbus; DAG und DAL am Thermischen Management eines Brennstoffzellen Antriebs gearbeitet.

Diehl Aviation Gilching (DAG) und Diehl Aviation Laupheim (DAL)
Die Zusammenarbeit mit der DAG bzw. DAL konzentrieren sich auf die Implementierung von Regelgesetzen mit den von der DAs entwickelten Tools auf der von der DAs bereit gestellten Hardware zur Steuerung des Thermischen Managements für Brennstoffzellen der Leistungsklasse 1-3MW (1 MW Kühlleistung),

Airbus Operations
Die Arbeiten mit Airbus konzentrierten sich auf die Implementierung der Hardware der DAs mit den Regelgesetzen der Diehl Aviation in das Testsystem von Airbus in Hamburg.

1.1.4.2 Zusammenarbeit mit den Unterauftragnehmern

Es fanden keine Arbeiten mit Unterauftragnehmern statt.
.

© Copyright by Diehl Aerospace GmbH
Dieses Dokument ist Eigentum der Diehl Aerospace GmbH. Eine Nutzung des Dokuments ist nur in unveränderter Form und unter Nennung der Diehl Aerospace GmbH statthaft.
This document is property of Diehl Aerospace GmbH. Use of this document is only permitted without changes and with referencing Diehl Aerospace GmbH.

2 AUSFÜHRLICHE DARSTELLUNG

2.1 Ergebnisse des Vorhabens

2.1.1 HAP2 Thermal Management System und Komponenten

2.1.2 AP2.1 Entwicklung eines Zulassungskonzepts

Im Arbeitspaket AP2.1 entwickelte Diehl Aerospace ein umfassendes Zulassungskonzept für die modulare Steuerrechnerplattform, die für Brennstoffzellen-Thermalmanagementsysteme zukünftiger wasserstoffbetriebener Luftfahrzeuge vorgesehen ist. Der Schwerpunkt lag auf der Erarbeitung eines Zulassungsansatzes für die Steuerrechner-Hardware und -Software sowie für die zugehörige automatisierte Entwicklungswerkzeugkette. Besonderes Augenmerk wurde auf den Einsatz von Model-Based-Development-(MBD)-Methoden gelegt, einschließlich MATLAB/Simulink-basierter Entwicklung, automatischer Codegenerierung sowie der Anwendung luftfahrtrechtlicher Standards wie DO-178C und DO-331. Das resultierende Konzept identifizierte die erforderlichen Entwicklungs-, Verifikations- und Validierungsaktivitäten zur Unterstützung zukünftiger fliegender Anwendungen.

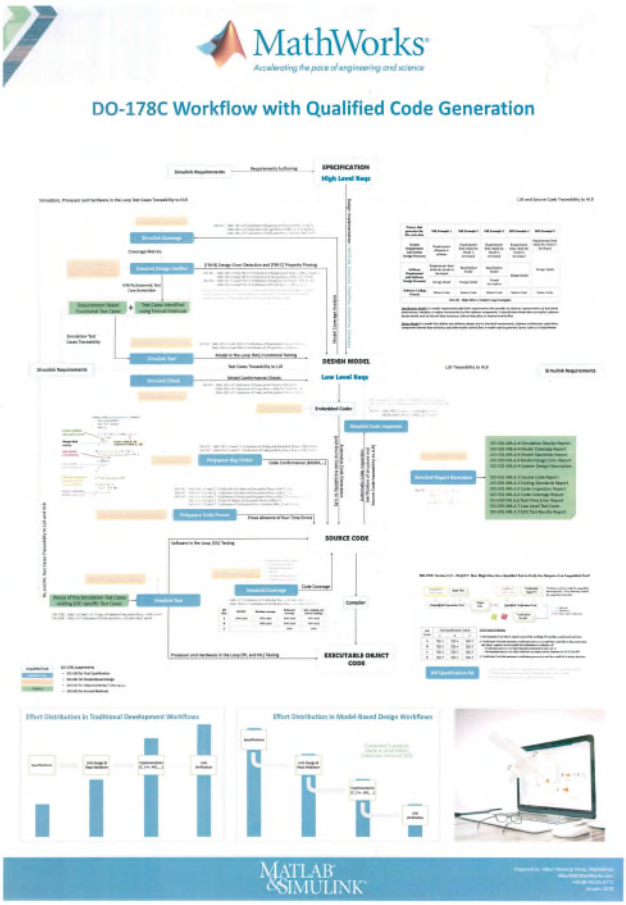

Abbildung 2 Zulassungskonzept Mathworks® Workflow

© Copyright by Diehl Aerospace GmbH
Dieses Dokument ist Eigentum der Diehl Aerospace GmbH. Eine Nutzung des Dokuments ist nur in unveränderter Form und unter Nennung der Diehl Aerospace GmbH statthaft.
This document is property of Diehl Aerospace GmbH. Use of this document is only permitted without changes and with referencing Diehl Aerospace GmbH.

Ein wesentliches Ergebnis dieses Arbeitspakets war die Entwicklung eines PSAC-orientierten Frameworks, das die Interaktion zwischen der modellbasierten Entwicklungsumgebung und der Avionik-Steuerrechnerplattform beschreibt. Dies umfasste die Definition von Anforderungen an die Werkzeugqualifikation, Verifikationsabläufe, Rückverfolgbarkeitskonzepte sowie Software-Lebenszyklusdaten.

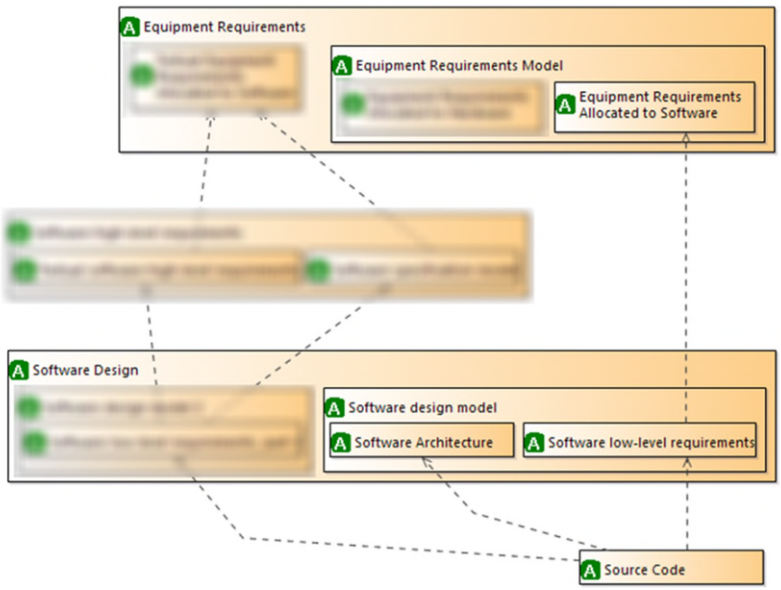

Abbildung 3 Zulassungskonzeptplan für PSAC

Darüber hinaus wurden die notwendigen Verifikations- und Codeanalysewerkzeuge identifiziert, um eine zulassungskonforme Softwareentwicklung zu ermöglichen. Die daraus abgeleitete Zulassungsstrategie schuf eine solide Grundlage für zukünftige Anwendungen, bis DAL-C und erhöhte die Reife der Technologie im Hinblick auf zukünftige Luftfahrtzulassungsprogramme deutlich.
Meilensteine im AP:
M2.1-1 Zulassungskonzept erstellt
Status: Erreicht

2.1.3 AP2.2 Aufbau und Verifikation von Komponenten für Engine Test Bed

AP2.2 konzentrierte sich auf die Anpassung der IMA-Steuerrechnerplattform und der zugehörigen Werkzeugkette für den Einsatz in der Engine-Test-Bed-Umgebung. Bestehende Steuerrechnerhardware, Kommunikationsschnittstellen, Softwarekomponenten und Konfigurationsgenerierungsprozesse wurden an die weiterentwickelten Anforderungen des Thermalmanagementsystems angepasst. Besonderes Augenmerk lag auf der Integration neuer Schnittstellendefinitionen, Kommunikationsprotokolle und Prozesskonfigurationen, die für den Laborvalidatortestplattform erforderlich waren. Die automatisierte Werkzeugkette wurde erweitert, um konsistente und reproduzierbare Steuerrechnerkonfigurationen für die Systemintegrationsaktivitäten bereitzustellen.

© Copyright by Diehl Aerospace GmbH
Dieses Dokument ist Eigentum der Diehl Aerospace GmbH. Eine Nutzung des Dokuments ist nur in unveränderter Form und unter Nennung der Diehl Aerospace GmbH statthaft.
This document is property of Diehl Aerospace GmbH. Use of this document is only permitted without changes and with referencing Diehl Aerospace GmbH.

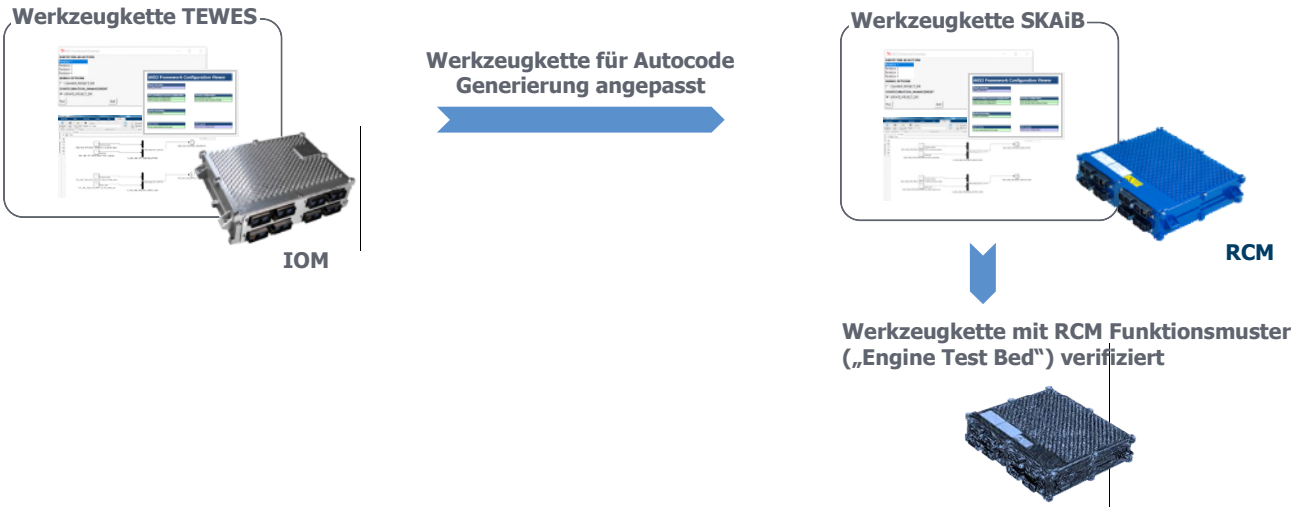

Abbildung 4 Anpassung Werkzeugkette und Aufbau und Verifikation von Komponenten für „Engine Test Bed"

Die konfigurierten Steuerrechner wurden anschließend umfangreichen Funktionsverifikationen und Umweltprüfungen unterzogen. Spezielle Hardwareeinheiten wurden für Integrationsaktivitäten, Untersuchungen zur elektromagnetischen Verträglichkeit sowie für Systemvalidierungsaufgaben vorbereitet. Die EMV-Prüfungen wurden anhand relevanter luftfahrtspezifischer Umwelt- und Zulassungsanforderungen durchgeführt und umfassten unter anderem Temperaturprüfungen, Spannungstransienten-Tests sowie Untersuchungen zur elektromagnetischen Störfestigkeit. Der erfolgreiche Abschluss dieser Aktivitäten bestätigte die Eignung der Steuerrechnerplattform für Demonstrationen auf Laborsystemebene und lieferte wichtige Erkenntnisse für zukünftige flugorientierte Weiterentwicklungen.

Meilensteine im AP:
M2.2-1 Komponenten- und Systemsteuerung für Laborsystem Test verifiziert
Status: **Erreicht**

2.1.4 AP2.3 Aufbau und Verifikation von Komponenten für FTD + SoF

Aufbauend auf den Erkenntnissen aus der Laborintegration befasste sich AP2.3 mit der weiteren Reifesteigerung der Steuerrechnerplattform für zukünftige Flight-Test-Validator- und Safety-of-Flight-Anwendungen. Die IMA-Einheiten wurden für repräsentative Einsatzumgebungen konfiguriert und vorbereitet, während sich die Verifikationsaktivitäten auf den Nachweis einer erhöhten Robustheit, Zuverlässigkeit und Eignung für zukünftige Luftfahrtanwendungen konzentrierten. Darüber hinaus wurden die technischen und zulassungsrelevanten Anforderungen untersucht, die für die Weiterentwicklung der Plattform hin zu einer flugtauglichen Implementierung erforderlich sind.

© Copyright by Diehl Aerospace GmbH
Dieses Dokument ist Eigentum der Diehl Aerospace GmbH. Eine Nutzung des Dokuments ist nur in unveränderter Form und unter Nennung der Diehl Aerospace GmbH statthaft.
This document is property of Diehl Aerospace GmbH. Use of this document is only permitted without changes and with referencing Diehl Aerospace GmbH.

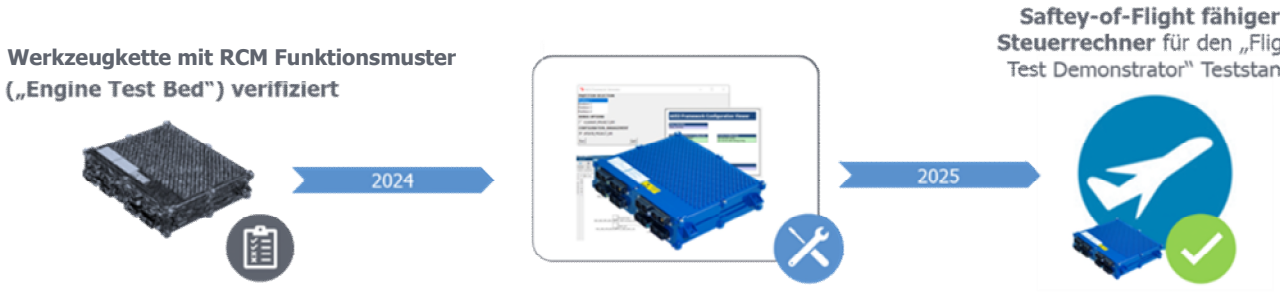

Abbildung 5 Vorbereitung Aufbau und Verifikation von Komponenten für „Safety of Flight" einschließlich DAs-Werkzeugkette

Ein wesentlicher Schwerpunkt dieser Arbeiten war die Bewertung von Safety-of-Flight-Aspekten sowie die Identifikation der erforderlichen Designmaßnahmen zur Erfüllung der luftfahrtspezifischen Sicherheitsziele. Zur Unterstützung dieses Ziels wurden funktionale Verifikationen, Umweltqualifikationsuntersuchungen und Integrationsstudien durchgeführt. Die resultierende Plattform demonstrierte die Einhaltung der angestrebten funktionalen und umweltbezogenen Anforderungen und lieferte einen strukturierten Fahrplan für zukünftige Flugtestvalidierungs-Einsätze. Dadurch wurde die Reife der Steuerrechnerarchitektur deutlich erhöht und ihre Anwendbarkeit über Thermalmanagementsysteme hinaus auf weitere Avionik-Steuerungsfunktionen ausgeweitet.

Meilensteine im AP:
M2.3-1 Komponenten- und Systemsteuerung für Anwendungssystem Test verifiziert
Status: Erreicht

2.1.5 AP2.4 Komponenten, System- Modellentwicklung und Simulation

AP2.4 konzentrierte sich auf die Entwicklung von Simulations- und Modellierungsfähigkeiten zur Unterstützung sowohl der Steuerrechnerentwicklung als auch der Systemintegrationsaktivitäten. Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurde eine Simulationsumgebung geschaffen, die das Verhalten des Steuerrechners, die Kommunikationsschnittstellen sowie die Wechselwirkungen mit weiteren Komponenten des Thermalmanagementsystems abbilden kann. Besonderes Augenmerk lag dabei auf der Unterstützung ARINC-653-konformer Ausführungskonzepte sowie auf der effizienten Integration automatisch generierter Regelungssoftware in die Avionik-Plattformarchitektur.
Ein bedeutendes technisches Ergebnis war die Entwicklung und Validierung eines automatisierten Framework-Generierungsprozesses zur Unterstützung der Kommunikations- und Partitionskonfiguration.

Als Eingaben dienen insbesondere das AC-ICD mit A653-Port- und Partitionsdefinitionen 653-Framework-Konfiguration mit Signal-Layouts und Routing-Einstellungen.
Die generierten Simulink-Blöcke ermöglichen es, im MATLAB/Simulink-Modell direkt auf Signale der A653-Ports zuzugreifen

In Anknüpfung an AP2.4-1 wurden weitere Systemmodellierungen durchgeführt, die sich auf das Gesamtsystem konzentrierten. In der A653 Framework-Generator-Implementierung waren nachfolgende Eingaben vom Benutzer notwendig:

© Copyright by Diehl Aerospace GmbH
Dieses Dokument ist Eigentum der Diehl Aerospace GmbH. Eine Nutzung des Dokuments ist nur in unveränderter Form und unter Nennung der Diehl Aerospace GmbH statthaft.
This document is property of Diehl Aerospace GmbH. Use of this document is only permitted without changes and with referencing Diehl Aerospace GmbH.

- AC-ICD mit der Definition der A653 Ports und A653 Partition
- A653 Framework Konfiguration mit dem Signal Layout der A653 Ports und Routing Einstellungen innerhalb der A653 Partition.

Meilensteine im AP:
M2.4-1 Modellaufbau und Simulation von Komponenten und Steuerung für Laborsystem abgeschlossen
M2.4-2 Modellaufbau und Simulation von Komponenten und Steuerung für Anwendungssystem abgeschlossen
Status: Erreicht

2.2 Positionen des zahlenmmäßigen Nachweises

Die größten Positionen waren die Personalkosten in der Entwicklung, welche gemäß der Planung entsprechend entstanden sind und angezeigt wurden. Kosten für Reisen und Material wurden entsprechend eingereicht.

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die im Rahmen des Verbundvorhabens SKAiB durchgeführten Arbeiten waren notwendig, um die technologische Lücke zwischen bestehenden Brennstoffzellenanwendungen und zukünftigen wasserstoffbasierten elektrischen Luftfahrtantrieben im Leistungsbereich von 1 bis 3 MW zu adressieren. Insbesondere für den Einsatz in der Luftfahrt bestehen deutlich höhere Anforderungen an Sicherheit, Verfügbarkeit, Zuverlässigkeit, Gewicht, Fehlertoleranz und Zulassbarkeit als bei vergleichbaren industriellen Anwendungen. Zum Projektbeginn standen weder ausreichend validierte Steuerungs- und Überwachungssysteme noch geeignete luftfahrttaugliche Rechnerplattformen für das Thermal Management von Brennstoffzellensystemen dieser Leistungsklasse zur Verfügung. Die Entwicklung entsprechender Technologien war daher eine wesentliche Voraussetzung für die zukünftige Realisierung emissionsarmer bzw. emissionsfreier Luftfahrzeuge.
Die Arbeiten der Diehl Aerospace konzentrierten sich auf die Entwicklung einer modularen Regel- und Überwachungsplattform einschließlich einer automatisierten Werkzeugkette zur Erzeugung zulassungsfähiger Steuerungs- und Regelungssoftware. Diese Arbeiten waren erforderlich, da die sichere Beherrschung komplexer Brennstoffzellen-, Kühl- und Versorgungssysteme nur durch leistungsfähige und hochzuverlässige Steuerrechner möglich ist. Gleichzeitig mussten bereits in frühen Entwicklungsphasen zukünftige Anforderungen aus den Bereichen Safety, Availability, Hardware- und Software-Zulassung sowie elektromagnetische Verträglichkeit berücksichtigt werden.
Die Angemessenheit der durchgeführten Arbeiten wird insbesondere durch die erreichten Projektergebnisse belegt. Im Projektverlauf konnten ein belastbares Zulassungskonzept für Rechnerplattform und Werkzeugkette entwickelt, die Maturität der Hard- und Software erhöht, die Steuerrechner erfolgreich aufgebaut und verifiziert sowie umfangreiche Funktions- und EMV-Nachweise erbracht werden. Darüber hinaus wurden Konzepte für zukünftige Safety-of-Flight-Anwendungen erarbeitet und die modellbasierte Entwicklungsumgebung weiterentwickelt. Sämtliche projektseitig definierten Meilensteine konnten erreicht werden.
Trotz der während der Projektlaufzeit veränderten Rahmenbedingungen durch die Verschiebung der Wasserstoff-Roadmap von Airbus und den zeitweisen Projektstopp blieb die Relevanz der Arbeiten

© Copyright by Diehl Aerospace GmbH
Dieses Dokument ist Eigentum der Diehl Aerospace GmbH. Eine Nutzung des Dokuments ist nur in unveränderter Form und unter Nennung der Diehl Aerospace GmbH statthaft.
This document is property of Diehl Aerospace GmbH. Use of this document is only permitted without changes and with referencing Diehl Aerospace GmbH.

erhalten. Die entwickelten Technologien sind nicht ausschließlich auf Brennstoffzellen-Kühlsysteme beschränkt, sondern können ebenso in zukünftigen Avionik-, Energieverteilungs-, Flugsteuerungs- und Überwachungssystemen eingesetzt werden. Die Arbeiten leisteten damit einen wichtigen Beitrag zur Weiterentwicklung modularer Avionikrechner und automatisierter Entwicklungswerkzeuge für zukünftige Luftfahrtsysteme.
Zusammenfassend waren Umfang, Inhalt und Tiefe der durchgeführten Arbeiten sowohl technisch als auch wirtschaftlich angemessen. Die Arbeiten ermöglichten eine Erhöhung des Technologiereifegrades der entwickelten Rechnerplattform und Werkzeugkette, schufen die Grundlage für weitere Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten im Bereich elektrischer Luftfahrtantriebe und stärkten die Kompetenz der Diehl Aerospace im Zukunftsfeld wasserstoffbasierter und elektrischer Luftfahrtsysteme.

2.4 Voraussichtliche Nutzung der Ergebnisse

Die im Verbundvorhaben SKAiB erzielten Ergebnisse bilden eine wesentliche Grundlage für die Weiterentwicklung zukünftiger Steuerungs- und Überwachungssysteme für elektrische und wasserstoffbasierte Luftfahrtantriebe. Insbesondere die im Teilvorhaben MOGUL II weiterentwickelte modulare Rechnerplattform, die zugehörige Werkzeugkette sowie die erarbeiteten Zulassungskonzepte eröffnen der Diehl Aerospace GmbH neue Möglichkeiten zur Bereitstellung von Control- und Monitoring-Systemen für zukünftige Luftfahrzeuganwendungen.
Ein Schwerpunkt der zukünftigen Nutzung liegt in der Weiterentwicklung der entwickelten Werkzeugkette für eine effiziente, modellbasierte und weitgehend automatisierte Erstellung von Steuerungs- und Regelungssoftware. Die im Rahmen des Vorhabens gewonnenen Erkenntnisse zur Integration von MATLAB/Simulink-basierten Entwicklungsprozessen, zur automatischen Codegenerierung sowie zu zulassungsrelevanten Entwicklungsabläufen können in zukünftigen Entwicklungsprogrammen unmittelbar genutzt werden. Dadurch wird eine deutliche Reduzierung von Entwicklungsaufwand, Integrationsrisiken und Qualifikationskosten erwartet.
Darüber hinaus können die entwickelten Technologien unabhängig von der ursprünglichen Brennstoffzellenanwendung in weiteren Luftfahrtsystemen eingesetzt werden. Die im Projekt nachgewiesene Eignung der modularen Rechnerplattform ermöglicht einen Einsatz in zukünftigen Avionik-, Energieverteilungs-, Thermal-Management-, Überwachungs- und Steuerungssystemen. Die Arbeiten leisten damit einen wichtigen Beitrag zur strategischen Weiterentwicklung der Integrated-Modular-Avionics-(IMA)-Produktfamilie der Diehl Aerospace.
Die im Projekt entwickelten Methoden und Werkzeuge schaffen zudem die Voraussetzungen für zukünftige Anwendungen im Bereich elektrischer und hybrid-elektrischer Luftfahrzeuge. Potenzielle Einsatzgebiete umfassen Regionalflugzeuge, CS-23-Luftfahrzeuge, Urban-Air-Mobility-Konzepte, Flugtaxis sowie unbemannte Luftfahrtsysteme. Dabei können die im Vorhaben entwickelten Steuerungs- und Überwachungstechnologien sowohl für Brennstoffzellensysteme als auch für andere elektrische Energieerzeugungs- und Energieverteilungssysteme genutzt werden.
Von besonderer Bedeutung sind die erarbeiteten Zulassungskonzepte und die nachgewiesene Anwendbarkeit modellbasierter Entwicklungsverfahren für sicherheitskritische Luftfahrtsysteme. Die Ergebnisse bilden eine wertvolle Grundlage für nachfolgende Forschungs- und Entwicklungsprojekte, bei denen die im Vorhaben begonnene Technologieentwicklung bis hin zu flugfähigen und zulassungsfähigen Anwendungen weitergeführt werden kann. Die gewonnenen Erkenntnisse reduzieren technische Risiken und beschleunigen zukünftige Entwicklungsprogramme im Bereich elektrifizierter Luftfahrtsysteme.

© Copyright by Diehl Aerospace GmbH
Dieses Dokument ist Eigentum der Diehl Aerospace GmbH. Eine Nutzung des Dokuments ist nur in unveränderter Form und unter Nennung der Diehl Aerospace GmbH statthaft.
This document is property of Diehl Aerospace GmbH. Use of this document is only permitted without changes and with referencing Diehl Aerospace GmbH.

Insgesamt erwartet die Diehl Aerospace GmbH, dass die im Vorhaben SKAiB erzielten Ergebnisse langfristig zur Erweiterung ihrer Systemkompetenz im Bereich elektrischer Luftfahrtantriebe beitragen. Gleichzeitig stärken sie die Wettbewerbsfähigkeit des Unternehmens bei zukünftigen Luftfahrtprogrammen und unterstützen den Aufbau neuer Geschäftsmöglichkeiten im Umfeld nachhaltiger und emissionsarmer Luftfahrtsysteme

2.5 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts bei anderen Stellen

Während der Arbeiten im Verbundvorhaben SKAiB sind keine Erkenntnisse bzgl. Fortschritten bei anderen Stellen bezogen auf die Zielsetzung der DAs, die Steuerung des Gesamtkühlsystems mittels Avionik Komponenten zur realisieren, bekanntgeworden.

2.6 Veröffentlichung der Ergebnisse

- Keine Publikationen.
- Keine Erfindungen, Schutzrechtsanmeldungen und erteilte Schutzrechte

© Copyright by Diehl Aerospace GmbH
Dieses Dokument ist Eigentum der Diehl Aerospace GmbH. Eine Nutzung des Dokuments ist nur in unveränderter Form und unter Nennung der Diehl Aerospace GmbH statthaft.
This document is property of Diehl Aerospace GmbH. Use of this document is only permitted without changes and with referencing Diehl Aerospace GmbH.