GE Export Control - Not Listed. This Item is not listed against the EC regulations in the GE. - Airbus Proprietary -
© Copyright Airbus (Airbus Defence and Space GmbH 2025) / ZETeBS-ADS Schlussbericht

Schlussbericht

des Fördervorhabens

LuFo VI-3 ZETeBS-ADS

Zero Emission Testinfrastruktur für BrennstoffzellenSysteme bei Airbus Defence and Space

Zuwendungsempfänger:	Airbus Defence and Space GmbH
Förderkennzeichen:	20M2243B
Laufzeit des Vorhabens:	01.01.2025 – 30.04.2025 (4 Monate)
Erstellungsdatum:	17.11.2025
Ref.-Nr.:	CT2511344
Berichterstatter	
Contract Manager:	Erhan Akcakoca
Technischer Projektleiter:	Peter Rostek

Ansprechpartner: Erhan AKCAKOCA

Mail: Erhan.Akcakoca@airbus.com

Gefördert durch:

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Schlussbericht des Fördervorhabens

ZETeBS-ADS

Zero Emission Testinfrastruktur für BrennstoffzellenSysteme bei Airbus Defence and Space

ZE: Airbus Defence and Space GmbH Willy-Messerschmitt-Straße 1 82024 Taufkirchen	Förderkennzeichen: 20M2243B
Vorhabensbezeichnung: ZETeBS-ADS - Zero Emission Testinfrastruktur für BrennstoffzellenSysteme bei Airbus Defence and Space	
Laufzeit des Vorhabens: 01.01.2025 – 30.04.2025	
Berichterstatter: Erhan AKCAKOCA (Business Manager R&T Contracts) Peter ROSTEK (R&T Technischer Projektleiter)	

Das diesem Schlussbericht zugrundeliegende Forschungsvorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWE) unter dem Förderkennzeichen 20M2243B gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Berichterstatter. Die Form des Berichtes entspricht den Nebenbestimmungen für Zuwendungen auf Kostenbasis des Bundesministers für Wirtschaft und Energie an Unternehmen der gewerblichen Wirtschaft für Forschungs- und Entwicklungsvorhaben (NKBF98)..

Wir danken dem Projektträger für die vertrauensvolle Zusammenarbeit. Hervorheben möchten wir die stets angenehme und engagierte Kooperation.

GE_EC_NotListed - Airbus Proprietary -
© Copyright Airbus (Airbus Defence and Space GmbH 2025) / ZETeBS-ADS Schlussbericht - ref. ADNS CT2511344

Inhaltsverzeichnis

1 Kurze Darstellung zur Aufgabenstellung 5
Einführung 5
Technische Ziele des Vorhabens 6
Wichtigstes förderpolitisches Ziel 6
2 Kurze Darstellung der Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde 8
3 Kurze Darstellung zur Planung und zum Ablauf des Vorhabens 9
3.1 Projektstrukturplan 9
3.2 Meilensteinplanung 12
Projektänderungen 13
4 Kurze Darstellung des wissenschaftlichen und technischen Standes, an den angeknüpft wurde 14
4.1 Stand der Wissenschaft und Technik 14
4.2 Bisherige Arbeiten des Antragstellers 14
4.3 Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden 17
4.4 Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste 17
5 Kurze Darstellung der Zusammenarbeit mit anderen Stellen 21
6 Eingehende Darstellung der erzielten Ergebnisse 22
6.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele 23
HAP 1 Teststand Verifikation Gesamtsystem 23
AP 1.1 Anforderungen Gesamtsystem 23
Zu AP 1.1.1 (Anforderungen) 24
Zu AP 1.1.2 (Architektur) 24
AP 1.2 Basisfunktionen 27
AP 1.3 Subsystem 27
AP 1.4 Bewertung Basis und Prozesseffizienz Gesamtsystem 27
HAP 4 Sensorik für Testüberwachung 31
AP 4.1 Anforderungen 31
AP 4.2 Sensorvermessung 35
AP 4.3 Datenakquise und Signalverarbeitung 39
AP 4.4 Sensoranpassung 39

GE_EC_NotListed - Airbus Proprietary -
© Copyright Airbus (Airbus Defence and Space GmbH 2025) / ZETeBS-ADS Schlussbericht - ref. ADNS CT2511344

Zusammenfassung 40
Themenschwerpunkt 1: Entwicklung der stationären Testanlage 40
Themenschwerpunkt 2: Entwicklung der Gassensorik 41
Gesamtfazit und Status 41
Fazit 42
7 Veröffentlichungen 43
7.1 Sonstige Veröffentlichungen 43
7.2 Diplomarbeiten/Studienarbeiten 43
7.3 Erfindungsmeldungen 43
8 Abbildungsverzeichnis 44

GE_EC_NotListed - Airbus Proprietary -
© Copyright Airbus (Airbus Defence and Space GmbH 2025) / ZETeBS-ADS Schlussbericht - ref. ADNS CT2511344

1 Kurze Darstellung zur Aufgabenstellung

Einführung

Eines der langfristigen Ziele von Airbus ist die Klimaneutralität der Luftfahrt, aus politischen, ökonomischen und ökologischen Gründen. Um dieses Ziel zu erreichen, werden neue Antriebssysteme und neue Flugzeugkonfigurationen benötigt. Eine vielversprechende Alternative für neuartige Antriebssysteme großer Verkehrsflugzeuge basiert auf Wasserstoff als Energieträger, Brennstoffzellen-Systemen zur Energiewandlung und elektrischen Maschinen innerhalb einer elektrischen Antriebskette. Zentrales Ziel des Programmaufrufs LuFo VI-3 ist die signifikante Reduzierung von Klimawirkungen der Luftfahrt. Der Beitrag des Vorhabens LuFo VI-3 ZETeBS-ADS zu diesem Ziel ist die Bereitstellung bzw. der Betrieb einer repräsentativen Entwicklungsumgebung zur Erforschung alternativer klimaneutraler Antriebssysteme. In Brennstoffzellen basierenden Antriebssystemen wird - im Vergleich zu konventionellen Antriebssystemen - Kerosin als Energieträger durch Wasserstoff ersetzt. Der Wasserstoff wird in einem Tank in flüssigem Aggregatzustand gespeichert und dann entweder in Gasgeneratoren (als flüssiger Brennstoff einer warmen Verbrennung) oder in Brennstoffzellen (als gasförmiger Brennstoff einer kalten Verbrennung) verbraucht. Da Wasserstoff keinen Kohlenstoff enthält, können beide Verbrennungsprozesse keine kohlenstoffhaltigen Schadstoffe wie Kohlenstoffmonoxid (CO), Kohlenstoffdioxid (CO2) und Kohlenwasserstoffe (CH) emittieren. Die einzigen Schadstoffe, die in größeren Konzentrationen im Abgas von Gasgeneratoren enthalten sein werden, sind Stickstoffoxide (NOx). Bei der Brennstoffzellenreaktion entsteht Wasserdampf, der in großen Flughöhen verstärkt zu Kondensstreifen führen kann.

GE_EC_NotListed - Airbus Proprietary -
© Copyright Airbus (Airbus Defence and Space GmbH 2025) / ZETeBS-ADS Schlussbericht - ref. ADNS CT2511344

Technische Ziele des Vorhabens

Die erwartete Zunahme in der Nachfrage nach Transportleistung wird zukünftig nur durch effizientere und klimafreundliche Lufttransportsysteme bedient werden können. Maßnahmen zur Reduzierung der Umweltwirkungen zielen daher auf eine signifikante Reduzierung der CO2-Emissionen aus fossilen Quellen, aber auch der Nicht-CO2-Effekte bis hin zum Zero Emission Aircraft ab. Als möglicher Weg hin zu einer emissionsneutralen Luftfahrt wird eine (Teil-)Elektrifizierung des Antriebsstrangs durch die Entwicklung eines Brennstoffzellensystems für den emissionsfreien Antrieb von Luftfahrzeugen vorangetrieben. Die Validierung von neuen Systemen für den Einsatz in der Luftfahrt erfordert jedoch hohe Aufwände zum Nachweis der geforderten Zuverlässigkeit, Funktionalität und Kontinuität der Daten. Im HAP1 von ZETeBS soll daher eine repräsentative Entwicklungsumgebung auf Brennstoffzellen - Systemebenen entwickelt und für die Eignung zur Nachweisführung bis zur experimentellen Flugzulassung validiert werden. Wesentliche Herausforderungen, wie z.B. die hohe Leistungsklasse, Komplexität und Varianz der Systeme, genutzte Medien sowie die hohe Anzahl von Systemparametern und Sicherheitsaspekte, müssen dafür berücksichtigt werden. Dafür sollen im Vorhaben Testkonzepte für unterschiedliche Leistungsbereiche von Brennstoffzellensystemen entwickelt und anhand repräsentativer Systemkonfigurationen validiert werden. Im HAP4 des Vorhabens ZETeBS wird kritische Sensorik zur Überwachung der Systeme und Medienführung für den Einsatz in verschiedenen Konfigurationen ebenfalls adressiert. Dafür notwendige Entwicklungsumgebungen werden bei diesem Vorhaben entsprechend der Testanforderungen entwickelt, um den Beitrag zu einer beschleunigten Entwicklung emissionsfreier Antriebstechnologien für die angestrebte Verwertung in einem ZEROemission Flugzeugprogramm ab 2040, zu sichern.

Wichtigstes förderpolitisches Ziel

Das Fördervorhaben ZETeBS leistet einen wesentlichen Beitrag zum förderpolitischen Ziel 1, umweltfreundliche Luftfahrt, da dessen Ergebnisse und Entwicklungen die sowohl

GE_EC_NotListed - Airbus Proprietary -
© Copyright Airbus (Airbus Defence and Space GmbH 2025) / ZETeBS-ADS Schlussbericht - ref. ADNS CT2511344

technische und ökologische als auch wirtschaftliche Umsetzung eines klimafreundlichen Wasserstoff-Flugzeugs ermöglichen sollen.
Airbus hat sich dazu bekannt, ab 2040 ein emissionsfreies ziviles Flugzeug auf den Markt zu bringen,um die im FlightPath 2050 formulierten Umweltschutzziele für die globale Luftfahrt signifikant zu unterstützen. Ein verfolgter Lösungsweg ist die Nutzung von erneuerbarem Wasserstoff mittels eines Brennstoffzellensystems für die Realisierung eines Flugzeug-Hauptantriebes, welches von Airbus und seine Partnern für eine erste Anwendung in Flugzeugen der Regionalklasse vorantreiben wird. Die Hochskalierung des Systems zu neuen Leistungsklassen und der Erhöhung der funktionalen Systemreife ist die Basis, um einen Wasserstoff-Brennstoffzellen-Antriebsstrang zu realisieren. Durch die Erzeugung von Antriebsleistung mit einem Brennstoffzellensystem wird ein schadstofffreier Antrieb möglich, der in bisherunerreichte Leistungsdichten und Energieeffizienzbereiche vordringt. Dafür ist eine Systemsicherheit notwendig, die heutigen existierenden kohlenwasserstoffbasierten Antriebssystemen in allen Belangen gleichwertig ist und damit die Markteintrittsbarrieren senkt. Die Entwicklungsziele des Vorhabens tragen in erheblichem Maße dazu bei, Brennstoffzellensysteme für die flugtaugliche Nutzung im Antriebsstrang von Verkehrsflugzeugen bis zu 1.2MW Gesamt Systemleistung zu validieren. Die damit verbundene Verkürzung der Entwicklungszeit ermöglicht eine frühzeitige Produkteinführung und trägt somit zu dem förderpolitischen Ziel, der Erreichung einer umweltfreundlichen Luftfahrt, bei.

GE_EC_NotListed - Airbus Proprietary -
© Copyright Airbus (Airbus Defence and Space GmbH 2025) / ZETeBS-ADS Schlussbericht - ref. ADNS CT2511344

2 Kurze Darstellung der Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Die Forschungs- und Technologie-Themen dieses Vorhabens sind Teil der strategischen, innerhalb des Airbus Konzerns abgestimmten R&T-Roadmap. Abhängig von den Projektinhalten und den Umsetzungszeiträumen wurden sie für dieses Projekt zusammengestellt.

Das Fördervorhaben wurde mit der Beteiligung anderer Partner durchgeführt. Die Federführung lag bei der Airbus Operations GmbH. Die Entwicklung eines Brennstoffzellen-Systems ist ein zwingend notwendiger Bestandteil eines wasserstoffbetriebenen Flugzeugs und Kernkompetenz von Airbus. Eine sinnvolle und termingerechte Bearbeitung der Aufgaben war jederzeit möglich

GE_EC_NotListed - Airbus Proprietary -
© Copyright Airbus (Airbus Defence and Space GmbH 2025) / ZETeBS-ADS Schlussbericht - ref. ADNS CT2511344

3 Kurze Darstellung zur Planung und zum Ablauf des Vorhabens

3.1 Projektstrukturplan

Wie in Abbildung 1 dargestellt, gliedert sich das Verbundvorhaben ZETeBS in 4 Hauptarbeitspakete (HAP) mit 16 Arbeitspaketen (AP) auf. Die Aktivitäten des Fördervorhabens ZETeBS-ADS wurden innerhalb von HAP1 (“Teststand Verifikation Gesamtsystem”) und HAP4 (“Sensorik für Testüberwachung”) in 8 Arbeitspaketen geplant (innerhalb von HAP3 (“Vernetzte Prüfstände”) waren lediglich beratende Tätigkeiten für die Konsortialpartner vorgesehen). Aufgrund des vorzeitigen Stopps des Fördervorhabens nach bereits 4 Monaten fanden die Aktivitäten lediglich in folgenden 4 Arbeitspaketen statt:

- HAP1 / AP1.1 - Anforderungen Gesamtsystem
- HAP1 / AP1.4 - Bewertung Basis und Prozesseffizienz Gesamtsystem
- HAP4 / AP4.1 - Anforderungen
- HAP4 / AP4.2 - Sensorvermessung

Um den zeitlichen Verzug des Projektverlaufs zu kompensieren, der sich aus dem verspäteten Erhalt des Zuwendungsbescheids ergeben hat, wurden einige Materialbestellungen für sogenannte Long-Lead-Time-Items früher eingeleitet als laut ursprünglicher Planung vorgesehen:

- HAP1 / AP1.2
    - Komponenten des Sicherheitssystems
    - Komponenten des Mess- und Regelungssystems
- HAP1 / AP1.3

GE_EC_NotListed - Airbus Proprietary -
© Copyright Airbus (Airbus Defence and Space GmbH 2025) / ZETeBS-ADS Schlussbericht - ref. ADNS CT2511344

- Elektrische Komponenten für den Leistungsemulator, die Schaltanlage und die Schaltmatrix
- Anlage zur Wasserstoffversorgung, Sauerstoffversorgung, Inertgasversorgung und Kühlmittelversorgung von Brennstoffzellen
- Anlage zur Integration eines wasserstoff-hybriden Verteilungssystems
- Lastmaschine und Maschinensteuerung zur Emulation von aerodynamischen Lasten
- Anlage zur Wasserstoffbefüllung von kryogenen Flüssigwasserstofftanks (inkl. Flüssigwasserstoff)
- Anlage zur sicheren Lagerung und zum sicheren Betrieb von Li-Ionen-Batteriesystemen
- Prüf- und Hintergrundgase (inkl. Sensorik)

Die entsprechenden Materialkosten können der Materialkostenabrechnung des Fördervorhabens entnommen werden.

GE_EC_NotListed - Airbus Proprietary -
© Copyright Airbus (Airbus Defence and Space GmbH 2025) / ZETeBS-ADS Schlussbericht - ref. ADNS CT2511344

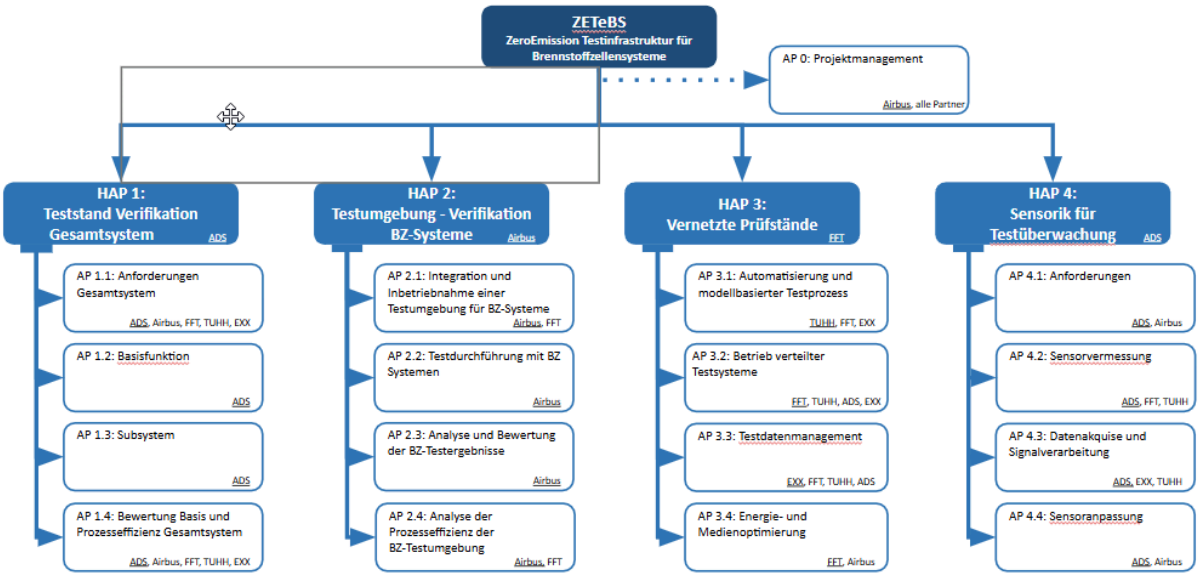

Abbildung 1: Projektstrukturplan ZETeBS

GE_EC_NotListed - Airbus Proprietary -
© Copyright Airbus (Airbus Defence and Space GmbH 2025) / ZETeBS-ADS Schlussbericht - ref. ADNS CT2511344

3.2 Meilensteinplanung

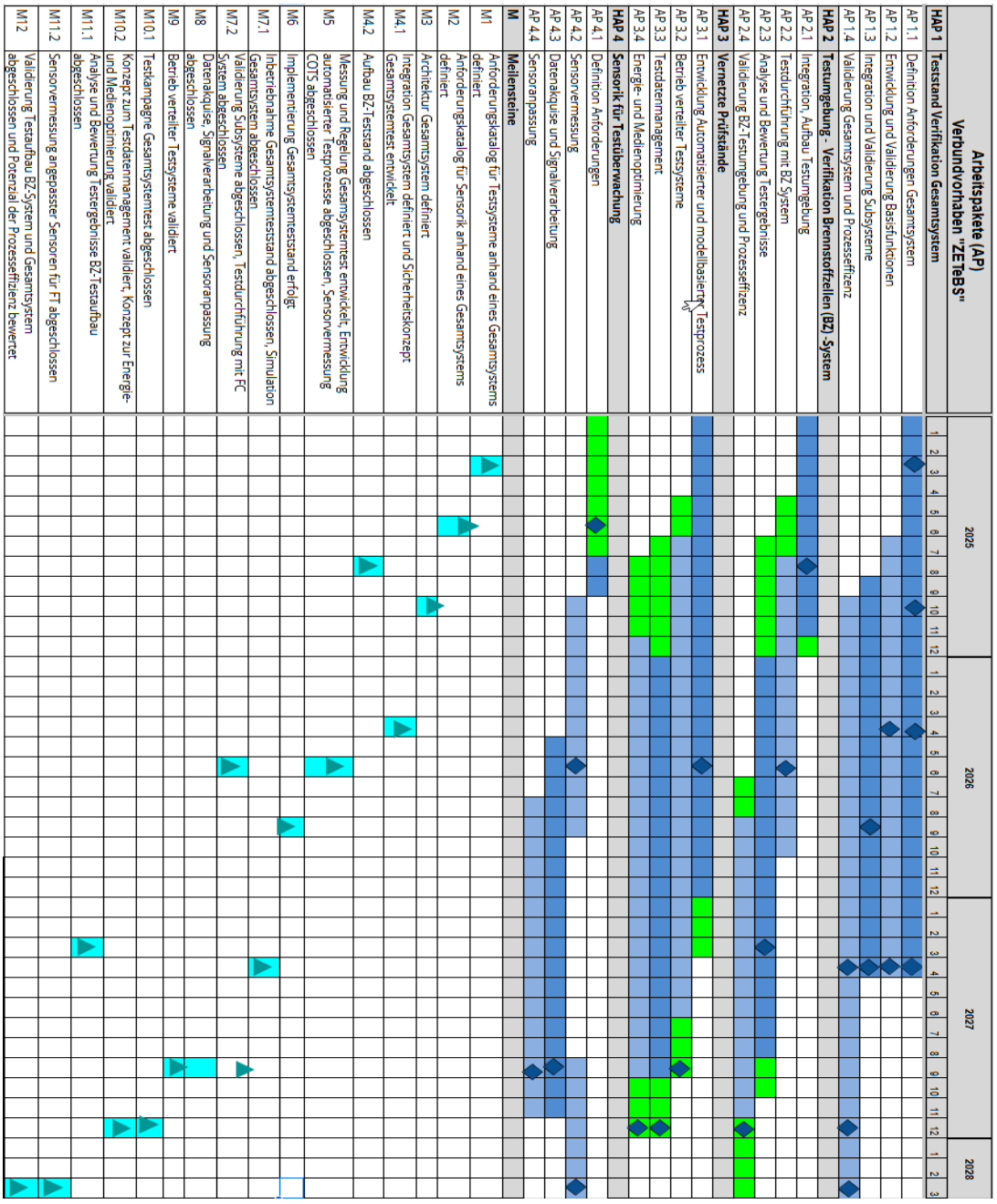

Abbildung 2: Projektzeitplan

GE_EC_NotListed - Airbus Proprietary -
© Copyright Airbus (Airbus Defence and Space GmbH 2025) / ZETeBS-ADS Schlussbericht - ref. ADNS CT2511344

Der zeitliche Ablauf und die Meilensteine (siehe Abbildung 2) sowie die Lieferungen des Fördervorhabens ZETeBS-ADS orientierten sich an den Hauptmeilensteinen. Die geplante Laufzeit des Vorhabens betrug drei Jahre und 3 Monate. Das Vorhaben startete am 01. Januar 2025, geplantes Vorhabenende war der 31. März 2028.

Projektänderungen

Aufgrund der sehr verspäteten Bewilligung des Fördervorhaben war es gleich zu Beginn des Vorhabens notwendig, die gesamte Meilensteinplanung zu überarbeiten. Dies fand in einem gemeinsamen Workshop Ende Januar 2025 zwischen allen Partnern statt und führte zum neuen Projektzeitplan (siehe Abbildung 2).

Nach der Verkündung durch Airbus, einen potenziellen Markteintritt des emissionsfreien zivilen Flugzeuges ab 2040 zu realisieren, sprach der Fördergeber einen Stopp des Vorhabens zum 30. April 2025 aus, wodurch die tatsächliche Laufzeit lediglich 4 Monate betrug.

GE_EC_NotListed - Airbus Proprietary -
© Copyright Airbus (Airbus Defence and Space GmbH 2025) / ZETeBS-ADS Schlussbericht - ref. ADNS CT2511344

4 Kurze Darstellung des wissenschaftlichen und technischen Standes, an den angeknüpft wurde

4.1 Stand der Wissenschaft und Technik

Eine Analyse der Patentsituation hat ergeben, dass der weitaus überwiegende Teil an Patenten zum Thema Brennstoffzellen Systemen mit direktem Bezug zu mobilen Anwendungen in der Automobil- und Logistikindustrie erstellt wurde. Patente mit direktem Bezug zu mobilen Anwendungen in der Luftfahrt beschränken sich weitestgehend auf kleinere Systeme zur lokalen Energieerzeugung. Patente mit direktem Bezug zu einem Hauptbetriebssystem in der hohen Leistungsklasse für Luftfahrzeuge inkl. der Energiespeicherung sind kaum auffindbar und decken in den meisten Fällen Brennstoffzellensystemarchitekturen ab. Eines der Patente mit dem Schwerpunkt Brennstoffzellensystem für die Luftfahrt zur Reduzierung der Emissionen wurde von der Airbus Operations GmbH eingereicht (US7208239B2). Zum expliziten Thema “Repräsentative Entwicklung von wasserstoff-hybriden Antriebssystemen von potentiellen zukünftigen Kurz-, Mittelstrecken-Flugzeugen mit Brennstoffzellen, Elektromaschinen und flüssigem Wasserstoff als Energiespeicher" konnten bislang keinerlei Patente ausfindig gemacht werden.

4.2 Bisherige Arbeiten des Antragstellers

Die Airbus Defence and Space GmbH verfügt über langjährige Erfahrungen in der Entwicklung von experimentellen Entwicklungsumgebungen für zukünftige Antriebssysteme der kommerziellen Luftfahrt. Zwischen 2010 und 2015 wurden die Antriebssysteme der Flugdemonstratoren CriCri, E-Fan 1.0 und E-Fan 1.1 mitentwickelt und am Boden vorgetestet. Zwischen 2015 und 2020 wurden weiterhin die Antriebssysteme der Flugdemonstratoren E-Fan X und CityAirbus Alpha mitentwickelt und am Boden vorgetestet. Seit 2020 ist der Standort Taufkirchen das konzernweite Kompetenzzentrum zur

GE_EC_NotListed - Airbus Proprietary -
© Copyright Airbus (Airbus Defence and Space GmbH 2025) / ZETeBS-ADS Schlussbericht - ref. ADNS CT2511344

experimentellen Entwicklung von emissionsfreien Antriebssystemen von Airbus. Die Kernkompetenzen sind Architektur, Integration, Validierung und Verifikation auf Gesamtsystemebene. Das Portfolio erstreckt sich von ersten Komponententests über erweiterte Subsystemtests bis hin zu integrierten Systemtests für voll-elektrische, hybrid-elektrische und wasserstoff-hybride Antriebsarchitekturen. Darüber hinaus wurde im Rahmen verschiedener Forschungsprojekte fundiertes Wissen über kryogene und supraleitende Systeme erarbeitet.

Da zum ordnungsgemäßen Betrieb der Brennstoffzelle auch Sensorik zur Detektion von Wasserstoff in der Gasphase benötigt wird, bestehen Synergien zum LuFo VI.3 Forschungsvorhaben HySEat, welches sich mit optimierten Sensorsystemen für die Überwachung des Verteilsystems und des Vorratsbehälters im Luftfahrzeug beschäftigt. Das gesamte Antriebssystem, ob als Brennstoffzelle oder als Direktverbrennung ausgelegt, muss hinsichtlich der Sicherheit der Flugzeugkabine auf H2-Leckage überwacht werden. Die Leckagedetektion und die Detektion von Wasserstoff in der Umgebung der BZ werden nicht innerhalb des Projektes ZETeBS abgedeckt. ZETeBS liefert aber Informationen zum Betriebszustand der Brennstoffzellen und deren Umgebungsbedingungen im Flug, die auch für das Vorhaben HySEat zutreffen. ZETeBS beschäftigt sich mit der Sensorik, die zum Betrieb der Brennstoffzellen notwendig sind. Dies umfasst insbesondere Luftqualitätssensorik in der Zuluft und Abluft der Brennstoffzelle, sowie die Messung der relativen Luftfeuchte. Zielgase der Luftqualitätsanalyse innerhalb von ZETeBS sind u.a. CO, CO2 , VOCs, NOx , H2S, SO2 , NH3 und Ozon.

Im Rahmen des Fördervorhabens LuFo-VI1 GAR-ELAn wurden wichtige wissenschaftliche Grundlagen für wasserstoff-hybride und kryogen-supraleitende Antriebssysteme entwickelt:

1. Wasserstoff-hybride Antriebssysteme
    - Demonstration eines Brennstoffzellen-Subsystems als Gleichstromquelle (1,2 MW, 1200 V, 1000 A)

GE_EC_NotListed - Airbus Proprietary -
© Copyright Airbus (Airbus Defence and Space GmbH 2025) / ZETeBS-ADS Schlussbericht - ref. ADNS CT2511344

    - LT-PEMFCs (Niedertemperatur-PEM-Brennstoffzellen) mit gasförmigem Wasserstoff und Umgebungsluft als Reaktionsgase
    - Sechs Brennstoffzellen-Halbkanäle zu je 200 kW
- Demonstration eines Subsystems zur Hochvolt-Gleichstrom-Verteilung (HVDC)
    - Drei Brennstoffzellen-Leistungsverteilzentren
    - Drei 1-Phasen-Gleichstrom-Verteilnetze
- Demonstration einer elektrischen Antriebseinheit (1,2 MW bei 1600 U/min)
    - Drei redundante Untereinheiten mit Elektromotor und Motorsteuerung
    - Ein Leistungsgetriebe (Sammelgetriebe) mit drei Eingangswellen und einer Ausgangswelle
- Emulation aerodynamischer Propellerlasten (7200 Nm)
- Emulation eines Kühlsystems zur Kompensation der Wärmelasten aus dem Brennstoffzellen-Subsystem

2. Kryogen-supraleitende Antriebssysteme
    - Emulation einer Gleichstromquelle (0,9 MW, 300 V, 3000 A)
    - Demonstration eines Kurzschlussstrombegrenzers / elektrischen Leistungsschalters
    - Demonstration eines kryogenen / supraleitenden Energieverteilungs-Subsystems
        - Ein 1-Phasen-Gleichstromkabel mit Kryostat (supraleitend)
        - Ein 1-Phasen-Gleichstrom- zu 3-Phasen-Wechselstrom-Wechselrichter mit Isoliergehäuse (kryogen)
        - Ein 3-Phasen-Wechselstromkabel mit Kryostat (supraleitend)
    - Demonstration eines teilsupraleitenden Elektromotors (500 kW bei 5000 U/min => 1700 A)
        - Supraleitender Innenstator
        - Konventioneller Außenläufer (Rotor)

GE_EC_NotListed - Airbus Proprietary -
© Copyright Airbus (Airbus Defence and Space GmbH 2025) / ZETeBS-ADS Schlussbericht - ref. ADNS CT2511344

- Emulation aerodynamischer Propellerlasten (1000 Nm)
- Demonstration eines kryogenen Kühlsystems auf Basis von flüssigem Stickstoff (-200 °C)

Die gesammelten Erkenntnisse für wasserstoff-hybride Antriebssysteme bilden den Startpunkt für die weiteren Arbeiten im Rahmen von LuFo-VI3 ZETeBS.

4.3 Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden

Es waren keinerlei Schutzrechte und Schutzrechtsanmeldungen bekannt, die dem Vorhaben hätten im Wege stehen können.

4.4 Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste

1. Vorschriften für Elektrofachkräfte und sicherer Betrieb von elektrischen Anlagen

➢ Fachliteratur:
- DIN VDE 0105-100: Betrieb von elektrischen Anlagen (VDE-Norm)
- DIN EN 50110-1: Betrieb von elektrischen Anlagen (europäische Norm)
- „Handbuch für Elektrofachkräfte“ von Werner Hörmann, VDE Verlag
- „Elektrosicherheit in der Praxis“ von Gerd Bennewitz, Springer Vieweg

➢ Informationsdienste:
- VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. (www.vde.com)
- DGUV Regel 103-011: Einsatz von Elektrofachkräften

➢ Dokumentationsdienste:
- Beuth Verlag (www.beuth.de) – Normen und Vorschriften

GE_EC_NotListed - Airbus Proprietary -
© Copyright Airbus (Airbus Defence and Space GmbH 2025) / ZETeBS-ADS Schlussbericht - ref. ADNS CT2511344

- Fachzeitschrift de – Der Elektro- und Gebäudetechniker (HUSS-MEDIEN GmbH)

2. Sicherer Betrieb von Anlagen mit gasförmigem Stickstoff und Wasserstoff

➢ Fachliteratur:
- DVGW G 409: Technische Regeln für Gase – Wasserstoff
- „Hydrogen Safety Handbook“ von John W. Newbury, CRC Press
- „Sicherheitskonzepte für den Umgang mit Wasserstoff“ von Michael Ball und Martin Wietschel, Springer

➢ Informationsdienste:
- Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches (DVGW) (www.dvgw.de)
- European Hydrogen Safety Panel (www.fch.europa.eu).

➢ Dokumentationsdienste:
- Fachzeitschrift gwt Wasserstoff-Technik (Springer Vieweg)
- Forschungsplattform H2 Safety (www.h2safe.info)

3. Prüfstände für elektrische Antriebe

➢ Fachliteratur:
- „Prüfstände für elektrische Antriebe“ von Friedrich Sick und Bernd Kilian, Springer Vieweg
- „Electrical Drives – Fundamentals and Applications“ von Dimitri B. Kazakoff, McGraw Hill

➢ Informationsdienste:
- Forschungsvereinigung Antriebstechnik (FVA) (www.fva-net.de)
- Elektrische Antriebstechnik bei IEE Explore (ieeexplore.ieee.org)

➢ Dokumentationsdienste:
- Fachzeitschrift etz Elektrotechnik & Automation (Hüthig Verlag)
- Kataloge von Prüfstandherstellern wie AVL, ZwickRoell, oder Siemens

4. Test von Batteriesystemen

➢ Fachliteratur:
- „Handbuch Lithium-Ionen-Batterien“ herausgegeben von D. Uwe Sauer, Springer Vieweg
- „Testing and Evaluation of Battery Systems“ von Michael Pecht, CRC Press

GE_EC_NotListed - Airbus Proprietary -
© Copyright Airbus (Airbus Defence and Space GmbH 2025) / ZETeBS-ADS Schlussbericht - ref. ADNS CT2511344

- ➢ Informationsdienste:
  - ○ Battery Safety Organization (www.battery-safety.org)
  - ○ Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (www.isi.fraunhofer.de)
- ➢ Dokumentationsdienste:
  - ○ Fachzeitschrift Batterien und Energie (Springer)
  - ○ Normensammlung im Bereich Batteriesicherheit (DIN EN 62660-1/2)

5. Test von Brennstoffzellen

- ➢ Fachliteratur:
  - ○ „Handbook of Fuel Cells“ von Wolf Vielstich, Wiley
  - ○ „Brennstoffzellen – Systeme und Anwendungen“ von Detlef Stolten, Springer
- ➢ Informationsdienste:
  - ○ Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Technische Thermodynamik (www.dlr.de)
  - ○ Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (www.fch.europa.eu)
- ➢ Dokumentationsdienste:
  - ○ Fachzeitschrift H2 International (WHEC Publications)
  - ○ Datenbanken zu Brennstoffzellen (z.B. NREL Hydrogen and Fuel Cells Database)

6. Test von Elektromotoren

- ➢ Fachliteratur:
  - ○ „Elektrische Maschinen und Antriebe: Grundlagen und Anwendungen“ von Andreas Binder, Springer Vieweg
  - ○ „Electrical Motor Testing: Principles and Applications“ von Samarjit Ghosh, CRC Press
- ➢ Informationsdienste:
  - ○ IEEE Motor Testing Standards (ieeexplore.ieee.org)
  - ○ Organisation für elektrische Antriebe und Maschinen (www.drivesystems.org)
- ➢ Dokumentationsdienste:
  - ○ International Journal of Electric Power Systems Research (Elsevier)
  - ○ Teststandanbieter wie AMETEK, Kistler

GE_EC_NotListed - Airbus Proprietary -
© Copyright Airbus (Airbus Defence and Space GmbH 2025) / ZETeBS-ADS Schlussbericht - ref. ADNS CT2511344

7. Test von Supraleitern

- ➢ Fachliteratur:
  - „High-Temperature Superconductors“ von David A. Cardwell, Wiley
  - „Superconductivity: A Very Short Introduction“ von Stephen J. Blundell, Oxford University Press
- ➢ Informationsdienste:
  - European Society for Applied Superconductivity (www.esas.org)
  - Institut für Technische Physik, KIT (www.kit.edu)
- ➢ Dokumentationsdienste:
  - Fachzeitschrift Superconductor Science and Technology (IOP Publishing)
  - Konferenzberichte (z.B. EUCAS, ASC)

8. Mess- und Regelungstechnik

- ➢ Fachliteratur:
  - „Regelungstechnik: Grundlagen und Praxis“ von Wolfgang Altmann, Springer
  - „Mess- und Regelungstechnik“ von Heinz Unbehauen, Oldenbourg Wissenschaftsverlag
- ➢ Informationsdienste:
  - Deutsche Gesellschaft für Mess- und Automatisierungstechnik (www.gma.vdi.de)
  - International Society of Automation (www.isa.org)
- ➢ Dokumentationsdienste:
  - Fachzeitschrift Technische Messungen (Springer Vieweg)
  - Normenplattformen wie IEC (www.iec.ch)

GE_EC_NotListed - Airbus Proprietary -
© Copyright Airbus (Airbus Defence and Space GmbH 2025) / ZETeBS-ADS Schlussbericht - ref. ADNS CT2511344

5 Kurze Darstellung der Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Während der Laufzeit des Vorhabens hat die Airbus Defence and Space GmbH mit folgenden anderen Stellen zusammengearbeitet:

- Airbus Operations GmbH Hamburg
- FFT Produktionssysteme GmbH Co. KG
- ExxpertSystems GmbH
- Technische Universität Hamburg

Als Projektpartner war die Airbus Defence and Space GmbH dabei für die Hauptarbeitspakete 1 und 4 verantwortlich, welche in weitere Arbeitspakete unterteilt wurden:

- HAP1
  - AP1 - Gesamtsystem
  - AP2 - Basisfunktionen
  - AP3 - Subsysteme
  - AP4 - Bewertung
- HAP4
  - AP1 - Anforderungen
  - AP2 - Sensor Charakterisierung & anwendungsnaher Test
  - AP3 - Datenakquise & Signalverarbeitung
  - AP4 - Optimierung Sensorfunktionalität HW / SW

GE_EC_NotListed - Airbus Proprietary -
© Copyright Airbus (Airbus Defence and Space GmbH 2025) / ZETeBS-ADS Schlussbericht - ref. ADNS CT2511344

6 Eingehende Darstellung der erzielten Ergebnisse

Im Zusammenhang mit der Entwicklung von emissionsfreien Antriebssystemen für zukünftige Verkehrsflugzeuge hatte das Vorhaben LuFo-VI3 ZETeBS-ADS zwei Themenschwerpunkte

1. Die Entwicklung einer stationären Testanlage zur experimentellen Erforschung von wasserstoff-hybriden Antriebssystemen für zukünftige Verkehrsflugzeuge.
2. Die Entwicklung von Gassensoren für eine stationäre Testanlage zur experimentellen Erforschung von wasserstoff-hybriden Antriebssystemen für zukünftige Verkehrsflugzeuge.

Beim ersten Themenschwerpunkt wurde der Fokus gelegt auf

- Gesamtsystem - Anforderungen
- Gesamtsystem - Architektur
- Bewertung - Simulation

Beim zweiten Themenschwerpunkt wurde der Fokus gelegt auf

- Sensorik für Testüberwachung - Anforderungen
- Sensorik für Testüberwachung - Sensor-Charakterisierung und anwendungsnaher Test

Die wissenschaftlich-technischen Ergebnisse des Vorhabens werden entlang der Projektstruktur in den folgenden Kapiteln zusammengefasst.

GE_EC_NotListed - Airbus Proprietary -
© Copyright Airbus (Airbus Defence and Space GmbH 2025) / ZETeBS-ADS Schlussbericht - ref. ADNS CT2511344

6.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

HAP 1 Teststand Verifikation Gesamtsystem

AP 1.1 Anforderungen Gesamtsystem

Dieses AP hatte folgende spezifischen Ziele:

- Analysiere die Anforderungen des System under Test
- Spezifiziere die Anforderungen der experimentellen Entwicklungsumgebung
- Definiere die Systemarchitektur der experimentellen Entwicklungsumgebung
- Berücksichtige eine Basis-Architektur und unterschiedliche Alternativ-Architekturen

1. Verwendung der Zuwendung im Rahmen dieses Arbeitspakets

Die in diesem Berichtszeitraum eingesetzten Ressourcen konzentrierten sich primär auf personelle Kapazitäten im Bereich Systems Engineering und Projektmanagement. Die Zuwendungen wurden spezifisch für folgende Bereiche verwendet:

- **Personalkosten:** Einsatz von Entwicklungsingenieuren für die Analyse des *System under Test* (SuT) und die Ableitung der Prüfstandsanforderungen sowie für die Architekturentwicklung.
- **Software-Lizenzen:** Beschaffung und Nutzung von Tools für das Requirements Engineering (z. B. IBM DOORS oder Jama) und für die modellbasierte Systemarchitektur (MBSE-Tools wie Cameo oder Enterprise Architect).
- **Externe Expertise:** Durchführung von Workshops mit den Entwicklern des Flugzeug-Antriebssystems zur Klärung der Schnittstellen-Spezifikationen.

2. Arbeitsschritte bei der Entwicklung

GE_EC_NotListed - Airbus Proprietary -
© Copyright Airbus (Airbus Defence and Space GmbH 2025) / ZETeBS-ADS Schlussbericht - ref. ADNS CT2511344

Die methodische Vorgehensweise orientierte sich strikt am V-Modell für komplexe technische Systeme. Die Entwicklung wurde in zwei logisch aufeinanderfolgende Arbeitspakete (AP) unterteilt:

Zu AP 1.1.1 (Anforderungen)

Der Prozess begann mit der **Analysephase**. Hierbei wurde die vorläufige Systemspezifikation des Flugzeugantriebs als Input genutzt. Der zentrale Arbeitsschritt war die „Übersetzung“ von Flugzeug-Lasten (z. B. Schubbedarf, Flughöhe) in stationäre Testparameter (z. B. Drehmoment an der Lastmaschine, Umgebungsdruck in der Klimakammer). Ziel war die Erreichung des **Meilensteins M1**.

Zu AP 1.1.2 (Architektur)

Aufbauend auf den Anforderungen folgte die **Synthesephase**. Hier wurde vom Groben ins Detail gearbeitet (Top-Down-Design). Zunächst wurde eine funktionale Basis-Architektur entworfen, gefolgt von der Ausarbeitung physischer Alternativ-Architekturen. Parallel dazu wurden die Konzepte für die Subsystemprüfstände (z. B. Brennstoffzelle, E-Motor) entwickelt. Ziel war die Erreichung des **Meilensteins M2**.

3. Durchgeführte Tätigkeiten

In der operativen Umsetzung wurden folgende spezifische Tätigkeiten durchgeführt:

Im Rahmen von AP 1.1.1 (Anforderungen):

- Detaillierte Sichtung der SuT-Systemspezifikation (Vorläufiges Design).
- Erstellung einer *Traceability-Matrix*, um sicherzustellen, dass jede Anforderung des Flugzeugantriebs durch eine entsprechende Test-Infrastruktur abgedeckt ist.
- Definition von Grenzwerten für die Medienversorgung (Wasserstoff-Masseströme, Kühlmitteltemperaturen, Spannungslevels).

GE_EC_NotListed - Airbus Proprietary -
© Copyright Airbus (Airbus Defence and Space GmbH 2025) / ZETeBS-ADS Schlussbericht - ref. ADNS CT2511344

- Klassifizierung der Anforderungen in „Muss-“, „Soll-“ und „Kann-Kriterien“ für die spätere Beschaffung.

Im Rahmen von AP 1.1.2 (Architektur):

- Modellierung des gesamten Prüfstandes als Blockschaltbild.
- Durchführung von Trade-off-Studien für kritische Subsysteme (z. B. Vergleich: Flüssigwasserstoff-Tank vs. gasförmige Hochdruckspeicherung vor Ort).
- Definition der Sicherheitsarchitektur, insbesondere Zonen-Einteilung für den Explosionsschutz (ATEX) im Umgang mit Wasserstoff.
- Erstellung erster Interface Control Documents (ICDs) zur Festlegung der mechanischen, elektrischen und thermischen Schnittstellen zwischen SuT und Testanlage.

4. Ergebnisse

Die Arbeiten führten zu konkreten, dokumentierten Ergebnissen, die als "Baseline" für die weitere Entwicklung dienen:

- **Anforderungskatalog System under Test (SuT):** Eine spezifizierte Liste der zu testenden Parameter des Antriebsstrangs (Leistungsprofile, thermisches Verhalten).
- **Anforderungskatalog Experimentelle Entwicklungsumgebung (EEU):** Das Lastenheft für den Bau der Testanlage. Es enthält genaue Vorgaben für die Gebäudeinfrastruktur, die Medienversorgung und die Messtechnik.
- **Systemarchitektur-Dokument:** Ein umfassender Plan der Gesamtanlage, inklusive:
    - Logische Architektur (Datenflüsse, Steuerungskonzepte).
    - Physische Architektur (Layout der Subsystemprüfstände, Verrohrungspläne P&ID Entwürfe).
- **Schnittstellen-Dokumentation:** Detaillierte Beschreibung aller physischen und logischen Übergabepunkte.

GE_EC_NotListed - Airbus Proprietary -
© Copyright Airbus (Airbus Defence and Space GmbH 2025) / ZETeBS-ADS Schlussbericht - ref. ADNS CT2511344

Diese Ergebnisse markieren den erfolgreichen Abschluss der Meilensteine **M1** (Anforderungs-Review) und **M2** (Architektur-Review).

5. Auswertung der Ergebnisse

Die Überprüfung der erarbeiteten Anforderungen und Architekturkonzepte ergab folgende Erkenntnisse:

1. **Vollständigkeit:** Der Anforderungskatalog deckt alle kritischen Betriebszustände des geplanten hybriden Antriebs ab. Lücken in der Spezifikation des SuT wurden identifiziert und als „To-Dos“ an das Flugzeug-Designteam zurückgemeldet.
2. **Machbarkeit:** Die gewählte Basis-Architektur ist technisch realisierbar. Die Analyse der Alternativ-Architekturen zeigte, dass eine modulare Container-Bauweise für die Leistungselektronik und Wasserstoffversorgung die höchste Flexibilität bei geringstem Risiko bietet.
3. **Skalierbarkeit:** Die Architektur wurde so ausgelegt, dass sie Reserven für zukünftige Leistungssteigerungen des Antriebssystems (Upgrades des SuT) bietet, ohne dass die fundamentale Infrastruktur der Testanlage geändert werden muss.

Fazit

Mit dem Abschluss der Arbeitspakete 1.1.1 und 1.1.2 wurde das theoretische Fundament für die stationäre Testanlage erfolgreich gelegt. Durch die saubere Trennung von SuT-Anforderungen und Prüfstandsanforderungen konnte eine klare Abgrenzung der Verantwortlichkeiten erreicht werden.

Die definierte Systemarchitektur ist robust genug, um in die nächste Phase (Detail Engineering und Beschaffung) überzugehen. Das Risiko von teuren Fehlplanungen in der Hardware-Phase wurde durch die ausführliche konzeptionelle Vorarbeit minimiert.

Nächster Schritt: Start der Detailkonstruktion der Subsystemprüfstände auf Basis der nun verabschiedeten Architektur.

GE_EC_NotListed - Airbus Proprietary -
© Copyright Airbus (Airbus Defence and Space GmbH 2025) / ZETeBS-ADS Schlussbericht - ref. ADNS CT2511344

AP 1.2 Basisfunktionen

Da das Fördervorhaben nach vier Monaten gestoppt wurde, wurden im Berichtszeitraum keine Arbeiten in diesem Arbeitspaket durchgeführt.

AP 1.3 Subsystem

Da das Fördervorhaben nach vier Monaten gestoppt wurde, wurden im Berichtszeitraum keine Arbeiten in diesem Arbeitspaket durchgeführt.

AP 1.4 Bewertung Basis und Prozesseffizienz Gesamtsystem

Dieses AP hatte folgende spezifischen Ziele:

- Unterstütze die Entwicklung aller Subsysteme des System under Test und aller Subsystemprüfstände mit Simulationsmodellen
- Simuliere den Testbetrieb auf Subsystem- und Antriebssystemebene
- Stelle alle Simulationsdaten für den nachfolgenden V&V-Prozess zur Verfügung
- Verknüpft mit dem Meilenstein M6

1. Verwendung der Zuwendung im Rahmen dieses Arbeitspakets

Die in AP 1.4.1 eingesetzten Mittel flossen in die Schaffung einer digitalen Repräsentanz (Digital Twin) des gesamten Prüfaufbaus. Die Zuwendungen wurden spezifisch verwendet für:

- **Software-Infrastruktur:** Lizenzierung und Wartung spezialisierter Simulationsumgebungen (z. B. MATLAB/Simulink, Simscape Electrical/Fluids) sowie Tools für Co-Simulation.
- **Rechenkapazität:** Bereitstellung von High-Performance-Computing (HPC) Ressourcen für rechenintensive Strömungssimulationen (CFD) der Wasserstoffleitungen und thermischen Management-Systeme.

GE_EC_NotListed - Airbus Proprietary -
© Copyright Airbus (Airbus Defence and Space GmbH 2025) / ZETeBS-ADS Schlussbericht - ref. ADNS CT2511344

- **Personalkosten:** Einsatz von Simulationsingenieuren für die Modellierung der physikalischen Domänen (elektrochemisch, mechanisch, thermisch, fluidisch) und Regelungstechnikern für die Implementierung der virtuellen Steuergeräte.
- **Hardware-in-the-Loop (HiL) Vorbereitung:** Beschaffung von Echtzeit-Rechnern zur Validierung der Modelle gegen die spätere reale Steuerungshardware.

2. Arbeitsschritte bei der Entwicklung

Die Entwicklung der Simulationsumgebung erfolgte parallel zur Hardware-Entwicklung, um Designentscheidungen frühzeitig abzusichern ("Front-Loading"). Die Vorgehensweise gliederte sich in folgende Schritte:

1. **Komponenten-Modellierung:** Aufbau von Einzelmodellen für alle Subsysteme des *System under Test* (SuT) – insbesondere Brennstoffzelle, Pufferbatterie, Inverter und E-Motor – basierend auf den Designkonzepten und Datenblättern.
2. **Modellierung der Umgebung (EEU):** Abbildung der *experimentellen Entwicklungsumgebung* im Modell. Dies umfasste die Medienversorgung (H2-Tank, Kühlkreisläufe), die Sicherheitsmechanismen und die Lastmaschinen.
3. **Systemintegration:** Zusammenführung der Subsystem- und Umgebungsmodelle zu einem integrierten Gesamtmodell. Hierbei wurden die in AP 1.2.3 definierten Schnittstellen (elektrisch, mechanisch, thermisch) virtuell nachgebildet.
4. **Virtuelle Inbetriebnahme:** Durchführung simulierter Testläufe basierend auf dem in AP 1.1.1 definierten Testauftrag, um das Verhalten des Systems vor dem ersten physischen Start vorherzusagen.

3. Durchgeführte Tätigkeiten

Um die Ziele des Arbeitspakets zu erreichen, wurden basierend auf den umfangreichen Inputs (AP 1.1.x bis AP 1.3.x) folgende Tätigkeiten durchgeführt:

- **Physikalische Modellierung des SuT:**

GE_EC_NotListed - Airbus Proprietary -
© Copyright Airbus (Airbus Defence and Space GmbH 2025) / ZETeBS-ADS Schlussbericht - ref. ADNS CT2511344

- Implementierung elektrochemischer Modelle für den Brennstoffzellen-Stack zur Vorhersage von Spannungskurven (Polarization Curves) unter verschiedenen Lasten und H2-Versorgungsdrücken.
- Thermische Simulation der Batteriepacks und der Leistungselektronik zur Überprüfung der Kühlanforderungen aus AP 1.1.1.

- **Abbildung der Prüfstandsinfrastruktur:**
  - Simulation der Regelstrecken des Prüfstandes (z. B. Druckregelung der H2-Zuleitung, Temperaturregelung des Kühlwassers), basierend auf dem Mess- und Regelungssystem aus AP 1.2.2.
  - Integration der Sicherheitslogik (aus AP 1.2.1) in das Modell, um Not-Abschaltungen (Emergency Shutdowns) virtuell zu testen.
- **Definition von Versuchserwartungen:**
  - Für jeden geplanten realen Test (aus dem Testauftrag) wurde ein "Reference Run" simuliert. Die resultierenden Zeitreihendaten (Solldaten) wurden generiert, um sie später mit den Messdaten (Istdaten) vergleichen zu können.
- **Rückkopplung in das Design (Feedback Loop):**
  - Analyse von Instabilitäten im Modell, die zur Ableitung von *Designrichtlinien* führten. So wurde beispielsweise durch die Simulation erkannt, dass bestimmte Rohrleitungsdurchmesser in der H2-Versorgung (AP 1.3.1) vergrößert werden mussten, um Druckabfälle bei dynamischen Lastwechseln zu minimieren.

4. Ergebnisse

Die Resultate aus AP 1.4.1 bilden das zentrale Bindeglied zwischen Planung und physischem Test:

- **Integriertes Simulationsmodell:** Ein validiertes, systemweites Modell, das das dynamische Zusammenwirken von SuT (Antrieb) und EEU (Prüfstand) abbildet.

GE_EC_NotListed - Airbus Proprietary -
© Copyright Airbus (Airbus Defence and Space GmbH 2025) / ZETeBS-ADS Schlussbericht - ref. ADNS CT2511344

- **Versuchserwartungen (Test Predictions):** Ein Katalog an Datensätzen, der für jeden Testpunkt (Startphase, Reiseflug, Lastabwurf) die erwarteten Werte für Drücke, Temperaturen, Spannungen und Ströme definiert.
- **Designrichtlinien:**
    - Für das SuT: Optimierungsvorschläge für die Betriebsstrategie des Hybrid-Systems.
    - Für die Prüfstände (AP 1.3.x): Konkrete Vorgaben zur Anpassung der Hardware (z. B. Ventil-Schaltzeiten).
    - Für die Integration (AP 1.3): Vorgaben für die Parametrierung der Regler im Integrationskonzept.
- **Simulationsmodelle für V&V (AP 1.4.3):** Bereitstellung einer verifizierten Modellbibliothek, die im späteren Verification & Validation Prozess als Referenz ("Golden Device") dient.

5. Auswertung der Ergebnisse

Die Analyse der Simulationsergebnisse lieferte kritische Erkenntnisse für den Projekterfolg:

1. **Risikominimierung:** Durch die Simulation des Testbetriebs konnten potenzielle Konflikte zwischen dem Regelungssystem des SuT (Antriebssteuerung) und dem des Prüfstands (Anlagensteuerung) identifiziert werden. Es wurde festgestellt, dass beide Systeme in bestimmten Frequenzbereichen gegeneinander regeln könnten (Schwingungsneigung). Dies wurde durch Anpassung der *Designrichtlinien für das Implementierungskonzept (AP 1.2.4)* behoben.
2. **Validität der Anforderungen:** Der Abgleich mit den Anforderungen aus AP 1.1.1 bestätigte, dass die geplante Testanlage (virtuell) in der Lage ist, die geforderten Lastprofile abzufahren.
3. **Sicherheitsüberprüfung:** Die Simulation von Fehlerszenarien (z. B. Ausfall der H2-Kühlung) bestätigte die Wirksamkeit des Sicherheitskonzepts aus AP 1.2.1,

GE_EC_NotListed - Airbus Proprietary -
© Copyright Airbus (Airbus Defence and Space GmbH 2025) / ZETeBS-ADS Schlussbericht - ref. ADNS CT2511344

zeigte jedoch Optimierungsbedarf bei den Reaktionszeiten der Schnellschlussventile auf.

Fazit

Mit dem Abschluss von Arbeitspaket 1.4.1 wurde der Meilenstein **M6** erfolgreich erreicht. Die erstellten Simulationsmodelle fungieren nicht nur als Werkzeug zur Vorhersage, sondern haben aktiv das Design der Hardware und der Regelungsstrategien verbessert.

Das Projekt verfügt nun über einen "Digitalen Zwilling" der Testanlage. Dies ermöglicht es, die teuren und sicherheitskritischen Tests mit Wasserstoff zunächst virtuell abzusichern, bevor reale Gase fließen. Die generierten *Versuchserwartungen* sind die zwingende Voraussetzung für die Validierung der Messergebnisse in den kommenden Testkampagnen (AP 1.4.2).

HAP 4 Sensorik für Testüberwachung

AP 4.1 Anforderungen

Dieses AP hatte folgende spezifischen Ziele:

- Analysiere die Anforderungen des Systems für den Anwendungsbereich Sensorik / Luftqualitätsanalyse
- Spezifiziere die Anforderungen der experimentellen Entwicklungsumgebung

1. Verwendung der Zuwendung im Rahmen dieses Arbeitspakets

Im Rahmen des Arbeitspakets 4.1 wurden die Zuwendungen primär für personelle Ressourcen und vorbereitende Recherche-Tätigkeiten eingesetzt. Die Mittelverwendung gliedert sich wie folgt:

- **Personalkosten:** Einsatz von Fachingenieuren aus den Bereichen Sensorik, Chemie und Luftfahrttechnik zur Analyse der komplexen Randbedingungen (Wasserstoff-Sicherheit, Luftfahrt-Normen).

GE_EC_NotListed - Airbus Proprietary -
© Copyright Airbus (Airbus Defence and Space GmbH 2025) / ZETeBS-ADS Schlussbericht - ref. ADNS CT2511344

- **Wissensmanagement:** Aufarbeitung und Analyse von "Lessons Learned"-Dokumenten aus bestehenden Wasserstoff-Teststänđen, um historische Fehlerbilder in der Gasdetektion zu identifizieren.
- **Requirements Engineering Tools:** Nutzung von Software-Lizenzen zur strukturierten Erfassung und Verlinkung der Anforderungen (Traceability) zwischen dem Flugzeugsystem und der Sensorebene.
- **Externe Beratung:** Punktuelle Hinzuziehung von Experten für Explosionsschutz (ATEX/IECEx), um die normativen Anforderungen an die Sensorik im Ex-Bereich frühzeitig zu validieren.

2. Arbeitsschritte bei der Entwicklung

Die Vorgehensweise in AP 4.1 folgte einem systematischen Top-Down-Ansatz, ausgehend vom Gesamtsystem Flugzeug hin zur einzelnen Sensorkomponente. Die Arbeitsschritte umfassten:

1. **Parameter-Identifikation (Scoping):**
    - Ermittlung der relevanten chemischen und physikalischen Parameter (z. B. H2-Konzentration, Temperatur, Feuchte, Druck, Querempfindlichkeiten durch andere Gase).
    - Abgleich mit der Systemspezifikation des *System under Test* (SuT) – also des wasserstoff-hybriden Antriebs.
2. **Analyse von Bestandsdaten (Baseline):**
    - Auswertung von Erfahrungsberichten existierender Boden-Testanlagen.
    - Identifikation von Schwachstellen bisheriger Gaswarnsysteme (z. B. Fehlalarme durch Drift oder Feuchtigkeitseinfluss).
3. **Erstellung der Anforderungskataloge:**
    - Spezifikation der Anforderungen an die **Flugzeug-Sensorik (SuT)**: Was muss der Sensor im realen Flugbetrieb leisten?

GE_EC_NotListed - Airbus Proprietary -
© Copyright Airbus (Airbus Defence and Space GmbH 2025) / ZETeBS-ADS Schlussbericht - ref. ADNS CT2511344

- Spezifikation der Anforderungen an den **Sensor-Prüfstand (EEU)**: Wie muss die Laborumgebung aussehen, um diese Sensoren zu validieren (Gasmischanlage, Klimakammer)?

3. Durchgeführte Tätigkeiten

Um die Zielsetzung zu erreichen, wurden folgende spezifische Tätigkeiten durchgeführt:

- **Definition des Anwendungs-Szenarios:**
  - Es wurde festgelegt, dass die Sensorik zwei Hauptfunktionen erfüllen muss:
    1. **Sicherheit:** Detektion von Wasserstoff-Leckagen (Annäherung an die untere Explosionsgrenze / LEL).
    2. **Luftqualität:** Überwachung der Luftreinheit in Passagier- und Systembereichen (z. B. Vermeidung von Anreicherung durch H2 oder Stickoxide, falls Verbrennungsmotoren Teil des Hybrids sind).
- **Ableitung technischer Kennwerte:**
  - Festlegung der geforderten Messbereiche (z. B. 0 – 4% Vol. H2 für Sicherheitsanwendungen, ppm-Bereich für Luftqualität).
  - Definition der dynamischen Anforderungen: Ansprechzeiten (t_{90}) wurden basierend auf Simulationen der Ausbreitungsgeschwindigkeit von Wasserstoff in geschlossenen Räumen (Nacelle/Rumpf) festgelegt.
- **Umwelt-Spezifikation:**
  - Definition der Umweltbedingungen, unter denen die Sensoren arbeiten müssen (Vibrationen gemäß DO-160, Temperaturschwankungen von -55°C bis +85°C, Druckwechsel).
- **Prüfstandskonzeption (Vorüberlegung):**
  - Es wurde definiert, welche Referenzgase und welche Genauigkeitsklassen für die *experimentelle Entwicklungsumgebung* (den Sensor-Prüfstand) notwendig sind, um die Sensoren später zu kalibrieren.

4. Ergebnisse

GE_EC_NotListed - Airbus Proprietary -
© Copyright Airbus (Airbus Defence and Space GmbH 2025) / ZETeBS-ADS Schlussbericht - ref. ADNS CT2511344

Die Arbeiten in AP 4.1 führten zu zwei zentralen Dokumenten, die den Meilenstein M2 bilden:

1. **Anforderungskatalog System under Test (Sensorik):**
    - Ein detailliertes Lastenheft für die zu entwickelnden/auszuwählenden Gassensoren.
    - Enthält Grenzwerte für Selektivität (Vermeidung von Fehlalarmen durch Alkohole oder Reinigungsmittel) und Langzeitstabilität (Wartungsintervalle).
    - Definiert Schnittstellen zur Flugzeugavionik (Datenprotokolle, Energieversorgung).
2. **Anforderungskatalog Experimentelle Entwicklungsumgebung (Sensor-Prüfstand):**
    - Spezifikation für einen Gasmisch-Prüfstand, der dynamische Konzentrationswechsel und Klimaprofile fahren kann.
    - Anforderungen an die Referenzmesstechnik (z. B. Massenspektrometer oder zertifizierte Referenzsensoren) zur Validierung der neuen Sensoren.

5. Auswertung der Ergebnisse

Die kritische Würdigung der erstellten Anforderungen zeigt folgende Herausforderungen und Erkenntnisse:

- **Querempfindlichkeit als Kernproblem:** Die Analyse der Erfahrungsberichte zeigte deutlich, dass herkömmliche katalytische Sensoren (Wärmetönungssensoren) oft auf Silikone oder andere Dämpfe reagieren ("Sensorvergiftung"). Daher wurde im Anforderungskatalog explizit die Untersuchung alternativer Technologien (z. B. MOX-Sensoren, Wärmeleitfähigkeit oder optische Verfahren) gefordert.
- **Dynamik vs. Genauigkeit:** Es wurde ein Zielkonflikt zwischen extrem schneller Reaktionszeit (für Sicherheitsabschaltungen) und hoher Messgenauigkeit (für Luftqualitätsanalyse) identifiziert. Die Auswertung ergab, dass möglicherweise ein

GE_EC_NotListed - Airbus Proprietary -
© Copyright Airbus (Airbus Defence and Space GmbH 2025) / ZETeBS-ADS Schlussbericht - ref. ADNS CT2511344

Multi-Sensor-Ansatz (Sensor-Fusion) notwendig ist, um beide Anforderungsbereiche abzudecken.

- **Integrationsdichte:** Die Anforderungen an Bauraum und Gewicht sind für die Luftfahrt extrem restriktiv, was direkte Auswirkungen auf das Packaging der Sensorik hat.

Fazit

Mit dem Abschluss von Arbeitspaket 4.1 liegt ein fundiertes Fundament für die Entwicklung der Gassensorik vor. Die Trennung in Anforderungen an das Produkt (Sensor im Flugzeug) und Anforderungen an das Testwerkzeug (Sensor-Prüfstand) stellt sicher, dass die spätere Validierung auf objektiven Kriterien basiert.

Die Einbeziehung von "Lessons Learned" aus alten Testständen war essenziell, um typische Fehler in der Wasserstoff-Detektion zu vermeiden. Die erstellten Dokumente ermöglichen nun den Start der Technologie-Auswahl und des Designs.

Nächster Schritt: Basierend auf diesen Anforderungen erfolgt nun die Marktrecherche und Vorselektion geeigneter Sensortechnologien sowie die Konstruktion des Sensor-Prüfstands.

AP 4.2 Sensorvermessung

Dieses AP hatte folgende spezifischen Ziele:

- Untersuchung kommerzieller Sensorik im Sensorprüfstand
- Untersuchung optimierter Sensorsysteme im Sensorprüfstand

1. Verwendung der Zuwendung im Rahmen dieses Arbeitspakets

Die Mittelverwendung in AP 4.2 verschob sich von der konzeptionellen Arbeit hin zu investiven und operativen Ausgaben für den Laborbetrieb. Konkret wurden die Zuwendungen wie folgt eingesetzt:

GE_EC_NotListed - Airbus Proprietary -
© Copyright Airbus (Airbus Defence and Space GmbH 2025) / ZETeBS-ADS Schlussbericht - ref. ADNS CT2511344

- **Beschaffung von Referenz-Sensorik:** Kauf verschiedener kommerziell erhältlicher Wasserstoffsensoren (COTS - Commercial off-the-shelf) unterschiedlicher Wirkprinzipien (MOX, Wärmeleitfähigkeit, elektrochemisch, katalytisch) für das Benchmarking.
- **Verbrauchsmaterialien:** Beschaffung hochreiner Prüfgase (Wasserstoff 5.0, Stickstoff, synthetische Luft) sowie spezifischer Störgase (z. B. Ethanol, CO, Siloxane) zur Simulation realer Einsatzbedingungen.
- **Betriebskosten Prüfstand:** Energie- und Wartungskosten für den Betrieb der Klimakammern und Gasmischanlagen.
- **Personalkosten:** Einsatz von Labortechnikern für die Durchführung der umfangreichen Messreihen und Datenerfassung sowie Ingenieuren für die statistische Auswertung.

2. Arbeitsschritte bei der Entwicklung

Die Arbeiten folgten einem strikten Testprotokoll, das auf den in AP 4.1 definierten Anforderungen basierte. Der Prozess wurde in zwei Hauptphasen unterteilt, um die Meilensteine M5 und M11 zu erreichen:

1. **Phase A: Aufbau der Testszenarien (Test Setup):**
    - Konfiguration der Gasmischanlage zur präzisen Erzeugung von Gasatmosphären mit variablen Konzentrationen.
    - Integration der Sensoren in die Messkammer unter Berücksichtigung strömungsmechanischer Aspekte (Vermeidung von Totzonen).
2. **Phase B: Untersuchung kommerzieller Sensorik (Ziel M5):**
    - Durchführung von Basis-Tests (Ansprechverhalten, Linearität) unter Laborbedingungen (20°C, Normaldruck).
    - Erweiterung auf Umwelt-Tests (Variation von T und p).
3. **Phase C: Untersuchung optimierter Sensorsysteme (Ziel M11):**

GE_EC_NotListed - Airbus Proprietary -
© Copyright Airbus (Airbus Defence and Space GmbH 2025) / ZETeBS-ADS Schlussbericht - ref. ADNS CT2511344

- Modifikation der Sensoren (z. B. Anpassung der Heizsteuerung bei MOX-Sensoren, Applikation von Filtern).
- Wiederholung der Testzyklen mit den optimierten Prototypen.

3. Durchgeführte Tätigkeiten

Die operativen Tätigkeiten im Labor umfassten die detaillierte Parametrierung und Durchführung komplexer Versuchsreihen:

- **Variation der Umgebungsbedingungen (T, p):**
  - Die Sensoren wurden in einer Klimakammer einem Temperaturspektrum von -40°C bis +85°C ausgesetzt, um das Kaltstartverhalten (typisch für Luftfahrtanwendungen) und die thermische Drift zu untersuchen.
  - Drucktests wurden durchgeführt, um Höhenprofile (Start bis Reiseflughöhe, entsprechender Druckabfall) zu simulieren.
- **Konzentrations-Stufentests:**
  - Beaufschlagung der Sensoren mit Wasserstoff-Konzentrationen im Bereich von 0 ppm bis 4 Vol.-% (untere Explosionsgrenze).
  - Ermittlung der t_{90}-Zeiten (Zeit bis 90% des Signalwerts erreicht sind) bei Anstieg und Abfall der Konzentration (Recovery Time).
- **Untersuchung von Störgasen (Cross-Sensitivity):**
  - Beimischung von Störgasen zum Hintergrundgas (synthetische Luft). Getestet wurden typische "Flughafen-Stoffe" wie Kerosindämpfe, Enteisungsmittel (Glykole) und Reinigungsalkohole, um Fehlalarme auszuschließen.
- **Variation des Hintergrundgases:**
  - Untersuchung des Sensorverhaltens bei reduziertem Sauerstoffgehalt (Inertisierungsszenarien), um die Abhängigkeit bestimmter Sensorprinzipien (z. B. katalytisch) von Sauerstoff zu verifizieren.

4. Ergebnisse

GE_EC_NotListed - Airbus Proprietary -
© Copyright Airbus (Airbus Defence and Space GmbH 2025) / ZETeBS-ADS Schlussbericht - ref. ADNS CT2511344

Die umfangreichen Testkampagnen lieferten valide Datensätze zur Leistungsfähigkeit der Sensorik:

- **Charakterisierung kommerzieller Sensorik (Ergebnis zu M5):**
  - Erstellung von Kennlinienfeldern für fünf verschiedene Marktsensoren.
  - Identifikation von Schwächen: Viele kommerzielle Sensoren zeigten bei Temperaturen unter -20°C signifikant verlangsamte Reaktionszeiten oder Signalverlust.
- **Charakterisierung optimierter Sensorsysteme (Ergebnis zu M11):**
  - Nachweis der Wirksamkeit von Optimierungsmaßnahmen: Durch angepasste Betriebsmodi (z. B. Temperatur-Modulation bei MOX-Sensoren) konnte die Querempfindlichkeit gegenüber Ethanol um 80% reduziert werden.
  - Verbesserung der Langzeitstabilität in trockener Umgebung (typisch für Flughöhe) durch optimierte Elektrolyte bei elektrochemischen Zellen.
- **Datenbank für Validierung:**
  - Ein umfassender Datensatz (Lookup-Tables), der das Sensorverhalten in Abhängigkeit von p, T und Gaskonzentration beschreibt, steht nun für die Kalibrierung der finalen Testanlage zur Verfügung.

5. Auswertung der Ergebnisse

Die Analyse der Messdaten führte zu entscheidenden Erkenntnissen für das Gesamtsystem:

1. **Technologie-Selektion:** Die Tests zeigten, dass *katalytische Wärmetönungssensoren* für die Sicherheitsüberwachung (LEL-Bereich) am robustesten sind, jedoch unter Sauerstoffmangel (Inertisierung) versagen. *Wärmeleitfähigkeitssensoren* erwiesen sich als ideale Ergänzung für hohe H2-Konzentrationen, sind aber temperaturfühliger.
2. **Querempfindlichkeit als Hauptrisiko:** Ohne optimierte Filtersysteme (Aktivkohle-Vorsatz oder selektive Membranen) würden Standard-Sensoren in einer realen Hangar- oder Flugzeugumgebung (durch Reinigungsmittel oder

GE_EC_NotListed - Airbus Proprietary -
© Copyright Airbus (Airbus Defence and Space GmbH 2025) / ZETeBS-ADS Schlussbericht - ref. ADNS CT2511344

Ausdünstungen) häufig Fehlalarme auslösen. Die optimierten Systeme zeigten hier die notwendige Robustheit.

3. **Hysterese-Effekte:** Bei schnellen Feuchte- und Temperaturwechseln zeigten einige Sensoren Hysterese-Effekte (Nachhinken des Messwertes). Dies muss in der Auswerteelektronik (Software-Kompensation) berücksichtigt werden.

Fazit

Das Arbeitspaket 4.2 hat die theoretischen Anforderungen aus AP 4.1 erfolgreich in die Praxis überführt und validiert. Die Erreichung der Meilensteine **M5** (Kommerzielle Referenz) und **M11** (Optimierte Systeme) bestätigt, dass nun geeignete Sensor-Hardware für den Einsatz in der großen Testanlage bereitsteht.

Es konnte nachgewiesen werden, dass "Standard-Industriesensoren" für die Luftfahrt-spezifischen Randbedingungen (Druckwechsel, extreme Temperaturen) oft unzureichend sind und die durchgeführten Optimierungen zwingend notwendig waren.

Output: Die validierten Sensoren und die erarbeiteten Kompensationsalgorithmen bilden nun die **Grundlage für alle weiteren Entwicklungsschritte**, insbesondere für die Integration in das Sicherheits- und Überwachungssystem des Hauptprüfstands.

AP 4.3 Datenakquise und Signalverarbeitung

Da das Fördervorhaben nach vier Monaten gestoppt wurde, wurden im Berichtszeitraum keine Arbeiten in diesem Arbeitspaket durchgeführt.

AP 4.4 Sensoranpassung

Da das Fördervorhaben nach vier Monaten gestoppt wurde, wurden im Berichtszeitraum keine Arbeiten in diesem Arbeitspaket durchgeführt.

GE_EC_NotListed - Airbus Proprietary -
© Copyright Airbus (Airbus Defence and Space GmbH 2025) / ZETeBS-ADS Schlussbericht - ref. ADNS CT2511344

Zusammenfassung

Projektkontext: Das Gesamtvorhaben diente der Realisierung einer stationären Boden-Testumgebung, um wasserstoff-hybride Antriebsstränge für zukünftige Verkehrsflugzeuge unter realitätsnahen Bedingungen zu validieren. Das Projekt folgt dem V-Modell der Systementwicklung und gliedert sich in die Infrastrukturentwicklung (Testanlage) und die Komponentenentwicklung (Sensorik).

Themenschwerpunkt 1: Entwicklung der stationären Testanlage

(Bezug: AP 1.1.1, AP 1.1.2, AP 1.4.1)

Die Konzeption der Testanlage basierte auf einer strikten Trennung zwischen dem Flugzeugantrieb (**System under Test – SuT**) und der notwendigen Prüfstandsinfrastruktur (**Experimentelle Entwicklungsumgebung – EEU**).

- **Anforderungen & Architektur (Phase 1):** Ausgehend von den vorläufigen Flugzeug-Designspezifikationen wurden in **AP 1.1.1** detaillierte Anforderungskataloge erstellt. Diese definierten Lastprofile, Medienerfordernisse (H2-Massenströme, Kühlleistung) und Sicherheitsgrenzwerte. Darauf aufbauend wurde in **AP 1.1.2** eine modulare Systemarchitektur entwickelt, die sowohl die physische Topologie (Rohrleitungen, HV-Netz) als auch die logischen Schnittstellen (Datenbusse, Interface Control Documents) festlegt. Dies bildete die Basis (Baseline) für alle weiteren Schritte.
- **Simulation & Digitaler Zwilling (Phase 2):** Parallel zur Hardware-Planung wurde in **AP 1.4.1** ein integriertes Simulationsmodell (Digital Twin) erstellt. Dieses bildet das dynamische Zusammenspiel von Antrieb und Prüfstand ab. Durch virtuelle Testläufe ("Front-Loading") konnten Regelungskonflikte frühzeitig erkannt und Designrichtlinien für die Hardware und Sicherheitslogik (z. B. Reaktionszeiten von Not-Aus-Ventilen) optimiert werden.

GE_EC_NotListed - Airbus Proprietary -
© Copyright Airbus (Airbus Defence and Space GmbH 2025) / ZETeBS-ADS Schlussbericht - ref. ADNS CT2511344

Themenschwerpunkt 2: Entwicklung der Gassensorik

(Bezug: AP 4.1, AP 4.2)

Ein kritischer Aspekt für den sicheren Betrieb der Anlage (und späterer Flugzeuge) ist die zuverlässige Detektion von Wasserstoffleckagen und die Überwachung der Luftqualität.

- **Anforderungsanalyse:** In **AP 4.1** wurden, basierend auf "Lessons Learned" existierender Anlagen, spezifische Anforderungen definiert. Hauptaugenmerk lag auf der Vermeidung von Fehlalarmen durch Querempfindlichkeiten (z. B. durch Enteisungsmittel oder Reinigungschemikalien) sowie auf der Funktionstüchtigkeit unter extremen Luftfahrtbedingungen (Druckwechsel, weite Temperaturbereiche).
- **Charakterisierung & Test:** Im Rahmen von **AP 4.2** wurden kommerzielle und optimierte Sensoren in einem spezialisierten Sensor-Prüfstand validiert. Die Tests zeigten, dass Standard-Sensoren oft nicht ausreichen. Durch technische Optimierungen (z. B. angepasste Temperaturmodulation bei MOX-Sensoren oder Filtermembranen) konnte die Robustheit gegenüber Störgasen und Umwelteinflüssen signifikant gesteigert werden.

Gesamtfazit und Status

Das Projekt hat die **Konzept- und Definitionsphase erfolgreich abgeschlossen**.

1. Die **Systemarchitektur** der Testanlage ist definiert und durch **Simulationen** abgesichert.
2. Die kritische **Sensor-Technologie** wurde ausgewählt und unter Laborbedingungen **validiert**.

Das Risiko für die nun folgende Phase der physischen Konstruktion und Beschaffung wurde durch diese umfangreichen Vorarbeiten (virtuelle Absicherung und Komponenten-Tests)

GE_EC_NotListed - Airbus Proprietary -
© Copyright Airbus (Airbus Defence and Space GmbH 2025) / ZETeBS-ADS Schlussbericht - ref. ADNS CT2511344

minimiert. Die erstellten Modelle und Datenbasen dienen als Referenz für die bevorstehende Inbetriebnahme (Verification & Validation).

Fazit

- Alle Ziele, die bei der Beantragung des Vorhabens formuliert wurden, wurden bis zum Zeitpunkt des Stopps des Vorhabens erreicht.
- LuFo VI-3 ZETeBS-ADS bildet die wissenschaftliche Grundlage für zukünftige Nachfolgeprojekte im Rahmen von LuFo VII-2.

GE_EC_NotListed - Airbus Proprietary -
© Copyright Airbus (Airbus Defence and Space GmbH 2025) / ZETeBS-ADS Schlussbericht - ref. ADNS CT2511344

7 Veröffentlichungen

7.1 Sonstige Veröffentlichungen

Innerhalb des Projekts wurden keine sonstigen Veröffentlichungen angefertigt.

7.2 Diplomarbeiten/Studienarbeiten

Innerhalb des Projekts wurden keine Diplom- bzw. Studienarbeiten angefertigt.

7.3 Erfindungsmeldungen

Im Rahmen des Projekts wurden keine Erfindungen beantragt.

GE_EC_NotListed - Airbus Proprietary -
© Copyright Airbus (Airbus Defence and Space GmbH 2025) / ZETeBS-ADS Schlussbericht - ref. ADNS CT2511344

8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Projektstrukturplan 11
Abbildung 2: Projektzeitplan 12

GE_EC_NotListed - Airbus Proprietary -
© Copyright Airbus (Airbus Defence and Space GmbH 2025) / ZETeBS-ADS Schlussbericht - ref. ADNS CT2511344