Luftfahrtforschung und -technologie

Abschlussbericht

„Erforschung von Energieerzeugungseinheiten für hybrid-elektrische Antriebssysteme (Hybrid Electric Propulsion System) durch Flugerprobung in einem Zubringerflugzeug“

(HEPS)

Förderkennzeichen **20M19012B**

Laufzeit: 01.01.2020 - 31.12.2023

Berichterstatter: Mark Vonnoe

MTU Aero Engines AG

Gefördert durch:

Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

München, August 2024

Copyright © MTU Aero Engines AG **Public**

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 3

2 Darstellung und Ergebnisse der Arbeitspakete 4

2.1 Projektstrukturplan 4

2.2 Finaler Zeitplan 6

2.3 Erreichte Ergebnisse 6

2.3.1 AP 1.1 Vorentwicklung der Antriebssystemarchitektur 6

2.4 AP 1.2 Konzept der Antrieb Sub Systeme 9

2.4.1 AP 1.2.1 Konzepte für Antrieb Sub System 9

2.4.2 AP 1.2.2 Entwicklung Kompressoren Subsystem „Airline“ 15

2.5 AP 1.3 Beschaffung Langläufer Bodenprüfstandsumgebung 17

2.6 AP 2.3 Konzept Integration Systeme und Subsysteme Antrieb und Flugzeug 19

2.7 AP 3.1 Sicherheitsanalysen 20

2.8 AP 3.2 Konfigurationsmanagement 21

2.9 AP 4.1 Flugversuchsplanung 22

3 Abbildungsverzeichnis 25

1 Einleitung

Angesichts der Endlichkeit fossiler Brennstoffe, der limitierten Akzeptanz der Gesellschaft hinsichtlich steigender Klimabelastung durch die Erhöhung des Flugaufkommens sowie der internationalen Bestrebungen zum Umweltschutz gilt es alternative Antriebskonzepte für die Luftfahrt zu untersuchen. Hierzu zählt unter anderem die Betrachtung der „E-Mobilität in der Luftfahrt“. Durch das Potential der Reduzierung des Treibstoffverbrauches ist die Entwicklung und Umsetzung jener für eine ökologisch nachhaltigere Luftfahrt der Zukunft zwingend notwendig.

Das MTU-Teilvorhaben im Verbund LuFo VI-1 HEPS widmete sich daher geeigneten Antriebstechnologien, um gesetzte Ziele zu erreichen.

Das hier skizzierte Forschungsvorhaben umfasst in HAP1 (Federführung MTU) die Konzeptionierung und Vorentwicklung des Antriebssystems. Im HAP 2 wird die Gesamtintegration im Flugzeug und die Integration des Antriebssystems in dieses vorentwickelt. Das HAP3 dient der Sicherstellung der Lufttauglichkeit mittels Sicherheitsanalysen, Konfigurationsmanagement und der Entwicklungs- und Zulassungsleitung. HAP4 enthält die Planung der Zielflugversuche mit Brennstoffzelle, wie auch die Erhaltung der Lufttüchtigkeit (HAP 2-4 jeweils Federführung Partner DLR).

2 Darstellung und Ergebnisse der Arbeitspakete

Nachfolgend werden der aktualisierte Projektstrukturplan und Ergänzungen zu den Arbeitspaketen dargestellt.

2.1 Projektstrukturplan

Abbildung 1 zeigt den Projektstrukturplan des Vorhabens.

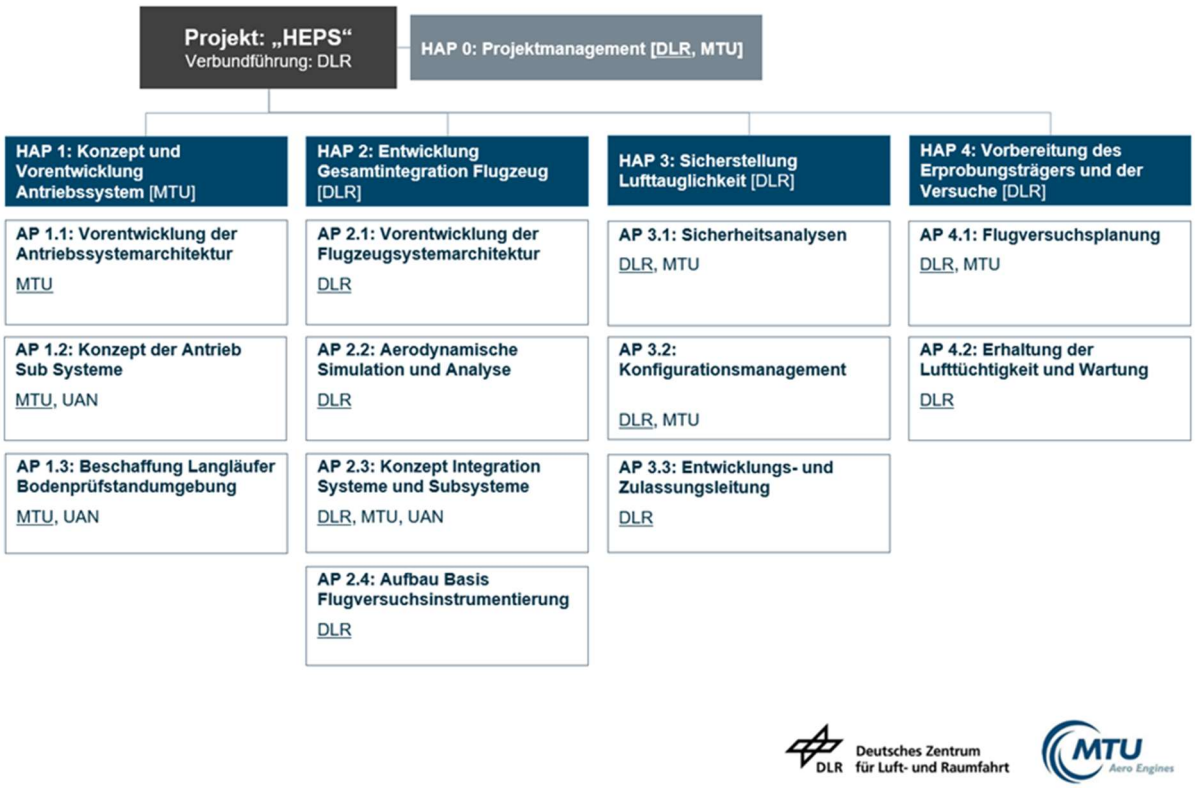

Abbildung 1: Projektstrukturplan des Gesamtvorhabens

Wie aus dem Projektstrukturplan in Abbilddung 1 ersichtlich, war MTU verantwortlich für das HAP1 und arbeitete im AP2.3, AP3.1, AP3.2 und AP4.1 eng mit dem DLR zusammen. So wurde im HAP1 die Weiterentwicklung der in Fördervorhaben „ELFE“ konzeptionierten Systemarchitektur (AP1.1) sowie die übergeordnete Konzepterstellung aller für den Antrieb notwendigen Subsysteme (AP1.2.1) weiter vorangetrieben. Im AP1.2.2 wurde im Vergleich zu den übrigen Subsystemen zusätzlich bereits die Kompressor-Konfiguration der Luftlinie entwickelt und validiert, sodass TRL4 erreicht

werden konnte. Diese Entwicklung mündete in das Parallel-Vorhaben LuFo6/1 „EPS“ und wurde mit den dort entwickelten Komponenten (aktive Befeuchtung und Wasser-Separation) zum gesamten Subsystem „Airline“ zusammengeführt und getestet. Die Beschaffung der Komponenten erfolgte unter Einbringung von MTU-Eigenmitteln. Im AP2.3 fand, basierend auf den Arbeiten in AP1.2.1 die Erstellung der Konzepte jedes Subsystems zur Integration in den Erprobungsträger statt. In AP3.1 wurden Wechselwirkungen zwischen Antriebssystem und der Luftfahrzeugebene erarbeitet und in den jeweiligen Sicherheitsanalysen auf Antriebs- und Flugzeugebene berücksichtigt. Dies stellte den ersten Schritt zur Erstellung und Aktualisierung der Sicherheitsanalysen dar, welche für eine spätere Erlangung der Lufttüchtigkeit unabdingbar sind. Für die Dokumentation der Entwicklungen war gleichermaßen die Etablierung und Fortschreibung des Konfigurationsmanagements notwendig, welche in AP3.2 in Abstimmung mit dem DLR erfolgte. Das AP4.1 befasste sich mit der Erstellung des für einen späteren Demonstratorflug benötigten Flugversuchsplan.

Tabelle 1 ordnet den Arbeitspaketen die zuständigen Teilprojektleiter zu.

Arbeitspakete	**Teilprojektleiter**
AP 1.1 Vorentwicklung der Antriebssystemarchitektur	Hr. Dr. D. Wirth
AP 1.2 Konzept der Antrieb Sub Systeme	Hr. Dr. Alexander Fuchs
AP 1.3 Beschaffung Langläufer Bodenprüfstandsumgebung	Hr. C. Steffen
AP 2.3 Konzept Integration Systeme und Subsysteme Antrieb und Flugzeug	Hr. Robert Dietrich
AP 3.1 Sicherheitsanalysen	Hr. Dr. Stefan Gehring
AP 3.2 Konfigurationsmanagement	Hr. R. Preuß
AP 4.1 Flugversuchsplanung	Hr. C. Steffen

Tabelle 1: Auflistung der Arbeitspakete mit durchführenden Teilprojektleitern.

2.2 Finaler Zeitplan

Nachfolgend ist in Abbildung 2 der finale Zeitplan dargestellt.

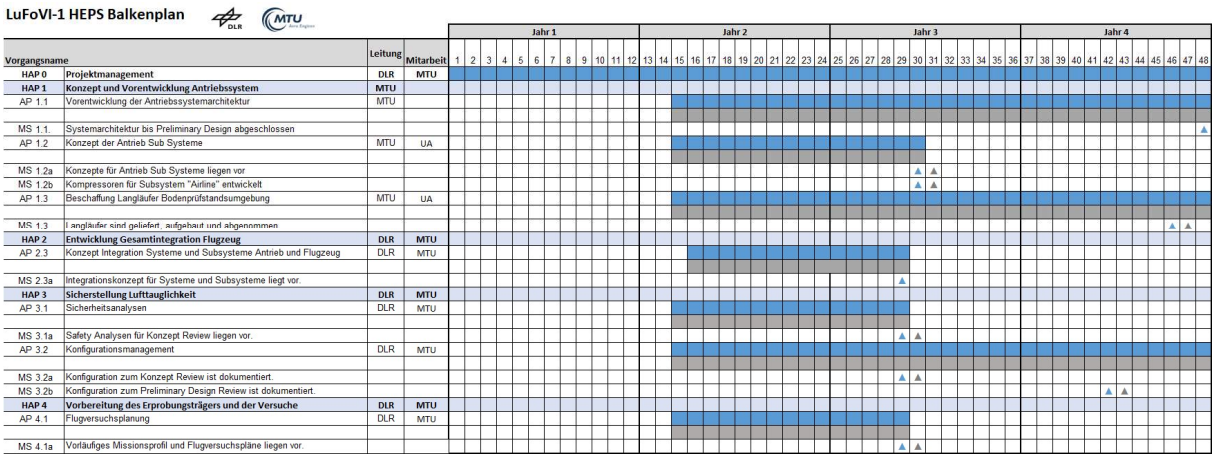

Abbildung 2: Zeitplan HEPS

2.3 Erreichte Ergebnisse

In diesem Abschlussbericht werden die Ergebnisse der durch die MTU verantworteten oder beteiligten Arbeitspakete HAP1, AP2.3, AP3.1, AP3.2 und AP4.1 beschrieben. Alle weiteren Arbeitspakete liegen nicht im Aufgabenbereich der MTU und sind hier nicht aufgeführt.

2.3.1 AP 1.1 Vorentwicklung der Antriebssystemarchitektur

Im Rahmen des AP1.1 wurde die in dem vorangegangenen Fördervorhaben BayLuFo ELFE erarbeitete Antriebssystemarchitektur weiterentwickelt. Die grundlegenden funktionalen Anforderungen wurden definiert. Die systeminternen aber auch flugzeugseitigen Schnittstellen wurden ebenfalls definiert. Mit dem Erreichen der Konzeptreife wurden erste Artefakte unter Konfigurationskontrolle gestellt.

Die Referenz-Konfiguration ist in Abbildung 3 wiedergegeben.

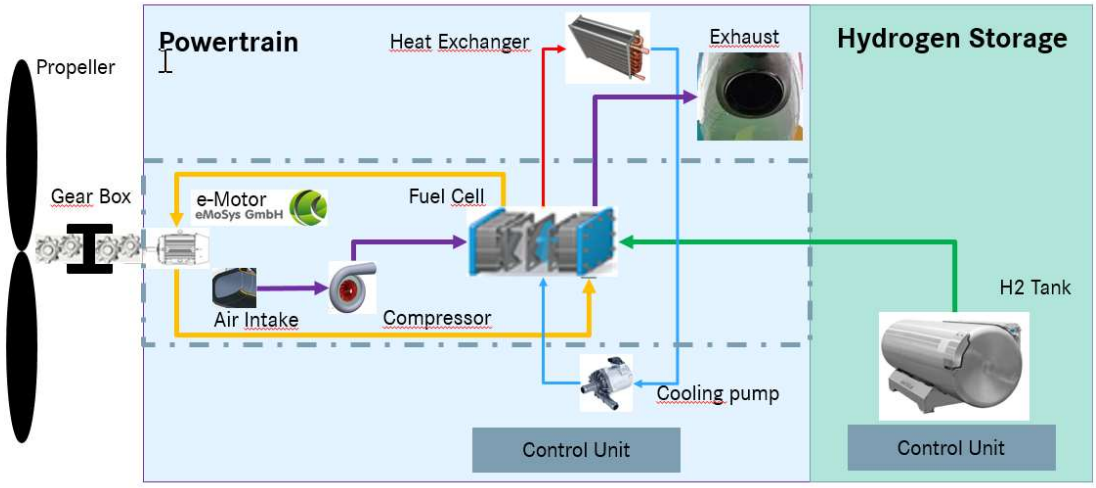

Abbildung 3: Referenzarchitektur FFC

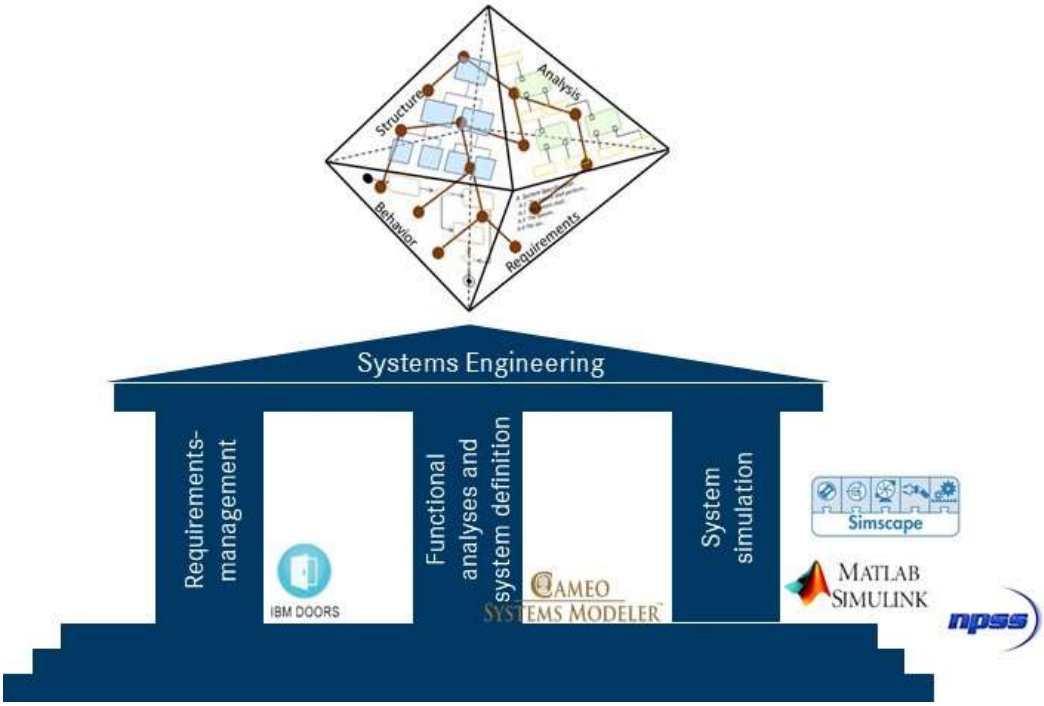

Abbildung 4: Für die Systementwicklung genutzte Datenbanken und Systemmodelle

Das Erstellen einer entsprechenden Systematik hinsichtlich des Änderungsmanagements war ein weiterer Schwerpunkt der Arbeiten. Für das Gesamtprojekt ist ein dreistufiges Änderungsmanagement vorgesehen:

1. Konzeptphase

   In dieser Phase findet kein formales Änderungsmanagement statt, da das hohe

Maß an Dynamik und Änderungen einen unverhältnismäßig großen prozessualen Aufwand generieren würde, welcher kein positives Kosten-Nutzen-Verhältnis darstellt.

2. Lean Configuration Management
   In dieser Phase wird ein schlanker, vereinfachter Änderungsmanagementprozess etabliert. Einzelne kritische Artefakte, welche die grundlegende Systemarchitektur und -parameter betreffen, werden unter Konfigurationskontrolle gestellt. Dies umfasst zum Beispiel die Systemanforderungen, die Systemarchitektur sowie die Schnittstellen auf System- und Subsystemebene. Änderungen an diesen Elementen werden über ein Change Board eingebracht, und dann beauftragt, zurückgestellt oder verworfen. Die korrekte Implementierung wird ebenfalls überwacht. Der Änderungsprozess wird dokumentiert. Diese Phase des Änderungsmanagement wurde im Projekt etabliert und läuft bis zum Erreichen des Preliminary Design Reviews.
3. Full Configuration Management
   Nach Abschluss der laufenden Entwicklungsphase werden sukzessive weitere Elemente in tieferen Ebenen der Systemhierarchie unter Konfigurationskontrolle gestellt. Damit steigen auch die Anforderungen an den Änderungsmanagementprozess selbst, da dessen Umfang und Komplexität steigt. Diese Phase wird erst nach PDR aktiv.

Weiterhin wurden Anforderungen an das Regelungssystem erarbeitet. Ein erster Schritt war die Einbindung des Regelungssystem in die vorhandene Requirements-Based-Engineering-Umgebung des Antriebssystems, welche in DOORS realisiert ist. Diese Implementierung wurde abgeschlossen. Auch die Anforderungen, die durch das Regelungssystem an andere Antriebssubsysteme gestellt werden, wurden weiter ausgebaut und erhärtet. Die nach „Use Cases“ gegliederte funktionale Analyse wurde ebenso weiterentwickelt. Hier waren insbesondere das Erstellen von Start- und Ausschaltprozeduren für das Antriebssystem in Abstimmung mit dem DLR ein Schwerpunkt.

Neben diesen Tätigkeiten lag ein weiterer inhaltlicher Fokus auf der Erweiterung der

Funktionsanalyse des Antriebssystems in der MBSE Software CAMEO inklusive regelungsspezifischer Funktionen und Aspekte. Die funktionale Analyse wird nach "Use Cases" gegliedert sukzessive durchgeführt. Auf Basis der Regelanforderungen wurde das grundlegende Regelungskonzept definiert.
Engineering Tests in einem kleinskaligen Brennstoffzellensystem dienten zur Erprobung des brennstoffzellenspezifischen Aspekts der Regelung. Ein Beckhoff-System wurde dafür in diese Prüfumgebung integriert, welches mit den tatsächlichen in Matlab erstellten Regelungsgesetzen bespielt werden kann und somit die erstellten Regelungslogiken und -parameter grundsätzlich validieren kann. Begleitend wurden Sicherheitsanalysen des Regelungskonzepts und -systems inklusive der involvierten Sensorik und Aktuatorik weitergeführt. Hierfür wurde das etablierte Systemmodell in der MBSE Umgebung CAMEO genutzt.
Im letzten Projektabschnitt wurden die Arbeiten an der Systemarchitektur in den Bereichen Requirements, Systemdefinition und Schnittstellenmanagement mittels der etablierten Werkzeuge CAMEO System Modeler und DOORS NG weitergeführt und kontinuierlich im Einklang mit den Fortschritten der Subsystementwicklung aktualisiert, um stets ein kohärentes und konsistentes Abbild des Gesamtsystems zu garantieren. Der Status der Arbeiten wurden in einem Preliminary Design Review (PDR) vorgestellt und das Review bestanden (zum Projektende).

2.4 AP 1.2 Konzept der Antrieb Sub Systeme

2.4.1 AP 1.2.1 Konzepte für Antrieb Sub System

System / Simulation:

Ein exemplarisches Systemmodell des EPT (Electrical Power Train) wurde in der MBSE Umgebung CAMEO erarbeitet. Dieses stellt eine weiterentwickelte und integrierte Sicht für die Sub-Systeme zur Verfügung. Dieser Arbeitsinhalt stellt die Grundlage für die MTU-interne Ablage im PLM dar. Im Anschluss daran fand die Überführung in das FEP (Full Engine Performance Model) statt, welches eine strukturierte Bearbeitung mittels Simulationen (Matlab Simulink/Simscape) ermöglicht. Damit ist eine simultane Simulation und Bewertung von allen relevanten Systemkomponenten in einem Modell möglich. Zusätzlich kann eine Bewertung der Schnittstellen zwischen allen Subsystemen umgesetzt werden. Beide Tools, die MBSE Umgebung und das Modell

für die Systemsimulation können semi-automatisiert synchronisiert werden, so dass Änderungen in den Betriebsbedingungen oder in den Komponentendaten, direkt in die Systemsimulation einfließen und die damit erzeugte Simulationsergebnisse wieder im MBSE Modell zurückgefüttert werden können.
Die aufgebaute Systemsimulation ist ein mächtiges Tool um das stationäre und transiente Verhalten des Systems zu verstehen, Schnittstellen zwischen Subsysteme zu charakterisieren und eine erste Dimensionierung der Komponenten durchzuführen.

Darüber hinaus wurden Simulationen der elektrischen Kabel durchgeführt um elektrische (Temperaturabhängige Leitfähigkeit, Material- und Höheeinflüsse) und thermische Aspekte (konvektive Abkühlung) in stationären Zuständen bewerten zu können.

H2-Line:

Im Rahmen des AP 1.2.1 wurde das Subsystem H2-Line entwickelt, welches für die Wasserstoffspeicherung und -versorgung des Brennstoffzellensystems zuständig ist. Die H2-Line beinhaltet das HFS (Hydrogen Fuel System) und das FCHS (Fuel Cell Hydrogen System). Dabei besteht das HFS aus einem Flüssigwasserstofftank sowie einer Systemkapsel für die Vorkonditionierung des kryogenen Wasserstoffs (Druck, Temperatur) und wird über einen eigenen Regler angesteuert. Die Aufbereitung des kryogenen Wasserstoffs erfolgt dabei hauptsächlich über Wasserstoff-Kühlmittel-Wärmetauscher, welche die Abwärme des Stacks zum Verdampfen und Aufheizen des tiefkalten Wasserstoffs nutzen. Die Fluidströme werden über (kryogene) Regelventile gesteuert, um bedarfsgerecht Wasserstoff für die Brennstoffzelle aufzubereiten. Ferner kommen passive, federbelastete Sicherheitsventile und Berstscheiben zum Einsatz, um unzulässigen Überdruck im Tanksystem unter allen Umständen (z.B. während eines Reglerausfalls) sicher zu verhindern sowie anfallende Boil-off Gasmengen sicher aus dem HFS abzuführen.
Das FCHS umfasst die weitere Aufbereitung des im HFS vorkonditionierten Wasserstoffs und stellt die bedarfsgerechte Versorgung des Stacks mit korrekt konditioniertem Wasserstoff (Druck, Temperatur, Feuchte) sicher. Das FCHS wird über das Powertrain Control System geregelt. Das FCHS wurde auf den Betrieb der Brennstoffzelle mit Wasserstoffüberschuss ausgelegt, wobei der überschüssige Wasserstoff zusammen

mit eindiffundiertem Wasserdampf und Stickstoff dem Stack-Eintritt erneut zugeführt wird. Dadurch wird der Wasserstoffverbrauch minimiert und gleichzeitig das Stack-Eintrittsgemisch befeuchtet. Hierfür wurde ein Ejektor-basiertes, passives Rezirkulationskonzept ausgewählt und die Machbarkeit mittels Versuchen mit Ersatzmedien (Helium, Luft) nachgewiesen. Anfallendes flüssiges Wasser im Rezirkulationskreis wird mittels Wasserseparatoren abgeschieden und über periodisch öffnende Drain-Ventile aus dem System geleitet. Darüber hinaus wird mittels periodisch öffnender Purge-Ventile eine unzulässig hohe Konzentration von eindiffundiertem Stickstoff im Anodenkreis vermieden, welches sich andernfalls im Anodenkreis über die Zeit akkumulieren würde.

Im Zuge des Konzeptreviews (TRL3) wurde die entsprechende Auswahl der HFS und FCHS Konzepte sowie die Machbarkeit im Kontext der DO228 Applikation erfolgreich bestätigt.

Air-Line:

Im Zuge des Concept Reviews wurde zunächst die Systemarchitektur beschrieben. Es ist notwendig die Stacks mit dem notwendigen Sauerstoff zu versorgen. Relevanten Teile des Luftsystems sind dabei der Lufteinlass, der im Verantwortungsbereich des DLRs liegt, aber ein Interface mit dem System der MTU darstellt. Des Weiteren werden Luftfilter benötigt, welche Partikel und schädigende Gase herausfiltern und mittels Bypass-Option den Druckverlust des Systems in definierten Betriebszuständen verringert und somit die Effizienz steigert. Weitere Bestandteile sind die beiden elektrisch angetriebenen Verdichterstufen der Firma Pankl, wie sie im Meilenstein 1.2b beschrieben sind. Für dessen Betrieb ist ein Bypass Ventil notwendig, um bei niedrigen Durchsätzen und hohen Druckverhältnissen den Verdichter nicht im Pumpbetrieb zu betreiben. Hinzu kommt die Befeuchtung der Luft auf ein Niveau, dass der Stack optimal betrieben werden kann und keinen Schaden nimmt. Hierfür wurde ein passiver Befeuchter mittels Membranbefeuchtern ausgewählt, da dieser vielversprechendere Ergebnisse gegenüber einer aktiven Befeuchtung lieferte. Diverse Membran Befeuchter wurden beim Zentrum für Brennstoffzellen Technik (ZBT) getestet und einer ausgewählt. Außerdem wurden diverse Ventile für den Stack und den die Anpassung des Gegendrucks im System ausgewählt.

Die übergeordnete Dimensionierung des Systems wurde mittels internem, MS Excel

basierten Programm, welches auf Grundlage von Mess- und Zulieferdaten sukzessive aktualisiert wurde, ausgelegt. Diverse Komponenten wurden bereits getestet.
Im Zuge des Reviews wurden somit das gewählte Konzept als umsetzbar bestätigt und die ausgewählten und vordefinierten Komponenten bestätigt. Viele dieser Komponenten befinden sich bereits als Hardware Vor-Ort oder sind im Zulauf, die restlichen Komponenten befinden sich im Beschaffungsprozess.

Cooling-Line:

Im Rahmen des AP 1.2.1 wurde ein Kühlkonzept für das Brennstoffzellen-Antriebssystem entwickelt. Die Hauptaufgaben der Cooling Line sind die Sicherstellung der optimalen Betriebstemperatur aller Komponenten sowie die Abfuhr der überschüssigen Wärme an die Umgebungsluft. Hauptkomponenten im Antriebssystem sind dabei die Brennstoffzellen, sowie diverse Halbleiterbauteile und Motoren.
Die Komplexität im Kühlsystem entsteht v.a. aus der Tatsache, dass jede der genannten Komponenten unterschiedliche Anforderungen fordert und somit alle Komponenten aufeinander abgestimmt werden müssen. Um auch in einer späten Projektphase auf Änderungen an den Interfaces reagieren zu können, wurde bei der Entwicklung des Kühlkonzepts ein hoher Wert auf die Flexibilität und Anpassungsfähigkeit gelegt.
Das erarbeitete Kühlkonzept basiert auf einer geschlossenen, einphasigen Umlaufkühlung. Hauptkomponenten im Kühlsystem sind mehrere regelbare, redundant ausgelegte, elektrische Pumpen sowie regelbare Ventile. Als Kühlmittel im Kreislauf kommt dabei EGW 50:50 zum Einsatz. Alle Systemkomponenten werden in einem einzigen Kreislauf verknüpft und über einen Hauptwärmetauscher an die Umgebungsluft angebunden. Die einzelnen Komponenten für die Cooling Line sind zumeist inkl. Luftfahrtzertifizierung am Markt erhältlich. Alternativ kann auf Komponenten aus dem Industrie- bzw. Automotivbereich zugegriffen werden. Eine finale Auswahl der Komponenten ist aufgrund der noch starken Variation der systemseitigen Anforderung nicht final getroffen worden.

Stack:

Das im Zuge des Reviews vorgestellte Brennstoffzellen-Konzept für das Flugzeug besteht aus zwei 350 kW, auf Luftfahrtanforderungen angepasste Stacks. Insgesamt kommen 400 Einzelzellen zum Einsatz, welche über Bipolarplatten miteinander verbunden sind. Damit kann eine maximale elektrische Leistung von 700 kW bereitgestellt

werden.
Als Voruntersuchung wurden diverse Designs für die Bipolarplatten (Kanalbreite / -höhe / -anzahl) bezüglich Performance und Homogenität in einem Short Stack, welcher aus 10 Zellen besteht, getestet.
Außerdem wurden diverse elektrische Membran-Elektroden Baugruppe getestet und in Bezug auf ihre Polarisierungskurve bewertet. Hierdurch konnte eine für die Anwendung ideale Kombination identifiziert werden.
Zusätzlich wurden Endplatte Designs entworfen, welche im nächsten Schritt auf Ihre Festigkeit und maximale Verformung mittels FEM Simulation untersucht werden.
Power-Line:
Zum Zeitpunkt der Konzeptionierung wurde eine elektrische Verteilung definiert, die aus Folgendem besteht:
• Ein Hochspannungsnetz
• Ein Niederspannungsnetz (28 Vdc)

Das Hochspannungsnetz versorgt Verbraucher mit einer Nennleistung über 1 kW (Heizung, Kompressoren, Kühlpumpen, elektrische Antriebseinheit), während das Niederspannungsnetz alle Verbraucher versorgt, die weniger Leistung benötigen (Steuer- und Überwachungseinheiten, Sensoren, Ventile…)
Um die Standardisierung zu maximieren, müssen alle Niederspannungsgeräte der Luft- und Raumfahrtnorm EN2282 für 28-V-Gleichstromnetze entsprechen. Der Hochspannungspegel wird direkt von der MTU definiert, da dieser direkt mit der Größe des Brennstoffzellen Stacks verknüpft ist (Anzahl der Bipolarplatten, Größe der aktiven Fläche der Bipolarplatten). Um außerdem die Strommenge zu begrenzen, die bei einem Kurzschluss zwischen einem Hochspannungskabel und dem Hochspannungsnetz in die Struktur induzierte wird, muss eine IT-Konfiguration (Isole-Terre) verwendet werden, während das Niederspannungsnetz eine Standard-TT-Konfiguration (Terre-Terre) verwendet.
Darüber hinaus wird im Hochspannungsnetz ein IMD installiert, um den Zustand der Isolierung des Hochspannungsnetzes gegenüber der Erdungsreferenz zu überwachen.

Propulsion-Line:

Für den Antrieb des Brennstoffzellensystems kommt ein elektrischer Motor der Firma eMoSys zur Anwendung. Diese besteht aus drei Hauptgruppen: Rotor, Stator und Wechselrichter. Die Eckdaten sind dabei eine Nennleistung von 600 kW Wellenleistung bei 15000 rpm. Es fanden umfangreiche experimentelle Tests und Abgleiche der detaillierten Auslegungssimulation mit dem abstrahierten Simulationsmodell statt. Beispielsweise zeigt Abbildung die Effizienz bei verschiedenen Eingangsspannungen. Durch den Ansatz, keine Spannungsstabilisierung der Brennstoffzellenversorgung zu implementieren, sind hier entsprechende Einflüsse zu erwarten und bei der Gesamtsystembetrachtung und Komponentenauslegung zu beachten.

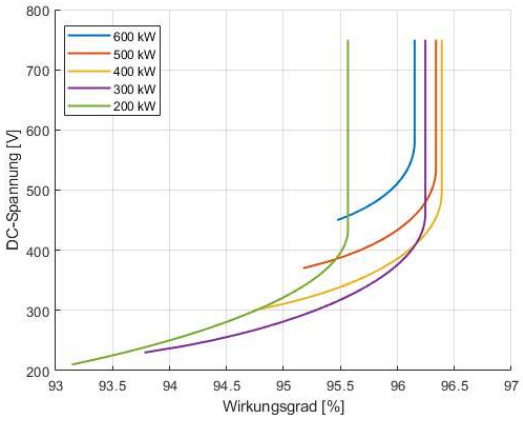

Abbildung 5: Effizienz bei variierender Versorgungsspannung

Control-Line:

Das Reglungssystem hat bei der Brennstoffzelle eine übergeordnete Rolle. Hierzu gehören das Hoch- und Herunterfahren, Lastwechsel, Schutzfunktionen, Optimierung des Wirkungsgrades, Lebensdauer sowie Kosten, Gewicht und Leistungsbedarf. Hierbei unterscheidet sich das System stark von konventionellen Triebwerksregelungssystemen.

Im Zuge des Reviews wurde vorgestellt, wie aus den vorab definierten Anforderungen und Randbedingungen die Kontrollfunktionen und State Machines im Systemmodell abgebildet wurden und sich daraus das Reglersystem, welches in Simulink / Simscape erstellt wurde, ableitet.

Die Architektur und Schnittstellen wurden hierbei mittels MBSE Ansatz modelliert. Um

die Sicherheitsaspekte zu bewerten wurde ein Functional Hazard Assessment durchgeführt. Ebenfalls wurde eine Fault Tree Analysis (FTA) im Rahmen des Preliminary System Safety Assessments (PSSA) durchgeführt.

Damit sind für die Subsysteme des Brennstoffzellenantriebssystems konzeptionell entwickelt und mit einer übergeordneten Referenzsystemarchitektur in einem Systemmodell implementiert. Das Arbeitspaket konnte erfolgreich abgeschlossen werden.

2.4.2 AP 1.2.2 Entwicklung Kompressoren Subsystem „Airline“

Im Rahmen der Kompressorentwicklung in der Airline wurde ein Unterauftrag zur Entwicklung der notwendigen Kompressoren an die Fa. Pankl vergeben.
In 2021 fanden sowohl das Konzept-Review als auch das Design-Review des ausgewählten Konzepts sowie die Beauftragung der Fertigung der Kompressoren statt.
Bei der Auswahl der Kompressoren wurde ein zweistufiges Aufladesystem mit zwei parallel verschalteten Niederdruckverdichtern und einem Hochdruckverdichter ausgewählt (siehe Abbildung 6) um die für die Fluganwendung relevanten Druckverhältnisse und Massenströme (z.B. bei Flight Level FL250) zu erreichen.

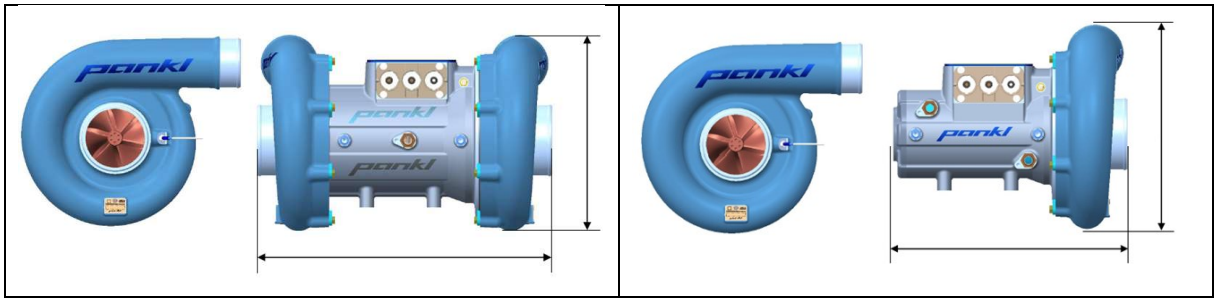

Abbildung 6: Niederdruck- und Hochdruck Verdichterstufe

Für die Auswahl der Verdichterräder wurden Anforderungen an verschieden Betriebspunkte und Flugszenarien mittels Druckverhältnis und Massendurchsatz definiert. Weitere Randbedingungen waren die parasitäre Leistungsaufnahme, Containment-Sicherheit sowie ein kompaktes und leichtes Design.
Bei der Auswahl der Motoren wurden mittels der Betriebspunkte und abgeschätzten Wirkungsgraden der Kompressoren und elektrischen Motoren die notwendigen Leistungen abgeschätzt. Für die Lagerung wurden Luftlager definiert, da sie gewährleisten,

dass keine Kontaminierung der Luft mit z.B. Öl stattfindet, welche die sensiblen Brennstoffzellenstacks beeinflussen kann.

Die finale Auswahl des Verdichterrad-Design wurde anhand von skalierten, bereits vorhandenen Designs getroffen. Hierdurch konnten langfristige Entwicklungszeiten, hohe Entwicklungskosten und Risiken bei der numerischen Neuauslegung der Verdichter vermieden werden.

Die gefertigten Kompressoren wurden folglich (1. Jahreshälfte 2022) beim UA Pankl getestet, wobei diese Tests sich auf den Betrieb der Kompressoren auf Komponentenebene (nicht Verbundtest beider Kompressoren) fokussierten und somit eine Ermittlung der sich ergebenen jeweiligen Kennfelder ermöglichte. Durch diese Tests konnte das Erreichen des TRL5-Levels der Kompressoren auf Komponentenebene (für den geplanten Bodendemonstrator, d.h. nicht flugfähig) bestätigt werden.

Nach erfolgten Einzelkomponententests beim UA Pankl wurden die Kompressoren zu MTU verbracht und stehen somit für Verbundtests (beide Kompressoren sowie weitere Sub-Systeme der Airline, siehe Abbildung 7) zur Verfügung. Die Konzeption, Aufplanung, Konstruktion, Beschaffung und Aufbau des Prüfstands für die o. g. Verbundtests erfolgten außerhalb dieses Fördervorhabens. Die Bestätigung des Versuchskonzepts wurde erfolgreich im November 2022 erfolgreich im Concept Review der Air-Linge gereviewed.

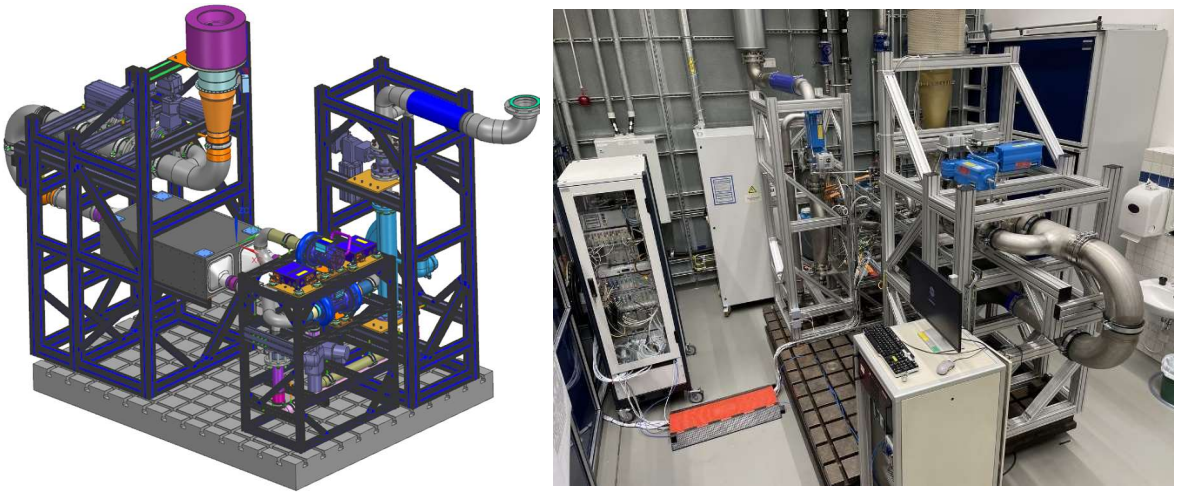

Abbildung 7: Verbundteststand für Kompressoren und weitere Komponenten der Airline

Nach Abschluss des Aufbaus des Verbundteststandes in 2023 wurde mit der Inbetriebnahme begonnen, wobei sich dies sowohl auf die Charakterisierung der Einzelkomponenten wie auch auf das Zusammenspiel aller getesteter Komponenten bezieht. Mit diesem Ergebnisstand sind die Arbeiten innerhalb dieses Arbeitspakets erfolgreich abgeschlossen. Die Tests des Subsystems erfolgten in dem parallelen Fördervorhaben LuFo VI/1 EPS.

2.5 AP 1.3 Beschaffung Langläufer Bodenprüfstandsumgebung

Dieses Arbeitspaket konzentrierte sich auf die Spezifikation und Erstellung der prüfstandsseitigen Wasserstoffinfrastruktur am Werksgelände der MTU München. Dazu wurden zunächst die Anforderungen an solch eine Anlage erarbeitet.
Diese gliedern sich im Wesentlichen in drei Kategorien:

- Kapazität und Lieferfähigkeit der Anlage
- Anzuwendende Sicherheitsvorschriften und behördliche Genehmigungen
- Aufstellort und Einbindung in die bestehende Werksinfrastruktur und Anbindung an die zu versorgenden Prüfanlagen.

Zunächst wurden Abschätzungen für die Dimensionierung der Anlage auf Basis der verschiedenen Verbrauchsszenarien für Wasserstoff am Prüfstand abgeleitet.
Die Sicherheitsfragen und behördlichen Aspekte wurden durch einen erfahrenen externen Dienstleister geklärt. Ein Flächen- und Infrastrukturkonzept wurde erarbeitet. All diese Ergebnisse wurden in einem vorläufigen Lastenheft zusammengefasst. Dieses Lastenheft wurde an potenzielle Lieferanten zur Abstimmung übergeben. In Vorgesprächen wurden verschiedene technische Konzepte für die Wasserstoffversorgung detailliert. Die Annahme einer gemischten Speicherung aus gasförmigen und flüssigen Wasserstoff zur Versorgung der Prüfstände wurde bestätigt und die Angebote dahingehend ausgearbeitet. In der Folge wurden diese bewertet, ein Lieferant ausgewählt (Fa. Linde) und letztlich ein Auftrag zur Erstellung der Anlage erteilt. Diese Anlage (Abbildung 8) gliedert sich in drei Anteile:

1. Die direkte Aufbereitungs- und Zuführungsstrecke in welcher der in den Tanks gespeicherte Wasserstoff aufbereitet, vorkonditioniert und an die Prüfstande bereitgestellt wird. Diese Anlage übernimmt auch die Betankung der Vorratstanks und

beherbergt Sicherheitseinrichtungen sowie auch die für eine Inertisierung der Test- und Tankeinrichtungen benötigte Stickstoffanlage inklusive des Stickstofftanks.

2. Die Bevorratungstanks: Jeweils ein Flüssigwasserstofftank mit 2,5 Tonnen Speicherkapazität und ein Tank zur gasförmigen Speicherung mit 0,5 Tonnen Kapazität.
3. Die umliegende Infrastruktur mit Anfahrtswegen, Abtankflächen und Sicherheitsabsperrungen

Darüber hinaus wurden die werksseitigen Arbeiten zum Aufbau und Anschluss der H2-Tankanlage an die Prüfstände ausgearbeitet, geplant und beauftragt. Diese umfassen erdeingebettet, nach oben offene Medienkanäle, die an den Wegenetzen mit Schwerverkehr tauglichen Überbauungen versehen sind. Dies gewährleistet, dass H2 Leckagemengen in die Umgebung entweichen können und sich unterirdisch oder in Hohlräumen keine gefährliche Ansammlungen von Wasserstoff bilden können.
Die Einreichplanung zur Baugenehmigung wurde mit den durch den Auftragnehmer bereitgestellten Bauunterlaugen durchgeführt.
Das Konzept zum Betrieb der H2-Anlagen wurde erstellt und mit dem TÜV und dem Lieferanten abgestimmt. Dies umfasst u.a. die thermischen Sicherheitsventile, die gefahrlose Entspannung / das Spülen von Rohrleitungen und die Druckabsicherung.
Um den Brandschutz zu benachbarten Gebäuden, Anlagen und insbesondere zu den in der Nähe befindlichen unterirdischen Kerosin Kraftstofftanks der Prüfstände für Verbrennungstriebwerke sicherzustellen, wurden mehrere Lösungen untersucht und schließlich die Errichtung einer Brandschutzwand beauftragt.
Beschaffung und Aufbau der gesamten H2-Tankanlage wurde mit MTU-Eigenmitteln durchgeführt (Invest). Mit dem Aufbau der Anlage wurde Anfang 2024 begonnen; Inbetriebnahme ist für Herbst 2024 vorgesehen.

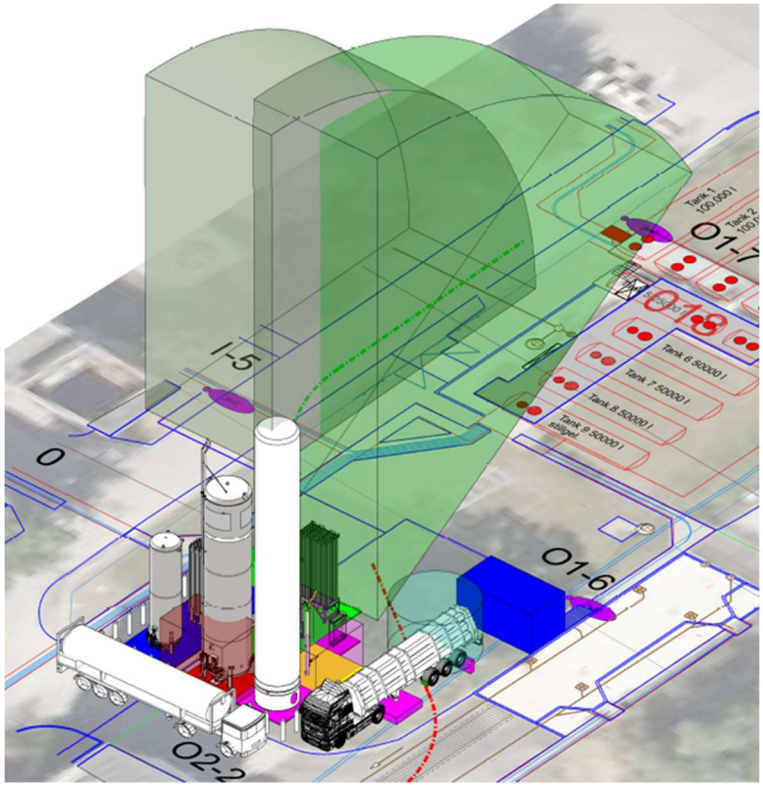

Abbildung 8: Wasserstofftank-Infrastruktur mit Sicherheitszonen

2.6 AP 2.3 Konzept Integration Systeme und Subsysteme Antrieb und Flugzeug

Abbildung 9 zeigt die Flugzeugintegration der verschiedenen Subsysteme im Erprobungsträger.

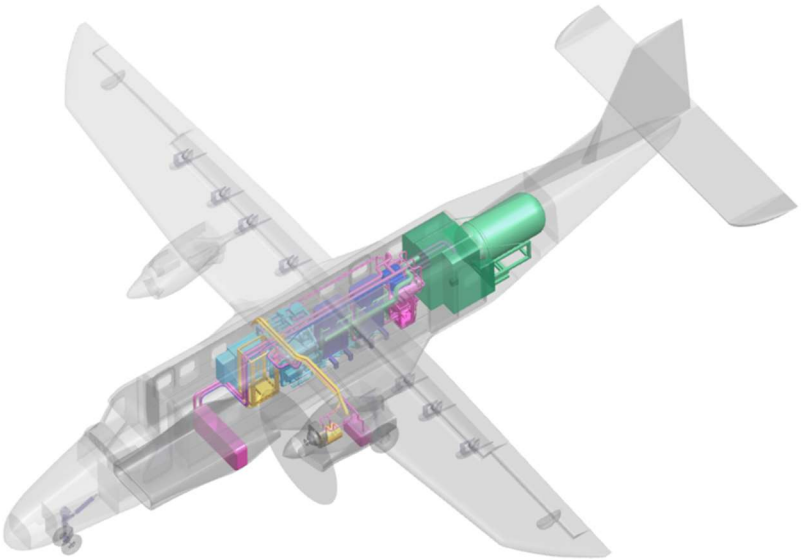

Abbildung 9: Digital-Mock-Up des Antriebssystems der MTU (Stand Dez 2023)

Im AP2.3 wurde innerhalb des Projektes HEPS das Integrationskonzept für das brennstoffzellenbasierte Antriebssystem zusammen mit dem DLR erarbeitet. Dabei wurde die Luftlinie mit ihren Verdichtern und Befeuchtungseinheit vor den Brennstoffzellen und die Kühlungslinie entsprechend dahinter platziert. Das Integrationskonzept wurden im Rahmen des durchgeführten CR (Concept Review) im Januar 2023 freigegeben.

Eine grundlegende Definition der Schnittstellen zwischen Do228 Erprobungsträger und Antriebssystem wurde erstellt. Damit sind die Arbeiten des Arbeitspaketes erfolgreich abgeschlossen worden.

AP2.3 Die Integrationskonzepte für die Subsysteme des Brennstoffzellenantriebs haben TRL3 erreicht

2.7 AP 3.1 Sicherheitsanalysen

Im Zuge der Sicherheitsanalyse wurden Design Failure Mode Analysen (DFMEA) für die Subsysteme und komplexe Komponenten durchgeführt. Auf Basis der DFMEAs ist eine detaillierte Analyse der Fehlermodi möglich.

Des Weiteren wurden Functional Hazard Assessments (FHA) für den Electrical Powertrain und das Hydrogen Fuel System erstellt. Darin werden sämtliche funktionale Fehlerfälle identifiziert und die Fehlereffekte klassifiziert. Davon abgeleitet ergeben sich Sicherheitsanforderungen für das Antriebskonzept. Anschließend wurden mit den Ergebnissen der FHA Fehlerbäume bis auf Komponenten-Ebene unter Betrachtung des Triebwerkskonzepts erstellt und analysiert. In Abbildung 10 wird exemplarisch ein Leckage Fehlerbaum für Wasserstoff-Leckagen vom EPT in die Flugzeugkabine gezeigt. Diese Top-Down Analyse wird durch Common Cause Untersuchungen ergänzt. Die Ergebnisse der Sicherheitsanalysen werden im Design berücksichtigt, damit dieses die Sicherheitsanforderungen erfüllen kann. Damit konnten die Ziele des Arbeitspaketes erfolgreich erreicht werden.

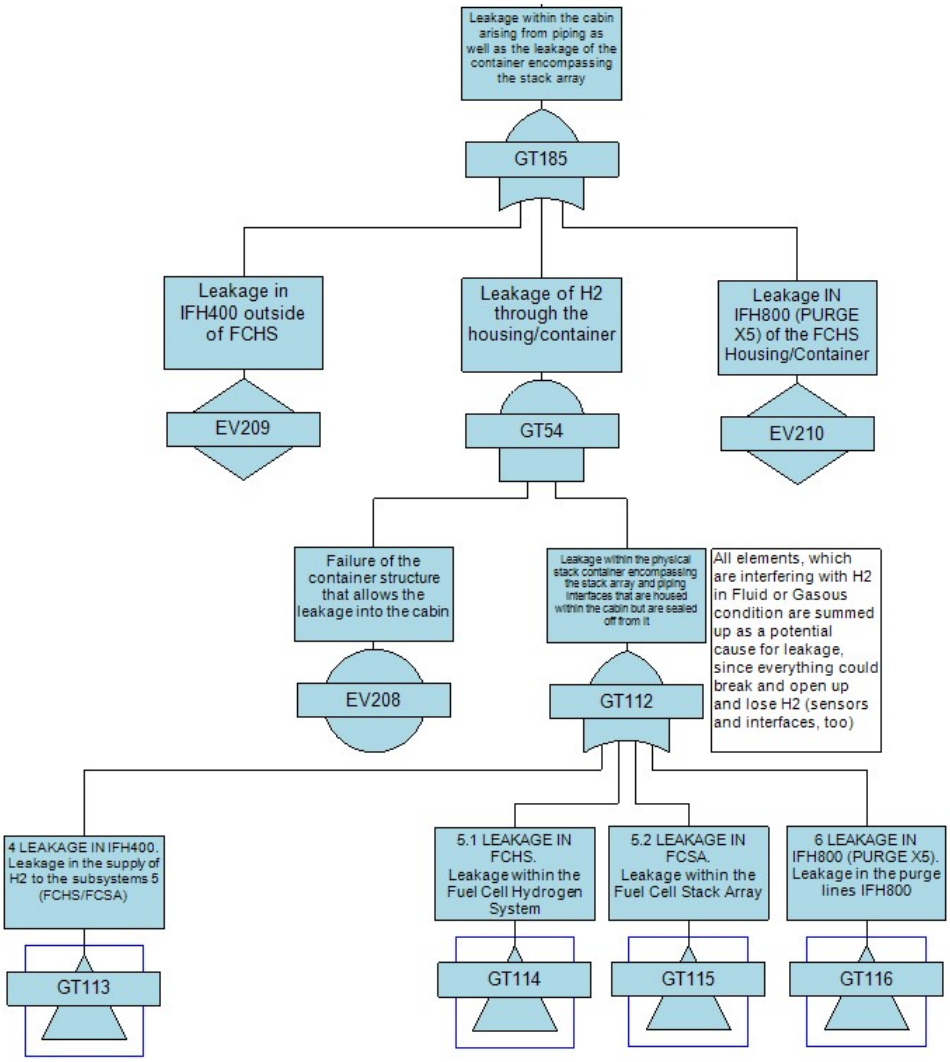

Abbildung 10: Fehlerbaum - Leckage vom EPT in die Flugzeugkabine

2.8 AP 3.2 Konfigurationsmanagement

Als zugelassener Entwicklungs- und Herstellbetrieb der Luftfahrt verfügt die MTU über etablierte Prozesse, Methoden und Tools zum Konfigurationsmanagement von Luftfahrt Bauteilen im Entwicklungs- sowie auch im Produktionsbereich. In Abstimmung mit dem DLR bezüglich der zu verwendenden Prozesse und Tools wurde eine sinnvolle Trennung im Konfigurationsprozess zwischen Antrieb und Flugzeug erarbeitet, so dass jeder Partner im wesentlichen seine Prozesse und Tools anwenden kann und eine Schnittstelle zur Übergabe und durchgängigen Verfolgung definiert ist. In der Folge wurde MTU intern auf Basis der bestehenden MTU Prozesse ein Konfigurationsmanagement für dieses Projekt aufgesetzt. Dabei wird grundsätzlich zwischen

Bauteilen mit und ohne Flugfreigabe (PtF) unterschieden, um den Qualitäts- und Qualifizierungsaufwand für Bauteile, die nur für einen Labor Testbetrieb (Rig-Use-Only) von denen für den Flugbetrieb (Development-Use-Only) zu minimieren und abzugrenzen. Die Nummernvergabe erfolgt dabei datenbankunterstützt.
Für das Antriebssystem wurde eine Produktstruktur erstellt, von der die Entwurfsstruktur als Basis für die späteren Zeichnungen und Teilelisten abgeleitet wurde.
In diesem Rahmen wurde auch das Vorgehen zur Ermittlung der korrekten Bauteileklassifizierung von derzeit nicht flugzugelassener Hardware, insbesondere für den Elektromotor, statt. Weitere Arbeiten hierzu finden im Rahmen von EbAnDo228 statt.

Für die bereits während dem Projektzeitraum HEPS laufenden Tests und der schon laufenden Hardwarebeschaffung wurden nach diesem Prozess bereits Entwürfe, Zeichnung und Bauteilspezifikationen angelegt.
Des Weiteren wurde ein allgemeiner Disclaimer Text für anstehende Zeichnungen und Entwürfe erarbeitet. Dieser dient als Hinweis auf die derzeit nicht flugzugelassene Hardware, um den richtigen Umgang / Einbau derer zu gewährleisten.

Die Freigabe des Konfigurationsmanagementplans, welcher in EPS vorbereitet wurde, erfolgte mit Abschluss des Meilenstein 3.2a „Konfiguration zum Konzept Review. Damit wurden die Ziele des Arbeitspaketes erfolgreich erreicht.

2.9 AP 4.1 Flugversuchsplanung

Gemeinsam mit dem DLR wurde ein Flugversuchsprogramm für die Erprobung des unmodifizierten Flugzeugs zur Basischarakterisierung im Ausgangszustand sowie mit Modifikationen bis hin zum finalen Einbau des Brennstoffzellenantriebs erstellt.
Dabei ergab sich die Aufteilung in 3 Versuchsphasen:

- Phase 1: Charakterisierung des unmodifizierten Flugzeuges zur Leistungsvalidierung und Bestätigung von Projektanforderungen.
- Phase 2: Flugversuche mit Außenlasten.
- Phase 3: Erprobungsflüge mit dem Brennstoffzellenantriebsstrang.

Für die Phase 1 des unmodifizierten Flugzeuges erstellte die MTU eine konkrete Anforderung zur Instrumentierung der Flugzeugstruktur im Rumpf und Flügelbereich, an denen die Komponenten des Brennstoffzellenantriebes montiert werden, um die tatsächlichen Lasten und Schwingungen zu vermessen und die angenommenen Last- und Schwingungsprofile zu bestätigen.

Die Messungen im Rumpf finden dazu an den für den Einbau der Brennstoffzellenantriebskomponenten vorgesehenen Montagepunkte auf den Sitzschienen statt. Die Positionen sind in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**11 dargestellt. In der Triebwerksgondel sind Messstellen am bestehenden Getriebe vorgesehen (siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**), die Lasten und Vibrationsspektren am Interface zwischen dem späteren E-Motor und dem Getriebe erfassen sollen.

Damit sind die generellen Anforderungen abgestimmt und die Ziele des Arbeitspaket erreicht worden.

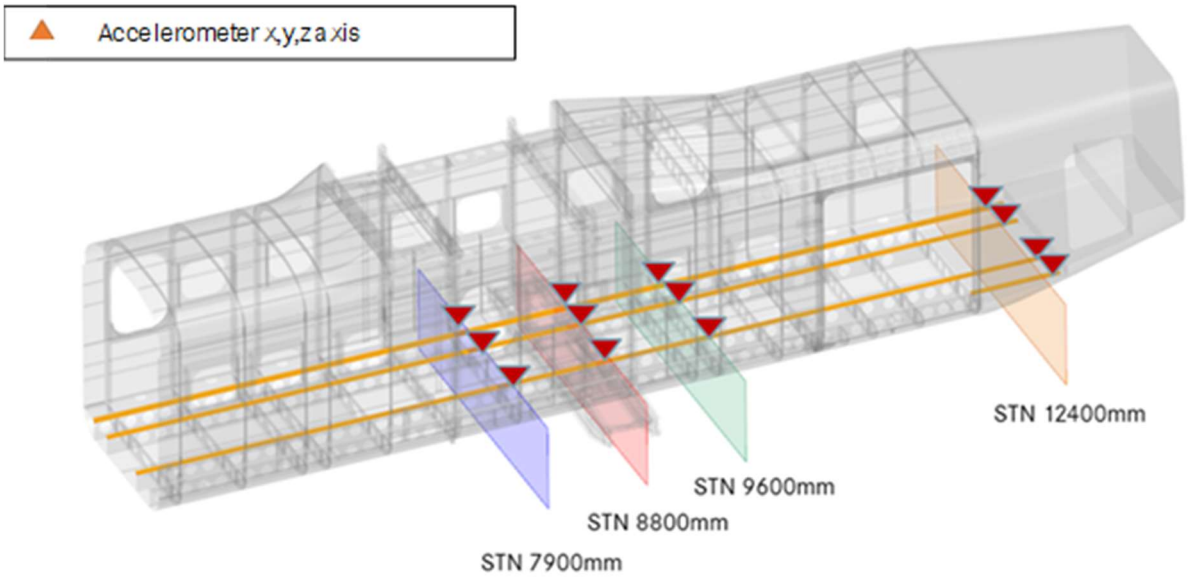

Abbildung 11: Position der Schwingungsaufnehmer am Rumpf

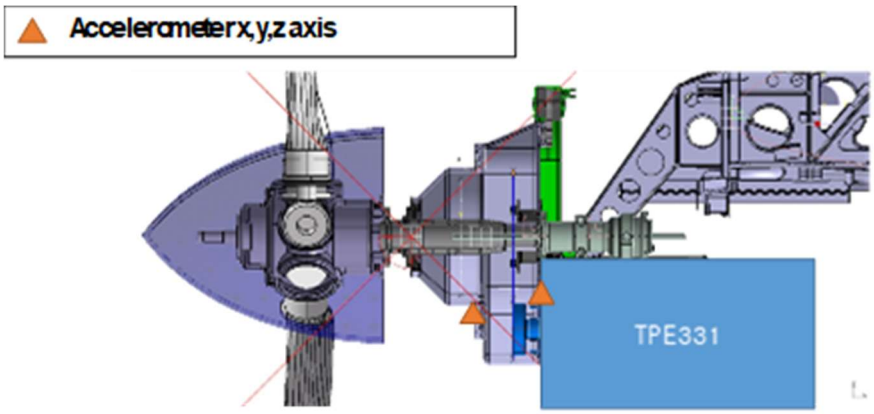

Abbildung 12: Position der Schwingungsaufnehmer am bestehenden Triebwerk

3 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Projektstrukturplan des Gesamtvorhabens
Abbildung 2: Zeitplan HEPS
Abbildung 3: Referenz-Architektur 'Fliegende Brennstoffzelle'
Abbildung 4: Für die Systementwicklung genutzte Datenbanken und Systemmodelle
Abbildung 5: Effizienz bei variierender Versorgungsspannung
Abbildung 6: Niederdruck- und Hochdruck Verdichterstufe
Abbildung 7: Verbundteststand für Kompressoren und weitere Komponenten der Airline
Abbildung 8: Wasserstofftank-Infrastruktur mit Sicherheitszonen
Abbildung 9: Digital-Mock-Up des Antriebssystems der MTU (Stand Dez 2023)
Abbildung 10: Fehlerbaum - Leckage vom EPT in die Flugzeugkabine
Abbildung 11: Position der Schwingungsaufnehmer am Rumpf
Abbildung 12: Position der Schwingungsaufnehmer am bestehenden Triebwerk