

Luftfahrtforschung und -technologie

Abschlussbericht

**„Erforschung elektrischer Antriebseinheiten durch
Flugerprobung in einem Zubringerflugzeug und auf-
bauender technologischer Weiterentwicklung“**

Electric Propulsion System (EPS)

Förderkennzeichen **20M1907B**

Laufzeit: 01.03.2020 bis 30.11.2023

Berichterstatter: Mark Vonnoe

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

München, August 2024

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Darstellung und Ergebnisse der Arbeitspakete	4
2.1	Projektstrukturplan.....	4
2.2	Finaler Zeitplan	6
2.3	Erreichte Ergebnisse und technische Darstellung	6
2.3.1	AP1.3 Konzept und Vorentwicklung Subsystem Luftlinie.....	6
2.3.2	AP1.5 Konfigurationsmanagement	11
2.3.3	AP2.1 Unterstützender Entwicklungsflugversuch.....	12

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 von des CO₂-Verbrauches bzw. der Klimawirkung ist die Entwicklung und Umsetzung jener für eine ökologisch nachhaltigere Luftfahrt der Zukunft zwingend notwendig.

Das MTU-Teilvorhaben im Verbund LuFo VI-1 EPS widmete sich daher der Bereitstellung geeigneter Antriebstechnologien, um gesetzte Ziele hinsichtlich Emissionsreduzierung zu erreichen.

Mit dem Ziel die Vorreiterrolle der deutschen Luftfahrtindustrie weiter auszubauen, hatte sich eine Kooperation aus den Partnern DLR und MTU gebildet, um für einen brennstoffzellenbasierten Antrieb mittelfristig Technologiereife zu erreichen (für eine spätere Anwendung in der Commuter- bzw. Regio-Klasse).

Das MTU-Teilvorhaben umfasste in AP1.3 die Konzeptionierung des Subsystems „Luftlinie“ des Antriebsstrangs inkl. Tests (Schwerpunkt). Außerdem wurden das AP 1.5 und AP 2.1 in Zusammenarbeit mit dem Partner DLR bearbeitet.

2 Darstellung und Ergebnisse der Arbeitspakete

Nachfolgend werden der Projektstrukturplan und der Zeitplan für die einzelnen Hauptarbeitspakete bzw. Arbeitspakete dargestellt.

2.1 Projektstrukturplan

Abbildung 1 zeigt den Projektstrukturplan des Gesamtvorhabens.



Abbildung 1: Projektstrukturplan des Gesamtvorhabens

Wie aus dem Projektstrukturplan in Abbildung 1 ersichtlich, bearbeitete die MTU in Arbeitspaket AP 1.3 „Konzept und Vorentwicklung Subsystem Luftlinie“ eigenständig die Konzeptionierung und Vorentwicklung von Teilkomponenten der Luftlinie des Brennstoffzellen-Antriebssystems. In AP 1.5 „Konfigurationsmanagement“ wurden in enger Abstimmung mit dem DLR notwendige Prozesse und Tools zur Implementierung eines Konfigurationsmanagement für das Subsystem Air Line des Antriebssystem untersucht, sodass eine Verknüpfung zum Konfigurationsmanagement für eine Fluganwendung möglich ist. In AP 2.1 unterstützte MTU das DLR bei der Erstellung des Testprogramms für den Flugversuch und stimmte die für Vorversuche notwendigen Testpunkte im Flugversuch mit dem Partner DLR ab.

Tabelle 1 ordnet den Arbeitspaketen die zuständigen Teilprojektleiter zu.

Arbeitspakete	Teilprojektleiter
AP1.3: Konzept und Vorentwicklung Subsystem Luftlinie	Hr. Dr. A. Fuchs
AP 1.5: Konfigurationsmanagement	Hr. R. Preuß
AP 2.1: Unterstützender Entwicklungsflugversuch	Hr. C. Steffen

Tabelle 1: Auflistung der Arbeitspakete mit durchführenden Teilprojektleitern

Membranbefeuchtung geändert werden. Ergebnisse aus den Versuchen mit der Wassereinspritzung wurden dahingehend verwendet, dass die notwendige Abkühlung der Luft aus dem Kompressor System, nach diesem Wirkprinzip erfolgt.

In Abbildung 3 ist dargestellt, dass alternativ mit einem Membranbefeuchter in Kombination mit einer Wassereinspritzung dieses Ziel erreicht werden kann.

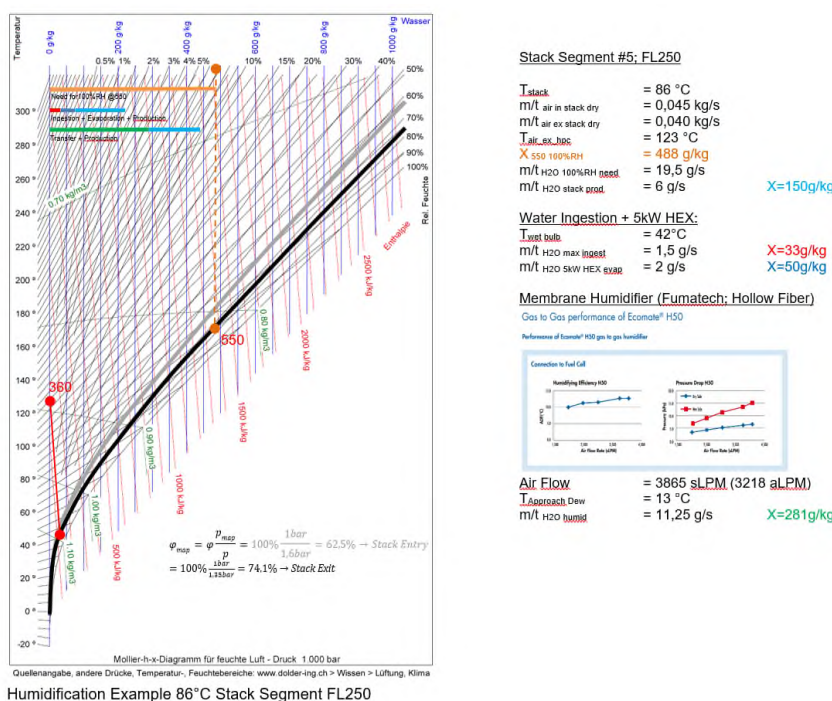


Abbildung 3: Mollier Diagramm mit Wasserbilanz

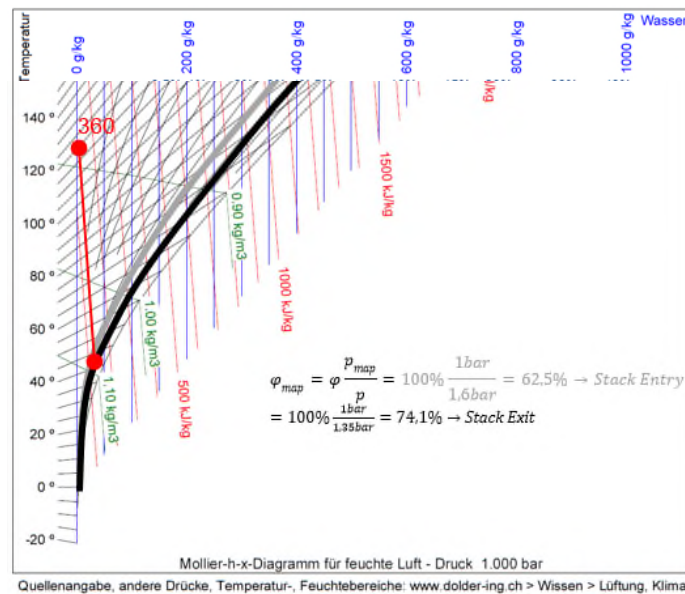
Der somit eingeleitete Wechsel der Konfiguration zugunsten einer passiven Membranbefeuchtung erfolgte und forderte folglich die Generierung einer Datenbasis, sowohl durch Vorstudien, wie auch durch experimentelle Ermittlung der Befeuchtungsleistung und -effizienz der neuerlichen Konfiguration.

Hierfür wurden mehrere passive Befeuchter unterschiedlicher Hersteller getestet und bzgl. ihrer Befeuchtungsleistung, -effizienz und den sich einstellenden Druckverlust bewertet. Getestet wurden drei Hohlfaserbefeuchter von drei unterschiedlichen Herstellern, sowie weitere Tests von einem Hohlfaserbefeuchter und einem Membranbefeuchter gestartet.

Es konnte durch diese Studien nachgewiesen werden, dass auf dem Wege der passi-

ven Befeuchtung eine ausreichende Befeuchtung der Membranen des Stacks erreichbar ist und dies bei allen relevanten Betriebspunkten und -bereichen. Ebenfalls konnte durch die Passivität der Konfiguration die Komplexität des Gesamtsystems reduziert werden.

Zusätzlich konnte festgestellt werden, dass sich die aktive Wassereinspritzung sehr gut als Ergänzung für ein passives Befeuchtungssystem eignet, um schnell auf transiente Änderungen, insbesondere der Lufttemperatur nach der Hochdruck-Kompressorstufe (siehe Abbildung 4), zu reagieren.



Humidification Example 86°C Stack Segment FL250

Abbildung 4: Mollier Diagramm der Wassereinspritzung zu Kühlzwecken

Ebenfalls kann eine aktive Wassereinspritzung eine unterstützende Funktion beim An- und Hochfahren eines Brennstoffzellensystems erfüllen.

Hinsichtlich der Verbundtests wurde die Konzeption, Aufplanung, Konstruktion, Beschaffung und Aufbau des Prüfstands abgeschlossen. Das Versuchskonzept wurde erfolgreich gereviewed (Bestandteil von HEPS). Der Versuchstand ist in Abbildung 5 einerseits in seinem konstruktiven Endplanungszustand (Abbildung 5 links) sowie im aufgebauten Zustand (Abbildung 5 rechts) dargestellt. Somit wurde der Gesamtaufbau des Versuchstandes erfolgreich abgeschlossen.

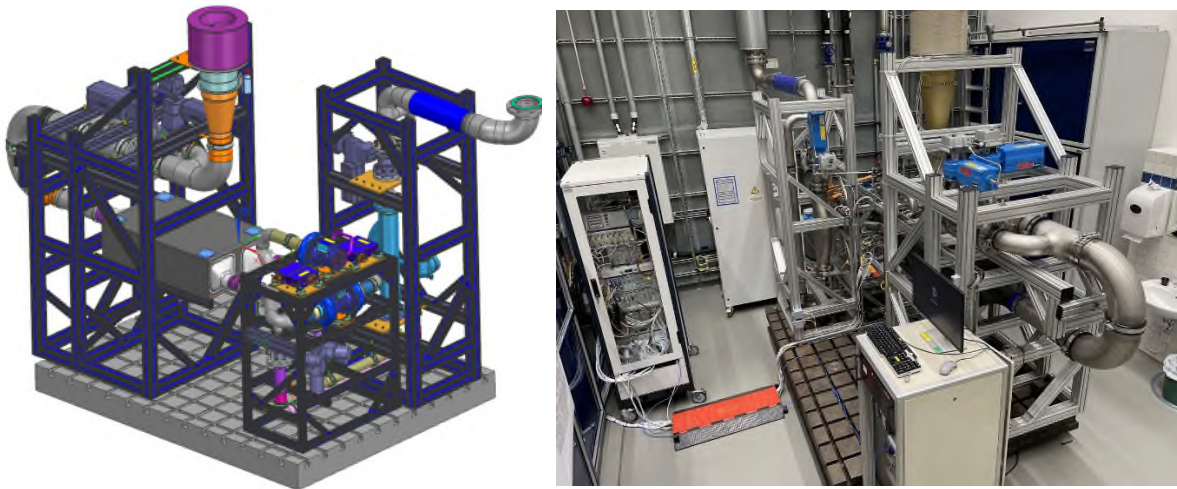


Abbildung 5: Verbundteststand für Kompressoren und weitere Komponenten der Airline

Im Anschluss wurde die Inbetriebnahme gestartet, welche sowohl die jeweiligen Einzelkomponenten wie auch den Gesamtaufbau betreffen.

Im Zuge der Inbetriebnahme erfolgte eine Charakterisierung der einzelnen Versuchskomponenten wie auch des gesamten Aufbaus, was wiederum ermöglicht, sowohl die Prüfstandssteuerung und –regelung konkret auf die vorherrschenden Rand- und Rahmenbedingungen abzustimmen, als auch eine Kalibrierung von numerischen Modellen (Digital-Twin) vorzunehmen.

Ebenfalls beginnend mit der Inbetriebnahme und fortgesetzt in den nachfolgenden Messkampagnen konnten Messergebnisse für die spezifischen Einzelkomponenten, wie auch den komplexen und in Interaktion der Einzelkomponenten stehenden Gesamtaufbau, gewonnen werden. Exemplarisch sind derartige Messergebnisse in Abbildung 6, Abbildung 7, Abbildung 8 und Abbildung 9 dargestellt.

Damit konnten alle Ziele des Arbeitspaketes erfolgreich erreicht werden.

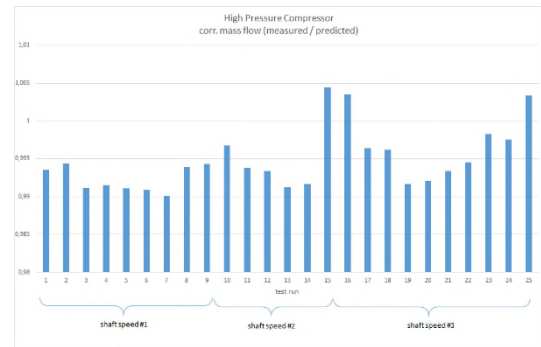
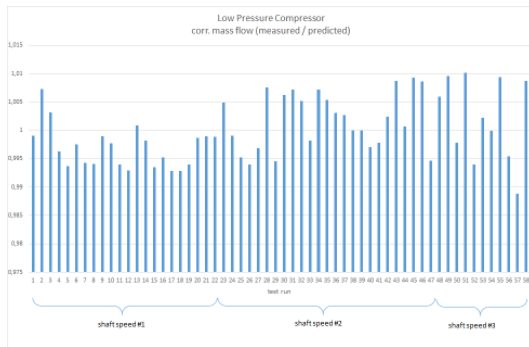


Abbildung 6: Exemplarische Messergebnisse bzgl. des korrigierten Massenstroms des Kompressionssystems des Versuchsaufbaus

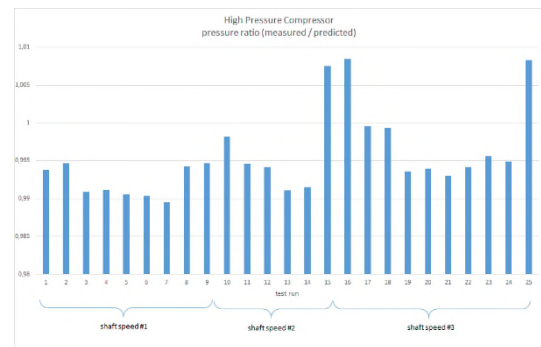
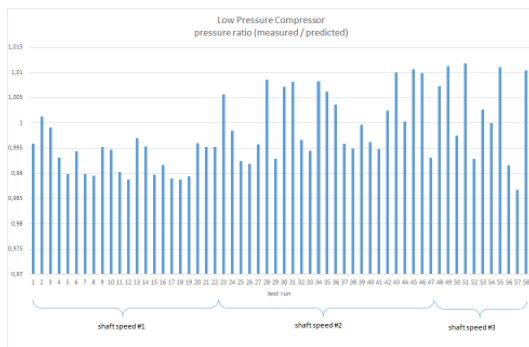


Abbildung 7: Exemplarische Messergebnisse bzgl. des Druckverhältnisses des Kompressionssystems des Versuchsaufbaus

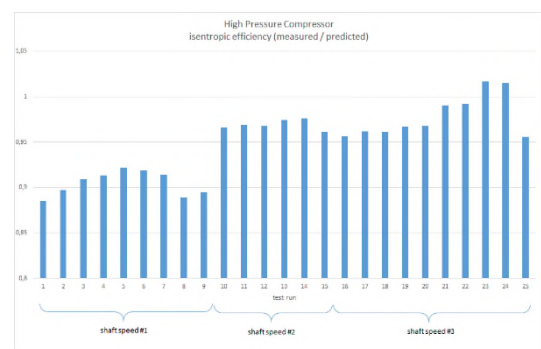
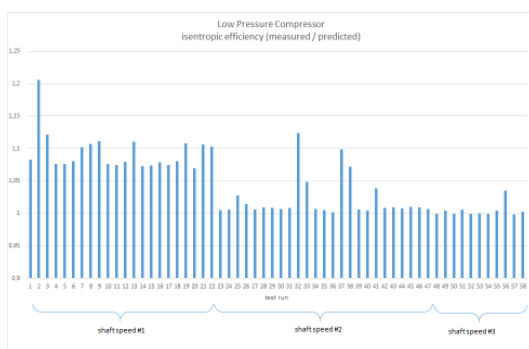


Abbildung 8: Exemplarische Messergebnisse bzgl. des Wirkungsgrades des Kompressionssystems des Versuchsaufbaus

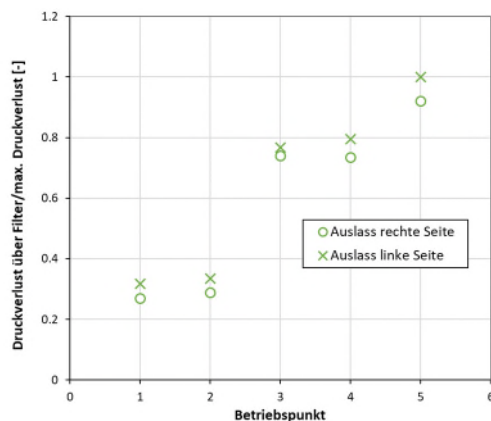


Abbildung 9: Exemplarische Messergebnisse bzgl. des Luftfilters des Versuchsaufbaus

2.3.2 AP1.5 Konfigurationsmanagement

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes erfolgte die Identifizierung und Abstimmung der notwendigen Prozesse und Tools zur Implementierung eines Konfigurationsmanagements, damit eine Gesamtkonfiguration für das Projekt gepflegt und überwacht werden kann.

Die Konfigurationsarbeiten umfassten die System Breakdown Strukturierung nach der internationalen Norm ATA2200, wie auch deren Einlastung zur Umsetzung dieser Definitionen in den MTU IT-Systemen. Zudem wurde die Definition und Erstellung der projektspezifischen Entwurfs- und Teilenummernsystematik (als Pilot diente das Subsystem Air Line) erstellt.

Ein Prozess der Entwurfserstellung zur Absicherung einer permanenten, nachvollziehbaren und auditierbaren Technik- und Bauteildefinition wurde abgestimmt und eingeführt, sodass systemisch belastbare Hardwarebestellungen und -fertigungen erfolgen können.

Über die Vergabe von Bauteilnummern und dazugehörigen Zeichnungen wurden erste Bauteile der Cooling Line Sektion offiziell bei ausgewählten Zulieferern quotiert.

Im Rahmen der Vorbereitung der bisher erstellten Entwürfe für die Air Line und das im Berichtszeitraum abgeschlossene Konzeptreview wurden die Regeln und Prozesse der dafür notwendigen Konfiguration, bezogen auf das FFC-System, erfasst und sind eindeutig.

Die Freigabe des Konfigurationsmanagementplans erfolgte durch die Dokumentation und Durchführung eines Konzept Reviews.

_inlet_4 (Inlet4_NACA_inlet.4.1)
ird_air_inlet_1 (Inlet5_standard_air_inlet.1.1)
r (Inlet6_circular.1)

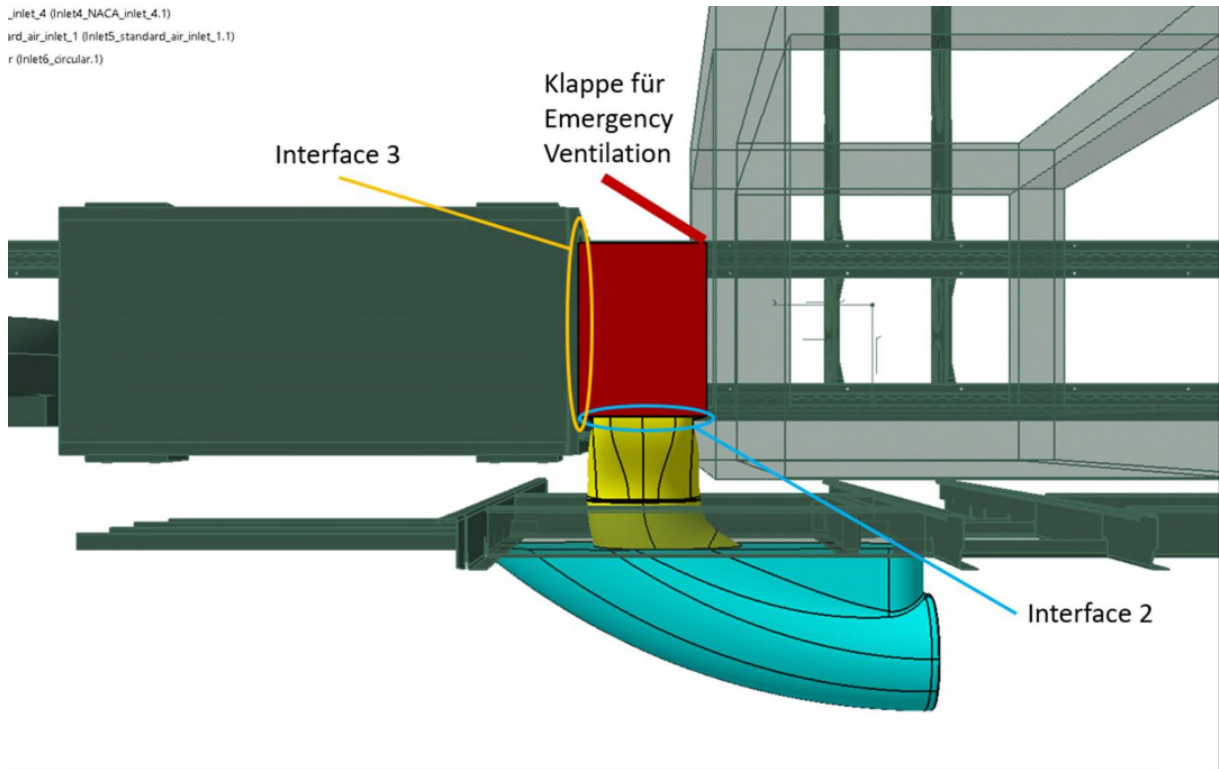


Abbildung 11: Untersuchung Lufteinlässe am Flugzeug