

Spitzencluster Luftfahrt - Metropolregion Hamburg

Verbundprojekt:
Kabinentechnologie und multifunktionale Brennstoffzelle

Teilprojekt:
Wassermanagement für den Greenliner

FKZ: 03CL03F

Schlussbericht

Projektpartner:

AOA apparatebau gauting gmbh
Ammerseestraße 45 – 49
D – 82131 Gauting

Datum:

28. Februar 2014

Projektleiter:

Dipl.-Ing. Alexander Rosam

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

28. Februar 2014		
------------------	--	--

Präambel

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03CL03F gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. AUFGABENSTELLUNG.....	7
2. VORAUSSETZUNGEN UNTER DENEN DAS VORHABEN DURCHGEFÜHRT WURDE.....	8
3. PLANUNG UND ABLAUF DES VORHABENS.....	9
4. WISSENSCHAFTLICH TECHNISCHER STAND ZU VORHABENSBEGINN.....	12
5. ZUSAMMENARBEIT MIT ANDEREN STELLEN	13
6. VERWENDUNG DER ZUWENDUNG.....	14
6.1. Zielsetzungen und Ergebnisse	14
6.2. Einsatz Personal, Material, Fremdleistung	15
7. LEERKAPITEL	16
8. AUSFÜHRLICHE DARSTELLUNG DER PROJEKTERGEBNISSE.....	17
8.1. AP 1 Anforderungen.....	17
8.1.1. Nutzungsmöglichkeiten des Brennstoffzellen-Prozesswassers	17
8.1.2. Umsetzung und Machbarkeitsanalyse	18
8.1.3. Definition der High-Level-Anforderungen.....	18
8.1.4. Rückkopplung der Anforderungen auf weitere Flugzeugsysteme	19
8.2. AP 2 Konzepte	20
8.2.1. Konzeptdefinition Wassergenerierung und Konzeptauswahl	20
8.2.2. Systemsimulation	20
8.3. AP 3 Spezifikation	22
8.3.1. Systemspezifikation Wassergenerierung.....	22
8.3.2. Systemspezifikation Wassergenerierung.....	23
8.3.3. Prototypenentwicklung	25
8.4. AP 4 Integration	32
8.4.1. Prüfstands Aufbau.....	32
8.4.2. Funktionstests	33
8.4.3. Qualifikationstests	34
8.5. AP 5 Test und Verifikation	34
8.5.1. Systemintegration und Systemtests	34
8.5.2. Systembewertung / Lessons Learnt	34
9. DARSTELLUNG DES VORAUSSICHTLICHEN NUTZENS UND DER VERWERTBARKEIT DER ERGEBNISSE	36
10. DARSTELLUNG DES WÄHREND DER DURCHFÜHRUNG BEKANNT GEWORDENEN FORTSCHRITTS BEI ANDEREN STELLEN	37
11. DARSTELLUNG DER GEPLANTEN ODER ERFOLGTEN VERÖFFENTLICHUNGEN.....	37

28. Februar 2014		3
------------------	--	---

Verzeichnis der Bilder

Abbildung 3-1: Strukturplan des Vorhabens „Kabinentechnologie und multifunktionale Brennstoffzelle“	9
Abbildung 3-2: AOA Balkenplan Teilprojekt TP3.2	11
Abbildung 8-1: Architektur 1 Wassergenerierungssystem	22
Abbildung 8-2: Architektur 2 Wassergenerierungssystem	23
Abbildung 8-3: Funktionsmuster Kondensator (NIP-BRIST)	25
Abbildung 8-4: Varianten von Strömungskanälen.....	26
Abbildung 8-5: Geschwindigkeitsvektoren.....	27
Abbildung 8-6: Temperaturverteilung	27
Abbildung 8-7: Modellierung Wellenrohr mit symmetrischer Fortsetzung	28
Abbildung 8-8: Modellierung Strömungsverteilung	29
Abbildung 8-9: Strömungsverteilung seitlich geführter Sammler	30
Abbildung 8-10: Strömungsverteilung zentral geführter Sammler.....	30
Abbildung 8-11: Wassertank	31
Abbildung 8-12: Wasserpumpe	31
Abbildung 8-13: Wassertank-Prüfstand.....	32
Abbildung 8-14: Leistungskennlinien Wasserpumpe	33

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 6-1: Gegenüberstellung der Zielsetzungen und Ergebnisse	14
Tabelle 8-1: Nutzungsmöglichkeiten für BZ-Prozesswasser.....	17
Tabelle 8-2: Kondensationsparameter	20
Tabelle 8-3: Funktionstests Wassertank	33

Abkürzungen

ATA	Air Transport Association
BRINKS	Brennstoffzelle, Infrastruktur, Komponenten und Systeme
BZ	Brennstoffzelle
DAL	Design Assurance Level
EFFESYS	Öko-effiziente Flugzeugsysteme für die nächste Generation
FC	Fuel Cell
PEM	Polymerelektrolytmembran
MF	Multifunktional(e)
TrinkwV	Trinkwasserverordnung
TRL	Technology Readiness Level (Technologiereifegrad)
USPHS	United States Public Health Service
WGS	Wassergenerierungssystem
ZAL	Zentrum für Angewandte Luftfahrtforschung

1. AUFGABENSTELLUNG

Der Weltluftverkehr wird sich in den nächsten 15 Jahren mit einer prognostizierten jährlichen Wachstumsrate von ca. 4 - 5% verdoppeln. Um dem Klimawandel zu entgegnen, hat die ACARE2020 (Advisory Council for Aeronautical Research) die Vision definiert, dass bis zum Jahre 2020 zukünftige Generationen von Verkehrsflugzeugen sparsamer, sauberer und leiser werden sollen. Die umweltrelevanten Ziele sind:

- Reduzierung der CO₂-Emissionen um 50% pro Fluggastkilometer,
- Reduzierung der NO_x-Emissionen um 80% pro Fluggastkilometer,
- Reduzierung des wahrgenommenen Lärms um 50% des gegenwärtigen Durchschnittslärmpegels.

Diese Zielsetzungen erfordern die Entwicklung und den Einsatz neuer und nachhaltiger Technologien, die äußerst effizient und schadstoffarm sind. Brennstoffzellen bieten ein großes Potential zur umweltschonenden elektrischen Energieerzeugung mit einem hohen Wirkungsgrad von bis zu 60%. Polymerelektrolytbrennstoffzellen können daher in Verbindung mit einem multifunktionalen Systemansatz einen wesentlichen Beitrag zur Ökoeffizienz zukünftiger Flugzeuggenerationen leisten. Hydraulische und pneumatische Systeme können durch elektrische Systeme und Komponenten ersetzt werden (z.B. Auxiliary Power Unit, Bleed Air, Bodenstromversorgung, Ram Air Turbine). Die Multifunktionalität beinhaltet, dass neben der Bereitstellung von elektrischer Energie auch die im Betrieb der Brennstoffzelle kontinuierlich entstehenden Prozessprodukte Wasser und sauerstoffreduzierte Kathodenabluft (Inertgas) im Flugzeug genutzt werden können. Das Wasser aus der Brennstoffzelle kann den Frischwasserbedarf reduzieren, das Abgas zum Brandschutz verwendet werden.

Im Verbundvorhaben „Kabinentechnologie und multifunktionale Brennstoffzelle“ sollen die Einsatzmöglichkeiten einer Brennstoffzelle im Flugzeug erforscht und anhand von Funktionsmustern der Nachweis erbracht werden, dass durch die Multifunktionalität der Brennstoffzelle das Gesamtgewicht des Flugzeugs reduziert, die operationellen Kosten gesenkt und somit das Flugzeug umweltfreundlich betrieben werden können.

In diesem Vorhaben sollen die möglichen Nutzungsarten des Brennstoffzellen-Prozesswassers gegenübergestellt und bewertet werden. Es sollen neue Systemarchitekturen für Wassermanagementsysteme innerhalb des multifunktionalen Brennstoffzellensystems im Hinblick auf eine spätere Flugzeugintegration definiert werden. Anschließend soll der Technologienachweis eines Wassergenerierungssystems (WGS) als Teil des Wassermanagements für eine ausgewählte Anwendung erbracht werden. Die wichtigsten Funktionen des Wassergenerierungssystems sind die Gewinnung des Prozesswassers, die Lagerung, der Transport und die Aufbereitung abhängig von der Anwendung.

28. Februar 2014		7
------------------	--	---

2. VORAUSSETZUNGEN UNTER DENEN DAS VORHABEN DURCHGEFÜHRT WURDE

AOA gehört seit Jahrzehnten zu den führenden Herstellern verschiedener Systeme und Geräte für die Luftfahrt. AOA bietet Lösungen für Wasserversorgung und Abwasserentsorgung, Brandschutz und Klimatisierung an - Produkte, die wesentlich zu Sicherheit und Komfort der Passagiere beitragen. Das Unternehmen baut seine technologische Spitzenstellung in diesen Bereichen durch Kooperationen mit Forschungsinstituten und kompetenten Zulieferern kontinuierlich weiter aus.

Im Bereich Wasser- und Abwassersysteme liefert die AOA Teilsysteme und Komponenten für die gesamte Single-Aisle Flotte von Airbus sowie die kompletten Systeme für den Airbus A330/A340 und A340-500/-600, sowie das Vakuum-Toilettensystem für die Boeing 747-8I. Derzeit entwickelt AOA das komplette Wasser-/ Abwassersystem für den Airbus A350XWB und die Bombardier Global 7000/8000. Daneben liefert AOA verschiedene Systeme für Geschäftsflugzeuge (Embraer, Gulfstream).

Der Bereich Brandschutz produziert Rauchwarngeräte für A340-500/-600 und A380. Der Militärtransporter A400M wird mit dem kompletten Rauchwarnsystem von AOA ausgerüstet.

Im Bereich Klimatisierung werden Kühlkomponenten für den A340-500/-600 sowie A380 an Airbus, Lufttrocknungs- und Befeuchtungs-Geräte sowohl an Airbus als auch an Boeing geliefert. In Entwicklung befindet sich die Air Cooling Unit für die A350XWB. AOA-Hochleistungsgebläse fliegen in sämtlichen Airbus-Flugzeugen mit Ausnahme der A380.

In diesen Produktbereichen verfügt AOA über langjährig aufgebaute Kompetenz sowie eine moderne Ausstattung an Entwicklungs-Tools, die im Rahmen des Projektes genutzt werden konnten.

Als Partner im LuFo III – Vorhaben APAWAGS hat sich AOA bereits mit der für die Qualitätssicherung des Brennstoffzellenwassers benötigten Sensorik befasst. In LuFo IV-2 hat AOA im Rahmen des EFFESYS-BRINKS-Projektes Nutzungsszenarien der Prozessprodukte der Brennstoffzelle identifiziert und erste Funktionsmuster von Kernkomponenten des Wassergenerierungssystems entwickelt und getestet. Die erreichten Ergebnisse entsprechen den Anforderungen des vorgesehenen Laboraufbaus.

Das vorliegende Vorhaben ist von hoher Komplexität hervorgerufen durch die intensiven Abhängigkeiten der unterschiedlichen Flugzeugsysteme innerhalb des multifunktionalen Brennstoffzellensystems.

Ungeklärt war die Verwendbarkeit des de-ionisierten Wassers der Brennstoffzelle als Brauchwasser (Toilettenspülung) oder gar als Trinkwasser. Dabei spielten sowohl Fragen der chemischen Widerstandsfähigkeit der eingesetzten Materialien gegenüber dem aggressiven Prozesswasser, als auch nach der Qualität des Wassers zur Trinkwasserversorgung eine Rolle. Desweiteren waren veränderte Systemarchitekturen im Flugzeug im Zusammenhang mit einem multifunktionalen Brennstoffzellensystem zu klären.

3. PLANUNG UND ABLAUF DES VORHABENS

Das von Airbus Operations GmbH geführte Verbundvorhaben „Kabinentechnologie und multifunktionale Brennstoffzelle“ im Spitzenclusterwettbewerb der Metropolregion Hamburg bildete den übergeordneten technologisch-wissenschaftlichen Rahmen für die drei Unterprojekte (Abbildung 3-1):

- MF Brennstoffzelle - Validationsplattform (P1)
- MF Brennstoffzelle - Flugprüfung (P2)
- Umweltfreundliche Kabinentechnologie (P3)

Das vorliegende Vorhaben ist im Teilprojekt TP3.2 „Wasser- und Abwassersystemarchitektur bei Brennstoffzelleneinsatz“ integriert, das dem P3 „Umweltfreundliche Kabinentechnologie“ untergeordnet ist.

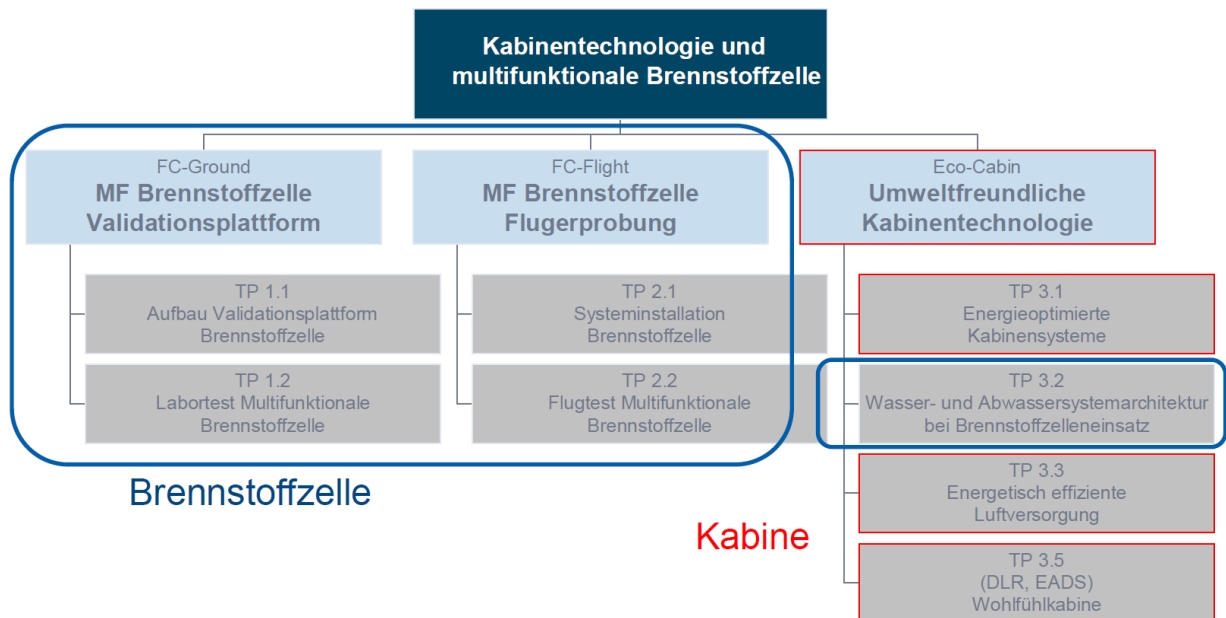


Abbildung 3-1: Strukturplan des Vorhabens
„Kabinentechnologie und multifunktionale Brennstoffzelle“

Die Arbeits- und Zeitplanung wurde kontinuierlich mit den Verbundpartnern abgestimmt. Das Vorhaben gliederte sich entsprechend dem Vorhabensantrag in aufeinander folgende Projektphasen, die zugleich als Arbeitspakete definiert waren:

- AP1 Anforderungen
- AP2 Konzepte
- AP3 Spezifikation
- AP4 Integration

28. Februar 2014		9
------------------	--	---

- AP5 Tests und Validierung

In AP1 Anforderungen wurden die Nutzungsmöglichkeiten des Brennstoffzellen-Prozesswassers ausgehend von der Dimensionierung des Brennstoffzellen-Stacks analysiert. Die Auswahl von Anwendungsszenarien war allerdings aufgrund der Abhängigkeiten der einzelnen Flugzeugsysteme voneinander und der Komplexität in Verbindung mit einem Brennstoffzellensystem sehr vom Verbundführer AIRBUS bestimmt. Aus den ausgewählten Anwendungsszenarien und dem Brennstoffzellensystem wurden die Anforderungen an ein Wassergenerierungssystem abgeleitet, sowie deren Rückkopplung auf andere Flugzeugsysteme evaluiert.

Unter Berücksichtigung des vorhergehenden Arbeitspaketes wurde ein Konzept für die Wassergenerierung zur Nutzung des Brennstoffzellen-Prozesswassers erarbeitet, das im späteren Projektverlauf aufgrund Änderungen in der Gesamtarchitektur abgeändert werden musste (AP2).

Im folgenden AP3 Spezifikation wurden auf Basis des erstellten Konzeptes Spezifikationen für das Wassergenerierungssystem und seiner Kernkomponenten erstellt, die die funktionalen System- und Geräteanforderungen, sowie Anforderungen zu gegebenen Umgebungsbedingungen beinhalten. Im Weiteren wurden Funktionsmuster der Komponenten (Wassertank, Wasserpumpe) des spezifizierten Wassergenerierungssystems aufgebaut, teils als Modifikation bereits vorhandener Komponenten. Die Anforderung an einen Kondensator (Verflüssiger) aus Kunststoff erwiesen sich als derart komplex, dass die Entwicklung eine weitere Iteration durchlaufen musste. Hierzu wurde mit Hilfe thermischer CFD Strömungssimulation das Design überarbeitet. Aufgrund der Verzögerungen konnte innerhalb der Vorhabenslaufzeit kein Hersteller mehr gefunden werden, der die erforderlichen Fertigungstechnologien zum Bau eines Funktionsmusters des Kondensators beherrscht.

Im AP4 Integration wurden parallel zum vorherigen Arbeitspaket die benötigten Komponentenprüfstände ausgelegt und aufgebaut bzw. adaptiert. Die Prüfstände dienten zur Funktions- und Leistungsüberprüfung der einzelnen gebauten Funktionsmuster. Die Funktionsmuster weisen einen Laborstatus anstatt der ursprünglichen Flugteststreife auf. Nach Änderungen der Gesamtarchitektur durch den Verbundführer waren die Komponenten des Wassergenerierungssystems zudem überdimensioniert. Daher musste sinnvollerweise auf Qualifikationstest verzichtet werden.

Im AP5 Test und Verifikation sollte das Zusammenwirken aller Geräte des Wassergenerierungssystems auf Systemebene und die Systemfunktion in Verbindung mit dem Brennstoffzellensystem nachgewiesen werden. Diese Arbeiten konnten durch mangelnde Testslots in dem Brennstoffzellen-Systemstand, sowie Verzögerungen im Bau des Brennstoffzellenlabors im Zentrum für Angewandte Luftfahrtforschung (ZAL) nur eingeschränkt durchgeführt werden.

In Abstimmung mit dem Verbundführer wurde das Vorhaben um einen Monat bis zum 31.12.2013 verlängert.

Eine Gesamtübersicht der zeitlichen Planung und Arbeitspakete des Vorhabens bei AOA sind in Abbildung 3-2 dargestellt.

28. Februar 2014		10
------------------	--	----

4. WISSENSCHAFTLICH TECHNISCHER STAND ZU VORHABENSBEGINN

Polymerelektrolytbrennstoffzellen (auch Protonenaustauschmembran-Brennstoffzelle, engl. Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC) sind Niedrigtemperatur-Brennstoffzellen mit einer Betriebstemperaturen zwischen 60°C und 85 °C. Sie sind daher für Anwendungen ohne Abwärmenutzung wie im mobilen Bereich (PKW, LKW, Bussen) oder für Akkuladegeräte besonders geeignet.

PEM-Brennstoffzellen wurden Anfang der 60er Jahre zur Stromerzeugung für die Raumfahrt entwickelt und erstmalig im Gemini Programm eingesetzt. In späteren Raumfahrtprogrammen wie den Apollo- und Space Shuttle-Missionen wurde erfolgreich die Idee umgesetzt, das im Abgasstrom der Brennstoffzelle enthaltene Prozesswasser zur Trinkwasserversorgung zu verwenden. In den 90er Jahren wurden F&E-Projekte zur Weiterentwicklung der PEM-Brennstoffzelle für den Betrieb von Elektrofahrzeugen gestartet, an denen große deutsche Firmen und Forschungseinrichtungen beteiligt waren. Dabei wurde das Ziel verfolgt, die benötigte elektrische Energie nicht wie bisher in gespeicherter Form (Batterien) mitzuführen, sondern sie direkt an Bord eines Fahrzeuges bedarfsgerecht aus Wasserstoff oder Methanol zu produzieren.

In den jüngsten Flugzeugentwicklungen zeigt sich der Trend einer gesteigerten Nutzung von elektrischer Energie um pneumatische und hydraulische Systeme, die durch mehrfache Redundanzen schwerer und in ihrem Wirkungsgrad ineffizienter sind, zu ersetzen. Zusätzlich steigt der Energieverbrauch durch zunehmend mehr Komfortfunktionen in der Kabine. Diesen gesteigerten elektrischen Energiebedarf im Flugzeug können Brennstoffzellen als sekundäre Stromaggregate abdecken. Neben der Reduzierung von Emissionen werden Einsparpotentiale beim Systemgewicht und bei den Wartungskosten erwartet. Weitere Synergien sieht man in der Nutzung der beim Betrieb von Brennstoffzellen anfallenden Prozessprodukte Wasser und Sauerstoff reduzierter Abluft. Die Verwendung von Brennstoffzellen in der Luftfahrt stellt eine zukunftsorientierte Neuerung dar, für die Nutzung der Prozessprodukte der Brennstoffzelle müssen zusätzliche Technologien bereitgestellt werden.

Zu Vorhabensbeginn beschränkten sich Studien in einer frühen Phase auf Überlegungen zur Festlegung einer geeigneten Architektur eines Brennstoffzellensystems (LuFo 4 - EF-FESYS-BRINKS), sowie Machbarkeitsanalysen mit industriell verfügbaren, keineswegs luftfahrttauglichen Komponenten. In dem früheren Projekt „APAWAGS“ wurde bei Airbus und AOA allerdings bereits an einigen Kernfunktionen und den zugehörigen Komponenten wie Wasseraufbereitung und Wassersensorik (Leitfähigkeit, pH-Sensor) gearbeitet. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse flossen in das vorliegende Vorhaben ein.

28. Februar 2014		12
------------------	--	----

5. ZUSAMMENARBEIT MIT ANDEREN STELLEN

Federführer des Verbundprojekts „Kabinentechnologie und multifunktionale Brennstoffzelle“ war die Airbus Operations GmbH.

Im Vorhaben nahm Airbus neben der Koordination der Verbundpartner auch folgende Aufgaben in der Rolle als Systemintegrator und Flugzeughersteller wahr:

- Definition der übergeordneten flugzeugspezifischen Anforderungen
- Konzipierung des Multifunktionalen Brennstoffzellensystems
- Definition der Flugzeugschnittstellen
- Integration der Komponenten in Systemteststände
- Bewertung der technischen Konzepte

Darüber hinaus hat AOA im Teilprojekt mit der Firma HTCO GmbH zusammengearbeitet, die im Unterauftrag CFD Strömungssimulationen durchgeführt hat.

Die detaillierte Beschreibung der Zusammenarbeit ist in den jeweiligen Abschnitten von Kapitel 8 enthalten.

28. Februar 2014		13
------------------	--	----

6. VERWENDUNG DER ZUWENDUNG

6.1. Zielsetzungen und Ergebnisse

Eine Gegenüberstellung der Ergebnisse mit den Zielsetzungen des Vorhabens erfolgt in Tabelle 6-1. Die ausführliche Darstellung der erzielten Ergebnisse ist Inhalt des Kapitel 8.

Zielsetzung lt. Vorhabensantrag	Ergebnisse des Vorhabens
AP1.1 Generelle Nutzungsmöglichkeiten BZ-Wasser	Analyse der Nutzungsszenarien für Brennstoffzellenwasser
AP1.2 Fokussierung auf wenige Nutzungsmöglichkeiten / HL-Anforderungen	Umsetzungsmöglichkeiten / Machbarkeitsanalyse, Definition der High-Level-Anforderungen
AP1.3 Rückkopplung der Anforderungen auf weitere Flugzeugsystemen	Rückkopplung der Anforderungen auf weitere Flugzeugsysteme (Frischwassersystem)
AP2.1 Systemkonzept Wassermanagement / WGS	Konzeptdefinition und -Auswahl (Systemdefinition)
AP2.2 Systemsimulation	Bewertung der Systemsimulation (Airbus), Komponentensimulation
AP3.1 Systemspezifikation Wassermanagement	Systemspezifikation für WGS,
AP3.2 Gerätespezifikationen	Gerätespezifikationen für - Kondensator, - Wasserabscheider, - Wasserpumpe, - Wassertank
AP3.3 Prototypenentwicklung - Bauunterlagen, Funktionsmuster	- Bauunterlagen für Wasserpumpe, - Bauunterlagen für Wassertank, - Designentwurf für Kondensator, - Strömungssimulation für Kondensator, - Designentwurf für Wasserabscheider
AP4.1 Prüfstände für Funktionsmuster	- Adaption Prüfstand Wasserpumpe, - Adaption Prüfstand Wassertank
AP4.2 Funktionstests - und Leistungstests	- Testergebnisse Wasserpumpe, - Testergebnisse Wassertank
AP4.3 Qualifikationstests	Ersetzt durch Neuauslegung Kondensator
AP5.1 Systemintegration	Ersetzt durch Iteration bei Konzeption und Detaillierung
AP5.2 Systemtests	Ersetzt durch Iteration bei Konzeption und Detaillierung
AP5.3 Systembewertung, Lessons Learnt	Technologiebewertung WGS, Technologiebewertung Kondensator und Wasserabscheider

Tabelle 6-1: Gegenüberstellung der Zielsetzungen und Ergebnisse

28. Februar 2014		14
------------------	--	----

6.2. Einsatz Personal, Material, Fremdleistung

Der zahlenmäßige Nachweis der Projektkosten wird separat dem Projektträger vorgelegt.

Die tatsächlichen Vorhabenskosten haben das ursprünglich eingeplante Budget um 4,8% überschritten. Ein Großteil des Projektbudgets (ca. 86,9%) wurde als Personalkosten für die im vorigen Abschnitt aufgeführten Tätigkeiten verwendet.

Darüber hinaus fielen Materialkosten für die Herstellung von Funktionsmustern eines Wassertanks und einer Wasserpumpe, sowie für die Adaption von bestehenden Prüfständen an. Fremdleistungen wurden erbracht von der HTCO GmbH für thermische Strömungssimulation. Materialkosten und Fremdleistungen haben einen Umfang von ca. 4,1 % der gesamten Vorhabenskosten.

28. Februar 2014		15
------------------	--	----

7. LEERKAPITEL

28. Februar 2014		16
------------------	--	----

8. AUSFÜHRLICHE DARSTELLUNG DER PROJEKTERGEBNISSE

8.1. AP 1 Anforderungen

8.1.1. Nutzungsmöglichkeiten des Brennstoffzellen-Prozesswassers

Im vorliegenden Vorhaben werden im Hinblick auf künftige Flugzeuganwendungen PEM-Brennstoffzellen verwendet. Sie sind Niedrigtemperatur-Brennstoffzellen, die im mobilen Bereich bisher ohne Nutzung der Abwärme und Prozessprodukte wie Wasser und Sauerstoff abgereicherte Abluft eingesetzt werden. Sie zeichnen sich durch eine niedrige Betriebstemperatur zwischen 60°C und 85°C aus. Die Stacks der Brennstoffzelle sind jedoch gegenüber Verschmutzung sehr empfindlich, wobei insbesondere bei Evaporationskühlung der Stacks ein aufwändiges Wassermanagement zur Rückführung des Prozesswassers erforderlich wird.

Der Verbundführer Airbus hat die Auswirkungen des Einsatzes von BZ über viele Flugzeugsysteme analysiert. Ausgehend von einem zentralen Brennstoffzellensystem ist die Nutzung der BZ primär mit einem multifunktionalen Systemansatz wirtschaftlich und effizient. Dabei sollen die bei der Reaktion zur Gewinnung elektrischer Energie in der BZ anfallenden Prozessprodukte Wasser und Sauerstoff abgereicherte Kathodenabluft (Inertgas) nutzbar gemacht werden.

Für das im BZ-Betrieb anfallende Prozesswasser wurden in Abstimmung mit Airbus grundsätzlich folgende Nutzungsmöglichkeiten identifiziert. Die entsprechend erforderlichen Wassermengen und Massendurchflüsse sind der Tabelle 8-1 zu entnehmen.

	Wassermenge	Massendurchfluss
Brennstoffzellen - Kühlung und Befeuchtung (4 x 90 kW)		145 kg/h
Frischwasser (Bordküchen, Waschbereiche in Toiletten)	130 l	20,8 kg/h
Toilettenspülung	70 l	11,2
Brandlöschung/-unterdrückung	30 l	
Triebwerkseinspritzung während Turbinenstart	150 l	
Luftbefeuchtung	21 l	4,2 kg/h

Tabelle 8-1: Nutzungsmöglichkeiten für BZ-Prozesswasser

Als Grundlage der angegebenen Daten wurde ein Mittelstreckenflug eines Single Aisle-Flugzeugs mit 180 Passagieren und einer Flugdauer von 6,25 Stunden angenommen. Die zur Kühlung der Stacks und Befeuchtung der Protonenaustauschmembran benötigte Wassermenge hängt von der elektrischen Leistung der Brennstoffzelle und den Umgebungsbedingungen ab und soll kontinuierlich dem entstehenden BZ-Prozesswasser entnommen werden. In der Analyse ging man von 4 Stacks á 90 kW aus. Für die Kühlung der Stacks werden 145 kg/h benötigt.

Weitere Nutzungsmöglichkeiten für das BZ-Prozesswasser bestehen für die Frischwasserversorgung in Bordküchen, Waschbereichen und Duschen, Toilettenspülung, Brandlö-

28. Februar 2014		17
------------------	--	----

schung/-unterdrückung im Frachtraum und Luftbefeuchtung in der Kabine, die hinsichtlich des Wasserverbrauchs bedarfsorientiert sind.

8.1.2. Umsetzung und Machbarkeitsanalyse

Die Brennstoffzelle mit einer elektrischen Gesamtleistung von 4 x 90 kW erzeugt je nach Umgebungstemperatur und –druck folgende Wassermengen:

- Inflight (5°C, 868 hPa) 170 l/h
- ISA (15°C, 1013 hPa) 150 l/h
- ISA Hot (38°C, 1013hPa) 140 l/h

Ein Brennstoffzellensystem mit Evaporationskühlung benötigt daher den überwiegenden Teil des gewonnenen Prozesswasser zur Kühlung der Brennstoffzelle und Befeuchtung der Stacks. Daher stehen auf den ersten Blick nur geringe Mengen des BZ-Prozesswasser für die weiteren identifizierten Nutzungsmöglichkeiten zur Verfügung. Mit dem Vorhalten einer bestimmten Wassermenge kann aber der Bedarf des Frischwasser- und Abwassersystems durch die Gewinnung des BZ-Prozesswassers gedeckt werden. Die Wasserbilanz verändert sich deutlich, wenn ein Brennstoffzellensystem ohne Evaporationskühlung verwendet wird. Diese Systeme arbeiten mit einem eigenständigen Kühlkreislauf.

Das entstehende BZ-Prozesswasser ist de-ionisiert und hat damit instabile und korrosive Eigenschaften. Daher bestehen nicht nur für das Wassermanagement/-generierungssystem besondere Anforderungen an die Beständigkeit der verwendeten Materialien, sondern auch an die nachfolgenden Anwendungen. Im Allgemeinen erfüllen Edelstahl und ausgewählte Kunststoffe, sowie hochwertige Titan-Legierungen diese Anforderungen. Da jedoch diese Materialauswahl nicht über alle Anwendungsszenarien gewährleistet werden kann, empfiehlt sich eine generelle Mineralisierung zur Stabilisierung des BZ-Prozesswassers durch Zugabe von Salzen (z.B. Natriumhydrogencarbonat). Für die Verwendung des Wassers zur Frischwasserversorgung ist die Zugabe von Mineralien unerlässlich, da der pH-Wert des BZ-Wassers im sauren Bereich unterhalb des zulässigen Mindestwertes von 6,5 liegt.

Da die Anforderungen der verschiedenen Systemanwendungen sehr unterschiedlich und komplex sind, ist für die Auslegung und den Betrieb einer Brennstoffzelle ein ganzheitlicher Konzeptansatz zu wählen. Systemübergreifende Analysen zu Kosten, Gewicht und Energie und Umweltbilanz hat der Verbundführer AIRBUS durchgeführt. Das Wassergenerierungssystem trägt nach aktueller Auslegung mit einem Gewicht von ca. 35 kg zum Gesamtgewicht eines multifunktionalen Brennstoffzellensystems bei.

8.1.3. Definition der High-Level-Anforderungen

In Zusammenarbeit mit dem Verbundpartner Airbus wurden die High-Level-Anforderungen für das Wassergenerierungssystem einer multifunktionalen Brennstoffzelle definiert. Die wesentlichen Anforderungen an das Wassergenerierungssystem sind nachfolgend beschrieben:

- Das im Betrieb der Brennstoffzelle erzeugte BZ-Prozesswasser soll den identifizierten Nutzungsmöglichkeiten zugeführt werden.

28. Februar 2014		18
------------------	--	----

- Das bei einer Temperatur zwischen 70°C und 85°C im Kathodenabgas dampfförmig vorhandene Prozesswasser muss mit einer möglichst hohen Effizienz auskondensiert werden.
- Das auskondensierte Wasser muss vom Inertgas getrennt und drucklos abgeschieden werden.
- Das gewonnene Wasser muss gespeichert werden.
- Ein Teil des BZ-Prozesswassers muss einer Brennstoffzelle mit Evaporationskühlung zur Kühlung und Befeuchtung der Stacks zurückgeführt werden.
- Das gesamte Wassergenerierungssystem muss entleert werden können.
- Zur Versorgung anderer Systeme mit Wasser muss ein Druckkreislauf mit einem Druck von 3-4 bar bestehen.
- Für die Nutzung des BZ-Prozesswassers als Frischwasser muss dieses die Anforderungen der United States Public Health Service (USPHS) und der Trinkwasserverordnung [TrinkwV 2001] erfüllen.
- Keimbildung im Wassergenerierungssystem soll durch ein geeignetes Design möglichst vermieden werden. Das gesamte Wassergenerierungssystem muss mittels Wasserdampf (Temperatur > 120°C) desinfizierbar sein.

8.1.4. Rückkopplung der Anforderungen auf weitere Flugzeugsysteme

Die Anforderungen an das Wassergenerierungssystem haben auch Auswirkungen auf weitere Systeme und auf das Flugzeug selbst. Der Analyse-Prozess der Anforderungen muss iterativ erfolgen, denn exakte Angaben zu Gewicht und Leistung lassen sich erst nach Festlegung eines endgültigen Betriebspunktes der Brennstoffzelle, sowie nach erfolgter Auslegung aller Systeme und deren Systemkomponenten machen.

Folgende Anforderungen weiterer Flugzeugsysteme sind in Abhängigkeit des Wassergenerierungssystems zu definieren:

- Das zentrale Kühlsystem ist entsprechend der erforderlichen Kühlleistung zur Wasserkondensation anzupassen. Für die Kondensation ist eine Kühlleistung von ca. 13 kW erforderlich.
- Zusätzliche Wasserreservoirs sind voraussichtlich erforderlich, damit Wasser sofort nach Inbetriebnahme (Power on) des Flugzeugs z.B. für eine wasserbasierte Feuerlöschung und/oder Triebwerkseinspritzung zur Verfügung steht.

In einem multifunktionalen Brennstoffzellensystem bestehen Abhängigkeiten auch zwischen anderen Flugzeugsystemen, z.B. dem Feuerlöschsystem und dem Energiesystem. Wird die Brennstoffzelle im Fall eines Brandes im Frachtraum in einem Betriebspunkt gefahren, dass ein ausreichend großer Volumenstrom des Inertgases zur Brandunterdrückung gewährleistet ist, dann muss auch das Energiesystem die erzeugte Energie der Brennstoffzelle „verbrauchen“.

Um im Vorhaben die Komplexität zwischen den Systemen zu reduzieren, wurde das Frischwassersystem als Nutzungsmöglichkeit für das BZ-Wasser ausgewählt.

28. Februar 2014		19
------------------	--	----

8.2. AP 2 Konzepte

8.2.1. Konzeptdefinition Wassergenerierung und Konzeptauswahl

Es wurde ein Konzept erarbeitet, das während der Vorhabenslaufzeit trotz Änderungen in der Systemarchitektur grundsätzlich von der Verfahrenstechnik gleich blieb.

Die Kathodenabluft der Brennstoffzelle wird einem Kondensator / (verfahrenstechnisch) Verflüssiger zugeführt, in dem die Abluft über eine möglichst große Oberfläche durch einen externen Kühlkreislauf gekühlt und das BZ-Prozesswasser auskondensiert wird. Über einen Wasserabscheider wird das Wasser im flüssigen Aggregatzustand von der sauerstoffreduzierten Luft getrennt und in einem Tank aufgefangen und gespeichert.

Um Wasser der Brennstoffzelle zur Kühlung rückzuführen und weitere Flugzeugsysteme mit dem Wasser versorgen zu können, ist es erforderlich, das Wasser in einen Druckkreislauf mit einem Druck von ca. 3-4 bar zu pumpen.

Das Wasser, das dem Frischwassersystem zugeführt wird, muss mit Hilfe einer Mineralisierungseinheit zur Stabilisierung und Neutralisierung des pH-Wertes mit Ionen versetzt werden. Die Mineralisierungseinheit ist nicht im Umfang des Vorhabens enthalten.

8.2.2. Systemsimulation

Auf Basis des Konzeptes für die Wassergenerierung wurden unter Berücksichtigung der bei AIRBUS erstellten Simulationsdaten die Eingangsgrößen für das Wassergenerierungssystem bei Einsatz eines 4 x 90kW-Brennstoffzellensystems mit Evaporationskühlung bewertet.

Bei normalen Betriebspunkt der Brennstoffzelle beträgt die Abgastemperatur 88°C bei einem Druck von 1,25 bar. Der Flüssiganteil liegt hierbei gegenüber dem Gasanteil bei 1%. Aus der BZ-Abluft kann theoretisch durch Kondensation Wasser in einer Menge von 188kg/h generiert werden können, was dann einem Anteil von 38% gegenüber dem Gasanteil entspricht (vgl. Tabelle 8-2).

Fuel Cell	90 KW			16,5 KW		
			Ratio Gas/Water			Ratio Gas/Water
	[Kg/h]	%	%	[Kg/h]	%	%
N2	275,86	55,02	62	45,71	47,65	54
O2	36,84	7,35		6,11	6,36	
Water	188,71	37,64	38	44,11	45,98	46
Total	501,41	100,00	100	95,93	100,00	100

Temp	88 °C	83,4 °C
Pressure	1,25 bar	1,1 bar
Vapor Frac	99%	77,9%
Liquid Frac	1%	22,1%

Tabelle 8-2: Kondensationsparameter

Bei AIRBUS stand ein weiteres Brennstoffzellensystem ohne Evaporations-Kühlung mit einer elektrischen Leistung von 4 x 16,5 kW unter Evaluierung. Diese Brennstoffzelle besitzt einen eigenen Kühlwasserkreislauf, wodurch die Rückführung von Wasser entfallen kann. Den Simulationsdaten zufolge ist der Flüssiganteil mit 22% bereits höher als bei dem BZ-System mit Evaporationskühlung. Nach Kondensation beträgt der Anteil an Wasser 46% gegenüber dem Gasanteil.

Somit ist hinsichtlich der Wassergenerierung ein Brennstoffzellensystem ohne Evaporationskühlung vorzuziehen.

Da diese Angaben auf Simulationsergebnissen beruhen, ist der tatsächliche Nutzen der Wassergenerierung anhand eines BZ-Demonstrators zu bestätigen.

8.3. AP 3 Spezifikation

8.3.1. Systemspezifikation Wassergenerierung

Im Anschluss an die Konzeptphase wurde die Spezifikation für das Wassergenerierungssystem erstellt. Hierbei wurde bereits die Zielsetzung verfolgt, dass im Design des Systems und der Komponenten die Voraussetzungen für eine spätere Flugzeugintegration berücksichtigt werden. Die Anforderungen an das WGS wurden in einer Anforderungs-Datenbank (DOORS) erfasst.

Die Spezifikation beruht zunächst auf einem Brennstoffzellensystem mit Evaporationskühlung. Das WGS setzt sich aus einem an einen externen Kühlkreislauf angeschlossenen Kondensator, Wasserabscheider, Wassertank und Wasserpumpe zusammen. Die Wasserpumpe beaufschlagt das Wasser in einem Druckkreislauf mit 3-4 bar. Ventile regeln die Zuleitungen zur Nutzung des Wassers durch weitere Flugzeugsysteme. An der Abnahmestelle für das Frischwassersystem ist eine Mineralisierungseinheit für die Stabilisierung des BZ-Prozesswasser vorgesehen (nicht im Umfang des Vorhabens). Die Steuerung und Überwachung der einzelnen Komponenten des WGS wie Kondensator/Wasserabscheider, Wassertank, Wasserpumpe und Ventile erfolgt zentral durch eine Steuerungseinheit. Abbildung 8-1 stellt vereinfacht die ursprüngliche Systemarchitektur des WGS dar.

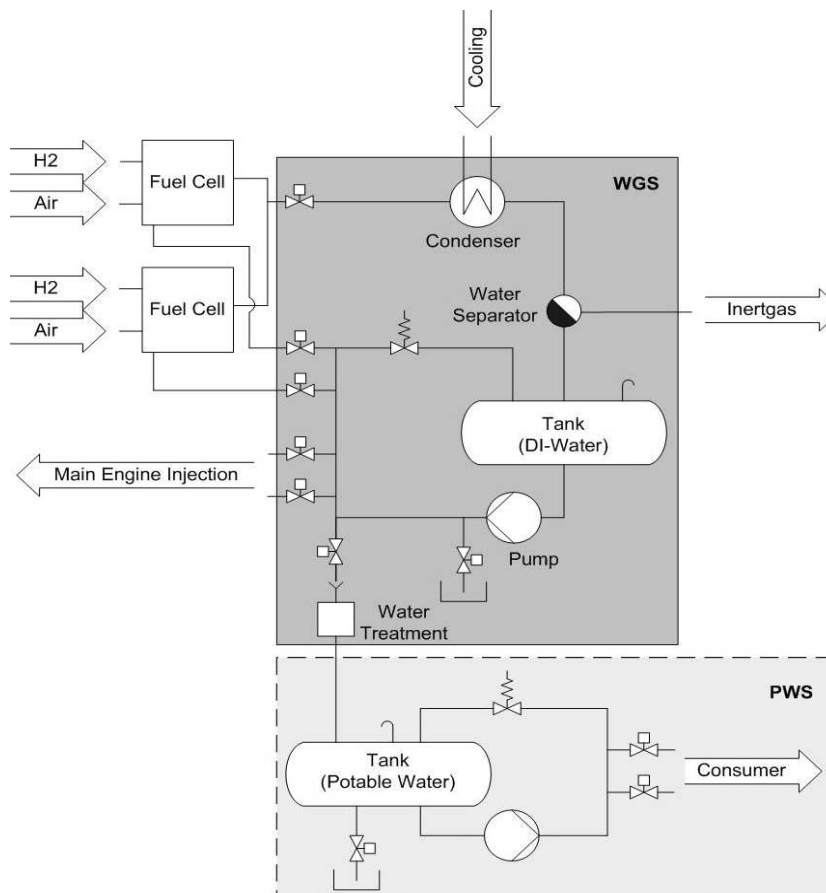


Abbildung 8-1: Architektur 1 Wassergenerierungssystem

28. Februar 2014		22
------------------	--	----

Während der Projektlaufzeit ergaben sich beim Verbundführer AIRBUS Änderungen in der Architektur des multifunktionalen Brennstoffzellensystems. So hat sich Airbus entschieden, ein 45 kW - Brennstoffzellensystem (NUVERA) ohne Evaporationskühlung zu verwenden. Außerdem sollen zunächst nur noch das Frischwassersystem und der Brandschutz als Nutzer des BZ-Prozesswassers und Inertgases berücksichtigt werden.

Auf das WGS wirken sich diese Änderungen wie folgt aus, dass kein BZ-Prozesswasser zur Brennstoffzelle zurückgeführt werden muss, der bedruckte Wasserkreislauf innerhalb des WGS entfällt und das gewonnene BZ-Prozesswasser direkt dem Frischwassersystem über eine Mineralisierungseinheit zugeführt wird. Da das BZ-Prozesswasser kontinuierlich in kleinen Mengen zum Frischwassersystem gepumpt werden soll, genügen ein kleiner Wassertank, sowie eine Wasserpumpe mit einer geringen Pumpleistung. Die modifizierte Systemarchitektur zeigt Abbildung 8-2.

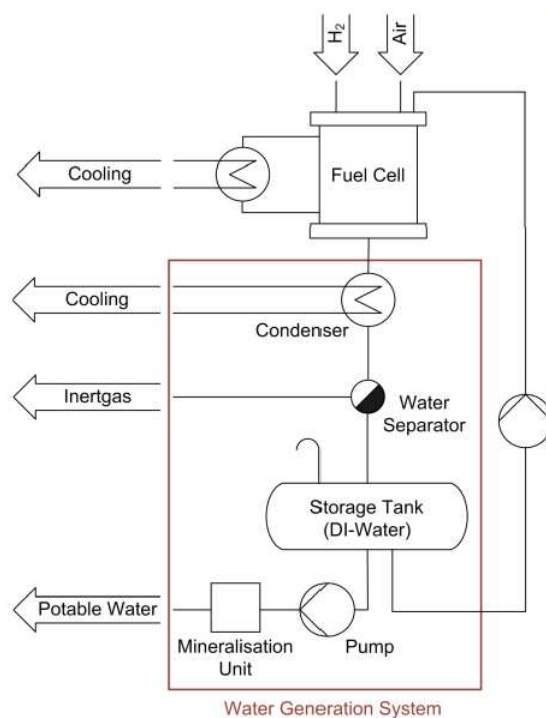


Abbildung 8-2: Architektur 2 Wassergenerierungssystem

Das WGS und die Komponenten müssen so ausgelegt sein, dass Materialbeständigkeit gegenüber deionisiertem Wasser gegeben ist. Zudem muss die Trinkwassereignung gewährleistet sein. Das WGS muss drainierbar, sowie mittels Wasserdampf mit einer Temperatur bis 120°C desinfizierbar sein. Der maximale Druckverlust innerhalb des WGS darf 300 mbar nicht überschreiten.

8.3.2. Systemspezifikation Wassergenerierung

Von der Systemspezifikation wurden die Gerätespezifikationen für einen Kondensator, Wassertank und Wasserpumpe unter Berücksichtigung einer Flugzeugintegration abgeleitet

28. Februar 2014		23
------------------	--	----

und die Anforderungen detailliert. Die Angaben beziehen sich auf die zuletzt beschriebene Systemarchitektur des WGS (ggf. sind in Klammern die Vorwerte angegeben).

Es wurden folgende Anforderungen an den Kondensator spezifiziert:

- Auskondensieren von Wasser aus dem BZ-Kathodenabgas;
Das Kathodenabgas ist mit folgenden Parametern charakterisiert:
 - Temperatur: 20°C bis 85°C
 - Druck (absolut): 1,4 bar bis 4 bar
 - Massenströme:
 $m(\text{N}_2) = 147,45 \text{ kg/h}$, $m(\text{O}_2) = 22,39 \text{ kg/h}$ und $m(\text{H}_2\text{O}) = 24,21 \text{ kg/h}$
- Das Kühlmedium besteht aus einem Wasser/Proylen glycol-Gemisch mit einer
 - Temperatur zwischen 2°C und 38°C
 - Massenstrom 2640 kg/h
- Maximale Druckdifferenz zwischen Abgas und Wasser: 2 bar
- Materialbeständigkeit gegenüber deionisiertem Wasser
- Trinkwassereignung
- Maximaler Bauraum: 90 x 190 x 610 mm
- Maximales Gewicht: 20 kg
- Desinfektionsmöglichkeit mittels Wasserdampf mit einer Temperatur zwischen 100°C und 120°C

Der Wassertank soll folgende Anforderungen erfüllen:

- Nicht bedruckter glasfaserverstärkter Thermoplastik Wassertank
- 6 l (80 l) Fassungskapazität
- Kapazitive Füllstandsmessung
- Anschlüsse:
 - Zirkulationsanschlüsse (Eingang, Ausgang)
 - Füllanschluss
 - Drainageanschluss
 - Überlaufventil
- Materialbeständigkeit gegenüber deionisiertem Wasser
- Trinkwassereignung
- Geringe Baugröße und niedriges Gewicht
- Desinfektionsmöglichkeit mittels Wasserdampf mit einer Temperatur zwischen 100°C und 120°C

Die Kernanforderungen an die Wasserpumpe sind:

- Ausgangsdruck selbstregelnd auf maximal 3 bar
- Eingangsdruck 0-2,2 bar

28. Februar 2014		24
------------------	--	----

- Trockenlauferkennung
- Materialbeständigkeit gegenüber deionisiertem Wasser
- Trinkwassereignung
- Geringe Baugröße und niedriges Gewicht
- Desinfektionsmöglichkeit mittels Wasserdampf mit einer Temperatur zwischen 100°C und 120°C
- CAN-Schnittstelle zur Datenkommunikation

Die Steuerung und Überwachung der einzelnen Komponenten des WGS wie Kondensator/Wasserabscheider, Wassertank, Wasserpumpe und Ventile soll durch eine zentrale Steuerungseinheit erfolgen.

8.3.3. Prototypenentwicklung

Nach der Erstellung der Spezifikationen wurde mit der Entwicklung der WGS-Kernkomponenten, nämlich Kondensator, Wassertank und Wasserpumpe begonnen. Die Arbeiten umfassten die Erstellung von Bauunterlagen und Aufbau bzw. Beschaffung und Modifikation bestehender Luftfahrtgeräte.

8.3.3.1. Kondensator

Da für die Entwicklung eines Kondensators ein sehr hohes Designrisiko bei gleichzeitig erheblichen Materialkosten besteht, wurden die Integrationsergebnisse des im Vorhaben NIP-BRIST aufgebauten Labormusters (Abbildung 8-3) berücksichtigt.



Abbildung 8-3: Funktionsmuster Kondensator (NIP-BRIST)

28. Februar 2014		25
------------------	--	----

Die Testergebnisse während der Laborintegration zeigten, dass das gewählte Design auf Basis eines Kunststoff-Spiralwärmeübertragers mit eigenem Kondensatablauf bei höheren Leistungsklassen (große Volumenströme und Drücke) nicht zielführend war. Daher musste die Zusammenarbeit mit dem vorgesehenen Kunststoffbauer trotz erster Versuche mit neuen Klebe- und Vergussmaterialien aufgegeben werden.

AIRBUS untersuchte außerhalb des Vorhabens Kondensatoren anderer Hersteller, die sich in Design und Materialien vom AOA Kondensator unterschieden haben. Der Versuch, die Kondensationsleistung durch eine geringe Höhe der Strömungskanäle von kleiner 1 mm signifikant zu erhöhen, scheiterte aufgrund eines dramatisch hohen Anstieg des Druckverlustes. Auch die Verwendung von Siliciumcarbid mit seiner relativ geringen Dichte und hohen Materialbeständigkeit wurde aufgrund hoher Materialkosten verworfen.

Sowohl die bisherigen Arbeiten zur Entwicklung eines Kunststoffkondensators im Hause AOA, als auch die Erfahrungen des Verbundführers Airbus mit Wärmetauschern anderer Hersteller haben gezeigt, dass die Anforderungen an einen luftfahrttauglicher Kondensator mit einer hohen Kondensationsleistung, niedrigem Druckverlust bei gleichzeitig geringem Gewicht und Bauraum eine große technologische Herausforderung darstellen.

Daher ergab sich die Notwendigkeit, das Design des Kondensators für die Anwendung im Flugzeug umfassend neu auszulegen. Die Ausführung des Kondensators aus Kunststoffmaterial lässt generell große Gewichtsvorteile erwarten. Daher soll der Kondensator weiterhin aus Kunststoff gebaut werden. Die Auslegung des Kondensators sollte mit Hilfe thermodynamischer Strömungssimulation (CFD) unterstützt werden, wofür die HTCO GmbH in Unterauftrag genommen wurde. Für einen hocheffizienten Kondensator sind nicht nur ein innovatives Design, sondern auch neuartige Fertigungstechnologien erforderlich.

In einer ersten Phase wurden Konzepte für Oberflächenstrukturen eines zunächst plattenförmigen Kunststoffwärmetauschers entworfen und deren Leistungsfähigkeiten im Hinblick auf die thermischen und druckverlusttechnischen Anforderungen evaluiert. Zielsetzung dieser Phase war, die optimale Oberflächenstruktur mit der größten Leistungseffizienz für die Wärmeübertragung zu finden. Für die Ausgangswerte wurde ISO-Hot, d.h. heißeste Umgebungsbedingung am Boden angenommen. Kondensationseffekte wurden in dieser Phase noch nicht berücksichtigt, sondern nur die reine Kühlleistung. Parametrisiert wurde die Wanddicke zwischen Kühlmittelkanal und Abgaskanal, sowie die einzelnen Kanalhöhen (Abbildung 8-4).

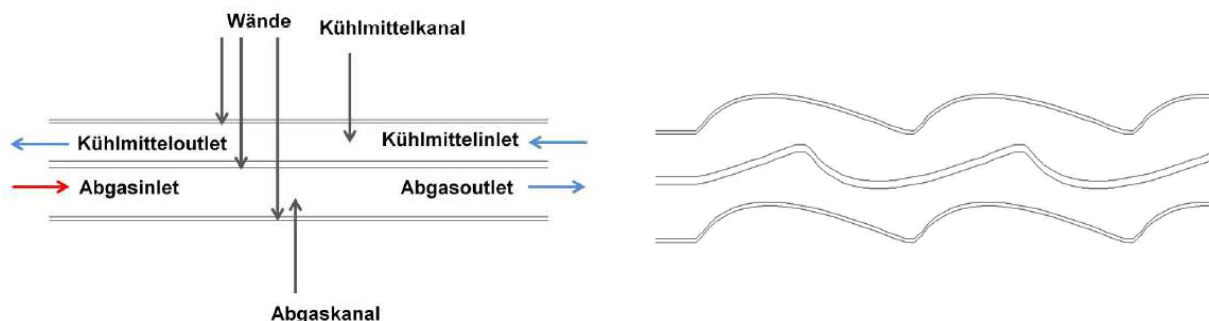


Abbildung 8-4: Varianten von Strömungskanälen

Es wurden verschiedene Geometrien von Strömungskanälen modelliert und simuliert, um deren Leistungsfähigkeit bei der Wärmeübertragung abschätzen zu können. Als Basis für die geometrischen Abmaße wurde der maximal zur Verfügung stehende Bauraum von 90mm x 190mm x 610mm angenommen. Die Strömungskanäle wurden nach dem Gegenstromprinzip angeordnet. Ein ebener Plattentauscher wurde als Referenz simuliert.

Abbildung 8-5 zeigt die Geschwindigkeitsvektoren im Abgasstrom und im Kühlmittelstrom. Aufgrund der sehr unterschiedlichen Massenströme in beiden Kanälen sind auch die auftretenden Geschwindigkeiten sehr unterschiedlich. In den Taschen der Struktur auf der Abgasseite bilden sich jeweils kleine Wirbel, die dafür sorgen, dass die Temperaturgrenzschicht an den Wänden aufgebrochen wird und somit der Wärmeübergang erhöht wird.

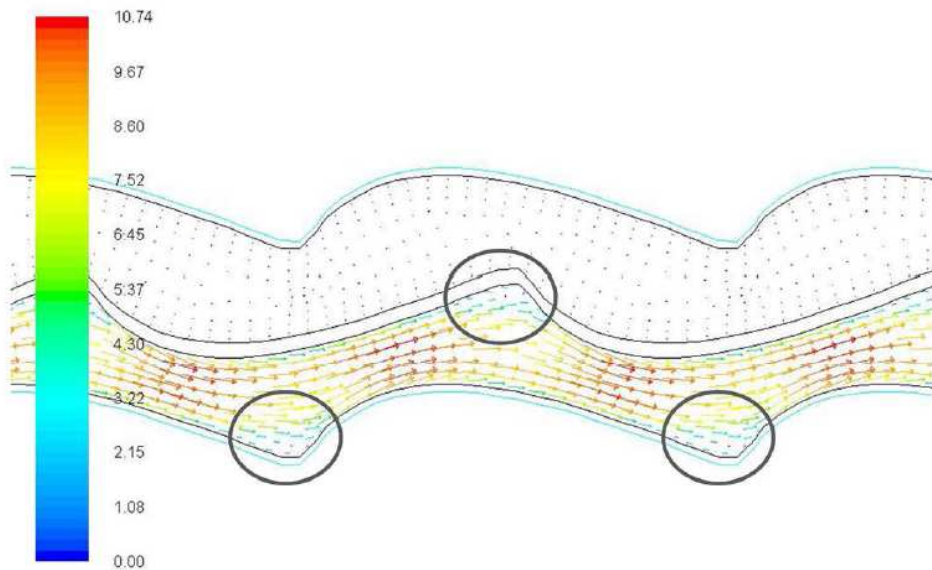


Abbildung 8-5: Geschwindigkeitsvektoren

In Abbildung 8-6 ist die Temperaturverteilung in den Kanälen dargestellt. Die Simulation über einen längeren Abschnitt zeigt, dass die Temperatur auf der Abgasseite sehr schnell abnimmt und sich im hinteren Teil des Tauschers nur noch um hundertstel Grad ändert.

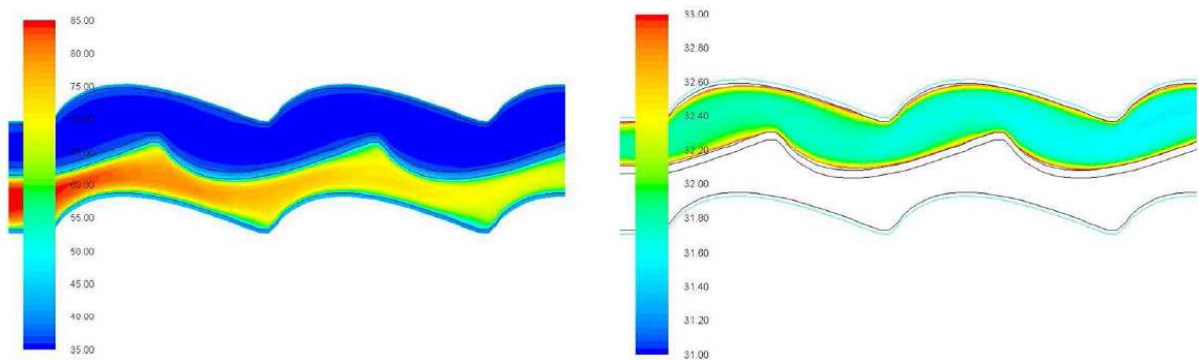


Abbildung 8-6: Temperaturverteilung

Die höchste Leistungseffizienz wurde mit einem Design nach dem Gegenstromprinzip erzielt. Die Wärmeleistung verbesserte sich um 30% mit einer asymmetrischen Wellenform. Die Wärmeleistung nimmt mit steigender Wandstärke ab, die Druckverluste der Wellenformen nehmen mit fallender Kanalhöhe deutlich zu. Bei Vernachlässigung der Kondensation konnte mit allen untersuchten Geometrien die gesamte theoretisch erforderliche Kühlleistung auf eine Länge von 610 mm erbracht werden. Da die Kondensation bislang nicht berücksichtigt wurde, dabei aber eine noch zu leistende Wärmemenge von ca. 11 kW bei Kühlung auf 31 °C bzw. 16 kW bei Kühlung auf 2 °C a ls Verdampfungsenthalpie notwendig ist, wurde die Abgastemperatur auf einen sehr hohen Wert gesetzt. Diese Abschätzung mit sehr hohen Differenztemperaturen ergab, dass die Wärmetauscherleistung im geforderten Bereich realisierbar sein sollte. Bei einem Simulationsvergleich mit Aluminium als Wandmaterial traten nur geringe Differenzen zwischen der Leistung von Aluminium und Kunststoff auf.

Aufgrund der hohen Druckdifferenzen zwischen Abgas und Kühlmittel ist die Druckfestigkeit eines Plattendesigns kritisch. Daher wurde zudem ein Design mit Rohrbündel untersucht.

Abbildung 8-7 zeigt die modellierten Wellenrohre mit einer asymmetrischen Wellenform und einer symmetrischen Fortsetzung auf eine Länge von 190 mm. Es wurde auch in diesem Fall das Gegenstromprinzip verfolgt, d.h. ein Medium strömt im Rohr, das andere Medium gegenläufig um das Rohr. In der Simulation wurden die Medien variiert, sowie die Wandstärken und Rohrdurchmesser. In den Fällen 2 und 3 strömt das Kühlmittel in den Rohren, das Abgas außen. Der Abstand zwischen den Rohren beträgt 2,7 mm (Fall 1 und 2), bzw. 1,1 mm (Fall 3).

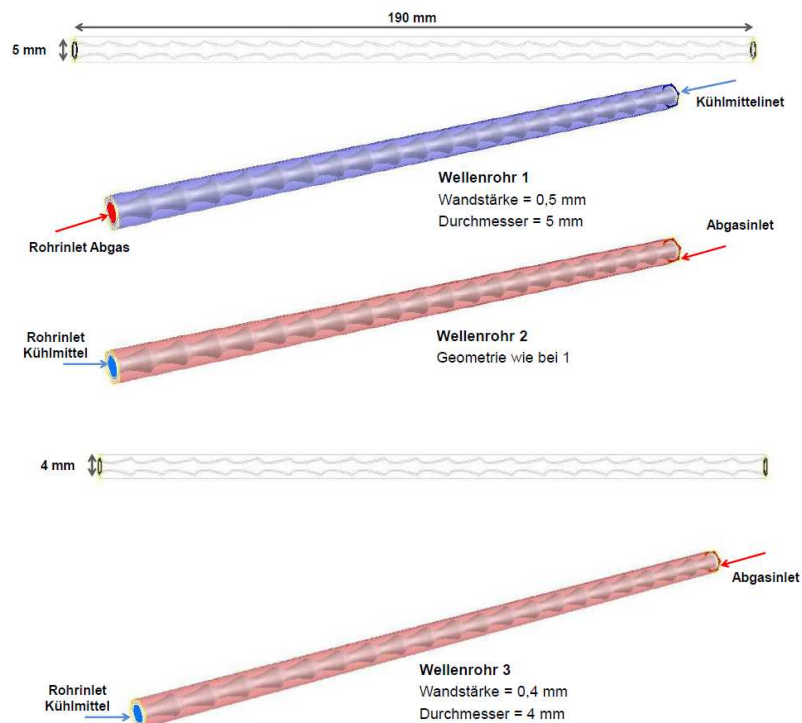


Abbildung 8-7: Modellierung Wellenrohr mit symmetrischer Fortsetzung

Als Ergebnis der Untersuchung konnte festgestellt werden, dass sich die Röhren thermisch um etwa 5% schlechter verhalten als Platten, allerdings der Druckverlust deutlich geringer ist.

Für eine maximale Wärmeübertragung ist es erforderlich, dass Platten bzw. Röhren gleichmäßig mit nahezu konstanter Geschwindigkeit durchströmt werden. Eine gleichmäßige Strömungsverteilung wird mit Hilfe von Sammelkanälen erreicht (Abbildung 8-8), die sich zu den äußerst gelegenen Plattenkanälen bzw. Röhren hin verjüngen.

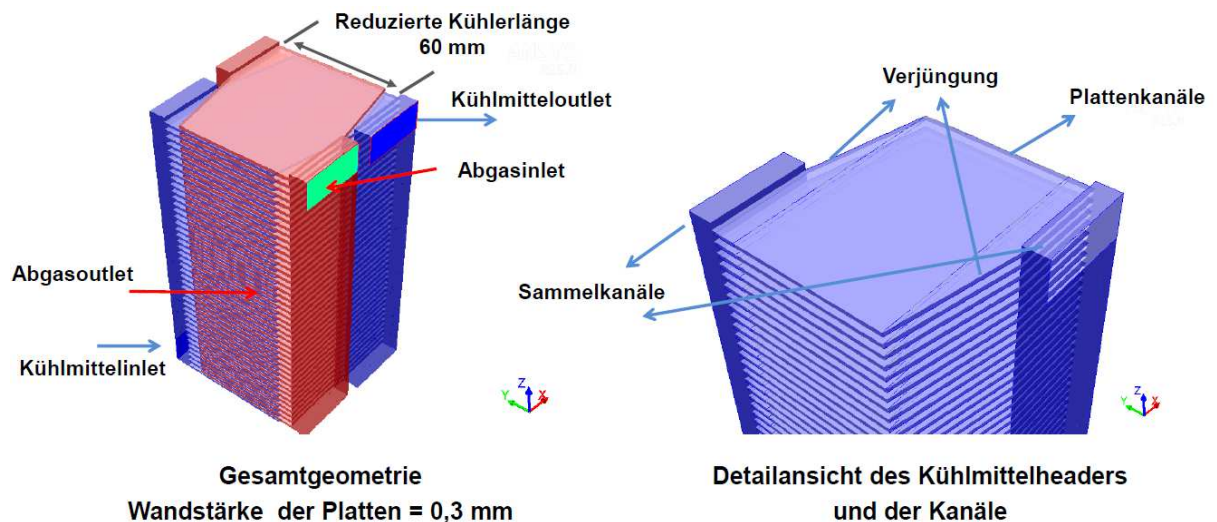


Abbildung 8-8: Modellierung Strömungsverteilung

Als Basisdesign zur Untersuchung des Strömungsverhaltens dient ein Plattendesign mit seitlichen Sammelkanal. Die einzelnen Kanäle für Abgas und Kühlmittel werden abwechselnd übereinander gelegt und über je einen Sammler auf den jeweiligen Einström- und Ausströmseiten miteinander verbunden. Die Sammelkanäle können seitlich geführt sein mit einer einseitigen Verjüngung oder auch als zentral geführte Kanäle mit beidseitigen Verjüngungen. Die Sammler sind bei den zentral geführten Kanälen auch über die Höhe verjüngt.

Abbildung 8-9 zeigt die Geschwindigkeitsverteilung in den Abgas- und Kühlmittelkanälen in einem mittigen senkrechten Schnitt durch den Kondensator. Die Abgasströmung weist eine Geschwindigkeit von 0,2 m/s bis 14 m/s auf, während sich die Kühlmittelströmung bis zu 0,2 m/s bewegt. Es fällt auf, dass die Strömungen sowohl in den Abgaskanälen, als auch in den Kühlmittelkanälen sehr ungleichmäßig verteilt sind. Die Kanäle direkt gegenüber dem Eintritt im Sammler werden am stärksten durchströmt. Danach tritt eine starke Ablenkung in Sammlerrichtung auf, wodurch wiederum die hintersten Kanäle stärker beaufschlagt werden. Die Strömung gelangt an den mittleren Kanälen praktisch vorbei und beaufschlagt diese kaum. Die Querverteilung in jedem der Kanäle ist hingegen durch die Verjüngung verhältnismäßig gleichmäßig.

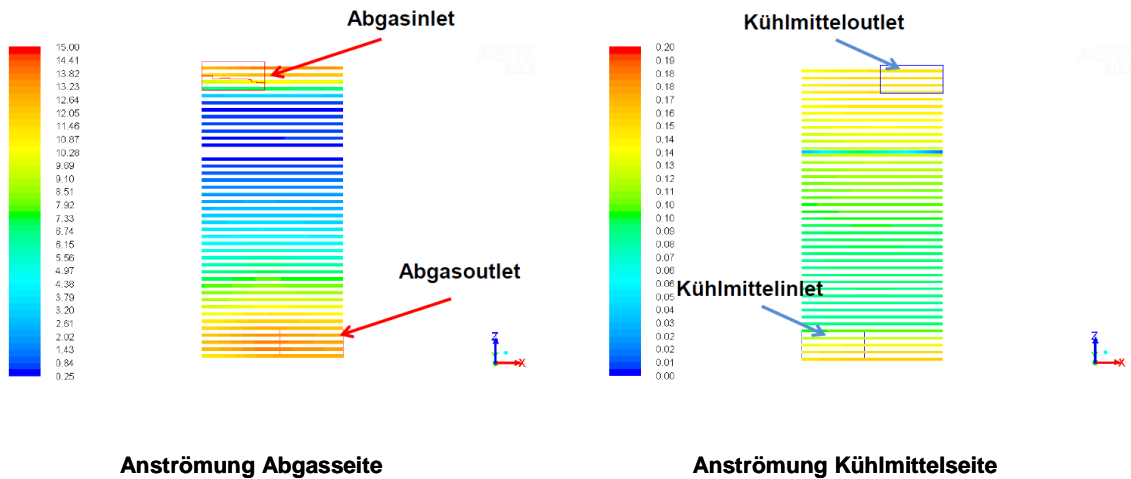


Abbildung 8-9: Strömungsverteilung seitlich geführter Sammler

In Abbildung 8-10 ist die Strömungsverteilung bei zentraler Zuführung dargestellt. Insgesamt stellt sich die Strömungsverteilung gleichmäßiger dar. Dennoch werden die an den Eingängen liegenden Kanäle bevorzugt und die weit weg von der Zuführung liegenden Kanäle schlecht durchströmt.

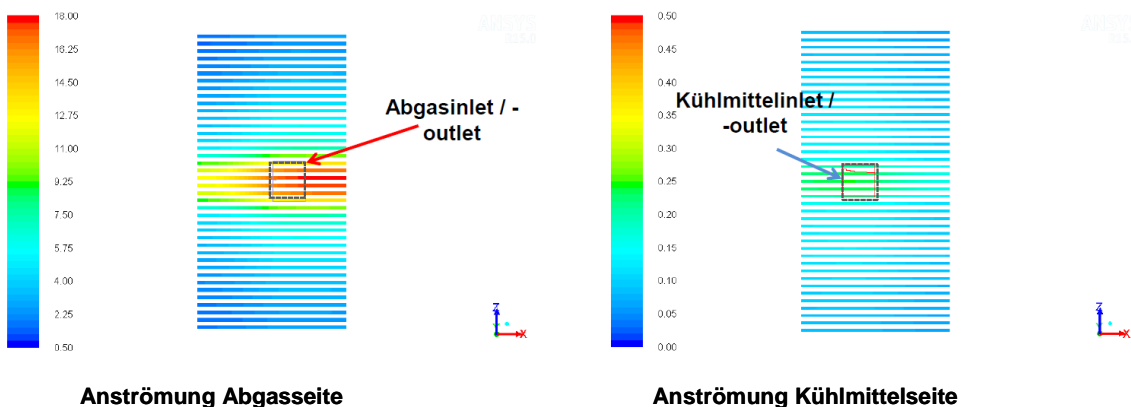


Abbildung 8-10: Strömungsverteilung zentral geführter Sammler

Die Untersuchungen zur Anströmung eines Wärmetauschers mit Plattendesign haben ergeben, dass die Druckverluste in den Strömungskanälen (Abgasseite ca. 300 mbar, Kühlmittelseite ca. 150 mbar) nicht ausreichen, die Strömung auf alle Kanäle gleichmäßig zu verteilen. Dies gilt sowohl für die Abgasseite, als auch für die Kühlmittelseite. Durch eine ungleichmäßige Verteilung ist die maximal mögliche Leistung des Wärmetauschers nicht zu gewährleisten.

Die Designkonzepte für Rohrbündel in fortgesetzter asymmetrischer Wellenform und zentrale Sammelkanäle werden in einem Nachfolgeprojekt zum Bau eines Kondensators Berücksichtigung finden. Das Feindesign muss strömungstechnisch weiter optimiert werden.

8.3.3.2. Wassertank

Auf der Grundlage eines bestehenden Tanks wurde ein Wassertank für das WGS aufgebaut (Abbildung 8-11). Entsprechend der ersten Systemdefinition/-architektur mit einem zentralen Druckkreislauf und Gerätespezifikation fasst der Wassertank ein Volumen von 100l, jedoch in Folge der Änderungen in der Gesamtarchitektur des Multifunktionalen Brennstoffzellensystems nunmehr überdimensioniert ist. Der Wassertank besteht aus CFK mit einem Innenliner aus Kunststoff, der sowohl Trinkwasser zugelassen als auch beständig gegenüber deionisiertem Wasser ist.

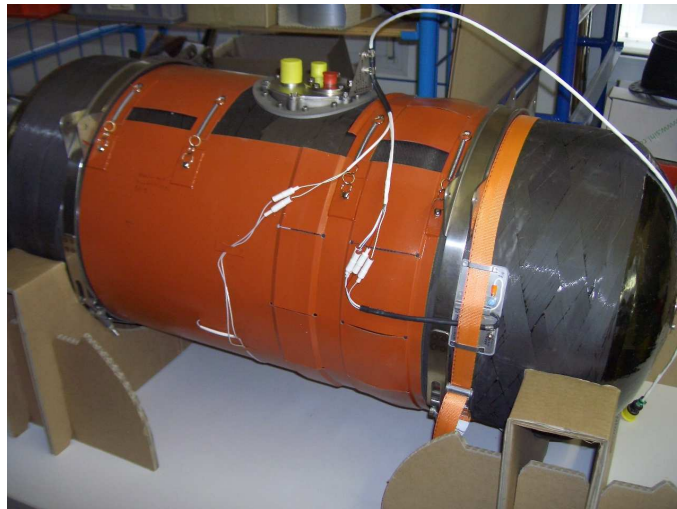


Abbildung 8-11: Wassertank

8.3.3.3. Wasserpumpe

Auf Basis der Anforderungen der Erstspezifikation wurde ein Funktionsmuster der Wasserpumpe (Abbildung 8-12) aufgebaut, die dem Wassertransport und der Bedruckung im Druckkreislauf dienen sollte.



Abbildung 8-12: Wasserpumpe

28. Februar 2014		31
------------------	--	----

Entsprechend den Anforderungen ist die Wasserpumpe selbstregelnd auf einen Wasserdruck bis zu 2,85 bar. Eine integrierte Wassersensorik erkennt, wenn sich die Pumpe im Trockenlauf befindet. In diesem Fall erfolgt eine Schutzabschaltung der Pumpe. Die Wasserpumpe ist Trinkwasser geeignet. Da alle Bereiche der Wasserpassage in Edelstahl ausgeführt sind, ist die Materialbeständigkeit der Pumpe gegenüber deionisiertem Wasser gegeben.

8.4. AP 4 Integration

8.4.1. Prüfstands Aufbau

Im Vorhaben wurden Prüfstände für Funktions- und Leistungstests der Funktionsmuster des WGS aufgebaut bzw. bestehende Prüfstände modifiziert.

Ein bestehender Prüfstand für Wassertanks wurde hinsichtlich der erforderlichen Anschlüsse adaptiert. Der Prüfstand für den Wassertank ermöglicht eine Dichtigkeitsprüfung durch Bedruckung, sowie Funktionstests von Komponenten wie Füllstandssensorik und Beheizung.



Abbildung 8-13: Wassertank-Prüfstand

Ebenso wurde ein bestehender Pumpen-Prüfstand adaptiert um Funktionstests mit der gebauten Wasserpumpe durchzuführen, sowie das Kennlinienfeld der Pumpleistung aufzunehmen.

28. Februar 2014		32
------------------	--	----

8.4.2. Funktionstests

8.4.2.1. Wassertank

Der Wassertank wurde im adaptierten Prüfstand folgenden Tests unterzogen:

Test	Ergebnis
Dichtigkeits- und Drucktest: Erhöhung Innendruck auf 8616 mbar in 2 min, 30 min Haltedruck	Bestanden
Berstdruckversuch: Erhöhung Innendruck auf 12958 mbar in 2 min, 30 min Haltedruck	Bestanden
Wassertankheizung: Widerstand der Masseanbindung Stromaufnahme Temperatursensor	Bestanden Bestanden Bestanden
Wasserstandssensorik	Bestanden

Tabelle 8-3: Funktionstests Wassertank

Nach Änderungen in der Gesamtarchitektur der Multifunktionalen Brennstoffzelle und des WGS ist der Wassertank aufgrund seines Fassungsvermögens von 100 l für eine spätere Flugzeugintegration überdimensioniert. Ein 6l ist für nach aktuellem Stand ausreichend.

8.4.2.2. Wasserpumpe

Die Wasserpumpe wurde im Pumpen-Prüfstand Funktionstests unterzogen. Hierbei wurde auch die Leistungskennlinie aufgenommen, die in Abbildung 8-14 dargestellt ist. Darin sind der Ausgangsdruck und die Stromaufnahme jeweils in Abhängigkeit der Fördermenge (Volumenstrom) aufgetragen.

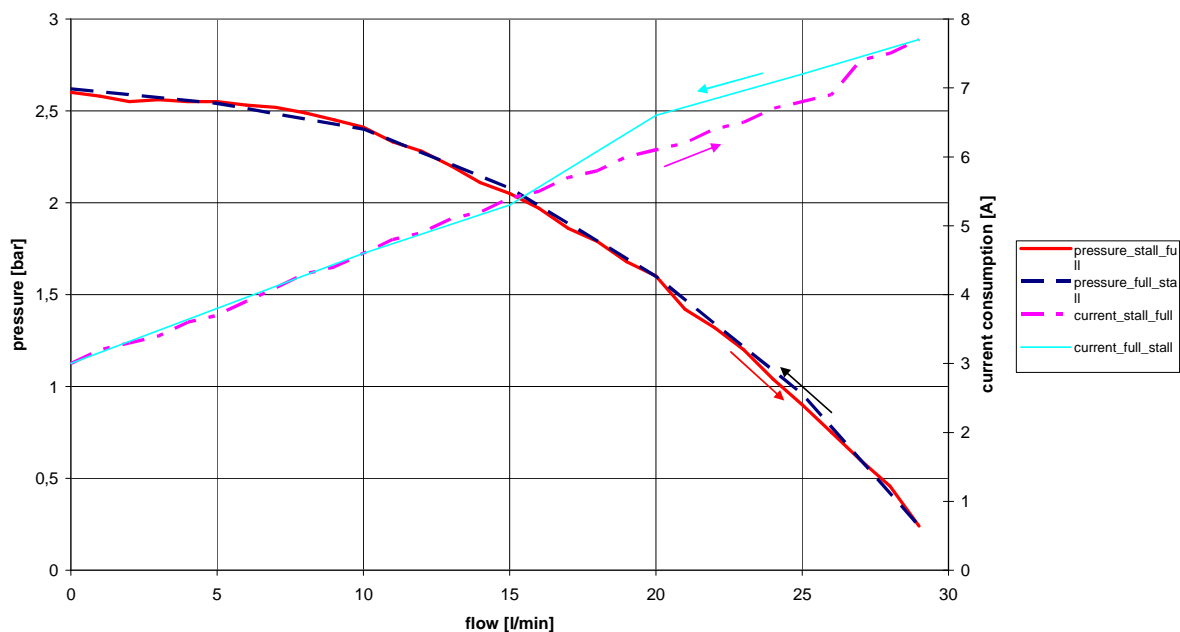


Abbildung 8-14: Leistungskennlinien Wasserpumpe

Auch die Wasserpumpe ist mit ihrer Pumpleistung aufgrund der Änderungen im Gesamtsystem für eine Flugzeugintegration überdimensioniert.

8.4.3. Qualifikationstests

Aufgrund von Programmverschiebungen und mehreren Änderungen in der Systemarchitektur, entsprechen die ursprünglich definierten und entwickelten Komponenten des Wassergenerierungssystems nicht mehr den aktuellen Anforderungen.

Der ursprünglich im Verbund für das multifunktionale Brennstoffzellensystem vorgesehene Technologiereifegrad von TRL 6 (flugtestfähige Komponenten) wurde im Rahmen dieses Vorhabens daher nicht erreicht. Die aufgebauten Funktionsmuster entsprechen nunmehr einem Technologiereifegrad TRL5 (Nachweisführung seiner Funktion im Labor). Somit erübrigen sich auch Qualifikationstest zum Nachweis der Flugtauglichkeit.

8.5. **AP 5 Test und Verifikation**

8.5.1. Systemintegration und Systemtests

In den Arbeitspaketen Systemintegration und Systemtest sollte das Zusammenwirken aller Geräte des Wassergenerierungssystems auf Systemebene verifiziert und die Systemfunktionen in Verbindung mit dem Brennstoffzellensystem nachgewiesen werden.

Aufgrund der Neuauslegung des Kondensators und mangelnder Verfügbarkeit des provisorischen Brennstoffzellenlabors (Testslot, Degeneration / Reparatur von Stacks) konnten die Komponenten des WGS nicht im Systemzusammenhang getestet werden. Die Komponenten sollen in einem späteren Vorhaben im neu erbauten Brennstoffzellenlabor des Zentrums für Angewandte Luftfahrtforschung (ZAL) integriert und verifiziert werden.

8.5.2. Systembewertung / Lessons Learnt

Die Kernkomponenten des WGS sind der Kondensator und der Wasserabscheider, an die sehr hohe Anforderungen für den Einsatz im Flugzeug gestellt werden. Im Vorhaben konnten eine Reihe von wichtigen Erkenntnissen gewonnen werden:

- Das Zusammenwirken der unterschiedlichen Flugzeugsysteme im Kontext eines Multifunktionalen Brennstoffzellensystems ist hoch komplex. Analysen bzgl. Energiehaushalt, Gewicht und Kosten müssen ganzheitlich durchgeführt werden. Eine Gesamtbewertung über alle Flugzeugsysteme kann daher nur der Flugzeughersteller vornehmen.
- Der Nutzen und die Leistungseffizienz des WGS hängen wesentlich vom Betriebsprofil des Brennstoffzellensystems ab (Bodenbetrieb, Flugbetrieb, Betriebspunkte optimiert zur Nutzung von Prozessprodukten z.B. Inertgasgewinnung).

28. Februar 2014		34
------------------	--	----

- Der Kondensator hat die bestmögliche Kondensationsleistung bei zugleich niedrigem Druckverlust, geringem Gewicht und kleiner Bauform zu erbringen. Ebenso stellen die maximal möglichen Druckdifferenzen im Kondensator besondere Anforderungen an das Design und die ausgewählten Materialien, die außerdem trinkwasser geeignet und materialbeständig gegenüber deionisiertem Wasser sein müssen.
- Mit besonderer Sorgfalt ist ein potentieller Hersteller des Kondensators auszuwählen, da für eine kompakte und robuste Bauform innovative und präzise Fertigungsmethoden erforderlich sind.
- Die Erfahrungen haben gezeigt, dass im Abgasstrom hinter dem Kondensator kleine Wasserteilchen mitgerissen werden. Wird das Brennstoffzellenabgas zur Tankinertisierung verwendet, darf es nur noch eine Restfeuchte von 2 g/kg enthalten. Daher ist es erforderlich, dass sämtliches Wasser in flüssiger Phase hinter dem Kondensator vom Abgasstrom getrennt wird. Dies beinhaltet auch die Separation feinsten Wassertröpfchen vom BZ-Abgas mithilfe eines Zyklons.
- Das generierte Wasser muss drucklos abgeführt werden, um den gesamten Druckverlust im Wassergenerierungssystem gering zu halten. Der maximale Druckverlust im WGS darf maximal 300 mbar betragen.
- Grundsätzlich sind die im Vorhaben aufgebauten Funktionsmuster durch die Verwendung von geeigneten Kunststoffmaterialien und Edelstahl materialbeständig gegenüber deionisiertem Wasser. Dennoch ist im Langzeitversuch die Wirkung des deionisierten Wassers auf die verwendeten Materialien, insbesondere Dichtungsringe noch zu untersuchen.
- In Anbetracht der korrodierenden Wirkung des deionisierten Wassers empfiehlt es sich, das im WGS erzeugte BZ-Wasser durch Zugabe von Salzen (z.B. Natriumhydrogencarbonat) generell zu mineralisieren, bevor es anderen Anwendungen zur Verfügung gestellt wird.

9. DARSTELLUNG DES VORAUSSICHTLICHEN NUTZENS UND DER VERWERTBARKEIT DER ERGEBNISSE

In diesem Vorhaben wurden die Anforderungen an ein flugfähiges Wassergenerierungssystem (WGS) für eine gegenüber einem Labormaßstab höhere Leistungsklasse untersucht und erste Systemkomponenten entwickelt.

Das WGS ist innerhalb eines Multifunktionalen Brennstoffzellensystems von zentraler Bedeutung. Es erzeugt und separiert die im Brennstoffzellen-Abgas enthaltenen Prozessprodukte Wasser und Inertgas, die anderen Systemanwendungen zur weiteren Nutzung zu Verfügung gestellt werden können. Hierzu wurden die Anforderungen seitens des WGS, aber auch rückwirkend auf andere die Prozessprodukte nutzende Flugzeugsysteme analysiert.

Auf der Grundlage einer ersten Gesamtarchitektur des Multifunktionalen Brennstoffzellensystems wurden Spezifikationen für das WGS und die erforderlichen Systemkomponenten Kondensator, Wasserabscheider, Wassertank und Wasserpumpe erstellt, auf die die weiteren Entwicklungsarbeiten aufbauen.

Im Vorhaben wurden ein Wassertank und eine Wasserpumpe unter Berücksichtigung einer späteren Flugzeugintegration aufgebaut. Diese Systemkomponenten können trotz Änderungen in der Gesamtarchitektur vorläufig in zukünftigen Laboraufbauten (z.B. ZAL) Verwendung finden. Die Leistungseffizienz dieser Komponenten ist jedoch aufgrund der Überdimensionierung eingeschränkt.

Während des Projekts zeigte sich, dass sowohl auf dem Markt erhältliche Kondensatoren, als auch Sonderentwicklungen die Anforderungen der Luftfahrt hinsichtlich Kondensationsleistung, Druckverlust und Gewicht bisher nicht vollständig erfüllen. Auch eine von AOA ursprünglich vorgesehene Bauform eines Kondensators musste verworfen werden. Mit Hilfe der thermischen CFD Strömungssimulation wurden Designkonzepte für einen Kondensator entwickelt, die die Grundlagen für die Umsetzung eines flugfähigen Funktionsmusters in einem Nachfolgevorhaben bilden. Die Ergebnisse dienen zudem der Weiterentwicklung des Grobdesigns eines Wasserabscheiders bis hin zu einem Prototyp.

Die nächsten Schritte werden die Entwicklung und der Aufbau von weiteren Komponenten des WGS im Hinblick auf eine Flugzeugintegration sein. Hierfür wird ein Zeitraum von weiteren 3 Jahren für ausführliche Bodentests und anschließendem Flugtest vorgesehen. Die erreichten Ergebnisse leisten somit einen erfolgreichen Beitrag für die Weiterentwicklung des multifunktionalen Brennstoffzellensystems. Eine abschließende Bewertung kann nur der Flugzeughersteller nach ganzheitlicher Evaluierung von flugfähigen Systemen leisten.

Mit dem Segment der Wassergenerierung und den neuen Komponenten Kondensator und Wasserabscheider wird das Portfolio des AOA Produktbereichs Wassermanagement erweitert. Werden in zukünftigen Flugzeugprogrammen Brennstoffzellensysteme mit Nutzung der Prozessprodukte Wasser und Inertgas zum Einsatz kommen, wird AOA als Technologieführer entsprechende Lösungen im Bereich der Wassergenerierung anbieten können.

28. Februar 2014		36
------------------	--	----

10. **DARSTELLUNG DES WÄHREND DER DURCHFÜHRUNG BEKANNT GEWORDENEN FORTSCHRITTS BEI ANDEREN STELLEN**

Dem Zuwendungsempfänger sind keine Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen bekannt geworden.

11. **DARSTELLUNG DER GEPLANTEN ODER ERFOLGTEN VERÖFFENTLICHUNGEN**

Während der Projektlaufzeit gab es keine Veröffentlichung der Vorhabensergebnisse, derzeit ist auch keine Veröffentlichung geplant.

28. Februar 2014		37
------------------	--	----

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel Wassermanagement für den Greenliner	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Dipl.-Ing. Rosam Alexander	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.12.2013
	6. Veröffentlichungsdatum 10.03.2014
	7. Form der Publikation Schlussbericht
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) AOA apparatebau gauting GmbH Ammerseestraße 45-49 82131 Gauting	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 03CL03F
	11. Seitenzahl 37
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. Literaturangaben
	14. Tabellen 4
	15. Abbildungen 16
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
18. Kurzfassung Der Einsatz eines multifunktionalen Brennstoffzellensystems soll einen Beitrag zum umweltfreundlicheren und wirtschaftlicheren Betrieb zukünftiger Flugzeuggenerationen leisten. Bei diesem Konzept sollen die Brennstoffzellen nicht nur elektrische Energie bereitstellen, sondern es sollen auch die im Betrieb der Brennstoffzelle anfallenden Prozessprodukte Wasser und sauerstoffabgereicherte Luft (Inertgas) genutzt werden. In diesem Vorhaben wurden die Anforderungen an ein flugfähiges Wassergenerierungssystem (WGS) untersucht und Systemkomponenten entwickelt. Die zum WGS gehörenden Komponenten Kondensator, Wasserabscheider, Wassertank und Wasserpumpe wurden spezifiziert und Funktionsmuster des Wassertanks und der Wasserpumpe aufgebaut. Aufgrund der hohen Luftfahrtanforderungen und ihrer Komplexität wurden für den Kondensator und den Wasserabscheider grundlegende Designstudien mittels CFD Strömungssimulation mit der Zielsetzung einer hohen Wärmetauscherleistung und eines geringen Druckverlustes durchgeführt. Die Ergebnisse bilden die Basis für detaillierte Designs von Kondensator und Wasserabscheider für zukünftige Luftfahrtanwendungen.	
19. Schlagwörter Greenliner , Multifunktionale Brennstoffzelle, Wassergenerierung, Inertgas, Kondensator, Wasserabscheider, Wasserpumpe, Wassertank	
20. Verlag	21. Preis

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) Final Report	
3. title Water management for the Greenliner		
4. author(s) (family name, first name(s)) Dipl.-Ing. Rosam Alexander	5. end of project December 31, 2013	
	6. publication date March 03, 2014	
	7. form of publication Final Report	
8. performing organization(s) (name, address) AOA apparatebau gauting GmbH Ammerseestraße 45-49 82131 Gauting	9. originator's report no.	
	10. reference no. 03CL03F	
	11. no. of pages 37	
12. sponsoring agency (name, address) Federal Ministry of Education and Research (BMW i) 53170 Bonn	13. no. of references	
	14. no. of tables 4	
	15. no. of figures 16	
16. supplementary notes		
17. presented at (title, place, date)		
18. abstract The use of a multi-functional fuel cell system shall enable an environment-friendly and economic operation of future aircraft generations. With this concept the fuel cell shall provide not only electrical energy, but also the process products water and oxygen-depleted air (inert gas) resulting in the operation of the fuel cell. In this project the requirements for an airworthy Water Generation System (WGS) were analysed and the appropriate system components were developed. The WGS components as condenser, water separator, water tank and water pump were specified, followed by the assembly of working prototypes for the water tank and water pump. Due to the strict aerospace requirements for the WGS and complexity of the condenser basic design studies have been conducted by means of flow simulation (CFD) for effective performance of the heat exchanger and low pressure drop. The results are the basis for the detailed design of the condenser and water separator for future aerospace applications.		
19. keywords Greenliner, multi-functional fuel cell, water generation, inert gas, condenser, water separation, water pump, water tank		
20. publisher	21. price	