

A WAY TO HYDROGEN-PROPELLED AIRCRAFT

M. C. Schwarze, G. Öttl

LLS Lehrstuhl für Luftfahrtsysteme, Technische Universität München,
Boltzmannstrasse 15, 85747 Garching, Deutschland

Zusammenfassung

Heutzutage auf breiter Basis verwendete Luftfahrttreibstoffe auf Kohlenwasserstoffbasis, wie etwa Kerosin, sind über die Ressourcenverfügbarkeit der Rohstoffe von Natur aus begrenzt. Gleichzeitig hat unter anderem ein auf Gesellschaftsebene gestiegenes Umweltbewußtsein dazu geführt, dass der Luftverkehr bereits im bevorstehenden Jahr 2012 in das europäische Emissions-Handelssystem ETS mit einbezogen wird und auf diese Weise zum ersten Mal konkrete Abgaben für anfallende CO₂ Emissionen erfolgen müssen.

Wasserstoff als möglicher zukünftiger Treibstoff bietet in diesem Zusammenhang grundsätzlich den Vorteil, theoretisch in unbegrenzten Mengen herstellbar zu sein. Falls diese Herstellung nachhaltig, d.h. ohne Emissionen erfolgt, ist ein komplett CO₂ freier Betrieb denkbar und möglich. Auch andere Emissionen wie CO werden während des Fluges vermieden bzw. signifikant reduziert (NO_x).

Mit Flüssigwasserstoff getriebene Flugzeuge gelten im Flugzeugentwurf als allgemein theoretisch gut erforscht, so dass mit der konkreten praktischen Implementierung und Erprobung als dem nächsten bevorstehenden, logischen und sinnvollen Schritt unmittelbar begonnen werden kann.

Für diesen weiteren Schritt präsentiert diese Veröffentlichung ein integriertes und praxisnahes Konzept, wie Test und Erprobung von wasserstoffgetriebenen Flugzeugen im Sektor des regionalen Frachtzubringerverkehrs unter realen operativen Einsatzbedingungen geplant und vorgenommen werden können. Im Rahmen dieses integrativen Konzeptes sind die verwendeten Flugzeuge, die Flugmission, die Komplexität in der Bodeninfrastruktur und die operativen Rahmenbedingungen, die die Mission und den Treibstoff betreffen so aufeinander abgestimmt, dass sich mit realistischem Aufwand und mit absehbaren Kosten ein zielgerichteter Erprobungs- und Evaluierungsbetrieb für Wasserstoff als Luftfahrttreibstoff einstellt.

Ein dazugehöriges und begleitendes Programm mit mehreren klaren Stufen und Meilensteinen strukturiert dabei den Test- und Erprobungsfortschritt. Übergeordnetes Ziel, sowohl für die beteiligten Flugzeuge, für ihre Triebwerke als auch für ihre Systeme, ist es, eine solche operative Einsatzreife zu erlangen, dass mit dem Einsatz von Serienfliegern und der Umrüstung von bestehenden Flugzeugen auf Flüssigwasserstoffbetrieb bei Bedarf auch im kommerziellen Betrieb nach Abschluss des Programms unmittelbar begonnen werden kann.

1. EINLEITUNG UND HINTERGRUND

In der Diskussion um einen nachhaltigeren und umweltfreundlicheren Treibstoff in der Luftfahrt gilt Wasserstoff für die zukünftige Verkehrsluftfahrt seit längerem als technologisch aussichtsreiche Alternative zu Kerosin. Wasserstoff bietet bei der Verwendung den Vorteil, dass klimarelevante Emissionen nahezu komplett entfallen.

Bei der Verbrennung des Treibstoffes in den Haupttriebwerken entstehen neben unvermeidbaren Spuren von NO_x durch die im Verbrennungsprozess beteiligte stickstoffhaltige Außenluft hauptsächlich Emissionen in Form von Wasserdampf. Mit Anwendung dieses Konzeptes werden große Mengen an klimaschädlichen Emissionen, insbesondere an CO₂, vermieden. Diese stehen im Verdacht, den Treibhauseffekt nennenswert zu beschleunigen und somit zum Klimawandel beizutragen. Aufgrund des gesellschaftlich gewachsenen Bewusstseins stehen erste verbindliche Emissionsbeschränkungen in Form gesetzlicher

Vorgaben mit der Einbeziehung der Luftfahrt in den Emissionshandel im nächsten Jahr 2012 unmittelbar bevor.

Seit kürzester Zeit wird diese Debatte nicht nur durch Umweltgesichtspunkte vorangetrieben. Bestehende fossile Reserven, die auf breiter Basis zur Energieversorgung beitragen, sind von Natur aus begrenzt und können für die mittelfristige Zukunft daher nicht mehr uneingeschränkt als kostengünstig verfügbar gelten. Einige Expertenteams sehen das Fördermaximum für konventionelles Rohöl bereits jetzt als überschritten an und prognostizieren als Folge des steigendes Bedarfs bei einem verknappenden Angebot eine empfindliche Steigerung des Ölpreises (vgl. BILD 1).

Vor dem Hintergrund aktueller gesellschaftspolitischer Ereignisse, besonders im arabischen Raum, rückt das Thema Versorgungssicherheit von Energie ins Zentrum des Interesses. Für die Wirtschaft und Gesellschaft der globalisierten Welt sind internationale Flugverbindungen für Passagiere und Fracht längst unverzichtbar geworden. Die Gewährleistung dieser Mobilität setzt die nachhaltige

Verfügbarkeit eines Treibstoffes in ausreichenden, großen Mengen und zu einem wirtschaftlich vertretbaren Preis voraus.

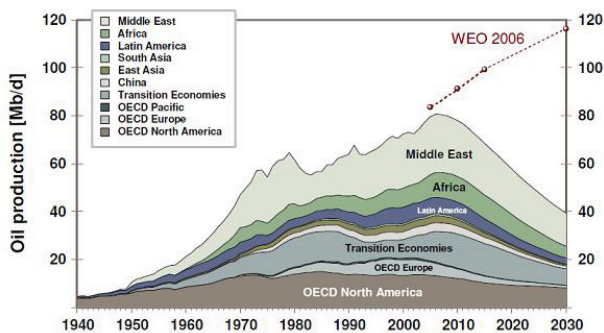


BILD 1. Die global förderbaren Rohölreserven werden abnehmend, dagegen der weltweite Ölbedarf (rot gestrichelte Linie) als weiter zunehmend angenommen, was eine zunehmende Angebotslücke erwarten lässt [1]

Hier bietet Wasserstoff als Energieträger mittel- und langfristig den Vorteil der politisch unabhängigen und potentiell unbegrenzten Erzeugung. Für die Zukunft ist es generell denkbar, den Wasserstoff mittels Elektrolyse aus Wasser mit ausschließlich erneuerbaren Energien zu erzeugen. Durch die regenerative Herstellung fallen damit bei der Produktion keine klimaschädlichen Emissionen an.

Bei der Integration eines Wasserstoffantriebssystems in Großflugzeuge ist das Einrüsten eines Brennstoffzellensystems zur elektrischen Energieversorgung der Haupttriebwerke nach aktuellem Stand der Technik aus Gewichtsgründen nicht machbar. Der Wasserstoff wird daher im gasförmigen Zustand direkt in die Haupttriebwerke eingeleitet. Ebenfalls aus Gewichtsgründen und aufgrund der Volumensensitivität kommt nur die Speicherung des Wasserstoffes in flüssiger Form in Frage [2]. In diesem Aggregatzustand bietet der Energieträger Wasserstoff eine hohe volumenspezifische Dichte. Dennoch verlangt der kryogene Treibstoff bei seiner Speicherung im Vergleich zu Kerosintreibstoffen nach dem vierfachen Volumen [3], das im Flugzeug vorzusehen ist. Die zentrale Herausforderung im Flugzeugvorentwurf besteht darin, genügend Volumen für die Speicherung des Kraftstoffes bereitzustellen.

Mit Blick auf den hohen Volumenbedarf bieten sich hierbei für die Erprobung und Validation der Wasserstoffantriebstechnologie Frachtflugzeuge an. Sie bieten ein hohes verfügbares Volumen, auf das insbesondere bei der Integration der Drucktanks zurückgegriffen werden kann. Sicherheits- und Auslegungskonzepte, die eines Tages im Linienbetrieb mit Passagieren selbstverständlich sein könnten, können hier schrittweise entwickelt und validiert werden.

2. BISHERIGE FORSCHUNGEN ZU WASSERSTOFFGETRIEBENEN VERKEHRSFLUGZEUGEN

2.1. Theoretische Forschungsprojekte

Unter denen zu wasserstoffgetriebenen Flugzeugen theoretisch vorgenommenen Forschungsvorhaben sind in zeitlich umgekehrter Reihenfolge vom jüngsten zum ältesten

ten Projekt besonders die beiden Forschungsvorhaben „Grüner Frachter“ und das „Cryoplane“ Projekt hervorzuheben.

Das Projekt „Grüner Frachter“ war ein gemeinsames Forschungsprogramm der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg (HAW), dem Institut für Flugzeugbau und Leichtbau (IFL) an der Technischen Universität Braunschweig, dem europäischen Flugzeughersteller Airbus und dem Ingenieurbüro Bishop GmbH. Ziel des im Zeitraum von 2006 - 2010 durchgeführten Projektes war es, möglich effiziente und umweltgerechte Flugzeuge hin auf typische Leistungsanforderungen einer Frachtmmission zu entwickeln [7]. Die Untersuchung betraf sowohl kleine Turbopropflugzeuge als auch Langstreckenfrachtflugzeuge am Beispiel der Boeing 777F. Im Rahmen des Projektes wurden hier mit der ATR 72 auch zum ersten Mal Turbopropflugzeuge im Wasserstoffbetrieb konkret für den regionalen Frachtzubringerverkehr ausgelegt.

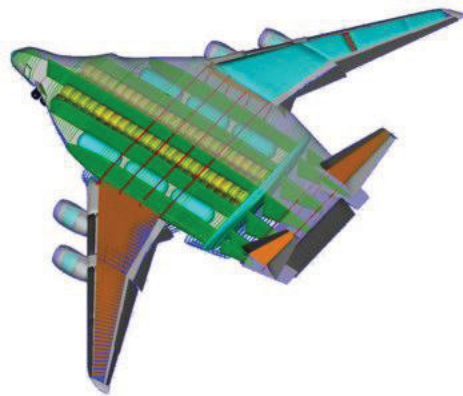


BILD 2. Im Rahmen des Forschungsprojektes „Grüner Frachter“ wurden auch unkonventionelle Konfigurationen in Form von BWBs untersucht [8]

Darüber hinaus wurden auch unkonventionelle Konfigurationen in Form von Blended Wing Bodies (BWBs) gerechnet, die auf Mittel- und Langstreckenmissionen zum Einsatz kamen und im Betrieb Kerosin, Wasserstoff oder beide Treibstoffe sequentiell benutzten.

Das „Cryoplane“ Projekt fand im Zeitraum von 2000 bis 2002 als Verbundprojekt zwischen 36 Universitäten, Forschungseinrichtungen und Industriepartnern aus verschiedenen europäischen Ländern und aus Russland statt. Unter der Führung des Flugzeugbauers Airbus galt als Ziel die Untersuchung und Umrüstung von Verkehrsflugzeugtypen unterschiedlicher Größe [7]. Das Projekt brachte größtenteils theoretische Ergebnisse und gilt als das größte und wichtigste europäische Projekt zur Erforschung wasserstoffgetriebener Flugzeuge.

2.2. Praktisch orientierte Forschung

Das „Cryoplane“ Projekt enthielt neben umfangreichen theoretischen Forschungen auch einige angewandte und praxisorientierte Aspekte. Im Rahmen des Projekts wurde an der Fachhochschule Aachen eine APU (Flugzeughilfsgasturbine) auf den Betrieb mit Wasserstoff umgerüstet. Die Umrüstung der Hilfgasturbine kann aufgrund des ähnlichen Wirkungsprinzips grundsätzlich auf Flugzeugturbinen für den Primärtrieb übertragen werden [9].

Messungen ergaben, dass im Wasserstoffbetrieb der Wirkungsgrad mindestens identisch zu dem im Kerosinbetrieb ist. Mit einigen moderaten Umrüstungen am Triebwerk könnte es zusätzlich möglich sein, diesen Wirkungsgrad sogar geringfügig zu steigern [10]. Auf der Abgasseite der Turbine konnte ein Rückgang der NO_x Emissionen um bis zu 80% erreicht werden [9]. Maßgeblich hierfür war auch die Verwendung eines innovativen Einspritzsystems. Das Mikro-Mischprinzip verteilt dabei die Einspritzung des gasförmigen Wasserstoffes auf zahlreiche Mikro-Einspritzdüsen, die in einer Matrixform innerhalb der Brennkammer angeordnet sind [9]. Kurz bevor der Wasserstoff selbst in die Brennkammer eingespritzt wird, wird er mit Hilfe eines Wärmetauschers vom flüssigen Lager- und Förderzustand in den gasförmigen Aggregatzustand übergeführt [6].

2.3. Erster praktischer Testbetrieb im zivilen Sektor

Noch vor dem „Cryoplane“ Projekt wurde auf russischer Seite beim Flugzeughersteller in den früheren 90er Jahren ein Test- und Erprobungsflugzeug in Betrieb genommen. Die Tupolev TU 155 basierte technisch auf dem Kurz- und Mittelstreckenverkehrsflugzeug TU 154 und erhielt in der Kabine im hinteren abgeschotteten Abschnitt einen $17,5 \text{ m}^3$ großen zylindrischen Tank für die Speicherung des kryogenen Wasserstoffes. Das in Flugrichtung rechte der insgesamt drei Triebwerke konnte im Flug wahlweise mit Wasserstoff oder Erdgas betrieben werden. Die verbleibenden zwei Triebwerke liefen parallel zum Umrüsttriebwerk NK88 und verwendeten konventionell Kerosin. Im Demonstrationbetrieb wurden mehrere Flüge vor Publikum in Berlin, Nizza, Bratislava und Hannover demonstriert [11]. Insgesamt wurden mit der TU 155 fünf Flüge im Wasserstoffbetrieb durchgeführt. Dabei kam es laut Auskunft von Tupolev zu keinen besonderen Vorkommnissen [11].

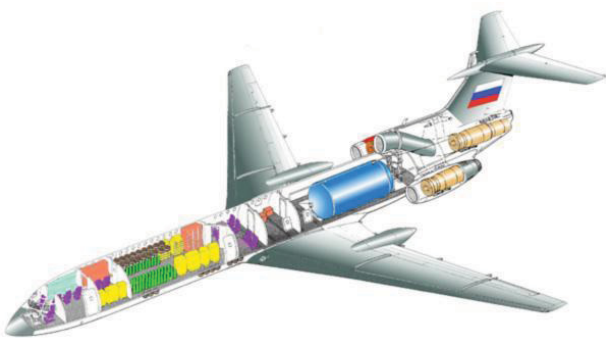


BILD 3. Layout des Tupolev Tu 155 Wasserstoff-Demonstratorflugzeuges [10]

Der Einsatzzweck hatte zunächst das Ziel, zu zeigen, dass der Betrieb von wasserstoffgetriebenen Flugzeugen grundsätzlich technisch möglich und sicher ist und war damit auch politisch motiviert. Nachdem die Erprobung des Wasserstoffbetriebes offiziell aufgrund der noch hohen Treibstoffkosten des flüssigen Wasserstoffes LH_2 beendet wurde [11], ging man dazu über, mit demselben Erprobungsträger den Betrieb mit Flüssiggas (Liquified Natural Gas, LNG) zu erproben. Auf dem Territorium der damaligen UdSSR wurden damals etwa die Hälfte der

damalig förderbaren Welterdgasreserven vermutet [11]. Am Flugzeug selbst mußten dazu nur moderate Umrüstungen getätigt werden. Hintergrund ist, dass beide Treibstoffe in ihren kryogenen Speicher- und Förderanforderungen recht ähnlich sind. Wasserstoffflugzeuge lassen sich bei geschickter Systemauslegung damit so ausführen, dass auch mit Flüssiggas geflogen werden kann [6].

2.4. Zentrale Herausforderungen bei dem Entwurf von Wasserstoffflugzeugen

Bei der Integration eines Wasserstoffantriebssystems in Großflugzeuge ist das Einrüsten eines Brennstoffzellensystems zur elektrischen Energieversorgung der Haupttriebwerke nach aktuellem Stand der Technik mittelfristig aus Gewichtsgründen nicht machbar. Der Wasserstoff wird daher als Brennstoff direkt in den Haupttriebwerken verwendet.

Die Speicherung des Wasserstoffes im gasförmigen Zustand an Bord müßte bei Drücken deutlich größer als 350 bar erfolgen, um eine realistische volumenspezifische Dichte bei der Integration der Treibstoffbehälter in Verkehrsflugzeuge zu ermöglichen. Beim derzeitigen Stand der Technik führt das jedoch zu einem nicht vertretbar hohen Behältergewicht, der die Nutzlast des Flugzeuges stark oder gar auf null herabsetzen würde. Damit kommt für die Speicherung des Wasserstoffes an Bord von Verkehrsflugzeugen derzeit nur der kryogene Zustand in Betracht.

Sowohl im Laufe des „Cryoplane“-Projektes als auch in der praktischen Erprobung zeigte sich, dass eines der zentralen Herausforderungen ist, im oder am Flugzeug ausreichend Volumen für die Treibstoffspeicherung des kryogenen Wasserstoffes bereitzustellen. Flüssiger Wasserstoff verfügt über eine vorteilhafte massenspezifische Energiedichte. Im Vergleich zu Kerosin ist bei Flüssigwasserstoff für dieselbe Energiemenge nur etwa ein Drittel (Faktor 2,8) des Treibstoffgewichtes notwendig [2].

Die volumenspezifische Energiedichte fällt dagegen schlechter als beim Kerosin aus. In flüssiger, d.h. kryogener Form, wird beim Wasserstoff eine hohe volumenspezifische Speicherdichte erreicht. Dennoch ist für dieselbe Energie beim Wasserstoff im Vergleich zum Kerosin das vierfache Volumen bereitzustellen [4]. Die kryogene Isolierung um die Behälter zur Erhaltung der Speicherbedingungen von -251°C bei etwa 1,5 bar [6] ist aufwendig und führt zusätzlich dazu, dass das Volumen für die Integration der Treibstoffbehälter in der Praxis noch größer ausfällt [5]. Trotz einer aufwendigen Isolierung läßt es sich, insbesondere während der Bodenstandzeiten, nicht vermeiden, dass ein kleiner Teil der Treibstoffmenge (5-10%) durch den Wärmeeintrag im Tank und im Fördersystem verdampft und nicht zur Vortriebserzeugung genutzt werden kann [6].

Für die flugzeugseitige Unterbringung der Treibstoffbehälter gibt es grundsätzlich zwei unterschiedliche Möglichkeiten. Bei der Integration der Speicher innerhalb der Passagierkabine wird das nutzbare Volumen für Passagiere und Fracht herabgesetzt. Mit der Unterbringung der Behälter außerhalb des Flugzeuges erhöht sich grundsätzlich die bespülte Fläche des Flugzeuges. Dies führt zu einem größeren Widerstand und bedeutet bei unverändertem Schub gegenüber dem ursprünglichen Kerosin-Referenzflugzeug schlechtere Flugleistungen.

Die Unterbringung der Wasserstoffspeicher außen am

Flugzeug erfolgt in den meisten Studien entweder unterhalb einer aerodynamischen Verkleidung direkt über der Passagierkabine oder aber in Gondeln unter dem Flügel.



BILD 4. Bei einer Studie zur wasserstoffgetriebenen Do 328 waren die Wasserstofftanks in Gondeln unterhalb des Flügels angebracht [12]

3. ZUKÜNFTIG VORGESCHLAGENES INTEGRIERTES KONZEPT ZUR ERPROBUNG VON LH₂ GETRIEBENEN FLUGZEUGEN

Das Konzept, das an dieser Stelle vorgestellt wird, greift mit der grundsätzlichen Flugzeug- und Systemarchitektur die Ergebnisse der theoretischen Forschung auf, geht jedoch einen Schritt weiter und stellt eine Lösung zur praktischen Erprobung von Wasserstoffflugzeugen unter realen Einsatzbedingungen dar. Es ist zeitlich weitsichtig aufgebaut. Ziel ist es, zusammen mit dem gestuften Programm einen Weg vorzugeben, der von der ersten operativen Anwendung des Wasserstoffes in einem speziellen Demonstratorflugzeug bis hin zur routinemäßigen Anwendung des Treibstoffes in einem seriennahen und vollwasserstoffbetriebenen Frachtflugzeug reicht. Im Lauf des Programms soll dabei die volle operative Einsatzreife des Flugzeuges, der Triebwerke und der beteiligten Systeme erreicht werden. Damit geht dieses Erprobungsprojekt auch deutlich über das erreichte Ziel des russischen Demonstratorflugzeuges aus den neunziger Jahren hinaus, welches innerhalb der 5 durchgeführten Flüge demonstriert hat, dass Wasserstoff als Treibstoff in der Luftfahrt grundsätzlich technisch machbar und in der Anwendung sicher ist.

Die im Rahmen dieses Konzeptes verwendeten Turbopropflugzeuge weisen deshalb in ihrer Systemarchitektur und Auslegung, so beispielsweise bei der Isolierung ihrer kryogenen Tanks, eine Architektur auf, die besser an den langfristigen Einsatz und an die realen operativen Anforderungen der Erprobungsmission angepasst ist.

Ein besonderes Kennzeichen und Alleinstellungsmerkmal dieses nachhaltigen Konzeptes beruht in dem integrativen Ansatz, der diese geeigneten modifizierten Flugzeuge unter realen Einsatzbedingungen innerhalb der passenden Mission im „geschützten“ und gleichzeitig isolierten Sektor des Frachtflugverkehrs zum Einsatz bringt. Dabei wird das langfristige Ziel nicht aus den Augen verloren, den Einsatz von Serienflugzeugen konkret vorzubereiten und dahingehend auch parallel die regulatorischen Rahmenbedingungen, z.B. in Form von Zulassungsvorschriften, bereitzustellen.

Nachdem der routinemäßige Einsatz im operativen Frachtflugverkehr erreicht ist, kann mit Hilfe der in der Erprobung erreichten Wissens- und Erfahrungsbasis gemäß der Idee der Skalierbarkeit die Technologie auch auf den Passagierflugverkehr und somit auf weitere Teile der kommerziellen Luftfahrt übertragen werden.

3.1. Verwendete Turbopropflugzeuge

Das integrierte Konzept zur Einführung von Wasserstoffflugzeugen nutzt dabei zwei speziell modifizierte Regionalflugzeuge, die teils oder ausschließlich mit Wasserstoff als Treibstoff operieren und durch Umrüstungen aus dem Basis- Turbopropflugzeug ATR 72-500 hervorgehen.

3.1.1. Demonstratorflugzeug

Das Flugzeug trägt mit Blick auf seine spezielle Aufgabe den Arbeitsnamen DEMONSTRATOR. Die Umrüstversion der ATR 72 nutzt, wie im folgenden Kapitel „Systemarchitektur“ beschrieben, sowohl Kerosin als auch Wasserstoff als Treibstoff. Dabei sind die Wasserstofftanks als Module

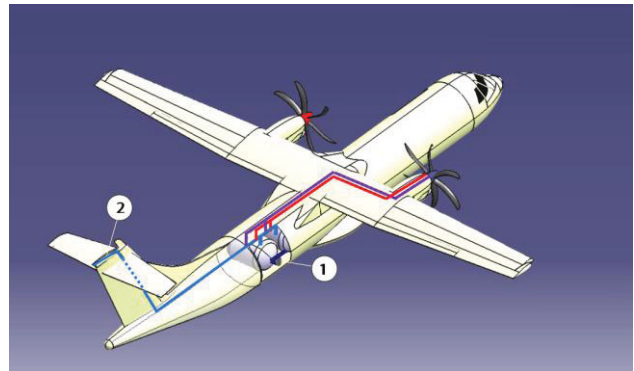


BILD 5. Layout des vorgeschlagenen Demonstratorflugzeuges auf Basis der ATR 72 mit in der Kabine rechten Wasserstofftanks [6]

ausgeführt und auf Paletten gelagert innerhalb der Frachtkabine untergebracht. Mit dieser Maschine können, wie später näher ausgeführt wird, die ersten fünf der insgesamt sechs Stufen des Testprogramms durchgeführt werden.

3.1.2. Seriennahes Flugzeug „Topliner“

Die zweite Flugzeugversion baut auf den Erfahrungen der Mission des Demonstratorflugzeuges auf und ermöglicht es, mit dem routinemäßigen langfristigen Einsatz im operativen Frachtverkehr die sechste und letzte Stufe des Test- und Erprobungsprogramms zu fliegen. Bei dieser Umrüstversion fällt der Umrüstaufwand größer aus, da nun von Anfang an beide Triebwerke auf Wasserstoff umgerüstet werden und die Tanks außen oberhalb der Passagierkabine unter einer Abdeckung installiert werden. Damit steht für die Missionserprobung im Frachtzubringerverkehr das gesamte Nutzvolumen der Kabine zur Verfügung. Diese seriennahe Version trägt im Konzept als Vollwasserstoffflugzeug den Arbeitsnamen TOPLINER.

Beide Flugzeugversionen, sowohl der Demonstrator als auch der Topliner, sind für den Betrieb im Expressfracht-

segment im regionalen Zubringerverkehr ausgelegt.

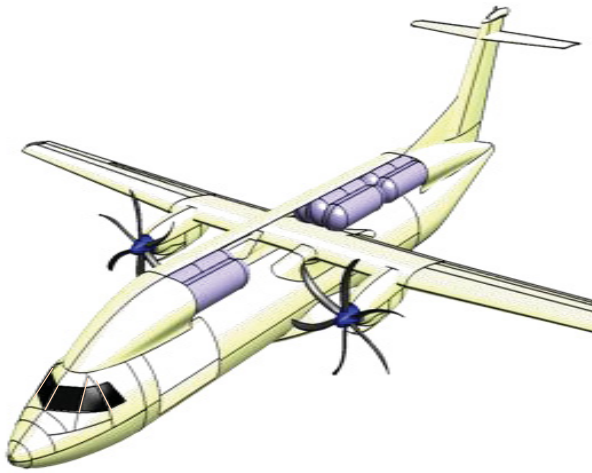


BILD 6. Bei dem seriennahen Frachtflugzeug „Topliner“ sind die Wasserstoffbehälter außen oberhalb der Kabine untergebracht (linke obere Abdeckung zur Verdeutlichung entfernt) [6]

3.2. Verwendetes Testprogramm und Meilensteine

Das Programm sieht vor, mit einem Demonstratorflugzeug zu starten, dessen Layout, Design und Systemarchitektur schon im Vorhinein so modular ausgelegt ist, dass ein systematisches und langfristiges Programm aus insgesamt sechs Schritten absolviert werden kann, an dessen Ende der reale operative Erprobungseinsatz steht.

Die einzelnen Programmschritte bauen dabei aufeinander auf und setzen einen immer fortschrittlicheren Umrüstungsstatus des Flugzeuges voraus. Dabei kommt für die ersten fünf Stufen das Demonstratorflugzeug zum Einsatz. Die letzte und sechste Stufe des Konzeptes greift auf die zweite Flugzeugversion „Topliner“ zurück, die als Vollwasserstoffflugzeug bereits sehr seriennah ausgeführt ist und für die operative Mission das volle Nutzlastvolumen der Kabine bereitstellt, da die Wasserstofftanks außen oberhalb des Rumpfes untergebracht sind.

Das 6-Stufenprogramm setzt sorgfältige Bodentests des Triebwerks, des Flugzeugs und seiner Komponenten voraus.

- 1.) **Wasserstoffbetrieb an der Parkposition:** Dieser Schritt ermöglicht die volle Energieversorgung des Flugzeuges im Hinblick auf die Elektrik, Hydraulik und Druckluft an der Parkposition durch Wasserstoff. Dazu wird zunächst das rechte Triebwerk auf Wasserstoffbetrieb umgerüstet und dabei im speziellen sogenannten „Hotel-Mode“ so betrieben, dass das Kerntriebwerk und die Generatoren laufen, während der Propeller von der Turbine entkoppelt bleibt und sich nicht dreht. Damit ergibt sich ein CO₂-freier Betrieb während der Abfertigung an der Parkposition.
- 2.) **Wasserstoffbetrieb während der Ground Operation:** Verwendung des umgerüsteten Wasserstofftriebwerkes auch zum Rollen bis zur Start-

bahn und zum Abrollen nach der Landung am Boden. Dieses ist laut Performance-Handbuch des Flugzeuges bereits in der Basisversion ausdrücklich möglich bzw. vorgesehen. Dieser Meilenstein führt zu einem komplett CO₂-freien Bodenbetrieb.

- 3.) **Flugbetrieb im Duo Fuel Betrieb:** Dies bedeutet, dass das linke Triebwerk konventionell im Kerosin-Modus läuft, während das rechte Triebwerk komplett mit Wasserstoff betrieben wird. Im Folgenden werden Tests unter verschiedenen Flug-, Manöver- und Atmosphärenbedingungen vorgenommen. Vorteile sind hierbei, dass die auf verschiedenen Treibstoffen operierenden Triebwerke zu jedem Zeitpunkt dieselben operativen und meteorologischen Bedingungen durchlaufen, also ständig miteinander verglichen werden können. Dieses könnte gerade beim Aufnehmen der für Turbopropflugzeuge üblichen Kennfelder recht praktisch sein.
- 4.) **Voll-Wasserstoff-Flugbetrieb:** Nachdem genug Erfahrung im Betrieb des umgerüsteten Triebwerkes gesammelt worden ist und dessen Zuverlässigkeit nachgewiesen ist, wird auch das 2. Triebwerk auf Wasserstoffbetrieb umgerüstet. Jedes Triebwerk wird dann entsprechend den Zulassungsvoraussetzungen aus einem eigenem Tank versorgt. Das Flugzeug emittiert damit kein CO₂ mehr. Die NO_x Emissionen sind stark herabgesetzt. Es folgt die weitere Flugerprobung.
- 5.) **Operative Einsatzerprobung:** Nach erprobter und erwiesener Einsatzreife wird das Demonstratorflugzeug im operativen und planmäßigen Frachtverkehr zur weiteren Einsatzerprobung eingesetzt. Dieses bietet die Gelegenheit, über einen größeren Zeitraum hinweg Erfahrungen unter den wirklichen Einsatzbedingungen zu sammeln und die Möglichkeit, Zulassungsrichtlinien zu entwickeln und zu evaluieren. Im selben Zuge kann das Ermüdungsverhalten von relevanten Komponenten und Systemen erfasst werden, so dass auch Wartungsintervalle festgelegt werden können. Während der Operation steht die im Volumen entgegen dem Basisflugzeug um etwa 35% reduzierte Kabine für die Frachtflugmission zur Verfügung [6].
- 6.) **Weitere Einsatzerprobung mit dem seriennahen Flugzeug „Topliner“:** Mit den Erfahrungen aus der Demonstratormission und der erwiesenen Einsatzreife der Triebwerke und Systeme kann nun auch die Umrüstung einer zweiten ATR 72 zu einer seriennahen Version für den Einsatz im kommerziellen Frachtflugzubringerverkehr erfolgen. Dabei liegen die Tanks nun außerhalb der Kabine, was dazu führt, dass das volle Nutzlastvolumen des Flugzeuges für die Mission zur Verfügung steht. Während der weiteren Operation kann die Langzeiterprobung der Systeme weitergehen und die Evaluierung der Zulassungsvorschriften fortgesetzt werden. Die Erfahrungen können in den Bau von Serienmaschinen einfließen oder auf andere Bereiche der Luftfahrt, z.B. den Passagiertransport transferiert werden.

3.3. Aufgaben, Sinn und Zielsetzung der der Mission des Demonstratorflugzeuges

Das Demonstratorflugzeug, das während der ersten fünf Stufen zum Einsatz kommt, verfolgt mit seiner Mission im Wesentlichen die folgenden Ziele:

- Zu zeigen, dass das Antriebskonzept auf Flüssigwasserstoffbasis technisch handhabbar ist und eine verlässliche und gleichermaßen sichere Methode zur regelmäßigen operativen Lufttransportdurchführung darstellt. Das Flugzeug soll die Sicherheit des Antriebskonzeptes demonstrieren und die gesellschaftliche Akzeptanz fördern.
- Sammeln von praxisrelevanten Erfahrungen im Umgang mit dem Treibstoff unter operativen Bedingungen (z.B. Förderbarkeit des Treibstoffes in sämtlichen Fluglagen, Verifizierung von verschiedenen kryogenen Pumpkonzepten)
- Finden und Erproben von technischen Lösungen zu operativen Detailfragen (wie etwa dem Spülen des Treibstoff-Rohrleitungssystems, die konkrete Durchführung der Betankung, die Enteisung etc.)
- Demonstration des ökologischen Potentials, insbesondere der nachhaltigen Senkung der Emissionen
- Zulassungsrichtlinien für den neuen Treibstoff und die betroffenen Systeme am Flugzeug zu entwickeln, was beispielsweise auch die Systemauslegung im Falle von Fehlern betrifft.
- Das Ermüdungsverhalten relevanter Komponenten zu entwickeln und darauf hingehend Detailverbesserungen in die Wege zu leiten und Wartungsintervalle für die beteiligten Systeme festzusetzen.
- Serienflieger vorzubereiten bzw. Erfahrungen zu sammeln, die in Konzepte für Serienflieger eingehen oder Retrofit - Lösungen aufzuzeigen (zur Umrüstung von bestehenden Flugzeugen).

Zusammenfassend gilt auch als Gesamtziel des Prozesses das Erarbeiten einer praxisrelevanten Wissens- und Erfahrungsbasis zu wasserstoffbetriebenen Verkehrsflugzeugen.

3.4. Systemarchitektur des Demonstratorflugzeuges

Für das Demonstratorflugzeug wird hinsichtlich der Sicherheit und aus Gründen der Robustheit, der Praktikabilität und der Einfachheit folgende Systemarchitektur gewählt.

Die beiden Turboproptriebwerke werden nach den an Bord verwendeten Treibstoffen unterteilt.

Das rechte Triebwerk (Steuerbord) wird demnach für den Wasserstoffbetrieb umgerüstet. Dazu wird für dieses Triebwerk ein zusätzliches kryogenes Treibstoffsystem mit Tanks, Pumpen und Zuführungsleitungen eingerichtet. Insbesondere werden an diesem Triebwerk selbst die Treibstoffeinspritzung und die Brennkammer umgerüstet. In der Triebwerksumgebung wird ein Wärmetauscher installiert, der den Wasserstoff vor dem Einspritzen vom flüssigen in den gasförmigen Zustand überführt (LH_2 zu GH_2).

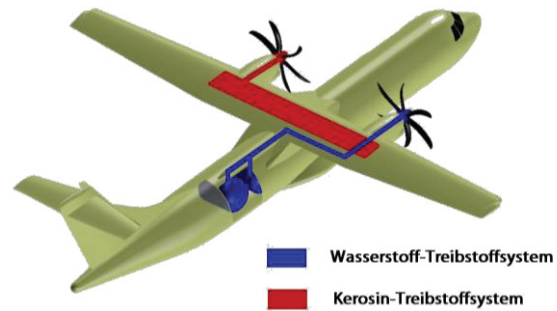


BILD 8. Layout des vorgeschlagenen Demonstratorflugzeuges auf Basis der ATR 72 mit in der Kabine untergebrachten Wasserstofftanks [6]

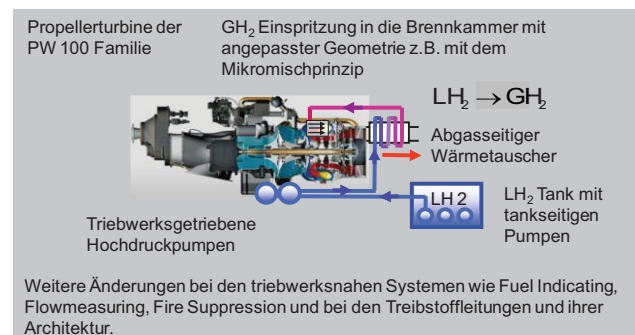


BILD 7. Schema zu den grundsätzlichen Änderungen, die im Zuge der Umrüstung auf LH_2 Betrieb für das Triebwerk und das Treibstoffförderungssystem notwendig werden (stark vereinfacht) [6]

Das linke Triebwerk (Backbord) bleibt dagegen unverändert, funktioniert nach wie vor mit Kerosin und greift dabei auf das bestehende Treibstoffversorgungssystem und auf die Tanks des Ursprungsflugzeuges zurück. Durch diese spezielle Systemarchitektur ergeben sich unter anderem folgende Vorteile:

- Durch die Umrüstung nur eines Triebwerkes werden Kosten, Aufwand und Zeit in einem realistischen Rahmen gehalten. Das Konzept folgt damit der erprobten „Minimum Change Philosophie“.
- Dadurch, dass stets ein Triebwerk, wie bereits bewährt, mit Kerosin betrieben wird und das Flugzeug für alle sicherheitsrelevanten Flugzustände auch einmotorig ausgelegt ist, wird für die Crew und das Flugzeug die Sicherheit während der Test- und Erprobungsmission im Fehlerfall des Wasserstoffsystems gewährleistet.
- Bedingt durch die Systemarchitektur und, dass sich nur ein Triebwerk im Wasserstoffmodus befindet, muss auch nur das Treibstoffvolumen für ein Triebwerk vorgehalten werden, weswegen die Integration der zwei Tanks innerhalb des Rumpfes gelingt.
- Das Wasserstofftriebwerk auf der rechten, dem Passagierausstieg abgewandten Seite kann im speziellen „Hotel Mode“ am Boden zur Energieversorgung des Flugzeuges herangezogen werden. Dabei befindet sich das Kerntriebwerk mit Generatoren im normalen Betrieb, während der

Propeller vorübergehend vom Triebwerk entkoppelt bleibt und somit stillsteht. Das Wasserstofftriebwerk kann so, ähnlich einer APU, zur CO₂-freien Energieversorgung des Flugzeuges am Boden herangezogen werden [6].

3.5. Vorteile bei der Verwendung des Turbopropflugzeuges ATR 72-500 als Ausgangsflugzeug für die Umrüstungen

Die ATR 72 ist mit ihrem Ruf als robustem wie auch zuverlässigem Regionalflugzeug im Frachtzubringer- wie auch im Passagierflugverkehr gut für die „rauhe“ und ausdauernde Test- und Erprobungsmission geeignet. Der Turbopropantrieb sorgt dafür, dass auch kurze Missionslängen äußerst treibstoffsparend zurückgelegt werden können [13]. Laut Hersteller bewegen sich hier die Einsparungen im Vergleich zu Passagierflugzeugen mit Strahltrieb vergleichbarer Kapazität bei einer 250 nm Mission bei 65% (vgl. BILD 9).

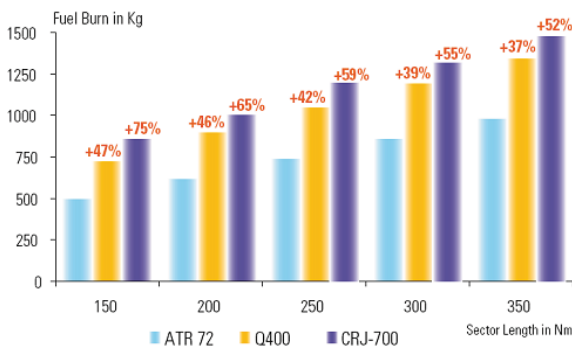


BILD 9. Relative Treibstoffersparnis der ATR 72-500 gegenüber Flugzeugen ähnlicher Größenordnung auf typischen Kurzstreckenmissionen, Q400 (Turbopropantrieb), CRJ (Strahltriebwerk) [6]

Bei wasserstoffgetriebenen Flugzeugen dieser Größenordnung stellt die Unterbringung des notwendigen Treibstoffvolumens für den flüssigen Wasserstoff die zentrale und konfigurationstreibende Herausforderung dar. Durch den effizienten Betrieb fällt dieses Wasserstoffvolumen daher deutlich kleiner aus und lässt sich auf diese Weise innerhalb des Flugzeugrumpfes integrieren. Der Propellerantrieb bringt neben dem lärmarmen Betrieb, der gut zu dem üblichen Nachtbetrieb der Frachter paßt, mit Ma=0,44 oder 550km auch eine geringere Fluggeschwindigkeit mit sich [6].

Denkt man an die auf das Demonstratorflugzeug folgende Version auf Basis der ATR 72 namens „Topliner“, so muss innerhalb des Rumpfes ein größeres Nutzvolumen für die Nutzung im kommerziellen Frachtflugverkehr bereitgestellt werden. Die Unterbringung der Wasserstofftanks am Flugzeug könnte deshalb nicht mehr innerhalb der Kabine erfolgen, sondern müsste außerhalb, d.h. wahrscheinlich oberhalb des Rumpfes unter einer nachträglich angebrachten Abdeckung, erfolgen. Bei einer insgesamt niedrigeren Fluggeschwindigkeit fällt der zusätzliche Nullwiderstand dieser voluminösen Verkleidung grundsätzlich geringer aus. Zusätzlich verringert sich die Gefahr, dass bei der Umströmung des aufgesetzten Körpers durch die

Beschleunigung der umströmten Luft, bedingt durch die Verdrängungswirkung, lokal die kritische Machzahl erreicht wird und der Widerstand signifikant ansteigt [6].

Auch die Flughöhe fällt im Vergleich zu Strahlverkehrsflugzeugen mit einer Dienstgipfelhöhe von 7600m deutlich geringer aus. In der Praxis werden für die kurzen Missionen des Frachtzubringerverkehres sogar oft nur Flughöhen von 3000 – 5500 m gewählt. Damit ist die Bildung von Kondensstreifen sehr unwahrscheinlich [6]. Diese stehen im , den Treibhauseffekt durch eine geänderte Strahlungsbilanz zu beeinflussen.

Ein weiterer wichtiger Vorteil bei der Umrüstung hin zum Wasserstoffflugzeug ergibt sich, wie bereits erwähnt, durch die spezielle Systemarchitektur der ATR 72. Das Flugzeug verfügt aufgrund seiner geringen Größe nicht über ein eigenes Hilfsgastriebwerk (APU). Die Bereitstellung der elektrischen, hydraulischen Energie und der Druckluft erfolgt daher auf eine spezielle Art und Weise. Das dem Passagiereinstieg abgewandte Triebwerk lässt sich dabei im sogenannten „Hotel Mode“ betreiben. Dabei wird am Boden der Propeller vom Kerntriebwerk abgekoppelt. Das Kerntriebwerk kann nun mitsamt den Generatoren laufen, ohne dass sich der Propeller mitdreht. Auf diese Weise ist im Wasserstoffbetrieb auch am Boden eine grundsätzlich CO₂ freie Energieversorgung des Flugzeuges möglich [6]. Aktuell befinden sich neben dem Schadstoffausstoß im Flug gerade auch die lokalen Emissionen im Nahbereich der Flughäfen öffentlich in der Diskussion.

Von der operativen Seite ist sowohl die Nutzlast als auch das Nutzvolumen ausreichend für die Installation eines zusätzlichen Treibstoffversorgungssystems und der entsprechenden Testinstrumentierung geeignet.

Die ATR 72 ist im regionalen Frachtzubringerverkehr bereits seit Jahren erfolgreich im operativen Einsatz. Hinsichtlich der Realisierung des Konzeptes sind daher Gebrauchsflugzeuge günstig zu erwerben. Darüber hinaus gibt es bereits einige umgerüstete Maschinen, die über eine große Frachttür zum Ein- und Ausladen von sperriger Fracht (hier wichtig für die Treibstoffmodule) verfügen.

Durch dieses große Rumpftor und durch den bei dieser Flugzeuggröße geräumigen Rumpfschnitt lassen sich somit die Treibstoffmodule, das Treibstoffversorgungssystem und zusätzliche Einrichtungen zur Testinstrumentierung vereinfacht auf Paletten in das Flugzeug laden [6]. Zuletzt sind im öffentlichen Bereich ausreichend Daten und Parameter zugänglich, die die ATR 72 in ihrer Geometrie, Masse, Aerodynamik und in ihren Flugleistungen hinreichend genau beschreiben. Damit ist im Rahmen des Flugzeugvorentwurfes eine realistische Leistungsbeschreibung der abgewandelten Versionen der ATR möglich.

3.6. Generelle Vorteile bei der Erprobung im Frachtflugverkehr

Den Test- und Erprobungsbetrieb im Frachtflugverkehr zu unternehmen, bietet den Vorteil, dass im Test und im Evaluierungsbetrieb noch keine Passagiere involviert sind. Zudem ist in den Frachtmaschinen ausreichend Volumen für die Unterbringung der Tannelemente vorhanden.

Im speziellen Sektor des regionalen Frachtzubringerverkehres mit seiner recht autonomen Ausprägung bleibt das Erprobungsfeld eng umrissen und in gewisser Weise von der sonst so stark vernetzten Luftfahrt entkoppelt. Ähnlich

wie bei der Einführung und Erprobung von elektrogetriebenen Autos im Rahmen von Car-Sharing Konzepten innerhalb des begrenzten Aktionsradiuses einer Großstadt bleibt der Aktionsradius auch im regionalen Frachtzubringerverkehr aufgrund der Reichweite begrenzt, und die Anzahl der Anlaufstellen respektive der Destinationen ist limitiert. Im selben Zug bleiben mit diesem Einsatzgebiet Aufwand und Kosten zur Erprobung in einem realistischen Rahmen, während die operativen Einsatzbedingungen, die sich einstellen, dennoch repräsentativ und real sind.

3.7. Vorteile auf Seiten der regionalen Zubringermission

Die typische Frachtmission, auf dem die ATR 72 im regionalen Frachtzubringerverkehr fliegt, bietet sich für die operative Erprobung im Wasserstoffbetrieb gleich aus mehreren Gründen gut an.

Zum Einen operieren regionale Zubringerflugzeuge innerhalb des Hub-and-Spoke Systemes auf vergleichsweise kurzen Strecken. Die durchschnittliche Flugstrecke beträgt in der Mehrzahl der Fälle lediglich 230 nm respektive 62 min [6]. Im größten Teil der Fälle werden pro Einsatztag nur 1 bis 2 dieser Flugabschnitte (legs) geflogen. Damit fällt auch die tägliche Flugzeit mit nur 1,5 – 3 h pro Tag relativ gering aus [6]. Die kurzen Strecken führen dazu, dass der Treibstoffbedarf für die Mission überschaubar bleibt. Eine geringe Treibstoffmenge bietet gleichermaßen den Vorteil, dass auch das Volumen für die Integration des flüssigen Treibstoffes überschaubar ausfällt. Bei Einführung des Wasserstoffes in diesem Segment halten sich auch die Investitionen in die Bodeninfrastruktur in Grenzen.

Zudem bewegen sich Kurzstreckenfrachtflugzeuge im Expressfrachtdienst im Rahmen eines klar definierten Streckennetzes mit nur wenigen Destinationen. Somit ist die Bodenversorgung und Betankung eines solchen Wasserstoffflugzeuges einfacher zu bewerkstelligen als bei Passagierflugzeugen, die in der Praxis bei der Streckenführung einer komplizierteren Rotation unterliegen [6].

Die geringe „Utilization“ des Flugzeuges von durchschnittlich nur 1-3 h pro Einsatztag findet oft während der Nacht statt und führt zum Anderen zu langen Bodenstandzeiten, die sich während der Erprobungsphase im Wasserstoffbetrieb gut dazu nutzen lassen, notwendige Inspektionen und Instandsetzungsarbeiten bei Tag am Flugzeug durchzuführen, um so auch das Flugzeug jeweils für weitere Testabschnitte umzubauen und vorzubereiten. Gerade in der Anfangsphase der Erprobung und beim Testen unterschiedlicher technischer Lösungen und Konzepte, beispielsweise zu den kryogenen Pumpen, muss damit gerechnet werden, dass der Betreuungs-, Inspektions- und Wartungsaufwand im Vergleich zu heutigen, mit konventionellen Treibstoffen betriebenen, Flugzeugen sehr groß ausfällt.

Die kurzen Flugzeiten, bedingt durch die effizienten Turbopropflugzeuge und die Einsatzmission, führen auf Kostenseite dazu, dass die Treibstoffkosten für die Erzeugung und Bereitstellung des Wasserstoffes und die Aufrechterhaltung der Infrastruktur klein ausfallen. Den größten Anteil der Kosten stellt, neben den wasserstoffspezifischen Komponenten und deren Entwicklung, hier der Anschaffungspreis des Flugzeuges, der dennoch in diesem Segment, wo normalerweise Gebrauchtflugzeuge verwendet werden, relativ günstig ausfällt [6].

Aufgrund dieser Kostenstruktur wäre auch grundsätzlich wirtschaftlich ein hybrides Betreibermodell denkbar. Im Rahmen einer Forschungsk Kooperation würde dabei beispielsweise das Flugzeug operativ unter realistischen Einsatzbedingungen bei einem Logistikanbieter einsatzüblich im regionalen Frachtzubringerverkehr fliegen. Während der Bodenstandzeiten würde es zusätzlich für den forschungsbedingten Umbau und für Inspektions- und Wartungsarbeiten von einer öffentlichen Forschungseinrichtung oder Luftfahrtorganisation betreut. Auch die Kosten wären damit aufteilbar.

3.8. Umweltauswirkungen während des LH₂-getriebenen Test- und Erprobungsbetriebs

Gemäß der Reaktionsformel reagiert Wasserstoff mit dem Oxidator Sauerstoff zu reinem Wasser. Zusätzlich entstehen durch die im Verbrennungsprozess beteiligte stickstoffhaltige Luft in unvermeidbarer Weise auch geringe Mengen an Stickstoffoxid NO_x.



Im Wasserstoffbetrieb wird das entstehende Wasser der Atmosphäre im Flug in Form von Wasserdampf zugeführt. Im Vergleich zur Verbrennung von Kerosin ergibt sich dabei die 2,55-fache Menge an Wasser [14]. Wie Kohlendioxid gilt Wasserdampf auch als Treibhausgas. Verglichen mit CO₂ fällt jedoch die durchschnittliche Verweilzeit von Wasserdampf in der Atmosphäre mit etwa einer Woche [15] deutlich geringer aus als die von CO₂, die mehrere Jahrzehnte beträgt [16].

Der in großen Flughöhen freigesetzte Wasserdampf führt jedoch zur Entstehung von Kondensstreifen, den so genannten „contrails“. Diese könnten bei Wasserstoffflugzeugen durch die größere freigesetzte Menge an Wasser bis zu 3-mal größere Ausmaße annehmen [14].

Kondensstreifen stehen jedoch im Verdacht, den Treibhauseffekt durch eine veränderte Strahlungsbilanz aus Reflektion und Absorption nennenswert zu beeinflussen.

Hier kommt ein weiterer Vorteil des Turboprop-Konzeptes zum Tragen. Turbopropflugzeuge operieren auslegungsgemäß in einer geringeren Reiseflughöhe. Die im Linienbetrieb normalerweise gewählten Flughöhen liegen zwischen 3500m und 5500m, wobei die Dienstgipfelhöhe bei 7600m erreicht wird [6]. Dagegen fliegen Jet-Flugzeuge üblicherweise im Höhenband von 11-13km.

In den vom Demonstratorflugzeug mit dem Turboproptriebwerk genutzten Reiseflughöhen ist die Bildung von Kondensstreifen unwahrscheinlich. Klimarelevante Auswirkungen durch Kondensstreifen sind somit bei den umgerüsteten Flugzeugen nicht gegeben. Zugleich bleibt der „Treibhauseffekt“ bedingt durch Wasserdampfemissionen bis zu einer Flughöhe von 9000 m vernachlässigbar klein [18]. Darüber hinaus können mit diesem Konzept Schadstoffemissionen nennenswert reduziert werden.

Die möglichen Emissionseinsparungen ergeben sich dabei im physikalischen Sinne aus der gewählten Systemarchitektur. Während im Betrieb des Demonstrators das Backbord-Triebwerk noch die gleichen Emissionen wie das Originalflugzeug aufweist, entfallen die Emissionen des Wasserstofftriebwerkes hinsichtlich des CO₂ komplett und werden im Hinblick auf NO_x um bis zu 80 % reduziert [9].

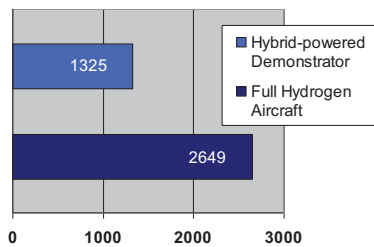


BILD 10. kg CO₂ Einsparungen für eine repräsentative Mission von 300nm (556km) für das Demonstratorflugzeug und die seriennahe Version „Topliner“ [6]

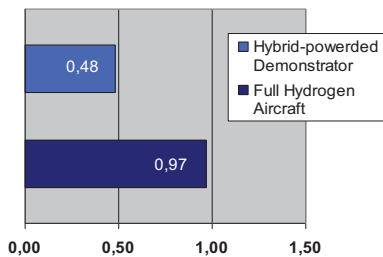


BILD 11. Million kg CO₂ Einsparungen für die Operation im regionalen Frachtflugverkehr mit durchschnittlicher „Utilization“ für das Demonstratorflugzeug und die seriennahe Version „Topliner“ [6]

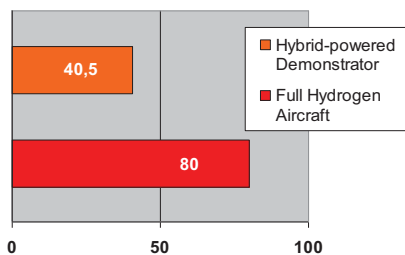


BILD 12. Potentielle prozentuelle Reduzierung von NO_x Emissionen, verglichen mit konventionellen Kerosinflugzeugen für das Demonstratorflugzeug und die seriennahe Version „Topliner“ [6]

3.9. Sicherheitsaspekt zu Wasserstoffflugzeugen

Mehrere Studien, darunter auch eine der NASA, kommen zu dem Ergebnis, dass beim Betrieb von Wasserstoffflugzeugen ein ähnlicher, eventuell sogar ein höherer Sicherheitsstandard, zu erreichen ist [17]. Hintergrund ist, dass ein Vorteil des Wasserstoffes darin besteht, dass im Falle eines ernststen Falles, bei dem Treibstoff in Brand gerät, der Wasserstoff kontrolliert und schnell nach oben hin wegbrennt, ohne von einer großen Hitzeentwicklung begleitet zu sein. Durch die schnelle Verbrennung ist auch die Durchbrandgefahr zur Passagierkabine geringer. Bei Kerosinflugzeugen dagegen kann es zum Ausbreiten eines Flammeppiches (brennender Treibstoff) um das Flugzeug kommen, der die Passagierevakuierung erschweren oder unmöglich machen kann. In der bisherigen Praxiserprobung mit der TU 155 wurden Flüge im Wasserstoffbetrieb durchgeführt. Dabei kam es laut Auskunft von Tupolev zu keinen besonderen Vorkommnissen. Ähnliches gilt auch für kleinere Flugzeuge, die Wasserstoff

über ein Brennstoffzellensystem zur elektrischen Vortriebsenerzeugung nutzen und bei denen der verwendete Wasserstoff im Allgemeinen in gasförmiger Form bei hohen Drücken im Flugzeug gespeichert ist. Auch hier kam es bisher zu keinen bekannten Vorfällen.

4. ZUKUNFTSAUSBLICK

Mit Blick auf die abnehmenden Ölreserven sollte schon bald die Praxiserprobung von Wasserstoffflugzeugen konkret ins Betracht gezogen werden. Konservative Schätzungen gehen davon aus, dass mit den bestehenden, förderbaren Ölreserven der derzeitige Bedarf noch etwa 40 Jahre gedeckt werden kann, wobei mobilitätseinschränkende Auswirkungen durch die Angebotsverknappung schon bedeutend früher zu erwarten sind.

Gleichzeitig haben aktuelle Flugzeugprogramme vor Augen geführt, dass vom Beginn der Entwicklung eines neuen Flugzeuges bis zur Indienststellung 10 – 15 Jahre vergehen können. Dabei gilt dieser Zeitraum für Flugzeuge mit gut bekannter und konservativer Antriebsarchitektur. Für Flugzeuge mit innovativen Antriebs- und Treibstoffsystemen wird die Entwicklung, der Bau und die Erprobung deutlich länger ausfallen, auch durch die parallele Entwicklung der neuen Zulassungsvorschriften.

Andere Treibstoffalternativen in Form von Pflanzen- und Algenkraftstoffen werfen im Hinblick auf die weltweite flächendeckende Versorgung und die Skalierbarkeit berechnete Fragen auf, während das elektrische Fliegen zumindest mittelfristig den kleineren Flugzeugen vorbehalten bleibt und vorerst nicht auf Verkehrsflugzeuge übertragen werden kann.

Im Rahmen dieser Veröffentlichung wird ein integriertes und praxisnahes Konzept zur Einführung von Wasserstoffflugzeugen und zur Erprobung dieser im operativen Frachtflugverkehr präsentiert mit der Option der Übertragbarkeit auf weitere Teile der kommerziellen Luftfahrt. Dabei enthält das begleitende Testprogramm mehrere aufeinander abgestimmte und klar definierte Meilensteine, die den Erprobungserfolg gliedern und jeweils zu einer absehbaren Dauer der einzelnen Testabschnitte führen.

Damit wird eine öffentliche Förderung im Rahmen von Forschungsprogrammen erleichtert ohne dass der langfristige Aspekt dieses nachhaltigen Vorhabens aus den Augen verloren wird.

LITERATUR

- [1] W. Zittel, J. Schindler (Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH - LBST): Zukunft der weltweiten Erdölversorgung; Energy Watch Group (Hrsg.), überarbeitete, deutschsprachige Ausgabe, Mai 2008 Schrifttum
- [2] Westenberg, A.: „Cryoplane“ - Hydrogen Aircraft, Präsentation gehalten auf der H2 Expo in Hamburg am 11.10.2003
- [3] Entwurf Wasserstoffverkehrsflugzeug, Flugzeugentwurfseminar WS 06/07, IFB Institut für Flugzeugbau, Universität Stuttgart, Gruppe 7, Fabian Donus, Daniel Kirchner, Michaela Myrczik, Holger Schubert, Malte Schwarze

- [4] Peschka, W.: "Flüssiger Wasserstoff als Energieträger". Wien, Springer Verlag 1984
- [5] Brewer, G. D.: "Hydrogen Aircraft Technology", CRC-Press, Boca-Raton, 1991
- [6] Malte Schwarze: Flugzeugvorentwurf Bi-Fuel- und wasserstoffbetriebener Kurzstrecken-Frachtflugzeuge, Diplomarbeit am Institut für Flugzeugbau der Universität Stuttgart, 2009
- [7] SEECKT, Kolja; KRAMMER, Philip; SCHWARZE, Malte; SCHOLZ, Dieter: Mitigating the Climate Impact of Aviation – What does Hydrogen Hold in Prospect? In: Leal Filho, Walter (Hrsg.): The Economic, Social and Political Elements of Climate Change. Berlin: Springer, 2011, S. 649-667. - ISBN 978-3-642-14776-0
- [8] SEECKT, Kolja; KRAMMER, Philip; SCHOLZ, Dieter; SCHWARZE, Malte: Mitigating the Climate Impact of Aviation – What does Hydrogen Hold in Prospect? Klima 2009 - Die weltweite klimaneutrale wissenschaftliche Klimakonferenz (Klima 2009, Online: www.klima2009.net, 02.-06. November 2009). - <http://www.klima2009.net/de/papers/4/103>. PDF-Download: <http://GF.ProfScholz.de>
- [9] Wasserstoff in Flugtriebwerken, Prof. Dr.-Ing. Harald Funke, Fachbereich 06 Luft- und Raumfahrttechnik, Gasturbinen und Flugtriebwerke, Fachhochschule Aachen, u. a. <http://www.acuas.de/2065.html?&L=1%2Fdownload-center.html%253>
- [10] Brewer, G. D.: "Hydrogen Aircraft Technology", CRC-Press, Boca-Raton, 1991
- [11] Flugzeughersteller Tupolev, Internetauftritt: <http://www.tupolev.ru/English/Show.asp?SectionID=8>
2 Entnahmedatum: 21.08.2011
- [12] Forschungszentrum Jülich, Internetauftritt <http://www2.fz-juelich.de/icg/icg-2/datapool/page/750/cryo2.jpg>
Entnahmedatum: 21.08.2011
- [13] AIAA 2007-7752, Snijders, T.A., Dr. Slingerland, R., (2007), Design and analysis of a hydrogen fuelled turboprop airliner, Delf University of Technology, published at the 7th AIAA Aviation Technology, Integration and Operations Conference ATIO, 2007 in Belfast, Northern Ireland
- [14] Marquardt, S., (2003), Climate Impact of contrails: Investigation by means of an atmospheric general circulation model, Dissertation of the faculty of physics, Ludwig-Maximilians-University, Munich, and Research Paper 2003-16, Institute for physics of the atmosphere, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) e.V., Oberpfaffenhofen
- [15] [MPI, Max-Planck-Institut für Meteorologie Hamburg, (1997), Jahresbericht 1997, Abteilung Theoretische Klimamodellierung, <http://www.mpimet.mpg.de/institut/jahresberichte/jahresbericht-1997.html>
- [16] Marquardt, S., Sausen, R., Ponater, M., Grewe, V., (2001), "Estimate of the climate impact of „Cryoplane"s", Aerospace Science Technology, 5, pages 73-84
- [17] Final Technical Report (publishable Version), Airbus Deutschland GmbH, 24. September 2003
- [18] Fredrik Svensson, (2005), "Potential of reducing the environmental impact of civil subsonic aviation by using liquid hydrogen." Ph.D. Thesis, Cranfield University, School of Engineering.