

Verfahren und Technologien für einen kombinierten Wasserstoff-SAF-Betrieb von Regional- und Geschäftsreiseflugzeugen

Carsten Clemen, Ruud Eggels, Thomas Dörr

Rolls-Royce Deutschland Ltd. & Co. KG, Eschenweg 11, 15827 Blankenfelde-Mahlow

Zusammenfassung

A Bei der Dekarbonisierung der Luftfahrt spielt Wasserstoff eine zentrale Rolle als potenziell vollständig CO₂ freie Alternative zu Sustainable Aviation Fuels (SAF).

Vor der Einführung von Wasserstoff in den Markt, sind jedoch zahlreiche technische, logistische und kommerzielle Herausforderungen zu meistern. In den letzten drei Jahren ist es bereits gelungen, einige der technischen Herausforderungen, wie zum Beispiel eine sichere und saubere Direkt-Verbrennung des Wasserstoffs in einer Fluggasturbine erfolgreich zu lösen [1 - 4]. Jedoch ist insbesondere die Integration einer Flüssig-Wasserstoffversorgung in das Triebwerk beziehungsweise die Flugzeugzelle noch nicht auf einem akzeptablen Technologieniveau angekommen, so sind zum Beispiel die erforderlichen Pumpen noch nicht ausgereift.

Darüber hinaus ist die sichere Handhabung des flüssigen Wasserstoffs im Flugzeug, aber insbesondere am Flughafen noch nicht etabliert. Auch die erforderliche Infrastruktur, die weltweit für eine Versorgung der Flughäfen in den benötigten Mengen erforderlich ist, wird nicht flächendeckend zur Verfügung stehen, wenn das erste wasserstoffbetriebene Flugzeug marktreif sein wird.

Daher stellt sich die Frage, welches Modell kommerziell sinnvoll ist, um Wasserstoff in die Luftfahrt einzuführen. Basierend auf den zuvor benannten Herausforderungen kann es daher sinnvoll sein, Flugzeuge für den Kurzstreckenbetrieb mit Wasserstoff anzutreiben, wobei der Wasserstoff dann gasförmig im Flugzeug gelagert werden kann. Für die Mittel- und Langstrecke wird wiederum auf Sustainable Aviation Fuel (SAF) zurückgegriffen. Ein Business Case wird aber nur dadurch entstehen, wenn eine entsprechende Anzahl von Flugzeugen an den Markt gebracht werden kann. Daher würde es Sinn machen, insbesondere im Geschäftsreise- oder auch Regionalflugzeug-Markt Produkte zu etablieren, die mit beiden Kraftstoffen betrieben werden können, da diese häufig nur kurze Strecken bis 1000Nm bedienen, aber dem Kunden dennoch auch 4000 oder mehr nautische Meilen Reichweite anbieten müssen. Dies ist dann der sogenannte „Dual Fuel“ Betrieb.

Dieses Konzept wird von Rolls-Royce in den Forschungsprojekten Cavendish (EU Clean Aviation) und Wotan (Lufo 6, FKZ 20M2104A) sowie Bretuflex (Lufo 6, FKZ 20M2237H) untersucht.

In diesem Paper werden die für den „Dual Fuel“ Betrieb notwendigen operationellen und technischen Aspekte beleuchtet und technische Lösungen sowohl auf Flugzeug als auch auf Triebwerks- beziehungsweise Komponentenebene skizziert und diskutiert.

Dabei sind insbesondere drei Betriebsarten von Interesse: 1. Wechselbetrieb, 2. Umschaltbetrieb und 3. Parallelbetrieb. Für jedes dieser Szenarien gibt es Vor- und Nachteile sowie technische Lösungen, die aus Sicht des Triebwerksherstellers Rolls-Royce in diesem Paper vorgestellt werden.

1. ABKÜRZUNGEN

3D	Dreidimensional
ABB	Abbildung
CFD	Computational fluid dynamics
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
EU	Europäische Union
H ₂	Wasserstoff
HBK	Hochdruckbrennkammerprüfstand
HEART	Hydrogen Injector for Eco-Friendly Aviation with Rolls-Royce Technology
ILA	Institut für Luftfahrtantriebe
Lufo	Luftfahrtforschungsprogramm
MTO	Maximum Take-off
NM	Nautische Meile
NOX	Stickoxid
NVPM	Non volatile particulate matters
OEM	Original Equipment Manufacturer
RANS	Reynolds Averaged Navier Stokes
RQL	Rich-Quench-Lean
SAF	Sustainable aviation fuel
T	Temperatur
TRL	Technology readiness level
UNS	Unstructured

2. EINLEITUNG UND ANFORDERUNGEN

Rolls-Royce spielt eine wichtige Rolle bei der Entwicklung nachhaltiger Luft- und Raumfahrtprodukte und verfolgt dabei drei zentrale Säulen: Erstens die kontinuierliche Verbesserung Effizienz der Turbomaschine; zweitens die Unterstützung der Definition von Anforderungen an nachhaltigen Flugkraftstoff (SAF) als Alternative zu fossilem Kerosin; und drittens die Entwicklung alternativer Lösungen für die Speicherung erneuerbarer Energien, einschließlich der Nutzung von Wasserstoff als Kraftstoff. Im Oktober 2021 startete Rolls-Royce sein Wasserstoff-Beschleunigungsprogramm zur Entwicklung eines 100 % wasserstofffähigen Triebwerksdemonstrators. In diesem Programm wurden erhebliche Fortschritte erzielt, und es konnte nachgewiesen werden, dass ein 100 % wasserstoffbetriebener Injektor (HEART) als Nachrüstung in eine bestehende Brennkammer des Pearl 15 Triebwerkes, das als Antrieb der Geschäftsreiseflugzeuge Bombardier Global 5500 & 6500 seit 2019 im Betrieb ist, sicher und mit wettbewerbsfähigen NO_x-Emissionen betrieben werden kann [1 - 4].

In diesem Programm wird auch die Möglichkeit untersucht, ein Triebwerk mit Wasserstoff und/oder Kerosin bzw. SAF

zu betreiben. Hintergrund ist, dass die Markteinführung von Wasserstoff aufgrund seiner Verfügbarkeit und der erforderlichen Infrastrukturinvestitionen und -anpassungen ein langfristiger Prozess sein wird, der eher lokal als global verläuft. Daher könnte es ein praktikabler Ansatz sein, die Fähigkeit von Flugzeugen, sowohl mit Wasserstoff als auch weiterhin mit Kerosin oder SAF fliegen zu können, zu untersuchen.

Um die Anforderungen besser zu verstehen, arbeitet Rolls-Royce im EU-Clean-Aviation-Projekt CAVENDISH mit den Flugzeugherstellern Embraer und Dassault zusammen.



Abb. 1. Embraer Energia H2 Dual Fuel Regionalflugzeug E50H2GT/DF (Quelle: <https://embraercommercialaviationsustainability.com/concepts/#energia>)

Auf dieser Grundlage konnten Anforderungen und Szenarien abgeleitet werden:

1. Als Flugzeugtypen, siehe Abbildung 1, für eine solche Anwendung kommen zum Beispiel mittlere und kleine Business Jets mit einer Gesamtreichweite von 4000-6000 Nm oder Regionalflugzeuge mit 50-100 Sitzen und einer Reichweite von unter 1000Nm in Frage (Quelle: Embraer <https://embraercommercialaviationsustainability.com/concepts/#energia>)
2. Der Betrieb soll dabei sowohl mit 100% Wasserstoff als auch mit Kerosin/SAF möglich sein.
3. Bei den Regionalflugzeugen dient Kerosin/SAF zur Erweiterung der Mission bzw. für den Fall einer Umleitung, bei den Business Jets soll bis 1000Nm mit Wasserstoff und darüber hinaus mit Kerosin/SAF geflogen werden.
4. Damit ist eine Umschaltung von Wasserstoff auf Kerosin/SAF während des Fluges erforderlich.
5. Ein Parallelbetrieb ist nicht prioritär, könnte aber langfristig eine Option sein.
6. Die Zertifizierung muss mit beiden Kraftstoffen durchgeführt werden können.
7. Der Wasserstoff kann entweder flüssig oder gasförmig im Flugzeug gelagert werden, wird in jedem Fall aber gasförmig an der Brennkammer zur Verfügung stehen.
8. Um möglichst hohe Flexibilität bei der Auslegung des Gesamtsystems zu erhalten, sind Wasserstofftemperaturen an der Brennkammer von bis zu -100 Grad Celsius möglich.

3. BETRIEBSMODI & SYSTEM KONZEPTE

Wie in Kapitel 2 beschrieben, sind die Anforderungen generell so, dass das Flugzeug mit zwei Tanksystemen ausgestattet sein muss, um sowohl einen Betrieb mit gasförmigem Kraftstoff (Wasserstoff), als auch mit flüssigem Kraftstoff (Kerosin oder SAF) zu ermöglichen.

Als Stand der Technik ist dabei kein zusätzliches System z.B. für die Zündung der Höhe vorgesehen, da dies mit beiden Kraftstoffen, abhängig vom jeweiligen Betriebsmodus, möglich sein soll. Dabei ist allerdings insbesondere das Brennkammervolumen bei Betrieb mit Kerosin/SAF stark abhängig von der gewünschten Flughöhe für die Wiederezündung, dies treibt damit auch das Gewicht, die Stückkosten und die Emissionen, die davon negativ beeinflusst werden.

Eine Lösung für dieses Problem wäre, einen für diesen Zweck dimensionierten Zusatztank mit gasförmigem Wasserstoff und dem erforderlichen Betriebsdruck an Bord bereitzustellen, wie es in [5] und Abbildung 2 (Nummer 7) definiert ist.

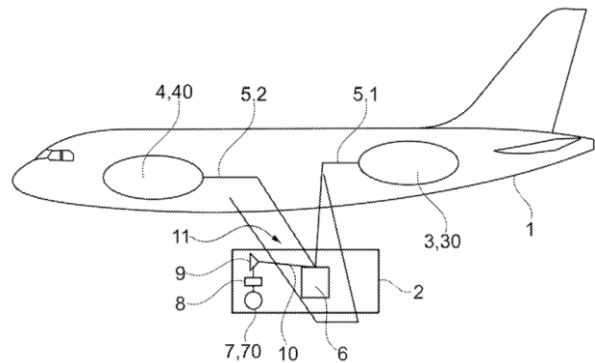


Abb. 2. Anordnung eines Systems zur Höhenzündung mit einem separaten H2 Tank für eine Dual Fuel Anwendung [5]

Eine weitere Lösung betrifft die Tankanordnung selbst, um eine möglichst effiziente Nutzung der vorhandenen Volumina zu ermöglichen. Eine Variante dazu betrifft die Anordnung Tank in Tank und die Nutzung der unterschiedlichen Lagerdrücke zum Transport der Fluide, wie es in [6] im Detail beschrieben ist und in Abbildung 3 gezeigt wird.

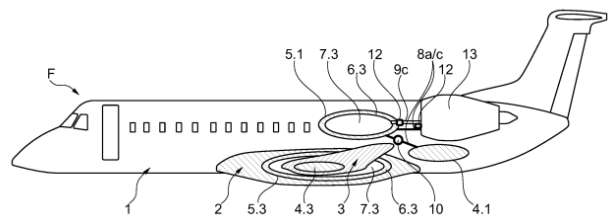


Abb. 3. H2 / SAF Tank in Tank Anordnung für eine Dual Fuel Anwendung [6]

4. BRENNER & BRENNKAMMER KONZEPTE

Neben den betrieblichen Anforderungen ist die konkrete Umsetzung der Verbrennung beider Kraftstoffe in der Brennkammer unter Berücksichtigung aller technischen

Attribute die zweite große Herausforderung für den Dual Fuel Betrieb.

Nachdem Rolls-Royce bereits nachweisen konnte, dass eine Umrüstung lediglich des Kraftstoffinjektors für den Betrieb mit Wasserstoff möglich ist, siehe dazu [1 – 4], ist die logische Konsequenz für den Dual Fuel Betrieb den gleichen Ansatz zu wählen und lediglich den Injektor zu wechseln.

Allerdings ergeben sich zwei technische Herausforderungen:

1. Den Injektor mit zwei Kraftstoffleitungen in den vorhandenen Bauraum zu implementieren und
2. Die Aufbereitung des flüssigen Kraftstoffes (Kerosin) weiterhin so auszulegen, dass vergleichbare Emissionen zum heutigen Stand der Technik eines modernen Kerosininjektors erreicht werden. Das betrifft vor allem die Ruß- bzw. nvPM-Emissionen.

Für beide Herausforderungen hat Rolls-Royce bereits zahlreiche Lösungsansätze entwickelt und zum Patent angemeldet.

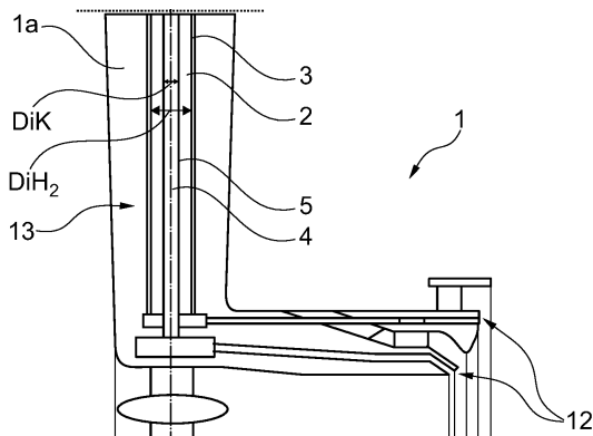


Abb. 4. Dimensionierung und Anordnung einer in eine H2 Leitung eingebettete Kerosinleitung [7]

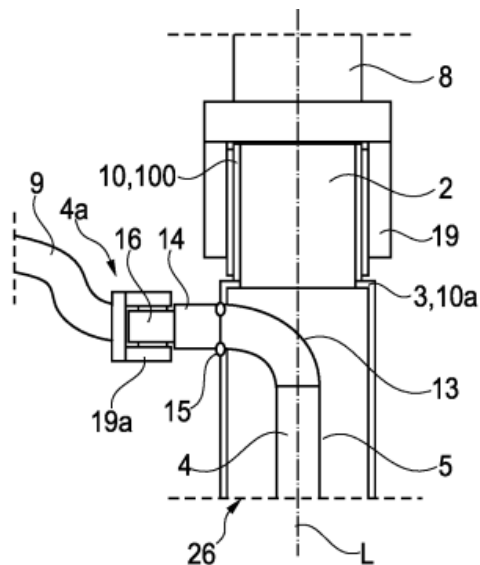


Abb. 5. Anbindung einer Wasserstoff- und einer Kerosinführenden Kraftstoffleitung [8]

So zeigen Abbildungen 4 und 5 Möglichkeiten zur Implementierung einer Wasserstoff- und einer Kerosinleitung.

Abbildung 4 zeigt die Dimensionierung und Anordnung einer in einer Wasserstoffleitung eingefassten Kerosinleitung in einem Kraftstoffinjektor gemäß [7].

Abbildung 5 zeigt gemäß [8] die Ausbildung der Anbindung einer solchen innenliegenden Kerosin- und einer außenliegenden (umfassenden) Wasserstoffleitung vom Kraftstoffkettor an die Kraftstoffleitungen außerhalb des Brennkammergehäuses.

Abbildung 6 zeigt eine Möglichkeit eines nachrüstbaren Injektors [9]. Die gezeigte Konfiguration behält die typische Anordnung eines Luft-Kraftstoffzerstäubers für Kerosin mit einem zentralen drallbehafteten Luftkanal und zwei äußeren Luftkanälen bei, kombiniert mit einer ringförmigen Eindüsung des Wasserstoffs zwischen dem mittleren und äußeren Luftkanal.

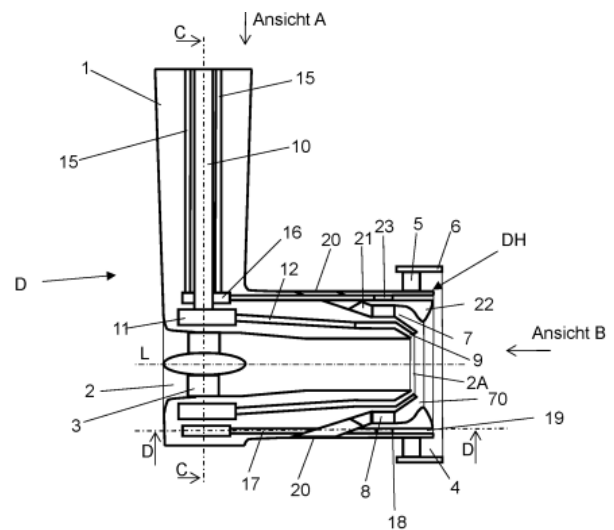


Abb. 6. Einrüstbarer Dual Fuel Injektor [9]

Darüber hinaus gibt es jedoch auch die Möglichkeit, die beiden Kraftstoffsysteme zu trennen und separat zu betrachten.

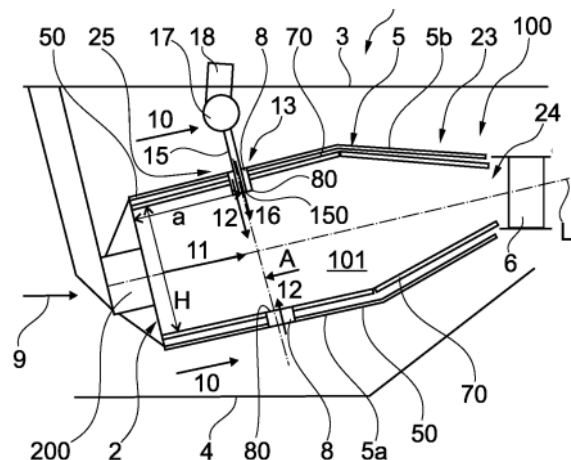


Abb. 7. Dual Fuel Brennkammer [10]

Das hat den Vorteil, dass der Kerosin Teil unverändert bleiben kann. Um dies zu realisieren, gibt es mehrere Möglichkeiten den Wasserstoff in der Brennkammer bereitzustellen beziehungsweise aufzubereiten. Eine davon ist in Abbildung 7 aus [10] dargestellt. Hierbei bleibt der Kerosininjektor und die Primärzone stromauf der Zuzugslöcher unverändert und die Dual Fuel Fähigkeit wird durch eine Einbringung des Wasserstoffs durch diskrete Wasserstoffdüsen angeordnet in den Mischluftlöchern der Brennkammer realisiert.

Weitere Lösungen zur getrennten Implementierung von Kerosin- und Wasserstoffinjektion unter Beibehaltung des derzeit verwendeten Kerosininjektors finden sich in [11] und [12].

Basierend auf Untersuchungen mit 3D-CFD, favorisiert, Rolls-Royce, jedoch die nachrüstbare Lösung.

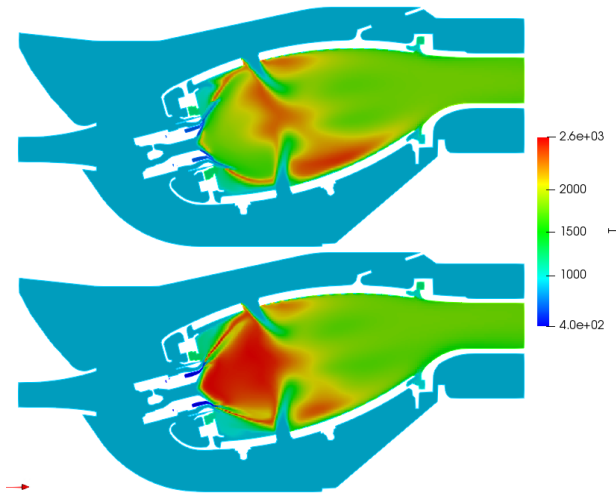


Abb. 8. 3D-CFD Temperaturverteilungen für einen nachrüstbaren Dual Fuel Injektor mit ringförmiger H2 Eindüsung (Konfiguration 1)

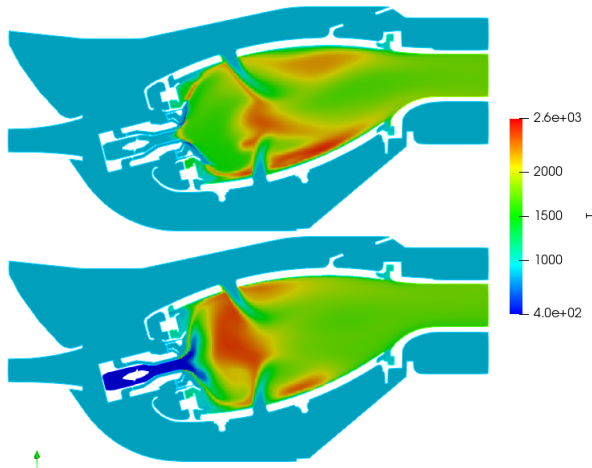


Abb. 9. 3D-CFD Temperaturverteilungen für einen nachrüstbaren Dual Fuel Injektor mit zentraler H2 Eindüsung (Konfiguration 2)

Abbildungen 8 und 9 zeigen Ergebnisse aus 3D CFD RANS Rechnungen mit dem Rolls-Royce Code Precise-UNS für zwei unterschiedliche Konfigurationen. Jeweils

dargestellt ist die Temperatureverteilung in der Brennkammer für eine 100% Vollast (MTO) Bedingung.

In Abbildung 8 (Konfiguration 1) weist der Injektor eine ringförmige H2 Eindüsung in Kombination mit einem Kerosin-Luftzerstäuber auf, in Abbildung 9 (Konfiguration 2) eine zentrale H2-Eindüsung in Kombination mit einem Kerosin-Luftzerstäuber.

Dargestellt ist jeweils die Lösung bei 100% H2 Betrieb (unten) und 100% Kerosinbetrieb (oben). Details zu den Konfigurationen finden sich in [13] und [14].



Abb. 10. Dual Fuel Injektor Konfiguration 1



Abb. 11. Dual Fuel Injektor Konfiguration 2

Basierend auf einer umfangreichen Designstudie wurden insgesamt drei Konfigurationen (Konfiguration 1, 2 und 3) von Injektoren ausgewählt, um diese im Folgenden zu testen. Diese Injektoren, siehe Abbildungen 10 bis 12, werden zunächst auf Sektorrigs untersucht mit dem Ziel die technischen Attribute Zündbarkeit, Emissionen und Thermoakustik zu vergleichen und eine bevorzugte Variante zu identifizieren. Diese wird dann in einem Vollringtest auf realen Triebwerksbedingungen getestet werden, wie zuvor bereits die H₂ Injektoren [3].



Abb. 11. Dual Fuel Injektor Konfiguration 3

Die zuvor diskutierten Lösungen zielen primär auf den Umschaltbetrieb zwischen Wasserstoff und Kerosin, da dies die Hauptanforderung der möglichen Kunden darstellt. Jedoch ist es auch denkbar, die Injektoren so auszulegen, dass ein gemeinsamer Betrieb von H₂ und Kerosin/SAF möglich ist bzw. der einzige Betriebsmodus ist. Auch dahin gehend wurden Konzepte entwickelt, diese sind in [15] und [16] zu finden.

5. VALIDIERUNG

Die Validierungsstrategie von Rolls-Royce für Dual Fuel fußt auf drei Säulen:

1. Komponententests für das Wasserstoffkraftstoffsystem, das umfasst die notwendigen Systeme zur Bereitstellung des Wasserstoffs an der Brennkammer: Leitungen, Wärmetauscher, Pumpen. Diese sind bereits Teil der Entwicklung für ein 100% Wasserstoff betriebenes Pearl 15 Triebwerk.
2. Rig Tests für einen Dual Fuel Kraftstoffinjektor im Rahmen des EU Clean Aviation Projektes Cavendish und des Lufo 6 Projektes Bretuflex, das umfasst Einsektorrigtests zum Nachweis des sicheren Betriebsverhaltens bei atmosphärischen und Mitteldruckbedingungen bei den Partnern

DLR Institut für Antriebstechnik, University of Cambridge und Loughborough University, gefolgt von Einsektorhochdrucktests am HBK3 Prüfstand des DLR in Köln zur Bewertung der Emissionen und der Thermoakustik bis hin zu Vollringtests am HBK5 Prüfstand und am Höhenprüfstand des ILA in Stuttgart zur Validierung des Gesamtsystems bis auf TRL5. Diese Untersuchungen umfassen auch Tests mit kaltem Wasserstoff.

3. Triebwerkstests, um TRL6 zu erreichen.

6. ZUSAMMENFASSUNG

Dieses Paper stellt zusammenfassend die Anforderungen und die möglichen Lösungen auf System- und Brennkammerebene für einen Dual Fuel Betrieb mit Kerosin / SAF und mit Wasserstoff aus Sicht von Rolls-Royce dar. Die vorgestellten Lösungen decken dabei sowohl die Möglichkeit einer Nachrüstbarkeit für einen Umschalt- als auch Parallelbetrieb dar, als auch Ansätze für nicht nachrüstbare Lösungen. Dabei weisen die bisherigen Untersuchungen darauf hin, dass eine nachrüstbare Lösung, die aus Sicht der geringeren Komplexität bevorzugbar wäre, durchaus erfolgsversprechend ist. Daher stellt das Paper auch den Weg dar, um eine solche Lösung zu validieren.

7. DANKSAGUNG

Rolls-Royce dankt für die Unterstützung der vorgestellten Arbeit durch die deutschen LUFO 6 Programme BRETUFLEX-(20M2237H) und WOTAN (20M2104A) und das Clean Aviation CAVENDISH-Programm der Europäischen Union.

Die Autoren danken ausserdem Rolls-Royce Deutschland für die Genehmigung zur Veröffentlichung dieser Arbeit.

8. REFERENZEN

- [1] C. Clemen, M. Ravikanti, N. La Bianca, R. Eggels, B. Wurm, K. Young: „Considerations for hydrogen fueled aerospace gas turbine combustion sub-system design“, GT2024-122593, ASME IGTI 2024, London
- [2] G. Gebel, C. Clemen, C. Palmer, K. Young: “On the Ignition of Hydrogen-fuelled Aero Gas Turbine Combustors”, ISABE-2024-235, 26th ISABE Conference, September 22-27, 2024, Toulouse
- [3] C. Clemen, R. Eggels, A. Fischer, B. Wurm, G. Gebel, N. La Bianca: „The Rolls-Royce Heart Hydrogen Injector for the Pearl 15 Demonstrator Engine“, TSAS 2025 (Paper 30), Toulouse
- [4] A. Fischer, C. Lahiri, C. Clemen: „A direct comparison of flame-transfer matrices measurements between hydrogen and kerosene flames in the same combustor at realistic aero-engine conditions“, GT2025-153683, ASME IGTI 2025, Memphis
- [5] C. Clemen, T. Dörr: „Drive system for an aircraft, aircraft having a drive system and method for operating an aircraft“, US Patent US000012320302B2
- [6] C. Clemen: “Tankanordnung, Luftfahrzeug und Verfahren zur Steuerung einer Kraftstoffzuführung“, Deutsche Patentanmeldung DE 10 2022 200 912 A1
- [7] C. Clemen: „Düsenvorrichtung zur Zugabe zumindest eines gasförmigen Kraftstoffes und eines flüssigen Kraftstoffes, Zuleitungssystem und Gasturbinen-

- anordnung“, Deutsche Patentanmeldung DE 10 2022 207 492 A1
- [8] C. Clemen: „Connecting apparatus for the flow connection between a fuel feed line system and a nozzle apparatus, nozzle apparatus and gas turbine arrangement“, US Patent US12196420B2
 - [9] C. Clemen: „Düsenbaugruppe mit einer Kraftstoffleitung passierender Verbindungsleitung in einem Düsenhauptkörper für eine Luftströmung“, Deutsche Patentanmeldung DE 10 2022 201 182 A1
 - [10] C. Clemen, T. Dörr: „Brennkammeranordnung zum Betrieb mit flüssigem und/oder gasförmigem Kraftstoff, Gasturbinenanordnung und Verfahren“, Deutsche Patentanmeldung DE 10 2022 208 339 A1
 - [11] C. Clemen, R. Eggels: „Düsenvorrichtung, Brennkammeranordnung mit einer Düsenvorrichtung und Triebwerk“, Deutsche Patentanmeldung DE 10 2025 117 321 A1
 - [12] C. Clemen, R. Eggels: „Düsenanordnung, Brennkammeranordnung mit einer Düsenanordnung und Triebwerk“, Deutsche Patentanmeldung DE 10 2025 117 314 A1
 - [13] R. Eggels: „Injektoranordnung für ein Triebwerk und Flugzeug“, Deutsche Patentanmeldung DE 102024205468 A1
 - [14] R. Eggels: „Injektoranordnung für ein Triebwerk und Flugzeug“, Deutsche Patentanmeldung DE 102024205469 A1
 - [15] C. Clemen: „Brennkammerinjektor für separaten und kombinierten Betrieb von flüssigem und gasförmigen Kraftstoff“, Deutsche Patentanmeldung DE 10 2024 202 602 A1
 - [16] C. Clemen: „Kraftstoffdüse für kombinierte Verbrennung von gasförmigem und flüssigem Kraftstoff“, Deutsche Patentanmeldung DE 10 2024 202 360 A1