

Abschlussbericht zum Vorhaben

Entwicklung einer NOx-armen Wasserstoff-Brennkammertechnologie und der Konditionierung des Wasserstoffs für den Bodenstartvorgang

Förderkennzeichen: **20M2211A**

Akronym: **H2-LoNOCS**

Zuwendungsempfänger:

GE Aviation Advanced Technology – GE Aerospace (GE)
Freisinger Landstr. 50
87748 Garching bei München

Ansprechpartner:

Dr.-Ing. Maximilian Zahn
Tel.: +49 173 3143515
E-Mail: Maximilian.Zahn@geaerospace.com



GE Aerospace

GE Aviation Advanced Technology

Zweigniederlassung der General Electric Deutschland Holding GmbH

Dieses Vorhaben ist Teil des Luftfahrtforschungsprogramms LuFo VI-3



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabenstellung & Zielsetzung	4
1.1	Gesamtziel des Vorhabens	4
1.2	Bezug zu den förderpolitischen Zielen	5
2	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	6
3	Stand der Wissenschaft und Technik, an den angeknüpft wurde	6
4	Planung und Ablauf des Vorhabens.....	8
4.1	AP0: Projektmanagement	9
4.2	HAP1: Auslegung und Analyse	11
4.3	HAP2: Brennerentwicklung	11
	AP 2.1: Experimentelle Untersuchung von GE-Brennkammerkonzepten	11
	AP 2.2: Hochdrucktests von GE-Brennkammerkonzepten.....	13
	AP 2.3: Untersuchung neuartiges, axial gestuftes System.....	13
4.4	HAP3: Hochdruck-Sektor	14
	AP 3.1: Vorbereitung des Sektor-Brennkammerrigs	14
5	Beiträge der Verbundpartner / Zusammenarbeit mit Dritten.....	14
	Geplante Arbeitsteilung mit den Verbundpartnern (Partner mit Eigenantrag)	14
	Geplante Zusammenarbeit mit Dritten.....	15
6	Darstellung der erzielten Ergebnisse	15
6.1	HAP1: Auslegung und Analyse	15
6.2	HAP2: Brennerentwicklung	16
	AP 2.1: Experimentelle Untersuchung von GE-Brennkammerkonzepten	16
	AP 2.2: Hochdrucktests von GE-Brennkammerkonzepten.....	19
	AP 2.3: Untersuchung neuartiges, axial gestuftes System.....	19
6.3	HAP3: Hochdruck-Sektor	20
	AP 3.1: Vorbereitung des Sektor-Brennkammerrigs	20
7	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	20

8	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten	21
9	Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse	22
10	Veröffentlichungen	23
11	Quellenverzeichnis.....	23

1 Aufgabenstellung & Zielsetzung

1.1 Gesamtziel des Vorhabens

Zur Erfüllung der Ziele des Pariser Klimaabkommens und des Green Deals der EU-Kommission sowie zur Stärkung der gesellschaftlichen Akzeptanz sind intensive Anstrengungen hin zu einer emissionsfreien und klimaneutralen Luftfahrt notwendig. Die Luftfahrtindustrie untersucht deshalb u.a. den Einsatz von Wasserstoff als Brennstoff für die Direktverbrennung in Flugtriebwerken, um die CO₂-Emissionen aus fossilen Quellen zu vermeiden. Darüber hinaus ist auch eine Reduzierung der Nicht-CO₂-Effekte, insbesondere der NO_x-Emissionen, im Hinblick auf eine klimaneutrale Luftfahrt erforderlich.

Im Projekt H₂-LoNOCS wurde begonnen, Technologien für eine NO_x-arme Brennkammer eines mit flüssigem Wasserstoff betriebenen Antriebs zu entwickeln. Das erste technologische Arbeitsziel im Vorhaben war die Auslegung, Fertigung und iterative Validierung sowie Optimierung von innovativen „Low NO_x“ Wasserstoff-Brennkammerkonzepten für die Flugtriebwerksanwendung. Messdaten bei triebwerksrelevanten Betriebsbedingungen (aus Einzelbrenner- / Sektorbrennkammertests) sollten eine quantitative Bewertung und Validierung der entwickelten Wasserstoff-Brennkammerkonfigurationen ermöglichen sowie die Verifizierung der Konzeptreife (TRL 4). Die Attraktivität lag in der Entwicklung einer Brennkammertechnologie ohne CO₂-Emissionen im Abgas und reduzierten NO_x-Emissionen („Low NO_x“) für die ZEROe Produktvision.

Ein weiteres technologisches Arbeitsziel war die Aufbereitung des flüssigen Wasserstoffs während des quasistationären Hochlaufens der Brennkammer. Hier wäre die Wasserstoffkonditionierung so aufzubauen gewesen, dass ausreichend Wasserstoff für den Hochlauf der Brennkammer zu den erforderlichen thermodynamischen Bedingungen bereitgestellt wird. Dies bedeutet im Umkehrschluss, Verdampfungswärme aus unterschiedlichen Wärmequellen zu managen und die Leistung des Flüssigkeitstransports derart anzupassen, dass keine Anpassungen der vorhandenen Systemkomponenten erforderlich sind.

Aufgrund der vorzeitigen Beendigung des Vorhabens konnte der geplante iterative Validierungs- und Optimierungsprozess der „Low NOx“ H₂-Brennkammerkonzepte allerdings nicht abgeschlossen werden.

1.2 Bezug zu den förderpolitischen Zielen

Das Vorhaben wurde im Rahmen der **Programmlinie (E) Zero Emission Aircraft, Fachbereich (2) Leistungsfähige, sichere und sparsame Systeme** unter dem **Ziel 1 Umweltfreundliche Luftfahrt** durchgeführt. Eine wesentliche Herausforderung der Luftfahrt stellt die Erreichung eines emissionsneutralen Luftfahrtsystems dar, welches über die im europäischen Strategiedokument „Flightpath 2050“ formulierten Umweltschutzziele definiert ist. Zur Reduzierung der dort adressierten Emissionen wird die Nutzung von Wasserstoff als Energiequelle für den Primärtrieb eines Flugzeuges als vielversprechender Lösungsansatz verfolgt. Die Aktivitäten im Rahmen des Vorhabens H₂-LoNOCS fokussierten sich auf eine signifikante Reduzierung von Klimawirkungen der Flugzeugtriebwerke. Um die Anforderungen und die Ziele des Pariser Klimaabkommens und des Green Deals der EU-Kommission zu erfüllen sowie die gesellschaftliche Akzeptanz zu stärken, sollten durch die Partner in H₂-LoNOCS intensive Anstrengungen hin zu einer emissionsfreien und klimaneutralen Luftfahrt und zur weiteren Reduzierung des Material- und Ressourcenverbrauchs in der Produktion unternommen werden. Die Zukunftsfähigkeit der Luftfahrt hängt maßgeblich von ihrer Umweltverträglichkeit und Ressourcenschonung ab. Dabei bedeutet der Fokus auf klimaneutrale Technologien in der Luftfahrt jedoch einen Paradigmenwechsel. Von zentraler Bedeutung sind karbonfreie Technologieoptionen. Alternativen zu den bisherigen Flugzeugkraftstoffen auf Basis nachhaltiger Energieträger weisen grundsätzlich geringere Energiedichten auf. Dies macht Anpassungen im Bereich der Energiewandlung, die Nutzung neuer Komponenten sowie die Auslegung komplexer Antriebsarchitekturen erforderlich. Auch die unterschiedlichen Reichweiten- und Nutzlastanforderungen sowie die Spezifikationen der Einzeltechnologien führt zu direkten Auswirkungen auf die Wahl und Konfiguration des optimalen Antriebssystems. Wesentlicher Baustein in diesem Vorhaben ist der Einsatz von Wasserstoff als Energieträger. Hierbei ist die emissionsarme Direktverbrennung in Gasturbinen vorgesehen. Die Forschungsschwerpunkte fokussierten sich auf die erforderlichen Anpassungen der Brennkammerauslegung sowie der Konditionierung

von flüssigem Wasserstoff an Bord. Durch die Zusammenarbeit mit den Instituten, Hochschulen und Industriepartnern wurde darüber hinaus begonnen qualifizierte Zulieferer und Nachwuchskräfte an die neuartigen Aufgabenstellungen der Luftfahrt heranzuführen und zu entwickeln.

2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Bei der im Rahmen dieses Vorhabens angestrebten Entwicklung innovativer „Low NOx“ Wasserstoff-Brennkammerkonzepte für Flugtriebwerksanwendungen (ZeroE [1] Produktvision) konnte auf Erkenntnisse des GE Teams in Garching u.a. aus den Forschungsvorhaben in LuFo VI-2 sowie Clean Aviation aufgebaut werden. Darüber hinaus konnte das GE Team in Garching als Teil des globalen GE-Verbrennungsteams auf zahlreiche Vorerfahrungen beim Einsatz von Wasserstoff in Brennkammern von aus der Luftfahrt abgeleiteten Gasturbinen, sogenannte „Aeroderivatives“, und Brennkammern von stationären Gasturbinen des früheren Schwester-Geschäftsbereichs (GE Power), jetzt GE Vernova, zurückgreifen. In den beschriebenen Anwendungen verfügt GE über eine 30-jährige Erfahrung im Betrieb von mit Wasserstoff betriebenen Gasturbinen und konnte auf Daten aus kumuliert über 6 Millionen Betriebsstunden mit Wasserstoffanteilen von 6-95% zurückgreifen.

Im Weiteren konnte das Vorhaben auf den Versuchsträgern aufbauen, die im nationalen LuFo VI-2 WAKOS und im Europäischen Clean Aviation entwickelt und getestet wurden. Es setzte die erfolgreiche Kooperation mit dem DLR Köln sowie der TU München fort.

3 Stand der Wissenschaft und Technik, an den angeknüpft wurde

Die angestrebte Entwicklung innovativer „Low NOx“ Wasserstoff-Brennkammerkonzepte erfolgte ausgehend von der – dem Stand der Technik entsprechenden – in LuFo VI-2 WAKOS sowie Clean Aviation HYDEA [2] durch GE Aerospace konzipierten und getesteten Wasserstoff-Brennkammertechnologie.

Die Innovation in H₂-LoNOCS sollte in einer deutlichen Reduktion der NO_x-Emissionen gegenüber dem Stand der Technik liegen, unter Gewährleistung eines sicheren, stabilen Betriebs über den gesamten Betriebsbereich sowohl für stationäre

(Lastpunkte bei unterschiedlichen Flugzuständen) als auch transiente Betriebszustände (Start-/Abstellvorgang), was mit Blick auf die höheren Temperaturen der Wasserstoffverbrennung eine wesentliche Herausforderung darstellte. Bei der „Low NOx“ H₂-Brennkammerentwicklung kamen neben örtlich und zeitlich hochauflösenden CFD-Verfahren insbesondere additive Gestaltungsmöglichkeiten zur Entwicklung der optimierten Brenner- und Mischluftkonfigurationen zum Einsatz. GE Aerospace hat bereits weitreichende Erfahrungen bei der Herstellung und Zertifizierung additiv gefertigter Komponenten für Brennkammern [3] und andere Triebwerksbauteile [4] und ist seit 2016 auch als Hersteller von additiven Fertigungsmaschinen im Markt etabliert [5].

In Ergänzung zu den Erkenntnissen aus LuFo VI-2 WAKOS sowie Clean Aviation HYDEA konnte das Verbrennungsteam von GE in Garching im Weiteren auf die gewonnenen Erfahrungen bei der Entwicklung fortschrittlicher Brennkammertechnologien in zahlreichen CLEAN SKY 2 Projekten und einem LuFo V-3 Vorhaben zurückgreifen. Im Einzelnen sind dies:

1. Das „Ultra High Propulsive Efficiency“ (UHPE) Programm, u.a. zur Entwicklung einer Fett-Mager-Brennkammer für Getriebefans (CLEAN SKY 2, iCore)
2. Das „Small Air Transport Engine“ Programm, u.a. zur Entwicklung einer Fett-Mager-Brennkammer zukünftiger Turboprops (CLEAN SKY 2, MAESTRO)
3. Das „Innovatives Verbrennungskonzept mit kompakter Primärzone für hocheffiziente schadstoffarme Rich-Quench-Lean (RQL)-Konzepte (LuFo V-3 InnoPri)

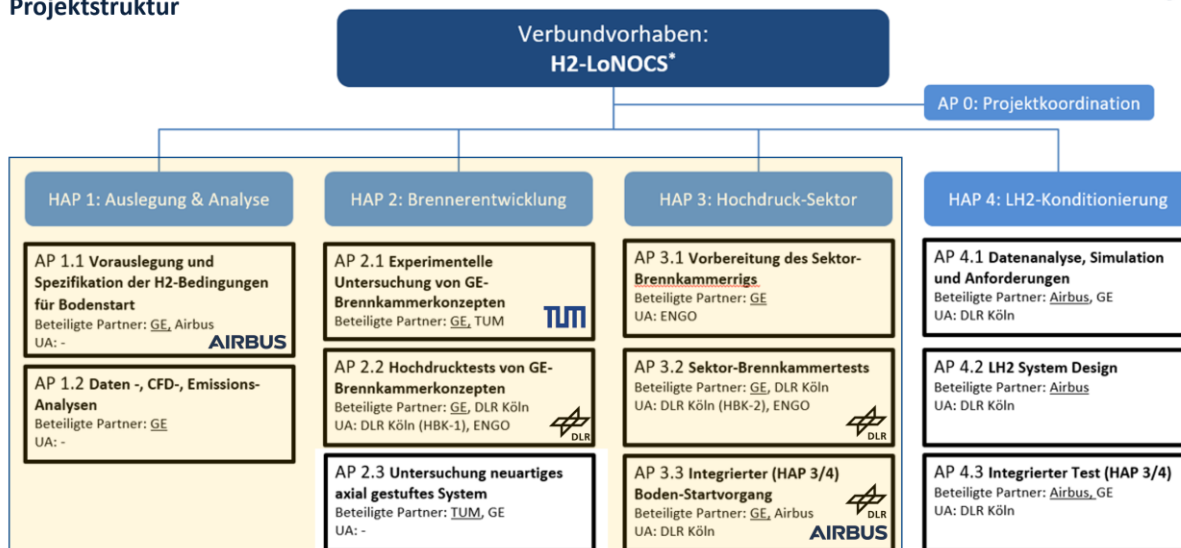
Zum Zeitpunkt des Vorhabens waren keine Schutzrechte oder Schutzrechtsanmeldungen Dritter auf den Gebieten bekannt, die einer späteren Ergebnisverwertung entgegenstehen.

4 Planung und Ablauf des Vorhabens

Der angestrebte iterative Validierungs- und Optimierungsprozess zur Entwicklung von „Low NOx“ H2-Brennkammerkonzepten sollte in drei Hauptarbeitspaketen erfolgen:

LuFo VI-3 H2-LoNOCS

Projektstruktur



HAP 1 umfasste zunächst die Auslegung von Brennkammerkonzepten basierend auf den verbrennungstechnischen/-dynamischen Erkenntnissen aus LuFo VI-2 WAKOS und Clean Aviation HYDEA zur Wasserstoffverbrennung in fett-mager (RQL)-Systemen sowie unter Einbringung von GE's Vorerfahrungen beim Einsatz von Wasserstoff in „Low NOx“ stationären bzw. den sog. „Aeroderivate“- Gasturbinen. Darüber hinaus kamen die ebenfalls in LuFo VI-2 WAKOS validierten CFD- sowie Emissionsmodellierungs-Verfahren von GE bei der Auslegung zum Einsatz.

Im ersten Validierungsschritt (HAP2) wurde begonnen die ausgelegten „Low NOx“ H2-Brennkammerkonzepte experimentell bei Umgebungsdruck in Zusammenarbeit mit dem Partner TUM zu untersuchen. Dabei war der Fokus sowohl auf der thermoakustischen Charakterisierung als auch auf dem stationären Betriebsverhalten inklusive der Emissionen. Basierend auf den gewonnenen Ergebnissen sollten die entwickelten Konzepte weiter optimiert werden, um im nächsten Schritt das Betriebsverhalten unter erhöhten Druckbedingungen in einem Einzelbrennerprüfstand (HBK1) am DLR in Köln zu untersuchen und bewerten. Hierbei sollten neu entwickelte optische Messverfahren durch das DLR-Messtechnikteam (Projektpartner) eingesetzt

werden, um Einblicke in die fundamentalen Prozesse der Wasserstoffverbrennung sowie der Stickoxidbildung in den untersuchten Brennkammerkonfigurationen zu erhalten.

Der letzte im Rahmen dieses Vorhabens durchgeführte Entwicklungsschritt (HAP 3) wäre die experimentelle Validierung eines optimierten H₂-Brennkammerkonzepts in einer Hochdruck-Mehrbrennerkonfiguration am DLR (HBK2) in Köln bei triebwerksrelevanten Betriebspunkten gewesen. Das technologische Ziel war, durch diesen iterativen Validierungsprozess eine Technologiereifegrad von TRL 4 zu erreichen.

Im Rahmen des HAP 3 sollten darüber hinaus Zündversuche bei Bodenstartbedingungen unter Nutzung der von Airbus in HAP 4 entwickelten LH2-Konditionierung durchgeführt werden.

Aufgrund der vorzeitigen Beendigung des Vorhabens konnte der geplante iterative Validierungs- und Optimierungsprozess der „Low NO_x“ H₂-Brennkammerkonzepte nicht abgeschlossen werden.

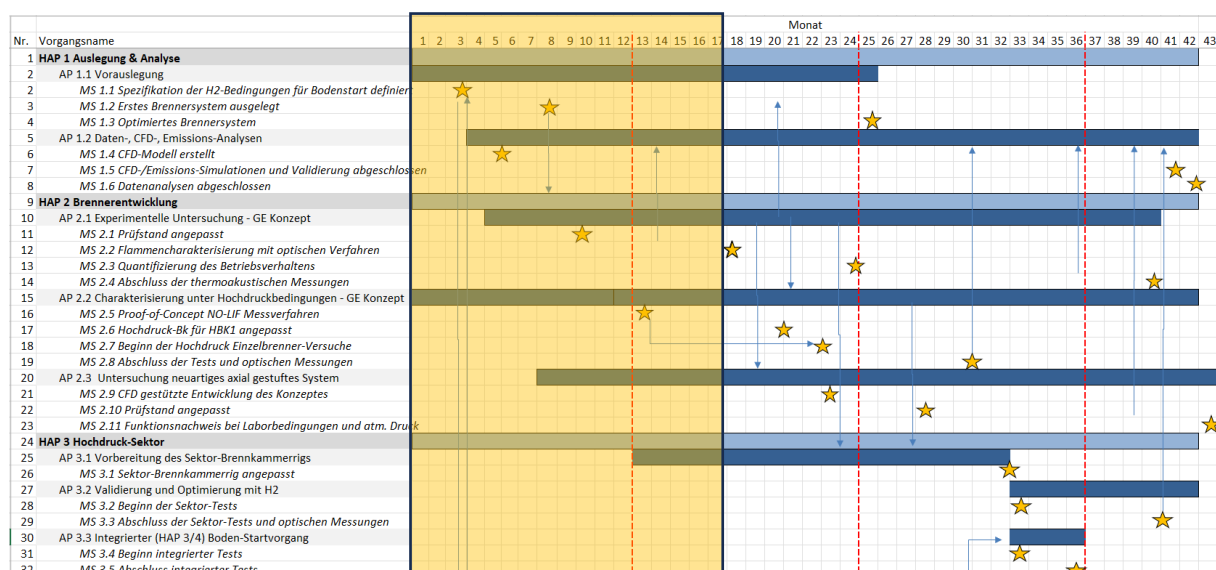
4.1 AP0: Projektmanagement

Das Kick-Off Meeting in Garching im Januar 2024 wurde durch GE Aerospace organisiert und zusammen mit dem Verbundführer Airbus koordiniert.

Der Projektfortschritt in den Projektjahren 2023 und 2024 wurde im ersten und zweiten Zwischenbericht dargelegt.

Im April 2025 erfolgte die vorzeitige Beendigung des Vorhabens.

Nachfolgend ist der Arbeitsplan gezeigt (nur GE-betreffende HAPs, d.h., HAP 1-3), wobei der relevante Berichtszeitraum farblich hervorgehoben wurde:



Anmerkung:

Der gezeigte Arbeitsplan entspricht dem Balkenplan gemäß der von GE eingereichten Vorhabenbeschreibung. Hierin wurde allerdings in AP 2.1 und AP 2.3 der verspätete Start des Partners TUM zum 1.4.2024 berücksichtigt (Projektstart – Monat 1 – des Vorhabens war am 1.12.2023).

Alle Meilensteine in HAP 1 innerhalb des Berichtszeitraums, d.h., MS 1.1, MS 1.2 und MS 1.4, konnten erreicht werden, wie nachfolgend beschrieben.

Der GE-betreffende Meilenstein in HAP 2, Meilenstein MS 2.1, wurde nach Projektende, u.a. durch GE-Eigenmittel, noch erzielt.

Anmerkung: Meilenstein MS 2.5 „Proof-Of-Concept NO-LIF Messverfahren“ wird durch den Verbundpartner DLR verantwortet und der diesbezügliche Fortschritt wird vom DLR berichtet.

4.2 HAP1: Auslegung und Analyse

AP 1.1: Vorauslegung

Zur Vorbereitung des AP3.3 “Integrierter Test”, in dem ein integrierter Boden-Startvorgang die Verbindung zwischen der Airbus LH2-Konditionierung und der GE-Brennkammer realisiert werden sollte, wurden die triebwerksseitigen Randbedingungen für das Kraftstoffsystem definiert und mit dem Verbundpartner Airbus abgestimmt. Der Meilenstein MS1.1 “Spezifikation der H2-Bedingungen für Bodenstart definiert” wurde wie geplant erreicht.

Des Weiteren wurde ein erstes Wasserstoff-betriebsfähiges „Low NOx“ Brennkammerkonzept hinsichtlich spezifischer Randbedingungen, unter Anwendung von Auslegungswerkzeugen reduzierter Ordnung, erfolgreich ausgelegt. Der technologische Schwerpunkt lag hierbei auf Brennkammerkonzepten für die Flugtriebwerksanwendung, die auf einer Vormisch-Verbrennung von 100% Wasserstoff basieren. Der Meilenstein MS1.2 „erstes Brennersystem ausgelegt“ wurde erfolgreich erreicht.

AP 1.2: Daten-, CFD-, Emissions-Analysen

Ein CFD-Modell für das erste ausgelegte Brennersystem (AP1.1 – MS 1.2) wurde erfolgreich erstellt und erste Simulationen wurden durchgeführt. Dies kann die spätere iterative Designoptimierung unterstützen. Meilenstein MS1.4 „CFD-Modell erstellt“ konnte somit erfolgreich erreicht werden.

4.3 HAP2: Brennerentwicklung

AP 2.1: Experimentelle Untersuchung von GE-Brennkammerkonzepten

Das AP 2.1 wurde federführend durch GE in Kooperation mit der TU München durchgeführt. Der folgende zeitliche und inhaltliche Ablauf hat sich dabei ergeben:

1. Konzeptphase:

- a. Definition der wesentlichen Randbedingungen an die durchzuführenden Verbrennungstests in AP 2.1 durch regelmäßige Meetings mit der TUM und dem Unterauftragnehmer ENGO AG.

- b. Identifikation der vorhandenen Hardware und Messtechnik an der TUM und abgleich mit den benötigten Anforderungen an die neu zu testenden Brennerkonfigurationen (GE-Brennkammerkonzept, sowie neuartig axial gestuftes System der TUM aus AP 2.3).
- c. Festlegung der neu zu fertigenden Bauteile, sowie Zuweisung und Aufteilung zwischen GE und TUM.

2. Designphase:

- a. Detaillierte Ausarbeitung des Prüfstandskonzeptes, sowie der neu benötigten Wasserstoffinfrastruktur und Sicherheitsmaßnahmen an der TUM in enger Zusammenarbeit mit der TUM und dem UA ENGO AG.
- b. Festlegung der Betriebsparameter für das GE-Brennkammerkonzept durch GE.
- c. Sicherstellung der mehrfachen Verwendbarkeit des Prüfstandes für alternative Brenner, z.B. axial gestuftes System der TUM aus AP 2.3.

3. Realisierungsphase (nach Berichtszeitraum/ Projektende – finanziert durch GE-Eigenmittel):

- a. Fertigung des Injektormoduls, der Brennkammer, sowie des stromabseitigen Abgasrohres durch den UA ENGO AG.
- b. Fertigung und Anpassung des GE-Brennkammerkonzeptes durch GE.
- c. Aufbau der H2 Infrastruktur und entsprechender Sicherheitsmaßnahmen an der TUM durch die TUM. Finanzielle Unterstützung durch GE für z.B. H2 Sensoren im Verbrennungslabor.
- d. Abschluss des Reviewprozesses bei GE und Testfreigabe durch GE-Experten.

4. Experimentelle Phase (nach Berichtszeitraum/ Projektende – finanziert durch GE-Eigenmittel):

- a. Lieferung und Einbau aller benötigten Prüfstandskomponenten an der TUM. Aufbau der relevanten Messtechnik für die Inbetriebnahme. Vortests der neuen H2 Infrastruktur, sowie Strömungstests mit kalter Luft. Somit wurde Meilenstein 2.1 noch erreicht.
- b. Erste erfolgreiche Zündung und Inbetriebnahme des GE-Brennkammerkonzeptes und erste stationäre Messdatenaufnahme für die von GE festgelegten Betriebspunkte (niederfrequente Druck-, Temperatur- und Massenströme, sowie OH*-Aufnahmen).

AP 2.2: Hochdrucktests von GE-Brennkammerkonzepten

GE führte auch AP 2.2 federführend durch. Die Konzeptphase zur Vorbereitung der Untersuchungen des Betriebsverhaltens der in AP1.1 ausgelegten „Low NOx“ Brennkammerkonzepte unter erhöhten Druckbedingungen im Einzelbrennerprüfstand HBK1 am DLR Köln (Unterauftrag) wurde durchgeführt und durch ein GE-internes Konzept-Review abgeschlossen. Aufgrund des vorzeitigen Projektendes konnte mit der Design- und Realisierungsphase (inkl. Hardware-Fertigung) nicht fortgefahren werden.

Im Rahmen der Hochdruck- Einzelbrennversuche sollten neu entwickelte optische Messverfahren - als Partnerbeitrag des DLR-Messtechnikerteams - zum Einsatz kommen. Der Fortschritt bei der Entwicklung dieser Messtechnik wird in den Status-Berichten des Partners DLR detailliert beschrieben.

AP 2.3: Untersuchung neuartiges, axial gestuftes System

Das AP 2.3 wurde federführend durch die TU München in Kooperation mit GE durchgeführt. Der folgende zeitliche und inhaltliche Ablauf hat sich dabei ergeben:

1. Auslegung der ersten Stufe des axial gestuften Brennersystems der TUM durch die TUM.
2. Iterative Designanpassung des TUM Brennersystems durch enge Kooperation mit GE und dem UA ENGO AG, um Kompatibilität mit der von GE zur Verfügung gestellten Brennkammerhardware sicher zu stellen (siehe auch AP 2.1).
3. Auslegung der zweiten Stufe des axial gestuften Brennersystems der TUM durch die TUM.
4. Vortests der ersten Stufe des TUM-Brennersystems durch die TUM.

Details zum AP 2.3 sind im Zwischenbericht der TUM zu finden.

4.4 HAP3: Hochdruck-Sektor

AP 3.1: Vorbereitung des Sektor-Brennkammerrigs

Erste administrative und technisch-konzeptionelle Vorarbeiten mit dem DLR Köln zur Vorbereitung des Sektor-Brennkammerrigs sowie Anpassungsarbeiten am Prüfstand wurden durchgeführt. Die begonnene Konzeptphase, wurde im weiteren Verlauf auf Grund des vorzeitigen Projektendes nicht fortgeführt.

AP3.2 und AP3.3 wurden nicht gestartet.

5 Beiträge der Verbundpartner / Zusammenarbeit mit Dritten

Geplante Arbeitsteilung mit den Verbundpartnern (Partner mit Eigenantrag)

Art	Institution/Unternehmung	Thema	HAP/AP im Verbund
IND	Airbus Operations GmbH	Abstimmung der Randbedingungen/ Interfacebeschreibung	AP 1.1
		Integrierter Boden-Start	AP 3.3
WIS	DLR Köln	Anwendung neuartiger optischer Messverfahren	AP 2.2 / AP 3.2
WIS	Technische Universität München	Experimentelle Untersuchung des stationären Betriebsverhalten sowie thermoakustische Charakterisierung von H2-Brennkammern	AP 2.1 / AP 2.3

Geplante Zusammenarbeit mit Dritten

Art	Institution/Unternehmung	Thema	HAP/AP im Verbund
WIS	DLR Köln – Institut für Antriebstechnik – HBK 1	Charakterisierung von H2-Einzelbrenner unter Hochdruckbedingungen	AP 2.2
WIS	DLR Köln – Institut für Antriebstechnik – HBK 2	Validierung und Optimierung einer Sektorbrennkammer mit H2 Integrierter Boden-Start	AP 3.2 AP 3.3
KMU	ENGO AG: Marco Iseli, Daniela Limacher	Unterstützung bei Hardware-Design und -Herstellung	AP 2.1/ AP2.2 AP3.1/ AP 3.2

6 Darstellung der erzielten Ergebnisse

6.1 HAP1: Auslegung und Analyse

AP 1.1: Vorauslegung

Zur Vorbereitung des AP3.3 “Integrierter Test”, in dem ein integrierter Boden-Startvorgang die Verbindung zwischen der Airbus LH2-Konditionierung und der GE-Brennkammer realisiert werden sollte, wurden die triebwerksseitigen Randbedingungen für das Kraftstoffsystem erfolgreich definiert und mit dem Verbundpartner Airbus abgestimmt, was das Ziel von AP1.1 darstellte. Neben Temperatur-, Durchfluss- und Druckbedingungen wurden ebenfalls Änderungsraten für den transienten Startvorgang definiert.

Es konnte im Weiteren ein erstes Wasserstoff-betriebsfähiges „Low NOx“ Brennkammerkonzept hinsichtlich spezifischer Randbedingungen erfolgreich

ausgelegt sowie die konstruktive und fertigungstechnische Umsetzung (u.a. durch Einsatz von GE-Eigenmitteln nach Projektende) erzielt werden.

AP 1.2: Daten-, CFD-, Emissions-Analysen

Ein CFD-Modell für das erste ausgelegte Brennersystem wurde erfolgreich erstellt und erste Simulationen wurden erzielt.

6.2 HAP2: Brennerentwicklung

AP 2.1: Experimentelle Untersuchung von GE-Brennkammerkonzepten

Die Konzeptphase für die Untersuchungen der GE „Low NOx“ H₂-Brennkammerkonfigurationen wurde mit Einstellung der neuen Doktoranden an der TUM im April 2024 begonnen und bis Anfang 2025 fortgeführt. Im Rahmen der Konzeptphase wurde festgestellt, dass die an der TUM vorhandene Prüfstandshardware für die geplanten Untersuchungen einer „Low NOx“ H₂-Flugtriebwerksbrennkammer wenig geeignet ist. Vor allem weil die vorhandene Brennkammer einen deutlich zu großen Brennkammerquerschnitt für die Untersuchungen des GE „Low NOx“ H₂ Brenners aufwies. Durch die Anpassung des Brennkammerquerschnitts mussten auch daran anschließende Komponenten neu ausgelegt werden, um das akustische Verhalten für die späteren Untersuchungen der Flammendynamik zu optimieren. Schließlich wurde der Prüfstand in enger Zusammenarbeit zwischen der TUM, GE und dem Unterauftragnehmer ENGO weitgehend neu ausgelegt und konstruiert. Dadurch ergibt sich eine optimale Anpassung der Prüfstandshardware und Messtechnik an die zu untersuchende H₂-Brenner, sei es der GE „Low NOx“ H₂ Brenner als auch das axial gestufte TUM-Konzept (siehe AP 2.3). Der neue Prüfstand ist damit nicht nur in der Lage den H₂ Low NOx Brenner von GE, sondern auch das axiale gestufte TUM-Konzept (siehe AP 2.3) aufzunehmen. Die neuen Hardwarekomponenten, sowie Teile der Messtechnik wurden mit Eigenmitteln von GE für die experimentellen Untersuchungen an der TUM beschafft. Einen Überblick des neuen Prüfstandes für die Untersuchung des H₂ Low NOx Konzeptes von GE gibt Abbildung 1.

Zudem wurde der an der TUM vorhandene Prüfstand in ein neues Labor verlegt, um die Sicherheit im Einklang mit der Sicherheitskultur von GE weiter zu verbessern.

Diese Initiative führte dazu, dass GE Aerospace zusätzliche sicherheitsrelevante Komponenten, z. B. H₂-Sensoren, aus eigenen Mitteln beschaffte und finanzierte.

Die Gründe für den Umzug betreffen vor allem die neu zu installierende Wasserstoffinfrastruktur für den Betrieb des Prüfstandes. Die Auslegung der Wasserstoffinfrastruktur erfolgte wiederum in enger Zusammenarbeit zwischen der TUM und GE und unter Einbezug der Erfahrungen aus dem Vorgängerprojekt LuFo VI-2 WAKOS. Einen Überblick über die neue Laborinfrastruktur inklusive der erforderlichen Versorgungsmedien gibt das vereinfachte Fließschema in Abbildung 2.

Der weitgehend neu ausgelegte und konstruierte Prüfstand, sowie die sicherheitstechnisch optimierte Wasserstoffinfrastruktur bedeuteten einen deutlichen Mehraufwand für das Erreichen des Meilensteins MS 2.1 (Prüfstand angepasst). Stand Ende April 2025 war die finale Designphase für den Prüfstand weitestgehend abgeschlossen und die Fertigung erster Bauteile hat gestartet.

Die Ausarbeitung von Strategien und Konzepten zum sicheren Zünd-, Hochfahr-, und Abstellverhalten wurde früher als ursprünglich geplant bereits innerhalb 2024 begonnen. Dies beinhaltet auch das Design und die Integration eines von GE und dem Unterauftragnehmer ENGO weiterentwickelten H₂-Zündbrenners in die neue Brennkammer von GE. Zusätzlich wurde das für den Betrieb des H₂-Zündbrenners notwendige Zündsystem ausgelegt.

Die abschließende Fertigung aller Prüfstandskomponenten, sowie die Beschaffung der fehlenden Messtechnik für die thermoakustischen Untersuchungen in AP 2.3 erfolgte im Sommer 2025. Der neue Prüfstand wurde im Oktober 2025 mit dem GE Brennerkonzept erstmalig erfolgreich in Betrieb genommen. Im Zuge der Inbetriebnahme wurde auch das neue Zündsystem erstmalig erfolgreich getestet und erste Verbrennungsversuche mit dem GE-Brennerkonzept durchgeführt (siehe Abbildung 3, außerhalb des Berichtszeitraums). Meilenstein MS 2.1 wurde daher erreicht. Zudem wurde mit MS 2.2 (Flammencharakterisierung mit optischen Verfahren) und MS 2.3 (Quantifizierung des Betriebsverhaltens) in Q4 2025 begonnen. Alle Aktivitäten nach offiziellem Projektende im April 2025 wurden durch GE-Eigenmittel weiter unterstützt.

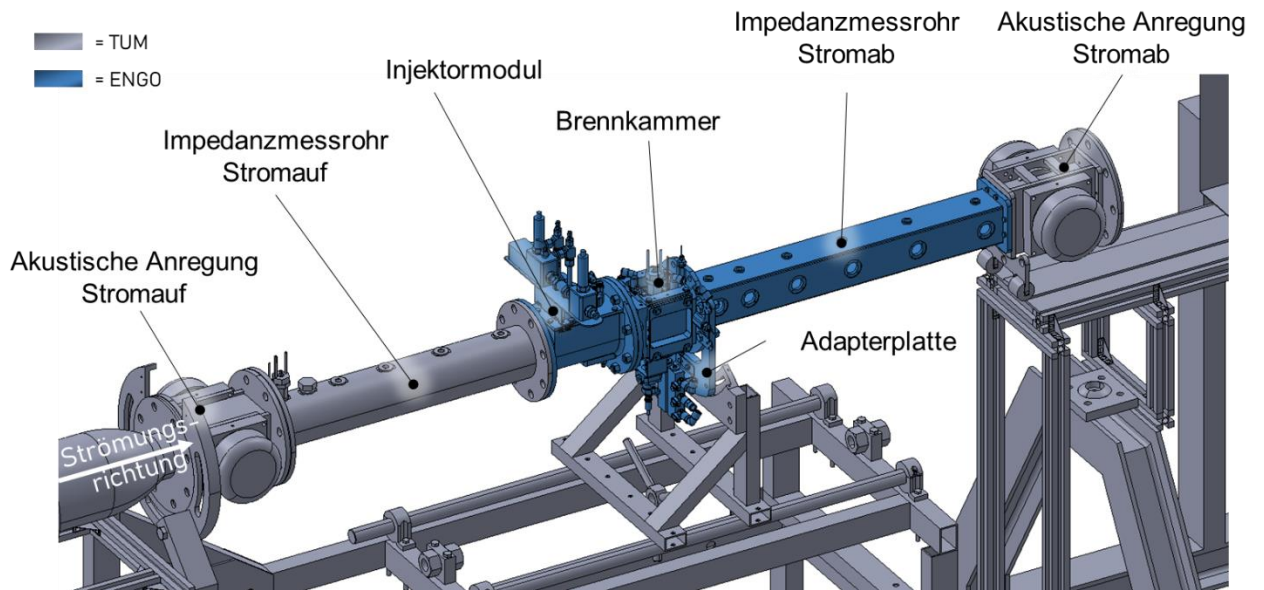


Abbildung 1: CAD Setup für die Untersuchung des H2 Low NOx GE Brenners am H2 LoNOCS Prüfstand der TUM.

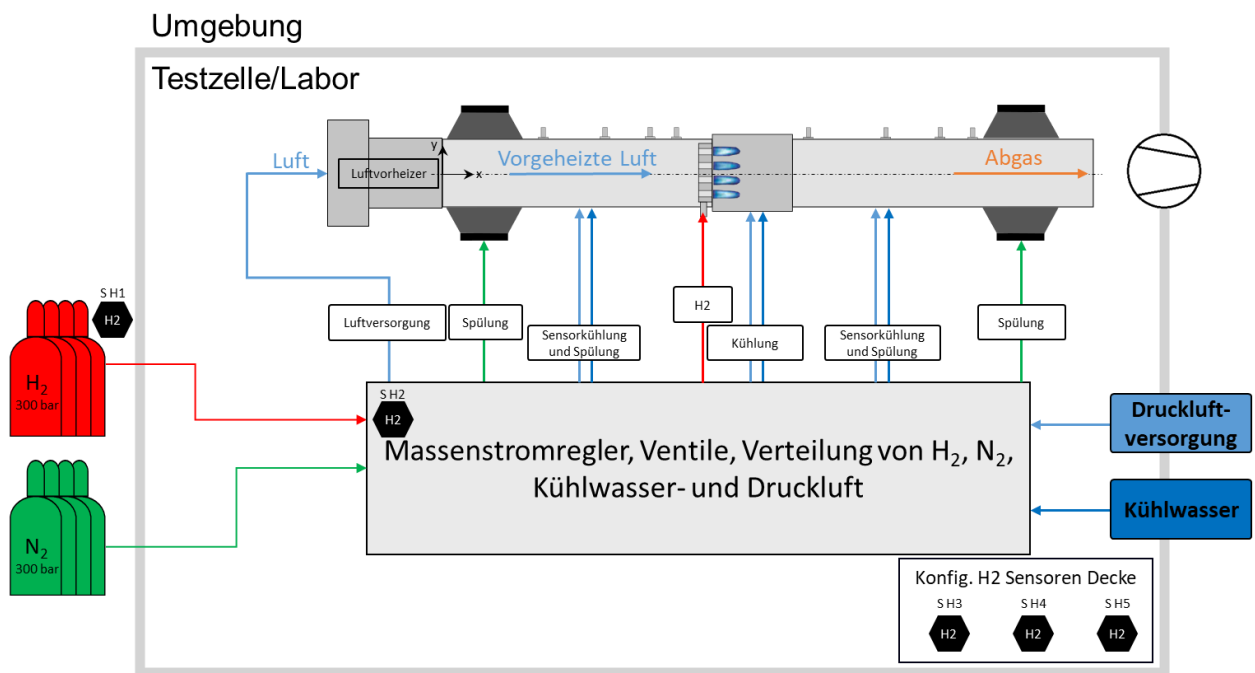


Abbildung 2: Vereinfachtes Fließschema der neuen Infrastruktur im TUM H2 LoNOCS Labor.

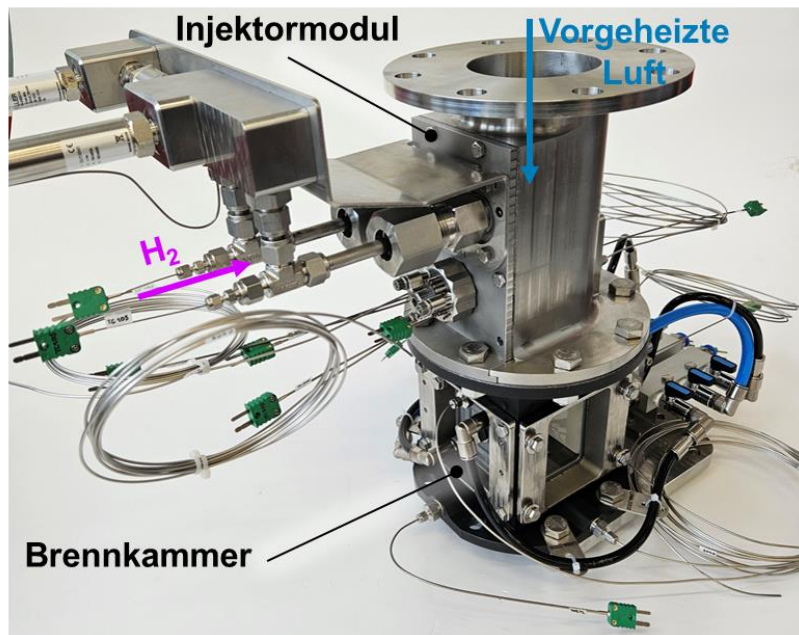


Abbildung 3: Injektormodul und Brennkammer für den H2 LoNOCS Prüfstand an der TUM (außerhalb des Berichtszeitraumes).

AP 2.2: Hochdrucktests von GE-Brennkammerkonzepten

Da in AP 2.2 aufgrund des vorzeitigen Projektendes lediglich die Konzeptphase abgeschlossen werden konnte, wurde die angestrebten experimentellen Ergebnisse nicht erzielt.

AP 2.3: Untersuchung neuartiges, axial gestuftes System

Das AP 2.3 wird federführend durch den Projektpartner TUM geleitet und von Seiten GE fachlich und finanziell unterstützt. Aus diesem Grund soll im gegenständlichen Bericht nur kurz darauf eingegangen werden.

Die Auslegung des axial gestuften H₂-Verbrennungssystems an der TUM wurde 2024 begonnen und bereits für die erste Verbrennungsstufe abgeschlossen. Dabei wurde auf eine hohe Modularität des Brenners in der ersten Verbrennungsstufe geachtet, um etwaige Modifikationen im Falle eines ungünstigen Betriebsverhaltens zu einem späteren Zeitpunkt vornehmen zu können. Parallel dazu liefen die numerischen Untersuchungen zum axial gestuften TUM-Konzept mittels CFD-Simulationen.

Die Integration der ersten Verbrennungsstufe des TUM-Konzeptes erfolgt in die von GE bereitgestellte Brennkammerhardware. Diese wird in AP 2.1 für den H₂ Low NOx Brenner von GE verwendet und wurde in enger Kooperation mit der TUM so ausgelegt

und konzipiert, dass beide Konzepte (GE und TUM) in eine Brennkammer aufgenommen werden können. Der in AP 2.1 beschriebene Zusatzaufwand durch weitgehende Neukonstruktion des Prüfstandes, Umzug des alten Prüfstandes, sowie sicherheitstechnisch optimierte H2 Infrastruktur ist weitgehend auch für das axial gestufte TUM-Konzept notwendig.

Die erste Stufe des axial gestuften TUM-Brennerkonzepts wurde 2025 in ersten Vortests auf ihre Funktionsfähigkeit hin untersucht und wird im Frühjahr 2026 im Detail geprüft. Die Auslegung der zweiten Verbrennungsstufe des TUM-Konzepts begann 2024 und wurde 2025 fortgeführt. Der „Design-Freeze“ des vorläufigen Gesamtkonzepts ist erfolgt, und die Fertigung der zusätzlich benötigten Prüfstandsbauteile für die zweite Verbrennungsstufe ist im Gange. Der erste Test des Gesamtkonzeptes ist für das Frühjahr 2026 geplant.

Eine detaillierte Ausführung zu AP 2.3 ist im Zwischenbericht des Verbundpartners TUM zu finden.

6.3 HAP3: Hochdruck-Sektor

AP 3.1: Vorbereitung des Sektor-Brennkammerrigs

Da im Rahmen von AP 3.1 aufgrund des vorzeitigen Projektendes lediglich die Konzeptphase in Vorbereitung war, wurden in HAP 3 keine Ergebnisse erzielt (**AP3.2** und **AP3.3** wurden nicht gestartet).

7 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Nachfolgend sind die wichtigsten Kosten kurz beschrieben.

Personalkosten:

Personalkosten in H2-LoNOCS entstanden hauptsächlich für die Arbeiten in HAP1 und HAP2. Im Rahmen von AP1.1 und AP 2.1 fielen die Personalkosten für die Auslegung des ersten Wasserstoff-betriebsfähigen „Low NOx“ Brennkammerkonzepts und für die Konstruktion des neuen TUM Prüfstandes, sowie die Ausarbeitung einer neuen H2

Infrastruktur an der TUM in enger Kooperation mit der TUM und dem UA ENGO AG an. AP1.2 umfasste CFD Modellierungen. In AP 2.2 und AP 3.1 wurden die Personalkosten hauptsächlich für die konzeptionellen Vorarbeiten für die geplanten Einzel- und Sektor-Brennkammertests unter Hochdruckbedingungen am DLR Köln verwendet.

Materialkosten:

Es wurden keine Materialkosten in Anspruch genommen.

Fremdleistungen:

Es wurden keine Fremdleistungen in Anspruch genommen.

Sonstige Kosten:

Die sonstigen Kosten, welche in Anspruch genommen wurden, sind vor allem für die ersten Arbeiten innerhalb der Konzeptphase für den TUM Prüfstand in AP 2.1 durch den UA ENGO AG angefallen, sowie für erste Vorbereitungen für den Hochdruck-Sektor in HAP 3. Der Großteil der angefallenen Kosten für den TUM Prüfstand in AP 2.1 beim UA ENGO AG wurde aus GE-Eigenmitteln beglichen.

8 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten

Die Förderung sollte die Adressierung von ehrgeizigeren Zielen mit einer deutlich gesteigerten Projektreichweite ermöglichen. So konnte dank der Förderung begonnen werden, die großen Herausforderungen bei der Entwicklung einer „Low NOx“ H2-Brennkammer von der grundlagenbasierten Entwicklung der Einzelbrenner bis hin zur Sektor-Brennkammer unter Triebwerks-Vollastbedingungen anzugehen. Die erreichten ersten Schritte (bis zum vorzeitigen Projektende) im Rahmen des geplanten iterativen Validierungs- und Optimierungsprozesses zur „Low NOx“ H2-Brennkammertechnologieentwicklung eröffnen die Möglichkeit, die erzielten Brennkammerkonzepte in an H2-LoNOCS anknüpfende Fördervorhaben (s. Kap. 9) zu höherer Technologiereife weiterzuentwickeln.

9 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Aufgrund des vorzeitigen Projektendes konnten die angestrebten Ergebnisse und Projektziele:

Erwartete Ergebnisse des Vorhabens (gemäß Vorhabenbeschreibung):
<ul style="list-style-type: none">• Auslegung, Fertigung und iterative Validierung sowie Optimierung von innovativen „Low NOx“ Wasserstoff-Brennkammerkonzepten (bis zur Konzeptreife TRL 4) für die Flugtriebwerksanwendung.• Demonstration des integrierten Bodenstart-Vorgangs der GE-Brennkammer unter Bereitstellung des konditionierten Wasserstoffs durch das Wasserstoffkonditionierungssystem von Airbus.• Durch den Brennkammer-Entwicklungsprozess geschaffene verbrennungstechnische und -dynamische Erkenntnisse hinsichtlich der „Low-NOx“ Wasserstoffverbrennung zur Unterstützung der Brennkammerentwicklung zukünftiger umweltfreundlicher und ultra-effizienter Triebwerke (CFM-RISE).• Validierung von GEs CFD- sowie Emissionsmodellierungs-Verfahren auf Basis der Messergebnisse und Bereitstellung von Richtlinien („best practices“) bei der Anwendung dieser Methoden zur Simulation des verbrennungstechnischen und -dynamischen Betriebsverhaltens von industrierelevanten Wasserstoff-betriebenen „Low-NOx“ Brennkammern.

nicht vollumfänglich erreicht werden. Dementsprechend kann die gemäß der Vorhabenbeschreibung vorgesehene Verwertung zunächst auch nicht wie geplant erfolgen.

Die beschriebenen technologischen Ziele haben trotz des vorzeitigen Projektendes weiterhin eine hohe Relevanz bzgl. der förderpolitischen Ziele sowie der beschriebenen Verwertungsstrategie. Demzufolge sollte das im Rahmen der verkürzten Projektlaufzeit erste ausgelegte Brennerkonzept (inkl. zugehörigem CFD Modell und gefertigter Brennkammerkonfiguration) sowie die konzeptionellen Vorarbeiten für Einzel- und Sektor-Brennkammertests unter Hochdruckbedingungen (am DLR) die Grundlage für an H₂-LoNOCS anknüpfende Fördervorhaben bilden. Wie im vorherigen Kapitel bereits beschrieben, eröffnet die begonnene „Low NOx“ H₂-Brennkammertechnologieentwicklung die Möglichkeit, diese Brennkammertechnologien, u.a. im LuFo VII-1 H₂-SYNC (ab 2026) sowie ggf. in zukünftigen LuFo-Programmen (LuFo VII-2) und dem geplanten europäisch geförderten Wasserstoff-Programm in CLEAN AVIATION – Call 4 (ab 2027), zu höherer Technologiereife (TRL5) weiterzuentwickeln. Die dabei erzielten Ergebnisse

in den auf H2-LoNOCS aufbauenden Fördervorhaben ermöglichen die weitere Forcierung der in der Vorhabenbeschreibung dargelegten Verwertungsstrategie.

10 Veröffentlichungen

Zum Zeitpunkt des Abschlussberichts gibt es keine Veröffentlichungen zu den Aktivitäten in H2-LoNOCS.

11 Quellenverzeichnis

[1] ZEROe - Hydrogen - Airbus

[2] CLEAN-AVIATION-2022-01-HPA-01

[3] <http://www.industrytap.com/ges-next-gen-jet-engines-use-3d-printed-parts/16149>

[4] <http://www.ainonline.com/aviation-news/aerospace/2015-04-14/ge-installs-first-additive-made-engine-part-ge90>

[5] <http://www.geadditive.com/press-releases/ge-well-positioned-to-accelerate-additive-revolution.html>

[6] Combustors with Low Emission Levels for Aero Gas Turbine Engines, International Journal of Engineering and Management Sciences (IJEMS) Vol. 4. (2019). No. 1 DOI: 10.21791/IJEMS.2019.1.62

[7] General Electric, TAPS II Combustor, Final Report, Continuous Lower Energy, Emissions and Noise (CLEEN) Program, June 2013

[8] H.C. Mongia – W.G.A.E. Dodds (2004) Low emissions propulsion engine combustor technology evolution past, present and future, in: 24th Congress of International Council of the Aeronautical Sciences, Yokohama, Japan

[9] Y. Liu – X. Sun – V. Sethi – D. Nalianda – Y. Li – L. Wang (2017) Review of modern low emissions combustion technologies for aero gas turbine engines. Progress in Aerospace Sciences 94 pp. 12– 45

[10] J. Herbon – J. Aicholtz – S.Y. Hsieh and others (2017) N+2 Advanced Low NOx Combustor Technology Final Report, NASA/CR-2017-219410. pp. 1-120