

Abschlussbericht zum Vorhaben

Entwicklung und Validierung eines innovativen Hochdruckverdichterkonzepts

Förderkennzeichen: **20T1903**

Akronym: **EVALOP-HPC**

Zuwendungsempfänger:

GE Aviation Advanced Technology
Freisinger Landstr. 50
87748 Garching bei München

Ansprechpartner:

Christian Aalburg
Tel.: +49 172 204-7913
E-Mail: christian.aalburg@geaerospace.com



GE Aerospace

GE Aviation Advanced Technology

Zweigniederlassung der General Electric Deutschland Holding GmbH

Dieses Vorhaben ist Teil des Luftfahrtforschungsprogramms LuFo VI-1

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabenstellung & Zielsetzung.....	3
1.1	Gesamtziel des Vorhabens	3
1.2	Bezug zu den förderpolitischen Zielen	6
2	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	6
3	Stand der Wissenschaft und Technik, an den angeknüpft wurde	8
4	Planung und Ablauf des Vorhabens.....	9
4.1	AP0: Projektmanagement	10
4.2	HAP1: Entwicklung & Validierung eines innovativen HDV-Konzepts	10
4.3	HAP2: Thermal-Transiente Untersuchungen zu HDV-Kavitäten am HS-SCR 12	
5	Beiträge der Verbundpartner / Zusammenarbeit mit Dritten.....	13
6	Darstellung der erzielten Ergebnisse	15
6.1	HAP1 – Entwicklung und Validierung eines innovativen Hochdruckverdichterkonzepts	15
6.2	HAP2 – Thermal-Transiente Untersuchungen zu HDV-Kavitäten am HS-SCR 26	
7	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	30
8	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten	31
9	Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse	32
10	Veröffentlichungen	34

1 Aufgabenstellung & Zielsetzung

1.1 Gesamtziel des Vorhabens

Das Projekt EVALOP-HPC verfolgte das Ziel, Technologien zu entwickeln, die die Effizienz von Hochdruckverdichtern allgemein verbessern und unter realistischen Betriebsbedingungen validieren. Das Projekt ist in zwei große Bereiche unterteilt, die sich beide dem Studium verschiedener Methoden widmen, die darauf abzielen, die Effizienz dieser Komponente zu verbessern. Einerseits die Untersuchung innovativer Technologien in einem dreistufigen Verdichter und andererseits die Analyse des Strömungsverhaltens in den Hohlräumen, die durch die Scheiben dieser Verdichter gebildet werden, insbesondere dort, wo die Kühlluft für die Turbinen entnommen wird. Dieses Konzept sollte repräsentativ für die hochbelasteten hinteren Stufen zukünftiger Hochdruckverdichter sein und sowohl den Wirkungsgrad als auch die Betriebsstabilität relativ zum derzeitigen Stand der Technik signifikant verbessern.

Die Einführung innovativer Technologien, wie der Verbesserung des Nahwandstroms im Verdichter und die Untersuchung des Verhaltens der Luft in Kavitäten, die an den Hauptstrom angrenzen, mit radialem Zufluss aus diesen, sowie war ein zentraler Bestandteil des Projekts. Diese Ziele sollten trotz erhöhter relativer Schaufelspitzenabstände erreicht werden, die für die nächste Triebwerksgeneration mit äußerst kompakten Kerntriebwerken relevant sind.

Die Motivation für das Projekt EVALOP-HPC ergab sich aus der dringenden Notwendigkeit, die Effizienz und Nachhaltigkeit von Flugzeugtriebwerken zu verbessern. Angesichts der wachsenden Anforderungen der Luftfahrtindustrie, die sowohl von wirtschaftlichen als auch von ökologischen Faktoren geprägt ist, ist die Entwicklung neuer Technologien von zentraler Bedeutung. Insbesondere Hochdruckverdichter stellen eine Schlüsselkomponente moderner Flugzeugtriebwerke dar, da sie maßgeblich zur Gesamtleistung, zum Kraftstoffverbrauch und zur Emissionsreduktion beitragen. Die Entwicklung innovativer Hochdruckverdichtertechnologien stellt deshalb einen entscheidenden Schritt dar, um die nächste Generation von Flugzeugtriebwerken zu ermöglichen, die den Anforderungen der Luftfahrtindustrie hinsichtlich Effizienz, Leistung und Umweltverträglichkeit gerecht werden.

Das Projekt nutzte zwei Prüfstände an zwei Forschungsinstituten in Deutschland gelegen: den Axialverdichterprüfstand HSRC der TU München (TUM), der speziell für die Validierung von Hochdruckverdichtern unter realistischen Betriebsbedingungen konzipiert ist und den sogenannten Kavitätenprüfstand HS-SCR der TU Dresden (TUD).

Der erste Prüfstand (Abbildung 1) bot die Möglichkeit, die entwickelten Technologien unter Bedingungen zu testen, die den Anforderungen zukünftiger Triebwerksgenerationen entsprechen, und einen Technologiereifegrad (TRL) von 4 zu erreichen. Darüber hinaus baute das Projekt auf früheren Forschungs- und Entwicklungsarbeiten auf, die eine solide Grundlage für die Weiterentwicklung der Technologie boten. Die erfolgreich durchgeführte Auslegung und Validierung der neuen Technologien aus diesem Projekt legt den Grundstein für die weitere Reifung der Technologie, insbesondere durch die Integration in Systemtechnologie-Demonstratoren, die einen höheren Technologiereifegrad (TRL-5/6) erreichen sollen.

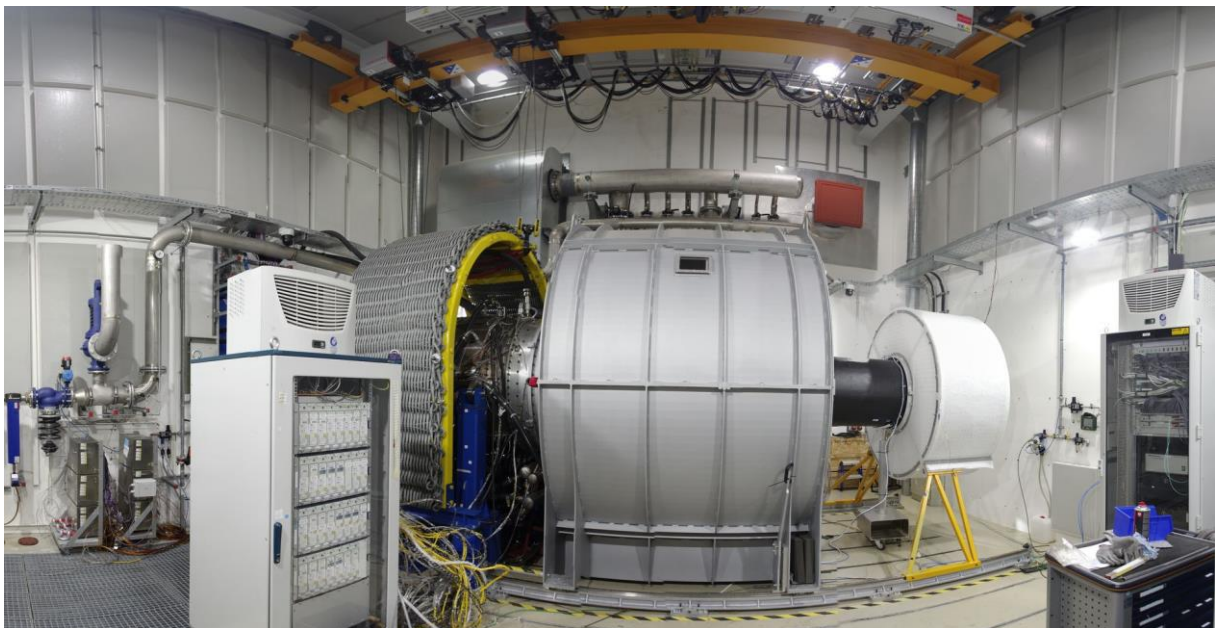


Abbildung 1: Axialverdichterprüfstand HSRC der TUM.

Der zweite Prüfstand (Abbildung 2) ist eine Weiterentwicklung desjenigen, der während LuFo V-2 und LuFo V-3 an der TUD verwendet wurde. In den ersten Monaten des Projekts wurde der Prüfstand genutzt, um Temperaturmessungen während transienten Zyklen durchzuführen, die repräsentativ für die Triebwerksbedingungen beim Start und bei der Verzögerung sind, ähnlich den Validierungszyklen bei

Entwicklungs- und Produktionstriebwerken. Diese Daten sind entscheidend, um das thermomechanische Verhalten der Verdichterhohlräume zu verstehen, das anschließend zur Bestimmung der Spaltmaße des Triebwerks verwendet wird. In einer zweiten Phase wurde der Prüfstand so umgebaut, dass er die hinteren Hohlräume des Triebwerks repräsentiert, in denen der Strömungsfluss radial abgeführt wird. Auf diese Weise wurde im Rahmen der aufeinanderfolgenden LuFo-Projekte der gesamte Verdichter aus der Perspektive des Wärmeübergangs der internen Strömungen charakterisiert.



Abbildung 2: Kavität Verdichterprüfstand HS-SCR der TUD.

Aus den vorherigen Absätzen lässt sich ableiten, dass dieses Projekt durch die enge Zusammenarbeit zwischen Industrie und Wissenschaft ermöglicht wurde, die einen wesentlichen Bestandteil des Projekts darstellte. GE Aviation Advanced Technology brachte umfangreiche Erfahrung in der Entwicklung und Validierung von Hochdruckverdichtern ein, während die TUM und die TUD modernste Forschungseinrichtungen, Meßmethoden und hochqualifizierte Fachkräfte bereitstellten. Diese Partnerschaft ermöglichte den Zugang zu neuesten wissenschaftlichen Erkenntnissen und förderte die Ausbildung von Nachwuchswissenschaftlern, die für die zukünftige Entwicklung der Luftfahrtindustrie eine hohe Bedeutung haben.

Zusammenfassend trägt das Projekt EVALOP-HPC dazu bei, die technologische Basis für die nächste Generation von Flugzeugtriebwerken zu schaffen, die sowohl den wirtschaftlichen als auch den ökologischen Anforderungen der Luftfahrtindustrie

gerecht werden. Es unterstützt damit die langfristigen Ziele der Luftfahrtforschung und stärkt die Position Deutschlands als führender Standort für Innovationen in der Luftfahrttechnologie.

1.2 Bezug zu den förderpolitischen Zielen

Das Projekt unterstützt die Umweltziele des Flightpath 2050, die eine drastische Reduzierung von CO₂-Emissionen und eine Verbesserung der Energieeffizienz in der Luftfahrt anstreben. Durch die Entwicklung hocheffizienter Triebwerke für Kurz- und Mittelstreckenflugzeuge trägt es direkt zur Erreichung dieser Ziele bei. Ein zentraler Fokus liegt auf der CFM RISE Open Fan Architektur, die eine Reduktion des Kraftstoffverbrauchs um bis zu 20% ermöglicht und vollständig kompatibel mit klimafreundlichen Kraftstoffen wie SAF und Wasserstoff ist. Die innovative RISE Technologie basiert auf einem kompakten Kerntriebwerk mit einem fortschrittlichen Kreisprozess, der höhere Temperaturen und Druckverhältnisse erlaubt, jedoch dadurch erhebliche Anforderungen an zukünftige Hochdruckverdichter stellt. Das Projekt EVALOP-HPC war darauf ausgelegt, neue Verdichtertechnologien genau für diese Anwendung zu entwickeln.

Gleichzeitig förderte das Projekt Forschungsk Kooperationen mit führenden akademischen Institutionen wie der TUM und der TUD, um den gegenseitigen Wissensaustausch und die Entwicklung von Schlüsseltechnologien voranzutreiben, wodurch die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Luftfahrtindustrie weiter verbessert und gesichert wurde.

2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Der GE Aerospace Standort in Garching ist aktiv an der Entwicklung des RISE Open Fan Programs beteiligt und verfügt über umfangreiche Erfahrung in der Entwicklung von Technologien für Flugzeugtriebwerke der nächsten Generation, die im Rahmen europäischer und nationaler Forschungsprogramme durchgeführt werden. Seit 2009 erweitert GE Aerospace kontinuierlich seinen Forschungs- und Entwicklungsstandort in Garching. Der Standort hat sich über diesen Zeitraum zu einem Kompetenzzentrum

für Verdichter innerhalb von GE entwickelt und spielt eine führende Rolle bei der Gestaltung zukünftiger Verdichtertechnologien.

Mit dem EVALOP-HPC-Projekt hat der Standort die Entwicklung moderner, kompakter Hochdruckverdichter für sauberere und effizientere Triebwerke vorangetrieben. Die Entwicklungslinie lässt sich bis zum ersten Hochgeschwindigkeits-Forschungsverdichter (HSRC) zurückverfolgen, der 2013 vom Freistaat Bayern gefördert wurde. Im Rahmen von Clean Sky 2 wurden innovative strömungsführende Technologien im Nabenbereich entwickelt und getestet. Das EVALOP-Projekt, das im Rahmen von LuFo VI-1 gefördert wurde, trug zur Entwicklung und Erprobung des fortschrittlichen Gehäusestrukturierungskonzepts bei, wobei der Schwerpunkt auf der Verbesserung von Haltbarkeit und Herstellbarkeit lag. Parallel dazu und als Teil der Gesamtstrategie zum Aufbau von Know-how im Bereich fortschrittlicher HDV Anwendungen trug das Thermik-Team mit der Konstruktion unter mehreren LuFo-geförderten Programmen bei (Prüfstandsentwicklung unter LuFo V-2, fortgesetzt in LuFo V-3 bis zum aktuellen Projekt unter LuFo VI-1).

Aufbauend auf den Fortschritten des EVALOP-HPC-Projekts verfeinerte das BayLu25-II INVINGEN-HPC-Projekt das Gehäusestrukturierungskonzept weiter und integrierte zusätzliche Fortschritte, um sich auf den nächsten HDV-Modultest vorzubereiten. Dieser Test, der im Rahmen von Clean Aviation durchgeführt wird, wird die Technologiereifegradstufe (TRL) 5 erreichen. Er stellt den nächsten entscheidenden Schritt hin zu einem marktreifen Produkt dar und ist wesentlich für die Validierung und Weiterentwicklung der entwickelten Technologien.

Die erfolgreiche Durchführung des Modultests unter Clean Aviation wird die Einsatzbereitschaft dieser Technologien für zukünftige Triebwerksanwendungen sicherstellen und ihre Integration in die nächste Generation von Flugzeugtriebwerken ermöglichen. Zusammen bilden die EVALOP-HPC- und INVINGEN-HPC-Projekte sowie der Clean Aviation-Modultest einen kohärenten Entwicklungsweg, der das Engagement von GE für Innovation und Nachhaltigkeit in der Luftfahrt unterstützt.

3 Stand der Wissenschaft und Technik, an den angeknüpft wurde

Hochdruckverdichter sind eine zentrale Komponente moderner Flugzeugtriebwerke und spielen eine entscheidende Rolle für die Effizienz, Leistung und Umweltverträglichkeit des Gesamtsystems. Der aktuelle Stand der Technik zeigt, dass Hochdruckverdichter zunehmend höheren Belastungen ausgesetzt sind, da die Anforderungen an die Effizienz und die Reduktion von Emissionen stetig steigen. Um diese Herausforderungen zu bewältigen, wurden in den letzten Jahren zahlreiche Fortschritte in der Verdichter-Aerodynamik und -Technologie erzielt.

Moderne Hochdruckverdichter zeichnen sich durch eine hohe Schaufelbelastung und eine kompakte Bauweise aus, die eine Reduzierung des Triebwerksgewichts und des Kraftstoffverbrauchs ermöglichen. Gleichzeitig stellen größere relative Schaufelspitzenabstände eine Herausforderung dar, da sie die Stabilität des Verdichterstroms beeinträchtigen können. Um diese Problematik zu adressieren, bedarf es innovativer Ansätze zur Verbesserung des Nahwandstroms, um die erforderliche Stabilisierung des Verdichterstroms und eine Erhöhung der Effizienz zu ermöglichen.

Genau hier setzte das vorliegende Projekt EVALOP-HPC an. Es baute auf einer soliden Grundlage aus früheren Forschungs- und Entwicklungsarbeiten auf, die sich mit der Optimierung von Hochdruckverdichtern und der Validierung innovativer Technologien, insbesondere zur Stabilisierung des Nahwandstroms, beschäftigten. Die Ergebnisse dieser Arbeiten zeigten, dass eine gezielte Beeinflussung des Nahwandstroms die Effizienz und Stabilität des Verdichterstroms tatsächlich erheblich verbessern kann. Diese Erkenntnisse bildeten die Basis für die Entwicklung des neuen dreistufigen Hochdruckverdichterkonzepts.

Ein weiterer Schwerpunkt der aktuellen Forschung lag außerdem auf der Validierung von neuen Verdichtertechnologien unter realistischen Betriebsbedingungen. Dies umfasst die Nutzung von hochmodernen Prüfständen, wie z.B. dem Axialverdichterprüfstand HSRC der TUM und HS-SCR der TUD, die eine präzise Simulation von produktrelevanten Bedingungen ermöglichen. Aus diesem Grund wurden die Prüfstände in das Projekt mit eingebunden, um die praktische Anwendbarkeit der neuen Technologien zur Verbesserung des Nahwandstroms zu

gewährleisten, und ihre Integration in zukünftige Triebwerksgenerationen zu unterstützen.

Ein weiterer zentraler Bestandteil der bisherigen Arbeiten war außerdem die Entwicklung von numerischen Simulationsmethoden, die eine detaillierte Analyse des Verdichterstroms und der Schaufelbelastung ermöglichen. Diese Methoden wurden durch das Einbeziehen von zeitlich und räumlich hoch aufgelösten Messungen an Prüfständen wie den HSRC und HS-SCR kontinuierlich weiterentwickelt, um die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Simulationen zu validieren und zu verbessern. Dadurch ließen sich zusätzliche Erkenntnisse für die Optimierung des Verdichtersdesigns gewinnen.

Zusammenfassend legten die bisherigen Arbeiten die Grundlage für die erfolgreiche Durchführung des Projekts EVALOP-HPC. Sie lieferten wertvolle Erkenntnisse und Technologien, die direkt in die Entwicklung und Validierung des dreistufigen Hochdruckverdichterkonzepts sowie die Kavität einfließen. Durch die Kombination von numerischen Simulationen, experimentellen Untersuchungen und der Nutzung modernster Prüfstände konnte das Projekt auf einem soliden Fundament aufbauen und die technologische Basis für die nächste Generation von Flugzeugtriebwerken schaffen.

4 Planung und Ablauf des Vorhabens

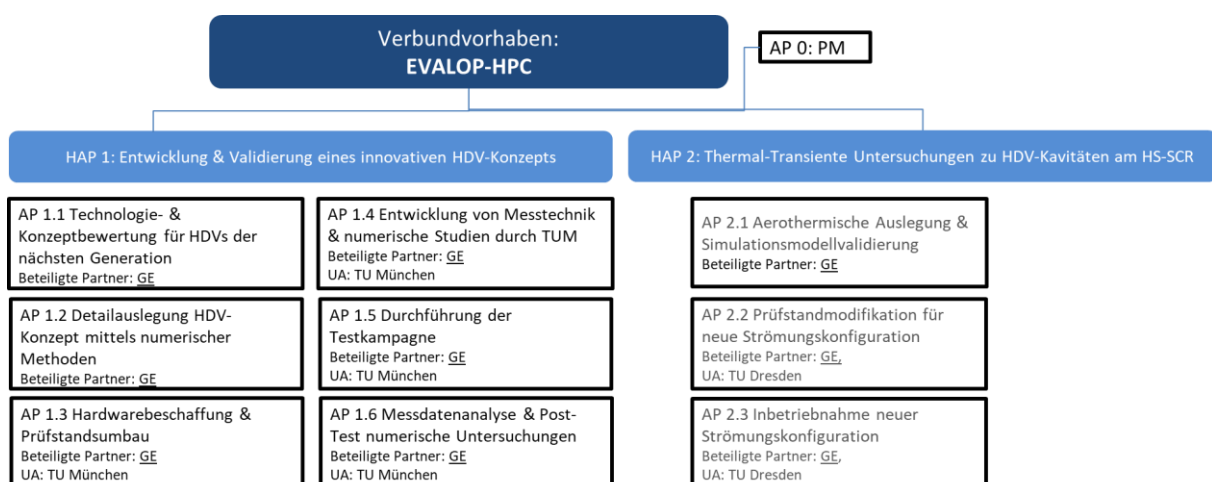


Abbildung 3: Projektstruktur.

Die Projektstruktur, dargestellt in Abbildung 3, bestand aus zwei parallelen Hauptaktivitäten, die beide der Entwicklung und Validierung der notwendigen Technologie für ein neuartiges Triebwerk mit erhöhtem Nebenstromverhältnis gewidmet waren. Die zugrunde liegende Idee ist, dass mit zunehmendem Nebenstromverhältnis der Kern des Triebwerks kleiner wird, was neue Herausforderungen mit sich bringt.

Auf der einen Seite konzentriert sich HAP1 auf die Entwicklung der notwendigen Technologie, um mit dem Wachstum der relativen Spalte für Hochdruckverdichter (im Folgenden HPC genannt) umzugehen; auf der anderen Seite konzentrierte sich HAP2 auf die erhöhten Herausforderungen bei der Wärmeabfuhr aus den Kavitäten bzw. Räumen zwischen den Verdichterscheiben eines kleineren und kompakteren HPC.

4.1 AP0: Projektmanagement

Während des Projekts fanden regelmäßige persönliche Treffen sowie Telefonkonferenzen mit dem Unterauftragnehmer TUM statt. Diese stellten sicher, dass die Arbeiten koordiniert und wie geplant durchgeführt wurden. Zusätzlich wurde ein Kick-Off Meeting und jährliche Projektreviews abgehalten, an denen auch der Projektträger teilnahm.

4.2 HAP1: Entwicklung & Validierung eines innovativen HDV-Konzepts



Abbildung 4: Zeitschiene HAP 1.

Die Zeitleiste in Abbildung 4 veranschaulicht die erfolgreiche Durchführung des Hauptarbeitspakets „HAP1: Entwicklung & Validierung eines innovativen HDV-

Konzepts“, das in GE Aerospace und die TUM zusammen bearbeiteten. Das Projekt war in verschiedene Phasen unterteilt, die jeweils spezifische Meilensteine und Ergebnisse umfassten und sich über den Zeitraum von 2020 bis 2024 erstreckten. Alle Meilensteine wurden termingerecht erreicht, und die versprochenen Ergebnisse wurden wie geplant erzielt.

Im Jahr 2020 begann das Projekt mit *AP1.1: Konzeptbewertung*, das sich auf die Evaluierung des Konzepts konzentrierte. Diese Phase legte die Grundlage für die nachfolgenden detaillierten Design- und Validierungsaktivitäten. Die Konzeptbewertung wurde erfolgreich mit einem formalen CDR (Concept Design Review) abgeschlossen, wodurch ein solider Ausgangspunkt für die nächsten Phasen sichergestellt wurde.

Das Jahr 2021 markierte den Übergang zu *AP1.2: Detailauslegung*, in der ein vollständiger Satz neuer Statoren und Rotoren entworfen wurde. Diese Komponenten wurden entwickelt, um Erkenntnisse aus allen vorherigen Tests zu nutzen und ein Design zu schaffen, das höhere relative Spaltmaße toleriert. Diese Phase erforderte eine sorgfältige Planung und Ingenieurarbeit, um die Machbarkeit des Konzepts und die Übereinstimmung mit den Projektzielen sicherzustellen. Die AP1.2-Phase wurde mit einem formalen DDR (Detailed Design Review) abgeschlossen, der die Freigabe des Designs für die Fertigung und den anschließenden Test darstellte.

Im Jahr 2022 ging das Projekt dann zu *AP1.3: H/W & Prüfstandumbau* über, welcher die Fertigung der neuen Verdichterbeschaufelung sowie deren Einbau in den HSRC Prüfstand umfasste. In dieser Phase musste der Prüfstand vollständig zerlegt, Teile ersetzt und wieder zusammengebaut werden, um die Kompatibilität mit dem innovativen HDV-Konzept sicherzustellen. Die AP1.3-Phase wurde erfolgreich und nahezu perfekt nach Plan abgeschlossen, so dass der Test pünktlich beginnen konnte. Dies stellte einen weiteren entscheidenden Meilenstein im Projekt dar.

Im Anschluss daran wurde *AP1.5: HSRC Test* durchgeführt, bei dem das Konzept ausführlichen und klar definierten Tests unterzogen wurde, um seine Leistung und Zuverlässigkeit unter repräsentativen Bedingungen zu validieren. Die Testergebnisse bestätigten die Effektivität des neuen Designs und der Hardware und erfüllten alle vordefinierten Kriterien.

Die letzte Phase, AP1.6: *Post-Test Analyse*, fand in den Jahren 2023 und 2024 statt. Diese Phase umfasste eine gründliche Analyse der Testergebnisse, um das Erreichen der Projektziele zu bestätigen und mögliche Verbesserungspotentiale zu identifizieren. Die Post-Test-Analyse wurde mit VDR1 und VDR2 (Validation Design Review 1 und 2) abgeschlossen, wodurch der Erfolg des innovativen HDV-Konzepts formell bestätigt wurde.

Im gesamten Projekt wurden alle Meilensteine termingerecht erreicht, und die versprochenen Ergebnisse wurden geliefert. Die Zusammenarbeit zwischen GE und der TUM steht hierbei beispielhaft für ein Engagement für Exzellenz, Innovation und termingerechte Umsetzung, das in der erfolgreichen Entwicklung und Validierung des HDV-Konzepts gipfelte.

4.3 HAP2: Thermal-Transiente Untersuchungen zu HDV-Kavitäten am HS-SCR

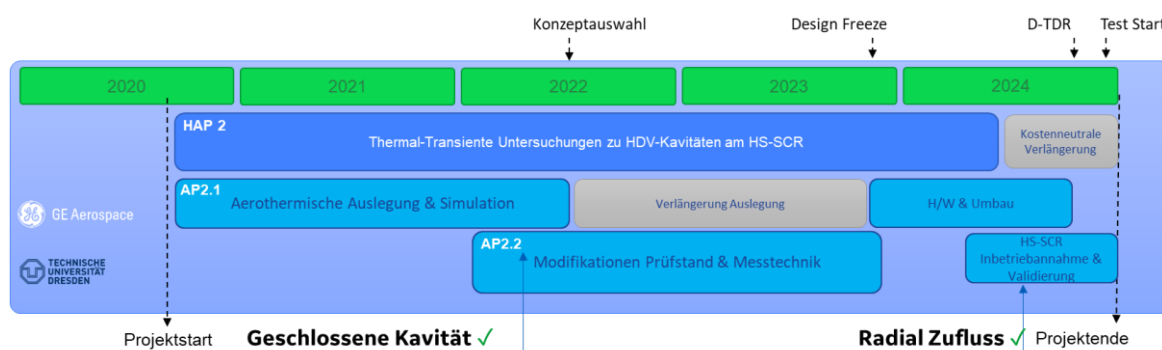


Abbildung 5: Zeitschiene HAP 2.

Hauptarbeitspaket 2 zu thermischen Untersuchungen an HPC-Kavitäten wurde in zwei Hauptarbeitslinien unterteilt (siehe Abbildung 5). Im ersten Block wurden die Transiententests am geschlossenen Kavitätenprüfstand durchgeführt. Der Prüfstand wurde dazu mit anwendungsnahen Beschleunigungen betrieben und einem komplexen System ausgestattet, das es dem Betreiber an der TUD ermöglichte, das Verhalten des internen Luftsystems des Verdichters nachzubilden. Der Prüfstand übernahm das Design der vorherigen LuFo V-2- und LuFo V-3-Programme, und der Leser wird auf diese Berichte sowie die am Ende dieses Berichts aufgeführten Veröffentlichungen verwiesen, um detaillierte Informationen zur vorherigen

Konstruktion zu erhalten. Die generierten Daten wurden verwendet, um spezielle thermische Modelle zu validieren und Korrelationen zu verbessern.

Der Hauptkern von EVALOP-HPC war die Modifikation des Prüfstands, um das radiale Einströmrohr sowie die notwendige Ausrüstung zu integrieren, um einen geschlossenen Kavitätenprüfstand in einen radialen Einströmprüfstand umzuwandeln, der dem hinteren Block des HPC entspricht. Dies wurde in drei Teilarbeitspaketen umgesetzt: Das erste, „AP2.1: Aerothermische Auslegung und Simulation“, konzentrierte sich auf die Konstruktionsarbeiten am Prüfstand, die von GE in Zusammenarbeit mit der TUD durchgeführt wurden. Im Rahmen dieses AP wurde auch die Instrumentierung von der TUD entworfen. Aufgrund der erweiterten Testkampagne und eines Dichtungsdesigns, das sich als deutlich komplexer als ursprünglich erwartet herausstellte, verlängerte sich das Arbeitspaket um etwa 9 Monate gegenüber der Planung aus dem Projektantrag.

Das zweite Arbeitspaket „AP2.2: Modifikationen Prüfstand und Messtechnik“ konzentrierte sich auf die Herstellung und Montage des Prüfstands. Weitere Details hierzu werden in den nächsten Abschnitten dargestellt. Insgesamt mussten etwa 10 % der Prüfstandsteile, einschließlich einiger Hauptkomponenten, entweder überarbeitet oder neu hergestellt werden. Schließlich wurde im letzten Jahr und nach Beantragung einer kostenneutralen Verlängerung um ein Jahr der Prüfstand in Betrieb genommen und Testdaten erzeugt.

5 Beiträge der Verbundpartner / Zusammenarbeit mit Dritten

Partner GE (HAP-1 & HAP-2):

GE war verantwortlich für die Überwachung des Projektmanagements (AP0) und leitete die technischen Aspekte und die Koordination für HAP-1 mit dem Titel „Entwicklung und Validierung eines innovativen HDV-Konzepts“ sowie für HAP-2, das sich auf „Thermische Transientenuntersuchungen von HDV-Kavitäten am HS-SCR-Prüfstand“ konzentrierte. GE stellte die nahtlose Koordination aller Aktivitäten der Unterauftragnehmer während der gesamten Projektdauer sicher.

Unterauftragnehmer TUM (HAP-1):

Der Lehrstuhl für Turbomaschinen und Flugantriebe an der Technischen Universität München (TUM) war als Unterauftragnehmer für HAP-1 tätig. Aufbauend auf der Expertise, die durch die Entwicklung des Axialverdichter-Prüfstands „Multidisziplinäres Labor für die Entwicklung neuer Technologien für Axialverdichter“ (HSRC) – eine Zusammenarbeit mit GE, finanziert durch den Freistaat Bayern – gewonnen wurde, etablierte sich TUM als führend in der experimentellen Forschung zu fortschrittlichen Verdichtertechnologien und innovativen Messmethoden. HAP-1 baute auf der langjährigen und erfolgreichen Partnerschaft zwischen GE und TUM auf, um Verdichtertechnologien weiterzuentwickeln, die zuvor im Rahmen der Forschungsinitiativen LuFo V-2 (Verd-Tech 20T1525A) und Clean Sky 2 (i-CORE) entwickelt wurden, und deren technologische Reife weiter zu steigern.

Im Rahmen von HAP-1 trug TUM zu Strömungssimulationen bei und lieferte zusätzliche Erkenntnisse aus der akademischen Forschung. Die Universität nahm auch Modifikationen am HSRC-Axialverdichter-Prüfstand vor und entwickelte fortschrittliche Messsysteme, um eine detaillierte Analyse der Sekundärströmungseffekte in den hinteren HDV-Stufen und deren Wechselwirkungen mit neuen Technologien zu ermöglichen. Nach der Testkampagne unterstützten TUM-Mitarbeiter die Analyse der gesammelten Daten, da sie über Expertise in der Auslegung der während der Tests eingesetzten Messsysteme verfügten.

Eine detaillierte Beschreibung der Dienstleistungen der TUM ist in der Projektdokumentation enthalten.

Unterauftragnehmer TUD (HAP-2):

Die Technische Universität Dresden (TUD) fungiert als Unterauftragnehmer für HAP-2 und trägt zur Entwicklung und Implementierung fortschrittlicher Messsysteme bei. TUD stellt außerdem den HS-SCR-Kompressorkavitätenprüfstand bereit, der für die Validierung des HDV-Konzepts entscheidend ist. Ihre Aufgaben umfassen die detaillierte Konstruktion des Prüfaufbaus, Modifikationen am Prüfstand und dessen Betrieb während der Testphase.

Zwei Haupttestkampagnen wurden durchgeführt, einschließlich derjenigen, die dem Arbeitspaket zu Beginn ihren Namen gibt (Thermal-Transiente Untersuchungen zu HDV-Kavitäten am HS-SCR).

Die zweite Testkampagne bezog sich auf die radialen Einströmtests. Der Beitrag der TUD zu diesen beiden Zielen umfasste technische Unterstützung bei der Entwicklung der Instrumentierung, der Konstruktion und Herstellung des Testdaten-Erfassungssystems, der Konstruktion, mechanischen Analyse und Zeichnung von Teilen und Komponenten des Prüfstands und des Versorgungssystems sowie technische Unterstützung bei der Integration extern hergestellter Komponenten. Darüber hinaus wurde die Testdaten-Erfassungssoftware intern entwickelt und ist genau auf die Anforderungen des Prüfstands abgestimmt.

6 Darstellung der erzielten Ergebnisse

6.1 HAP1 – Entwicklung und Validierung eines innovativen Hochdruckverdichterkonzepts

Im Rahmen von HAP-1 wurde ein innovatives dreistufiges Hochdruckverdichterkonzept entwickelt und erfolgreich validiert. Ziel war es, die Effizienz und Betriebsstabilität des Verdichters zu verbessern, insbesondere unter den anspruchsvollen Bedingungen zukünftiger Triebwerksgenerationen. Verschiedene Konzepte wurden untersucht, wobei eine Kombination aus erhöhtem Drall, fortschrittlichen Rotoren mit geringem Teilungsverhältnis und einem hoch belasteten Austrittsleitrad ausgewählt wurde. Ergänzt wurde das Konzept durch Gehäusestrukturierungen über den letzten beiden Rotoren, um die Betriebsbereichsanforderungen zu erfüllen.

Das aerodynamische Design des Verdichters wurde durch umfangreiche numerische Analysen (RANS und URANS) optimiert, die eine Wirkungsgradverbesserung und eine verbesserte Pumpgrenze bestätigten. Die Detailauslegung des Beschaukelungskonzepts erfolgte in enger Abstimmung mit Fertigungs- und Strukturmechanik-Anforderungen. Die Schaufelgeometrie wurde nach erfolgreichen Design Reviews eingefroren und für die finale Konstruktion freigegeben. Die Fertigung der Komponenten, einschließlich der Gehäusestrukturierungen, wurde durch Feckl Maschinenbau durchgeführt, wobei alle geforderten Toleranzen und Oberflächengüten eingehalten wurden.

Die Testkampagne am High-Speed Research Compressor (HSRC) der TU München bestätigte die numerisch vorhergesagte Leistungsverbesserung. Die Ergebnisse

zeigten eine Erhöhung der Betriebsstabilität über den gesamten Betriebsbereich sowie eine Wirkungsgradverbesserung trotz Einsatz von Gehäusestrukturierungen. Die fortschrittliche Messtechnik, darunter zeitaufgelöste Druck- und Temperaturmessungen, ermöglichte eine detaillierte Analyse der Strömungscharakteristika. Die Post-Test-Analyse bestätigte die Zielsetzung des Designs und lieferte wertvolle Erkenntnisse für zukünftige Entwicklungen.

Die Testkampagne wurde mit dem Fokus auf den Vergleich mit einer vorherigen „Baseline“-Konfiguration durchgeführt. Die Baseline ist eine Konfiguration, die repräsentativ für die hinteren Stufen eines Hochdruckverdichters (HPC) eines tatsächlichen GE Aerospace Produkts ist. Der ursprüngliche Test wurde mit relativ großen relativen Spaltmaßen durchgeführt, um die Bedingungen eines kleineren HPC zu simulieren, wie sie für ein modernes Triebwerk mit hohem Bypassverhältnis erforderlich sind. Daher wird der Baseline-Test immer als eine der Referenzbedingungen für den Vergleich der Testergebnisse der sogenannten „LuFo“-Konfiguration verwendet, die das Ergebnis des Designs im Zusammenhang mit dem EVALOP-HPC-Projekt ist. Die andere Referenz wird durch die Konfiguration namens iCore oder SR gebildet. Diese Konfiguration stellt bereits einen technischen Fortschritt im Vergleich zur Baseline dar, und zwar mit einer höheren Drosselfähigkeit bei sehr ähnlichem Wirkungsgrad. Alle Testergebnisse werden mit einer oder beiden dieser Referenzen verglichen.

Ein bemerkenswerter Punkt bei der LuFo-Konfiguration ist, dass die erste Stufe der drei Verdichterstufen mit einem kleinen relativen Spaltmaß entworfen wurde, um sicherzustellen, dass sie nicht die begrenzende Stufe beim Erreichen der Pumpgrenze ist. Dadurch wurde sichergestellt, dass der tatsächliche Nutzen der neuen Technologie für die letzten beiden Stufen voll zur Geltung kommen konnte.

Die Testsequenz beginnt immer mit der Aufnahme der Geschwindigkeitskennlinien. Dazu wird der Verdichter auf Nenndrehzahl und Auslegungspunkt gebracht und dort auf Betriebstemperatur aufgewärmt. Nachdem die Aufwärmphase abgeschlossen ist, wird das Drosselventil am Austritt geöffnet, um die Betriebslinie auf den maximalen Durchfluss fallen zu lassen. Nachdem die gemessenen Temperaturen stabile Bedingungen erreicht haben, wird ein 30-Sekunden-Mittelwert für alle gemessenen Werte aufgenommen. Das Drosselventil wird dann schrittweise langsam geschlossen, um den nächsten gewünschten Betriebspunkt anzufahren. Dort wird wieder gewartet,

bis sich ein Gleichgewicht eingestellt hat, und daraufhin wird der nächste 30-Sekunden-Mittelwert aufgezeichnet. Dieses Verfahren wird bis zu dem Punkt wiederholt, an dem der Verdichter keinen Druck mehr liefern kann und die Strömung zusammenbricht. In diesem Fall wird entweder durch eine automatische Reaktion oder einen manuellen Auslöser das Drosselventil schlagartig geöffnet, um den Verdichter aus dem Pumpen wieder rauszuholen.

Dieser Prozess für die Aufnahme von Geschwindigkeitskennlinien wurde für alle in diesem Programm gewünschten Drehzahlen und darüberhinausgehende Bedingungen von Interesse wiederholt.

	Test Day	Speed [% Nc]	R3 OD Bleed	R3 ID Bleed	Comment
S0 +4deg	1	98	-	-	
	2	100	-	-	
	2	95	-	-	
	3	105	-	-	
	3	75	-	-	
	4	98	-	-	Repeatability
S0 +6deg	5	98	-	-	Check Stg1 throttling capability
S0 +2deg	6	98	-	-	Minimize S0 loss

Abbildung 6: Übersicht der vermessenen Betriebslinien des Verdichterkennfelds.

Abbildung 6 zeigt eine Zusammenfassung aller vermessenen Geschwindigkeitskennlinien. Aus der Abbildung ist ersichtlich, dass für die Betriebslinie bei 98% korrigierter Drehzahl der Winkel des verstellbaren Statorleitschaufel S0 (direkt vor dem ersten Rotor) variiert wurde. Diese Ableitung half dabei zu identifizieren, dass bei einer Position von +2 Grad gegenüber der Nennposition die Verluste von S0 geringer sind, während die den Betriebsbereich des Verdichters begrenzenden Stufen weiterhin die letzten beiden, d.h. Stufen zwei und drei, waren. Basierend auf diesem Erkenntnis, wurde dieser Winkel von +2° für S0 als der am besten geeignete Winkel ausgewählt, um alle nachfolgenden Traversierungstests durchzuführen.

Angesichts der geringen Unterschiede in dem angestrebten Wirkungsgrad, die an den Grenzen der Messfähigkeit liegen, musste große Aufmerksamkeit darauf gelegt

werden, sicherzustellen, dass die Randbedingungen für alle Tests gleich waren, z. B. wurde mit Erfolg besonders darauf geachtet, dass die Variation bzw. Verzerrung der Einlasstemperatur und des Einlassdrucks in radialer und umfangsgerichteter Richtung immer gleich blieben.

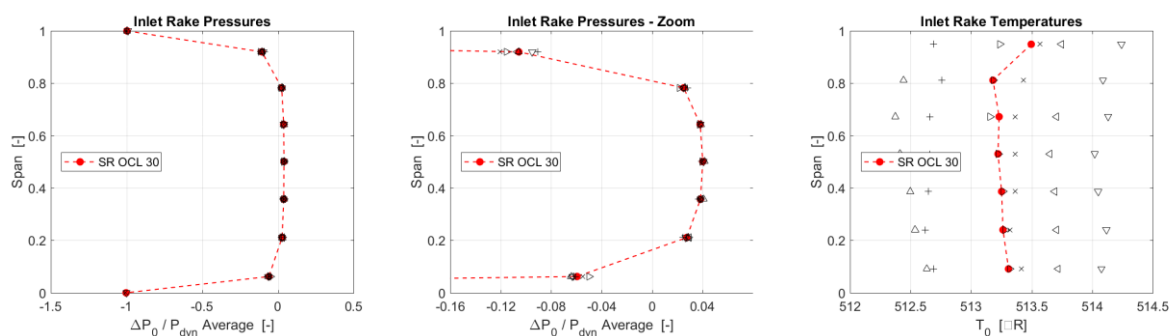


Abbildung 7: Radialprofile einschließlich Variation in Umfangsrichtung von Druck (links und Mitte) und Temperatur (rechts) am Verdichtereinlaß für den Auslegungspunkt eines Clean Sky 2 Tests.

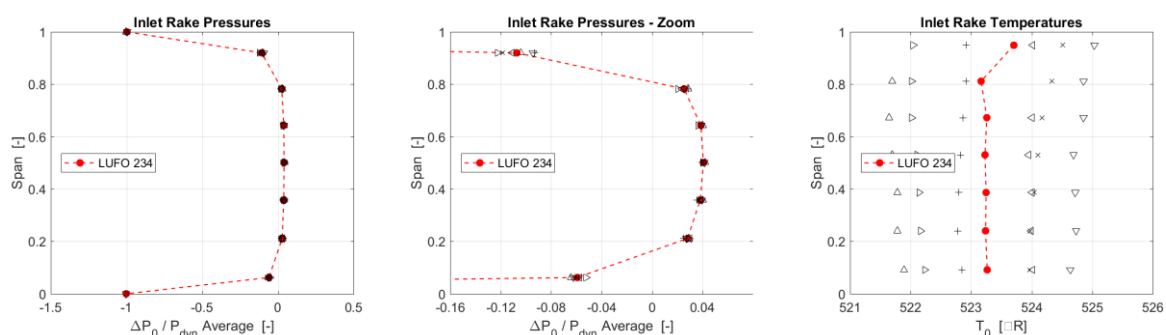


Abbildung 8: Radialprofile einschließlich Variation in Umfangsrichtung von Druck (links und Mitte) und Temperatur (rechts) am Verdichtereinlaß für den Auslegungspunkt des aktuellen LUFO Tests.

Abbildung 7 und Abbildung 8 zeigen die Radialprofile einschließlich Verzerrung bzw. Variation in Umfangsrichtung von Druck und Temperatur am Einlass des Verdichters gemessen am aerodynamischen Auslegungspunkt für einen vorherigen Test (Abbildung 7) und den aktuellen LUFO Test (Abbildung 8). Beide Tests zeigen ein sehr ähnliches Einlassprofil und vor allem eine vergleichbare Streuung der Daten, was ein erster Schritt zur Sicherstellung der Wiederhol- und Vergleichbarkeit ist.

Ein weiterer wichtiger Punkt für die Vergleichbarkeit der Ergebnisse sind die Spaltmaße der drei Rotoren. Abbildung 9 zeigt die gemessenen Spaltmaße für alle drei Rotoren der LUFO Testkampagne (blau) als Funktion des Massenstroms, normalisiert

relativ zu einem Referenztest, der unter Clean Sky 2 (CS2) lief. Für Rotor 1 ist der Spalt wie vorher angedeutet bewusst deutlich kleiner, aber sehr vergleichbar mit dem des CS2 Tests mit nominalem Spalt (NCL), sodass der Rotor den Verdichter nicht begrenzt. Für Rotor 2 und 3 sind die Werte sehr vergleichbar.

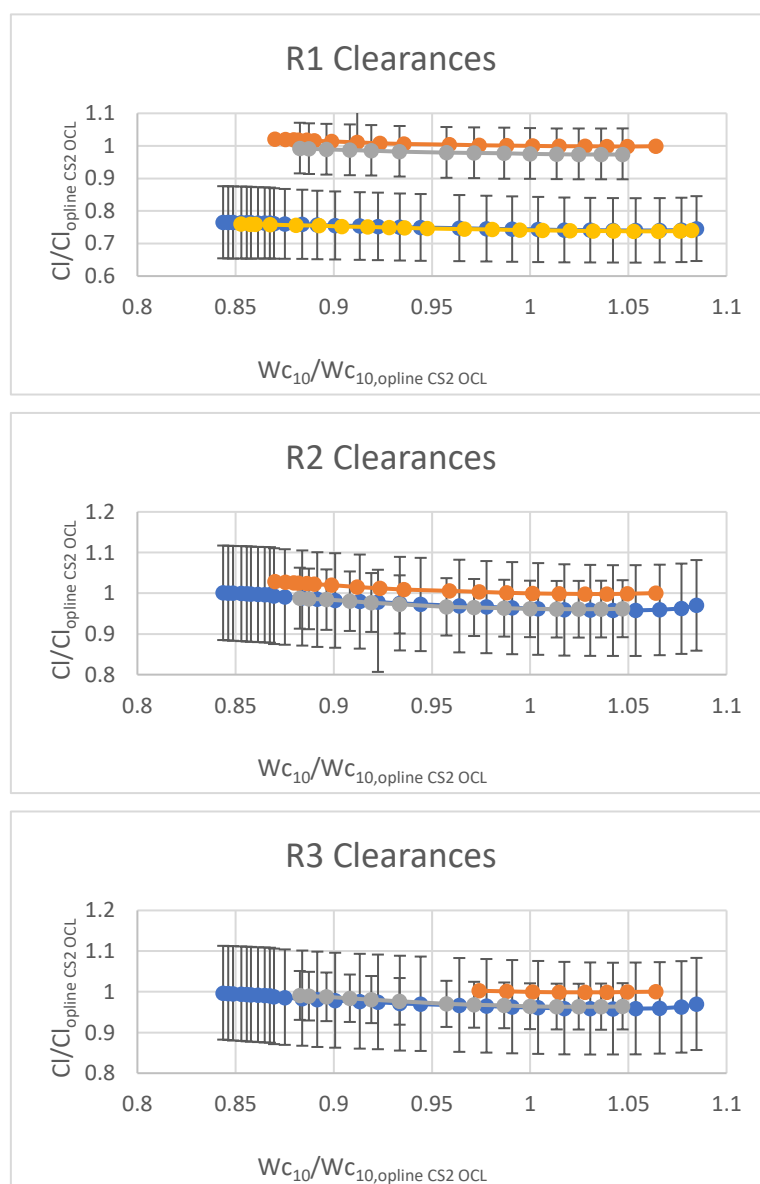


Abbildung 9: Normalisierte Rotor Spaltmaße als Funktion des normalisierten Verdichterdurchflusses für den aktuellen LuFo Test (blau) im Vergleich zu vorangegangenen Tests (grau, orange und gelb).

Abbildung 10 illustriert die gemessene Kennlinie des LUFO Tests (blau) bei Auslegungsdrehzahl (98%) in Form des normalisierten Druckverhältnisses als Funktion von normiertem Massenstrom im Vergleich zu früheren Tests. Es ist

deutlich erkennbar, dass ein großen Gewinn an stabilem Betriebsbereich erreicht wurde, da der LuFo-Test eine wesentlich steilere Charakteristik aufweist und deren korrigierter Massendurchfluß beim Erreichen der Pumpgrenze deutlich kleiner ist als für die Referenztests bei vergleichbaren Spaltmaßen (siehe „Baseline OCL“ und „CS2 i-CORE OCL in Abbildung 10). Trotz deutlich größerer Spaltmaße über Rotor 2 und 3 ist die erreichte Charakteristik des LUFO Tests sehr vergleichbar mit der des CS2 Tests, der mit nominalen Spaltgrößen (NCL) über allen drei Rotoren durchgeführt wurde.

Abbildung 11 zeigt die zu Abbildung 10 korrespondierenden adiabatischen Wirkungsgradlinien, normiert auf den gleichen Referenztest „CS2 OCL“ und als Funktion des normierten Massenstroms, für den LUFO Test und die gleichen Referenztests. Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass der LuFo-Test alle anderen Referenztests übertrifft, mit Ausnahme des CS2-NCL, das den klaren Vorteil hat, bei allen Rotoren kleine Spalte zu besitzen.

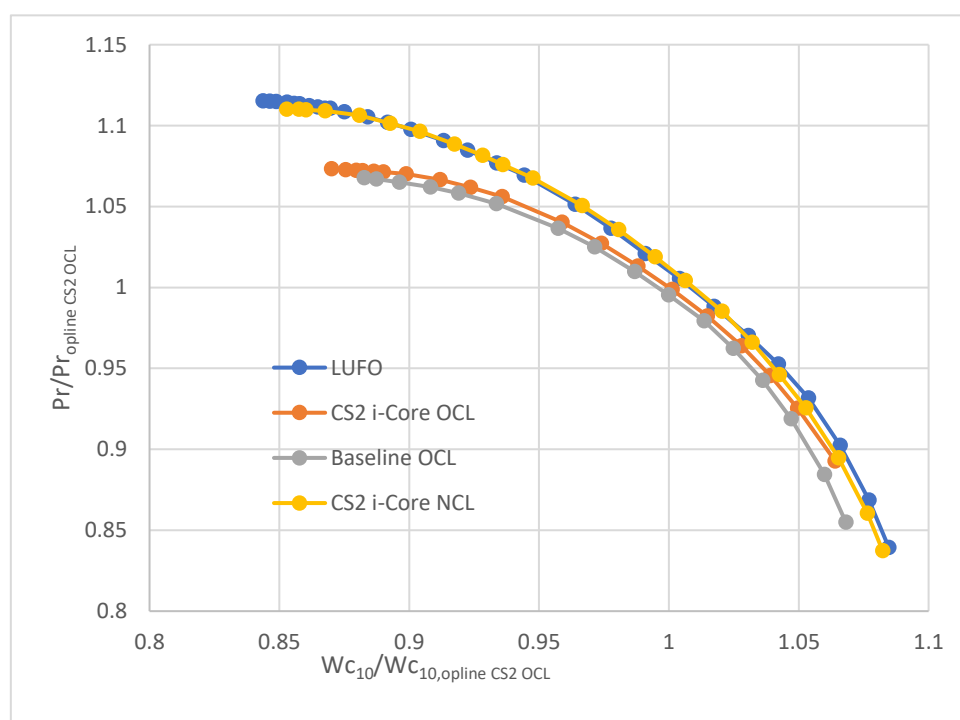


Abbildung 10: Vergleich der gemessenen Verdichterkennlinie bei Auslegungsdrehzahl (98%) in Form von Normalisiertem Druckverhältnis als Funktion des normalisierten Massenstroms für den LuFo Test (blau) gegenüber Vergleichstests (andere Farben).

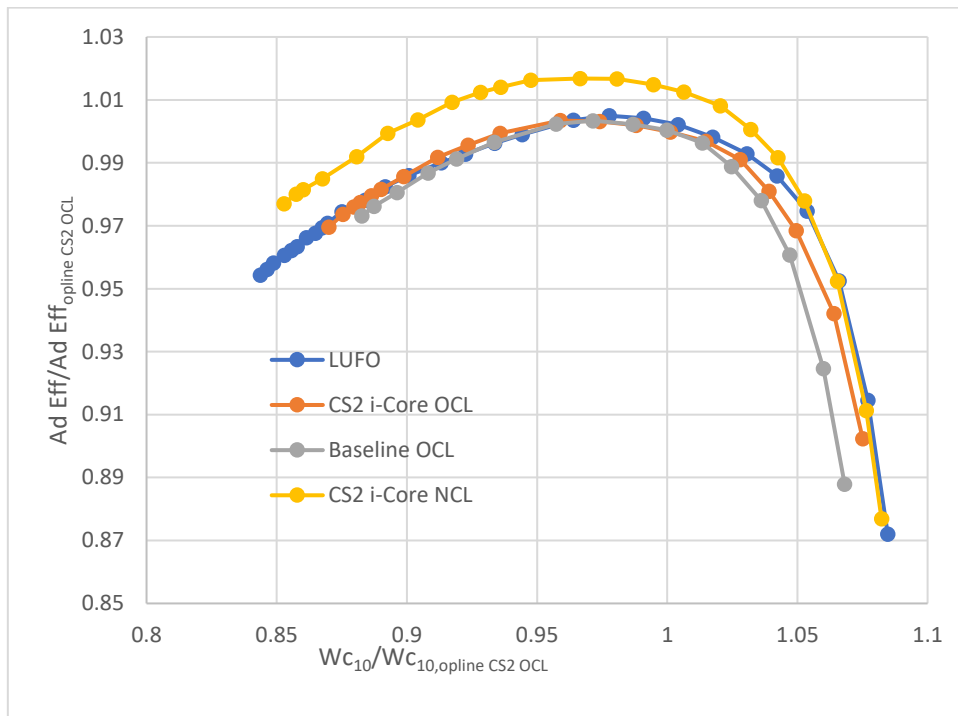


Abbildung 11: Vergleich des Adiabatischer Wirkungsgrads bei Auslegungsdrehzahl, bilanziert zwischen Verdichtereinlaß und -austritt und normiert auf den Auslegungspunkt des „CS2 OCL“ Tests, als Funktion des normalisierten Massenstroms zwischen dem LUFO Test (blau) und den Vergleichstests (andere Farben).

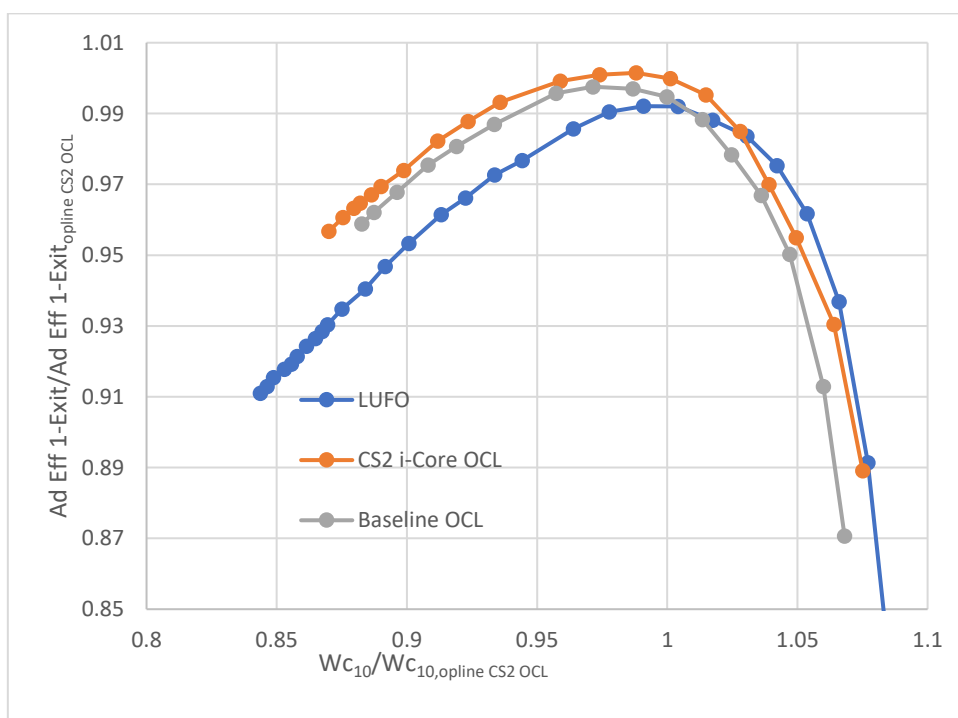


Abbildung 12: Adiabatischer Wirkungsgrad entsprechend Abbildung 11, aber bilanziert zwischen Stator 1 und Verdichteraustritt.

Abbildung 12 zeigt einen weiterführenden Vergleich des adiabatischen Wirkungsgrads, der anhand von Meßdaten berechnet wurde, die von der Vorderkante von Stator 1 bis zu den Austrittsrechen reichen. In diesem Fall ist Rotor 1 aus der Bilanzierung herausgenommen und alle verbliebenen Schaufelreihen haben übereinstimmende Rotorspalte. Es ist klar erkennbar, dass der LuFo-Test eine deutlich verbesserte Drosselungsfähigkeit aufweist. Die adiabatische Effizienz rund um den Auslegungspunkt (der Wert 1 auf der x-Achse) zeigt einen nahezu vernachlässigbaren Unterschied im Vergleich zur Basislinie mit offenem Spalt, während sie beim Drosseln bis zum Strömungsabriss abfällt.

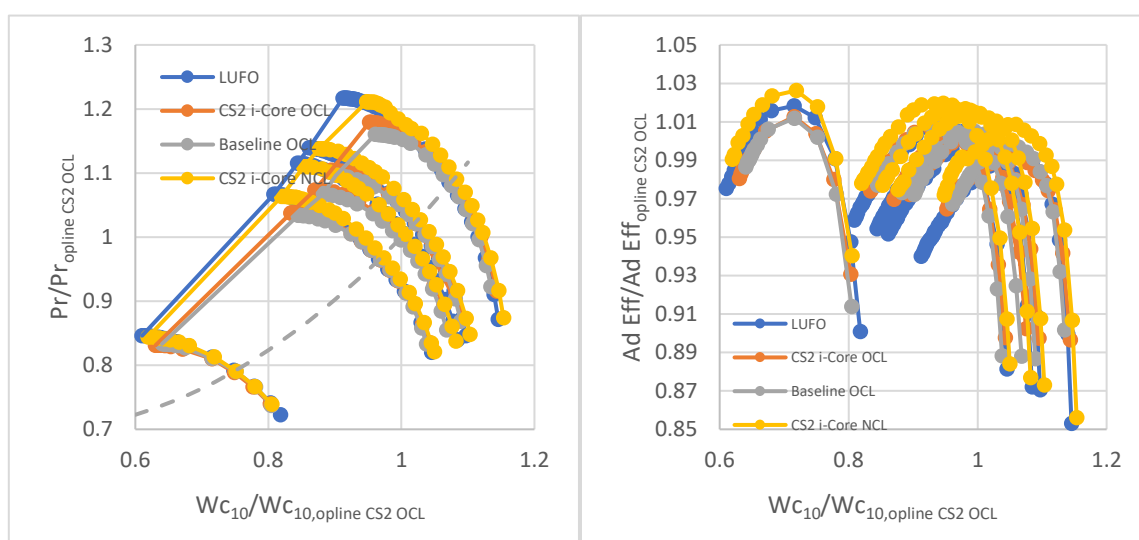


Abbildung 13: Verdichterkennfeld und adiabatische Wirkungsgradlinien für die 5 getesteten Drehzahlen aus Abbildung 6 vom LUFO Test gegenüber den Vergleichstests:

*Links: Normiertes Totaldruckverhältnis vs. Normiertem Massendurchfluß.
Rechts: Normierter adiabatischer Wirkungsgrad vs. normiertem Massendurchfluß.*

Abbildung 13 illustriert das vollständige Verdichterkennfeld mit den dazugehörigen Wirkungsgradlinien für die 5 Drehzahlen, die per Abbildung 6 vermessen wurden, für den LUFO und die Vergleichstests.

Nach der erfolgreichen Aufnahme aller geplanten Geschwindigkeitskennlinien trat der Test in die nächste Phase ein, und zwar das Traversieren zur hochaufgelösten Vermessung des Strömungsfelds stromabwärts von allen Rotoren und Statoren unter 4 verschiedenen Betriebsbedingungen durch den Einsatz von 5-Loch- und FRAP-Sonden.

Das Traversieren ist ein Verfahren, bei dem eine Sonde in Umfangs- und Radialrichtung bewegt wird, um eine 2D-Abbildung des Strömungsfeldes in der gewünschten Ebene zu erstellen. Die Auflösung betrug in der Größenordnung von 1000 Punkten pro Ebene.

Traversing (5-Hole, FRAP & Hotwire)

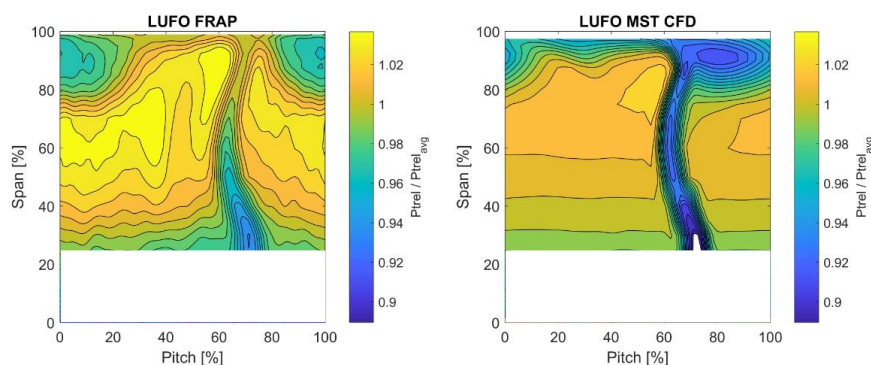
Test Day	Speed	OD Bleed	5HP - Rotor			5HP - Stators			FRAP			NS 3	NS 2	NS 1	OP line
			R1	R2	R3	S1	S2	S3	R1	R2	R3				
1	98	-	✓	✓	✓				✓					Done	Done
2	98	-	✓	✓	✓				✓			Done	Done		
3	98	-				✓	✓	✓			✓			Done	Done
4	98	-				✓	✓	✓			✓	Done	Done		

Test Day	Speed	OD Bleed	HOT-WIRE			FRAP			NS 3	NS 2	NS 1	OP line
			S1	R2	S2	S1	R2	S2				
1	98	-		✓			✓					Done
2	98	-			✓		✓		Done			
3	98	-		✓			✓					Done
4	98	-		✓			✓		Done			

Test Day	Speed	OD Bleed	5HP - Rotor 2			5HP - Stator 1			NS 3	NS 2	NS 1	OP line
			25°	125°	235°	25°	125°	235°				
1	98	-	✓	✓	✓							Done
2	98	-	✓	✓	✓				Done			
3	98	-				✓	✓	✓				Done
4	98	-				✓	✓	✓	Done			

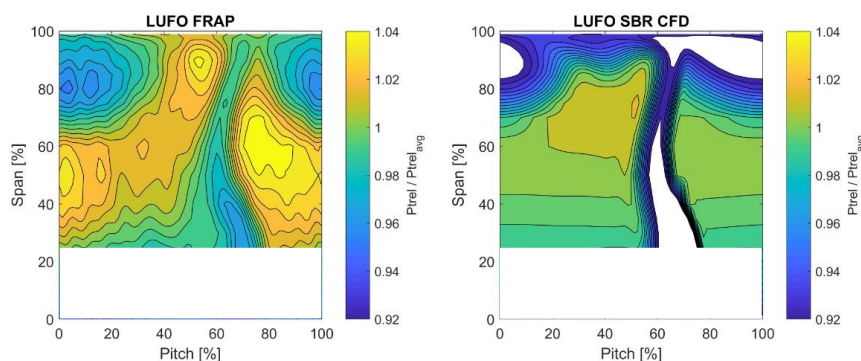
Abbildung 14: Tabellarische Übersicht der durchgeführten Traversierungsmessungen.

Abbildung 14 gibt eine tabellarische Übersicht aller durchgeführten Traversierungen. Die Akronyme OP-line, NS1, NS2 und NS3 definieren die Betriebspunkte auf der Geschwindigkeitskennlinie, wobei OP-line dem aerodynamischen Auslegungspunkt entspricht und NS1 bis NS3 für „Near Stall“ 1-3 steht, also Betriebspunkte die progressiv immer dichter an der Pumpgrenze liegen. Während mit den standardmäßig eingesetzten 5-Lochsonden (5HP) nur stationäre, d.h. zeitlich gemittelte Strömungsparameter gemessen werden konnten, wurden für ausgewählte Betriebspunkte (OP Line und NS3) durch den Einsatz von FRAP und Hot-Wire Proben jeweils auch instationäre Strömungsgrößen in zeitlich hoher Auflösung aufgenommen. Dies ermöglichte es, das Strömungsfeld nicht nur im stationären Stator-Bezugsrahmen zu rekonstruieren, sondern auch im rotierenden Rotor-Bezugsrahmen, womit sich eine deutlich verbesserte Vergleichsmöglichkeit zu vorab durchgeführten numerischen CFD Rechnungen ergab.



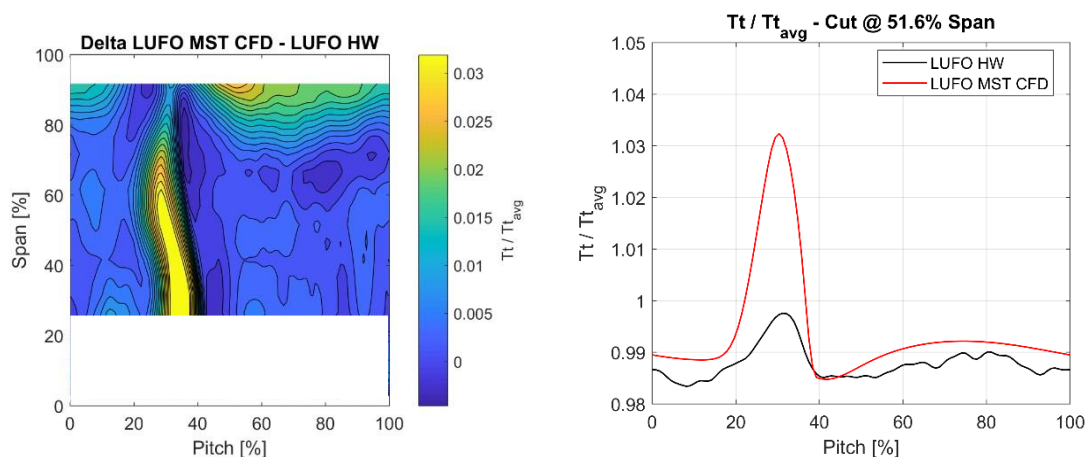
*Abbildung 15: Normalisiertes relatives Totaldruckfeld (Schaufelspannhöhe vs. Schaufelteilung) hinter Rotor 1 am Auslegungspunkt:
Links: Messergebnis der FRAP Sonde.
Rechts: Ergebnis der numerischen CFD Rechnung.*

In Abbildung 15 ist beispielhaft das relative Gesamtdruckfeld hinter Rotor 1 dargestellt. Auf der linken Seite ist das Ergebnis der FRAP Sonde und auf der rechten Seite als Vergleich das Ergebnis einer mehrstufigen CFD Rechnung. Diese Darstellung hebt die relativ unterschiedliche Vorhersage des Spitzenwirbels zwischen der CFD Rechnung und den gemessenen Daten hervor, wobei das CFD Ergebnis im Vergleich zur Messung einen etwas stärkeren und an die Rotorschaukel angehefteten Wirbel vorhersagt.



*Abbildung 16: Normalisiertes relatives Totaldruckfeld (Schaufelspannhöhe vs. Schaufelteilung) hinter Rotor 1 nahe der Pumpgrenze:
Links: Messergebnis der FRAP Sonde. Rechts: Ergebnis der CFD Rechnung einer einzelnen Schaufelreihe.*

In Abbildung 16 ist derselbe Vergleich zwischen FRAP und CFD für den NS3 Punkt ganz nah an der Pumpgrenze wiedergegeben. Unter dieser Bedingung überschätzt die CFD Rechnung die Stärke des Schaufelnachlaufs im Vergleich zu den experimentellen Ergebnissen recht deutlich.



*Abbildung 17: Vergleich zwischen mehrstufiger CFD Rechnung und HOTWIRE Sonde für die normalisierte Totaltemperatur hinter Rotor 2 nahe der Pumpgrenze:
Links: Differenz zwischen CFD Rechnung und HOTWIRE Sonde.
Rechts: Vergleich der umfangsbezogenen Verteilung für einen Schnitt in mittlerer Schaufelhöhe.*

Abbildung 17 schließlich illustriert die Differenz zwischen Messung und Berechnung der rotorspezifischen Totaltemperatur am Austritt von Rotor 2 nahe der Pumpgrenze. Die Auflösung des instationären Temperaturfeldes im Rotor-Bezugsrahmen wurde durch den Einsatz der Hot-Wire Sonde erreicht. Die Darstellung auf der rechten Seite von Abbildung 17 zeigt einen Schnitt des Temperaturverlaufs durch die Ebene auf der linken Seite in Umfangsrichtung ungefähr auf mittlerer Schaufelhöhe. Deutlich erkennbar ist auch hier wieder eine Überschätzung des Temperaturverlaufs im Rotornachlauf durch die Rechnung relativ zur Messung.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass eine neuartige Verdichterkonfiguration erfolgreich entwickelt wurde, die auf den bisherigen Erfahrungen aufbaut. Diese neue Konfiguration ist in der Lage, den stabilen Betriebsbereich im Vergleich zur Basiskonfiguration erheblich zu erhöhen, ohne dabei eine signifikante Reduzierung des Wirkungsgrads in Kauf nehmen zu müssen. Dies gilt auch trotz der zu erwartenden größeren relativen Spaltmaße in einem kleineren modernen Triebwerkskern. Trotz der erfolgreichen numerischen Auslegung haben die umfangreich durchgeführten und vor allem räumlich sowie auch zeitlich hochauflösenden Strömungsmessungen zwischen den Schaufelreihen einige Unterschiede im Detail zu den Berechnungen offenbart, die Motivation für weitere Untersuchungen, z.B. unter Zuhilfenahme von higher-fidelity CFD Berechnungen wie LES, liefern.

6.2 HAP2 – Thermal-Transiente Untersuchungen zu HDV-Kavitäten am HS-SCR

HAP-2 konzentrierte sich auf die Entwicklung und Validierung innovativer Sekundärluftsystem-Konzepte, die im High-Speed Single-Cavity Rig (HS-SCR) der TUD getestet wurden. Ziel war es, das Verständnis der thermischen Umgebung von Hochdruckverdichtern in Kavitäten mit radialem Zufluss zu verbessern.

Während der ersten Monate des Projekts war der HS-SCR-Prüfstand in Betrieb und lieferte Daten aus der Konstruktion früherer Projekte. Obwohl dies kein integraler Bestandteil des Vorhabens war, sollte dieser Beitrag gewürdigt werden, da er erheblich dazu beigetragen hat, die Installation zu verstehen und Daten zu erzeugen, die dem übergeordneten Ziel von EVALOP-HPC dienen. Wie in Abbildung 18 dargestellt, wurden diese Daten nicht nur zur Verbesserung der thermischen Modelle verwendet, wie es üblicherweise bei Validierungen von Motorkonfigurationen der Fall ist, sondern auch zur Verbesserung der Korrelationen für deren Entwicklung. Dies führte zu einer Verkürzung des Entwicklungszyklus sowie zu einem Vorteil in der Verdichtungseffizienz.

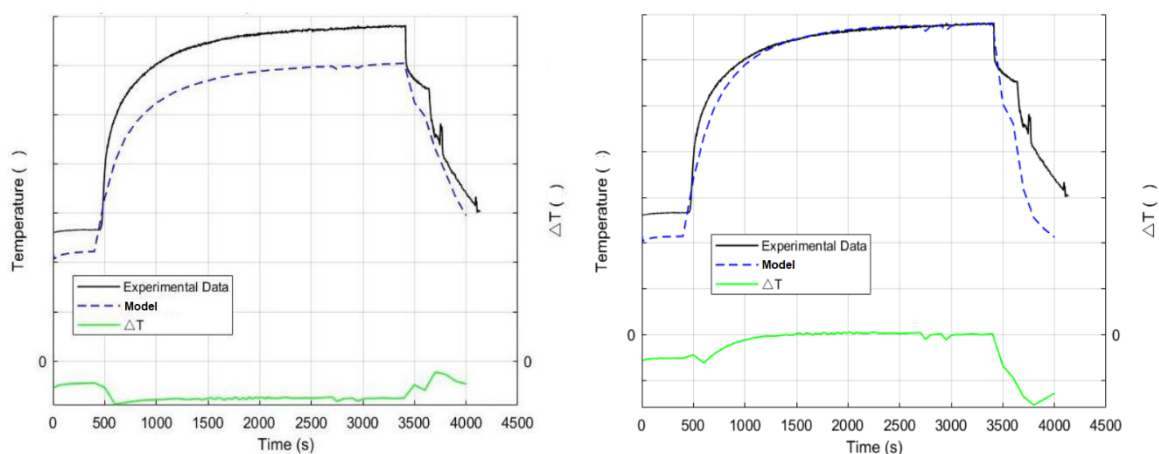


Abbildung 18: Vergleich der transienten Temperaturvorhersagen mit Testdaten vor der Einbeziehung der neuen Erkenntnisse in die Korrelation (links) und nach der Validierungsarbeit (rechts).

In der nächsten Phase wurden alle Teile des bestehenden Prüfstands identifiziert, die ersetzt bzw. neu gefertigt werden mussten. Abbildung 19 liefert hierzu einen Überblick.

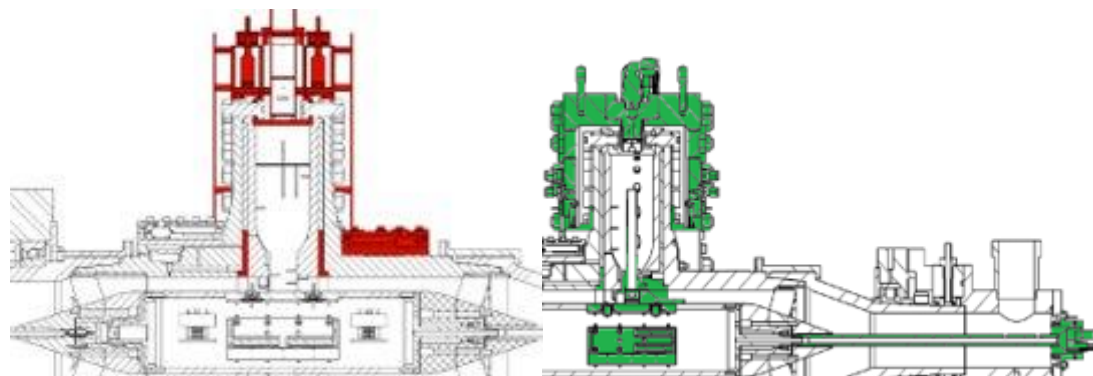


Abbildung 19: Modifizierte Teile von der geschlossenen Kavität zu den radialen Einströmungsaufbauten: Links in Rot: entfernte Teile; Rechts in Grün: neue Teile.

Die Konzeptionsphase umfasste die aerothermische Auslegung und Simulationsmodellvalidierung, wobei der Einfluss von Auslegungsmerkmalen auf Druckverluste und Temperaturverteilung analysiert wurde. CFD-Analysen und 1D-Strömungsmodelle lieferten wichtige Erkenntnisse für die Optimierung der Strömungskonfiguration.

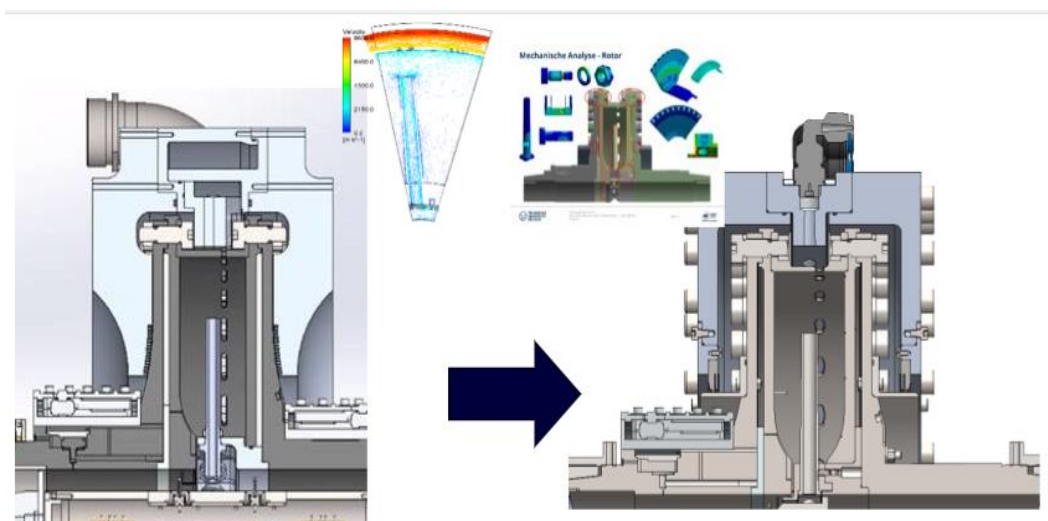


Abbildung 20: Radialer Einströmungsprüfstand zusammen mit einem Kompendium von CFD- und Spannungsanalysen.

Die Prüfstandmodifikationen umfassten mechanische Anpassungen des Rotorblocks, die Einführung eines neuen Luftversorgungssystems mit Burstdichtungen zur Minimierung von Druckverlusten sowie die Integration eines Prallminderers zur Stabilisierung des radialen Zuflusses. Die mechanischen Analysen bestätigten die Eignung der neuen Konstruktion, wobei die meisten existierenden Bauteile

wiederverwendet werden konnten. Die Messtechnik wurde durch zusätzliche Sensoren erweitert, um die neuen Ziele zu erreichen.

Die Fertigung der Bauteile wurde dank der Zusammenarbeit mit der Werkstatt der TUD sowie durch die Vergabe an lokale Zulieferer in Bayern abgeschlossen. Dies ermöglichte die rechtzeitige Montage, um experimentelle Daten in der neuen Konfiguration zu gewinnen.

In Abbildung 21 wird eine Zusammenstellung von Bildern der für die Montage vorbereiteten Bauteile dargestellt: neues Gehäuse und Halterungen, Prahlminderer, Instrumentierungsrohre sowie die Rotor-Trommel in ihrer vertikalen Montageposition. Die Instrumentierung wurde vor der Montage an den jeweiligen Bauteilen ordnungsgemäß kalibriert. Abbildung 22 zeigt den Prüfstand komplett gebaut und bereit zum Testen.

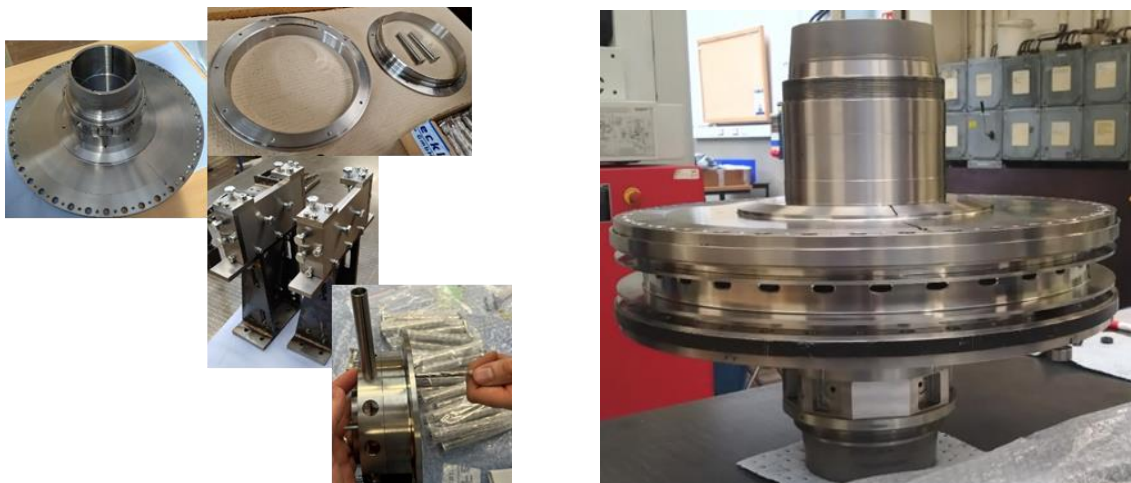


Abbildung 21: Bilder der Hardware des radialen Einströmungsprüfstands. Von links nach rechts und von oben nach unten: Scheibenträger, Flügelplatten, Prüfstandstützen, Rohrträger sowie Rohr- und Trommelbaugruppe.

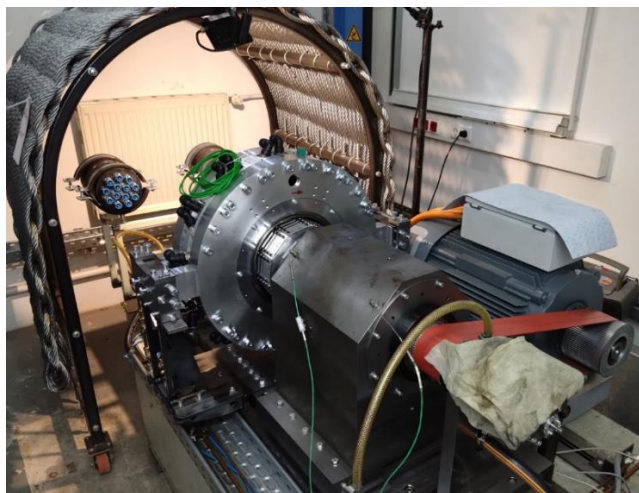


Abbildung 22: Kavitätenprüfstand HS-SCR der TUD: Radialzufluss Aufbau.

Als abschließende Schlussfolgerung dieses Arbeitspakets wird in Abbildung 23 eine normalisierte Illustration der experimentellen Daten im Vergleich zu den Vorhersagen für verschiedene Konfigurationen des Prüfstands dargestellt. Die Ergebnisse zeigten eine ausgezeichnete Übereinstimmung mit den Modellvorhersagen und bestätigten zudem, dass die Instrumentierung in der Lage war, Änderungen der Eingangsbedingungen des Prüfstands zu erkennen. Damit wurden alle vorgeschlagenen Ziele des Projekts EVALOP-HPC erreicht, was den Weg für die weitere Gewinnung von Daten ebnet, die das thermische Design und die aerodynamischen Auswirkungen des Wissens über Kavitationen mit radialem Zufluss fördern werden.

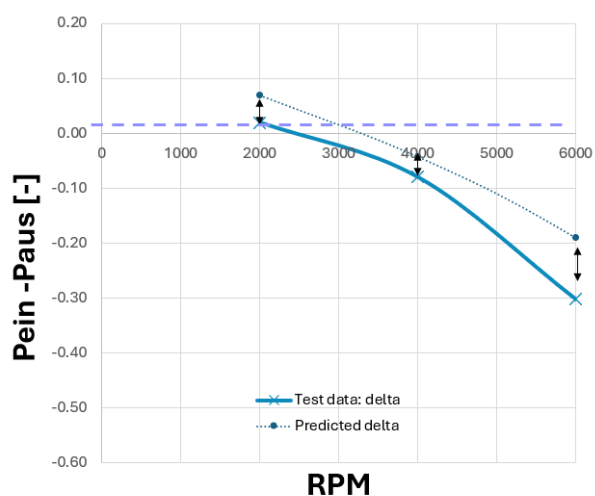


Abbildung 23: Gesammelte Testdaten, die den Druckunterschied zwischen Einlass und Auslass als Funktion der Drehzahl zeigen, sowie ein Vergleich mit den Vorhersagen, der eine gute Übereinstimmung zeigt.

7 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Nachfolgend befindet sich eine kurze Beschreibung der wichtigsten Positionen der Kostenaufstellung.

Personalkosten:

Der Personalaufwand in diesem Projekt umfasste hauptsächlich Studien des potenziellen Designraums für den Hochdruckverdichter, einschließlich aerodynamischer Analysen und Auslegung der drei Stufen des HSRC. Darüber hinaus umfasste der Personalaufwand die mechanische Konstruktion, Planung und Definition der Testkampagne, deren Durchführung sowie die Datenanalyse nach Abschluss aller Versuche.

Materialkosten:

Die Materialkosten in diesem Projekt wurden hauptsächlich für die Herstellung neuer Hardware verwendet, einschließlich Rotoren, Statoren und Auskleidungen für den HSRC Verdichter. Diese Komponenten waren entscheidend für den experimentellen Aufbau und die erfolgreiche Durchführung der Testkampagne.

Fremdleistungen:

Die externen Dienstleistungen deckten hauptsächlich die Unterstützung durch die Technische Universität München (TUM) während der Testkampagne ab, einschließlich der Installation und Demontage des Verdichters. Ihre Expertise gewährleistete die reibungslose Durchführung der experimentellen Aktivitäten, wie z.B. das Messen mit fortschrittlichen FRAP und Hot-Wire Sonden, und die ordnungsgemäße Handhabung der Hardware während des Testprozesses.

Sonstige Kosten:

Die sonstigen Kosten unterstützten Reparaturen und Verbesserungen der Anlage, Kalibrierung von Geräten, Softwareausgaben und Instrumentierungskosten. Diese Ausgaben waren entscheidend, um sicherzustellen, dass die Prüfstandsinfrastruktur voll funktionsfähig war und während der Testkampagne genaue und zuverlässige Ergebnisse liefern konnte.

8 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten

Das EVALOP-HPC-Projekt wurde ins Leben gerufen, um fortschrittliche Technologien für Hochdruckverdichter (HPC) zu entwickeln, die speziell für Triebwerke mit größeren Nebenstromverhältnissen ausgelegt sind. Diese Triebwerke, die entscheidend für sauberere und effizientere Antriebssysteme sind, stellen einzigartige Konstruktionsherausforderungen dar. Da die Größe des Verdichters in solchen Konfigurationen abnimmt, wird es zunehmend schwieriger, die Effizienz und die Betriebsstabilität aufrechtzuerhalten, da die relativen Schaufelspitzenabstände größer werden. Die Bewältigung dieser Herausforderungen erforderte innovative Lösungen und einen systematischen Ansatz für die Verdichterkonstruktion und -prüfung.

Aufbauend auf mehreren Jahren Forschung im Bereich Hochdruckverdichter, die sowohl intern als auch extern durch Initiativen wie Clean Sky 2 finanziert wurden, definierte das EVALOP-HPC-Projekt einen neuartigen Ansatz zur Reduzierung der Empfindlichkeit gegenüber größer werdenden relativen Spaltmaßen. Ausgangspunkt des Projekts war eine Basisgeometrie und -konfiguration, die repräsentativ für den HPC eines der Triebwerke von GE Aerospace ist. Diese Basis wurde mit erhöhten relativen Spaltmaßen getestet, die für moderne ultrahohe Nebenstrom-Triebwerke erforderlich sind. Die ersten Tests zeigten eine signifikante Reduzierung des Wirkungsgrads und der Drosselmarge, was die Notwendigkeit von Konstruktionsänderungen zur Bewältigung dieser Herausforderungen verdeutlichte.

Um den Effizienzverlust auszugleichen wurde die Anzahl der Verdichterschaufeln reduziert, wodurch die Reibung verringert und der ursprüngliche Wirkungsgrad wieder hergestellt wurde. Diese Reduzierung der Schaufeldichte hatte jedoch die erwartete Nebenwirkung, die Blockierung in der Nähe der Schaufelspitze zu verringern, wo der Schaufelspitzenwirbel eine bedeutende Rolle spielt. Diese Veränderung des Strömungsverhaltens verlagerte die Kritikalität bei niedrigen Strömungsbedingungen vom Schaufelspitzen- in den Schaufelnabenbereich. Im Clean Sky 2-Programm wurde deshalb ein neuartiger Ansatz entwickelt, um die Nabenströmung zu stärken, und nachfolgende Tests ergaben positive Ergebnisse.

Das EVALOP-HPC-Projekt ging den nächsten Schritt auf diesem Entwicklungsweg. Mit geringer Schaufeldichte und gestärkter Nabenströmung verlagerte sich die Kritikalität zurück zur Spitze des Rotors. Um dies zu bewältigen, wurde eine

fortschrittliche Gehäusebehandlung entwickelt und getestet. Die Ergebnisse dieser Tests zeigten den gewünschten Erfolg: der Wirkungsgrad wurde beibehalten und die Drosselmarge bzw. der Umfang des stabilen Betriebsbereichs konnte trotz der größeren relativen Spaltmaße erhöht werden. Dieser Erfolg stellt einen bedeutenden Fortschritt in der HPC-Konstruktion dar und zeigt Möglichkeiten auf, die inhärenten Herausforderungen moderner ultrahohen Nebenstrom-Triebwerkskonfigurationen zu überwinden.

Ein entscheidender Faktor für den Erfolg des EVALOP-HPC-Projekts war die Validierung analytischer Werkzeuge anhand hochauflösender Testergebnisse. Die komplexen Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Konstruktionselementen und deren Auswirkungen auf die Leistung wurden nur durch die Integration fortschrittlicher Messtechnologien verstanden. Der Partner von GE Aerospace, die Technische Universität München (TUM), spielte in diesem Aspekt des Projekts eine entscheidende Rolle. Die TUM entwickelte hochwertige, hochpräzise Messtechniken, die eine detaillierte Visualisierung und Quantifizierung der komplexen Strömungsfelder innerhalb des Verdichters ermöglichten. Diese Erkenntnisse waren entscheidend für die Verfeinerung des Designs und die Sicherstellung seiner Wirksamkeit.

Der nahtlose Arbeitsfluss über alle Phasen des Projekts – Vorentwurf, Detailentwurf, Hardwareherstellung, Installation, fortschrittliche Messtechniken, Tests und Nachttestanalyse – trug zur erfolgreichen Entwicklung eines Verdichterdesigns bei, das nun für die Implementierung in der nächsten Generation von Triebwerken ausgewählt wurde. Das EVALOP-HPC-Projekt hat nicht nur den Stand der HPC-Technologie vorangebracht, sondern auch die Grundlage für zukünftige Innovationen in der Verdichterkonstruktion gelegt und damit die Führungsposition des Standorts Garching sowie der Projektteilnehmer in Bezug auf nachhaltige Luftfahrtantriebssysteme gesichert.

9 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Im Einklang mit den im Projektvorschlag festgelegten Zielen hat das EVALOP-HPC-Projekt mehrere verwertbare Ergebnisse geliefert, die wesentlich zur

Weiterentwicklung von Hochdruckverdichtertechnologien (HDV) für zukünftige Flugzeugtriebwerke beitragen werden.

Die im Rahmen des EVALOP-HPC-Projekts gewonnenen Erkenntnisse werden eine entscheidende Rolle in der nächsten Entwicklungs- und Testphase spielen, in der die während des Projekts entwickelten Technologien zur fortschrittlichen Gehäusestrukturierung und Nabenströmung weiter verfeinert und validiert werden. Diese Technologien sind entscheidend, um die Herausforderungen durch größere relative Schaufelspitzenabstände und höhere aerodynamische und thermische Belastungen in den hinteren Stufen zukünftiger HDVs zu bewältigen. Der nächste HDV-Modultest, der im Rahmen des Clean Aviation-Programms für 2026 geplant ist, wird darauf abzielen, die Technologie-Reifegradstufe (TRL) 5 zu erreichen. Dieser umfassende Modultest wird die Technologie unter produktrelevanten Bedingungen validieren und ihre Einsatzbereitschaft für die Integration in die nächste Generation von Turbofan-Triebwerken sicherstellen. Das Erreichen von TRL 5 wird als Sprungbrett für die anschließende TRL 6-Validierung (Tests auf Triebwerksebene) dienen, die letztendlich zur Produktentwicklung führen wird.

Das GE Aerospace-Team in Garching ist entschlossen sicherzustellen, dass die für HDVs entwickelten Designstrategien in Technologieintegrationsprogrammen genutzt werden, die die Produktvision des RISE Open Fan-Triebwerks unterstützen. Diese Vision konzentriert sich darauf, zukünftige Marktanforderungen und Umweltpolitische Ziele, wie sie in Flightpath 2050 beschrieben sind, zu erfüllen. Darüber hinaus bilden die durch EVALOP-HPC erzielten Fortschritte die Grundlage für die kontinuierliche Weiterentwicklung der HDV-Expertise am Standort Garching und festigen dessen Rolle als Kompetenzzentrum für Verdichtertechnologien.

Die erfolgreiche Zusammenarbeit mit der Technischen Universität München (TUM) war ein Eckpfeiler des Projekts. Die Beiträge der TUM, insbesondere bei der Entwicklung fortschrittlicher Messtechniken und der Nutzung des HSRC-Prüfstands, waren entscheidend für die Erreichung der Projektziele. Diese Partnerschaft wurde weiter gestärkt und bildet eine solide Grundlage für laufende und zukünftige Forschungsinitiativen. Ebenso wurde die Zusammenarbeit mit der Technischen Universität Dresden (TUD) intensiviert, insbesondere durch ihre Arbeit am HS-SCR-Prüfstand, der die Validierung von thermischen Transientenmodellen und

Kühlkonzepten für hintere HPC-Stufen unterstützte. Diese Partnerschaften haben eine effektive Koordination und die Entwicklung modernster Technologien sichergestellt.

Die Ergebnisse des EVALOP-HPC-Projekts stellen einen bedeutenden Fortschritt in der Entwicklung fortschrittlicher HDV-Technologien dar. Die nahtlose Integration von Vorentwurf, Detailentwurf, Hardwareherstellung, Installation, Tests und Nachttestanalyse hat zu einem umfassenden Verständnis der komplexen Wechselwirkungen zwischen Konstruktionselementen und deren Auswirkungen auf die Leistung beigetragen. Diese validierten Technologien sind nun bereit für die Integration in die nächste Generation von Flugzeugtriebwerken und ebnen den Weg für sauberere und effizientere Antriebssysteme.

Kurzfristig werden die Projektergebnisse in Anschlussforschungsaktivitäten genutzt, um den Technologie-Reifegrad weiter zu erhöhen und die Validierung von TRL 5 vorzubereiten. Mittelfristig werden die validierten Technologien in Demonstrator-Triebwerke für TRL 6-Tests integriert, um ihre Marktreife sicherzustellen. Langfristig werden diese Fortschritte zur Entwicklung der nächsten Generation von Turbofan-Triebwerken für Kurz- und Mittelstreckenflugzeuge beitragen und GE Aerospace's Engagement für Innovation und Nachhaltigkeit in der Luftfahrt unterstützen.

10 Veröffentlichungen

- 1 Schäffer, Christian, Konstantin Speck, and Volker Gümmer. "Numerical Calibration and Investigation of the Influence of Reynolds Number on Measurements With Five-Hole Probes in Compressible Flows." In *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*, 84966:V004T05A002. American Society of Mechanical Engineers, 2021.
- 2 Schäffer, Christian, Konstantin Speck, and Volker Gümmer. "Numerical Calibration and Investigation of the Influence of Reynolds Number on Measurements with Five-Hole Probes in Compressible Flows." *Journal of Turbomachinery* 144, no. 9 (2022): 091010.
- 3 Schäffer, Christian, Alexander Rabl, Konstantin Speck, Kiyon Boetzel, Christian Helcig, and Volker Gümmer. "Challenges in the Application of Hot-Wire Anemometry for the Investigation of Transient Temperature Fluctuations in a High-

- Speed Research Compressor.” In *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*, 86977:V004T05A003. American Society of Mechanical Engineers, 2023.
- 4 Speck, Konstantin, Christian Schäffer, and Volker Gümmer. “Design of a Small Pressure Chamber to Evaluate Probe Calibrations at Varying Reynolds Numbers.” In *Journal of Physics: Conference Series*, 2511:012023. IOP Publishing, 2023.
 - 5 Konstantin, Speck, Rabl Alexander, Helcig Christian, and Gümmer Volker. “Development and Validation of a Methodology for Numerical Calibration of Five-Hole Probes.” In *ISABE-2024*, 2024
 - 6 Diemel, E. “Experimentelle Untersuchung von auftriebsbehafteter Strömung und Wärmeübertragung einer rotierenden Kavität mit axialer Durchströmung.” Dissertation, 2023.
 - 7 Diemel, E. “Analysis of Cavity Disk Heat Transfer by Solving Inverse Heat Transfer Problem.” *Journal of Turbomachinery* 146, no. 4 (April 2024): TURBO-22-1296.
 - 8 Brito Gadeschi, A. “Large Eddy Simulation of Flow Structures of Heat Transfer in Compressor Disk Drum Enclosed Cavities.” Master’s Thesis, 25 May 2022.
 - 9 Paredes Yataco, “CFD on Buoyancy Driven Compressor Cavities at Representative Engine Conditions.” Master’s Thesis, 4 March 2024.
 - 10 Hernan-Gomez Mingo, M. “CFD Simulations of HPC C”avities with Radial Inflow.” Master’s Thesis, 24 February 2025.