



40 Jahre AG Turbo

19. Statusseminar

Tagungsband

17. – 18. März 2026

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Köln

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Für Form und Inhalt der Beiträge zeichnen die jeweiligen Autoren verantwortlich. Die wissenschaftliche Koordinierungsstelle AG Turbo übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung von Rechten Dritter.

Bildquellen: Mit freundlicher Unterstützung der Verbundpartner Siemens Energy, Everllence SE und Rolls-Royce Deutschland. Alle Rechte vorbehalten.

Herausgeber:
Wissenschaftliche Koordinierungsstelle AG Turbo
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)
März 2026

Vorwort

Dies ist der Tagungsband zum 19. Statusseminar der AG Turbo, das am 17. und 18. März 2026 bei unserem Gastgeber, dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), in Köln stattfand.

Die AG Turbo steht seit nunmehr vier Jahrzehnten für exzellente, vorwettbewerbliche Verbundforschung im Bereich der Turbomaschinen. Als zentrale Plattform in Deutschland vereint sie Industrie, Hochschulen und Forschungseinrichtungen, um gemeinsam innovative Lösungen für eine effiziente, ressourcenschonende und klimafreundliche Energieumwandlung zu entwickeln.

Im Rahmen des 19. Statusseminars haben wir den 40. Geburtstag der AG Turbo gefeiert – mit einem Rückblick auf unsere Historie durch die ehemaligen Vorsitzenden der Programmleitung, Prof. Dr. Alexander Wiedermann und Dr. Dirk Goldschmidt, inspirierenden Keynotes aus Industrie (Prof. Dr. Thomas Thiemann, Siemens Energy), Politik (Dirk von der Hude, BMW) und Forschung (Prof. Dr. Jörg Seume, LU Hannover) sowie einem Ausblick auf die Zukunft der Turbomaschinen durch die Nachwuchsforscherinnen und -forscher Felix Gellert (HSU Hamburg), Bernhard Weigel (TU Dresden), Nils Petersen (RWTH Aachen) und Katharina Brinkmann (LU Hannover).

Gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWE) nimmt die AG Turbo europaweit eine einzigartige Stellung ein und genießt internationale Anerkennung. Auch künftig wird sie ein zentraler Baustein für das Gelingen der Energiewende sein – insbesondere im Zusammenspiel mit erneuerbaren Energien und der Weiterentwicklung effizienter Strom- und Speichertechnologien. Wie die Energiewende unter Berücksichtigung des energiepolitischen Zieldreiecks aus Bezahlbarkeit, Zuverlässigkeit und Nachhaltigkeit erfolgreich gestaltet werden kann, diskutierten im Rahmen einer Paneldiskussion unter Moderation von Sophia Jörg (Everllence SE) die Expertinnen und Experten Sabrina Schreiner (Fraunhofer UMSICHT), Martin Frings (Open Grid Europe), Dr. Oliver Then (VGBE Energy), Dirk von der Hude (BMW) und Dr. Karsten von Maydell (DLR).

Abgerundet wurde das Statusseminar – wie in jedem Jahr – durch spannende technische Vorträge aus den vier Arbeitskreisen Verdichtung, Verbrennung, Kühlung und Expansion, die als wissenschaftliche Beiträge in diesem Tagungsband noch einmal nachgelesen werden können.



Foto: DLR. Alle Rechte vorbehalten.

März 2026

Dr. Benjamin Witzel

Vorsitzender der Programmleitung der AG Turbo

Inhaltsverzeichnis

Teilverbundprojekt Verdichtung

Überblick: Heinz Knittel, MTU Aero Engines AG 5

Hochschluckfähige Kompressorstufe für H₂- und H₂-Gemische 25

Kolja Metz, Everllence SE

Interdisziplinärer Auslegungsprozess für Aero-Strukturoptimierung 35

Dr. Ilya Arsenyev, MTU Aero Engines AG

Teilverbundprojekt Verbrennung

Überblick: Dr. Benjamin Witzel, Siemens Energy Global GmbH & Co. KG 57

Hochfrequente thermoakustische Instabilitäten in einem axial gestuften 79

Verbrennungssystem

Philip Bonnaire, Technische Universität München

Flammenrückschlagsmodellierung in einem turbulenten Wasserstoffbrenner 99

Paul Porath, Siemens Energy Global GmbH & Co. KG

Teilverbundprojekt Kühlung

Überblick: Dr. Jens Ortmanns, Rolls-Royce Deutschland Ltd & Co KG 119

Wärmeübertragung in fortschrittlichen rotierenden Schaufelkühlkanälen 137

Dr. Rico Poser, Universität Stuttgart

Vom Anriss zum Ersatzteil: Ein probabilistischer Ansatz zur Integration der 161

Komponentenlebensdauer in Serviceprozesse

Dr. Philipp Engels, Siemens Energy

Teilverbundprojekt Expansion

Überblick: Dr. Thomas Polklas, Everllence SE 185

Untersuchungen der Strömungsbedingungen in Axial-Radial-Diffusoren für 205

flexible Einsatzbedingungen

Anastasia Fomina, Universität Stuttgart

Robuste und schnelle Aeroelastikbewertung mit Harmonic-Balance 225

Dr. Benjamin Winhart, MTU Aero Engines AG

Verdichtung

19. Statusseminar der AG Turbo

17. und 18. März 2026 in Köln

Arbeitskreis Verdichtung

Verbundprojekt DigiTecT

„Digitalisierung und interdisziplinäre Auslegungstechnologien von Turbomaschinen für die Energiewende“

Verbundprojekt TurboHyTec

„Turbomaschinen für Hydrogen-Technologien“

Verbundprojekt TurboTrans

„Turbomaschinen für die Transformation in das integrierte Energiesystem der Zukunft“

Verbundprojekt FokusTurbo

„Flexible Turbomaschinen für klimaneutrale und resiliente Energiesysteme“

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

zusammengestellt von

Dipl. - Ing. Heinz Knittel

MTU Aero Engines AG

Abstract

Renewable energies have seen significant growth in recent years, both in Germany and in other countries around the world. The expansion of renewable energies is to be further accelerated and thus the share of electricity generation is to be further increased. Renewable energy sources, with the highly volatile components of wind and solar in particular, will lead to even more fluctuations in the power grid in future and thus requires significantly more extensive measures to ensure grid stability. The power supply in Germany faces the greatest challenges in terms of environmental compatibility of generation, power supply stability and affordability. In addition to extensive technological adjustments and further developments of thermal power plant concepts, the planned increasing use of hydrogen as an energy carrier and different storage concepts also result in completely new challenges for turbo machines.

This program segment focuses on the compression paths of gas turbines and compressors facing new challenges on performance enhancement, part load efficiency and operational flexibility with regard to high ramp up rates and more cyclic operation of the power plant. The report gives an overview of the current projects.

Kurzfassung

Die erneuerbaren Energien haben während der letzten Jahre sowohl in Deutschland, als auch weltweit in anderen Ländern, einen bedeutenden Zuwachs verzeichnet. Der Ausbau der erneuerbaren Energien soll weiter forciert und damit der Anteil an der Stromerzeugung weiter gesteigert werden. Die erneuerbaren Energiequellen, mit den stark volatilen Anteilen von Wind und Sonne im Besonderen, werden in der Zukunft zu noch häufigeren und grösseren Schwankungen im Stromnetz führen und damit auch deutlich weitergehende Massnahmen zur Sicherstellung der Netzstabilität erfordern. Die Stromversorgung in Deutschland steht bzgl. Umweltverträglichkeit bei der Erzeugung, Stabilität und Bezahlbarkeit vor grössten Herausforderungen. Neben technologisch weitgehenden Anpassungen und Weiterentwicklungen für thermische Kraftwerkskonzepte, ergeben sich durch den geplanten zunehmenden Einsatz von Wasserstoff als Energieträger und unterschiedliche Speicherkonzepte zusätzlich völlig neue Anforderungen an Turbomaschinen.

Im Teilverbund Verdichtung ergeben sich für Gasturbinen und Kompressoren neue technologische Herausforderungen insb. in Bezug auf Wirkungsgradverbesserung für Voll- und Teillastbetrieb, sowie Betriebsflexibilität im Hinblick auf schnelle Lastwechselfahrten und mehr zyklische Belastungsprofile. Der Bericht gibt einen Überblick über die aktuellen Projekte.

Herausforderungen und technische Ziele des Teilverbunds Verdichtung

Durch die Energiewende und die hieraus resultierenden signifikanten Eingriffe in den Stromerzeugungsmarkt ergibt sich ein erweitertes Anwendungsspektrum mit neuen und zusätzlichen Herausforderungen für Verdichter:

- (1) Zum kurzfristigen Lastausgleich (Residuallast zu erneuerbaren Stromerzeugungskapazitäten), ggf. im regionalen Verbund, bieten sich hochflexible Gasturbinen an. Hieraus leiten sich jedoch weitergehende Anforderungen an den Verdichter ab, insbesondere im Bereich der Betriebsflexibilität und erhöhten Lebensdauer bei kurzen Betriebszyklen.
- (2) Die regenerativen Stromerzeugungskapazitäten wurden und werden ohne besondere Berücksichtigung des bestehenden Kraftwerksparks installiert. Eine stabile und gesicherte Stromversorgung kann aber, wegen fehlender Netz- und Stromspeicherkapazitäten, ohne komplementäre Infrastruktur mit thermischen Kraftwerken nicht gewährleistet werden. Die vorhandene Infrastruktur ist jedoch für diesen fluktuierenden Betrieb nicht oder nur eingeschränkt ausgelegt. Die Vorgehensweisen zur betriebsinduzierten Lebensdauerbestimmung sind zu erweitern und darauf aufbauend effiziente Technologien für lebensdauersteigernde Maßnahmen zu entwickeln.
- (3) Kompressoren für alternative Anwendungen zur temporären Energie- und Abgasspeicherung, sowie für die Wasserstoffinfrastruktur werden mittelfristig an Bedeutung gewinnen. Aus den spezifischen Betriebsanforderungen, auch verbunden mit entsprechenden Systemgrößen, leiten sich entsprechende technologische Herausforderungen ab.
- (4) Hocheffiziente Gasturbinen hoher Leistungsklasse mit gleichzeitig flexiblerem Betriebsverhalten sind auf dem Weltmarkt zur emissionsreduzierten Stromerzeugung auch weiterhin von großer Bedeutung. Die technologischen Fragestellungen in Bezug auf den Verdichter fokussieren auf eine weitere Steigerung der Effizienz und fluktuierendem Betrieb, insbesondere auch unter Teillastbedingungen.

Zur Umsetzung dieser herausfordernden Ziele und entsprechend der Ausrichtung des 7ten und ab 2024 des 8ten Energieforschungsprogramms der Bundesregierung wurden die Themen in den nachfolgend vorgestellten Verbundprojekten aufgestellt.

DigiTecT, Digitalisierung und interdisziplinäre Auslegungstechnologien von Turbomaschinen für die Energiewende

Für eine effiziente Umsetzung der Zielsetzungen des 7ten Energieforschungsprogramms sollen im AG Turbo-Verbundprojekt Digitalisierung und interdisziplinäre Auslegungstechnologien von Turbomaschinen für die Energiewende (DigiTecT) technologische Fragestellungen untersucht werden, die auf das geänderte Anforderungsprofil der Turbomaschinen in der Energiewende fokussieren.

Die politische Vorgabe der massiven Ausweitung der erneuerbaren Energiewandlung basierend auf Wind und Sonne hat große Auswirkungen auf zukünftige Kraftwerkskapazitäten, aber auch auf den bestehenden Kraftwerkspark. Neben der im Energieforschungsgesetz angepeilten Energieeffizienz auf der Verbraucherseite können die von der Bundesregierung angestrebten Ziele nur erreicht werden, wenn auch Sektoren wie Verkehr, Haushalt und Industrie stärker elektrifiziert werden, um sie den erneuerbaren Energieträgern zugänglich zu machen. Neben den grundsätzlichen technischen Herausforderungen müssen dabei vor allem auch die Robustheit der Stromversorgung und die Bezahlbarkeit künftiger Strompreise Berücksichtigung finden.

Turbomaschinen bilden das Rückgrat in zahlreichen Speichieranwendungen und Industrieprozessen und werden dabei auch in Prozessen zur Erzeugung synthetischer Brennstoffe eingesetzt. Dies betrifft insbesondere Prozessverdichter und –expander für die dazugehörigen Kreisprozesse. Diese werden in Zukunft in neuen thermodynamischen Kreisläufen eingesetzt und müssen mit alternativen Arbeitsmedien wie Wasserstoff oder superkritischem Kohlendioxid (sCO₂) betreibbar sein. Insbesondere für Wasserstoff werden für die Speicherung und Verteilung, z.B. in Pipeline-Netzwerken, geeignete Verdichtungs- und Expansionsaggregate zu entwickeln sein, wenn in Zukunft aus Überschussanteilen der erneuerbaren Energieerzeugung erzeugter Wasserstoff als Speichermedium für die „grüne“ Elektrifizierung aller Sektoren an Bedeutung gewinnen soll.

Darüber hinaus werden klassische thermische Kraftwerke auch zukünftig unverzichtbar sein, um Schwankungen der volatilen Energieträger Sonne und Wind auszugleichen.

Das Verbundprojekt DigiTecT [2022-2026] gliedert sich in die nachfolgenden vier thematisch übergeordneten Arbeitspakete, mit entsprechenden Themen zur Verdichtung:

AP 1: Digitalisierung interdisziplinärer Auslegungsprozesse

Für die Auslegung und Produkterstellung von Gasturbinen und deren Bauteile wird eine durchgängige Digitalisierung der Entwicklungs- und Herstellprozesse angestrebt. Daraus leiten sich signifikante Anpassungen in den Abläufen mit stärkerer Virtualisierung sowie weitergehenden Simulationsansätzen über den gesamten Produktentstehungsprozess ab. Interdisziplinäre Simulationen sollen bereits in frühen Projektphasen eingesetzt werden.

AP 2: Speicher und H₂-Anwendungen

Das Arbeitspaket widmet sich Verdichtern und Expansionskomponenten für Anwendungen in Speicherprozessen für die zukünftige, von erneuerbaren dominierte Energieinfrastruktur und in Prozessen der synthetischen Erzeugung klimaneutraler Brenngase. Bei steigendem Anteil der Stromproduktion aus erneuerbaren Energien mit hoher Volatilität, wie Photovoltaik oder Windenergie, müssen, zur Gewährleistung der Versorgungssicherheit, Speicher die potentiellen Engpässe ausgleichen. Im geforderten großtechnischen Maßstab kommen hierfür insbesondere chemische Speicher mit Betriebsmedien wie Wasserstoff oder anderen Kohlenwasserstoffen in Frage, die aus Strom zu Zeiten der Überproduktion synthetisiert wurden. Hierzu sind Radialverdichter der Zukunft mit neu zu entwickelnden multidisziplinären Auslegungsverfahren zu berechnen und konstruieren.

AP 3: Flexible Gasturbinen für synthetische Brennstoffe

In dem Arbeitspaket wird die notwendige hohe Flexibilisierung der Stromerzeugung durch Gasturbinen-basierte Kraftwerke adressiert. Dies führt zu einem häufigen schnellen An- und Abfahren von Gasturbinen in Kraftwerken. Für die flexible Anpassung der Energiebereitstellung gewinnen auch kleine Gasturbinen, die nach Bedarf zu- und abgeschaltet werden können, zunehmend an Bedeutung. Die Architektur von kleinen Anlagen unterscheidet sich z.T. deutlich von großen Maschinen (Radial- vs. Axialverdichter), Generell sind durch die größeren relativen Spalte in kleinen Gasturbinen die geforderten Wirkungsgradziele nur mit höherem Aufwand zu erreichen.

AP 4: Transienter Betrieb und Lebensdauer

Der bisherige Einsatz von Gasturbinenkraftwerken im Grundlastbereich mit bis zu 8.000 Betriebsstunden im Jahr verliert durch den steigenden Anteil erneuerbarer Energie zunehmend an Bedeutung. Durch die notwendige höhere Flexibilität im Betrieb werden deutlich mehr Zyklen mit transienten An- und Abfahrvorgängen erforderlich. In diesem Arbeitspaket werden u.a. der Einfluss auf Spalte und die damit verbundenen Verluste im transienten Betrieb untersucht. Die steigende Zyklenzahl begünstigt den Rissfortschritt und forciert damit die Materialermüdung. Dies kann die erreichbare Lebensdauer der Gasturbinenkomponenten erheblich reduzieren. Zum Erreichen möglichst langer Wartungsintervalle und Nutzungszeiten ist eine genauere Kenntnis und Modellierung der Schädigungsvorgänge durch die zyklische Belastung unabdingbar.

TurboHyTec, Turbomaschinen für Hydrogen-Technologien

Ausgerichtet am 7ten Energieforschungsprogramm werden mit dem AG Turbo Verbundprojekt Turbomaschinen für Hydrogen-Technologien (TurboHyTec) technologische Fragestellungen im Zusammenhang mit einer verstärkten Wasserstoffnutzung untersucht.

Der Ausbau der erneuerbaren Energien erfordert zur Sicherung der Netzstabilität zugleich auch eine deutliche Ausweitung von Energiespeicher-Kapazitäten. Dies muss in einem Umfang geschehen, der die bislang technisch ausgereiften Speichertechnologien (Pumpspeicher; Batterien) bei weitem übersteigt. Dazu gehört neben mechanischen (LAES; CAES) und thermischen Speichern, in denen ausnahmslos Turbomaschinen für neue Kreisprozesse eingesetzt werden, auch die chemische Power-to-Gas Speicherung, z.B. mit grünem Wasserstoff.

Thermische Kraftwerke müssen durch Bereitstellung von Reserveenergien die Schwankungen der Erneuerbaren abfangen, um „power-on-demand“ zu liefern und das Netz zu stabilisieren. Dies bedeutet, dass die Kraftwerke und deren Turbomaschinen ein Höchstmaß an Betriebsflexibilität besitzen müssen.

Neben der Erzeugung von Strom für alle Sektoren spielt vor allem die Erzeugung von Wärme für industrielle Anwendungen sowie für die regionale Versorgung von kommunalen Fernwärmenetzen eine wichtige Rolle. Durch die Verwendung von GuD- und KWK-Anlagen stehen hierzu Anlagen mit höchsten Wirkungsgraden bzw. Brennstoffausnutzungsraten zur Verfügung.

Der Übergang von der präventiven zur prädiktiven Wartung (predictive maintenance) trägt den stark unterschiedlichen Einsatzkonzepten der Turbomaschinen Rechnung. Zukünftig wird verstärkt der Einsatz hochentwickelter numerischer und materialtechnischer Verfahren gefordert sein, um die Lebensdauer der Kraftwerksturbinen für die erwarteten stark zyklisch geprägten Fahrweisen zuverlässiger vorhersagen zu können. Dazu werden unter anderem digitale Zwillinge zu entwickeln sein, die parallel zum realen Betrieb betrieben werden und Abweichungen bewerten werden müssen.

Das Verbundprojekt TurboHyTec [2023-2027] gliedert sich in vier thematisch übergeordnete Arbeitspakete, in denen die Entwicklung von Turbokomponenten für unterschiedliche Anwendungsbereiche im neuen Energiemix vorangetrieben wird und entsprechenden Themen zur Verdichtung:

AP 1 Wasserstoff-Anwendungen

Für die Realisierung einer Wasserstoff-Energieinfrastruktur werden im Arbeitspaket „Wasserstoff-Anwendungen“ sowohl Verdichter für den Wasserstoff-Transport als auch Gasturbinen für die Wasserstoff-Rückverstromung betrachtet. Dabei stehen vor allem innovative Fertigungsverfahren und die Anwendung neuartiger Werkstoffe im Vordergrund.

AP 2 Energiespeicher

Neben Wasserstoff bilden „Energiespeicher“ das zweite große zentrale Element für eine Realisierung der Energiewende. Deswegen werden in diesem zweiten Arbeitspaket Verdichter-Komponenten für den Einsatz als Wärmepumpen und Expansionsturbinen als Bestandteile von Energiespeichersystemen erarbeitet.

AP 3 Flexibilisierung

Neben einer nachhaltigen Stromversorgung ist die Bereitstellung von grüner Wärme für die Industrie essentiell. Um bestehende Wärmeversorgungsanlagen und neuartige Wärmeenergie-Speicheranlagen an den zukünftigen flexiblen Betrieb anpassen zu können, der bei der Interaktion mit erneuerbarer Energiebereitstellung zwangsläufig entsteht, werden im Arbeitspaket „Flexibilisierung“ derartige Aufgabenstellungen an Verdichtern und Turbinen durchgeführt. Das Themenfeld Flexibilisierung ist in vorangegangenen AG Turbo Programmen schon intensiv bearbeitet worden, allerdings war der Fokus bislang maßgeblich die Stromerzeugung. Mit der Wärmeversorgung kommt jetzt ein neuer Schwerpunkt dazu.

AP 4 Digitalisierung

Für die Auslegung, die Produkterstellung und den Betrieb von Turbomaschinen und deren Bauteilen wird eine durchgängige Digitalisierung angestrebt. Daraus leiten sich Anpassungen in den Abläufen mit einer stärkeren Virtualisierung und weitergehenden Simulationsansätzen über den gesamten Produktentstehungsprozess und den Betrieb der Anlagen ab. Interdisziplinäre Simulationen sollen bereits in frühen Projektphasen eingesetzt werden. In dem Arbeitspaket „Digitalisierung“ werden diese Themenfelder adressiert, auch spezifisch für Verdichter.

TurboTrans: Turbomaschinen für die Transformation in das integrierte Energiesystem der Zukunft

Auf dem Weg zu einer klimaneutralen und dekarbonisierten Wirtschaft ist die Transformation der Energieversorgung von zentraler Bedeutung. Dabei gewinnt Strom als Energieträger in den aktuellen Szenarien weiter an Bedeutung, auch durch zusätzliche Anwendungsbereiche wie Mobilität und Wärmeversorgung.

Zentrale Herausforderungen der Energiewende sind der weitere Ausbau des Anteils erneuerbarer Energien und die dafür erforderlichen Transportnetze, die hocheffiziente Nutzung der Energie und die deutliche Senkung des energiebedingten Kohlendioxidausstoßes. Hierbei sind die Versorgungssicherheit und international wettbewerbsfähige Kostenstrukturen der Energieversorgung zu gewährleisten.

Um die anvisierten Ziele des 7. Energieforschungsprogramms umzusetzen, sind Turbomaschinen, in unterschiedlichen Applikationen und Ausprägungen, von zentraler Bedeutung –insb. für thermische Kraftwerksprozesse mit unterschiedlichen Brennstoffen, Integration von volatilen erneuerbarer Energieanlagen in so genannten Power-to-X-Prozessen für die Wasserstoff- und Brennstoffherzeugung, zur Integration von Energiespeichern in die Kraftwerksprozesse und als Konzepte zur Abtrennung und Nutzung von CO₂.

Das Verbundprojekt Turbomaschinen für die Transformation in das integrierte Energiesystem der Zukunft - TurboTrans [2025-2028] gliedert sich in drei thematisch übergeordnete Arbeitspakete, in denen die Entwicklung von Turbokomponenten für unterschiedliche Anwendungsbereiche im neuen Energiemix vorangetrieben wird. Verdichter spielen hierbei eine zentrale Rolle:

AP 2 CO₂ Infrastruktur u. Speicher

Für die Realisierung einer CO₂ Infrastruktur und Speicherapplikationen mit unterschiedlichen Betriebsmedien werden im Arbeitspaket „CO₂-Infrastruktur u. Speicher“ (AP 2) angepasste Verdichter und Turbinen, auch mit alternativen Dichtungs- und Kühlkonzepten betrachtet.

Hochaufladende Radialverdichterstufen mit robuster 3D Rotorgestaltung sind in zukünftigen turboaufgeladenen Kolbenmaschinen, sowie aufgeladenen Brennstoffzellensystemen von zentraler Bedeutung für einen effizienten Betrieb (AP 2.1). Der Betrieb erfolgt vorzugsweise mit treibhausgas-neutralen synthetischen Kraftstoffen und alternativ mit grünem Wasserstoff. Die optimierten Verdichterstufen eines Abgasturboladers für die Anwendung im Kolbenmotor mit H₂-Verbrennung sollen versuchs-technisch verifiziert werden. Wegen den zu erwartenden extremen aerodynamischen und strukturdynamischen Belastungen ist der Aufbau einer neuen Versuchseinrichtung erforderlich, zusammen in Erweiterung der Standard-Messtechnik zur integralen thermodynamischen Untersuchung zwischen den Eintritts- und Austritts-Flanschen mit einer hochauflösenden, instationären Instrumentierung des Prüfstandes.

Neben der Identifizierung der Leistungsdaten und Wirkungsgrade im Auslegungspunkt erfolgt die Analyse des Verhaltens der Verdichterstufe an der Stabilitätsgrenze über dem gesamten Drehzahlbereich. Das HCF-Verhalten wird ebenfalls im Rigaufbau getestet. Mittels dieser High-Cycle-Fatigue Absicherung können derart ausgelegte Verdichterstufen in volatilen zukünftigen Energiewandlungsprozessen Anwendung finden, mit gesteigerter Gesamteffizienz, bei der auch Abwärmenutzung möglich sein wird und erweitertem Teillastbereich.

Gasdichtungen für den Einsatz in CO₂ Anwendungen sollen untersucht und eine Modellbildung des Dichtverhaltens bei Realgas abgeleitet werden (AP 2.2). Bei den Gasdichtungen muss der Dichtspalt zwischen rotierenden und feststehenden Bauteilen während des Betriebes eingehalten werden und so soll möglichst gering sein, um den Strömungsquerschnitt und damit die Leckage zu minimieren. Dichtungsfehler sind für unerwünschte Ausfallzeiten des Verdichters vor Ort verantwortlich und können bei Verwendung gefährlicher Arbeitsmedien zu Gefahren für Mensch und Umwelt führen. Die wesentliche Unbekannte ist die Kondensation von CO₂ und damit eine Zweiphasenströmung in der Gasdichtung. Auswirkungen der Zweiphasenströmung auf die Gasdichtung, wie Veränderung der Leckage und die Auswirkungen auf die Betriebssicherheit sollen ermittelt werden.

Die vorhandenen Methoden zur Berechnung von Gasdichtungen sollen um die Berechnung der Flüssigkeitsfilme innerhalb von Gasdichtungen erweitert werden. Bei der Modellierung werden die Filmoberfläche und das Aufbrechen des Flüssigkeitsfilms in Strähnen berücksichtigt.

Zur Untersuchung von Gasdichtungen für Anwendungen mit Realgas werden für experimentelle Untersuchungen Betriebsbedingungen definiert, in denen eine Zweiphasenströmung im Dichtspalt vorliegt und entsprechende Messwerte innerhalb der Gasdichtung identifiziert, anhand derer sich die Entstehung / das Vorhandensein einer Zweiphasenströmung verifizieren lässt (AP 2.3). Nachdem eine klare messtechnische Unterscheidung zwischen einphasiger- und zweiphasiger Strömung getroffen werden kann, beginnt die eigentliche experimentelle Untersuchung der Gasdichtung bei variablen Betriebsbedingungen (Variation von Druckverhältnis, Drehzahl, Strukturierung der Dichtfläche). Hierbei wird der Fokus auf die Bedingungen im Dichtspalt (Temperatur, Druck und Dichtspalthöhe) gelegt, um den sicheren Betrieb der Gasdichtung auch bei einer Zweiphasenströmung zu gewährleisten. Insbesondere muss der Kontakt der beiden Dichtringe ausgeschlossen werden. Auch darf das, durch den entstehenden Flüssigkeitsfilm, zunehmende Reibmoment, einhergehend mit einer Temperatur- und Druckänderung innerhalb des Spaltes nicht zu einem Versagen der Gasdichtung führen. Das AP 2.3 liefert zudem die experimentelle Validierung der Simulationen aus AP 2.2.

Durch diese messtechnischen Untersuchungen kann das Vertrauen in die Betriebssicherheit der Gasdichtung bei Auftreten einer Zweiphasenströmung gewährleistet werden und durch Ansätze zur vorausschauenden Wartung. Dichtungsversagen, als eine der größten Ausfallursachen von Turbomaschinen, vermieden werden.

AP 3 Flexibilität und Effizienz

„Flexibilität und Effizienz“ (AP 3) sind weiterhin zentrale Herausforderungen bei Gasturbinen zur Abdeckung der Residuallasten und in integrierten Anwendungen zur Wärmeversorgung und Speicherkonzepten. Das Einsatzprofil von Gasturbinen erfordert zukünftig eine weiter zunehmende Flexibilität bei gleichzeitig hoher Effizienz, insb. im Teillastbetrieb. Transiente Vorgänge mit schnellen Lastwechseln und hohe Zyklenzahlen führen zu besonderen Herausforderungen bzgl. Betriebsverhalten und Lebensdauer.

Sekundärströmungen liefern einen wesentlichen Beitrag zu den Gesamtverlusten in einem Verdichter. Durch verbesserte Randzonenströmungen in mehrstufigen Verdichtern (AP 3.1) können Wirkungsgradsteigerungen erzielt werden. Die genaue Vorhersage dieser Verluste ist aufgrund der Komplexität der Strömung mit höheren Unsicherheiten behaftet als die Berechnung der profilinduzierten Verluste. Unklar ist, wie sich aktuelle (und evtl. neue) Verstellstator- und Kavitätenverluste beim flexiblen Verdichterbetrieb aerodynamisch in den Randzonen auswirken (verlässliche Bewertung bzgl. Wirkungsgrad-Einfluss, Stabilitäts-Einfluss).

Zur Stabilitätsverbesserung für flexiblen Verdichterbetrieb bei zukünftigen Verdichtern soll durch verbesserte Tools und hierauf basierenden Designs die Transition und damit bedingten induzierten Verluste reduziert werden. Aufbauend auf Vorarbeiten zur Spaltströmung und aktuellen Beschaukelungskonzepten werden die Daten zu Randzonenströmung inkl. Verluste erfasst und mit numerischen Untersuchungen abgeglichen. Auf Basis dieser Erkenntnisse erfolgt die Konzeptionierung einer optimierten Beschaukelung für eine Statorstufe mit angepasster Randzonengeometrien zur experimentellen Untersuchung im Rigaaufbau. Angestrebt werden, unter Einhaltung der Stabilitätsanforderungen, neue Designkonzepte für Verdichterrandzonen mit gleichzeitig erhöhten Wirkungsgraden.

Die Prognose des Rissfortschrittwachstums und Versagensvorhersage ist von zentraler Bedeutung für die Bewertung der Restlebensdauer und Steigerung der Zylinderfestigkeit bei gleichzeitig höherer Dynamik im Betrieb von Bauteilen in Gasturbinen. Zur Simulation des Rissfortschrittwachstums (Cracktracer3D) können bereits verschiedene Lastfälle bewertet werden; diese sollen erweitert (mixed Mode Missionsrechnungen) und validiert werden (AP 3.2). Die Datenbasis von experimentellen Ergebnissen zum Abgleichen ist begrenzt; sowohl bzgl. von Versuchen, in denen mixed-mode, unterschiedliche Betriebseinflüsse und Temperatureinflüsse getrennt untersucht werden, als auch in Überlagerung dieser Phänomene. Zur Validierung des Rissfortschrittwachstums soll daher ein durchgängiges, gestaffeltes Versuchsprogramm durchgeführt werden und die Effekte separiert bestimmt werden. Basierend auf der Versuchsauswertung erfolgen dann ggf. Modifizierungen der Rissfortschrittskriterien in Cracktracer3D, zur verbesserten Vorhersage des Rissfortschrittsrichtung bei transientem Betriebseinsatz und darauf aufbauend eine genauere Vorhersage der Lebensdauer von Turbomaschinenkomponenten, insb. Verdichterblicken und Turbinenscheiben.

Durch eine verbesserte Lebensdauerauslegung kann eine zu konservative Auslegung und schwere Konstruktion des Rotors vermieden werden. Dies senkt die Massenträgheit und ermöglicht schnellere Lastwechsel und damit ein flexibleres Betriebsverhalten.

AP 4 Grüne Brennstoffe

Für den zunehmenden Einsatz „Grüner Brennstoffe“ (AP 4) sind Turbomaschinen technologische Schlüsselkomponenten. Von besonderer Herausforderung in der Transformationsphase hin zu einer durchgängigen Stromversorgung ohne Einsatz fossiler Brennstoffe ist der robuste Betrieb mit unterschiedlichen Brennstoffgemischen.

Mit zunehmenden Gastemperaturen sowie variierenden Zusammensetzungen von Rauchgasen (z.B. durch Wassereinspritzung in Brennkammer oder der Verwendung von synthetischen Kraftstoffen) können signifikante Abweichungen der Stoffeigenschaften auftreten. Die aerodynamische Auslegung soll daher zukünftig vollständig unter Berücksichtigung thermisch perfekter Gaseigenschaften erfolgen, sowohl für Verdichter, wie Turbine. Damit steigt auch die Anforderung diese hochwertigen Gasmodelle interdisziplinär einzusetzen; insb. für die Aeroelastik und Wärmetechnik mit spezifischen Anforderungen an die Toollandschaft (AP 4.2). Der 3D-Auslegungsprozesses mit der CFD-Simulation (TRACE) wurde hinsichtlich der Berechnungs- und Auswertefähigkeit um temperaturabhängige (thermisch perfekte) Stoffwerte erweitert und soll mit einem Solvermodul mit übergreifenden Fähigkeiten ausgearbeitet werden, für eine durchgängige aeromechanische und -thermische Bewertungsfähigkeit mit thermisch perfektem Gas.

Es wird dann eine robustere Komponentenauslegungen ermöglicht, mit höheren Produktlebenszyklen, reduziertem Ersatzteilbedarf und längeren Wartungsintervallen. Es können Verbesserungen bei der Bestimmung der Bauteiltemperatur und damit Lebensdauersteigerungen resultieren.

Nr.	Titel	Antrag- steller	Industrie- partner
AP 2	Turbomaschinen für Speicher und alternative Medien		
2.1a	Robuste 3D Rotorgestaltung zukünftiger Radialverdichter für moderne Energiewandlungsprozesse	MAN	MAN
2.1b	Robuste 3D-Rotorgestaltung zukünftiger Radialverdichter für moderne Energiewandlungsprozesse	RWTH Aachen	MAN
2.2	Untersuchung von Gasdichtungen für Anwendungen mit Realgas – Modellbildung	Uni Duisburg-Essen	Siemens Energy
2.3	Untersuchung von Gasdichtungen für Anwendungen mit Realgas – Experimentelle Untersuchungen	Uni Duisburg-Essen	Siemens Energy
AP 3	Flexibilität und Effizienz		
3.1a	Verbesserte Randzonenströmung in mehrstufigen Verdichtern	MTU	MTU
3.1b	Verbesserte Randzonenströmung in mehrstufigen Verdichtern	RWTH Aachen	MTU
3.2a	Validierung von Cracktracer3D für mixed-mode Missionsrechnungen	MTU	MTU
3.2b	Validierung von CrackTracer3D für Mixed-Mode Rechnungen	Uni Rostock	MTU
AP 4	Grüne Brennstoffe		
4.2a	Disziplinübergreifende Simulationen mit temperaturabhängigen Stoffeigenschaften	Siemens Energy	Siemens Energy
4.2b	Disziplinübergreifende Simulationen mit temperaturabhängigen Stoffeigenschaften	MTU	MTU
4.2c	Disziplinübergreifende Simulationen mit temperaturabhängigen Stoffeigenschaften	DLR-AT	Siemens Energy, MTU

FokusTurbo: Flexible Turbomaschinen für klimaneutrale und resiliente Energiesysteme

Um das Ziel der Klimaneutralität Deutschlands im Jahr 2045 zu erreichen, müssen umfassende Anstrengungen zur Transformation der Energieversorgung unternommen werden. Dabei gilt es nicht nur, die erneuerbaren Energien wie Windkraft und Photovoltaik oder auch Geothermie weiter auszubauen, vielmehr muss das gesamte Energiesystem stärker gekoppelt und vernetzt werden, um eine wirtschaftliche und gleichzeitig stabile und resiliente Versorgung aufzubauen.

In Bezug auf die Zuverlässigkeit und der flächendeckenden Versorgungssicherheit von elektrischer Energie ist hierbei vor allem die Stabilität der Stromnetze von höchster Bedeutung. Zusätzlich zur Erweiterung der Kapazitäten der dezentralen, erneuerbaren Erzeuger muss daher die Einbindung notwendiger Speicher- und Transporttechnologien verstärkt vorangetrieben werden, um temporär überschüssige Energie speichern und bei nicht ausreichendem Angebot wieder einspeisen zu können. Hierfür werden auch Spitzenlast- und Reservekraftwerke benötigt.

Das Verbundprojekt „Flexible Turbomaschinen für klimaneutrale und resiliente Energiesysteme – FokusTurbo [2026-2028]“ gliedert sich in vier thematisch übergeordnete Arbeitspakete, die sich direkt an den Missionen des 8. EFP orientieren. Darin soll die Technologieentwicklung von Turbomaschinenkomponenten für die Transformation des Energiesystems hin zu einem klimaneutralen Energiesystem vorangetrieben werden, mit den nachfolgenden Schwerpunkten bei der Verdichtung.

AP 1 Effizienzsteigerung von Turbomaschinenkomponenten

Die Effizienzsteigerung von Turbomaschinenkomponenten (AP 1) gepaart mit einem robusten Komponentenentwurf sind wesentliche Attribute, die durch die Technologieentwicklung für ein effizientes Gesamtsystem kontinuierlich adressiert werden müssen und einen zentralen Beitrag zur Mission Energiesystem leisten. Dabei müssen auch Bauteilgruppen außerhalb des Hauptgaspfades in die Betrachtungen mit einbezogen werden. Zudem müssen Lösungen für neue Betriebsrandbedingungen, wie die Verdichtung von Gasen mit geringen Molgewichten (Wasserstoff), erarbeitet werden.

Zur Verbesserung der Leistung und Effizienz von Kompressoren sind mechanische Verluste zu reduzieren, insb. hinsichtlich der Ventilationsverluste (AP 1.1). Die Ventilationsverluste des Luft-Öl Gemisches innerhalb des Getriebegehäuses eines Getriebeturbokompressors verursachen die größten mechanischen Verluste, die den Gesamtwirkungsgrad des Kompressors erheblich verringern. Auch durch Einbau zusätzlicher Komponenten in das Getriebegehäuse, um die Ventilation zu reduzieren oder den Abstand zwischen den rotierenden Teilen und dem Gehäuse zu verringern, konnten bisher jedoch keine wesentlichen Verbesserungen erzielt werden.

Daher sollen die Phänomene auf analytische Weise mit Hilfe von CFD-Berechnungen untersucht werden, um die Verwirbelungen zu simulieren und hierauf basierend Strategien zu deren Reduzierung zu entwickeln.

Für die effiziente Verdichtung von Wasserstoff werden Verdichter mit einem robusten Maschinendesign benötigt (AP 1.2). Zur energieeffizienten Verdichtung von Gasen mit geringen Molgewichten wie z.B. Wasserstoff sind hohe Wellendrehzahlen erforderlich. In Abhängigkeit des Rotordesigns kann dies zu einem bisher unüblichen Betrieb des Rotors zwischen der zweiten und dritten kritischen Rotor-Biegeeigenfrequenz führen. Insbesondere bei Start- und Stoppvorgängen müssen die üblicherweise verwendeten Gleitlager beim Durchfahren der ersten und zweiten Rotor-Biegeeigenfrequenz ausreichende Dämpfungseigenschaften bereitstellen, um die Schwingungsamplituden in akzeptablen moderaten Bereichen zu halten.

Zur weiteren Steigerung der Systemdämpfung und Robustheit der Anwendung sollen daher Quetschöldämpfer angewendet werden. Hierbei umschließt ein mit Öl gefüllter und gegenüber der Umgebung über O-Ringe abgedichteter „Quetschspalt“ das eigentliche Gleitlagergehäuse. Die Schwingungen der Welle werden über den Schmierfilm des Gleitlagers auf den Quetschölfilm übertragen und sorgen so für zusätzliche Dämpfung. Das Gleitlager wird in dem Quetschölfilm über einen Federmechanismus zentriert. Sowohl der gewählte Federmechanismus als auch die Quetschspaltgeometrie beeinflussen sehr stark die zu erzielenden dynamischen Eigenschaften des Quetschöldämpfers. Für eine sichere Verwendung dieses Bauteils soll ein experimentell abgesichertes Vorhersagemodell entwickelt werden.

AP 2 Wärmepumpen für den Industrieinsatz

Zur Unterstützung der Mission Wärmewende liefert die Technologieentwicklung der Wärmepumpen für den Industrieinsatz (AP 2) einen wichtigen Beitrag. Die Arbeitsziele umfassen neben der Effizienzsteigerung und Betriebsbereichserweiterung von Kompressoren für Wärmepumpenkreislauf und -prozesse, auch grundlegende Untersuchungen für die modellprädiktive Regelung von Wärmepumpen, sowie die Aspekte der 2-Phasenströmung an strömungsführenden Bauteilen (Gemisch aus Flüssigkeit und Gas). Die Erkenntnisse sollen in die weitere Entwicklung von Industrierärmepumpen für den niedrigen und mittleren Temperaturbereich (unter, ab 200°C) einfließen.

Zur Effizienzsteigerung im Wärmepumpenkreislauf (AP 2.1) ist sowohl ein kompakter Aufbau des Kompressors als auch eine robuste Bauweise entscheidend. In Wärmepumpenkreisläufen tritt das Kältemittel sowohl flüssig als auch gasförmig auf, daher sind Kompressorstufen oft mit Gasen mit hoher Flüssigkeitsbeladung konfrontiert. Dies ist z.B. bei Stufen nach einem Verdampfer der Fall oder bei Einspritzkühlung von Wasserdampfkompressoren. Die Abscheidung von Flüssigkeit aus dem Gasstrom sollte dazu sowohl effektiv als auch auf möglichst geringem Bauraum erfolgen. Darüber hinaus ist ein

flüssigkeitsresistentes Kompressor-Design erforderlich, um einen effizienten und zuverlässigen Betrieb sicherstellen zu können. Entsprechende Kompressorkonzepte für Gase mit hoher Flüssigkeitsbelastung sollen entwickelt werden.

Die Erweiterung des Betriebsbereichs von Radialverdichterstufen ist für den Einsatz in industriellen Wärmepumpenprozessen von hoher Wichtigkeit (AP 2.2). Die Produktion von Wärme und Kälte stellen in Deutschland mehr als 50% des Endenergieverbrauchs dar. Es ergeben sich steigende Anforderungen an die Flexibilisierung des Betriebs, um einerseits schwankende Bedarfe decken zu können und um Wärmepumpen andererseits bei großem Stromangebot netzdienlich betreiben zu können. Daraus leiten sich unmittelbar die Entwicklungsziele für Radialverdichter als eine der zentralen Anlagenkomponenten ab: Hohe Anforderung an die Flexibilität im Betrieb sollen durch breite Betriebsbereiche abgebildet werden, bei gleichzeitigen Wirkungsgradsteigerungen zum Erreichen einer hohen Effizienz des Gesamtprozesses, sowie kompakte und modulare Bauweise des Kompressors.

Die aerodynamische Betriebsbereichserweiterung eines mehrstufigen Radialkompressors steht im Vordergrund. Neuartige Arbeitsmedien, die in Wärmepumpenprozessen zum Einsatz kommen, erfordern in Kombination mit hohen Umfangsmachzahlen zur Wirkungsgradsteigerung die Entwicklung von neuen Verdichterstufengeometrien. Durch numerische Studien sollen mögliche Inhomogenitätsprofile in der Zuströmung ermittelt und nach einer Klassifikation der Einlaufstörungen, ein geeigneter Mechanismus entwickelt werden, um die Inhomogenität der Anströmung im Prüfstands-aufbau abbilden zu können. Die experimentellen Untersuchungen erfolgen an einer Spiralstufe unter variierenden Anströmbedingungen und Einsatz von Kältemitteln in einem geschlossenen Kreislauf des Prüfstands und ermöglichen Reynolds-ähnliche Bedingungen im Vergleich zur Realapplikation des Wärmepumpenprozesses.

Für Fortschritte von Wärmepumpenprozessen ist die Weiterentwicklung und Optimierung der zugehörigen Anlagenkomponenten unerlässlich. Strömungsführende Bauteile werden mittels 3D-CFD simuliert und modelliert. Aufbauend auf numerischen Untersuchungen des druckinduzierten Phasenübergangs reiner Fluide (AP 2.3) soll die Modellierung der 2-Phasenströmung verbessert werden.

Für einen effizienten Wärmepumpenprozess ist es notwendig, dass das verwendete Kühlmittel einem Phasenübergang unterzogen wird. Dies geschieht einerseits bei der Zuführung von Wärme aus der Wärmequelle, wobei das Medium verdampft. Je nach Kreislaufdesign kommt es entweder während der Wärmeabgabe oder in der nachgeschalteten Drossel erneut zu einem Phasenwechsel. Während des Phasenwechsels liegt in den strömungsführenden Bauteilen ein Gemisch aus Flüssigkeit und Gas vor (2-Phasenströmung).

Im Rahmen des Vorhabens sollen die vereinfachenden Annahmen des homogenen Gleichgewichtsmodells hinsichtlich ihrer Gültigkeit bei den Phasenübergängen im Wärmepumpenkreislauf untersucht werden. Unzureichende Annahmen sollen umformuliert werden, um eine höhere Güte und Verlässlichkeit der CFD-Vorhersagen zu erreichen. Erst dieser Schritt ermöglicht es, mittels numerischer Verfahren Bauteile zu optimieren, und so den Wärmepumpenprozess zu verbessern. Dies führt unmittelbar zu einer Reduktion des Energieverbrauchs zur Bereitstellung von Wärme und Kälte.

Eine wesentliche Herausforderung beim Einsatz von Wärmepumpen zur Dekarbonisierung ist die hohe Volatilität des Angebots regenerativer Stromerzeugungsanlagen über verschiedene Zeitskalen. Eine modellprädiktive Regelung flexibler Groß-Wärmepumpen (AP2.4) ermöglicht die effiziente Erzeugung von grüner Wärme. Basierend auf einem genauen Verständnis der systemimmanenten Speichermengen (z. B. in Wärmeübertragern, Rohrleitungen) sowie des dynamischen Betriebs der Anlagen und deren flexible Integration in das Energiesystem können dann Regelungs- und Automationskonzepte konzipiert werden, die vorausschauend agieren, schnell auf abrupt wechselnde Anforderungen reagieren und dabei die Anlage in ihren zulässigen stationären und transienten Betriebsgrenzen halten.

Das zu entwickelnde Regelungs- und Automationssystem muss also Stelleingriffe und Entscheidungen auf Grund des inneren Anlagenzustands, der sich ändernden äußeren Rahmenbedingungen und Prognosen generieren. Für die optimale Wahl der aktuellen Betriebsstrategie soll auf automationstechnischer Seite Maschinelles Lernen in Form eines Agenten untersucht werden, wobei z. B. Reinforcement Learning als Ansatz geeignet erscheint. Der Einfluss von Modellierungsschwächen insbesondere der Wärmeübertrager auf die Prozessparameter, soll vorab quantifiziert werden, um die dynamische Betriebsführung durch ein geeignetes, vorausschauendes Regelkonzept anpassen und optimieren zu können.

AP 3 Flexibilisierung / Lebensdauer und Speicherung

Die Arbeitspakete im Kontext der Mission Stromwende konzentrieren sich auf die Themen der Flexibilisierung von Turbomaschinen und den damit verbundenen Entwicklungen für Lebensdauer und Betriebssicherheit, sowie den Aspekten der Speichertechnologie für ein diverses Energiesystem (AP 3). Durch die Untersuchungen zu instationären Effekten in Verdichtern, wie Schallentstehungsmechanismen in Kombination mit beschauften Diffusoren und Laufradkavitäten unter Berücksichtigung der akustoelastischen Kopplung, aber auch durch die Betrachtung von mehrachsigen und nicht-proportionalen Belastungen, sollen verbesserte Lebensdauervorhersagen auf Komponentenebene erzielt werden.

Die Entwicklung neuer Prozesse im Zusammenhang mit der Dekarbonisierung führen bei Turboverdichtern zu Eintrittsbedingungen in der Nähe des Zweiphasengebiets liegen und erfordern damit auch die Untersuchung von Radialverdichtern mit Phasenwechsel (AP3.1). Eine erste Studie zeigte die starke Auswirkung einer Zweiphasen-Strömung auf die Betriebsgrenzen eines Turboverdichters. Es soll daher ein detailliertes Rechenmodell mit

Berücksichtigung von Nicht-Gleichgewichtseffekten bei der Blasen- sowie Tropfenbildung erarbeitet werden. Weiterhin sollen zugehörige Schädigungsmechanismen mittels dreidimensionaler numerischer Strömungsmechanik (CFD) untersucht werden. Dabei soll eine Erweiterung bestehender Modelle zur Beschreibung des Phasenwechsels und die Quantifizierung von Schädigungen erarbeitet und in das bestehende Verfahren integriert werden und damit die Untersuchung typischer Radialverdichter zur Beurteilung von Einsatzgrenzen und notwendigen Designmodifikationen zu ermöglichen.

Auch im Bereich der Radialverdichterindustrie gewinnt das Thema Lärm an Bedeutung, insbesondere wenn Verdichteranlagen in der Nähe bewohnter Gebiete zum Einsatz kommen. Die zulässigen Grenzwerte lassen sich oft nur durch den Einsatz von Schalldämpfern oder durch aufwendige Schallhauben einhalten. Die Schallentstehungsmechanismen bei Radialverdichtern mit beschaukelten Diffusoren sollen daher untersucht werden (AP 3.2), um zukünftig Lärmemissionen und damit verbundene Druckschwankungen mit Degradationseffekten innerhalb der Rohrleitungssysteme oder nachgeschalteter Elemente wie z.B. Kühlern zu reduzieren. Die Zuverlässigkeit des Verdichterbetriebes kann dadurch gefährdet sein, und der Verdichter als zentrales Element des Gesamtsystems kann zu einem Ausfall der gesamten Prozesskette führen. Von besonderem Interesse ist in diesem Zusammenhang die Thematik Schall beim Einsatz beschaukelter Diffusoren, da durch die Rotor/Stator-Interaktion zwischen Laufrad- und Diffusorschaukeln dominante Druckmuster hoher Amplitude entstehen. Solche Designs mit beschaukelten Diffusoren werden vor dem Hintergrund besserer Wirkungsgrade und geringerer CO₂-Emissionen für zukünftige Verdichterauslegungen eine hohe Relevanz haben, und das Schallverhalten muss zuverlässig vorhergesagt werden können.

Aus dem Verständnis der Schallentstehungsmechanismen für Radialverdichter beim Einsatz von beschaukelten Diffusoren sollen konkrete Auslegungsrichtlinien abgeleitet werden. Diese sollen allgemein formuliert werden, sodass eine Übertragbarkeit auf verschiedene Arbeitsmedien (Luft, Wasserstoff, CO₂, ...) möglich ist. Zur Umsetzung im industriellen Umfeld sollen Verfahren entwickelt werden, die – ohne den Einsatz passiver Schalldämpfungsmaßnahmen – ein „Low-Noise-Design“ ermöglichen.

Verdichterlaufrad-Kavitäten-Systeme (VKS) mit Deckscheiben, deren Geometrie in radialer und axialer Richtung veränderlich sein können, sogenannte dreidimensionale VKS, müssen im Zuge der Energiewende und Dekarbonisierung vermehrt an veränderte Fluideigenschaften oder thermodynamische Eigenschaften, wie z.B. zur Wasserstoffverdichtung, dem Einsatz in Wärmepumpenkreisläufen oder zur Verdichtung und Speicherung von CO₂, angepasst werden (AP 3.3). Die dauerhafteste Auslegung der VKS bedingt dabei eine sichere Quantifizierung der verfügbaren Dämpfung in einer frühen Designphase der Laufräder. Dies gilt umso mehr vor dem Hintergrund der Forderung nach dem Entwurf immer effizienterer, ressourcenschonender und damit flexiblerer Laufräder, welche höhere Umfangsgeschwindigkeiten und Stufendruckverhältnisse ermöglichen (insbesondere für Wasserstoff), und damit gleichzeitig jedoch durch eine erhöhte

Schwingungsanfälligkeit charakterisiert sind. Andererseits sieht man sich mit dem Problem konfrontiert, dass die Ermittlung modaler Dämpfungen prinzipiell die Durchführung unidirektionaler, aber dennoch aufwendiger FSI-Simulationen von VKS unter Berücksichtigung der Laufraddurchströmung als auch der akustoelastischen Kopplung zwischen Laufrad und Seitenkavitäten verlangt. Der damit verbundene Berechnungsaufwand wäre wirtschaftlich nicht zu rechtfertigen; dies gilt insbesondere vor dem Hintergrund, dass sich gerade in der Entwurfsphase operative Anforderungen und geometrische Abmessungen häufig ändern und neue FSI-Berechnungen erforderlich machen.

Als besonders schnelle und effiziente Methode zur Dämpfungsermittlung soll deshalb ein Ansatz, welcher die modalen Parameter akustoelastischer Koppelsysteme numerisch effizient approximiert, weiterentwickelt werden. Durch modale Superposition der ungekoppelten Moden kann die komplexe Geometrie von Industrieverdichterstufen berücksichtigt und gleichzeitig den numerischen Aufwand im Vergleich zu FE-Simulationen drastisch zu reduziert werden. Modale Dämpfungen werden bislang jedoch nur auf Basis von Messungen oder anhand grober Abschätzungen berücksichtigt. Es wird daher angestrebt Abschätzungsformeln für modale Dämpfungen auf der Basis physikalischer Modelle zu entwickeln, welche den Grundgleichungen der Strömungslehre genügen und sich auf geometrische Daten von Laufrad und Seitenkavität, Betriebsbedingungen wie Drehzahl, Druck und Temperatur und Struktureigenfrequenzen stützen. Die Verfügbarkeit der Abschätzungsformeln eröffnet die Perspektive, Laufraddämpfungen besonders effizient, d.h. ohne die Durchführung aufwendiger FSI-Simulationen bereits in der Designphase zu berechnen, und dabei dennoch den Einfluss der akustoelastischen Kopplung und der Durchströmung zu berücksichtigen.

Nr.	Titel	Antrag- steller	Industrie- partner
AP 1	Energiesystem – Effizienzsteigerung von Turbomaschinenkomponenten		
1.1a	Effizienzsteigerung durch Reduzierung mechanischer Verluste	Everllence	Everllence
1.1b	Effizienzsteigerung durch Reduzierung mechanischer Verluste	Uni Duisburg- Essen	Siemens Energy, Everllence
1.2	Robustes Maschinendesign für die effiziente Verdichtung von Wasserstoff	TU Clausthal	Siemens Energy
AP 2	Wärmewende – Wärmepumpen für den Industrieinsatz		
2.1a	Effizienzsteigerung Kompressor im Wärmepumpenkreislauf	Everllence	Everllence
2.1b	Effizienzsteigerung Kompressor im Wärmepumpenkreislauf: Wet-Inlet-Kompressorstufe	HSU	Everllence
2.2	Erweiterung des Betriebsbereichs von Radialverdichterstufen für den Einsatz in industriellen Wärmepumpenprozessen	RWTH Aachen	Everllence
2.3a	Numerische Untersuchung des druckinduzierten Phasenübergangs reiner Fluide	Everllence	Everllence
2.3b	Numerische Untersuchung des druckinduzierten Phasenübergangs reiner Fluide	RUB	Everllence
2.4a	Modellprädiktive Regelung flexibler Groß-Wärmepumpen	Everllence	Everllence
2.4b	Modellprädiktive Regelung flexibler Groß-Wärmepumpen	Hochschule Düsseldorf	Everllence
2.4c	Modellprädiktive Regelung flexibler Groß-Wärmepumpen	RWTH Aachen	Everllence
AP 3	Stromwende – Flexibilisierung/Lebensdauer und Speicherung		
3.1	Untersuchung von Radialverdichtern mit Phasenwechsel	Uni Duisburg- Essen	Siemens Energy
3.2	Schallentstehungsmechanismen bei Radialverdichtern mit beschauften Diffusoren (SchaRD _i)	Hochschule Trier	Siemens Energy
3.3	Dämpfung von Verdichterlaufrad-Kavitäten Systemen unter Berücksichtigung akustoelastischer Kopplung	BTU-Cottbus	Siemens Energy

Verdichtung

Verbundprojekt „TurboHyTec – Turbomaschinen für Hydrogen Technologien“

Teilverbundprojekt Verdichtung

Vorhabengruppe „Wasserstoff-Anwendungen“

„Hochschluckfähige Kompressorstufe für H₂ und H₂-Gemische“

Vorhaben-Nr.: 1.3

verfasst von

Kolja Metz
Everllence SE

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das dem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wird von Everllence SE und mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWE) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages unter dem Förderkennzeichen 03EE5158A gefördert.

Abstract

Turbomachinery plays a central role in numerous energy storage applications and industrial processes and is also used in technologies for producing renewable energy carriers and synthetic fuels. If hydrogen produced from renewable energy is to play a major role in the future as a storage medium or energy carrier for the decarbonization of all industrial sectors, suitable compressors for its storage and transport must be developed. Process compressors will therefore be operated in new processes and must be capable of compressing alternative working fluids such as hydrogen or hydrogen-containing gas mixtures.

This report provides an overview of the current scientific and technical progress achieved within the AG Turbo project TurboHyTec 1.3. The overall objective of the project is to develop efficient H_2 compressors for H_2 liquefaction plants, especially for large-scale electrolysis systems, as well as for storage in underground H_2 caverns and for pipeline injection. Due to its low molecular weight, hydrogen compression requires impeller tip speeds that in many cases exceed the design limits of conventional industrial compressors. Work package AP 1.3 continues the development of hydrogen turbocompressor stages initiated in the predecessor project InnoTurbinE AP 1.2, extending it to higher volume flows and the machine elements required for these operating conditions. Within this work package, compressor stages are being aerodynamically and mechanically designed, experimentally tested, and key components are further developed to ensure a mechanically efficient and reliable operation.

Kurzfassung

Turbomaschinen spielen eine zentrale Rolle in zahlreichen Energiespeicheranwendungen und industriellen Prozessen und werden zudem in Verfahren zur Herstellung grüner Energieträger und synthetischer Kraftstoffe eingesetzt. Wenn zukünftig aus erneuerbaren Energien erzeugter Wasserstoff eine wesentliche Rolle als Speichermedium oder Energieträger für die Dekarbonisierung aller Industriezweige spielen soll, sind für die Speicherung und den Transport geeignete Kompressoren zu entwickeln. Prozessverdichter werden daher in Zukunft in neuen Prozessen eingesetzt und müssen alternative Medien wie z.B. Wasserstoff oder wasserstoffhaltige Gase komprimieren können. Dieser Bericht gibt einen Überblick über den aktuellen Zwischenstand der wissenschaftlichen und technischen Arbeiten im AG-Turbo-Verbundprojekt TurboHyTec 1.3. Ziel des Verbundvorhabens ist die Entwicklung effizienter H_2 -Kompressoren für H_2 -Verflüssigungsanlagen, insbesondere große Elektrolysesysteme, sowie für die Speicherung in H_2 -Kavernen und die Einspeisung in Pipelines. Aufgrund der geringen Mol-Masse erfordert die H_2 -Kompression Laufradumfanggeschwindigkeiten, die in vielen Fällen über die bisherigen Grenzen für Industriekompressoren hinausgehen. Damit setzt das Arbeitspaket AP 1.3 die im Rahmen von InnoTurbinE AP 1.2 begonnene Entwicklung der H_2 -Turbo-Kompressorstufen fort und ergänzt diese für höhere Volumenströme, sowie die dafür erforderlichen Maschinenelemente. Es werden Kompressorstufen aerodynamisch und mechanisch entwickelt und im Versuch erprobt, sowie die Komponenten weiterentwickelt, um einen mechanisch effizienten und zuverlässigen Betrieb sicher zu stellen.

1 Einleitung

Im Arbeitspaket, welches von Everllence SE im Rahmen von TurboHyTec bearbeitet wird, steht die Weiterentwicklung der Technologie im Fokus, um die Einsatzmöglichkeiten von Turboverdichtern zu größeren Volumenströmen hin zu erweitern. Damit trägt es entscheidend zur Kostenreduktion und Effizienzsteigerung bei der Speicherung und des Transports von Wasserstoff bei. Durch den Einsatz von leistungsfähigeren Turboverdichtern ist ein zukünftiges Wachstum der Anlagengröße auf deutlich über 100 Tonnen pro Tag möglich, im Vergleich zu 30-35 Tonnen pro Tag von zurzeit existierenden Anlagen. In diesem Bereich kann der spezifische Energiebedarf für die Verflüssigung im Vergleich zu bisherigen Anlagen um die Hälfte oder mehr reduziert werden [1], wenn anstatt bisher verwendeter Kolbenkompressoren Turboverdichter eingesetzt werden. Als klimaneutraler Energieträger nimmt Wasserstoff eine zentrale Position für eine erfolgreiche Transformation zu einer dekarbonisierten Energiewirtschaft ein. Mit dem erwarteten Anstieg des Bedarfs an verflüssigtem Wasserstoff gewinnen großskalige Verflüssigungsanlagen erheblich an Bedeutung innerhalb der gesamten Lieferkette. Darüber hinaus stellt der Verdichter eine Schlüsselkomponente nicht nur für kryogene Anwendungen dar, sondern ebenso für die Verdichtung von gasförmigem Wasserstoff, beispielsweise in Pipeline-Transportsystemen. Seine Leistungsfähigkeit beeinflusst maßgeblich sowohl die Kostenstruktur als auch die Energieeffizienz entsprechender Infrastrukturen.

Konventionelle Turbokompressoren können bei der Verdichtung von Gasen mit niedriger molarer Masse, wie Wasserstoff, nur sehr niedrige Stufendruckverhältnisse erreichen. Um die für die Verflüssigung benötigten Druckniveaus zu erreichen, muss insbesondere das Laufrad für diese Anwendung optimiert werden. Das im Rahmen von InnoTurbinE AP1.2 entwickelte Laufrad ist zwar für höhere Druckverhältnisse optimiert, aber auf mittlere Volumenströme begrenzt.

Getriebeverdichter sind besonders gut geeignet, um die Vorteile von hochschluckfähigen, halboffenen Laufrädern, die hohe Umfangsgeschwindigkeiten erreichen können, auszunutzen. Durch die Möglichkeit, die verschiedene Drehzahlen auf den unterschiedlichen Wellen zu realisieren, können sowohl die aerodynamischen, als auch die mechanischen Grenzen weiter ausgereizt werden, um höhere Wirkungsgrade als mit anderen Verdichterkonfigurationen zu erreichen.

Ziel des TurboHyTec-Arbeitspaketes AP1.3 „Hochschluckfähige Kompressorstufe für H₂ und H₂-Gemische“ ist die Entwicklung und anschließende Erprobung einer Verdichterstufe für Getriebe-Turboverdichter, die für hohe Saugvolumenströme bei niedrigen Saugdrücken optimiert ist, sowie die Weiterentwicklung der Maschinenelemente für einen stabilen rotordynamischen Betrieb von Wasserstoffkompressoren. Dabei wird auf den Erkenntnissen der mechanischen Untersuchungen und der Werkstofftechnik aus InnoTurbinE AP1.2 aufgebaut und der Einsatzbereich von Turboverdichtern erweitert.

2 Hochschluckfähige Kompressorstufe für H₂ und H₂-Gemische

Das Projekt „Hochschluckfähige Kompressorstufe für H₂ und H₂-Gemische“ gliedert sich in insgesamt acht Arbeitspakete, siehe Abbildung 1. Das dunkelblaue Feld ist abgeschlossen, hellblau hinterlegten Felder sind zurzeit in Arbeit und die schraffiert dargestellten Felder wurden bisher noch nicht begonnen.

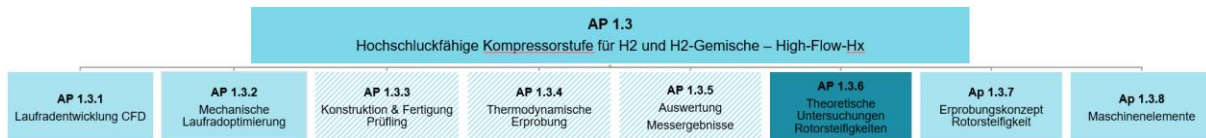


Abbildung 1: Struktur des Arbeitspaketes „Hochschluckfähige Kompressorstufe für H₂ und H₂-Gemische“ (TurboHyTec AP 1.3)

In den Arbeitspaketen 1.3.1 & 1.3.2 wird eine Kompressorstufe für hohe Volumenströme bei niedrigen Saugdrücken entwickelt, welche später in den Arbeitspaketen 1.3.3 & 1.3.4. erprobt werden soll. Die Auswertung der Messergebnisse soll im Arbeitspaket AP 1.3.5 erfolgen.

Im Arbeitspaket 1.3.6 wurde die Rotordynamik für Kompressorrotoren jenseits der bisherigen Auslegungsgrenzen untersucht. In den beiden Arbeitspaketen 1.3.7 & 1.3.8 werden die experimentellen Untersuchungen des rotordynamischen Konzepts sowie der dazugehörigen Maschinenelemente vorbereitet.

Der aktuelle Status wird in den folgenden Kapiteln zusammengefasst.

2.1 Laufradentwicklung CFD (AP 1.3.1)

Die aerodynamische Auslegung des hochschluckfähigen Laufrades ist in folgende Schritte gegliedert:

- 1D-Auslegung: Die Voruntersuchung umfasste eine eindimensionale Auslegung, um die wichtigsten Strömungsgrößen und die Hauptabmessungen des Laufrades zu bestimmen.
- Automatische 3D-Optimierung: Mit Hilfe eines kommerziellen Optimierers des Von-Kármán-Instituts (CADO) wurden insgesamt mehr als 400 Varianten untersucht.
- Manuelle 3D-Optimierung: Auf Basis der 1D-Auslegung wurden zuerst mehrere Geometrien manuell mit Hilfe von CFD vor-optimiert. Ergänzend wurden nach der automatischen Optimierung einige ausgewählte Geometrien manuell weiter optimiert (CFD mit *Cadence FINE/Turbo v17.1*).

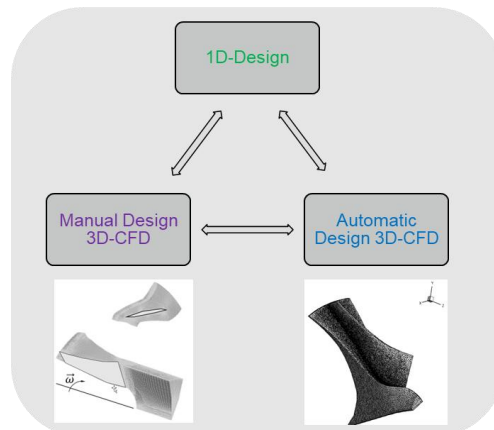


Abbildung 2: Überblick der Auslegungsmethoden

Für die automatische Optimierung wurde zuerst eine Datenbasis von 256 Geometrien generiert. Durch die Variation von 28 geometrischen Parametern wurde die Optimierung mit dem Ziel eines möglichst breiten Wirkungsgradoptimums durchgeführt. Die Zielfunktionen waren dabei die Wirkungsgrade bei 80% und 130% des Auslegungsvolumenstroms. Zwei Geometrien aus der automatischen Optimierung, sowie eine weitere aus der manuellen Optimierung wurden als besonders aussichtsreich identifiziert. Diese drei wurden anschließend einer detaillierten mechanischen Überprüfung und einer Modalanalyse unterzogen. Anschließend wurde daraus der beste Kandidat hinsichtlich Wirkungsgrad, Kennfeldbreite und Resonanzverhalten ausgewählt, welcher im Folgenden für die Auslegung der restlichen Kompressorstufe verwendet wird.

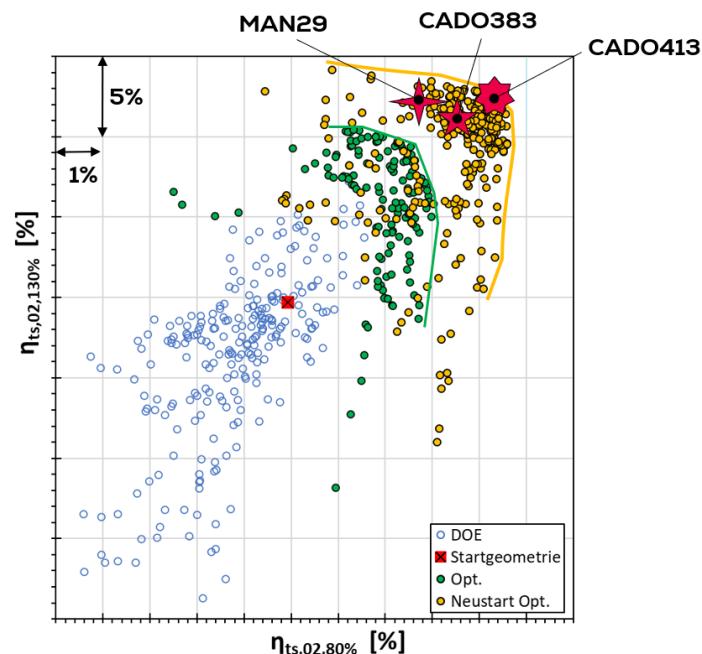


Abbildung 3: Evolutionäre Entwicklung der Wirkungsgrade bei 80% und 130% Menge

Nach der Laufradauslegung erfolgt die Auslegung des beschauften Diffusors, welche noch nicht abgeschlossen ist. Anschließend erfolgt die Auslegung eines Flowcuts für niedrigere Volumenströme, um den Bereich oberhalb des Vorgängerlaufrades (InnoTurbinE AP 1.2a) nahtlos abzudecken. Das Arbeitspaket hat zurzeit einen Verzug von etwa einem Jahr.

2.2 Mechanische Laufradoptimierung (AP 1.3.2)

Parallel zur aerodynamischen Optimierung wurden die Laufradgeometrien fortlaufend automatisch anhand der Maximalspannung in Bezug auf Festigkeit überprüft. Die Bewertung ist direkt in die aerodynamische Optimierung eingeflossen. Anschließend wurden die drei aussichtsreichsten Kandidaten noch einmal manuell detaillierter auf Spannungen und Verformungen überprüft. Abschließend wurden für die finalen drei Kandidaten Modalanalysen durchgeführt, um ein zulässiges Resonanzverhalten sicher zu stellen. Das Arbeitspaket hat zurzeit ebenfalls einen Verzug von etwa einem Jahr.

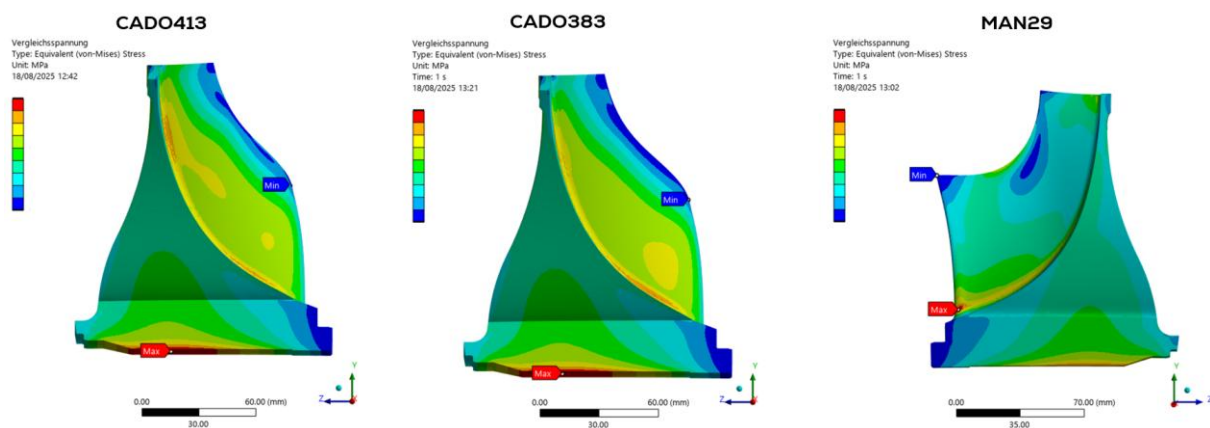


Abbildung 4: Spannungsverläufe in drei ausgewählten Laufradkandidaten

2.3 Konstruktion und Fertigung Prüfling (AP 1.3.3)

Die Erprobung des Laufrades war ursprünglich am IKDG der RWTH Aachen vorgesehen. Da es im Vorgängerprojekt InnoTurbinE (AP 1.2a) zu zwei Havarien des Prüfstandes kam, ist dieser zurzeit nicht betriebsbereit. Eine Erprobung ist dort im ursprünglich vorgesehenen Zeitrahmen nicht mehr möglich. Die Suche nach alternativen Erprobungsmöglichkeiten war bisher erfolglos, weil es zumindest im universitären Umfeld keinen geeigneten Prüfstand gibt, der bereits in Betrieb ist. Das Arbeitspaket verzögert sich dadurch um mehr als ein Jahr. Für die nachfolgenden Arbeitspakete 1.3.4 „Thermodynamische Erprobung“ und 1.3.5 „Auswertung der Messergebnisse“ wird ebenfalls mit einem Verzug von mehr als einem Jahr gerechnet.

2.4 Theoretische Untersuchungen der Rotorsteifigkeiten (AP 1.3.6)

Die für die Kompression von Wasserstoff und anderen leichten Gasen erforderlichen Laufradumfangsgeschwindigkeiten führen zu sehr hohen Rotordrehzahlen. Da die maximalen Lagerumfangsgeschwindigkeiten konstruktiv nicht entsprechend gesteigert werden können, sind Rotoren für Wasserstoffanwendungen verhältnismäßig schlank und haben nur eine geringe Steifigkeit. Daraus ergibt sich ein sehr niedriges starrkritisches Verhältnis, welches außerhalb des Erfahrungsbereiches für bisherige Kompressoren für andere Gase liegt. In API617 [2] wird der erforderliche Umfang der rotordynamischen Analysen beschrieben, der neben dem starrkritischen Verhältnis auch wesentlich von der Gasdichte abhängt.

Da die Gasdichte von Wasserstoff sehr gering ist, spielen die Anregung durch Gaskräfte und die Koppelsteifigkeiten nur eine untergeordnete Rolle. Das Kriterium aus API617 [2] ist somit für Wasserstoffkompressoren nicht ausschlaggebend. Entscheidend für eine stabile Rotordynamik ist die Rotor-Dämpfung.

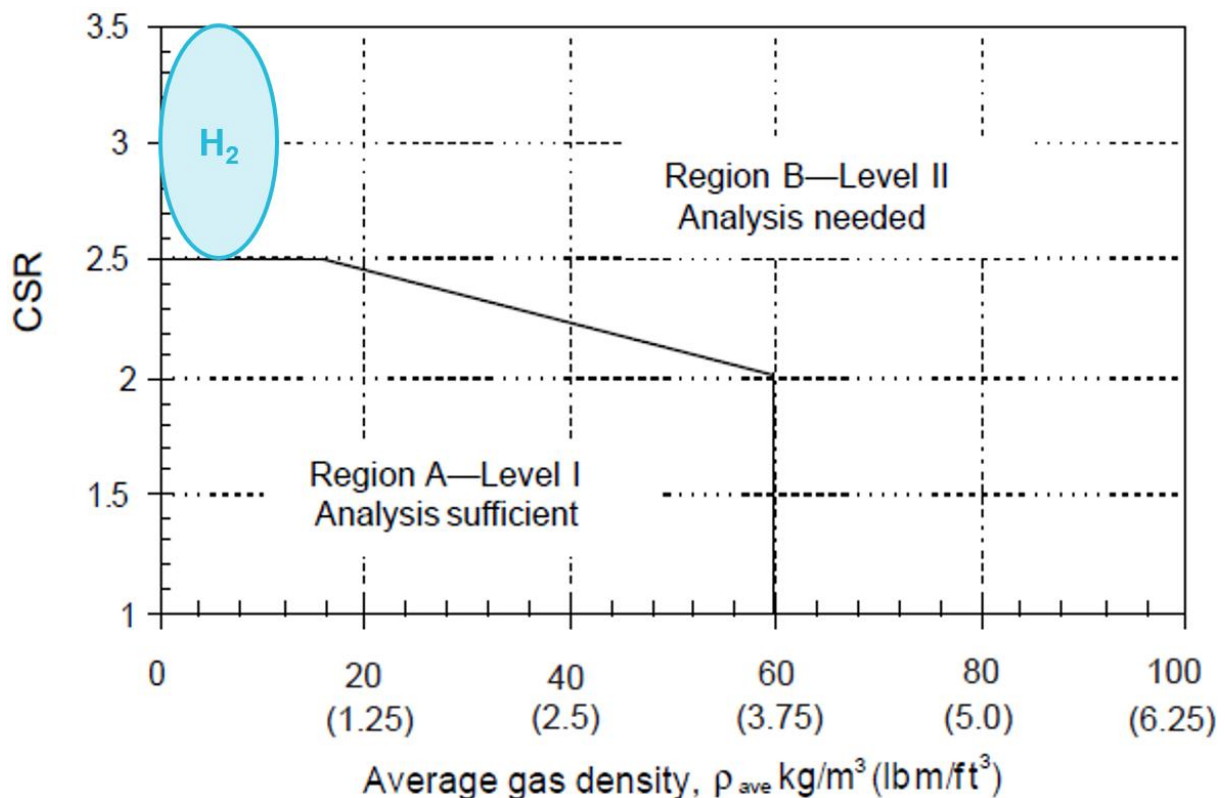


Abbildung 5: Gasdichte und starrkritisches Verhältnis von Kompressorrotoren für H_2 [2]

Die Vorwärtsmoden sind verhältnismäßig gut gedämpft, so dass eine rotordynamische Auslegung im Einklang mit den Kriterien der API617 [2] möglich ist. Die Dämpfung der Rückwärtsmoden liegt allerdings für alle untersuchten Lagertypen unterhalb des minimal zulässigen Wertes von $\text{LogDec} = 10\%$.

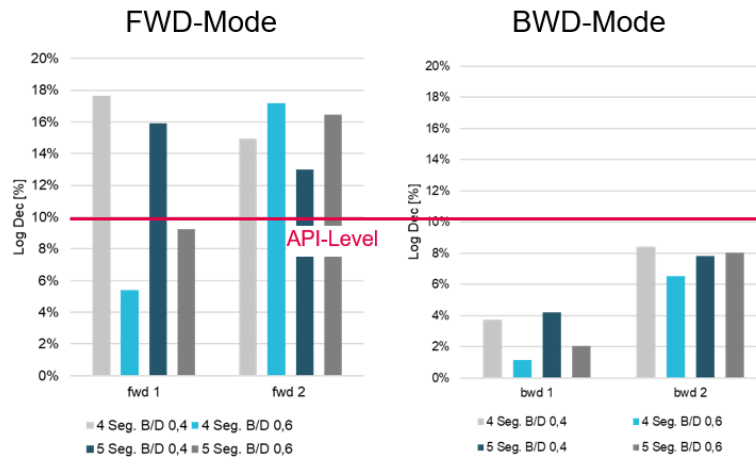


Abbildung 6: Dämpfung von Vorwärts- und Rückwärtsmoden für verschiedene Lagertypen

Die geringere Dämpfung kann zu größeren Amplituden bei den Rückwärtsmoden führen. Ob dies für den Betrieb relevant ist und wie stark die Rückwärtsmoden angeregt werden, soll durch geeignete Vergleichsrotoren experimentell untersucht werden.

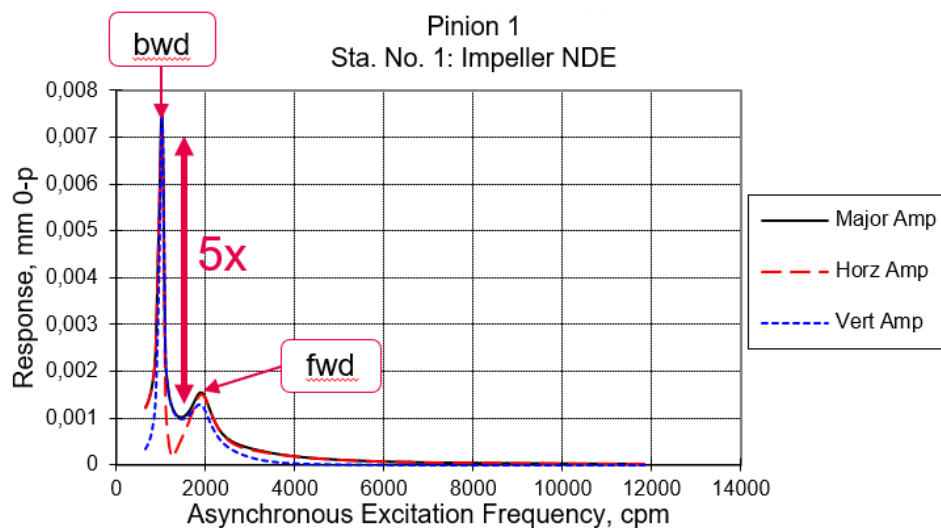


Abbildung 7: Systemantwort von Vorwärts- und Rückwärtsmoden

Da Laufräder für Wasserstoffkompressoren alle möglichst hohe Umfangsgeschwindigkeiten erreichen sollen, sind auf einem Rotor typischerweise zwei sehr ähnlich große Laufräder angeordnet. Daher sind die Überhangmassen auf beiden Seiten quasi identisch. Dies führt dazu, dass die entsprechenden Überhang-Biegemoden sehr nahe beieinander liegen. Um dem entgegenzuwirken wurden stark asymmetrische Wellengeometrien untersucht. Eine weitere Möglichkeit, um die Überhangmassen zu differenzieren, ist der Einsatz von Werkstoffen mit stark unterschiedlichen Dichten. Damit wird auf den Werkstoffuntersuchungen aus dem Vorgängerprojekt InnoTurbinE 1.2 aufgebaut.

2.5 Erprobungskonzept Rotorsteifigkeit (AP 1.3.7)

Auf Basis der in Arbeitspaket 1.3.6 identifizierten kritischen Punkte wurden mehrere Wellengeometrien entworfen, die in einem Versuchsträger mechanisch erprobt werden sollen. Die Vergleichswellen sind derart gestaltet, dass sie ein ähnlich niedriges starrkritisches Verhältnis, sowie vergleichbare logarithmische Dekremente aufweisen und sollen mit ähnlich niedrigen Lagerlasten betrieben werden, wie die Kompressorrotoren für Wasserstoff. Weiterhin soll der Einfluss der asymmetrischen Wellengeometrie untersucht werden. Zurzeit erfolgt die Detailkonstruktion der Wellen.

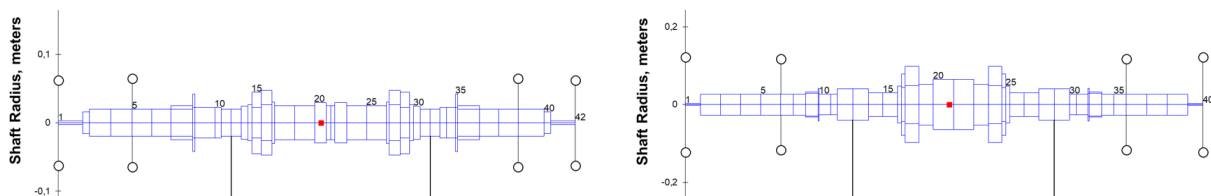


Abbildung 8: Kompressorrotor (links) und Vergleichswelle für experimentelle Untersuchung (rechts)

2.6 Maschinenelemente (AP 1.3.8)

Es werden neue Gleitlagerkonstruktionen für hohe Umfangsgeschwindigkeiten und Dämpfungen bei niedrigen Lasten untersucht. Die Lagerlasten hängen stark von der Gasdichte und damit vom Druck in den jeweiligen Kompressorstufen und den dazugehörigen Rotoren ab. Um die entsprechende Flexibilität zu erreichen, werden Lager mit verschiedenen Breiten-Durchmesser-Verhältnissen konstruiert, wodurch die Lagerpressung an die jeweiligen Einsatzfälle angepasst werden kann. So kann der bestmögliche Bereich an Lagersteifigkeit und Dämpfung optimal ausgenutzt werden.

3 Zusammenfassung

Im Rahmen von TurboHyTec 1.3 wird die Entwicklung von speziellen Wasserstoffstufen weitergeführt, welche bereits im Vorgängerprojekt InnoTurbinE AP 1.2 begonnen wurde. Die Aerodynamik wird zu höheren Volumenströmen hin erweitert, die für die Verdichtung von Wasserstoff aus Niederdruck-Elektrolyseanlagen erforderlich sind. Mit der neu entwickelten Stufe für große Volumenströme bei niedrigen Drücken kann die Baugröße der Kompressoren für diese Anwendungen signifikant reduziert werden. Die herausfordernden mechanischen Anforderungen für die hohen Umfangsgeschwindigkeiten, welche für die Verdichtung so leichter Gase notwendig sind, spielen auch für diese Laufradentwicklung eine dominierende Rolle. Zusätzlich zur Aerodynamik und Festigkeit der einzelnen Laufräder wird auch das Zusammenspiel mehrerer Wasserstoffstufen auf einem Rotor untersucht. Für einen zuverlässigen Kompressorbetrieb ist eine robuste Rotordynamik unerlässlich. Um das Betriebsrisiko zu reduzieren, werden auch die kritischen mechanischen Komponenten, wie Wellen und Gleitlager optimiert. Neben theoretischen rotordynamischen Untersuchungen werden Rotoren, Gleitlager sowie die Dämpfungseigenschaften experimentell validiert.

Aufgrund der beiden Havarien, die im Rahmen des Vorläuferprojektes InnoTurbinE am Prüfstand des IKDG in Aachen aufgetreten sind, können die thermodynamischen Versuche erst deutlich später als ursprünglich geplant durchgeführt werden.

Zusammen mit der in InnoTurbinE entwickelten Kompressorstufe deckt das vorgestellte Entwicklungsprojekt einen breiten Volumenstrombereich für die Speicherung, den Transport und die Aufbereitung von Wasserstoff ab und trägt somit einen signifikanten Teil zur Einführung dieser Technologien zur Dekarbonisierung bei.

4 Literatur

- [1] Cardella, U.; Decker, L.; Klein, H.: *Roadmap to economically viable hydrogen liquefaction*. In: International Journal of Hydrogen Energy 42 (2017) 19, S. 13329–13338.
- [2] American Petroleum Institute (2022): *API Standard 617 – Axial and Centrifugal Compressors and Expander-compressors*. Washington, DC: American Petroleum Institute.

Verdichtung

Verbundprojekt „DigiTecT - Digitalisierung und interdisziplinäre Auslegungstechnologien von Turbomaschinen für die Energiewende“

Teilverbundprojekt Verdichtung

Vorhabengruppe „Digitalisierung interdisziplinärer Auslegungsprozesse“

„Interdisziplinärer Auslegungsprozess für Aero-Strukturoptimierung“

Vorhaben-Nr.: 1.1

verfasst von

Ilya Arsenyev
Aryan Karimian

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das dem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wird von MTU Aero Engines AG und mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWE) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages unter dem Förderkennzeichen 03EE5116B gefördert.

Abstract

In this project, three building blocks for efficient interdisciplinary blade design were developed: consistent aero-structural simulation chain with a unified geometry definition across disciplines; efficient numerical optimization methods targeted at expensive interdisciplinary and high-dimensional problems; improvements in the design and optimization environment for the productive application of interdisciplinary processes and methods.

Adaptive response surface methods, available in the AutoOpti software, were enhanced with an interdisciplinary decision function (IDF) that enables optimal process control for interdisciplinary optimization. The combination of IDF and an interdisciplinary process with dynamic process control provided significant reduction in optimization time while simultaneously improving the optimum compared to optimization without IDF. Additionally, a gradient decision function was developed in AutoOpti to efficiently use adjoint sensitivities for high-dimensional optimization problems, which also reduces optimization time and computational effort. Novel AI models have been developed, that can be used as surrogate models for expensive CFD simulations, predicting multiple flow quantities for given blade geometries.

Kurzfassung

Im Projekt wurden drei Bausteine für eine effiziente interdisziplinäre Auslegung von Verdichterbeschaufelungen entwickelt: eine durchgehende Aero-Struktur-Simulationskette mit einer einheitlichen Geometriedefinition; effiziente numerische Optimierungsmethoden, die gezielt auf teure interdisziplinäre und hochdimensionale Probleme ausgerichtet sind; sowie die Erweiterung und Weiterentwicklung der Auslegungs- und Optimierungsumgebung für die produktive Anwendung interdisziplinärer Prozesse und Methoden.

Die adaptiven Antwortflächenverfahren (AutoOpti-Software) wurden um eine interdisziplinäre Entscheidungsfunktion (Interdisciplinary Decision Function, IDF) erweitert, die eine optimale Prozesssteuerung für die interdisziplinäre Optimierung ermöglicht. Die Kombination von IDF und einem interdisziplinären Prozess mit dynamischer Prozesssteuerung hat zu einer deutlichen Reduktion der Optimierungszeit und gleichzeitig zu einer Verbesserung des Optimums im Vergleich zu einer Optimierung ohne IDF geführt. Zusätzlich wurde in AutoOpti eine Gradientenentscheidungsfunktion entwickelt, um adjoint Sensitivitäten für hochdimensionale Optimierungsprobleme zu nutzen, was ebenfalls die Optimierungszeit und den Rechenaufwand reduziert. Neuartige KI-Methoden wurden entwickelt, die als Ersatzmodelle für teure CFD-Simulationen geeignet sind und mehrere Strömungsgrößen für gegebene Schaufelgeometrien vorhersagen können.

1 Einleitung

Die heutige Vorgehensweise einer aerodynamischen und strukturmechanischen Beschauelungsauslegung ist disziplinär und sequenziell organisiert, es gibt oft mehrere manuelle Iterationen zwischen den beiden Disziplinen. Der Detaillierungsgrad von Simulationen und Prozessen steigt kontinuierlich um die Entwicklung effizienter zukünftiger Turbomaschinen zu ermöglichen. Dafür wird ein interdisziplinärer Aero-Struktur Prozess benötigt, um die Auslegung ohne teilweise konservative oder vereinfachende Annahmen sowie ohne zusätzliche Designraumeinschränkungen zu ermöglichen und potenziell bessere optimale Lösungen zu entwickeln. Der Prozess dient als Grundlage für eine automatisierte fehlerfreie Bewertung und befähigt eine interdisziplinären Optimierung und Robustheitsanalyse. Der Schritt von einer disziplinären zur interdisziplinären Auslegung macht die Problemstellung noch komplexer, inhomogener, mit zusätzlichen interdisziplinären Schnittstellen, unterschiedlichen Design-Parameter-Sensitivitäten, unterschiedlichen HPC-Anforderungen usw.

Um diese komplexen interdisziplinären und hochdimensionalen Auslegungsaufgaben für state-of-the-art Verdichterdesign effizient lösen zu können, werden im Projekt entsprechende Prozesse und Methoden erarbeitet. Dafür sind drei Bausteine nötig: durchgehende Aero-Struktur-Simulationsketten mit einer einheitlichen Geometriedefinition; effiziente numerische Optimierungsmethoden, die auf teure interdisziplinäre und hochdimensionale Probleme gezielt sind; sowie die Erweiterung bzw. Weiterentwicklung der Auslegungs- und Optimierungsumgebung für die produktive Anwendung interdisziplinärer Prozesse und Methoden.

2 Detaillierung

Problemstellung:

Als erster Schritt im Projekt wurden Auslegungsschritte und Aufgaben analysiert um Anwendungsszenarien zu identifizieren, wo interdisziplinäre Optimierung besonders wertvoll wäre. Daraus wurden zwei Anwendungsszenarien abgeleitet:

- Szenario 1: 3D Aero-Struktur Optimierung von Rotoren. Der Schritt findet nach einer Pre-Design Phase statt, wenn der Verdichter schon aerodynamisch grob in 3D ausgelegt wurde und die erste 3D Geometrieentwurf vorhanden ist. Danach folgen Iterationen zwischen Strukturmechanik und Aerodynamik, mit dem Ziel strukturmechanische Anforderungen zu erfüllen und die erreichte aerodynamische Performance nicht zu verschlechtern.
- Szenario 2: 3D Aero-Struktur mehrstufige Optimierung. Der Schritt ermöglicht ein nah finales Design fein zu schleifen, indem detaillierte aerodynamische Optimierung im großen Kontrollvolumen durchgeführt (z.B. Frontblock) wird unter Einhaltung von den schon erfüllten strukturmechanischen Anforderungen.

Um die Aufgaben zu lösen, wurden zunächst Anforderungen für die Simulationsprozessketten formuliert und besondere Problemeigenschaften aus der Optimierungssicht analysiert. Für das Szenario 1 es ist üblich, dass Optimierungsproblem nicht sehr hochdimensional ist (ca. 20-50 Freiheitsgraden), hat aber sehr viele strukturelle Nebenbedingungen, die für das Baseline-Design verletzt sind. Gleichzeitig muss so eine Optimierung mehrmals wiederholt werden, weil einige Anforderungen von Anfang an nicht eindeutig spezifiziert werden kann (z.B. Anforderungen für Frequenzen, Campbell Diagramm). Das Szenario 2 dagegen fasst viele Freiheitsgraden um (>100), hat aber eine gute Startlösung, die alle Anforderungen schon erfüllt. CFD Simulationen sind aber deutlich teurer als im Szenario 2, da das Modell mehrere Verdichterstufen umfasst. Was bei den beiden Szenarien ähnlich ist, ist das die involvierte disziplinäre Analysen (Strukturmechanik, Aerodynamik, Geometriegenerierung) deutlich unterschiedliche Laufzeiten haben. Um die Probleme effizienter zu lösen, wurden im Projekt folgende Anforderungen für Methoden(weiter-)entwicklung vorgeschlagen:

- Existierende Antwortflächen-basierte Optimierungstool AutoOpti (DLR) weiter zu entwickeln, um interdisziplinäre Optimierung zu beschleunigen durch Ausnutzen von der heterogenen Struktur des interdisziplinären Problems und intelligente Prozesssteuerung.
- Existierende Antwortflächen-basierte Optimierungstool AutoOpti (DLR) weiter zu entwickeln, um Optimierung für hochdimensionale Probleme zu beschleunigen durch einer optimalen Verwendung von adjoint Sensitivitäten.
- Neuartige KI-basierte Approximationsmethoden entwickeln, um teure (im Vergleich mit FEM) CFD Simulationen während Optimierung zu ersetzen.

Methodenentwicklung

Optimierung mit interdisziplinärer Entscheidungsfunktion für optimale Prozesssteuerung

Interdisziplinäre Optimierung braucht viele disziplinäre Simulationen, die für jeden Designpunkt alle ausgeführt werden. Das erhöht Optimierungszeit und Auslastung vom HPC Infrastruktur, und reduziert Parallelisierungspotenzial. Gleichzeitig nicht alle disziplinäre Ergebnisse immer für den Optimierungsverlauf entscheidend sind. Eine Herausforderung ist rauszufinden, wie die interdisziplinäre Optimierung effizienter durchgeführt werden kann, wenn Disziplinen unterschiedliche Laufzeiten haben und nicht immer alle Disziplinen für jeden Designzustand entscheidend sind. Z.B. es passiert oft das ein Design aerodynamisch gut ausgelegt ist, verletzt aber strukturelle Anforderungen. In dem Fall am Anfang einer Optimierung wäre Strukturmechanik entscheidende Disziplin. Während einer ersatzmodellbasierten Optimierung könnte ein Stand erreicht werden, wenn die Approximation für eine Disziplin gut genug ist, und Simulationen nur noch für andere Disziplinen benötigt werden, um Ersatzmodellqualität zu verbessern.

Grundsätzlich um interdisziplinäre Optimierung effizienter zu gestalten, müssen nur die Disziplinen ausgeführt werden, die bei dem erreichten Optimierungsstand für weitere Schritte Mehrwert bringen, unter Berücksichtigung von der Laufzeit. Der Mehrwert einer Disziplin kann nach verschiedenen Kriterien für „Wichtigkeit“ bewertet werden, z.B.:

- Ob es aktive verletzte NB bei der Disziplin gibt
- Wie hoch ist Verbesserungspotenzial pro Zeit
- Wie genau sind entsprechende Ersatzmodelle
- Usw.

Eine heuristische interdisziplinäre Entscheidungsfunktion, die alle Kriterien mit bestimmter Gewichtung zusammenführt, wurde vom DLR vorgeschlagen und in AutoOpti Optimierungssoftware umgesetzt. Damit wird für jeden neuen Member entschieden, welche Disziplin(en), oder Ergebnisgruppen, benötigt werden.

Während in Reviews wie [1, 2] die vielen verschiedenen Ansätze im Bereich der multidisziplinären Optimierung kategorisiert werden und Arbeiten wie [3] problemspezifisches Vorwissen in der multidisziplinären Turbomaschinenoptimierung einbringen, fehlt es an dynamischen Strategien zur Steuerung und Koordinierung der Prozessketten zur Berechnung verschiedener Größen wie im multidisziplinären Kontext.

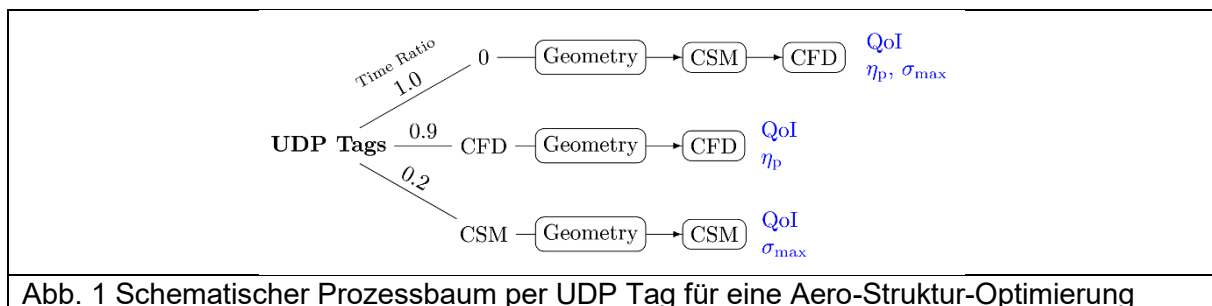
Methoden des Machine Learning bieten geeignete Möglichkeiten adaptive Strategien zu erlernen und entsprechende Entscheidungen zu treffen. Allerdings erfordern sie viele Daten und Interaktionen, um zuverlässige Strategien zu entwickeln [4], was angesichts der hohen Rechenkosten der vorliegenden Designoptimierungen nicht realisierbar ist. Anstatt einen kostspieligen Lernprozess von Grund auf zu initiieren, ist es wünschenswert, diese Entscheidungen auf dem verfügbaren System- und Problemwissen aufzubauen.

Ein einfacherer und transparenterer Ansatz für die automatisierte Entscheidungsfindung liegt in der Verwendung von Heuristiken oder Entscheidungsbäumen. Diese Methoden basieren auf vorherigem Problembewusstsein und funktionieren nach explizit definierten Regeln, wobei Varianten jedoch auch Stochastizität beinhalten können. Man kann sich einen erfahrenen Designer vorstellen, der den Optimierungsprozess kontinuierlich überwacht und die Teilprobleme koordiniert, indem er die Bewertung der relevantesten Qols während der Laufzeit priorisiert. Die entwickelte Entscheidungsfunktion dient als automatisierte Überwachungsinstanz für eine dynamische Prozesskettensteuerung (DPCC), die solche expertengesteuerten Entscheidungen initiiert. Das Framework ermöglicht die einfache Integration von Reaktionen auf bestimmte Szenarien, die ein erfahrener Benutzer typischerweise erwarten würde.

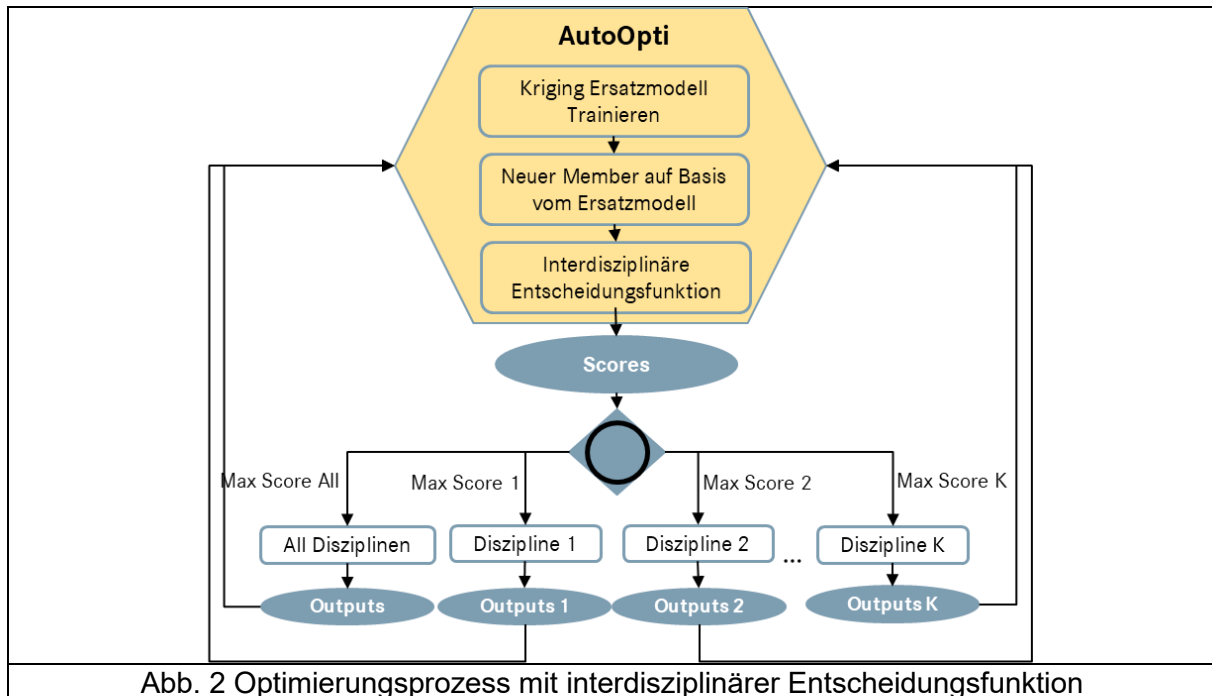
Die Entscheidungsfunktion basiert auf Heuristiken, die innerhalb eines Entscheidungsbaumes bestimmte Fälle während des Optimierungsprozesses detektieren. Diese Fälle werden anschließend durch die Ausführung einer untergeordneten Prozesskette innerhalb der gesamten zusammengesetzten Prozesskette behandelt. Auf diese Weise kann die

Berechnung von Größen, die für den aktuellen Optimierungsfortschritt von geringerer Relevanz sind, temporär übersprungen werden und eine dynamische Prozesskettensteuerung hergestellt werden. Je nach Aufwandsunterschieden der einzelnen Prozessketten resultieren dadurch signifikante Zeitersparnisse. Um dies zu ermöglichen, muss die gesamte Prozesskette zunächst in Segmente zerlegt werden, die jeweils mindestens eine Größe berechnen. In AutoOpti wird die Prozesskette durch die sogenannte benutzerdefinierte Prozesskette (UDP) definiert. Durch die Zuweisung von Tags zu den Prozessen können sie in separate untergeordnete Prozessketten gruppiert werden. Wir bezeichnen diese Tags als UDP Tags.

Abb. 1 zeigt einen beispielhaften schematischen Prozessbaum für ein Aero-Struktur-Optimierungsproblem, wobei die vollständige Prozesskette sowohl Computational Fluid Dynamics (CFD) als auch Computational Structural Mechanics (CSM) umfasst. Zusätzlich zu der vollständigen Prozesskette, die dem UDP Tag "0" entspricht, stellen zwei weitere Zweige die untergeordneten Prozessketten dar, die durch die UDP Tags "CFD" und "CSM" definiert sind. Die „Time Ratio“ gibt das Verhältnis der Laufzeit einer bestimmten Prozesskette zu der der vollständigen Prozesskette an und geht zusammen mit anderen Parametern in die Entscheidungsmethodik ein, um die o.g. Kriterien auszuwerten. Dazu gehören: Kriging-Güteparameter, Nebenbedingungswerte, Ersatzmodellvorhersagen und Informationsentropie aus übersprungenen Berechnungen.



Das Verfahren wurde ins MTU Optimierungssystem OPUS integriert. Zuerst wird, basierend auf einer Initialisierung Prozesskettendurchlauf die Laufzeiten bestimmt, um jede Ergebnisgruppe (oder Disziplin) zu berechnen. Die Information, zusammen mit der Gruppierung in Disziplinen wird als Input für AutoOpti bereitgestellt. Die Funktionalitäten für optimale Prozesssteuerung, die MTU seitig umgesetzt wurden, erlauben je nach Entscheidung, welche Ergebnisse für einen Member gebraucht werden, nur entsprechende Prozessteile auszuführen (anhand von einer Prozessgraphenanalyse). Die Auswertung einzelnen Members läuft parallel und asynchron, damit müssen schnellere Members, die z.B. nur strukturelle Ergebnisse liefern nicht auf teurere Members mit CFD Simulationen warten. Sobald ein Member fertig ist, wird ein neuer von AutoOpti erstellt, inkl. Information, welche Ergebnisse benötigt werden. Optimierungsloop ist schematisch auf Abb. 2 dargestellt.



Optimierung mit Gradientenentscheidungsfunktion für hochdimensionale Probleme mit adjoint Sensitivitäten

Um aerodynamische Optimierung für hochdimensionale Probleme zu beschleunigen könnte lokale Sensitivitäten verwendet werden:

- Lokale Sensitivitäten erlauben globale Ersatzmodelle (Gradient Enhanced Kriging, GEK) mit wenigen Samples zu trainieren
- Lokale Sensitivitäten werden effizient mit einem adjungierten CFD-Löser berechnet
- Synergie aus lokale Information und globale Ersatzmodelle → effiziente globale Optimierung für hohe Dimensionen

Es gibt aber gleichzeitig einige Herausforderungen:

- Adjungierte CFD Rechnungen sind teuer und brauchen mehr Resources/Zeit
- Durch zusätzliche Sensitivitätsinformation steigt GEK Modellgröße sehr schnell, was zu längeren Trainingszeiten führt.

Die Sensitivitätsinformation besonders wertvoll in Bereichen, wo Ersatzmodelle wenige Daten und höhere Ungenauigkeit haben, damit ein Trend in dem Bereich besser vom Modell gelernt werden kann. Deswegen wurde vom DLR die vorhergesagte Gaußprozessvarianz vom neuen Member im Vergleich mit vorherigen Members als Kriterien vorgeschlagen. Damit wird entschieden, ob Sensitivitäten für neuen Member einen Mehrwert während Optimierung bringen können.

Die Entscheidung hängt von der Anzahl der einzubeziehenden vorherigen Members und der Repräsentation derer Gaußprozessvarianzen ab. Die Anzahl ist vom Benutzer vorzugeben. Sie sollte möglichst aktuelle Members bzw. Varianzvorhersagen einbeziehen, aber auch groß genug sein, um repräsentativ zu sein. So kann sich diese Anzahl bspw. nach der Anzahl parallel berechneter Members in AutoOpti richten. Die Varianz des neuen Members wird mit einem Quantil der Varianzen der vorherigen Members verglichen. Die Wahl des Quantils durch den Benutzer beeinflusst die Strenge des Kriteriums. Ein Quantil von 0,5, bedeutet z.B., dass Sensitivitäten für den neuen Member nur berechnet werden, wenn dessen Varianz größer als die Hälfte aller Varianzen der vorherigen Members ist, während ein Quantil von 1 bedeutet, dass die Varianz des neuen Members größer als alle vorherigen sein muss, damit Sensitivitäten berechnet werden. Auf diese Weise kann die zusätzliche Berechnung von Sensitivitäten auf solche Members beschränkt werden, für die eine verhältnismäßig hohe Unsicherheit im Gaußprozess vorliegt.

Das Verfahren wurde ins MTU Optimierungssystem OPUS integriert. Innerhalb einer aerodynamischen Prozesskette wurden zwei Äste definiert: einer für „normale“ CFD, und der andere für adjungierte CFD. Die Funktionalitäten für optimale Prozesssteuerung, die MTU seitig umgesetzt wurden, erlauben je nach Entscheidung entweder einer oder anderer Ast auszuführen. Die Auswertung einzelnen Members läuft parallel und asynchron, damit müssen schnellere Members ohne adjoint CFD nicht auf teureren adjungierten Simulationen warten. Sobald ein Member fertig ist, wird ein neuer von AutoOpti erstellt, inkl. Information, ob Sensitivitäten benötigt werden. Optimierungsloop ist schematisch auf Abb. 3 dargestellt.

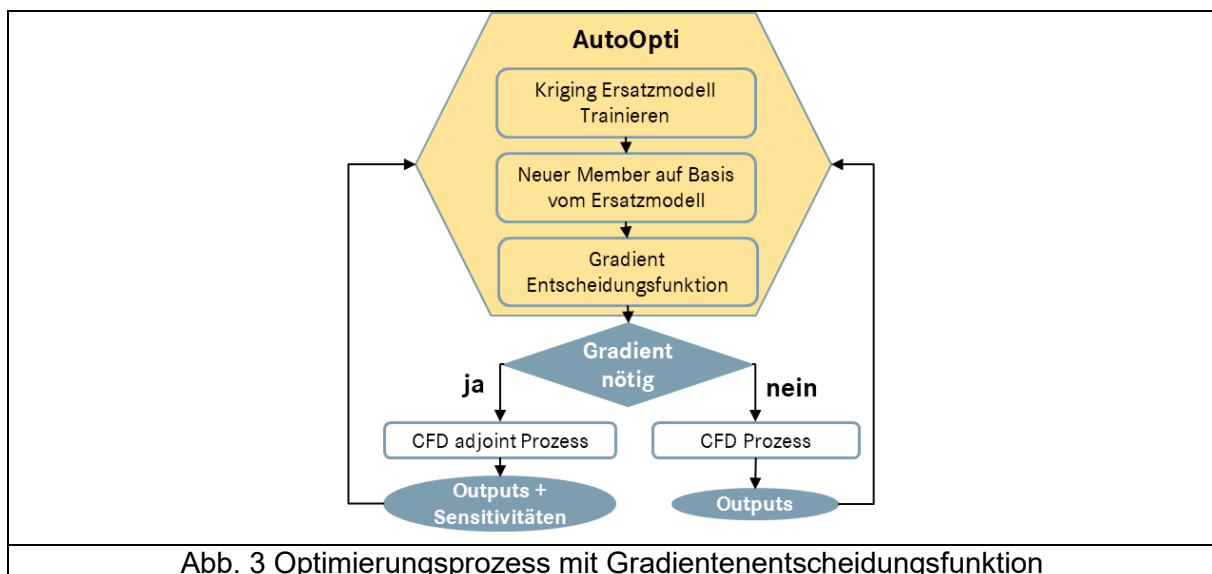


Abb. 3 Optimierungsprozess mit Gradientenentscheidungsfunktion

KI Modelle als Ersatz für teure CFD Simulation im interdisziplinären Kontext

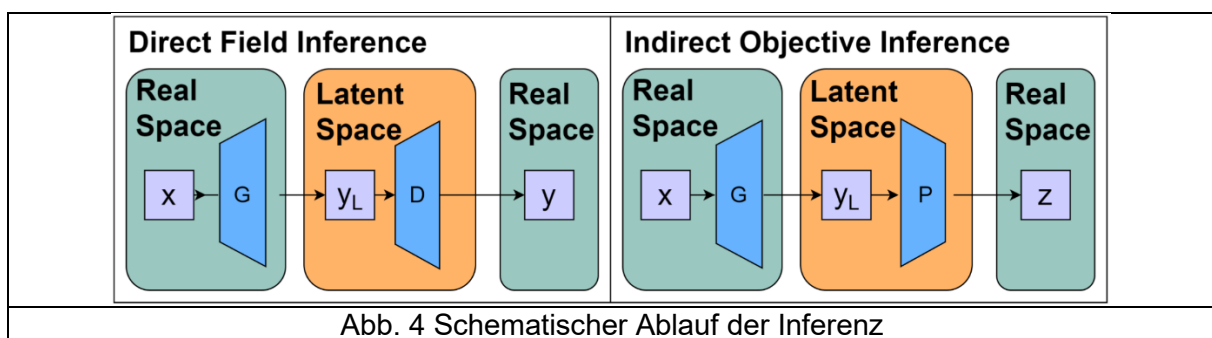
Im Rahmen von Optimierungen, Parameterstudien oder Unsicherheitsquantifizierungen mit dem Ziel, die aerodynamische oder strukturelle Leistung von Turbomaschinenmodulen wie Kompressor- oder Turbinenstufen zu verbessern, ist die Fähigkeit, eine schnelle und ausreichend genaue Konstruktionsbewertung durchzuführen, eine entscheidende Voraussetzung. Da Studien dieser Art die Durchführung zahlreicher Simulationen der Computational Fluid Dynamics (CFD) und der Computational Structural Mechanics (CSM) erfordern, benötigen sie eine erhebliche Rechenleistung. Daher ist die Verwendung sogenannter Ersatzmodelle wie z.B. polynomiale Response Surface Methoden [5], Kriging [6-8], radiale Basisfunktionen [9] und Support Vector Regression [10], oder auch Reduced Order Modelle (ROM), die in einen Multidimensionalen Raum abbilden, eine gängige Praxis. Diese Methoden dienen der Beschleunigung der Verfahren, da sie in der Lage sind, die erforderlichen Strömungs- und Strukturgrößen mit einer akzeptablen Genauigkeit in relativ kurzer Zeit vorherzusagen. Insbesondere ROMs erlauben die Nutzung der teuren Information aus 3D CFD und CSM im Training der Modelle.

Generative KI bietet mit tiefen neuronalen Netzen eine geeignete Methode zur Approximation von Feldgrößen nichtlinearer Probleme. Variationen von Graph Neural Networks [11] und Convolutional Neural Networks [12,13] dienen der Vorhersage von 3D Strömungen und sind daher als CFD-Ersatz geeignet. Allerdings sind sie möglicherweise nicht die geeignetsten für Optimierungsaufgaben, da ihre Inputs nicht aus freien Optimierungsvariablen wie bei klassischen Ersatzmodellen bestehen, sondern aus 3D-Geometrien oder Netzen. Darüber hinaus bestehen ihre Outputs auch nicht aus den integralen Optimierungszielen, und der Zeitaufwand für das Training ist recht hoch.

Daher soll der Vorteil beider Modelle genutzt werden: Die schnellen Approximationen von Zielfunktionen und Nebenbedingungen ähnlich wie bei klassischen Ersatzmodellen und die weitere Verwendung der riesigen Menge an Feldinformation wie bei modernen KI-Methoden. Darüber hinaus sollte es möglich sein, neue integrale Zielfunktionen auf der Grundlage der zweidimensionalen Generatorausgabe zu definieren und diese dann direkt unter Verwendung der von den Modellen bereitgestellten Gradienten zu optimieren. Mit diesen Zielen vor Augen wurde ein datengetriebenes KI-Modell entwickelt. Zu diesem Zweck werden tiefe neuronale Netze auf Basis einer Transformer-Architektur verwendet.

Der Gesamtprozess ist in zwei Teilmodelle unterteilt: Ein Generator-DNN, um den Vektor der freien Optimierungsvariablen auf eine Reihe von 2D-Bildern von Strömungs- oder Strukturgrößen abzubilden, die durch die zeitaufwändigen CFD- und CSM-Simulationen gegeben sind. Für CFD können diese 2D-Felder beispielsweise umfangsgemittelte Strömungen auf S2-Flächen, blade to blade Schnitte auf S1-Flächen oder Eintritts- bzw. Austrittsflächen auf S3-Flächen sein. Tatsächlich wird hier ein zusätzlicher Autoencoder verwendet, sodass der Generator nicht direkt die physikalischen 2D-Felder erzeugt, sondern deren Darstellung im latenten Raum. Der Vorteil der Dimensionsreduktion von den tatsächlichen 3D-Simulationsergebnissen zu 2D-Bildinformationen (bzw. deren latenter

Darstellung) liegt hauptsächlich in den numerischen Kosten in Bezug auf GPU-Stunden und Speicher. Der Inferenz-Prozess ist schematisch in Abb. 4 dargestellt. Hier steht x für die freien Variablen, G für den Generator, y_L für die latente Darstellung, D für den Decoder-Teil des Autoencoders und y für die Feldvorhersage. Während in der „Direct Field Inference“ das 2D Feld vorhergesagt wird, leitet bei der „Indirect Objective Inference“ ein zweites Netzwerk P die 0D Performancevariablen ab und berücksichtigt dabei diese latenten Felder als Eingabe. Der große Vorteil dieses Ansatzes für die Optimierung von Turbomaschinen besteht darin, dass er die mehrdimensionalen Informationen aus den aufwendigen Simulationen nutzt und dennoch nur sehr kurze Trainingszeiten benötigt, um die relevanten Integralwerte zu approximieren.



Testkonfiguration

Ein integraler Testfall für detaillierte 3D Optimierung vom HDV Frontblock umfasst eine 4-stufige Konfiguration, die aerodynamisch sowie strukturell bewertet wird (siehe Abb. 5).

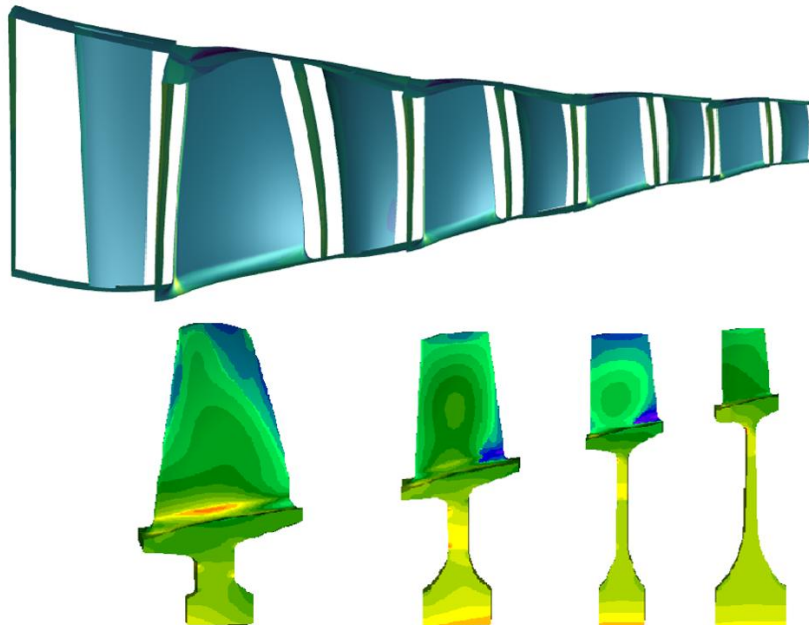


Abb. 5: Aero-Struktur Bewertung vom HDV Frontblock

Für detaillierte Optimierung werden feinaufgelöste aerodynamische (CFD) und strukturelle (FEM) Simulationen benötigt. Das vorbereitete Setup berücksichtigt folgende Features:

- Feinparametrisierte Geometriedefinition mit Fillets, Gaps, usw.
- CFD für mehrstufige HDV Konfiguration
- Subsonische und transsonische Rotoren, was KI Modelle herausfordern sollte
- 2 Betriebspunkte mit 2 Drehzahlen (100% Cruise und 85% Teillast)
- Statische und Modalanalyse mit Campbell Diagramm für alle vier Rotoren

Schwerpunkt dieses Testfalles liegt bei der Optimierung von Rotoren, während Statoren nur auf 3 radialen Positionen verstellt werden können und nicht strukturell bewertet werden. Insgesamt mit üblicher Parametrisierung, die für Aero-Struktur Optimierung verwendet wird, werden ca. 240-250 freie Parameter benötigt. Mit einer feineren Parametrisierung, insb. für komplexen R1 und R2 Geometrien könnte die Anzahl noch um 20-40 Parameter steigern. Als Ziel wird Effizienz für Cruise definiert, mit einer großen Anzahl von Nebenbedingungen, die aus geometrischen Anforderungen, Teillast und Strukturmekanik kommen. Die Dauer einer Bewertung beträgt je nach Design ca. 3-6 Std.

(für jede CFD Berechnung wurden 32 CPUs verwendet, für FEM 6 CPUs. FEM dauert in der Regel < 10Min.). Mit dem Setup ist es möglich verschiedene Anwendungsszenarien für Ersatzmodelle mit einem industrieähnlichen Testfall zu herausfordern.

Anwendungsbeispiele

Ersatzmodellbasierte Optimierung mit adjoint Sensitivitäten und Gradientenentscheidungsfunktion

Für eine Validierung und Tests von einer ersatzmodellbasierten Optimierung mit Gradientenentscheidungsfunktion wird zuerst ein vereinfachtes Testfall verwenden, nämlich aerodynamische Optimierung einer Hochdruckverdichterstufe (Stufe 2 von der 4-Stufigen HDV Frontblockkonfiguration). Rotorgeometrie ist mit insgesamt 27 Freiheitsgraden parametrisiert, der Stator wird nicht variiert. Das Ziel der Optimierung ist eine Effizienzverbesserung unter Einhaltung vom Betriebspunkt und Austrittsinterfacegrößen (z.B. Strömungswinkel).

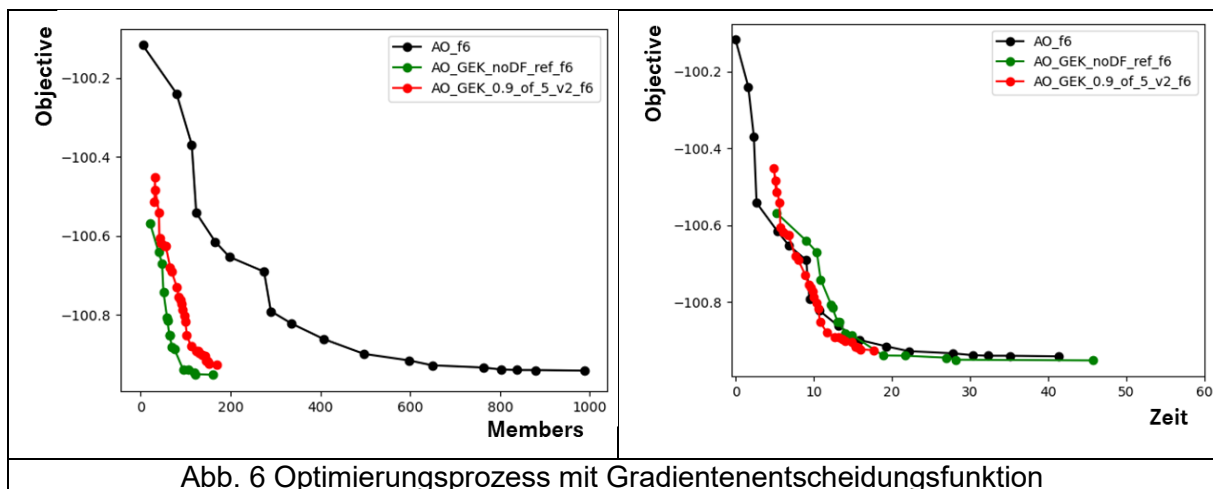
Automatisierte Simulationsprozesskette beinhaltet Geometriegenerierung, Vernetzung und CFD Simulation. Während CFD Löser adjungierte Sensitivitäten bzgl. Netzknoten berechnen kann, Geometriegenerierung und Vernetzung sind nicht differenzierbar. Deswegen wird hybride Prozesskette benutzt, die schon in den früheren Berichten erwähnt wurde. Das führt dazu, dass für jedes Sample die Geometrie mittels Variation jedes einzelnen Freiheitsgrads perturbiert (in dem Fall 27 Mal) und vernetzt werden muss. Die CFD-Simulation läuft für den Referenzpunkt im adjungierten Modus und liefert dabei Netzsensitivitäten. Diese Netzsensitivitäten und die durch Einzelparametervariationen erstellten deformierten Netze werden benutzt, um wiederum Sensitivitäten von Ausgangsgrößen bzgl. Geometrieparameter zu berechnen.

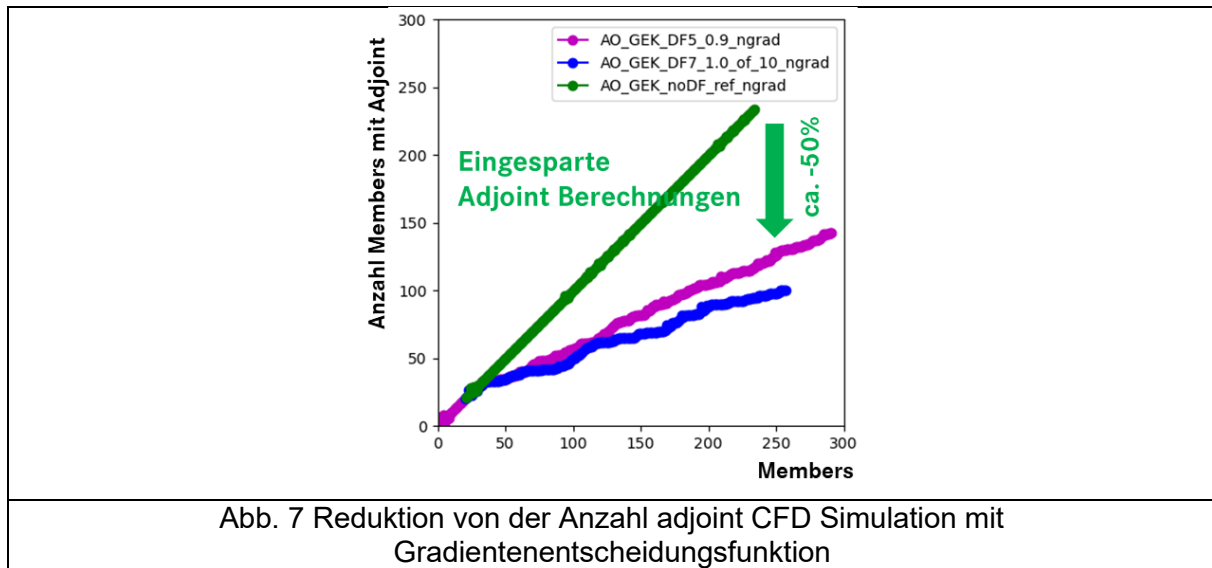
Es wurden folgende Optimierungen in dem Berichtszeitraum durchgeführt:

- Referenzoptimierung mit AutoOpti und Ersatzmodelle ohne Sensitivitäten (20 Designs parallel)
- AutoOpti Optimierung mit Sensitivitäten ohne Entscheidungsfunktion, wo adjoint Sensitivitäten für jeden Member gerechnet werden (6 Designs parallel)
- AutoOpti Optimierungen mit Entscheidungsfunktion und zwei unterschiedliche Varianzgrenzwerte für eine Entscheidung (6 Designs parallel)

Es ist wichtig zu erwähnen, dass für alle Optimierungen mit Sensitivitätsinformation die gleiche initiale Datenbank mit 24 Members verwendet wird, sodass die Verläufe direkt vergleichbar sind, während für die Referenzoptimierung eine andere Datenbank mit 61 Members ohne Sensitivitätsinformation verwendet wird.

Die Verläufe von Referenzoptimierung und adjungierte Optimierungen mit und ohne GDF sind auf Abb. 6 dargestellt. Es ist klar sichtbar, dass Optimierungen mit Sensitivitätsinformation deutlich weniger Members brauchen, im Vergleich mit der Referenzoptimierung. Allerdings sind adjungierte CFD Simulationen und GEK Training teure. Gleichzeitig liefert Optimierung mit Sensitivitätsinformation leicht besseres Ergebnis, als die Referenzoptimierung. Die neuartige GDF beschleunigt die adjungierte Optimierung mit GEK (um ca. 20%) und liefert fast gleiches Ergebnis. Es werden mit GDF deutlich weniger teuren adjoint CFD Simulationen ausgeführt. Mit nur 27 Freiheitsgraden ist die GEK Optimierung mit GDF schon schneller als die Referenzoptimierung. Um das Effekt von GDF zu zeigen, wurde die Anzahl von Members mit adjoint CFD über gesamte Anzahl von Members während einer Optimierung geplottet (Abb. 7). Für Optimierung ohne GDF ist die Anzahl immer gleich (grüne Linie), während zwei Optimierungen mit GDF (mit weniger und mehr aggressiven Einstellungen) erlauben ca. 50% bzw. 60% von adjoint Simulationen zu sparen. Die erste Studie zeigt Vorteile von Ersatzmodellbasierte Optimierung mit adjoint Sensitivitäten, insb. mit der Gradientenentscheidungsfunktion, schon in relativ niedriger Dimension. Für hochdimensionale Probleme mit ~100 Freiheitsgraden ist noch deutliche Beschleunigung ist erwartet.





Interdisziplinäre ersatzmodellbasierte Optimierung mit interdisziplinärer Entscheidungsfunktion für optimale Prozesssteuerung

Die entwickelte interdisziplinäre Optimierungsmethode wurde für Aero-Struktur Optimierung eines Rotors angewendet. Initialer Design ist schon aerodynamisch gut ausgelegt, verletzt aber viele strukturelle Anforderungen, u.a. statische Spannungen und Frequenzanforderungen.

In dem Testfall wird die Stufe 4 eines Hochdruckverdichters optimiert. Folgende Anforderungen sollten mit der Optimierung erfüllt werden:

- Aerodynamische Effizienz für ADP (Cruise) muss nicht verschlechtert, unter Einhaltung von ADP Betriebsbedingungen
- Das Verhalten von der Stufe für Teillast Betriebsbedingungen muss nicht verschlechtert
- Statische Spannungen (Redline Betriebsbedingungen) für auf der Vorderkante müssen so viel wie möglich reduziert werden, während statische Spannungen für andere Bereiche innerhalb der vorgegebenen Grenzen liegen müssen. Baseline Design verletzt die Anforderungen für statische Spannungen deutlich.
- Campbell Diagramm muss optimiert werden, um gefährliche Resonanzen im Betriebsbereich auszuschließen. Zusätzlich müssen Abstände zwischen Eigenfrequenzen begrenzt werden und Mode Switches vermieden werden.
- Dazu kommen noch einige geometrische Nebenbedingungen, z.B. aus der Fertigung.

Um ein Design gegen Anforderungen zu bewerten, wurde eine interdisziplinäre Simulationsprozesskette aufgesetzt, die folgende Analyse beinhaltet:

- Aerodynamische CFD Berechnung für ADP und für einen angedrosselten Punkt
- Aerodynamische CFD Berechnung für Teillast und für einen angedrosselten Punkt
- FEM statische strukturmechanische Analyse für Redline Betriebsbedingungen
- FEM Modalanalysen für Teillast und Redline Betriebsbedingungen

Insgesamt laufen pro Auswertung 4 CFD und 3 FEM Simulationen, die alle parallel gestartet werden (die Gaslasten für FEM werden aus 2D aerodynamische Rechnung genommen, was für schnelldrehende Rotoren genügend gute Ergebnisqualität liefert).

Rotorgeometrie wurde mit 29 Freiheitsgraden parametrisiert, die ermöglichen Staffellungswinkel, Bladewinkel an der Vorder- und Hinterkante, Profildickenverteilung, Sehnenlänge, und Lean auf einer Deltabasis zu variieren. Das Optimierungsproblem ist als Mehrzieloptimierung formuliert, mit zwei Zielfunktionen: gewichtete statische Spannungen und Effizienz@ADP. Andere Anforderungen (inkl. untere Grenze für Effizienz@ADP) werden als insgesamt 63 Nebenbedingungen definiert.

Es wurden folgende Optimierungen in dem Berichtszeitraum durchgeführt:

- Zwei Referenzoptimierungen mit AutoOpti und Ersatzmodelle ohne interdisziplinäre Entscheidungsfunktion. Für jeden Member wird in dem Fall immer die gesamte Prozesskette ausgeführt und entsprechen alle Ersatzmodelle aktualisiert
- Optimierung mit IDF drei Mal wiederholt, um stochastische Effekte zu minimieren (IDF basiert auf mehreren Kriterien, die während Optimierung unterscheiden können, was zu unterschiedliche Verläufe führen kann). Es sind noch weitere Tests mit IDF geplant.

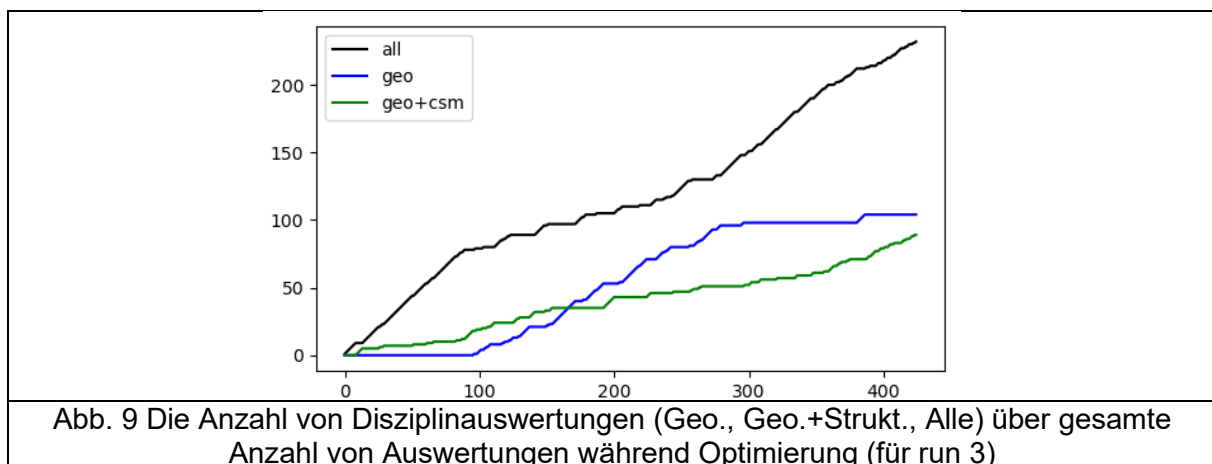
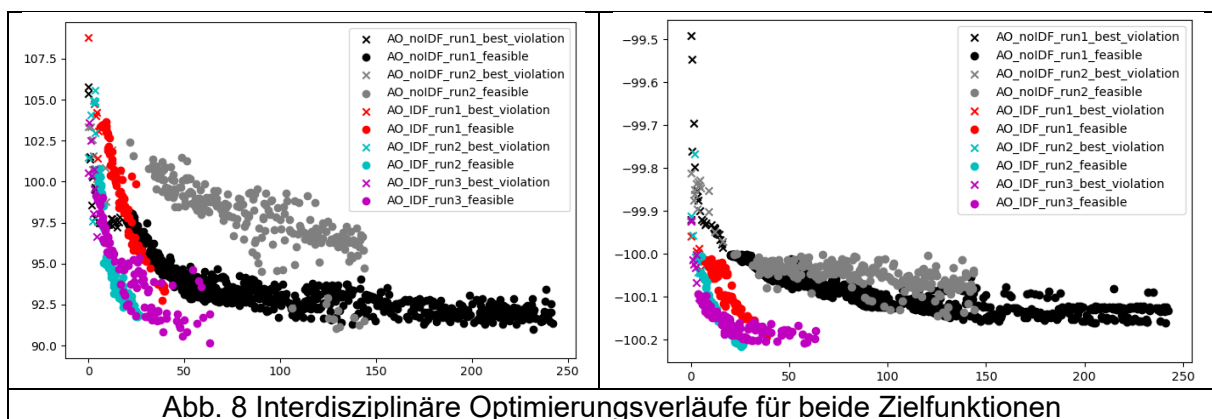
Für alle Optimierungen wird die gleiche initiale Datenbank mit 208 Members verwendet, so dass Optimierungen besser vergleichbar sind.

Für Optimierungen mit IDF wurden 3 Ergebnisgruppen definiert:

- Gruppe mit allen Ergebnissen, Laufzeitanteil 1
- Gruppe mit geometrischen Ergebnissen, Laufzeitanteil 0.03
- Gruppe mit strukturmechanischen und geometrischen Ergebnissen, Laufzeitanteil 0.15

Die Laufzeitanteil definieren wie teuer eine Untermenge von Ergebnissen zu berechnen, im Vergleich mit der gesamten Prozesskette. Je nach Anwendung, das kann benötigte Wandzeit oder z.B. CPU Zeit widerspiegeln. Für diesen Testfall wurden die Anteil entsprechen benötigter Wandzeit gesetzt. Da Simulationen parallel laufen, im dem Fall mach es keins Sinn einzelne CFD Simulationen in Gruppen zu teilen, da die alle ungefähr die gleiche Zeit brauchen.

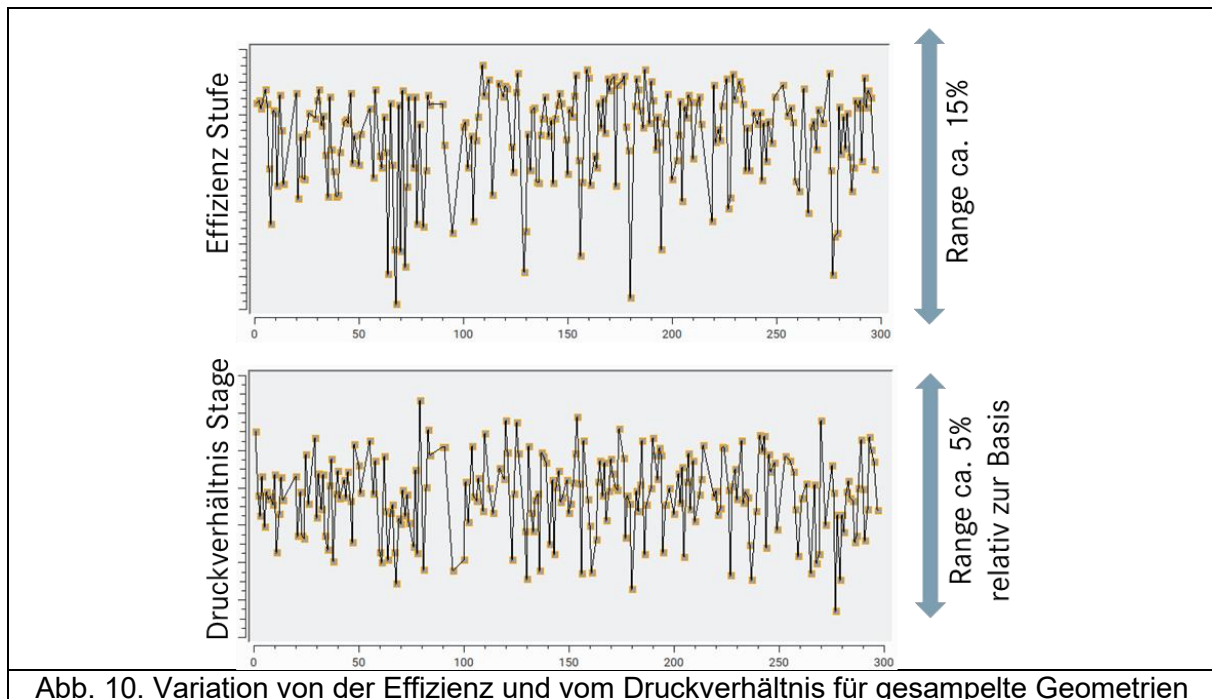
Die erste Ergebnisse sind auf Abb. 8 für beide Zielfunktionen dargestellt (schwarze und graue Kurven zeigen Referenzoptimierungen, rot, türkis und magenta zeigen Optimierungen mit IDF). Punkte mit „x“ Symbol zeigen Members, die gesamte Nebenbedingungsverletzung verbessern, aber immer noch manche Nebenbedingungen verletzen. Die Punkte mit Kreisen zeigen die Members, die alle Nebenbedingungen erfüllen. Optimierungen mit IDF finden ein Design, das alle Nebenbedingungen erfüllt, schneller als die Referenzoptimierung (Referenz ca. 20Std. ohne IDF, ca. 4-6Std. mit IDF). Auch die Verbesserung über die Zeit ist steiler, was könnte die Abb. 9 erklären, wo es auf Basis von der „magenta“ Optimierung mit IDF gezeigt wird, dass IDF den Anteil von Members, wo CFD ausgeführt wird, auf ca 50% reduziert, sonst laufen schnellere strukturelle FEM Simulationen und/oder Geometriegenerierung. Für die aerodynamische Effizienz haben Optimierungen mit IDF immer bessere Lösung gefunden, als ohne IDF, und gleichzeitig deutlich schneller. Für die Spannungsreduktion zeigen Optimierungen mit IDF sehr guten Trend im Vergleich mit der Referenzoptimierung. Leider wurden zwei von drei („rote“ und „türkise“) Optimierungen mit IDF technisch bedingt früher unterbrochen.



Neuronales Netz für CFD Approximation

Für Erprobung und Validierung von KI-Modelle wurde auf Basis von der beschriebenen 4-Stufigen Konfiguration ein Testfall vorbereitet, der nur eine Stufe umfasst (Stufe 2). Das Ziel hier ist eine Datenbank mit gesampelten Geometrien beschaffen um KI Modelle trainieren und validieren zu können. Dafür wurde Rotorgeometrie mit 27 Freiheitsgraden parametrisiert, die Statorgeometrie blieb zuerst unverändert.

Um Geometrieviation zu erzeugen wurde Latin-Hypercube Sampling (LHS) Methode angewendet, die den Variationsraum gleichmäßig abdeckt. Insgesamt wurden 300 Samples erzeugt, die danach mit einer automatisierten Prozesskette vernetzt und mittels CFD ausgewertet werden. Aus 300 generierten Samples wurden 223 erfolgreich berechnet (siehe Abb. 10), die anderen haben wegen große Variationsbreite entweder Geometriegenerierungsprobleme (e.g. physikalisch nicht sinnvolle Geometrie) oder CFD Konvergenzprobleme (z.B. wegen einer starken Ablösung).



Mit der Samplesdatenbank wurde das KI-Modell mit 173 Samples trainiert und mit den verbleibenden 50 Samples für eine Validierung ausgewertet. Für eine neue „ungesehene“ Kombination von Geometrieparametern liefert das Modell zunächst mittels eines Generators eine Vorhersage für die 2D umfangsgemittelte Verteilung von mehreren Strömungsgrößen, u.a. Geschwindigkeit (in y-, x- und z-Richtung), Druck, Machzahl, Entropie usw. Mit einem Visual Transformer könnte aus diesen Informationen skalare Größen vorhergesagt werden (Indirect Objective Inference), z.B. Effizienz oder Druckverhältnis. Hier wird aber nur den Generator verwendet, und die vorhergesagte 2D Felder gegen Referenzen verglichen. Dafür

wurden die skalare Größen direkt aus dem 2D Feld gerechnet, für die KI Vorhersage und für die Validierungsdaten. Ein entsprechender Vergleich der Druck- und Massenstromvorhersagen in Abb. 11 dargestellt. Für die beiden Outputs liefert das KI Modell schon eine gute Vorhersagegenauigkeit, insb. unter Berücksichtigung von der extremen Variationsbreite.

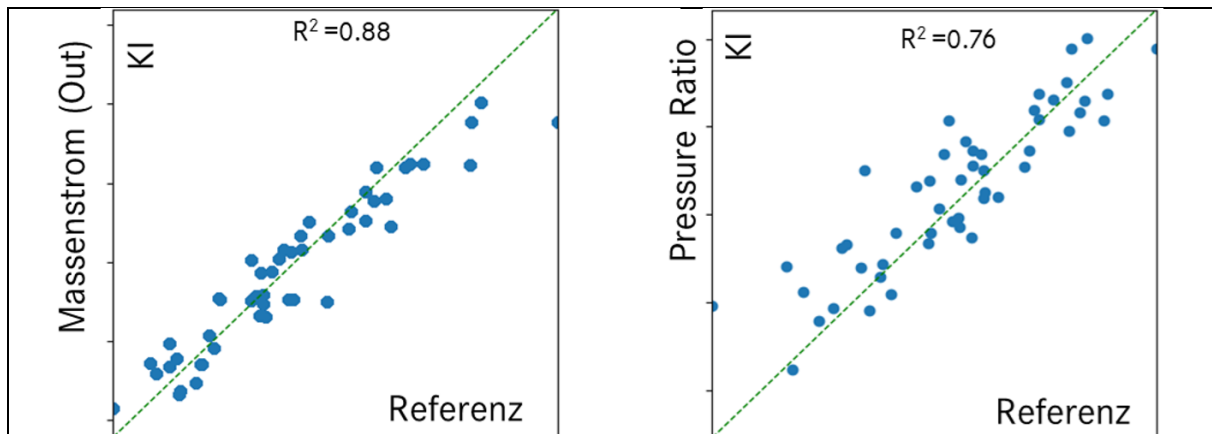


Abb. 11. Validierung KI Modell für Druck- (links) und Massenstromvorhersage (rechts) anhand von 50 Validierungssamples

Für die Effizienz, getrieben u.a. von komplexen lokalen physikalischen Effekte wie z.B. Ablösungen und transsonische Stoßlage, usw., ist die Vorhersagequalität ist nur zufriedenstellend (siehe Abb. 12). Insb. im Bereich mit einer niedrigen Effizienz, z.B. wegen hohen Ablösungen, steigt der Modellfehler. Im [14] wurde auch gezeigt, dass die größte Abweichung vom vorhergesagten Entropieerzeugungsfeld im Bereich von Stöße und Sekundärströmungen liegt.

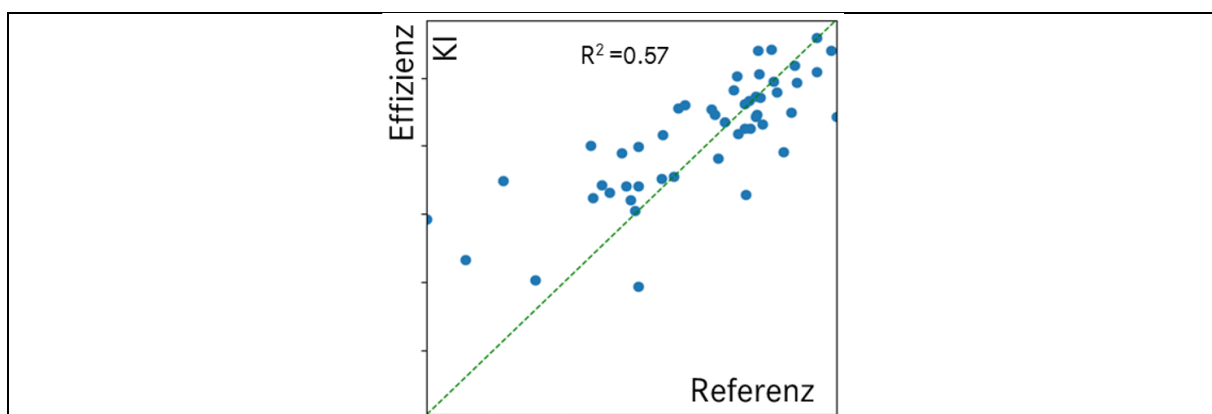
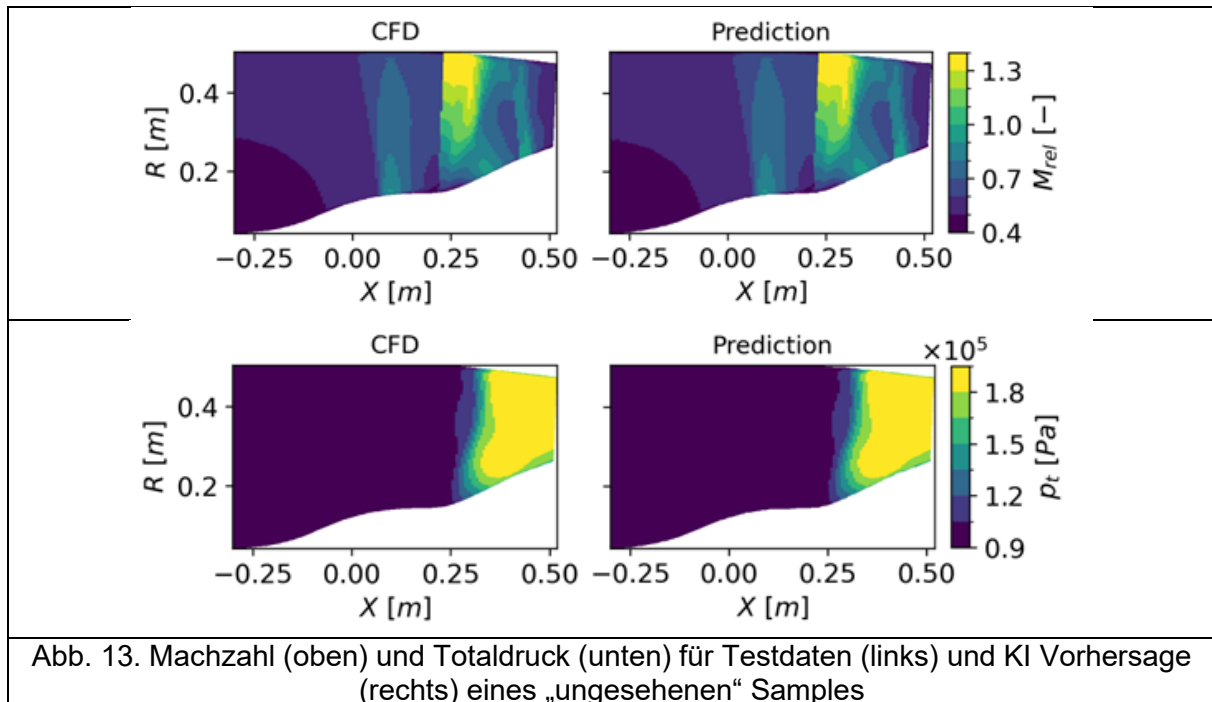


Abb. 12. Validierung KI Modell für Effizienz anhand von 50 Validierungssamples

Neben den gezeigten Ergebnissen der „Indirect Objective Inference“ ermöglicht die „Direct Field Inference“ des KI Modells Vorhersagen des Strömungsfeldes (vgl. Abb. 4). Abb. 13. Zeigt

beispielhafte Vergleiche eines S2 Feldes der relativen Machzahl und des Totaldrucks aus der CFD und der KI-Vorhersage des unbekannten Testsamples. Hierfür wurde das Modell auf 100 Trainingssamples trainiert. Die Konturen zeigen kaum sichtbare Unterschiede. Da es sich um ein datengetriebenes Modell handelt sammeln sich Vorhersagefehler hauptsächlich an lokalen physikalischen Phänomenen, wie z.B. Verdichtungsstöße, Ablösungen, usw. Dennoch sind diese i.d.R. ausreichend klein, wie auch am Beispiel zu sehen.



3 Zusammenfassung

Im Projekt wurden drei Bausteine für eine effiziente interdisziplinäre Auslegung von Verdichterbeschaukelung entwickelt: durchgehende Aero-Struktur-Simulationsketten mit einer einheitlichen Geometriedefinition; effiziente numerische Optimierungsmethoden, die auf teure interdisziplinäre und hochdimensionale Probleme abzielen; sowie die Erweiterung und Weiterentwicklung der Auslegungs- und Optimierungsumgebung zur produktiven Anwendung interdisziplinärer Prozesse und Methoden.

Für die Auslegung von State-of-the-Art Verdichterbeschaukelung wurde eine durchgängige interdisziplinäre Prozesskette zur aerodynamischen und strukturellen Bewertung von mehrstufigen Verdichterkonfigurationen bereitgestellt. Dank einer einheitlichen Geometrieparametrisierung für beide Disziplinen wird eine genauere Designbewertung ermöglicht, ohne auf teilweise konservative oder vereinfachende Annahmen zurückgreifen zu müssen und ohne zusätzliche Einschränkungen im Designraum, um potenziell bessere

optimale Lösungen zu entwickeln. Als Testkonfiguration dient ein Frontblock eines axialen Hochdruckverdichters mit vier Stufen, der sowohl aerodynamisch als auch strukturell (Statik, Modalanalyse) bewertet wird.

Die gestiegene Problemkomplexität hat die Entwicklung effizienterer Optimierungs- und Ersatzmodellmethoden erforderlich gemacht, um interdisziplinäre Beschauflungsoptimierungsaufgaben mit mehreren Freiheitsgraden und teureren CFD- und FEM-Simulationen in einer industriell akzeptablen Zeit zu lösen. Die adaptiven Antwortflächenverfahren (AutoOpti Software) wurden um eine interdisziplinäre Entscheidungsfunktion (Interdisciplinary Decision Function, IDF) erweitert, die eine optimale Prozesssteuerung für die interdisziplinäre Optimierung ermöglicht. Die Kombination aus IDF und einem interdisziplinären Prozess mit dynamischer Prozesssteuerung hat eine deutliche Reduktion der Optimierungszeit sowie eine Verbesserung des Optimums im Vergleich zu einer Optimierung ohne IDF ermöglicht. Bei der Aero-Struktur-Optimierung von Stufe 4 konnte die Optimierung mit IDF bessere Lösungen finden und das mehr als doppelt so schnell. Auch erste Lösungen, die alle Nebenbedingungen erfüllen, wurden etwa dreimal schneller gefunden.

Zusätzlich wurde eine Gradientenentscheidungsfunktion in AutoOpti entwickelt, um adjoint Sensitivitäten für hochdimensionale Optimierungsprobleme zu nutzen, was ebenfalls die Optimierungszeit und den Rechenaufwand reduziert. Bei einer Rotoroptimierung mit adjoint Sensitivitäten hat die Methode dasselbe Optimum wie die Referenzoptimierung gefunden, jedoch etwa 20 % schneller und mit 50 % weniger rechenintensiven adjungierten CFD-Berechnungen.

Neuartige KI-Methoden wurden entwickelt, die als Ersatzmodelle für teure CFD-Simulationen geeignet sind und mehrere Strömungsgrößen für gegebene Schaufelgeometrien vorhersagen können. Das Modell wurde erfolgreich auf axiale sowie radiale Verdichterkonfigurationen angewendet und hat vielversprechendes Potenzial für zukünftige Anwendungen gezeigt.

Derzeit wird weiterhin aktiv in Richtung effizienter Ersatzmodelle geforscht, einschließlich der Weiterentwicklung des KI-Modells sowie der Bereitstellung alternativer Antwortflächen (zum Kriging-Ersatzmodell in AutoOpti), wie beispielsweise Bayesische Neuronale Netze (BNNs) [15], die theoretisch besser mit der Anzahl von Trainingsdaten skalieren und für sehr hochdimensionale Probleme mit adjoint Sensitivitäten eingesetzt werden können [16].

4 Literatur

- [1] Papageorgiou, A., Tarkian, M., Amadori, K. and Ölvander, J.: Multidisciplinary Design Optimization of Aerial Vehicles: A Review of Recent Advancements, International Journal of Aerospace Engineering Vol. 2018 No. 1, 2018, S. 1–21.
- [2] Martins, J. R. R. A., Lambe, A. B.: Multidisciplinary Design Optimization: A Survey of Architectures, AIAA Journal Vol. 51 No. 9, 2013, S. 2049–2075.
- [3] Pretsch, L., Arsenyev, I., Czech, C., Duddeck, F.: Interdisciplinary design optimization of compressor blades combining low- and high-fidelity models, Structural and Multidisciplinary Optimization Vol. 66, 2023.

- [4] Sutton, R. S., Barto, A. G.: Reinforcement Learning: An Introduction, 2nd ed. MIT Press, 2018, S. 1–22.
- [5] Gunst, R.F.: Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments, Technometrics Vol. 38 No. 3, 1996.
- [6] Voß, C. and Aulich, M., Raitor, T.: Metamodel Assisted Aeromechanical Optimization of a Transonic Centrifugal Compressor.” ISROMAC 15, 2014.
- [7] Schnoes, M., Voß, C. and Nicke, E.: Design optimisation of a Multi-Stage Axial Compressor Using Throughflow and a Database of Optimal Airfoils, Journal of the Global Power and Propulsion Society, 2018.
- [8] Schaffrath, R. Nicke, E., Forsthofer, N., Kunc, O., Voß, C.: Gradient-Free Aerodynamic Optimisation with Structural Constraints and Surge Line Control for Radial Compressor Stage, Journal of Turbomachinery, ASME Turbo Expo, 2023.
- [9] Baert, L. and Grasso, G., Sainvitu, C., Lepot, I., Enkhuizen, M., Lammers, K., Bown, N.: From Concept to Wind Tunnel Model: Efficient Design Methodology For Innovative Low-Noise Propellers, ASME Turbo Expo, Turbomachinery Technical Conference and Exposition, 2022.
- [10] Hu, Yu J. Song Y., H., Chen, F.: The application of support vector regression and mesh deformation technique in the optimization of transonic compressor design, Aerospace Science and Technology Vol. 112, 2021.
- [11] Strönisch, S., Meyer, M., Knüpfer, A., Sander, M.: Prediction of Steady and Unsteady Flow Quantities Using Multiscale Graph Neural Networks, ASME Turbo Expo, 2023.
- [12] Aulich, M., Küppers, F., Schmitz, A., Voß, C.: Surrogate Estimations of Complete Flow Fields of Fan Stage Designs via Deep Neural Networks, ASME Turbo Expo, Turbomachinery Technical Conference and Exposition, 2019.
- [13] Aulich, M., Goinis, G., Voß, C.: Data-Driven AI Model for Turbomachinery Compressor Aerodynamics Enabling Rapid Approximation of 3D Flow Solutions, Aerospace Vol. 11, 2024.
- [14] Schmitz, A, Schaffrath, R, Voss, C, Karimian, A, Singh, D, & Heinen, D.: Advanced Generative Neural Networks for Predicting Complex 2D Physical Fields With Minimal Data: A VQVAE-Transformer Framework ASME Turbo Expo, Turbomachinery Technical Conference and Exposition, 2025.
- [15] Li, Yucen Lily and Rudner, Tim G. J. and Wilson, Andrew Gordon.: A Study of Bayesian Neural Network Surrogates for Bayesian Optimization. ICLR, 2024.
- [16] Rottmayer, J., Chen, L., Özkaya, E., Gauger, N.R.: Sobolev Learning for Bayesian Neural Network Assisted Aerodynamic Shape Optimization, STAB Konferenz, 13.11.2024, Regensburg, Germany.

Verbrennung

19. Statusseminar der AG Turbo

17. und 18. März 2026 in Köln

Arbeitskreis Verbrennung

Überblick

zusammengestellt von

Dr. Benjamin Witzel

Siemens Energy Global GmbH und Co. KG

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Abstract

Germany has set itself the goal of becoming climate-neutral by 2045. The 8th Energy Research Programme provides the framework for achieving this. Turbomachinery continues to play a central role in implementing the programme's objectives, especially in power plants operated with hydrogen, synthetic fuels, or biogenic fuels. Due to the massive expansion of renewable energy, existing and future power plants must become significantly more flexible in order to compensate for the volatile electricity from wind and solar power. At the same time, a reliable power supply, affordable electricity prices, high efficiencies, and low emissions remain essential.

The combustion system of gas turbines is of particular importance in this context. Accordingly, the research activities of the AG Turbo Working Group Combustion focus on topics such as alternative fuels (especially hydrogen), emission reduction, operational flexibility, and the further development of numerical and experimental methods.

This article provides the latest overview of how these research priorities are reflected in the ongoing AG Turbo research projects *TurboGruen*, *TurboHyTec*, *TurboTrans*, and *FokusTurbo*. In addition, it offers an outlook on expected future research priorities in the field of combustion.

Kurzfassung

Deutschland hat sich das Ziel gesetzt, bis 2045 klimaneutral zu werden. Das 8. Energieforschungsprogramm bildet hierfür den Rahmen. Turbomaschinen spielen bei der Umsetzung der darin definierten Ziele weiterhin eine zentrale Rolle – vor allem in Kraftwerken, die mit Wasserstoff, synthetischen oder biogenen Brennstoffen betrieben werden. Durch den massiven Ausbau erneuerbarer Energien müssen bestehende und zukünftige Kraftwerke jedoch wesentlich flexibler werden, um die schwankende Einspeisung aus Wind und Sonne auszugleichen. Gleichzeitig bleiben eine zuverlässige Stromversorgung, bezahlbare Strompreise, hohe Wirkungsgrade und geringe Emissionen essenziell.

Dabei kommt dem Verbrennungssystem von Gasturbinen besondere Bedeutung zu. Entsprechend konzentrieren sich die Forschungsarbeiten des AG Turbo-Arbeitskreises Verbrennung auf Themen wie alternative Brennstoffe (insbesondere Wasserstoff), Emissionsreduktion, Flexibilisierung und die Weiterentwicklung numerischer sowie experimenteller Methoden.

Dieser Beitrag bietet einen aktuellen Überblick, wie sich die entsprechenden Forschungsschwerpunkte in den aktuell laufenden AG Turbo-Verbundvorhaben, *TurboGruen*, *TurboHyTec*, *TurboTrans* und *FokusTurbo* widerspiegeln. Darüber hinaus wird ein kurzer Ausblick zu den erwarteten zukünftigen Forschungsschwerpunkten im Bereich der Verbrennung gegeben.

1 Einleitung

„Bis spätestens 2045 wollen wir in Deutschland klimaneutral leben und wirtschaften“. So beginnt das Vorwort des 8. Energieforschungsprogramms des damals noch Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz genannten Ministeriums, über dessen Förderprogramme im Prinzip alle AG Turbo-Verbundvorhaben laufen. Und so steht es auch im deutschen Klimaschutzgesetz mit seinen ambitionierten Zielen zur Treibhausgas-minderung für Deutschland (2030 -65%, 2040 -88%, 2045 vollständig klimaneutral; %-Zahlen jeweils bezogen auf das Referenzjahr 1990).

Um die anvisierten Ziele des 8. Energieforschungsprogramms umzusetzen, sind Turbomaschinen – in unterschiedlichen Applikationen und Ausprägungen – weiterhin von zentraler Bedeutung. Dies umfasst mit Wasserstoff, synthetischen Brennstoffen oder Bio-Kraftstoffen betriebene Kraftwerke auf der Basis von Gasturbinen oder gekoppelten Gas- und Dampfkraftwerken, teilweise sogar noch kombiniert mit Kraft-Wärmekopplung. Die massive Ausweitung der erneuerbaren Energiewandlung basierend auf Wind und Sonne hat große Auswirkungen sowohl auf zukünftige Kraftwerkskapazitäten als auch auf den bestehenden Kraftwerkspark, der an die volatile Natur der erneuerbaren Energieträger angepasst werden muss. Neben den grundsätzlichen technischen Herausforderungen müssen dabei vor allem auch die Zuverlässigkeit der Stromversorgung und die Bezahlbarkeit künftiger Strompreise Berücksichtigung finden. Darüber hinaus werden thermische Kraftwerke auch zukünftig unverzichtbar sein, um Schwankungen der volatilen Energieträger Sonne und Wind auszugleichen. Neben der Betriebs- und Brennstoffflexibilität werden in diesem Bereich nach wie vor höchste Wirkungsgrade und Emissionen der Anlagen und ihrer Komponenten über einen weiten Betriebsbereich gefordert, um die Kosten und die Umweltwirkung der Stromrückgewinnung aus regenerativ erzeugten Brennstoffen möglichst niedrig zu halten.

Eine wesentliche Komponente bei den sich daraus ergebenden Herausforderungen für die Neu- und Weiterentwicklung von Turbomaschinen ist und bleibt das Verbrennungssystem von Gasturbinen. Daher wundert es auch nicht, dass sich im Prinzip alle im Folgenden vorgestellten AG Turbo-Forschungsaktivitäten im Arbeitskreis Verbrennung um alternative Brennstoffe, insbesondere Wasserstoff, Emissionen, Flexibilität oder begleitende Verbesserungen der dazu benötigten numerischen oder experimentellen Werkzeuge drehen.

Die AG Turbo bietet dabei eine einzigartige Plattform für eine enge Zusammenarbeit zwischen Technologieentwicklung und Grundlageforschung sowie eine stark interdisziplinäre Arbeitsumgebung, bei der auch weiterhin die Synergien mit anderen Sektoren wie der Luftfahrt für die begleitende, gezielte Entwicklung von unterstützenden Technologien wie beispielsweise Digitalisierung, Künstliche Intelligenz, Methoden des maschinellen Lernens, oder additive Fertigungsverfahren gehoben werden.

2 Aktuelle Projekte im Arbeitskreis Verbrennung

Dieses Kapitel bietet einen Überblick über die laufenden Arbeitspakete der verschiedenen AG Turbo-Verbundprojekte mit Fokus auf den Arbeitskreis Verbrennung.

Die im letzten Tagungsband 2024 vorgestellten Arbeitspakete aus den Verbundprojekten *OptiSysKom – Optimierung der Prozesse und Systeme sowie der Lebensdauer der Gesamtanlage und ihrer Komponenten* und *InnoTurbinE – Innovative Turbomaschinen für nachhaltige Energiesysteme* wurden zwischenzeitlich erfolgreich abgeschlossen. Das InnoTurbinE-Arbeitspaket 1.3 *Untersuchung und Vorhersage von hochfrequenten Verbrennungsinstabilitäten mit LES* in Kooperation der TU München und Siemens Energy wird in diesem Tagungsband in einem separaten Beitrag von Philipp Bonnaire detailliert beschrieben.

Ebenfalls bereits im Tagungsband 2024 wurde das 2021 gestartete Verbundprojekt *TurboGruen – Turbomaschinen für Energiespeicher und grüne Brennstoffe* mit seinen drei verbrennungsrelevanten Arbeitspaketen vorgestellt. Während zwei davon planmäßig abgeschlossen wurden, befindet sich das Arbeitspaket 2.1 *Fortschrittliche Verbrennungsmodellierung für nachhaltige Energiesysteme* in Kooperation der Universität Duisburg-Essen und Siemens Energy nach kostenneutraler Verlängerung weiterhin in Bearbeitung.

Das Verbundprojekt *TurboHyTec – Turbomaschinen für Hydrogen Technologien* wurde im Oktober 2023 gestartet. Es beinhaltet ein Arbeitspaket mit Verbrennungsthemen. Neben der Kurzübersicht über den Inhalt dieses APs enthält dieser Tagungsabend auch einen separaten Beitrag von Paul Porath, in dem das Arbeitspaket inklusive der bisherigen Ergebnisse ausführlich beschrieben wird.

Unter dem 8 Energieforschungsprogramm der (EFP) der Bundesregierung wurden die Verbundprojekte *TurboTrans – Turbomaschinen für die Transformation in das integrierte Energiesystem der Zukunft* (Start Januar 2025) und *FokusTurbo – Flexible Turbomaschinen für klimaneutrale und resiliente Energiesysteme* (Start Januar 2026) beantragt und bewilligt. Beide Projekte beinhalten jeweils vier Verbrennungs-Arbeitspakete welche ebenfalls im Folgenden beschrieben.

2.1 TurboHyTec – Turbomaschinen für Hydrogen Technologien

Wie in der Übersicht der Arbeitspakete unten zu sehen ist, enthält TurboHyTec lediglich ein Arbeitspaket mit Verbrennungsthemen (grün hinterlegt).

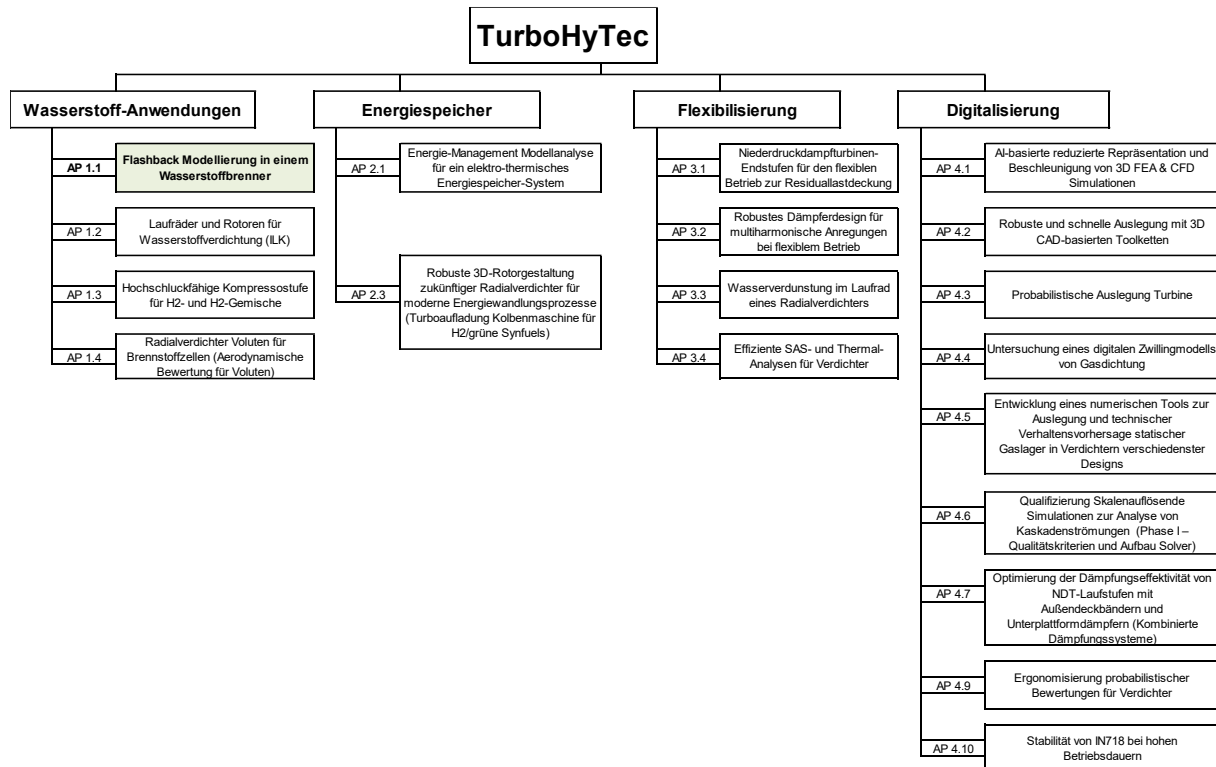


Abbildung 1: Übersicht der Arbeitspakete in TurboHyTec

AP 1.1 Flashback Modellierung in einem Wasserstoffbrenner (Siemens Energy, TU Berlin)

Die Kontrolle und Vorhersage vom Flammenrückschlag in einem wasserstoffbetriebenen Strahlbrenner zählt zu den größten Herausforderungen bei der Dekarbonisierung der Energie- und Wärmeversorgung mit einer stationären Gasturbine. Das Auftreten eines Flammenrückschlags im Betrieb kann weitreichende Folgen haben: sofortige Abschaltung der technischen Anlage, anschließende Inspektionen und ggf. Beschädigung der Bauteile einer Brennkammer verbunden mit langen Ausfallzeiten der Gasturbine. Damit dieser Fall nicht eintritt, muss der Mechanismus, der zum Flammenrückschlag führt, untersucht und verstanden werden. Bislang ist wenig über den exakten Mechanismus bekannt. Numerische Strömungssimulationen, wie zeitlich und räumlich aufgelöste Large Eddy Simulationen (LES), sind ein äußerst leistungsfähiges Instrument zur Modellierung des Rückschlags der Flamme und geben einen detaillierten Einblick in die Strömungscharakteristiken. Außerdem sind in den letzten Jahren die Anwendungen von Deep Learning Techniken im Bereich der Strömungsmechanik rasant gestiegen, die ein erheblich erweitertes Potenzial für die Modellierung und Auswertung von Strömungssimulationen bieten. Die Kombination aus beiden Welten soll helfen, die Ursachen für den Flammenrückschläge zu identifizieren und

gezielte Modifikationen an der Geometrie vorzunehmen, um den Verbrennungsprozess sicher kontrollieren zu können.

Am DLR werden experimentelle Untersuchungen an einem einzelnen Jet durchgeführt, die für die Validierung und Kalibrierung der numerischen Modelle genutzt werden. Die gewonnenen Ergebnisse und Methoden aus dem DLR-Fall sollen anschließend auf einen industriellen Brenner erweitert bzw. angewendet werden. Dieser Brenner wurde am Clean Energy Center (CEC) von Siemens Energy getestet. Mehrere Flammenrückschlag-Ereignisse sind in diesen Tests aufgetreten, die z.T. nicht nachvollziehbar sind. Mit dieser Arbeit soll das Problem des Flammenrückschlags systematisch erforscht und beseitigt werden.

2.2 TurboTrans – Turbomaschinen für die Transformation in das integrierte Energiesystem der Zukunft

Wie in der folgenden Abbildung zu sehen ist, beinhaltet TurboTrans insgesamt vier Arbeitspakete mit Fokus auf Verbrennung (grün hinterlegt).

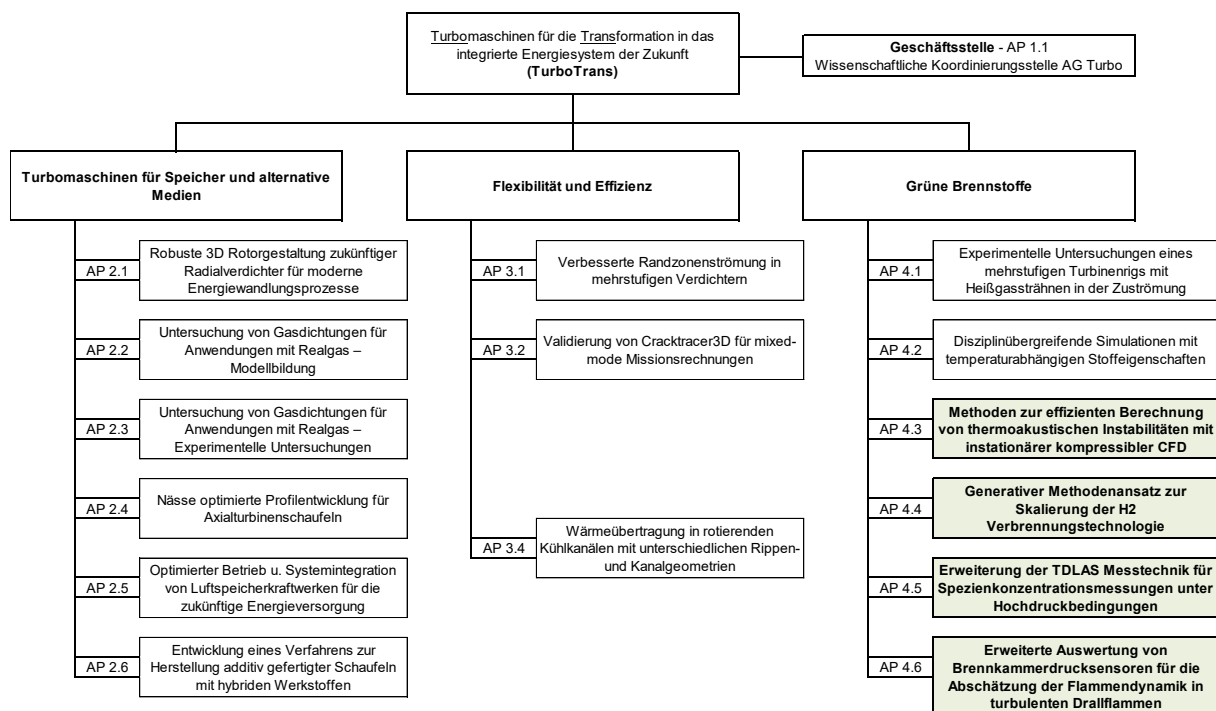


Abbildung 2: Übersicht der Arbeitspakete in TurboTrans

AP 4.3 Methoden zur effizienten Berechnung von thermoakustischen Instabilitäten mit instationärer kompressibler CFD (Siemens Energy, Uni Duisburg-Essen)

Mit der Einführung von Gasturbinen mit mageren vorgemischten Verbrennungssystemen zur Reduzierung von Emissionen (insb. NO_x, Ruß) traten Probleme mit der thermoakustischen Verbrennungsinstabilität in der Brennkammer auf. Verbesserungen bei den Brennkammern führten zu immer komplexeren Systemen mit entsprechend komplizierten thermoakustischen Moden auch bei hohen Frequenzen. Komplexe Large-Eddy-Simulationen mit sehr hohen Auflösungen sind prinzipiell in der Lage, diese Thermoakustik vorherzusagen; in der Praxis ist dieser Aufwand kaum zu leisten und die Einführung von Wasserstoffbrennstoff (Gemischen) fügt dem Problem eine weitere Dimension hinzu.

Der Anregungsmechanismus hochfrequenter thermoakustischer Instabilitäten wurde am Lehrstuhl für Fluidodynamik in dem Projekt "Untersuchung der Entstehungsmechanismen zu Hochfrequenzinstabilitäten" des Clean Energy Center Stufe 2 [FKz 03ET7011L) identifiziert. Weiterhin wurden, unterstützt vom BMWK [FKz 03EE5013D] und DFG (INST 20876/209-1 FUGG, INST 20876/243-1 FUGG)), Methoden untersucht, zur Reduzierung der numerischen Dämpfung des CFD-Codes und Anpassungen der Anregungsmechanismen, um genaue Vorhersagen von hochfrequenten thermoakustischen Instabilitäten zu ermöglichen.

Das AP 4.3 zielt darauf ab, auf Basis des Simulationswerkzeugs StarCD ein Tool zu entwickeln, mit dem die Thermoakustik um ein bis zwei Größenordnungen effizienter vorhergesagt werden kann, um dieses Werkzeug dann bei der Entwicklung neuer Brennkammern einsetzen zu können. Zu diesem Zweck wird ein innovativer Ansatz (verstärkte Thermoakustik) verwendet, um die folgenden Ziele zu erreichen:

- (1) Reduktion der Anzahl der erforderlichen Simulationen.
- (2) Reduktion der Kosten und Dauer jeder Simulation.
- (3) Bestimmung des Abstands zur Stabilitätsgrenze.
- (4) Ermöglichen von Design-Optimierungen.

Die "verstärkte Thermoakustik" erhöht das Rayleigh-Integral, indem sie die Wärmefreisetzungsrates nur um sehr wenige Prozent verändert. Dadurch können Verluste an akustischer Energie an Grenzen oder nicht ideale numerische Schemata kompensiert werden. Die Methode hat sich bewährt, aber die Erstellung eines schnellen, validierten Werkzeugs erfordert zusätzliche Schritte:

1. Reduzierung der Anzahl der erforderlichen Simulationen, um Kosten und Zeit zu sparen. Derzeit sind viele Simulationen erforderlich, da viele mögliche Einflussparameter (numerisch und physikalisch) die Vorhersage beeinflussen können. In den meisten Fällen müssen die numerischen Zeichen sorgfältig abgestimmt werden, um eine minimale Verlustleistung zu erreichen, ohne die Stabilität der Simulation zu beeinträchtigen. Dieser Aufwand soll durch das Projekt entfallen.

2. Um die Dauer und die Kosten jeder Simulation zu reduzieren: Die Vorhersagen sollen auf größeren Gittern möglich werden, d.h. auf Gittern, die normalerweise zu viel akustische Energie abführen würden, die durch verstärkte Thermoakustik zurückgewonnen werden soll. Es müssen Erfahrungen mit unterschiedlichen Brennkammern gesammelt und Best-Practice-

Empfehlungen abgeleitet werden. Ziel ist es, irgendwann auf Large- Eddy-Simulationen zu verzichten und auch aus kostengünstigen URANS-Simulationen verlässliche Vorhersagen zur Thermoakustik zu erhalten.

3. Um quantitative Daten über die Stabilität eines Falles zu erhalten. Bis heute können Simulationen im besten Fall feststellen, ob ein Fall instabil ist oder nicht. Eine Aussage über den Abstand zur Stabilitätsgrenze ist nicht möglich – es ist nicht klar, ob einfache Maßnahmen einen Fall stabilisieren können, oder ob umgekehrt schon kleine Änderungen einen Fall destabilisieren würden. Die Verstärkung/Schwächung der Thermoakustik ermöglicht es, die Marge bis zur Stabilitätsgrenze zu bestimmen.

4. Das thermoakustische Verhalten einer Brennkammer kann nur verbessert werden, wenn ihre Festigkeit bestimmt und mit der Festigkeit in anderen (optimierten) Fällen verglichen werden kann. Da die meisten Simulationen überhaupt keine thermoakustischen Schwingungen vorhersagen, ist eine solche Optimierung nicht möglich. Die numerisch verstärkte Thermoakustik ermöglicht es, die Schwingungen "zurückzubringen" und so die Stabilität einer Brennkammer zu optimieren.

Dieses Projekt trägt somit zu übergeordneten Entwicklungszielen bei, indem es den Anstieg des Entwicklungsaufwands durch ein neues, zuverlässiges Simulationswerkzeug begrenzt. Es wird erwartet, dass das Auslegungswerkzeug später auch eingesetzt werden kann, um Brennstoffspezifikation bestehender Verbrennungssysteme zu erweitern und die Entwicklung neuer Verbrennungssysteme zu unterstützen.

AP 4.4 Generativer Methodenansatz zur Skalierung der H₂ Verbrennungstechnologie (Siemens Energy, TU-Berlin)

Bei der Entwicklung von Verbrennungstechnologien zur schadstoffarmen Verbrennung von hochreaktivem Wasserstoff sind insb. der Vermeidung von Verbrennungsinstabilitäten sowie unkontrolliertem Flammenrückschlag spezielle Aufmerksamkeit geboten.

Im Gegensatz zur Beschaukelung der Turbomaschinen sind Verbrennungssysteme nicht streng skalierbar und es müssen verschiedene Kompromisse bezüglich der Skalierungsparameter (z.B. Re Zahl und Residenzzeit) gemacht werden. Generative Methoden unter Verwendung der künstlichen Intelligenz, die bereits im AP 2.2 des AG Turbo Verbundprojekts „TurboGruen“ [FKz 03EE5068D] entwickelt wurden, können hier einen Beitrag leisten. Daher soll unter TurboTrans ein generativer Methodenansatz zur Skalierung und Übertragung der Verbrennungstechnologie von 100% H₂ auf Gasturbinen unterschiedlicher Leistungsklassen und unterschiedlicher Architektur entwickelt werden.

Das Projekt dient den Zielen der Dekarbonisierung durch Unterstützung der H₂ Verbrennungstechnologie und wird darüber hinaus mit der Entwicklung von KI basierten Konstruktions- und Berechnungsmethoden, noch auf niedrigem TRL-Niveau (TRL 2-4),

Erkenntnisse zur vollautomatischen Auslegung von H_2 -Verbrennungssystemen für Gasturbinen unterschiedlicher Leistungsklassen bereitstellen.

AP 4.5 Erweiterung der TDLAS Messtechnik für Spezieskonzentrationsmessungen unter Hochdruckbedingungen (RRD, TU-Darmstadt)

Neben der Brennkammeraustrittstemperatur, sind gerade im Hinblick auf immer schärfer werdende Emissionsregularien, die Schadstoffemissionen am Brennkammeraustritt eine wichtige Kenn- und Messgröße des Verbrennungssystems. Laserbasierende Spektroskopieverfahren eignen sich dabei hervorragend, Spezieskonzentrationen hochgenau zu messen. Eine Qualifizierung der TDLAS Methode zur Bestimmung der Spezieskonzentrationen von H_2O , NO , NO_2 , CO und CO_2 in einer Hochdruckbrennkammern soll vorangetrieben werden. TDLAS, kann dabei als integrierendes line-of-sight Messverfahren, aber auch als flächiges Messverfahren eingesetzt werden.

Untersuchungen zum Verfahren wurden im Rahmen der AG-Turbo-Vorhaben COORETEC-AG-Turbo2020 [FKz 03ET2012N & 03ET2012K] und ECOFLEX-Turbo RoBoFlex AP2.4 [FKz 03EE5012D & 03EE5013Q]. Diese Messungen wurde allerdings bei Umgebungsdruck am Brennkammeraustritt durchgeführt.

Zur Erweiterung und Integration der TDLAS-Temperaturmessmethode auf Spezieskonzentrationsmessungen am Austritt einer Hochdruckbrennkammer (~ 10 bar), sowie Untersuchung der Messgenauigkeit in Abhängigkeit verschiedener Einflussparameter sind nachfolgende Arbeitsschritte geplant:

- (1) Erstellung einer Spezifikation für die Druckfenster des optischen Zugangs
- (2) Drucklose Verifikation der Spezieskonzentrationsmessungen durch die Fenster gemäß Spezifikation
- (3) Konstruktion und Herstellung von Messfenster für Hochdrucktest (~ 10 bar)
- (4) Durchführung und Auswertung von Messungen an einer Hochdruckbrennkammer

Eine Validierung der TDLAS-Spezieskonzentrationsmesstechnik einschließlich der Spezifikation der Messfenster bis 10 bar erlaubt nach Abschluss der Arbeiten die Anwendung dieser Technik in Brennkammerprüfständen im Teillastbereich und simulierten Hochlastbereich (reduzierter Druck mit korrekten Temperaturen). Dies unterstützt die Entwicklung von emissionsarmen und brennstoffflexiblen Brennkammer für zukünftige Gasturbinen.

AP 4.6 Erweiterte Auswertung von Brennkammerdrucksensoren für die Abschätzung der Flammdynamik in turbulenten Drallflammen (RRD, TU-Berlin, DLR)

Auf das dynamische Flammenverhalten von Brennkammersystemen hat die Injektordüsengeometrie einen dominierenden Einfluss. Während der Entwicklung eines Injektors werden zumeist verschiedene Geometrien in unterschiedlichen Prüfständen auf

diverse Eigenschaften untersucht, wie z.B. Kühlung oder Emissionen. Solche Untersuchungen finden häufig in Einsektorprüfständen statt, die von ihrer Bauweise her nicht akustisch ausgelegt wurden, und damit gewonnene akustische Daten, aufgrund von Eigenfrequenzen des Prüfstandes, keine direkte Aussagekraft für die Gasturbine haben. Zu Überwachungszwecken werden jedoch dynamische Drucksensoren installiert.

Basierend auf gemessenen Druckdaten, u.a. auch basierend auf den Prüfstandsaufbauten in COORETEC-Turbo 2020 Vorhaben 2.3.2a [FKz 03ET2012B], 2.3.2b [FKz 03ET2013J], 2.3.4d [FKz 03ET2012N], sowie dem COOREFLEX-Vorhaben 2.1.1 [FKz 03ET7040W] soll eine Vorhersagemethode entwickelt werden, die basierend auf den gemessenen Druckdaten eine erste Extraktion der Flammentransferfunktion berechnet, um so, parallel zu den anderen Tests, den Einfluss der untersuchten Parameter auf das Flammenverhalten abzubilden.

Ausgehend von einem Zweischnitt-Optimierungsalgorithmus, welcher auf gemessene, dynamische Druckdaten in einer Brennkammer zurückgreift, soll eine erste Abschätzung der Flammentransferfunktion von turbulenten Drallflammen bestimmt werden. In der zweiten Optimierungsschleife wird der Betrag und die Phase des n -tau-Modells mit der Flammentransferfunktion (FTF) verknüpft, um so zusätzlich den Frequenzverlauf der zugrundeliegenden FTF zu bestimmen. Die Methode, ursprünglich für Vormischflammen entwickelt, wird nun für Drallflammen erweitert und soll im nächsten Schritt mit gemessenen Flammentransferfunktionen aus den SCARLET-Prüfstand mit gleicher Injektorgeometrie validiert und darauffolgend auf eine Vollringgeometrie angewendet werden.

Nach erfolgreichem Abschluss der Arbeiten kann basierend auf den gemessenen Druckdaten am Einzelsektor eine Bewertung der einzelnen Brennkonzeppte bezüglich ihrer Neigung zu Verbrennungsinstabilitäten durchgeführt werden. Nur aussichtsreiche Kandidaten werden dann auf dem Vollring getestet. Eine Filterung der Konzepte durch eine Vielzahl an zeit- und kostenaufwändige SCARLET-Tests (spezieller Prüfstand für thermo-akustische Untersuchungen am HBK3) kann vermieden werden. Die Entwicklung emissionsarmer und brennstoffflexibler Brennerkonzepte kann damit beschleunigt werden; dies führt dann auch zu einer früheren Marktreife.

2.3 FokusTurbo – Flexible Turbomaschinen für klimaneutrale und resiliente Energiesysteme

Mit der Einführung des 8. Energieforschungsprogramms (EFP) der Bundesregierung hat sich die Struktur der AG Turbo-Verbundvorhaben dahingehend geändert, als dass die Arbeitspakete unmittelbar den im EFP genannten, übergeordneten Missionen *Energiesystem*, *Wärmewende*, *Stromwende*, *Wasserstoff* oder *Transfer* zugeordnet wurden. Dies ist anhand des unten gezeigten Schaubildes des im Januar 2026 gestarteten, neuen Verbundprojekts *FokusTurbo – Flexible Turbomaschinen für klimaneutrale und resiliente Energiesysteme* gut sichtbar.

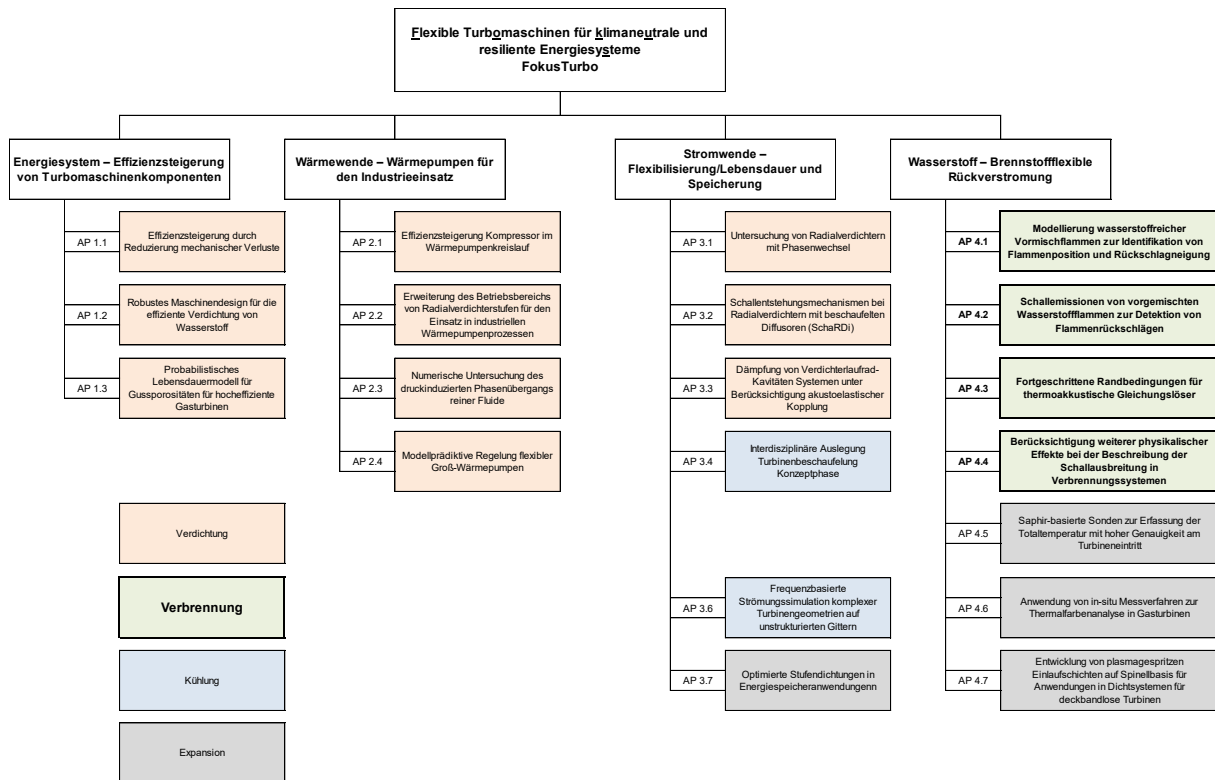


Abbildung 3: Übersicht der Arbeitspakete in FokusTurbo

Alle vier verbrennungsrelevanten Arbeitspakete (in der Abbildung grün hinterlegt) unterstützen hierbei die Mission Wasserstoff. Für die effektive Erzeugung von grünem Wasserstoff und Derivaten sowie deren Weiterverarbeitung werden Turbomaschinen durch weitere Technologieentwicklung zu ertüchtigen sein. Dafür sind die Aspekte der verlustminimierten Ein- und Ausspeicherung von Energie, der Einsatz von Gasturbinen im flexiblen Betrieb sowie die sichere Verbrennung von Wasserstoff oder Derivaten im Fokus und werden durch das Arbeitspaket Wasserstoff bearbeitet. Die Inhalte der vier verbrennungsrelevanten Arbeitspakete werden im Folgenden beschrieben.

AP 4.1 Modellierung wasserstoffreicher Vormischflammen zur Identifikation von Flammenposition und Rückschlagneigung (TU-Darmstadt, RWTH Aachen, Siemens Energy)

Während die für die Auslegung von mit konventionellen Brennstoffen betriebenen Verbrennungssystemen eingesetzten CFD-Simulationsansätze bereits ausreichende Vorhersagegenauigkeit der Flammenlage und Rückschlagneigung erreicht haben, ist die Genauigkeit für wasserstoffhaltige Brennstoffe insbesondere bei gasturbinenrelevanten Bedingungen unzureichend. Ein wesentlicher Grund hierfür ist, dass generelle Ansätze zur Modellierung intrinsischer Flammeninstabilitäten fehlen und die makroskopische Auswirkung dieser auf die auslegungsrelevanten Parameter wie Flammentemperatur, -lage und -stabilität

in Abhängigkeit von Druck und Temperatur für gasturbinenrelevante Bedingungen nicht bekannt sind. In der Literatur werden deren Auswirkung bis dato lediglich für niedrig-turbulente Fälle unter Umgebungsbedingungen diskutiert.

Im Rahmen dieses Arbeitspakets soll zunächst über die Auswertung von DNS-Studien von generischen Freistrahlfammen ein grundlegendes physikalisches Verständnis der treibenden Parameter für Flammenposition und Rückschlagneigung gewonnen werden. Damit sollen zu Beginn des Projekts die geeignetsten LES-Modellierungsansätze identifiziert und im weiteren Projektverlauf Schritt für Schritt verbessert werden, um später die Flammenlage in technischen Verbrennungssystemen unter Hochdruck vorhersagen zu können. Darüber hinaus sollen über die Analyse der Flammendynamik aus den DNS-Daten Prädiktoren entwickelt werden, die später auch über die verwendeten Modellansätze die Rückschlagneigung der Flamme vorhersagen können.

Zentrale Grundlage des Verbundprojekts ist dabei ein experimenteller Datensatz einer mit Wasserstoff betriebenen Hochdruck-Freistrahlfamme, der in den letzten Jahren am DLR Stuttgart in Zusammenarbeit mit Siemens Energy entstanden ist. In diesem Datensatz liegt der Einfluss umfangreicher Parametervariationen auf das Stabilitätsverhalten dieser Flamme vor. Die Experimente stellen somit einen umfangreichen Validierungsdatensatz für die im Rahmen dieses Arbeitspakets zu verbessernden LES-Modellierungsansätze dar.

Über ein bereits initiiertes Vorprojekt außerhalb der AG Turbo werden bis zum Projektbeginn vom ITV in Aachen umfangreiche Daten direkter numerischer Simulationen der erwähnten vereinfachten Freistrahlfamme bereitgestellt. Unter Einsatz von europaweit führenden Supercomputer Ressourcen soll der Fokus hierbei darauf gelegt werden, möglichst hohe Reynoldszahlen bei gleichzeitig hohen Drücken zu erreichen. Das ITV verfügt über langjährige Erfahrung in der numerischen Simulation von Wasserstoffflammen im Rahmen von DNS und LES. Darüber hinaus konnten am ITV entscheidende Fortschritte in der LES-Modellierung von Wasserstoffflammen unter Berücksichtigung von intrinsischen Flammeninstabilitäten erzielt werden.

Analog zu den geplanten DNS-Vorarbeiten in Aachen sind über das STFS in Darmstadt ebenfalls direkte numerische Simulationen vorgelagert zu diesem AG Turbo-Projekt in Vorbereitung, ebenfalls unter Benutzung von Supercomputing Clustern. Fokus, der über das STFS einzubringenden DNS-Studien, ist die Untersuchung des Wandeinflusses auf das Rückschlagverhalten. Bei der LES-Modellierung der Flamme-Wand-Wechselwirkung wird das STFS auf die bisherigen Ergebnisse des SFBs 150 zurückgreifen. Erste Erkenntnisse zum Einfluss von effusionsgekühlten Brennkammerwänden liegen u.a. auch aus dem Schwerpunktprogramm 2419 „HYCAM“ vor.

Die Abgrenzung der Arbeiten von bisherigen/laufenden Projekten: Die Modellierung von Wasserstoffflammen, und damit die einhergehende Abbildung der H₂-spezifischen Transportprozesse, die bekanntermaßen im Vergleich zu Kohlenwasserstoffflammen starke funktionale Unterschiede aufweisen, muss zur Vorhersage von Flammenstabilität und Lage zeitaufgelöst erfolgen. Damit ist die Grobstruktursimulation (LES) das Mittel der Wahl. Hier

existieren allerdings aktuell keine Verbrennungsmodelle die Effekte wie thermodiffusive Instabilitäten (extreme Faltung der Flammenoberfläche) abbilden können wodurch die Charakteristik der Flammenausbreitung und Stabilisierung fehlinterpretiert wird.

Die Fähigkeit, numerisch Flammenlage und Rückschlagneigung von wasserstoffbefeuelten Brennern verlässlich vorhersagen zu können, wird es erlauben, die industrielle Produktentwicklung entscheidend zu beschleunigen, da bisher notwendige Validierungsexperimente, z.B. Hochdruckverbrennungstests von unskalierten Brennern bei Realbedingungen, weniger häufig durchgeführt werden müssen. Darüber hinaus können die gewählten Verbrennungskonzepte auch bei Wasserstoffverbrennung weiter hinsichtlich Emissionsbildung, Druckverlust und Kühl- & Spülluftverbrauch optimiert werden, ohne dabei die Stabilität jeweils experimentell nachweisen zu müssen.

AP 4.2 Schallemissionen von vorgemischten Wasserstoffflammen zur Detektion von Flammenrückschlägen (TU-Berlin, DLR Stuttgart, Siemens Energy)

Eine frühzeitige Detektion von Flammenrückschlägen ist in allen Bereichen des Verbrennungssystems essenziell, um Hardware-Schäden zuverlässig zu vermeiden. Während zu diesem Zweck bei mit konventionellen, fossilen Brennstoffen betriebenen Gasturbinen typischerweise auf Thermoelemente zurückgegriffen wird, ist deren Einsatz bei Wasserstoffbetrieb wegen ihrer intrinsischen Eigenschaft, im Einbauszustand selber Flashback zu erzeugen, stark eingegrenzt. Darüber hinaus müssen speziell bei Mehrflammenbrennern alle Mischstrecken instrumentiert werden, um den Gesamtbrenner ausreichend zu schützen. Die Ausfallquote dieser Methodik der Rückschlagdetektion verschlechtert zusätzlich die Gesamtanlagenverfügbarkeit. Aus diesem Grund werden alternative, im Idealfall volumenintegral detektierende Technologien benötigt.

Vor diesem Hintergrund soll im Rahmen dieses Arbeitspakets zunächst die Schallemissionscharakteristik von wasserstoffgefeuerten Vormischflammen grundlegend untersucht werden. Dies soll in einem atmosphärischen, schallreflexionsfreien Prüfstand an der TU Berlin durchgeführt werden; neben der Schalldetektion über Wechseldruckaufnehmer werden auch Messtechniken angewendet, die die gegenseitige Wechselwirkung von Strömung und Flamme zeit- und orts aufgelöst abbilden. Später sollen gezielte Manipulationen in die Anströmung eingebracht und deren Auswirkung auf die Akustik evaluiert werden. Dabei liegt der Fokus darauf, gezielt Manipulationen der Strömung zu etablieren, die die beim Flammenrückschlag auftretende Änderung der Flammenakustik entweder verstärken und damit erst detektierbar machen, oder generell eine Störung einbringen, die eine Änderung der Akustik beim Flammenrückschlag nach sich zieht. Parallel dazu sollen die Experimente, insbesondere die Vormischzone, numerisch über RANS-Simulationen modelliert werden. Dabei wird angestrebt, Vorhersagen, über die die Schallemission dominierenden Längenmaße treffen zu können, um letzten Endes damit Strömungsmanipulationen zur Steuerung der akustischen Abstrahlcharakteristik auslegen zu können.

Sowohl im atmosphärischen Prüfstand der TU Berlin als auch im optisch zugänglichen Hochdruckprüfstand des DLR Stuttgart sollen die aus den Vorexperimenten herausgegangenen vielversprechendsten Ansätze auf Ihre Eignung zur Detektion von Flammenrückschlag überprüft und optimiert werden. Dabei sollen geeignete Algorithmen entwickelt werden, die aus der Änderung des akustischen Abstrahlcharakteristik Flammenrückschlag detektierbar machen sollen. Diese sollen vom Labormaßstab des TU Berlin-Experiments zum Technikumsmaßstab des DLR übertragen werden. Im Rahmen des DLR-Experiments sollen darüber hinaus auch Grundlagenuntersuchungen zur Dynamik des Flammenrückschlags, insbesondere zum Verständnis der Interaktion der Wandtemperatur mit der Entstehung von Flammenrückschlag angestellt werden, um den Rückschlagmechanismus über die Grenzschicht vollständig charakterisieren zu können.

Im Rahmen des Projektes ‚H2BED‘ (AP1.4, FKZ 03EE5179A, nicht Teil der AG Turbo) soll ein optischer Sensor entwickelt werden und hinsichtlich seiner Detektionsfähigkeit für alle Brennerstufen optimiert werden. Dieses Konzept soll gegen die klassische Detektion über Thermoelemente und mit dem Detektionspotential über geänderte Schallemission während des Rückschlags verglichen werden. Im Gegensatz zu den genannten existierenden Projekten soll in diesem Vorhaben zunächst gezielt die Emissionscharakteristik von Wasserstoffflammen bei systematischer Betriebsparametervariation untersucht werden. Dazu gehört auch die genaue Untersuchung der akustischen Antwort während eines Rückschlags. Die bisherigen Methoden der akustischen Flammenüberwachung basieren auf der natürlichen, „vorgefundenen“ Schallemission beim Rückschlag. Diese ist direkt von der Geometrie des Brenners abhängig und unterschiedlich stark ausgeprägt. Für eine zuverlässige Detektion, die mit einer klassischen, sehr aufwendigen Detektion über ein Netzwerk von Temperaturmessstellen konkurrieren kann ist jedoch eine zuverlässige akustische Antwort des Brenners erforderlich. Bisher wurde das Thema kaum systematisch untersucht.

Die Motivation hierbei ist, eine Grundlage zu schaffen, um durch Geometrieanpassungen a) entweder die sich beim Rückschlag ändernden Bänder zu verstärken damit ein ausreichendes Signal/Rausch-Verhältnis für die Detektion von Flammenrückschlag erreicht wird oder b) generell gezielt eine Störung einzubringen, um überhaupt erst eine Änderung der Akustik beim Flammenrückschlag zu erzeugen.

Die Fähigkeit, Flammenrückschlag verlässlich mit robusten physikalischen Wirkprinzipien zu detektieren, stellt eine Schlüsseltechnologie für den sicheren Betrieb von wasserstoffgefeuerten Verbrennungssystemen dar. Das Aufzeigen von alternativen Methoden, die im Vergleich zur Messung über Thermoelemente weniger häufig ausfallen und darüber hinaus Flammenrückschlag über einen größeren Bereich des Brenners detektieren können, stellt einen erheblichen Kostenvorteil dar, der zum einen aus einem geringeren Sensor- und Detektionskettenaufwand herrührt, aber auch durch die gesteigerte Anlagenverfügbarkeit zustande kommt. Im Fall von jetstabilisierten Mehrflammenbrennern, bei denen jede einzelne Flamme entsprechend mit Thermoelementen instrumentiert werden müsste, multipliziert sich der genannte Vorteil.

AP 4.3 Fortgeschrittene Randbedingungen für thermoakustische Gleichungslöser (TU-München, RRD)

Die Arbeiten in diesem Arbeitspaket sind inhaltlich sehr eng mit dem AP 4.4 verknüpft. In AP 4.4 sollen die linearisierten kompressiblen Navier-Stokes Gleichungen (LNSE) für die Beschreibung der akustischen Schallausbreitung in dem CAA-Löser Nektar++ implementiert und validiert werden. Die in AP 4.3 geplanten Arbeiten bauen auf diesem Thema auf, da zusätzlich fortgeschrittene Randbedingungen für einen Akustiklöser entwickelt werden sollen. Hierbei soll bei der Implementierung von akustischen Randbedingungen auf den „state-space“-Ansatz, welcher von der TU-München entwickelt wurde, zurückgegriffen werden, wodurch sich nichtlineare Gleichungen auf lineare Eigenwert-Probleme reduzieren lassen. Ziel ist es mit diesen Randbedingungen auch perforierte Oberflächen in einem Akustiklöser modellieren zu können, was bisher meist vernachlässigt wird, da vorhandene Modelle aufgrund ihrer Komplexität sehr rechenintensiv sind.

Allgemein werden systembeschreibenden Differenzialgleichungen n-ter Ordnung in n Differenzialgleichungen 1. Ordnung zerlegt und somit sämtliche Beziehungen der Eingangs-, Ausgangs- und Zustandsgrößen in Form von Matrizen und Vektoren dargestellt. Diese Systembeschreibung durch ein lineares, zeitinvariantes Übertragungssystem ermöglicht komplexere, nichtlineare und zeitvariable Übertragungssysteme, einfacher darzustellen und somit auch einfacher zu lösen. Im Speziellen soll dies für die akustische Beschreibung von multiperforierten Oberflächen und Injektoren erfolgen, um so die entstehenden akustischen Verluste an Wandoberflächen und das akustische Übertragungsverhalten von Einspritzdüsen im akustischen Löser berücksichtigen zu können. Daraus ergeben sich für das Gesamtarbeitspaket inhaltlich folgende Schwerpunkte:

1. Beschreibung und Implementierung von akustischen Randbedingung bzw. Transmissionsbedingungen mit anschließender Validierung.
2. Simulation und Bewertung der Eignung der entwickelten Randbedingungen für verschiedene Testfälle.

Rolls-Royce Deutschland wird in diesem Arbeitspaket dem Partnervorhaben 4.3b der TU München mit fachlicher Expertise und Beratung zur Seite stehen. Dabei werden akustische Messungen von perforierten Wandoberflächen und Injektoren ausgetauscht, sowie Geometrien bereitgestellt, um die Implementierung der Randbedingungen zu bewerten und zu validieren.

AP 4.4 Berücksichtigung weiterer physikalischer Effekte bei der Beschreibung der Schallausbreitung in Verbrennungssystemen (TU-Darmstadt, RRD)

Für die Vorhersage des thermoakustischen Verhaltens in Brennkammersystemen kann eine inkompressible Strömungssimulationen (low-Ma CFD) mit einer numerischen Aero-

akustischen Simulation (CAA) gekoppelt werden, um Rechenleistung gegenüber einer kompressiblen Rechnung zu sparen. Die Akustik auf dem Strömungsfeld kann dabei über verschiedene mathematische Formulierungen beschrieben werden, die abhängig von der benötigten Genauigkeit unterschiedlich physikalische Komplexität aufweisen. Aus vorherigen Vorhaben (ECOFLEX-turbo LaBreVer (FKZ 0324295DD)) ist bekannt, dass auch Dämpfungsmechanismen berücksichtigt werden müssen, weshalb hier die linearisierten Navier-Stokes-Gleichungen (LNSE) implementiert werden sollen, um die Vorhersagequalität zu verbessern.

Für die bisherigen Simulationen von thermoakustischen Instabilitäten in Brennkammern wurde an einer Kopplung des CFD-Lösers PRECISE-UNS (Computational Fluid Dynamics) mit dem CAA-Löser Nektar++ (Computational Aero Acoustics) gearbeitet, um möglichst realitätsnahe Konfigurationen mit gekoppelten LES-CAA Verfahren vorhersagen zu können. Die bisherige Implementierung der Erhaltungsgleichungen für die akustische Wellenausbreitung wurde erfolgreich mittels Linearisierter Euler-Gleichungen (LEE) und über die Acoustic Perturbation Equations (APE) realisiert. Im Wesentlichen vernachlässigen die LEE viskose Effekte im Fluid und die APE zusätzlich, akustische Dämpfung, mit dem Vorteil, dass beide Verfahren sich einfacher im Löser implementieren lassen. Um die Genauigkeit der Vorhersage weiter zu verbessern, ist in diesem Arbeitspaket die Implementierung der linearisierten kompressiblen Navier-Stokes Gleichungen (LNSE) für die Beschreibung der akustischen Schallausbreitung mit anschließender Validierung vorgesehen, da somit Dämpfung durch akustische und thermische Grenzschichten sowie die Dissipation von Wirbelstrukturen präziser erfasst wird. Da bisher keine Dämpfung im akustischen Löser implementiert war, konnte dieser oft nicht konvergieren.

Konkret sollen die LNSE in den spektralen Finite-Elemente Code Nektar++ implementiert werden und mit anderen linearisierten Gleichungssystemen wie den Linearisierten Euler-Gleichungen (LEE) und den Acoustic Perturbation Equations (APE) auf ihre physikalische Genauigkeit, in Form von Schallausbreitung in Verbrennungssystemen verglichen werden. Im Speziellen sollen die Dämpfungsmechanismen aller Gleichungssysteme mit einer kompressiblen Referenzlösung verglichen werden, wobei eine geeignete Behandlung der akustischen und strömungsmechanischen Randbedingungen bedacht werden muss. Durch flexiblere Lastzyklen von Turbomaschinen werden immer öfter Off-Design Punkte angefahren, an denen es zu thermoakustischen Schwingungen des Systems kommen kann. Deshalb ist eine verbesserte Vorhersage von Thermoakustik mit realistischen Rechenzeiten erforderlich, weshalb dieses Vorhaben Ziele wie Flexibilisierung von Kraftwerken und Brennstoffen als Teil der Energiewende vorantreibt.

Nach der Implementierung der LNSE in den CAA-Löser Nektar++, was Teil des APs ist, müssen diese auch validiert werden. Die Validierungsstrategie sieht vor, zunächst simple generische Akustik-Testfälle mit steigender Komplexität nachzurechnen (z.B. Wellenausbreitung in Scherströmung, Spinning Vortex Pair, Zylinder in laminarer Querströmung, usw.). Danach sollen relevante, bereits veröffentlichte Testfälle nachgerechnet

werden, die die Interaktion von Akustik, Strömung in Verbrennungssystemen adressieren (z.B. Volvo-Test Case). Der letzte Validierungsschritt umfasst die Modellierung einer industrierelevanten Brennkammergeometrie auf Basis vorhergehender Industrieprojekte und experimenteller Daten (z.B. SCARLET Tests).

Im Wesentlichen wird durch die bessere, physikalisch konsistente Beschreibung natürlicher Dämpfungsmechanismen, in solch einem hybriden Simulationsverfahren, die Vorhersagegenauigkeit verbessert, bei gleichzeitig verkürzter Rechenzeit, im Vergleich zu einer reinen kompressiblen CFD-Rechnung. Zusätzlich zum besseren Verständnis dieses Ansatzes in Brennkammeranwendungen soll dieses Verfahren in unsere zukünftigen Auslegungswerkzeuge einfließen und langfristig unsere bisherigen niederdimensionalen Modelle ergänzen bzw. ersetzen.

3 Ausblick

Auch weiterhin bewegen sich die wichtigsten Forschungs- und Entwicklungsaufgaben für die Verbrennung in Turbomaschinen in den Bereichen Nachhaltigkeit (insbesondere Brennstoffe und niedrige Emissionen), Digitalisierung und Weiterentwicklung von Simulations- und Messwerkzeugen und -methoden. Diese Themen haben sich durch globale, geopolitische Änderungen, die eine Verschiebung der Prioritäten von Klimaneutralität in Richtung Flexibilität, Unabhängigkeit und Resilienz beobachten lassen, nicht verändert – im Gegenteil. So werden beispielweise hochflexible Gasturbinen-Kraftwerke, die mit neuen Brennstoffen wie zum Beispiel Wasserstoff betrieben werden können, maßgeblich dazu beitragen, Abhängigkeiten von Importen klassischer, fossiler Brennstoffe zu reduzieren und die Versorgungssicherheit aller Sektoren auf dem Weg in eine voll dekarbonisierte Energiewirtschaft sicherzustellen.

Für die Hersteller stellt sich dabei weiterhin die technische Herausforderung, trotz der hochreaktiven und -diffusiven Eigenschaften des Wasserstoffs einen sicheren und emissionsarmen Betrieb sicherzustellen. Anfang September 2025 hat die AG Turbo die Skizze für das neue Verbundvorhaben *DiWaTurb – Diversifizierung des Energiesystems durch Wasserstoff, Wärmepumpen und Energiespeicher – Turbomaschinen* eingereicht. In DiWaTurb sind vier verbrennungsrelevante Arbeitspakete geplant, die sich zur Unterstützung der Mission Wasserstoff des 8 EFP mit unterschiedlichen Aspekten der Weiterentwicklung von Gasturbinen beschäftigen. Der geplante Start des Projekts ist der 01.10.2026. Stand Ende Januar 2026 liegt der AG Turbo allerdings noch keine Rückmeldung zur Priorisierung der Skizze seitens des PTJ und BMW vor.

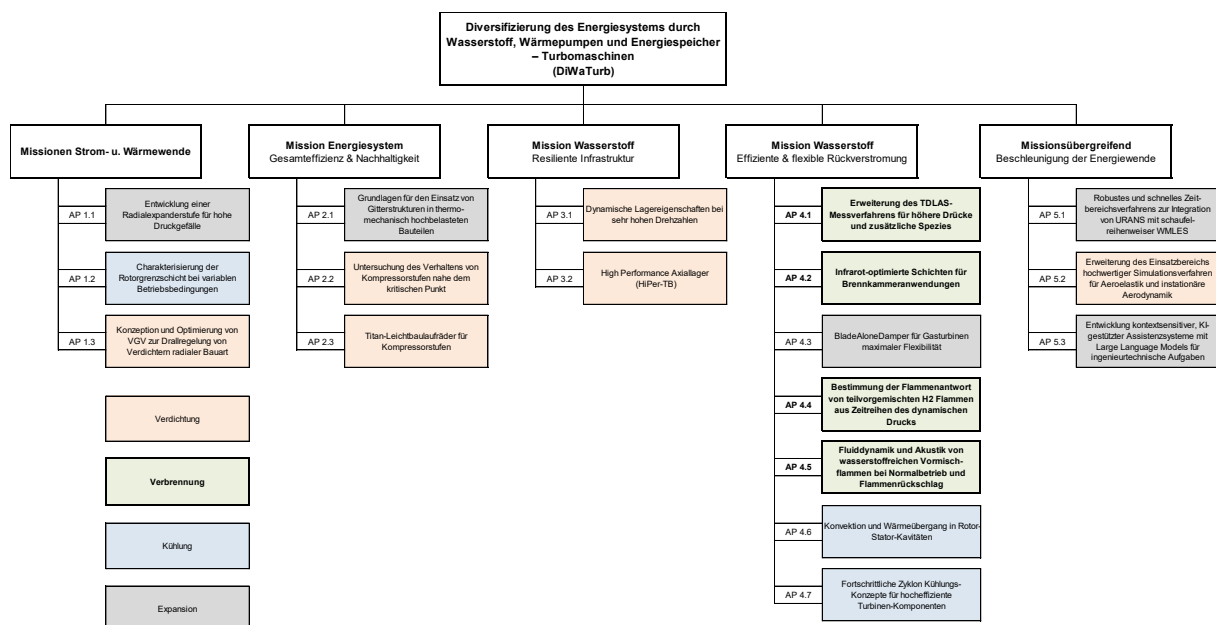


Abbildung 4: Übersicht der Arbeitspakete in DiWaTurb

AP 4.1 und 4.2 bieten Grundlagen zur weiteren Optimierung von Verbrennungssystemen und Brennkammern. Die Arbeitspakete 4.4 und 4.5 adressieren weiterhin bestehende Herausforderungen bei der direkten Verbrennung von Wasserstoff in Gasturbinen-Verbrennungssystemen. Eine kurze Beschreibung der Inhalte der einzelnen Arbeitspakete ist im Folgenden gegeben.

AP 4.1: Erweiterung des TDLAS-Messverfahrens für höhere Drücke und zusätzliche Spezies (Rolls-Royce Deutschland, TU Darmstadt)

Mittels TDLAS (Tunable diode laser absorption spectroscopy) können kleine Moleküle in mannigfaltigen Anwendungen in-situ gemessen werden. Dabei erfolgt die Absorption des Laserlichts in Linien, die durch Übergänge zwischen verschiedenen Energiezuständen eines Moleküls hervorgerufen werden. Bei einer Umgebungsdruckerhöhung (>10 bar) tritt automatisch eine Absorptionslinienverbreiterung auf, weshalb verbesserte Auswertungsansätze in realen technischen Anwendungen erprobt werden müssen. Im Hinblick auf Entwicklungsarbeiten im Bereich Wasserstoffverbrennung, ist TDLAS dazu geeignet die Brennkammeraustrittstemperaturen, eine Größe, die zur Entwicklung von hoch effizienten Turbinen unerlässlich ist, an einem Prüfstand unter realen Bedingungen zu ermitteln, was konventionell nur über den Umweg der Messung der Sauerstoff und Stickoxidkonzentrationen möglich ist. Auch erlaubt TDLAS die Messung von multiplen Schadstoff- und Verbrennungsgrößen, wie z.B. NO_x , O_2 und Feuchte nahezu zeitgleich und in großer Bandbreite und Genauigkeit, was eine deutlich bessere Ermittlung des Verbrennungszustandes im Allgemeinen und die Messung von Schadstoffemissionen im Speziellen ermöglicht.

Ziel dieses Arbeitspakets ist die Erweiterung des unter ECOFLEX-turbo RoBoFlex (FKZ 03EE5013Q) entwickelten TDLAS-Systems für die Messung von Molekülabsorptionen mit maximal verbreiteter Linienbreite, die bei Speziesmessung bei hohen Umgebungsdrücken essenziell werden. Das Arbeitspaket beinhaltet dabei auch den Test neuer Auswertungsalgorithmen zur allgemeinen Optimierung von TDLAS in Turbomaschinenanwendungen.

AP 4.2: Infrarot-optimierte Schichten für Brennkammeranwendungen (Rolls-Royce Deutschland, Siemens Energy, FZ Jülich)

Innerhalb dieses Arbeitspaketes sollen bezüglich der Infrarot-Transmission optimierte Wärmedämmschichtsysteme entwickelt werden. Durch die Verhinderung der Transmission von IR-Strahlung in den Grundwerkstoff kann dessen Temperatur signifikant reduziert werden. Je nach angewendetem Kühlsystem in der Brennkammer kann allerdings noch eine zusätzliche Wärmedämmung nötig werden. Als besonders geeignete Werkstoffe für die IR-Optimierung zeigen sich Metalle wie Aluminium, Gold oder Platin. Diese können auf eine Diffusionsbarriere aufgetragen werden, die auch Wärmedämmeigenschaften aufweist. Eine

andere Option ist das Dotieren von Wärmedämmschichten. Das Vorhaben soll verschiedene Möglichkeiten in Abhängigkeit des gewählten Kühlsystems beleuchten und den Prozess sowie das Schichtsystem diesbezüglich optimieren.

Ziel dieses Arbeitspaketes ist es, das Wärmedämmschicht- und Oxidationsschutzschichtsystem für Brennkammerschindeln hinsichtlich Infrarottransmission und Prozessführung zu optimieren. Dabei soll ein System erarbeitet werden, dass je nach Kühlkonzept in seinen Schichtdicken und Wirkungsweisen hinsichtlich IR-Transmission und Wärmedämmung optimiert ist und auf verschiedenen Brennkammeranwendungen übertragen werden kann.

AP 4.4: Bestimmung der Flammenantwort von teilvorgemischten H₂ Flammen aus Zeitreihen des dynamischen Drucks (Siemens Energy, Leibniz-Universität Hannover)

Thermoakustisch induzierte Verbrennungsschwingungen begleiten die Entwicklung von emissionsarmen Gasturbinenverbrennungssystemen seit mehr als 30 Jahren. Sie müssen über den gesamten Betriebsbereich der Maschine unterdrückt werden, um Schäden oder ein Abschalten der Maschine zu vermeiden. Die Anforderungen an die thermoakustische Stabilität sind in den letzten Jahren durch die starke Zunahme der Leistungsdichte aufgrund höherer Effizienz und Maschinenleistung als auch die Verbesserung der Betriebsflexibilität der Maschine stark gestiegen. Durch die Verwendung von Wasserstoff werden die Anforderungen an die thermoakustische Stabilität weiter erhöht.

Im Rahmen der digitalen Datenerfassung sowohl von Hochdruck- als auch Maschinentests entsteht ein sehr umfangreicher Datensatz, der die thermoakustische Charakterisierung in Verbindung mit den Betriebsdaten der unterschiedlichen Verbrennungssysteme erlaubt.

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes soll das thermoakustische Verhalten des Gasturbinenverbrennungssystems aus Zeitreihen des gemessenen akustischen Drucks unter Verwendung neuer Methoden, die der Forschungspartner entwickelt, charakterisiert werden. Die Messdaten werden hierbei sowohl vom Hochdruckprüfstand der SIEMENS Energy im „Clean Energy Center“ als auch aus geeigneten Maschinenmessungen erstellt.

Ziel ist es, aus den Messdaten sowohl die thermoakustische Flammenantwort im Hochdruckversuchsstand als auch in der Maschine als Funktion der unterschiedlichen Betriebsdaten und Brennstoffe zu ermitteln. Damit ermöglichen diese Arbeiten auch eine Korrelation zwischen dem thermoakustischen Verhalten auf der Maschine als auch im Prüfstand, was wiederum eine gezielte Weiterentwicklung des Versuchsstandes zur Verbesserung dieser Korrelation erlaubt. Dies geschieht auch mit Hilfe neuer Methoden, die vom Forschungspartner entwickelt worden sind, und im Rahmen dieses Projekts weiterentwickelt werden sollen.

AP 4.5: Fluidodynamik und Akustik von wasserstoffreichen Vormischflammen bei Normalbetrieb und Flammenrückschlag (Siemens Energy, TU Berlin, TU Darmstadt)

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes soll zunächst am ISTA der TU Berlin ein Versuchsstand aufgebaut werden, der es ermöglicht für einen Freistrahlbrenner die Auswirkungen von technisch relevanten Störfaktoren auf das Betriebsverhalten und damit den Flammenrückschlag von wasserstoffreichen Vormischflammen zu untersuchen. Dabei soll die Flammenakustik, insbesondere bei Flammenrückschlag, charakterisiert werden. Parallel zu diesem Experiment soll am ISTA eine Vorgehensweise entwickelt werden, um die dabei auftretende Akustik vorhersagen zu können. Damit soll eine Grundlage für die Auslegung von Brennern geschaffen werden, die bei Flammenrückschlag ein gezielt geändertes akustisches Verhalten aufweisen, was somit Flashbackdetektion als robuste und wirtschaftlicher Alternative zur Detektion mittels Thermoelementen erlaubt.

Am STFS sind in Darmstadt hochaufgelöste Simulationen vorgesehen, die durch den Einsatz von Hochleistungsrechnern durchgeführt werden. Der Fokus dieser Studien liegt auf der gezielten Untersuchung technisch relevanter Störgrößen an der Brennkammerwand, insbesondere lokaler Wandtemperaturinhomogenitäten sowie Wandrauigkeiten. Auf Basis experimentell bestimmter Profile und Variationen dieser Parameter werden in detaillierten Studien deren Auswirkungen auf das Rückschlagverhalten wasserstoff-reicher Vormischflammen analysiert. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse dienen im nächsten Schritt der Entwicklung und Validierung physikalisch konsistenter Modelle zur Flamme-Wand-Wechselwirkung im Rahmen großskaliger LES-Simulationen.

Die Fähigkeit, Flammenlage und Rückschlagsneigung in wasserstoffbefeuelten Brennern numerisch und unter Berücksichtigung technisch relevanter Störgrößen verlässlich vorhersagen zu können, bietet ein erhebliches Potenzial für die industrielle Entwicklung. Insbesondere kann der Bedarf an kostenintensiven Validierungsexperimenten – etwa Hochdruckversuchen mit unskalierten Brennern unter Realbedingungen – signifikant reduziert werden. Darüber hinaus ermöglicht das erweiterte physikalische Verständnis eine gezielte Optimierung wasserstofftauglicher Brennerkonzepte hinsichtlich Emissionsverhalten, Druckverlust sowie Kühl- und Spülluftbedarf, ohne dabei in jedem Entwicklungsschritt experimentelle Nachweise der Flammenstabilität erbringen zu müssen. Die Integration der untersuchten Störgrößen in prädiktive LES-Modelle stellt damit einen zentralen Baustein für eine beschleunigte, modellbasierte Entwicklung der nächsten Generation wasserstofftauglicher Brennkammertechnologien dar.

Verbrennung

Verbundprojekt „InnoTurbinE – Innovative Turbomaschinen für nachhaltige Energiesysteme“

Teilverbundprojekt Verbrennung

Vorhabengruppe „Turbomaschinen für die H₂-Ökonomie“

„Untersuchung und Vorhersage von hochfrequenten Verbrennungsinstabilitäten mit LES“

Vorhaben-Nr.: 1.3

verfasst von

Philip Bonnaire

und

Wolfgang Polifke

Technische Universität München

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das dem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wird von Siemens Energy Global GmbH & Co. KG und mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWE) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages unter dem Förderkennzeichen 03EE5041F gefördert.

Abstract

The mechanisms of high-frequency thermoacoustic instabilities in systems with axially staged combustion are not yet fully understood. This work aims to shed light on this aspect and identify interaction mechanisms that pave the way toward developing damping strategies. For this purpose, this study applies large eddy simulation to generic and industrially relevant configurations and uses modal analysis to identify the coherent structures of the turbulent, reacting flow. During thermoacoustic instability, the shear layer of the reactive jet shows strong vortex shedding activity. Changing the orientation of the major and minor axes of the elliptical mixing tubes relative to the main flow triggered different selfexcited thermoacoustic modes.

Numerical simulations of a staged combustion configuration that was experimentally investigated at the German Aerospace Center in Stuttgart revealed the relevance of orthogonal acoustic velocity fluctuations relative to the jet axis and the compression/expansion of the gases as a consequence of acoustic pressure fluctuations.

Kurzfassung

Die Mechanismen hochfrequenter thermoakustischer Instabilitäten in Systemen mit axial gestufter Verbrennung sind noch nicht vollständig verstanden. Diese Arbeit beleuchtet diesen Aspekt durch Identifikation von Wechselwirkungsmechanismen, die die Entwicklung von Dämpfungsstrategien ermöglichen. Dazu werden in dieser Studie Grobstruktursimulationen für generische und industriell relevante Konfigurationen durchgeführt und eine Modalanalyse zur Identifizierung der kohärenten Strukturen der turbulenten, reagierenden Strömung eingesetzt. Unter Einfluss von thermoakustischer Instabilität zeigt die Scherschicht des reagierenden Strahls starke Wirbelablösung. Die Ausrichtung der Haupt- und Nebenachsen der elliptischen Mischrohre im Verhältnis zur Hauptströmung löst unterschiedliche, selbst erregte thermoakustische Moden aus.

Numerische Simulationen einer am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt in Stuttgart experimentell untersuchten gestuften Verbrennungskonfiguration analysierten die Bedeutung von Geschwindigkeitsfluktuationen orthogonal relativ zur Achse des Strahls sowie die Kompression und Expansion der Gase aufgrund der Dichtefluktuationen.

1 Einleitung

Im Laufe der Jahre wurde beträchtliche Forschungsarbeit geleistet, um das Auftreten thermoakustischer Instabilitäten zu verstehen. Dazu gehörten zum einen die Bestimmung der Mechanismen, die zu einer positiven Rückkopplung zwischen Flamme und Akustik führen, sowie die Ableitung wirksamer Dämpfungsstrategien [5, 18]. Numerische Simulationen, insbesondere die Grobstruktursimulation (LES), können die grundlegenden Prozesse der Verbrennungsdynamik in Zeit und Raum auflösen und sind in dieser Hinsicht sehr hilfreich. Mit den zunehmenden Rechenressourcen ist LES nun über akademische Testfälle hinaus auf weitaus komplexere, industriell relevante Systeme anwendbar [35]. Es ist jedoch nach wie vor undenkbar, eine gesamte Brennkammer ohne Modelle für Turbulenz und Turbulenz-Chemie-Interaktionsmodell zu simulieren. Daher müssen Einschränkungen bei den Modellannahmen und Kompromisse bei der zeitlichen und räumlichen Auflösung berücksichtigt werden, um eine brauchbar genaue Darstellung der wichtigsten Phänomene zu gewährleisten.

Das Ziel, mehr Wasserstoff in Gasturbinen einzusetzen, stellt eine weitere Hürde für die numerische Modellierung dieser Prozesse dar: Wasserstoff weist eine höhere Flammengeschwindigkeit und deutlich dünnere Flammenfronten auf [10]. Während Erstere zu einer höheren Rückschlagneigung führen kann [36], stößt die numerische Modellierung aufgrund der geringeren Flammendicke auf das Problem der räumlichen Auflösung. Darüber hinaus weist Wasserstoff eine deutlich höhere molekulare Diffusion auf, was zu thermoeffusiven Instabilitäten führen kann [2].

Das Projekt versucht Antworten zu geben, wie der reagierende Querstrahl Teil der Rückkopplungsschleife für hochfrequente Instabilitäten sein kann. Folgende Auflistung erwähnt Gründe, weshalb aufgrund der Präsenz von hochfrequenten Instabilitäten die Anwendbarkeit etablierter Methoden zur Identifizierung eines Flammenmodells in Frage gestellt werden müssen:

1. Flammen verhalten sich wie Tiefpassfilter [1]. Störungen an der Flammenbasis oberhalb der Grenzfrequenz führen nicht mehr zu Störungen der Wärmefreisetzung.
2. Bei hohen Frequenzen ist die Annahme einer kompakten Flamme möglicherweise nicht mehr gültig. Daher müssen lokale Wechselwirkungen zwischen Druck und Wärmefreisetzung im Modellierungsansatz berücksichtigt werden [15].
3. Die Ausbreitung von Schallwellen ist nicht auf die Längsrichtung beschränkt. Transversale oder radiale Moden werden häufig bei hochfrequenten Verbrennungsinstabilitäten beobachtet und führen möglicherweise neue Anregungsmechanismen für die Flamme ein.

Diese Tatsachen veranlasste Schwing et al. [34], Zellhuber et al. [38, 39] und Méry [20, 21], das Modell der *Verschiebung* der Flamme im Druckfeld als führenden Mechanismus der thermoakustischen Wechselwirkung für hochfrequente Instabilitäten vorzuschlagen. Hummel et al. [15] erweiterten dieses Modell später um den Effekt der Dilatation (im Original als *Deformation* bezeichnet).

Ein weiteres, nicht zu vernachlässigendes Merkmal hochfrequenter Instabilitäten ist die mit Äquivalenzschwankungen verbundene Modulation der Wärmefreisetzungsrate. Ausgelöst durch Geschwindigkeitsschwankungen im Luftstrom wandern brennstoffreiche bzw. brennstoffarme Fluidelemente in Richtung der Flamme, was zu Schwankungen in der Wärmefreisetzungsrate führt. Die Diffusionslänge nimmt jedoch mit zunehmender Frequenz relativ zur Wellenlänge zu. Dadurch verwischen diese Störungen, und der Mechanismus wird obsolet.

Die Tatsache, dass die akustische Ausbreitung auch in radialer und transversaler Richtung stattfinden kann, führt die Komplexität ein, dass die Flamme orthogonal zu ihrer Ausbreitungsrichtung angeregt werden kann. O'Connor und Kollegen untersuchten diese Wechselwirkung zwischen Akustik und Flamme anhand einer Reihe von Studien an ringförmigen Brennkammern, die Instabilitäten in Umfangsrichtung ausgesetzt waren [23, 24, 25, 26, 27, 28]. Die beobachteten Störungen waren niederfrequent und die Annahme der Kompaktheit der Flamme im akustischen Feld blieb gültig. Dennoch brachten diese Arbeiten wesentliche Überlegungen zur Interaktion von tieffrequenter Transversalakustik und Flammenverhalten hervor, die womöglich auch auf das hochfrequente Regime übertragbar sind.

Nach Ansicht der Autoren [23, 24, 25, 26, 27, 28] lässt sich der Einfluss der transversalen Akustik in drei Wege einteilen.

1. Transversale Akustik löst über den Kopplungsmechanismus im Injektorrohr longitudinale Akustik aus, die dann über bekannte Mechanismen eine Flammenreaktion erzeugt.
2. Transversale Akustik verursacht eine Strömungsinstabilität, die eine Flammenreaktion hervorruft.
3. Transversale Akustik erzeugt direkt eine Flammenreaktion.

Der reagierende Querstrahl bietet die Besonderheit, dass aufgrund seiner Trajektorie selbst longitudinale Moden eine akustische Anregung orthogonal zur Flammenachse auslösen. Ebenso wird durch den Einfluss der Querströmung die Symmetrie bezüglich der Strahlaustrittsachse gebrochen. Im Gegensatz zur symmetrischen Flamme, die auf eine seitliche akustische Geschwindigkeitsanregung mit der doppelten Frequenz reagiert [31, 37], wodurch die thermoakustische Rückkopplungsschleife unterbrochen wird, zeigt der reagierende Strahl dieses frequenzverdoppelnde Verhalten nicht. Choi und Kim [6] untersuchten die Charakteristik des transversalen Strahls unter Einwirkung von orthogonaler Anregung und beobachteten einen stromaufwärts gerichteten Knick, wenn der Strahl hohen stromaufwärts gerichteten Geschwindigkeitsschwankungen ausgesetzt war, wie z. B. in Druckknoten der stehenden Mode. Dies resultierte mit Verzug in Fluktuationen der Wärmefreisetzung.

Der reagierende Querstrahl bietet auch viele Wirbelstrukturen, die möglicherweise, ausgelöst durch eine akustische Anregung, eine Flammenantwort verstärken können, ähnlich wie bereits von O'Connor [23] für das System der transversalen Anregung auf Flammen der Ringbrennkammern beschrieben. Um das potentielle Eingreifen der hydrodynamischen

Strukturen des reagierenden Querstrahls in die thermoakustische Rückkopplungsschleife einzuordnen bedarf es Kenntnis über die Ausprägung und Frequenz der Wirbel. Studien von Megerian et al. [19], Davitian et al. [7] und Getsinger et al. [11] kamen übereinstimmend zu dem Ergebnis, dass die Spektren der hydrodynamischen Instabilität der Scherschichtwirbel der nicht-reagierenden Strahlen bei kleinen Dichteverhältnissen (Getsinger et al. [11]: $S < 0.5$) und geringen Geschwindigkeitsverhältnissen (Davitian et al. [7]: $R < 3$) nadelförmige Spitzen zeigen und somit möglicherweise ohne große äußere Anregung eine Modulation der Flamme erzwingen könnten. Nair [22] stellte Skalierungsgesetze für die Frequenz der Scherschichtinstabilität auf, die hilfreich bei der Abschätzung der zu erwartenden hydrodynamischen Frequenz sein können.

Tabelle 1: Betriebsbedingungen: Der einzig variierender Parameter ist das Seitenverhältnis des reagierenden Querstrahls mit $AR = [0.5, 1, 2]$.

p in bar	J	AR	ϕ	T_c in K	T_{ad} in K	$\dot{m}_{1st}$ in g/s	$\dot{m}_{RJC}$ in g/s
8.2	15	[0.5, 1, 2]	0.855	723.15	2386.1	763.4	420.0

2 Generische Geometrie

2.1 Elliptische reagierende Querstrahlen

Um den Einfluss der hydrodynamischen Strukturen auf die thermoakustische Stabilität zu überprüfen wird nun bei gleichbleibenden Betriebsbedingungen, welche in Tabelle 1 einzusehen sind, die Form der reagierenden Querstrahlen variiert. Getestet wurden elliptische Variationen des Mischrohrs (Abbildung 1). Bei gleicher Fläche wurde die große und kleine Halbachse mit der Querströmung ausgerichtet. Das Stabilitätsverhalten des reagierenden Querstrahls in Abhängigkeit der Form der Mischrohre wurde bisher noch nicht systematisch untersucht. Es existieren Studien von Ho und Gutmark [13], die die Besonderheit von elliptischen Freistrahlen aufzeigen. Sie weisen auf die ungleiche Verteilung der Wirbelstärke und der Impulsverlustdicke entlang der azimuthalen Richtung hin. Die Frequenz skaliert mit der minimalen Impulsverlustdicke, die entlang der kleinen Halbachse zu finden ist. Zudem wurde eine verstärkte Ansaugung umliegenden Fluids infolge der Wirbelinduktion beobachtet, welche zugleich die Rotation der Halbachsenorientierung elliptischer Wirbelringe verursacht. Dieser Mechanismus konnte von Hussain und Husain [16] bekräftigt werden. In Bezug auf die thermoakustische Stabilität konnten Paschereit und Gutmark [29] zeigen, dass ein elliptischer, drallstabilisierter Brenner durch das veränderte Mischverhalten eine starke azimuthale Mode produziert. Diese reduziert die Kohärenz der Wirbel in axialer und radialer Richtung. Infolgedessen zeigt die Zone der Wärmefreisetzung eine deutlich geringere Variabilität innerhalb eines Schwingungszyklus und Druckamplituden sind abgeschwächt. Polifke et al. [30] zeigten, dass die elliptischen Brenner eine breitere Impulsantwort aufweisen, was zu stabilerem Verhalten führt.

Da die Wirbelringe in einem Strahl in Querströmung schnell aufbrechen, sind die für den Freistrahler geltenden Stabilitätsmechanismen hier nur teilweise anwendbar. Folglich wird auch der kreisrunde Strahl auf sein Stabilitätsverhalten getestet.

Das thermoakustische Spektrum basierend auf dem aufgezeichneten Drucksignal zeigt, wie sich die dominante akustische Mode ändert, wenn das Seitenverhältnis variiert wird (siehe Abbildung 2). Im länglichen Fall ist die 1L1T-Mode mit den stärksten Amplituden sichtbar. Der zweitstärkste Frequenz gehört zur ersten radialen Mode. Es gibt markante Amplituden bei etwa 2200 Hz und 8800 Hz, die jeweils dem ersten longitudinalen und dem zweiten transversalen Modus zugeordnet sind. Erhöht man das Seitenverhältnis auf $AR = 1$, nimmt die Stärke dieser Moden ab. Beim eiförmigen Strahl ist die 1T1L-Mode vollständig verschwunden, und nur die 1R-Mode ist deutlich sichtbar.

Zur Untersuchung der möglichen Teilhabe der hydrodynamischen Strukturen an der thermoakustischen Rückkopplungsschleife wird eine Dynamic Mode Decomposition (DMD), eingeführt

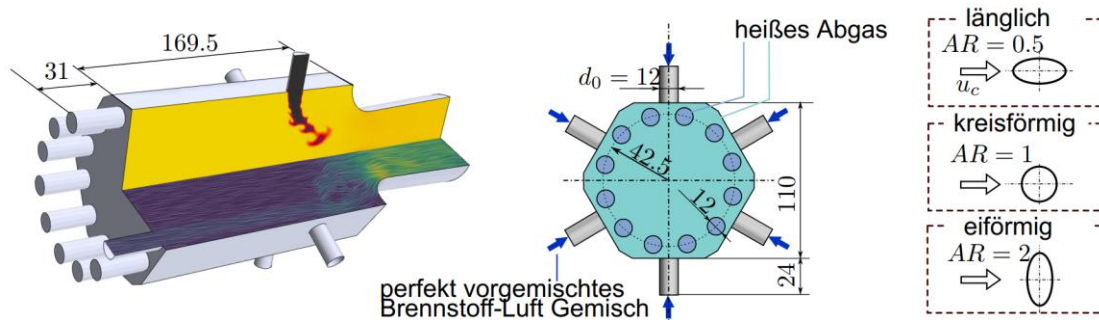


Abbildung 1: Geometrie der Brennkammer. Längenmaße sind in mm angegeben. Links: Perspektivische Darstellung des Brenners. Mitte: Frontalansicht. An der Stirnfläche wird nur heißes Abgas eingedüst. Rechts: Geometrische Variationen des reagierenden Querstrahls. Abbildungen sind teilweise übernommen aus [3].

von Peter Schmid [33], verwendet. Für die vorgestellte Analyse wird die Variante von Quinlan [32] verwendet, bei der mehrere charakteristische Größen des Strömungsfeld zu einem großen Vektor zusammengefasst werden. Somit werden verknüpfende Dynamiken sichtbar, gleichzeitig dient diese Methode aus eigener Erfahrung als Filter, um dominante Moden im turbulenten Regime hervorzuheben. In unserem Fall werden die horizontale und vertikale Geschwindigkeit sowie die aus der Ebene zeigende Wirbelstärke kombiniert zu $\xi = [u, v, \omega]^T$, um die Moden der Hydrodynamik zu berechnen. Zudem wird eine alleinstehende Modalanalyse der Wärmefreisetzung durchgeführt. Die Methode wird detailliert in [4] präsentiert. Abbildung 2 zeigt die Stärke der einzelnen Moden, normalisiert für ihre Vergleichbarkeit. Beim länglichen Strahl ist deutlich eine Mode bei 5300 Hz sichtbar, welche zur akustischen Frequenz der 1T1L Mode passt. Die hydrodynamische Mode bei 2600 Hz gehört zur 1L Mode. Die Wärmefreisetzung reagiert am stärksten allerdings auf die 1T1L Mode. Beim kreisförmigen Strahl sind die hydrodynamischen Moden stark abgeschwächt und führen auch zu einer geringen Antwort der Wärmefreisetzungsrates. Beim eiförmigen Strahl ist

eine deutliche Reaktion der hydrodynamischen Mode und der Wärmefreisetzung bei der akustischen Frequenz der 1R Mode erkennbar.

Die Modenformen zeigen jeweils deutliche Scherschichtmodulation bei der Hydrodynamik sowie in den Moden der Wärmefreisetzungsrates, welche jeweils für die dominante akustische Frequenz ebenfalls in Abbildung 2 gezeigt sind. Es lässt sich bestätigen, dass die Modulationen der Scherschicht die Flamme beeinflussen und dass hydrodynamische Strukturen zusammen mit der Wärmefreisetzungsrates Schwankungen mit nahezu gleicher Frequenz aufweisen können. Dies stützt die Hypothese, dass die hydrodynamischen Fluktuationen der Scherschicht zu den thermoakustischen Wechselwirkungen beitragen können.

3 Reale Geometrie

3.1 Vorstellung der Standardkonfiguration

Die untersuchte Geometrie basiert auf einem Experiment des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR). Der Hochdruckprüfstand HBK-S, bekannt aus früheren Arbeiten, bei-

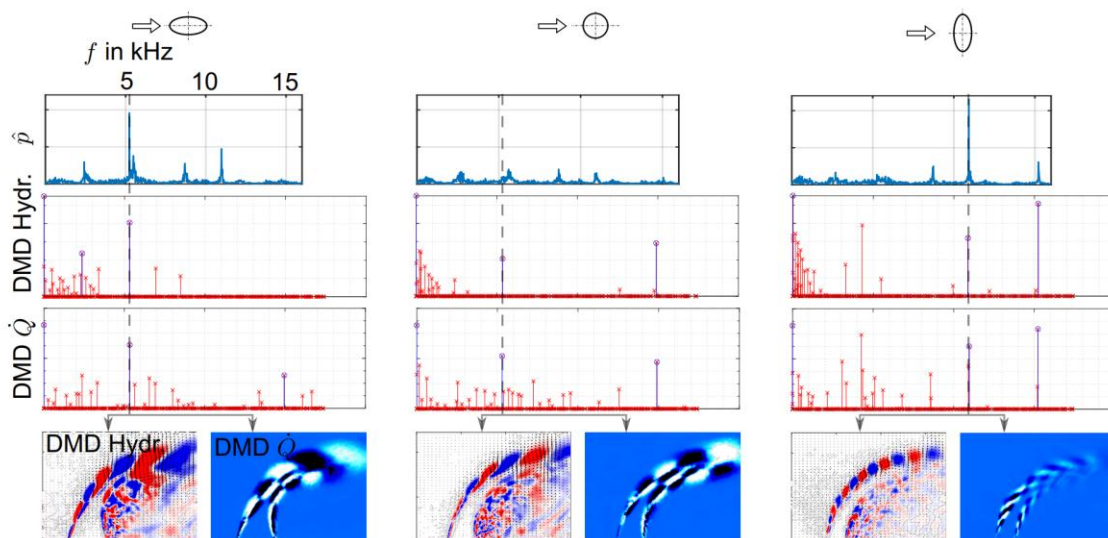


Abbildung 2: Modenstärke der Hydrodynamik (DMD Hydr.) bestehend aus den Vektoren $[u, v, \omega]^T$, sowie die Amplituden der Modalanalyse der Wärmefreisetzungsrates $DMD \dot{Q}$. Darüber die Fourier-Transformation der Druckfluktuation. Abbildungen sind teilweise übernommen aus [3].

spielsweise von Lammel et al. [17] und Fiolitakis et al. [9], wurde mit einer zweiten Stufe ausgestattet, die durch einen reagierenden Strahl im Querstrom an drei der sechs Seitenwände der hexagonalen Brennkammer realisiert wurde. Die in dieser Studie verwendete Konfiguration und Abmessungen sind in Abbildung 3 dargestellt. Der Unterschied zu den Simulationen an der generischen Geometrie ist, dass nun eine technische Vormischung vorliegt. Somit können Störungen des Äquivalenzverhältnisses auftreten, verursacht durch die

akustische Geschwindigkeitsmodulation am Injektor, welche zur Flamme propagieren und dort Fluktuationen der Wärmefreisetzungsrate bewirken. Ein einzelner Brenner der zweiten Stufe liefert knapp 6% der Gesamtleistung, während ein Brenner der ersten Stufe etwa 7% der Gesamtleistung erzeugt. Der Brennstoffmassenstrom beträgt 0.0166 kg s^{-1} , was einer Gesamtleistung von ca. 1 MW entspricht. Detaillierte Betriebsbedingungen für die erste und zweite Stufe sind in Tabelle 2 aufgeführt.

	u_j in $\frac{\text{m}}{\text{s}}$	ϕ		Komp. in vol - %	$\dot{m}$ in $\frac{\text{kg}}{\text{s}}$	T in K
1. Stufe	110	0.53	Brennstoff	60 H ₂ - 40 CH ₄	0.0138	333.15
			Luft	79 N ₂ - 21 O ₂	0.5203	673.15
2. Stufe	90	0.53	Brennstoff	60 H ₂ - 40 CH ₄	0.0028	333.15
			Luft	79 N ₂ - 21 O ₂	0.1066	673.15

Tabelle 2: Randbedingungen für die erste und zweite Stufe.

Die Simulation werden mit Anfangsbedingungen gestartet, die auf einer RANS-Simulation basieren. Anschließend wird das PISO-Verfahren, das in StarCCM+ in der zeitlichen Integration erster Ordnung implementiert ist, für 140 ms mit einem Zeitschritt von $5 \mu\text{s}$ verwendet, um die

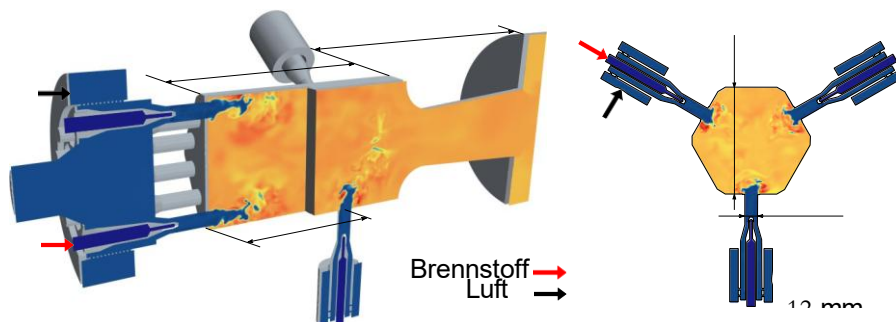


Abbildung 3: Geometrie und Strömungsstrukturen der Standardkonfiguration mit technisch vorgemischter zweiter Stufe.

vom drastischen Impuls ausgehenden akustischen Wellen durch den Wechsel von RANS zu LES zu dämpfen. Anschließend wird die Zeitintegrationsmethode auf ein implizites Verfahren zweiter Ordnung mit einem Zeitschritt von $1 \mu\text{s}$ umgestellt. Dieses bereits von Ho et al. [14] gezeigte Verfahren erwies sich als effiziente Methode zur Initialisierung von LES-Simulationen zur Vermeidung numerischer Artefakte und Dämpfung akustischer Wellen.

Der Vergleich der zeitlich gemittelten OH*-Chemilumineszenz aus dem Experiment mit der mittleren Wärmefreisetzungsrate aus der Grobstruktursimulation zeigt eine gute Übereinstimmung (Abbildung 4). Die Aufzeichnung des akustischen Druckes zeigt einen Grenzyklus bei einer Frequenz von 2188 Hz, was der ersten longitudinalen Moden entspricht.

Das Experiment zeigt ebenfalls diese Mode im akustischen Spektrum, wie in Abbildung 4 dargestellt ist.

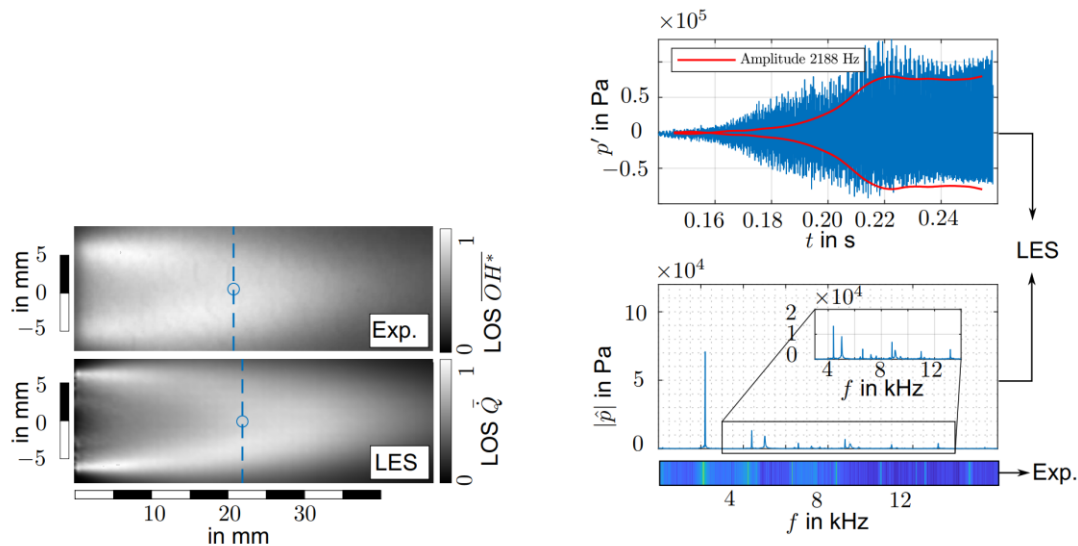


Abbildung 4: Links: Die zeitlich gemittelten OH*-Chemilumineszenz aus dem Experiment wird mit der mittleren Wärmefreisetzungsrate aus der Simulation für die erste Stufe verglichen. Die blauen Punkte stellen den Schwerpunkt der Wärmefreisetzung dar. Rechts: Technisch vorgemischte Simulation, die eine 1L Mode bei 2188 Hz zeigt.

3.2 Variation der Mischrohlänge der ersten Stufe

Um relevante Wirkmechanismen zu identifizieren, wird zunächst die Sensitivität auf Äquivalenzfluktuationen untersucht. Abbildung 5 zeigt detailliert die Injektorgeometrie der ersten und zweiten Stufe sowie jeweils im Frequenzbereich die Druckfluktuationen Nahe des Injektors, die flächengemittelte Störung des Äquivalenzverhältnisses und die resultierende Modulation der Wärmefreisetzungsrate. An der ersten sowie der zweiten Stufe wird ersichtlich, dass Fluktuationen aller genannten Größen bei der akustischen Frequenz der 1L Mode bei 2188 Hz vorhanden sind. Somit werden Brennstoffinhomogenitäten nicht verschmiert bis sie die Flamme erreichen und führen so zu Modulationen der Wärmefreisetzungsrate.

Abbildung 6 zeigt auf der linken Seite das Spektrogramm des akustischen Druckes der Simulation sowie die des Experiments einer Konfiguration mit verlängerter Mischstrecke in der ersten Stufe. Das Experiment zeigt nicht die 1L Mode bei 2188 Hz, was von der Simulation bestätigt werden kann. Schaut man sich die Phasenlage zwischen Druck und Wärmefreisetzung an einer ausgewählten Flamme der ersten Stufe genauer an, sieht man für die Geometrie mit der kurzen Mischrohlänge, welche die 1L Mode im Spektrum zeigt (Abbildung 4), kaum eine Differenz. Nach dem Rayleigh-Kriterium ist das eine notwendige, aber nicht hinreichende Bedingung für in- stabiles Verhalten. Beachtet man nun die verlängerte Mischstrecke und den damit verbundenen Zeitverzug, der sich aus der Länge des Mischrohrs und der mittleren

Strömungsgeschwindigkeit ergibt, findet man eine Verzögerung von knapp einer viertel Periode. Dieser zusätzliche Verzug bringt die Phasendifferenz zwischen Druck und Wärmefreisetzung in den stabilen Bereich. Die Simulation zeigt jedoch die zweite transversale Mode (siehe Abbildung 7) bei 7200 Hz mit signifikanter Amplitude.

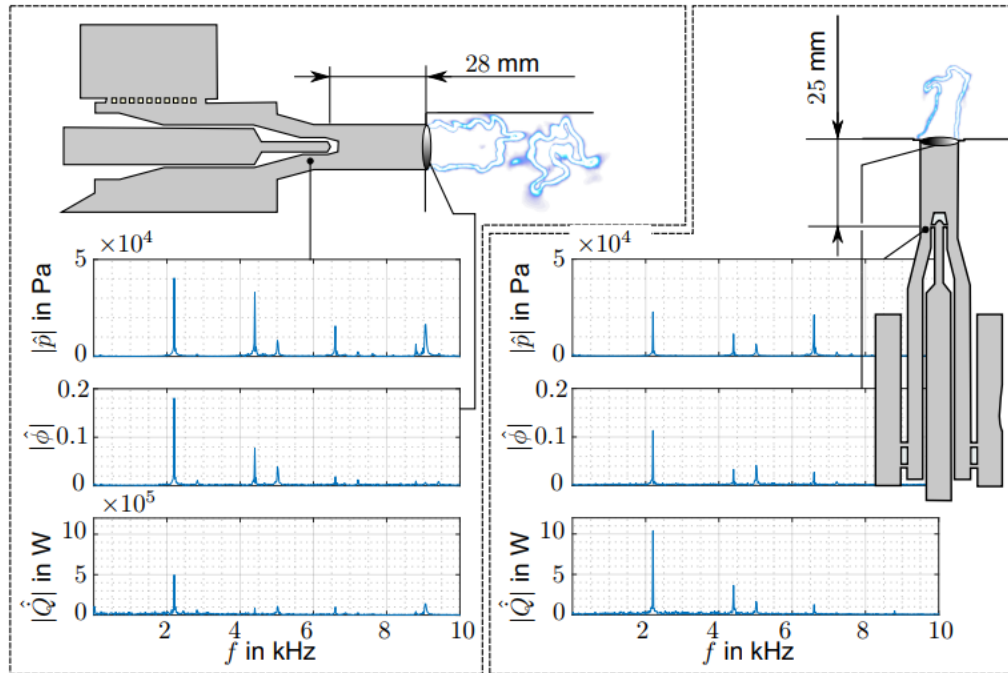


Abbildung 5: Spektren von Druck, Äquivalenzverhältnis und integrierter Wärmefreisetzung, aufgezeichnet an der angegebenen Position für die erste Stufe (links) und zweite Stufe (rechts) der technisch vorgemischten Simulation.

Diese Mode wird im Experiment nicht beobachtet. Es erscheint möglich, dass diese Mode physikalisch ist, im Experiment jedoch aufgrund der vielen Dämpfungsfaktoren im Versuchsaufbau (Kühlluft, Leckage durch Druckmessumformer) nicht sichtbar war, wie beispielsweise bereits in Eder et al. [8] beschrieben. Obwohl die Simulation diese vielen kleinen Dissipationseffekte der akustischen Energie nicht erfasst, kann gezeigt werden, dass sie die Mechanismen reproduzieren kann, die für das Ausbleiben der 1L Mode verantwortlich sind.

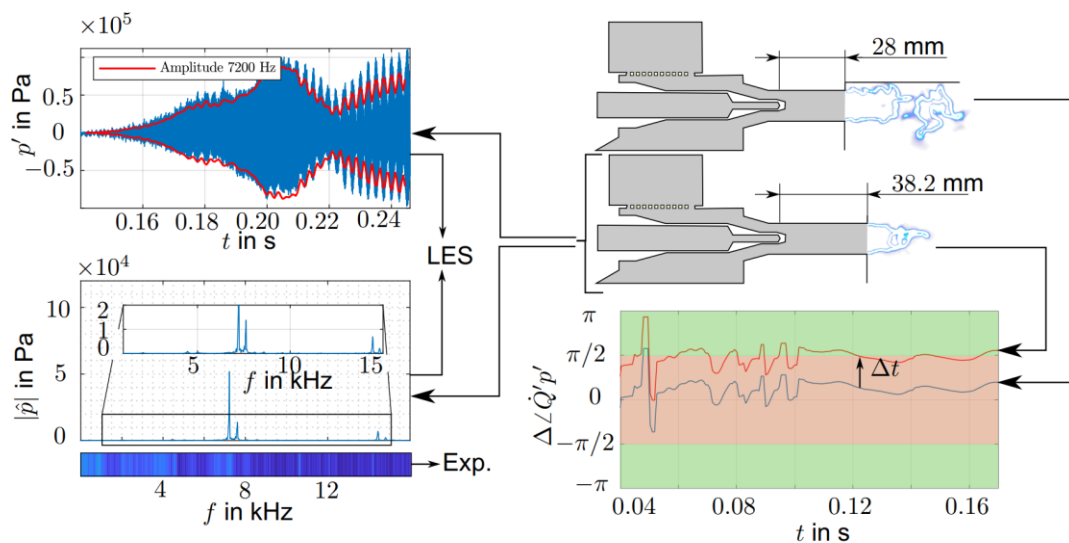


Abbildung 6: Links: Das Druckspektrum im Experiment zeigt keine Amplituden, und die erste longitudinale Mode ist nicht sichtbar. Die Simulation zeigt außerdem das Ausbleiben der 1L-Mode bei 2188 Hz, jedoch eine 2T-Mode bei 7200 Hz. Rechts: Die Phasenlage zwischen Druck und Wärmefreisetzung wird für die Konfigurationen mit unterschiedlicher Mischrohrlänge der ersten Stufe abgebildet. Im rot hinterlegten Bereich kann gemäß dem Rayleigh-Kriterium Instabilität auftreten, während die grün hinterlegte Phasendifferenz in einem stabilen Verhalten resultiert.

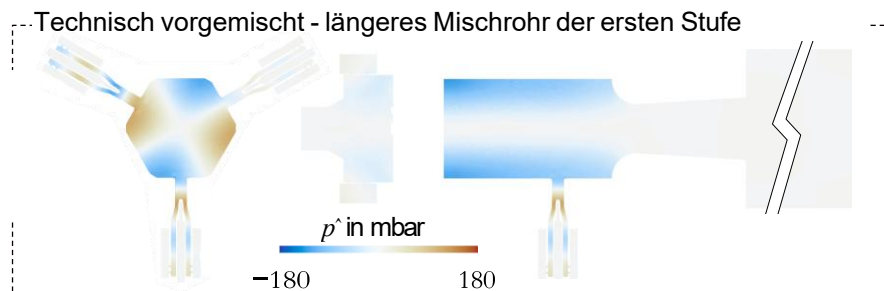


Abbildung 7: FFT-Transformation der Configuration mit längerem Mischrohr in der ersten Stufe, die die zweite transversale Mode zeigt. Die Betriebsbedingungen sind dieselben wie im dargestellten Fall mit der technisch vorgemischten Axialstufe.

3.3 Unterbindung von Brennstoffinhomogenitäten

Auffallend in Abbildung 5 ist, dass die Amplitude der Wärmefreisetzungsrate in der zweiten Stufe wesentlich größer ist, obwohl die gemessene Fluktuation des Äquivalenzverhältnisses deutlich geringer ist. Somit verdichtet sich die Hypothese, dass ein weiterer Mechanismus zusätzlich zur Äquivalenzfluktuation aktiv ist. Aus diesem Grund wird mittels eines numerischen Eingriffs die Fluktuation des Äquivalenzverhältnisses ausgeschaltet. Perfekt vorgemischtes Gemisch mit der gleichen Menge an Brennstoff wird durch beide Einlässe, die des Brennstoffs und der Luft der axialen Stufe eingedüst. Somit wird im Folgenden der Unterschied zwischen der technisch vorgemischten zweiten Stufe, abgekürzt als *TP*, mit der perfekt vorgemischten zweiten Stufe, abgekürzt *PP* verglichen. Die erste Stufe bleibt unverändert in beiden Fällen technisch vorgemischt. Die Simulation *PP* zeigt anders als die Simulation *TP* eine longitudinale-transversale Mischmode bei 5072 Hz (siehe Abbildung 8 und 9). Initialisiert wurde die Simulation wie bereits beschrieben durch die RANS Simulation, gefolgt von der LES mit großem Zeitschritt und Verfahren erster Ordnung in der Zeitintegration.

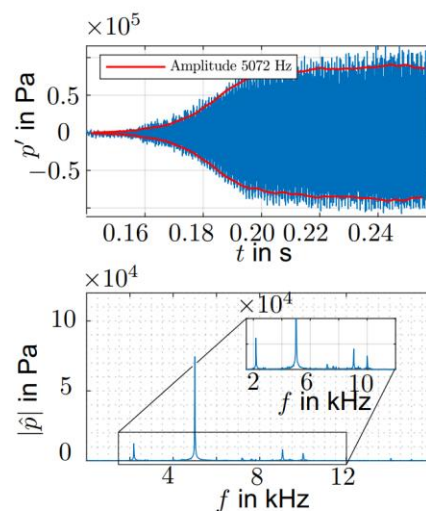


Abbildung 8: Die perfekt vorgemischte Simulation zeigt eine 1T1L Mode bei 5072 Hz.

Die Flammen der ersten und zweiten Stufe können angesichts der Flammenlänge (siehe Abbildung 4 für die erste Stufe) und der Modenstruktur (siehe Abbildung 9) als kompakt angesehen werden. Folglich berücksichtigen wir nur die integrierte Wärmefreisetzung und keine lokale Wechselwirkung von Druck und Wärmefreisetzung.

Die integrierte Wärmefreisetzung $\dot{Q}$ entlang einer Flammenoberfläche A_{fl} ist eine Funktion der unverbrannten Dichte ρ_u , der Reaktionsenthalpie h_r und der Flammengeschwindigkeit s_l :

2188 Hz

$$\dot{Q} = \int_{A_{fl}} \rho_u h_r s_l dA, \quad (1)$$

$$\dot{Q} = \rho_u h_{r,fl} s_{l,fl} A_{fl}, \quad (2)$$

wobei der Index fl die Bewertung der jeweiligen Größe auf der Flammenoberfläche bezeichnet.

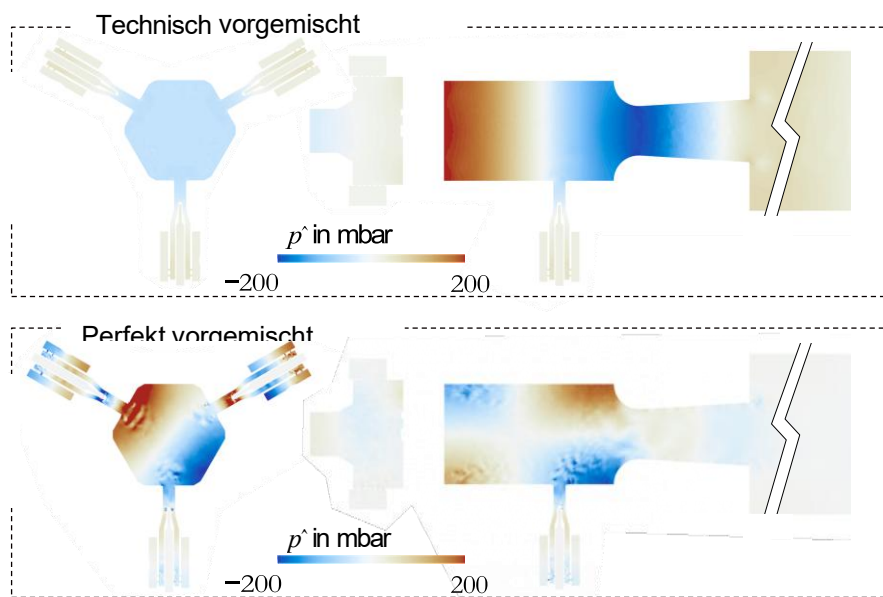


Abbildung 9: Fourier-Transformation der beiden Fälle. Die Simulation mit technisch vorgemischter zweiter Stufe zeigt eine stehende longitudinale Mode (oben), die Simulation mit perfekt vorgemischter zweiter Stufe eine rotierende longitudinal-transversalen Mischmode (unten). Der Stern kennzeichnet die Sondenposition für die in Abbildung 4 und 8 dargestellten Druckreihen.

In einem linearisierten Rahmen lassen sich die folgenden Beiträge zu normalisierten Schwankungen der Wärmefreisetzungsrate identifizieren:

$$\frac{\dot{Q}'}{\bar{\dot{Q}}} = \frac{\rho'_u}{\bar{\rho}_u} + \frac{h'_{r,fl}}{\bar{h}_{r,fl}} + \frac{s'_{l,fl}}{\bar{s}_{l,fl}} + \frac{A'_{fl}}{\bar{A}_{fl}} \quad (3)$$

Die Größen aus Gleichung (3) werden auf einer Isofläche der normalisierten Fortschrittsvariablen $c = 0.5$ im Frequenzraum analysiert. Der Betrag und das Argument des Fourier-Koeffizienten markiert als $\hat{(\cdot)}$ in Abbildung 10 werden bei der instabilen Frequenz mit einem Zeiger in der komplexen Ebene dargestellt. Dieses Verfahren ermöglicht Rückschlüsse darauf,

welche Wechselwirkungen die globale Wärmefreisetzung beeinflussen und somit zu einem positiven Rayleigh- Kriterium führen. Es gilt zu beachten, dass die unverbrannte Dichte ρ_u im Mischrohr und nicht auf der Isofläche ausgewertet wird. Die Modulationen der Reaktionsenthalpie h' werden als Schwankungen des Äquivalenzverhältnisses ϕ' ausgedrückt, da sie direkt messbar sind. Die laminare Flammengeschwindigkeit wird basierend auf der Korrelation von Gülder [12] berechnet, wobei die Parameter für Methan als Brennstoff gewählt werden. Die Fläche A wird als Gesamtfläche der Isofläche $c = 0.5$ berechnet. Es ist anzumerken, dass speziell die Analyse auf Basis der laminaren Flammengeschwindigkeit eine erhebliche Vereinfachung darstellt, da die Verbrennung im turbulenten Regime stattfindet.

Für die erste und zweite Stufe beider Simulationen sind die Modulationen des Druckes und der Wärmefreisetzungsrates in Phase. Somit würde der Zeiger des Druckes das gleiche Argument aufweisen wie die Wärmefreisetzungsrates und ist aus diesem Grund nicht in Abbildung 10 dargestellt. Für die erste Stufe beider Simulationen ist ein erheblicher Beitrag der laminaren Flammengeschwindigkeit zur Wärmefreisetzungsrates erkennbar. Bedingt wird dies zum einen

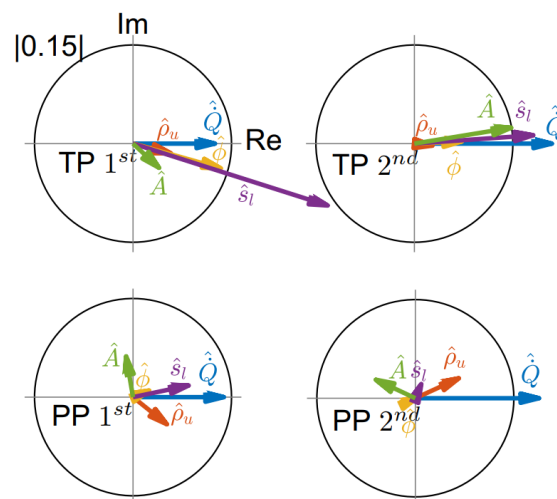


Abbildung 10: Zeigerdiagramme der in Gl. (3) gezeigten Größen bei der instabilen Frequenz (2188 Hz für TP und 5027 Hz für PP) bei einer ausgewählten Flamme für die erste und zweite Stufe.

durch den ebenso nachvollziehbaren Einfluss des Äquivalenzverhältnisses, sowie existiert der Einfluss der isentropen Kompression auf die Flammengeschwindigkeit, der in der Zusammenarbeit mit der Uni Duisburg-Essen zur Anfachung thermoakustischer Instabilitäten in der Grobstruktursimulation eingesetzt wurde. Bei der zweiten Stufe ist für die technisch vorgemischte Simulation ebenso zu erkennen, dass die Flammengeschwindigkeit einen signifikanten Einfluss ausübt. Zudem ist der Einfluss der Flammenfläche erheblich. Der Grund hierfür wird in Abbildung 11 ersichtlich. Aufnahmen der Wärmefreisetzungsrates werden auf der Ebene, welche den reagierenden Querstrahl mittig schneidet, mit einer Dynamic Mode

Decomposition (DMD) in ihre dominanten Strukturen zerlegt. Anschließend werden die Daten zurück in den Zeitbereich konvertiert, wobei nur das gemittelte Feld und die erste stärkste Mode berücksichtigt wird, deren Frequenz ungleich null ist:

$$\mathbf{x}(t) = \sum_{k=1}^r \psi_k e^{i\omega_k t} b_k, \quad (4)$$

wobei ψ_k die Moden und ω_k eine komplexe Frequenz darstellt. b_k ist die Anfangsbedingung der Mode k und r die Anzahl der berücksichtigten Moden. Dieses Verfahren stellt eine effektive Methode dar, um Rauschen zu filtern und die Dynamik bei der instabilen Frequenz hervorzuheben. Anhand der rekonstruierten Bilder der Wärmefreisetzungsrate bei der dominanten Frequenz wird erkennbar, dass die Flammen sich nahe der Mündung zwischen $\tau = 0.25$ und $\tau = 0.625$ stark stromauf richtet. Dies führt dazu, dass Flammenfläche vernichtet wird und resultiert in abnehmender Wärmefreisetzungsrate. Das Abknicken der Flamme entgegen der mittleren Strömung wird bedingt durch die akustische Geschwindigkeit, wie in den abgebildeten Zeitreihen neben den zweidimensionalen Flammenbildern ersichtlich wird. Das Abknicken beginnt zum Zeitpunkt negativer akustischer Geschwindigkeit. Da in der untersuchten Konfiguration eine Mode mit stehendem Charakter vorliegt, in der die akustische Geschwindigkeit dem Druck voraus ist, kommen Druck und Wärmefreisetzungsrate aufgrund des Zeitverzugs zwischen akustischer Geschwindigkeit und Wärmefreisetzungsrate in Phase.

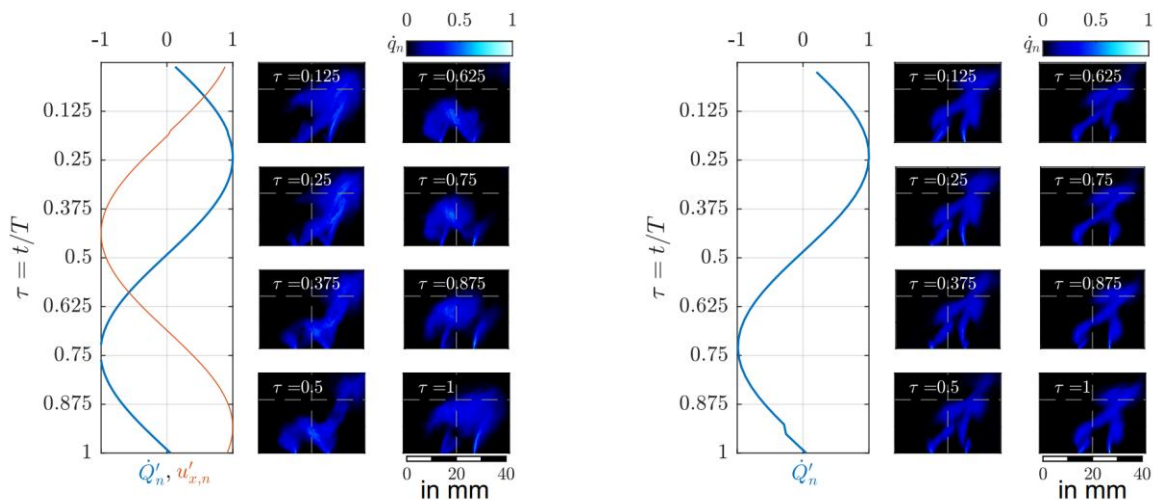


Abbildung 11: Rekonstruierte Wärmefreisetzungsrate durch die dominanten DMD-Moden der Flamme der zweiten Stufe, normalisiert durch ihre maximale und integrierte Wärmefreisetzungsrate des rekonstruierten Felds über einen Zyklus. Links: Technisch vorgemischte Simulation bei 2188 Hz. Rechts: perfekt vorgemischte Simulation bei 5072 Hz.

Die axiale Stufe der perfekt vorgemischten Simulation zeigt nur einen Einfluss der Dichte, der sich annähernd in Phase mit der Wärmefreisetzungsrate befindet (Abbildung 10). In den

rekonstruierten Flammenbilder auf Basis der dominanten Mode zeigt sich starke Scherschichtaktivität 11. Die 1T1L ist eine rotierende Mode in der untersuchten Konfiguration. Wie in Abbildung 9 zu erkennen ist, erfährt die axiale Stufe somit die maximale Druckamplitude und ermöglicht den Mechanismus über die Dichtefluktuations. Eine mögliche Dämpfungsstrategie bietet in diesem Fall eine abweichende axiale Positionierung der axialen Stufe, hin in Bereiche niedrigeren Druckes bezogen auf den longitudinalen Anteil der Mode.

4 Schlussfolgerungen und Ausblick

Ziel der Arbeit war es, grundlegende Wechselwirkungsmechanismen zwischen Strömung, Flamme und Akustik in zunächst stark vereinfachter Geometrie mit reagierendem Querstrahl zu analysieren. Trotz der reduzierten Komplexität konnten unter hohen, allerdings nicht mehr maschinenrelevanten Leistungsdichten thermoakustische Instabilitäten provoziert werden. In späteren Studien zeigte sich besonders die Fluktuation des Äquivalenzverhältnisses als einflussreicher Parameter, was die Relevanz einer Untersuchung an realen Geometrien unterstreicht.

Ein bedeutender Befund ist der Einfluss der Halbachsenausrichtung elliptischer Strahlen auf das Stabilitätsverhalten. Im Gegensatz zu Erfahrungen mit drallstabilisierten elliptischen Brennern [29] erwiesen sich runde Strahlen in Querströmung als stabiler. Die Scherschicht des reagierenden Querstrahls stellt ein Element der Rückkopplungsschleife dar, wobei nicht abschließend geklärt werden konnte, ob sie treibend oder lediglich verstärkend wirkt.

Einen überraschenden, zu Beginn des Vorhabens nicht absehbaren Einblick lieferte die Bereitstellung experimenteller Daten zum thermoakustischen Verhalten eines Brenners mit axialer Stufung am DLR in Stuttgart. Die Grobstruktursimulation konnte die im Experiment beobachteten Moden abbilden. Ein bedeutender Mechanismus, der an der realen Geometrie identifiziert werden konnte, ist die Modulation des Äquivalenzverhältnisses durch akustisch angeregte Luftmassenfluktuationen am Injektor. Diese gelangen über Entfernungen von bis zu 40 mm zur Flamme und beeinflussen die Wärmefreisetzung selbst im Hochfrequenzbereich über 2000 Hz signifikant. Ebenso zeigte sich, dass ein gezielt eingebauter Zeitverzug, welcher durch eine um 10,2 mm verlängerte Mischstrecke realisiert wird, das Auftreten der ersten longitudinalen Mode verhindert. Zudem wurde ein Mechanismus identifiziert, bei dem die akustische Geschwindigkeitsmodulation der longitudinalen Mode zur Erzeugung und Zerstörung von Flammenfläche des reagierenden Querstrahls führt. Diese Dynamik verursacht zeitlich verzögerte Schwankungen der Wärmefreisetzungsrates. Die Phasenlage zwischen Druck und Wärmefreisetzung wird dabei wesentlich durch die Impedanzen an den Rändern bestimmt, womit sich durch gezielte Positionierung des Querstrahls Einfluss auf das Stabilitätsverhalten nehmen lässt. Abschließend bleibt festzuhalten, dass bei einer transversalen-longitudinalen Mischmode von 5072 Hz zwar starke Scherschichtaktivitäten auftreten, diese jedoch unerwarteterweise nicht mit einer Flammenflächenmodulation in Verbindung gebracht werden können. Lediglich der Mechanismus über die Kompression der kalten Gase wurde als thermoakustischer Treiber erkannt.

Die Analyse weist somit auf komplexe Interaktionen zwischen Strömung, Flamme und Akustik in einer Konfiguration mit reagierendem Querstrahl hin, deren vollständiges Verständnis weiterhin detaillierte Untersuchungen erfordert. Die Rolle der Scherschichtfrequenz im Rahmen des

thermoakustischen Rückkopplungsmechanismus ist bislang nicht vollständig geklärt. Sollte sich bestätigen, dass die Frequenz der Scherschicht entscheidenden Einfluss nimmt, wäre der gezielte Einsatz als Dämpfungsstrategie möglich. Passive Maßnahmen wie die Optimierung der Injektorgeometrie und die Anbringung von Wirbelgeneratoren oder Drallerzeuger, wodurch eine Kopplung der hydrodynamische Frequenz mit der akustischen Frequenz verhindert wird, wären mögliche Umsetzungen. Starke Aktivität der Scherschicht unter stabilen Bedingungen zeigen sich allerdings nur bei sehr geringem Geschwindigkeits- und Dichteverhältnis. Dies deutet darauf hin, dass Strahlen in Querströmung mit hohem Wasserstoffgehalt empfindlicher gegenüber Scherschichtinstabilitäten sein könnten.

In Bezug auf die niedrigdimensionalen Modelle sind weitere Untersuchungen erforderlich, um die Übertragungsfunktion zu quantifizieren, welche die Störung der orthogonalen Geschwindigkeit und die Schwankung der Wärmefreisetzungsrate verbindet. Sollte trotz des Trends zu hoher Wasserstoffbeimischung und damit kurzen Flammen die Annahme der Kompaktheit nicht mehr gültig sein, müssen räumlich verteilte Flammenübertragungsfunktionen identifiziert werden. Ebenso ist der Einfluss unterschiedlicher Verbrennungsmodelle auf die thermoakustische Sensitivität noch nicht ausreichend verstanden. Darüber hinaus muss detailliert untersucht werden, inwieweit Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Stufen eines gestuften Verbrennungssystems bestehen oder diese als entkoppelte Wärmefreisetzungszone betrachtet werden können.

5 Literatur

- [1] E. Æsøy, T. Indlekofer, F. Gant, A. Cuquel, M. R. Bothien, and J. R. Dawson. The effect of hydrogen enrichment, flame-flame interaction, confinement, and asymmetry on the acoustic response of a model can combustor. *Combustion and Flame*, 242:112176, Aug. 2022.
- [2] L. Berger, K. Kleinheinz, A. Attili, and H. Pitsch. Characteristic patterns of thermodiffusively unstable premixed lean hydrogen flames. *Proceedings of the Combustion Institute*, 37(2):1879–1886, 2019.
- [3] P. Bonnaire and W. Polifke. Analysis of High-Frequency Dynamics of a Reacting Jet in Crossflow Based on Large Eddy Simulation. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 146(3): 031002, 2024.
- [4] P. Bonnaire, W. Polifke, and W. Polifke. Analysis of High-Frequency Dynamics of a Reacting Jet in Crossflow Based on Large Eddy Simulation. In Volume 3B: Combustion, Fuels, and Emissions, page V03BT04A010, Boston, Massachusetts, USA, June 2023. American Society of Mechanical Engineers.
- [5] S. Candel. Combustion Dynamics and Control: Progress and Challenges. *Proceedings of the Combustion Institute*, 29(1):1–28, 2002.
- [6] Y. Choi and K. T. Kim. Mode shape-dependent thermoacoustic interactions between a lean-premixed primary flame and an axially-staged transverse reacting jet. *Combustion and Flame*, 255:112884, Sept. 2023.
- [7] J. Davitian, C. Hendrickson, D. Getsinger, R. T. M'Closkey, and A. R. Karagozian. Strategic Control of Transverse Jet Shear Layer Instabilities. *AIAA Journal*, 48(9):2145–2156, Sept. 2010.

- [8] A. J. Eder, C. F. Silva, M. Haeringer, J. Kuhlmann, and W. Polifke. Incompressible versus compressible large eddy simulation for the identification of premixed flame dynamics. *International Journal of Spray and Combustion Dynamics*, 15(1):16–32, 2023.
- [9] A. Fiolitakis, M. Pries, O. Lammel, and T. Kathrotia. Investigation of high-frequency thermoacoustic instabilities in a FLOX[®] burner using large-eddy simulation and multi resolution proper orthogonal decomposition. In *AIAA SCITECH 2024 Forum*, Orlando, FL, Jan. 2024. American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- [10] A. M. Garcia, S. Le Bras, and W. Polifke. Effect of hydrogen addition on the consumption speed of lean premixed laminar methane flames exposed to combined strain and heat loss. *Combustion Theory and Modelling*, 27(4):584–604, 2023.
- [11] D. R. Getsinger, C. Hendrickson, and A. R. Karagozian. Shear layer instabilities in low-density transverse jets. *Experiments in Fluids*, 53(3):783–801, Sept. 2012.
- [12] Ö. L. Gülder. Correlations of Laminar Combustion Data for Alternative S.I. Engine Fuels. In *West Coast International Meeting and Exposition*, page 841000, Aug. 1984.
- [13] C.-M. Ho and E. Gutmark. Vortex induction and mass entrainment in a small-aspect-ratio elliptic jet. *Journal of Fluid Mechanics*, 179:383–405, June 1987.
- [14] J. Z. Ho, S. Jella, M. Talei, G. Bourque, T. Indlekofer, and J. Dawson. Assessment of the LES-FGM framework for capturing stable and unstable modes in a hydrogen / methane fuelled premixed combustor. *Combustion and Flame*, 255:112904, Sept. 2023.
- [15] T. Hummel, F. Berger, M. Hertweck, B. Schuermans, and T. Sattelmayer. High-Frequency Thermoacoustic Modulation Mechanisms in Swirl-Stabilized Gas Turbine Combustors—Part II: Modeling and Analysis. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 139(7):071502–071502–10, Feb. 2017.
- [16] F. Hussain and H. S. Husain. Elliptic jets. Part 1. Characteristics of unexcited and excited jets. *Journal of Fluid Mechanics*, 208:257–320, Nov. 1989.
- [17] O. Lammel, H. Schütz, G. Schmitz, R. Lückcrath, M. Stöhr, B. Noll, M. Aigner, M. Hase, and W. Krebs. FLOX[®] Combustion at High Power Density and High Flame Temperatures. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 132(121503-1), Jan. 2010.
- [18] K. R. McManus, T. Poinso, and S. M. Candel. A Review of Active Control of Combustion Instabilities. *Progress in Energy and Combustion Science*, 19(1):1–29, 1993.
- [19] S. Megerian, J. Davitian, L. S. De B. Alves, and A. R. Karagozian. Transverse-jet shear-layer instabilities. Part 1. Experimental studies. *Journal of Fluid Mechanics*, 593:93–129, Dec. 2007.
- [20] Y. Méry. Impact of Heat Release Global Fluctuations and Flame Motion on Transverse Acoustic Wave Stability. *Proceedings of the Combustion Institute*, 36(3):3889–3898, 2017.
- [21] Y. Méry. Dynamical response of a perfectly premixed flame and limit behavior for high power density systems. *Combustion and Flame*, 192:410–425, June 2018.
- [22] V. Nair. *Shear Layer Dynamics of a Reacting Jet in Vitiating Crossflow*. PhD thesis, Georgia Institute of Technology, 2020.
- [23] J. O'Connor. Visualization of Shear Layer Dynamics in a Transversely Forced Flow and Flame.

- Journal of Propulsion and Power*, 31(4):1127–1136, July 2015.
- [24] J. O'Connor. Disturbance-Field Decomposition in a Transversely Forced Swirl Flow and Flame. *Journal of Propulsion and Power*, 33(3):764–775, 2017.
 - [25] J. O'Connor and V. Acharya. Development of a Flame Transfer Function Framework for Transversely Forced Flames. In *Volume 1B: Combustion, Fuels and Emissions*, page V01BT04A064, San Antonio, Texas, USA, June 2013. American Society of Mechanical Engineers. ISBN 978-0-7918-5511-9.
 - [26] J. O'Connor and T. Lieuwen. Disturbance Field Characteristics of a Transversely Excited Burner. *Combustion Science and Technology*, 183(5):427–443, Feb. 2011.
 - [27] J. O'Connor and T. Lieuwen. Further Characterization of the Disturbance Field in a Transversely Excited Swirl-Stabilized Flame. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 134(1):011501, Jan. 2012.
 - [28] J. O'Connor, V. Acharya, and T. Lieuwen. Transverse combustion instabilities: Acoustic, fluid mechanic, and flame processes. *Progress in Energy and Combustion Science*, 49:1–39, Aug. 2015.
 - [29] C. O. Paschereit and E. J. Gutmark. Enhanced Stability and Reduced Emissions in an Elliptic Swirl-Stabilized Burner. *AIAA Journal*, 46(5):1063–1071, 2008.
 - [30] W. Polifke, J. Kopitz, and A. Serbanovic. Impact of the Fuel Time Lag Distribution in Elliptical Premix Nozzles on Combustion Stability. In *7th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*, AIAA 2001-2104, Maastricht, The Netherlands, 2001.
 - [31] N. Purwar, M. Haeringer, B. Schuermans, and W. Polifke. Flame response to transverse velocity excitation leading to frequency doubling and modal coupling. *Combustion and Flame*, 230:111412, Aug. 2021.
 - [32] J. M. Quinlan and B. T. Zinn. Transverse Combustion Instabilities: Modern Experimental Techniques and Analysis. In *50th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*, Cleveland, OH, July 2014. American Institute of Aeronautics and Astronautics.
 - [33] P. J. Schmid. Dynamic mode decomposition of numerical and experimental data. *Journal of Fluid Mechanics*, 656:5–28, Aug. 2010.
 - [34] J. Schwing, F. Grimm, and T. Sattelmayer. A model for the thermo-acoustic feedback of transverse acoustic modes and periodic oscillations in flame position in cylindrical flame tubes. In *Proceedings of ASME Turbo Expo 2012*, Copenhagen, DK, 2012.
 - [35] G. Staffelbach, L. Y. M. Gicquel, G. Boudier, and T. Poinso. Large Eddy Simulation of self excited azimuthal modes in annular combustors. *Proceedings of the Combustion Institute*, 32(2):2909–2916, 2009.
 - [36] S. Tartsch, S. Flebbe, G. J. Marques De Sousa Ponte, and T. Sattelmayer. Effect of Fuel Reactivity and Operating Conditions on Flame Anchoring in the Premixing Zone of a Swirl Stabilized Gas Turbine Combustor. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 146(4):041005, Apr. 2024.
 - [37] M. Zellhuber, L. Tay-Wo-Chong, and W. Polifke. Non-Linear Flame Response at Small Perturbation Amplitudes – Consequences for Analysis of Thermoacoustic Instabilities. In *Proceedings of the European Combustion Meeting 2011*, Cardiff, UK, June 2011.

- [38] M. Zellhuber, C. Meraner, R. Kulkarni, W. Polifke, and B. Schuermans. Large Eddy Simulation of Flame Response to Transverse Acoustic Excitation in a Model Reheat Combustor. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 135:091508–1–9, 2013.
- [39] M. Zellhuber, J. Schwing, B. Schuermans, T. Sattelmayer, and W. Polifke. Experimental and Numerical Investigation of Thermo-Acoustic Sources Related to High-Frequency Instabilities. *International Journal of Spray and Combustion Dynamics*, 6:1–34, 2014.

Verbrennung

Verbundprojekt „TurboHyTec – Turbomaschinen für Hydrogen Technologien“

Teilverbundprojekt Verbrennung

Vorhabengruppe „Wasserstoff-Anwendungen“

„Flammenrückschlagsmodellierung in einem turbulenten Wasserstoffbrenner“

Vorhaben-Nr.: 1.1

verfasst von

Paul Porath

Siemens Energy Global GmbH & Co. KG

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das dem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wird von Siemens Energy und mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWE) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages unter dem Förderkennzeichen 03EE5159B gefördert.

Abstract

This work presents a detailed numerical investigation of boundary-layer flashback (BLF) in a turbulent, premixed hydrogen flame. Hydrogen is a promising carbon-free fuel for future energy systems, yet its high flame speed, low ignition energy, and strong thermo-diffusive instabilities pose significant challenges for stable combustor operation. The aim of this study is to deepen the physical understanding of the mechanisms governing wall-anchored flame propagation and the transition from stable burning to flashback.

Large Eddy Simulations with exceptionally fine grid resolution are performed to reproduce flashback experiments conducted on a hydrogen bunsen burner at TU Delft. The numerical setup includes conjugate heat transfer for realistic wall temperature prediction and wall and flame -resolved mesh resolution to capture near-wall flow and temperature gradients. The simulations reveal that thermo-diffusive instabilities substantially accelerate the flame and amplify curvature-dependent local burning rates. A key observation is the formation of a low-velocity streak generated by an ejection event, which transports preheated and hydrogen-enriched fluid from the wall towards the flame. This strongly increases the local flame speed and triggers the development of a pronounced flame leading finger.

The interaction between increased flame curvature, rising heat-release rates, and the formation of a negative pressure gradient ultimately causes the flame to propagate upstream into the mixing tube. The findings provide valuable insights into the physics of hydrogen flame flashback and contribute to improving the design of flashback-resistant combustion systems for future hydrogen-powered gas turbines.

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der numerischen Untersuchung des Grenzschicht-Flammenrückschlags (GS-FB) in einer turbulenten, vorgemischten Wasserstoffflamme. Wasserstoff gewinnt als emissionsfreier Energieträger zunehmend an Bedeutung, stellt jedoch aufgrund seiner hohen Brenngeschwindigkeit, niedrigen Zündenergie und ausgeprägten thermo-diffusiven Instabilitäten besondere Herausforderungen an das Design von Brennkammern dar. Der Fokus liegt auf der detaillierten Analyse der Mechanismen, die die wandgebundene Flammenausbreitung und den Übergang vom stabilen Betriebspunkt zum Flashback steuern.

Auf Basis von LES-Simulationen mit hoher räumlicher Auflösung werden experimentelle Flashback-Versuche eines H_2 -Bunsenbrenners der TU Delft nachgebildet. Die Modellierung berücksichtigt realistische Wandtemperaturen mittels konjugierter Wärmeübertragung sowie wand- und flammenauflösende Gitter zur präzisen Erfassung der relevanten Prozesse. Die Ergebnisse zeigen, dass thermo-diffusive Instabilitäten wesentlich zur Flammenbeschleunigung beitragen und insbesondere in Kombination mit wandnahen Geschwindigkeitsdefiziten kritische Flammenfinger ausbilden. Ein zentrales identifiziertes

Phänomen ist ein durch Ejektionsereignisse hervorgerufener Niedriggeschwindigkeitsstreifen, der lokal erhöhte Wasserstoffmassenanteile und Temperaturen transportiert und somit die Reaktivität der Flamme stark steigert.

Die Studie bestätigt, dass das Zusammenspiel aus verstärkter Flammenkrümmung, lokal erhöhten Reaktionsraten und einem anwachsenden negativen Druckgradienten die Flamme schließlich in das Mischrohr zurücktreibt. Die gewonnenen Erkenntnisse liefern wichtige Grundlagen für die Entwicklung von Brennerkonzepten im Kontext zukünftiger wasserstoffbasierter Gasturbinentechnologien.

1 Einleitung & Motivation

Die Nutzung von Wasserstoff als CO₂-freier Energieträger gewinnt im Zuge der weltweiten Dekarbonisierungsstrategien zunehmend an Bedeutung. Insbesondere in der stationären Energieerzeugung (Gasturbinen) stellt Wasserstoff eine vielversprechende Alternative zu fossilen Brennstoffen dar. Die Möglichkeit einer nahezu emissionsfreien Verbrennung machen Wasserstoff zu einem zentralen Baustein für nachhaltige Energiesysteme. Gleichzeitig ergeben sich jedoch technologische Herausforderungen, die einer breiten industriellen Implementierung noch im Wege stehen.

Eine der kritischsten Herausforderungen ist der Flammenrückschlag – das Zurückschlagen der Flamme in nicht dafür vorgesehene Bereiche des Brenners. Dieses Phänomen tritt bei Wasserstoff deutlich häufiger und ausgeprägter auf als bei konventionellen Kohlenwasserstoffbrennstoffen. Grund hierfür sind die spezifischen Eigenschaften von Wasserstoff, insbesondere die erhöhte Brenngeschwindigkeit sowie seine niedrige Zündenergie. Das Verständnis der zugrunde liegenden Mechanismen und die Entwicklung robuster Brennerkonzepte zur Vermeidung von Flashback sind daher essenzielle Forschungsfelder der modernen Wasserstoff-Verbrennungstechnologie.

Der Grenzschicht-Flammenrückschlag (GS-FB) stellt einen bislang unzureichend verstandenen Mechanismus in der Wasserstoffverbrennung da. Konventionelle Brennkammern sind besonders anfällig, da der wandnahe Geschwindigkeitsrückgang und die hohe Reaktivität des Brennstoffs die Flammenausbreitung entlang der Wand begünstigen. Zudem machen die für Wasserstoff charakteristischen Eigenschaften – hohe Brenngeschwindigkeit und starke thermo-diffusive Instabilitäten – die physikalischen Prozesse an der Flammenfront deutlich komplexer als bei konventionellen Brennstoffen. Dies führt zu einer erhöhten Sensitivität gegenüber kleinsten Störungen im Strömungsfeld und zu einer gesteigerten Flammenrückschlagsanfälligkeit.

Die Motivation der zugrunde liegenden Arbeit besteht daher darin, diese Mechanismen numerisch detailliert zu untersuchen und insbesondere den Grenzschicht-Flammenrückschlags-Mechanismus in einer dreidimensionalen turbulenten Wasserstoff-Jet-Flamme mittels Grobstruktur-Simulationen (LES) nachzuverfolgen. Die aufgestellte Hypothese lautet, dass GS-FB primär durch thermo-diffusive Instabilitäten getrieben wird, deren Einfluss bislang nur unzureichend quantifiziert ist.

Ein verbessertes Verständnis dieses Mechanismus ist entscheidend für die Entwicklung FB-robuster Systeme, die zukünftige wasserstoffbasierte Energiesysteme sicher und effizient machen.

Wir unterteilen unsere Beobachtungen der charakteristischen Vorgänge während des FBs in vier Phasen (Abb.1), beginnend mit einer nicht durch Wände begrenzten, stationär brennenden Flamme (i). Ein Streifen mit geringer Geschwindigkeit tritt in der Rohrströmung wandnah auf. Dieses Verhalten ist aus wandbegrenzten Rohrströmungen gut bekannt (Kaplan, 2021), (Nogueira, 2019), (Pickering, 2020): Ein Ejection-Ereignis, das durch die Verbrennung weiter verstärkt wird, wie von Chen et al. gezeigt (Chen, 2023), transportiert langsam strömendes, vorgeheiztes und wasserstoffangereichertes Fluid von der Wand in den Kern der Strömung (ii). Darauf reagiert die Flamme mit der Ausbildung eines langgezogenen Flammenfingers (iii).

Dieser Flammenfinger verstärkt die typischen Merkmale turbulenter vorgemischter Wasserstoffverbrennung erheblich: Die Flamme ist stärker in Richtung des unverbrannten Gemisches gekrümmt, was zu höheren Reaktionsraten und einer Zunahme der turbulenten Flammengeschwindigkeit führt (iii). Darüber hinaus bewirkt der Flammenfinger einen positiven Druckgradienten in der Grenzschicht, der das einströmende Geschwindigkeitsprofil zusätzlich abbremst und dadurch FB begünstigt.

Das Zusammenspiel dieser Mechanismen führt schließlich dazu, dass sich die Flamme stromaufwärts in das Mischrohr bewegt, wo die Stromauf-Propagation durch die Ausbildung einer Rezirkulationszone vor dem führenden Flammenpunkt weiter intensiviert wird (iv).

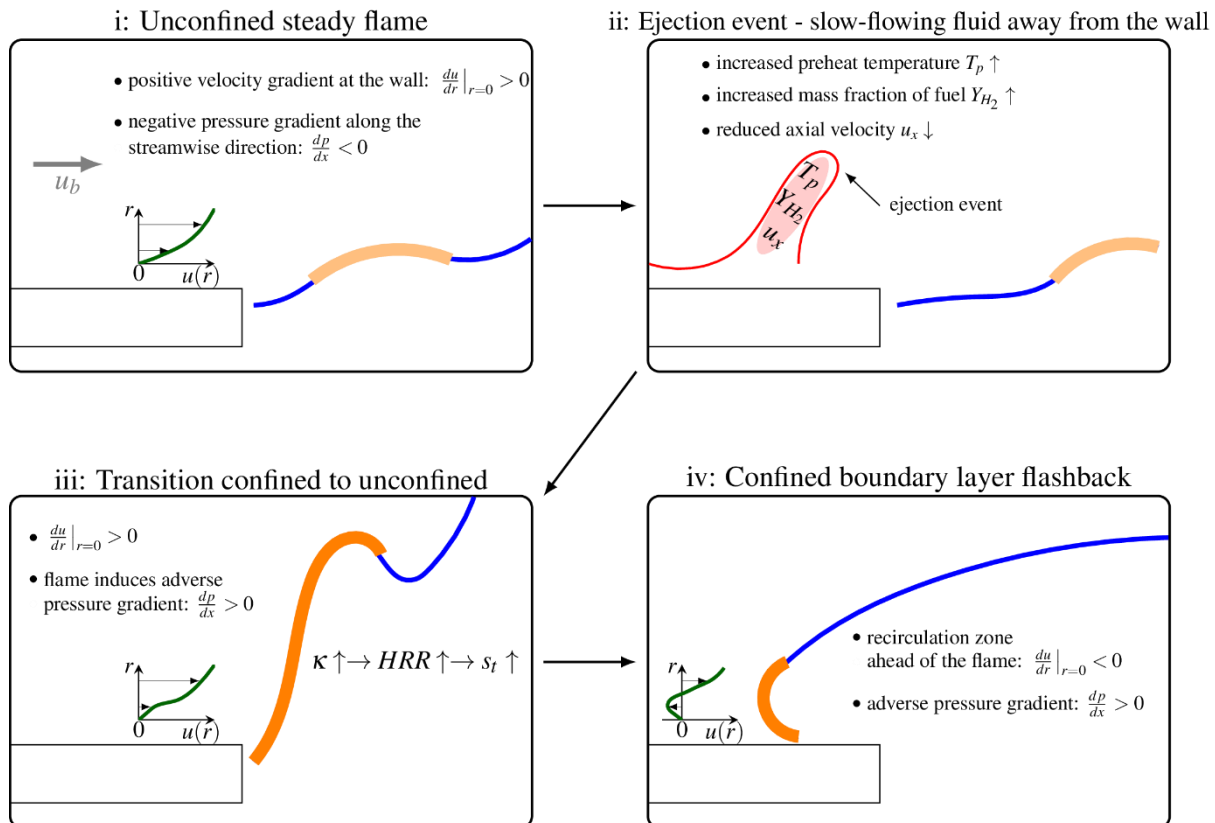


Abbildung 1: Grenzschicht Flammenrückschlags Mechanismus: Nicht begrenzte Flamme mit moderaten Verbrennungsraten, dargestellt durch die hell orangefarbene Linie (i). Auftreten eines Ejektionsereignisses, das langsam strömendes, vorgewärmtes und wasserstoffangereichertes Fluid von der Wand in Richtung Kernströmung transportiert (ii). Die Flamme reagiert auf dieses Ejektionsereignisses mit erhöhten Verbrennungsraten (dunkel-orange) (iii), was schließlich zum Flammenrückschlag in der Grenzschicht führt. Anschließend wird die Flamme durch die Rohrwand begrenzt, wodurch sich die stromaufwärts gerichtete Flammenausbreitung weiter beschleunigt (iv).

1.1 Arbeitsziele des Projektes

Angesichts des Klimawandels steigt die Nachfrage nach kohlenstofffreien Brennstoffen für stationäre Gasturbinen und zivile Luftfahrttriebwerke. Um signifikant zur Dekarbonisierung beizutragen, müssen zukünftige Brennkammern alternative Brennstoffe verwenden können, wie z.B. Wasserstoff. Dieser steht im Fokus des Gesamtvorhabens.

In diesem Vorhaben werden wichtige Fragestellungen zu instationären Wasserstoffflammen bearbeitet. Das Projekt konzentriert sich auf die rechnergestützte Modellbildung von Flammenrückschlägen. Es gilt hier die numerischen Strömungssimulationsverfahren, die teilweise bereits existieren und im Wesentlichen für die Verbrennung von Erdgas entwickelt wurden, im Kontext der turbulenten Wasserstoffverbrennung zu bewerten und

weiterzuentwickeln. Hierfür werden drei, in ihrer strömungsmechanischen Komplexität steigende, Konfigurationen untersucht, deren experimentelle Datenbasis der Wasserstoffverbrennung eine robuste Bewertung der vorhergesagten Ergebnisse erlaubt. In diesem Statusbericht wird jedoch ausschließlich eine Konfiguration detailliert betrachtet, die das Flammenverhalten während eines Rückschlags beschreibt.

2 Experimenteller Aufbau und numerische Methoden

2.1 Beschreibung des Experiments

Die Flammenrückschlagsexperimente wurden mit einem Bunsenbrenner an der TU Delft (TUD) bei Umgebungsdruck durchgeführt (Altenburg, 2025). Der Brenneraufbau besteht aus einem horizontalen und einem vertikalen Mischrohr mit einer Länge von jeweils $l_h = 1.45m$ und $l_v = 1.25m$, die durch einen 90° -Umlenkbogen miteinander verbunden sind (Abb. 2). Beide Rohre besitzen einen Innendurchmesser D sowie eine Wandstärke t_{wall} . Wasserstoff und Luft werden stromauf in das Mischrohr eingeleitet, um am Brennerauslass ein homogenes Gemisch zu erzeugen. Die am Rohrende gemessenen mittleren Geschwindigkeits- und Reynolds-Spannungsprofile stimmen mit einer voll entwickelten turbulenten Rohrströmung überein (Willems, 2022). Die Temperatur des unverbrannten Gemisches $T_p = 295K$.

Das Brennerrohr ist thermisch nicht aktiv gekühlt. Mehrere Thermoelemente überwachen die Brennertemperatur während des Betriebs. Diese sind an der Außenwand des Brennerrohres an verschiedenen axialen Positionen angebracht. Die dem Brennerrand nächstgelegene Messstelle befindet sich in einer Entfernung von $x = 2mm$ (Abb. 2).

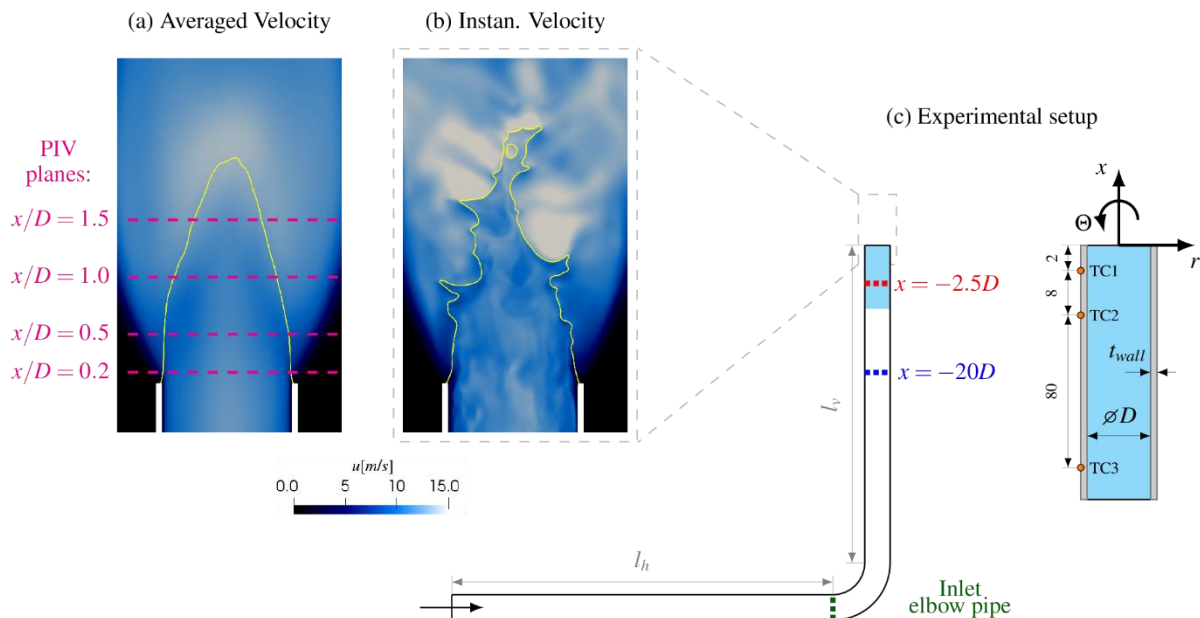


Abbildung 2: Skizze des TUD Bunsenbrenner Experiments. Die PIV-Daten wurden entlang der magentafarbenen Linien extrahiert (a). Zusätzlich sind die gemittelten (a) sowie die instantanen (b) Geschwindigkeitsfelder aus der LES dargestellt.

2.1.1 Auslösens des Flammenrückschlags im Experiment

Der Flashback wird wie folgt eingeleitet: Die Geschwindigkeit des Frischgases u_b wird schrittweise in kleinen Stufen reduziert, während die Gemischzusammensetzung unverändert bleibt. Dabei wird nach jeder Geschwindigkeitsreduktion das thermische Gleichgewicht wiederhergestellt. Der gesamte Prozess – vom stabilen Betriebspunkt bis zur stromaufwärts gerichteten Flammenausbreitung – dauert mehrere Minuten. Jedes FB-Ereignis wurde dreimal wiederholt, um einen Eindruck der Reproduzierbarkeit zu erhalten.

Sobald die Flamme in das Mischrohr springt, werden die zugehörige Wandtemperatur T_w und die Geschwindigkeit u_b erfasst. Für unseren Fall ($\Phi = 0.6$ und $T_p = 295K$) ergeben sich die Werte $T_w = 346K$ und $u_b = 9.6m/s$. Wie von Faldella berichtet, ist die stochastische Streuung der FB-Ereignisse für einen einzelnen Betriebspunkt relativ groß (Faldella, 2020): Obwohl im Experiment stets thermisches Gleichgewicht hergestellt wird und somit für längere Zeit an einem Betriebspunkt verweilt wird, beträgt die Standardabweichung innerhalb der Grenzen der gemessenen Geschwindigkeiten bei $\Phi = 0.6$ etwa $\sigma = 0.55m/s$.

Da die untere Grenze des Flashback-Eintritts im Experiment bei $u_b = 9.0 m/s$ liegt, verwenden wir diesen Wert als Referenz für die Beurteilung der numerischen Genauigkeit. Bezüglich der gemessenen Wandtemperatur gilt: Es ist sehr unwahrscheinlich, dass die Position des Thermoelements genau mit dem Ort übereinstimmt, an dem die Flamme in das Mischrohr eintritt. Daher ist die exakte Wandtemperatur während des FB im Experiment schwer zu bestimmen.

2.2 Numerische Methoden

Für die numerische Untersuchung des GS-FBs in einer Wasserstoffstrahlflamme wird ein LES-Ansatz eingesetzt, der auf einem inkompressiblen Low Mach Zahl Strömungslöser basiert. Dieser Ansatz ist besonders geeignet für Flammenströmungen, bei denen kompressible Effekte gering sind. Der Ansatz ermöglicht eine präzise Erfassung der großskaligen turbulenten Strukturen, ohne die hohen Rechenkosten eines vollständig kompressiblen Strömungslösers.

Ein zentrales Element der Simulation ist die Auflösung der Flammenfront. Hierfür wurde die Gitterauflösung so gewählt, dass 12 Punkte über der Flammenstärke liegen ($\delta_f = 0,36 mm$). Eine derart feine Auflösung ist notwendig, um die steilen Gradienten der thermo-chemischen Größen bei Wasserstoffflammen korrekt darzustellen und damit die für Flashback relevanten Mechanismen, insbesondere die wandnahe Flammenausbreitung, realistisch zu erfassen.

Das Berechnungsgebiet wird mit einem strukturierten Rechengitter diskretisiert, bestehend aus rund 150 Millionen Zellen. Die minimale Zellgröße beträgt dabei $\Delta x \approx 0,03 mm$. Im Vergleich zu typischen LES-Berechnungen für konventionelle CH_4 /Luft-Flammen (mit etwa 5 Millionen Zellen) ist dies eine außergewöhnlich hohe räumliche Auflösung. Dies verdeutlicht die numerischen Anforderungen, die sich aus der hohen Brenngeschwindigkeit und der ausgeprägten thermo-diffusiven Instabilität reiner Wasserstoffflammen ergeben.

Um eine realistische Beschreibung der Wandprozesse zu gewährleisten, wird die Gitterauflösung so gewählt, dass der dimensionslose Wandabstand y^+ unter Eins bleibt. Dies erlaubt eine direkte Auflösung der viskosen Unterschicht, ohne auf Wandfunktionen zurückgreifen zu müssen. Für die Untersuchung des Boundary-Layer-Flashbacks ist dies essenziell, da die Ausbreitung der Flamme entlang der Wand in erster Linie durch wandnahe Geschwindigkeits- und Temperaturgradienten gesteuert wird. Für die Modellierung der kleinskaligen Turbulenz wird das WALE-Modell (Wall-Adapted Local Eddy-Viscosity) verwendet.

Für die Beschreibung der Wandtemperaturen wird ein konjugierter Wärmeübergang (CHT, Conjugate Heat Transfer) verwendet. Die Wandtemperaturverteilung wird zunächst mit einer stabilen Referenzflamme berechnet. Diese Vorberechnung liefert ein räumlich verteiltes Temperaturfeld in der Brennerstruktur (Rohr/Wand), das anschließend während der Flammenrückschlagsimulation als festes Dirichlet-Randfeld für die Fluidseite verwendet wird. Damit wird angenommen, dass sich die Wandtemperatur über die für FB relevanten Zeitskalen nicht signifikant ändert. Die thermische Trägheit der Struktur ist im Vergleich zu den schnellen transienten Vorgängen der Flammenrückschläge groß; die maßgeblichen FB-Mechanismen spielen sich auf Strömungs- und Reaktionszeitskalen ab, die deutlich kürzer sind als die Zeitskalen der Wärmeübertragung in der Wand.

Insgesamt ermöglicht diese numerische Methodik eine hochaufgelöste, physikalisch konsistente Simulation des Flashback-Verhaltens, insbesondere der wandgebundenen Mechanismen, die bei reinem Wasserstoff eine zentrale Rolle spielen.

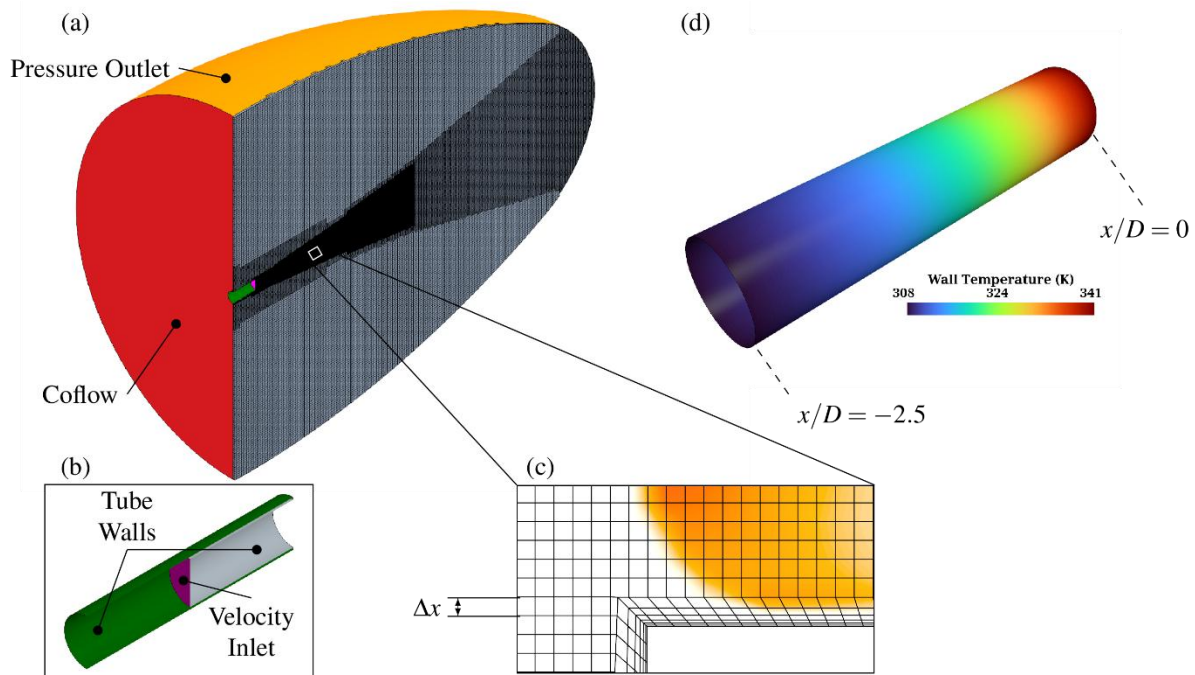


Abbildung 3: CFD Domäne mit Gitterauslösung in der mittleren Schnittfläche (a). Vergrößerte Ansicht des Mischrohrs (b). Die Verteilung der Wärmefreisetzung zeigt die Flammenposition nahe der Wand sowie die erforderliche Gitterauflösung zur Erfassung der wandnahen Strömung (c). Die Wandtemperaturverteilung wird aus CHT-Berechnungen gewonnen (d).

3 Ergebnisse

3.1 Validierung der reaktiven LES Ergebnisse

Zur Bewertung der Genauigkeit des eingesetzten LES-Modells wurden sowohl nicht-reaktive (nicht gezeigt) als auch reaktive Strömungsfälle mit experimentellen PIV-Messungen verglichen. Für beide Fälle standen Daten aus zwei Versuchsbedingungen zur Verfügung, die sich hinsichtlich Rohrdurchmesser, Wandmaterial, Äquivalenzverhältnis und Reynolds-Zahl unterscheiden. Dadurch konnte die Validität des numerischen Setups unter verschiedenen thermischen und geometrischen Randbedingungen überprüft werden.

Die Gegenüberstellung der simulierten und experimentell erfassten Geschwindigkeitsprofile zeigt eine sehr gute Übereinstimmung sowohl für nicht-reaktive als auch für reaktive Strömungsbedingungen. Die numerischen Ergebnisse reproduzieren die gemessenen axialen und radialen Geschwindigkeitsverteilungen über verschiedene axial normierte Positionen zuverlässig. Besonders hervorzuheben ist, dass die zeitlich gemittelten Simulationen die charakteristischen Formverläufe der PIV-Daten präzise wiedergeben und sowohl die Maxima als auch die Gradienten der Geschwindigkeitsprofile im zentralen Strömungsbereich korrekt vorhersagen. Dies bestätigt die Robustheit des verwendeten Rechenmodells und seine

Eignung zur realitätsnahen Abbildung der Strömungsdynamik in reaktiven und nicht-reaktiven Rohrströmungen.

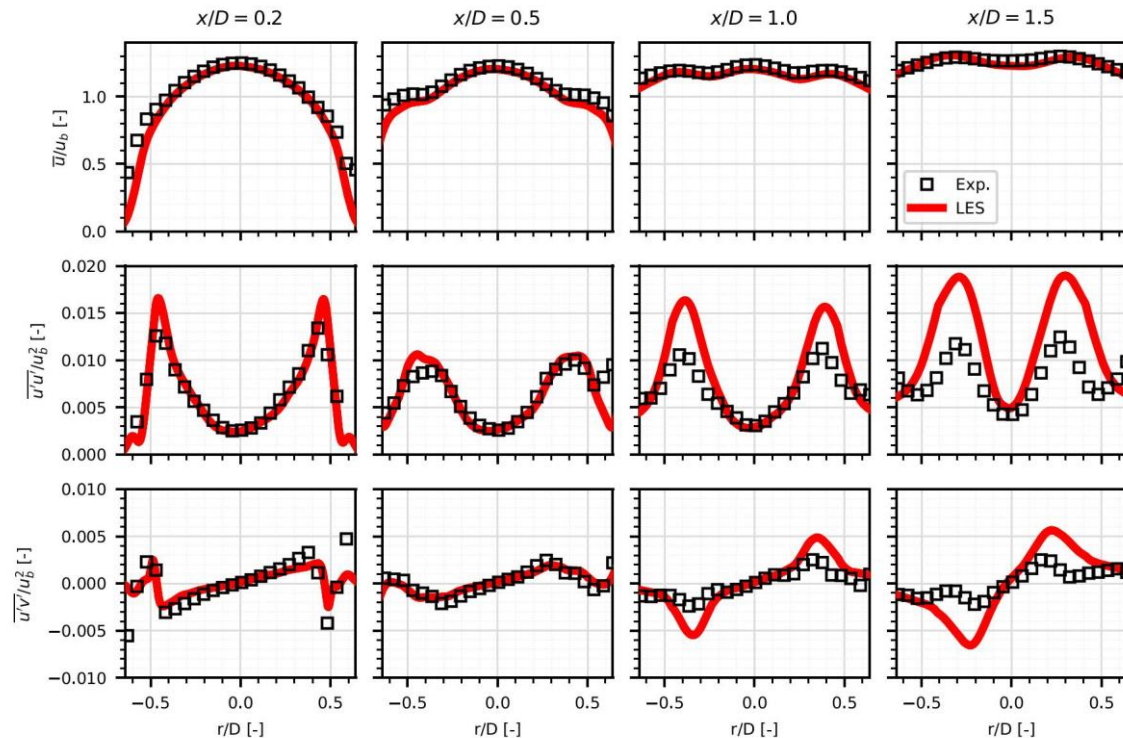


Abbildung 4: Validierung des reaktiven Strömungsfeldes an verschiedenen axialen Positionen entlang der Flammenhöhe (Spalten): erste Zeile: Geschwindigkeit, zweite Zeile: Reynoldsspannungen, dritte Zeile: Reynolds-Schubspannungen.

3.2 Untersuchung von stabilen Wasserstoffflammen

Nach einer sorgfältigen Validierung der LES gegen zwei experimentelle Setups mit nicht-reaktiven und reaktiven Messdaten werden im Folgenden die charakteristischen Merkmale der turbulenten, vorgemischten Wasserstoffflamme unter mageren Bedingungen vor dem Flashback-Ereignis untersucht. Ziel ist es, die stationären Flammeneigenschaften zu verstehen und diese mit vorhandenen Studien zur turbulenten, vorgemischten Wasserstoffverbrennung in Beziehung zu setzen. Für diese Analyse wird das Kupferrohr ($D = 20\text{mm}$, $\Phi = 0,6$) herangezogen, da die Flashback-Simulationen auf demselben Versuchsaufbau basieren.

Zunächst werden die wasserstoffspezifischen Brennmerkmale eines stabilen Betriebspunktes beschrieben. Die mittlere Strömungsgeschwindigkeit u_b wird konstant auf $u_b = 10.2\text{m/s}$ gehalten. Um sicherzustellen, dass sich die LES in einem statistisch stationären Zustand befindet, werden zwei Strömungsdurchlaufzeiten über die gesamte Domäne abgewartet, bevor Daten extrahiert werden.

Wesentliche Merkmale der Wasserstoffflamme ergeben sich aus den Momentanfildern der normierten Wärmefreisetzung, des Wasserstoffmassenanteils, der Temperatur und des Mischungsbruchs (siehe Abbildung 5). Der Mischungsbruch ist definiert als

$$Z = \frac{Y_{H_2} + \nu(Y_{O_2,air} - Y_{O_2})}{1 + \nu Y_{O_2,air}},$$

wobei Y_{H_2} und Y_{O_2} die Massenanteile von Wasserstoff und Sauerstoff bezeichnen. Der stöchiometrische Koeffizient ν ist mit acht gemäß der Wasserstoffverbrennung festgelegt (Poinot, 2005). Ein Äquivalenzverhältnis von $\Phi = 0.6$ entspricht im Gleichgewichtszustand einem Mischungsbruch von $Z = 0,017$. In Abbildung 5c ist deutlich zu erkennen, dass der Mischungsbruch diesen Gleichgewichtswert überschreitet – insbesondere in konvex gekrümmten Flammensegmenten, die in Richtung unverbranntes Gas orientiert sind. Dies deckt sich mit der Beobachtung lokal erhöhter Reaktionsraten in positiv gekrümmten Bereichen, während in konkav gekrümmten Zonen geringere Reaktionsraten bis hin zu lokalen Flammenauslöschungen auftreten (vgl. Abbildung 5a).

Als direkte Folge treten super-adiabatische Flammentemperaturen – in Abbildung 5d, pink markiert – hauptsächlich in konvex gekrümmten Bereichen auf. Diese Ergebnisse stehen im Einklang mit früheren DNS-Studien ({Rieth, 2023}, {Berger, 2022}, {Howarth, 2023}) und dienen als erster Hinweis darauf, dass in dieser Flammenkonfiguration thermo-diffusive Instabilitäten (TDIs) auftreten. Qualitativ zeigt die Flamme damit bekannte physikalische Effekte wie erhöhte lokale Brenngeschwindigkeiten in konvexen Segmenten, die auch experimentell nachgewiesen wurden (Altenburg, 2025).

Ausgehend vom normierten Wasserstoffmassenanteil in Abbildung 5b wird die Fortschrittsvariable c definiert als

$$c = \frac{Y_{H_2} - Y_{H_2,u}}{Y_{H_2,b} - Y_{H_2,u}} = 1 - \frac{Y_{H_2}}{Y_{H_2,u}}.$$

Da Wasserstoff vollständig umgesetzt wird und der Mischungsbruch unterhalb des stöchiometrischen Werts $Z = 0,028$ liegt, verschwindet der Wasserstoffmassenanteil im verbrannten Gas, weshalb der Ausdruck rechts gilt.

In Abbildung 5b ist zudem zu erkennen, dass sich Wasserstoff verstärkt zur Wand hin anreichert (pinkfarbene Bereiche mit normiertem $Y_{H_2} > 1$). Selbst bei relativ niedrigen Wandtemperaturen spielt der Soret-Effekt eine bedeutende Rolle und darf nicht vernachlässigt werden. Wie in Abschnitt 4 ausführlicher beschrieben, erhöht der Soret-Effekt lokal das Äquivalenzverhältnis an der Wand und führt so zu höheren Flammengeschwindigkeiten in Bereichen, die für Flashback anfällig sind.

Basierend auf eindimensionalen laminaren Flammenberechnung tritt die maximale Wärmefreisetzung bei $c = 0,7$ auf. Falls nicht anders angegeben, beziehen sich im Folgenden alle Isoflächen auf diesen Wert.

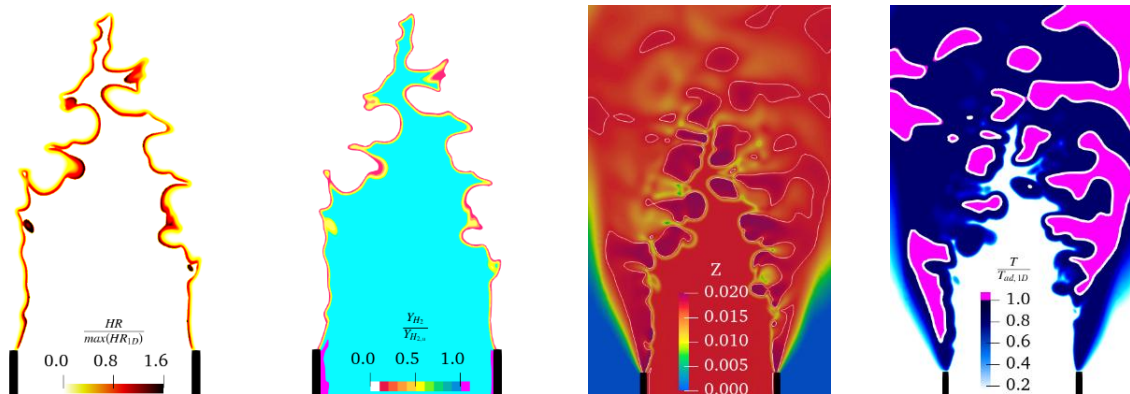


Abbildung 5: Instantane Konturen zum selben Zeitpunkt von (a) der Wärmefreisetzung, normiert mit dem Maximalwert einer eindimensionalen, laminaren, ungestreckten Flamme, welche ausgeprägte Bereiche superadiabatischer Verbrennung erkennen lässt, (b) dem Massenanteil von H_2 , normiert mit dem unverbrannten Wert und mit lokal erhöhten H_2 -Konzentrationen, sowie (d) der Temperatur, normiert mit der adiabatischen Flammentemperatur einer 1D-Flamme, wobei Bereiche mit $T/T_{ad} > 1$ (superadiabate Temperaturen) hervorgehoben sind. In (c) sind größere und kleinere Mischungsbruchwerte relativ zu $Z = 0.017$ (voll durchmischter Zustand, weiße Konturlinien) zu erkennen. Analog zu (b) zeigt sich aufgrund des Soret-Effekts ein Anstieg des Mischungsbruchs in Richtung der Rohrwände.

Die turbulente, vorgemischte Wasserstoffflamme weist deutliche H_2 -spezifische Merkmale auf, insbesondere erhöhte lokale Brenngeschwindigkeiten aufgrund thermo-diffusiver Instabilitäten. Obwohl diese Eigenschaften bereits in mehreren DNS-Studien dokumentiert wurden (Berger, 2022) (Rieth, 2023), werden sie hier im Detail analysiert, da sie für das spätere Flashback-Ereignis von entscheidender Bedeutung sind.

4 Transientes Verhalten während des Flammenrückschlags

Im vorherigen Abschnitt haben wir TDI-Effekte im stationären Zustand untersucht, die – wie im Folgenden gezeigt wird – die Haupttreiber für Flashback (FB) sind. Nun betrachten wir, wie sich diese Effekte während des transienten Flashback-Prozesses verhalten. Dieser Abschnitt umfasst die Phasen ii – iv 4 in Abb.1. Zunächst beschreiben wir die globalen Eigenschaften der Flamme während des Flashbacks. Anschließend folgt die Betrachtung der Flammen-Strömung Wechselwirkungen während des FB Prozesses.

4.1 Globale Effekte

Wie im experimentellen Verfahren wird auch in der LES die Geschwindigkeit am Geschwindigkeitseintritt von $u_b = 10.2m/s$ auf $6.0m/s$ innerhalb von $t = 30ms$ reduziert. Im

Experiment dauert es hingegen mehrere Minuten, ausgehend von einem stabilen Betriebspunkt, bis die Geschwindigkeit so weit verringert ist, dass die Flamme stromaufwärts propagiert. Dies ist aufgrund der hohen Rechenkosten in der LES nicht realisierbar. Ursache hierfür ist, dass die Experimente deutlich länger an einem Betriebspunkt verweilen als die LES (in der Größenordnung von Minuten). Dies stellt den wesentlichen Unterschied im Rampenverhalten zwischen Experiment und LES dar: In der LES wird die Reynolds-Zahl kontinuierlich reduziert, während im Experiment eine Abfolge von Sprüngen (Stufenfunktionen) vorliegt.

Den Gradient der Rampe haben wir getestet und hinsichtlich des Flammenrückschlagverhaltens bewertet: Ein steilerer Gradient führt zu rampeninduzierten Strömungsablösungen an der Wand, während das Flashback-Verhalten durch einen flacheren Gradient nicht beeinflusst wird. Es zeigt sich jedoch, dass die globalen und lokalen Trends des FB ähnlich und somit unabhängig vom Rampengradienten sind – mit Ausnahme des Zeitpunkts, zu dem Flashback eintritt. Der Punkt markiert den Zeitpunkt des Flashbacks in der LES (Abb. 5). Sobald die axiale Position der Flammen Isofläche bei $c = 0.7$ kleiner als Null wird, also in das Mischrohr hineinragt, sprechen wir von Flashback und bezeichnen den zugehörigen Zeitpunkt mit t_{FB} . Flashback tritt bei einer Bulk-Geschwindigkeit von $u_b = 6.2m/s$ auf – ein Wert, der unter dem experimentellen liegt ($u_b = 9.0m/s$). Wie bereits in vorherigen Abschnitten erläutert, existiert eine Reihe von Unsicherheiten sowohl im numerischen Modell (Dauer der Geschwindigkeitsrampe, Flammenauflösung, Wandtemperatur) als auch im experimentellen Verfahren (stochastische Schwankungen, Position des Thermoelements, Einstellungen des Massendurchflussreglers). Man beachte, dass die Zeit normiert ist durch

$$t^* = (t - t_{FB}) / \tau_f,$$

wobei t_{FB} den Zeitpunkt des FB markiert und τ_f die Flammenzeit ist ($\tau_f = \delta_f / S_l$). Für $t^* < 0$ ist Flashback noch nicht eingetreten, während Werte > 0 FB zugeordnet werden.

Neben der Rampe zeigt die gestrichelte schwarze Linie die stabile Simulation, bei der die Geschwindigkeit ($u_b = 10.2m/s$) unverändert bleibt (keine Rampe). Diese LES wurde durchgeführt, um zu prüfen, ob unter identischen temporalen Eintrittsbedingungen Flammenrückschlag innerhalb derselben physikalischen Zeit auftritt. Hier bleibt die Flamme außerhalb des Mischrohres.

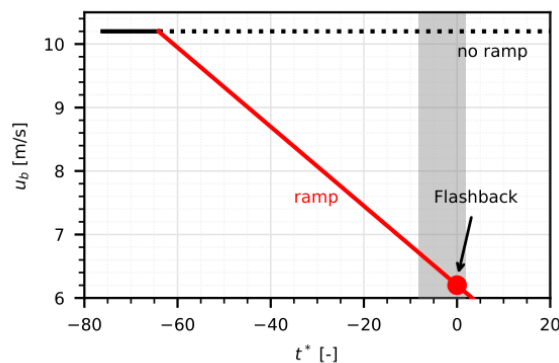


Abbildung 6: Geschwindigkeitsrampe zur Auslösung des Flammenrückschlagsereignisses. Der rote Marker kennzeichnet den Zeitpunkt des Flammenrückschlags. Der grau hinterlegte Bereich umfasst den Übergang vom unbegrenzten zum begrenzten Flammenrückschlag. Die gepunktete Linie stellt die stabile LES dar.

Abbildung 6 zeigt die globale stromaufwärts gerichtete Flammenpropagation, beginnend von einem nicht begrenzten Zustand im ersten Bild bis hin zu einem begrenzten Zustand im letzten Bild.

Es ist zu beachten, dass ausschließlich die Übergangszeit aus Abbildung 5 dargestellt wird (grauer Bereich). Neben jedem Bild ist der führende Flammenfinger dargestellt. Generell unterliegt die Wasserstoffflamme intrinsischen Instabilitäten wie der Darrieus–Landau-Instabilität und thermo-diffusiven Instabilitäten (TDI), die für diese Flamme in Abschnitt 3.2 beschrieben sind (Berger, 2022), (Matalon, 2007).

Die heterogene Verteilung der Wärmefreisetzung über die Flammenoberfläche ist ein deutlicher Hinweis auf TDIs (Abbildung 6). Analog zu Abschnitt 3.2 und Abbildung 5 treten hohe Werte der Wärmefreisetzung (rot) dort auf, wo die Flamme konvex in Richtung des unverbrannten Gemisches gekrümmt ist, während niedrigere Werte in konkaven (grün, gelb) Bereichen auftreten. Im unteren Bereich der Flamme (direkt stromab des Düsenaustritts) treten langgezogene Flammenfinger mit erhöhter Wärmefreisetzung auf, während in den oberen Bereichen keine klar definierbaren TDI-Strukturen erkennbar sind.

Während der Rampe verringert sich die Flammenhöhe. Zudem beobachten wir, dass sich entlang des Brennerrandes längliche, longitudinal orientierte Flammenfinger ausbilden, die durch Streifen mit geringer Geschwindigkeit entstehen und zu einer signifikanten Erhöhung der Wärmefreisetzung führen ($t^* = -6.73$). Die Flamme–Strömungs-Wechselwirkung mit Identifikation eines solchen Niedriggeschwindigkeitsstreifen wird im nächsten Abschnitt analysiert. Ab $t^* = -5.53$ interagiert der neu entstandene führende Flammenfinger mit der anströmenden Strömung, bis dieser in das Mischrohr springt und sich weiter stromaufwärts ausbreitet. Von dort an beginnt der gut verstandene, begrenzt verlaufende BLF-Prozess mit seinen charakteristischen Phänomenen wie Grenzschichtablösung und Ausbildung einer Rezirkulationszone stromauf der Flamme (grüne Isofläche in Abbildung 6 (h–i)), welche für

den negativen Druckgradienten verantwortlich ist (Endres A. a., 2018), (Endres A. a., 2019), (Eichler, 2012), (Hoferichter, 2017), (Novoselov, 2022).

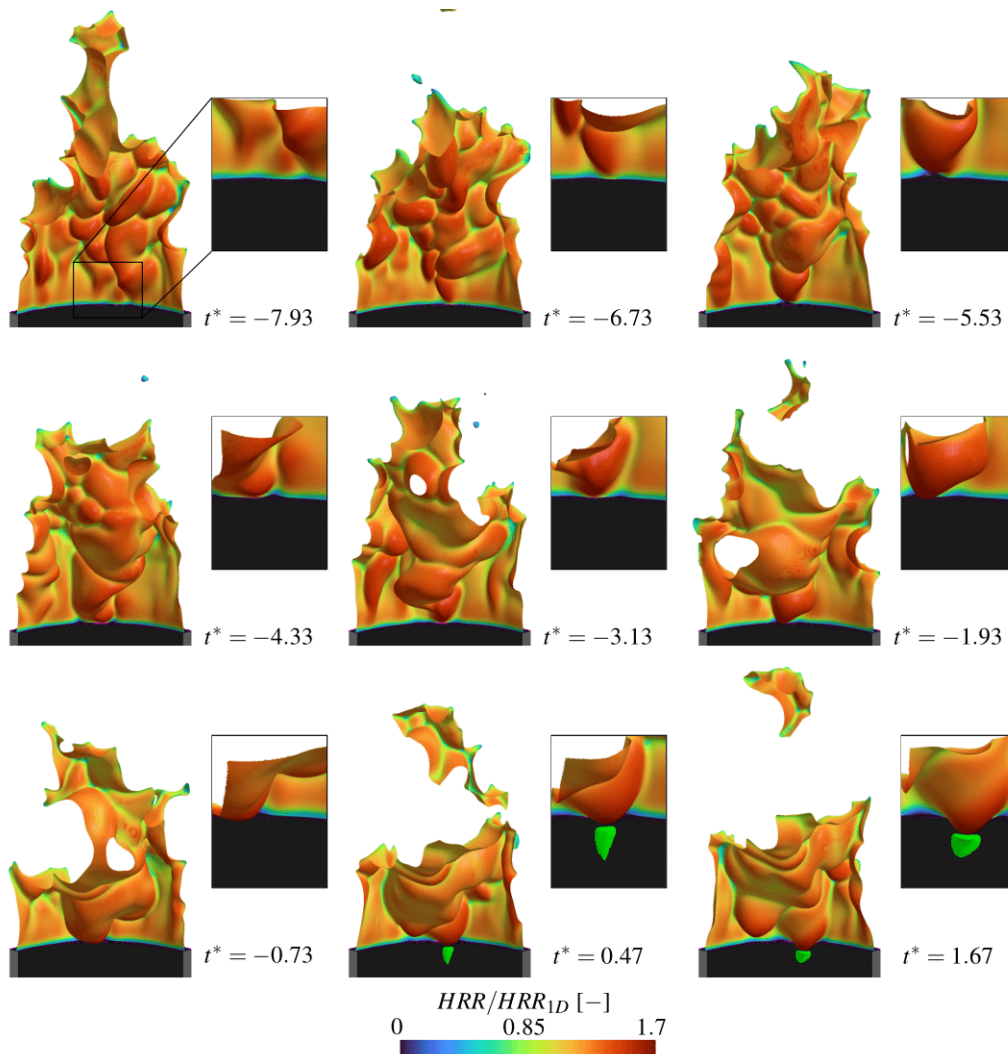


Abbildung 7: Flammenausbreitung während des Flammenrückschlags, dargestellt anhand eines 90° Flammensegments. Jede Momentaufnahme entwickelt sich in Schritten von $\Delta t = 0,5$ ms. Die normierte Wärmefreisetzungsrate wird auf der Iso-Kontur bei $c = 0,7$ ausgewertet. Der Flammenrückschlag tritt zwischen $t^* = -0,73$ und $t^* = 0,47$ auf, wobei der Beginn des Flashbacks bereits früher einsetzt. Sobald die Flamme in das Mischrohr eintritt, breitet sie sich weiter stromaufwärts aus, und es bildet sich aufgrund des Druckgradienten eine Rezirkulationszone (grüne Isofläche).

4.2 Interaktion von Flamme und Strömung

Wir analysieren die Flamme-Strömungs-Interaktion während des Flammenrückschlags und zeigen zunächst vier Zeitpunkte des Geschwindigkeitsfeldes auf einer zylindrischen Ebene ($r=9.5\text{mm}$) zusammen mit der Flammenfront bei $c=0.7$, welche entsprechend der Wärmefreisetzungsrate eingefärbt ist (Abbildung 7). Im ersten Bild ($t^*=-6.73$) sind sowohl der

neu gebildete Flammenfinger als auch der sich nähernde Niedriggeschwindigkeitsstreifen stromaufwärts der Flammenspitze deutlich zu erkennen.

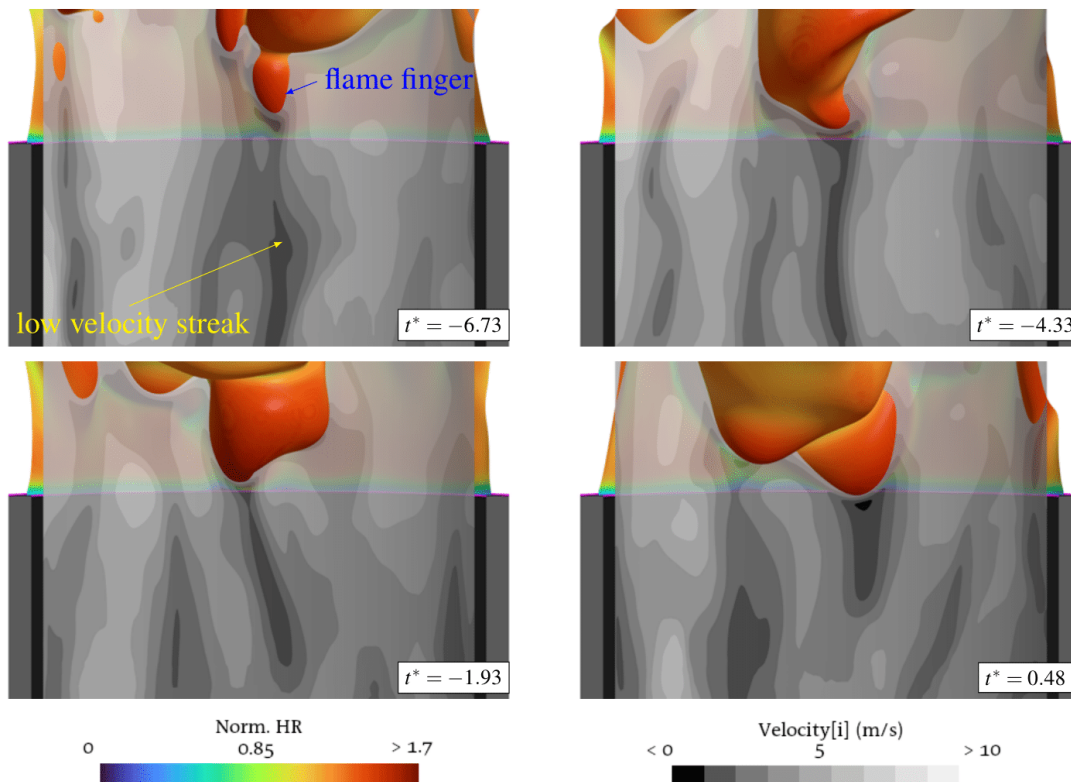


Abbildung 8: Momentanes Geschwindigkeitsfeld auf einer zylindrischen Ebene zusammen mit der Flammenfront bei $c=0.7$.

Der rote Bereich der Flammenoberfläche zeigt hohe Verbrennungsraten an. In den folgenden Zeitpunkten trifft der Niedriggeschwindigkeitsstreifen auf die Flammenfront und führt zu einer stromaufwärts gerichteten Flammenausbreitung. Die führende Flammenspitze bewegt sich entlang dieses Niedriggeschwindigkeitsstreifens. Gemäß Abbildung 7 stellen wir fest, dass der Niedriggeschwindigkeitsstreifen das Flammenrückschlags-Ereignis auslöst und hauptsächlich für die stromaufwärts gerichtete Flammenbewegung verantwortlich ist. Ähnliche Trends wurden auch in Experimenten beobachtet (Altenburg, 2025).

Die Bildmatrix (Abbildung 8) zeigt die Strömungsgeschwindigkeit (1. Spalte), den normierten Wasserstoffmassenanteil (2. Spalte), die Temperatur (3. Spalte) und die Wirbelstärke (4. Spalte) zu charakteristischen Zeitpunkten (Zeilen). Die 2D-Ebenen schneiden dabei die FLP, sodass sie dynamisch angepasst werden. In den ersten Zeitschritten ($t^*=-7.93$) ist eine stabile Flamme kurz vor dem Flashback zu sehen, ohne erkennbare Besonderheiten in den vier Größen. Anschließend wird eine deutliche Änderung sichtbar ($t^*=-6.73$): Die Geschwindigkeit nimmt in Wandnähe ab, während gleichzeitig der Wasserstoffmassenanteil und die Vorwärmtemperatur ansteigen.

Ein Niedriggeschwindigkeitsstreifen (ii) nähert sich dem Düsenaustritt ($-6.73 < t^* < -0.73$: dunkelgraue Strukturen nahe der Wand). Die geringe Geschwindigkeit löst eine stromaufwärts gerichtete Flammenausbreitung aus, was zu einem stärker gekrümmten Flammensegment führt. Nicht nur die Geschwindigkeitsreduktion ist hierfür verantwortlich, sondern auch der gleichzeitige Anstieg der Vorwärmtemperatur der Frischgase sowie des Wasserstoffmassenanteils. Alle drei Größen führen zu einer reaktiveren, stärker wirksamen Flamme. Wir bezeichnen das als Niedriggeschwindigkeitsstreifen, verursacht durch ein Ejektionsereignis. Ein solches Ereignis bringt langsam strömendes Fluid von der Wand nach außen. Direkt an der Wand sammelt sich aufgrund des Soret-Effekts der meiste Wasserstoff an, und dort treten auch die höchsten Temperaturen aufgrund der Wandaufheizung durch die Flamme auf. Dieses langsam fließende, hochtemperierte und wasserstoffreiche Fluid wird in Bereiche transportiert, in denen die Flamme bestehen kann – deutlich außerhalb der Erlöschungssdistanz. Ein Ejektionsereignis erzeugt Turbulenz, da es als Quelle turbulenter kinetischer Energie wirkt, weshalb eine erhöhte Wirbelstärke sichtbar ist (Abbildung 8, 4. Spalte, $t^*=-4.33$) (Pope, 2001). Infolgedessen reagiert die Flamme mit verstärkten H₂-spezifischen Eigenschaften wie erhöhter Krümmung und gesteigerten Reaktionsraten. Dieses Verhalten entspricht hauptsächlich Phase iii: (Abbildung 1). Es führt schließlich zu Flammensegmenten, die senkrecht zur axialen Strömungsgeschwindigkeit stehen (Abbildung 8 bei $t^*=-1.93$). Aufgrund dieser Orientierung wandert die Flamme weiter in Richtung Mischrohr und tritt schließlich entlang der turbulenten Grenzschicht in dieses Rohr hinein.

Gleichzeitig wird ein stark erhöhter negativer Druckgradient beobachtet, der von der Flamme etwa 3mm von der Wand induziert wird.

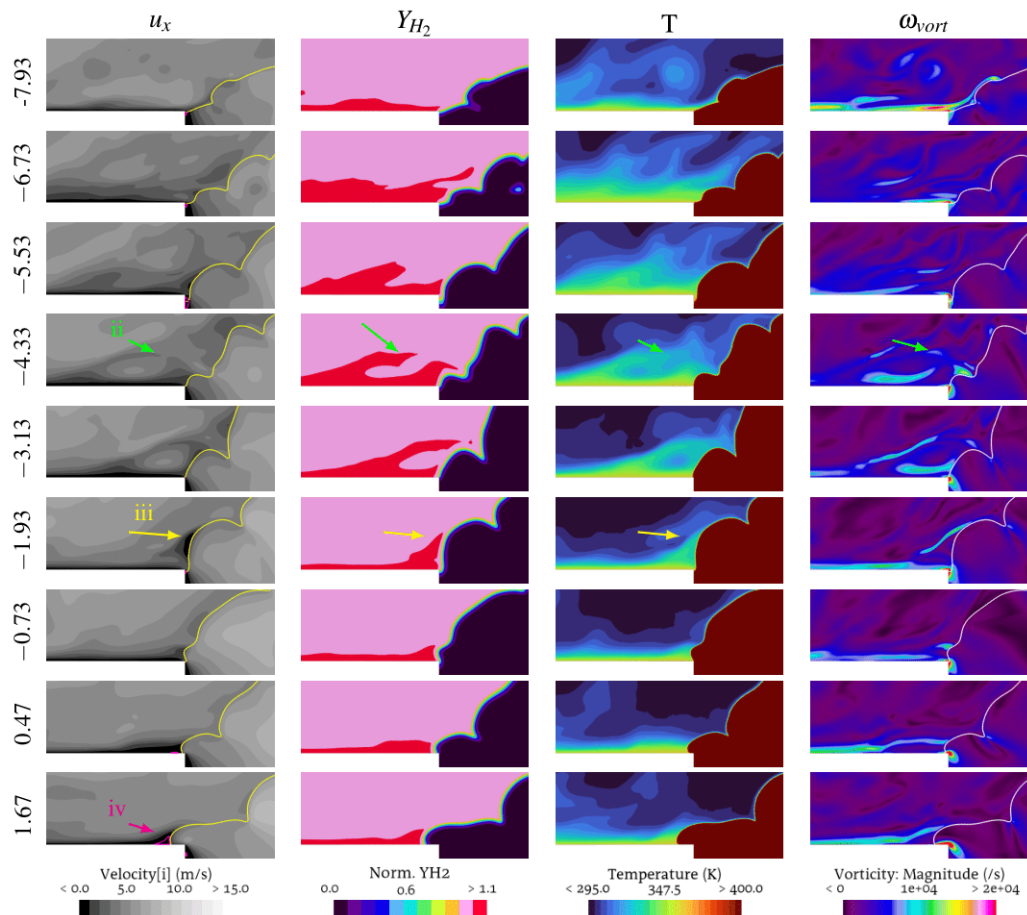


Abbildung 9: Konturen von Geschwindigkeit, Wasserstoffmassenanteil, Temperatur und Wirbelstärke sind in der ersten, zweiten, dritten bzw. vierten Spalte dargestellt. Die dimensionslose Zeit ist in jeder Zeile angegeben.

Ausgelöst durch die niedrige Geschwindigkeit und die hohe Wirbelstärke innerhalb des Ejektionsereignisses wächst der führende Flammenfinger deutlich an. Der wachsende Flammenfinger erzeugt im Übergangsbereich einen negativen Druckgradienten, der die Strömung weiter abbremst. Damit erleichtert der negative Druckgradient die stromaufwärts gerichtete Flammenausbreitung in Flammennormalrichtung und trägt entscheidend zum Flammenrückschlag bei. Wir bestätigen damit die allgemeine Annahme experimenteller Arbeiten, die ein ähnliches Verhalten der Flamme-Strömungs-Interaktion in positiv gekrümmten Flammensegmenten beobachten: Ein größerer negativer Druckgradient tritt bei höheren positiven Krümmungen des Flammenbuckels auf (Chen, 2023){altenburg_review}. Das starke Wachstum des Flammenfingers führt zu hohen Krümmungen der Flamme in der Region der turbulenten Grenzschicht, was dort die lokale Flammengeschwindigkeit erhöht und die Flamme anfälliger für Flammenrückschlag macht. Entlang der Eintrittsposition steigen die Krümmungswerte an und ermöglichen der Flamme schließlich den Eintritt in das Mischrohr ($t^*=-0.97$). Abschließend bildet sich bei $t^*=0.47$ eine kleine Rezirkulationszone (Abbildung 8:

1. Spalte, iv, pinke Isolinie), die im Laufe der Zeit wächst und typisch für Flashback-Prozesse in begrenzten Grenzschichten ist.

Zusammenfassend beginnt der Übergangsprozess etwa 2mm stromaufwärts des Brennrandes, während sich die Flamme in einem Wandabstand von 0.48mm in das Mischrohr hineinbewegt. Während dieses Übergangs ist die Flamme stark in Richtung des unverbrannten Gemisches gekrümmt, während die Wärmefreisetzungsrate zunimmt. Dieser Mechanismus ist für Strömungen mit niedriger Lewis-Zahl – wie Wasserstoff – bekannt: Intrinsische Instabilitäten wie TDI und DL verstärken die Verbrennungsrate, wenn die Flamme konvex zu den Frischgasen geformt ist. Dadurch entstehen lokal höhere Flammengeschwindigkeiten, die wiederum das Strömungsfeld stärker beeinflussen und schließlich einen Flammenrückschlag auslösen.

5 Zusammenfassung & Ausblick

Die vorliegende Arbeit liefert eine umfassende numerische Analyse des Grenzschicht-Flammenrückschlags in einer turbulenten, vorgemischten Wasserstofflamme und zeigt klar die zentralen physikalischen Mechanismen auf, die den Übergang vom stabilen Betrieb zum Flashback bestimmen. Die hochaufgelösten LES-Simulationen bestätigen, dass insbesondere die Kombination aus thermo-diffusiven Instabilitäten, ausgeprägten Krümmungseffekten und wandnahen Strömungsphänomenen die lokale Flammenbeschleunigung stark beeinflusst. Ein wesentliches Ergebnis ist die Identifikation eines durch Ejektionsereignisse verursachten Niedriggeschwindigkeitsstreifens, der vorgewärmtes, wasserstoffangereichertes Fluid in wandferne Bereiche transportiert. Dadurch entstehen reaktive Flammensegmente mit erhöhten Verbrennungsraten, die schließlich in den stromaufwärts propagierenden Flammenfinger übergehen — der entscheidende Auslöser des Flashbacks.

Die Analyse verdeutlicht zudem, dass der daraus resultierende negative Druckgradient, verstärkte Flammenkrümmungen und die thermodiffusiv bedingte Sensitivität der Flamme eng miteinander verknüpft sind und gemeinsam den Eintritt der Flamme in das Mischrohr ermöglichen. Damit liefert die Arbeit nicht nur eine Bestätigung experimenteller Beobachtungen, sondern ergänzt diese um ein detailliertes, dreidimensionales Bild der transienten Flamme-Strömungs-Interaktion während des Rückschlags.

Künftige Arbeiten können auf den gewonnenen Erkenntnissen aufbauen, indem sie die Sensitivität gegenüber z.B. Turbulenzniveau, Druck, etc. weiter untersuchen. Darüber hinaus bieten gekoppelte experimentelle und numerische Studien sowie datengetriebene Modellierungsansätze Potenzial, Flashback-kritische Betriebsbereiche noch präziser vorherzusagen und robuste Brennkammerkonzepte für wasserstoffbasierte Turbomaschinen zu entwickeln.

6 Literatur

- {Howarth, T. a. (2023). Thermodiffusively-unstable lean premixed hydrogen flames: Phenomenology, empirical modelling, and thermal leading points. *Combust. Flame*.
- {Rieth, M. a. (2023). The effect of pressure on lean premixed hydrogen-air flames. *Combust. Flame*.
- Altenburg, L. A. (2025). Flame-induced pressure gradients in turbulent premixed natural gas-air and hydrogen-air jet flames. *Combust. Flame.*, 1-19.
- Berger, L. a. (2022). Intrinsic instabilities in premixed hydrogen flames: parametric variation of pressure, equivalence ratio, and temperature. Part 2--Non-linear regime and flame speed enhancement. *Combust. Flame.*, 1-16.
- Chen, G. a. (2023). Study of flame--flow interactions in turbulent boundary layer premixed flame flashback over a flat plate using direct numerical simulation. *J. Fluid Mech.*, 1-26.
- Eichler, C. a. (2012). Experimental investigation of turbulent boundary layer flashback limits for premixed hydrogen-air flames confined in ducts. *J Eng Gas Turbine Power*, 1-8.
- Endres, A. a. (2018). Large Eddy simulation of confined turbulent boundary layer flashback of premixed hydrogen-air flames. *Int. J. Heat Fluid Flow*, 151-160.
- Endres, A. a. (2019). Numerical Investigation of Pressure Influence on the Confined Turbulent Boundary Layer Flashback Process. *Fluids*.
- Faldella, F. (2020). Experimental investigation of Boundary Layer Flashback in high H₂ concentration turbulent premixed jet flames. *Master Thesis - TU Delft*.
- Hoferichter, V. a. (2017). Prediction of confined flame flashback limits using boundary layer separation theory. *J. Eng. Gas Turbine. Power*.
- Kaplan, O. a. (2021). Nozzle dynamics and wavepackets in turbulent jets. *J. Fluid Mech*.
- Matalon, M. (2007). Intrinsic flame instabilities in premixed and nonpremixed combustion. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 163-191.
- Nogueira, P. A. (2019). Large-scale streaky structures in turbulent jets. *J. Fluid Mech.*, 211-237.
- Novoselov, A. G. (2022). Accurate prediction of confined turbulent boundary layer flashback through a critically strained flame model. *J. Eng. Gas Turbine. Power*.
- Pickering, E. a. (2020). Lift-up, Kelvin--Helmholtz and Orr mechanisms in turbulent jets. *J. Fluid Mech*.
- Poinsot, T. (2005). *Theoretical and Numerical Combustion*.
- Pope, S. B. (2001). *Turbulent flows*.
- Willems, G. (2022). Unraveling Flashback Phenomena of Turbulent premixed Hydrogen-Natural Gas-Air Flames. *Master Thesis - TU Delft*.

Kühlung

19. Statusseminar der AG Turbo

17. und 18. März 2026 in Köln

Arbeitskreis Kühlung

Überblick

zusammengestellt von

Dr. Jens Ortmanns

Rolls-Royce Deutschland Ltd & Co. KG

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Abstract

The activities in the working group "Cooling" deliver an essential contribution to the implementation of modern, highly efficient and safe turbomachinery components with focus on the following technical aspects:

- Continuous development of advanced cooling concepts and optimized components to increase efficiency, robustness and service life at variable operating conditions
- Development and application of modern numerical methods and analysis tools for experimental results as well as the use of probabilistic toolsets for an efficient and comprehensive design of gas turbines
- Determination of new requirements, properties and behaviours of materials, e.g. in the case of new, modified fuel media and advanced manufacturing processes

The report provides an overview of the completed and ongoing projects.

Kurzfassung

Die Arbeiten in dem Arbeitskreis "Kühlung" liefern einen essenziellen Beitrag zur Umsetzung moderner, hoch-effizienter und sicherer Turbomaschinen-Komponenten mit Fokus auf folgenden technischen Aspekten:

- Kontinuierliche Entwicklung fortschrittlicher Kühlkonzepte und optimierter Komponenten zur Steigerung der Effizienz, Robustheit und Lebensdauer bei variablem Betriebsverhalten
- Erarbeitung und Anwendung moderner numerischer Methoden und Analyseverfahren für experimentelle Ergebnisse sowie der Einsatz probabilistischer Werkzeuge zur effizienten und umfassenden Auslegung von Gasturbinen
- Bestimmung von neuen Anforderungen, Eigenschaften und Verhalten von Materialien bei z.B. geänderten Brennstoffmedien und erweiterten Fertigungsprozessen

Der Bericht gibt einen Überblick über die abgeschlossenen und laufenden Projekte.

1 Einleitung

Um die anvisierten Ziele des 8. Energieforschungsprogramms umzusetzen, sind Turbomaschinen – in unterschiedlichen Applikationen und Ausprägungen – von zentraler Bedeutung. Dies umfasst mit Wasserstoff, synthetischen Brennstoffen oder Bio-Kraftstoffen betriebene Kraftwerke auf der Basis von Gasturbinen oder gekoppelten Gas- und Dampfkraftwerken, teilweise sogar noch mit Kraft-Wärmekopplung.

Neben der Betriebs- und Brennstoffflexibilität werden nach wie vor höchste Wirkungsgrade und minimale Emissionen der Anlagen und ihrer Komponenten über einen weiten Betriebsbereich gefordert, um die Kosten und die Umweltwirkung möglichst niedrig zu halten. Zudem muss eine hohe Robustheit der Systeme und Zuverlässigkeit der Energieversorgung Berücksichtigung finden.

Weiterhin sind Turbomaschinen auch zentrale Komponenten in zahlreichen Energiespeicheranwendungen und Industrieprozessen und werden auch in Prozessen für die Erzeugung synthetischer Brennstoffe eingesetzt.

Die Auslegung von Turbomaschinen einschließlich der Kühlsysteme für die genannten Aufgaben fokussiert auf die Effizienz und Sicherstellung der Integrität der gesamten Anlagen und muss im Verbundbetrieb mit diversen, regenerativen Energiequellen folgenden Anforderungen genügen:

- Hoher Wirkungsgrad des Gesamtsystems
- Hohe Zyklenfestigkeit / lange Lebensdauer für Ressourceneffizienz
- Robustheit über den gesamten Betriebsbereich (inkl. transienter Manöver)
- Kleine geometrische Abmessungen und minimale Leckagen

Für die Technologieentwicklung zukünftiger Kühlsysteme bedeutet dieses weiterhin: optimierte Temperaturen im Gaspfad, möglichst geringer Kühlmedienbedarf, kleine Temperaturgradienten im Werkstoff, geeignete Kontrolle von Sekundär- und Leckageströmungen, Flexibilisierung der eingesetzten Kühlluft, verbesserte numerische Methoden zur Berechnung der komplexen Innen- und Außenströmungen und ihrer Interaktion, sowie des konjugierten Wärmetransports und des Temperaturfeldes in den gekühlten Bauteilen.

2 Projekte im Arbeitskreis Kühlung

Dieser Abschnitt bietet einen Überblick über die abgeschlossenen und laufenden Arbeitspakete der verschiedenen AG Turbo-Verbundprojekte mit Fokus auf den Arbeitskreis Kühlung im Zeitraum 2024-2025.

Abbildung 1 zeigt eine Übersicht der Projekte, die in den Arbeitskreissitzungen (AKS) im Zeitraum 2024-2025 präsentiert und diskutiert wurden.

Projekt	Titel	Industrie-, Forschungspartner	2024				2025				2026
			Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1
RoBoFlex AP 3.1a & b	Wärmeübertragung bei fortschrittlichen Kühlkonzepten zur Minimierung des Kühlluftmassenstroms unter Berücksichtigung der Rotation*	MTU, U-Stuttgart	▲ AKS Darmstadt			▲ AKS Dresden	▲ AKS Köln			▲ AKS Stuttgart	
RoBoFlex AP 4.8a & b	Verbesserte numerische Berechnungen von Innenströmungssystemen	MTU, U-Stuttgart				▲ Abschlussvortrag					
Küple AP 1.1, 1.2	Simulation und Analyse der Strömung in Rotor-Stator Kavitäten in Turbinen	MTU, RWTH Aachen									
Küple AP 4.1	Strömung und Wärmeübergang in Innenströmungen mit großen Wirbelskalen	MTU				▲ Abschlussvortrag					
Küple AP 4.2	Strömung und Wärmeübergang in Innenströmungen mit großen Wirbelskalen	U-Stuttgart		▲ Abschlussvortrag							
Küple AP 3.1	Untersuchung der Kühlluftausbreitung sowie der Kühleffektivität von Filmkühlung auf den Seitenwänden einer	Everlence		▲ Abschlussvortrag							
Küple AP 3.3	Untersuchung der Kühlluftausbreitung sowie der Kühleffektivität von Filmkühlung auf den Seitenwänden einer	RWTH Aachen					▲ Abschlussvortrag				
Küple AP 6	Adaptive Dichtungen für ein verbessertes Teillast- und transientes Betriebsverhalten von Gasturbinen	KIT				▲ Abschlussvortrag					
ECOFlex-turbo AP 3.1.4a & b	3D-Wärmetechnische Modellierung von Kavitäten (Teil 1, Strömung und WÜ bei signifikanter nat. Konvektion)	MTU, TU-Dresden		▲ Abschlussvortrag							
OptiSysKom AP 2.4	Innovative interne Kühlkonzepte	KIT				▲ Abschlussvortrag					
OptiSysKom AP 1.4a & b	Untersuchung von Rotorkavitäten mit verbesserter Luftführung	MTU, TU-Dresden									
TurboGrün AP 2.5a, b & c	Einfluss von wasserstoffhaltigen Gasgemischen auf die Versprödungsneigung von unterschiedlichen Materialklassen	Siemens Energy, U-Stuttgart, U-Bochum									
TurboGrün AP 3.1a & b	Transiente analytische und experimentelle Untersuchung von Dichtungs- und Kühlsystemen	Everlence, TU-Dresden					▲ Abschlussvortrag				
TurboGrün AP 3.4	Fortschrittliche Kühlmethode für Turbinenkomponenten (konjugierter Wärmeübergang)	Siemens Energy					▲ Abschlussvortrag				
Turbogrün AP 3.2a & b	Digital Twin für thermisch hochbelastete Bauteile unter hochvariablen Lastgradienten	Everlence, Fraunhofer				▲ Abschlussvortrag					
TurboGrün AP 3.5	Probabilistischer digitaler Zwilling zur Optimierung von Serviceintervallen*	Siemens Energy								▲ Abschlussvortrag	
DigiTect AP 1.3	Effizientes Thermalfarben-Postprocessing mittels farbiger digitaler Zwillinge	TU-Dresden, RRD									
DigiTect AP 3.1a & b	Bürstendichtung Airseal (Wirkungsgraderhöhung, transient)	DLR									
DigiTect AP 3.2	Messtechnische Entwicklung zur Thermalvalidierung doppelwandiger Kühlkonzepte	KIT									
DigiTect AP 3.4a & b	Deckbanddesign gekühlte ND-Turbine (Wirkungsgrad/Flexibilität)	MTU, U-Stuttgart									
DigiTect AP 4.1a & b	Zusammenhang der Rissnukleation an Schmiedefehlern mit Materialermüdungseigenschaften (Flexibilität Lebensdauer)	Siemens Energy, Fraunhofer									
TurboTrans AP 3.4a & b	Wärmeübertragung in rotierenden Kühlkanälen mit unterschiedlichen Rippen- und Kanalgeometrien	MTU, U-Stuttgart									
TurboTrans AP 4.1	Experimentelle Untersuchungen eines mehrstufigen Turbinenrings mit Heißgasstrahlen in der Zuströmung	DLR									

Abbildung 1: Übersicht der präsentierten Projekte und Themen in den Arbeitskreissitzungen (AKS) Kühlung im Zeitraum 2024-2025 (die Zeitbalken orientieren sich an den Events und reflektieren nicht die Projektlaufzeiten).

*Projekte mit nachfolgendem Beitrag in diesem Tagungsband

Im nachfolgenden soll eine Kurzdarstellung über die abgeschlossenen und laufenden Projekte erfolgen. Dabei dienen ausgesuchte Textpassagen aus den Projektanträgen bzw. der Abschlussberichte als Grundlage.

2.1 Abgeschlossene Projekte im Arbeitskreis Kühlung

RoBoFlex AP 3.1a & b „Wärmeübertragung bei fortschrittlichen Kühlkonzepten zur Minimierung des Kühlluftmassenstroms unter Berücksichtigung der Rotation“ [1], [2]

Im Arbeitspaket 3.1a wurden vier Testgeometrien von Innenkühlsystemen unter verschiedenen Versuchsbedingungen am rotierenden Prüfstand „RotRig“ des ITLR Stuttgart getestet. Aus den Messergebnissen für Wärmeübergang und statischen Druck erfolgte die Ableitung von Wärmeübergangs- und Druckverlustkorrelationen für unterschiedliche Rippenkonfigurationen und einer Rippen- Protrusion Kombination zur späteren Verwendung in Vorauslegungstools. Mit den gewonnenen Messdaten wurde eine Validierung der vorhandenen numerischen Berechnungsmethoden von Innenströmungen durchgeführt, und das Verbesserungspotential bewertet. Parallel zu den Messkampagnen erfolgte eine interdisziplinäre Vorauslegung einer gekühlten Niederdruckturbinenschaufel unter Nutzung eines Optimierungstools zur Auslegung der Kühlkanalgeometrie. Mit dem daraus entwickelten Kühlkanaldesign konnte eine Kühllufteinsparung bis zu 10% gegenüber einem Referenzdesign realisiert werden.

Als Teil des Verbundprojektes AG Turbo RoboFlex 3.1b im AP3: “Lebensdauer bei stark fluktuierendem Betrieb” bestand für das Teilprojekt die übergeordnete Zielsetzung dieses Vorhabens in dem effizienteren Einsatz der Kühlluft in Turbinenschaufeln unter Berücksichtigung variabler Betriebsbedingungen. Durch die angestrebte Flexibilität werden die Turbinenkomponenten sehr unterschiedlichen thermischen und mechanischen Belastungen ausgesetzt. Dabei ist eine aktive Kühlung unerlässlich, um vorzeitigem Materialversagen vorzubeugen. Für Turbinenlaufschaufeln ist dazu eine genauere Datenbasis zur sicheren Auslegung der Kühlungssysteme unter Berücksichtigung des Rotationseinflusses notwendig, um die durch Laständerungen bedingten Temperaturgradienten in ihren Auswirkungen auf die Lebensdauer genauer bewerten und berücksichtigen zu können. Darüber hinaus ist der thermische Wirkungsgrad und damit auch die klimaschädlichen Emissionen einer Gasturbine direkt an den Kühlluftbedarf gekoppelt, sodass eine Minimierung dessen durch eine Optimierung der Kühlungstechnologien geboten ist.

In diesem Teilprojekt werden daher für die Auslegung von lastwechselangepassten Laufschaufeln Innenkühl designs mit kleinskaligen Konfigurationen (Turbulatorgeometrien) untersucht. Dies erfordert geeignete Experimente unter einem maschinenähnlichen Rotationseinfluss bei relevanten physikalischen Bedingungen, welche durch numerische Simulationsverfahren ergänzt werden.

RoBoFlex AP 4.8a & b „Verbesserte numerische Berechnungen von Innenströmungssystemen“ [2]

Als Teil des Verbundprojektes AG Turbo RoboFlex 4.8 in dem Hauptarbeitspaket “Simulationsverfahren und multidisziplinäre Optimierung” bestand die übergeordnete Zielsetzung dieses Vorhabens in dem effizienteren Einsatz der Kühlluft in Turbinenschaufeln unter Berücksichtigung variabler Betriebsbedingungen. Aufgrund der immensen thermischen

Anforderungen an die Schaufeln moderner Gasturbinen, ist eine aktive Kühlung unerlässlich, um vorzeitigem Materialversagen vorzubeugen. Da der thermische Wirkungsgrad und damit auch die klimaschädlichen Emissionen einer Gasturbine direkt an den Kühlluftbedarf gekoppelt sind, ist eine Minimierung dessen und damit einhergehend eine Optimierung der Kühlungstechnologien geboten.

Eine solche Optimierung erfordert zwingend detaillierte Kenntnisse über die auftretenden Strömungs- und Wärmeübergangsphänomene. Die Genauigkeit der etablierten 3D-CFD Simulationen zu deren Bestimmung, die auf den Reynolds-gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen basieren, hängt jedoch maßgeblich von der Turbulenzmodellierung ab. Als Kompromiss zwischen Rechenzeit und Genauigkeit stellen Wirbelviskositätsmodelle dabei den derzeitigen Industriestandard dar.

Dieses Teilprojekt zielt auf die strukturelle Erweiterung und Rekalibrierung existierender Wirbelviskositätsmodelle ab. Dazu sollen ehemals konstante Modellkoeffizienten als Funktionen des mittleren Strömungsfeldes beschrieben werden. Diese Abhängigkeiten sind mittels maschineller Lernverfahren aus Daten zu extrahieren. Die dafür nötigen Daten werden mittels skalenauflösender Simulationen für die Kühlung von Gasturbinenschaufeln prototypischer Fälle generiert. Auf diese Weise optimierte Turbulenzmodelle versprechen eine Steigerung der Vorhersagegenauigkeit numerischer Simulationen für stark wirbelbehaftete Innenströmungssysteme. Damit liefert dieses Projekt einen wichtigen Beitrag zur präziseren Auslegung der Kühlung von Gasturbinenschaufeln und folglich zur Senkung der Treibhausgasemissionen.

KüpLe AP4.2 „Strömung und Wärmeübergang in Innenströmungen mit großen Wirbelskalen“ [3]

Im AP 4.2 liegt der Fokus auf innengekühlten Strebenbauteilen im Heißgaspfad von Gasturbinen. Der sogenannte „Turbine Center Frame“– TCF, der zur Gruppe der Strebenbauteile gezählt wird, befindet sich zwischen der Hochdruck- und der Niederdruckturbine einer Gasturbine. Er zeichnet sich durch komplexe geometrische Bedingungen aus. Grundlegend besteht die Struktur im Inneren aus großen Hohlräumen, die durch relativ enge Strömungsquerschnitte und Leckageabdichtungen mit hohen Durchströmungsgeschwindigkeiten mit Kühlluft gespeist werden. Dadurch entstehen stark unterschiedlich große Wirbelstrukturen in der Innenströmung. Diese komplexen Strömungs- und damit auch Wärmeübergangsverhältnisse werden bisher nur durch erheblich vereinfachte Modelle in der Auslegung erfasst. Hier sollen in Zukunft zur physikalisch belastbareren Bewertungs- und Auslegungsfähigkeit verstärkt numerische Berechnungsmethoden eingesetzt werden, die experimentell zu validieren sind.

Die Bauteiltemperaturen in modernen Turbomaschinen werden wesentlich durch die konjugierte Situation aus thermischer Belastung der Heißgasströmung auf die Festkörper, deren zeitabhängiges Wärmeleitungsverhalten und den Strömungsbedingungen auf der Kühlungsseite beeinflusst. Dabei entstehen bei zeitlichen Betriebspunktänderungen starke Interaktionen, die durch die Betrachtung von quasi-stationären Bedingungen in einzelnen

Betriebspunkten, wie sie bisher vorgenommen wird, nicht ausreichend beschreibbar sind. Daher wurden geeignete Kopplungsstrategien der Analyseverfahren für das Strömungsverhalten und der thermischen Bedingungen in den Festkörperbauteilen entwickelt. Diese müssen numerisch effizient gestaltet werden, um längere Betriebszyklen und Laständerungen bei flexiblen Gasturbinenkraftwerken mit entsprechenden Parameteränderungen analysieren zu können. Das vorgeschlagene Vorhaben war in seiner Gesamtheit auf die Bewertung der Vorhersagegenauigkeit numerischer Simulationsmodelle und die Betrachtung von transienten Betriebspunktänderungen in ihren Auswirkungen auf Bauteiltemperaturen verschiedener Gasturbinenkomponenten anhand der konjugierten thermischen Situation ausgerichtet. Dies wurde in enger Abstimmung mit dem Partnerprojekt des Industriepartners und durch zielgerichtete experimentelle Untersuchungen zur Validierung der Modellierungsansätze erreicht.

KüpLe AP3.1 „Untersuchung der Kühlluftausbreitung sowie der Kühleffektivität von Filmkühlung auf den Seitenwänden einer hochbelasteten Leitschaufel“ [4]

Die die Kühlung der Wände des Strömungskanals (sowohl die Seitenwände als auch die Beschaukelung) ist nach wie vor von großer Bedeutung für die Effizienz sowie die Lebensdauer der Maschine. In diesem Projekt wurde folgerichtig zum einen Möglichkeiten zur vereinfachten Modellierung der Kühlung entwickelt und zum anderen Optimierungspotenzial erörtert. Dabei wurde zwischen den Seitenwänden und der Beschaukelung unterschieden. Die entwickelten Methoden können allerdings auf beide Regionen angewandt werden.

Auf dem Gebiet Methodik wurden folgende Aspekte betrachtet:

- Turbulenzmodellierung inkl. der Entwicklung eines modifizierten Turbulenzmodells
- Vereinfachte Modellierung der Kühlluftausblasung in der Hauptströmung unter Berücksichtigung der Auswertung auf der Innen- sowie der Außenströmung
- Darstellung und Berechnung von der Kühlluftausbreitung auf dem Festkörpermodell und vereinfachte Berechnung der Metalltemperaturen

Die Seitenwandkühlung wurde in intensiver Iteration mit einem Parallelprojekt an der RPTU Kaiserslautern-Landau betrachtet. Die experimentelle Set-Ups der Universität wurden numerisch untersucht, die Differenzen zwischen Numerik und Experiment aufgedeckt und Strategien entwickelt, diese zu reduzieren.

Die numerische Untersuchung der Kühlung der Beschaukelung baute auf die Arbeiten an der RWTH Aachen auf. Hier wurde eine sowohl konvektiv als auch filmgekühlte Schaufel schrittweise untersucht. Diese Vorgehensweise ermöglichte die Isolierung der Effekte der einzelnen Kühlungskomponenten (Innenkühlung, unterschiedliche Reihen von Filmkühlungsbohrungen). Parallel zu der vorher geschilderten Vorgehensweise wurden auch diese Geometrien numerisch untersucht, die Differenzen zwischen Numerik und Experiment aufgedeckt und Strategien entwickelt, diese zu reduzieren.

KüpLe AP6 „Adaptive Dichtungen für ein verbessertes Teillast- und transientes Betriebsverhalten von Gasturbinen“ [5]

Aufgrund der hohen Relativgeschwindigkeiten in Turbomaschinen werden berührungslose Dichtungssysteme eingesetzt, um die Spalte zwischen rotierenden und feststehenden Bauteilen abzudichten. Um die Leckage durch die Dichtspalte zu reduzieren, liegt der Fokus bei der Entwicklung von Dichtungssystemen darauf, die Spalte und damit die vom Gas durchströmte Querschnittsfläche zu minimieren. Das Problem hierbei ist, dass sich die Spalthöhen in Abhängigkeit von den Betriebsbedingungen ändern. Um einen Kontakt zwischen Rotor und Stator zu verhindern, müssen die Dichtspalte in Turbomaschinen daher mit einem minimalen Spalt ausgeführt werden. Ein vielversprechender Weg, den konstruktiven Spalt möglichst klein zu halten, ist der Einsatz adaptiver Dichtungssysteme. Diese sind in der Lage, betriebsbedingte Änderungen der Spalthöhe auszugleichen und so ein Reiben zu verhindern.

Das Gesamtziel des Projekts bestand darin, ein besseres Verständnis des dynamischen Verhaltens adaptiver Dichtungssysteme, insbesondere von aerostatischen Dichtungen, zu erlangen. Um dieses Ziel zu erreichen, wurden experimentelle Untersuchungen an einem bestehenden Prüfstand am Institut für Thermische Strömungsmaschinen (ITS) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) durchgeführt, der die Realisierung anwendungsorientierter Betriebsbedingungen ermöglichte.

Im Rahmen dieses Projekts wurde das transiente Schließverhalten von aerostatischen Dichtungen genauer untersucht und relevante Einflussparameter identifiziert. Um dies zu ermöglichen, wurden im Prüfstand aerostatische Dichtungskonzepte des Industriepartners Siemens Energy experimentell untersucht. Der größte Schwerpunkt des Projekts lag auf der Untersuchung, wie sich das Nachlaufverhalten der aerostatischen Dichtungen im geschlossenen Zustand in Abhängigkeit von verschiedenen Anregungsamplituden und -frequenzen verändert. Die Anregung resultiert beispielsweise aus betriebsbedingt auftretenden Rotor-Exzentrizitäten, die im Prüfstand nachgebildet werden sollten. Die Ergebnisse des Projekts dienen als wertvolle Datenbasis für die Validierung von Berechnungsansätzen.

ECOFlex-turbo AP 3.1.4a & b “3D-Wärmetechnische Modellierung von Kavitäten“ [6]

Neue Verdichter werden mit immer höheren Wirkungsgrad-Zielen entwickelt. Dabei ist es nötig, das analytische Vorhersagen immer genauer werden. Damit sollen z.B. Spalte besser ausgelegt werden oder Kühlluftmengen reduziert werden. Spalte hängen direkt von Bauteiltemperaturen ab und Kühlmengen sind davon abhängig, wie effektiv diese eingesetzt werden. Die Temperaturverteilung in den hoch belasteten Bauteilen beeinflusst die Festigkeit und damit deren Leben. Bei entsprechenden Vorhersagen spielen im Allgemeinen die Strömung und der Wärmeübergang eine entscheidende Rolle. Diese werden zunehmend mit Unterstützung von detaillierten CFD-Simulationen untersucht. Verdichterkavitäten im Rotor werden vielfach rein axial belüftet. Die Verteilung der Kühlluft ergibt sich somit ausschließlich aufgrund der Strömungssituation in den Kavitäten. Die Effektivität der Kühlung hängt dabei auch davon ab, wieviel Luft in der axial durchströmten Kavität ausgetauscht wird. Dies hängt wiederum von einer Vielzahl unterschiedlicher Faktoren ab. So spielen z.B. der

Temperaturunterschied zwischen der Kühllufttemperatur und der Materialtemperatur im Außenbereich der Kavität oder auch die Kontur der Kavität eine große Rolle.

Die Strömung ist weitestgehend 3-dimensional chaotisch und stellt somit hohe Anforderungen an die CFD-Simulation. Um für Thermalrechnungen zuverlässige Aussagen zu erhalten, bedarf es einer umfangreichen Validierung der CFD-Methoden. Moderne Trends in der Entwicklung haben zu einer Änderung des Scheibendesigns hin zu leichteren Scheiben durch ein optimiertes Nabendesign geführt. Die Masse wird näher an der Rotationsachse positioniert, was zu einer Verbreiterung der Nabe führt. Auch geht die allgemeine Entwicklung zu immer weiter reduzierten Kühlluftströmen. Im Partner Vorhaben 3.1.4b wurden bei der TU Dresden Versuche für das Projekt durchgeführt. Dazu wurde ein vorhandener Prüfstand im Rahmen des Projektes neu entworfen und aufgebaut. Die axiale Länge der Kavitäten machte die Nutzung eines neuen Antriebskonzeptes notwendig. Die Aufbauten des Prüfstandes haben aufgrund von Corona Schließungen länger gedauert als ursprünglich geplant. Mit dem neu aufgebauten Prüfstand konnten Testdaten von Kavitäten auf Basis einer innovativen Rotorscheiben-Geometrie gewonnen werden.

Die Testmatrix wurde unter Berücksichtigung aktueller Verdichter-Randbedingungen definiert. Der umfangreiche Testaufbau ist zur Validierung von fortschrittlichen konjugierten CHT-CFD Simulationen essenziell. Bei CHT-CFD Simulationen werden neben dem Strömungsfeld auch Bauteiltemperatur berechnet. Durch die neuen Testdaten wurde der validierte Bereich deutlich erweitert und bisherige Unsicherheiten müssen nicht mehr vorgehalten werden. Aus den CHT-CFD Simulationen können vielfältig Daten für Temperaturberechnungen in Verdichtern gewonnen werden. Ziel ist es, durch das Projekt die analytischen Randbedingungen für Thermalmodelle und damit die analytischen Vorhersagen in der Konzept- und Designphase zu verbessern, was wiederum den Iterations- und Redesignbedarf vermindert. In der Projektlaufzeit wurden von der MTU Vorstudien zu Variationen der Betriebsparameter wie der Drehzahl, des Betriebsdruckes und des Kühlluftmassenstroms durchgeführt um die zu erwartenden Sensitivitäten in den Versuchen frühzeitig zu verstehen. Von den getesteten Betriebspunkten wurden drei ausgewählt und mit CHT-CFD Simulationen nachgerechnet. Zur Validierung der Ergebnisse wurden diese mit Experimenten verglichen und optimiert.

OptiSysKom AP 2.4 „Innovative interne Kühlkonzepte“ [7]

Das Ziel dieses Vorhabens besteht in der Entwicklung und experimentellen Untersuchung kompletter, realistischer Kühlkonfigurationen für Hochdruckturbinenrotorscheaufeln zur gesamtheitlichen Bewertung von komplexen Kühlgeometrien unter maschinenähnlichen Randbedingungen. Dafür werden in einer bestehenden Versuchsanlage mehrere Versuchsschaufeln mit verschiedenen Kühlkanal- und Filmkühlungsgeometrien untersucht. Die Versuchsanlage ermöglicht die Messung der Oberflächentemperatur von Schaufelmodellen. Zur gesamtheitlichen Bewertung der Kühlsysteme soll die Versuchsanlage um die messtechnische Erfassung der Schaufelspitze erweitert werden, um die Kühlung von modernen deckbandlosen Schaufeln untersuchen zu können. Da die Schaufelspitze einer hohen thermischen Belastung ausgesetzt ist, ist das ein wichtiger Bereich für die Bewertung

der Kühlkonfigurationen. Für die vollständige Klassifikation der Kühlsysteme ist neben der Erfassung der Temperaturverteilung auf der gekühlten äußeren Oberfläche auch die Analyse aerothormaler Vorgänge in den Kühlkanälen ein wichtiger Aspekt. Da diese in realitätsnahen Versuchsaufbauten nur schwer zugänglich sind, können sie bisher lediglich über integrale Größen wie die Massenstrombilanz, den Totaldruckverlust oder die Temperaturänderung der Kühlluft entlang des Systems bewertet werden. Im Rahmen dieses Teilvorhabens wird in einer Machbarkeitsstudie untersucht, ob und gegebenenfalls, wie die internen aerodynamischen und thermischen Vorgänge messtechnisch erfasst werden können.

Die aus den experimentellen Untersuchungen gewonnenen Daten sollen Erkenntnisse über die Effektivität der Kühlkonfigurationen unter realistischen Betriebsbedingungen liefern. Außerdem sollen die Versuchsdaten zur Optimierung numerischer Methoden eingesetzt werden können, die zur Auslegung und Weiterentwicklung von Kühlmethode in Turbinenschaufeln unerlässlich sind. Diese Arbeit soll zudem die technischen Möglichkeiten für eine umfassende experimentelle Untersuchung von Turbinenschaufelkühlverfahren und die erzielbare Qualität der Messdaten zeigen.

TurboGrün AP 3.1a & b „Transiente analytische und experimentelle Untersuchung von Dichtungs- und Kühlsystemen“ [8]

Im Bereich der stationären Gasturbinen besteht noch Optimierungspotential. Dies betrifft einerseits den komplexen Strömungspfad der (Kühl-)Luft und deren Dichtungen und andererseits neue Möglichkeiten durch die Herstellung von Komponenten mit additiven Fertigungsverfahren (AM-additive manufacturing, speziell SLM-selective laser melting).

Neue AM-Fertigungsverfahren wie das selektive Laserschmelzen (engl. SLM – selective laser melting) eröffnen vollkommen neue Möglichkeiten. Dies beginnt bereits im Konstruktionsprozess. Es können einerseits bestehende Bauteile optimiert werden. Durch den 3D-Druck mit geringer Fertigungsabweichung können bspw. miniaturisierte Kühlkanäle in konventionell unzugänglichen Bereichen gedruckt werden. Eine Heißgaskomponente mit inneren Kühlluftstrukturen, welche durch viele, aufwendige, konventionelle Fertigungsschritte (Herstellen eines Wachsmodells, Herstellen der Gußkokillen, Guß, zerspanende Nachbearbeitung, ...) hergestellt wurde, könnte durch ein integrales 3D-gedrucktes Bauteil ersetzt werden. Dies reduziert die Fertigungszeit und verhindert mögliche Fehler oder Schäden während des Fertigungsprozesses. Andererseits können ebenso ganze Baugruppen neu konzipiert werden. Vormalig geschraubte Baugruppen mit vielen Verbindungselementen können möglicherweise durch wenige, funktionsoptimierte 3D-Druckteile ersetzt werden. Dies verringert die Anzahl der Teile einer Baugruppe und die Montagezeit für weniger Arbeitsschritte.

Das Ziel besteht in der Messung von Leckagemasseströmen mit minimaler Messunsicherheit und möglichst unter Originalbedingungen für unterschiedliche Dichtelemente. Weiterhin werden unterschiedliche Kühlstrukturen im baugleichen Versuchsträger in Form von adaptierten SLM-Decksegmenten untersucht. Beide Maßnahmen unterstützen den Industriepartner bei einer präziseren Auslegung des Thermalsystems in einer Gasturbine.

Turbogrün AP 3.2a & b „Digital Twin für thermisch hochbelastete Bauteile unter hochvariablen Lastgradienten“ [9]

Das übergeordnete Ziel des Teilvorhabens besteht darin, betriebsrelevante thermomechanisch komplexe Belastungszyklen, wie sie im Betrieb am Übergangskanal in der Brennkammer der Gasturbine auftreten können mittels fortschrittlicher Bewertungskonzepte anwendungsorientiert rechnerisch für die Echtzeitlebensdauer-bewertung zugänglich zu machen. Die Aufgaben, die sich im Rahmen dieser Zielsetzung im Einzelnen ergeben sind:

- Probenfertigung aus Blechen der Nickellegierung Hastelloy-X
 - Eckanriss-Proben (engl.: Corner-Crack, CC) für Risswachstumsversuche
 - Flachproben für isotherme Ermüdungsversuche
 - Rundproben für anisotherme Ermüdungsversuche
- Risswachstumsversuche mit eingestreuten Überlasten
- Isotherme komplexe/mehrstufige Ermüdungsversuche
- Anisotherme komplexe/mehrstufige Ermüdungsversuche
- Modellerweiterung für die Lebensdauerbewertung komplexer mehrstufiger Belastungen
- Rechnerischer Zugang für die Finite Elemente Analyse und Echtzeitlebensdauerbewertung

2.2 Laufende Projekte im Arbeitskreis Kühlung

KüpLe AP 1.1, 1.2 Simulation und Analyse der Strömung in Rotor-Stator Kavitäten in Turbinen [10]

Die zunehmenden Temperaturen im Gaskanal und die reduzierten Kühl- und Sperrluftmengen bei zunehmender zyklischer Belastung erfordern eine deutlich genauere Berechnung der Strömung und des Wärmeübergangs in den Rotorkavitäten in Turbinen. Dazu gehört eine physikalisch ausreichend abgesicherte Strömungssimulation der Strömung in diesen Rotorkavitäten, die durch ein hohes Maß an Rotation, Mischungseffekte durch Luftindüsungen, Interaktion mit dem Hauptmassenstrom und eine komplexe Geometrie gekennzeichnet ist. Zur Absicherung solcher Strömungsberechnungen sollen gezielt Experimente in einem Modell-Rig an der RWTH durchgeführt werden, welches eine Überprüfung und Absicherung von CFD Ergebnissen und Vorgehensweisen erlaubt. Parallel soll auch an verbesserten Simulationsstrategien gearbeitet werden, um hier genauere Ergebnisse erzielen zu können. Dies schließt die bessere Beschreibung von Wärmeübergangsverteilungen und Kopplungen mit dem Festkörper ein. Das Arbeitspaket wird zur Optimierung einen engen Austausch der entwickelten Konzepte und Methoden mit dem AP5 haben.

OptiSysKom AP 1.4a&b Untersuchung von Rotorkavitäten mit verbesserter Luftführung [11]

Im Teilprojekt „Untersuchung von Rotorkavitäten mit verbesserter Luftführung“ (AP1.4) sollen die Bereiche der Verdichterkavitäten untersucht werden, die mit radial zugeführter Luft durchströmt werden. Durch Optimierung der Geometrie einer Anti-Vortex-Konfiguration (AVT), welche verhindert, dass die Luft zu große Drall- und Druckschwankungen ausbildet, können Kühlmassenstrom und Wärmeübergangsverhalten verbessert werden. Ziel dieses Vorhabens ist es, zuverlässige Bauteil-Temperaturvorhersagen in der Konzept- und Designphase des Verdichtungssystems zu erhalten. Daraus ergibt sich ein geringerer Iterationsbedarf und eine verbesserte Auslegungsfähigkeit des Sekundärluftsystems bei verschiedenen AVT-Geometrien. Es wird somit möglich, die LCF-Lebensdauer an kritischen Stellen des Verdichters besser bewerten zu können und damit das Design zu optimieren, was wiederum zur Steigerung des Wirkungsgrads bei gleichzeitiger Verbesserung der Lebensdauer des Gesamtsystems führt.

Neben diesem Schwerpunkt „Lebensdauerverbesserung unter flexiblen Einsatzbedingungen“, der bereits im 6. EFP adressiert wurde und jetzt im 7. EFP weiter entwickelt wird, wird auch das neu hinzugekommene Förderziel „digitale Verfahren, hochauflösende und multidisziplinäre Simulationsverfahren“ im vorliegenden Projektcluster adressiert: Als eines der Kernziele soll mit Hilfe von Rechenalgorithmen und künstlicher Intelligenz ein digitaler Zwilling der Turbine bzw. der Turbinenkomponenten geschaffen werden, wodurch es möglich ist, den Einfluss verschiedener Lastprofile und -rampen auf den Teillastwirkungsgrad und den Lebensdauerverbrauch durch den stark fluktuierenden Betrieb zu simulieren, ohne dass z.B. eine konkrete Bauteilschädigung entsteht.

Die Erkenntnisse können anschließend dafür verwendet werden, gezielt Turbinen (-Komponenten) im Hinblick auf Kühleffizienz bzw. Lebensdauerverbrauch zu optimieren.

Für einen weiterhin ökonomischen Betrieb der Kombi-Kraftwerke sind solche verbesserten Vorhersage- und Überwachungsmodelle für die Turbinen nahezu unerlässlich.

TurboGrün AP 2.5 Einfluss von wasserstoffhaltigen Gasgemischen auf die Versprödungsneigung von unterschiedlichen Materialklassen [12]

Im Rahmen dieses Projekts wird ein Konzept für Verbrennungsmaschinen, wie zum Beispiel Gasturbinen, vorgeschlagen, bei dem der Wasserstoff vor der Turbine mit geringen Luftmengen gemischt und somit die inhibierende Wirkung des in der Luft enthalten Sauerstoffs genutzt wird. Dadurch werden zahlreiche Komponenten in der Brenngasversorgung, der Gaszuleitungen und den thermisch wie mechanisch hoch belasten Brennersystemen geschützt. Verbrennungstechnisch sind hieraus keine Nachteile zu erwarten, da die Zumischung von Luft zum Brenngas vor der Verbrennung in vielen Verbrennungsmaschinen erfolgt. Dabei ist sicherzustellen, dass die Inhibierung stets unterhalb der kritischen Konzentration eines zündfähigen Gemisches von 4% Sauerstoff (in Wasserstoff) erfolgt. Um ein Konzept zur inhibierenden Dosierung von Sauerstoff in Wasserstoffnetzen technischer Reinheit für Gasturbinen zu erstellen, ist die Beantwortung folgender Fragestellungen anhand von Modellbildung und Versuchen von zentraler Bedeutung:

- Ist der Mechanismus der inhibierenden Wirkung des Sauerstoffs auf die Wasserstoffversprödung von ferritischen Stählen auch auf die in Gasturbinen zumeist verwendeten austenitischen Stähle und Nickelbasislegierungen übertragbar?
- Bieten die gebildeten Oxide, die als Diffusionsbarriere die Wasserstoffaufnahme verhindern, auch bei langzeitiger Exposition Schutz?
- Wie beeinflussen Druck, Temperatur und der Sauerstoffgehalt des Wasserstoff-Gasgemisch den Mechanismus der Inhibierung?

DigiTecT AP 1.3 Effizientes Thermalfarben-Postprocessing mittels farbiger digitaler Zwillinge [13]

Ziel des Vorhabens ist die Effizienzsteigerung des Postprocessings von Hochdruckturbinen Thermalfarben-Experimenten mittels farbiger digitaler Zwillinge. Dazu soll zunächst ein Prozess zur automatisierten Erstellung der farbigen digitalen Zwillinge mittels einer GOM ATOS Scanbox und geeigneter Fotografie-Hardware sowie Beleuchtung entwickelt und anhand von Hochdruckturbinen-Komponenten demonstriert werden. Daran anschließend soll mittels geeigneter Software, z.B. GOM-Inspect Professional die Position der Temperatur-Umschlagslinien digital erfasst und an im Prozess nachgelagerte Analysewerkzeuge transferiert werden, um so das digitale Matching von Simulationsdaten mit den experimentellen Daten zu ermöglichen.

Thermalfarbverfahren zur Ermittlung der tatsächlichen Bauteiltemperaturen in hochbelasteten Turbinenkomponenten sind ein wichtiges Validierungselement der numerischen Auslegungswerkzeuge. Derzeit werden die Temperaturumschlaglinien aufwändig händisch gelesen und ausgewertet. Durch die parallele digitale Erfassung bei der Aufnahme der Bauteilgeometrie im GOM-Scanner können erheblich mehr und genauer die Daten erfasst und damit die tatsächlichen Bauteiltemperaturen einschließlich der Komponentengeometrien bestimmt werden. Somit können die Auslegungswerkzeuge erheblich feiner justiert und validiert werden. Da im Hochtemperaturbereich der Gasturbine schon Bauteiltemperaturunterschiede von wenigen Kelvin signifikanten Einfluss auf die Belastbarkeit bzw. die Lebensdauer der Komponente haben, erlauben diese Daten eine erhebliche Verbesserung der Auslegung zukünftiger Gasturbinen.

Der automatisierte Prozess zum Postprocessing der Thermalfarbenkomponenten wird zu einer signifikanten Zeitersparnis führen. Weiterhin ermöglicht die durchgängige Digitalisierung des Prozesses zum einen die Erstellung einer digitalen „Bibliothek“ von Thermalfarbkomponenten und bildet das Fundament für die Anwendung von Methoden der Künstlichen Intelligenz zur Verbesserung der Auswertung von Temperaturumschlagslinien.

DigiTecT AP 3.1 Bürstendichtungen als Inner Air Seals für Niederdruckturbinen der nächsten Generation [13]

Bei stationären Gasturbinen und im Triebwerksbau finden Bürstendichtungen zunehmend Anwendung, da sich durch ihren Einsatz eine deutliche Reduzierung der Leckage gegenüber Labyrinthdichtungen erreichen lässt. Bei Nutz- und Niederdruckturbinen (NDT) der nächsten

Generation können Bürstendichtungen einen wesentlichen Beitrag zum Erreichen der avisierten Kühlluft einsparungen und somit der Reduktion der des spezifischen Brennstoffverbrauchs (Specific Fuel Consumption - SFC) und der Reduktion der Emissionen um bis zu 0,3% leisten. Für die in diesem Vorhaben angestrebten Ziele ist eine wesentliche Innovation notwendig: das Einführen von Bürstendichtungen als Inner Air Seal (IAS) der NDT. Bisher kommen Bürstendichtungen in primär im lagernahen Bereich zum Einsatz, wo geringere Temperaturen, Umfangsgeschwindigkeiten und Relativbewegungen herrschen. Der Anwendungsbereich von Bürstendichtungen soll nun erweitert werden, um von den Vorteilen dieser Dichtungsart in weiteren Positionen in der Gasturbine profitieren zu können, insbesondere auch als Dichtelement auf drehmomentübertragenden Bauteilen (Rotoren). Hierzu müssen, aufbauend auf den Arbeiten aus Vorgängervorhaben (z.B. in EU CleanSky), komplexe Wärmeeintrags- und Verschleißversuche auf einem neuen Prüfstand und einem eigens dafür projektierten Rig am DLR SG in Augsburg durchgeführt werden. Damit können die Parameter für den zukünftigen Einsatz von Bürstendichtungen als IAS bestimmt werden.

DigiTecT AP 3.2 Messtechnische Entwicklung zur Thermalvalidierung doppelwandiger Kühlungskonzepte [14]

Über die letzten Jahre wurde am KIT, in Zusammenarbeit mit Rolls-Royce Deutschland ein Kaskadenprüfstand zur Untersuchung aerothormaler Fragestellungen an Turbinenschaufeln aufgebaut. Der Prüfstand erlaubt die optische Erfassung der Schaufeloberflächentemperatur via Infrarot (IR) Thermographie unter Einhaltung aller für die Kühlung relevanter Ähnlichkeitsparameter. Das KIT verfügt über mehrere Jahrzehnte Erfahrung im Bereich gekühlter Gasturbinenkomponenten. Neben seiner speziellen Expertise auf den Gebieten der hierfür erforderlichen Messtechniken und der Untersuchung filmgekühlter Oberflächen kompletter Kühlsystemen, sind insbesondere jüngere Arbeiten am Kaskadenprüfstand des KIT zu nennen.

Die Anlage ist für die Evaluierung und Validierung von Kühlungsdesigns prädestiniert und erlaubt die Messung der „total cooling effectiveness“ mit einer bereits sehr guten Genauigkeit von ± 5 %. Dennoch wurde in vorangegangenen Untersuchungen Verbesserungspotenziale sowohl bezüglich der Messtechnik als auch des Anlagenbetriebs identifiziert, die eine weitere Erhöhung der Messgenauigkeit auf bis zu ± 2 % erlauben. Derartig genaue Messungen sind insbesondere für die Erbprobung und Validierung von Schaufelkühlungsdesigns notwendig, die sich zusätzlich zur Filmkühlung durch eine hohe interne, konvektive Kühlung auszeichnen. Dazu zählen die in diesem Projektvorschlag fokussierten miniaturisierten doppelwandigen Kühlungskonzepte.

DigiTecT AP 3.4 Untersuchung Wärmeübergang im Deckbandbereich von Turbinen-Rotoren [13]

Der Deckbandbereich von Turbinenschaufeln stellt einen thermisch hochbelasteten Bereich dar. Die Kombination aus thermischer Belastung und hoher mechanischer Belastung führt dazu, dass für den genannten Bereich ein Risiko hinsichtlich Zieleinhaltung der Lebensdauer entstehen kann, wenn die Vorhersage der Temperaturen nicht hinreichend genau erfolgt. Im

Rahmen der vorliegenden Projektskizze soll zunächst die Vorhersagefähigkeit der korrelations- bzw. CFD-basierten Verfahren für diesen Bereich der Schaufeln bestätigt bzw. hergestellt werden. Im nächsten Schritt wird zudem untersucht und verifiziert, inwieweit durch lokale Kühlluftzufuhr eine Temperaturabsenkung im Deckbandbereich erzielt werden kann. Zur Erreichung dieser Ziele sind experimentelle Untersuchungen an einem großskaligen stationären Versuchsaufbau am Institut ITLR der Universität Stuttgart geplant. Diese stellen die Basis dar für die Validierung der Verfahren sowie die Bewertung des Einflusses von Kühlluft. Dabei werden gezielte Parametervariationen durchgeführt und Verteilungen von Temperaturen und Wärmeübergangskoeffizienten (HTC) auf den Oberflächen der Schaufel bestimmt. Darüber hinaus werden die Strömungs-geschwindigkeiten im Kanal mittels PIV (Particle Image Velocimetry) gemessen, um das Verständnis für den lokalen Wärmeübergang im Deckbandbereich zu verbessern. Dies erfolgt zunächst ohne zusätzliche Kühlluft (Basisvariante), im nachfolgenden Schritt dann mit gezielt eingeblasener Kühlluft, wobei der Einfluss auf das Strömungsfeld wie auch die Temperatur- bzw. HTC-Verteilung vermessen wird.

DigiTecT AP 4.1 Zusammenhang der Rissnukleation an Schmiedefehlern mit Materialermüdungs-eigenschaften [13]

Es soll ein verallgemeinertes transferierbares Modell zur Beschreibung der Rissnukleation und zur probabilistischen Quantifizierung der Lebensdauer von Komponenten mit herstellungsbedingten Fehlstellen entwickelt werden. Das Modell soll auf herkömmlich ermittelten Werkstoffversuchen und Kennwerten, wie Dehnungswöhlerlinien (DWL), zyklische Rissfortschrittskurven und Schwellenwerte, zurückgreifen und zur Vermeidung komplexer und aufwändiger Versuche an großen fehlerbehafteten Proben beitragen. Dabei sollen auch Erkenntnisse aus zwei Vorgängerprojekten berücksichtigt werden. Das Ziel ist die genauere Quantifizierung der Gesamtlebensdauer (Rissnukleation + Risswachstum) von herstellungsbedingten Fehlstellen in bruchmechanisch kritischen Komponenten. Ein wichtiges Beispiel sind z.B. Rotorscheiben in Gasturbinen. Hier erlaubt die angestrebte bessere Quantifizierung der Lebensdauer und damit verbundene Risiko-Abschätzung im Betrieb eine Ertüchtigung bereits existierender Anlagen für häufiges und schnelles Starten infolge der Flexibilisierung des Betriebs. Ähnliches gilt für Neuanlagen sowie Nachrüstungen von Kraftwerken. Das hier vorgeschlagene Konzept ist prinzipiell erweiterbar auf andere herstellungsbedingte Fehlertypen und Fehler z.B. in additiv gefertigten Bauteilen und Gusswerkstoffen. Das Vorhaben unterstützt die Einhaltung von Klimazielen durch reduzierte Emissionen, indem es gesteigerte Anforderungen im zyklischen Betrieb von herkömmlichen Kraftwerken im Umfeld von zunehmend volatilen erneuerbaren Energieträgern ermöglicht. Die angestrebte genauere Quantifizierung der Betriebslebensdauer von Komponenten erhöht die Wirtschaftlichkeit und Vielseitigkeit von Kraftwerksanlagen und trägt zur Ressourcennutzung und Effizienzsteigerung bei.

TurboTrans AP 3.4 Wärmeübertragung in rotierenden Kühlkanälen mit unterschiedlichen Rippen- und Kanalgeometrien [15]

Mit einem kühlungsoptimierten Turbinenschaufeldesign kann gegenüber aktuellen Designs Kühlluft einsparungen realisiert und damit der spezifische Brennstoffverbrauch einer Gasturbine reduziert werden. Eine robustere Auslegung der Laufschaufeln steigert die Lebensdauer und ermöglicht in zukünftigen Energiesystemen noch flexiblere Leistungsanpassungen und höhere zulässige Zyklenzahlen.

Zum Erreichen eines optimalen Kühlungsdesigns von gekühlten Laufschaufeln, unter möglichst minimalem Einsatz von Kühlluft, muss der interne Wärmeübergang entsprechend genau bestimmt werden. Ausgehend von vorhergehenden Entwicklungen, insb. COORETEC-Turbo 2020 3.1.6 „Flächenhafte Messung der internen Wärmeübergänge für Kühlsysteme von Turbinenlaufschaufeln unter maschinenähnlichen Betriebsbedingungen“ [FKz0327715H] und -RoboFlex AP3.1 "Wärmeübertragung bei fortschrittlichen Kühlkonzepten zur Minimierung des Kühlluftmassenstroms unter Berücksichtigung der Rotation" [FKz 03EE5012A]- sollen die Wärmeübergänge und komplexen Strömungen in Kühlkanälen mit Rippenturbulatoren, unter zusätzlichem Einfluss der Rotation (Coriolis & Auftriebseffekte) experimentell ermittelt und numerisch validiert werden.

Für einen systematischen Aufbau einer Messdatenbasis von Wärmeübergängen und Druckverlusten in Kühlkanälen unter Rotation werden unterschiedliche Rippen - und Kanalgeometrien kombiniert und in Wechselwirkung mit Rotationseffekten ausgewertet. Dies erfolgt am rotierenden Schaufelprüfstand des ITLR Stuttgart, mittels thermochromatischen Flüssigkristallen (TLC). In einem transienten Messverfahren wird die flächige Verteilung der Wärmeübergänge an den Kühlkanalwänden ermittelt. Mit diesen Versuchsdaten werden die bestehenden CFD-Methoden validiert und verbessert, sowie Wärmeübergangs- und Druckverlustkorrelationen abgeleitet.

Mit einer verbesserten Berechnungsgenauigkeit des Wärmeübergangs, und damit der Materialtemperatur gekühlter Schaufeln, steigt die Auslegungs-/Berechnungssicherheit für kommende Gasturbinenprojekte. Die Robustheit des Bauteils und damit der gesamten Gasturbine wird dadurch erhöht. Weiterhin kann mit Hilfen von korrelationsbasierten Optimierungstools die Wandtemperaturverteilung gezielt eingestellt werden, sodass unter Verwendung eines minimalen Kühlluftmassenstroms eine maximale Lebensdauer der Schaufel erreicht wird. Eine Kühlluft einsparung wirkt sich dabei positiv auf den Gesamtturbinenwirkungsgrad aus und senkt den spezifischen Brennstoffverbrauch.

Das Einsparpotential im Kühlluftverbrauch durch eine optimierte Rippengestaltung wird auf etwa 5% vom Nominalwert geschätzt. Ausgehend von einer schwach gekühlten Niederdruckturbinenschaufel wird eine Reduktion von ca. 0,02% pro Stufe erwartet.

TurboTrans AP 4.1 Experimentelle Untersuchungen eines mehrstufigen Turbinenrings mit Heißgasstrahlen in der Zuströmung [15]

Die Brennkammerabströmung (Turbineneintrittsprofil) mit lokalen Temperaturspitzen (Heißgasstrahlen) haben enorme Auswirkungen auf die thermomechanische Belastung und Lebensdauer der Turbinenkomponenten. Sowohl die Temperaturvorhersage der

Brennkammerabströmung, als auch die Ausmischung der Heißgasstrahlen sind im Auslegungsprozess der Turbine mit hohen Unsicherheiten belegt. Um die Lebensdauer und Zuverlässigkeit der Bauteile zu gewährleisten, müssen folglich hohe Sicherheitsmargen und Temperaturabschläge zusammen mit entsprechender Kühlung im Design berücksichtigt werden und führt zu einem geringeren Wirkungsgrad.

Das Rotating Turbine Rig (RTR) der Abteilung Turbine des Instituts für Antriebstechnik am DLR Göttingen ist ein Turbinenversuchsträger, der bereits in zwei Messkampagnen betrieben wurde. Es existiert hierfür umfangreiches Messequipment und validierte Messdaten der Messkampagnen sind verfügbar. In verschiedenen Projekten wie z.B. im EU-Projekt TRANSITION (DLR & RRD) [Grant Agreement Number: 945541] und dem EU-Projekt FACTOR [Grant Agreement Number: 265985] wurden erfolgreich Brennkammersimulatoren eingesetzt.

Das AP 4.1 zielt darauf ab, die Temperaturvorhersage für die Ausmischung der Heißgasstrahlen zu verbessern. Dabei sollen die Abklingrate der Temperatur in dem 2.5-stufigen, gekühlten Turbinenrig RTR untersucht werden, mit detaillierten Strömungsmessungen für ein besseres physikalisches Verständnis der Strömungsvorgänge. Die Ergebnisse sollen genutzt werden, um die numerische Vorhersage der Temperatur im Turbinenströmungskanal zu verbessern. Das Projekt umfasst die Auslegung und Herstellung eines Brennkammersimulators (BKS) mittels Heizpatronen sowie die umfassende Untersuchung der Brennkammer-Turbinen-Interaktion am Prüfstand. Ziel des Projekts ist es die Effizienz und Zuverlässigkeit von Gasturbinen zu steigern.

Die in diesem Projekt angestrebte Verbesserung der örtlichen Temperaturvorhersage und deren Ausmischung durch die mehrstufige Turbine bietet die Möglichkeit die Turbineneintrittstemperatur weiter zu erhöhen, da die notwendigen Margen reduziert werden können und gleichzeitig bis zu 1%-Punkt Kühlluft eingespart werden kann. Beides wirkt sich positiv auf den Wirkungsgrad aus. Bei zukünftig steigendem Anteil von Wasserstoff in der Verbrennung erhöht sich auch die Flammengeschwindigkeit. Somit gewinnt eine verlässliche Temperaturvorhersage durch die Turbine zusätzlich an Bedeutung.

Aufgrund ihres flexiblen Betriebsverhaltens und des weiterhin steigenden globalen Bedarfs an Energie, wird die Gasturbine auch in Zukunft einen notwendigen Beitrag leisten, um die Grundlastversorgung zu den volatilen alternativen Energieerzeugern zu gewähren. Dabei hat in den letzten Jahren die Dekarbonisierung durch Erhöhung des Wirkungsgrades oder das Verbrennen von Wasserstoff immer mehr an Bedeutung gewonnen und kann auch zukünftig situativ (u. a. Verfügbarkeit Brennstoffe), gesteigert werden.

2.3 Referenzen

- [1] J. Schmidt-Petersen: „Verbundvorhaben ROBOFLEX, Robuste Turbomaschinen für den flexiblen Einsatz Teilvorhaben: 1.1a, 3.1a, 4.1a und 4.8a“, Abschlussbericht FKZ 03EE5012A, 2025.
- [2] D. Vogt et. al: „Verbundprojekt: Robuste Turbomaschinen für den flexiblen Einsatz (RoboFlex), AP1.3a&b, AP1.5a&b, AP 3.1b, AP 3.5, AP 4.8b.“, Abschlussbericht FKZ 03EE5013C, 2025.

- [3] S. Köhler, C. Hartmann, J. von Wolfersdorf: „Strömung und Wärmeübergang in Innenströmungen mit großen Wirbelskalen (AP4.2)“, Verbundprojekt ECOFlex-turbo, Teilverbundprojekt KUpLe, FKZ 0324358I, 2025.
- [4] R. Krewinkel, C. Domnick, M. Rabs: „Untersuchung der Kühlluftausbreitung sowie der Kühleffektivität von Filmkühlung auf den Seiten- und Schaufelwänden thermisch und aerodynamisch hochbelasteter Schaufeln (AP3.1)“, Verbundprojekt ECOFlex-turbo, Teilverbundprojekt KUpLe, FKZ 0324358B, 2024.
- [5] J. Lofts: „Adaptive Dichtungen für ein verbessertes Teillast- und transientes Betriebsverhalten von Gasturbinen (AP6)“, Verbundprojekt ECOFlex-turbo, Teilverbundprojekt KUpLe, FKZ 0324358E, 2024.
- [6] T. Komarek: „3D Wärmetechnische Modellierung von Kavitäten, Teil 1: Strömung und Wärmeübergang bei signifikanter natürlicher Konvektion (AP3.1.4a)“, Verbundprojekt ECOFlex-turbo, FKZ 03ET7090G, 2024.
- [7] D. Bicat, J. Schmid, H.-J. Bauer: „Innovative interne Kühlkonzepte“, Schlussbericht OptiSysKom: Teilvorhaben 2.4, FKZ 03EE5035G, 2025.
- [8] B. Weigl: „Transiente analytische und experimentelle Untersuchung von Dichtungs- und Kühlsystemen (AP3.1b)“, TU Dresden, Verbundprojekt TurboGrün, FKZ 03EE5069F, 2025.
- [9] M. Metzger, M. Schlesinger: „„Digital Twin“ für thermisch hochbelastete Bauteile für hochvariable Lastgradienten (AP3.2)“, Fraunhofer IWM, Verbundprojekt TurboGrün, FKZ 03EE5069B, 2024.
- [10] D. Hilberg: „Gesamtvorhabenbeschreibung ECOFLEX-turbo – Kühlung für optimierte Lebensdauer (KUpLe)“, Rolls-Royce Deutschland Ltd & Co KG, 2018.
- [11] A. Wiedemann: „Verbundvorhabenbeschreibung OptiSysKom – Optimierung der Prozesse und Systeme sowie der Lebensdauer der Gesamtanlage und ihrer Komponenten“, MAN Energy Solutions SE, 2020.
- [12] A. Wiedemann: „Gesamtzielbeschreibung Turbogrün – Turbomaschinen für Energiespeicher und grüne Brennstoffe“, MAN Energy Solutions SE, 2020.
- [13] B. Witzel: „Projektskizze DigITecT – Digitalisierung und interdisziplinäre Auslegungstechnologien von Turbomaschinen für die Energiewende“, Siemens Energy Global GmbH & Co. KG, 2021.
- [14] J. Ortmanns: „Verbundvorhaben DigITecT (FKZ - 03EE5116C) – Digitalisierung und interdisziplinäre Auslegungstechnologien von Turbomaschinen für die Energiewende – Antrag auf Arbeitsplanänderung“, Rolls-Royce Deutschland Ltd & Co KG, 2024.
- [15] H. Knittel: „Gesamtvorhabenbeschreibung TurboTrans - Turbomaschinen für die Transformation in das integrierte Energiesystem der Zukunft“, MTU Aero Engines AG, 2024.

Kühlung

Verbundprojekt „RoBoFlex - Robuste Turbomaschinen für den flexiblen Einsatz“

Teilverbundprojekt Kühlung

Vorhabengruppe „Lebensdauer bei stark fluktuierendem Betrieb“

„Wärmeübertragung in fortschrittlichen rotierenden Schaufelkühlkanälen“

Vorhaben-Nr.: 3.1b

verfasst von

D. de Arcos
Dr.-Ing. C. Waidmann
Dr.-Ing. R. Poser

Institut für Thermodynamik der
Luft- und Raumfahrt (ITLR)
Universität Stuttgart

B. Jäppelt
MTU Aero Engines AG

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das dem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wird von MTU Aero Engines AG und mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWE) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages unter dem Förderkennzeichen 03EE5013C gefördert.

Abstract

The efficient cooling of thermally highly stressed gas turbine components requires precise knowledge of the flow and heat transfer processes that occur during operation. In this context, the influence of rotation in internally-cooled turbines blades plays a prominent role, as it can significantly alter the flow field compared to that of the equivalent non-rotating case. Consequently, the internal heat transfer structure becomes asymmetric and can differ greatly from investigations under non-rotating conditions. In order to take the influence of rotation into account, various cooling channel configurations were experimentally tested in the rotating rig at the Institute of Aerospace Thermodynamics (ITLR) at the University of Stuttgart. Liquid Crystal Thermography was used to determine high-resolution heat transfer distributions on the inner channel surfaces. The experimentally obtained measurement data also serve to validate the numerical methods and to generate design and optimization correlations by the industrial partner. The results show a strong dependence on the rotational speed and the angle of attack of the channel, which underlines the relevance of conducting tests under machine-like rotating conditions.

Kurzfassung

Die effiziente Kühlung thermisch hochbelasteter Gasturbinenkomponenten erfordert genaue Kenntnis der im Betrieb auftretenden Strömungs- und Wärmeübergangsprozesse. Für innengekühlte Turbinenlaufschaufeln spielt der Einfluss der Rotation eine herausragende Rolle, weil sie die Strömungsfelder, gegenüber denen vom nicht-rotierenden Fall, maßgeblich verändern kann. Infolgedessen wird eine Asymmetrie in der internen Wärmeübergangsstruktur hervorgerufen, welche sich stark von den Untersuchungen unter nicht-rotierenden Bedingungen unterscheiden kann. Um den Einfluss der Rotation zu berücksichtigen, wurden verschiedene Kühlkanalkonfigurationen am Rotationsprüfstand des Instituts für Thermodynamik der Luft- und Raumfahrt (ITLR) der Universität Stuttgart untersucht. Dabei wurde die transiente Flüssigkristallmesstechnik eingesetzt, um hochaufgelöste Wärmeübergangsverteilungen auf den inneren Kanaloberflächen zu bestimmen. Die experimentell gewonnenen Messdaten dienen zudem der Validierung der numerischen Verfahren und zur Erstellung von Auslegungs- und Optimierungskorrelationen beim Industriepartner. Die Ergebnisse zeigen eine starke Abhängigkeit von der Rotationsgeschwindigkeit sowie vom Anstellwinkel des Kanals, was die Relevanz der Durchführung von Tests unter maschinenähnlichen rotierenden Bedingungen unterstreicht.

1 Einleitung

Die effiziente interne Kühlung von Turbinenlaufschaufeln stellt eine wesentliche Voraussetzung für den Betrieb moderner Gasturbinen dar. Während Laufschaufeln extremen thermischen Lasten ausgesetzt sind, verändert die Schaufelrotation die Strömungsstrukturen innerhalb der Kühlkanäle grundlegend. Durch die Coriolis- und Zentrifugalkräfte (siehe Abb. 1) entstehen asymmetrische Strömungsfelder, die zu einer deutlichen Umverteilung der lokalen Wärmeübergangskoeffizienten führen. Diese komplexen Effekte erschweren nicht nur die Auslegung effizienter Kühlsysteme, sondern verlangen auch ein präzises Verständnis der zugrunde liegenden Mechanismen, um Materialgrenzen einzuhalten und gleichzeitig hohe Turbineneintrittstemperaturen zu ermöglichen. Ein detaillierter Einblick in das Zusammenspiel von Rotation und Wärmeübertragung ist daher unerlässlich, um die Sicherheit und Lebensdauer zukünftiger Laufschaufeldesigns zu gewährleisten und um die thermische Effizienz der Gasturbinen weiter zu erhöhen.

Obwohl eine Vielzahl an Studien zum Wärmeübergang in internen Laufschaufelkühlkanälen die Einflüsse variierender Parameter beleuchtet hat, konnten nur wenige Untersuchungen unter maschinenähnlichen rotierenden Bedingungen die Auswirkungen auf die lokalen Wärmeübergangskoeffizienten quantifizieren. Im Rahmen dieses Vorhabens werden daher experimentelle Untersuchungen und numerische Simulationen von berippten Kühlkanalkonfigurationen unter Rotationseinfluss durchgeführt. Die Wärmeübergangsmessungen an vier verschiedenen Testmodellen werden mittels der transienten Flüssigkristallmesstechnik durchgeführt, was eine hohe Auflösung der lokalen Wärmeübergangsstrukturen ermöglicht. Drei Basisgeometrien (Basis A, B und C) und eine Anwendungsgeometrie (Wendy A) werden dabei untersucht. Die numerischen Modelle wurden mit der kommerziellen CFD-Software ANSYS CFX erstellt.

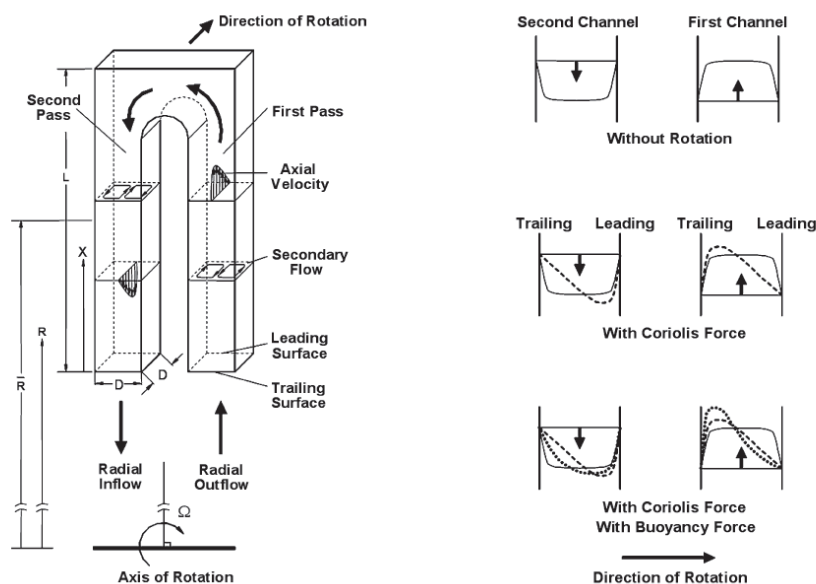


Abb. 1: Schematische Darstellung des Strömungsfelds in einem rotierenden Kühlkanal [1]

2 Experimentelle Methoden

Versuchsaufbau: Der rotierende Versuchstand [2,3] modelliert die interne Kühlung einer Gasturbinenschaufel und wurde im Vorgängerprojekt in Betrieb genommen [4]. Ein Schema des Versuchsaufbaus ist in Abb. 2 dargestellt. Die Druckluftversorgung erfolgt über einen Kompressor, der bis zu 10 bar in drei separaten Luftströmen (Versuchsluft, Spülluft, Temperierluft) liefern kann. Die notwendigen Temperaturbedingungen werden durch einen Wärmeübertrager, der mittels flüssigen Stickstoffs (LN2) gekühlt wird, bereitgestellt. Die spezifischen Versuchsbedingungen hinsichtlich Massenstrom, Druck und Temperatur werden für die drei Luftströme durch mehrere Regeleinrichtungen erreicht und ermöglichen eine sehr genaue Einstellung der Zielgrößen Reynoldszahl (Re), Rotationszahl (Ro) und Buoyancyzahl (Bo). Damit lassen sich die in der realen Anwendung auftretenden dimensionslosen Kennzahlen realisieren.

Um die transiente Flüssigkristallmesstechnik anwenden zu können, wird eine sprunghafte Temperaturänderung in einem anfänglich isothermen Testmodell benötigt. Diese wird durch eine Ventileinheit bestehend aus sechs schnellschaltenden Ventilen realisiert (siehe Abb. 2). Die unterschiedlichen Luftströme werden mittels Drehdurchführungen an den Wellenenden in das Rotationssystem ein- bzw. ausgebracht. Das optisch transparente, vollständig instrumentierte Versuchsmodell wird in einem Modellgehäuse aus Aluminium fixiert. Dieses ist am Ende des Rotorarms befestigt und enthält die mitrotierenden Kameramodule in den druck- und saugseitigen Gehäusehalbschalen, jeweils mit ein bis zwei Action-Cams, vier LED-Lampen und einer roten Synchronisations-LED. Die Welle wird von einem frequenzgesteuerten Elektromotor (55 kW) über einen Riemenantrieb angetrieben.

Messtechnik: Das Messverfahren basiert auf der Verwendung von thermochromatischen Flüssigkristallen (im engl. Thermochromic Liquid Crystals, TLC). Diese sind optisch aktive Mischungen organischer Moleküle, deren optische Eigenschaften temperaturabhängig sind. Die kleinen TLC-Partikel sind durch Mikrokapseln vor Umgebungseinflüssen geschützt, so dass diese keine Druck- oder Schubspannungsabhängigkeit zeigen. Werden die TLC mit einer externen Weißlichtquelle beleuchtet, dann reflektieren sie das Licht im optisch sichtbaren

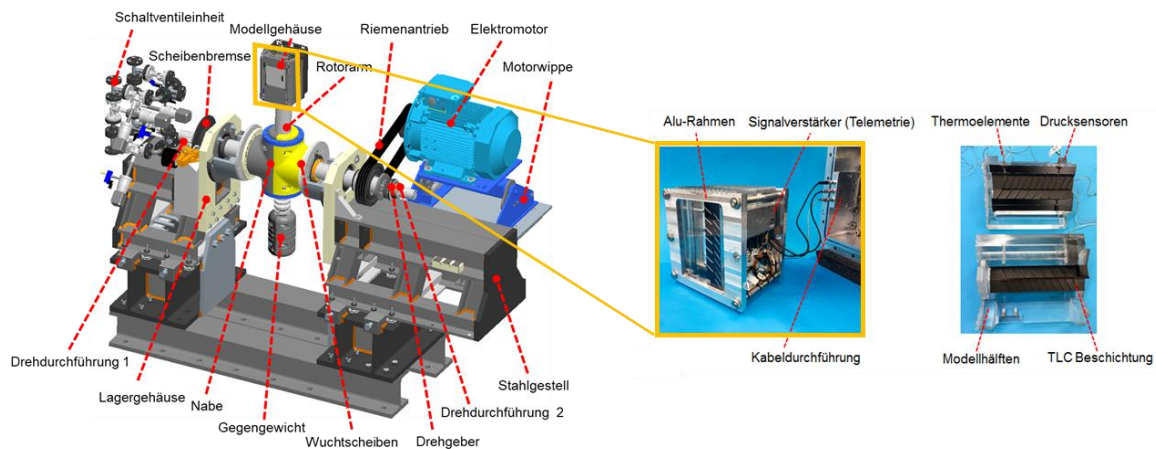


Abb. 2: Schematische Darstellung des Rotationsprüfstands

Wellenlängenbereich selektiv innerhalb eines Temperaturbereichs von nur 1 K (schmalbandige TLC). Da die TLC auf der gesamten Innenseite des Schaufelkühlkanalmodells aufgetragen werden, erlaubt dies die Messung der lokalen Verteilung der Wandtemperatur. Dank Ihrer Einfachheit in der Auftragung per Airbrush-Verfahren bietet diese Messtechnik den Vorteil einer einfachen Untersuchung komplexer Kühlkanalkonfigurationen, die durch herkömmliche Messmethoden, wie z.B. der Infrarot-Thermographie, nicht möglich wäre.

Zur Bestimmung des Zusammenhangs zwischen Farbe und Temperatur ist eine Kalibration der verwendeten TLC-Mischung nötig [5]. Hierzu wird in einem separaten Kalibrieraufbau am ITLR (siehe Abb. 3) die Temperatur ermittelt, bei der die TLC die maximale Intensität des grünen Farbkanals anzeigen.

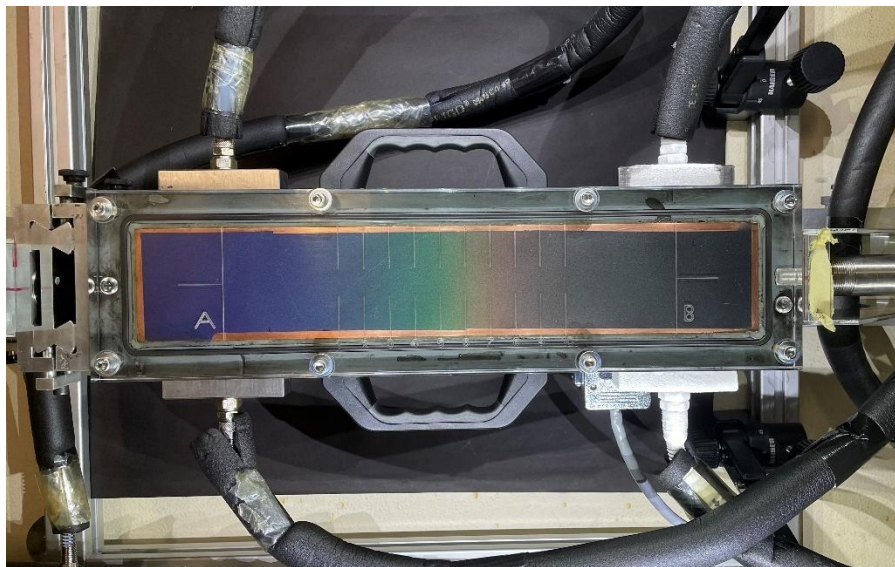


Abb. 3: Versuchsaufbau zur Kalibration thermochromatischer Flüssigkristalle (TLC)

In diesem Vorhaben wird das transiente TLC-Messverfahren zur lokalen Wärmeübergangsmessung verwendet, welches auf der Bestimmung des Farbumschlagzeitpunktes nach einem aufgeprägten Fluidtemperatursprung beruht. Für Versuche mit Rotation ist dabei die korrekte Richtung des Wärmestroms von „heißer“ Wand auf „kaltes“ Fluid einzuhalten, um die Wirkrichtung der rotationsbedingten Auftriebskräfte korrekt abbilden zu können. Aus diesem Grund wird der mit der Ventileinheit erzeugte Temperatursprung mittels trockener gekühlter Luft erzeugt.

In einem transienten Experiment befinden sich zu Beginn alle Testmodellwände auf konstanter Temperatur. Die Kühlluft wird zu Versuchsbeginn in das isotherme Plexiglas-Versuchsmodell geleitet, worauf sich mit der Zeit die Kanalwände abkühlen und die TLC ihre Farbe ändern. Gleichzeitig werden die ursächlichen Fluidtemperaturen im Testmodell mittels lokaler Thermoelementmessungen erfasst. Im Postprocessing werden die aufgenommenen

Temperaturen durch flächenhafte Interpolation am Ort jedes Pixels berechnet. Aus den durch die mitrotierenden Kameras aufgenommenen Videos im Versuch wird über einen Farbabgleich für jedes Pixel die Indikationszeit bestimmt, bei der die Wandtemperatur der vorher kalibrierten Temperatur entspricht. Bereiche hohen Wärmeübergangs haben bei gleicher Fluidtemperatur einen schnelleren TLC-Farbumschlag als Bereiche mit niedrigerem Wärmeübergang.

Der lokale Wärmeübergangskoeffizient kann aus der analytischen Lösung der instationären Fourierschen Wärmeleitungsgleichung für eine eindimensionale Wärmeleitung in einer halbbunendlichen Wand bestimmt werden [6]. Bei Turbulatoren mit gekrümmten Oberflächen (z.B. Kugelsegmente oder Dimples („Dellen“)), muss eine Korrektur aus der Literatur berücksichtigt werden [7]. Aufgrund der Natur der Turbulatorgeometrie, kann die o.g. Korrektur für sphärische Oberflächen nicht direkt auf unvollständige Kugelsegmente ohne weitere Validierung angewandt werden. Dies wird im Kapitel „Auszug aus den Messergebnissen: Basisgeometrie-B“ diskutiert. Um die Wärmeübergangserhöhung im Vergleich zu einer turbulenten Strömung in einem glatten Kühlkanal zu bestimmen, wird das Verhältnis der lokalen Nußeltzahlen in Bezug auf die Nußeltzahl der Korrelation nach Dittus-Boelter/McAdams [8] gebildet. Des Weiteren wird als Maß für die rotationsbedingte Wärmeübergangssteigerung auf das normalisierte Nußeltzahlverhältnis (NNNR) als Logarithmus mit Basis 2, $\log_2(NNNR)$, zurückgegriffen. Die zuvor genannten Methoden sind in der ITLR Software „PROTEIN“ zur Auswertung der TLC-Videos implementiert [5,9].

3 Testmodelle und Testmatrix

Testmodelle: Die Anwendung der Flüssigkristallmesstechnik erfordert Testmodelle aus einem optisch transparenten Material (Acrylglas), um die TLC-Umschläge auf den internen Kühlkanalseiten von außen mit den mitrotierenden Kameras aufzeichnen zu können. Eine Übersicht der internen Struktur der im Rahmen dieses Vorhabens untersuchten Kühlkanalkonfigurationen ist in Abb. 4 dargestellt.

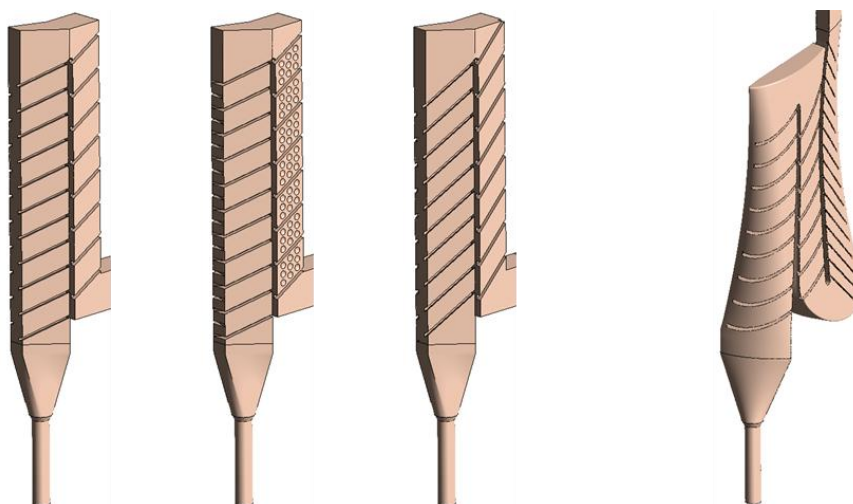


Abb. 4: Schematische Ansicht der drei Basisgeometrien (ganz links: Basis-A, Mitte links: Basis-B, Mitte rechts: Basis-C) und der Anwendungsgeometrie (Wendy-A, ganz rechts)

Die drei Basisgeometrien (A, B und C) zeichnen sich durch druck- und saugseitig berippte 2-Pass Kühlkanalkonfigurationen mit folgenden geometrischen Eigenschaften aus:

- Basis-A: 60-65° angestellte Rippen
- Basis-B: 60-65° angestellte Rippen, Dreieck-Vorderkantenrippen und Kugelsegmente im zweiten Teilkanal (pass2)
- Basis-C: 42-48° angestellte Rippen

Für die Nußeltzahlberechnung wird der hydraulische Durchmesser des ersten Teilkanals (pass1) verwendet. In Abb. 5 ist eine CAD-Ansicht der zwei Acrylglasschalen (links) sowie eine Aufnahme des gefertigten Kühlkanalmodells (rechts) exemplarisch für das Basis-B Modell dargestellt. Es ist die innere Struktur des Kühlkanals mit den Rippen und Kugelsegmenten sowie eine Vielzahl an Thermoelement- und Drucksensorbohrungen zu erkennen.

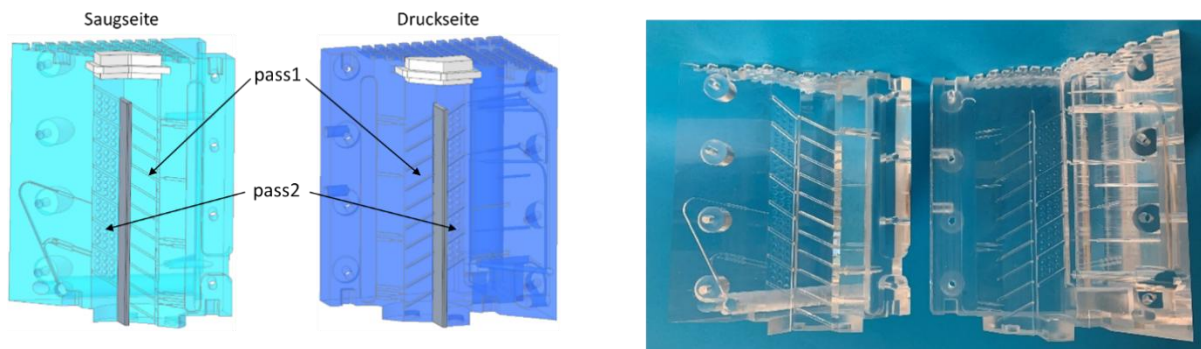


Abb. 5: CAD-Modell der Basisgeometrie-B (links) und gefertigtes Kühlkanalmodell (rechts)

Anstellwinkel: Die drei Basisgeometrien wurden bei drei verschiedenen Anstellwinkeln (-18.5° , $+8.0^\circ$ und $+46.5^\circ$) untersucht, um die Einflüsse verschiedener Wirkrichtungen der Rotationskräfte zu bewerten und parallel auch die Eignung des numerischen Modells zu verifizieren. In Abb. 6 sind die drei Anstellwinkelpositionen exemplarisch für das Basis-A Modell dargestellt, wobei der Anstellwinkel $+8.0^\circ$ dem nominellen Winkel entspricht. Die Anwendungsgeometrie-A zeichnet sich durch eine 3-Pass Kühlkanalkonfiguration und eine maschinenähnliche Verdrehung in radialer Richtung aus. Die Rippen auf

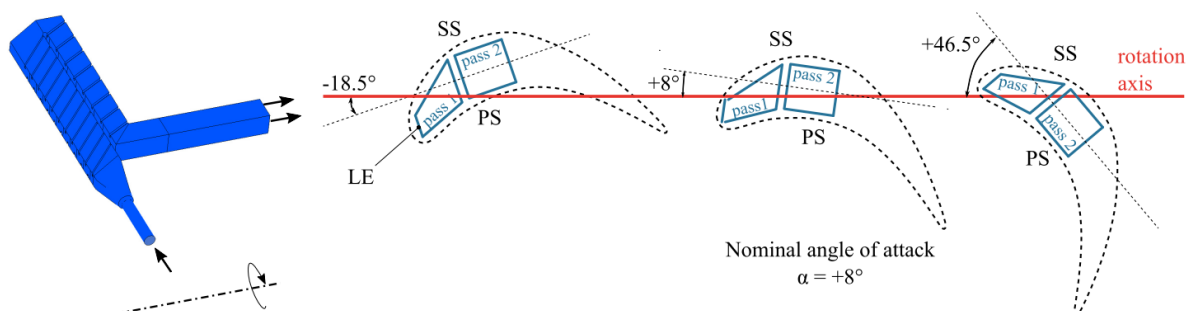


Abb. 6: Winkelanstellungen der Basisgeometrien

Druck- (PS) und Saugseite (SS) sind mit einem $+45^\circ$ Winkel im ersten und zweiten Teilkanal und mit einem -45° Winkel im dritten Teilkanal angestellt. Für die Nußeltzahlberechnung wird der hydraulische Durchmesser des ersten Teilkanals am Schauffelfuß verwendet.

Testmatrix: Tab. 1 gibt die Testmatrix wieder. Diese besteht aus 13 Betriebspunkten und umfasst anwendungstypische Parameterbereiche von gekühlten Turbinenlaufschaufeln. Bei den Basisgeometrien wurde die Testmatrix bei den drei verschiedenen Anstellwinkeln (-18.5° , $+8.0^\circ$ und $+46.5^\circ$) untersucht. Bei der Anwendungsgeometrie-A wurde hingegen keine Anstellwinkelvariation durchgeführt.

Tab. 1: Versuchsmatrix als Kombination unterschiedlicher Reynoldszahlen (Re) und Rotationszahlen (Ro); gemessene Kombinationen sind mit „X“ gekennzeichnet

		Ro			
		0	0.15	0.30	0.50
Re	7500	X	X	X	X
	15000	X	X	X	X
	30000	X	X	X	-
	60000	X	X	-	-

4 Numerische Modellierung

Die numerischen Berechnungen wurden mit der kommerziellen CFD-Software ANSYS CFX 21 durchgeführt. Dabei handelte es sich um stationäre RANS-Strömungssimulationen mit dem $k-\omega$ SST-Turbulenzmodell mit den Ergänzungen „curvature correction“ und „reattachment modification“ von CFX [10], welche im Rahmen des Vorgängerprojekts gegenüber Literaturdaten validiert wurden [11]. Als Arbeitsmedium wird analog zum experimentellen Versuch trockene Luft benutzt, welche als kompressibles ideales Gas behandelt wird. Deren Viskosität und Wärmeleitfähigkeit werden mittels der Sutherlandgleichungen beschrieben [12].

Rechengebiet und Randbedingungen: Das Rechengebiet und die zugehörigen Randbedingungen wurden so gewählt, dass die Gegebenheiten im Experiment möglichst gut nachgebildet werden; sie sind in Abb. 7 schematisch dargestellt.

Am Einlass werden die drei Geschwindigkeitskomponenten einer vollentwickelten Kanalströmung vorgegeben. Diese wurden mittels Simulation der Rohrströmung in der Rotorleitung beim gleichen Massenstrom wie im Experiment bestimmt. Dies hat den Vorteil, dass das durch den Rotationseinfluss verzerrte Geschwindigkeitsprofil vor dem Eintritt in den Kanal berücksichtigt wird und somit die Strömungssituation des Experiments besser abgebildet wird. Am Auslass wird ein konstanter Druck von 6 bar vorgegeben. Alle Wände sind

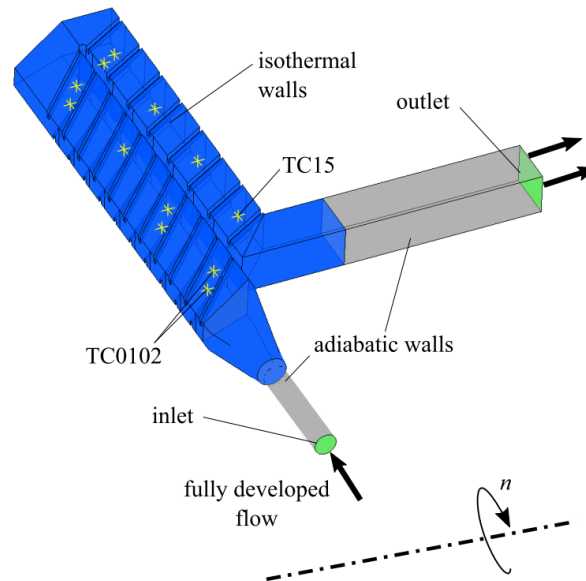


Abb. 7: Rechengebiet mit Randbedingungen sowie Einlass- und Auslass-Thermoelement-Messstellen des Experiments. Zusätzliche TCs in der Strömung sind mit gelben Kreuzen gekennzeichnet

mit einer Haftbedingung definiert. Kanalwände (blau) wurden isotherm mit der Anfangstemperatur des transienten TLC-Experiments gesetzt. Die Ein- und Auslassstücke wurden adiabat modelliert. Darüber hinaus wurde das Auslassstück extrudiert, um Rückströmungen und Rezirkulationsgebiete an der Position der Auslassrandbedingung zu vermeiden und diese möglichst in der Simulation gut abbilden zu können. Um den Einfluss der Rotationskräfte (Coriolis und thermischer Auftrieb) abbilden zu können, wird das Rechengebiet der Rotationsgeschwindigkeit des transienten TLC-Experiments ausgesetzt. Die Rotationskräfte werden als zusätzliche Quellen in den Impulsgleichungen modelliert.

Numerische Auswertung: Der Wärmeübergangskoeffizient wird mittels des Newtonschen Kühlungsgesetzes [13] berechnet. Als Referenztemperatur wird die massenstromgemittelte Bulktemperatur für jedes Segment im Kanal herangezogen. Der errechnete Wärmeübergangskoeffizient wird dann analog zum transienten TLC-Experiment in die dimensionslose Nußeltzahl Nu überführt.

Rechengitter: Im Rahmen dieses Projekts wurden alle Rechengitter mittels ANSYS ICEM CFD 21 generiert. Bei den Basisgeometrien wurde ein multi-blockstrukturierter Ansatz verfolgt, welcher eine bessere Kontrolle der Topologieeigenschaften und des dimensionslosen Wandabstands ermöglicht. Durch die Auswahl eines strukturierten Ansatzes wird ebenfalls ein verringerter Rechenaufwand angestrebt.

Bei der Anwendungskonfiguration Wendy-A hingegen wurde aufgrund der Komplexität der Geometrie ein unstrukturierter Ansatz verfolgt. Dabei wurde das unstrukturierte Octree-Verfahren mit einer Delaunay Glättung ergänzt [14]. Die Anzahl der Zellschichten sowie die Höhe der ersten Zellschicht wurden hierbei konstant bei jeweils 15 Zellen und $2\text{ }\mu\text{m}$ gehalten. Dies wurde ausgewählt, um einen sanften Übergang zwischen dem Tetraedernetz in der Kernströmung und der letzten Prismenschicht zu erreichen. Darüber hinaus wurde darauf geachtet, dass der dimensionslose Wandabstand der ersten Zellschicht $y_1^+ = \sqrt{\frac{|\tau_w|}{\rho}} \frac{y_1}{\nu} \approx 1$ auf allen relevanten Oberflächen eingehalten wird. Die daraus resultierende Zellenanzahl für die vier Testgeometrien ist in Tab. 2 angegeben.

Tab. 2: Knotenanzahl der vier Kühlkanalmodellgeometrien

	Basis-A	Basis-B	Basis-C	Wendy-A
Zellenanzahl (Mio.)	11.4	18.7	10.8	65.0

Zur Bewertung des Diskretisierungsfehlers wurden umfassende Netzunabhängigkeitsstudien durchgeführt. Dabei wurde der Grid Convergence Index (GCI), nach [15,16] für die Nußeltzahl Nu eingeführt und berechnet.

5 Auszug aus den Messergebnissen

Basisgeometrie-A: Abb. 8 zeigt den lokalen Wärmeübergang auf der Druck- (PS) und Saugseite (SS) des Basis-A Modells für einen nicht-rotierenden Versuch mit einem $+8^\circ$ -Anstellwinkel und $Re \approx 15000$ als Nu/Nu_0 -Konturplots. Die schwarzen Pfeile am Ein- und Auslass des Kanals verdeutlichen die Strömungsrichtung. Experimentelle Ergebnisse der thermochromatischen Flüssigkristalle (TLC) sind links in der Abbildung zu sehen. Zur Verifikation werden die CFD-Ergebnisse auf der rechten Seite dargestellt. In Gegensatz zur CFD, liegen die Wärmeübergangsdaten des Experiments auf der Vorderkante (LE) nicht vor

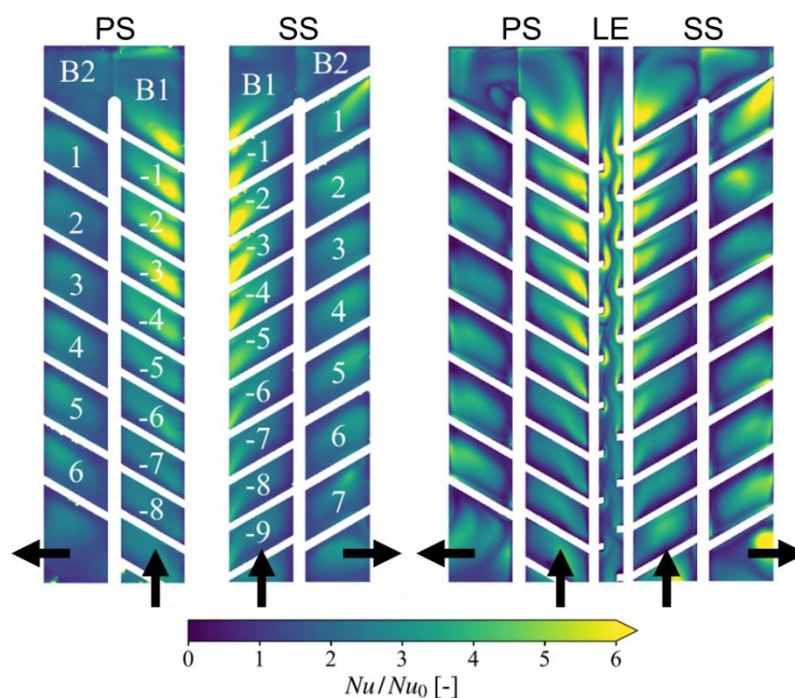


Abb. 8: Lokale Nußeltzahlverteilung (nicht-rotierend). Links: Experiment, rechts: CFD

und sind deshalb ausgeblendet.

Die Wärmeübergangsstruktur zeigt das klassische Muster einer berippten Kanalströmung. In der radial nach außen gerichteten Strömung des ersten Teilkanals löst die Luft an den geneigten Rippen ab und wird in Richtung der LE abgelenkt. In den umliegenden Bereichen der LE, sowohl auf der PS als auch auf der SS, trifft die Strömung hinter den Rippen schräg auf die Kanalwände auf. Dadurch steigen die Wärmeübertragungsraten in Richtung der Umlenkung stark an, mit einer lokalen Erhöhung von $Nu/Nu_0 > 6$ gegenüber der Korrelation für einen glatten Kanal. Im ersten Teilkanal liegen die Wärmeübergangsraten bei einem deutlich höheren Niveau als im zweiten Teilkanal. Direkt stromab der Umlenkung im Segment 1 auf der SS entsteht ein Gebiet mit erhöhtem Wärmeübergang, welches auf die 180° Strömungsumlenkung und die Querschnittsänderung - von trapezförmig im ersten

Teilkanal, auf quadratisch im zweiten Teilkanal - zurückzuführen ist. Generell stimmen die CFD-Daten mit den experimentellen Daten qualitativ gut überein.

Sowohl die Rotation als auch die Variation des Kühlkanalanstellwinkels bewirken eine Änderung der Corioliskraftwirkung, die zu signifikanten Abweichungen in der lokalen Wärmeübergangsstruktur führen kann. In Abb. 9. ist die rotationsbedingte

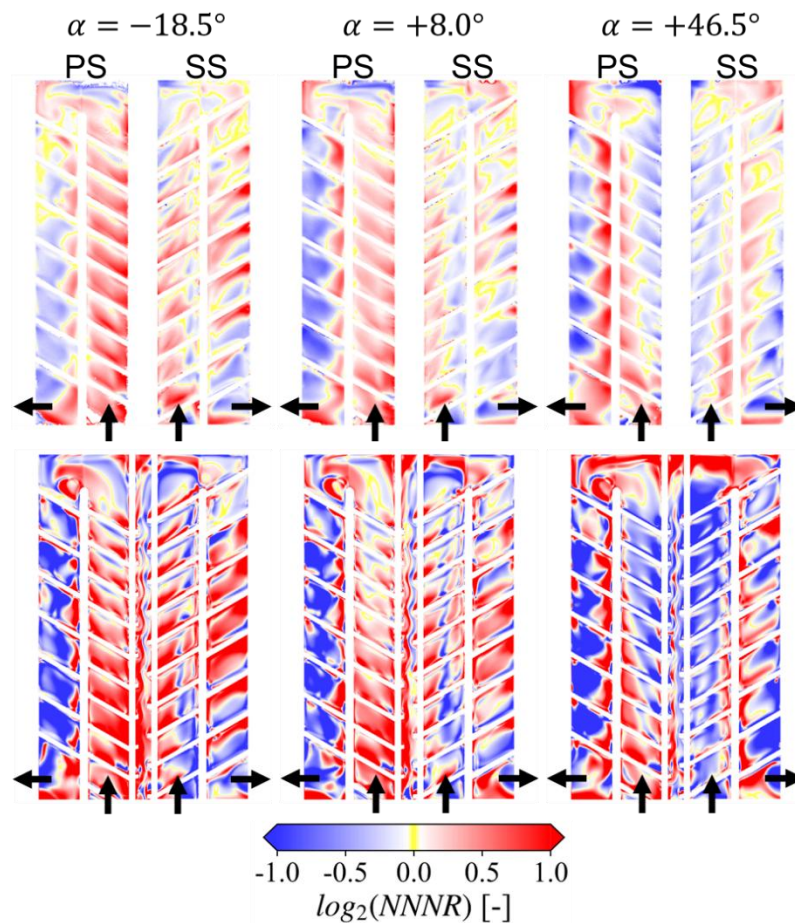


Abb. 9: Rotationsbedingte Variation des Wärmeübergangskoeffizienten für drei verschiedene Anstellwinkel. Oben: Experiment, unten: CFD)

Wärmeübergangserhöhung gegenüber dem glatten Kanal ($NNNR$) für die drei Anstellwinkel sowie für Experiment und Numerik bei $Ro \approx 0.15$ dargestellt. Die Daten werden als logarithmische Funktion mit Basis 2 ($\log_2(NNNR)$) geplottet, um eine Verzerrung zugunsten der Wärmeübertragungssteigerung zu vermeiden, indem z.B. die Halbierung ($\log_2(NNNR) = -1$) sowie die Verdoppelung ($\log_2(NNNR) = +1$) der Wärmeübergangskoeffizienten in der divergenten rot-weiß-blauen Skala gleich gewichtet werden. Während rote Bereiche eine rotationsbedingte Erhöhung des Wärmeübergangskoeffizienten signalisieren, deuten blaue Flächen auf eine Reduktion des Wärmeübergangskoeffizienten hin.

Eine Variation des Modellanstellwinkels von $+8.0^\circ$ auf -18.5° (siehe Abb. 6 für die schematische Darstellung der Winkel) lässt anhand der experimentellen Daten eine nur leichte Anpassung der Wärmeübergangsstruktur erkennen. Im Allgemeinen steigt die Nußeltzahl gegenüber dem nicht-rotierenden Fall im ersten Teilkanal deutlich. Andererseits lassen sich im zweiten Teilkanal zwei klar abgetrennte Gebiete mit jeweils erhöhten und verringerten Wärmeübergangskoeffizienten erkennen. Beim $+46.5^\circ$ Winkel ist eine signifikante Veränderung der Struktur vornehmlich im ersten Teilkanal festzustellen. In diesem Fall werden die Wärmeübergangskoeffizienten durch Rotation überwiegend reduziert. In der Regel ist die CFD in der Lage, die lokalen Abweichungen vom transienten TLC-Experiment qualitativ korrekt abzubilden.

Eine detailliertere Untersuchung der sich durch die Rotation verändernden Wärmeübergangscharakteristiken sowie ein quantitativer Vergleich zwischen Experiment und Numerik wurde in zwei Veröffentlichungen [17,18] diskutiert.

Basisgeometrie-B: Die klassische Wärmeübergangsauswertung der transienten Flüssigkristallexperimente setzt eine eindimensionale Wärmeleitung in einer halbinendlichen Wand voraus. Durch die Anwendung von gekrümmten Turbulatoren (z.B. Kugelsegmente) wie beim Basis-B Versuchsmodell werden beide Annahmen verletzt. Abb. 10 zeigt die Verteilung der Nußeltzahlen und die dazugehörigen flächengemittelten Daten eines nicht-rotierenden Tests bei $Re \approx 15000$. Dargestellt sind die Ergebnisse eines transienten TLC-Versuchs mittels zweier in Schichten gesprühter Flüssigkristalle: TLC2, mit $T_{\text{ind}} \approx 2^\circ\text{C}$, d.h. mit einem „langsamen“ Farbumschlag, und TLC1 mit $T_{\text{ind}} \approx 11^\circ\text{C}$, d.h. mit einem „schnellen“ Farbumschlag. Generell kann man im ersten Teilkanal eine relativ gute Überlappung beider Datensätze innerhalb der experimentellen Messgenauigkeit erkennen. Im zweiten Teilkanal zeigt sich hingegen eine signifikante Abweichung mit einer systematischen Übersteigerung des Wärmeübergangs beim TLC2 im Vergleich zu den Ergebnissen von TLC1. Bei näherer Betrachtung der Turbulatoren im zweiten Teilkanal zeigen sich sehr starke lokale Unterschiede zwischen TLC2 und TLC1, mit einem durchweg höheren Wärmeübergangsniveau bei TLC2.

Die dargestellten Unterschiede liegen maßgeblich an der radialen Wärmeleitung in den Kugelsegmenten. Da die Kugelsegmente eine konvexe Oberfläche aufweisen, ergibt sich im Vergleich zum rein eindimensionalen Fall einer ebenen Oberfläche eine größere Kühlwirkung. Solche Krümmungseffekte können durch das Modell nach [7] berücksichtigt werden. Allerdings ist dieses alternative Modell theoretisch nur für idealisierte Geometrien (Kugel, Zylinder) gültig.

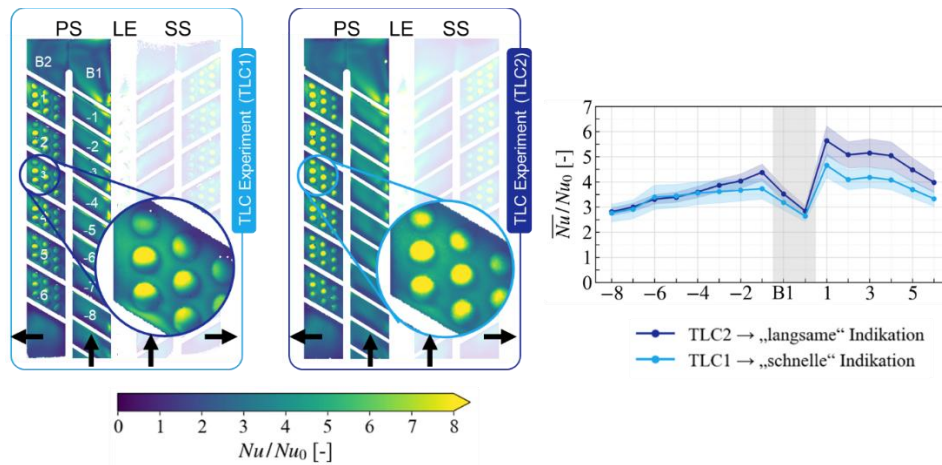


Abb. 10: Lokale (links) und segmentgemittelte Nußeltzahlen (rechts) unter Verwendung von zwei TLC-Typen (nicht-rotierend) auf der Druckseite (PS)

Für sonstige Geometrien wie Kugelabschnitte (= Kugelsegmente) muss es genauer untersucht werden. Aus diesem Anlass wurde ein numerisches, instationäres Modell in ANSYS CFX implementiert, das die radiale Wärmeleitung im Festkörper innerhalb eines transienten TLC-Versuchs simuliert. Dieses Modell soll dazu dienen, die Anwendbarkeit der o.g. Gleichung für die Basisgeometrie-B zu überprüfen und ggf. zu validieren und wird im Folgenden kurz erläutert.

Die wichtigsten Merkmale des instationären Wärmeleitungsmodells sind Abb. 11 zu entnehmen. Es wird lediglich die Energiegleichung im Festkörper, bestehend aus dem Kugelsegment vom Basis-B Modell (PROT) sowie benachbarte ebene Wände (SIDE), gelöst. Diese werden von einem Zylinder (WALLS) mit ausreichender Länge in y-Richtung umrandet, um die Versuchslänge eines typischen transienten TLC-Experiments abbilden zu können.

SETUP TRANS. FESTKÖRPERSIMULATION

ANSYS CFX R21

Simulationszeit: 150 s

Zeitschritt: 0.1 s (0.01 s in den ersten 10 s)

Material: Plexiglas (PMMA)

Residuen: max 10^{-6}

RANDBEDINGUNGEN

Anfangstemperatur: $T_0 = 20 \text{ °C}$

Kugelsegment: $h(x, y) \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}} \right]; T_{\text{ref}} = 0 \text{ °C (konst.)}$

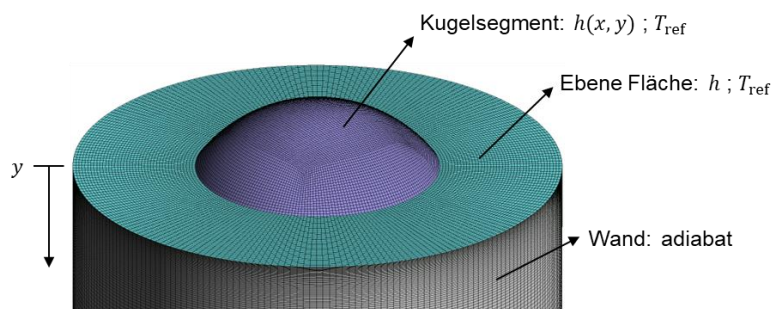


Abb. 11: Numerisches Modell zur Untersuchung von radialen Wärmeleitungseinflüssen

Sowohl auf der gekrümmten PROT, als auch auf der flachen SIDE wird ein Wärmeübergangskoeffizient aus einer vorherigen CFD-Simulation mit einer zeitlich konstanten Referenztemperatur vorgegeben. In Abb. 12 links ist die zweidimensionale Verteilung des Wärmeübergangskoeffizienten, die als Randbedingung vorgegeben wurde, dargestellt.

Wertet man die aus der instationären Wärmeleitungssimulation resultierenden Indikationszeiten für ein „virtuelles“ TLC (z.B. für TLC1: $T_{\text{ind}} \approx 11 \text{ °C}$) mittels der klassischen Auswertung nach [6] und mittels des alternativen Modells nach [7] aus, und setzt man diese ins Verhältnis zu den in Abb. 12 (links) als Randbedingung vorgegebenen Wärmeübergangskoeffizienten, dann erhält man die Kontur-Plots in Abb. 12 rechts. Ein Verhältnis $h/h_{\text{BC}} = 1$ deutet auf eine perfekte Übereinstimmung mit den vorgegebenen Werten von Abb. 12 links. In detaillierten Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass die „schnell“ anzeigenden TLC1 genauere Werte als der später anzeigenden TLC2 auf der Kugelsegment-Oberfläche liefern. Grund dafür ist die radiale Komponente des Wärmeübergangs, deren Einfluss bei kürzeren Indikationszeiten geringer ausfällt. Vergleicht man die Auswertung der Indikationszeiten mittels beider Methoden, dann lässt sich eine bedeutsame Verbesserung der Vorhersagegenauigkeit durch [7] erkennen, mit einer in weiten Teilen maximalen Abweichung zu den vorgegebenen Werten kleiner als ca. 5 %. An den Randbereichen sowie auf den Bereichen mit niedrigsten Wärmeübergangskoeffizienten, wie auf der Südwest-Seite des Kugelsegments, kann allerdings der Wärmeübergangskoeffizient aufgrund der lateralen Wärmeleitung lokal um $h/h_{\text{BC}} > 1.4$ überschätzt werden.

Die verbesserte Auswertung, die aus der kombinierten Auswertung zwischen TLC1 mit [7] für Kugelsegmente und TLC2 mit [6] für die restlichen Kanalflächen besteht, wird auf die Indikationszeiten des TLC-Versuchs in Abb. 13 angewandt. Man erkennt, dass die neue Auswertung auf niedrigere Wärmeübergangskoeffizienten wie die klassische Auswertung von TLC1 oder TLC2 mittels [6] hindeutet. Es kann zusätzlich noch angenommen werden, dass die tatsächlich existierenden Wärmeübergangskoeffizienten aufgrund von lateralen Wärmeleitungseffekten noch niedriger ausfallen könnten als der Datensatz „Blend TLC2 / TLC1“ welcher in Abb. 13 darstellt ist. Eine genauere Abgrenzung des von der lateralen Wärmeleitung verursachten Fehlers auf dem Kugelsegment wurde untersucht [19], ließ sich jedoch im Rahmen des Projekts nicht realisieren.

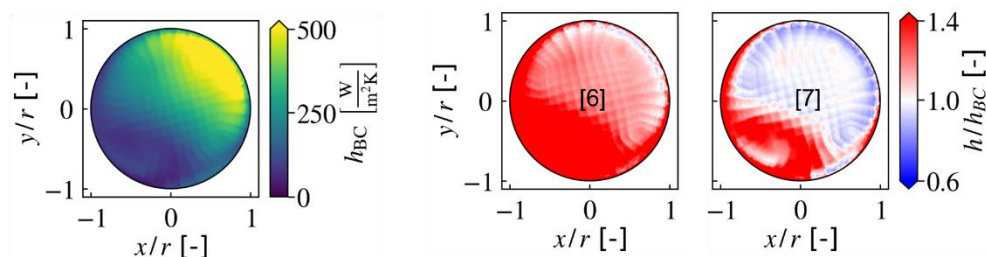


Abb. 12: Links: Wärmeübergangskoeffizienten-Randbedingung. Rechts: Verhältnis des neu berechneten zu dem vorgegebenen Wärmeübergangskoeffizienten mit den zwei Auswertegleichungen

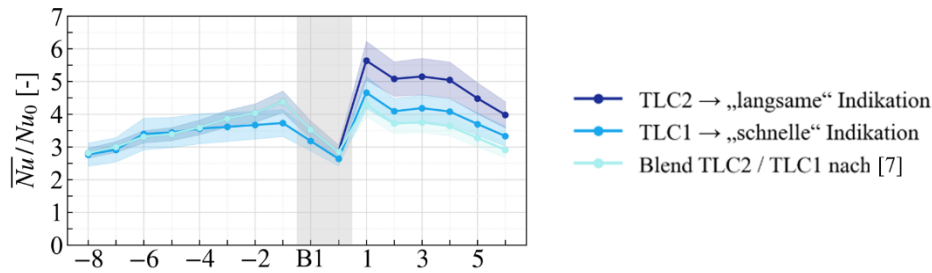


Abb. 13: Vergleich der verschiedenen Auswertemethoden

Eine detaillierte Untersuchung der durch die neuen Turbulatoren beeinflussten Wärmeübergangscharakteristiken sowie ein quantitativer Vergleich zwischen den Basisgeometrien A und B wurden in zwei Veröffentlichungen [20, 21] vorgestellt.

Basisgeometrie-C: Die Variation der Rotationsgeschwindigkeit unter ansonsten gleichbleibenden Betriebsparametern resultiert in der Änderung des lokalen Wärmeübergangskoeffizienten bei generell unveränderter Wärmeübergangsstruktur. Abb. 14 zeigt die Änderung der lokalen (links) und der globalen (rechts) Wärmeübergangskoeffizienten exemplarisch auf der PS für einen Anstellwinkel von $+8^\circ$ und $Re \approx 15000$ bei verschiedenen Rotationszahlen $Ro \approx 0.15 \dots 0.50$. Analog zum 60° bis 65° berippten Basis-A Kühlkanalmodell zeigen die Daten, dass, während die Wärmeübergangskoeffizienten mit steigenden Rotationszahlen im ersten Teilkanal weiter zunehmen, es im zweiten Teilkanal zu einer Reduktion des Wärmeübergangs kommt. Eine alternative Darstellungsform bieten die $\log_2(NNNR)$ -Histogramme auf der rechten Seite. Anhand dieser lässt sich für den ersten Teilkanal eine Ausbreitung der Wärmeübergangsverteilungen in Richtung höherer $\log_2(NNNR)$ erkennen. Im zweiten Teilkanal zeigt sich hingegen die entgegengesetzte Tendenz.

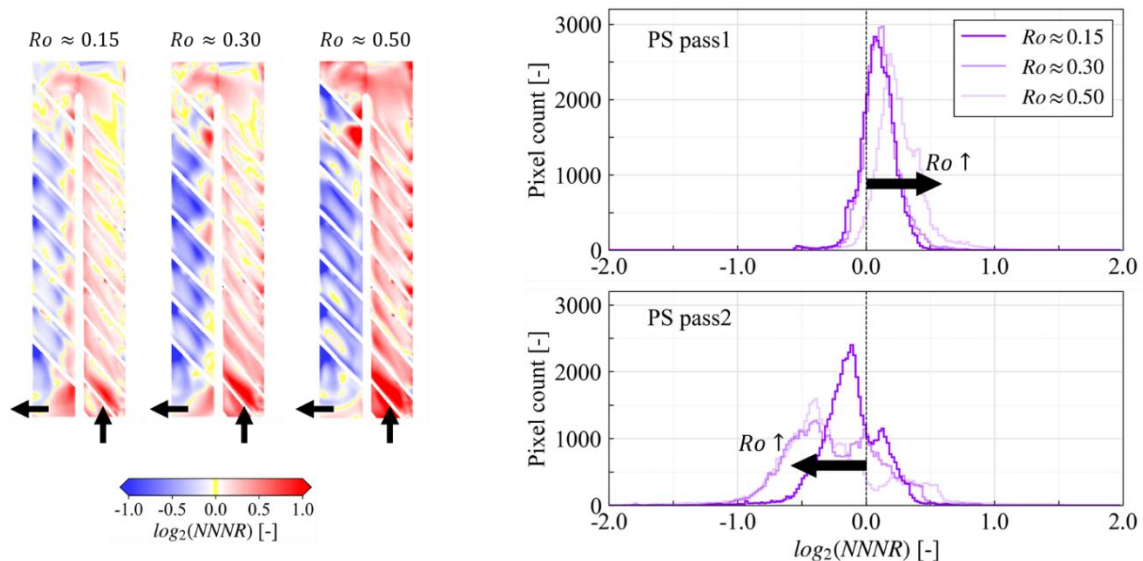


Abb. 14: Rotationsbedingte Variation des Wärmeübergangskoeffizienten bei verschiedenen Rotationszahlen ($Ro \approx 0.15, \dots, 0.50$) auf der Druckseite (PS)

Anwendungsgeometrie-A: Die Anwendungskonfiguration wurde gemäß Tab. 1 bei den gleichen Betriebsparametern (Re , Ro) wie die Basisgeometrien untersucht. In Abb. 15 ist die Wärmeübergangsverteilung eines nicht-rotierenden TLC-Versuchs mit $Re \approx 15000$ lokal und für jedes Segment flächengemittelt dargestellt.

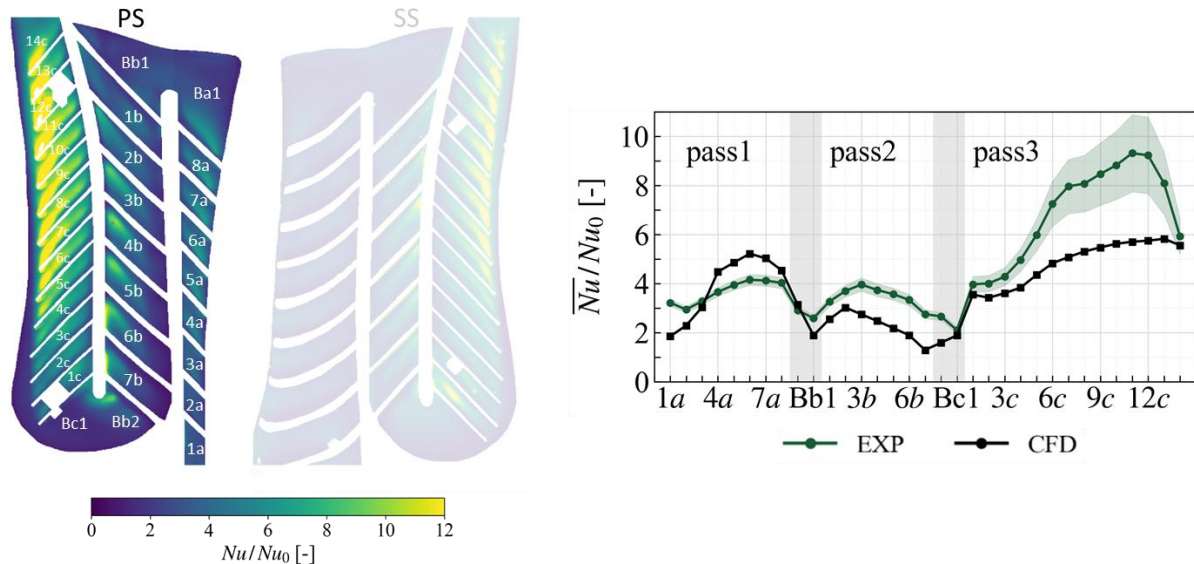


Abb. 15: Lokale (links) und segmentgemittelte Nußeltzahlverteilung (rechts) auf der Druckseite (PS) eines nicht-rotierenden Versuchs

Die Daten der PS deuten auf eine zunehmende Erhöhung des Wärmeübergangs vom Kanaleinlass (1a) in Richtung Umlenkung (Ba1) hin. Im Gegensatz zum Modell Basis-A (siehe Abb. 8) bleibt der Wärmeübergang im zweiten Teilkanal auf einem nahezu gleichbleibenden Niveau wie im ersten Teilkanal. Das manifestiert sich in den segmentgemittelten Daten auf der rechten Seite. Dort sind die experimentellen Daten sowie die numerischen Ergebnisse aus der CFD-Simulation als Vergleich dargestellt. Es ist vor allem ein starker Anstieg der Wärmeübergangskoeffizienten im dritten Teilkanal zu erkennen. In diesem Kontext ist es wichtig zu erwähnen, dass für die Berechnung der dimensionslosen Nußeltzahl der hydraulische Kanaldurchmesser am Einlass als charakteristische Größe gewählt wurde. Festzustellen sind ebenfalls die breiten Fehlerbalken vom Experiment, die auf die hohen Wärmeübergangskoeffizienten und die damit verbundenen höheren Unsicherheiten zurückzuführen sind.

Der Effekt der Rotation auf die Wärmeübergangskoeffizienten ist in Abb. 16 bei $Ro \approx 0.15, \dots, 0.5$ exemplarisch für PS dargestellt. Anhand der lokalen Kontur-Plots auf der linken Seite lässt sich ein deutlicher Anstieg im ersten Teilkanal mit steigenden Ro erkennen, der durch das Diagramm auf der rechten Seite bestätigt werden kann. Die Wärmeübergangskoeffizienten erreichen ein Maximum im Segment 2a und fallen dann in Richtung Umlenkung bis zum Segment 8a progressiv ab. Im zweiten Teilkanal ist zudem eine ausgeprägte lokale Differenzierung zwischen Regionen mit erhöhtem und reduziertem

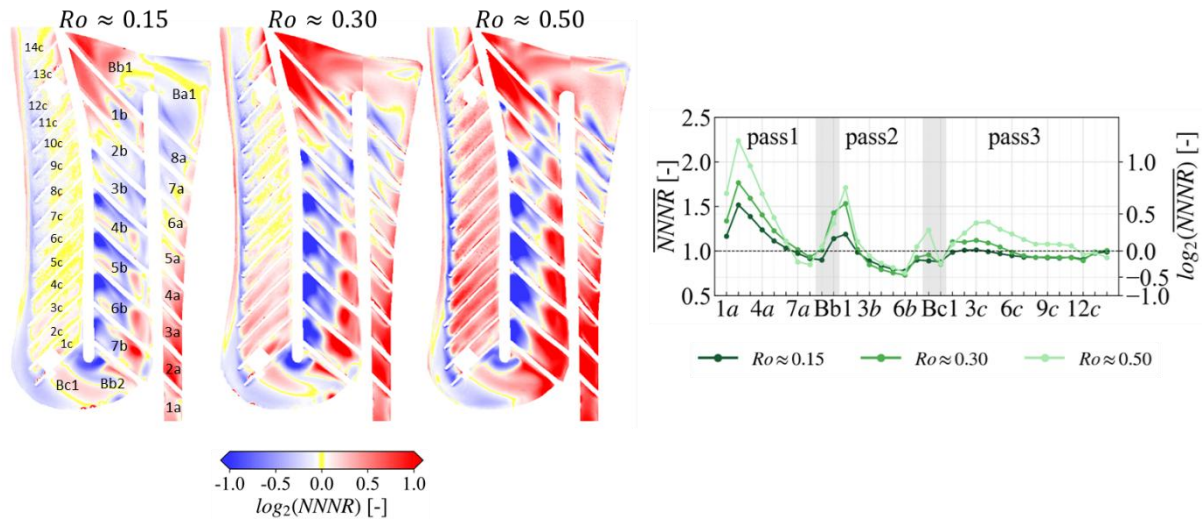


Abb. 16: Rotationsbedingte Variation des Wärmeübergangskoeffizienten bei verschiedenen Rotationszahlen ($Ro \approx 0.15, \dots, 0.50$) auf der Druckseite (PS)

Wärmeübergang erkennbar, die in den gemittelten Nußeltzahlen verborgen bliebe. Im Gegensatz dazu zeigt sich im dritten Teilkanal eine sehr homogene Wärmeübergangsstruktur für alle hier untersuchten Rotationszahlen. Während das Niveau näherungsweise für niedrige Rotationszahlen unverändert bleibt (für $Ro \approx 0.15 \rightarrow \log_2(NNNR) \approx 0$), steigen die Wärmeübergangskoeffizienten mit zunehmenden Ro maßgeblich an.

6 Auswertung beim Industriepartner (MTU)

Basierend auf den segmentgemittelten Nußeltzahlen (z.B. Abb. 10) wurden Wärmeübergangskorrelationen abgeleitet. Diese berücksichtigen die Abhängigkeit von Reynoldszahl (Re), Rotationszahl (Ro), Dichteverhältnis (DR) sowie der relativen Lauflänge (x/D). Neben einem eigenen Regressionsansatz wurden passende Modelle aus der Literatur verwendet. Zur Bestimmung der Korrelationskoeffizienten wurden das erste Segment (Einlaufeffekte) und der Fall $Re = 60.000$ ausgenommen aufgrund der hohen Messunsicherheit in diesem Fall. Dadurch wird der Gültigkeitsbereich der Korrelation eingeschränkt, bei gleichzeitiger Erhöhung ihrer Genauigkeit. Die mittlere Abweichung der Korrelation zu den Messergebnissen lag bei 6,6 % über alle Varianten (Abb. 17).

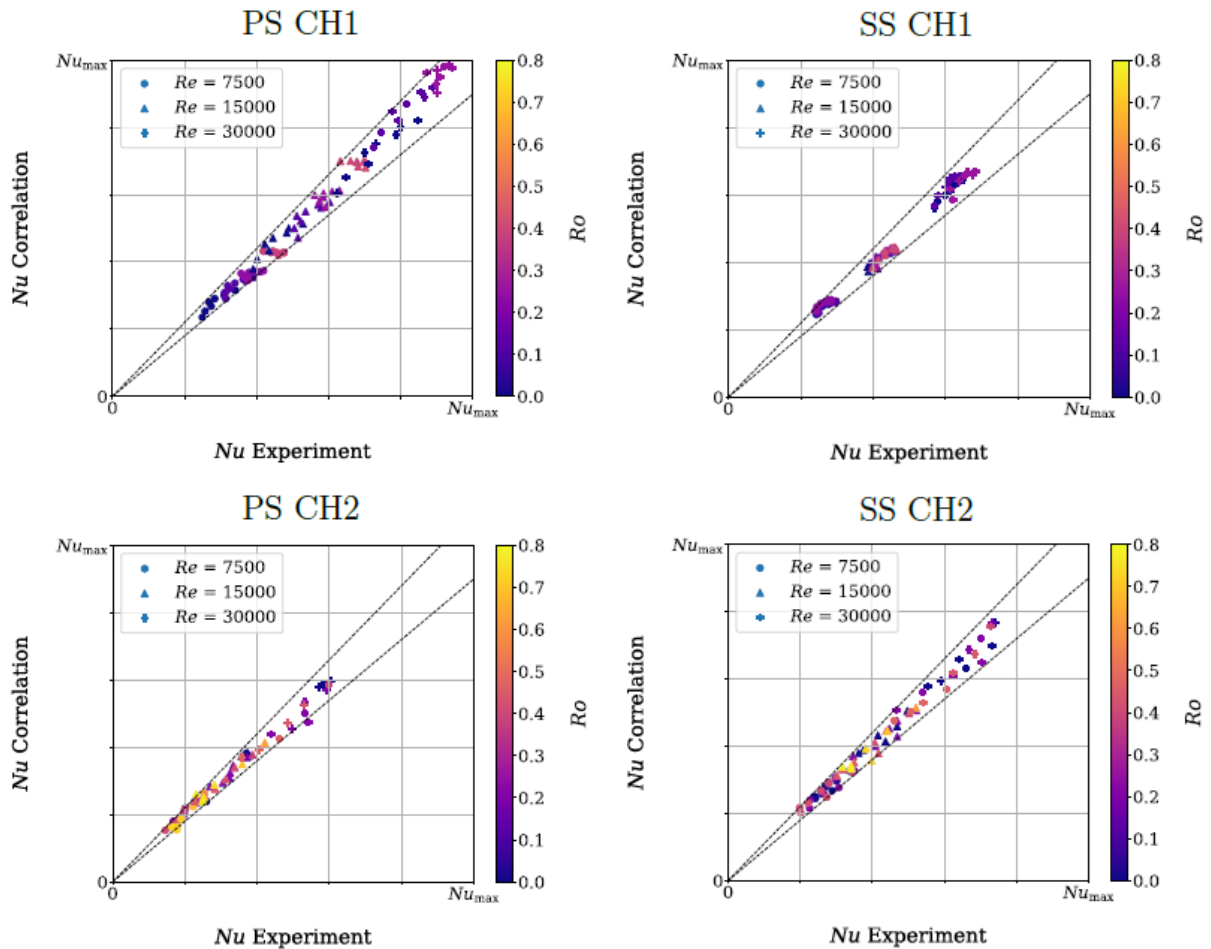
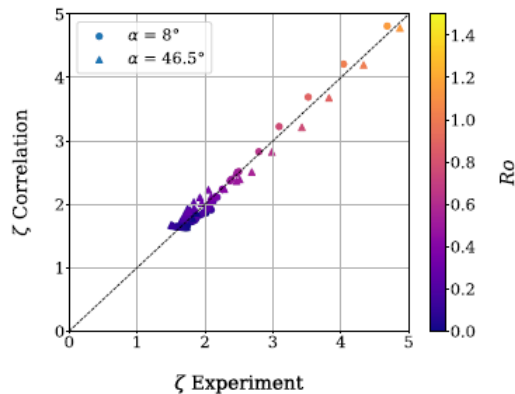
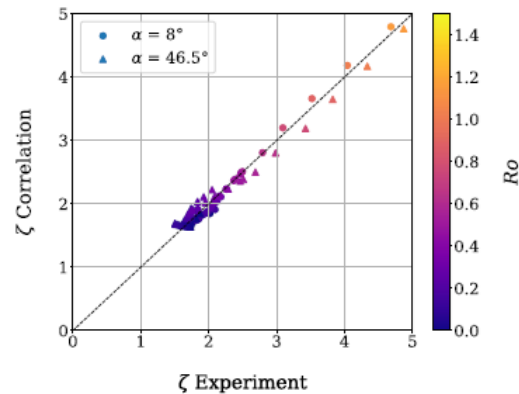


Abb. 17: Vergleich der segmentgemittelten Nußeltzahlen von Experiment und Korrelation BASIS A (Linien markieren Abweichungen von +10% und -10%) für Anstellwinkel $\alpha = 8^\circ$

Zusätzlich wurde eine Druckverlustkorrelation für den gesamten 2-Pass-Kanal erstellt. Zwei Ansätze, ein Exponentialmodell für den dimensionslosen Druckverlustbeiwert ζ sowie ein relatives Modell ζ/ζ_s (Verhältnis von rotierendem zu stationärem Druckverlustbeiwert), zeigten beide eine sehr gute Übereinstimmung mit den Messdaten, mit einer mittleren Abweichung von 5 % (Abb. 18).



Power function approach



Approach with ζ/ζ_s

Abb. 18: Vergleich der Druckverlustbeiwerte des 2Pass Kanals BASIS A von Korrelation und Experiment für unterschiedliche Reynolds-, Rotationszahlen und Anstellwinkel (Ursprungsgerade zeigt exakte Übereinstimmung)

Zur Untersuchung der Auswirkungen spezifischer Geometrieelemente in der Konfiguration BASIS B, einer Vorderkantenrippe im ersten Kanal und Protrusions im zweiten, wurde ein Vergleich mit der Referenzgeometrie BASIS A durchgeführt. Die Segmentierung der Kanäle blieb identisch, wobei bei BASIS B zusätzlich der Vorderkantenbereich optisch erfasst wurde.

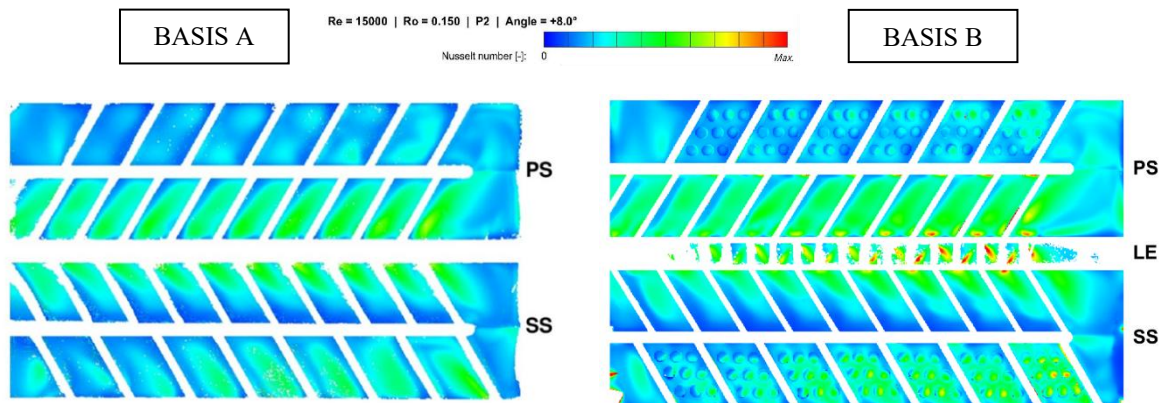


Abb. 19: Gemessene 2D Nußeltzahlverteilung BASIS A (links) und BASIS B Test (rechts)

Der qualitative Vergleich der 2D-Wärmeübergangsverteilungen (Abb. 19) zeigt in beiden Fällen ähnliche Strukturen, geprägt durch Sekundärströmungen und rotatorische Effekte. Im Bereich der Umlenkung ist in BASIS B auf der Druckseite ein leicht erhöhter Wärmeübergang erkennbar. In den segmentgemittelten Daten (Abb. 20) zeigt sich im ersten Kanal eine deutliche Erhöhung des Wärmeübergangs auf der Druckseite, während die Saugseite weitgehend unverändert bleibt. Insgesamt liegen die mittleren Wärmeübergänge in BASIS B, bezogen auf beide Seitenflächen, stets auf dem Niveau oder über den Werten von BASIS A. Die Steigerung ist abhängig von Reynoldszahl, Rotationszahl und Anstellwinkel. Für alle

untersuchten Anstellwinkel ergibt sich eine konsistente Verbesserung auf der Druckseite. Im zweiten Kanal führt der Einsatz von Protrusions zu einer markanten Erhöhung des Wärmeübergangs auf beiden Seitenwänden um 19 % bis 35 %.

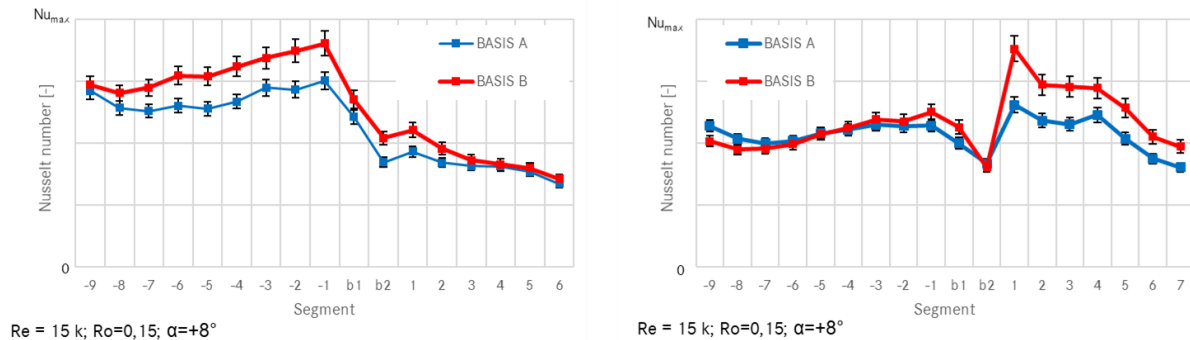


Abb. 20: Segmentgemittelte Nußeltzahlen für BASIS A & B Test;
Druckseite PS (links) und Saugseite SS (rechts)

7 Zusammenfassung

Im Rahmen des hier vorgestellten Vorhabens wurden umfassende Wärmeübergangsmessungen unter maschinenähnlichen Betriebsbedingungen an vier verschiedenen innengekühlten Turbinenlaufschaufeldesigns durchgeführt. Die zweidimensional aufgelösten Verteilungen des Wärmeübergangs bieten detaillierte Einblicke in deren Kühlungseigenschaften, die mit klassischen experimentellen Methoden nicht erreichbar wären. In dieser Hinsicht erweist sich die transiente Flüssigkristallmesstechnik als besonders vorteilhaft und ermöglicht die Untersuchung geometrisch komplexer Kühlkanäle. Um die durch die Schaufelrotation bedingten Veränderungen im Wärmeübergang experimentell zu untersuchen, wurde der rotierende Versuchstand des ITLR genutzt. Der Rotationseinfluss erwies sich als maßgeblicher Faktor, der die lokalen Wärmeübergangseigenschaften in Abhängigkeit von der Kanalseite (PS, SS, LE) sowie den jeweiligen Strömungsbedingungen deutlich modifizieren kann. Die hieraus gewonnenen Daten stellen eine umfangreiche Datenbasis für typische aktuelle Kühlungssysteme bei maschinenrelevanten Betriebsbedingungen bereit, und wurden beim Industriepartner (MTU) zur Erzeugung von Wärmeübergangskorrelationen genutzt. Diese können zur Weiterentwicklung und Optimierung bestehender Kühlkanal designs eingesetzt werden.

8 Danksagung

Wir sind zutiefst dankbar für die unschätzbaren Beiträge von Prof. Dr.-Ing. Jens von Wolfersdorf, der bis kurz vor seinem Tod aktiv an dieser Arbeit beteiligt war. Sein Fachwissen, sein Mentoring und seine Leidenschaft für die Forschung werden uns sehr fehlen. Wir widmen diese Arbeit seinem Andenken. Neben den in diesem Bericht aufgeführten Autoren haben zahlreiche Studierende der Universität Stuttgart zur experimentellen Evaluation und zur numerischen Ausarbeitung beigetragen.

9 Literatur

- [1] Han, J.-C. (2004). Recent studies in Turbine Blade Cooling. *International Journal of Rotating Machinery*, 10(6), 443–457
- [2] Waidmann, C., Poser, R., Nieland, S., & von Wolfersdorf, J. (2016). Design of a Rotating Test Rig for Transient Thermochromic Liquid Crystal Heat Transfer Experiments. 16th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery. Honolulu, United States
- [3] Waidmann, C. (2020). Heat transfer measurements in rotating turbine blade cooling channel configurations using the transient thermochromic liquid crystal technique. PhD dissertation. Institute of Aerospace Thermodynamics, University of Stuttgart
- [4] Waidmann, C., Poser, R., Göhring, M., & von Wolfersdorf, J. (2018). First operation of a rotating test rig for transient thermochromic liquid crystal heat transfer experiments. XXIV Biennial Symposium on Measuring Techniques in Turbomachinery. Prague, Czech Republic. MTT2418A11
- [5] Poser, R. (2010). Transient heat transfer experiments in complex geometries using liquid crystal thermography. PhD dissertation. Institute of Aerospace Thermodynamics, University of Stuttgart
- [6] Carslaw, H. S., & Jaeger, J. C. (1959). *Conduction of heat in solids*. 2nd edition. Oxford University Press. pp. 30-32
- [7] Buttsworth, D.R., & Jones, T. V. (1997). Radial heat conduction effects in transient heat transfer experiments. *The Aeronautical Journal of the Royal Aeronautical Society*, vol. 101, pp. 209-212
- [8] Williams, W. C. (2011). If the Dittus and Boelter equation is really the McAdams equation, then should not the McAdams equation really be the Koo equation? *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54 (7), pp. 1682–1683
- [9] Poser, R., von Wolfersdorf, J., & Lutum, E. (2007). Advanced evaluation of transient heat transfer experiments using thermochromic liquid crystals. *Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, vol. 221, pp. 793-801
- [10] ANSYS CFX: Solver modeling guide (2021). Release 2021 R2. ANSYS Inc.
- [11] Göhring, M., Krille, T., Feile, J., & v. Wolfersdorf, J. (2016). Heat Transfer Predictions in Smooth and Ribbed Two-Pass Cooling Channels under Stationary and Rotating Conditions. 16th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery. Honolulu, United States
- [12] White, F. M., & Majdalani, J. (2021). *Viscous fluid flow*. In: vol. 4. McGraw-Hill New York
- [13] Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. (2017). *Principles of heat and mass transfer*. In 8th global edition. Wiley New York
- [14] ANSYS ICEM CFD: User's manual (2021). Release 2021 R2. ANSYS Inc.
- [15] Roache, P. J. (1994). Perspective: A Method for Uniform Reporting of Grid Refinement Studies. *Journal of Fluids Engineering*, 116 (3), pp. 405–413
- [16] Celik, I., Ghia, U., Roache, P., Freitas, C., Coloman, H., & Raad, P. (2008). Procedure for Estimation and Reporting of Uncertainty Due to Discretization in CFD Applications. *Journal of Fluids Engineering*, 130(7)

- [17] Waidmann, C., Poser, R., G. de Arcos, D., Göhring, M., von Wolfersdorf, J., Semmler, K., & Jäppelt, B. (2022). Experimental Investigation of Local Heat Transfer in a Rotating Two-Pass Cooling Channel Using the Transient Thermochromic Liquid Crystal (TLC) Technique. Proceedings of the ASME Turbo Expo 2022. Rotterdam, Netherlands. V06BT15A009. <https://doi.org/10.1115/GT2022-81291>
- [18] G. de Arcos, D., Waidmann, C., Poser, R., von Wolfersdorf, J., & Jäppelt, B. (2022). Comparison of Experimental and Numerical Local Rotational Heat Transfer Effects in a Two-Pass Cooling Channel Configuration. Proceedings of the ASME Turbo Expo 2022. Rotterdam, Netherlands. V06BT15A008. ASME. <https://doi.org/10.1115/GT2022-79846>
- [19] G. de Arcos, D., Neumann, L., Poser, R., & Waidmann, C. (2025). Towards an improved measurement accuracy in transient TLC experiments with curved turbulators. [Poster presentation]. DEHEMA/VDI Jahrestreffen Wärme- und Stoffübertragung 2025, Stuttgart, Germany
- [20] G. de Arcos, D., Waidmann, C., Poser, R., von Wolfersdorf, J., & Jäppelt, B. (2024). Effect of Protrusions and Leading Edge Ribs on the Local Heat Transfer Characteristics in a Two-Pass Cooling Channel under Rotation. Proceedings of Global Power and Propulsion Society. Chania, Greece. GPPS-TC-2024-0045. <http://doi.org/10.33737/gpps24-tc-045>
- [21] G. de Arcos, D., Waidmann, C., Poser, R., von Wolfersdorf, & J., & Göhring, M. (2024). Rotationally Induced Local Heat Transfer Features in a Two-Pass Cooling Channel: Experimental–Numerical Investigation. International Journal of Turbomachinery, Propulsion and Power, 9(4), 34. <https://doi.org/10.3390/ijtp9040034>

Kühlung

Verbundprojekt „TurboGrün - Turbomaschinen für Energiespeicher und grüne Brennstoffe“

Teilverbundprojekt Kühlung

Vorhabengruppe „Fortschrittliche Methoden im Heißgaspfad“

"Vom Anriss zum Ersatzteil: Ein probabilistischer Ansatz zur Integration der Komponentenlebensdauer in Serviceprozesse"

Vorhaben-Nr.: 3.5

verfasst von

Dr. Philipp Engels
Dr. Lucas Mäde
Dr. Peter Dumstorff
Siemens Energy AG

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das dem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wird von Siemens Energy und mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWE) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages unter dem Förderkennzeichen 03EE5068D gefördert.

Abstract

In this project, a simulation-based decision framework has been developed that consistently integrates complex component reliability models and makes use of ideas of Asset Performance Management (APM) systems. The goal was to enhance both the assessment of real customer assets and the planning of spare parts and service concepts for Siemens Energy as an OEM. The framework combines operational data, probabilistic reliability models, and economic parameters within a coherent decision-making process, enabling more accurate estimations of downtime, spare-part demand, and storage requirements.

The technical focus has been on forecasting the parts consumption of serialized large components with long lead times and high inventory costs. To achieve this, the project has delivered three key building blocks: improved risk models for sparse and censored fleet data, a model for deriving local physical state variables from operational parameters, and a tool for simulation-based spare-parts demand forecasting. The resulting framework establishes a foundation for more efficient spare-parts planning and thus a better utilization of available resources.

Kurzfassung

Im Rahmen dieses Teilprojekts wurde ein simulationsbasiertes Entscheidungsframework entwickelt, das komplexe Komponentenmodelle konsistent und in Anlehnungen an moderne Asset-Performance-Management-(APM)-Systeme integriert. Ziel war es, für Siemens Energy als OEM sowohl die Bewertung realer Kundenassets als auch die Planung von Ersatzteilen und Servicekonzepten zu verbessern. Das Framework führt Betriebsdaten, probabilistische Zuverlässigkeitsmodelle und wirtschaftliche Parameter in einem durchgängigen Entscheidungsprozess zusammen und ermöglicht damit eine präzisere Einschätzung von Stillstandszeiten, Teilebedarfe oder Lagerkapazitäten. Dabei lag der inhaltliche Fokus auf der Vorhersage des Teileverbrauchs serialisierter Großkomponenten mit langen Lieferzeiten und hohen Lagerkosten. Das Projekt hat hierfür drei zentrale Bausteine erarbeitet: verbesserte Risikomodelle für spärliche und zensierte Flottendaten, ein Modell zur Ableitung lokaler Zustandsgrößen aus Betriebsparametern sowie ein Werkzeug zur simulationsgestützten Teilebedarfsprognose. Das entstandene Framework legt den Grundstein für eine effizientere Ersatzteilplanung und somit eine bessere Ausnutzung der eingesetzten Ressourcen.

1 Einleitung

Motivation und Projektziel

Moderne Asset Performance Management (APM) Ansätze gewinnen an Bedeutung, da sie eine kontinuierliche, daten- und zustandsbasierte Bewertung von Anlagen über deren Lebenszyklus ermöglichen. Für Siemens Energy als OEM sind sie sowohl für die Optimierung der Kundenanlagen als auch für die Weiterentwicklung eigener Service- und Produktstrategien zentral. APM-Systeme integrieren Betriebsdaten, probabilistische Zuverlässigkeitsmodelle sowie wirtschaftliche und logistische Kenngrößen, um Wartungs- und Ersatzteilentscheidungen risikobasiert und dynamisch zu unterstützen. Klassische Reliability Centered Maintenance (RCM) Methoden erfassen hingegen die zunehmende Komplexität moderner physikalischer Modelle und Unsicherheiten nur eingeschränkt.

Bei hochbelasteten Kraftwerkskomponenten, deren Zuverlässigkeit stark von Betriebsprofilen und numerischen Modellen abhängt, stoßen statische RCM-Logiken an Grenzen. APM-Systeme verknüpfen hier modellbasierte Zustandsgrößen, Flottenstatistiken und Kostenbewertung in einem integrierten Prozess. Für Siemens Energy ist die simulationsgestützte Analyse besonders wertvoll, da sie eine präzisere Bewertung realer Lasten, eine kontinuierliche Validierung der Engineering-Modelle und die Ableitung optimierter Service- und Ersatzteilstrategien ermöglicht.

Proprietäre Simulationsframeworks bieten zwar detaillierte Teilanalysen, sind jedoch oft nicht auf unternehmensspezifische Daten- und Serviceanforderungen abgestimmt und daher selten vollständig in APM-Prozesse eingebunden. Hinzu kommt, dass Komponentenmodelle häufig isoliert entwickelt werden und organisatorische Trennungen zwischen Engineering, Modellierung und Service die Integration erschweren. Eine zentrale Herausforderung ist daher die konsistente Einbindung probabilistischer Zuverlässigkeitsmodelle in simulationsgestützte Entscheidungs- und Planungsprozesse, die sowohl technische als auch geschäftsrelevante Anforderungen eines OEM berücksichtigen.

Das Ziel des Projekts ist die Entwicklung eines simulationsbasierten Entscheidungsframeworks, das komplexe Komponentenmodelle abbildet und gleichzeitig skalierbar in ein APM-System integriert werden kann. Im Fokus steht die präzise Prognose des Teileverbrauchs serialisierter Großkomponenten mit langen Lieferzeiten und hohen Lagerkosten – ein Thema von erheblicher technischer und wirtschaftlicher Relevanz für die Serviceorganisation eines OEM. Das Framework ermöglicht die quantitative Bewertung alternativer Handlungsoptionen hinsichtlich Verfügbarkeit, Risiko und Kosten und unterstützt damit sowohl Betreiber bei risikobasierten Wartungsstrategien als auch SE als Hersteller bei der effizienten Planung von Rückstellungen und Ersatzteilen sowie der nachhaltigen Steigerung der Anlagenperformance.

Stand der Technik

Probabilistischer Lebensdauermodelle im Rahmen der Gasturbinenentwicklung haben im Bereich der Bewertung inhärenter Schmiedefehler in Rotorradscheiben den höchsten Entwicklungsgrad erreicht und kommen bei der Siemens Energy (SEAG) seit Jahren zum Einsatz [1]. Entwicklungen hierzu wurden auch in früheren AG Turbo Projekten gefördert. In diesen Modellen werden Materialstreuungen, Fertigungsabweichungen, Qualitätssicherungsprozesse und Betriebsbedingungen in einem komplexen Modell numerisch zu einer Versagenswahrscheinlichkeit des Rotors berechnet, was erforderlich ist, um die geforderten Betriebssicherheiten nachweisen zu können, was mit einer rein deterministischen Betrachtung in manchen Fällen nicht mehr möglich ist. Daneben ist die probabilistische Berechnung der Anrisswahrscheinlichkeit zu nennen [2], aus der sich eine akkumulierte Lebensdauer unter Berücksichtigung der Risswachstumsphase und des Bruchs berechnen lässt [3]. Diese Methode spielt insbesondere dann eine Rolle, wenn aufgrund hoher zyklischer Spannungs- oder Dehnungsamplituden eine hohe Anrisswahrscheinlichkeit vorliegt, und die erforderliche Lebensdauer über den Rissfortschritt nachgewiesen werden muss. Auch diese Methode kann probabilistisch aufgestellt werden und trägt somit den komplexen, mikromechanischen Prozessen Rechnung, die einer hohen Streuung unterliegen. Das Wissen um die Wahrscheinlichkeit der Rissinitiierung ohne Vorschädigung ist auch für Turbinenbeschaufelung, Gehäuseteile oder Radscheibenklauen von Bedeutung. Die Methodik erlaubt die Berechnung dieser komplexen Geometrien durch eine dreidimensionale Integration über Bauteiloberflächen. Natürlich gibt es neben derart komplexen, nichtlinearen Modellen häufig auch heuristische Modelle, die sich weder rein aus einem physikalischen Modell noch aus quantitativer Flottenstatistik herleiten. Diese Modelle können etwa in Form von Expertenschätzungen [4] entstanden sein und sind in vielen Fällen erfolgreich.

In der praktischen Anwendung haben diese Modelle aber gemein, dass ihre Ergebnisse vornehmlich als Risikobewertung bei festgelegten Serviceintervallen dienen, um somit Rückstellungen für den Schadensfall zu bilden. In zwei früheren Doktorarbeiten von Gröger [5] und Konnov [6] wurden bei der SEAG jedoch bereits erste Ansätze entwickelt, um auch die Servicekonzepte im Sinne der Ausfallwahrscheinlichkeiten zu optimieren. Die Umsetzung derer ist aber kompliziert, da das etablierte Servicekonzept im Zusammenspiel mit den anderen Kraftwerkskomponenten oder Kundenanforderungen nur geringe Variabilität erlaubt, die sich auch mit Hilfe von RCM-Systemen nicht auflösen lässt.

Arbeitspakete

Im Vorfeld dieser Arbeit wurden drei zentrale Arbeitspakete identifiziert, die den Projekterfolg definieren und zusammen das Projektziel erreichbar machen:

1. Entwicklung einer verbesserten Methodik zur Berechnung von Ausfallrisiken beim Vorliegen von (wenigen) bzw. zensierten Flottendaten und unter der Annahme mehrerer unabhängiger Treiber (Zyklen, Temperatur, Betriebsstunden, ...).
2. Ein Modell zur Überführung von beobachtbaren Betriebsparameter einer Turbine in unbeobachtbare lokale Zustandsgrößen wie Temperatur oder Spannung.

3. Die Erstellung eines Werkzeugs zur Berechnung erwarteter Teilebedarfe als Folge einzelner Ereignisse und Entscheidungen. Im Ergebnis soll eine Software-Lösung implementiert werden, die Schnittstellen sowohl für die Einzelrisiken als auch die Betriebsdaten bereitstellt und diese intern verarbeitet. Risiken, die bisher nicht quantitativ erfasst wurden, sollen für den Demonstrator mit den in (2) entwickelten Methoden gezielt ergänzt werden.

2 Probabilistische Zuverlässigkeitsmodellierung mittels Bayes'scher Modellierung

2.1 Schritte zur Modellaufstellung

Eine wiederkehrende Aufgabe im Gasturbinen-Servicegeschäft ist das Quantifizieren der Ausfallwahrscheinlichkeit von Bauteilen oder Bauteilgruppen. Dabei müssen sowohl Erkenntnisse der Versagensursachenanalyse, welches durch Domain-Experten qualitativ formuliert wird, als auch quantitative Information (Lebensdauerbefunddaten) kombiniert werden. Qualitative Daten sind z.B. Schadenstreiber (Start-Stopp-Zyklen, Betriebsstunden, besondere Fahrweisen), die Kenntnis über hierarchisches Auftreten oder Interaktion von Schädigungsmechanismen oder die Einordnung des Schädigungsmechanismus in den Lebenszyklus der Komponente (Infant-Mortality oder Wear-out). Letztere führen zur Aufstellung der Modellhypothese und Randbedingungen für die Modellparameterschätzung. Die Modellhypothese umfasst:

1. **Eine parametrische Wahrscheinlichkeitsverteilung** $F(T) = P(T \leq t)$. $T \in \mathbb{R}^+$ ist der zufällige Zeitpunkt des betrachteten Ereignisses (Schädigung oder Versagen). Die Hazardraten der Verteilung sollten dem angenommenen Schädigungsmechanismus entsprechen sollen (z. B. Weibull bei monotoner Hazardrate).
2. **Eine Altersmetrik**, die bei univariaten Schadenstreibern diesem entspricht, bei multivariaten Treibern (z. B. Starts + Betriebsstunden, temperaturabhängige Alterung) eine Kombination derer ist. Wichtungs- & Kopplungsparameter sind ggf. zu schätzen.
3. **Ein Skalierungsmodell** für die Wahrscheinlichkeitsverteilung. Im einfachsten Fall ein einzelner, direkt zu schätzender Parameter. Zur Abbildung von Design- oder Populationseffekten werden kontinuierlichen oder kategorialen Kovariablen kombiniert (Alternative zur Alterungsmetrik). Wichtungs- & Kopplungsparameter sind ggf. zu schätzen. Rein auf Befunddaten basierende Skalierungsmodellansätze sollten maximal gemischt linearen Charakter haben. Diese sind auch in der medizinischen Statistik üblich [7].
4. **Ein Dispersionsmodell** für die Wahrscheinlichkeitsverteilung. Im einfachsten Fall ein einzelner, direkt zu schätzender Parameter. Wenn die Dispersion der Ereigniszeiten über die Bauteillebensdauer veränderlich ist (z.B. Streuung der Risslänge über Risswachstumszyklenzahl), muss ein entsprechendes Modell angewendet werden, dessen Parameter ggf. zu schätzen sind.

Wenn die Modellhypothese formuliert ist, können verschiedene Verfahren zur Parameterschätzung herangezogen werden. Das im Projekt untersuchte Verfahren der Bayesian Posterior Estimation durch Markov-Chain Monte-Carlo Sampling ist Likelihood-basiert [7]. Die Likelihood $\mathcal{L}(\boldsymbol{\vartheta}, \{t_i\}) = P(\{t_i\}|\boldsymbol{\vartheta})$ ist die Wahrscheinlichkeit eine Menge von stochastisch unabhängigen (Schadens-) Ereignissen $\{t_i\}$ zu beobachten, wenn der sie produzierende stochastische Prozess durch das angenommene, mit $\boldsymbol{\vartheta}$ parametrisierte Modell beschrieben wird. Die Zensierung der Beobachtungsdatenpunkte ist maßgeblich für deren Informationsgehalt und damit auch deren Likelihoodbeiträge.

Versagensereignisse, die sich im Betrieb einer Maschine selbst bemerkbar machen (z.B. durch Maschinenstopp) sind unzensiert, d.h. der Zeitpunkt ihres Auftretens, sowie die Lebensdauer des betroffenen Bauteils, ist exakt bekannt. Schadensereignisse, die sich im Betrieb einer Maschine nicht selbst bemerkbar machen, sondern erst bei einer Inspektion zutage treten sind zensiert. Dabei werden drei Arten der Zensierung unterschieden:

- Links-zensiert: Eine Schädigung trat in der Vergangenheit (links auf dem Zeitstrahl) zwischen Bauteillebensdauer 0 und dem ersten Inspektionszeitpunkt auf.
- Intervall-zensiert: Eine Schädigung trat in dem Betriebsintervall zwischen einer vorherigen, befundfreien Inspektion und dem jetzigen Inspektionszeitpunkt auf.
- Rechts-zensiert: Eine Schädigung ist bis jetzt noch nicht aufgetreten, und wird erst in der Zukunft (rechts auf dem Zeitstrahl) auftreten.

Noch nicht eingetretene Schadensfälle, also störungsfrei im Betrieb befindliche Bauteile sollten immer als rechtszensierte Datenpunkte zu tatsächlichen Versagensdaten hinzugezogen werden, da dies ebenfalls für die Schätzung relevante Informationen enthält.

2.2 Schätzung von Parameter-Posteriorverteilungen mit Markov-Chain Monte Carlo Sampling

In der Regel liegen für ein gewisses Bauteildesign nur wenige Versagensdaten vor. Das bedeutet, dass das erzielte Schätzergebnis auf wenig Informationen basiert und somit eine geringe Konfidenz hat. Punktschätzer, wie der Maximum-Likelihood Estimator täuschen jedoch hohe Genauigkeit vor, weil sie aus einer möglicherweise stark streuenden Verteilung von möglichen Schätzergebnissen einen Punkt (eine mögliche Modellparametrierung $\hat{\boldsymbol{\vartheta}}$) darstellen. Bereichsschätzer dagegen bieten die Möglichkeit die Streu- und Symmetriecharakteristik der Wahrscheinlichkeitsverteilung möglicher Modelle in der schlussendlich angezielten Versagenswahrscheinlichkeitsvorhersage zu berücksichtigen. Die Methode der Bayesian Posterior Estimation schätzt die multivariate Posterior-Verteilung der Modellparameter. Grundlage ist der Satz von Bayes

$$P(\boldsymbol{\vartheta}|\{t_i\}) = \frac{P(\{t_i\}|\boldsymbol{\vartheta}) \cdot P(\boldsymbol{\vartheta})}{P(\{t_i\})}$$

Die Parameter-Priorverteilung ist ein Daten-unabhängiger Ansatz für die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Modellparameter. Diese kann durch Expertenwissen erzeugt worden sein oder auf Schätzergebnissen für vergleichbare Phänomene an ähnlichen Bauteilen beruhen. Die zu schätzende die Parameter-Posteriorverteilung dagegen ist die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Modellparameter unter Berücksichtigung des Priors und der beobachteten Daten.

Für einen zwei-parametrischen Weibullmodellansatz mit univariatem Skalenparameter erhält man MCMC-Samples aus der Posteriorverteilung, die als zweidimensionaler Scatterplot darstellbar sind (Abbildung 1). An diesem Beispielfall, der auf wenigen (<10) intervallzensierten Befunddaten und sonst rechts-zensierten Datenpunkten basiert, hat sich gezeigt, dass die Konvergenz der Markovketten erheblich verbessert wird, wenn der Skalenparameter der Verteilungen reparametrisiert wird, $F_T(t) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{t}{10\tilde{\eta}}\right)^\beta\right)$ sodass die Verteilung von $\tilde{\eta} = \log_{10} \eta$ geschätzt wird.

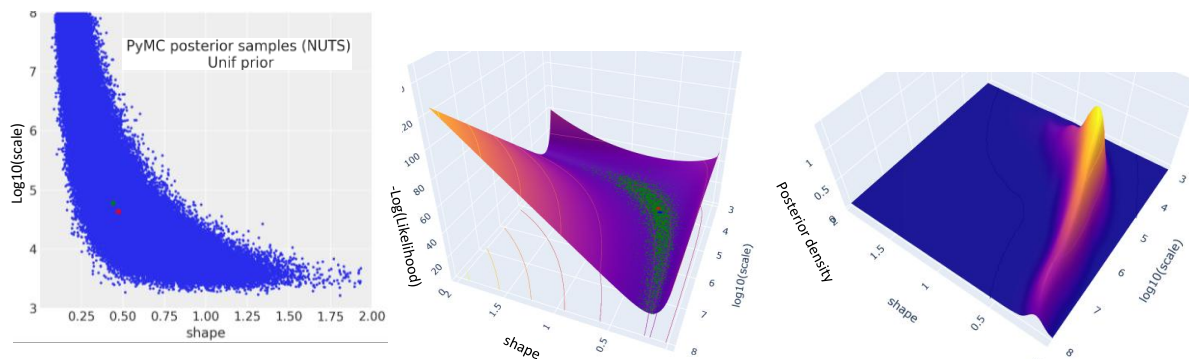


Abbildung 1: Links, MCMC Sample Scatterplot für Weibull Shape β und Logarithmus des Scale Parameters $\tilde{\eta} = \log_{10} \eta$. Mitte, Lage der MCMC-Samples in der negativen Log-Likelihood Fläche. Rechts, durch Kernel-Density Estimation ermittelte Parameter-Posterior-Dichtefunktion.

Der Grund dafür konnte nicht vollständig erklärt werden. Ein Anhaltspunkt ist jedoch, dass die Form der negativen Log-Likelihood Fläche bei Parametrierung mit η einem Boomerang ähnelt, dessen Hälften sich in Richtung der β -Achse einerseits und der η -Achse andererseits orientieren (Abbildung 2). Der negative Log-Likelihood-Bereich um den *Maximum A-Posterior* (MAP) Punkt hat im Vergleich zur anderen Hälfte des Boomerang-Troges die Charakteristik eines sehr schmalen Tals mit engem Eingang. Daher haben auch die Hamiltonian-basierten Sampler *No-U-Turn-Sampler* (NUTS) oder *Hamiltonian Monte-Carlo* (HMC), die sonst auch weit auseinanderliegende Samples vorschlagen [8], Schwierigkeiten, wieder in diesen Likelihood-Bereich zurückzukommen, wenn er einmal verlassen ist, sodass der Sample-Raum nicht adäquat abgedeckt wird. Die logarithmische Transformation verändert die Charakteristik der negativen Log-Likelihood-Fläche hin gleichmäßig breiteren Tälern, in denen Samples gleichmäßiger verteilt generiert werden (Abbildung 1 Mitte).

Es ist zulässig die Likelihood Fläche zur Untersuchung des Phänomens heranzuziehen, weil für diese Auswertung die informativen Prior-Verteilungen $\tilde{\eta} \sim \mathcal{U}(2,9)$ und $\beta \sim \mathcal{U}(10^{-4},5)$ gewählt worden sind, welche die Likelihoodfläche nicht deformieren.

Die Parameter-Posterior-Verteilung stellt die epistemische (Modell-) Unsicherheit der Ereigniswahrscheinlichkeitsvorhersage quantitativ dar. In der praktischen Anwendung hat es sich als praktikabel herausgestellt, die diskreten MCMC-Samples für Parameterpaare direkt zu verwenden und nicht daraus eine kontinuierliche Posterior-Verteilung (über Kernel-Density Estimation) zu schätzen. Die sogenannten Posterior Predictive Samples, Ereigniszeitwahrscheinlichkeitsfunktionen für alle Samples ausgewertet, sind in Abbildung 2 dargestellt. Damit kann die totale Wahrscheinlichkeit für die Zeit bis zum Ereignis (Erwartungswert der Verteilung möglicher Modelle) berechnet werden.

Abbildung 2: Posterior Predictive Samples der Ereigniszeitwahrscheinlichkeitskurven (blau). Die gelbe Kurve ist der Erwartungswert des Ereigniszeitwahrscheinlichkeitsmodells $P_{tot}(T \leq t)$. Gestrichelte Kurven sind die Verbindungen verschiedenen Quantile der Verteilung der Ereigniszeitwahrscheinlichkeiten und jedem Zeitpunkt.

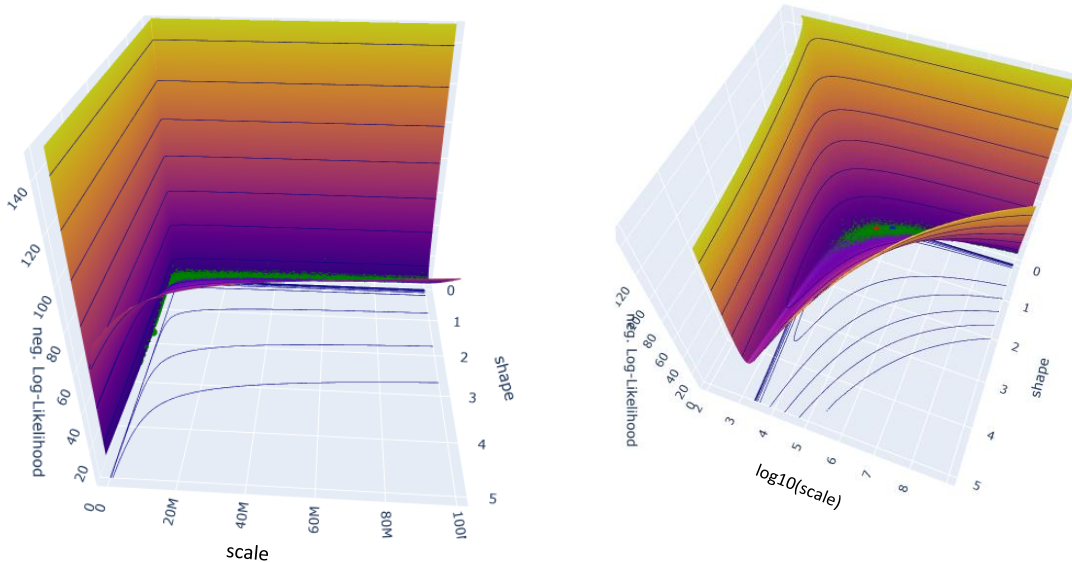
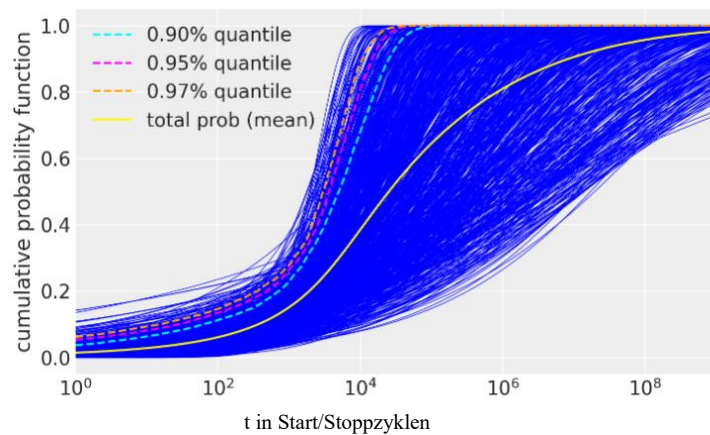


Abbildung 3: Links, negative Log-Likelihood Fläche mit MCMC-Samples bei regulärem Weibull-Ansatz. Die konvergierenden Isolinien zeigen ein sehr schmales Tal in der Fläche. Darin liegt der MAP (grüner Punkt). Rechts, negative Log-Likelihood Fläche mit MCMC-Samples, wenn die Skalenparameterachse logarithmisch aufgetragen ist. Die Verteilung der η -Samples zeigt, dass der Raum möglicher Samples nicht gleichmäßig abgedeckt ist.

$$P_{tot}(T \leq t) = \frac{1}{n_{samples}} \sum_i^{n_{samples}} P(T \leq t | \beta_i, \eta_i)$$

Die verschiedenen Wahrscheinlichkeitsfunktionskurven (Posterior Predictive Samples) kreuzen sich. Daraus muss man ableiten, dass es nicht korrekt ist, ein (niedriges) Perzentil p für den Parameter-Posterior zu definieren, das entsprechende Quantil $q^{(p)} = (\eta^{(p)}, \beta^{(p)})$ zu bestimmen und zu schlussfolgern, dass die daraus resultierende, Weibull-Ereigniszeitwahrscheinlichkeitsfunktion $T \sim \mathcal{W}(\eta^{(p)}, \beta^{(p)})$ mit Konfidenz $1 - p$ konservativ ist.

Wenn aus der Verteilung möglicher Ereigniszeitmodelle ein mit Konfidenz $1 - p$ konservatives Modell gewünscht ist, muss an jedem möglichen Ereigniszeitpunkt die relative Häufigkeit des Auftretens eines Posterior Predictive Samples ausgewertet werden. Das Verbinden der Punkte gleicher Häufigkeit ergäbe ein mit $1 - p$ konservatives Ereigniszeitwahrscheinlichkeitsmodell. Sowohl die Berechnung der totalen Wahrscheinlichkeit als auch die Ermittlung konservativer Modelle resultiert in Wahrscheinlichkeitsfunktionen, die i.A. nicht den Charakter des ursprünglichen Modellansatzes (z.B. Weibull) haben und auch nicht in geschlossener Form, parametrisch darstellbar sind (siehe Abbildung 2). Insbesondere kann auch die Charakteristik der Hazardrate von der Annahme abweichen und damit Phänomene des Schädigungsmechanismus offenlegen, die in den Daten als Information implizit enthalten waren oder durch Prior-Annahmen unbewusst erzwungen werden.

Das Konzept des Bayes'schen Markov-Chain Monte-Carlo Samplings kann auch zur Schätzung der Posterior-Verteilung von Alterungsmetrik- oder Skalen- und Dispersionsparametermodellen genutzt werden.

Zuverlässigkeitsvorhersage für einen Gasturbinenverdichter

Zwar wurde im Teilprojekt 3.5 kein Fall mit Schätzung der Posteriorverteilung von Alterungsmetrikmodellparametern untersucht, aber eine Analyse mit gemischt-linearem Ansatz für den Skalenparameter. In diesem Fall lagen Daten eines mehrstufigen Schädigungs- und Versagensprozesses im Verdichter einer landgestützten Gasturbine zur Stromerzeugung vor, (Nicht-) Befund- (rechts- & intervallzensiert) und (Nicht-)Versagensdaten (rechts- & unzensiert). Befunddaten wurden typischerweise bei regulären Verdichterservicemaßnahmen gesammelt, während Versagensereignisse während des Betriebes unmittelbar selbstankündigend sind. Für beide Ereignisse, Schadensinitiierung und Versagen, wurden jeweils Modelle geschätzt, mit dem Ziel die Wahrscheinlichkeit des Gesamtmechanismus anschließend über einen Faltungsansatz ähnlich zu [3] auszuwerten.

Der Weibull-Ansatz

$$F_{T_i}(t) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{t}{10\tilde{\eta}_i}\right)^\beta\right)$$

wird mit dem gemischt linearen Skalenparametermodell $\tilde{\eta}_i = x_0 \cdot \vartheta_0 + x_1 \cdot \vartheta_1 + x_1 \cdot x_2 \cdot \vartheta_2 + n_{start} \cdot \eta_{start}$ und konstanten Parameter β aufgestellt. Hauptursächliche Alterungsmetrik sind die in jeder Verdichterstufe akkumulierten Betriebsstunden. $\tilde{\eta}_i$ ist der Skalenparameter für ein Verdichterstufe unter Berücksichtigung der weiteren Kovariablen x_1, x_2 und n_{start} .

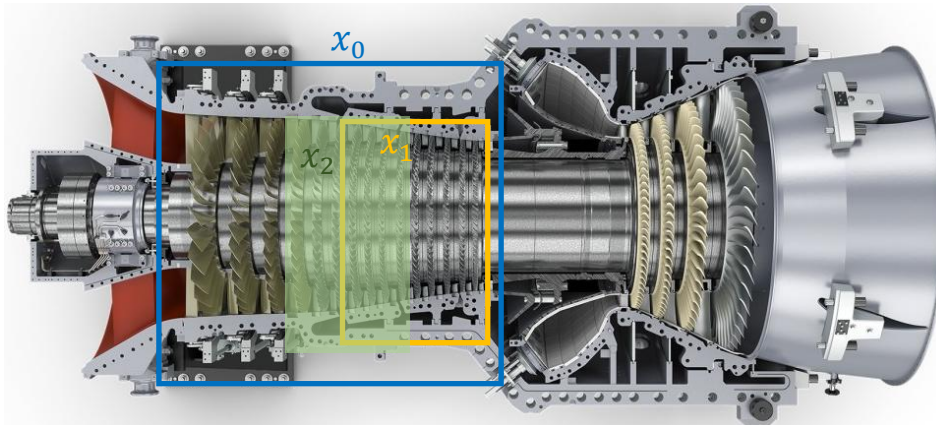


Abbildung 4: Axialschnittbild einer landgestützten Gasturbine mit Hervorhebung der Verdichtersektion und verschiedenen Kategorien.

Abbildung 4 zeigt die Bauteilstufenbereiche, für die Beiträge zu $\tilde{\eta}_i$ mit kategoriellen Variablen anhand der Logik in Tabelle 1 kodiert werden.

Tabelle 1: Exemplarische Bedeutung der Kovariablen im gemischt linearen Modell für die Ereigniszeitwahrscheinlichkeitsverteilungen im Gasturbinenverdichter

x_1	Ist Stufe i in der hochbelasteten hinteren Verdichtersektion?	$x_1 = \begin{cases} 1 & \text{wenn ja} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$
x_2	Liegt Stufe i als bekanntermaßen problematisches Design vor?	$x_2 = \begin{cases} 1 & \text{wenn ja} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$
n_{start}	Anzahl der Start-Stoppzyklen, die Stufe i akkumuliert hat	

Die Kovariable x_0 hat immer den Wert 1, weil der Parameter ϑ_0 dem Basis-Skalenparameter entspricht.

Die Parameter ϑ_1 , ϑ_2 und η_{start} sind grundsätzlich negativ, weil sie zur Pönalisierung des Basis-Skalenparameters dienen. Dieser Aspekt der Modellhypothese muss in die Definition der Priorverteilungen einfließen. Im untersuchten Fall wurden wieder Gleichverteilungen gewählt: $\vartheta_0 \sim \mathcal{U}(0, \vartheta_{0max})$, $\vartheta_1 \sim \mathcal{U}(\vartheta_{1min}, 0)$, $\vartheta_2 \sim \mathcal{U}(\vartheta_{2min}, 0)$ und $\vartheta_{start} \sim \mathcal{U}(\vartheta_{startmin}, 0)$.

Die Schädigungsinitiierungs- und Versagenszeitverteilungen jeder einzelnen Verdichterstufe haben folglich unterschiedliche Skalenparameter, was deren unterschiedlicher Zuverlässigkeit Rechnung trägt.

Tabelle 2: Beispielhafte Auswahl möglicher Konstellationen des Skalenparameters

vordere Verdichterstufe, gutes Design	$\tilde{\eta}_2 = 1 \cdot \vartheta_0 + 0 \cdot \vartheta_1 + 0 \cdot 0 \cdot \vartheta_2 + n_{start} \cdot \eta_{start}$ $\tilde{\eta}_2 = \vartheta_0 + \underbrace{n_{start} \cdot \eta_{start}}_{<0}$
mittlere Verdichterstufe, problematisches Design	$\tilde{\eta}_7 = 1 \cdot \vartheta_0 + 1 \cdot \vartheta_1 + 1 \cdot 1 \cdot \vartheta_2 + n_{start} \cdot \eta_{start}$ $\tilde{\eta}_7 = \vartheta_0 + \underbrace{\vartheta_2}_{<0} + \underbrace{\vartheta_2}_{<0} + \underbrace{n_{start} \cdot \eta_{start}}_{<0}$
hintere Verdichterstufe, gutes Design	$\tilde{\eta}_{13} = 1 \cdot \vartheta_0 + 1 \cdot \vartheta_1 + 1 \cdot 0 \cdot \vartheta_2 + n_{start} \cdot \eta_{start}$ $\tilde{\eta}_{13} = \vartheta_0 + \underbrace{\vartheta_1}_{<0} + \underbrace{n_{start} \cdot \eta_{start}}_{<0}$

Im Übrigen wurde bei dieser Verdichterstufen-auflösenden Weibullmodellhypothese die Annahme getroffen, dass der Shape-Parameter für alle Stufen identisch ist.

Es wurden zwei Modelle geschätzt, eines für die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Betriebszeit bis zur befundbaren Schadensinitiierung und ein weiteres für die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Betriebszeit bis zum Versagen. Für beide Modelle und Datensätze wurden, nach Vergleich von Alternativmodellen mit dem Bayes'schem Informationskriterium, die gleichen Ansatzhypothesen gewählt. Durch die Konstruktion des Skalenparameters mit kategoriellen Kovariable, ist die Likelihood-Fläche nicht stetig differenzierbar. Das verhindert den Einsatz von Gradienten-basierten Samplern, wie HMC und NUTS. Stattdessen wurde der ineffizientere Sampler *Metropolis-Hastings* (MH) angewendet. Ein exemplarischer Scatterplot der multivariaten Posterior-Verteilung ist in Abb. 5 dargestellt.

Um zu einer Risikobewertung für den gesamten Gasturbinenverdichter zu kommen können nun die Versagenszeitwahrscheinlichkeitsverteilungen der einzelnen Stufen berechnet und daraus über den Weakest-Link Ansatz die Versagenszeitwahrscheinlichkeitsverteilung für einen Verdichterschaden vorhergesagt werden. Das ist dadurch motiviert, dass das Versagensereignis in einer einzelnen Stufe gleichbedeutend ist mit dem Lösen von Komponenten, die im Strömungspfad dahinter Sekundärschaden und in der Regel einen Pumpstoß verursachen, welcher den Betrieb der Gasturbine stoppt. Zur Mitigation dieses unerwünschten Ereignisses, wird ab einer gewissen jährlichen Versagenswahrscheinlichkeit eine Videoskopinspektion der ohne Coverlift zugänglichen Verdichterstufen empfohlen.

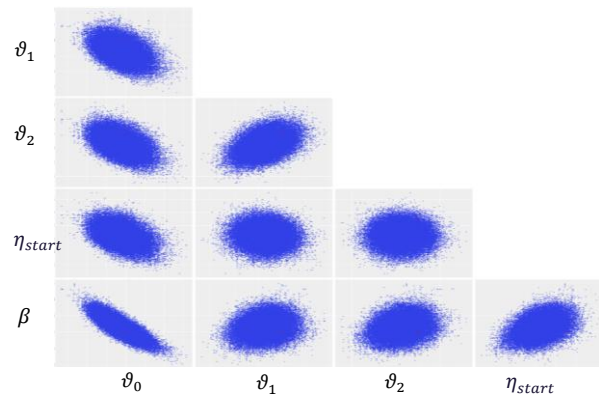


Abbildung 5: Scatterplot der Posterior-Samples. Achsenwerte wurden aus Gründen der Vertraulichkeit entfernt.

$$P_{comp}(T \leq t) = 1 - \prod_i 1 - P(T \leq t | \tilde{\eta}_i(\vartheta_0, x_1, \vartheta_1, x_1, x_2, \vartheta_2, n_{start}, \eta_{start}), \beta)$$

Daraus leitet sich unmittelbar die Frage ab, wie der Verlauf der Verdichterschadenswahrscheinlichkeit aussieht, wenn die Inspektion befundlos war. Wenn Stufen mit a-priori hoher Versagenswahrscheinlichkeit inspiziert worden sind und befundlos waren, reduziert das die Verdichterschadenswahrscheinlichkeit, jedoch nicht auf Null, weil andere Stufen nicht befundet werden konnten und für diese noch die bisher vorhergesagte Schadenswahrscheinlichkeit gilt. Doch die jährliche Wahrscheinlichkeit einen Verdichterschaden zu erleiden, wird im besten Fall unter die zulässige Schranke fallen und im Idealfall, abhängig von konkretem Installationszustand und Betriebsweise, einen Betrieb bis zur nächsten geplanten Verdichterservicemaßnahme ermöglichen. Durch den Weakest-Link Ansatz wird die Kombination verschiedener Wahrscheinlichkeitsbeiträge unkompliziert ermöglicht. Es verbleibt die Bestimmung der Wahrscheinlichkeitsvorhersage für einzelne, befundfrei inspizierte Stufen. Dies kann mit Hilfe eines Faltungsmodells erreicht werden. Wenn

eine Zufallsvariable (T_{fail}) als Summe zweier anderer Zufallsvariablen (T_{init} und T_{damage}) auf dem gleichen Definitionsbereich (t) dargestellt werden kann,

$$T_{init} + T_{damage} = T_{fail}$$

Dann kann die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion dieser Zufallsvariable durch Faltung der Dichtefunktionen der addierten Zufallsvariablen berechnet werden.

$$f_{T_{fail}}(t) = f_{T_{init}}(t) * f_{T_{damage}}(t) = \int_0^{\infty} f_{T_{init}}(t - \tau) \cdot f_{T_{damage}}(\tau) d\tau$$

Auf Basis der zensierten Befunddaten wurde auch ein Modell mit gemischt linearem Skalenparameteransatz aufgestellt und die Parameter-Posteriorverteilungen mittels MCMC geschätzt. Die totale Wahrscheinlichkeit der Posterior-Predictive Samples dieses Modells ist die Wahrscheinlichkeitsverteilung $P(T_{init} \leq t)$ für die Zeit bis zur Schädigungsinitiierung T_{init} . Sie gilt in der Situation, dass jedes betreffende Bauteil in den Betrieb geht und bis zum Zeitpunkt t keine Information über den Bauteilzustand erhalten wird. Man kann hier einen neuen Bayes'schen Kontext eröffnen und $P(T_{init} \leq t)$ als a-priori Wahrscheinlichkeit für Schädigungsinitiierung bezeichnen. Unbeobachtet könnte ein Bauteil auch mit Schädigungsinitiierung betrieben werden, da dies keine selbstankündigende Außenwirkung hat.

Wird jedoch zum Zeitpunkt t_{insp} inspiziert und keine Schädigungsinitiierung festgestellt, wird damit bekannt, dass die Initiierungswahrscheinlichkeit $P(T_{init} \leq t_{insp}) = 0$ war und ist. Die Posteriorwahrscheinlichkeit nach befundfreier Inspektion lautet:

$$P(T_{init} \leq t | t_{insp} \leq T_{init} \cap t_{insp} < t) = 1 - \frac{S_{T_{init}}(t)}{S_{T_{init}}(t_{insp})}$$

wobei $S_{T_{init}}(t)$ die Survivalfunktion $1 - F_{T_{init}}(t)$ ist. Die befundfreie Inspektion einer Verdichterstufe ändert damit die Initiierungswahrscheinlichkeit dieser Stufe, was schlussendlich auch die Versagenswahrscheinlichkeit beeinflusst. Versagen ist bedingt durch die Initiierung und dem Verstreichen der zufälligen Schädigungsfortschrittszeit T_{damage}

$$F_{T_{fail}}(t) = P(T_{init} + T_{damage} \leq t | t_{insp} \leq T_{init} \cap t_{insp} < t)$$

Das Bayes'sche Update der Initiierungswahrscheinlichkeit nach befundloser Inspektion schneidet die Dichtefunktion bei t_{insp} ab, staucht sie und verschiebt den Erwartungswert zu höheren Zeiten. Der halbkomakte Charakter der Initiierungswahrscheinlichkeitsfunktion wird durch die Faltungsoperation auch auf die Versagenswahrscheinlichkeit übertragen. Dies ist trivial, weil kein offensichtliches Versagen vor t_{insp} eingetreten ist.

Die Versagenswahrscheinlichkeitsfunktionen nach Inspektion sind in **Abbildung 6** zu sehen.

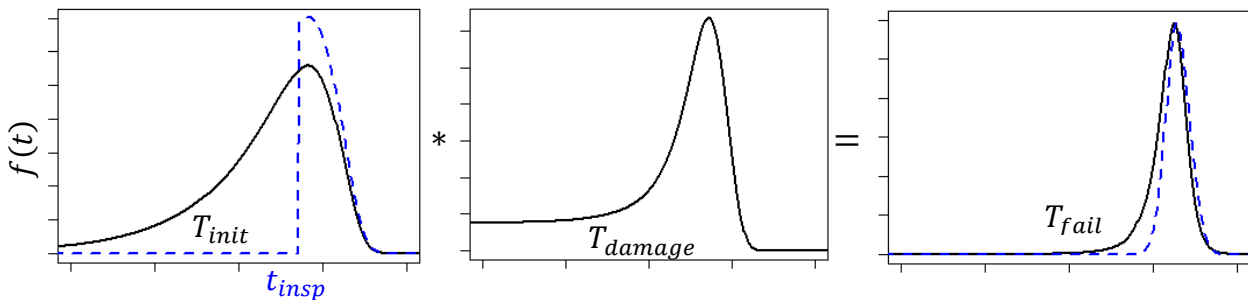


Abbildung 6: Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen der sequenziellen Zufallsprozesse Schädigungsinitiierung (links), Schadensfortschritt (Mitte) und Versagen (rechts). Schwarze Kurve zeigen die a-priori Verteilungen, blau-gestrichelte Kurven die a-posteriori Verteilungen nach befundloser Inspektion, was bedeutet, dass zum Inspektionszeitpunkt die Schädigungsinitiierung noch nicht stattgefunden hat. Dadurch wird die Initiierungsdichtefunktion bis t_{insp} auf 0 gesetzt. Anschließend steigt die Initiierungswahrscheinlichkeit steil an, sodass die Dichtefunktion an t_{insp} unstetig ist. Alle Dichtefunktionen sind halblogarithmisch über der Zeitachse aufgetragen. Achsenwerte wurden aus Gründen der Vertraulichkeit entfernt.

Die so für jede befundfrei inspizierte Stufe ermittelten Posterior-Verteilungen werden über den Weakest-Link Ansatz miteinander und mit den nicht inspizierten, a-priori Verteilungen kombiniert, um die Verdichterschadenswahrscheinlichkeit zu ermitteln, um diese gegen das für dieses Ereignis definierte akzeptierte Limit zu vergleichen.

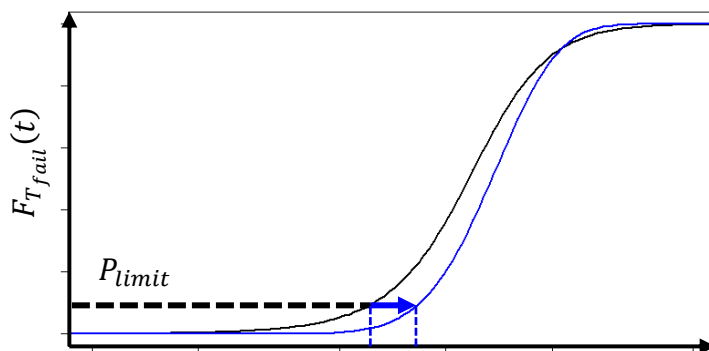


Abbildung 7: Kumulative Wahrscheinlichkeitsfunktion und Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion für Zeit bis zum Versagen. Schwarz sind die a-priori Verteilungsfunktionen dargestellt und blau jene nach befundloser Inspektion. Achsenwerte wurden aus Gründen der Vertraulichkeit entfernt.

Der blaue Pfeil in zeigt den Betriebszeitgewinn bis Erreichen der maximal akzeptierten Wahrscheinlichkeit nach einer befundlosen Inspektion. Durch die halblogarithmische Darstellung über der t -Achse in allen Plots erscheint der Nutzen der Inspektion insignifikant klein. In der realen Anwendung hat sich gezeigt, dass mit dem oben beschriebenen Vorgehen nach befundloser Inspektion oft der Nachweis für einen sicheren Betrieb über weitere Monate bis Jahre erbracht werden.

Es lagen keine Befunddaten vor, die die Schätzung eine Schadensfortschrittszeitverteilung $P(T_{damage} \leq t)$ erlaubt hätten. Stattdessen wird der Ansatz einer schiefen Normalverteilung gewählt und deren Parameter so geschätzt, dass die Faltung mit der a-priori Initiierungswahrscheinlichkeit wieder die a-priori Versagenswahrscheinlichkeit ergibt.

Der Nutzen von Daten-, Physik- und Expertenwissen-gestützten Schätzmethode zur Ermittlung von Schädigungsinitiierungs- und Versagenswahrscheinlichkeiten liegt nicht ausschließlich in der Entscheidungsunterstützung bei RCM-Prozessen, wie der Planung von

Zusatzinspektionen zur Früherkennung eines sich ankündigenden Maschinenschadens. Auch interne Prozesse, wie die Ersatzteilplanung können durch die Kenntnis der Bauteilschädigungs- und Versagenszeitwahrscheinlichkeitsverteilungen unterstützt werden. Insbesondere bei zufällig ausfallenden Komponenten, die in mehreren Designevolutionen zeitlich gestaffelt installiert wurden und Maschinen unterschiedlich betrieben werden steigt die Vorhersagekomplexität erheblich, sodass ein skalierbarer Vorhersageansatz erforderlich ist. Solch ein Ansatz wird im folgenden Abschnitt erörtert.

3 Ein numerisches Framework zur Modellierung des Ersatzteilbedarfs von Turbinenflotten

3.1 Modellbildung

Methodenauswahl

Zunächst wurden die verfügbaren Methoden zur Beschreibung zeitabhängiger Entscheidungsprobleme untersucht, dazu gehören die dynamische Programmierung, Optimalsteuerung, Markov Prozesse (MP) oder die Diskrete Event Simulation (DES). Es zeigte sich, dass Markov-Prozesse ihren Vorteil in der numerischen Genauigkeit und verhältnismäßig geringen Berechnungsaufwände besitzen, sich jedoch bei Berücksichtigung vieler geschäftsrelevanter Details sehr schnell große Zustandsnetzwerke bilden [9]. Sowohl die Formulierung der Übergangswahrscheinlichkeiten als auch die Definition von Belohnungsfunktionen (für das Entscheidungsproblem) erfordert einen geübten Umgang mit der Methode, die aber häufig nicht vorahnden ist. Aus diesem Grund ist die Diskrete Event Simulation (DES), ausgeführt in einem Monte-Carlo Framework, hier bevorzugt worden, da sie eine direktere Implementierung verspricht, auch wenn der Berechnungsaufwand höher ist.

Modelbeschreibung

Das entwickelte Modell auf Basis der DES wird im Folgenden in die Aspekte Wartungskonzept, Komponenten- und Risikomodell und Lager- und Werkstattmodell untergliedert und beschrieben.

Wartungskonzept

Im Rahmen der Modellierung wird der Serviceprozess einer Maschine ε nun als Abfolge von Betriebs- und Wartungszeiträumen aufgefasst. Eine Maschine wechselt vom Zustand Betrieb in den Zustand Wartung ($Z_B \rightarrow Z_W$) entweder durch das Erreichen eines vordefinierten Zeitpunktes, oder durch das Auslösen eines ungeplanten (irregulären) Ereignisses, der im Folgenden mit dem Versagen / Ausfall einer Teilkomponente des Systems gleichgesetzt ist. Die Zeitpunkte der geplanten Maßnahmen $\mathcal{O}_k$ berechnen sich bei einem ungestörten System typischerweise anhand einer auf (equivalenten) Betriebsstunden basierenden Intervallen, z.B. Maßnahme alle 50,000 Stunden. Geplante Maßnahmen unterscheiden sich durch ihren geplanten Umfang und Dauer. Zentral für eine Maßnahme ist der Tausch von Komponenten. Abbildung 8 stellt den möglichen Ablauf einer Historie dar. Zunächst folgen zwei sogenannte „Minor“-

Outages. Statt die geplante „Major“-Outage zu erreichen, fällt die Komponente A#1 aus und muss durch eine Komponente A#2 ersetzt werden.

Komponenten- und Risikomodell

Eine Maschine $\mathcal{E}(\mathcal{K}_1, \mathcal{K}_2, \dots, \mathcal{K}_N)$ (hier: Turbine oder Generator) bestehe aus einer beliebigen Anzahl von Komponenten $N_{\mathcal{K}}$ mit einem Alter a , die ihrerseits aus einer abzählbaren Menge von $N_{\mathcal{K}_S}$ Subkomponenten besteht. Als Beispiele seien ein Satz von Turbinenschaufeln oder Ober- bzw. Unterteil eines Leitschaufelträgers genannt. Jeder Komponente werden N mögliche Risiken zugewiesen, die unabhängig voneinander ausgewertet werden und zwei Typen zugeordnet sind: 1) Das Risiko beschreibt den spontanen Ausfall einer Komponente, eine ungeplante Maßnahme und infolgedessen diese ausgetauscht werden muss, um den weiteren Betrieb zu gewährleisten.

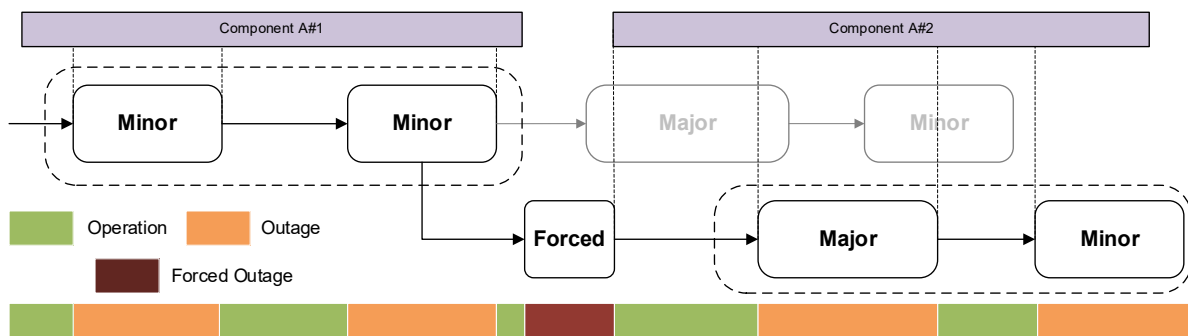


Abbildung 8: Verlaufsplan eines Servicekonzepts einer Turbine bestehende aus einer Abfolge von „Minor“- „Major“- und „Forced“-Outages.

Als Beispiel sei hier der Abriss einer Turbinenschaufel infolge hoher Kriechbeanspruchung genannt, der sich nicht vorher ankündigt und einen sofortigen Maschinenstopp zur Folge hätte. 2) Das Risiko beschreibt den Befund während einer Maßnahme, etwa den erhöhten Beschichtungsverlust an mehreren Turbinenschaufeln eines Satzes, der nicht toleriert werden kann und zum (teilweisen) Austausch führt. Jedes Risiko kann weiterhin Mitigationsmechanismen aufweisen, d.h. die Reparatur oder der geplante Tausch nach dem Erreichen einer gewissen Komponentenlebensdauer. Die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Risikos kann durch eine beliebige, invertierbare, auf $\mathbb{R}^+$ definierte kumulative Verteilungsfunktion (CDF) $F_T(t) = P(T \leq t)$ beschrieben sein.

Für alle $N_{\mathcal{K}_S}$ wird die risiko-spezifische Lebensdauer $\hat{a}_j$ als Realisationen aus der gegebenen Verteilung mittels Inversionsmethode (Inverse Transform Sampling) wie folgt berechnet:

1. Ziehen einer Zufallszahl u aus der Gleichverteilung $u \sim \mathcal{U}(0,1)$.
2. Setze $T_j = F_T^{-1}(u)$. Es ist zu beachten, dass dieser Ansatz davon ausgeht, dass die Subkomponenten voneinander unabhängig ausfallen.

Ausfallrisiken (selbstankündigendes Versagen):

Dieses tritt genau dann ein, wenn das Alter der Komponente bei der nächsten geplanten Maßnahme die kleinste Lebensdauer übersteigt, d.h. $T(t = \mathcal{O}_{k+1}) > \min_j T_j$. Der Zeitpunkt der ungeplanten Maßnahme berechnet sich unter der Annahme, dass das Alter zwischen $\mathcal{O}_k < t < \mathcal{O}_{k+1}$ linear ansteigt. Es wird weiterhin davon ausgegangen, dass infolge eines ungeplanten Schadensereignisses alle $N_{\mathcal{K}_S}$ Subkomponenten des Satzes zu Schaden kommen und getauscht werden müssen.

Befundrisiken (nicht selbstankündigendes Versagen):

Erreicht eine Maschine eine geplante Maßnahme $\mathcal{O}_{k+1}(t)$ und gibt es die Möglichkeit eines Befundes aufgrund einer Inspektion, wird dieses ausgewertet. Getauscht werden nur diejenigen Subkomponenten, für die gilt $a_j(t = \mathcal{O}_{k+1}) \geq T_j$. Offensichtlich folgt daraus, dass nach dem Bezug von Ersatzteilen ein Mischsatz entsteht, der in der Summe wieder auf die vollständige nominelle Satzgröße führen muss, $N_{\mathcal{K}_S} = \sum_j N_{\mathcal{K}_S, j}$.

Die oben genannten Risiken lassen sich durch separat angegebene Aktionen mitigieren. Dazu gehört die Inspektion während einer vorhergehenden Maßnahme. Alternativ kann die Komponente geplant getauscht werden. Die Kombination aus beiden Aspekten stellt den klassischen Lebensdauerzyklus bei Turbinenkomponenten dar.

Lager- und Werkstattmodell

Das Modell verfügt über ein zentrales Lager, in welchem Neuteile, gebrauchte Teile und beschädigte Teile gelagert werden: Für die Inbetriebsetzung einer Maschine werden dem Neuteillager Teile entnommen, wobei verschiedene Designs derselben Komponente vorliegen können. Ersatzteile werden priorisiert dem Ersatzteillager entnommen. Komponenten, die einer Maschine entnommen werden, werden unabhängig von ihrem Zustand an das Ersatzteillager zurückgeschickt und repariert. Der Reparaturerefolg soll hier lediglich durch einen Parameter $r_y \in [0,1]$ berücksichtigt werden. Komponenten, die repariert werden können, werden in den Originalzustand zurückversetzt. Lieferzeiten zwischen einer Anlage und dem Lagerhaus und umgekehrt werden im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter betrachtet, allerdings nimmt eine Reparatur Δt_{rep} in Anspruch, bevor sie wieder zur Verfügung stehen.

Meldet eine Maschine einen Teilebedarf an, so wird dieser nach dem Prinzip „First-Come-First-Served“ abgearbeitet. Priorisiert werden gebrauchte, reparierte Teile verwendet, wobei möglichst wenige Sätze verwendet werden sollen, um eine zu starke Durchmischung zu vermeiden. Stehen keine Ersatzteile zur Verfügung wird auf Neuteile zurückgegriffen. Gelingt auch dies nicht, wird die Abfrage täglich wiederholt, bis Teile zur Verfügung stehen (durch Zulauf aus Reparatur oder Neufertigung). Zeiten der Nichtbelieferung werden registriert und stellen ein zentrales Geschäftsrisiko dar, da sie zum Stillstand einer oder mehrerer Maschinen führen.

Implementierung und Patentanmeldung

Wie eingangs erwähnt existieren bereits kommerzielle Softwarepakete zur numerischen Berechnung im Zuverlässigkeitskontext (z.B. *Reliasoft Blocksim*). Es zeigte sich jedoch, dass

sich diese unzureichend auf unseren Anwendungsfall anpassen lassen und nennenswerte Lizenzierungskosten mit sich bringen. Aus diesem Grund wurde das oben beschriebene Modell von Grund auf in C# und dem DES-Paket *SimSharp* [10] implementiert. Innerhalb der Programmarchitektur werden alle Maschinen, Komponenten und Maßnahmen durch Objekte abgebildet und die Simulation für ein Mehrkernsystem parallelisiert.

Unter dem Aktenzeichen 25205337.6 wurde zu dem o.g. Modell beim Europäischen Patentamt ein Patentantrag mit dem Titel “Computer-implemented method, data-processing system, computer-readable storage medium and computer program product” eingereicht.

3.2 Ergebnisse

Im Folgenden sollen anhand von Beispielen die Implementierung demonstriert und diskutiert werden.

Szenario 1 – Befunde aufgrund von Inspektion während Maßnahme

Im ersten Szenario soll der Fall untersucht werden, bei dem eine Maschine aufgrund von Befunden während einer laufenden Maßnahme mit Neuteilen beliefert werden muss. Konkret könnte es sich dabei um einen Satz bestehend aus 64 Turbinenschaufeln handeln, die bei Heißgaspfad- (HPGI) und Hauptinspektionen (Major) geprüft werden. Die Befundwahrscheinlichkeit der Einzelschaufel folgt in diesem Fall einer vom Alter der Komponente abhängigen Weibullverteilung. Zur besseren Darstellung der Ergebnisse soll hier lediglich eine einzelne Realisation in **Abbildung 9** betrachtet werden. Im oberen Plot sind die Belieferungen an die Anlagen über den Zeitverlauf dargestellt, wobei die blauen und gelben Graphen jeweils unterschiedliche Designs darstellen, die jedoch mischbar sind. Der mittlere Plot zeigt die Anzahl diejenigen Teile an, die nicht geliefert werden, weil die insgesamt benötigte Menge nicht verfügbar ist. Ein Wert größer 0 in diesem Plot ist gleichbedeutend mit dem Stillstand einer Maschine infolge fehlender Teile. Abschließend zeigt der untere Plot den Lagerbestand der Neuteile der genannten Designs. Zu Beginn der Simulation wird die Maschine mit einem Satz von 64 Teilen beliefert und beginnt den Betrieb bis zur ersten HGPI. Eine Prüfung bei der Maßnahme vom Typ „BI“ ist nicht vorgesehen. Tatsächlich zeigen 51 Schaufeln bei der HGPI-Befunde, die zum Tausch führen. Die Belieferung erfolgt als Mischsatz zweier Designs, da die Lagerbestände keinen reinen Satz ermöglichen. In diesem Beispiel wird angenommen, dass die Belieferung instantan erfolgt, d.h. keine Verlängerung der geplanten Dauer einer Maßnahme zur Folge hat. Dass dies jedoch möglich ist, zeigt das Ergebnis der Prüfung bei einer geplanten Hauptinspektion. Wieder wird eine Vielzahl der Komponenten befundet, insbesondere sämtliche, die bei der vorherigen Maßnahme nicht getauscht wurden. Der Lagerbestand des Designs A ist jedoch bereits konsumiert, derjenige des Designs B unterhalb der angefragten Menge.

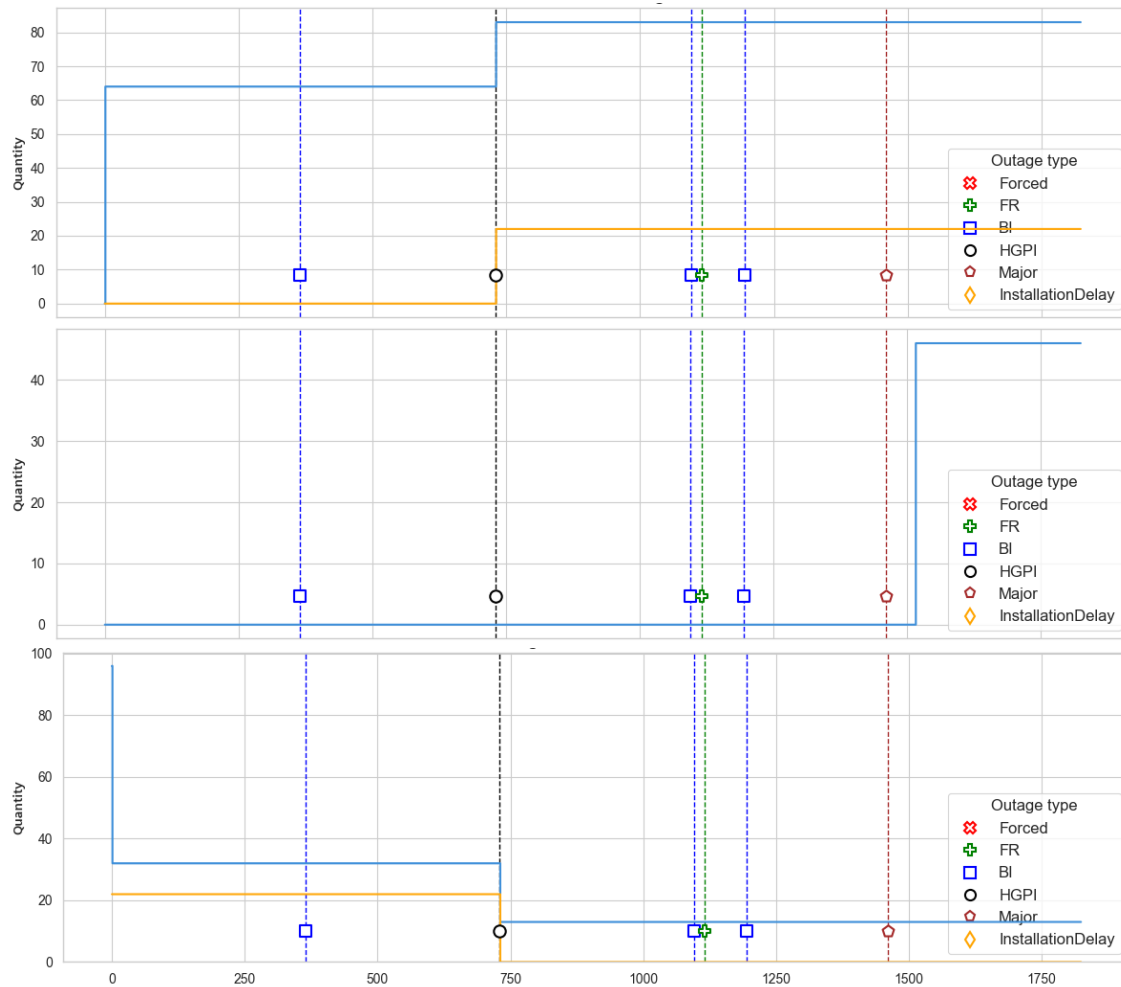


Abbildung 9: Ergebnisse für das Szenario 1. Die x-Achse stellt die Zeit als Tage seit Beginn der Simulation, die y-Achse die Anzahl der Subkomponenten dar. Oben: Teilelieferung aus Neuteilen; mittig: Ausstehende Lieferungen; unten: Lagerbestand

Szenario 2 – Markteinführung Flotte

Von größerer Komplexität ist die Berechnung der Markteinführung und ersten Betriebsjahre einer neuen Turbinengeneration. Folgende Annahmen werden getroffen:

- 20 Turbinen werden zu unterschiedlichen Zeitpunkten gebaut und in Betrieb genommen. Der Teileabruf erfolgt jeweils ein halbes Jahr vor Inbetriebsetzung. Der Einfachheit halber besteht die Turbine hier lediglich aus der Komponente „Turbinenschaufel 1“, bestehend aus 64 Subkomponenten.
- Die Turbinenschaufel 1 unterliegt zwei unabhängigen Risiken, jeweils eines für den Befund während einer Maßnahme sowie eines, das den spontanen Ausfall abbildet. In beiden Fällen folgt die Ausfallwahrscheinlichkeit eine der Betriebsstunden abhängige Weibullverteilung. Zur Verdeutlichung der Mechanismen werden hier keine realen Zuverlässigkeitsparameter verwendet, sondern solche mit deutlich geringerem Skalenparameter. **Aus den folgenden Grafiken ist somit kein Rückschluss auf die Zuverlässigkeit der Siemens Energy Produkte abzuleiten.** Des Weiteren sind die Grenzen für den geplanten Austausch so hoch gesetzt, dass ungeplante Ausfälle oder Austausche begünstigt werden, um das System weniger determiniert zu rechnen.
- Es existiert die Basis Variante „PTB1000“, dazu wird erwartet, dass in den Folgejahren die Varianten „PTB1000-1“ und „PTB1000-2“ eingeführt werden. Jährlich wird ein Satz a 64 Schaufeln bestellt.
- Die genannten Schaufeln lagern in einem Lagerhaus, aus dem die Komponenten geordert werden können. Zurückkehrende Schaufeln können mit einer Erfolgsquote von 60% genau einmal repariert werden.

Der Simulationsergebnisse nach 100,000 Monte-Carlo Iterationen sind in den Abbildung 10 und 11 dargestellt. Die unterschiedlichen Farben repräsentieren unterschiedliche Designvarianten, die Bänder repräsentieren den Bereich zwischen dem 25%- und dem 75% Quantil.

In Abbildung 10 oben wird nun das spontane Versagen mit Maschinenstopp und unten die Bedarfe aufgrund von Befunden bei geplanten Maßnahmen separat gezeigt. Mit ersten Befunden ist bei den ersten Maßnahmen zu rechnen, die zunächst aus dem gelben, und dann aus den gelben und roten Designs bedient werden. Mit zunehmender Laufzeit kommt es dann auch zu spontanen Ausfällen, die Unsicherheit bei dem gewählten Konfidenzband beträgt ca. 2 Sätze.

Für den Lagerbestand an Neuteilen ergeben sich die in Abbildung 11 (oben) gezeigten Verläufe. Zunächst wird ein hoher Anfangsbestand des Designs A (blau) für die Errichtung der ersten Anlagen benötigt, bevor auch ein zweites, „gelbes“ Design als Neuteil zuläuft. Da letzteres priorisiert ist, werden damit die ersten Bedarfe aus dem Feld ab dem Jahr 2026 abgedeckt. Ab dem Jahr 2029 kommt das nun priorisierte „rote“ Design in geringen Stückzahlen hinzu. Da dessen Stückzahlen nicht genügen den Bedarf zu decken, wird regelmäßig wieder auf Design B zurückgegriffen, dessen Lagerbestand weiterhin hoch ist. Kleinere Bedarfe können aus dem Lager reparierter Teile bedient werden (Abbildung 11 unten). Erst ab 2028 ist mit ersten Rückläufern zu rechnen, gleichzeitig ist die Unsicherheit in dieser

Vorsage auch deutlich größer, da sie maßgeblich von den Befunden abhängig ist, während insbesondere der Lagerzulauf an Neuteilen an vorab festgelegten Daten passiert.

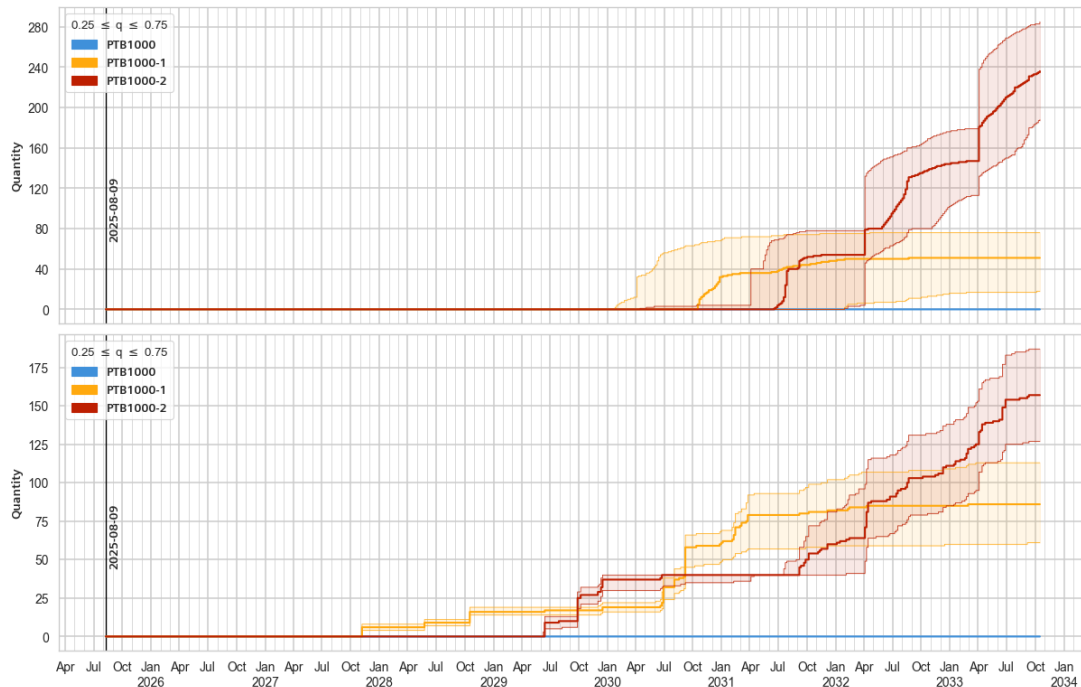


Abbildung 10: Teilelieferungen aufgrund spontaner Ausfälle (oben) und aufgrund von Befunden während Maßnahmen (unten).

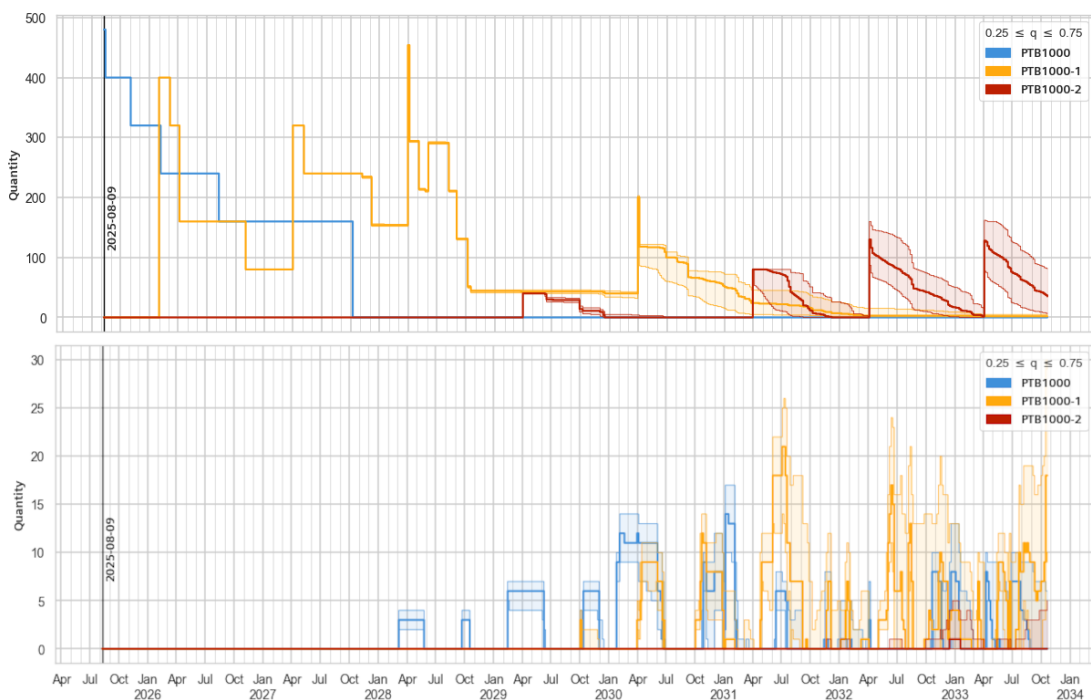


Abbildung 11: Lagerbestand der unterschiedlichen Designs für Neuteile (oben) und reparierte Teile (unten).

3.3 Erweiterung des Modells um latente Schädigungsvariablen

Während in den vorherigen Kapiteln die Befund- oder Ausfallwahrscheinlichkeit unmittelbar aus einer latenten Betriebsgröße hergeleitet wurde (d.h. den Starts oder Betriebsstunden), ist bei Turbinen die thermische Betriebsbeanspruchung ein maßgeblicher Treiber für der Schädigungsmechanismen. Als Beispiel seien hier Oxidation, Materialalterung oder Kriechen genannt. Je mehr sich die Betriebsbedingungen von Anlage zu Anlage oder auch einer einzelnen Anlage über den Betrieb variieren, desto weniger kann die Betrachtung der Betriebsstunden der korrekten Ausfallwahrscheinlichkeit Rechnung tragen. Daher hat sich es dieses Projekt zur Aufgabe gemacht, auch solche latenten Zustandsgrößen als Eingang zur Zuverlässigkeitsmodellierung zu verwenden.

Ersatzmodell lokaler Temperaturen

In einem ersten Schritt ist in der Regel die Ermittlung einer ebenfalls latenten, da nicht gemessenen, Zwischengröße durchzuführen. Dabei handelt es sich hier um die lokale Metalltemperatur sowie die Spannungen, die die Schädigungsrate beschreiben. Benötigt wird eine Abbildung $f(\mathbf{P}, t) \rightarrow T(x, t), \sigma(x, t)$, wobei $\mathbf{P}(t)$ ein Satz zeitabhängiger Betriebsparametern ist. Dazu gehören mindestens die Drehzahl der Turbine, deren Wellenleistung sowie die Umgebungstemperatur der angesaugten Luft. Zum Training des Ersatzmodells wurde ein Ganzmaschinenmodell hinsichtlich verschiedener Betriebszustände parametrisiert und gerechnet, so dass die Temperaturen und Spannungen an den relevanten Positionen identifiziert werden konnten. In einem weiteren Schritt wurde dann die lokale Temperaturlösung mittels Deep Learning (Deep Gaussian Covariance Network [11]) in ein Ersatzmodell überführt.

Schädigungsmodell und Betriebsdaten

Die Einbindung des Modells der Schädigungsvariable sei in **Abbildung 10** als Variation der bereits aus **Abbildung 88** bekannten Grafik gezeigt, in dem nun nicht mehr eine einfache Zählvariable a (Stunden / Starts), sondern eine oder mehrere Schädigungsvariablen $d > 0$ ein Ausfallereignis bei $d = D$ auslöst.

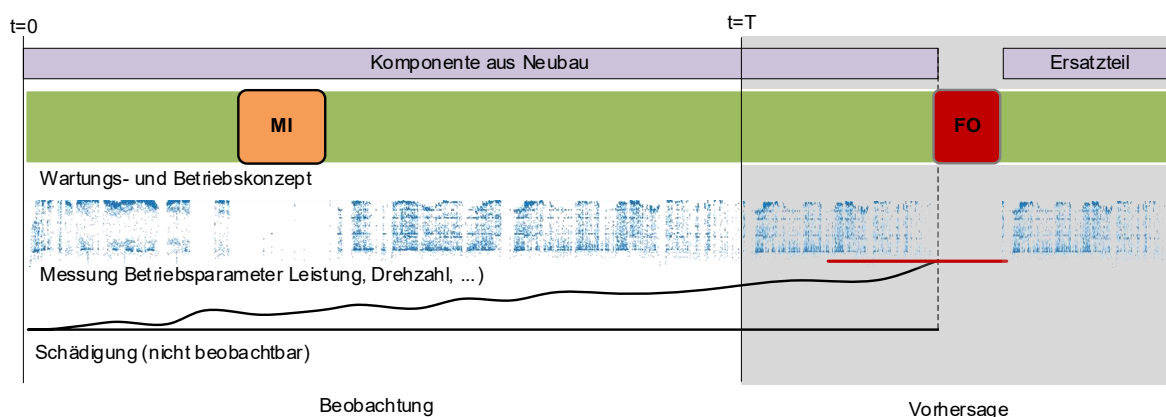


Abbildung 10: Beispiel für die Berechnung des Ausfalls aufgrund einer latenten Schädigungsvariable, die aus einer Betriebsgröße berechnet wird.

Zur Integration des Kriechmodells in das DES-Modell ist es erforderlich, die Schädigungsvariable der Komponente hinzuzufügen und zusätzliche „Ereignisse“ mit Zeitschrittweite Δt zwischen den geplanten Maßnahmen zu ergänzen, die dazu dienen den Schädigungsfortschritt zu überprüfen. Hierzu eignet sich ein implizite Integrationsverfahren $d_{t+\Delta t} = d_t + \Delta t \dot{d}(\sigma_{t+\Delta t}, T_{t+\Delta t}, t_{t+\Delta t})$. Überschreitet nun die integrierte Schädigungsgröße den ausgesampelten kritischen Wert D , so wird sofort ein Ausfallereignis mit vorgegebener Dauer ausgelöst. Der Temperaturverlauf wird bis zu einem Zeitpunkt t_{now} , für den bereits gemessenen Daten vorliegen explizit verwendet. Für den Zeitraum $t > t_{now}$ müssen geeignete Annahmen für den fortgesetzten Betrieb getroffen werden, zum Beispiel die Wiederholung des Betriebsmusters der letzten 12 Monate, auf die hier nicht näher eingegangen werden soll. Der weitere Ablauf der Deinstallation, Bestellung, Lieferung und des Einbaus erfolgt nach dem bereits beschriebenen Schema.

Szenario 3 – Simulation mit Schädigungsverhalten

In diesem abschließenden Szenario soll nun die Unsicherheit des Ausfallzeitraums durch die zum Zeitpunkt des Verkaufs einer Turbine häufig nicht bekannte Fahrweise untersucht werden. Hier sei angenommen, dass die Leistungskurve der zu verkaufenden Maschinen normalverteilt ist, mit $\tilde{\eta} \sim N(80\%, 10\%)$. Zu einem gegebenen Zeitpunkt wird mittels Inversionsmethode aus der Verteilung ein Leistungspunkt gesampelt, und dann, mit Hilfe des Ersatzmodells, die zugehörige Metalltemperatur T_{metall} bestimmt. Für die Schädigungsrate wird das Norton-Bailey Kriechgesetz verwendet, $\dot{d} := \dot{\epsilon}_c = A' \sigma'^n e_c^m$, wobei vereinfachend angenommen wird, dass die tertiäre Kriechphase kurz ist gegenüber den ersten beiden Phasen. Die Parameter A' , n und m sind temperaturabhängig, so dass sich zu jedem Zeitpunkt eine Kriechrate in Folge der veränderlichen Metalltemperatur errechnen lässt. Ein Ausfall (Kriechbruch) erfolgt dann, wenn eine kritische Dehnung $e_c > 0.005$ erreicht wird. Als Zeitschrittweite werden 24h gewählt.

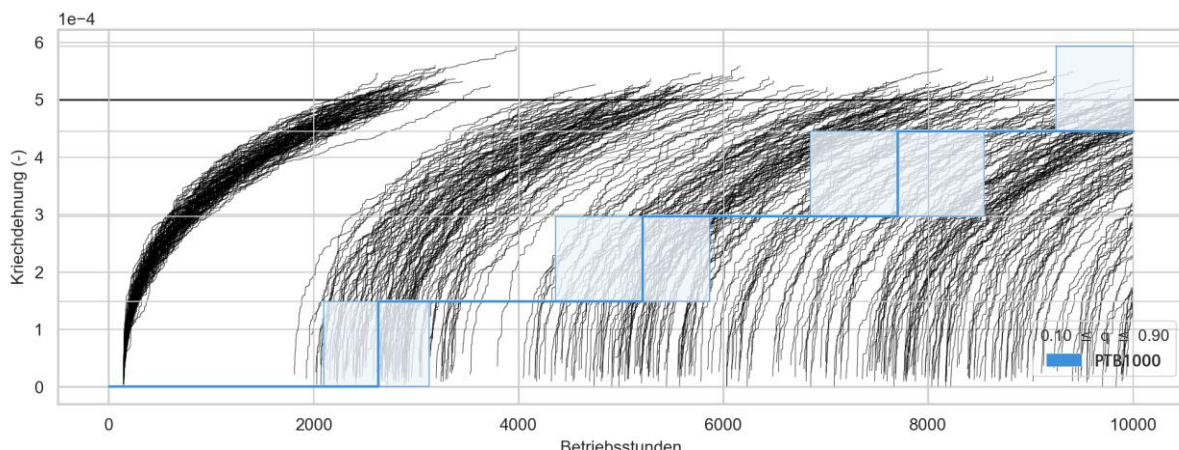


Abbildung 1311: Kriechdehnung über der Zeit (schwarz). Teilebedarf aufgrund der Ausfälle bei Erreichen des Kriechlimits. Die blaue Linie ist der Median, die Schattierung das 10%-90% Konfidenzband.

Abbildung 13 zeigt das Ergebnis der Simulation im Verlauf der Kriechdeformation der einzelnen virtuellen Betriebsläufe. Bereits während des ersten Betriebs zeigt sich eine Streuung in der Kriechrate aufgrund der variierenden Temperaturen. Konsequenterweise

führen somit die Zeitpunkte des ungeplanten Tauschs dazu, dass auch die Ausfälle zweiter Ordnung noch stärker streuen, da zu der Temperaturvariation die Variation im Komponentenalter über der Zeit kommt. Dies drückt sich im Bedarfsplot in einer immer größeren horizontalen Streuung aus.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Diese Arbeit adressiert die Grenzen klassischer Reliability-Centered-Maintenance-(RCM-) Ansätze bei der Wartungs- und Ersatzteilplanung moderner Kraftwerkskomponenten. Während etablierte RCM-Frameworks bewährte Wartungslogiken bereitstellen, fehlt bislang eine systematische Integration komplexer, probabilistischer Zuverlässigkeitsmodelle sowie eine quantitative, simulationsgestützte Entscheidungsunterstützung unter Einbindung realer Betriebs- und Businessdaten.

Zur Schließung dieser Lücke wurde ein simulationsbasiertes Entscheidungsframework entwickelt, das detaillierte, Zustands- und belastungsabhängige Ausfallmodelle mit operativen Planungslogiken verknüpft. Der Schwerpunkt liegt auf der Prognose des Teileverbrauchs serialisierter Großkomponenten, deren lange Lieferzeiten und hohe Lagerkosten besondere Anforderungen an die Ersatzteilplanung stellen. Das Framework ermöglicht die transparente Bewertung alternativer Handlungsoptionen hinsichtlich Risikos, Verfügbarkeit und Wirtschaftlichkeit.

Auf Basis der erzielten Ergebnisse wird das entwickelte Modell nun in die industrielle Anwendung überführt. In einem nächsten Schritt erfolgt die Integration in reale Service- und Planungsprozesse sowie die Validierung mit Flotten- und Betriebsdaten, um eine skalierbare, Zustands- und risikobasierte Entscheidungsunterstützung für den industriellen Einsatz zu etablieren.

Literaturverzeichnis

- [1] C. Amann und K. Kadau, „Numerically efficient modified Runge-Kutta solver for fatigue crack growth analysis,“ *Engineering Fracture Mechanics*, Bd. 161, pp. 55-62, 2016.
- [2] S. Schmitz, T. Seibel, T. Beck, G. Rollmann, R. Krause und H. Gottschalk, „A Probabilistic Model for LCF,“ *Computational Materials Science*, Bd. 79, pp. 584-590, 2013.
- [3] P. Engels, C. Amann, S. Schmitz und K. Kadau, „Probabilistic Fracture Mechanics For Mature Service Frame Rotors,“ *Journal of Gasturbine and Power*, Bd. 143, Nr. 7, 2021.
- [4] R. Clemen und R. Winkler, „Combining Probability Distributions From Experts in Risk Analysis,“ *Risk Analysis*, Vol. 19(2), pp. 187-203, 1999.
- [5] M. Gröger, Models and Methods for reliability based Maintenance Scheduling, Universität Wuppertal: Dissertation, 2006.
- [6] A. Konnov, Zuverlässigkeitsberechnung und vorbeugende Wartung von komplexen technischen Systemen mittels modifizierter Markov-Methode, Universität Karlsruhe: Dissertation, 2007.

- [7] K. L. Fahrmeier, Regression, Heidelberg Dordrecht London New York: Springer, 2009.
- [8] A. Rogozhnikov, „Brilliantly wrong,“ 2016. [Online]. Available: https://arogozhnikov.github.io/2016/12/19/markov_chain_monte_carlo.html.
- [9] H. George-Williams und E. Patelli, „Monte-Carlo based reliability / availability analysis algorithm for efficient maintenance planning,“ in *Transactions, SMiRT-23*, Manchester, 2015.
- [10] A. Beham, „SimSharp,“ [Online]. Available: <https://github.com/heal-research/SimSharp>.
- [11] K. Cremanns und D. Roos, „Deep Gaussian Covariance Network,“ *arXiv*, 2019.

Expansion

19. Statusseminar der AG Turbo

17. und 18. März 2026 in Köln

Arbeitskreis Expansion

Überblick

zusammengestellt von

Dr. Thomas Polklas

Everllence SE

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Abstract

The German government is aiming for greenhouse gas neutrality by 2045 and wants to achieve negative emissions by 2050. This can be achieved through the widespread use of innovative technologies. Turbomachinery plays a central role in this. The volatile nature of wind and solar energy requires enormous operational flexibility from steam and gas turbines in order to stabilize the grid. In addition, large energy storage systems must be integrated into the energy systems in terms of the power they can provide and their storage duration.

The Expansion sub-project is working on the expansion path of steam and gas turbines and on further expansion turbines based on their technologies, also known as expanders, which are operated with flow media other than steam or air, e.g., CO₂. These are suitable for energy storage systems, among other things.

Topics include:

- Efficiency improvement for full and partial load operation
- Operational flexibility with regard to rapid load changes
- Digitalization of design processes
- Probabilistic design methods
- Service life
- Additive manufacturing

Kurzfassung

Die Bundesregierung strebt Treibhausgasneutralität bis 2045 an und will ab 2050 negative Emissionen erreichen. Dies lässt sich realisieren durch massiven Einsatz innovativer Technologien. Turbomaschinen spielen dabei eine zentrale Rolle. Die volatilen Anteile von Wind- und Sonnenenergie erfordern enorme Betriebsflexibilität von Dampf- und Gasturbinen für die Netzstabilisierung. Zudem sind große Energiespeicher hinsichtlich der zur Verfügung stellbaren Leistung und Speicherdauer in die Energiesysteme zu integrieren.

Das Teilverbundprojekt Expansion arbeitet im Expansionspfad von Dampf- und Gasturbinen und auf deren Technologien basierenden weiteren Expansionsturbinen, auch Expander genannt, die mit anderen Strömungsmedien als Wasserdampf oder Luft betrieben werden, z. B. CO₂. Diese bieten sich u.a. für Energiespeichersysteme an.

Themen sind:

- Wirkungsgradverbesserung für Voll- und Teillastbetrieb
- Betriebsflexibilität im Hinblick auf schnelle Lastwechselfahrten
- Digitalisierung der Auslegungsprozesse
- Probabilistische Auslegungsmethoden
- Lebensdauer
- Additive Fertigung

1 Einleitung

Die Zielsetzungen des 7. und 8. Energieforschungsprogramms¹ der Bundesrepublik Deutschland werden von den aktuellen Verbundprojekten der AG Turbo umgesetzt. Sie reflektieren das geänderte Anforderungsprofil an Turbomaschinen für das Gelingen der Energiewende. Ein resilientes und effizientes Energiesystem, das eine klima-neutrale Wärme- und Kälteversorgung, sowie die Umstellung der Stromversorgung auf erneuerbare Energien realisiert, erfordert eine massive Ausweitung der erneuerbaren Energiewandlung basierend auf Wind und Sonne. Dies hat große Auswirkungen auf den bestehenden Kraftwerkspark, der an die volatile Natur dieser erneuerbaren Energieträger angepasst werden muss. Neben der angepeilten Energieeffizienz auf der Verbraucherseite können die von der EU angestrebten Ziele der Klimaneutralität bis zum Jahre 2050 nur erreicht werden, wenn auch Sektoren wie Verkehr, Wohnung und Industrie stärker elektrifiziert werden, um sie den erneuerbaren Energieträgern zugänglich zu machen.

Nicht nur auf dem Weg hin zu einer fossilfreien Energieversorgung der EU² werden thermische Kraftwerke benötigt, sondern sie werden das Rückgrat der Versorgungssicherheit des neuen Energiemixes sein. Turbomaschinen werden in Energiespeicheranwendungen und für die Erzeugung synthetischer „grüner“ Brennstoffe benötigt und sind an die neuen Anforderungen anzupassen. Dies betrifft insbesondere Prozessverdichter und –expander für die dazugehörigen Kreisprozesse. Zudem sind thermische Kraftwerke erforderlich, um Schwankungen der volatilen Energieträger Sonne und Wind auszugleichen. Ihre besondere Bedeutung gewinnen sie auch während saisonal abhängiger Dunkelflauten in den Wintermonaten.

Desweiteren ist eine nachhaltige Wasserstoffwirtschaft essenziell. Wasserstoff ist u.a. Basis von synthetischen „grünen“ Kraftstoffen wie z.B. Methanol oder Ammoniak und kann als Beimischung oder direkt in Gasturbinen zur Strom- und Wärmebereitstellung genutzt werden³. Neben der Betriebs- und Brennstoffflexibilität werden auch nach wie vor höchste Wirkungsgrade der Anlagen und ihrer Komponenten gefordert, um dem hohen Preis der Stromrückgewinnung aus regenerativ erzeugten Brennstoffen entgegenzusteuern.

¹ 7. +8. EFP, BMWK 2018+2023

² Green Deal, EU 2019

³ Nationale Wasserstoffstrategie, BMWK 2023

Somit lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

1. Ein Ausbau der erneuerbaren Energien ist nur sinnvoll, wenn zugleich auch die Speicherkapazitäten deutlich ausgeweitet werden. Dies muss in solchem Umfang geschehen, der die bislang technisch ausgereiften Speichertechnologien (Pumpspeicher; Batterien) bei weitem übersteigt. Dazu gehört neben mechanischen Speichern (LAES⁴; CAES⁵) und thermischen Speichern, in denen ausnahmslos Turbomaschinen für neue Kreisprozesse eingesetzt werden, auch die chemische „Power-to-Gas“ Speicherung.
2. Konventionelle Kraftwerke müssen durch Bereitstellung von Reserveenergien die Schwankungen der Erneuerbaren abfangen können, um „power-on- demand“ zu liefern und somit das Netz zu stabilisieren. Dies bedeutet, dass die Kraftwerke und deren Turbomaschinen ein Höchstmaß an Betriebsflexibilität besitzen müssen.
3. Neben der Erzeugung von Strom für alle Sektoren spielt die Erzeugung von Wärme für industrielle Anwendungen und für die regionale Versorgung von Wärmenetzen eine prägende Rolle. Durch die Verwendung von kombinierten Gas- und Dampfturbinenkraftwerken (GuD) und Anlagen mit Kraft-Wärme-Koppelung (KWK) können höchste Wirkungsgrade bzw. Brennstoffausnutzungsraten erzielt werden. Diese Anlagen leisten somit einen wesentlichen Beitrag zur nachhaltigen und bezahlbaren Strom- und Wärmeerzeugung.
4. Mit erneuerbaren Energien erzeugter Wasserstoff wird die Basis zur Herstellung klimaneutraler „grüner“ hochenergetischer Brennstoffe sein, z.B. für maritime Anwendungen und Flugantriebe. Schließlich sollen auch alle Endverbraucher – und damit auch thermische Kraftwerke auf der Basis von Gasturbinen - mit einem Gemisch hohen Wasserstoffanteils betrieben werden können („H2-Ready“).

Alle von der AG Turbo initiierten Verbundvorhaben greifen die genannten Aspekte auf und tragen damit zur Erfüllung der Ziele der Energieforschungsprogramme der Bundesregierung bei.

Die im letzten Tagungsband 2024 vorgestellten Verbundprojekte *SchauTex*, *RoboFlex* und *OptiSysKom* wurden inzwischen größtenteils abgeschlossen.

Im Folgenden werden die Arbeitspakete der Gruppe Expansion der AG Turbo Vorhaben *InnoTurbinE*, *TurboGrün* und *DigiTecT* näher vorgestellt und es wird ein Ausblick auf die laufenden Vorhaben *TurboHyTec*, *TurboTrans* und *FokusTurbo* gegeben.

⁴ LAES: Liquid Air Energy Storage

⁵ CAES: Compressed Air Energy Storage

2 Das AG Turbo Verbundprojekt *InnoTurbinE*

Im AG Turbo - Verbundprojekt *InnoTurbinE* – „Innovative Turbomaschinen für nachhaltige Energiesysteme“ werden die in vorangegangenen Forschungsprojekten der AG Turbo begonnenen Aspekte der Brennstoffflexibilität in Bezug auf H₂, sowie die Auswirkungen des Betriebs der Turbomaschinen im Verbund mit den erneuerbaren Energien mit Blick auf Lebensdauer und Effizienz vertiefend weitergeführt. Die Turbomaschinen sollen dahingehend verbessert werden, dass sie technisch so ausgeführt sind, dass sie die immer höher werdenden Zyklen pro Jahr ohne Schaden überstehen. Die hohe Zahl an Zyklen ergibt sich aus dem Zusammenspiel mit nachhaltigen Stromerzeugungssystemen (erneuerbare Energie aus Wind und Sonne). Zur Erreichung dieser Ziele sollen die Möglichkeiten voll ausgeschöpft werden, die sich aus der Virtualisierung des Designs und der Lebenszyklusüberwachung ergeben.

Konkret werden die Ziele in folgenden Arbeitspaketen angegangen:

- AP 1: Turbomaschinen für die H₂-Wirtschaft
- AP 2: Zyklenfeste Turbomaschinen
- AP 3: Virtuelle Produktentwicklung unter realen Randbedingungen

Abbildung 1 zeigt die Gesamtstruktur von *InnoTurbinE*. Blau umrahmt sind die Arbeitspakete, die der hier vorgestellten Gruppe Expansion zugeordnet sind.

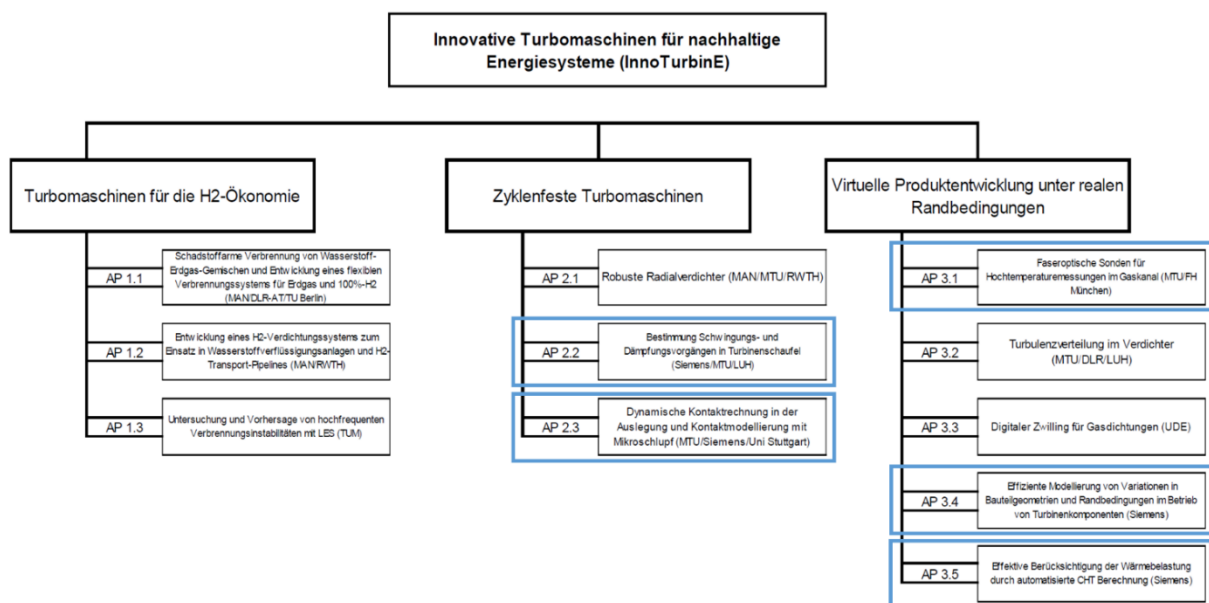


Abbildung 1: Übersicht der Arbeitspakete in *InnoTurbinE*

In AP 2 „Zyklusfeste Turbokomponenten“ werden die Auswirkungen von Laständerungen in Turbomaschinen bei einer deutlich höheren Anzahl von An- und Abfahrvorgängen untersucht mit dem Ziel, die Lebensdauer und damit die Verfügbarkeit der Gasturbinen im erweiterten Lastfolgebetrieb zu erhöhen. Bei zukünftigen hocheffizienten Gasturbinen, die einen hochflexiblen Betrieb in einem sehr großen Betriebsbereich gewährleisten können, bekommen aeromechanische Schwingungsanregungen durch Verbrennung, Mehrstufeninteraktion und Schaufelflattern viel größere Bedeutung und werden bei den thermisch und statisch höchstausgelasteten Turbinenschaufeln sogar Design-beeinflussend. Da die vielfältigen Anregungen im Design nicht mehr vollständig vermieden werden können, wird eine gezielte Dämpfungsoptimierung zwingend notwendig, die integral mit dem Schaufeldesign durchgeführt werden muss und nur noch durch eine multidisziplinäre Optimierung erreicht werden kann. Die präzise Vorhersage von Eigenfrequenzen und Dämpfungsverhalten im Deckbandbereich ist von hoher Bedeutung für eine Verschleißbewertung und – darauf aufbauend – um zukünftig in der Auslegung das Optimierungspotential hinsichtlich Schwingungen zu vergrößern, um den Verschleiß im Betrieb reduzieren zu können. Hierzu sind Simulationstools für nichtlineare Strukturdynamik in ihrer Funktionalität weiter zu entwickeln, um Effekte wie Reibung, schlagender Kontakt und Mikroschlupf bewerten zu können.

AP 3 „Virtuelle Produktentwicklung unter realen Bedingungen“ behandelt, dass Turbomaschinen heute immer näher an ihre Designgrenzen gebracht werden. Während früher Unsicherheiten über die realen Zustände in der Turbine durch Margen (Sicherheitsfaktoren/ -abstände) im Design berücksichtigt wurden, wird heute bewusst versucht, diese Margen immer weiter zu verkleinern. Dadurch können Wirkungsgrade noch weiter erhöht werden, oder aber Fahrweisen erlaubt werden, die Hersteller früher nicht zu garantieren in der Lage waren. Die im Design berücksichtigten Margen dienen hier also dazu Unsicherheiten in Kauf zu nehmen. Diese Unsicherheiten liegen zum einen darin, dass gar nicht genau bekannt ist, wie die Maschine real belastet wird (Unsicherheiten bezüglich der Physik), und zum anderen, dass nicht zu 100% vorhergesagt werden kann, wie die Maschine nach der Fertigung aussieht (Fertigungstoleranzen). Hinzu kommen Unsicherheiten bezüglich der Fahrweise, die bei der Berechnung von Service-Zyklen nicht berücksichtigt werden können. So ist es oft nicht klar, wie oft und wie schnell eine Maschine im tatsächlichen Betrieb hoch- und heruntergefahren wird. Hier müssen deswegen „worst case“-Szenarien für die Berechnung von Service-Zyklen berücksichtigt werden. Die Berechnung und Berücksichtigung solcher Unsicherheiten übersteigt die Fähigkeiten der heute verwendeten Tools und Methoden, die zur Auslegung und Überwachung von Turbomaschinen eingesetzt werden. Die virtuelle Entwicklung hat in den letzten Jahren im Zuge des allgemeinen Trends zur Digitalisierung immer bessere Modelle und Methoden hervorgebracht, die für die oben beschriebenen Problematiken genutzt werden können. An allen drei Punkten der Unsicherheiten bei den realen Bedingungen des Betriebs von Turbomaschinen, nämlich der physikalischen und der geometrischen sowie aufgrund der Interdisziplinarität der beeinflussenden Phänomene, soll dieses Arbeitspaket wirken.

Als Ziel soll schließlich im Sinne eines digitalen Zwillings die Bewertung von benötigten Serviceintervallen vorhergesagt werden, indem die reale Fahrweise, z.B. einer Turbine, oder der

Zustand von Dichtungssystemen mit Hilfe solcher digitalen Zwillinge in Zukunft parallel zum Betrieb simuliert werden kann.

2.1 Ergebnisse und Zusammenarbeit *InnoTurbinE*

Die Ergebnisse dieses Verbundprojektes kommen allen beteiligten Projektpartnern zu Gute, um hauseigene Auslegungsverfahren aufzurüsten. Bei den beteiligten akademischen Partnern wird die Versuchsinfrastruktur weiter ausgebaut und damit ein wichtiger Schritt zur internationalen Stärkung der deutschen Turbinenforschung getan.

Die Verwertung der Einzelprojekte erfolgt gemäß Tabelle 1.

Tabelle 1: Verwertung der Ergebnisse aus den Einzelprojekten bei *InnoTurbinE*

AP	Ergebnis	Verwertung
2.2	Bestimmung von Schwingungs- und Dämpfungsvorgängen bei Turbinenschaufeln	Verbesserte Aeroelastizität für Schaufeln ohne und mit Deckbändern Niedriger Teillastbetrieb < 50%
2.3	Dynamische Kontaktrechnung in der Auslegung und Kontaktmodellierung mit Mikroschlupf	Verbesserte Aeroelastizität für Schaufeln ohne und mit Deckbändern Lastwechselrate +20%
3.1	Faseroptische Sonden für Hochtemperaturmessungen im Gaskanal	Innovative Temperaturmessung zur Bauteilüberwachung Frühzeitige Erkennung von Bauteilschäden
3.4	Effiziente Modellierung von Variationen in Bauteilgeometrien und Randbedingungen im Betrieb von Turbinenkomponenten	Verbesserungen im Kühlungssystem von Hochtemperatorturbinen +20% Lebensdauer
3.5	Effektive Berücksichtigung der Wärmebelastung durch automatisierte CHT Berechnung	Verbesserungen im Kühlungssystem von Hochtemperatorturbinen 10% Kühlluftersparnis

3 Das AG Turbo Verbundprojekt *TurboGrün*

Im AG Turbo-Verbundprojekt *TurboGrün – Turbomaschinen für Energiespeicher und grüne Brennstoffe* wird in drei Hauptarbeitspaketen an folgenden Themen gearbeitet.

Das Arbeitspaket „Stabile flexible Verbrennung klimafreundlicher Brennstoffe“ widmet sich der Verbrennung von Wasserstoff in reiner Form oder als Beimischung in Erdgas und schließt die Kette zu den Erneuerbaren Energien insofern, dass die Erzeugung von sogenanntem grünen Wasserstoff durch Elektrolyse eine nachhaltige Speicherung des Stromüberschusses aus erneuerbaren Energieanlagen bedeutet. Schwerpunkte liegen in der Entwicklung robuster und emissionsreduzierter Brenner für Gase mit hohen Wasserstoffanteilen. Für Industriegasturbinen, die in den Pipelinestationen des Wasserstoffnetzes benötigt werden, werden tiefe Teillastbereiche untersucht, die in Abhängigkeit von der Fördermenge des Gases angefahren werden müssen. Ziel des übergeordneten Arbeitspaketes ist die Ertüchtigung von Gasturbinenbasierten Anlagen in der Energieerzeugung und beim Transport von wasserstoffhaltigen Brenngasgemischen für einen Wasserstoffanteil von bis zu 100%.

Im Arbeitspaket „Fortschrittliche Methoden im Heißgaspfad“ wird die Optimierung der Kühlluftführung und der Schaufeldämpfung thematisiert, um höchste Zuverlässigkeit und Effizienz zu gewährleisten. Dabei wird u.a. auch der Einsatz modernster Fertigungstechnologien (Additive Manufacturing) angenommen. Die Entwicklung eines digitalen Zwillings auf Basis probabilistischer Verfahren wird die Optimierung von Serviceintervallen ermöglichen, um unnötige Stillstandszeiten zu vermeiden. Zu diesem Zweck werden ebenfalls Methoden zur analytischen Vorhersage der Lebensdauer thermisch hochbelasteter Bauteile entwickelt. Die Verwertung der Ergebnisse dieses Arbeitspaketes wird in den wirtschaftlichen Betrieb und eine hohe Verfügbarkeitsrate von Gasturbinen in einer dekarbonisierten Energiewirtschaft münden.

Das Arbeitspaket „Expander und Verdichter für die Energiewende“ widmet sich Verdichtern und Expansionskomponenten für Anwendungen in Speicherprozessen für die zukünftige von Erneuerbaren dominierte Energieinfrastruktur und in Prozessen der synthetischen Erzeugung klimaneutraler Brenngase. Für Turbinen und Expander, die in den Kreisprozessen der thermischen Speicherung eingesetzt werden, steht die Erweiterung der Auslegungssystematik für besondere Gasgemische in den Wärme- und Kältekreisläufen im Vordergrund. Unter anderem müssen besondere Maßnahmen zur Abdichtung getroffen werden, um die Ausströmung der Prozessgase in die Umgebung zu verhindern. Radialverdichter der Zukunft werden mit neu zu entwickelnden multidisziplinären Auslegungsverfahren berechnet und konstruiert. Schließlich werden integrierte Bewertungen von Verdichtern im Hinblick auf Stabilität und Operabilität im Gesamtsystem betrachtet und Beiträge zur verbesserten Messtechnik geleistet.

Abbildung 2 zeigt die Gesamtstruktur von *TurboGrün*. Blau umrahmt sind die Arbeitspakete, die der hier vorgestellten Gruppe Expansion zugeordnet sind.

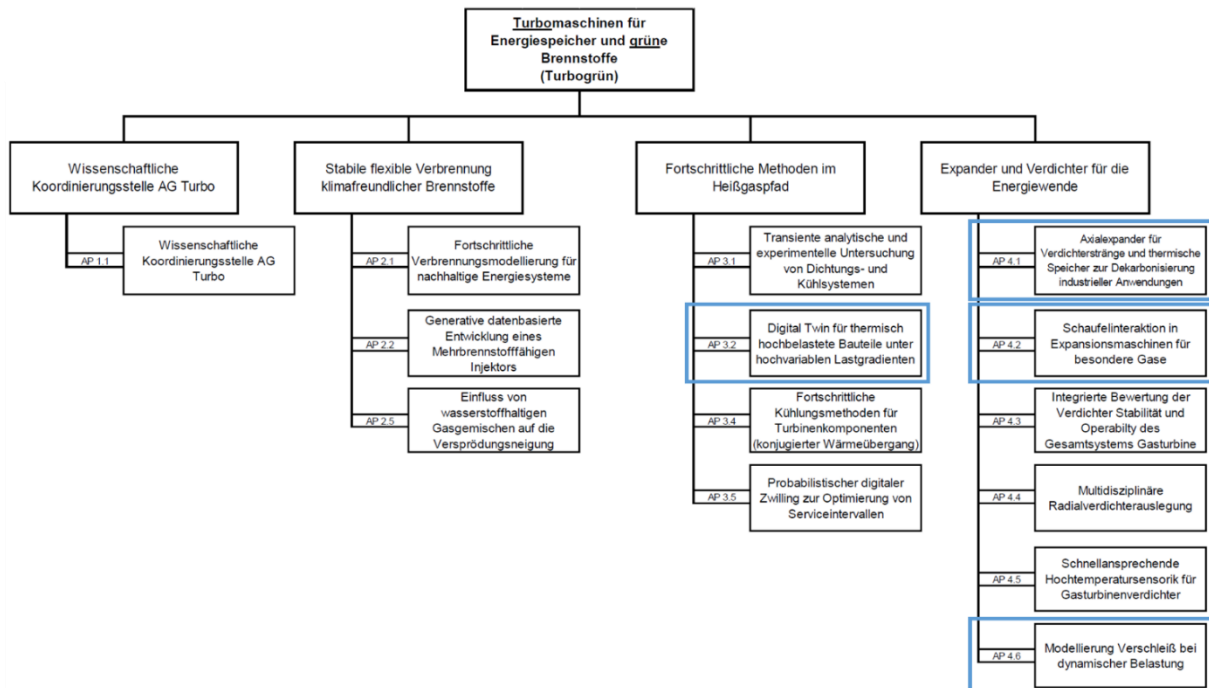


Abbildung 2: Übersicht der Arbeitspakete in *TurboGrün*

AP 3.2 *Kriechmodelle für hochvariable Lastanteile in Gasturbinenbauteilen*, untersucht am Beispiel eines hoch beanspruchten Bauteils den Einfluss der transienten Betriebsweise der Gasturbine auf die Lebensdauererwartung. Der Fokus des Projektes liegt hierbei auf der Verwendung von digitalen Messdaten sowie der automatisierten Verarbeitung dieser Daten. Hierbei werden die Unterschiede zwischen den Annahmen zur Auslegung der Maschine und dem tatsächlichen transienten Betrieb der Maschine ausgearbeitet. Zudem soll der Einfluss der transienten Fahrweise der Maschine auf die Lebensdauererwartung am Beispiele des hoch beanspruchten Bauteils erarbeitet werden. Ein wichtiger Aspekt dieser Untersuchung ist der Aufbau eines vereinfachten Simulationsmodells, „Reduced Order Model“, kurz ROM, dass trotz der erforderlichen Abstraktion in der Lage ist den relevanten Schädigungsmechanismus akkurat zu beschreiben. Parallel hierzu werden Untersuchungen zu dem für dieses Bauteil relevanten Schädigungsmechanismus durchgeführt. Hierbei wird der zyklische Rissfortschritt unter Einfluss von Kriechen, Oxidation und thermomechanischer Ermüdung behandelt.

In AP 4.1 *Innovative Axialexpander für Verdichterstränge und thermische Speicher zur Dekarbonisierung industrieller Anwendungen* wird die Auslegungsmethodik für die Konstruktion von Expandern erweitert, die in Verdichtersträngen der Prozessindustrie und in thermischen Speichern eingesetzt werden. Durch die Ausnutzung von Restexergie und -wärme tragen sie wesentlich zur Dekarbonisierung industrieller Prozesse bei, deren Anteil am Ausstoß klimaschädlicher Gase erheblich ist. Für die genannten Anwendungen wird das Auslegungsverfahren für

hocheffiziente Expander erweitert und in einer Neuauslegung validiert. Hierzu wird der Strömungspfad der Maschine von Grund auf technisch neu bewertet. Eintrittsgehäuse, beschauelter Bereich inkl. Diffusor und Austrittsgehäuse werden mittels numerischer Methoden strömungsmechanisch optimiert. Eine hocheffiziente Beschaukelung wird entwickelt, die alle Prozessanforderungen erfüllt. Bei der thermo-mechanischen Auslegung des Expanders werden Werkstoffe für die anspruchsvollen Betriebsbedingungen und neueste Fertigungstechnologien qualifiziert. Hierzu wird eine materialtechnische Validierung hinsichtlich der Ermüdung unter Einfluss des Kriechens unter anspruchsvollen Bedingungen erarbeitet.

AP 4.2 *Schaufelinteraktion in Expansionsmaschinen für besondere Gase* bearbeitet die flexible Integration von Energiespeichersystemen. Die dafür essentiellen Bausteine bilden Turbomaschinen. Um diese wirkungsgradoptimal in volatilen Energieversorgungsnetzen der Zukunft einsetzen zu können, sind Kenntnisse über das Wirkungsgradverhalten der neu zu entwickelnden Beschaukelung und Einströmgeometrien notwendig. Neben diesem strömungsmechanischen und thermodynamischen Verhalten sind zudem die rotordynamischen Auswirkungen der flexiblen Betriebsweise auf die Gesamtmaschine zu analysieren. Für den Einsatz in innovativen Energiespeicher-Systemen sind Expansionsmaschinen auf Basis von Dampfturbinen weiter zu entwickeln. Diese Expander werden mit anderen Strömungsmedien betrieben, als dies bislang weitestgehend üblich war – wie z.B. CH_4 oder sCO_2 . Hierzu sind neue Beschaukelungen und Einströmgeometrien zu entwickeln. Es werden sowohl Messungen durchgeführt als auch numerische Verfahren erarbeitet und validiert. Dadurch soll eine Verbesserung der Vorhersagemöglichkeiten des Betriebsverhaltens bei hochgradig flexiblem Teillastbetrieb erreicht werden. Die zu untersuchenden Komponenten für axiale Expansions-Turbomaschinen können dann zukünftig in neuartigen Kreisprozessen eingesetzt werden.

AP 4.6 *Modellierung Verschleiß bei dynamischer Belastung* betrachtet Verschleißerscheinungen. Diese treten bei allen Bauteilen mit Kontakt auf und limitieren die Lebensdauer gerade bei Gasturbinen, die in flexiblem Betrieb eingesetzt werden. Zur Validierung eines im Verbundprojekt ECOFLEX-Turbo erarbeiteten Verfahrens und Absicherung eines ausreichenden Anwendungsbereichs werden in Ergänzung zu diesen bereits durchgeführten Grundlagenversuchen die Modellierungsansätze erweitert und damit weitere Materialpaarungen sowie Parameterbereiche untersucht. Für ein robusteres Design und erhöhte Flexibilität im Betrieb von Gasturbinen werden die bisher entwickelten analytischen Modelle zur Simulation von reibendem Verschleiß und schlagendem Kontakt auf eine weitere Werkstoffpaarung und im Modellierungsansatz für beschichtete Einkristalline erweitert. Hierzu muss die Versuchsvorgehensweise angepasst werden und eine Modellierung für die beschichteten Paarungen entwickelt werden.

3.1 Ergebnisse und Zusammenarbeit *TurboGrün*

Die in den einzelnen Arbeitspaketen erarbeiteten Erkenntnisse werden nicht nur zwischen den jeweiligen Projektpartnern ausgetauscht, was für den Projektfortschritt in den einzelnen Arbeitspaketen ohnehin zwingend notwendig ist, sondern sie werden auch in den regelmäßig (i.d.R. halbjährlich) stattfindenden Arbeitsgruppensitzungen präsentiert, diskutiert und dadurch mit den jeweiligen Expertengruppen für Verdichtung, Kühlung, Verbrennung und Expansion der Mitglieder von AG Turbo aus Industrie und Akademia geteilt. Die Verwertung der Einzelprojekte erfolgt gemäß Tabelle 2.

Tabelle 2: Verwertung der Ergebnisse aus den Einzelprojekten bei *TurboGrün*

AP	Ergebnis	Verwertung
3.2	Verbesserungen im Kühlungssystem von Hochtemperaturturbinen	+0,5% Komponenten-Effizienz
4.1	Verbesserte Auslegungssysteme	Verbesserte Aeroelastizität für Schaufeln ohne und mit Deckbändern Lastwechselrate +20%
4.2	Verbesserte Schwingungsdämpfung für große Schaufeln	Frühzeitige Erkennung von Bauteilschäden
4.6	Digitaler Zwilling für Betriebsüberwachung	Vorausberechnung der Ausfallwahrscheinlichkeit

4 Das AG Turbo Verbundprojekt *DigiTecT*

Das AG Turbo-Verbundprojekt *DigiTecT* – *Digitalisierung und interdisziplinäre Auslegungstechnologien von Turbomaschinen für die Energiewende* arbeitet in vier Hauptarbeitspaketen an folgenden Themen.

Für die Auslegung und Produkterstellung von Gasturbinen und deren Bauteilen wird eine durchgängige Digitalisierung der Entwicklungs- und Herstellprozesse angestrebt. Daraus leiten sich signifikante Anpassungen in den Abläufen mit einer stärkeren Virtualisierung und weitergehenden Simulationsansätzen über den gesamten Produktentstehungsprozess ab. Interdisziplinäre Simulationen sollen bereits in frühen Projektphasen eingesetzt werden. In dem Arbeitspaket „*Digitalisierung interdisziplinärer Auslegungsprozesse*“ werden diese Themenfelder adressiert.

Das Arbeitspaket „*Speicher und H₂-Anwendungen*“ widmet sich Verdichtern und Expansionskomponenten für Anwendungen in Speicherprozessen für die zukünftige, von Erneuerbaren

dominierte Energieinfrastruktur und in Prozessen der synthetischen Erzeugung klimaneutraler Brenngase. Für Turbinen und Expander, die in den Kreisprozessen der thermischen Speicherung eingesetzt werden, steht die Erweiterung der Auslegungssystematik für besondere Gasgemische und Wasserstoff in den Wärme- und Kältekreisläufen im Vordergrund. Unter anderem müssen besondere Maßnahmen zur Abdichtung getroffen werden, um die Ausströmung der Prozessgase in die Umgebung zu verhindern. Radialverdichter der Zukunft werden mit neu zu entwickelnden multidisziplinären Auslegungsverfahren berechnet und konstruiert.

Zum Erreichen der klimapolitischen Ziele wird der Anteil der Stromproduktion aus erneuerbaren Energien mit hoher Volatilität wie Photovoltaik oder Windenergie weiter steigen. Damit die Versorgungssicherheit gewährleistet wird, müssen Speicher die potentiellen Engpässe ausgleichen. Im geforderten großtechnischen Maßstab kommen hierfür insbesondere chemische Speicher wie Wasserstoff oder andere Kohlenwasserstoffe in Frage, die aus Strom zu Zeiten der Überproduktion synthetisiert wurden. Im Arbeitspaket „*Flexible GT für synthetische Brennstoffe*“ wird die dafür notwendige hohe Flexibilisierung der Stromerzeugung durch GT-basierte Kraftwerke adressiert. Dies führt zu einem häufigen schnellen An- und Abfahren von Gasturbinen in Kraftwerken. Für die flexible Anpassung der Energiebereitstellung gewinnen auch kleine Gasturbinen, die nach Bedarf zu- und abgeschaltet werden können, zunehmend an Bedeutung. Die Architektur von kleinen Anlagen unterscheidet sich z.T. deutlich von großen Maschinen (Radial- vs. Axialverdichter) und generell sind durch die größeren relativen Spalte in kleinen Gasturbinen die geforderten Wirkungsgradziele nur mit höherem Aufwand zu erreichen.

Der bisherige Einsatz von Gasturbinenkraftwerken im Grundlastbereich mit bis zu 8.000 Betriebsstunden im Jahr verliert durch den steigenden Anteil von erneuerbaren Energie zunehmend an Bedeutung. Durch die notwendige höhere Flexibilität im Betrieb werden deutlich mehr Zyklen mit transienten An- und Abfahrvorgängen erforderlich. Im Arbeitspaket „*Transienter Betrieb und Lebensdauer*“ werden u.a. der Einfluss auf Spalte und die damit verbundenen Verluste im transienten Betrieb untersucht. Die steigende Zyklenzahl begünstigt den Rissfortschritt und forciert damit die Materialermüdung. Dies kann die erreichbare Lebensdauer der Gasturbinenkomponenten erheblich reduzieren. Zum Erreichen möglichst langer Wartungsintervalle und Nutzungszeiten ist eine genauere Kenntnis und Modellierung der Schädigungsvorgänge durch die zyklische Belastung unabdingbar.

Abbildung 3 zeigt die Gesamtstruktur von *DigiTecT*. Blau umrahmt sind die Arbeitspakete, die der hier vorgestellten Gruppe Expansion zugeordnet sind.

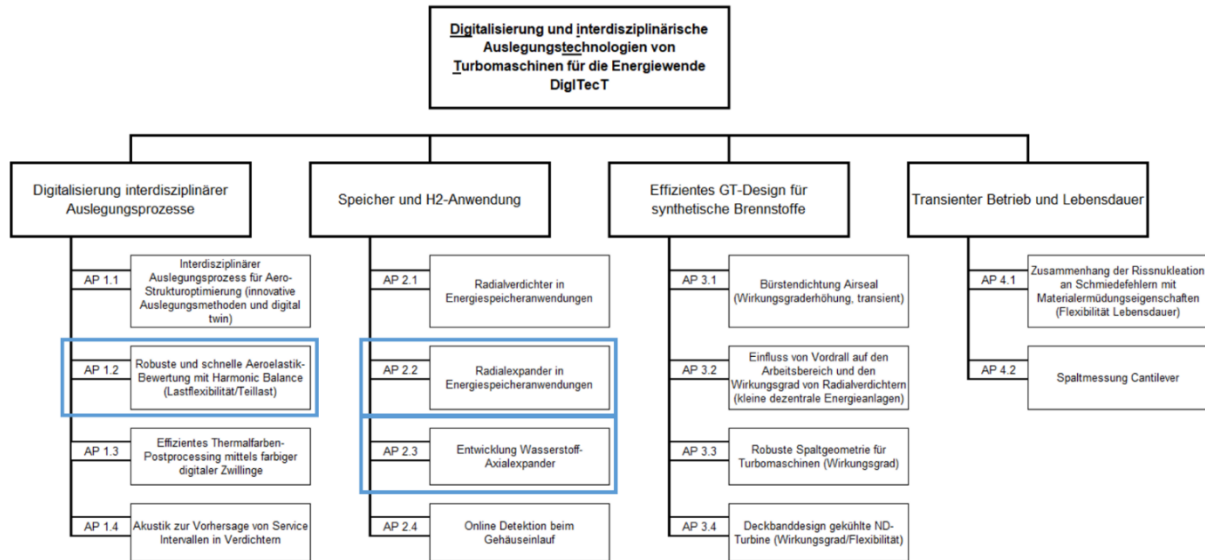


Abbildung 3: Übersicht der Arbeitspakete in *DigiTecT*

AP 1.2 Robuste und schnelle Aeroelastik-Bewertung mit Harmonic Balance. Mit dem Harmonic Balance (HB) Ansatz steht in TRACE ein hochwertiges Frequenzbereichsverfahren für instationäre Strömungssimulationen zur Verfügung, welches deutlich effizienter als konventionelle instationäre Zeitbereichsverfahren (URANS) bei akzeptablem Genauigkeitsverlust aerodynamische Bauteilanregungen berechnen kann. Nach mehreren erfolgreich gelaufenen Entwicklungsprojekten wird das Verfahren in der Industrie zunehmend in der Turbinen-Aeroelastik und –Akustik eingesetzt und löst die bisher eingesetzten, vereinfachten, aber bzgl. Rechenzeit oft schnelleren linearisierten Verfahren ab. Durch Erweiterungen des HB-Verfahrens zur Berücksichtigung von Nebenstromgeometrien (Kavitäten, Casing Treatments) soll zukünftig auch die aeroelastische Bewertung von Verdichtern ermöglicht werden. Aufgrund sekundärer (nicht-harmonischer) Instabilitäten konvergieren bis zu einem Drittel der Flutter-Simulationen mit dem vorhandenen HB-Verfahren nicht. Auslöser sind gerade in den aeroelastischen (Off-Design) Bewertungspunkten auftretende strömungsinduzierte Effekte wie Stoß-Grenzschicht-Wechselwirkungen und offene Ablösungen. In diesem Arbeitspaket werden durch eine verbesserte linke Seite der HB-Gleichungen sowie eine effiziente Berücksichtigung der sekundären Frequenzen robuste Bewertungen über die gesamte Flutter-Kurve mit HB in TRACE ermöglicht. Hierfür ist ein erhöhter Berechnungsaufwand zu erwarten, der die gestiegenen Durchlaufzeiten gegenüber vereinfachten linearisierten Verfahren nochmals erhöht. Um einerseits die Durchlaufzeiten der bisherigen HB-Modellierung für Flutter- und Forced-Response-Bewertungen signifikant zu verringern, und andererseits den höheren numerischen Aufwand durch die verbesserte Modellierung gegenüber dem jetzigen Stand zumindest zu kompensieren, werden verbesserte Lösungsalgorithmen entwickelt und implementiert. Um konvergierende und performante Flutter- und Forced Response-Bewertungen mit HB auch an durch sekundäre Instabilitäten gestörten Betriebspunkten zu gewährleisten, wird zunächst eine genauere Abbildung der linken Seite der HB-Gleichungen hinsichtlich der Fluss-Jacobi sowie der Berücksichtigung

höherer Harmonischer entwickelt. Es wird eine Strategie zur effizienten Berücksichtigung (d.h. ohne begleitende URANS-Simulationen) sekundärer Frequenzen im HB-Flutter-Prozess entwickelt und effiziente Lösungsalgorithmen z.B. auf Basis der SPLISS-Bibliotheken in HB implementiert. Durch bereitgestellte generische und industrielle Testfälle erfolgt die Evaluierung der Weiterentwicklungen.

AP 2.2 *Radialexpander in Energiespeicheranwendungen* behandelt die Effizienz und Wirtschaftlichkeit von Energiespeichern, die auf den Prinzipien der Kompression und Expansion von Gasen arbeiten. Diese hängt maßgeblich von den Wirkungsgraden der darin verwendeten Turbomaschinen ab. Auf der Expansionsseite des Prozesses kommen mehrstufige Radialexpander zum Einsatz. Zur Effizienzsteigerung dieser Expander müssen einzelne Komponenten bezüglich ihrer aerodynamischen Effektivität ertüchtigt werden. Neben der Effizienz des eigentlichen Expansionsprozesses spielen auch Nebeneffekte eine große Rolle. Beispielsweise entstehen in den Räumen zwischen dem rotierenden Laufrad und dem stehenden Gehäuse – den sogenannten Radseitenräumen - hohe Reibungsverluste, die die Effizienz der Expansion schmälern. Weiterhin entstehen aufgrund der hohen Druckniveaus hohe Schubkräfte, die den Einsatz entsprechender großer Gegenlager notwendig machen. Um die in den Lagern entstehenden Lagerverluste so klein wie möglich zu halten, ist es notwendig die Schubkräfte zu minimieren. Je nach der Art des Energiespeichers kommen unterschiedliche Fluide für den Prozess in Betracht. Diese Fluide unterscheiden sich in ihren Eigenschaften zum Teil erheblich voneinander. Dies hat Auswirkungen auf die genaue Gestaltung der aerodynamischen Komponenten. Es erfolgen detaillierte experimentelle Vermessungen der Strömung durch einen Expander, der für den flexiblen Betrieb mit unterschiedlichen Medien ausgelegt ist. Der Fokus der Messungen ist die Erfassung der Verlustquellen, insbesondere derjenigen, die in den Radseitenräumen entstehen. Zudem wird ein Modell zur aerodynamischen Vorauslegung eines Expanders für den Betrieb mit verschiedenen Medien erstellt, welche ein Realgasverhalten aufweisen.

AP 2.3 *Entwicklung Wasserstoff-Axialexpander*. Zur weiteren Reduzierung der CO₂ Emissionen, insbesondere in energieintensiven Industrieanlagen, soll grün produzierter Wasserstoff als Brennstoffersatz für fossile Energieträger eingesetzt werden. Der mittels Windenergie produzierte Wasserstoff soll zum Teil unter Verwendung des bestehenden Erdgasnetzes vom Elektrolyseur aus verteilt werden. Zur Zwischenspeicherung des Wasserstoffs kann dieser in geologisch geeigneten Kavernen gelagert werden. Zur Lagerung wird das Medium auf einen vielfach höheren Druck komprimiert als er im Netz zur Verfügung steht. Wird das Medium aus der Kaverne wieder dem Netz zugeführt, muss es wiederum auf den Netzdruck expandiert werden. Zur optimalen Nutzung der dabei zur Verfügung stehenden potentiellen Energie erfolgt die Expansion über eine Expansionsmaschine, welche einen Generator antreibt. Die spezielle Auslegung der für diesen Einsatz geeigneten Expansionsmaschinen lässt sich unter anderem prinzipiell aus dem Design von Dampfturbinen oder Axialexpandern ableiten. Da das zu expandierende Medium allerdings gegenüber z.B. Dampf oder Luft deutlich andere Eigenschaften hat, ergeben sich einige wesentliche Änderungen im Design einer solchen Maschine. Wichtige Unterschiede zu konventionellen Expandern liegen in der Flüchtigkeit des Gases,

welche besondere Vorkehrungen zur Abdichtung erforderlich machen, und im niedrigen Molekulargewicht. Letzteres führt dazu, dass mit der üblichen Beschaukelung viele Stufen und sogar mehrere Maschinengehäuse notwendig werden. Zusätzlich bewirkt die Wasserstoffversprödung eine Absenkung der Materialeigenschaften der Turbine. Um den Wirkungsgrad sowie die Kosten und damit die Wirtschaftlichkeit einer solchen Maschine zu verbessern, soll im Rahmen dieses Projekts sowohl die Beschaukelung wie auch die Maschinenauslegung optimiert werden.

4.1 Ergebnisse und Zusammenarbeit *DigiTecT*

Die von den Industrieunternehmen selbst und deren universitären Partnern erarbeiteten Ergebnisse fließen unmittelbar in die Entwicklung bzw. Weiterentwicklung moderner Turbomaschinen ein, die einen aktiven Beitrag zu den Zielen des 7. Energieforschungsprogramms „Innovationen für die Energiewende“ leisten. Damit wird die deutsche Energieindustrie in die Lage versetzt, weiterhin eine führende Rolle auf dem Weltmarkt für emissionsarme, hocheffiziente, äußerst flexible und den Anforderungen der Energiewende gerecht werdenden Turbomaschinen zu spielen. Die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Energieindustrie wird somit im internationalen Vergleich gestärkt, was letztlich auch bei einer aktuell nachlassenden Nachfrage nach Turbomaschinen zum Erhalt von hochqualifizierten Arbeitsplätzen in Produktion, Betrieb und Service bei in Deutschland ansässigen Herstellern von Turbomaschinen führt. Die Verwertung der Einzelprojekte erfolgt gemäß Tabelle 3.

Tabelle 3: Verwertung der Ergebnisse aus den Einzelprojekten bei *DigiTecT*

AP	Ergebnis	Verwertung
1.2	Aeroelastik-Bewertung mit HB	Lebensdauersteigerung > 20%
2.2 2.3	Anpassung von Radial- und Axialexpandern an neue Anforderungen	Ertüchtigung der Turbomaschinen für Energiespeicher und H ₂

5 Ausblick auf die laufenden und gerade gestartete AG Turbo Vorhaben *TurboHyTec*, *TurboTrans* und *FokusTurbo*

Die Auswahl der von der AG Turbo initiierten Projekte orientiert sich an den Vorgaben der Energieforschungsprogramme der Bundesregierung, die die Umsetzung der Klimaziele der EU entscheidend vorantreiben sollen.

In der Definition neuer Arbeitspakete in den neuen Verbundprojekten der AG Turbo *TurboHyTec* – Turbomaschinen für Hydrogen Technologien, *TurboTrans* – Turbomaschinen für die Transformation in das integrierte Energiesystem der Zukunft und *FokusTurbo* – Flexible Turbomaschinen für klimaneutrale und resiliente Energiesysteme wird das widersgespiegelt.

Nachfolgende Abbildungen 4 bis 6 zeigen die jeweiligen Projektstrukturen der neuen Vorhaben (blau umrahmt bzw. grau unterlegt die Arbeitspakete der Gruppe Expansion).

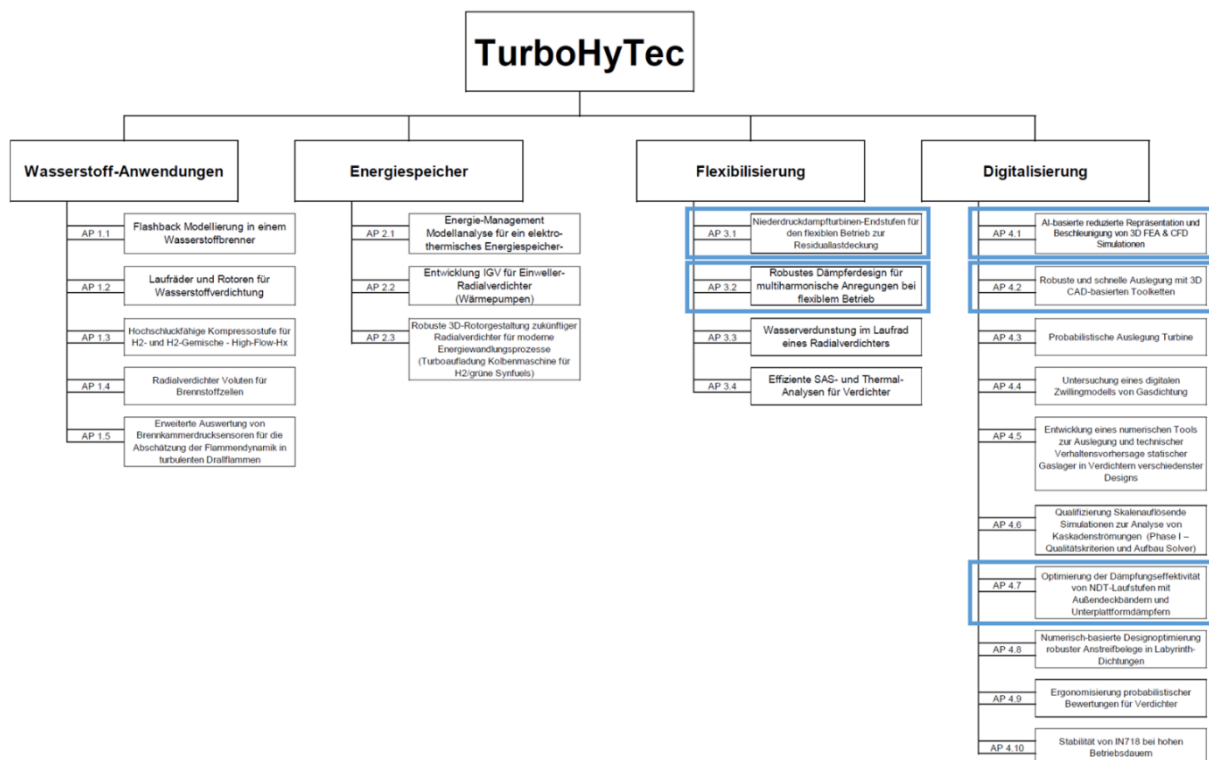


Abbildung 4: Übersicht der Arbeitspakete in *TurboHyTec*

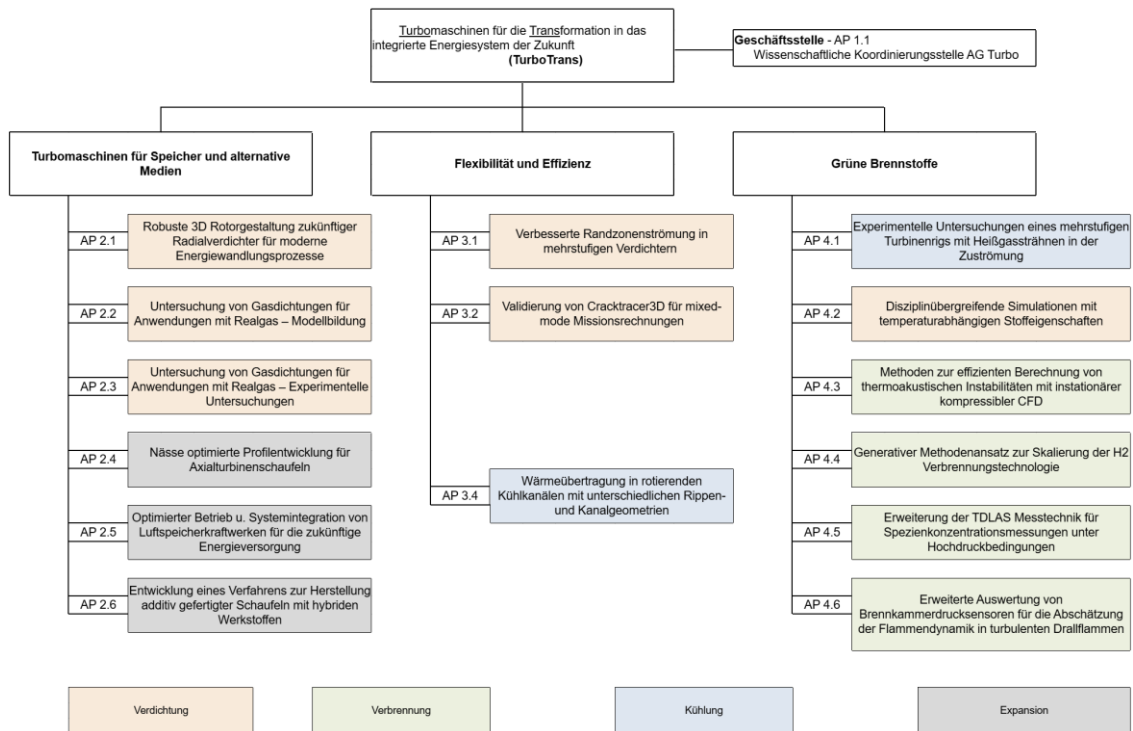


Abbildung 5: Übersicht der Arbeitspakete in *TurboTrans*

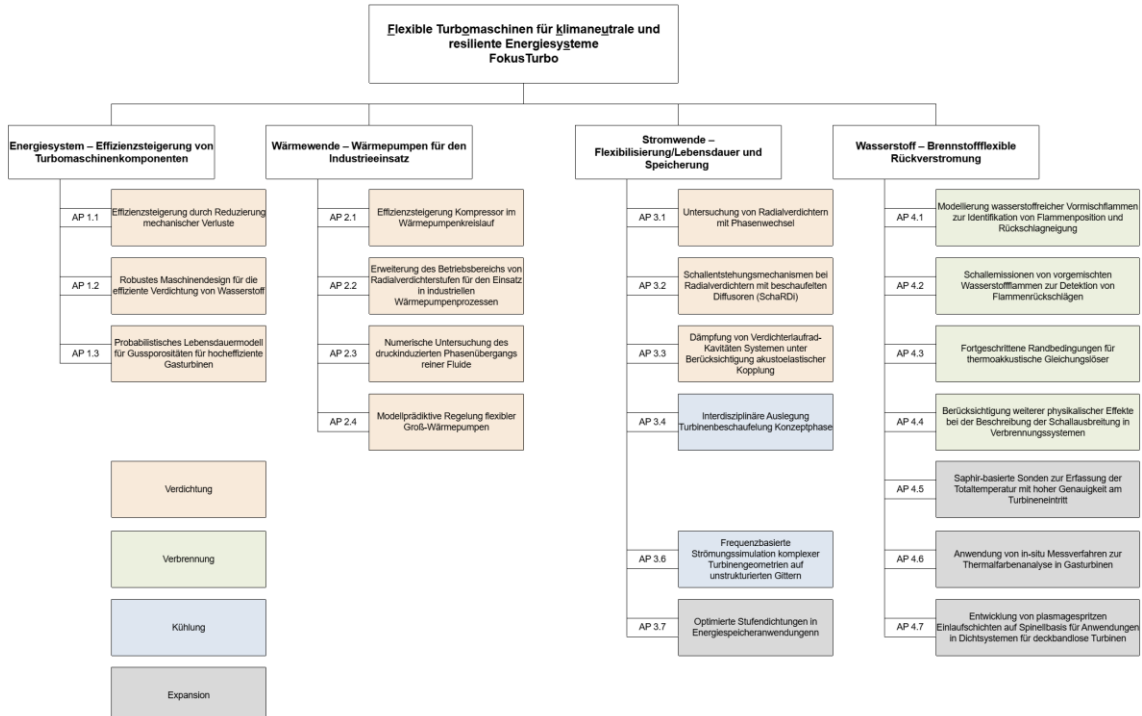


Abbildung 6: Übersicht der Arbeitspakete in *FokusTurbo*

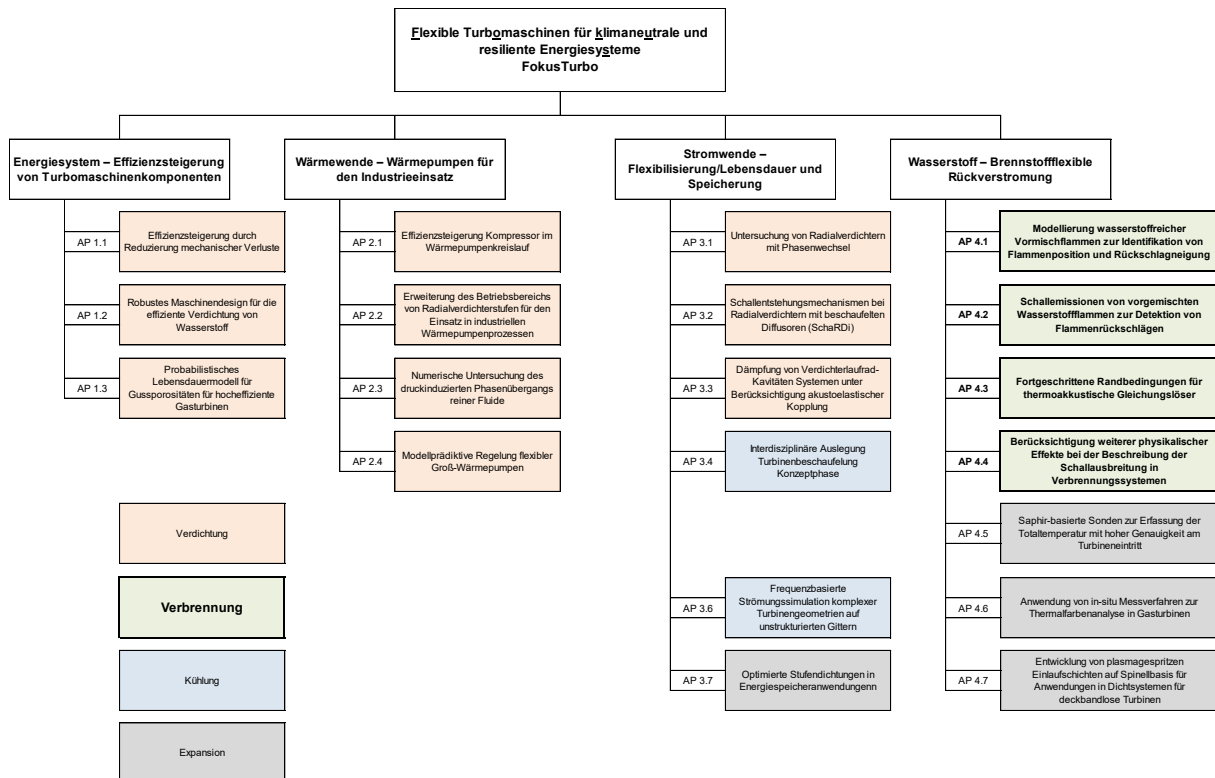


Abbildung 1: Übersicht der Arbeitspakete in FokusTurbo

Zu den wichtigen Themen gehören u.a. die Gewährleistung und Überwachung der Lebensdauer bei flexiblem Betrieb. Ein Augenmerk richtet sich dabei auf Hochtemperaturbauteile in der Brennkammer und den Expansionsturbinen von Gasturbinen, um die Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit von thermischen Kraftwerken im Verbund mit den Erneuerbaren zu gewährleisten. Dies ist insbesondere dann wichtig, wenn Kraftwerke für die zuverlässige Bereitstellung von schnellen Stromreserven eingesetzt werden. Dies bedeutet, dass eine zuverlässige Aufnahme des Ist-Zustandes der Bauteile vorgenommen werden muss, um daraus eine Restlebensdauer und damit Wartungsintervalle für die Verfügbarkeit und einen zuverlässigen Betrieb ermitteln zu können. Auch das Thema Betriebsüberwachung (condition based monitoring) ist durch Arbeitspakete der Partner abgedeckt bis hin zur Entwicklung von sogenannten Digital Twins zur Online-Bewertung von Abweichungen vom Normalbetrieb. Da der Schwerpunkt auf Heißgasbauteilen liegt, werden zahlreiche dieser Arbeitspakete im Teilverbundprojekt „Expansion“ bearbeitet. In diesem Themengebiet setzt sich die bewährte fruchtbare Zusammenarbeit mit den Herstellern von Flugtriebwerken fort, da die digitale Betriebsüberwachung dort bereits weit entwickelt ist und sich zahlreiche Synergien mit den stationären Anlagen ableiten lassen.

Dies gilt auch für die Digitalisierung des Produktentstehungsprozesses. Hier ist die Entwicklung von interdisziplinären Expertensystemen zu nennen, die z.B. für die Auslegung von gekühlten Hochtemperaturturbinen im Teilverbundprojekt Expansion von großer Bedeutung ist, wo die Disziplinen Aerodynamik, Wärmetechnik und Mechanik noch stärker als bisher miteinander vernetzt werden müssen. Ebenfalls in der Behandlung aero-elastischer Auslegungsaufgaben für besonders gefährdete Bauteile wie lange Turbinenschaufeln sind nach wie vor Modellexperimente und Entwicklung leistungsfähiger transienter Methoden notwendig. Schließlich ist in diesem Zusammenhang zu nennen, dass probabilistische Auslegungsmethoden weiter vertieft angegangen werden bis hin zu Auslegungsverfahren, die vollständig auf der Mitnahme der Realgeometrien basieren.

Neben der Anpassung der Kraftwerkskomponenten an den Betrieb mit einem hohen Anteil von Erneuerbaren spielt die Frage der Speicherung von Strom aus volatilen regenerativen Energiequellen eine dominante Rolle, ohne die ein weiterer Ausbau von Solar- und Windkraftanlagen nicht sinnvoll wäre. Für die Sektorenkopplung werden Power-to-Gas Anlagen eine Schlüsselrolle spielen, die die Basis für die Herstellung von grünen Kraftstoffen für den schweren Transportbereich und die Luftfahrt sein werden. In den Herstellungsprozessen dieser grünen Kraftstoffe sind Turbomaschinen, Verdichter und Expansionsturbinen, essenziell.

Zudem werden mechanischen und thermischen Speichern wichtige Aufgaben zukommen, in denen Verdichter und Expander benötigt werden, die für die Hochtemperatur- und Hochdruckanwendungen weiter bzw. neu entwickelt werden müssen. Dabei steht auch der Gedanke im Fokus, dass alternative Arbeitsmedien wie etwa Wasserstoff oder superkritisches Kohlendioxid (sCO_2) verarbeitet werden müssen.

Zusammenfassend ergibt sich, dass auch in der zukünftigen klimaneutralen Welt in zahlreichen Prozessen der Energiewandlung auf den Einsatz von Turbomaschinen zur Verdichtung und Expansion nicht verzichtet werden kann. Auch mit grünen Wasserstoff befeuerte Gaskraftwerke werden für die Überbrückung von saisonalen Dunkelflauten unverzichtbar sein, da sie im kombinierten Prozess (GuD oder KWK) höchste Brennstoffausnutzungsgrade und damit relativ hohe Rückverstromungswirkungsgrade für synthetisch hergestellte Brennstoffe gewährleisten. Die AG Turbo und ihre Partner tragen dazu bei, dass in der Zusammenstellung innovativer Projekte diese Aufgaben angegangen werden können, um die technologische Spitzenstellung der deutschen Turbomaschinenindustrie zu sichern und weiter auszubauen.

Expansion

Verbundprojekt „RoBoFlex - Robuste Turbomaschinen für den flexiblen Einsatz“

Teilverbundprojekt Expansion

Vorhabengruppe „Turbinenbetrieb im Verbund mit Erneuerbaren“

„Untersuchungen der Strömungsbedingungen in Axial-Radial-Diffusoren für flexible Einsatzbedingungen“

Vorhaben-Nr.: 1.5 a & b

verfasst von

**A. Fomina, M. Maqueo (Univ. Stuttgart),
T. Willeke (Everllence)**

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das dem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wird von Everllence SE und mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWE) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages unter dem Förderkennzeichen 03EE5012C, 03EE5013C gefördert.

Abstract

The project is carried out in collaboration between University of Stuttgart and Everllence and aims at the further development and validation of numerical methods for axial-radial diffusers. The scope of the project encompasses two key areas of focus: the development of a suitable numerical method and the modification of the diffuser geometry to increase efficiency.

The first objective focuses on the development of a new diffuser test rig and subsequently the simulation model to enable high-accuracy flow measurements at various operating points and to validate the numerical results in detail. Various operating points were examined, and the resulting data were subsequently used to develop the methodology for the numerical flow simulations. The choice of turbulence modelling is crucial for the result quality. For example, the EARS model performs better than classical two-equation models. Finally, based on the obtained results, best-practice recommendations were formulated for flow simulations of axial-radial diffusers.

For the second objective, a diffuser geometry was modified with the aim of increasing pressure recovery and reducing pressure losses. The modified design was then investigated numerically and experimentally both at ITSM diffuser test facility and at a Everllence hot-gas facility to assess the aerodynamic differences compared to the initial design. The pressure rise of the modified geometry could be demonstrated for the investigated operating points. However, it did not obtain the expected improvement in efficiency.

Kurzfassung

Das Projekt zielt auf die Weiterentwicklung und Validierung von Berechnungsmethoden für Axial-Radial-Diffusoren ab und wurde in Zusammenarbeit zwischen der Universität Stuttgart und Everllence durchgeführt. Die Untersuchungen fokussierten sich auf zwei zentrale Schwerpunkte: Die Entwicklung einer geeigneten Methode zur Strömungssimulation, sowie den Entwurf einer Diffusorgeometrie mit erhöhtem Wirkungsgrad.

Im ersten Projektabschnitt wurde ein neuer Diffusorversuchsstand an der Universität Stuttgart aufgebaut, um die Diffusorströmung hochgenau bei verschiedenen Betriebspunkten messtechnisch erfassen zu können. Der Versuchsstand wurde in einem Simulationsmodell zur Strömungsberechnung abgebildet, um die Simulationsergebnisse in der Detailvalidierung mit den Messergebnissen der verschiedenen Messeinrichtungen abzugleichen. Dabei zeigte sich, dass je nach Betriebspunkt unterschiedliche Parameter des Simulationsmodells zu einer besseren Übereinstimmung mit den Messdaten führen. Insbesondere der Ansatz zur Turbulenzmodellierung ist entscheidend für die Strömungsvorhersage. Zum Beispiel zeigt das EARS-Modell eine bessere Eignung als klassische Zwei-Gleichungsmodelle. Abschließend wurden basierend auf den erzielten Ergebnissen Best-Practice-Empfehlungen für die Strömungssimulation von Axial-radial-Diffusoren abgeleitet.

Im zweiten Projektabschnitt wurde eine ausgewählte Diffusorgeometrie zur Steigerung des Druckrückgewinns und Reduktion der Verluste modifiziert und anschließend numerisch und experimentell am Diffusorprüfstand des ITSM Universität Stuttgart, sowie an einem Heißgasprüfstand von Everllence untersucht, um die aerodynamischen Unterschiede zum Initialdesign zu bewerten. Der Druckanstieg der modifizierten Geometrie konnte für die untersuchten Betriebspunkte nachgewiesen werden, er führte jedoch nicht zu der erwarteten Verbesserung des Wirkungsgrads.

1 Einleitung

Das gesamte Verbundvorhaben „RoboFlex“ (Robuste Turbomaschinen für den flexiblen Einsatz) leistet einen aktiven Beitrag zu den Zielen der 6. und 7. Energieforschungsprogramme „Forschung für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung“ [1] und „Innovationen für die Energiewende“ [2]. Im Zuge der Energiewende steigt der Anteil erneuerbarer Energien kontinuierlich an. Dadurch werden neue Fahrweisen erforderlich, die bestehende Turbomaschinen vor zusätzliche Herausforderungen stellen. Ein Betrieb außerhalb des Auslegungsbereichs sowie schnelle Anfahrvorgänge können zu erhöhtem Verschleiß, deutlichen Wirkungsgradeinbußen im Teillastbetrieb und einer verkürzten Lebensdauer führen. In dem vom Institut für thermische Strömungsmaschinen und Maschinenlaboratorium (ITSM) der Universität Stuttgart und Everllence bearbeiteten Arbeitspaket 1.5: „Numerische und experimentelle Untersuchungen zu einem axial-radial Turbinendiffuser“ werden die Herausforderungen des Betriebs von Maschinen im Kontext erneuerbarer Energien aufgegriffen: Stabilität, Lebensdauer und Effizienz im fluktuierenden Lastfolgebetrieb.

Axial-Radial-Diffusoren werden üblicherweise sowohl in fossil gefeuerten, solarthermischen und geothermischen Kraftwerken, als auch am Austritt von Turbinen von Turboladern für (Bio-)Gasmotoren oder große Schiffantriebe nachgeschaltet [3]. Diese Anwendungsbereiche erfordern eine sehr kompakte Bauweise mit hohen spezifischen Durchsätzen bei gleichzeitig hohen Wirkungsgraden, was zur namensgebenden axial-radialen Bauweise führt. Große Durchsätze in kompakten Turbinenbauteilen führen zu hohen Strömungsgeschwindigkeiten und damit zu tendenziell steigenden Druckverlusten insbesondere in den Gehäusen der Turbine.

Die Strömung besitzt am Austritt des Turbinenrotors einen Restanteil an kinetischer Energie, der anschließend in den nachgeschalteten Komponenten dissipiert wird und somit zum Gesamtdruckverlust der Anlage beiträgt. Die Höhe der Verluste hängt im Wesentlichen von der Strömungsgeschwindigkeit ab. Eine Strömungsverzögerung führt demzufolge zu einer Verbesserung des Gesamtwirkungsgrads, weshalb stromab des Rotors ein Diffusor eingesetzt wird. Zwei Effekte tragen zur Wirkungsgradsteigerung bei: Erstens sinkt der Gegendruck am Turbinenaustritt, wodurch das Enthalpiegefälle in der Turbine vergrößert und damit die spezifische Leistung der Turbinenstufe erhöht wird. Zweitens werden durch die Reduktion der Strömungsgeschwindigkeit die Totaldruckverluste verringert. Die verbesserte Prognostizierbarkeit der Strömungsbedingungen in Axial-Radial-Diffusoren sowie deren optimale Auslegung liefern

einen Beitrag zu effizienteren Anlagen und einer insgesamt verbesserten Auslegung zukünftiger Turbomaschinen.

Durch das komplexe Strömungsfeld mit Grenzschichtablösungen stellt der Axial-Radial-Diffusor eine besondere Herausforderung für die numerische Modellierung dar. In den vergangenen Jahren wurden zahlreiche Studien durchgeführt. Dabei wurden mehrere Ansätze verwendet, um die Modelle zu validieren. Allerdings basiert ein großer Anteil numerischer Studien auf einer sehr eingeschränkten Anzahl von Messdaten. Zum Teil wird eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Versuch und Simulation berichtet, jedoch kommt es vor allem im Off-Design-Bereich zu erheblichen Abweichungen. Die Studie von Beevers et al. [4] verdeutlicht unter anderem, dass die numerischen Berechnungen den Druckrückgewinn im Vergleich zu Messdaten eines skalierten Versuchsstands teilweise erheblich überschätzen. Dies ist konsistent mit den Ergebnissen aus dem Bereich der Strömungssimulation von Axialdiffusoren durch Brouwer und Vogt [5]. Eine gute Übereinstimmung kann mit dem Shear-Stress-Transport-Modell (SST) von Menter [6] erzielt werden, wie beispielsweise Stein et al. [7], Guillot et al. [8] oder Munyoki et al. [9] berichten. In diesen drei Veröffentlichungen werden die numerischen Ergebnisse mithilfe von Messdaten aus einem skalierten Turbinenversuchsstand von Stein et al. [7] oder aus einem skalierten Diffusorversuchsstand wie bei Guillot et al. [8] oder Munyoki et al. [9] ohne rotierende Komponenten validiert. Es ist festzustellen, dass es bislang keinen umfassend validierten Überblick über die Eignung verschiedener Turbulenzmodelle bis hin zu skalenadaptiven Verfahren wie von Menter und Egorov [10] und Kopplungsverfahren zwischen dem stationären und rotierenden System für die numerische Berechnung von Axial-Radial-Diffusoren gibt. In Bezug auf die Notwendigkeit der Auslegung von effizienten Diffusoren besteht dementsprechend eine erhebliche Wissenslücke [3].

Die Arbeitsziele und Vorgehensweise in AP 1.5 lassen sich in folgende Meilensteine aufteilen.

1. Eine umfangreiche Messkampagne mit verschiedenen Axial-Radial-Diffusoren unter unterschiedlichen Strömungsbedingungen: Hierzu wurde der Versuchsstand an die untersuchten Gehäusegeometrien und Betriebsbedingungen angepasst. Begleitend dazu wurden stationäre und instationäre Strömungssimulationen der untersuchten Axial-Radial-Diffusoren mit verschiedenen Modellansätzen durchgeführt. Auf Basis der Messergebnisse wurden die numerischen Resultate validiert und geeignete Simulationsmethoden analysiert (Best-Practice-Guidelines).
2. Die Entwicklung eines modifizierten Axial-Radial-Diffusors mit gesteigertem Druckrückgewinn und reduzierten Verlusten: Durchführung einer numerischen Design-of-Experiment-Studie und anschließenden Messungen mit der ursprünglichen und der modifizierten Diffusorgeometrie am Heißgasprüfstand (Everllence) sowie Diffusor Prüfstand (Univ. Stuttgart) sowie die Analyse der Ergebnisse.

2 Detaillierung

Die folgenden Unterabschnitte geben einen Überblick über die wesentlichen Ergebnisse des Projekts. Zunächst werden der Versuchsstand und die verfügbaren Messmöglichkeiten vorgestellt. Anschließend folgt eine kurze Zusammenfassung der durchgeführten numerischen Studien. Darauf aufbauend wird ein Blick auf die Validierung der Ergebnisse geworfen. Abschließend erfolgt eine Zusammenstellung der wichtigsten Best-Practice-Guidelines.

Der zweite Teil umfasst einen Überblick über die vorgenommenen geometrischen Untersuchungen sowie einen kurzen Vergleich zwischen der initialen und der modifizierten Geometrie, wie er im Rahmen der experimentellen Analyse durchgeführt wurde.

2.1 Experimentelle Messkampagne und numerische Studien

Messungen am ITSM

Der bereits in früheren Messkampagnen eingesetzte Versuchsstand [11] wurde für dieses Projekt umfassend angepasst. Von Everllence wurden hierfür Geometriedaten für zwei Turbinenabströmgehäuse, im weiteren Diffusor A und B genannt, sowie die zugehörigen strömungsmechanischen Randbedingungen bereitgestellt. Der Axial-Radial-Diffusor-Prüfstand am ITSM der Universität Stuttgart ist modular aufgebaut, siehe Abbildung 1. Die Hauptbestandteile umfassen den Haupteinlasskanal, das Siebgewebe, den Drallerzeuger, die Spaltströmungseinblasung sowie den Diffusor mit Abströmgehäuse, wodurch ein flexibler Austausch der jeweiligen Komponenten ermöglicht wird.

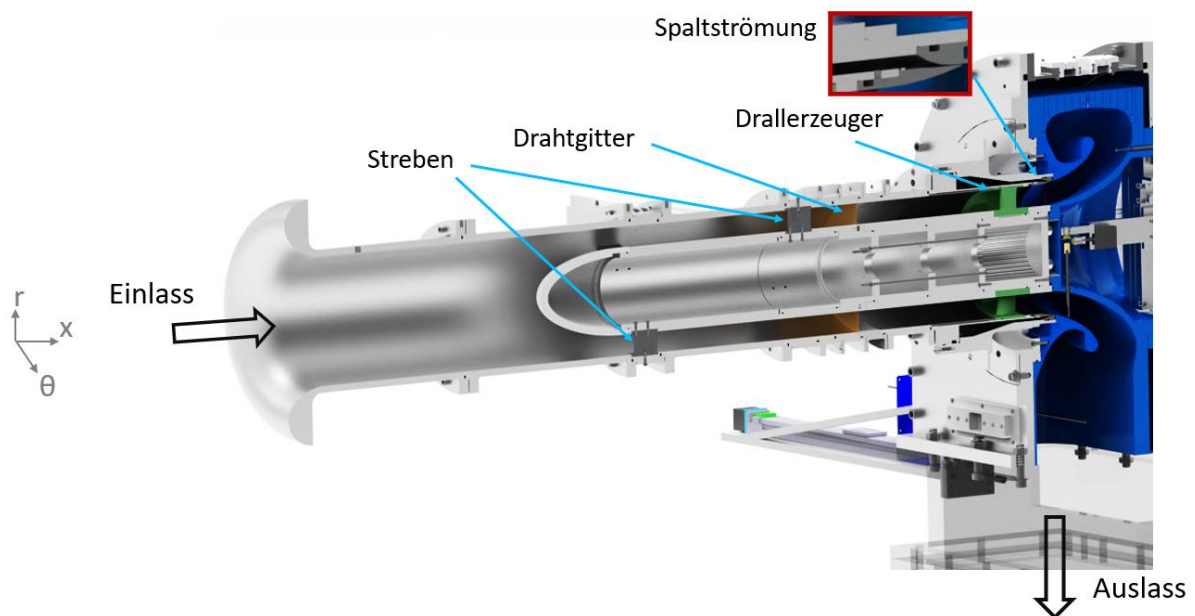


Abbildung 1: ITSM Axial-Radial-Diffusor-Versuchsstand, aktueller Aufbau

Die Versuchsanlage wird mit Umgebungsluft als Arbeitsmedium betrieben, wobei die Luft durch einen am Auslass nachgeschalteten Kompressor im Saugbetrieb angesaugt wird und

ein zweiter Kompressor die für die Spalteinblasung erforderliche Strömung im Überdruck bereitstellt. Die Strömung wird am Einlasskanal angesaugt und nach der Stabilisierung im Einlasskanal durch ein Siebgewebe geführt, das die Einstellung eines Totaldruckprofils ermöglicht (gehäuse- oder nabenbetont, abhängig vom Betriebspunkt). Anschließend werden die für die Strömung erforderlichen Anströmwinkel über einen stationären Drallerzeuger erzeugt. Die Spaltströmung, die in der Turbine infolge des Rotorspalts entsteht, wird durch eine zusätzliche Lufteinblasung nachgebildet, deren Massenstrom ebenfalls abhängig vom Betriebspunkt eingestellt wird.

Im Diffusorversuchsstand werden Strömungsgrößen an mehreren Messpositionen erfasst. Eine Übersicht über die räumliche Lage der Messstellen sowie die Nomenklatur ist in der Tabelle 1 sowie Abbildung 2 gegeben. In den Messebenen PL0 bis PL3 werden pneumatische Sondenmessungen mithilfe verschiedener Traversen durchgeführt. Der Prüfstand verfügt darüber hinaus über mehr als 180 Messpositionen für statische Wanddrücke. Das Rotationssystem an der Nabe ermöglicht eine Messung in jeder beliebigen Umfangsposition, dies gilt für sowohl für die Messung der Wanddrücke an der Diffusornabe als auch für die Sonden am Diffusoreinlass (PL1) und -auslass (PL2).

Tabelle 1: Nomenklatur der Messpositionen (ITSM-Versuchsstand)

Name	Position im Versuchstand	
PL0	Stromabwärts des Drahtgitters	Messung radial, eine Umfangsposition
PL1	Diffusoreinlass	Messung radial, rotierbar am Umfang
PL2	Diffusorauslass	
PL3	Gehäuseauslass	Feste Höhenposition
Wanddrücke	Diffusorgehäuse	10 Druckmessstellen x 8 Umfangspositionen
	Nabe	axial 10 (stationär) & 4 (transient) Messstellen, rotierbar in Umfangsrichtung
	Gehäusewand	14 Druckmessstellen x 5 Umfangspositionen
	Auslassebene	12 Messstellen an vorderer Wand 12 Messstellen an hinterer Wand

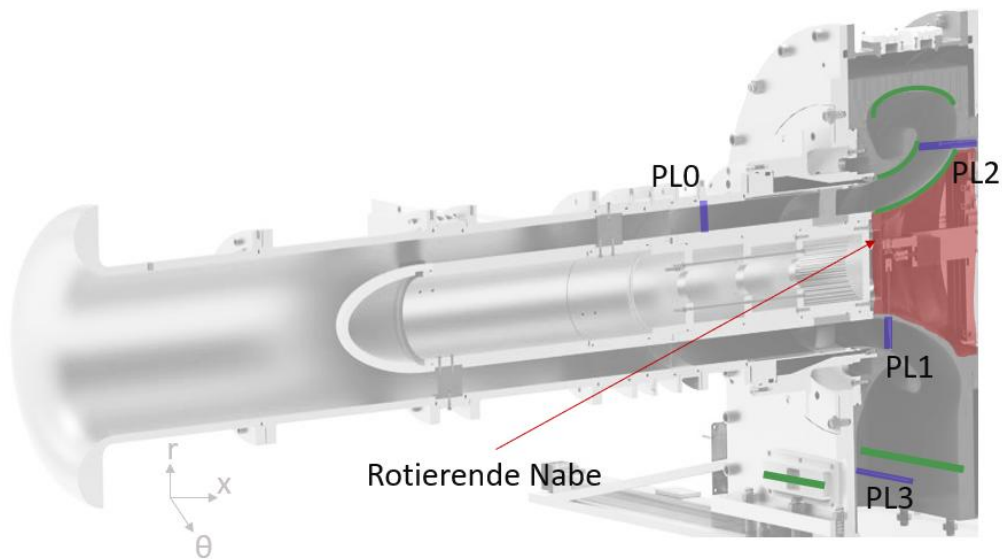


Abbildung 2: Position der Messebenen am Axial-Radial-Diffusorversuchsstand)

Um die Messdaten von den täglich schwankenden Umgebungsbedingungen zu entkoppeln und mit den Simulationsergebnissen zu vergleichen, wird der korrigierte Massenstrom mit den Normbedingungen ($p_{norm} = 101325 \text{ Pa}$ und $T_{norm} = 288 \text{ K}$) normiert.

Für die experimentelle und numerische Analyse sowie die Validierung werden der Druckrückgewinnungs- und der Druckverlustkoeffizient wie folgt definiert.

$$c_p = \frac{\hat{P}_{stat-Ebene} - \hat{P}_{stat-diff.in}}{\tilde{P}_{tot-diff.in} - \hat{P}_{stat-diff.in}} \quad \zeta = \frac{\tilde{P}_{tot-diff.in} - \tilde{P}_{tot-Ebene}}{\tilde{P}_{tot-diff.in} - \hat{P}_{stat-diff.in}} \quad (1)$$

Dabei ist $\hat{P}$ der flächengemittelte statische Druck und $\tilde{P}$ der massenstromgemittelten Gesamtdruck der jeweiligen Messebene.

Numerische Studien

Aufgrund der Umlenkung der Strömung von der axialen in die radiale Richtung im Diffusor und der daraus resultierenden starken Strömungsverzögerung kommt es zu Grenzschichtablösungen und zur Bildung von Rückströmungsgebieten. Diese Ablösebereiche hängen stark von der Diffusorgeometrie sowie von den Strömungsbedingungen im Diffusor ab. Zusätzlich führt die asymmetrische Gestaltung des anschließenden Sammelraums zur Ausbildung zweier großer Wirbel im Gehäuse, die zu deutlichen Abweichungen und Instabilitäten in den numerischen Lösungen führen können. Abbildung 3 illustriert beispielhaft, wie sich die Strömungslinien im Diffusor in Abhängigkeit vom Betriebspunkt entwickeln; die Betriebspunkte sind dabei in der

Reihenfolge abnehmender Einlassströmungswinkel angeordnet. Die Betriebspunkte Drallzeuger (DE) Nr. 1 und Nr. 2 bilden dabei Volllastbetriebspunkte ab und DE Nr. 3 R und L sind verschiedene Massenströme im Teillastbetrieb.

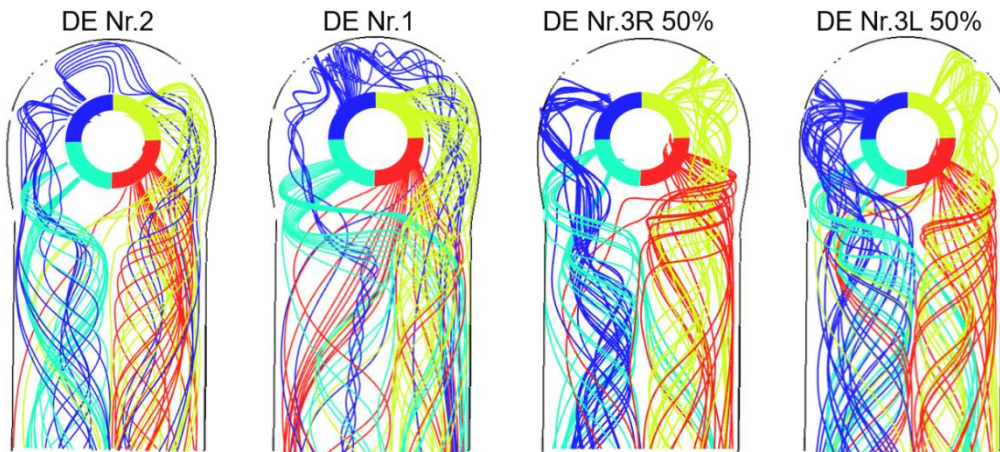


Abbildung 3: Stromlinien im Diffusor B für verschiedene Betriebspunkte

Die beschriebenen Strömungsphänomene bilden eine wesentliche Herausforderung für die numerischen Vorhersagemodelle. Um die Sensitivität der Lösung bezüglich verschiedener Parameter des Setups zu untersuchen, wird eine erweiterte Studie durchgeführt. Ergänzend zur globalen Netzverfeinerungsstudie für mehrere Betriebspunkte werden zusätzliche Untersuchungen mit lokalen Netzverfeinerungen durchgeführt. Diese Art der Vernetzung erwies sich insbesondere für Teillastbetriebspunkte als vorteilhaft. Die Ergebnisse für gemittelte Druckrückgewinne für zwei Kontrollvolumen (PL1-PL2 und PL1-PL3) sind in Abbildung 4 dargestellt. Für den Teillast-Betriebspunkt wird deutlich, dass ein grobes Netz mit lokaler Verfeinerung zufriedenstellende Ergebnisse liefert, während die Ergebnisse für den Volllast-Betriebspunkt eine starke Abhängigkeit von der Netzstruktur aufweisen. Zusätzlich treten numerische Instabilitäten auf, die im Diagramm durch Fehlerbalken gekennzeichnet sind.

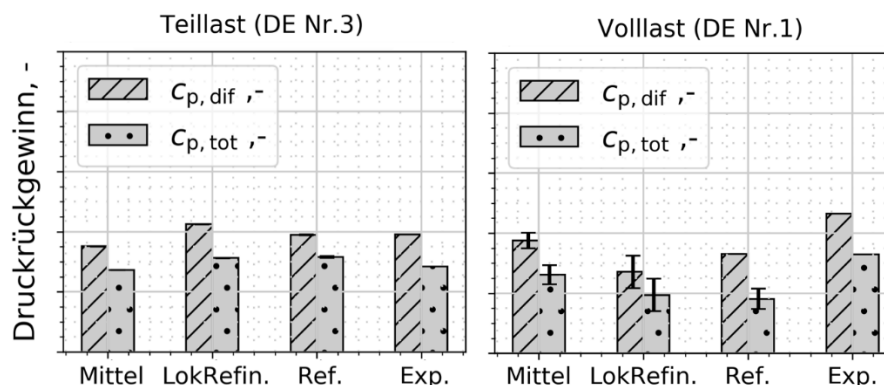


Abbildung 4: Druckrückgewinn im Diffusor und für das Gesamtmodell für zwei untersuchte Betriebspunkte unter Verwendung unterschiedlich feiner Netze im Diffusor

Darüber hinaus zeigt sich, dass Änderungen der Turbulenzintensität im Diffusor maßgeblich die Vorhersage der Rückströmungsgebiete beeinflussen. Abbildung 5 zeigt einen klaren Trend dieser Untersuchung: Mit steigender Turbulenzintensität am Eintritt nimmt der Druckrückgewinn zu. Die beiden Vollast Betriebspunkte DE Nr. 1 und DE Nr. 2 zeigen, dass eine Turbulenzintensität von 8 % am Einlass zur besten Übereinstimmung mit den experimentellen Daten führt.

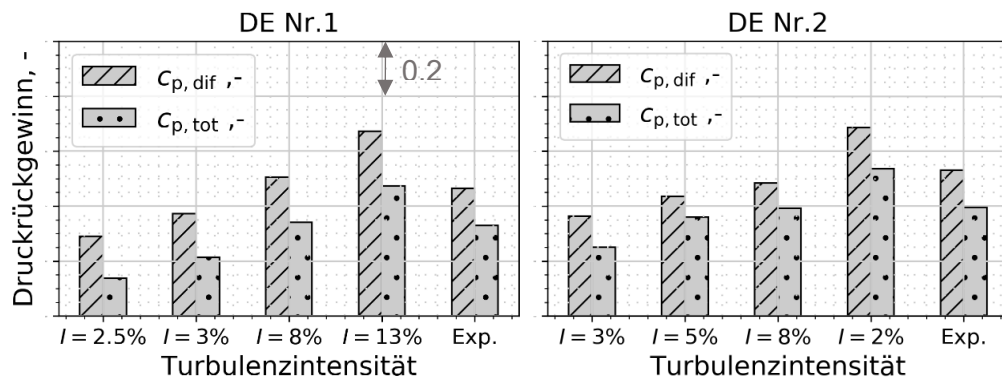


Abbildung 5: Druckrückgewinn bei Variation der Einlassturbulenz im numerischen Modell

Darüber hinaus hat das Turbulenzmodell einen großen Einfluss auf die Ergebnisse. In einer weiteren Studie werden die Resultate folgender Turbulenzmodelle mit Messdaten verglichen: Spalart-Allmaras (SA), Shear-Stress-Modell (SST) und Explicit-Algebraic-Reynolds-Stress-Modell (S-BSL-EARSM). Von diesen drei untersuchten Turbulenzmodellen stellt das RSM-(S-BSL-EARSM)-Modell den besten Kompromiss dar, weil es sowohl eine bessere Übereinstimmung mit den Messungen als auch eine höhere numerische Stabilität der Lösung zeigt [3]. Das EARSM-Modell wird in alle weiteren Studien als Turbulenzmodell verwendet.

Aus den durchgeführten Studien werden die geeignetsten Modellansätze für die Validierung verwendet. Untersuchungen zur Netzverfeinerung in Wandnähe, sowie zur Oberflächenrauheit der überströmten Flächen zeigen keinen signifikanten Einfluss auf die Simulationsergebnisse.

Validierung

Die Validierung des numerischen Modells ist ein zentrales Projektziel. Im Folgenden wird ein exemplarischer Ausschnitt aus der umfassenden Validierungsarbeit präsentiert. Zahlreiche numerische Studien haben gezeigt, dass keines der untersuchten Setups für alle Betriebspunkte eine gute Übereinstimmung liefert. Daher werden für die Validierung drei unterschiedliche Setups herangezogen:

- Als Referenz dient ein Modell, das alle Prüfstandskomponenten vom Einlassrohr bis zum Gehäuseauslass berücksichtigt (Abbildung 1).

- Ein reduziertes Modell mit erhöhter Einlassturbulenz zeigt die beste Übereinstimmung für den Volllastpunkt DE Nr.1 (Setup 1).
- Ein Vollmodell mit einem gröberen Netz im Gehäuse und einem feineren Netz im Diffusor erzielt die beste Übereinstimmung für den Teillastpunkt DE Nr.3 links (Setup 2).

Für die Validierung werden die Messdaten der Sondentraversen PL1-Diffusoreinlass und PL2-Diffusorauslass mit den numerischen Ergebnissen verglichen. Abbildung 6 zeigt die Umfangsverteilung des Druckrückgewinns in einem Volllast-Betriebspunkt auf vier Kanalhöhen.

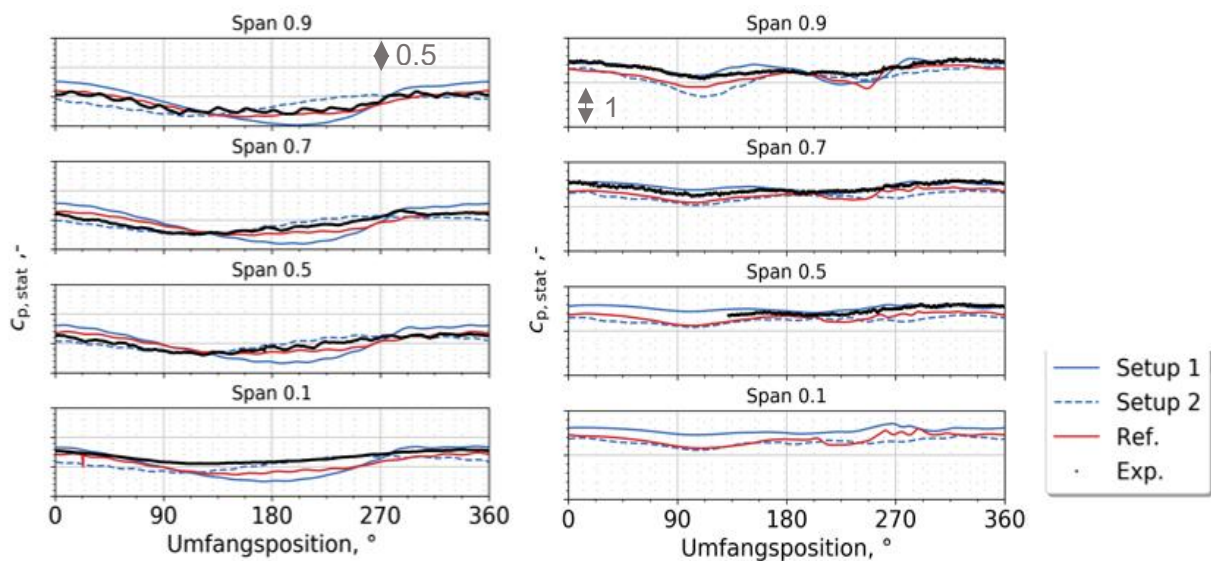


Abbildung 6: Verläufe des Druckrückgewinns in PL1 (links) und PL2 (rechts) unter Volllast

Die Verläufe in der Diffusoreinlassebene PL1 zeigen im Referenzmodell eine sehr gute Übereinstimmung mit den experimentellen Messungen. Das Setup 1 weist eine stärkere Asymmetrie in Umfangsrichtung auf, welche in der Messung nicht zu erkennen ist. Setup 2 zeigt eine gute Übereinstimmung vor allem in der Kanalmitte. Am Diffusorauslass bildet Setup 1 den gemessenen Druck sehr gut ab, wohingegen das Referenzmodell und Setup 2 insbesondere bei den Positionen um 90° und 270° erhebliche Abweichungen erkennen lassen.

Wie bereits erläutert, ist die Qualität der numerischen Vorhersage äußerst sensitiv gegenüber Strömungsablösungen. Für den untersuchten Betriebspunkt ist eine Ablösung im Diffusor insbesondere im Bereich der Nabe zu erwarten. Daher kommt der korrekten Vorhersage der Wanddrücke an der Nabe eine besondere Bedeutung zu. In Abbildung 7 sind die Umfangsverteilungen des Drucks entlang der Diffusornabe dargestellt.

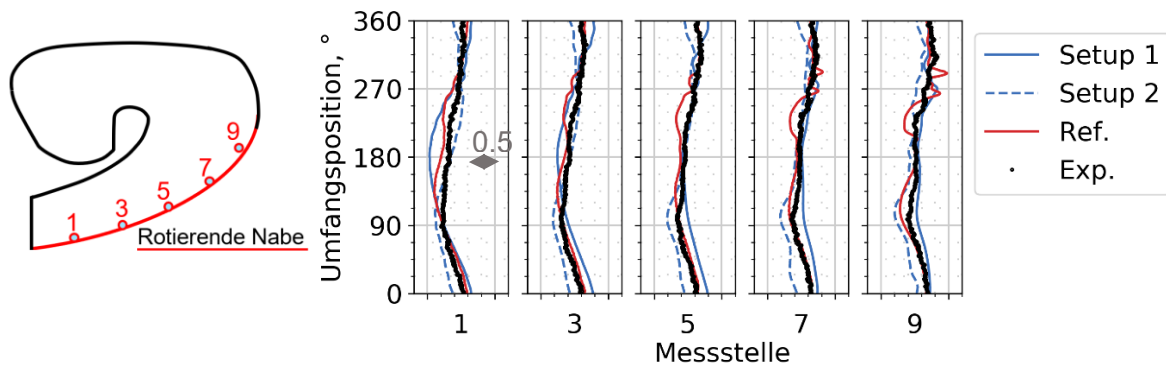


Abbildung 7: Wanddrücke an der Diffusornabe unter Volllast

Der Verlauf der Nabendrücke zeigt, dass die Vorhersage des Referenzmodells besonders im Bereich von 180° bis 360° an den Messstellen 5-9 durch starke Fluktuationen gekennzeichnet ist, die weder bei Setup 1 und 2 noch in den experimentellen Messungen auftreten. Ansonsten ist die Übereinstimmung mit den Messdaten besonders für Setup 1 besonders gut. Es zeigen sich lediglich leichte Abweichungen zwischen 0° und 180° an den Messstellen 3-9.

Wie erwartet zeigt Setup 1 die beste Übereinstimmung mit dem experimentell gemessenen lokalen Drücken. Im Teillastbetrieb hingegen ergibt sich ein abweichender Trend. Abbildung 8 zeigt die Verläufe in den Ebenen PL1 und PL2 für die normierte Drücke bei Teillast.

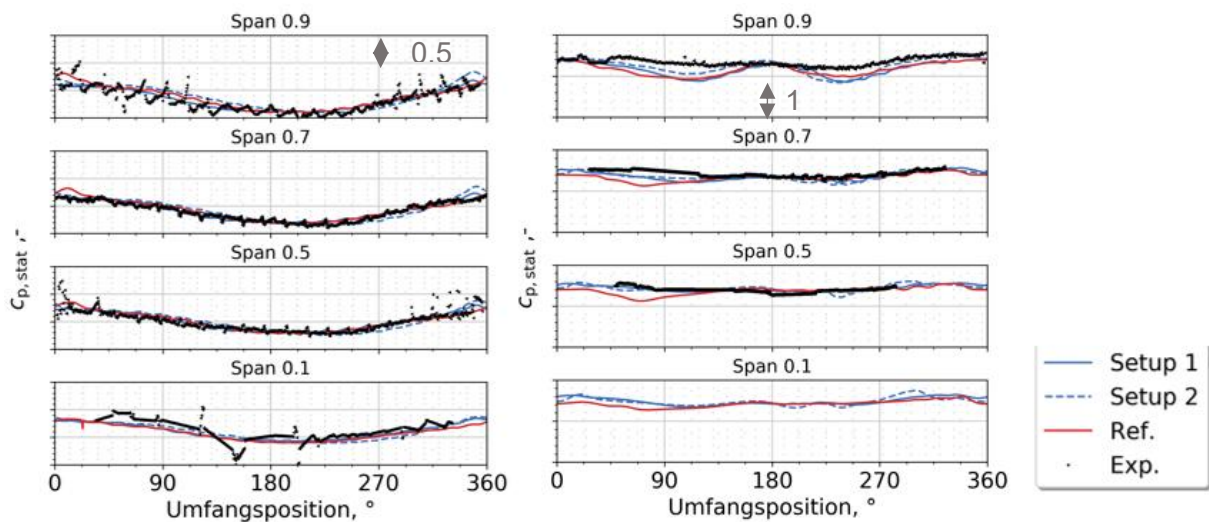


Abbildung 8: Drücke in PL1 (links) und PL2 (rechts) unter Teillast

Generell zeigen alle drei numerischen Simulationsmodelle eine gute Übereinstimmung für diesen Betriebspunkt. Der Teillast-Betriebspunkt ist ebenfalls durch die Ablösung an der Diffusornabe charakterisiert.

In Abbildung 9 werden die Ergebnisse für die normierten Drücke entlang der Diffusornabe präsentiert.

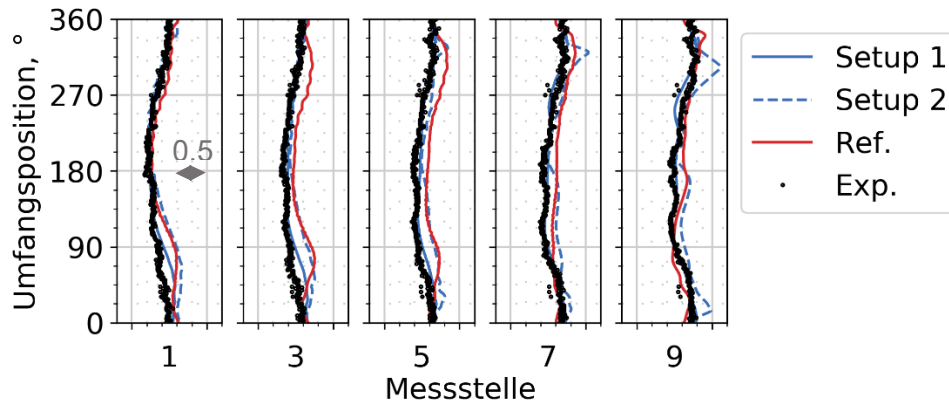


Abbildung 9: Wanddrücke an der Diffusornabe bei Teillast

An der Diffusornabe zeigen die numerischen Modelle Setup 1 und Setup 2 eine gute Übereinstimmung mit den experimentellen Messdaten. Im Bereich von 180° bis 360° stimmen die numerischen Ergebnisse des Setups 2 gut mit den experimentellen Daten überein, mit einer lokalen Ausnahme bei etwa 300°.

Die Ergebnisse für die beiden dargestellten Betriebspunkte verdeutlichen die zuvor beschriebene Sensitivität des numerischen Setups hinsichtlich der Prognosegenauigkeit.

Best-Practice-Guidelines

Im Rahmen des Projektes wurden zahlreiche numerische Simulationsmodelle für die Strömung in Axial-Radial-Diffusoren analysiert und mit Messdaten verglichen. Es hat sich gezeigt, dass die Art der Modellierung signifikante Auswirkungen auf die vorhergesagte Strömung haben kann und zudem stark vom Betriebspunkt und der analysierten Geometrie abhängt. Dieser Abschnitt fasst Empfehlungen zur CFD-Simulation von Axial-Radial-Diffusoren zusammen, die auf der Analyse der numerischen Ergebnisse dieses Vorhabens basieren [3].

Weil für bestimmte Betriebspunkte keine numerisch stabile stationäre Lösung erreichbar ist, sollten bei der Bewertung insbesondere folgende Kriterien herangezogen werden: Die Stabilität der Simulation ist entweder über ‚Monitoring Points‘ (diskrete Punkte im Strömungsfeld; Solver Fine/Open 11.2 von Numeca) oder über gemittelte Variablen auf definierten Flächen (Solver Fidelity 2023.2 von Cadence) zu beurteilen.

Ein zylindrisches, unstrukturiertes Netz mit einer Symmetrieachse entlang der Rotationsachse erfüllt die Anforderungen der untersuchten Anwendungen, da es durch geringe Aspect- und Expansion-Verhältnisse eine hohe geometrische Flexibilität bietet und laut den durchgeführten Studien mit einer maximalen Elementgröße von weniger als 6,3 % der Kanalhöhe numerische Unabhängigkeit gewährleistet.

Die lokale Netzverfeinerung im Bereich des Diffusors wird kontrovers diskutiert. Sie kann für die untersuchten Teillast-Betriebspunkte vorteilhaft sein, aber in Volllast-Betriebspunkten zu unphysikalischen Effekte im Übergangsbereich zu einem gröberen Netz führen und ist daher nicht zu empfehlen.

Die Auflösung in Wandnähe spielt eine entscheidende Rolle, da die Strömung in allen Betriebspunkten an der Nabe ablöst. Feine Netze mit einem y^+ -Wert kleiner 1 liefern aufgrund präziserer Vorhersagen zuverlässige Ergebnisse. Zudem hat sich gezeigt, dass eine hohe Anzahl von Netzknoten im Bereich der Strömungsgrenzschicht (30 Schichten) vorteilhaft ist.

Die Modellierung der Turbulenz stellt eine besondere Herausforderung dar, weil das Turbulenzmodell eine entscheidende Rolle bei der Vorhersage des Strömungsfeldes und der Ablösegebiete spielt. Unter den untersuchten Modellen (SA, SST und S-BSL-EARSM) hat sich das S-BSL-EARSM-Modell als besonders stabil erwiesen, insbesondere aufgrund der berücksichtigten Anisotropie turbulenter Strömungen [3].

Es ist zu beachten, dass im Rahmen dieser Studie keine direkten Messdaten für die Turbulenz vorliegen, weshalb die Modellparameter iterativ bestimmt werden mussten. Studien haben gezeigt, dass die Turbulenz bei Verwendung des großskaligen Modells im Diffusoreinlass unterschätzt werden kann. Durch eine erhöhte Turbulenz im Diffusor konnten jedoch Ergebnisse erzielt werden, die eine gute Übereinstimmung mit experimentellen Daten aufweisen.

Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass die Geometrie des Abströmgehäuses nicht rotationssymmetrisch ist, führt jede Reduzierung des Modells zu ungenauen Ergebnissen, weil dadurch die sich ausbreitenden asymmetrischen Effekte vereinfacht werden. Bei einem numerischen Modell mit einem Drallerzeuger sind die Effekte der Asymmetrie stromab des Drallerzeugers vernachlässigbar.

Für die Modellierung inklusive einer Turbinenstufe ist die Modellierung des Einlassgehäuses und die komplette Turbinenstufe notwendig, um die auftretenden asymmetrischen Strömungseffekte genau nachzubilden [3].

2.2 Geometrievariation

Die Geometrie eines Axial-Radial-Diffusors hat erheblichen Einfluss auf den erzielten Druckrückgewinn und ist daher Gegenstand zahlreicher Studien. Für einfache Geometrien können einige Auslegungsregeln abgeleitet werden [11] [12].

Im Rahmen dieses Projekts wurde eine numerische Studie durchgeführt, in welcher die Geometrie des Diffusors systematisch variiert wurde. Die Ergebnisse wurden von Fomina et al. [11] veröffentlicht. Ein Ansatz dieser Untersuchung ist, die Diffusorgeometrie asymmetrisch zur Rotationsachse zu variieren, um den Druckrückgewinn zu steigern und die Symmetrie der Strömung am Diffusoraustritt zu verbessern.

Hierzu wird die Diffusorgeometrie entlang der Symmetrieebene mit sechs Parametern parametrisiert, während die Geometrie in der senkrechten Ebene konstant gehalten und nicht verändert wird. Die parametrisierten Bereiche werden durch einen Spline approximiert. Abbildung 10 verdeutlicht die asymmetrische Gestaltung der Diffusorgeometrie.

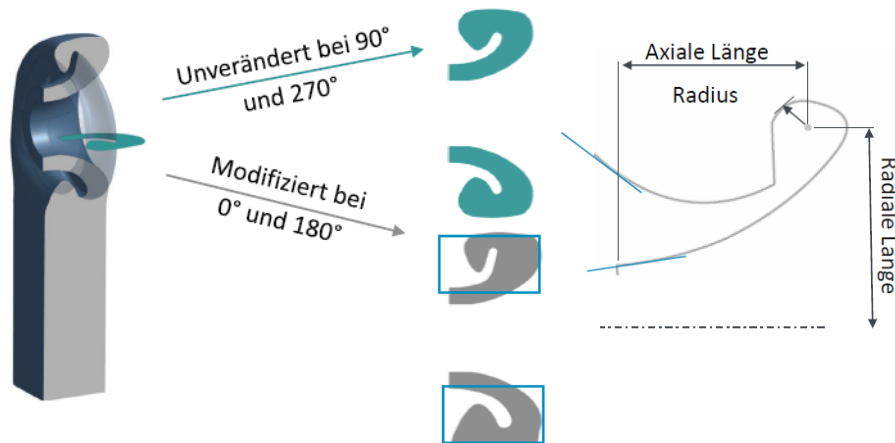


Abbildung 10: Geometriemodifikation, Prinzipskizze und Parameter-Definition für die Geometriestudie

Der analysierte Parametersatz wird mittels Latin-Hypercube-Sampling erzeugt. Für die Generierung der insgesamt 120 untersuchten Geometrien wird ANSYS SpaceClaim 2022.1 verwendet. Anschließend werden die Geometrien für zwei Betriebspunkte untersucht: Volllast DE Nr.2 100 rechts und Teillast DE Nr.3 links-50.

Aus dieser Studie lassen sich die folgenden Ergebnisse ableiten: Die asymmetrische Geometriemodifikation führt zu einer Verbesserung der Diffusoreffizienz. Der Einfluss der Asymmetrie variiert jedoch mit dem Betriebspunkt.

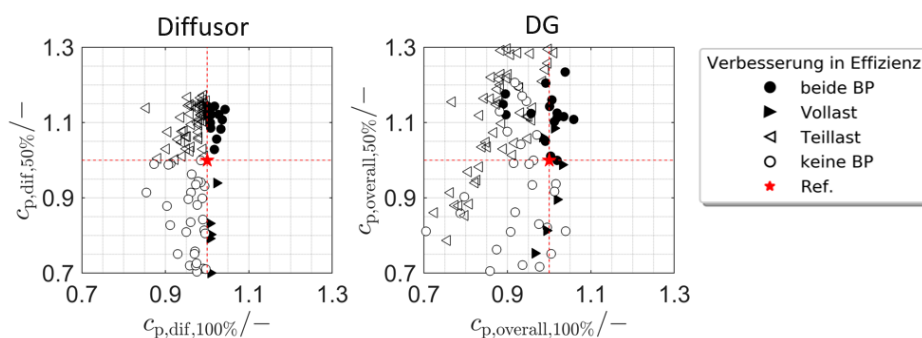


Abbildung 11: Druckrückgewinn der Diffusorgeometrie-Studie

Aus Abbildung 11 lässt sich entnehmen, dass es Geometrie-Modifikationen gibt, die nur in einem Betriebspunkt zu einem verbesserten Druckrückgewinn führen; diese Varianten sind im linken Diagramm mit Dreieck-Symbolen gekennzeichnet. Das rechte Diagramm zeigt jedoch,

dass die Verbesserungen im Diffusor-Druckrückgewinn nicht auf das gesamte Modell inklusive des Sammelraums übertragbar sind.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist der Einfluss der einzelnen Parameter. Es zeigt sich, dass die Parameter im unteren Bereich des Diffusors (in Abströmrichtung) einen größeren Einfluss auf den DG-Druckrückgewinn haben, während die Parameter im oberen Bereich (entgegen der Abströmrichtung) die Diffusoreffizienz stärker beeinflussen. Darüber hinaus wirken sich axiale Parameter, welche die Auslassfläche des Diffusors verändern, stärker auf die Effizienz aus als radiale Parameter oder der Radius der Diffusorauslasskurve.

Ein weiteres Ergebnis ist, dass durch asymmetrische Geometrieänderungen die Strömungsasymmetrie am Auslass reduziert werden kann. Diese Verbesserung der Strömungssymmetrie führt jedoch nicht zwangsläufig zu einer Steigerung der Effizienz. Es wird auch untersucht, wie die einzelnen Parameter den Auslass beeinflussen. Eine Reduzierung der Auslassfläche im oberen Bereich des Diffusors führt beispielsweise zu einer stärkeren Asymmetrie in der Auslassströmung. Geometrien mit nahezu konstanter Kanalbreite im unteren Diffusorbereich weisen geringere Strömungsvariationen in Abhängigkeit von der Umfangsposition auf [3].

Eine modifizierte Geometrie, die aus dieser numerischen Untersuchung resultiert, wird ausgewählt und experimentell untersucht. Die entsprechenden Tests wurden sowohl am ITSM-Versuchsstand als auch an einem Heißgas-Versuchsstand von Everllence bei ähnlichen Betriebspunkten durchgeführt. Ein Einblick in die Ergebnisse des Heißgasprüfstands folgt im nächsten Abschnitt.

Messungen am Heißgas-Versuchsstand

Die Diffusor-Geometrie B und die modifizierte Geometrie werden seitens Everllence in Messungen an einem Heißgasprüfstand untersucht. Zu diesem Zweck werden zunächst zwei Austrittsgehäuse mit jeweils einem der beiden Diffusoren konstruiert und gefertigt, wobei der Sammelraum bei beiden Gehäusevarianten identisch ist. Abbildung 12 zeigt die beiden Diffusoren innerhalb der untersuchten Gehäuse.

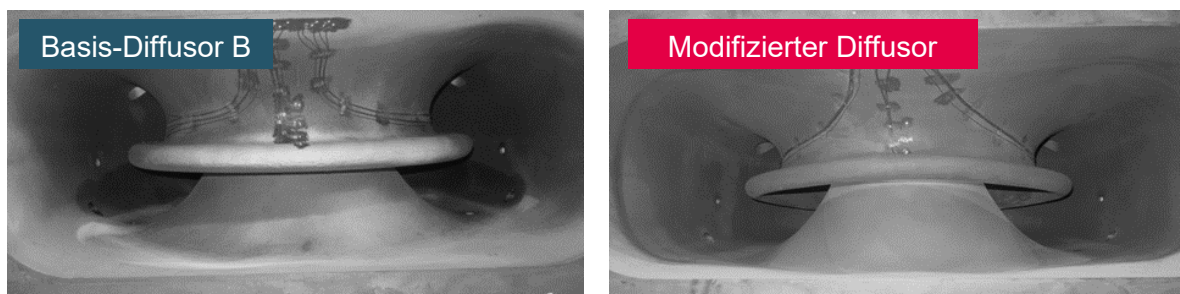


Abbildung 12: Turbinenabströmgehäuse mit Diffusor B (links) und modifiziertem Diffusor (rechts)

Die Heißgasversuche wurden mit verschiedenen Turbolader-Konfigurationen an einem Brennkammerprüfstand durchgeführt. Aus den Messdaten am Eintritt und Austritt jeder dieser Bilanzierungsabschnitte wird ein komponenten-spezifischer integraler Druckaufbau berechnet.

Hierbei ist zu beachten, dass diese Bilanzierung nur auf den verfügbaren Messdaten an den Strömungskanalwänden basiert. Eine Umrechnung auf totale Strömungsgrößen oder massenstromgemittelte Werte erfolgt nicht, weil hierfür Annahmen über die unbekannte Strömungsverteilung in jeder Bilanzenebene zu treffen wären, die über dem Umfang stark variiert [3]. Die Aufteilung der Druckmessstellen für die jeweiligen Bilanzierungsräume ist in Abbildung 13 dargestellt.

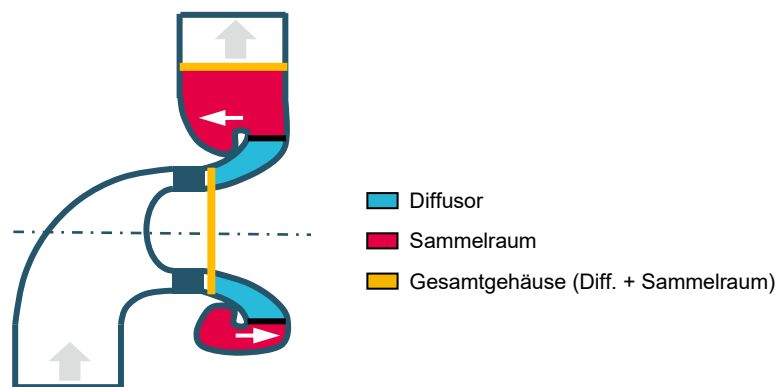


Abbildung 13: Gehäuseabschnitte zur Bilanzierung des integralen Druckaufbaus innerhalb des Austrittsgehäuses im Heißgasversuch

Der integrale Druckaufbau ist definiert als die einfache Druckdifferenz Δp , welche den Druckunterschied innerhalb eines Abschnitts eines der beiden Gehäuse beschreibt. Dabei werden die Druckdifferenzen der beiden Gehäusevarianten, Δp_B und Δp_{B_mod} voneinander subtrahiert. Das bedeutet: Positive Werte stehen für einen erhöhten Druckaufbau, während negative Werte auf einen Druckabbau hinweisen.

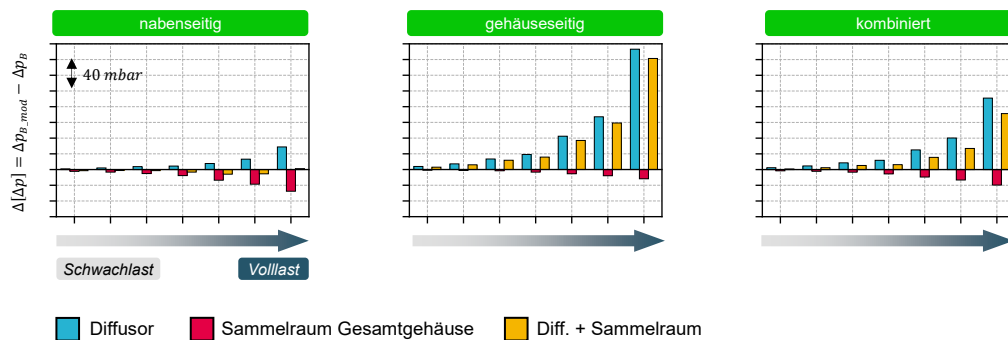


Abbildung 14: Unterschiede der komponentenspezifischen integralen Druckdifferenz im Heißgasversuch

Auf dieser Grundlage zeigt die Diffusormodifikation entsprechend der Abbildung 14 für alle dargestellten Betriebszustände einen gesteigerten integralen Druckaufbau innerhalb des Diffusors. Dabei ist die gesteigerte Belastung an der gehäuseseitigen Diffusorkontur stärker als an der Diffusornabe. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Diffusormodifikation ausschließlich die gehäuseseitige Diffusorkontur betrifft, während die Diffusornabe unverändert bleibt.

Auch in der kombinierten Druckdifferenz basierend auf den naben- und gehäuseseitigen Messwerten steigert die Diffusormodifikation den integralen Druckaufbau des Diffusors. Im Gegensatz dazu bewirkt die Diffusormodifikation im Sammelraum eine Reduzierung der Druckdifferenz, wobei die beiden Gehäusevarianten durch einen Druckabbau charakterisiert sind. Jedoch überwiegt der gesteigerte Druckzugewinn im Diffusor die ebenfalls gestiegene Druckreduzierung im Sammelraum, sodass der positive Druckrückgewinn infolge der Diffusormodifikation auch über das gesamte Austrittsgehäuse nachweisbar ist.

Abschließend zeigt die Abbildung 15 die im Heißgasversuch gemessenen gehäusebedingten Unterschiede im Turbinenwirkungsgrad.

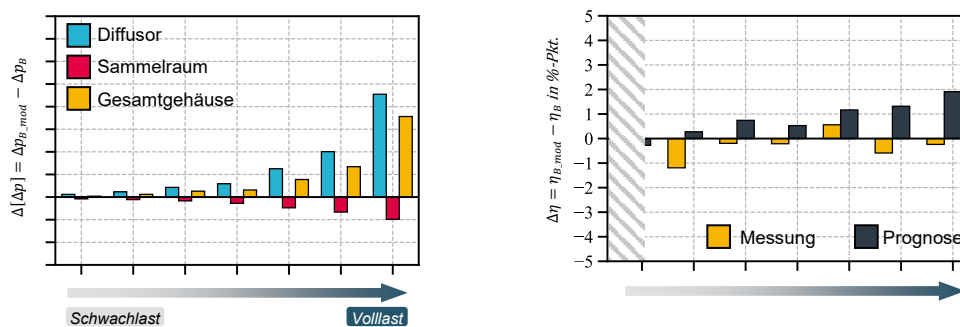


Abbildung 15: Gemessene und nachträglich prognostizierte Wirkungsgradunterschiede für die Heißgasversuche

Anhand der Abbildung 15 hat die Diffusormodifikation den Wirkungsgrad über einen Großteil der dargestellten Betriebsbedingungen im Vergleich zum unveränderten Basisgehäuse verschlechtert, jedoch ohne einen eindeutigen Trend.

Der gemessenen Wirkungsgradverschlechterung stehen die nachgewiesenen Unterschiede im gesteigerten integralen Druckaufbau (Abbildung 14) entgegen. Ergänzend dazu wurden die prognostizierten Wirkungsgradunterschiede dargestellt. Diese beruhen auf der Annahme, dass die entsprechenden integralen Druckunterschiede in eine unmittelbare Wirkungsgradänderung überführt werden können.

Die Prognose steht mit den tatsächlich gemessenen Wirkungsgraden im Widerspruch. Mehrere Ursachen können dazu beitragen. Die komponentenspezifische Wirkungsgradbestimmung im Turbolader ist anspruchsvoll, da viele relevante Messgrößen aufgrund begrenzter Zugänglichkeit nur lokal erfasst werden können.

Des Weiteren steht die analysierte Turbine im vorliegenden Fall eines Turboladers unter den thermodynamischen und aerodynamischen Einflüssen weiterer Komponenten – insbesondere des Verdichters. Dementsprechend kann eine als ursprünglich positiv angenommene Änderung im Turbinenabströmgehäuse unter Umständen auch eine negative Änderung im Gesamtsystem bewirken, wenn das Gesamtsystem aus Turbine, Verdichter und Lagerung aus seiner optimierten Gleichgewichtslage (Drehzahl, Leistung) gebracht wird [3]. Eine Wiederherstellung des Leistungsgleichgewichts zwecks Nutzung des Wirkungsgradpotenzials erfordert eine spezifische Neuabstimmung aller Turboladerkomponenten auf die geänderte Turbinenabströmung und wurde in diesem Vorhaben nicht durchgeführt.

3 Zusammenfassung

In der Zusammenarbeit zwischen dem ITSM der Universität Stuttgart und Everllence wurde im Rahmen dieses Vorhabens eine Versuchsanlage zur Erzeugung repräsentativer Diffusorströmungen entwickelt und für experimentelle Untersuchungen eingesetzt. Begleitend zu den experimentellen Untersuchungen wurden verschiedene numerische Modelle entwickelt und anhand der Messergebnisse validiert. Aus diesem Vergleich wurden Empfehlungen zur numerischen Strömungssimulation von Axial-Radial-Diffusoren abgeleitet. Zusätzlich wurde eine der untersuchten Diffusorvarianten mit dem Ziel eines gesteigerten Druckrückgewinns numerisch optimiert und sowohl am ITSM-Diffusor-Versuchsstand als auch an einem Heißgasversuchsstand von Everllence mit der Ursprungsgeometrie verglichen. Diese Vergleiche zeigten zwar einen gesteigerten Druckrückgewinn für den modifizierten Diffusor jedoch ohne die erforderliche Neuabstimmung von Verdichter und Turbine keine eindeutige Verbesserung im Turbinenwirkungsgrad.

Insgesamt zeigte die numerische Simulation unter den gewählten Bedingungen eine hohe Sensitivität gegenüber den Modellparametern mit entsprechenden Auswirkungen auf die beabsichtigte Geometrieoptimierung.

Zusätzlich wurde eine asymmetrische Variante der Diffusorgeometrie B entworfen und analysiert. Dabei zeigte sich, dass die numerischen Modelle die prognostizierte Verbesserung überschätzten, während experimentell nur für einen Betriebspunkt (DE Nr. 3 links) eine Verbesserung nachgewiesen werden konnte.

Aufbauend auf den numerischen Ergebnissen zur Diffusormodifikation wurden an einem Heißgasprüfstand von Everllence Turbinenmessungen mit zwei Varianten von Turbinenabströmgehäusen durchgeführt. Zwar zeigten diese Messdaten in vielen der untersuchten Betriebspunkte einen infolge der veränderten Diffusorgestaltung gesteigerten Druckaufbau innerhalb des Diffusors, jedoch resultierte daraus keine eindeutige Wirkungsgradsteigerung für die untersuchte Turbine. Infolge der asymmetrischen Diffusorgestaltung wurde die im Abströmgehäuse vorhandene Strömungsasymmetrie verstärkt. Die asymmetrische Druckverteilung innerhalb des Diffusors resultiert aus einem hohen Turbinendurchsatz in Kombination mit kompakten Gehäuseabmessungen [3].

4 Literatur

- [1] „Bekanntmachung – Forschungsförderung im 6. Energieforschungsprogramm: Forschung für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung,“ 2014.
- [2] „Förderbekanntmachung – Angewandte nichtnukleare Forschungsförderung im 7. Energieforschungsprogramm: Innovationen für die Energiewende,“ 2018.
- [3] A. Fomina, M. E. Maqueo M. und T. Willeke, „Abschlussbericht Teilvorhaben Verbundprojekt AG Turbo: RoboFlex Teilvorhaben-Nr. 1.5 a & b – Numerische und experimentelle Untersuchungen zu einem axial-radial Turbinendiffuser,“ 2025.
- [4] A. Beevers, Congiu, P. F. F. und T. Mokulys, „An analysis of the merits of CFD for the performance prediction of a low pressure steam turbine radial diffuser,“ in *ASME Turbo Expo 2010: Power for Land, Sea, and Air*, 2010.

- [5] S. Brouwer und D. M. Vogt, „Simulation of a Flow in a Gas Turbine Exhaust Diffuser with Advanced Turbulence Models,“ in *High Performance*, 2015.
- [6] F. R. Menter, „Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications,“ Bd. 32, Nr. 8, p. 1598–1605, 1994.
- [7] P. Stein, C. Pfoster, M. Sell, P. Galpin und T. Hansen, „Computational Fluid Dynamics Modeling of Low Pressure Steam Turbine Radial Diffuser Flow by Using a Novel Multiple Mixing Plane Based Coupling — Simulation and Validation,“ Bd. 138, Nr. 4, 2016.
- [8] S. Guillot, W. F. Ng, H. D. Hamm, U. E. Stang und K. T. Lowe, „The experimental studies of improving the aerodynamic performance of a turbine exhaust system,“ Bd. 137, Nr. 1, 2015.
- [9] D. Munyoki, M. Schatz und D. M. Vogt, „Detailed Numerical Study of the Main Sources of Loss and Flow Behavior in Low Pressure Steam Turbine Exhaust Hoods,“ in ASME Turbo Expo 2017: Turbomachinery Technical Conference and Exposition, 2017.
- [10] F. Menter und Y. Egorov, „A scale adaptive simulation model using two-equation models,“ in 43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2005.
- [11] G. Sovran und E. D. Klomp, „Experimentally determined optimum geometries for rectilinear diffusers with rectangular, conical or annular cross-section,“ in *Fluid Mechanics of Internal Flow*, Elsevier Publishing Company, 1967, p. 270–319.
- [12] D. Japikse, *Turbomachinery Diffuser Design Technology*, Norwich, Vermont, USA: Concepts ETI Press, 1984.
- [13] A. Fomina, C. Fuhrer, M. Vogt und T. Willeke, „Numerical study on the influence of geometrical parameters on the performance of a turbine exhaust hood,“ in ASME 2023 Turbomachinery Technical Conference and Exposition, 2023.
- [14] C. Finzel, M. Schatz, M. V. Casey und D. Gloss, „Experimental investigation of geometrical parameters on the pressure recovery of low pressure steam turbine exhaust hoods,“ in ASME 2011 Turbo Expo: Turbine Technical Conference and Exposition, 2011.

Expansion

Verbundprojekt „DigITecT - Digitalisierung und interdisziplinäre Auslegungstechnologien von Turbomaschinen für die Energiewende“

Teilverbundprojekt Expansion

Vorhabengruppe „Digitalisierung interdisziplinärer Auslegungsprozesse“

„Robuste und schnelle Aeroelastik-Bewertung mit Harmonic Balance“

Vorhaben-Nr.: AP 1.2 a, b & c

verfasst von

Dr. Benjamin Winhart
MTU Aero Engines

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das dem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wird von MTU Aero Engines, Siemens Energy und mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages unter den Förderkennzeichen 03EE5116A, 03EE5116B und 03EE5117A gefördert.

Abstract

The numerical assessment of aeroelastic stability is of great importance for the design of modern turbomachinery components. Only through a robust and accurate prediction of the occurring unsteady interactions can the involved components be designed, ensuring maximum efficiency while maintaining operational safety.

Within this project, the flow solver TRACE—used at MTU and continuously developed in cooperation with DLR—was enhanced to enable this assessment capability even in the presence of non-synchronous, i.e., a priori unknown, frequency components such as strongly nonlinear shock–boundary-layer interactions. The newly developed method not only closes existing assessment gaps but also achieves an efficiency improvement of up to a factor of 50 compared to conventional time-domain approaches. The reliability of the results obtained with the new method is confirmed through comparison with reference simulations in the time domain.

Kurzfassung

Die numerische Bewertung von aeroelastischer Stabilität ist für die Auslegung moderner Turbomaschinenkomponenten von höchster Wichtigkeit, denn nur durch eine robuste und akkurate Vorhersage der auftretenden instationären Wechselwirkungen kann eine zielgerichtete Auslegung der beteiligten Komponenten erfolgen, wodurch maximale Effizienz bei gleichzeitiger Betriebssicherheit gewährleistet werden kann.

Innerhalb des Vorhabens wurde der bei der MTU eingesetzte und gemeinsam mit dem DLR stetig weiterentwickelte Strömungslöser TRACE dahingehend erweitert, diese Bewertungsfähigkeit auch in Anwesenheit nicht-synchroner, d.h. a priori unbekannter Frequenzanteile wie z.B. stark nichtlinearer Stoß-Grenzschicht Wechselwirkungen zu gewährleisten. Mit Hilfe des neuartigen Verfahrens konnten nicht nur Bewertungslücken geschlossen werden, sondern auch eine Effizienzsteigerung von bis zu Faktor 50 gegenüber konventionellen Methoden im Zeitbereich erzielt werden. Die Belastbarkeit der mittels des neuen Verfahrens erzielten Ergebnisse wird durch einen Vergleich mit Referenzsimulationen im Zeitbereich bestätigt.

1 Einleitung

1.1 Motivation

Turbomaschinen – beispielsweise in Energieanlagen, industriellen Verdichtern oder Flugzeugtriebwerken – werden unter konkurrierenden Anforderungen entwickelt: hohe Effizienz, hohe Leistungsdichte und strenge Sicherheitsvorgaben. Mit zunehmender aerodynamischer Belastung, höheren Druckverhältnissen und gleichzeitig geringer werdenden Effizienzreserven steigt der Bedarf, auch kritische Betriebsbereiche numerisch zuverlässig abzubilden. Insbesondere transsonische Strömungszustände sind durch Stoßsysteme, mögliche Ablösungen und ausgeprägte Gradienten gekennzeichnet und damit stark nichtlinear. Zusätzlich können selbstangeregte Strömungsinstabilitäten, beispielsweise infolge von Stoß-Grenzschicht-Wechselwirkungen, die Vorhersage des Strömungsfeldes erheblich erschweren.

Eine zentrale Fragestellung im Entwicklungsprozess ist die aeroelastische Stabilität von Schaufelreihen. Dabei gilt es zu klären, ob unter den gegebenen Strömungsbedingungen selbstangeregte Schwingungen (Flattern) von Schaufeln oder Schaufelkränzen auftreten können. Flattern stellt ein unmittelbares Risiko für Lebensdauer und Betriebssicherheit dar. Eine nicht hinreichend abgesicherte Stabilitätsbewertung führt daher entweder zu konservativen Sicherheitsmargen (Überdimensionierung und Wirkungsgradverluste) oder – im ungünstigen Fall – zu technischen und wirtschaftlichen Schäden durch instabile Betriebszustände im späteren Einsatz.

Zur frühzeitigen Bewertung der aeroelastischen Stabilität werden in der Praxis numerische Verfahren eingesetzt. Zeitbereichsbasierte Methoden können komplexe Instationaritäten zwar grundsätzlich robust abbilden, sind jedoch für umfassende Parameterstudien (Betriebspunkte und Modenkombinationen) häufig mit sehr hohen Rechenkosten verbunden. Frequenzbereichsverfahren wie Harmonic-Balance (HB) sind demgegenüber attraktiv, da viele makroskopische instationäre Phänomene in Turbomaschinen stark periodisch geprägt sind und sich über eine endliche Fourierdarstellung effizient erfassen lassen. [1] Der Einsatz dieser Verfahren erfordert jedoch, dass die für die Lösung relevanten Frequenzanteile angemessen im Modell repräsentiert werden.

1.2 Problemstellung

Der etablierte Einsatz des Harmonic-Balance-Verfahrens im aeroelastischen Kontext beruht auf der Annahme, dass eine periodische Anregung – beispielsweise durch die Schaufeldurchgangsfrequenz oder durch die periodische Strukturbewegung im Flutterfall – eine Strömungsantwort erzeugt, die durch eine endliche Anzahl von Harmonischen einer Fundamentalfrequenz beschrieben werden kann. Die zeitabhängige Formulierung wird dabei im Wesentlichen durch eine Fourierdarstellung ersetzt, sodass anstelle einer zeitlichen Integration ein zeitunabhängiges, nichtlineares Gleichungssystem gelöst wird. [2, 3]

In transsonischen Schaufelgittern kann jedoch eine zusätzliche, eigenständige Dynamik auftreten: Ein Verdichtungsstoß kann mit der Grenzschicht interagieren, Ablöseprozesse initiieren

und selbstangeregte, selbsterhaltende Oszillationen ausbilden (Abbildung 1). Diese Instationaritäten können auch ohne strukturelle Bewegung auftreten, besitzen eine eigene charakteristische Frequenz, sind a priori aber in der Regel nicht bekannt und müssen auch nicht mit der Flutterbewegung synchron sein. Häufig ist zudem eine ausgeprägte Umfangsstruktur (azimutale Mode) vorhanden. [4]

Damit ist eine zentrale Voraussetzung der klassischen Harmonic-Balance-Flutterbewertung verletzt. Wenn das Frequenzmodell ausschließlich die Schwingungsfrequenz der Struktur und deren Harmonische berücksichtigt, kann eine nicht-synchrone Instabilität der Grundströmung nicht adäquat abgebildet werden. Daraus können Konvergenzprobleme, numerisch induzierte Lock-in-Effekte und im ungünstigsten Fall aerodynamische Dämpfungs- bzw. Flutterkennlinien resultieren, die trotz plausibler Erscheinung keine verlässliche Aussagekraft besitzen. [5]

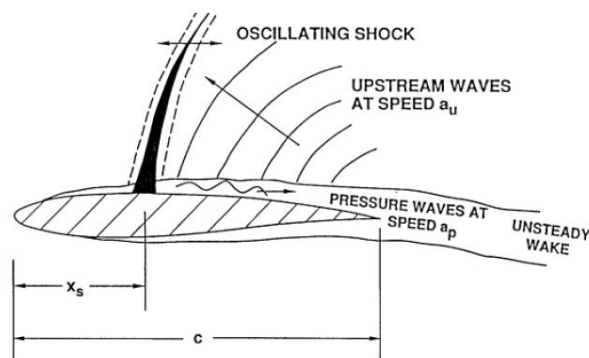


Abbildung 1: Stoß-Grenzschicht Interaktion nach Lee [6]

1.3 Zielsetzung und Aufbau des Projekts

Ziel des Vorhabens ist die Entwicklung und Demonstration einer effizienten und zugleich belastbaren Vorgehensweise zur Vorhersage der aerodynamischen Dämpfung entlang der gesamten Flutterkurve, auch in Anwesenheit nicht-synchroner, selbstangeregter Instationaritäten. Ausgangspunkt ist die Beobachtung, dass eine standardmäßige Flutterbewertung mit Harmonic-Balance unter solchen Bedingungen nicht zuverlässig ist, sowohl hinsichtlich der numerischen Konvergenz als auch hinsichtlich der Ergebnisqualität (bis zu 30% der Punkte entlang einer Flutterkurve können nicht bewertet werden). [5]

Hieraus wird ein Vorgehen abgeleitet, das aus zwei Schritten besteht: Zunächst wird die Instabilität in der Grundströmung identifiziert, insbesondere hinsichtlich dominanter Frequenz und zugehöriger Umfangsstruktur. Anschließend wird diese Instabilität in der Harmonic-Balance-Formulierung gezielt berücksichtigt, ohne den Rechenaufwand unverhältnismäßig zu erhöhen. Hierfür wurde innerhalb des Vorhabens eine Prozesskette erarbeitet, die eine effiziente, HB-basierte Frequenzsuche beziehungsweise Frequenzadaption mit einem Ansatz auf Basis zweier unabhängiger harmonic-sets kombiniert, um die aeroelastische Bewertung in transsonischen Regimen zu stabilisieren und die Ergebnisbelastbarkeit zu erhöhen. [7]

1.4 Untersuchungsgegenstand und methodischer Rahmen

Die Untersuchungen stützen sich auf einen dreidimensionalen, transsonischen Verdichterstator einer realen Turbomaschine, um die entwickelte Methodik unter praxisnahen Randbedingungen zu bewerten. Die aeroelastische Stabilitätsanalyse erfolgt mit der in der Turbomaschinenanwendung etablierten Energiemethode in unidirektionaler Kopplung. Hierzu werden die relevanten Strukturmoden einschließlich Eigenfrequenzen und Schwingungsformen aus einer vorgelagerten Modalanalyse bereitgestellt. In der Strömungssimulation wird die entsprechende Schaufelbewegung kinematisch auf das Rechenetz aufgeprägt; eine Rückkopplung der aerodynamischen Lasten auf die Struktur wird nicht modelliert. Auf eine vollständig bidirektionale Fluid-Struktur-Kopplung wird verzichtet, da diese im industriellen Kontext in der Regel mit einem erheblich höheren Rechen- und Prozessaufwand verbunden ist. [8, 9]

Als CFD-Umgebung kommt der industriell etablierte Turbomaschinenlöser TRACE (gemeinsame Entwicklung DLR/MTU) zum Einsatz. TRACE stellt sowohl zeitbereichsbasierte Verfahren als auch die frequenzbereichsbasierte Harmonic-Balance-Methode bereit und ermöglicht damit konsistente, methodenübergreifende Vergleiche zwischen Zeitbereichsreferenzen und HB-basierten Auswertungen innerhalb einer einheitlichen Softwareumgebung. [10]

2 Detaillierung

2.1 Bewertungsgröße und Ergebnisdarstellung

Die Flutterbewertung zielt darauf ab, die energetische Wechselwirkung zwischen Strömung und aufgeprägter Schaufelbewegung zu quantifizieren. In der Energiemethode wird dazu die über eine Schwingungsperiode verrichtete aerodynamische Arbeit bestimmt und in eine aerodynamische Dämpfung umgerechnet. Eine positive aerodynamische Dämpfung entspricht einer stabilisierenden Wirkung (Energieentzug aus der Strukturbewegung), während ein negatives Vorzeichen – abhängig von der mechanischen Dämpfung – zu anwachsenden Schwingungsamplituden führen kann.

Für die Auslegungspraxis wird die aerodynamische Dämpfung als Funktion der Umfangsperiodizität der Schwingungsform (Knotendurchmesser) dargestellt. Diese Flutterkurve ist die unmittelbare Entscheidungsgrundlage, da die aeroelastische Stabilität stark von der jeweiligen Umfangsform abhängt und kritische Bereiche häufig durch einzelne Knotendurchmesser bestimmt werden.

2.2 Grenzen der Standard-HB-Flutterbewertung im transsonischen Maschinenfall

Im untersuchten transsonischen Maschinenfall treten Stoß-Grenzschicht-Wechselwirkungen auf, die zu selbstangeregten, selbsterhaltenden Instationaritäten führen können. Diese Dynamik ist nicht lediglich eine lineare Antwort auf die Strukturbewegung, sondern ein eigenständiger Strömungsmechanismus mit charakteristischer Frequenz und Umfangsstruktur. Damit liegen im Allgemeinen mindestens zwei relevante Frequenzanteile vor: die aufgeprägte

Strukturfrequenz (Flutterbewegung) und die Frequenz der Strömungsinstabilität, die a priori nicht bekannt ist und nicht synchron zur Flutterfrequenz sein muss.

Standard-Harmonic-Balance-Ansätze sind in dieser Situation methodisch limitiert, wenn das Frequenzmodell ausschließlich die Strukturfrequenz und deren Harmonische zulässt. Die Konsequenzen sind zweifach:

- Erstens zeigen sich Einschränkungen der numerischen Robustheit. Eine stärkere Kopplung in der linearen Lösung (innerhalb des Vorhabens ist dies über die Implementierung einer vollgekoppelten Behandlung der Jakobimatrix im HB-Residual umgesetzt) kann zwar divergente Fälle stabilisieren, garantiert jedoch keine saubere Konvergenz. Typische Symptome sind hohe Residuen, anhaltende Oszillationen integraler Größen und entsprechend unsichere Mittelwerte.
- Zweitens besteht ein physikalisches Risiko: Fehlt die Instabilitätsfrequenz im Frequenzmodell, kann es zu einem modellinduzierten Frequenz Lock-In kommen, bei der sich die Strömungsinstabilität an die im Modell verfügbaren Harmonischen der Flutterfrequenz „anpasst“. Dieser Zustand ist nicht zwangsläufig physikalisch korrekt und kann die aerodynamischen Dämpfungen systematisch verfälschen, selbst wenn ein Rechenlauf formal als konvergiert erscheint.

Abbildung 2 zeigt die Flutterkurve des zugrundeliegenden Testfalls. Hervorgehoben sind die Lücken, an denen keine Bewertung erfolgen konnte, da die Simulationen mit dem Standard HB-Verfahren hier entweder divergiert sind oder die Bewertungsgrößen einer zu starken Schwankung unterlagen. [11]

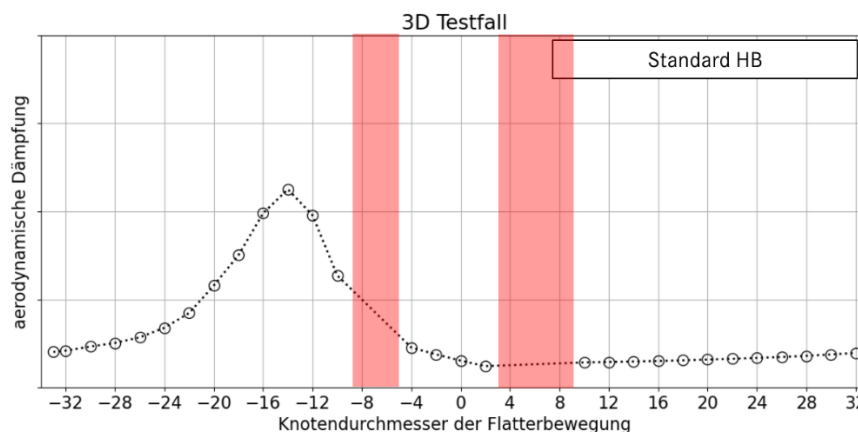


Abbildung 2: 3D Verdichterstator: Flutterkurve mit Standard HB-Ansatz

2.3 Charakterisierung der Strömungsinstabilität und Ablösung zeitbereichsbasierter Frequenzbestimmung

Grundlage der im Vorhaben entwickelten Methodik ist eine belastbare Bestimmung derjenigen Strömungsinstabilität, die im untersuchten transsonischen Verdichterstator zusätzlich zur ausgeprägten Schaufelschwingung auftreten kann. Für eine zielgerichtete Erweiterung des

Frequenzmodells sind dabei zwei Kenngrößen erforderlich: Die dominante Instabilitätsfrequenz und die zugehörige Umfangsstruktur (azimutale Mode bzw. Knotendurchmesser). Zu Beginn des Vorhabens wurde diese Charakterisierung mit Vollkranzsimulationen im Zeitbereich durchgeführt, da der Zeitbereich die Instationarität ohne Vorannahmen über das Frequenzspektrum abbildet und damit als Referenz zur physikalischen Einordnung geeignet ist. Für die Zeitbereichscharakterisierung wurde die Grundströmung ohne aufgeprägte Schaufelbewegung berechnet, sodass beobachtete selbstangefachte Instationaritäten eindeutig der Strömungsdynamik zugeordnet werden können. Die Instabilitätsfrequenz konnte dann aus Zeitsignalen von Monitorpunkten im Bereich der Stoß-Grenzschicht-Wechselwirkung bestimmt werden, wobei eine Spektralanalyse eine dominante Frequenz von $f_{\text{Instabilität}} \approx 1.48 \cdot f_{\text{Flattern}}$ ergab, wie in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** dargestellt ist.

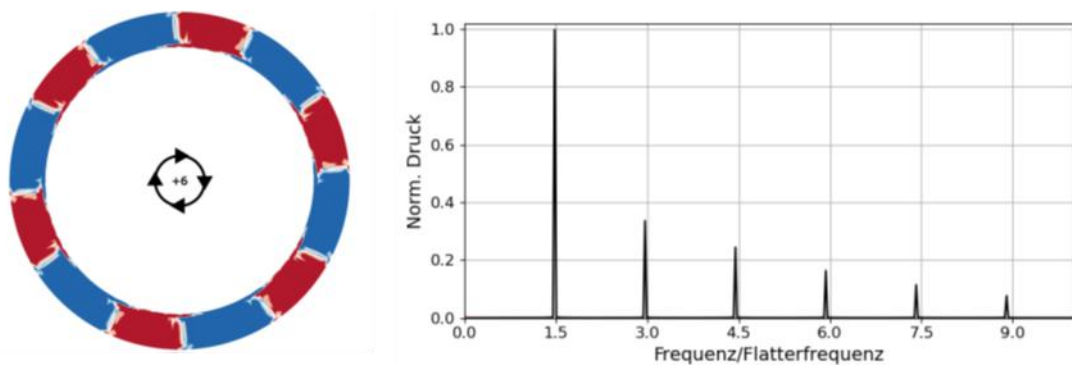


Abbildung 3: Umfangsstruktur der nicht-synchronen Instabilität auf Basis der ersten Harmonischen des Drucksignals am Austritt des Schaufelgitters (links), Frequenzspektrum des Drucksignals im Bereich der Stoß-Grenzschichtinteraktion (rechts) [11] (eigene Darstellung)

Ergänzend wurde die Umfangsstruktur über die Auswertung der ersten Harmonischen der zeitabhängigen Druckverteilung am Austritt des Schaufelgitters identifiziert. Dabei ergab sich eine ausgeprägte Periodizität mit acht Wellenlängen über dem Umfang, entsprechend einer Zuordnung zu Knotendurchmesser +8 nach verwendeter Konvention (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Diese beiden Größen (Frequenzverhältnis und Knotendurchmesser) sind entscheidend, da sie festlegen, welche zusätzlichen Anteile in der nachfolgenden Flatterbewertung im Frequenzbereich explizit berücksichtigt werden müssen.

Aus methodischer Sicht ist die Zeitbereichscharakterisierung jedoch für eine industrielle Prozesskette nur eingeschränkt skalierbar. Ursache sind insbesondere die hohen Integrationskosten (Einschwingphase, Notwendigkeit von Vollkranzmodellen, ausreichende Zeitfensterlänge für eine sichere Spektralbestimmung) sowie der Umstand, dass nicht-reflektive Randbedingungen im Zeitbereich häufig einen geeigneten Frequenzsatz voraussetzen, welcher iterativ bestimmt werden muss. Damit wird die reine Zeitbereichsvoruntersuchung zum dominierenden Kostentreiber, insbesondere wenn mehrere Varianten oder Betriebspunkte zu analysieren sind.

Zentrales Ergebnis des Vorhabens ist daher die Ablösung dieser teuren zeitbereichsbasierten Voruntersuchungen durch eine neue Implementierung der Frequenzadaption innerhalb von Harmonic Balance. Im Gegensatz zum Zeitbereich wird die Instabilitätsfrequenz hierbei nicht vorausgesetzt, sondern als freier Parameter behandelt und iterativ so angepasst, dass das

Harmonic-Balance-Residuum minimiert wird. Damit kann die Instabilitätsfrequenz direkt im Frequenzbereich identifiziert und somit die Durchführung von kostenintensiven Zeitbereichsrechnungen vermieden werden.

Für den untersuchten Fall konnte somit die aus den Zeitbereichsrechnungen bereits identifizierte Frequenz der nicht-synchronen Instabilität mit Hilfe eines 1-Passagen-Modells unter der Nutzung von Harmonic-Balance bestätigt werden.

Der Zeitbereich bleibt damit im Workflow primär Referenz- und Validierungsinstrument, während die eigentliche Identifikation der Instabilität in der vorgesehenen Prozesskette effizient im Frequenzbereich erfolgt. Der Verlauf der Frequenzadaption ist gemeinsam mit dem L2 Residuum in Abbildung 4 dargestellt.

Für die praktische Anwendbarkeit ist wesentlich, dass die Umfangsstruktur der Instabilität im gewählten 1-Passagen-Rechenmodell abbildbar ist. Kann die azimutale Mode (hier ND +8) aufgrund der Periodizitätsvorgaben nicht entstehen, prägt sich die Instabilität nicht konsistent

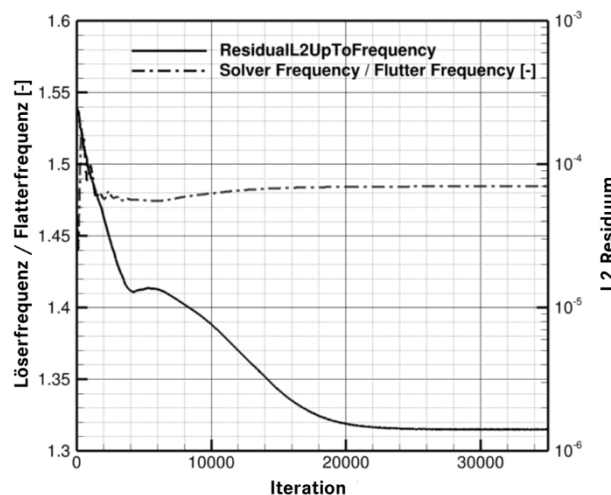


Abbildung 4: HB-Setup: Frequenzanpassung und L2 Residuum für die HB-Frequenzadaption [11]

aus; in der Folge kann die Frequenzsuche instabil werden beziehungsweise divergieren. Eine konvergente Lösung wird daher nur für das Setup mit dem korrekten Knotendurchmesser (Phasenversatz an den Umfangsrandbedingungen) erzielt. Die Kombination aus (i) Frequenzadaption in HB und (ii) konsistenter Abbildung der Umfangsstruktur stellt somit den methodischen Schlüssel dar, um die Instabilität als Eingangsinformation für die nachfolgende HB-basierte Flutterbewertung bereitzustellen und gleichzeitig den Aufwand gegenüber zeitbereichsbasierten Voruntersuchungen deutlich zu reduzieren.

2.4 Berücksichtigung der Instabilität in HB

Nach Identifikation von Instabilitätsfrequenz und Umfangsstruktur werden diese Informationen gezielt in die frequenzbereichsbasierte Flutterbewertung integriert. Der zentrale Ansatz ist hierbei die getrennte Abbildung von Strukturbewegung und Strömungsinstabilität in zwei sogenannten Harmonic-Sets. Damit können beide Mechanismen gleichzeitig aufgelöst und somit

innerhalb der Strömungsvorhersage ausreichend genau wiedergegeben werden. Die Kopplung der Anteile findet hier im aktuellen Implementierungsstand nur über die 0. Harmonische, also den Mittelwert des Strömungszustands, statt. Es handelt sich hierbei um eine modellseitige Näherung, deren Eignung über Vergleiche und Validierung abgesichert wird.

Ergänzend ist eine Abbildung in einem gemeinsamen Harmonic-Set prinzipiell möglich, sofern eine gemeinsame Fundamentalfrequenz praktikabel ist, ohne die Anzahl an notwendigen Harmonischen zu sehr anwachsen zu lassen. Dieser Ansatz ist physikalisch attraktiv, da nichtlineare Kopplungsterme zwischen Frequenzanteilen berücksichtigt werden, ist jedoch in der Regel deutlich rechenintensiver und kann durch Vorgaben zur Umfangsperiodizität eingeschränkt sein.

2.4.1 Validierung:

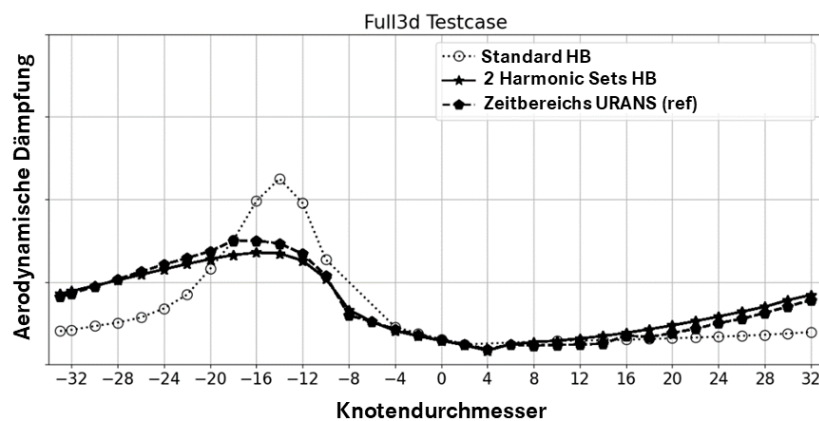


Abbildung 5: Vergleich der beiden Harmonic-Balance basierten Flutterkurven mit dem Zeitbereichsverfahren (Referenz) [11]

Die Validierung der entwickelten Vorgehensweise erfolgt primär über den direkten Vergleich der Flutterkurven (aerodynamische Dämpfung über dem Knotendurchmesser) zwischen der Zeitbereichs-Referenz und zwei Harmonic-Balance-Ansätzen in Abbildung 5: (i) Standard-HB ohne explizite Instabilitätsfrequenzen und (ii) erweiterter HB-Ansatz mit zusätzlicher Abbildung der selbstangeregten Instationarität (zwei-Harmonic-Sets). Dieser Vergleich zeigt, dass der Standard-HB-Ansatz in dem betrachteten transsonischen Regime entweder keine durchgängige, konvergent berechenbare Flutterkurve liefert oder – bei formaler Konvergenz – einen Kurvenverlauf aufweist, der gegenüber der Zeitbereichsreferenz qualitativ und quantitativ abweicht. Der erweiterte HB-Ansatz reproduziert die wesentlichen Merkmale der Zeitbereichs-Flutterkurve hingegen deutlich konsistenter und stabilisiert insbesondere die zuvor kritischen Knotendurchmesserbereiche.

Eine weitere wichtige Errungenschaft des Projektes ist die Erarbeitung einer Erklärung für die Diskrepanzen der Standard-HB-Methode, welche durch das Phänomen des numerischen Lock-Ins zu erklären ist. Das Aufprägen der jeweiligen Phasenversätze in Umfangsrichtung (entsprechend der jeweils betrachteten Knotendurchmesser) sorgt dafür, dass sich die nicht-synchrone Instabilität strukturell anpasst und somit deren Vorhersage verfälscht wird. In manchen Knotendurchmessern wird sie sogar so stark unterdrückt, dass die Simulation bereits vor ihrer Ausprägung als numerisch konvergent bewertet werden kann, wodurch der Effekt komplett vernachlässigt wird. Dies ist in Abbildung 7 sehr deutlich gezeigt. Dargestellt ist der Verlauf der aerodynamischen Dämpfung über der Löseriteration. Die nicht-synchrone Instabilität

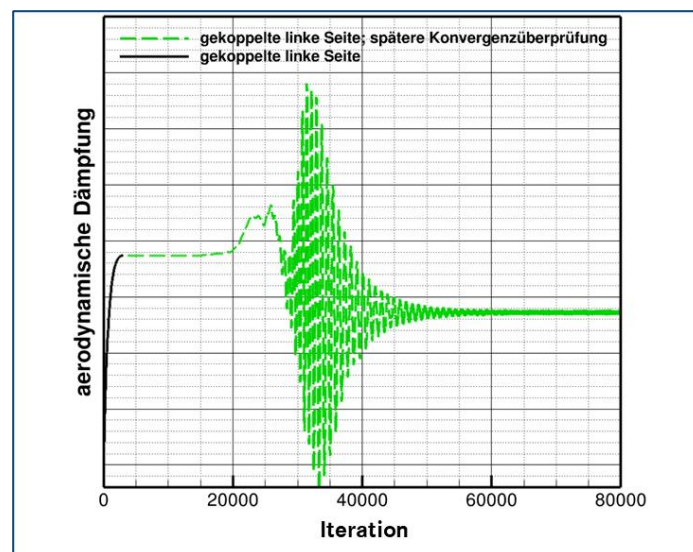


Abbildung 6: Typischer Verlauf der aerodynamischen Dämpfung in anwesenheit nicht-synchroner Signalanteile (mittels standard HB-Verfahren) [11]

wird sehr lange durch die Umfangsrandbedingungen unterdrückt, bevor sie sich numerisch auf den vorgegebenen Knotendurchmesser anpasst und für einen (allerdings falsche) Änderung der aerodynamischen Dämpfung sorgt.

Als zweite, physikalisch stützende Validierungsebene wird der Vergleich der Druckverteilungen entlang der Profiloberfläche herangezogen. Der Standard-HB-Ansatz zeigt hierbei eine verschobene Vorhersage der mittleren Stoßposition und daraus resultierende Abweichungen in der Drucklastverteilung. Diese Abweichungen korrespondieren mit den beobachteten Unterschieden in der Dämpfungsvorhersage. Der erweiterte HB-Ansatz bildet die mittlere Stoßlage sowie die zugehörigen Druckgradienten und Lastniveaus deutlich näher an der Zeitbereichsreferenz ab und liefert damit nicht nur numerisch robuste, sondern auch strömungsphy-

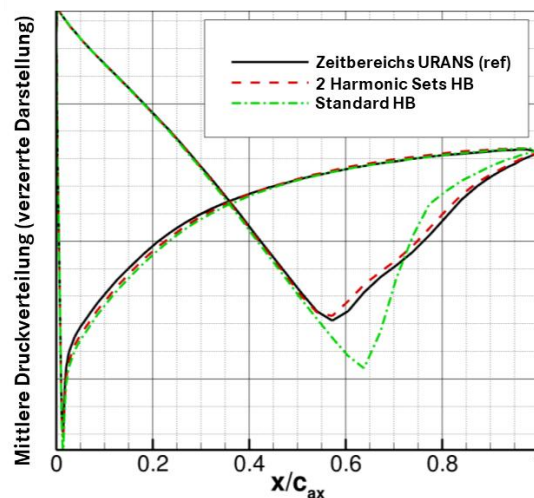


Abbildung 7: Mittlere Druckverteilung entlang der Schaufeloberfläche im Vergleich mit der Referenzsimulation im Zeitbereich [11]

sikalisch konsistente Eingangsdaten für die Energiebilanz.

2.4.2 Numerischer Aufwand

Für die Bewertung des numerischen Aufwandes müssen zwei Vergleiche herangezogen werden.

- Zum einen der Vergleich der Klassifizierung der nicht-synchronen Instabilität (Bestimmung von Frequenz und räumlicher Ordnung), zwischen dem konventionellen zeitbereichsbasierten Ansatz und dem innerhalb des Vorhabens realisierten HB-basierten Frequenzadaptionsverfahren.
- Zum anderen zwischen der tatsächlichen Flutterbewertung mittels konventionellem zeitbereichsbasierten Ansatz und dem HB-basierten Zwei-Harmonic-Sets-Ansatz.

Für den betrachteten Testfall zeigt sich, dass die Klassifizierung der nicht-synchronen Instabilität mittels der neuartigen HB-Implementierung um ca. 40-mal effizienter ist, als durch die Vollkranzsimulation im Zeitbereich.

Die tatsächliche Flutterbewertung ermöglicht zusätzlich eine ca. 50-mal schnellere Berechnung der einzelnen Dämpfungswerte entlang der Flutterkurve bei gleichzeitiger Reduktion der

Bewertungsausfälle auf null Prozent, wodurch eine industrielle Anwendung ermöglicht wird, ohne in die Kostenklasse zeitbereichsbasierter Referenzrechnungen zu geraten.

3 Zusammenfassung

Innerhalb des Vorhabens wurde der Strömungslöser TRACE dahingehend erweitert eine robuste und schnelle aeroelastische Bewertung in Anwesenheit von nicht-synchronen Instabilitäten zu ermöglichen. Hierfür wurde eine Methode implementiert, die es ermöglicht mittels Harmonic-Balance a priori unbekannte Frequenzanteile innerhalb der Lösung zu detektieren und das zugrundeliegende Harmonic-Set automatisiert anzupassen.

Nach der Charakterisierung dieser Instabilitäten in Hinblick auf Frequenz und räumlicher Ordnung kann diese über ein zusätzliches Harmonic-Set neben der eigentlichen Flutterbewegung aufgelöst werden, wodurch nicht nur eine belastbare Flattervorhersage überhaupt erst ermöglicht wird, sondern auch die Ausfallquote der Simulationen auf null Prozent gesenkt werden konnte.

Durch das Vermeiden rechenintensiver Vollkranzsimulationen konnte gezeigt werden, dass die Effizienz der Bewertung für den vorliegenden Testfall um das ca. 40–50-fache gesteigert werden konnte.

4 Literatur

[1] Berthold et al. (2014): On the Development of a Harmonic Balance Method for Aeroelastic Analysis. Proceedings of the 11th World Congress on Computational Mechanics (WCCM XI).

[2] Frey et al. (2014): A Harmonic Balance Technique for Multistage Turbomachinery Applications. ASME Turbo Expo.

[3] Kersken et al. (2012): Time-Linearized and Time-Accurate 3D RANS Methods for Aeroelastic Analysis in Turbomachinery. Journal of Turbomachinery.

[4] Kersken et al. (2014): Non-reflecting Boundary Conditions for Aeroelastic Analysis in Time and Frequency Domain 3D RANS Solver. ASME Turbo Expo.

[5] Heners (2022): A Lanczos-filtered Harmonic Balance Method for Aeroelastic Applications of Turbomachinery Resolving Unsteady Turbulence Effects. Dissertation, Universität Stuttgart.

[6] Lee (2001): Self-sustained Shock Oscillations on Airfoils at Transonic Speeds. Progress in Aerospace Sciences.

[7] Heners et al. (2023): Evaluating the Aerodynamic Damping at Shock-Wave/Boundary-Layer-Interacting Flow Conditions with Harmonic Balance. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power.

[8] Berthold et al. (2022): Fully Coupled Analysis of Flutter Induced Limit Cycles: Frequency vs. Time Domain Methods. ASME Turbo Expo.

[9] Frey et al. (2024): Using Pseudotime Marching for the Solution of Harmonic Balance Problems. ASME Turbo Expo.

[10] Kersken et al. (2024): A Harmonic Balance Solver for the Aeroelastic Analysis of Turbomachinery Components on Unstructured Grids. GPPS Proceedings.

[11] Müller (2025) Robuste Aeroelastik Bewertung in Anwesenheit selbstangefachter Stoß-Grenzschicht Interaktionsphänomene mit Harmonic Balance. Masterarbeit