Schlussbericht zu Nr. 8.2 NKBF 98

Entwicklung und Erprobung von Turbinentechnologien für Turbo-Generatoren für hybrid-elektrische Flugantriebe

TurbTuGen

Gefördert durch:

Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

im Förderprogramm LuFo VI/2

unter dem Förderkennzeichen 20L21041& 20L21042

Die Verantwortung für den Inhalt liegt bei den Autoren

Projektleiter: Dr. Jens Ortmanns

R&T Programme Manager: Andreas Frenzel

Ortmanns, Jens Digitally signed by Ortmanns, Jens Date: 2024.09.16 17:41:35 +02'00'

Frenzel, Andreas Digitally signed by Frenzel, Andreas Date: 2024.09.16 10:27:50 +02'00'

Rolls-Royce Deutschland Ltd & Co KG

Dahlewitz, September 2024

Liste der Autoren

Dr. Jens Ortmanns

Dr. Kay Heinze

Dr. Torsten Wolf

Marcus Merder

Andreas Frenzel

Inhaltsverzeichnis

1 Aufgabenstellung / Zielsetzung ... 4
1.1 Bezug des Vorhabens zu den förderpolitischen Zielen ... 4
1.2 Gesamtziel des Vorhabens ... 4
1.3 Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele des Vorhabens ... 5
2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde ... 7
3 Planung und Ablauf des Vorhabens ... 8
4 Stand der Wissenschaft und Technik bei Beginn des Vorhabens ... 12
5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen ... 15
6 Darstellung der erzielten Ergebnisse ... 16
6.1 Designprozess für Blisk ... 16
6.1.1 CAD-Geometrie ... 17
6.1.2 Conjugate Heat Transfer (CHT)-Analyse ... 19
6.1.3 Festigkeitsanalyse mittels Finite-Elemente (FE) Methode ... 20
6.1.4 Optimierungsstrategie ... 22
6.2 Transmissionsbauteile ... 23
6.3 Ölversorgung und Optimierung ... 26
6.4 NT Modul- und Technologiedesign ... 28
6.5 Testkampagne und -ergebnisse: ... 33
6.5.1 Testdurchführung ... 33
6.5.2 Übersicht zu den Ergebnissen der Turbinenvalidierung: ... 36
6.5.3 Auswertung und Analyse der Thermalfarbentestergebnisse: ... 37
6.5.4 Aerothermal Analyse der Testergebnisse ... 38
6.5.5 Fehleranalyse des FPT-Rotors ... 39
6.5.6 Transmissions ... 40
7 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse ... 41
8 Referenzen ... 41
9 Anlagen / Veröffentlichungen ... 41

1 Aufgabenstellung / Zielsetzung

1.1 Bezug des Vorhabens zu den förderpolitischen Zielen

Das übergeordnete förderpolitische Ziel dieses Vorhabens war die umweltfreundliche Luftfahrt im Fachbereich „Leise und effiziente Antriebe“. Dieses Vorhaben hat durch die Entwicklung der Systemfähigkeit und der erforderlichen Systemtechnologien für kleinskalige Gasturbinen als Leistungserzeuger des hybrid-elektrischen Antriebes (Turbogeneratorsystem - TGS) dazu beigetragen, die Verwirklichung von disruptiven Flugzeugkonfigurationen mit geringem ökologischen Fußabdruck zu ermöglichen. Die Kompetenz von Rolls-Royce Deutschland für die Entwicklung und Herstellung von (hybrid-)elektrischen Antriebssystemen wurde gestärkt.

1.2 Gesamtziel des Vorhabens

Die Entwicklung der Systemfähigkeit für (hybrid-)elektrische Systeme ist ein Kernbestandteil der Rolls-Royce Strategie, um die Effizienz des Antriebs zu verbessern, die CO_2-, NOx- und Lärmemissionen zu reduzieren und neue Marktchancen zu erschließen. Im aktuellen Marktumfeld besteht eine hohe Nachfrage für voll-elektrische Antriebssysteme für frühe Plattformen in den Segmenten Urban Air Mobility (UAM) und Zubringerflugzeuge (Commuter). Zudem zeichnet sich eine starke Nachfrage für die Erweiterung dieser Systeme zu komplexeren hybrid-elektrischen Systemen ab, die eine deutliche Erweiterung der Reichweite liefern würden. (Hybrid)-elektrische Antriebe erfordern die Entwicklung innovativer Flugzeugkonzepte, bei denen Technologien wie langsam laufende Propeller und eine neue Verteilung der Antriebe genutzt werden können. Diese Technologien und neuartigen Konzepte ebnen den Weg für die Entwicklung von eSTOL (electrical Short Take Off and Landing) oder sogar eVTOL (electrical Vertical Take-Off and Landing) Plattformen. Rolls-Royce strebt an, Technologien für eine **modulare, skalierbare Lösung** für ein (hybrid-)elektrisches Gesamtsystem zu entwickeln, da die Entwicklung verschiedener "punktoptimierter" Lösungen unerschwinglich sein würde.

Mit der Technologieinitiative Lausitz will Rolls-Royce dieses Ziel umsetzen und eine international einzigartige Kompetenz aufbauen, die das Fundament für eine langfristige und nachhaltige Entwicklung von voll-elektrischen und hybrid-elektrischen Flugantrieben legt. Dazu plant RRD zusammen mit der BTU Cottbus-Senftenberg (BTU), dem DLR und weiteren Forschungseinrichtungen sowie Partnern aus der Wirtschaft Technologien für (hybrid-)elektrische Antriebssysteme zu entwickeln. Dieser neue Technologiestrang von innovativen, umweltfreundlichen Antriebslösungen wird unter der Bezeichnung „Technologieinitiative (Hybrid-) Elektrische Antriebssysteme“ zusammengefasst und erweitert die bisher aufgebauten Entwicklungskompetenzen von RRD für zweiwellige Gasturbinen und für Hochleistungsreduktionsgetriebe. Der Standort Deutschland wird hierbei innerhalb des Konzerns zu einem Leitstandort für (hybrid-)elektrische Antriebssysteme. Hierdurch wird die

Wettbewerbsfähigkeit zukünftiger Produkte erhöht und die technologische Basis für den mittelfristigen Markteintritt (hybrid-)elektrischer Antriebssysteme vorbereitet.

Abbildung 1.1 enthält eine Übersicht der Vorhaben, die zur Entwicklung von Technologien für die Technologieinitiative (Hybrid-) Elektrische Antriebssysteme beitragen. Weitere zur Realisierung der Technologieinitiative erforderliche Forschungs- und Entwicklungsprojekte sind in Folgevorhaben vorgesehen.

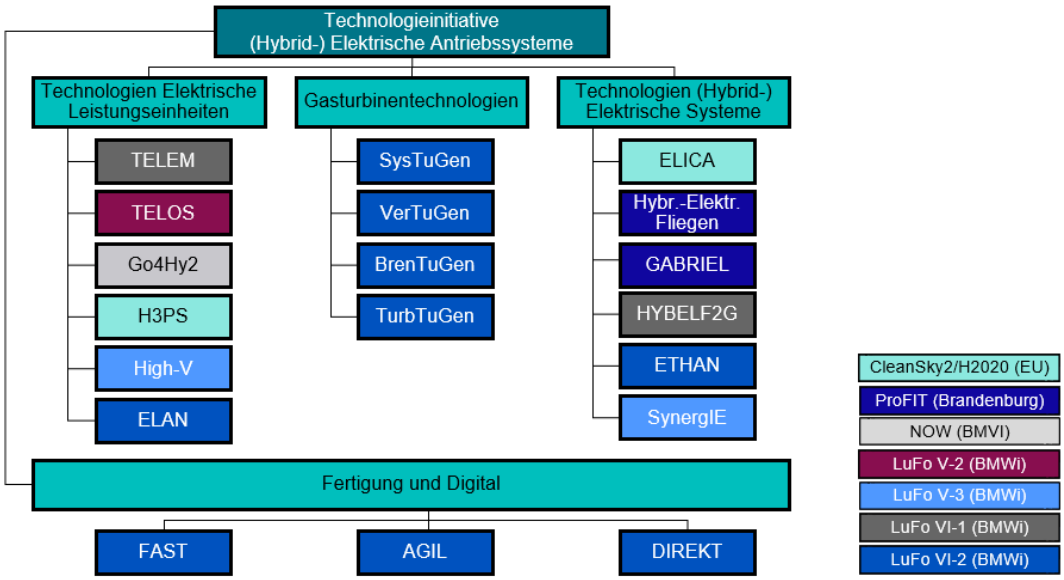

Abbildung 1.1: Übersicht Technologieinitiative (Hybrid-) Elektrische Antriebssysteme

Die Schlüsselfaktoren für den hybrid-elektrischen Flug sind eine Gasturbine, die für hybrid-elektrische Anwendungen optimiert ist, sowie ein neues elektrisches Speicher-, Verteilungs- und Motorsystem und elektrisch betriebene Propulsoren. Die Gesamtheit dieser Komponenten bildet das hybrid-elektrische Antriebssystem.

Gegenstand des Vorhabens TurbTuGen ist die Weiterentwicklung und Erprobung von fortschrittlichen Turbinentechnologien für Turbo-Generatoren für hybridelektrische Flugantriebe. Diese Zielsetzung ist im Formblatt SMARTe-Ziele detailliert und SMART beschrieben.

1.3 Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele des Vorhabens

Im vorliegenden Vorhaben werden die Konzepte für die Module Hochdruck- (HDT) und Nutzturbine (NT) basierend auf den Ergebnissen der derzeit laufenden Forschungsprogramme wie z.B. LuFo 5-3 HiTTTurb (Aufstockungsantrag eingereicht) gemäß den Anforderungen hybrid-elektrischer Flugantriebe verfeinert. Daran schließt sich die Weiterentwicklung und der Detailentwurf von den HDT- und NT-Modulen an. Im

Gegensatz zu Vorgängerprojekten ist im TurbTuGen Vorhaben der Rotor der gekühlten HDT wie auch der Rotor der ungekühlten NT erstmalig in Blisk-Bauweise geplant. Auch sollen sowohl die statischen Bauteile (gekühlte Leitschaufelringe, Gehäuse) als auch die Lagerung der Wellen weiterentwickelt und verbessert werden. Weiterhin werden sowohl für das HDT- als auch das NT-Modul neuartige Lagerkammertechnologien für Hochgeschwindigkeitslager und Ölsysteme sowie Dichtkonzepte für schnelllaufende Wellen entwickelt und erprobt, die für die Anforderungen der hybrid-elektrischen Flugantriebe ausgelegt sind.

Zusätzlich ist die Erprobung dieser Module sowie die Vorbereitung und Auswertung des finalen Validierungstests auf Systemebene ein wichtiger Bestandteil des Vorhabens.

Unteraufträge zur Durchführung der Blisk- und Scheibenerprobung bei Element Materials sowie zur Weiterentwicklung der Lagerbauteile bei Schaeffler sind ebenfalls Bestandteil des vorliegenden Vorhabens.

Das Vorhaben TurbTuGen ist eng verzahnt mit den Lufo 6-2 Vorhaben VerTuGen (Verdichtertechnologie), BrenTuGen (Brennkammertechnologie), SysTuGen (Technologien auf Systemebene) und AGIL. Zusammen mit den ersten drei Vorhaben sollen die Technologien für einen neuen Turbo-Generator entwickelt werden, welcher auf die Anforderungen der hybrid-elektrischen Antriebstechnik optimiert ist. In AGIL werden für diesen Turbo-Generator neue Fertigungstechnologien entwickelt und Musterbauteile hergestellt, die im vorliegenden Vorhaben entwickelt und getestet werden.

2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Im Rahmen der früheren LuFo-Programme ProFI-Blisk („Prozesseffiziente Auslegung, Fertigung und Instandsetzung von Blisks“, FKZ 20T0908C) und Blisk-VF („Blisk-Validierung & Fertigungsmethoden“, FKZ 20T1114) wurden Fertigungsprozesse für die Fertigung von Blisks aus Nickelbasis-Legierungen entwickelt und validiert. Im früheren ProFI-Blisk Programm stand die Fertigung von Blisks aus Inconel718 im Fokus. Darauf aufbauend wurde im nachfolgenden Blisk-VF Programm die komplette Fertigungsprozesskette für Blisks aus Allvac718Plus entwickelt und validiert. In beiden Programmen umfasste die Fertigungsprozesskette das Fräsen „aus dem Vollen“ (engl. machining from solid), sowie die Oberflächenbearbeitung in Form von Kugelstrahlen (engl. shot peening) bzw. dem neuartigen Verfahren des Kugeldruckpolierens (engl. vibropeening) mit besonderem Fokus auf die zu erreichende Oberflächengüte der Blisk-Schaufeln. Im Kontext hierzu wurden umfängliche Probentestprogramme für die genannten Blisk-Werkstoffe sowohl auf Basis von Laborprobentests (mit Fokus auf hochfrequenter Wechselermüdung - engl. HCF=High Cycle Fatigue) als auch an sogenannten Subelement-Tests bzw. Feature-Tests, welche u. a. auch gekerbte Proben und solche mit definierten Vorschädigungen (wie Kratzern) umfassten. Letztere Versuchskategorie diente der Evaluierung des Schadenstoleranzverhaltens der genannten Blisk-Werkstoffe unter Berücksichtigung blisktypischer Beanspruchungen wie HCF und dessen Überlagerung mit LCF (Low-Cycle Fatigue) unter der Annahme von Vorschädigungen in Form von Kratzern, wie sie im Rahmen der Montage nicht immer vollständig auszuschließen sind.

Auf diesen für beide Werkstoffe erzielten Erfahrungen und Erkenntnissen bei der Validierung von Bliskwerkstoffen soll in diesem Vorhaben bezüglich der Validierung von HDT- und NT-Bliskwerkstoffen und Komponenten in den Arbeitspaketen AP3.1 und 3.2 aufgebaut werden.

Weitere Vorarbeiten des Antragstellers, die sich mit dem MIM Herstellverfahren im Bereich der HDT befasst haben, sind im Vorhaben Lufo 5-3 Ad2Tech (Lockplates mit INCO713 und CM247) durchgeführt worden. Zum Thema Reibschweißen liegen durch das Vorhaben BiTaNi (2012-2016) Erfahrungen bei dem Antragsteller vor, in dem die Machbarkeit von Reibscheißen für Nickel-Legierungen untersucht und demonstriert wurde.

RRD hat sich in den vergangenen Jahren im Bereich der Lagerentwicklung darauf konzentriert, das vordere Kugellager des Hochdruckrotors (ca. 180 mm Innenringdurchmesser) für Nenndrehzahlen bis 20000 min-1 zu qualifizieren. Dies gelang zusammen mit der Fa. FAG Schaeffler innerhalb von LuFo 4. Dort wurde in VERLAT (FKZ 20T0912) und VERLAT-FP (FKZ 20T1119A) ein Hybridkugellager (Kugeln aus Keramik, Ringe aus konventionellem Lagerstahl) entwickelt und ausgiebig getestet. Zusammen mit dem Folgevorhaben HyZyRo (FKZ 20T1318A - Lagerdauertest mit vorgeschädigter Keramikkugel) konnte das Hybridkugellager für den Serieneinsatz bei 20 000 min-1 Nenndrehzahl qualifiziert werden.

3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben ist in drei Hauptarbeitspakete unterteilt, wie auch in Abb. 3.1 dargestellt. Im HAP 1 „HDT Modul- und Technologiedesign“ werden die Weiterentwicklung des Subsystemkonzepts und Designmodifikationen für die Hochdruckturbine (HDT) sowie Arbeiten für schnelllaufende Lager- und Lagerkammertechnologien durchgeführt. Der Schwerpunkt der Arbeiten wird auf der Anpassung der Schnittstelle zwischen Brennkammer und Turbine und einschließlich dem Komponentendesign für alle Bauteile der HDT sein. Hier sollen gekühlte HDT-Blisken und Leitschaufelringe mit integrierter Plattform- und Luftsystemfunktionalität als neuartige HDT-Technologien für kleine Gasturbinengrößen entwickelt werden. Im HAP 2 „NT Modul- und Technologiedesign“ werden die Weiterentwicklung des Subsystemkonzepts und Designmodifikationen für die Nutzturbine (NT) sowie Arbeiten für die erforderlichen Lager- und Lagerkammertechnologien für Drehzahlen über 30.000 rpm durchgeführt. Der Schwerpunkt der Arbeiten soll auf der Entwicklung neuartiger NT-Blisken mit Deckband einschließlich dem Komponentendesign aller NT-Bauteile liegen. Im HAP 3 „Komponententechnologie- und Subsystemvalidierung“ werden vor allem die Schleuderversuche für die HDT- und die NT-Blisken zur Überprüfung der Festigkeitsmodellierungen aber auch die Erprobungen der neuen Lagertechnologien bei den Unterauftragnehmern durchgeführt. Weiterhin wird die Lebensdauermodellierung aller Komponenten abgeschlossen und die Auslegung an die zukünftig zu erwartenden Betriebsbedingungen beim Einsatz der Kleingasturbine in hybrid-elektrischen Antrieben adaptiert.

Projektstrukturplan (PSP)

Das Vorhaben TurbTuGen gliedert sich in drei Hauptarbeitspakete, wie im Projektstrukturplan in

Abbildung 2 dargestellt. Die Farben kennzeichnen die unterschiedlichen Themenfelder, deren Beitrag im Rahmen der Arbeiten in TurbTuGen integriert werden soll: Turbine, Rotatives und Structures & Transmissions (S & T).

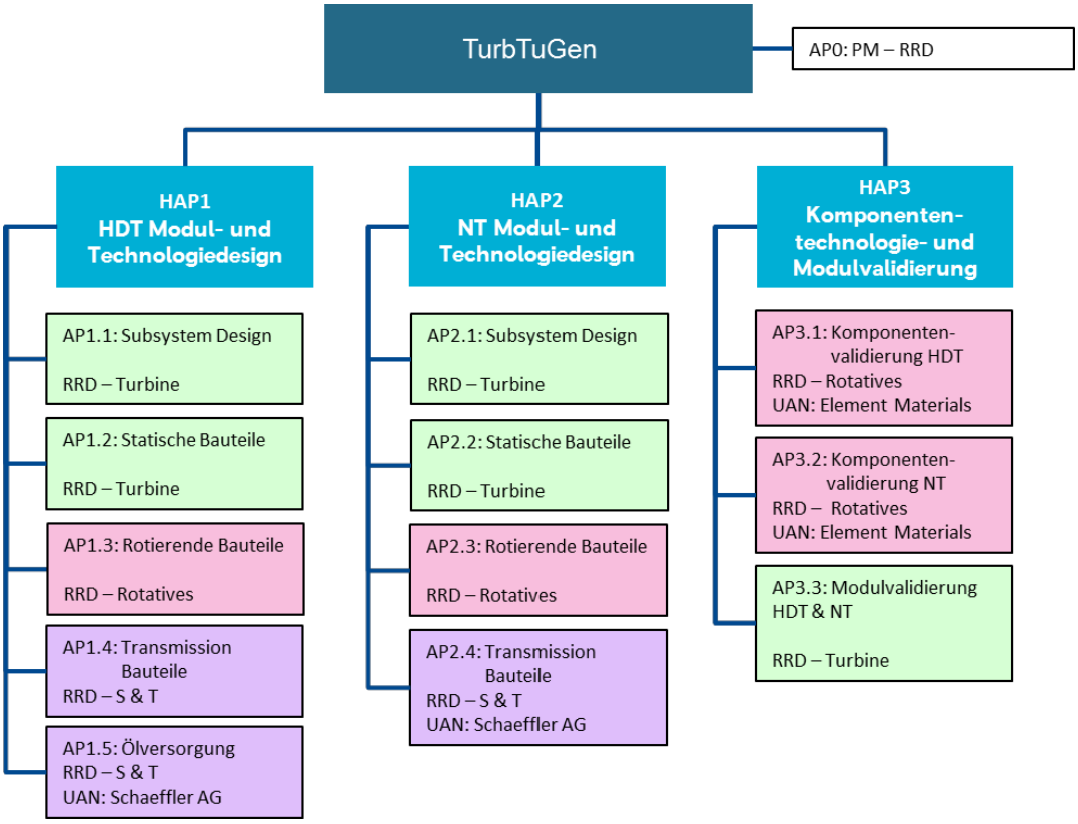

Abbildung 2: TurbTuGen Projektstrukturplan, Stand Beantragung

Im Laufe der Projektdurchführung traten Ergebnisse, Erkenntnisse, aber auch Probleme auf, die Auswirkungen auf die Projektziele, den Arbeitsinhalt und damit auch den Projektstrukturplan hatten. Der letzte gültige und während des LuFo Statusseminares von Oktober 2023 in Cottbus abgestimmte Projektstrukturplan ist in Abbildung 3 gezeigt. Die wichtigsten Änderungen werden danach zusammengefasst.

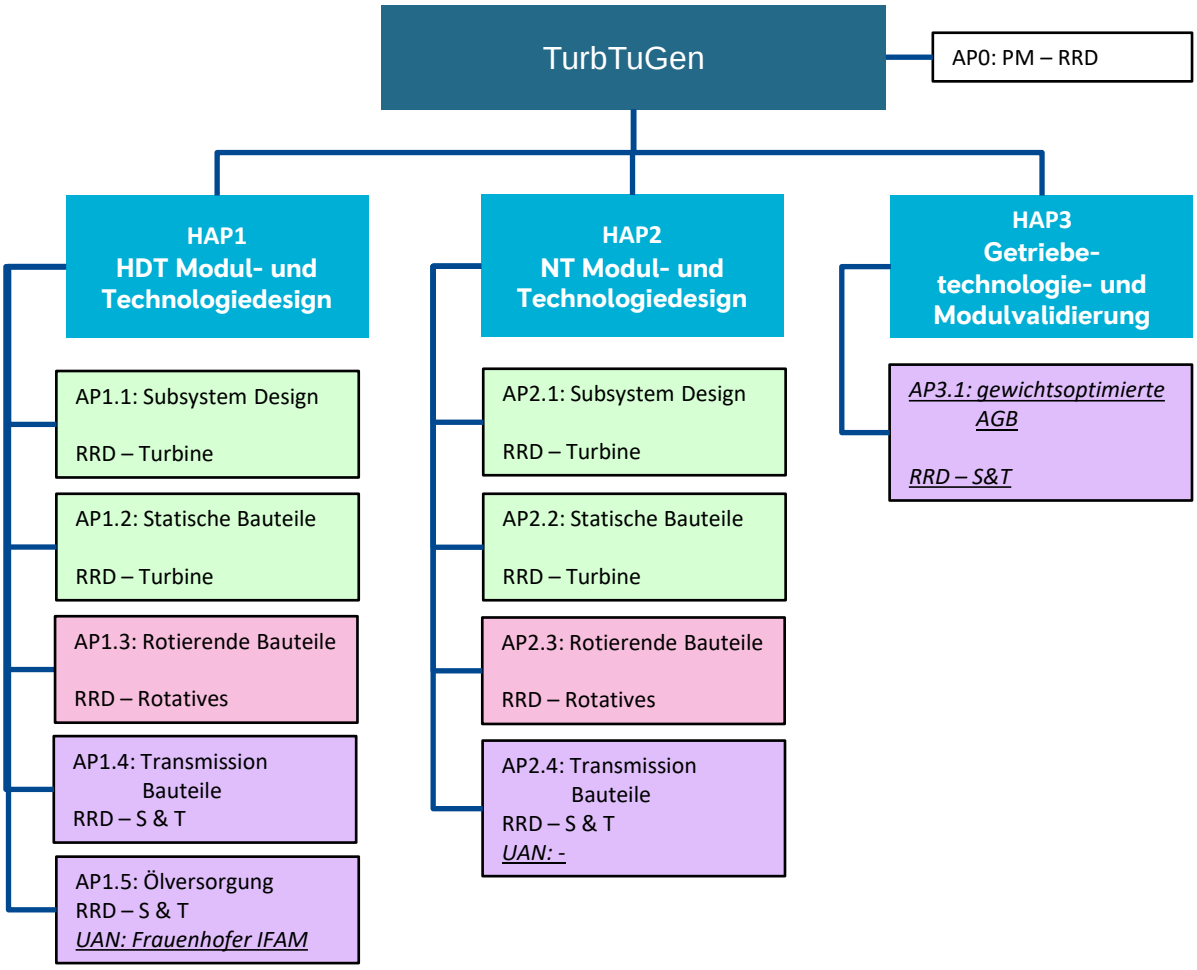

Abbildung 3: TurbTuGen Projektstrukturplan, Stand nach Änderungen

Bei den Projektzielen war eine Änderung der ursprünglich anvisierten Blisk-Bauweise der Rotoren auf eine beschaufelte Scheiben-Konstruktion notwendig. Der Hauptgrund lag in geänderte Anforderungen basierend auf Kundenerfordernissen, für die das Leistungsgewicht wichtiger gewertet als zunächst erwartet wurde. Zudem wurden signifikante Fertigungsprobleme der gegossenen Blisks festgestellt. Durch den Wechsel von Blisk auf die beschaufelte Scheiben kann beispielsweise Gewicht gespart werden, da keine Berstringe mehr benötigt werden. Die Entwicklung blieb dennoch technologisch herausfordernd und risikoreich.

Eine kostenneutrale Verlängerung von eineinhalb Jahren bis Mitte 2026 wurde auf Grund der Änderung der Projektziele und den Verzögerungen beim Test der neuen kleinen Gasturbine und der Generatorentwicklung angefragt. Testergebnisse bei thermal stabilisierten Bedingungen mit hoher Drehzahl und Leistung sind ein essenzielles Ergebnis für den Entwurf des Turbinenmoduls. Diese wurden Ende 2023 / Anfang 2024 durchgeführt. Deswegen verschob sich die Entwicklung des integrierten Turbogeneratorsystems im Rahmen der Phase 2.

Die Anpassung der Ziele und die Verschiebungen führten auch zu Anpassungen des Projektstrukturplans. Die ursprünglich geplanten Validierungstests (HAP3) der Blisks waren auf Grund der Zieländerungen und zeitlichen Verschiebungen nicht mehr sinnvoll bzw. möglich. Die freiwerdenden Mittel sollten für gestiegene Entwicklungsaufwände genutzt werden. So wurde beispielsweise im Rahmen von SysTuGen identifiziert, dass die Nebenaggregate mechanisch durch ein Getriebe (gewichtsoptimierte hybride AGB) betrieben werden sollen. Die Entwicklung sollte durch das neue AP3.1 gewichtsoptimierte hybride AGB unterstützt werden.

Eine Überarbeitung der hybrid-elektrischen Antriebsstrategie von Rolls-Royce hat zu dem Entschluss geführt das Projekt TurbTuGen zunächst zu stoppen.

4 Stand der Wissenschaft und Technik bei Beginn des Vorhabens

Bisherige Arbeiten des Antragstellers haben sich auf 2-wellige Turbofan-Triebwerke im mittleren Schubsegment (vornehmlich Geschäftsreiseflugzeuge im Schubbereich 12.000-25.000lbf Startschub) konzentriert. Im Turbinenbereich konnten so in den letzten Jahrzehnten umfangreiche Erfahrungen im Bereich von deckbandlosen und deckbandbehafteten 2-stufigen Hochdruckturbinen sowie mehrstufigen Niederdruckturbinen gesammelt werden. Frühere Entwicklungen von Wellenleistungstriebwerken in der Rolls-Royce Gruppe liegen mehrere Jahrzehnte zurück (z.B. M250) und erfüllen nicht mehr die zukünftigen Kosten-, Gewichts- und Emissionsziele. Weiterhin wurden die genannten Triebwerke nicht für den Bereich hybrid-elektrischer Antriebe entwickelt und optimiert. Die genannten Aspekte zeigen, dass der Stand der Technik im Bereich hybrid-elektrischer Antriebe sowie von Hilfsgasturbinen ein erhebliches Entwicklungs- und Optimierungspotential in Bezug auf Gewicht, Kosten und Emissionen in sich birgt. Untersuchte Einzelaspekte aus früheren Forschungsvorhaben des Antragstellers (z. B. transsonische einstufige Hochdruckdruckturbinen HWSS, Brennkammer-Turbinen-Interaktion, Metallspritzgießen (MIM) für Turbinenbauteile) konnten erhebliche technologische Verbesserungen aufzeigen, jedoch war ihr Anwendungsbereich auf das mittlere Schubsegment ausgerichtet.

Insbesondere für den Rotor der Hochdruckturbine soll in diesem Vorhaben erstmals eine gekühlte Blisk als integrales Bauteil entwickelt und zur Anwendungsreife gebracht werden. Hierbei muss ein ganzheitliches Konzept von Schaufel und Scheibe betrachtet und berücksichtigt werden, gerade im Hinblick auf die angestrebte kleine geometrische Größe der Zielanwendung. Bisher liegen beim Antragsteller für diesen Größenbereich nur Erfahrungen mit ungekühlten Rotor-Blisk Bauteilen vor (z. B. M250).

In einem ersten Schritt befasst sich der Antragsteller derzeit in einem laufenden Vorhaben (HiTTTurb FKZ 20T1521) mit der Entwicklung eines HDT-Rotors mit traditioneller Scheibe-Schaufel Verbindung für den Einsatzbereich des hybrid-elektrischer Antriebs, worauf aufbauend dann in diesem Vorhaben der nächste Schritt zum gekühlten Integralbauteil angegangen werden soll.

Dazu sollen die Schaufeln weiterhin als MIM Bauteile (Metallspritzgießverfahren) hergestellt werden, um den erheblichen Kostenvorteil dieser Herstelltechnologie gegenüber gegossenen Turbinenschaufeln ausnutzen zu können. Jedoch werden sie statt mit traditioneller Schaufel-Scheibe Verbindung mittels eines geeigneten Verfahrens (z. B. Reibschweißen) auf der Scheibe befestigt.

Im Gegensatz zur HDT sind die Rotoren der Nutzturbine als ungekühlte Gussteile ausgestaltet, was dem derzeitigen Stand der Technik entspricht. So ist z.B. bei der M250 die Niederdruckturbine zur Erzeugung der Wellenleistung in dieser Form in Bliskbauweise ausgeführt. Dies ist jedoch bei Neuentwicklungen nicht ohne erheblichen Aufwand zertifizierbar. Abhängig von dem tatsächlichen Einsatz muss die Zertifizierungsstrategie überprüft werden, da dies direkte Auswirkung auf die tatsächliche Konstruktion (z.B. Notwendigkeit von Containment) hat.

In beiden Fällen (HDT & NT) führt die Ausbildung der Rotoren als integrale Blisk-Bauteile zu einer höheren Komplexität von Entwicklung, Herstellung und Wartbarkeit. So ist zum Beispiel das Problem der Reparatur von einzelnen Schaufeln schon in der Entwicklung zu betrachten, damit nicht die Beschädigung einer Einzelschaufel zum Verlust der gesamten Blisk führt. Weiterhin weisen Blisk-Bauteile ein verändertes Frequenzverhalten mit reduzierter mechanischer Dämpfung durch den Wegfall von Schaufel-Scheibe Verbindung und Dämpferelement auf. Dies muss ebenfalls schon bei der Entwicklung der Bauteile berücksichtigt werden, um Probleme mit aerodynamischer Anregung und damit einhergehender Ermüdungsschädigung zu vermeiden.

Für die Fertigung von Fan- und Verdichter-Blisken, auch aus Nickelbasis-Legierungen, existiert umfassendes Know-how innerhalb von RRD am Fertigungsstandort Oberursel. Dies betrifft die komplette Fertigungskette vom Fräsen aus dem Vollen, d. h. aus einem kompakten Schmiederohling bis hin zur finalen Oberflächenbearbeitung durch das verfestigende, lebensdauerverlängernde Kugelstrahlen bzw. alternativ Kugeldruckpolieren. Dies bezieht sich bislang vorwiegend auf Bliskstufen im vorderen Bereich des HD-Verdichters. Aufgrund der deutlich geringeren Größe der zu entwickelnden und zu untersuchenden Turbinen-Blisk ergeben sich spezifische Herausforderungen, da die Zugänglichkeit deutlich eingeschränkter und damit herausfordernder ist. Bislang wurden Fertigungsprozesse für Verdichterblisken neben den Titanlegierungen im vorderen Bereich für die Nickelbasis-Legierungen Inconel718 und Allvac718Plus entwickelt. Die Komponentenvalidierung in Form von Schleuderversuchen (Spintests) im letzteren Werkstofffall ist bislang noch nicht abgeschlossen. In diesem Bereich werden die im beantragten Projekt zu validierenden Blisk-Komponenten für die Turbinenanwendung aufgrund ihrer kleinen Größen besondere Anforderungen an die Versuchsdurchführung stellen.

Wälzlager sind heutzutage für ein sehr großes Abmessungs-, Last- und Drehzahlspektrum verfügbar und im Maschinenbau sehr weit verbreitet. Für den Bereich der Gasturbinen – erst recht für kleinere Baugrößen – stellen die hohen Drehzahlen und die hohen Umgebungstemperaturen allerdings eine besondere Herausforderung dar. Mit der Drehzahl steigen die Zentrifugalkräfte an den Wälzkörpern des Lagers und damit auch die Rollverluste. Diese Verlustarbeit kann bei den Wälzlagern von mittelgroßen Gasturbinen (Nenndrehzahl Hochdruckwelle ca. 19 000 min-1) zweistellige kW-Werte erreichen und muss als Wärme in einer ohnehin schon warmen Umgebung abgeführt werden. Als Kühlmedium wird in Gasturbinenlagern Öl verwendet, welches zur Absenkung der Werkstofftemperatur entweder als Ölnebel vorliegt oder gezielt eingespritzt wird.

Wälzlager für hohe Drehzahlen und in relevanten Abmessungen sind bisher nur als Spindellager für den Bereich Werkzeugmaschinen oder für Elektromotoren verfügbar, beides Anwendungen in mäßig warmer Umgebung. Für das in LuFo 6-2 angestrebte Ziel einer Kleingasturbine mit hoher Leistungsdichte existiert heute noch kein Lager mit der notwendigen Lebensdauer und auch keine Sonder- oder Serienproduktion.

Bezüglich der im vorliegenden Vorhaben geplanten Entwicklung von kompakten und hocheffizienten Turbinen in Bliskbauweise sowie Hochleistungslager für hybrid-elektrische Antriebe wird darauf geachtet, keine existierenden Schutzrechte und

Schutzrechtsanmeldungen Dritter zu verletzen, die einer späteren Ergebnisverwertung entgegenstehen könnten. Eigene Patente hierzu wurden in diesem Bereich bisher nicht angemeldet.

5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

In der Lausitz sind folgende Arbeiten durchgeführt worden, bzw. geplant gewesen.

- AneCom AeroTest GmbH, Freiheitstraße 122, 15745 Wildau hat Detailauslegungen der Lagerkammern unterstützt
- FTT Deutschland GmbH, Ludwig-Witthöft-Straße 14, 15745 Wildau hat Detailauslegungen des Turbinenmoduls
- Schaeffler Aerospace Germany GmbH & Co KG, Georg-Schäfer-Straße 30, 97421 Schweinfurt sollte die Erprobung und Validierung von innovativen Ölversorgungskonzepten sowie ALM Außenringen mit integrierten Kühlkanälen unterstützen. Diese Arbeiten konnten im Fördergebiet nicht durchgeführt werden.
- Fraunhofer-Institut für Angewandte Polymerforschung IAP, Schmiedestraße 5, 15745 Wildau sollte für SPH Studien zur Optimierung der Lagerschmierung und -kühlung durchführen.

Im LuFo Anteil sind folgende Arbeiten durchgeführt worden

- Turbo Science GmbH, Robert-Bosch-Straße 7, 64293 Darmstadt hat CFD-Rechnungen für die Turbinenauslegung unterstützt

6 Darstellung der erzielten Ergebnisse

6.1 Designprozess für Blisk

Die technischen Ergebnisse für die Untersuchung und den Entwurf des Designprozesses von Turbinen-Blisken beziehen sich auf frühe Arbeiten im Projekt (Abbruchmeilenstein), wo geänderte Produktanforderungen noch nicht bekannt waren (vgl. Abschnitt 0). Die gewonnenen Erkenntnisse und der erarbeitete Prozess stellen wichtige Ergebnisse für den Entwurf möglicher zukünftiger Turbine-Blisken dar.

Die Ertüchtigung des automatisierten Designprozesses für Blisk-Anforderungen im AP1.3 „Rotierende Bauteile“ fokussiert auf die Entwicklung einer gekühlten HDT-Blisk, welche Scheibe und Schaufeln integriert. Aufgrund der Neuartigkeit des Bauteils sind dazu zunächst die automatisierten Designprozesse für Schaufel und Scheibe an die neuen Anforderungen anzupassen und miteinander zu verbinden. Dieser Prozess soll dann für die integrale Definition von Scheibe und Schaufeln Verwendung finden. Auf Basis der Testergebnisse von HAP3 soll final eine Überarbeitung und Verbesserung der Bauteildefinition erfolgen.

Das parametrische Geometriemodell des Bling-Konzepts, einer Variante der gekühlten HDT-Blisk bei der die Schaufeln in einem Ring gegossen und auf den Scheibenkörper aufgeschweißt sind, wird durch den „Gas-Path Design-System“ (GPDS)-Prozess gesteuert. Abbildung 4 zeigt dafür das Ablaufdiagramm.

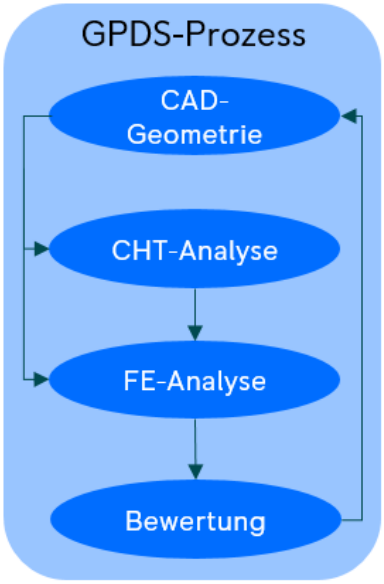

Abbildung 4: GPDS-Prozess

Das GPDS-System ist ein plattformunabhängiger Python-Prozess, welcher die gesamte RR-Werkzeugkette der beteiligen Design Disziplinen Geometrie, Aero-Thermal und Mechanik verbindet. Dabei können je nach Notwendigkeit Teile des Prozesses auf Windows Desktop-PCs als auch auf Linux Clustern ausgeführt werden. Der Prozess beinhaltet außerdem die Möglichkeiten Parameter Studien und Optimierungsaufgaben zu definieren und zu steuern.

6.1.1 CAD-Geometrie

Für die Erzeugung der parametrisierten CAD-Geometrie werden folgende Komponenten (Abbildung 5) durch den Prozess automatisiert erzeugt:

1) Scheibengeometrie: Parametrisches 2D Models zur Dimensionierung der Scheibe
2) Turbinen-Schaufel: Parametrischer Aufbau über 21 ebene Profile definiert
3) Detaillierte Schaufelgeometrien (Gaspfad): Parametrische Definition aller 3D-Features
4) Detaillierte Schaufelgeometrien (Kern): Parametrische Definition über Offsets zur Schaufel definiert
5) Film-Kühlung: Anzahl, Position, Winkel und Durchmesser

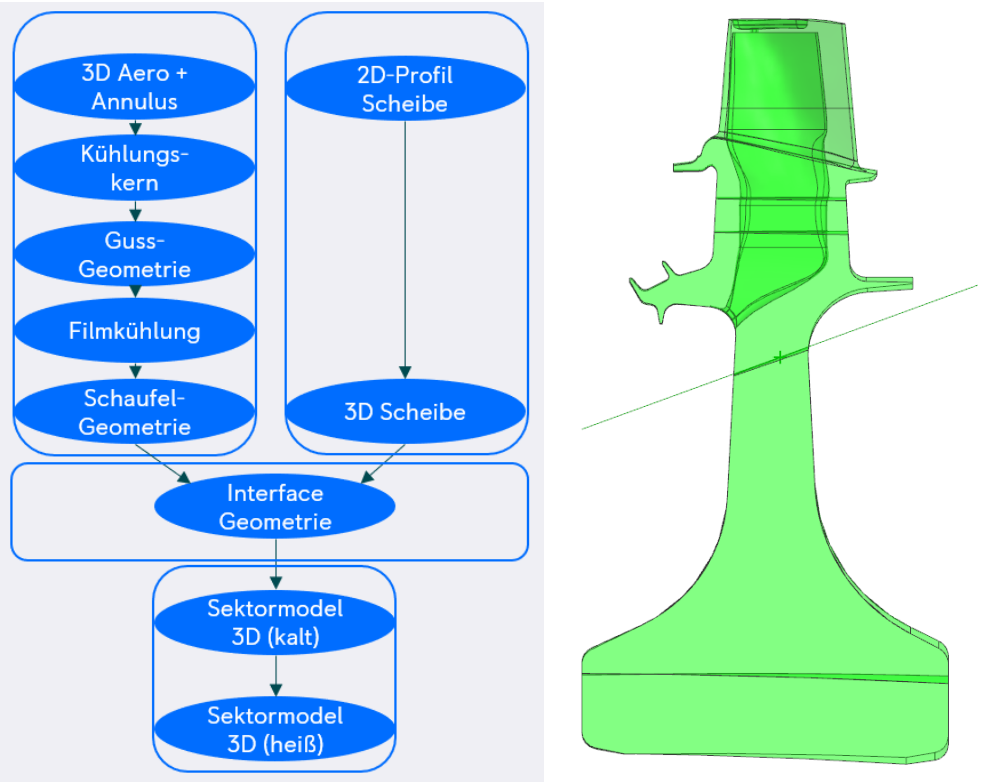

Abbildung 5: Komponenten zur CAD-Geometrieerzeugung u.A. mit Fokus auf die Schnittstelle zwischen Disk und Schaufel

Der Geometrie-Prozess führt eine Serie von Siemens NX Open basierten Applikationen aus, wobei die Schritte und deren Reihenfolge dem tatsächlichen Fertigungsprozess entsprechen. Das erzeugte Geometriemodell ist voll parametrisiert und weitestgehend assoziativ, wobei alle Parameter über Text-Schnittstellen angesprochen werden können. Die Assoziativität stellt zusammen mit der jeweiligen Modellierung der Geometrie-Elemente sicher, dass Änderungen durch die gesamte Modellstruktur durchgearbeitet werden.

Zunächst wird die Geometrie der Schaufel erzeugt, indem die 2D Definitionen des Aerofoils und des Heißgas-Annulus auf „kalt“ skaliert, in 3D überführt und mittels geeigneter Übergangsradien verbunden werden. Dem folgt der Aufbau der Kerngeometrie mit Verwirbelungselementen, welcher dann, zusammen mit der zuvor erzeugten 3D Aerofoil-Geometrie, zur Geometrie eines Gußteil-Rohlings zusammengefügt wird. An dieser Rohlings-Geometrie werden im Weiteren verschiedene Operationen mittels Abzugskörper durchgeführt, welche der maschinellen Bearbeitung durch EDM, Fräsen oder Laserbohren entsprechen. Den Abschluss der Geometrieerzeugung der Schaufel bildet die Erzeugung der detaillierten Filmkühlungsdefinition, wobei diese aus Gruppen von Zylinderköpern mit oder ohne Ausströmformen, den sog. „Fan-Shapes“, besteht.

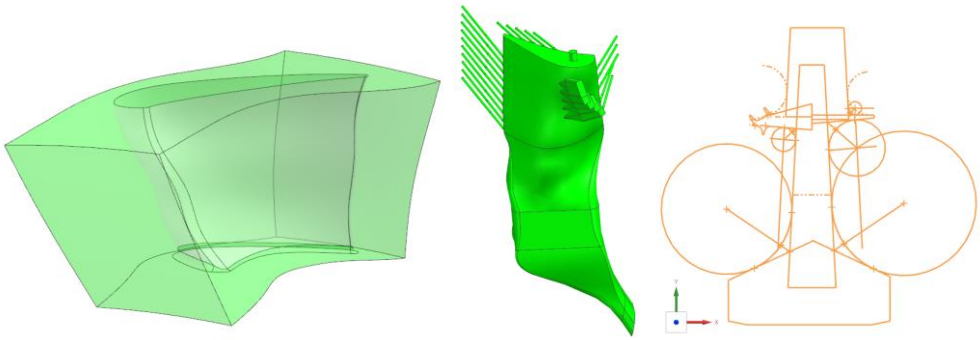

Abbildung 6: Geometrie-Teilmodelle - äußere Gussform mit Aeorofil und innerer Plattform (links), Kühlungskern mit Film-Definition (mit-te) und der 2D Scheibenkontur (rechts).

Die Scheibengeometrie wird aus einem parametrisch aufgebauten 2D Profil erzeugt, indem dieses durch Rotation zu einem Sektor aufgespannt wird. In einem weiteren Schritt wird das Sektor-Modell der Scheibe mit der Schaufelgeometrie verbunden. Bei dem Bling-Konzept des HDT-Rotors ergeben sich mehrere Schnittstellen zwischen Schaufel- und Scheibengeometrie: Den Übergang des rotationssymmetrischen Scheibenkörpers zur Schaufel unterhalb der inneren Annulus-Linie, der Durchführung des Kühlkanals der Schaufel durch den Scheibenkörper sowie die physikalische Schnittstelle von Schaufel und Scheibenmaterial als parametrische, gekrümmte Ebene unterhalb der Kühllufteintrittsöffnung.

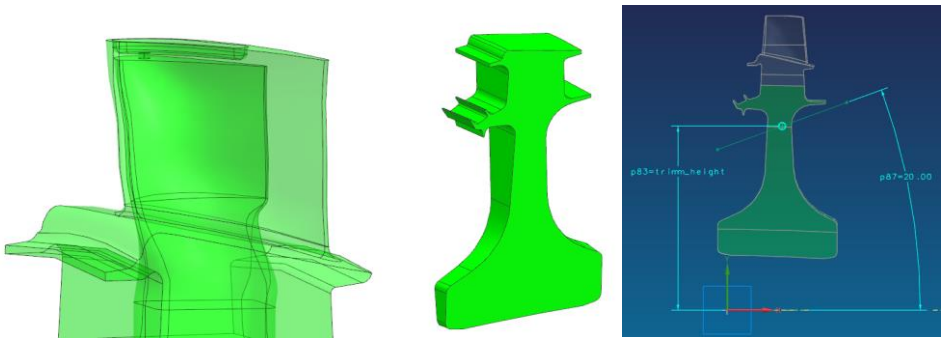

Abbildung 7: CAD-Geometrieerzeugung des Rotorsektors - integriert die Schaufel-Geometrie mit Kühlungskern (links), die Scheiben-Geometrie (mitte) sowie die parametrische Fügestelle von Schaufel- und Scheibenmaterial (rechts)

Von der erzeugten Geometrie des Rotors werden zwei Analysemodelle abgeleitet. Für das CHT-Modell wird zu-nächst das Sektor-Modell des Rotors auf „heiß“ transformiert, um die korrekte Position im Heißgaspfad zu er-langen. Zusätzlich wird ein zyklisch-periodisches Modells des Fluids inklusive Heißgaspfad, Kühlungskern und Filmkühlung erzeugt. Das „kalte“ Modell für die Strukturanalyse wird abgeleitet, indem die Filmkühlungsbohrun-gen entfernt und das Modell auf die Anforderungen des RR-eigenen Analysetools SC03 angepasst wird.

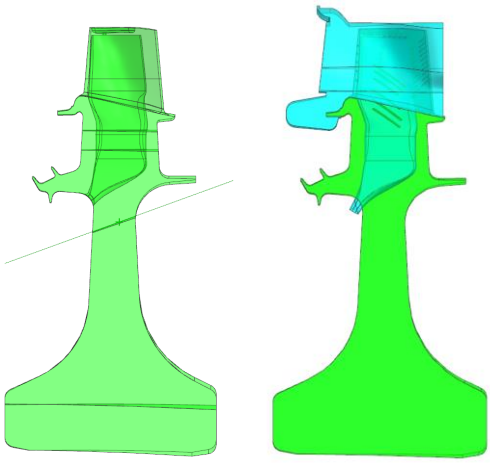

Abbildung 8: Von der CAD-Geometrie abgeleitete Analysemodelle - Sektormodelle für die Strukturanalyse (links) und die konjugierte (CHT) Analyse mit Struktur- und Fluiddomain

Die Steuerung der Geometrieerzeugung erfolgt über den GPDS-Prozess, wobei die Geometrieparameter über eine Eingabematrix variiert werden können. Der Logik eines „Desing of Experiments (DoE)“ folgend, kann unter Vorgabe geeigneter Bandbreiten der Parameter die Eingabematrix automatisch, z.B. als Latin Hypercube (LHC) durch den GPDS-Prozess erzeugt werden.

6.1.2 Conjugate Heat Transfer (CHT)-Analyse

Zur Berechnung und CHT-Analyse des Schaufel- und Kühlungsentwurfs, der die aero-thermalen Aspekte adressiert und die Metalltemperaturen für die mechanischen Belastungsrechnung liefert, basiert auf dem STAR-CCM+ Software-Paket und wird mit JAVA für den automatischen Prozess konfiguriert. Der Prozess gliedert sich in die folgenden sieben Schritte:

1) Vorbereitung: Bereitstellung aller Randbedingungen (Aero-thermal und Material)
2) Geometrie: Importieren und ggf. säubern/reparieren der Geometriedefinition
3) Vorverarbeitung: Importieren und Anwenden der Materialdaten sowie numerischen Randbedingungen und Einstellen des Lösers
4) Netzgenerierung: Definition der globalen und lokalen Netzparameter und Erzeugung des Volumen- und Oberflächennetzes
5) Definition Nachbearbeitung: Erzeugung von Auswertebenen, Graphiken und Berichte während der Laufzeit und nach Prozessdurchlauf
6) Berechnung: Durchführung der CHT-Rechnung mit Konvergenzanalyse
7) Nachbearbeitung: Globale und lokale Bewertung der Ergebnisse

Abbildung 9 zeigt exemplarisch die relevanten Schritte des CHT-Durchlaufs.

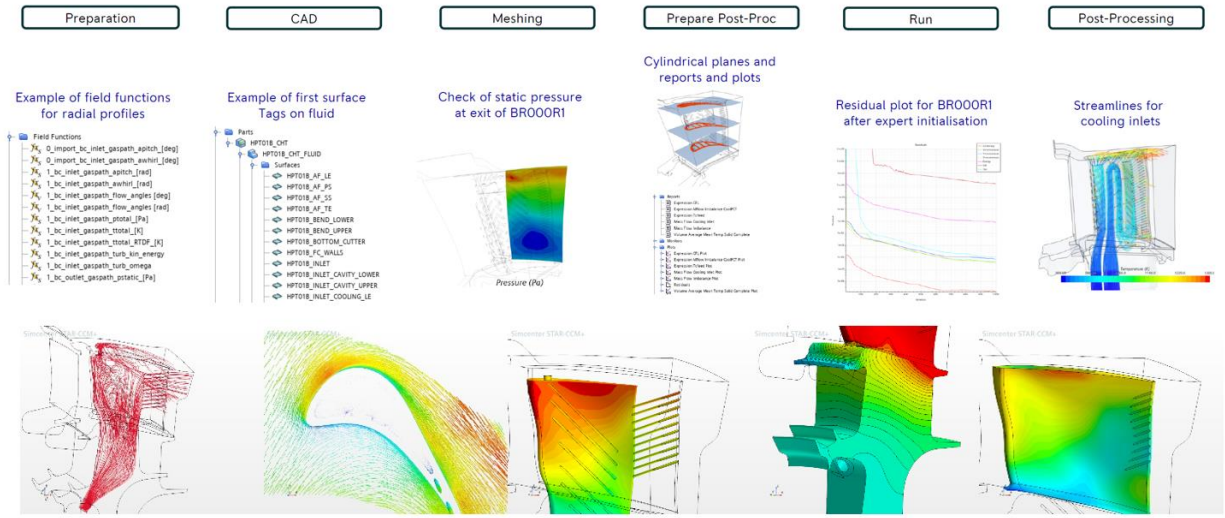

Abbildung 9: Systematischer Ablauf der CHT-Analyse am Beispiel eines generischen Rotorentwurfs (oben) - Schritt 3 ist aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht gezeigt - sowie Ergebnisses für das CHT-Modell des HDT Rotors des Bling-Konzepts (unten)

6.1.3 Festigkeitsanalyse mittels Finite-Elemente (FE) Methode

Die Bauteilfestigkeit wird durch einen zweistufigen Prozess untersucht (Abbildung 10), welche aufeinander aufbauen und jeweils Finite Elemente Analysen des Sektormodells sowie verschiedene Auswerte-Routinen enthalten. Der zweistufige Prozess ermöglich eine effizientere Abdeckung des Parameterraumes, da insbesondere Negativ-Bewertungen bereits nach der ersten Stufe erfolgen können. Der Prozess gliedert sich in die folgenden Schritte:

Stufe 1: Elastische Analyse (0,5h Laufzeit)

1) Vernetzung & Modell-Aufbau & elastische Analyse
2) Bewertung der Spannungen, Dehnungen (LCF Lebensdauern) von Schaufeln und Scheibe
3) Laufzeit ca. 30min

Stufe 2.1: Kriechanalyse (3h Laufzeit)

4) Optional Neu-Vernetzung
5) Modellaufbau & in-elastische Analyse
6) Kombinierte Bewertung LCF+Kriechen der Schaufel
7) Laufzeit ca. 3h

Stufe 2.2: Scheibenbewertung (2h Laufzeit):

8) Feature-basierter Vergleich mit Rig-Test

Neben den der Drehzahl sind die aus der CHT-Analyse gewonnenen Metalltemperaturen und statischen Gaslasten die wesentlichen Randbedingungen. Weiterhin sind zyklisch-symmetrische Übergangsbedingungen an den Sektor-Trennflächen definiert, welche entsprechend in der Analyse-Geometrie modelliert sind.

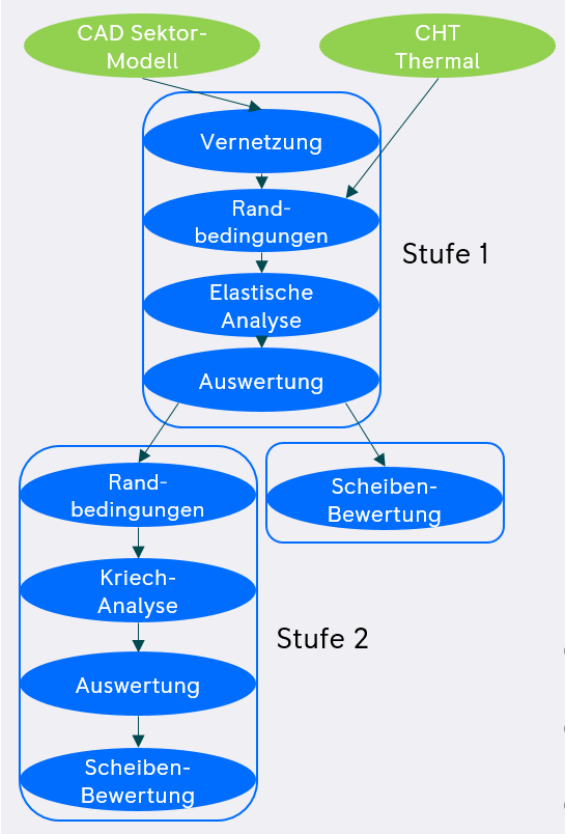

Abbildung 10: Systematischer Ablauf der zweistufigen FE-Analyse

Im Rahmen der ersten Stufe wird zunächst das Sektormodell durch 10-Knoten-Thetraeder Elemente vernetzt und die Randbedingungen aufgebracht. Darauf folgt eine nicht-lineare elastische FE-Analyse des Rotor-Sektor-Modells, d.h. unter Berücksichtigung der Verformungen, sowie eine Bewertung der ermittelten Spannungen und Dehnung. Zusätzlich wird die Betriebsfestigkeit infolge zyklischer Wechselbelastung bewertet. Diese Analyse wird bei jedem Geometrie-Kandidaten angewandt und ermöglicht die bereits eine Negativ-Bewertung.

Für aussichtreiche Geometrie-Kandidaten wird eine zweite Stufe des Prozesses durchlaufen, bei der das Zeit-standverhalten der Schaufel-Komponente durch eine Kriechanalyse untersucht wird. Daran angeschlossen ist die Bewertung des kombinierten Schadensmechanismus aus Kriech- und Wechselbelastung. Zusätzlich erfolgt in dieser Stufe der Abgleich der ermittelten Spannungs- und Dehnungsbereiche mit einer Datenbank basierend auf nachgerechneten Scheiben-Berstversuchen.

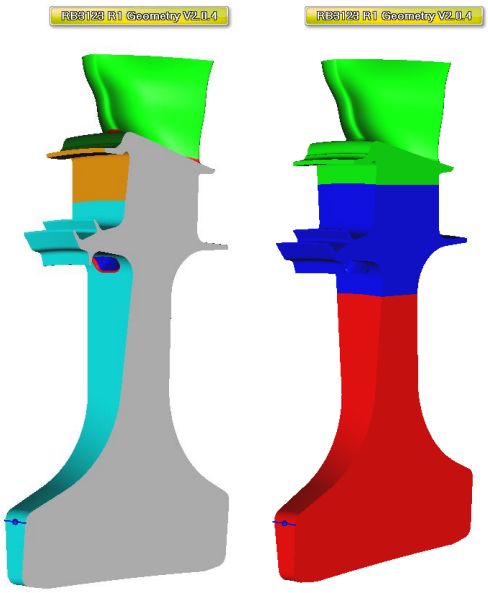

Abbildung 11: Einteilung der Schaufeloberflächen zur Bewertung – Abgrenzung unterschiedliche Bereiche der Bauteilbewertung (links) und Einteilung der Schaufel in drei Regionen zum Abgleich mit Berst-Versuchen (rechts).

Für die Bewertung des Rotors ist das gesamte Modell in Bereiche unterteilt (Abbildung 11) sodass zum einen unterschiedliche Bewertungskriterien und zum anderen unterschiedliche Grenzwerte angewandt werden können. So ist der Schadensmechanismus der durch Oxidationsangriff nur im Bereich des Heißgaspfads relevant, wobei jedoch andere Grenzwerte auf der inneren Plattform als am Aerofoil gelten.

6.1.4 Optimierungsstrategie

Die Topologie des Rotors basiert auf der aktuellen Geometrie der Phase 1 des Lausitz-Projekts mit Anpassungen am Annulus und sowie dem Wechsel von einer traditionellen beschaufelten Scheibe hin zu einem „Bling“-Konzept. Die Optimierungsstrategie berücksichtigt den “fortgeschrittenen” Stand des Entwurfs sowie die schrittweise Bauteilfreigabe. Zunächst sind vier Optimierungs-Aufgaben geplant:

1) Dimensionierung der Rotor-Scheibe basierend auf dem aktuellen Schaufelkonzept -> Hierbei werden hauptsächlich Parameter der 2D Scheibenkontur verwendet, um die Scheibenkontur optimal relativ zum Aerofoil zu positionieren und zu dimensionieren.
2) Optimierung der Lage der physikalischen Schnittstelle zwischen Schaufelring und Scheibenkörper -> Hierbei werden hauptsächlich Parameter des Kerns (zur Gewichtsreduktion) und der Interface-Ebene verwendet.
3) Optimierung der Scheiben-/Kern-Einströmöffnung -> Dieses geometrische Element ist typischerweise maßgeblich für die Scheibendimensionierung und wird hauptsächlich mittels der Parameter des Übergangsradius am „Airhole“ und der des Kerns beeinflusst.

4) Schaufel-Aerofoil Lebensdaueroptimierung -> Als letzten Schritt wird mit Hilfe der Parameter der Film Definition und Wandstärken des Kühlungs-Kerns die Lebensdauer der Schaufel optimiert.

Aufgrund der Vielzahl an Geometrie-Parametern ist bei vor allen Optimierungsaufgaben eine Parameter-Reduktion geplant: Dies kann je nach Bereich und Aufgabenstellung durch Paramater-Sensitivitätsanalysen erfolgen, oder aber durch die Nutzung von Erfahrungen aus vorangegangenen Optimierungs-Studien an konventionellen Rotor-Geometrien. Dabei erlaubt es das Geometrie Tool-set auch, Parameter sinnvoll zu gruppieren.

6.2 Transmissionsbauteile

Mit dem Ziel, die optimale Lösung für die neue schnelllaufende Triebwerksgeneration zu definieren, wurden im Laufe des Jahres 2022 einige verschiedene Hoch- und Niederdruck-Lagerkonfigurationen betrachtet.

Unter anderem war die ursprüngliche Absicht, den internen Rolls-Royce Konstruktionsrichtlinien für diese Art von rotierenden Hochgeschwindigkeitslagern zu folgen, die die Schmierung unterhalb der inneren Laufbahn empfehlen, insbesondere für schnelllaufende Kugellager wie das, was am vorderen Ende des HP-Rotors installiert ist. Aufgrund von Platzbeschränkungen, bedingt durch die kleineren Dimensionen dieser neuen Triebwerksgeneration, konnte diese bisher präferierte Schmierung unterhalb der inneren Laufbahn nicht umgesetzt werden.

Der Fokus lag deshalb auf der Entwicklung alternativer Konzepte für die Schmierung und Kühlung der Lager. Innerhalb dieser Entwicklungsaktivität wurden Optimierungen der Lagergeometrien (Außenringführung, angepasste Lagerkäfiggeometrie für einen effizienteren Ölfang usw.) und eine spezielle Analyse der Ölsprühströmungen und -ziele durchgeführt.

Zur Unterstützung dieser Untersuchungen wurde ein Teil der Arbeiten extern von der Firma AneCom-AeroTest GmbH mit Sitz in der Lausitz durchgeführt. In Anbetracht des Umfanges und der Komplexität der in die Lausitz verlagerten Arbeiten ist ein Ingenieur des involvierten Transmissions-Konstruktionsteams bereits im Dezember 2022 nach Cottbus umgezogen und wird dort vor Ort die Arbeiten an den TurbTuGen-Aktivitäten unterstützen, sobald diese wieder aufgenommen werden.

Mit Hilfe von CFD-Simulationssoftware, insbesondere Smooth Particle Hydrodynamics (SPH), wurden Sprühcharakteristik, Effizienz und Reflexion beim Auftreffen auf die Lagergeometrie simuliert und die zu untersuchende Schmierkonfiguration in Bezug auf Folgendes betrachtet:

- Anzahl der Ölzuführungen
  - Zwei Öldüsen pro Hoch- und Niederdruck- Kugellager
  - eine Öldüse pro Hochdruck- und Niederdruck- Zylinderrollenlager
- Distanz und Orientierung der Öldüsenauslässe zum Lager
- Ölvolumen und Sprühcharakteristik

Es ist anzumerken, dass die SPH-Simulationsstudien (wie in Abbildung 12 gezeigt) unter dem Dach der SysTuGen Aktivität durchgeführt wurden, die Ergebnisse dieser Analysen wurden vom Getriebeteam, also TurbTuGen, für die Konzeptauswahl und Bauteildefinition übernommen. Obwohl erste Studien die Entscheidung über die Architektur der aktuellen Konzeptauswahl für neue kleine Motoren ermöglicht haben, ist beabsichtigt, mit der CFD- und SPH-Simulation im Laufe des Jahres 2024 fortzufahren, um eine weitere Optimierungsmöglichkeiten und detailliertere Auslegungskriterien zu definieren. Details werden in Abschnitt 6.3 beschrieben.

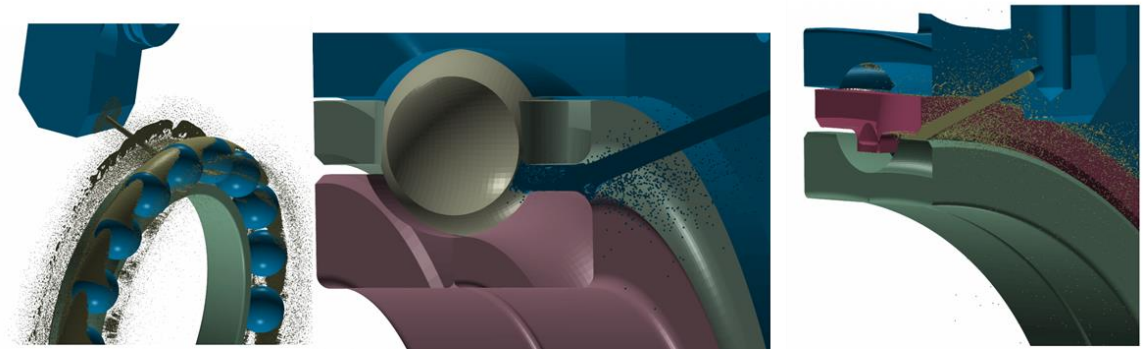

Abbildung 12: Beispiel für eine SPH Simulation (Teil der SysTuGen Aktivität)

Zusätzlich zu den analytischen Studien und als Validierungs- und Verifizierungsaktivität wurden die Öl-Düsen in einem Prüfstand in der Universität Hannover getestet, um zu bestätigen, dass die Konstruktionsanforderungen erfüllt sind, und um den Aufwand innerhalb des endgültigen Treibwerktests signifikant zu verringern.

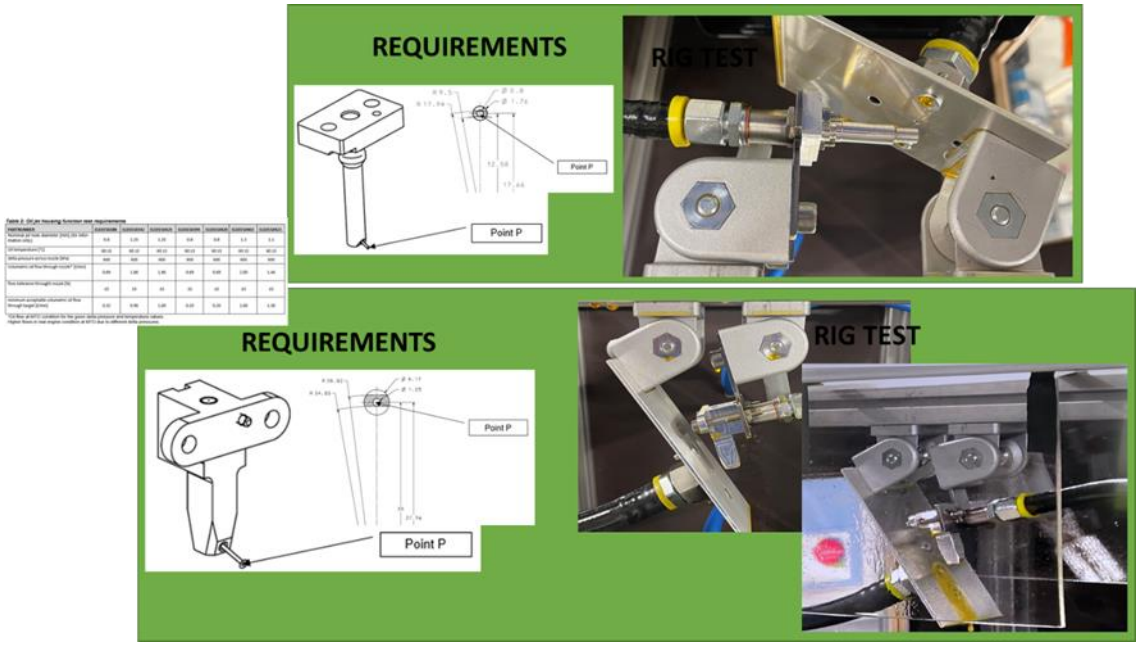

Abbildung 13: Beispiel für ein Öldüsenteststand und zugehörige Anforderungen

Das final vorgeschlagene Design aller Lagerbauteile wurde im zweiten Quartal 2022 akzeptiert und in die Fertigung überführt. Die Komponenten für die Phase 1 (abgedeckt durch Ad2Tec HAP7) wurden erfolgreich hergestellt, getestet und bis Ende 2022 an RRD Dahlewitz geliefert.

Für die Konzept- und Detailauslegung und der finalen Freigabe der zu fertigenden Lager für Phase 2 (abgedeckt durch TurbTuGen AP1.4) werden die Testergebnisse aus dem Triebwerksversuchen bei Phase 1 herangezogen und mit den Anforderungen aus der Phase 2 abgeglichen, sodass der Aufwand zur Auslegung der Lagerdetails möglicherweise signifikant reduziert werden könnte.

Die Arbeiten zum Designkonzept wurden 2023 abgeschlossen. Die konstruierten Bauteile wurden mit Eigenmitteln finanziert gefertigt und dem Zusammenbau übergeben. Abbildung 14 und Abbildung 15 zeigen die instrumentierten und zum Modul zusammengebauten Teile.

Abbildung 14: FCB mit Ölversorgung und Nebenaggregateantrieb

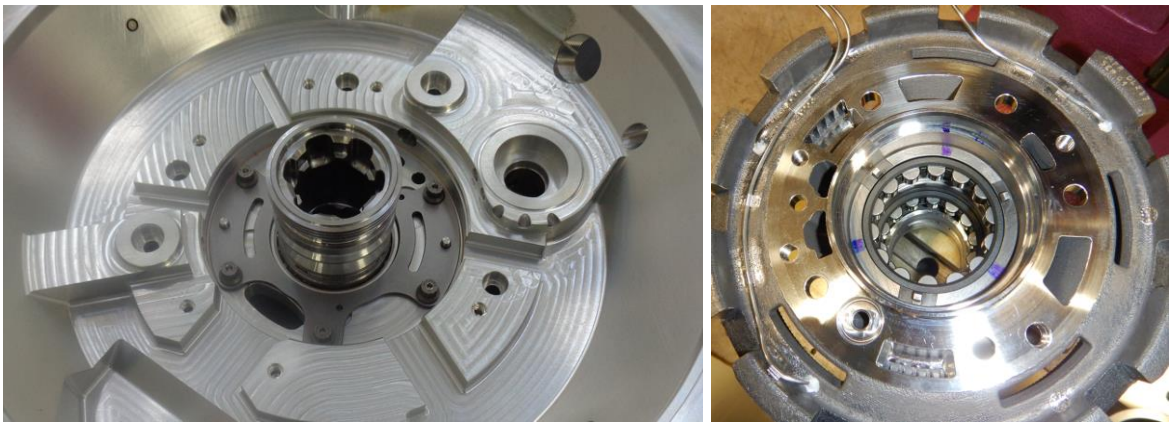

Abbildung 15: Hergestellte Lagerkomponenten im eingebauten Zustand

Der Prototypentest der kleinen Gasturbine wurde 2023 begonnen und bis März 2024 erfolgreich abgeschlossen. Eine Vielzahl von Messdaten aus den Testläufen wird ausgewertet und für die Verbesserung der Konstruktion des Phase-2-Triebwerkes berücksichtigt. Erkenntnisse aus der Messung des Vibrationsverhaltens der

Testtriebwerke deuten darauf hin, dass die Lageranordnung und/oder eine Anpassung der Wellengeometrie für das produktnahe Triebwerk vorgenommen werden sollten.

Die für die in der Luftfahrt untypische Schmierung der Lager zeigte in den Test keine Auffälligkeiten und dieser Erkenntnisgewinn kann ebenfalls für das produktnahe Triebwerk herangezogen werden und weiter Verwendung finden.

Systemstudien zur Erhöhung der Leistung und Verbesserung des Gewicht-Leistungsverhältnis wurden begonnen. Die dadurch angepasste Systemarchitektur wird auch in der Anpassung der Lagerkammerkonstruktionen Berücksichtigung finden.

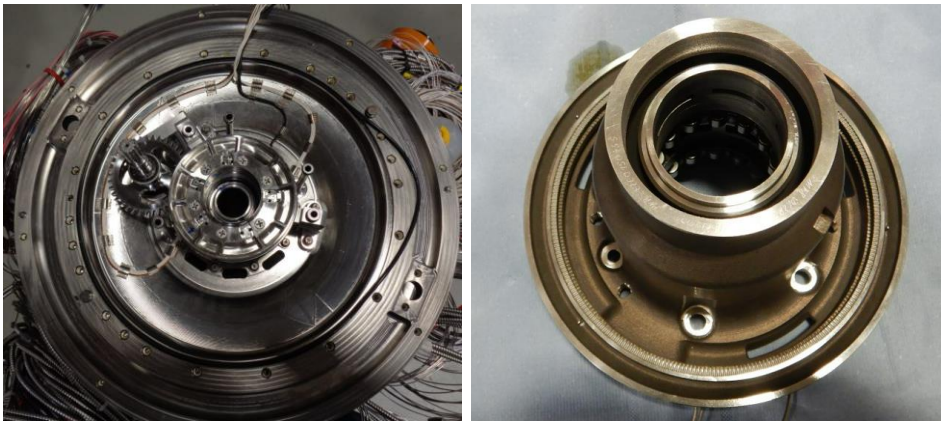

Abbildung 16: Transmissions-Bauteile

6.3 Ölversorgung und Optimierung

Im Arbeitspaket 1.5 waren laut Arbeitsplan für 2022 noch keine Aktivitäten vorgesehen, es wurde jedoch mit der Vorbereitung im Juni 2022 begonnen. Dabei stellte sich heraus, dass Teile der ursprünglich geplanten Aktivitäten – Konstruktion und Versuche optimierter Kühlkonzepte im Unterauftrag durch Schaeffler Aerospace Group (SAG) auszuführen – leider nicht wie gefordert in der Lausitz durchgeführt werden können. Im Einvernehmen mit der SAG wurde dieser Unterauftrag daher nicht vergeben.

RRD strebt an Arbeiten innerhalb dieses Arbeitspaketes umzuwidmen. Es ist nun vorgesehen, durch CFD-Simulation in der Lausitz-Region durch die Fraunhofer Gesellschaft die Schmierstoffzuführung zu untersuchen. Der gewählte Berechnungsansatz Smooth-Particle Hydrodynamics (SPH) wurde durch RRD bereits zur Untersuchung der Schmierung von Kugellagern angewandt (Abbildung 17), eine Untersuchung der Schmierung von Zylinderrollenlagern erscheint daher vielversprechend. Diese Simulationen unterscheiden sich von den Simulationen aus AP 1.4 weiterhin darin, dass nicht Konzepte, sondern feinere Parametervariationen untersucht werden.

Erste Gespräche mit der Fraunhofer Gesellschaft wurde im September 2023 geführt, die Durchführung der Berechnungen ist für das Jahr 2024 vorgesehen. Aktuell wird ein Angebot angefragt und besprochen. Ausgehend von den Ergebnissen soll ein optimiertes Kühl- und Schmierkonzept auf die Entwicklung der Phase 2 übertragen werden.

Abbildung 17: Ergebnisdarstellung einer Untersuchung der Schmierstoffverteilung mittels SPH in einem Kugellager

Die mit der Fraunhofer Gesellschaft geplante SPH-Simulation im Rahmen eines Arbeitspaketes für Lagerschmierung wurden weiter vorbereitet, konnten aber noch nicht beauftragt werden. In Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer Institut IAP aus Wildau in der Lausitz wurden Angebote für die Rechnungen abgestimmt und iteriert. Eine Beauftragung war für 2024 geplant, sobald die Konstruktion der hinteren Lagerkammer für die Phase 2 ausreichend vorangeschritten ist. In diesem Bereich werden zur Erhöhung der Leistungsdichte und besseren Integration signifikante Änderungen erwartet. In dieser Situation war eine Beauftragung noch nicht zielführend.

6.4 NT Modul- und Technologiedesign

Basierend auf Festigkeitsanalysen aus dem Vorgängerprojekt (LuFo5/2 HittTurb, 20T1521) sind Änderungen in der Konstruktion der Nutzturbine notwendig, um neue Technologieanforderungen zu erfüllen. Diese Änderungen wurden durch Flugzyklen-Analysen an der Nutzturbine unterstützt.

Das 2D-Temperaturmodell und die Stressanalyse der Nutzturbine wurde basierend auf den Vorgängerarbeiten weiterentwickelt. Diese Weiterentwicklung umfasste konstruktionstechnische Änderungen, Materialanpassungen sowie ein verbessertes Verständnis der Gas- und externen Lasten. Abbildung 18 zeigt das verwendete CAD-Modell, mit dem die Untersuchungen durchgeführt wurden.

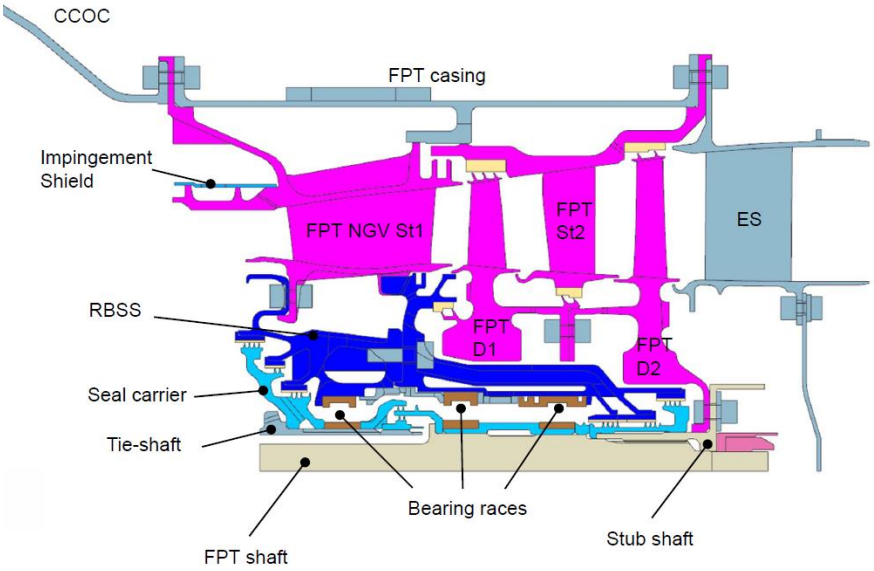

Abbildung 18: 2D-Modell der Nutzturbine

Das 2D-Modell und die damit durchgeführten Analysen sind essenzielle Bausteine für die detaillierte 3D-Konstruktion der einzelnen Bauteile. Durch die Analysen werden wichtige Informationen zu den Metalltemperaturen, zur Festigkeit und dem Abstand zwischen statischen und rotierenden Bauteilen bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen ermittelt.

Abbildung 19 und Abbildung 20 zeigen einige Ergebnisse der Untersuchungen. In Abbildung 19 ist ein Screening der Festigkeitsanalysen dargestellt. Dabei werden die Spannungen aus der Festigkeitsanalyse mit den maximal zulässigen Spannungen unter Berücksichtigung eines Sicherheitsfaktors ins Verhältnis gesetzt. Durch diese Darstellung werden interessante Bereiche identifiziert, die einer genaueren Analyse bedürfen und potenziell angepasst werden müssen.

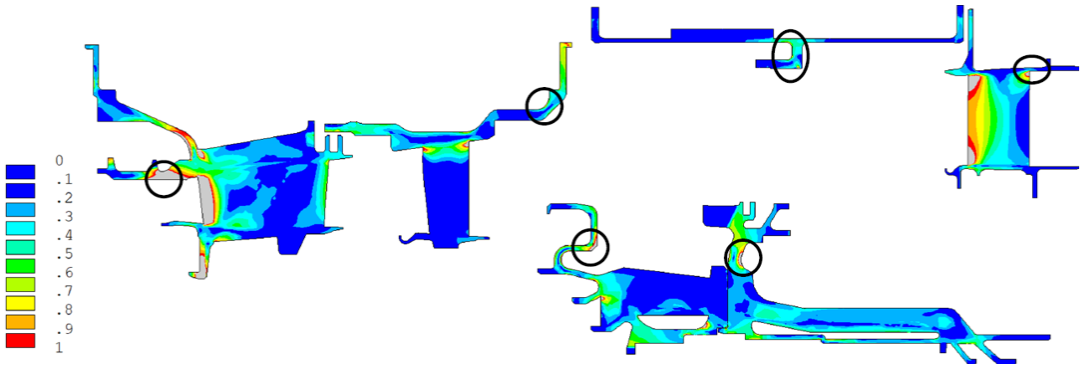

Abbildung 19: Ergebnisse der 2D-Festigkeitsanalyse

In Abbildung 19 ist ein Ergebnis aus der 2D-Spaltanalyse dargestellt. Unter Berücksichtigung der thermalen Ausdehnung sowie der Verschiebungen durch externe Lasten und Gaslasten können zu unterschiedlichen Betriebspunkten die Spalte zwischen den rotierenden und statischen Bauteilen berechnet werden. Diese Analyse ist ein wichtiges Ergebnis, um die Funktionalität des internen Luftsystems sowohl unter statischen als auch unter transienten Betriebsbedingungen zu gewährleisten.

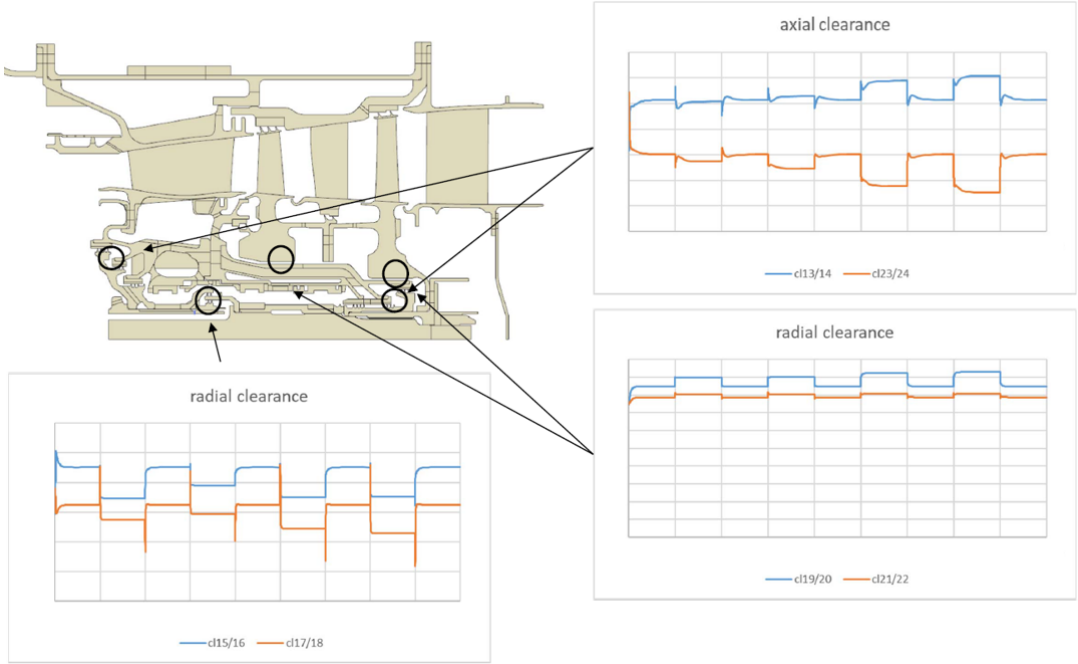

Abbildung 20: Ergebnisse der Spaltanalyse

Weiterhin wurde das 2D-Modell genutzt, um Flugzyklen von potenziellen Anwendungen zu untersuchen und miteinander zu vergleichen. Damit konnten wertvolle Ergebnisse des Schädigungsverlaufs und der Schädigungsakkumulation gewonnen werden. Je nach Anwendung streut die thermische sowie statische Belastung der Komponenten. Abbildung 21 zeigt den Temperaturvergleich von zwei unterschiedlichen Flugzyklen jeweils am Start.

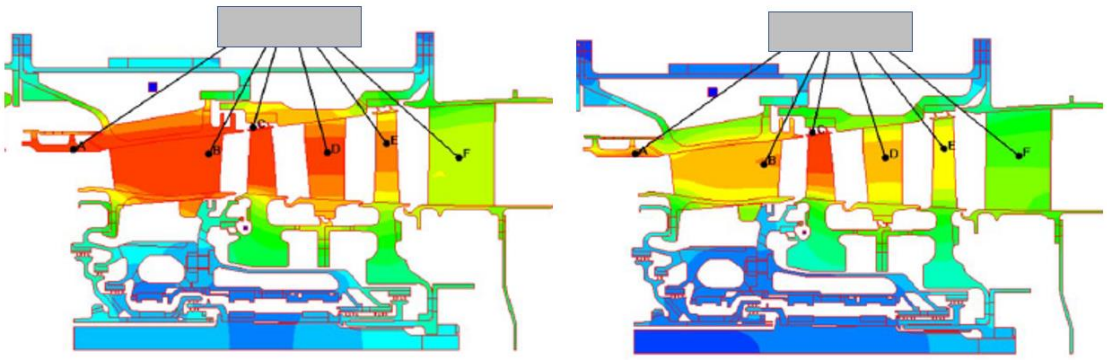

Abbildung 21: Temperaturverteilung in der Nutzturbine

Basierend auf den 2D-Analysen sind weitere 3D Analysen der NT-Rotoren durchgeführt worden. Ziel war es, die hochbelasteten Bereiche genauer zu untersuchen. Zudem ist aus Materialtests bekannt, dass die Materialeigenschaften der gegossenen Rotoren teils stark variieren. Außerdem wurde überprüft, welchen Einfluss Poren, die durch den Gussprozess entstehen, auf die Lebensdauer haben. In den Untersuchungen wurde ein Abschlagsfaktor auf die Materialeigenschaften sowie eine definierte Porengröße berücksichtigt. Abbildung 22 zeigt die Ergebnisse der 3D Festigkeitsanalyse. Die hochbelasteten Bereiche sind entsprechend durchnummeriert, wobei der Bereich 1 am NT1-Rotor am Übergang zwischen Schaufelblatt und Deckbandring am höchsten belastet ist. Für diese Analyse wurde ein Faktor von 3 in der Lebensdauer zwischen den nominalen Materialeigenschaften und den Materialeigenschaften mit Abschlag berechnet.

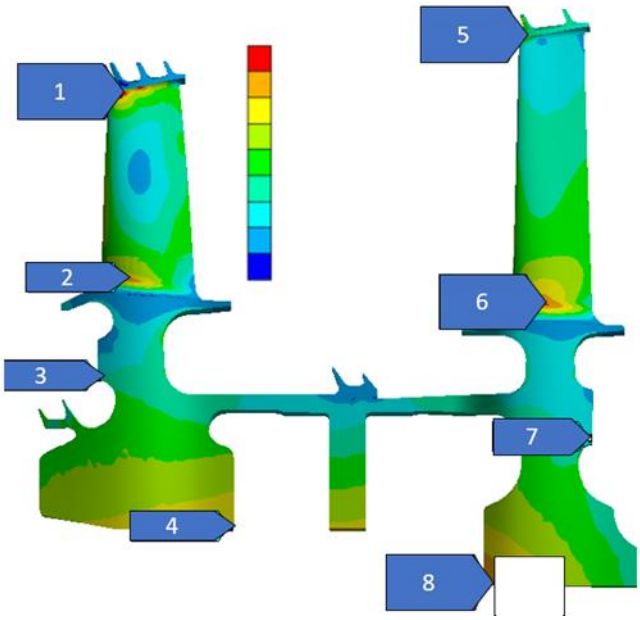

Abbildung 22: 3D–Festigkeitsanalyse der Nutzturbinenrotoren

Weiterhin wurde eine Rissfortschrittsanalyse durchgeführt, um den Einfluss von Poren aus dem Gießprozess in den hochbelasteten Bereichen zu prüfen. Die Analyse wurde unter der Annahme aufgesetzt, dass die Pore beim ersten Hochfahren einen Riss

initiiert. Das Ziel der Analyse ist die Berechnung der maximalen Anzahl von Zyklen bis zum Versagen des Rotors. Dazu wurde ein vereinfachtes Plattenmodel mit einer fiktiven Pore und den entsprechenden Belastungen aufgesetzt, siehe Abbildung 23. Die Ergebnisse der Analyse wurden verwendet, um die maximal zulässige Porengröße aus dem Fertigungsprozess zu definieren.

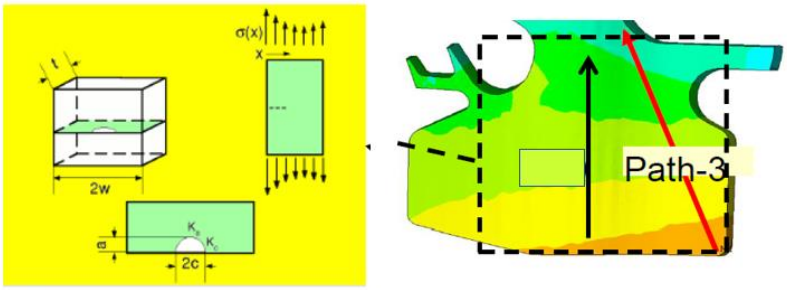

Abbildung 23: Rissfortschrittsanalyse

Um die vielfältigen funktionalen und geometrischen Anforderungen des Lagergehäuses zu erfüllen, wurde sich entschieden diese Komponente mittels 3D-Druck herzustellen. Aus dem Vorgängerprojekt (LuFo5/2 HittTurb, 20T1521) sind mehrere Fragestellungen identifiziert wurden, die für eine produktnahe Konstruktion gelöst werden müssen. Deshalb wurde in einem ersten Schritt der Fokus auf den Anforderungskatalog gelegt, um alle Anforderungen der Partner zu definieren und dokumentieren. Durch die Fertigungsmethode ist ein großer Konstruktionsfreiraum gegeben, mit dem detailliert auf die Anforderungen in den einzelnen Bereichen reagiert werden kann. Damit ist es möglich sowohl die Durchflussanforderungen für das Ölsystem als auch die Durchströmflächen für das Luftsystem und Materialverstärkungen in hochbelasteten Bereichen zu realisieren.

Parallel zu dem Anforderungskatalog wurden 2D- und 3D-Modelle erstellt, um die Diskussionen zu unterstützen. Abbildung 24 zeigt einen Ausschnitt aus der Komponentenentwicklung der Öl-Ventilationskanäle mit den Anforderungen an den Durchfluss in den einzelnen Bereichen sowie der Positionierung der Röhren zum Turbinengehäuse.

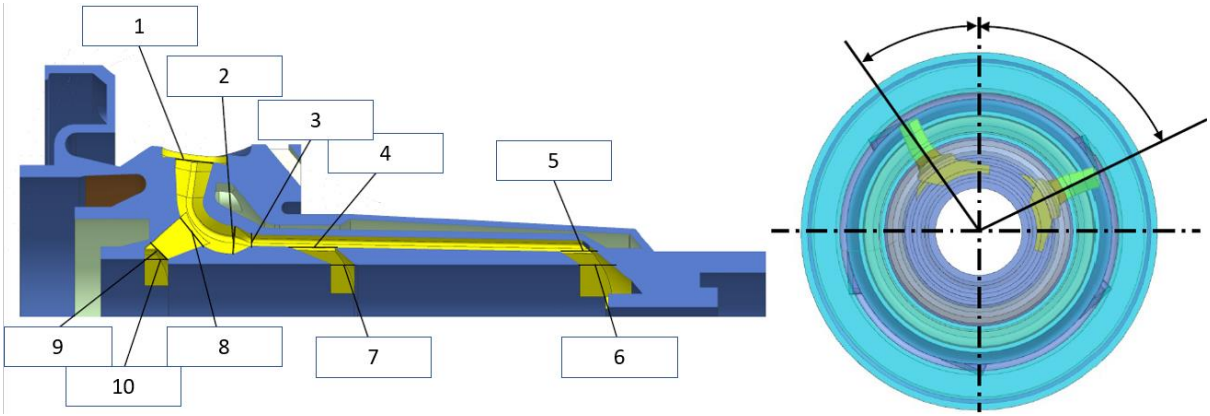

Abbildung 24: Öl-Ventilationskanäle im Lagergehäuse

In der Konstruktion des Lagergehäuses wurden auch fertigungstechnische Aspekte berücksichtigt, die ein schnelles Drucken des Bauteils ohne größere Stützstrukturen und maschinelle Nachbearbeitung ermöglichen. Abbildung 25 zeigt das 3D-CAD Modell, dass in einem nächsten Schritt für die Festigkeitssimulation und für Fertigungsversuche genutzt werden soll.

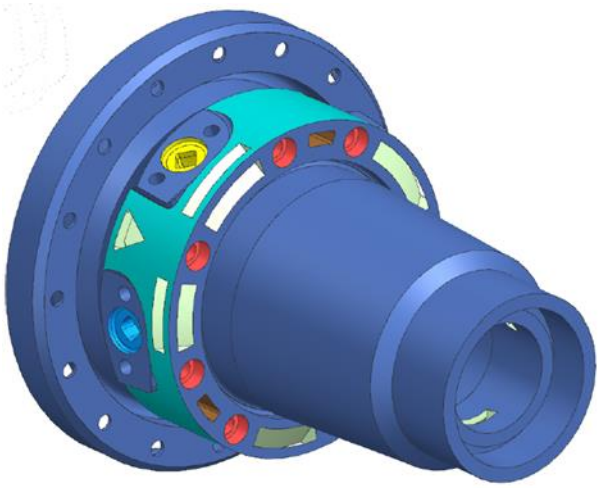

Abbildung 25: 3D-CAD Modell des Lagergehäuses

Der Fokus des Vorgängerprojekts LuFo5/2 HittTurb (20T1521) sowie des laufenden Projekts LuFo6/3 OptTuGen lag auf der Bereitstellung von Bauteilen, um eine funktionelle Validierung der Leistungsparametermodelle durchzuführen. Dafür war nur ein Minimum an Bauteillebensdauer nötig. Zur Wiederaufnahme der Konstruktionsarbeiten ist deshalb eine detaillierte Überprüfung der vorhandenen Konstruktionen inklusive der bekannten Schwachstellen erfolgt, um auch die mechanischen Anforderungen zu erreichen. Weitere Anforderungen wie Kosten und Gewicht müssen ebenfalls in der Weiterentwicklung berücksichtigt werden. Die vorhandene Konstruktion erfordert deshalb Änderungen im Bereich der Hochdruckturbine, sowie der Nutzturbinenrotoren und des Lagergehäuses. Weiterhin muß die Konstruktion verbessert werden, um Sicherheitsanforderungen und Lastübertragungen für den Fall eines Schaufelversagens oder eines Luftsystemfehlers zu gewährleisten.

Im Rahmen der Technologienentwicklung für den Turbogenerator wurden alle Komponenten der Turbine hinsichtlich des benötigten Entwicklungsaufwands überprüft. Sowohl die gegossenen HPT und FPT1 Statorringe als auch das additiv gefertigte Lagergehäuse gehören zu den Komponenten, die einer regelmäßigen und detaillierten Überprüfung unterzogen werden müssen. Damit soll sichergestellt werden, dass frühzeitig Risiken identifiziert werden, eine enge Abstimmung zwischen den involvierten Abteilungen erfolgt und die Firmenstrategie zur Entwicklung neuer Technologien abgestimmt ist. Außerdem wurden Planungsszenarien für das Projekt unterstützt, Änderungen ausgearbeitet und im Rahmen des LuFo Statusseminars am 17.10.2023 in Cottbus kommuniziert.

Um die Weiterentwicklung des integrierten Turbogeneratorsystems zu unterstützen, wurden für die neue kleine Gasturbine ein Vibrationstest an den Hochdruckturbinenschaufeln sowie ein Thermalfarbentest für den Heißgaspfad definiert. Für den Vibrationstest der Hochdruckturbinenschaufeln wurden Bewegungsaufnehmer auf den Schaufelblättern appliziert, um die Schwingungsantwort zu messen. Die Thermalfarben wurden entsprechend den zu erwartenden Metalltemperaturen inkl. Entwicklungsunsicherheit ausgewählt. Die Ergebnisse aus diesen beiden Tests werden genutzt, um die bestehenden Modelle zu validieren und für die weitere Lebensdaueroptimierung zu nutzen.

Am Stator der Hochdruckturbine wurde bereits mit Konstruktionsänderungen begonnen. Durch eine geplante Anpassung der Brennkammer muss die Konstruktion des Stators ebenfalls mit angepasst werden. Aus dem Vorgängerprojekt ist bekannt, dass aufgrund der integralen Konstruktion hohe thermische Gradienten innerhalb des Bauteils auftreten. Diese sind hervorgerufen durch die heißen Plattformringe innerhalb des Heißgaspfades und des kalten Rings an der Schnittstelle zum Rotor. Weiterhin ist die Ausdehnung der Plattformringe durch die Schnittstelle zur Brennkammer und der damit verbundenen Materialanhäufung beeinträchtigt, wodurch zusätzliche Spannungen im Schaufelblatt induziert werden. Abbildung 26 zeigt die Ergebnisse dieser ersten Analyse aus einer Festigkeitsanalyse. Weitere Iterationen sind notwendig, um die Spannungen innerhalb des Bauteils zu reduzieren.

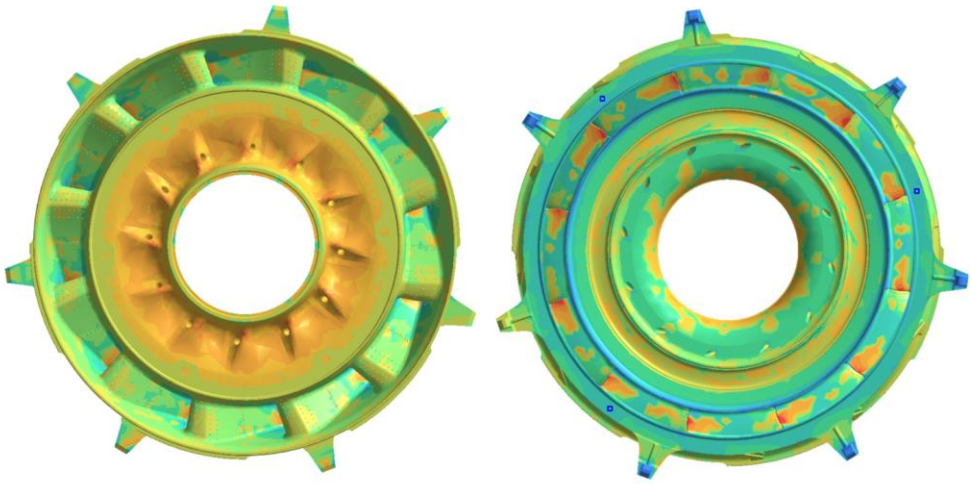

Abbildung 26: Festigkeitsuntersuchung am Hochdruckturbinenstator.

6.5 Testkampagne und -ergebnisse:

6.5.1 Testdurchführung

Elementarer Teil der Entwicklungsstrategie war es Subsystemtests der kleinen Gasturbine und des Generators vor der Integration in das Turbogeneratorsystem durchzuführen. Dadurch werden Entwicklungsrisiken reduziert und die gewonnen

Erkenntnisse tragen wesentlich zur Optimierung des Gesamtsystems bei. Test von zwei Kerntriebwerks-Prototypen auf niedrigem TRL-Niveau in einer simulierten Triebwerksumgebung wurden durchgeführt. Der Aufbau dieser Prototypen und die Testdurchführung wurden über das LuFo VI/Klima Projekt OptTuGen (20M2264A) gefördert. Die Auswertung der Testergebnisse für die geplante Integration in das Turbogeneratorsystem erfolgte in TurbTuGen (20L2104) für Turbinenmodul und Elemente zur Leistungsübertragung und SysTuGen (20L2107) für Performance, Öl-System, Luftsystem, Systemdynamik und weitere Aspekte Dafür werden der Testaufbau, die Rolle der beiden Prototypen und die Testkampagne beschrieben. Es folgen Details der Auswertung im Rahmen dieses LuFo Projektes, um die erfolgte Verwertung der Förderprojekte zu zeigen.

Um die Daten möglichst schnell und in einem angemessenen Detailgrad auf der nötigen Subsystemebene generieren zu können, wird der Kern der neuen kleinen Gasturbine in einer simulierten Triebwerksumgebung getestet. Der gesamte Laboraufbau wird in Abbildung 27 gezeigt. Dabei wird die neue kleine Gasturbine im Kern ohne Nebenaggregate aufgebaut. Kraftstoff-, Luft-, Regelungs- oder Öl-Systeme oder der Lufteinlass werden durch industrielle Laborsysteme simuliert. Dieser Aufbau ist nicht flugfähig und bedarf weiterer Entwicklungsarbeiten. Für eine flugfähige Anwendung müssen diese genannten Systeme zukünftig ausgereift, integriert und miniaturisiert werden.

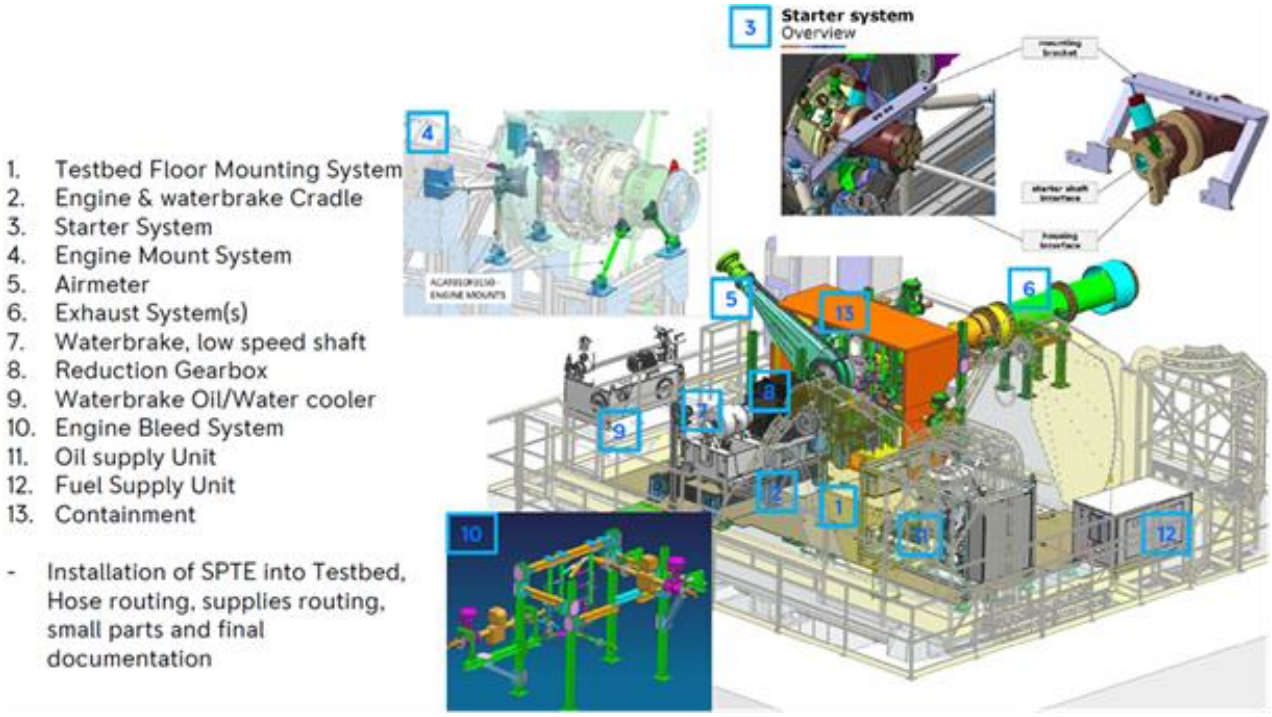

Abbildung 27: Prüfstands-Umgebung für die neue kleine Gasturbine

Ziel des ersten Prototypen war die Inbetriebnahme der Testanlage und der Testausrüstung durchzuführen, sowie die geplanten Testverfahren zu überprüfen. Daher wurde dieses erste Testvehikel mit einem Mindestmaß an Instrumentierung montiert (d.h. nur grundlegende Leistungsparameter und Triebwerkszustands- und sicherheitsrelevante Instrumentierung). Dies reduzierte einerseits das Risiko von Montageproblemen aufgrund umfangreicher oder komplexer Instrumentierung und ermöglichte andererseits die Entwicklung und Reifung der Zusammenbausequenz mit minimalen Störungen. Während der Montage des ersten Prototypen wurden alle Werkzeuge überprüft und, wo erforderlich, Änderungen vorgenommen.

Im Gegensatz zum ersten Aufbau, wurde der zweite Prototyp (siehe Abbildung 28) im hohen Maße mit Instrumentierung bestückt, um die Leistung und Funktionsfähigkeit der neuen kleinen Gasturbine zu verifizieren, sowie Testdaten zur Verifizierung von Systemmodellen zu generieren. Das vergleichsweise hohe Niveau der Instrumentierung in Verbindung mit den kleinen Abmaßen der Gasturbine führten zu einigen Problemen während dieses zweiten Aufbaus. Dennoch gelang es den üblicherweise auftretenden Verlust an Instrumentierung minimal zu halten (weniger als 1 % der Parameter gingen verloren). Darüber hinaus wurden während der Montage Messungen durchgeführt, um wichtige dimensionale Eigenschaften des Prototypen zu bestätigen, wie z.B. den Laufradspitzenabstand zum Gehäuse und den engsten Strömungsquerschnitt der ersten Leitschaufelreihe. Nach der Montage wurden die Gasturbinen zur Testvorbereitung an die Testanlage übergeben und im Anschluss erprobt.

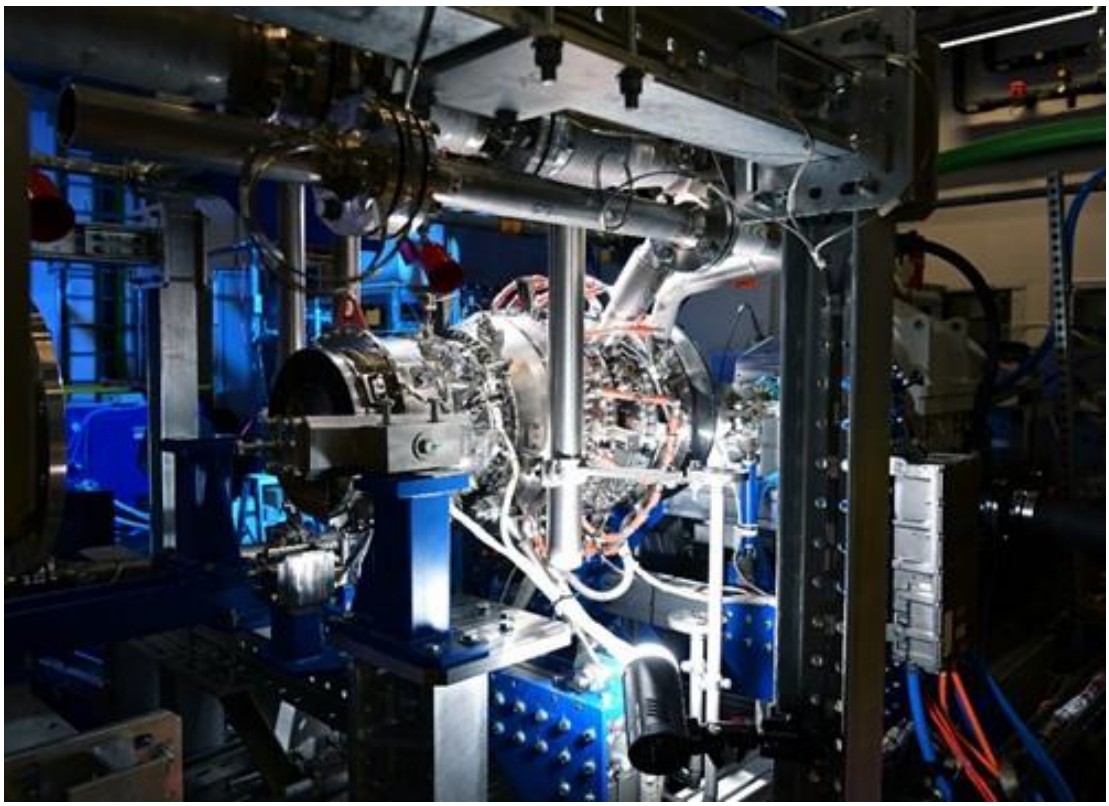

Abbildung 28: Gasturbine des TGS während der Inbetriebnahme

Aufgrund der Komplexität der integrierten Testsysteme war es erforderlich, vor der Durchführung der Erprobung einen Inbetriebnahmeplan zu entwickeln und auszuführen. Dieser Plan berücksichtigte alle Aktivitäten, die erforderlich sind, um die Funktion(en) der einzelnen und integrierten Systeme zu bestätigen, Betriebsanweisungen zu validieren und alle Nachweisanforderungen für die Zulassungen zu erfüllen (z.B. RR-Prozessanforderungen, ATEX-Konformität, EU-Maschinenrichtlinie usw.).

Mit Abschluss des zweiten Triebwerksbaus erfolgte unmittelbar, dessen Aufbau auf dem Prüfstand sowie der Anschluss der zugehörigen Instrumentierung. Ebenso wurden notwendige Änderungen an der Softwarekonfiguration (hard trims) vorgenommen, sowie Instrumentierungsprüfläufe und Systemprüfungen (z.B. statische Dichtigkeitstests) durchgeführt.

6.5.2 Übersicht zu den Ergebnissen der Turbinenvalidierung:

Mehrere verschiedene Tests und Experimente wurden durchgeführt, um die einzelnen Bauteile des Turbinenmoduls sowie das Turbinenmodul selbst zu validieren. Dazu wurden folgende Experimente auf dem zweiten Triebwerksaufbau durchgeführt:

- Ermittlung der Metalltemperaturen der Heißgasbauteile mit temperatursensitiven Farben

  Die Analyse der Ergebnisse an der HPT zeigen, dass die Metalltemperaturen signifikant höher sind als ursprünglich mit den Thermalmodellen vorhergesagt. Weitere Analysen sind notwendig, um die ermittelten Ergebnisse zu analysieren und mit den Modellen abzugleichen. Das Ziel sollte ist, die Testergebnisse in den Modellen und der Simulation abbilden zu können.

- Demonstration der Hochdruckturbinen- und Nutzturbineneffizienz

  Die Effizienz der Hochdruck- und Nutzturbinen konnte während des Tests demonstriert werden. Weitere Untersuchungen sind auch hier nötig, um das Gesamtbild und die Details zu verstehen.

- Demonstration der Bauteilintegrität für den Hochlastbereich

  Das Triebwerk wurde insgesamt zu 154 Zyklen bei einer Drehzahl der Hochdruckwelle zwischen 60% und 96% getestet. Die Testzeit betrug über 20 Stunden. Risse an den Nutzturbinenrotoren konnten nach der Auswertung des Tests erfolgreich mit den Modellen abgebildet werden.

Die Hochlasttests konnten erst durchgeführt werden, nachdem die kritischen Eigenfrequenzen der Nutzturbine einschließlich der entsprechenden Eigenfrequenzen des Wasserbremssystems gewuchtet wurden. Der Auswuchtvorgang der Nutzturbinenwelle einschließlich der Einrichtung der Anlage für Hochlasttests dauerte mehrere Wochen, in denen Läufe im niedrigen und mittleren Lastbereich durchgeführt

wurden. In der Regel werden Thermalfarbenexperimente zu Beginn eines Tests mit einem neuen Triebwerk an einem ausgereiften System durchgeführt, um qualitativ hochwertige Ergebnisse zu gewährleisten, die für die Zertifizierung erforderlich sind und um die Lebensdaueranalyse der Komponenten zu unterstützen. Für dieses Projekt wurde beschlossen, alle Experimente an einem Triebwerk durchzuführen, mit dem Ziel am Anfang des Tests das Thermalfarbenexperiment durchzuführen. Diese Entscheidung wurde unter Berücksichtigung des engen Zeitplans, des begrenzten Budgets und mit dem Bewusstsein getroffen, dass die aufgezeichneten Daten nicht für ein Zertifizierungsdesign verwendet werden. Ziel war es vielmehr, schnelle Erkenntnisse zu gewinnen, die für die Gestaltung der nächsten Phase mit validierten Modellen genutzt werden sollten. Der zeitaufwändige Auswuchtvorgang zu Beginn der Testkampagne führte dazu, dass die Thermalfarben auf den Heißgaskomponenten an einigen Stellen erodiert waren, was eine vollständige Analyse der Metalltemperaturen nicht zuließ.

6.5.3 Auswertung und Analyse der Thermalfarbentestergebnisse:

Die Auswertung der Thermalfarbenergebnisse und der Vergleich mit den Thermalmodellen zeigte am HPT NGV signifikante Unterschiede.. In dem Vergleich wurde deutlich, dass es hauptsächlich einen Unterschied in den Temperaturen am Schaufelblatt gibt. Zudem ist eine Umfangsvariation in den Thermalfarben zu erkennen. Abbildung 29 zeigt den Vergleich der Simulation (links) mit einem Sektor aus dem Thermalfarbentest (rechts).

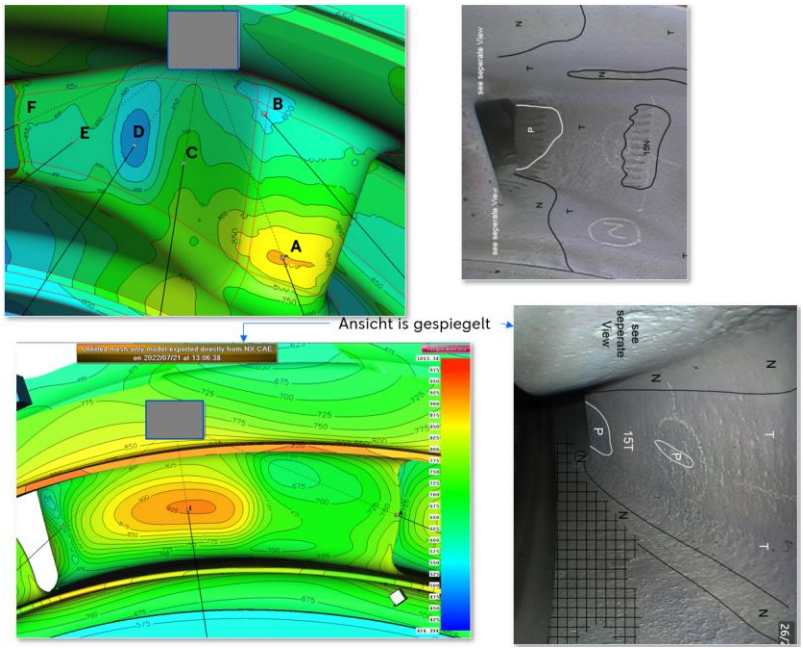

Abbildung 29: Vergleich der Thermalfarbensimulation mit den Testdaten

Die Unterschiede in den Temperaturen können entweder durch die Temperaturtraverse oder unzureichende Kühlung hervorgerufen werden. Deshalb wurde im Nachgang die Brennkammer-CFD überprüft und mit dem besten Verständnis aktualisiert. Dabei wurde

die Tröpfchenmodellierung angepasst und die erreichten Testbedingungen in der Simulation abgebildet. Außerdem wurde eine Variation in der Drehzahl für den Hochlastbereich berücksichtigt, um die Sensitivität der Temperaturtraverse zu verstehen. Ein Vergleich der Sektortemperaturen am Übergang zwischen Brennkammer und Turbine zeigt Abbildung 30. Die dargestellten Temperaturen bilden den Hochleistungslastbereich mit einem Unterschied in der Drehzahl von 3% ab. Auf den Abbildungen ist zu erkennen, dass die Temperaturspitzen mit der Drehzahl variieren. Während auf der linken Abbildung die höchsten Temperaturen überwiegend an den Randbereichen auftreten, befindet sich die höchste Temperatur auf der rechten Abbildung in der Mitte des Sektors. Die Unterschiede in der Temperaturtraverse bei dieser kleinen Variation der NH-Drehzahl im Hochlastberiech zeigen, dass die Temperaturverteilung sehr empfindlich ist. Deshalb sollten für die nächste Iteration weitere Analysen und Tests des Kraftstoffsprühkegels und der Verdampfung in der Primärzone durchgeführt werden, um die Wechselwirkung zwischen Kraftstoffströmung, Sprühwinkel und Tröpfchengröße zu analysieren und Korrelationen abzuleiten, die für die CFD genutzt werden können. Außerdem ist ein weiterer Thermalfarbentest mit angeschlossener HPT NGV Stufe sowie eine Temperaturmessung an der Verbrennungsaustrittsebene nötig, um die Metalltemperaturen und Temperaturtraverse für verschiedene Lastfälle zu ermitteln.

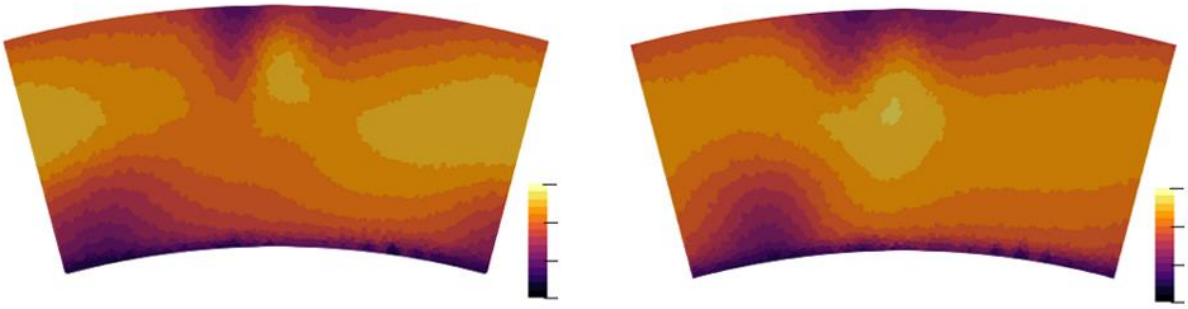

Abbildung 30: Vergleich der Temperaturtraverse für unterschiedliche Drehzahlen im Hochlastbereich

6.5.4 Aerothermal Analyse der Testergebnisse

Im Rahmen des Messprogramms wurden Betriebspunkte bis knapp unter die Auslegungsdrehzahlen für Hoch- und Niederdruckwelle gefahren. Die im Anschluss durchgeführte Wirkungsgradberechnung anhand der Messergebnisse berücksichtigt alle Einflussfaktoren auf der experimentellen Seite, wie z.B. die Korrektur fehlerhafter Messwerte, die Balance der Triebwerkskomponenten, die nicht eindeutig durch die Instrumentierung charakterisiert werden können, interne Verlustquellen sowie betriebspunktabhängige Korrekturen der Messdaten.

Die Ergebnisse der Leistungsrechnung sind u.a. die Wirkungsgrade der Verdichter- und Turbinenkomponenten aber auch charakteristische Größen wie die HDT-Kapazität und deren Eintrittstemperatur. Diese Ergebnisse wurden mit der Wirkungsgradvorhersage

verglichen. Letztere fußt auf dem Wirkungsgrad einer Turbine eines bekannten Produkts und fügt schrittweise die aus den Unterschieden zu der in diesem Projekt untersuchten Turbine herrührenden Abweichungen hinzu.

Für die HDT wurde vor Beginn des Tests ein Wirkungsgrad vorhergesagt, welcher jedoch insbesondere aufgrund eines im Test anders ausgeprägten Schaufelspitzenspalts deutlich nach unten korrigiert werden musste. Außerdem wurden die tatsächlich gemessenen Rauheiten der Bauteile sowie der störende Einfluss der auf einigen Schaufeln aufgebrachten Dehnmessstreifen einbezogen. Der Ausgangswert der Wirkungsgradvorhersage basierte außerdem auf den Soll-Schaufelkonturen. Die Auswertung von optischen Messungen (GOM) der HDT Beschaufelung und die Bewertung mittels numerischer Strömungssimulation reduziert den erwarteten Wirkungsgrad zusätzlich. Dass der zur Wirkungsgradvorhersage ausgewählte Betriebspunkt deutlich vom Auslegungspunkt abweicht, wurde ebenfalls korrigiert.

Diese Schritte sind in Abbildung 31 dargestellt. Der vorhergesagte Wirkungsgrad liegt somit nur knapp oberhalb des Messwerts und absolut gesehen innerhalb der Vorhersagegenauigkeit. Die Ergebnisse der Strömungssimulation basierend auf den GOM-Messungen wurden ebenfalls dazu genutzt, die HDT-Kapazität um ca. 1% gegenüber der Erwartung zu korrigieren.

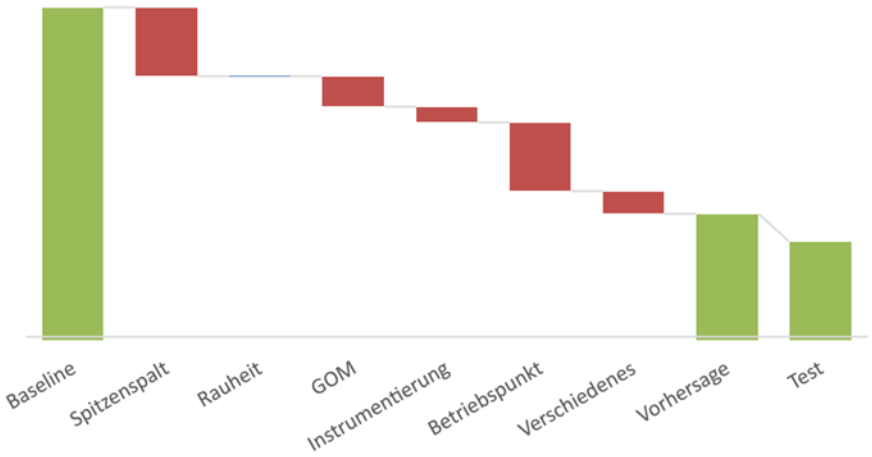

Abbildung 31: HDT-Wirkungsgradvorhersage und Vergleich mit Messung

Das Vorgehen wurde auch auf die Niederdruckturbine angewandt, wobei bei dieser die Abweichungen vom Nominal hinsichtlich Schaufelspitzenspalt und Fertigungsabweichungen geringer ausfallen als bei der HDT. Auch hier ergibt sich eine gute Übereinstimmung zwischen vorhergesagtem und gemessenem Wirkungsgrad.

6.5.5 Fehleranalyse des FPT-Rotors

Während der Inspektion der Bauteile nach dem Test wurden am FPT1 Rotor in der Mitte des Schaufelblatts Risse entdeckt. Um die Fehleranalyse zu unterstützen, wurden Festigkeitsberechnungen mit den Testrandbedingungen durchgeführt. Dabei wurde

deutlich, dass es aufgrund der hohen Temperaturen, die im Test erreicht wurden, im Schaufelblatt zu Kriechen und Plastifizierung des Werkstoffs kam (siehe Abbildung 32). Die Analyse konnte bestätigen, dass schon eine geringe Dauer bei den hohen Temperaturen sowie wenige Zyklen ausgereicht haben, um einen Riss im Schaufelblatt zu erzeugen. Dies ist ebenfalls ein hervorragendes Ergebnis, was die Abbildung der Realität in der Simulation für dieses Bauteil bestätigt und eine sehr gute Voraussetzung für eine nächste Phase des Projekts ist.

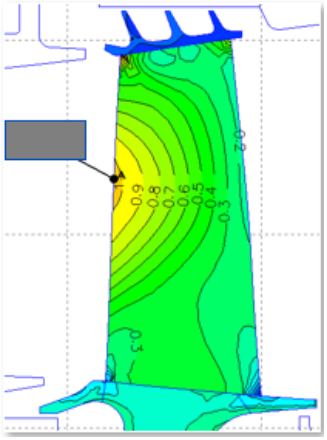

Abbildung 32: Zweidimensionale Spannungsergebnisse am FPT-Rotor für den getesteten Hochlastbereich

6.5.6 Transmissions

Daten aus dem Lauf der beiden Triebwerke bzgl. Temperaturen werden ausgewertet und sollen für eine verbesserte Lagerschmierung für die Entwicklung der Phase 2 herangezogen werden. Die im Rahmen von SysTuGen ausgewerteten Testergebnisse des Öl-Systems haben Auswirkungen auf die Auslegung der Teile für die Öl-Zufuhr und der Dichtungen im Rahmen von TurbTuGen.

7 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Rolls-Royce hat im März 2024 das Testprogramm der neuen kleinen Gasturbine durch Erreichen der geplanten Ziele abgeschlossen. Dies markierte das erfolgreiche Ende der Phase 1 in der Entwicklung der neuen kleinen Gasturbine für das Turbogeneratorsystem (TGS).

Beim Aufbau der Prototypen kamen 3D-Druckverfahren für neue Teile zur Anwendung. So wurden beispielsweise die Brennkammer und die hintere Lagerkammer gedruckt. Die Flexibilität der 3D-Druckberfahren war für den Prototypenbau das wichtigste Kriterium. Dabei wurden viele praktische Erfahrungswerte gesammelt. Perspektivisch sollen die 3D-Druckberfahren in weiteren Bereichen der Business Aviation Projekte stärker eingesetzt werden.

Zukünftige Triebwerke werden kompaktere Kerntriebwerke mit schneller drehenden und kleineren Turbinenschaufeln aufweisen. Die Auslegung, die Fertigung und der Test der kleinen Gasturbine mit vergleichbar großen Turbinenschaufeln liefert hierfür wertvolle Erfahrungswerte und Validierungsdaten.

8 Referenzen

n/a

9 Anlagen / Veröffentlichungen

n/a