

Luftfahrtforschung und -technologie

Abschlussbericht

Innovatives Blisk-Design für Hochdruckverdichter der nächsten Generation (BliDes HDV)

Förderkennzeichen 20T0601A

Laufzeit: 01.01.2007 bis 30.04.2011

Berichtersteller: Frank von Czerniewicz



MTU Aero Engines GmbH

München, Oktober 2011

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
2	Zusammenfassung	6
2.1	Projektstrukturplan.....	6
2.2	Erreichte Ergebnisse	7
2.2.1	AP1 Rohmaterial minimierte und eigenschaftsoptimierte Rohteile	7
2.2.2	AP2 Hochtemperatur-Blisk.....	9
2.2.3	AP3 Innovative Belüftungskonzepte	12
2.2.4	AP4 Strömungsphänomene beim Pumpen und Flattern	13
3	Technische Darstellung der Arbeitspakete	17
3.1	AP1 Rohmaterial minimierte und eigenschaftsoptimierte Rohteile.....	17
3.1.1	AP1.1 Rohmaterialminimierte Schmiedeteile.....	17
3.1.2	AP1.2 Eigenschaftsoptimierte Schmiedeteile Vorkonturiertes Schmiederohnteil	19
3.1.3	AP1.3 DA718	24
3.2	AP2 Hochtemperatur-Blisk	27
3.2.1	AP2.1 TMF Blisk	27
3.2.2	AP2.2 Mistuning Blisk	33
3.2.3	AP2.3 Hochtemperatur Erosionsschutz	38
3.3	AP3 Innovative Belüftungskonzepte	41
3.4	AP4 Strömungsphänomene beim Pumpen und Flattern	44
3.4.1	AP4.1 Rückströmphase beim Pumpen	44

3.4.2 AP4.2 Flatterfreie Auslegung	48
3.4.3 AP4.3 Tandemstator	54
3.4.4 AP4.4 CT-Ausgelegte Frontstufe	56
4 Literaturverzeichnis	61

1 Einleitung

Die Bliskbauweise in Verdichterrotoren bietet gegenüber den herkömmlichen Bauweisen Gewichts- und Wirkungsgradvorteile. Es ist aber momentan noch nicht möglich, diese Potenziale umfassend auszunutzen. So ist die Einsatztemperatur von Blisken noch auf 500°C begrenzt. Die hinteren Stufen eines Hochdruckverdichters müssen aber deutlich höhere Temperaturen ertragen. Es gibt noch keinen Hochtemperaturerosionsschutz für Verdichter-Blisken. Ferner birgt die neue Bauweise ein erhöhtes Belastungsrisiko. Schwingungsresonanzen und Temperaturspannungen sind weitestgehend unbekannt und können mit heutigen Berechnungsprogrammen nur unzureichend simuliert werden.

Ziel des Verbundvorhabens ist es erstmals zu ermöglichen, umfassend die Strömungs-, Spannungs- und Temperaturphänomene einer Blisk im realen Betrieb genauer zu simulieren. Schon bei der Auslegung von Blisken sollen die Risiken hinsichtlich Pumpen und Flattern minimiert werden. Die Einsatzgrenze soll auf 650°C erweitert werden. Es wird erstmalig möglich sein, auch hintere Stufen in Hochdruckverdichtern in Bliskbauweise auszuführen. Ferner sollen Herstellrouten für rohmateriale minimierte und eigenschaftsoptimierte Schmiederohrteile für Verdichter-Blisken entwickelt werden. Vorgehaltene Sicherheiten können so künftig reduziert werden und das Gewichtspotenzial moderner Blisken kann voll ausgeschöpft werden.

In AP1 wird eine genaue Simulation des Schmiedevorgangs von Titan-Rohrteilen erarbeitet. Für höhere Temperaturen wird der Werkstoff DA718 eingeführt.

In AP2 (Hochtemperatur-Blisk) sollen TMF-Spannungsspitzen berücksichtigt werden, die aufgrund von unterschiedlichen Wärmedehnungen an Schaufeln und Scheibenkörper einer Blisk entstehen. Mistuning Blisk (Frequenzabstimmung benachbarter Bliskschaufeln) trägt den Resonanzverschiebungen infolge von Fertigungsabweichungen der Bliskschaufeln Rechnung. Durch Entwicklung einer Hochtemperatur-Erosions-Schutzschicht soll die Lebensdauer von Blisk-Schaufeln in erosiver Umgebung bei Temperaturen bis 650°C verdoppelt werden.

In AP3 (Innovative Belüftungskonzepte) soll durch eine gleichmäßigere Temperaturverteilung an den Rotoren von Hochdruckverdichtern die Spalthaltung verbessert werden, bei gleichzeitiger Erhöhung der Lebensdauer und Reduzierung

des Gewichts. Ein entsprechendes Konzept soll entwickelt und anschließend validiert werden.

In AP4 (Strömungsphänomene beim Pumpen und Flattern) sollen die komplexen Strömungsphänomene während der Rückströmphase des Verdichterpumpens experimentell und numerisch untersucht und berechenbar gemacht werden. Darüber hinaus sollen Verfahren zur zuverlässigen Bestimmung der aerodynamischen Dämpfung auch für Off-Design-Betriebspunkte entwickelt werden, die zur Ermittlung der Flatterstabilität und zur Berechnung von Resonanzamplituden notwendig sind.

In der Auslegung der vorderen Verdichterstufe in Tandembauweise wird ein Potenzial zur Kosten-, Gewichts- und Baulängenreduzierung von Hochdruckverdichtern gesehen. Dazu wird in AP4 der Tandemstator betrachtet, der die Auslegung eines Tandemrotors zu einer vollständigen Tandem-Verdichterstufe sinnvoll ergänzt.

Außerdem wird in AP4 eine hoch ausgelastete Frontstufe eines Hochdruckverdichters unter Berücksichtigung eines modernen Casing Treatments (CT) der 3. Generation ausgelegt und entsprechend getestet.

Planung, Durchführung und Controlling der Technologieaufgaben werden in den einzelnen Arbeitspaketen von folgenden Projektleitern durchgeführt:

Hr. Dr. Heutling	AP1.1: Rohmaterialminimierte Schmiedeteile AP1.2: Eigenschaftsoptimierte Schmiedeteile
Fr. Dr. Stoll (i.V. Dr. Roder)	AP1.3: DA718
Hr. Dr. Wilms	AP2.1: TMF Blisk
Hr. Dr. Schönenborn	AP2.2: Mistuning Blisk
Hr. Dr. Uihlein	AP2.3: Hochtemperatur Erosionsschutz
Hr. Dr. Heller	AP3 : Innovative Belüftungskonzepte
Hr. Dr. Schönenborn	AP4.1: Rückströmphase beim Pumpen
Hr. Dr. Grüber	AP4.2: Flatterfreie Auslegung
Hr. Dr. Baier	AP4.3: Tandemstator
Hr. Dr. Sturm	AP4.4: Hochbelastete, CT-ausgelegte Frontstufe

2 Zusammenfassung

2.1 Projektstrukturplan

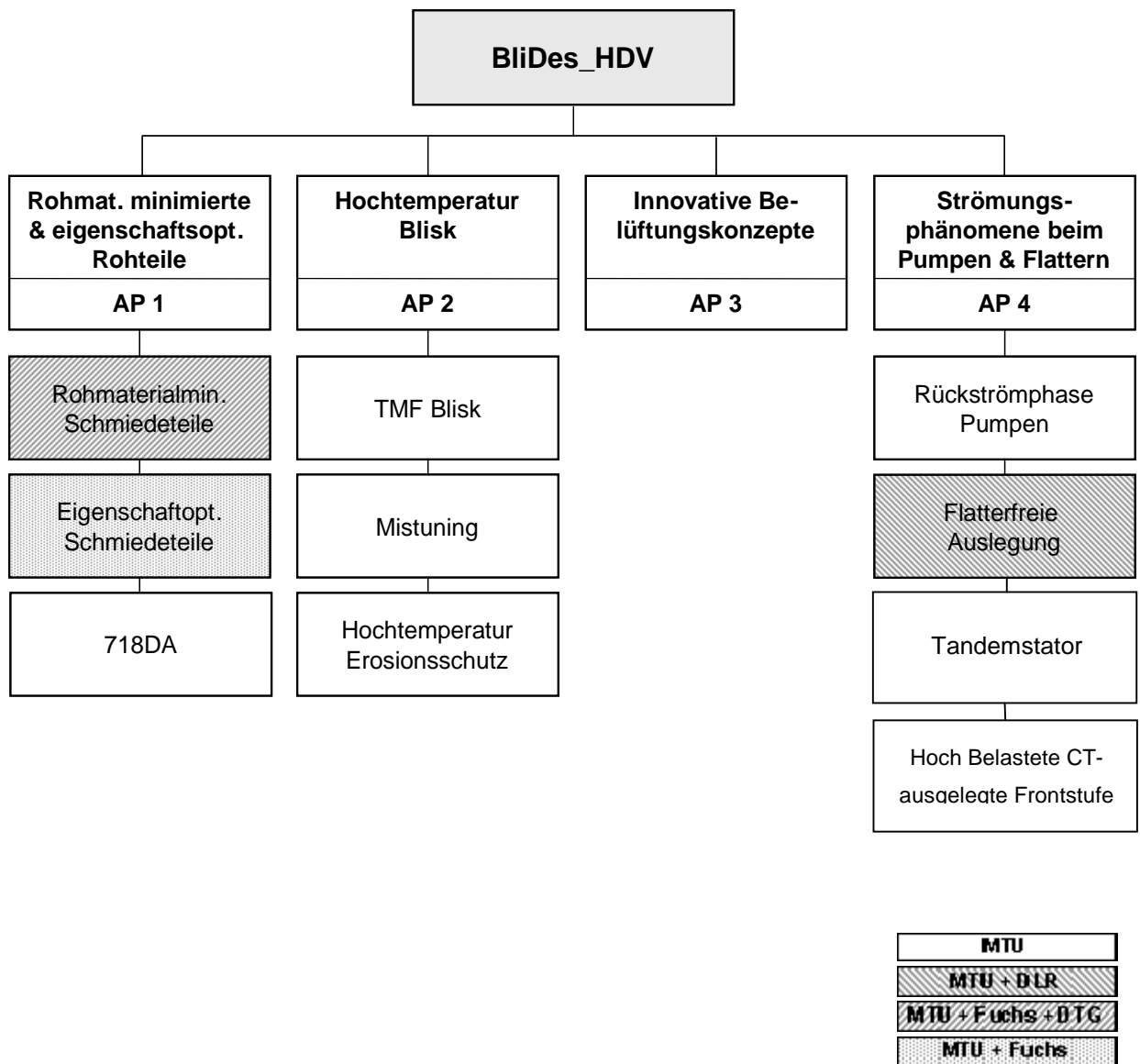


Abbildung 1: Projektstrukturplan

2.2 Erreichte Ergebnisse

2.2.1 AP1 Rohmaterial minimierte und eigenschaftsoptimierte Rohteile

2.2.1.1 AP1.1 Rohmaterialminimierte Schmiedeteile

Erreichte Ergebnisse

Für Billettdurchmesser von ca. 200-300 mm ist eine feinkörnige und homogene Mikrostruktur des Ti-Billets eine Voraussetzung für verbesserte Werkstoffeigenschaften. Darüber hinaus sind Textureffekte zu minimieren um eine gute US-Prüfbarkeit zu erreichen. Diese optimierte Mikrostruktur/Textur ist auch die Voraussetzung für eine Ultraschallprüfbarkeit am Billet mit erhöhter Empfindlichkeit (#2 FBH; entspricht einer Flachbodenbohrung mit einem \varnothing von 0,8 mm). An der im Projekt von ThyssenKrupp hergestellten Low Noise – Versuchscharge konnte gegenüber konventionellem Billetmaterial eine deutlich verbesserte Ultraschallprüfbarkeit nachgewiesen werden. Das Ziel einer Ultraschallprüfung für das gesamte Prüfvolumen mit einer Fehler-nachweisgrenze von #2 FBH konnte sicher erreicht werden. Dabei wurde auch eine kostenoptimierte Konvertierungsrouten entwickelt. Die Materialuntersuchungen (Gefügecharakterisierung; Ultraschallprüfbarkeit) zeigen, dass die technischen Ziele mit der kostenoptimierten Konvertierungsrouten für die betrachtete Titanlegierung Ti64 erreicht werden.

2.2.1.2 AP1.2 Eigenschaftsoptimierte Schmiedeteile

Erreichte Ergebnisse

Ziel im Arbeitspaket „Eigenschaftsoptimierte Schmiedeteile“ war, die Voraussetzungen zur Realisierung von vorkonturierten Titan-Blisk-Bauteilen zu erarbeiten. Eine Umsetzung der schon alten Idee der Vorkonturierung von Blisk-Bauteilen scheiterte in der Vergangenheit nicht nur an dem fehlenden QS-System (US-Prüfbarkeit), sondern auch am fehlenden Verständnis über den Auf- und Abbau von Eigenspannungen im Fertigungsprozess. Die Vorhersage von Eigenspannungen in vorkonturierten Blisk-Schmiederohtteilen ist von entscheidender Bedeutung für die Ausarbeitung

einer Frässtrategie, die sich durch geringe Verzüge im Schaufelblattbereich auszeichnet. Durch Anwendung der Low°Noise-Qualität für Ti64 kann das heute für rotierende Bauteile gültige Qualitätssicherungskonzept angepasst werden. Die bessere Ultraschallprüfbarkeit des Schmiedeeinsatzmaterials ermöglicht, die Qualitätsprüfungen vom Schmiederohteil auf das Schmiedeeinsatzmaterial (Billet) zu verlagern. Dadurch können endkonturnahe Schmiederohteilgeometrien umgesetzt werden. Ein großes Einsparpotential der Low°Noise-Qualität für Schmiedeeinsatzmaterial (Billet) liegt somit in der Reduzierung des Schmiedeeinsatzgewichtes.

Eine weitere Aufgabe in AP1.2 war die Entwicklung einer Gefügesimulation für die Titanlegierung Ti6246. Das von der RWTH-Aachen in Zusammenarbeit mit Otto-Fuchs ausgearbeitete Simulationstool lieferte Ergebnisse, die der Mikrostruktur in einem realen Ti6246-Schmiederohteil gegenübergestellt wurden. Die durch das Kornformmodell der RWTH Aachen vorhergesagten Gefüge korrelierten sehr gut mit der Gefügeausbildung in den Ti6246-Schmiederohteilen. Das Kornformmodell erhält seine Inputdaten vor allem aus der Schmiedesimulation und zeigt die neuen Möglichkeiten einer prozessübergreifenden Simulation auf. Das entwickelte Kornformmodell ist heute ein nützliches Werkzeug bei der Vorhersage der Kornform und Größe im Schmiederohteil und bildet künftig die Basis für weiterführende Simulationen, die eine lokale Eigenschaftsvorhersage im Schmiederohteil zum Ziel haben.

2.2.1.3 AP1.3 DA718

Erreichte Ergebnisse

Die Nickel-Basis Superlegierung INCONEL® 718, Kurzform IN718, wird im Zustand „lösungsgeglüht und ausgehärtet“ in den meisten MTU Hochdruckverdichtern und Niederdruckturbinen eingesetzt. Für rotierende Anwendungen, wie Scheiben und Blisken wird IN718 für Anwendungstemperaturen bis 600°C (max. Dauertemperatur am „life rim“) verwendet.

Neben dieser IN718 Version gibt es eine IN718 „Direct Aged“ (kurz DA718) Version mit identischer chemischer Zusammensetzung welche von Wyman & Gordon gemeinsam mit General Electric entwickelt wurde.

Der Direct Aged Prozess verbindet den Schmiede und Auslagerungsprozess und verspricht höhere Festigkeit und höhere LCF-Lebensdauer bei gleichbleibender Kriechbeständigkeit. Dies führt in erster Abschätzung zu ca. 6% Gewichtsersparnis für eine LCF-limitierte Scheibe und zu ca. 8% Gewichtsersparnis bei einer Berst-limitierten Scheibe bei konstanten Kosten.

In Arbeitspaket 1.3 wurde der Werkstoff DA718 für rotierende Anwendungen qualifiziert. Für dünne Scheiben konnte der Nachweis erbracht werden, dass Rotorscheiben aus DA718 deutlich leichter sind als solche aus IN718. Das Werkstoffprogramm wurde so erfolgreich umgesetzt, dass der Werkstoff im neuen GTF-Triebwerk PW1000G eingesetzt wird.

2.2.2 AP2 Hochtemperatur-Blisk

2.2.2.1 AP2.1 TMF Blisk

Erreichte Ergebnisse

Ziel des Arbeitspakets war, die Bewertbarkeit von TMF (Thermomechanische Ermüdung) einer Hochdruckverdichter-Blisk herzustellen. Dies erfolgte mit der Entwicklung und Bereitstellung eines gekoppelten 3D-Thermal- und TMF-Analyseprozesses. Für die Validierung der 3D-Thermalanalyse, deren Genauigkeit maßgeblich die Vorhersagegenauigkeit der TMF-Lebensdaueranalyse beeinflusst, kamen wie geplant zwei Versuchsstände zum Einsatz.

Zunächst wurde ein statisches Rig zur Untersuchung einer verdichtertypischen Einzelschaufel in einem Rechteck-Kanal unter transienten Bedingungen aufgebaut. Diese sind sich schnell ändernde Gastemperatur-Randbedingungen, die vergleichbar mit zeitlichen Temperaturverläufen bei einer Triebwerks-Beschleunigung oder – Verzögerung sind. Das statische Rig erlaubte eine umfangreiche Instrumentierung, so dass eine genaue Kenntnis der Randbedingungen vorlag und eine große Menge an Messdaten gewonnen werden konnte, u.a. die Oberflächentemperatur-Verteilung mittels einer Infrarot-Kamera. Es zeigte sich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Messdaten und dem Ergebnis der 3D-Thermalanalyse.

Eine weitere Versuchskampagne fand mit einem Hochdruckverdichter-Rig statt, bei dem eine Blisk in eine hintere Stufe eingebaut und mit Thermoelementen instrumentiert wurde. Der Vergleich der Messdaten von Versuchen unter transienten Bedingungen mit Ergebnissen der 3D-Thermalanalyse ergab auch bei diesem Rig eine sehr gute Übereinstimmung. Dabei wurden zwei Methoden zur Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten auf den heißgasseitigen Oberflächen miteinander verglichen: Ein Grenzschichtverfahren zur Berechnung von Wärmeübergangskoeffizienten auf Stromlinien, das bisher standardmäßig bei Turbinen eingesetzt wird, und ein im Rahmen dieses Technologie-Projektes neu entwickeltes Verfahren, bei dem Verteilungen des Wärmeübergangskoeffizienten mittels CFD berechnet werden. Es zeigte sich, dass das neue Verfahren genauer ist und die im Projektlastenheft spezifizierte Forderung hinsichtlich der Genauigkeit einer 3D-Thermalanalyse erfüllt. Damit werden die Ziele für eine verbesserte und genauere 3D-Thermal- und auch TMF-Analyse erreicht.

2.2.2.2 AP2.2 Mistuning Blisk

Erreichte Ergebnisse

Im Unterarbeitspaket Analytik wurde die Software TURBO-Reduce für Mistuning-Untersuchungen in die Entwicklungsumgebung der MTU integriert. Die Schnittstelle zur Aerokopplung wurde getestet. Es ist nun möglich, aus dem CFD-code Lin3D (linearisierter Eulercode für Aeroelastik) die entsprechenden Kopplungsmatrizen für aerodynamische Dämpfung und Steifigkeit einzubinden. Damit wurden umfangreiche Studien zum Einfluss der Aerokopplung und des gezielten Mistunings bei Resonanzen und beim Flattern durchgeführt.

Im Unterarbeitspaket Reverse Engineering wurden auf der Basis einer optischen Vermessung einer kompletten Blisk eine Methodik erarbeitet, mit der gezielt einzelnen Schaufeln aus der Punktwolke der optischen Messung herausgeschnitten werden können. Diese einzelnen Schaufeln werden dann in mehreren Schritten aufbereitet, um schließlich eine Vernetzung für ein FEM-Programm zu erzeugen. Damit kann für jede Schaufel einer Blisk die Frequenzverteilung rechnerisch ermittelt werden.

Im Unterarbeitspaket Prüfstand wurde zunächst ein Konzept für einen Prüfstand entwickelt, der mit Hilfe einer rotierenden Anregung Resonanzdurchfahrten simulieren kann, die einer Anregung im Triebwerk entspricht. Dieses Konzept wurde dann umgesetzt und der Prüfstand mit verschiedenen Blisken erfolgreich getestet. Die Ziele des AP Mistuning Blisk wurden in vollem Umfang erreicht.

2.2.2.3 AP2.3 Hochtemperatur Erosionsschutz

Erreichte Ergebnisse

Durch Veränderung der chemischen Zusammensetzung der Multilayer und der Zahl der Schichtlagen konnten sowohl die Diffusionsstabilität als auch die Oxidationsbeständigkeit und der Erosionswiderstand signifikant erhöht werden. Auch der Einfluss von Verfahrensparametern wie Art der Bauteilbewegung konnte zur weiteren Verbesserung der Schichteigenschaften genutzt werden. Die mechanischen Eigenschaften der Erosionsschutzschichten wurden zur Absicherung in einem späteren Triebwerkseinsatz umfangreich untersucht.

Unterarbeitspaket Streufähigkeit:

Die Streufähigkeit des Verfahrens konnte für die gesamte Palette großer und kleiner Blisks sowie Tandemblisks untersucht werden. Die Abhängigkeitsverhältnisse von Abstand zu Beschichtungsquelle und anderen geometrischen Faktoren wurden ermittelt. Die Auswertung der Beschichtungen zeigte, dass bei entsprechender Anpassung der Substratträger eine gleichmäßige Schichtdickenverteilung erreichbar ist. Auch Abdeckvorrichtungen für notwendige Teilbeschichtungen konnten für diese komplexen Bauteile entwickelt werden.

Unterarbeitspaket Diffusionsbarrieren:

Die in einer Literaturstudie ermittelten Elemente für Diffusionsbarrieren wurden auf technische Umsetzbarkeit bewertet und eine Auswahl experimentell erprobt. Dabei stellte sich heraus, dass es bei einigen Elementen zu Haftungsproblemen der Erosionsschutzschicht kommen kann. Auslagerungsversuche in einem engen Temperatur-

feld zeigten, dass das ausgewählte System bei diesen Temperaturen nicht oxidiert und auch Diffusion und daraus resultierende Veränderungen zu keinen signifikanten Veränderungen führten.

2.2.3 AP3 Innovative Belüftungskonzepte

Erreichte Ergebnisse

Das Arbeitspaket wurde erfolgreich abgeschlossen. Durch die verbesserte Temperaturvorhersage in Scheiben eines Hochdruckverdichters wird die Auslegungssicherheit der rotierenden Komponenten erhöht und somit eine verbesserte Spalthaltung und Gewichtsoptimierung der Komponenten ermöglicht.

Dies erfolgt durch einen kombinierten Auslegungsprozess, der durch eine neuentwickelte, validierte Thermalkorrelation für die komplexe thermische Gesamtmodellierung und der Möglichkeit der detaillierten Betrachtung bei speziellen Problemen mit Hilfe einer eingegrenzten validierten 3D-CFD-Rechnung charakterisiert ist.

Für die Validierung beider Analysen wurde auf Basis der Erkenntnisse aus Vorstudien eine Versuchskampagne mit einem Hochdruckverdichter-Rig durchgeführt, bei der drei Scheiben in radialer Richtung mit Thermoelementen bestückt wurden. Es wurden verschiedene stationäre und transiente Messungen durchgeführt. Dabei wurde der Einfluss der Kühlluftmenge und Kühllufttemperatur variiert. Um möglichst realitätsnahe Bedingungen im Hochdruckverdichter-Rig einzustellen, wurde eine Heißgasrückführung realisiert.

Der Vergleich der Messdaten aus den stationären und transienten Versuchen mit den Ergebnissen der neuentwickelten Korrelation und den CFD-Analysen ergaben eine gute Übereinstimmung und bestätigte die verbesserte Vorhersagegenauigkeit für das radiale Temperaturprofil. Dies zeigt sich dann auch in dem Vergleich mit dem bisherigen Modellierungsansatz. Unterstützt wurde dieser Vergleich mit der stationären 3D-CFD-Rechnung.

2.2.4 AP4 Strömungsphänomene beim Pumpen und Flattern

2.2.4.1 AP4.1 Rückströmphase beim Pumpen

Erreichte Ergebnisse

Im Unterarbeitspaket Ringgitterkanal wurde eine Schaufel erfolgreich von hinten auf die Hinterkante angeströmt, um den Strömungszustand während der Rückströmphase beim Pumpen zu nachzubilden. Dabei wurden stationäre und instationäre Druckmessungen auf dem Schaufelprofil und an der Gehäusewand durchgeführt, die zum Vergleich mit CFD-Rechnungen dienen.

Im Unterarbeitspaket Sondenentwicklung wurden zunächst instationäre 6-Lochsonden mit Long-Lines entwickelt. Damit wurden Pumpstöße vor und hinter dem ersten Rotor eines Versuchsverdichters vermessen. Auf der Basis dieser Erfahrung wurden dann instationäre 9-Lochsonden entwickelt, die mit den Druckaufnehmern direkt in der Strömung messen. Es wurden wieder Pumpstöße vor und hinter dem ersten Rotor eines Versuchsverdichters vermessen. Diese Daten dienen dem Vergleich mit analytischen Vorhersagen.

Im Unterarbeitspaket Analytik wurde zunächst die bei MTU im Einsatz befindliche CFD-Software TRACE erfolgreich auf die komplexen quasistationären Strömungszustände bei Rückströmung angewendet und anhand der Daten in Unterarbeitspaket 1 validiert. Auf der Basis dieser quasistationären Strömungszustände wurden mit den linearisierten Verfahren Flutterrechnungen durchgeführt. Es konnte analytisch gezeigt werden, dass die hohen Schaufelschwingungen in der Rückströmphase des Pumpens durch Flattern hervorgerufen werden.

2.2.4.2 AP4.2 Flutterfreie Auslegung

Erreichte Ergebnisse

Ziel dieses Arbeitspakets war die verlässliche Bestimmung der aerodynamischen Dämpfung, auch für off-design Betriebspunkte. Diese Kennzahl beschreibt die Flatterstabilität eines Schaufelgitters und ist auch für die zuverlässige Berechnung von Resonanzamplituden unabdingbar. Erreicht werden sollte dies durch einen kombinierten experimentellen und numerischen Ansatz. Hierzu sollte ein transsonischer

Verdichter-Rotor in Blisk-Bauweise gezielt zu Schaufelschwingungen angeregt werden und die so generierten instationären Druckkräfte gemessen werden. Die Ergebnisse dieser detaillierten instationären Strömungs- und Schwingungsmessungen sollten zur Verbesserung, Validierung und Kalibrierung der Verdichter-Auslegungsprozesse und der darin verwendeten Rechenverfahren führen.

Das Arbeitspaket wurde in Zusammenarbeit mit den DLR Instituten für Antriebstechnik (DLR-AT, Köln) und Aeroelastik (DLR-AE, Göttingen) durchgeführt. DLR-AT verantwortete den Aufbau und den Betrieb des einstufigen Verdichter-Rigs inklusive Fertigung des Blisk-Rotors sowie Instrumentierung und Datenübertragung. DLR-AE war für die Entwicklung des Erregersystems sowie für die instationären Druckmessungen auf dem Rotor verantwortlich.

MTU verantwortete die dazu benötigte Konzeptstudie, welche im Unterauftrag von der Univ. Hannover (Institut für Strömungsmaschinen) anhand eines Prinzipversuchs durchgeführt wurde. Weiterhin wurde im Unterauftrag an der HAWK (Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst) Hildesheim/Holzwinden/Göttingen das Reglerkonzept für die aktive Schaufelschwingungs-Erregung im Rahmen einer Vorstudie festgelegt und detailliert.

Diese Arbeiten wurden erfolgreich beendet. Es wurde zum einen gezeigt, dass sowohl Schaufelschwingungen gezielt mit Piezo-Erregern angeregt werden können als auch eine unabhängige Regelung der Schwingungsamplitude und –phase mittels des entwickelten Reglers möglich ist. Dabei ist der Regelkreis so robust ausgelegt, dass er auch mit relativ verrauschten Signalen, wie sie bei der Schleifringübertragung auftreten können, problemlos zurecht kommt. Der Prinzipversuch, bei dem die Anregung von Schaufelschwingungen und Amplitudenregelung im rotierenden System erprobt wurde, verlief zur vollsten Zufriedenheit. Weiterhin wurde am ruhenden Blisk-Rotor demonstriert, dass auch hier Schaufelschwingungen mittels Piezo-Folien angeregt werden können und sich fünf benachbarte Schaufeln unabhängig voneinander in Amplitude und Phase regeln lassen.

Weiterhin wurde von MTU eine umfangreiche Pre-Test-Analyse für die instationären Experimente am transsonischen Blisk-Rotor durchgeführt. Dabei wurden zwischen

50% und 100% Drehzahl fünf Drehzahllinien detailliert untersucht. Vergleiche mit dem bereits vermessenen Kennfeld zeigen eine gute Übereinstimmung. Für alle Betriebspunkte wurden Flutterrechnungen für die ersten drei Grundschwingungsformen durchgeführt. Dabei wurde sowohl das bisherige MTU-Auslegungsverfahren als auch das neuentwickelte LinearTRACE-Verfahren angewendet. Beide Verfahren geben generell denselben Trend wieder. So wurde eine Fluttergefährdung des Rotors in Pumpgrenzenähe von beiden Verfahren vorausgesagt. Allerdings gab es auch Betriebspunkte, bei denen beide Verfahren zu leicht unterschiedlichen aerodynamischen Dämpfungen führten.

Eine Gegenüberstellung zu den instationären Messungen konnte nicht erfolgen, da diese, vom Projektpartner DLR verantwortet, bis zum Zeitpunkt dieser Berichtserstellung nicht durchgeführt worden sind. Die geplante Validierung und Kalibrierung des Auslegungsprozesses war somit nicht möglich. Gleichwohl führten die numerischen Ergebnisse zu wichtigen Erkenntnissen, welche in den zukünftigen Auslegungsprozess einfließen werden.

Die Arbeiten zur Konzeptphase mündeten in zwei Veröffentlichungen [1], [2], welche auf den betreffenden Konferenzen präsentiert wurden.

2.2.4.3 AP4.3 Tandemstator

Erreichte Ergebnisse

Es sollte untersucht werden, welches Verbesserungspotential sich für Leitschaufeln in Tandembauweise hinsichtlich Verlustbeiwert, Umlenkung, statischer Druckerhöhung und Betriebsbereich ergibt. Während bei kleinen Drehzahlen die Frontstufen des Hochdruckverdichters vom Ablösen bedroht sind, sind bei Auslegungsdrehzahl die Austrittsleiträder der letzten Stufe aerodynamisch hoch belastet.

In den Frontstufen treten über einen großen Betriebsbereich transsonische Machzahlen auf. Hier ist die maximal mögliche Umlenkung sowie der zulässige Zuströmwinkelbereich infolge der hohen Werte für Machzahl und Staffelungswinkel gering

und die Leitschaufeln müssen als Verstellstatoren ausgeführt werden. Mit dem Einsatz von Tandemstatoren könnte hier eine Reduzierung der konstruktiven Komplexität erreicht werden. Die Austrittsleiträder sind dagegen durch kleine Strömungsgeschwindigkeiten und hohe Umlenkungen bei moderaten Zuströmmachzahlen gekennzeichnet. An dieser Position werden bereits Tandemkonfigurationen verwendet, die jedoch bisher nicht optimiert wurden.

Indem vorliegenden Vorhaben wurden zwei hoch belastete Gitter, das heißt ein konventionelles Referenzgitter und ein entsprechendes Tandemgitter entworfen; beide Entwürfe wurden im Gitterwindkanal der Universität Braunschweig untersucht. Durch den Einsatz kontrahierender Seitenwände wurden dabei im Mittelschnitt der Gitter maschinentypische Verhältnisse realisiert. Die Messungen umfassten neben Nachlauf- und Druckverteilungsmessungen auch Sondenmessungen in der Profilhrenzschicht sowie Anstrichbilder und ermöglichten damit einen Zugang zu dem Umschlagsverhalten der Strömung.

2.2.4.4 AP4.4 Hochbelastete, CT-ausgelegte Frontstufe

Erreichte Ergebnisse

Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurde für den 7-stufigen ATF12-Hochdruckverdichter eine hochbelastete Frontstufe (Stufe 0) unter gezielter Einbeziehung eines Casing Treatments der 3. Generation und Anpassung der bisherigen 1. und 2. Stufe zur Gewährleistung eines kontinuierlichen Verlaufs des Stufendruckverhältnisses entworfen und in einer aufwändigen Testkampagne (230 Verdichterlaufstunden) untersucht.

Wie erwartet zeigte sich die Wirksamkeit des neuen Auslegungskonzepts vor allem im Teillastbereich. Die diesbezüglich durchgeführten Messungen haben auf dem Weg dorthin einen enorm wichtigen Beitrag geleistet.

3 Technische Darstellung der Arbeitspakete

3.1 AP1 Rohmaterial minimierte und eigenschaftsoptimierte Rohteile

3.1.1 AP1.1 Rohmaterialminimierte Schmiedeteile

Ziel in AP1.1 war, für die Titanlegierung Ti64 eine Konvertierungsroute zu entwickeln und zu validieren, die eine zerstörungsfreie Prüfbarkeit mittels Ultraschall mit einer höheren Fehlerauffindwahrscheinlichkeit erlaubt. Eine Verbesserung der Ultraschallprüfbarkeit wird durch eine Gefügearpassung (homogen, feinkörnig) und durch Vermeiden von Texturen im Billetmaterial erreicht. Der Einfluss der geänderten Konvertierung auf die Gefügemerkmale und die Werkstoffkennwerte wurden durch mechanische Versuche an Werkstoffproben ermittelt und bewertet.

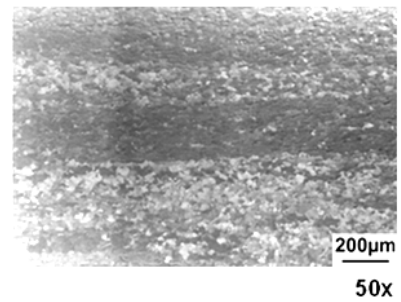
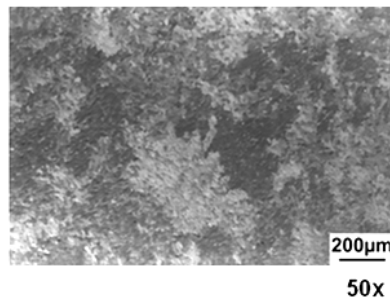
Dabei wurde eine Konvertierungsroute angestrebt, die die Mikrostruktur und Textur im gesamten Volumen des Billets vergleichmäßigt, wobei eine fein globulitische und texturarme Mikrostruktur entstehen sollte.

Abbildung 2 zeigt Beispiele für lichtmikroskopische Untersuchungen der Mikrostrukturen. Die mit Hilfe von polarisiertem Licht untersuchten Gefüge lassen Bereiche mit gleicher Orientierung erkennen. Zusammen mit röntgenographischen Untersuchungen zur Textur in diesen Gefügebereichen kann auf wichtige metallkundliche Prozesse (Phasenumwandlung; Kornverformung; Rekristallisation) während der Konvertierung geschlossen werden.

Für die Bewertung der Ultraschallprüfbarkeit eines Ti-Billets konnte ein geeigneter Ti-Kalibrierkörper von MTU definiert und gefertigt werden. Die künstlichen Fehler wurden dabei durch spanende Verfahren erzeugt (Flachbodenbohrungen mit Durchmessern von nur 0,1 bis 0,4 mm).

In der Abbildung 3 ist ein Beispiel für eine Ultraschalluntersuchung an einem Prüfkörper aus LowNoise-Billet gezeigt. Abgebildet ist ein Ultraschall-A-Bild (Abszisse: Schallkörper-Tiefe; Ordinate: Ultraschall-Intensität). Im Ultraschallspektrum sind die Testbohrung (\varnothing 0,8 mm; # 2 FBH) und Nebenechos zu erkennen.

konv. Konvertierung



LNB-Konvertierung

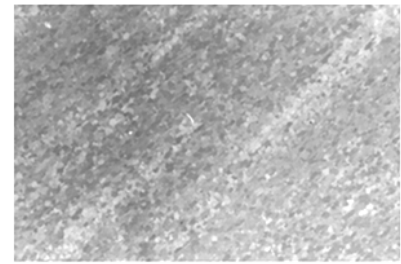
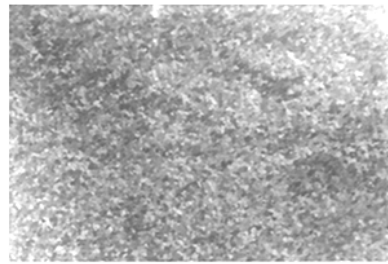


Abbildung 2: Beispiele lichtmikroskopischer Untersuchung im polarisierten Licht. Die Abbildungen zeigen einen Vergleich der Mikrostruktur im Billetmaterial. Oben: Mikrostruktur nach konventioneller Ti64-Konvertierung. Unten: Mikrostruktur nach LowNoise-Konvertierung (Ti64-Billets mit Billetdurchmesser 250 mm)

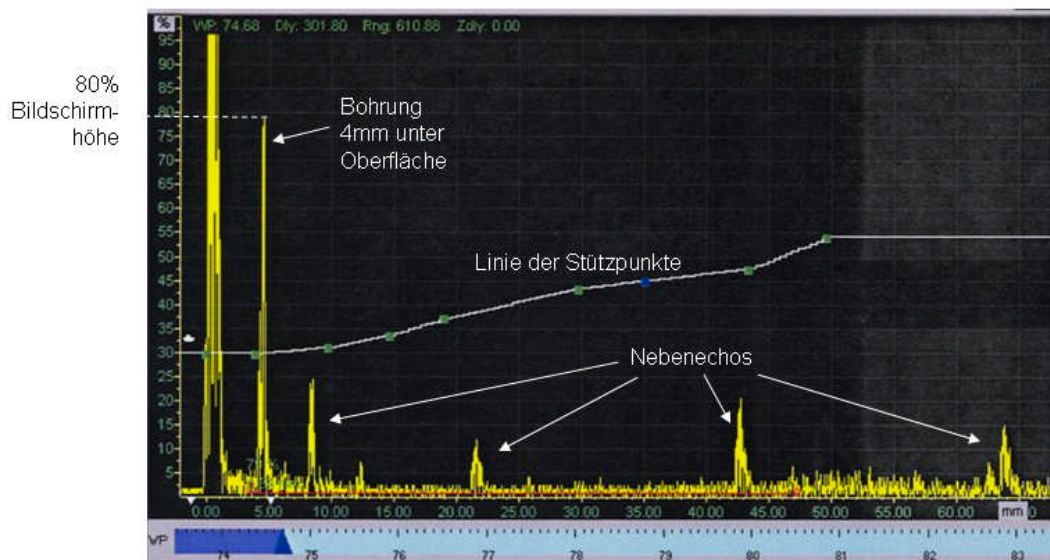


Abbildung 3: Beispiel eines A-Bildes aus einer Ultraschalluntersuchung an einem LowNoise-Billet-Prüfkörper mit einer Flachbodenbohrung (\varnothing 0,8mm, #2 FBH) in 4 mm Tiefe

Abbildung 4 zeigt das Ergebnis einer Ultraschalluntersuchung in Form eines C-Bildes. Jeder Punkt der dargestellten Fläche repräsentiert eine Auswertung eines Ultraschall-A-Bildes. Dargestellt ist somit das gesamte Volumen des zylindrischen

Ultraschallprüfkörpers. Die Abszisse zeigt den Umfang in Winkelgrad und die Ordinate die Höhe des Prüfcylinders. Im Prüfbereich konnten alle in den Prüfkörper eingebrachten Testfehler gefunden werden.

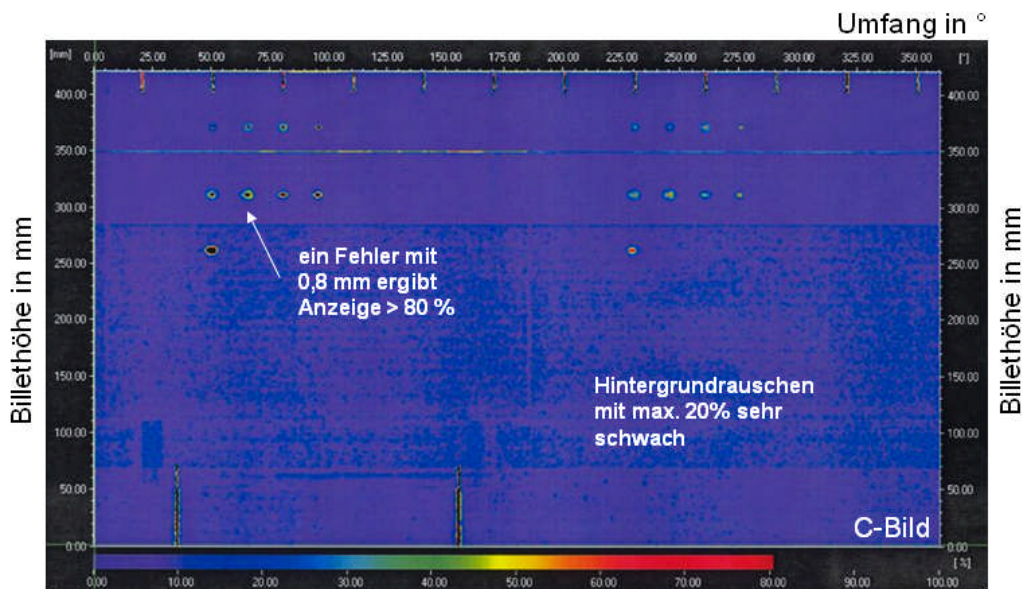


Abbildung 4: Beispiel eines C-Bildes aufgenommen an einem LowNoise Billetprüfkörper mit verschiedenen Testfehlern (Flachbodenbohrungen)

Durch Optimierungen im Konvertierungsprozess wurde ein homogenes, feinkörniges und texturarmes Ti64-Billetmaterial erreicht, das sich durch eine sehr gute US-Prüfbarkeit auszeichnet („Low Noise“ steht dabei für geringes Hintergrundrauschen bei der Ultraschallprüfung). Ultraschallprüfungen konnten eine signifikante Verbesserung der zerstörungsfreien Prüfbarkeit aufzeigen. Mit herkömmlicher Ultraschallprüfung konnte die nachweisbare Fehlergröße von 1,2 mm (FBH) für konventionelles Billetmaterial auf 0,8 mm (FBH) für das Low Noise Billet verbessert werden. Mit diesem Ergebnis wurden die technischen Projektziele erreicht.

3.1.2 AP1.2 Eigenschaftsoptimierte Schmiedeteile Vorkonturiertes Schmiederohrteil

In diesem Arbeitspaket sollten die Voraussetzungen zur Realisierung von vorkonturierten Titan-Blisk Bauteilen erarbeitet werden. Dazu wurde zunächst in enger Abstimmung zwischen OttoFuchs und MTU eine Demonstratorgeometrie mit Vorkontu-

rierung im Schaufelkranzbereich festgelegt. Auf Basis dieser Geometrie erfolgte die Ausarbeitung einer Schmiederohteilgeometrie durch OttoFuchs unter folgenden Prämissen:

- ausreichende Umformung beim Schmieden, vor allem in den festigkeitskritischen Bauteilbereichen,
- geringes Einsatzgewicht (Materialkosten),
- kostengünstiges Schmiedegesenk,
- optimale Bedingungen für US-Prüfbarkeit des Schmiederohteils,
- möglichst geringes Zerspanvolumen bei der Fertigteilbearbeitung,
- ausreichendes Aufmass vom Schmiederohteil zum Fertigteil.

OttoFuchs stellte nach den Vorgaben Schmiedegesenke her und führte Versuchsschmiedungen mit LowNoise-Billetmaterial (Ti64) durch. Die Charakterisierung der vorkonturierten Schmiederohteile zeigte, dass alle Festigkeitseigenschaften die gültigen Forderungen für Blisk-Bauteile erfüllen.

Die Abbildung 5 zeigt das 3D-Modell und ein Foto des ersten geschmiedeten Rohteils mit Vorkonturierung im Schaufelkranzbereich.

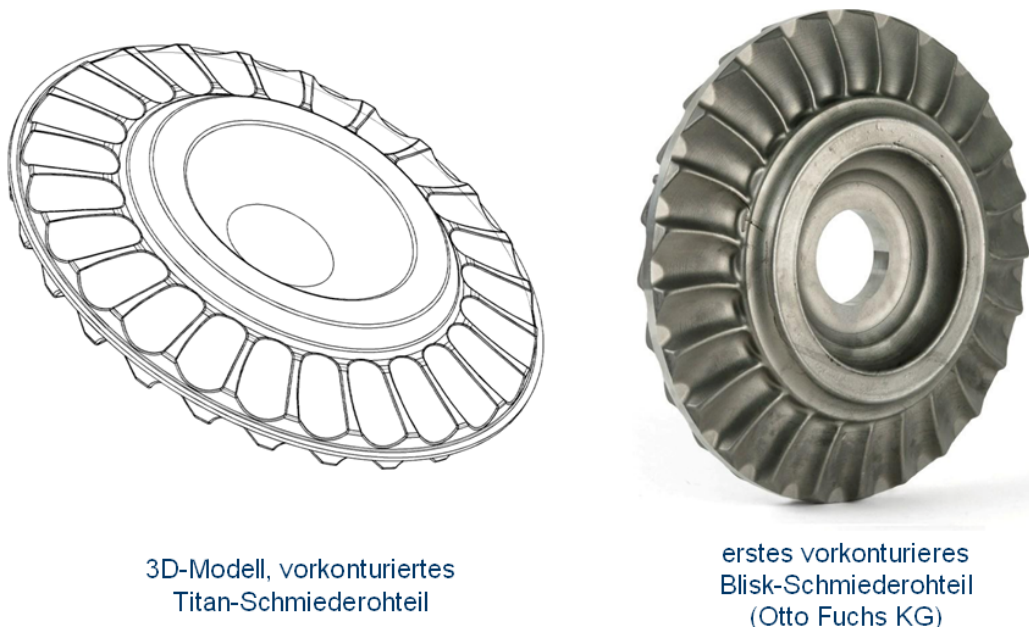


Abbildung 5: 3D-Ansicht und Schmiedeteil der zwischen OttoFuchs und MTU abgestimmten Geometrie für ein vorkonturiertes Schmiederohteil

Charakterisierung des vorkonturierten Schmiederohrteils:

Neben Geometrie und der Einhaltung der maßlichen Toleranzen wurden Makro- und Mikrostruktur untersucht. Die Makrountersuchungen lassen den Materialfluss beim Schmieden erkennen. Die Flusslinien in den Makroätzungen sind die makroskopischen Merkmale, die den Materialfluss erkennen lassen. Abbildung 6 zeigt eine solche Makroätzung an einer Beizscheibe mit gut zu erkennenden Flusslinien. Die Beizscheibe zeigt den gesamten Querschnitt des vorkonturierten Schmiederohrteils.

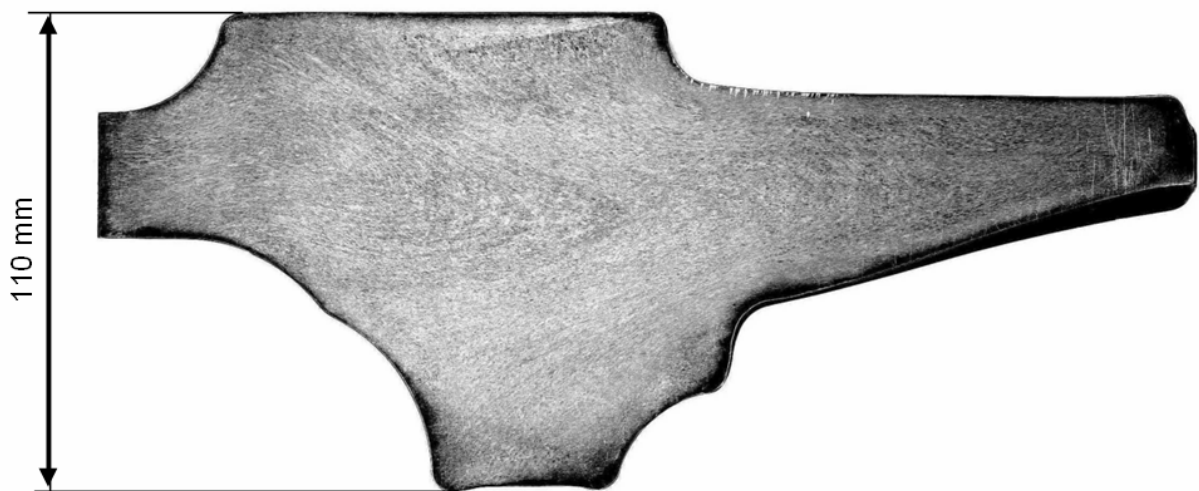


Abbildung 6: Makroätzung einer Beizscheibe, die den gesamten Querschnitt des Schmiederohrteils zeigt

Nach der Auswertung aller Kennwerte, die in den mechanischen Prüfungen ermittelt wurden, kann festgestellt werden, dass das Schmiederohrteil alle geforderten Materialeigenschaften erfüllt. Eine Bewertung der mechanischen Testergebnisse mit den heute für Ti64 gültigen Design Lines konnte durchgeführt werden. Das Ergebnis dieser Bewertung ist, dass das Potential für eine Anhebung der gültigen Design Lines (höhere Auslastung des Werkstoffes im Bauteil) durch eine Low°Noise-Qualität als gering einzuschätzen ist.

Die Anwendung der Low°Noise-Qualität für Ti64 hat vielmehr den Vorteil, dass das heute für rotierende Bauteile gültige Qualitätssicherungskonzept angepasst werden kann. Durch die bessere Ultraschallprüfbarkeit des Schmiedeeinsatzmaterials besteht die Möglichkeit Qualitätsprüfungen vom Schmiederohrteil auf das Schmiedeeinsatzmaterial (Billet) zu verlagern. Das angepasste Qualitätssicherungskonzept

ermöglicht die Umsetzung von endkonturnahen Schmiederohteilgeometrien. Das wesentliche Einsparpotential durch Low°Noise-Qualität für Schmiedeeinsatzmaterial (Billet) liegt somit in der Reduzierung des Schmiedeeinsatzgewichtes.

Untersuchungen zur Eigenspannung im Ti64-Schmiederohteil:

Abbildung 7 zeigt ein Simulationsergebnis (RWTH-Aachen) des Eigenspannungszustands nach Schmieden und Wärmebehandlung einer vorkonturierten Blisk. Zu erkennen ist, dass nach der Simulation vor allem in den eingeschmiedeten Bereichen zwischen den Schaufeln hohe Zugeigenspannungen vorhanden sind.

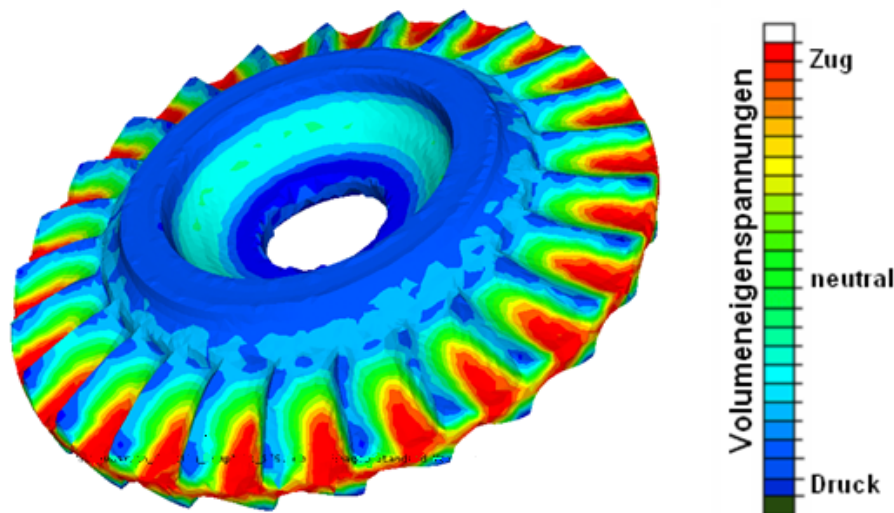


Abbildung 7: Simulationsergebnis (RWTH-Aachen) des Eigenspannungszustandes nach Schmieden und Wärmebehandlung einer vorkonturierten Blisk

Über Neutronenbeugungsversuche, die am Reaktor der Technischen Universität München in Zusammenarbeit mit dem Hahn-Meitner-Institut Berlin durchgeführt wurden, konnten Volumeneigenspannungen im Ti64-Schmiederohteil bestimmt werden. Die ermittelten Eigenspannungen liegen im erwarteten Bereich (Simulationsergebnisse RWTH Aachen) und können für das Schmiederohteil als unkritisch angesehen werden. Das Ergebnis der Eigenspannungsuntersuchungen konnte auch durch die Bearbeitungsversuche an einem vorkonturierten Schmiederohteil bestätigt werden. Bei der Bearbeitung des Ti64-Schmiedeteils konnten keine spannungsbedingten Verzüge gefunden werden.

Spanende Bearbeitung von vorkonturierten Schmiederohtteilen:

Im Mittelpunkt dieses Unterarbeitspakets stand die Entwicklung einer Bearbeitungsstrategie für vorkonturierte Schmiederohteile zum fertigen Blisk-Bauteil. Für das vorkonturierte Schmiederohteil wurden Bearbeitungsprogramme erstellt, die eine Dreh- und Fräsbearbeitung auf NC-Maschinen bis zum fertigen Bauteil ermöglichen. Erste Bearbeitungsversuche zeigten, dass eine Fertigung innerhalb der definierten Toleranzen zwischen Schmiederohteil und Fertigteil mit den verfügbaren NC-Maschinen möglich ist. Abbildung 8 zeigt ein vorkonturiertes Schmiederohteil und einen bearbeiteten Ausschnitt von vier Schaufeln des gleichen Schmiederohteils.



Abbildung 8: Erste Endbearbeitungsversuche demonstrieren die Machbarkeit

links: vorkonturiertes Schmiederohteil

rechts: Blisk-Ausschnitt mit vier bearbeiteter Schaufeln

Mittels der Bearbeitungsversuche konnten ferner folgende Erkenntnisse gewonnen werden:

- Die Schmiedehaut im Schaufelkranzbereich hat keinen negativen Einfluss auf die Fräsbearbeitung.
- Es ist kein erhöhter Werkzeugverschleiß durch die Schmiedehaut und die Vorkonturierung zu beobachten.
- Das gewählte Aufmass am Schmiederohteil war ausreichend für die Dreh- und Fräsbearbeitung.
- Es konnten keine negativen Effekte durch Schwingungsanregung bei der Fräsbearbeitung beobachtet werden.
- Geometrische Verzüge durch freigesetzte Eigenspannungen bei der Einzelschaufelbearbeitung traten nicht auf.

Gefügesimulation für die Titanlegierung Ti6246:

An einem vorkonturierterm Schmiederohteil aus Ti6246 wurden mechanische Kennwerte ermittelt und mit den geltenden Materialspezifikationen für Ti6246 verglichen. Für die Ermittlung der mechanischen Kennwerte wurden im einzelnen Zug,- HCF,- LCF,- Kriech- und Bruchzähigkeitsversuche durchgeführt.

An den Proben erfolgte jeweils eine zyklische HCF- und LCF-Prüfung bis zum Bruch. Dabei wurden spezifikationsgerechte Festigkeiten und Duktilitäten erreicht. Ferner erfüllten die Ergebnisse der Kriechversuche die MTU-Spezifikationsanforderungen. Auch die ermittelten Kennwerte K1c,- Kriech- und Rissfortschritt erfüllen die MTU-Spezifikationen für rotierende Klasse 1-Bauteile aus Ti6246.

Nach dem Abschluss der Arbeiten zur Gefügesimulation (RWTH Aachen) und der Untersuchungen zur Gefügeausbildung in den Ti6246-Schmiederohteilen erfolgte durch OttoFuchs im ersten Quartal 2010 die Validierung des im Projekt entwickelten Gefügemodells. Die durch das Kornformmodell der RWTH Aachen vorhergesagten Gefüge korrelierten sehr gut mit der Gefügeausbildung in den Ti6246 – Schmiederohteilen. Das Kornformmodell, welches seine Inputdaten vor allem aus der Schmiedesimulation erhält, zeigt die neuen Möglichkeiten einer prozessübergreifenden Simulation auf. Das entwickelte Kornformmodell ist heute ein nützliches Werkzeug bei der Vorhersage der Kornform und Größe im Schmiederohteil. In Zukunft bietet das Kornformmodell die Basis für weiterführende Simulationen, die eine lokale Eigenschaftsvorhersage im Schmiederohteil zum Ziel haben.

3.1.3 AP1.3 DA718

Im Detail gab es bei der DA718 Qualifizierung 4 Schwerpunkte, deren Ergebnisse im folgenden kurz zusammengefasst sind.

Ermittlung der für die Auslegung notwendigen Werkstoffdatenbasis:

Für die Auslegung von rotierenden Triebwerksscheiben wird eine große Bandbreite von mechanischen Eigenschaften mit statistischer Absicherung benötigt. So liefert

z.B. die statische Festigkeit als Funktion der Temperatur eine Aussage über das Bruchverhalten oder die Lebensdauer bei Kurzzeitermüdungsbelastung, um die Lebensdauer der Scheibennabe (glatte Stelle) und eventueller Bohrungen (gekerbte Stelle) berechnen zu können. Diese Eigenschaften sind nicht nur eine Funktion der Temperatur sondern unterliegen z.B. auch einer gewissen Streuung in Abhängigkeit von der Lage im jeweiligen Bauteil, des Herstellers, der Schmelzcharge und insbesondere der Qualität der Bauteiloberfläche bei Ermüdungsbelastung, um nur die wichtigsten zu nennen.

Im Rahmen dieses Arbeitspaktes wurde die Lebensdauer glatter LCF-Proben in Abhängigkeit vom Oberflächenbearbeitungszustand untersucht.

Die Versuche wurden erfolgreich abgeschlossen. Auf Basis umfangreicher Voruntersuchungen wurden geeignete Oberflächennachbehandlungsverfahren für DA718 erarbeitet und ein optimiertes Oberflächenbearbeitungsverfahren zur Herstellung gedrehter Oberflächen definiert. Alle auslegungsrelevanten Daten wurden ermittelt und die Versagensmechanismen durch Nachuntersuchungen der Bruchflächen im Rasterelektronenmikroskop bestimmt (Abbildung 9).

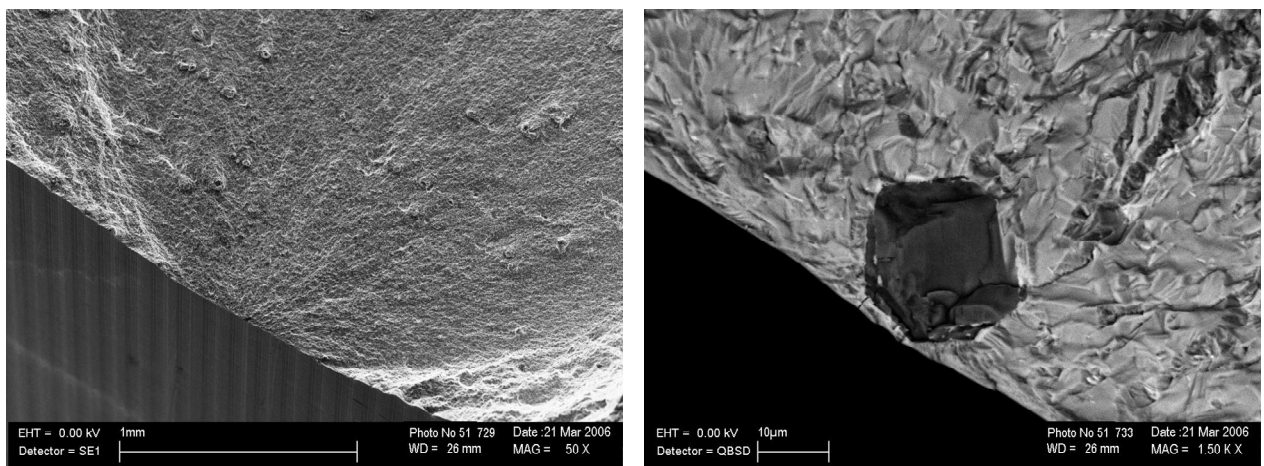


Abbildung 9: Bruchfläche einer geprüften LCF-Probe mit gedrehter Oberfläche (Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme)

Qualifizierung einer Schwungradreißschweißverbindung aus DA718 mit DA718:

Zur Gewichtseinsparung werden einzelne Stufen insbesondere im Verdichterbereich modernster Triebwerke häufig nicht miteinander verschraubt, sondern verschweißt. Das hierfür am besten geeignete Verfahren ist das Schwungradreißschweißen (engl.

Inertia Welding), bei dem keine flüssige Phase entsteht, sondern „nur“ ein teigiger Werkstoffzustand, und damit bei entsprechender Sorgfalt und Prozessführung auch keine Poren. Die Schweißzone ist klein, bedarf aber einer Schweißwärmenachbehandlung zur Optimierung der Eigenschaften in der Schweißnaht. Die Wärmenachbehandlung sollte wiederum keinen allzu großen Einfluss auf die Eigenschaften des Grundwerkstoffes haben.

Die Schwungradreißschweißverbindung DA718 mit DA718 wurde erfolgreich qualifiziert. Dafür wurden neben statischen Festigkeitsversuchen der Schweißnaht auch Ermüdungsversuche und Rissfortschrittsversuche durchgeführt.

Kompetenzaufbau zur Abweichungsbewertung

Wie zuvor beschrieben unterliegt die Materialqualität einer gewissen Schwankungsbreite in Abhängigkeit von verschiedenen Einflussfaktoren (Bauteillage, Hersteller, Schmelzcharge etc.). Die zulässige Bandbreite wird in einer entsprechenden Spezifikation beschrieben und in der Regel eingehalten.

Zwei der wichtigsten „Merkmale“ für die Bewertung von Abweichungen von der Spezifikation sind die Zugversuchskennwerte und das Gefüge.

Zur gezielten Untersuchung wurden in Zusammenarbeit mit Böhler Schmiedetechnik (Kapfenberg, Österreich) Bauteile mit 3 verschiedenen Schmiedezuständen hergestellt (Abbildung 10). Diese wurden umfassend durch lagenabhängige Zugversuche und Gefügebewertungen charakterisiert.



Abbildung 10: Schmiederohteil DA718 im Anlieferungszustand

Die Versuche wurden erfolgreich abgeschlossen. Es hat sich gezeigt, dass die Einstellung der gewünschten DA718 Eigenschaften im gesamten Bauteil mehrere Iterationen erfordert und, dass das volle prognostizierte Festigkeitspotential nur in dünnen Bauteilen realisierbar ist. Dickere DA718 Bauteile haben ebenfalls ein höheres Festigkeitsniveau im Vergleich zu IN718 Bauteilen, der Unterschied ist aber geringer als bei dünnen Scheiben. Exakte prozentuale Angaben sind dabei stark von Bauteilgeometrie und Hersteller abhängig. Die Gefügeuntersuchungen zeigen weiterhin, dass abhängig vom Herstellprozess, die einzelnen Härtungsmechanismen einen unterschiedlich hohen Beitrag liefern. Diese Unterschiede sind lichtmikroskopisch ($V_{\max} = 1000x$) kaum nachweisbar, sondern erfordern ein Transmissions – Elektronenmikroskop ($V = 5000x$ bis $100000x$).

Verifikation der bei der MTU typischen Zerspanungs- und Prozessparameter für Räumen, Drehen, Bohren u.a.:

Es ist bekannt, dass eine Bearbeitung die oberflächennahe Mikrostruktur des Werkstoffs verändern kann. Diese Veränderungen können einen negativen Einfluss insbesondere auf die Ermüdungseigenschaften haben, z.B. vorzeitige Rissbildung.

Umfangreiche Bearbeitungsversuche wurden mit variierten Bearbeitungsparametern durchgeführt, um zu überprüfen, ob die Standardbearbeitungsparameter für DA718 zu einer unzulässigen Veränderung der Oberflächenmikrostruktur führt. Alle untersuchten Parameter zeigen für den MTU Bearbeitungsstandard erfüllende Ergebnisse.

3.2 AP2 Hochtemperatur-Blisk

3.2.1 AP2.1 TMF Blisk

3.2.1.1 Unterarbeitspaket 1: Statisches Rig

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes wurde ein statisches Rig konstruiert und aufgebaut (siehe Abbildung 11), um eine verdichterähnliche Einzelschaufel in einem Rechteck-Kanal unter transienten Bedingungen zu untersuchen, d.h. unter sich

schnell ändernden Gastemperatur-Randbedingungen, die vergleichbar sind mit zeitlichen Temperaturverläufen bei einer Triebwerks-Beschleunigung oder -Verzögerung. Um den schnellen Wechsel der Gastemperatur unter gleichbleibenden Strömungsbedingungen zu ermöglichen, wird dem Versuchsstand kontinuierlich Luft unterschiedlicher Temperatur über zwei Rohrleitungen zugeführt, wobei über Ventile entweder Heiß- oder Kaltluft durch die Messstrecke bzw. die Bypässe geleitet wird.

Das statische Rig besitzt eine umfangreiche Instrumentierung mit Messgeräten. Dies dient sowohl der Messung der Strömungsverhältnisse, die als Randbedingung für die CFD- und Thermalanalyse verwendet werden, als auch der Messung der Materialtemperatur der Schaufel für einen Vergleich mit dem Ergebnis der Thermalanalyse.

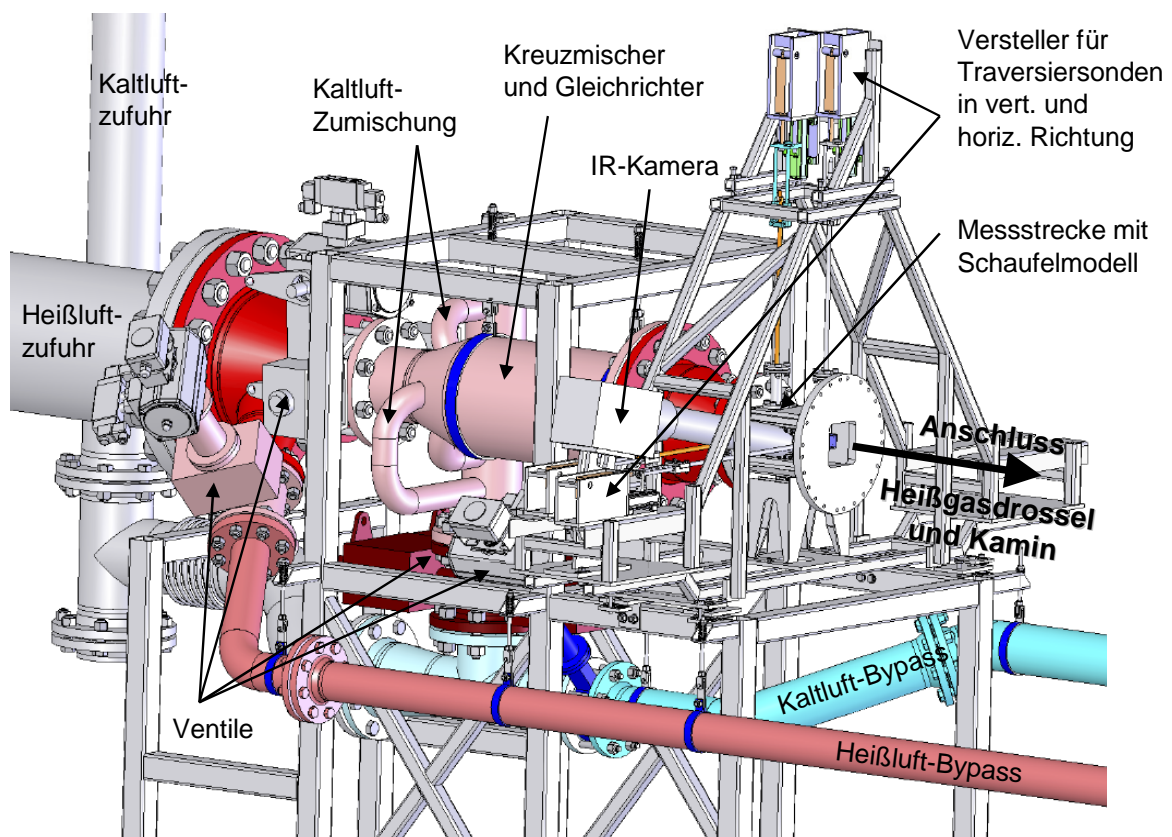


Abbildung 11: Statisches Rig

Vor und nach der Schaufel können mit Sonden, die über Linearversteller bewegt werden, horizontale und vertikale Profile von Druck, Temperatur und Turbulenzgrad aufgezeichnet werden. Es wurden zwei Schaufelmodelle gefertigt, eines mit Druck-

messbohrungen zur Messung von Druck- bzw. Machzahlverteilungen auf dem Schaufelblatt sowie am Fillet nahe der Vorderkante. Das andere Schaufelmodell wurde einer speziellen Oberflächenbehandlung unterzogen, um einen hohen Emissionsgrad und damit eine genaue Messung der Oberflächentemperatur mittels einer Infrarot-Kamera zu ermöglichen. Außerdem befinden sich in diesem Modell Thermoelemente im Schaufelteller nahe an der Oberfläche.

In einem ersten Schritt wurde die CFD-Rechnung validiert. Dafür wurden Versuche unter stationären Bedingungen bei unterschiedlichen Drücken, Temperaturen, Zuström-Machzahlen und Anstellwinkeln der Schaufel durchgeführt. Es zeigte sich eine gute Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen der CFD-Rechnung und den gemessenen Profilen vor und nach der Schaufel sowie den Machzahlverteilungen auf der Schaufeloberfläche bei halber Schaufelhöhe (siehe Abbildung 12).

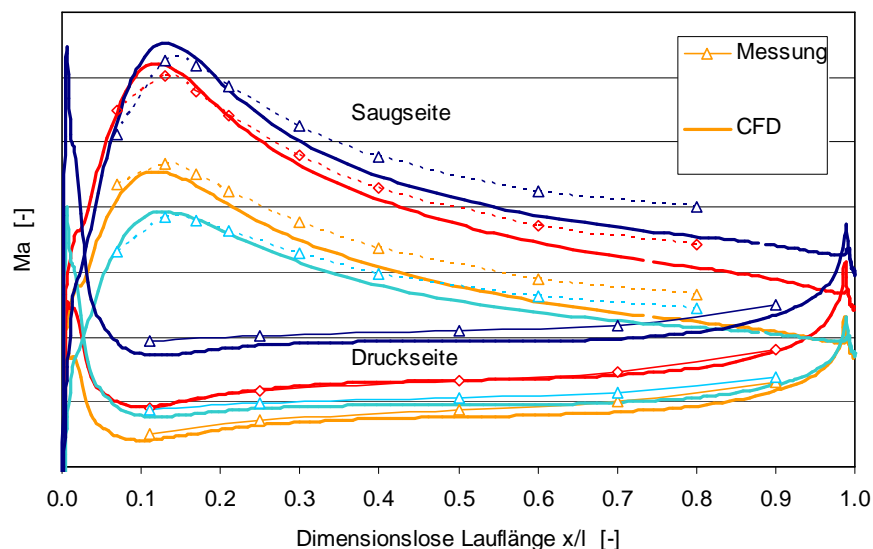


Abbildung 12: Gemessene und berechnete Machzahl-Verteilungen auf dem Schaufeloberfläche bei halber Schaufelhöhe für unterschiedliche Zuström-Machzahlen und Anstellwinkel

Für die Thermalanalyse wurden zunächst mittels CFD die Wärmeübergangskoeffizienten auf der Schaufeloberfläche bestimmt. Abbildung 13 zeigt ein Ergebnis für einen transienten Versuch mit Aufheizung. In der Abbildung sind die Verläufe der gemessenen und als Randbedingung für die Rechnung, die verwendete Gastemperatur sowie der berechneten und gemessenen Materialtemperaturen in Filletnähe dargestellt. Es zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Messdaten und

Ergebnissen der Thermalanalyse. Abbildung 14 zeigt die gemessene und berechnete Oberflächentemperaturverteilung zu einem bestimmten Zeitpunkt während der Aufheizung der Schaufel. Die beste Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung ergibt sich auf der Schaufelblattmitte. Richtung Vorder- und Hinterkante sowie Richtung Fillet wächst die Abweichung an. Dies liegt vor allem an einer steigenden Messungenauigkeit der Infrarotkamera aufgrund einer Zunahme an Streustrahlung. Dies ist auf einen ungünstigeren Beobachtungswinkel zurückzuführen und wird durch eine Richtungsabhängigkeit des Emissionskoeffizienten verstärkt.

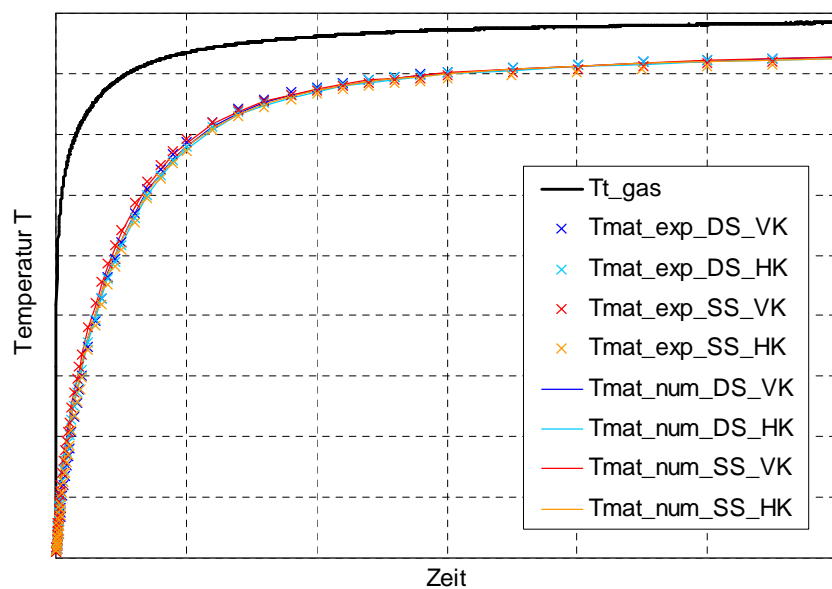


Abbildung 13: Berechnete und mit Thermoelementen gemessene Materialtemperatur in Filletnähe während eines transienten Versuchs mit Aufheizung (DS = Druckseite, SS = Saugseite, VK = Vorderkante, HK = Hinterkante)

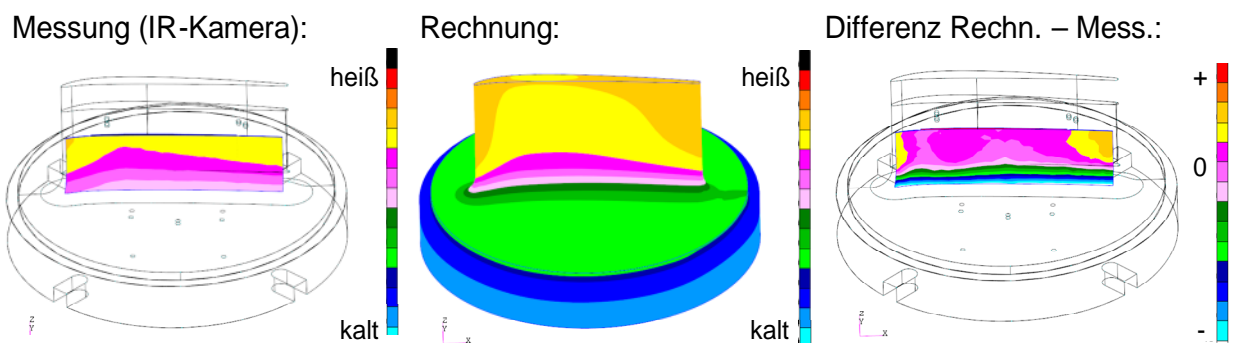


Abbildung 14: Gemessene und berechnete Oberflächentemperaturverteilung zu einem bestimmten Zeitpunkt während eines transienten Versuchs mit Aufheizung (gleicher Versuch wie in Abbildung 13)

Insgesamt konnte für die Thermalanalyse aber die im Projektlastenheft spezifizierte Genauigkeit nachgewiesen werden. Darüber hinaus konnte die Methode zur Berechnung der Wärmeübergangskoeffizienten mittels CFD optimiert werden, und zwar durch Studien mit Variation der Netzqualität, der Turbulenz- und Transitionsmodelle und der Funktionen zur Berechnung der Stoffgrößen.

3.2.1.2 Unterarbeitspaket 2: 3D-Thermal- und TMF-Analyseprozess einer Blisk

In diesem Arbeitspaket wurde der Berechnungsprozess für die 3D-Thermal- und TMF-Analyse entwickelt, bereitgestellt und erstmalig angewandt. Zur Einbindung der neuen Berechnungsmethode für die Wärmeübergangskoeffizienten mit CFD in die Thermalanalyse wurde ein neuer Prozess entwickelt und die Schnittstelle zwischen Wärmetechnik und Aerodynamik erweitert.

Abbildung 15 zeigt das 3D-FE-Modell, das sowohl für dieses Arbeitspaket als auch die nachfolgenden Untersuchungen mit dem HDV-Rig verwendet wurde. Zum Testen des Analyseprozesses wurden Auslegungsrechnungen für das HDV-Rig verwendet. Damit konnte die Einsatzfähigkeit des Analyseprozesses nachgewiesen werden.

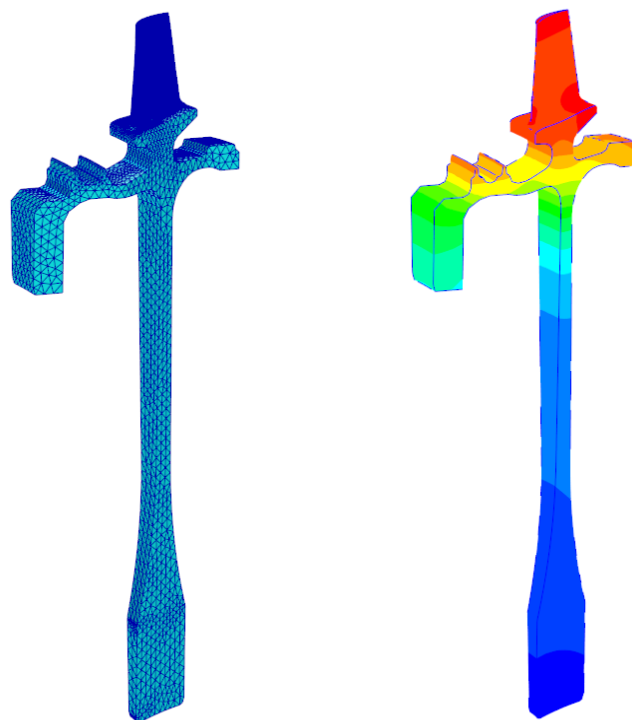


Abbildung 15: 3D-Modell der untersuchten Blisk des HDV-Rigs. Links: Rechennetz, rechts: Materialtemperatur im heißen Zustand.

3.2.1.3 Unterarbeitspaket 3: HDV-Rig

Um Temperatur-Messdaten insbesondere im Filletbereich zu gewinnen, wurde bei einem Hochdruckverdichter-Rig die Blisk einer hinteren Stufe mit Thermoelementen instrumentiert. Mit dem Rig wurden dann transiente Versuche durchgeführt, die die Beschleunigung eines Triebwerks von Leerlauf auf Volllast bzw. den umgekehrten Vorgang der Verzögerung simulierten. Für die Thermalanalyse wurde zur Berechnung der Wärmeübergangskoeffizienten sowohl der standardmäßige Prozess mittels Grenzschichtverfahren auf Stromlinien als auch der neu entwickelte Prozess mit CFD eingesetzt. Der Vergleich der Messdaten mit den Rechenergebnissen zeigt, dass der neue Prozess genauer ist und die geforderte Genauigkeit der Thermalanalyse erfüllt. Aufbauend auf dem Ergebnis der Thermalanalyse wurde eine TMF-Bewertung durchgeführt.

Das Ergebnis zeigt, dass die größte thermomechanische Ermüdung an den erwarteten Stellen auftritt, nämlich im Fillet nahe der Vorder- und Hinterkante. Wegen der unterschiedlich schnellen Aufheizung bzw. Abkühlung des dünnwandigen Schaufelblattes und des massiven Scheibenkörpers treten nämlich im Fillet die größten Temperaturgradienten während dem transienten Betrieb des Triebwerks auf. Dadurch werden im Fillet auch die größten Spannungen induziert, deren zeitliche Änderung letztendlich die thermomechanische Ermüdung bewirkt.

Abschließend wurden die mit dem HDV-Rig kalibrierten Thermalmodelle an Triebwerks-Bedingungen angepasst, um eine 3D-Thermalanalyse mit anschließender TMF-Lebensdaueranalyse unter Triebwerksbedingungen durchzuführen. Es ergab sich eine relativ hohe TMF-Schädigung. Als Folgerung daraus wird der im Rahmen dieses Arbeitspakets entwickelte Berechnungsprozess zukünftig als Standard-Prozess bei der Auslegung einer Hochdruckverdichter-Blisk eingesetzt.

3.2.2 AP2.2 Mistuning Blisk

Die analytische Auslegung von Blisken erfolgt in der Regel über die Annahme von zyklischer Symmetrie der Rotoren. Damit kann der Berechnungsaufwand mit Hilfe von Finite-Elemente-Modellen überschaubar gehalten werden, indem nur ein Segment der gesamten Blisk modelliert wird.

In Wirklichkeit sind aber die realen Bauteile nicht symmetrisch, sondern es ergeben sich aufgrund von Fertigungstoleranzen oder Einflüssen im Betrieb (Verschleiß/ Verschmutzung/ FOD) kleine Abweichungen von Schaufel zu Schaufel. Diese geringen Abweichungen (Mistuning) zerstören die zyklische Symmetrie der Blisk und führen dazu, dass bei bestimmten Betriebssituationen die Amplitudenüberhöhung in Resonanzen bei einzelnen Schaufeln wesentlich größer werden kann als im ideal symmetrischen Fall (tuned system). Dies erfordert die Betrachtung von allen Schaufeln einer Blisk sowohl aus analytischer als auch experimenteller Sicht.

3.2.2.1 Unterarbeitspaket 1: Analytik

Für die Analytik ist der Einsatz eines Reduced-Order-Codes unverzichtbar, um den Berechnungsaufwand zu reduzieren. Die Software TURBO-Reduce wurde bereits früher von der University of Michigan gekauft und getestet. Die Software verfügt über eine Schnittstelle für die Berücksichtigung aerodynamischer Kopplung, die noch nicht getestet wurde.

Damit ergaben sich folgende Aufgaben:

- Test der Schnittstelle für die aerodynamischen Kopplungskoeffizienten
- Validierung der Schnittstelle, Vergleich mit DMS- und BSSM-Messungen
- Studie gezieltes Mistuning (intentional mistuning)

Abbildung 16 zeigt den Vergleich der Amplitudenüberhöhungen einer Bliskschaufel bei einer Resonanzdurchfahrt in Abhängigkeit der anregenden Engine-Order (EO) und der Standardabweichung der Frequenzen, jeweils ohne und mit Aerokopplung.

Man sieht, dass aufgrund der Aerodämpfung die maximalen Amplituden für die meisten EO-Anregungen abnehmen.

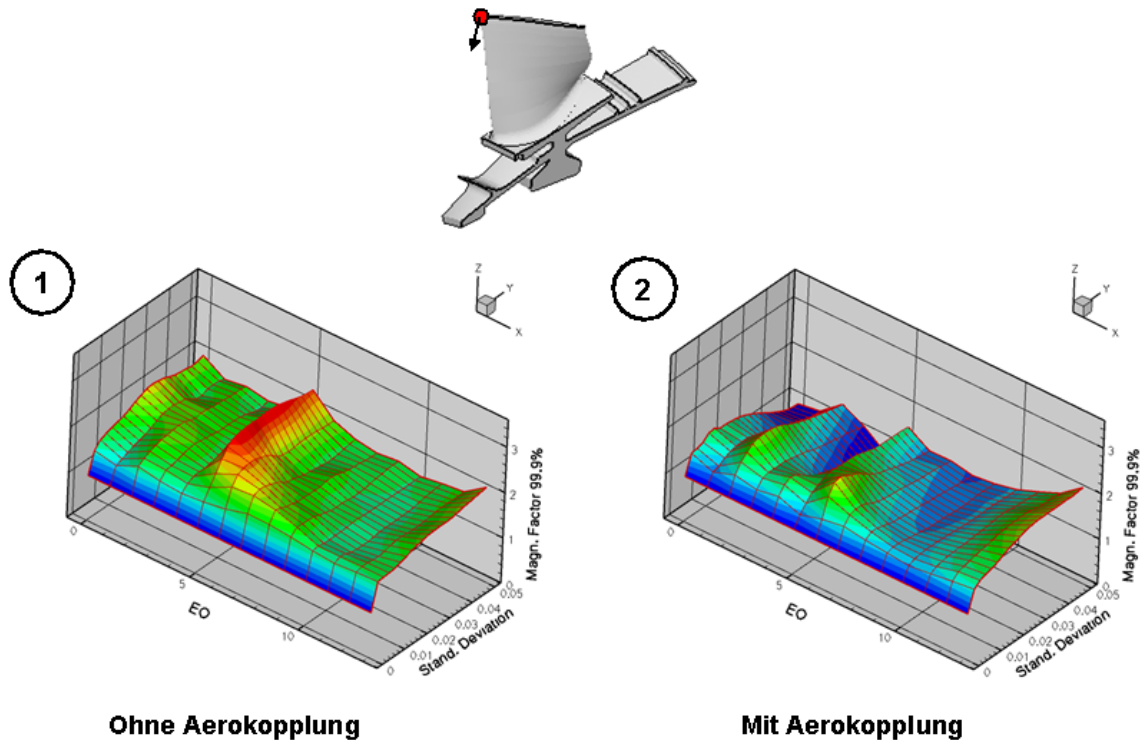


Abbildung 16: Testrechnung zum Einfluss der Aerokopplung

In Abbildung 20 ist ein weiteres, reales Beispiel gezeigt, bei dem Messung und Analytik zusammen eingesetzt wurden. Eine Beschreibung erfolgt im Abschnitt zu Unterarbeitspaket 3.

3.2.2.2 Unterarbeitspaket 2: Reverse Engineering

Die Nachrechnung vom Mistuning einer bestimmten Blisk erfordert die Kenntnis der Eigenfrequenzverteilungen aller Schaufeln. Das Ziel des Unterarbeitspakets 2 „Reverse Engineering“ war es, eine Methode zu entwickeln, mit der die aktuelle Geometrie jeder Schaufel einer beliebigen Blisk als FEM-Modell abgebildet wird und die Frequenz rechnerisch ermittelt wird. Dieses konnte vollumfänglich umgesetzt werden. In Abbildung 17 wird beispielhaft eine Frequenzverteilung einer realen Blisk mit der oben beschriebenen Methode verglichen. Die Frequenzverteilung wird gut wie-

dergegeben. In Referenz [3] ist eine alternative Methode beschrieben, die auf einem automatischen Tetraeder-Vernetzer basiert, statt auf der bevorzugten, oben beschriebenen strukturierten Vernetzung.

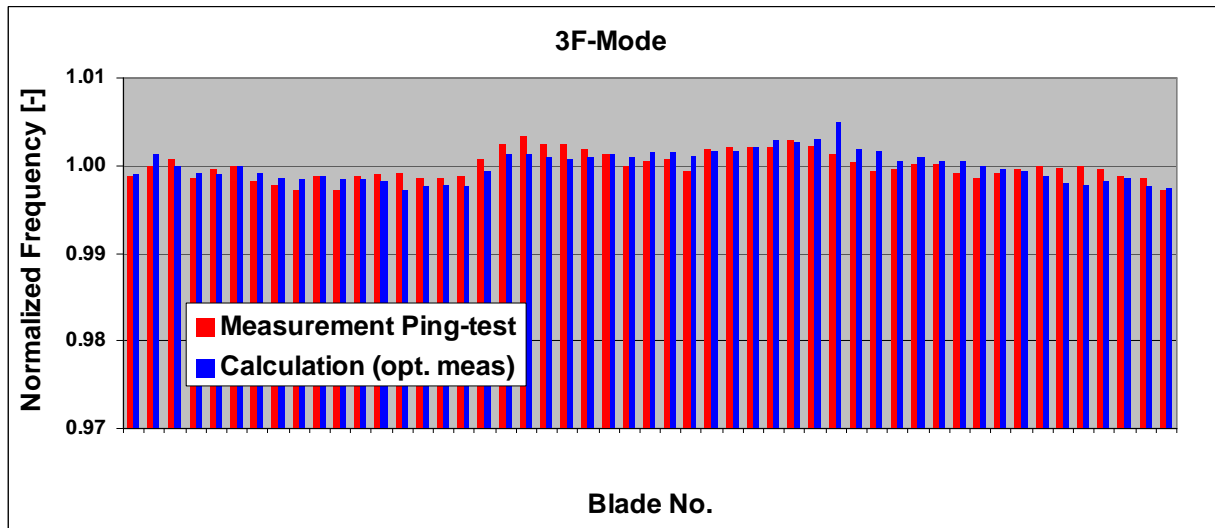


Abbildung 17: Vergleich Frequenzmessung ⇔ FEM-Rechnung

3.2.2.3 Unterarbeitspaket 3: Prüfstand

Für den Prüfstand wurde ein Konzept erarbeitet. Wesentliche Komponenten des Prüfstandskonzeptes sind:

- Erzeugung einer umlaufenden Anregung
- Erregungskonzept der Schaufeln mit Lautsprechern (berührungslos!)
- Kalibrierung der Lautsprecher
- Messaufnahme mit Laser

Das Anregungssystem definiert die Erregung der umlaufenden Welle in Amplitude und Phase. Die Schwingungen aller Schaufeln werden mit einem Laservibrometer erfasst und an das Messsystem weitergeleitet. Somit können ganze Resonanzbereiche automatisch durchgemessen werden.

Die Antwort einer Blisk auf eine umlaufende Erregung ist in Abbildung 18 dargestellt. Man erkennt gut, dass die Struktur auch mit einer wellenförmigen Verteilung der Schaufelamplituden mit gleicher Knotendurchmesserzahl antwortet.

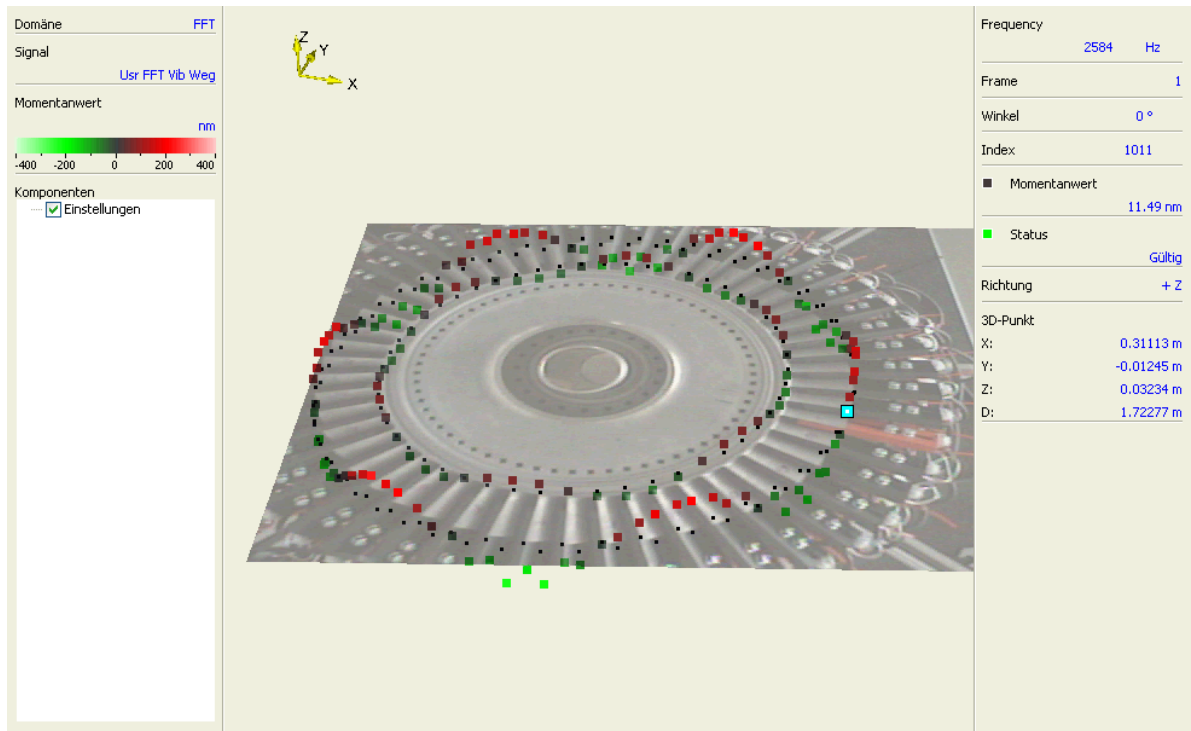


Abbildung 18: Mistuning-Prüfstand – umlaufende Anregung

Im Rahmen einer Zusammenarbeit mit der Fa. „smart material“ in Dresden sollten optimierte Anregungsquellen erarbeitet werden, da selbst die kleinsten kommerziell verfügbaren Lautsprecher nicht zwischen die Schaufeln einer HDV-Blisk passen. Verschiedene Prototypen wurden hergestellt und getestet. Abbildung 19 zeigt das Ergebnis der Entwicklung, eine extrem kompakte Schallquelle mit guter Charakteristik über einen großen Frequenzbereich.

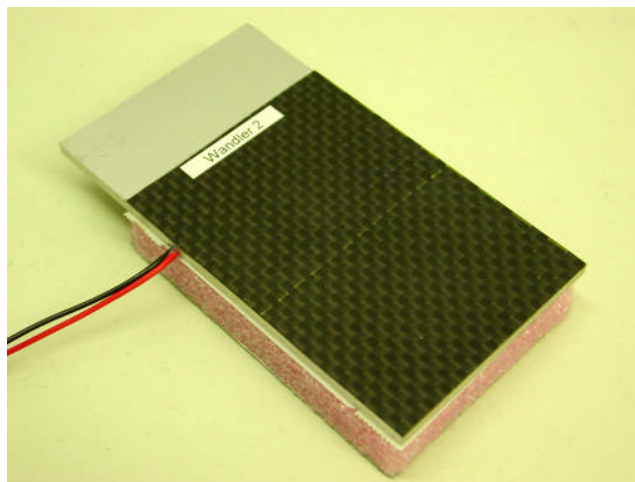


Abbildung 19: Entwicklung Schallwandler

Eine geeignete Validierung der Methoden (analytisch und experimentell) ist an der ersten Blisk des im Rahmen von LuFo III geförderten Axialspaltrigs am Institut für Strahlantriebe und Turbomaschinen der RWTH Aachen gelungen.

Die erste Blisk wurde auf dem neuen Mistuning-Prüfstand vermessen. Das in der Analytik verwendete FEM-Modell ist unter a) abgebildet. Dann erfolgten Nachrechnungen von Messungen, für die das Modell b) verwendet wurde.

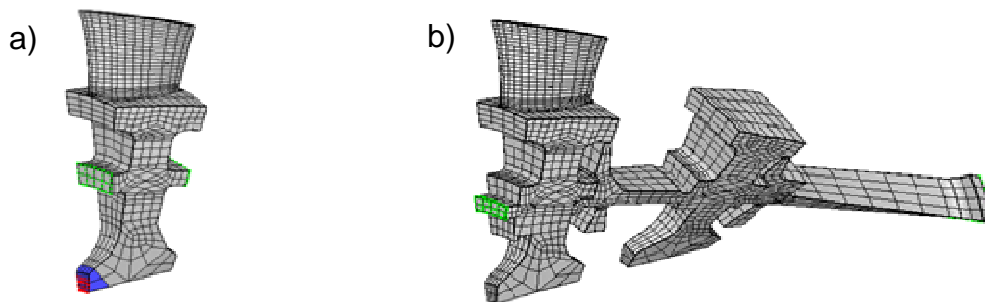


Abbildung 20: FEM-Modell der ersten vermessenen Blisk

In Abbildung 21 ist das Ergebnis der Messungen (Amplitudenüberhöhungsfaktor für jede Schaufel bezogen auf den Mittelwert aller Schaufeln) bei einer Resonanzdurchfahrt dargestellt. Man erkennt, dass zwischen Laborbedingungen (LAB) und Rig-Bedingungen (RIG) Unterschiede in der Amplitudenverteilung vorliegen, die analytisch mit dem Programm Turbo-Reduce nachvollzogen werden können. Eine ausführlichere Beschreibung ist in Referenz [4] zu finden.

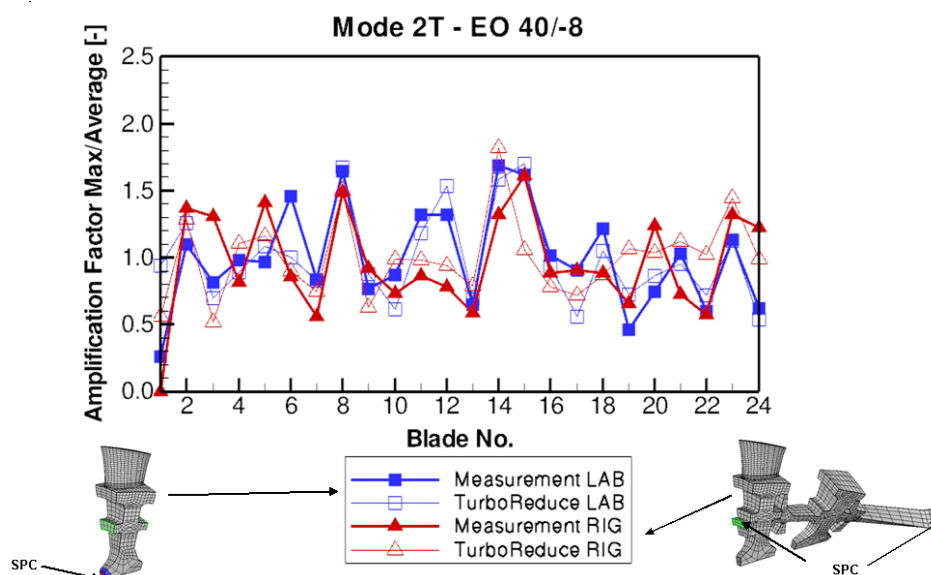


Abbildung 21: Vergleich Rechnung – Messung Axialrig Aachen R1

3.2.3 AP2.3 Hochtemperatur Erosionsschutz

3.2.3.1 Unterarbeitspaket 1: Schichteigenschaften

Bezüglich Mikrostruktur der Erosionsschutzschicht wurden Arbeiten mit dem Ziel höherer Oxidations- und Erosionsbeständigkeit durchgeführt. Dadurch wurde das Verständnis für die ablaufenden Reaktionen bei unterschiedlichen Schichtaufbauten für thermisch stabilere Schichten bei unveränderten mechanischen Eigenschaften gewonnen. Eine der wesentlichen Erkenntnisse war, dass insbesondere durch Veränderungen der chemischen Zusammensetzung und Erhöhung der Zahl der Schichtlagen die Diffusionsstabilität erhöht werden konnte. Dies führte gleichzeitig zu einer Reduktion von Wachstumsfehlern der Schicht.

Ein weiterer Optimierungsansatz war die Applikation von Nanocomposites mit extrem hoher Härte und Zähigkeit. Erprobt wurden folgende wesentliche Parameter bei der Applikation dieser Schichten auf diversen Proben: Schichtkomposition, Lagigkeit und Bias-Spannung. Die Auswertung der Versuche erfolgte mittels Metallografie, raster-elektronenmikroskopischer Untersuchung der Schichtbruchfläche, Glow Discharge Optical Emission Spectroscopy (GDOES) und normierten Erosionstests.

Bei den weiteren Anpassungen der Mikro- und Makrostruktur wurde der Einfluss verschiedener Einflussparameter ermittelt.

Um das thermische Dehnungsverhalten der Erosionsschutz-Beschichtung zu untersuchen, musste eine prüfbare Probe hergestellt werden. Dazu wurde ein Versuchsmaterial beschichtet, das im Anschluss über eine chemische Reaktion von der Beschichtung abgelöst werden konnte. Für Dilatometer-Messungen stand somit eine ca. 15 µm dicke Folie zur Verfügung. Ein Aufheizen und Abkühlen der Folie erfolgte in einem kleinen Kammerofen, wobei gleichzeitig die Formänderung der Folie durch ein Fenster mit einem optischen Dilatometer verfolgt werden konnte. Eine an das optische Messsystem angeschlossene Bildanalyse erlaubte die Bestimmung der Kantenlänge der Folie im relevanten Temperaturbereich.

Ein Vergleich der Ausdehnungskurven für Erosionsschutzschicht und Ti64 zeigte, dass die Ti64-Kurve in das Streuband der Schicht-Kurven fällt. Die Temperaturänderungen führen somit zu keinen thermisch induzierten Spannungen zwischen Beschichtung und einem Ti64-Grundwerkstoff.

Bei der thermischen Behandlung des Schichtsystems (Differential scanning Calorimetry (DSC) – Untersuchungen) waren endotherme und exotherme Vorgänge zu beobachten, die auf Veränderungen in der Schicht hindeuten würden. Diese Veränderungen hatten jedoch keinen signifikanten Einfluss auf die Ermüdungseigenschaften.

Zum Gasflusssputtern (Durchführung der Arbeiten bei DLR Köln) wurden erste grundlegende Versuche zur Ermittlung von Beschichtungsparametern für die Abscheidung von Titan als Vorstufe für die Herstellung eines Modell-Multilayers Ti/TiN begonnen. In Vorversuchen wurden die Beschichtungsraten von Ti und TiN auf ebenen Substraten bestimmt und Multilayer auf Titanflachproben abgeschieden. Des Weiteren wurden Schaufelsegmente beschichtet.

Die Beschichtungsrate für Reintitan nimmt ab, wenn das Substrat rotiert. Druck und Temperatur stiegen beim Reaktivbeschichten an, fielen aber wieder ab, wenn die Reaktivgaszufuhr geschlossen wurde.

Die Beschichtungsrate von reinem Titan konnte erfolgreich gesteigert werden. Von anfangs 8 $\mu\text{m}/\text{h}$ konnte durch Erhöhung der Quellenleistung durch Verringern des Abstandes zwischen Quelle und Substrat eine Verdoppelung der Beschichtungsrate erzielt werden.

Für das reaktive Herstellen von Titannitrid hat die Untersuchung ergeben, dass eine Stickstoffbeimengung geeignet ist. Es entstanden gleichmäßig gelbgoldene Schichten bei flachen Substraten. Zudem lieferte die Mikrohärtprüfung der Schicht bei einer relativ hohen Prüflast positive Ergebnisse.

Die durchgeführten Arbeiten zum Gasflusssputtern zeigten, dass bei der Beschichtung von komplexen Strukturen die Abscheiderate signifikant absinkt und auch sehr inhomogene Schichtverteilungen beobachtet werden. Es stellte sich heraus, dass insbesondere die Strömungsverhältnisse eine wesentliche Rolle auf die Verteilung der Schicht besitzen. Somit zeigte das Verfahren mit einer Gasflussquelle beispielsweise im Vergleich zum konventionellen ARC PVD z.B. keine verbesserten Schichtverteilungen.

3.2.3.2 Unterarbeitspaket 2: Streufähigkeit und Toolingkonzepte

An Proben wurden erste Versuche zur Ermittlung der Streufähigkeit des Beschichtungsverfahrens begonnen, um später auf komplexere Bauteile schließen zu können. Die Beschichtung von zwei Blisken und die daraus resultierende Ermittlung der Streufähigkeit des Verfahrens konnte realisiert werden. Die Auswertung der Schichtdicken zeigte, dass die ausgewählten Parameter zu einer gleichmäßigen Beschichtung führten.

Voraussetzung für die Beschichtung ist auch die Fähigkeit, Bereiche maskieren zu können, wo im Betrieb keine Beschichtung zulässig ist. Dazu wurden neuartige Toolingkonzepte entwickelt, die auch bei derart komplexen Bauteilen wie Blisken kostengünstig anzuwenden sind und gleichzeitig extremen Anforderungen an Maßhaltigkeit und möglichst gleichmäßigem Auslauf der Schichten genügen. Die entwickelte Lösung wurde zu einem Patent angemeldet.

Des Weiteren wurden Versuche zur Beschichtung von Blisken bzw. Verdichterlauf-rädern durchgeführt. Um einen adäquaten Beschichtungsabstand zu erreichen, musste die Beschichtungsanlage modifiziert werden. Die Beschichtungsrate nimmt mit dem Abstand des Substrats zur Beschichtungsquelle ab.

Bestimmend für die Streufähigkeit des PVD-Verfahrens ist weitestgehend die Geometrie des Substrates in Abhängigkeit vom Aspektverhältnis sowie Abstand und Ausrichtung des Blattprofils.

3.2.3.3 Unterarbeitspaket 3: Diffusionsbarrieren

Für den Höchsttemperatureinsatz von diesen Schichten wurden in einer Literaturstudie Elemente identifiziert, die für eine Verwendung als Barrieren einsetzbar sein könnten. Zusätzlich wurden bereits vorhandene kohlenstoffhaltige Diffusionsbarrieren beschafft, um den prinzipiellen Einfluss dieser ermitteln zu können.

Eines der betrachteten Sperrschichtsysteme wurde auf den Proben aufgedampft (Max-Planck-Institut Garching), danach erfolgte die Beschichtung mit den betrachteten Erosionsschutzbeschichtungen. Es gelang allerdings nicht eine ausreichende Anbindung zwischen Sperrschicht und Erosionsschutzschicht zu erreichen. Erosionsversuche zeigten, dass das Interface zwischen beiden Schichten eine Schwach-

stelle darstellt, die zu frühzeitigem Versagen führt. Aufgrund dieser wenig erfolgversprechenden Ergebnisse wurde beschlossen die weiteren Arbeiten allein auf die Entwicklung von modifizierten Sperrschichten zu konzentrieren.

Bei der Abscheidung von Nanocomposites wurde auf eine separate Diffusionsbarriere verzichtet, da zu erwarten ist, dass sich das primäre Schichtsystem ausreichend diffusionsstabil verhält.

Bei der Maximaltemperatur für zukünftige Anwendungen unter extremsten Bedingungen wurde ein Auslagerungsversuch abgeschlossen. Außer einer leichten Härtesteigerung waren keine Veränderungen zu registrieren.

3.3 AP3 Innovative Belüftungskonzepte

Im Rahmen des Arbeitspaketes wurde in einer Vorstudie die schädigenden Mechanismen für rotierende Bauteile untersucht. Diese treten besonders während schneller Transienten auf, die durch Beschleunigungen oder Verzögerungen des Triebwerks bedingt sind. Dabei bilden sich ungünstige Spannungsverläufe in der Scheibe aus. Zur besseren Vorhersage wurde in einem anderen Projekt an einer Grundlage für die Optimierung der thermischen Korrelation und einer Studie zur CFD-Modellierung solcher Kammern anhand eines Zwei-Kammer Prüfstandes gearbeitet. Diese Versuche wurden vornehmlich in stationären Zuständen gemessen und dienten als Grundlage für die Optimierung der analytischen Vorgehensweise.

Bei einem Hochdruckverdichter-Rig wurden drei Scheiben der hinteren Stufen mit Thermoelementen besonders aufwändig instrumentiert, um Temperatur-Messdaten mit einer guten Auflösung in radialer Richtung zu gewinnen. Die Stufen davor und danach wurden mit einer minimalen Instrumentierung ausgestattet, um für das Thermalmodell den gesamten Rotor messtechnisch abdecken zu können. Es wurden transiente Versuche für Beschleunigung von Leerlauf auf Vollast und umgekehrt für eine Verzögerung durchgeführt. Für die Thermalanalyse wurden dabei zunächst die stationären Punkte für einen Vergleich verwendet und in einem zweiten Schritt auf die transienten Messungen erweitert. Für die 3D-CFD-Rechnungen wurden nur die

stationären Ergebnisse verwendet, da sich die Nachrechnung einer entsprechenden Transiente trotz Optimierung des Rechenmodells und der Rechenzeit als zu aufwendig erwies. Das Ergebnis der CFD-Rechnung dient zur Überprüfung des physikalischen Strömungsverlaufs, der durch die optimierte Korrelation erwartet wird.

Stationäre Untersuchung:

Um die Verbesserung der optimierten Korrelation darstellen zu können, wurde auf Basis der Standard-Korrelation eine Vorhersage der Temperaturen durchgeführt. Im Vergleich zu den gemessenen Temperaturen ergaben sich Abweichungen im untersuchten Bereich, Eine mit den Messungen übereinstimmende Korrelation berücksichtigt die Einströmungssituation in die Kammern genauer. Die bisher verwendete Korrelation für den Wärmeübergang scheint auf einem etwas konservativen Ansatz zu beruhen. Die Temperaturunterschiede liegen jetzt im stationären Zustand bei <15K.

Parallel dazu wurden die Strömungsphänomene in den Kammern mittels einer konjugierten 3D CFD-Rechnung näher untersucht.



Abbildung 22: Strömungslinien und Temperaturverteilung.

Die Strömungslinien und die Temperaturverteilung sind in Abbildung 22 zu sehen. Die Kühlluft bildet in beiden Kammern im Nabenbereich einen Wirbel, der durch die Aufweitung des axial durchströmenden Fluids an der stromabwärts liegenden Schei-

be induziert wird. Im Außenbereich ist der Einfluss dieser Wirbel nur noch gering. Ein Vergleich der mit CFD ermittelten Oberflächentemperaturen mit den gemessenen Temperaturen zeigten eine gute Übereinstimmung im äußeren Bereich, während im Nabenbereich die Temperaturen etwas zu niedrig berechnet werden. Hier scheint die CFD – Rechnung eine zu starke Verwirbelung und somit einen zu hohen Wärmeübergang zu berechnen. Dies deckt sich mit den Erkenntnissen, die aus Versuchen mit einem akademischen Rig ermittelt wurden.

Transiente Untersuchung

Für die transiente Untersuchung wurde nur noch das Thermalmodell verwendet. Es mussten dabei die äußeren Randbedingungen transient aufbereitet werden und in das Modell übernommen werden. Es wurde ein typischer Zyklus, ausgehend von einem stationären Zustand, startend mit einer Beschleunigung, danach einer ausreichenden Haltezeit und einer anschließenden Verzögerung mit ausreichender Haltezeit, ausgewählt. Der Temperaturverlauf an einem beispielhaften Punkt auf der Scheibe ist in Abbildung 23a für die Standardmodellierung dargestellt. Wie schon im stationären Fall dargestellt, zeigt diese Modellierung Schwächen in der Vorhersage der Temperaturen. Da die Temperaturen höher vorhergesagt sind, stellt dies einen konservativen Fall dar. In Abbildung 23b ist die modifizierte Modellierung dargestellt. Genau wie bei der stationären Rechnung stimmen die Temperaturvorhersagen sehr gut mit den Messungen überein.

Aufbauend auf dem Ergebnis der stationären und transienten Thermalanalyse zusammen mit der CFD-Modellierung konnte gezeigt werden, dass die Strömung und damit die für das Thermalmodell wichtigen Größen von Massenstrom und Wärmeübergang in rotierenden Kammern dieses Typs gut dargestellt werden kann. Zukünftig wird diese modifizierte Variante bei der thermischen Auslegung von Verdichterscheiben verwendet werden.

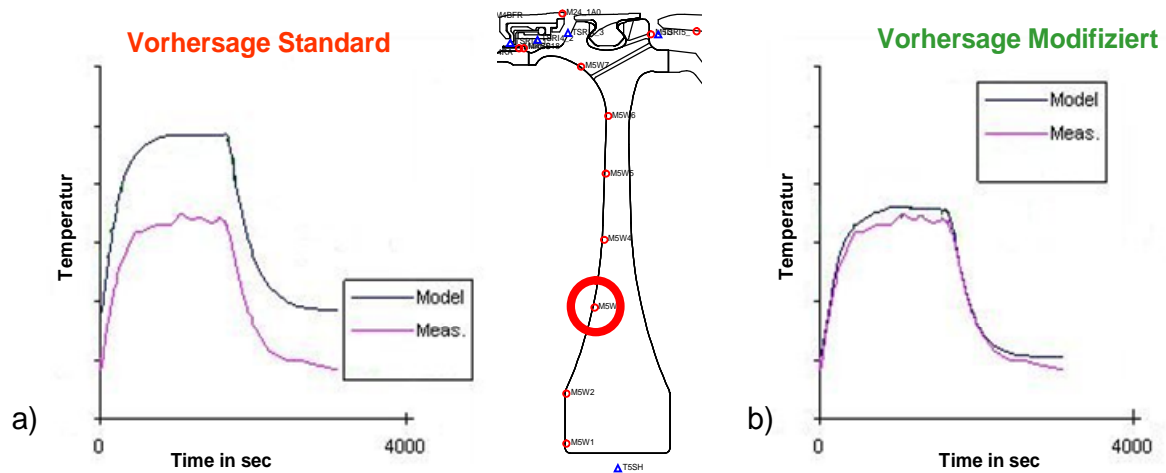


Abbildung 23: Vergleich transients Basiszyklus (Beschleunigung, Verzögerung) Messung und Thermalanalyse a) Standard Model, b) Modifiziertes Modell.

3.4 AP4 Strömungsphänomene beim Pumpen und Flattern

3.4.1 AP4.1 Rückströmphase beim Pumpen

Das Verdichterpumpen stellt einen instabilen Betriebszustand eines Verdichters dar und geht oft mit hohen mechanischen Belastungen für die Beschauflung einher. Es gliedert sich in die Phasen Strömungsabriss, Rückströmung, Wiederanlegen und Druckaufbau. Während der Rückströmphase werden die Laufschaufeln nahezu senkrecht auf die Hinterkante angeströmt. In realen Verdichtern ist zu beobachten, dass es dabei zu sehr hohen Schwingungen kommen kann. Die Ursache dafür war bisher nicht eindeutig geklärt. Um dieses Phänomen zu untersuchen, wurden im Rahmen des Arbeitspakets 4.1 drei Unterarbeitspakete (UAP) zusammengestellt. Im ersten Unterarbeitspaket wurde in einem Ringgitterkanal ein Schaufelprofil von hinten senkrecht auf die Hinterkante angeströmt, um den stationären Strömungszustand zu vermessen. Hierzu wurde der Ringgitterkanal der EPFL (LTT, Lausanne, CH) verwendet, der sich dadurch auszeichnet, dass die einzelnen Gitter von außen gezielt bewegt werden können. Damit können instationäre Drücke vermessen werden.

Im zweiten Unterarbeitspaket wurde zusammen mit dem Institut für Strahlantriebe und Turbomaschinen der RWTH Aachen eine Sonde entwickelt, die es erlaubt, den

Strömungszustand während eines Pumpzyklus instationär zu vermessen. Im dritten Unterarbeitspaket wurden die Arbeiten analytisch begleitet.

3.4.1.1 Unterarbeitspaket 1: Ringgitterkanal

Der Ringgitterkanals war auf den Schaufelprofilen und an der Gehäusewand instrumentiert. Die stationären und instationären Druckmessbohrungen befinden sich auf jeweils 50% Kanalhöhe. Die Strömungszustände vor und hinter dem Gitter wurden mit 5-Loch-Sonden vermessen.

In Abbildung 24 sind die gemessenen stationären Profildrücke mit den berechneten verglichen. Die Übereinstimmung ist sehr gut, somit kann der CFD-Code diese Strömungsbedingungen gut wiedergeben. Abbildung 25 zeigt dagegen den Vergleich der instationären Druckmessungen mit den Rechnungen. Im Bereich der Hinterkante auf der Saugseite kommt es zu größeren Abweichungen, die auf das große Rückströmgebiet zurückzuführen sind. Weitere Details zu dem Prüfstand und den Messungen sind in den Referenzen [5] und [6] zu finden.

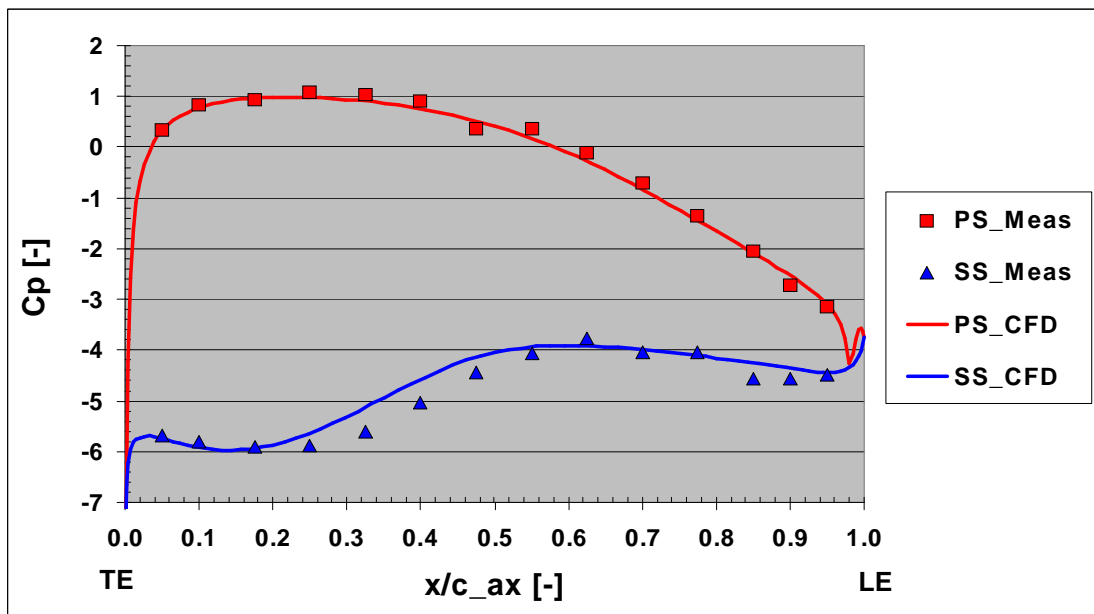


Abbildung 24: Statische Druckverteilung bei 50% Kanalhöhe

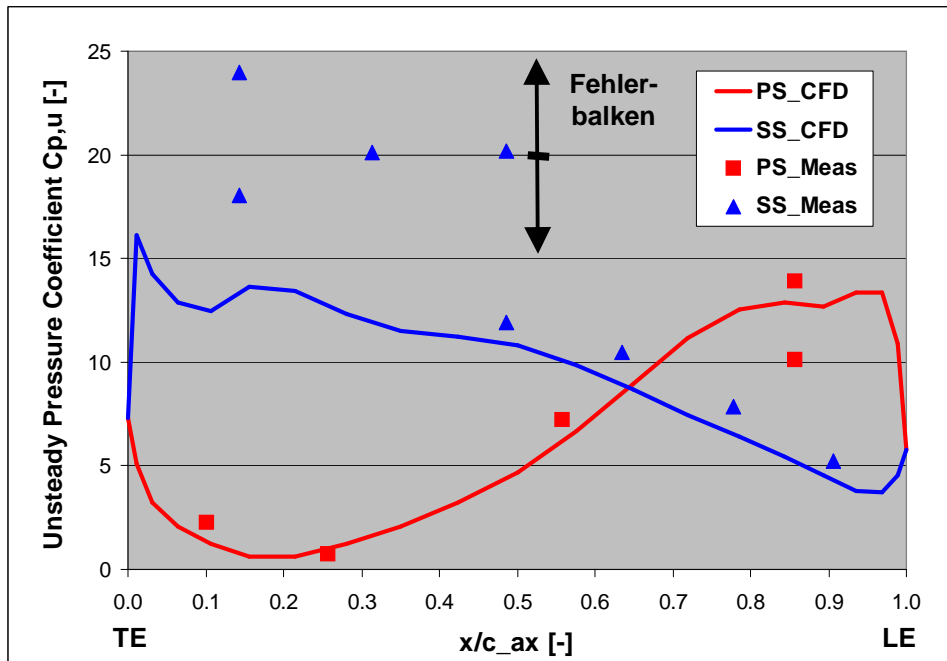


Abbildung 25: Instationäre Druckverteilung

3.4.1.2 Unterarbeitspaket 2: Sondenentwicklung

In einem ersten Schritt wurden instationäre 6-Lochsonden entwickelt, die auf der Basis von Long-Lines messen (d.h. die Messaufnehmer sind durch Schläuche mit der Messposition verbunden). Die Herausforderung bei diesen Messungen waren die extrem kurzen Zeiten, die aufzulösen sind, da der Strömungszusammenbruch in wenigen Millisekunden erfolgt. Die Messungen von Pumpstößen mit diesen Sonden haben ein Verbesserungspotential aufgezeigt. In einem zweiten Schritt wurden daher Sonden entwickelt, die 9 Löcher haben und wo der Messaufnehmer direkt in der Strömung sitzt. Abbildung 26 zeigt eine Skizze (linke Seite) und die reale Ausführung (rechte Seite) einer solchen Sonde. An der Spitze wurde zudem ein schneller Temperatursensor angebracht. Zwei Sonden wurden hergestellt und jeweils vor und hinter dem ersten Rotor eines 8-stufigen Versuchsverdichters eingebaut.

Weitere Details zu den Messungen sind in Referenz [7] zu finden, dort ist auch ein Vergleich mit instationären Rechnungen eines 1D-Verfahrens gezeigt.

Auslegung



Fertigung

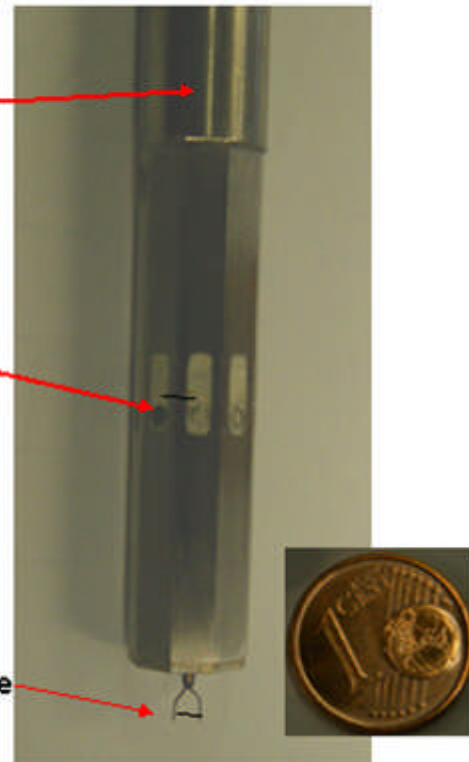


Abbildung 26: 9-Lochsonde

3.4.1.3 Unterarbeitspaket 3: Analytik

Die experimentellen Arbeiten von UAP 1 und 2 wurden mit analytischen Untersuchungen begleitet. Weiter oben wurde schon gezeigt, dass das CFD-Verfahren in der Lage ist, den quasistationären, komplexen Strömungszustand gut wiederzugeben. Das linearisierte Verfahren, mit dem die instationären Drücke berechnet werden, liefert ebenfalls zufriedenstellende Ergebnisse. Mit diesen beiden Rechenschritten (stationäre Strömung und darauf aufgesetzt ein linearisiertes Verfahren), die der Standard-Vorgehensweise bei Aeroelastik-Rechnungen entsprechen, wurden bei dem Versuchsverdichter Berechnungen bei quasistationärer Rückströmung durchgeführt. Details hierzu sind in Referenz [8] zu finden. Damit konnte das gesuchte Phänomen, das zu hohen Belastungen in der Rückströmphase des Pumpens führt, eindeutig bestimmt werden.

3.4.2 AP4.2 Flutterfreie Auslegung

Im folgenden wird der entwickelte Regler, der Konzeptnachweis zur Anregung und Regelung von Schaufeln im rotierenden System sowie die numerischen Analyse für den experimentell untersuchten transsonischen Verdichterrotor beschrieben.

Regler:

Im Experiment sollen fünf benachbarte Rotor-Schaukeln mittels Piezo-Folien gezielt zu Schwingungen angeregt werden. Die Schaufeln müssen dabei mit derselben Amplitude und einem festen Phasendifferenzwinkel zueinander schwingen. Die Anforderungen an den Regler bestehen daher aus einer unabhängigen Amplituden- und Phasenregelung. Diese muss robust und schnell erfolgen, um mit der reduzierten Signalqualität aufgrund der Übertragung vom rotierenden ins ruhende System und Störungen in der Strömung, z.B. durch instationäre Ablösungen oder geringe Betriebspunktschwankungen zurecht zu kommen. In Abbildung 27 ist das Schema zur geregelten Anregung einer Rotorschaukel dargestellt. Sowohl die DMS-Signale, als auch die Spannungsversorgung der Piezofolien (MFC) müssen dabei vom ruhenden ins rotierende System transferiert werden.

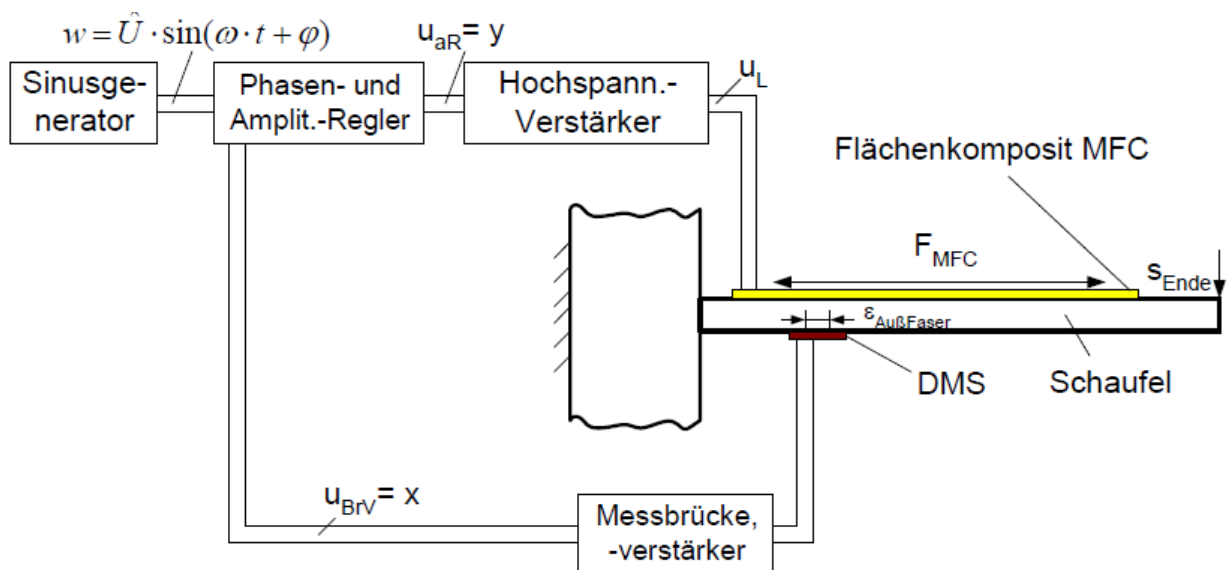


Abbildung 27: Schema der Schaltung zur geregelten Anregung einer Schaufel

Der Regler wurde als fünfkanaliger Amplituden- und Phasenregler umgesetzt. Aufgrund der hohen Anforderungen bezüglich der zeitlichen Deterministik ist für die Implementierung der Regleralgorithmen eine echtzeitfähige Plattform mit hoher Rechenleistung erforderlich. Dafür wurde auf einer Standard-PC-Plattform ein Echtzeit-Betriebssystem installiert. Die in diesen PC installierte Karte stellt die Schnittstelle zu den Prozessen her. Es werden fünf analoge Eingänge und fünf analoge Ausgänge zur Verfügung zur Ansteuerung der Hochspannungsverstärker. Auf einem weiteren analogen Ausgang wird das Sinus-Referenz-Signal ausgegeben. Die Konfiguration und Programmierung dieses Echtzeit-PCs erfolgte mittels eines Standard-Windows-PCs.

Der Regler wird über eine komfortable Eingabemaske gesteuert. Die Bedienoberfläche enthält alle Eingangsdaten für die eigentliche Reglerberechnung. Das sind die Führungsgrößen (Sollwerte) für die zu regelnden Amplituden und Phasen, die gewünschte Frequenz sowie die Parameter für die Amplituden- und Phasenregler. Alle Eingangsdaten werden programmtechnisch mit sinnvollen Werten vorinitialisiert. Zusätzlich können die Werte auch tabellarisch hinterlegt werden, was ein schnelles und fehlerfreies Einstellen von vordefinierten Schwingungen ermöglicht.

Durch den Konzeptnachweis konnte demonstriert werden, dass es möglich ist, im rotierenden System eine Rotorschaukel mittels Piezo-Folien zu Schaufelschwingungen anzuregen und diese darüber hinaus verlässlich zu regeln. Besonderes Augenmerk wurde dabei auf die Qualität der Signale, dem Einstreuen von elektrischen Störungen und der Leistung zur Schaufelanregung gelegt.

Der Konzeptnachweis erfolgte am zweistufigen Niedergeschwindigkeits-Axialverdichter des Instituts für Turbomaschinen und Fluid-Dynamik (TFD) der Universität Hannover.

Aufgrund des aus Vorversuchen bekannten Ergebnisses, dass der Leistungsverstärker eine Anregung mehrerer Piezo-Aktuatoren ohne Spannungseinbruch erlaubt, wurden drei nebeneinander liegende Verdichterschaukeln der ersten Rotorstufe saugseitig mit Piezo-Aktuatoren ausgestattet. Druckseitig wurden je ein Vollbrücken- sowie ein Viertelbrücken-DMS an den in Abbildung 28 markierten Positionen appli-

ziert. Für die Vollbrücken-DMS wurden die optimalen Position zur Bestimmung der ersten Biegeeigenfrequenz (1F) ausgewählt. In der Abbildung 29 sind die saugseitigen Piezo-Aktuatoren sowie die druckseitig applizierten Dehnungsmessstreifen (DMS) im eingebauten Zustand abgebildet.

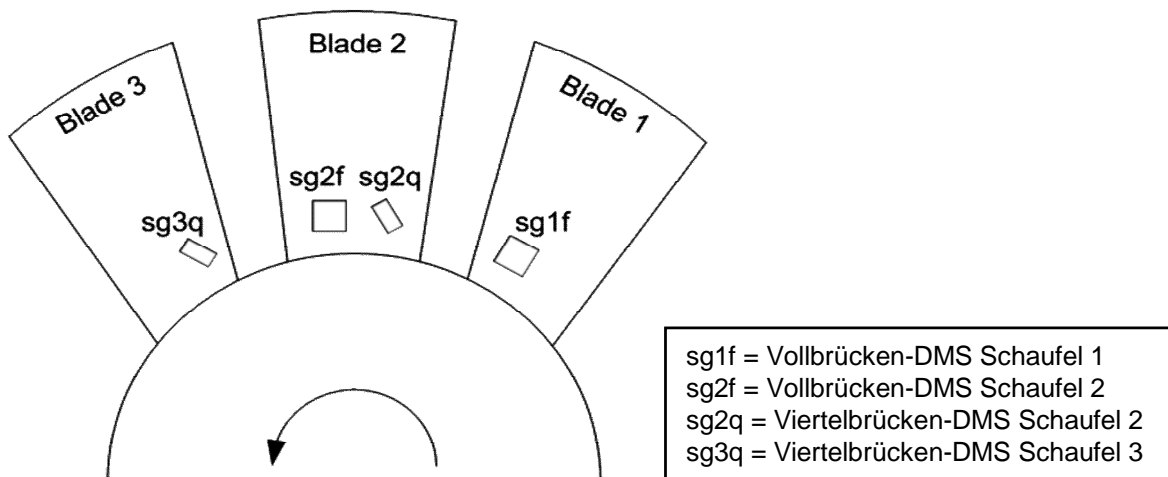


Abbildung 28: Positionen der applizierten Dehnungsmessstreifen

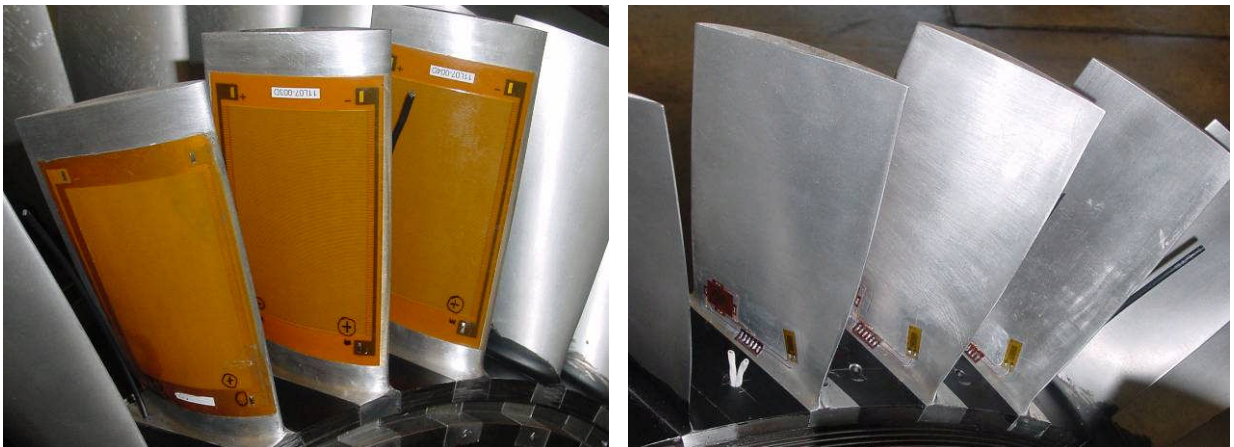


Abbildung 29: Saugseitige Piezo-Aktuatoren und druckseitige Dehnungsmessstreifen

Drei Rotorschaukeln wurden mit Aktuatoren versehen dabei konnte eine gleich- bzw. gegenphasige Anregung der Schaufeln realisiert werden. So konnten mit dieser Vorgehensweise zumindest zwei unterschiedliche instationäre Strömungszustände zum Test der Amplitudenregelung erzielt werden (Schaufeln schwingen gleich bzw. gegenphasig). Anhand eines Sweep-Generators und -Analyzers wurden die applizierten Piezo-Aktuatoren und DMS vor dem Einbau in den Versuchsstand einem

Funktionstest unterzogen. Alle zeigten ein fehlerfreies und reproduzierbares Verhalten. Weiterhin wurde festgestellt, dass die Amplituden der Signale der Vollbrücken-DMS um das ca. 3- bis 4-fache höher waren, als die Amplituden der Viertelbrücken-DMS. Dies liegt sowohl an der Tatsache, dass Vollbrücken empfindlicher messen, als auch an der günstigeren Messposition. Mit der oben beschriebenen Konfiguration wurden mehrere Versuchsreihen durchgeführt, in deren Rahmen die Anzahl der angeregten Schaufeln und Ihre Polung zueinander (gleich- oder gegenphasig) sowie die Drehzahl des Verdichters variierte. Exemplarisch zeigt Abbildung 30 den gemessenen Amplituden- und Phasenverlauf bei gleichphasiger Anregung und 3000 Umdrehungen.

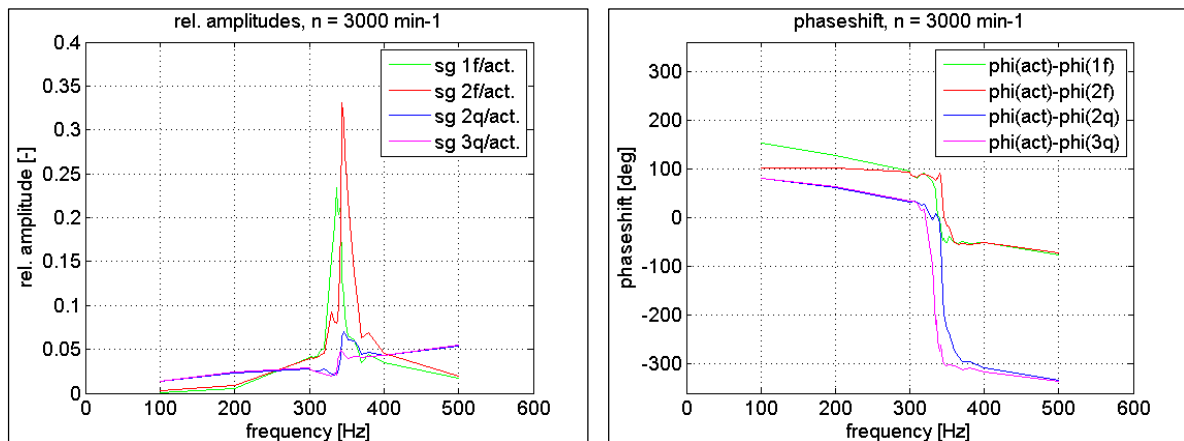


Abbildung 30: Gemessener Amplituden- und Phasenverlauf

Bei allen Phasenverläufen weisen die Viertelbrücken-DMS bei Durchlaufen der Eigenfrequenz einen Phasensprung von 360° bzw. 0° auf. Dieser ungewöhnliche Phasensprung, zu erwarten sind 180° , ist auf eine Störung des Signals zurückzuführen, welche durch eine Einstreuung des Hochspannungs-Anregungssignals hervorgerufen wird. Das Signal dieser Aktuatorspannung überlagert dabei die verhältnismäßig kleinen Ausgangsspannungen der Viertelbrücken, so dass die Phasenwinkel der DMS mit denen der Anregung übereinstimmen. Ein Vervollständigen der DMS-Viertelbrückenschaltung direkt am Rotor, statt wie bei den oben beschriebenen Messreihen nach Herausführen des Signals erst außerhalb des Rigs, behob die Störung durch die Aktuatorspannung.

Weitere Messungen mit einer geregelten Anregung wurden in Zusammenarbeit mit der Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst (HAWK) Göttingen durch-

geführt. Dabei wurden alle Anregungskonfigurationen (nur eine Schaufel, gleichphasig, gegenphasig) untersucht. Zur Regelung wurden Signale sowohl von Vollbrücken- als auch von Viertelbrücken-DMS verwendet. Die durchgeführten Messungen lieferten durchwegs positive Ergebnisse, eine Regelung der Anregung war bei allen Konfigurationen möglich. Abbildung 31 zeigt exemplarisch einen gemessenen geregelten Signalverlauf.

Abschließend lässt sich zusammenfassen, dass der Konzeptnachweis zur Anregung und Regelung von Verdichterschaufeln im rotierenden System erbracht wurde. Die Mess- und Aktuatortechnik kann somit in ähnlicher Bauweise für den transsonischen Verdichterrotor im M2VP-Rig des DLR verwendet werden. Dabei wird aufgrund der in diesem Arbeitspaket gesammelten Erfahrungen zur Verwendung von Vollbrücken-DMS bzw. zu einer, wenn möglich, größeren räumlichen oder elektrischen Trennung von Hochspannungs-Anregungssignal und Messsignal geraten.

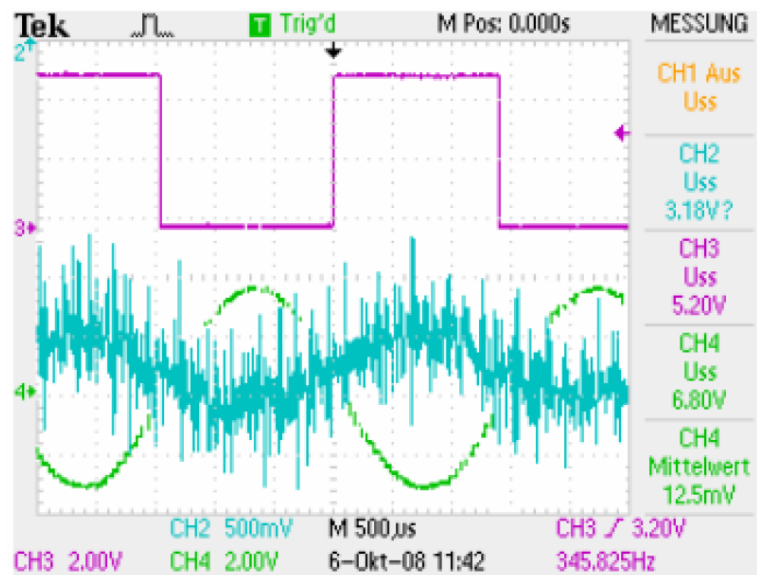


Abbildung 31: Zeitsignal der geregelten Anregung (grün: Führungsgröße / blau: Ausgangsspannung angeregte Schaufel 2 (Viertelbrücke))

Numerische Analyse:

Zunächst werden die Ergebnisse der Pre-Test-Analyse für den transsonischen Verdichterrotor in Blisk-Bauweise vorgestellt (Abbildung 32). Auf diesem wurden 5 benachbarte Schaufeln zu Schwingungen angeregt, um die aerodynamische Dämpfung für alle Phasendifferenzwinkel und verschiedene Strömungszustände zu messen.

Für das Experiment ist das DLR verantwortlich. Die detaillierte Beschreibung des Experiments erfolgt in dessen Abschlußbericht.



Abbildung 32: Transsonischer Verdichter-Rotor in Blisk-Bauweise

Bei der Pre-Test-Analyse wurde das Flatterverhalten des Rotors zwischen 50% und 100% Drehzahl auf fünf Drehzahllinien vom stark entdrosselten Bereich bis zur numerischen Pumpgrenze untersucht. Mit den gemessenen Kennfeldpunkten (bekannt aus einer früheren Messung) zeigte sich eine sehr gute generelle Übereinstimmung.

Experimentell wurde ein Sicherheitsabstand zur Pumpgrenze eingehalten, so dass für weiter angedrosselte Punkte kein Vergleich möglich ist. Die Strömungszustände reichen dabei von anliegenden und abgelösten subsonischen Strömungen bei $N=50\%$ bis hin zu transsonischen Strömungen, bei denen die Schaufel im äußeren Bereich gesperrt sein kann. Im Experiment lässt sich nur die erste Schwingungs-mode anregen.

Die Flutter-Rechnungen wurden zum einen mit dem zeitlinearisierten MTU-Verfahren Lin3d und zum anderen mit dem vom DLR neu entwickelten zeitlinearisierten LinearTRACE durchgeführt. Für ausgesuchte Punkte wurden auch nichtlineare Navier-

Stokes-Rechnungen durchgeführt. Generell führen beide Verfahren zu denselben Flatteraussagen. Dabei wurde beobachtet, dass die Flatterkurven in vielen Fällen sehr gut übereinstimmen, für andere Betriebspunkte jedoch leichte Abweichungen zu verzeichnen sind.

Interessant ist auch der Vergleich der lokalen Arbeit auf der Schaufel, welche über die gesamte Schaufel aufintegriert die aerodynamische Dämpfung ergibt. Obwohl die Flatterkurven im Auslegungspunkt identisch sind, zeigen sich in der lokalen Anregung, die für den Phasendifferenzwinkel 0° in Abbildung 33 dargestellt ist, erhebliche Unterschiede. Ein Ziel des Experiments ist es daher, diese Diskrepanz aufzuklären.

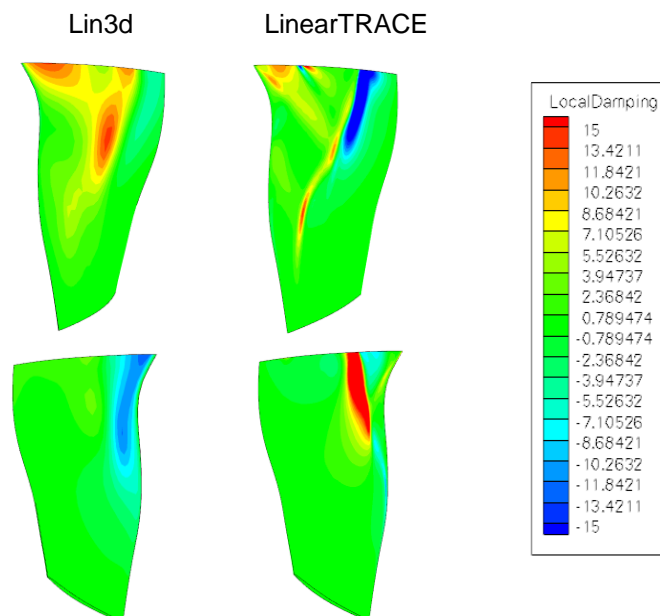


Abbildung 33: Lokale aerodynamische Dämpfung für den Auslegungspunkt

3.4.3 AP4.3 Tandemstator

Vorstudien

Um den verlustarmen Einsatz des Tandems bei hohen Zuströmmachzahlen im ADP (Aerodynamic Design Point) zu ermöglichen, wurde für die erste Schaufel ein transsonisches Design entwickelt.

Besondere Kriterien bei der Auslegung der beiden Schaufeln waren:

- i) Die Interaktion der Schaufeln und die damit verbundene Auswirkung auf die Machzahlverteilungen und den Nachlauf der ersten Schaufel.
- ii) Die Gestaltung des Strömungsquerschnitts zwischen den Schaufeln sowie
- iii) die saugseitige Strömungsverzögerung.

Aufgrund der festgelegten Baulänge ergibt sich aus der gewünschten Überdeckung die Sehnenlänge der zweiten Schaufel. Hier war ein Kompromiss zwischen der verbesserten Strömungsführung bei längerer Sehne und dem Reibungsverlust zu finden. Dabei bewahrt die zweite Schaufel der Tandemkonfiguration praktisch die gleiche Inzidenz und kann damit über einen weiten Betriebsbereich den Abströmwinkel halten.

Messungen der Gittercharakteristik

Zur Ermittlung der Gittercharakteristik wurden die Nachläufe im Mittelschnitt vermessen und die entsprechenden örtlichen Beiwerte errechnet.

Die Tandemkonfiguration weist eine höhere Umlenkung auf, die sich bei steigendem Anstellwinkel praktisch linear verhält. Das Einzelgitter zeigt dagegen beim Androsseln (höherer Anstellwinkel) eine Abnahme der Umlenkung. Der Arbeitsbereich des Tandemstators ist größer, wobei die Verluste (im Mittelschnitt) etwas höher liegen. Insgesamt zeigen die Gitterpolaren der Tandemkonfiguration für künftige Auslegungen das Potential, z.B. einen besseren Wirkungsgrad durch Schaufelzahlreduktion aufgrund des erweiterten Betriebsbereichs zu ermöglichen, oder eine geänderte Drallverteilung in einem mehrstufigen Verdichter mit einem hoch umlenkenden Tandemstator zu realisieren.

Die Druckverteilungen bestätigen die in der Auslegung erwartete geringere Sensitivität der zweiten Schaufel auf Änderungen des Anströmwinkels und die entsprechend stabile Umlenkung, während die Druckverteilung der Einzelschaukel bei dem höheren Anstellwinkel bereits erhöhte Verluste und Minderumlenkung andeutet. Unterstützt werden die Ergebnisse durch Anstrichbilder für die Saugseiten des Tandem- und des Referenzgitters für den Auslegungszustand und für den höchsten Anstellwinkel, die

zusätzlich eine weitere Information über das Verhalten der Seitenwandgrenzschicht liefert. Der erweiterte Arbeitsbereich zeigt sich dann sehr deutlich bei dem hohen Anstellwinkel, bei der die Sekundärströmungseffekte durch die Seitenwand bei der Einzelschaufel praktisch die gesamte Kanalhöhe einnehmen und der Tandemstator hingegen diesbezüglich nur wenig Änderung zeigt. Zusätzlich erkennt man auch die schwache Sensitivität der zweiten Schaufel auf die Anströmwinkeländerung für die Tandemstator-Konfiguration.

3.4.4 AP4.4 CT-Ausgelegte Frontstufe

Ziel dieses Arbeitspaketes war es, das von MTU entwickelte neuartige Casing Treatment der 3. Generation erstmals vollständig in den Auslegungsprozess einer hochbelasteten Verdichterstufe zu integrieren und diese neue Vorgehensweise zusammen mit einem bereits geplanten HDV-Rig zu validieren.

Zunächst wurde eine hochbelasteten Frontstufe unter gezielter Einbeziehung eines Casing Treatments der 3. Generation ausgelegt. Die bisherige 1. und 2. Stufe wurden zur Gewährleistung eines kontinuierlichen Verlaufs des Stufendruckverhältnisses entsprechend angepasst. Ferner wurden der Rotorverband und die vordere Lagerung angepasst. Der Rig-Einlauf (prüfstandsseitig) wurde an den geänderten Massendurchsatz angepasst. Die Rig Hardware wurde beschafft bzw. die erforderlichen Modifikationen wurden durchgeführt. Anschliessend erfolgte die Erprobung des 8-stufigen ATFI3-Hochdruckverdichters mit und ohne CT (im Rahmen des Lufo III – Projektes HDV_XL) und die Tester-gebnisse wurden ausgewertet.

Erreichte Ergebnisse:

Nach Abschluss des Designs einer hochbelasteten Frontstufe und der Beschaffung bzw. Fertigung der zugehörigen Hardware erfolgte zunächst die Instrumentierung der Casing-Treatment-Einsätze. Diese Instrumentierung sollte einerseits zu einem vertieften Verständnis der Wirkungsweise des Casing Treatments beitragen und andererseits der Schwingungsüberwachung des hochbelasteten Frontstufenrotors dienen.

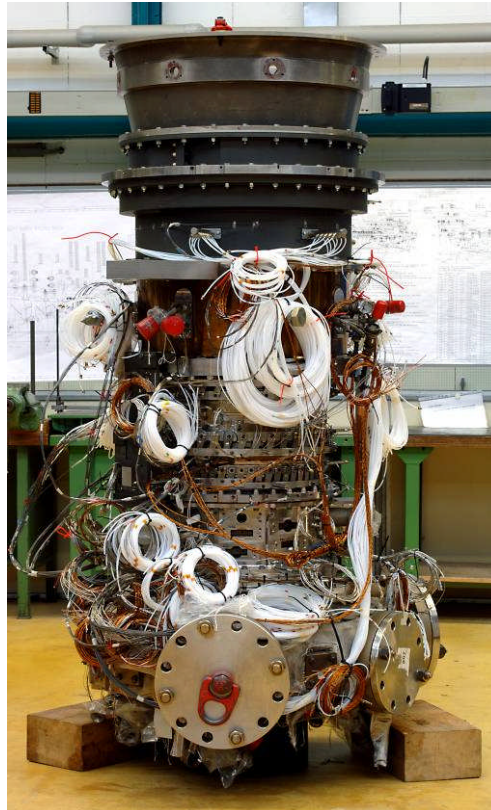


Abbildung 34: Fertig montiertes und instrumentiertes HDV-Rig

Aufgrund der deutlich erhöhten Komplexität des HDV-Rigs kam es zu unerwarteten Verzögerungen bei der Bereitstellung der Verdichtergehäuse. Dies hatte zur Folge, dass der Abschluss der Rigmontage und –instrumentierung nicht wie geplant zum 30.08.2007 sondern erst zum 20.12.2007 erfolgte. Abbildung 34 zeigt das fertig montierte und instrumentierte HDV-Rig und vermittelt einen guten Eindruck von der Komplexität des Versuchsträgers.

Nachdem das HDV-Rig mit der hoch belasteten, CT-ausgelegten Frontstufe fertig montiert und instrumentiert war, musste die weitere Versuchsvorbereitung zunächst unterbrochen werden, weil der für die Erprobung vorgesehene Verdichterprüfstand noch durch ein anderes Rig belegt war.

Mitte März 2008 konnte dann der Aufbau am Verdichterprüfstand Süd der MTU begonnen werden. Abbildung 35 vermittelt einen Eindruck von der Fülle der Instrumentierungs- und Versorgungsleitungen, die dabei anzuschließen und zu überprüfen waren.

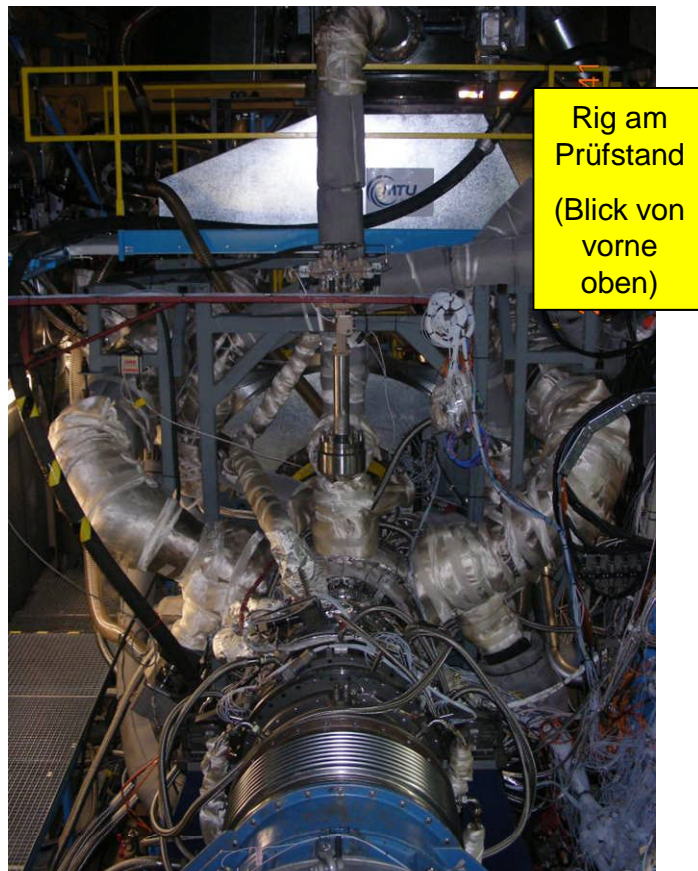


Abbildung 35: Am Prüfstand installiertes HDV-Rig mit angeschlossenen Instrumentierungs- und Versorgungsleitungen

Die erfolgreiche Inbetriebnahme fand am 28.04.2008 statt, und bereits am zweiten Versuchstag wurde der Auslegungspunkt bei 100% Drehzahl erreicht. Nach einer ersten Messkampagne mit CT schloss sich eine zweite ohne CT an, um durch den direkten Vergleich beider Konfigurationen die Wirksamkeit des neuen Auslegungskonzepts besser bewerten zu können.

Während der insgesamt rund 230 Verdichterlaufstunden des Rigs wurden folgende Untersuchungen durchgeführt:

- Kennfeldmessungen zur Ermittlung des Einflusses unterschiedlicher Leitradstellungen, Reynoldszahlen, Bleedmengen und Radialspalte über den Rotoren,
- Sondentraversierungen (Druck, Temperatur und Winkel) in den Stufen 0, 4 und 6,
- Lasermessungen in der hoch belasteten, CT-ausgelegten Frontstufe (= Stufe 0).

Wie erwartet zeigte sich die Wirksamkeit des neuen Auslegungskonzepts vor allem im Teillastbereich. Die Wirkungsweise wird besonders deutlich, wenn man die Stufencharakteristiken bei einer Teillast-Drehzahl betrachtet. Dabei führt das CT in der Frontstufe zu einer deutlich steileren Kennlinie und somit zu einer merklichen Stabilisierung. Damit einher geht eine veränderte radiale Verteilung der Strömungsgrößen, die bei der nachfolgenden Stufe 1 zu einer erhöhten Belastung im Nabenbereich führt.

Wesentlich detailliertere Einblicke in die Wirkungsweise der hoch belasteten, CT-ausgelegten Frontstufe lieferten die mit 100 Verdichterlaufstunden sehr umfangreichen Lasermessungen, die in Zusammenarbeit mit den Kollegen des DLR Köln durchgeführt wurden. Abbildung 36 zeigt den zugehörigen Versuchsaufbau.

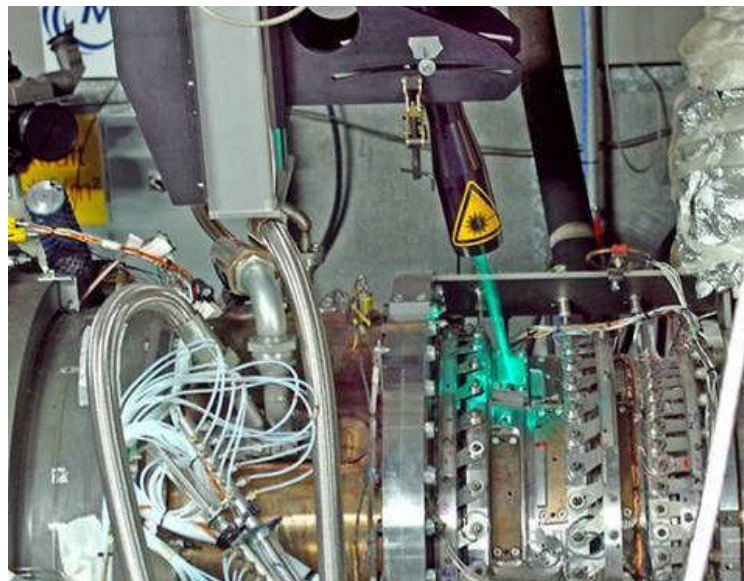


Abbildung 36: Lasermessaufbau an der hoch belasteten, CT-ausgelegten Frontstufe

In Abbildung 37 ist exemplarisch in der Ebene hinter dem Rotor der hoch belasteten, CT-ausgelegten Frontstufe jeweils für einen Betriebspunkt in der Nähe der Stabilitätsgrenze die Meridiankomponente des Geschwindigkeitsvektors senkrecht zum Laserstrahl im Relativsystem des Rotors aufgetragen. Man erkennt im Fall mit CT zum einen im Gehäusebereich eine deutliche Hemmung des Spaltwirbels und zum anderen im Nabenbereich ein wesentlich niedrigeres Geschwindigkeitsniveau, aus dem die bereits erwähnte höhere Belastung für die nachfolgende Stufe resultiert.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der hier gewählte Weg, nämlich das Hinzufügen einer hoch belasteten, CT-ausgelegten Frontstufe, trotz einer signifikanten Stabilisierung dieser Stufe für den Verdichter als Ganzes nur zu einer begrenzten Stabilitätsverbesserung führte. Ursächlich hierfür waren eindeutig die aus der Wirkung des CT resultierenden Stabilitätseinbußen in den nachfolgenden Verdichterstufen, die verhinderten, dass das theoretische Stabilitätspotenzial in vollem Umfang genutzt werden konnte.

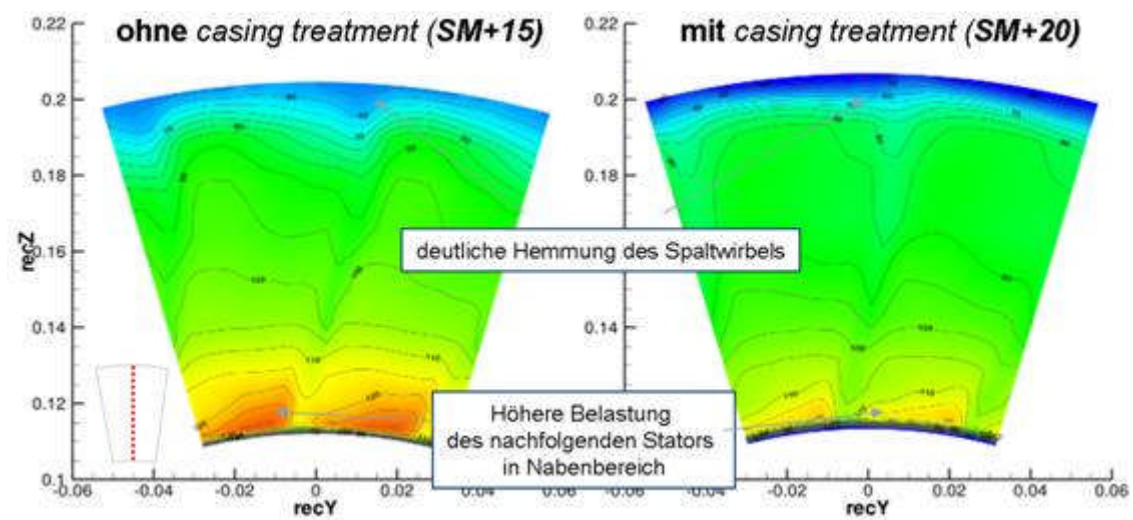


Abbildung 37: Vergleich zweier Lasermessungen hinter dem Rotor der hoch belasteten, CT-ausgelegten Frontstufe. Dargestellt ist die Meridiankomponente des Geschwindigkeitsvektors senkrecht zum Laserstrahl im Relativsystem des Rotors.

Erfolgsversprechender erscheint hier der Ansatz zu sein, von Anfang an die Wirkung des CT in die Auslegung des gesamten Verdichters mit einzubeziehen. In letzter Zeit sich abzeichnende Fortschritte auf dem Gebiet der 3D-Strömungsberechnung lassen dies in naher Zukunft möglich erscheinen. Die im HDV-Rig diesbezüglich durchgeführten Messungen haben auf dem Weg dorthin einen enorm wichtigen Beitrag geleistet.

4 Literaturverzeichnis

- [1] Goltz, I.; Böhmer, H.; Nollau, R.; Belz, J.; Grueber, B.; Seume, J.: „Piezo-Electric Actuation of Rotor Blades in an Axial Compressor“, 8th European Conference on Turbomachinery, 23.-27.03.2009, Graz, Österreich, 2009
- [2] Siemann, J.; Nollau, R.; Grueber, B., Seume, J.: „Controlled Excitation of Rotor Blades via Macro Fiber Composites in an Axial Compressor“, 19th Conference of the International Society for Air Breathing Engines, 7.-11.09.2009, Montreal, Kanada, 2009
- [3] Schoenenborn, H., Grossmann, D., Satzger, W., Zisik, H.: „Determination of blade-alone frequencies of a blisk for mistuning analysis based on optical measurements“, paper GT2009-59148, proceedings of ASME Turbo Expo 2009, Orlando, FL, USA
- [4] Schoenenborn, H.; Retze, U.; Ziller, G.; Waniczek, P.: „Experimental and Analytical Mistuning Analysis of a Blisk at Lab Conditions and under Rig Conditions Using Tip Timing“, paper GT2010-22447, proceedings of ASME Turbo Expo 2010, Glasgow, UK
- [5] Chenaux, V., Schoenenborn, H., Ott, P.: „Experimental Investigations of the Aerodynamics of an Annular Compressor Cascade at Reversed Flow Conditions“, Paper 168, Proceedings of the 9th ETC (European Turbine Conference), Istanbul, March 2011
- [6] Schoenenborn, H., Chenaux, V., Ott, P.: „Aeroelasticity at reversed flow conditions – Part 1: Numerical and Experimental Investigations of a Compressor Cascade with Controlled Vibration“, ASME-Paper GT2011-45034, Vancouver, Canada, June 2011
- [7] Waniczek, P., Jeschke, P., Schoenenborn, H., Metzler, T.: „Investigation of the Surge Behavior of a Multi-Stage Axial Compressor with a Multi-Sensor Probe“, ASME-Paper GT2011-46219, Vancouver, Canada, June 2011
- [8] Schoenenborn, H., Breuer, T.: „Aeroelasticity at reversed flow conditions – Part 2: Application to Compressor Surge“, ASME-Paper GT2011-45035, Vancouver, Canada, June 2011

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart Abschlussbericht	
3a. Titel des Berichts Innovatives Blisk-Design für Hochdruckverdichter der nächsten Generation (BliDes HDV)		
3b. Titel der Publikation		
4a. Autoren des Berichts (Name, Vorname(n)) Von Czerniewicz, Frank	5. Abschlussdatum des Vorhabens 30.04.2011	
	6. Veröffentlichungsdatum Nov 2011	
4b. Autoren der Publikation (Name, Vorname(n))	7. Form der Publikation	
	9. Ber.Nr. Durchführende Institution	
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) MTU Aero Engines GmbH Postfach 50 06 40 D-80976 München	10. Förderkennzeichen *) 20T0601A	
	11a. Seitenzahl Bericht 61	
	11b. Seitenzahl Publikation	
	12. Literaturangaben 8	
13. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWI) Scharnhorststr. 36 10115 Berlin	14. Tabellen -	
	15. Abbildungen 37	
	16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)		
18. Kurzfassung Die Bliskbauweise in Verdichtertrotoren bietet gegenüber den herkömmlichen Bauweisen Gewichts- und Wirkungsgradvorteile. Es war bisher nicht möglich, diese Potenziale umfassend auszunutzen. So war die Einsatztemperatur von Blisken bisher auf 500°C begrenzt. Die hinteren Stufen eines Hochdruckverdichters müssen aber deutlich höhere Temperaturen bis 650°C ertragen. Für diese Temperaturen sind bisherige Erosionsschutzschichten nicht anwendbar. Zur Steigerung der aerodynamischen Stufenbelastung sind neue Designkonzepte erforderlich. Ferner birgt die neue Bauweise ein erhöhtes Risiko für die mechanische Integrität. Schwingungsresonanzen und Temperaturspannungen sind weitestgehend unbekannt und konnten mit den vorhandenen Berechnungsprogrammen nur unzureichend simuliert werden. Das Potenzial der Casing Treatments neuer Generation konnte nicht umfassend in der Auslegung berücksichtigt werden. Ziel des Verbundvorhabens war es, erstmals zu ermöglichen, umfassend die Strömungs-, Spannungs- und Temperaturphänomene einer Blisk im realen Betrieb genauer zu simulieren. Schon bei der Auslegung von Blisken sollten die Risiken hinsichtlich Pumpen und Flattern minimiert werden. Der erweiterte Designspielraum durch CT der neuen Generation sollte nutzbar gemacht werden. Zur Erhöhung der aerodynamischen Stufenbelastung sollte der in einem anderen Vorhaben entwickelte Tandemrotor mit einem Tandemstator sinnvoll zu einer vollständigen Tandemstufe ergänzt werden. Die Einsatzgrenze für Blisken sollte auf 650°C erweitert werden. Ferner sollten Herstellrouten für rohmaterialminimierte und eigenschaftsoptimierte Schmiederohrteile für Verdichter-Blisken entwickelt werden. Das Vorhaben wurde erfolgreich abgeschlossen und die angestrebten Ziele wurden in vollem Umfang erreicht.		
19. Schlagwörter HDV, Blisk, Schmiedeverfahren, DA718 ,TMF-Blisk, Mistuning, HT-ESS, Pumpen, CT		
20. Verlag	21. Preis	

*) Auf das Förderkennzeichen des BMBF soll auch in der Veröffentlichung hingewiesen werden.

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. Type of Report Final Report
3a. Report Title New Technologies for Next Generation Geared Turbofans (NT-GTF)	
3b. Title of Publication	
4a. Author(s) of the Report (Family Name, First Name(s)) Dr. Zähringer, Christian	5. End of Project 30.9.2010
	6. Publication Date Nov 2010
4b. Author(s) of the Publication (Family Name, First Name(s))	7. Form of Publication
	9. Originator's Report No.
8. Performing Organization(s) (Name, Address) MTU Aero Engines GmbH Postfach 50 06 40 D-80976 München	10. Reference No. 20T0607
	11a. No. of Pages Report 61
	11b. No. of Pages Publication -
	12. No. of References -
13. Sponsoring Agency (Name, Address) Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWI) Scharnhorststr. 36 10115 Berlin	14. No. of Tables -
	15. No. of Figures 37
	16. Supplementary Notes
17. Presented at (Title, Place, Date)	
18. Abstract In order to maintain the growth of global air traffic increase despite ecological and cost restrictions, the fuel efficiency of future aircraft needs to be improved significantly. A major part of this efficiency increase is required from the engines in order to achieve the overall goals. This requires improvement of component efficiencies on the one hand, on the other hand a further increase of the engine bypass-ratio for the enhancement of the overall propulsion efficiency. In this context, MTU and partners pursue the particularly efficient concept of the Geared Turbofan. To enable the utilization of the benefits offered through the GTF concept, several technical improvements have been gathered in the actual project. Two of those did aim directly towards the weight reduction of the Low Pressure Turbine. One dealt with the qualification of the new alloy ATI718plus and one in the development of TiAl, that features a significantly lower density than comparable alloys that are used in the relevant temperature range. Another topic of the investigations was the development of key components of a distributed control system, that offers the possibility of weight reduction through optimized fuel metering and therefore improving the heat sink capacity of the engine fuel, allowing for minimization engine mounted coolers. Besides development of these technologies, validation of the GTF concept under realistic conditions is a key task for demonstration of the concept benefits. Therefore, an engine demonstrator was built up, and tested in an extensive ground- and flight test program. For this, MTU provided the high speed low pressure turbine. This final report describes the achieved results.	
19. Keywords geared turbofan, high speed LPT, alloys, weight reduction, distributed control system	
20. Publisher	21. Price