

ZUKUNFTSWEISENDE NEUE TECHNOLOGIEN FÜR HOCHDRUCKVERDICHTER DER NÄCHSTEN GENERATION

G. Kahl, W. Sturm
MTU Aero Engines GmbH
Dachauer Str. 665
80995 München
Deutschland

Zusammenfassung

Der Hochdruckverdichter (HDV) hat entscheidenden Einfluss auf Treibstoffverbrauch, Wartungskosten und Gesamtwirtschaftlichkeit von Flugantrieben. Die Entwicklung eines hocheffizienten und gleichzeitig kostengünstigen HDVs ist daher unabdingbare Voraussetzung, um die aktuellen Herausforderungen in der Luftfahrt meistern zu können.

Als wesentlicher Baustein der Hochdruckverdichter-Technologieentwicklung wurde bei der MTU Aero Engines in den letzten drei Jahren das Technologieprogramm „HDV-XL“ durchgeführt. Neben der Entwicklung und Validierung von Erosions-Schutzschichten sowie von Methoden und Verfahren zur Vorhersage von Verschleiß und Fretting umfasste dieses Programm vor allem die Weiterentwicklung der aerodynamischen Auslegungsvorgehen. Kernstück der Aktivitäten war die Auslegung, Erprobung und Validierung eines hochinnovativen, triebwerkstypischen, 8-stufigen Hochdruckverdichters.

An diesem Verdichter wurden in bisher nicht dagewesenem Umfang stationäre und instationäre Messdaten ermittelt. Neben umfangreichen Traversierungen des Strömungsfeldes mit pneumatischen Miniatur-Messsonden wurden auch detaillierte Feldmessungen aller drei Geschwindigkeitskomponenten mit berührungslosen Laser-Messverfahren durchgeführt. Gemeinsam mit der ebenfalls berührungslosen Messung der Schwingungsantwort aller Rotor-Schaufeln wurde so ein konsistenter Datensatz in beispielloser Detailtiefe erzeugt, der jetzt und zukünftig eine wichtige Basis für die Kalibrierung und Validierung der Auslegungsvorgehen bei der MTU bildet.

Die Anwendung stationärer und instationärer, hochgenauer Aerodynamik-Rechenverfahren bildet heutzutage das Rückgrat der Verdichterauslegung. Vorhersagegüte und -sicherheit sind dabei von fundamentaler Bedeutung für das Entwicklungsergebnis. Neben der Vorhersage der grundlegenden Leistungsdaten des Verdichters, wie Durchsatz, Druckverhältnis und Wirkungsgrad im Auslegungspunkt, ist hierbei zunehmend auch das Teillastverhalten bedeutsam, wobei auch kleine geometrische Details präzise modelliert und in ihrer Auswirkung auf das Strömungsfeld berücksichtigt werden müssen.

Im vorliegenden Beitrag wird ein Überblick über die HDV-Technologieentwicklung anhand der analytischen und experimentellen Arbeiten und ihrer Ergebnisse im Programm „HDV-XL“ gegeben, mit denen die Basis für derzeit laufende und zukünftige Verdichter-Auslegungen bei der MTU gelegt und ihre technologische Spitzenposition auf diesem Gebiet weiter gefestigt wird.

1. ANFORDERUNGEN MODERNER TRIEBWERKS- KONZEPTE UND VERDICHTER

In einem modernen Flugtriebwerk stellt der Hochdruckverdichter (HDV) eine der Komponenten mit den höchsten technologischen Ansprüchen dar. Gleichzeitig haben sein Wirkungsgrad und sein Betriebsverhalten entscheidenden Einfluss auf das gesamte Triebwerk. Die hohe Leistungsdichte des HDVs ist dabei maßgeblich für die Umsetzung hoher Nebenstromverhältnisse in zivilen Triebwerken, die ihrerseits erst eine hohe Effizienz des Antriebs ermöglichen. Zusätzlich spielt der Wirkungsgrad des HDVs eine dominante Rolle beim Treibstoffverbrauch, da eine Verbesserung seines Wirkungsgrades um 1%-Punkt den spezifischen Kraftstoffverbrauch des Triebwerks um ca. 0,5% senken kann. Auch spielen die Herstell- und Instandhaltungskosten des HDVs eine wichtige Rolle für die

Wirtschaftlichkeit des Triebwerks und damit auch des Flugzeuges, denn der Kostenanteil der Triebwerke am Flugzeug beträgt ca. ein Viertel der Produktionskosten und die Treibstoffkosten betragen fast die Hälfte der Betriebskosten. Insgesamt entsteht somit aus der Kundenforderung nach preisgünstigen Flugscheinen ein hoher Druck auf die Fluglinien, die Anschaffungs- und Betriebskosten der Flugzeuge stetig zu senken. Daher ist es für die Triebwerkshersteller unabdingbar, hocheffiziente Triebwerke zu wettbewerbsfähigen Preisen zur Verfügung zu stellen.

Die so geforderten Verbesserungen können nur durch fortschrittliche und innovative Technologien erzielt werden, die in kürzester Zeit entwickelt und für den Einsatz im Triebwerk reif gemacht werden müssen. Dabei tritt besonders die Verwendung von modernen Rechenverfahren und Auslegungsmethoden in den Vordergrund. Erst diese

ermöglichen es, vorzuhaltende Sicherheitsmargen in der Auslegung von Bauteilen immer weiter zu reduzieren und so an die Grenzen der zulässigen Belastungen vorzustoßen, um damit gewichtsoptimierte, hocheffiziente und wirtschaftliche Verdichter auszuliegen.

Bei der MTU Aero Engines wird die technologische Weiterentwicklung des Hochdruckverdichters konsequent vorangetrieben. Dabei wird einerseits besonderes Augenmerk auf eine enge Verknüpfung der Verbesserungen an den Auslegungswerkzeugen mit der experimentellen Validierung im Rigversuch gelegt, andererseits wird stets eine schnelle und direkte Umsetzung der gewonnenen Erkenntnisse in Serienprodukten angestrebt. Im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie geförderten Technologieprogramms „HDV-XL“ wurden in den vergangenen 4 Jahren intensive analytische und experimentelle Untersuchungen abgeschlossen, mit denen die Basis für derzeit laufende und zukünftige Verdichter-Auslegungen bei der MTU gelegt und ihre technologische Spitzenposition auf diesem Gebiet weiter gefestigt wird.

2. AUSLEGUNGSVERFAHREN

Der Einsatz hochentwickelter Simulations- und Rechenverfahren ist aus der Auslegung moderner, hoch belasteter Verdichter heute nicht mehr wegzudenken. Um die anspruchsvollen Zielsetzungen bezüglich hoher Effizienz, geringem Gewicht und extremer Zuverlässigkeit mit einem wirtschaftlich herstellbaren Produkt erfüllen zu können, sind kalibrierte und präzise Aerodynamik- und Strukturmechanik-Tools unabdingbar.

2.1. Aerodynamische Auslegung

Im Bereich der aerodynamischen Auslegung von Verdichtern sind heute vornehmlich stationäre 2D- und 3D-Berechnungsverfahren standardmäßig im Einsatz. Aufgrund der Wechselwirkung von feststehenden und rotierenden Bauteilen im Verdichter ist die reale Strömung dagegen hochgradig instationär und wird daher durch stationäre Verfahren nur näherungsweise beschrieben. Um auch diese Effekte realitätsnah zu erfassen, müssen zunehmend auch instationäre Rechenverfahren angewandt werden. Langfristiges Ziel ist somit der Übergang zu instationären 3D-Berechnungsverfahren bereits in der Auslegung von Verdichtern, um durch Berücksichtigung und Nutzung dieser Effekte bei Verdichtern der nächsten Generation einen deutlichen Sprung im Wirkungsgrad zu erreichen.

Diese Verfahren erfordern jedoch einen um ein vielfaches höheren Rechenaufwand, zudem fehlen qualitativ hochwertige instationäre Messdaten für die notwendige präzise Validierung und Kalibrierung der Rechenergebnisse.

Wesentliche Ziele des Technologieprogramms „HDV-XL“ waren daher einerseits eine deutliche Reduktion der Durchlaufzeit durch die Automatisierung der Rechenverfahren, andererseits aber vor allem auch eine Erhöhung der Vorhersagegüte durch die Erfassung realer Geometrien (z.B. Ausrundungsradien) und komplexer Einlaufstörungen sowie der Vorhersagbarkeit von Wirkungsgrad und Pumpgrenze durch eine genauere Modellierung, z.B. bei 2D-Verlusten, Transition, Rauigkeit und Turbulenz. Einige der erreichten Weiterentwicklungen werden im Fol-

genden exemplarisch dargestellt.

2.1.1. Verfahren zur Kennfeldberechnung

Während die Auslegung einer Verdichterbeschaufelung von einer umfangssymmetrischen Verteilung der Eintrittsgrößen ausgeht, erfordert die Berechnung der Auswirkungen von Einlaufstörungen auf Stabilitätsgrenze und Wirkungsgrad die Berücksichtigung sowohl radialer als auch Umfangsgradienten in der Zuströmung. Damit einher geht demzufolge die Forderung, auch die Strömung innerhalb des Verdichters entsprechend abzubilden, d.h. eine Auflösung nicht nur in radialer Richtung (= Standard beim 3D-Auslegungsprozess) sondern auch in Umfangsrichtung.

Obwohl dieser Anspruch grundsätzlich auch mit einem 3D-Strömungslöser abgedeckt werden kann, wurde stattdessen ein bereits in der Designphase einsetzbares schnelles Verfahren entwickelt, das auf Basis von radial unterschiedlichen Stufen- bzw. Gitterkennlinien den Einfluss der Einlaufstörung auf die Stabilitätsgrenze des Verdichters ermittelt.

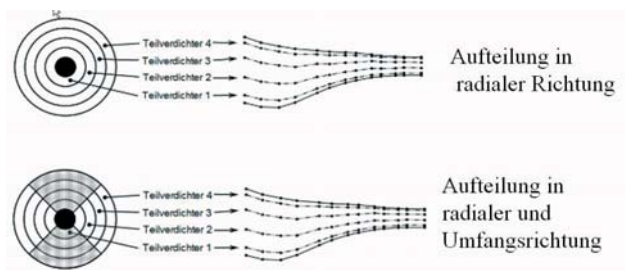


BILD 1. Aufteilung eines Verdichters in Umfangs- und Radialsegmente

BILD 1 zeigt schematisch die Aufteilung eines Verdichters in Umfangs- und Radialsegmente. Sowohl innerhalb des Verdichters als auch am Austritt werden die einzelnen Segmente über Gleichgewichtsrandbedingungen gekoppelt. In meridionaler Richtung wird der Verdichter durch seine Geometrie und entsprechende Kennlinien pro Stufe bzw. Gitter beschrieben.

Die Vorhersagegenauigkeit des Berechnungsverfahrens wurde anhand von Versuchsdaten für einen mehrstufigen Verdichter validiert. BILD 2 zeigt einen Vergleich zwischen Rechnung und Messung für eine Eintrittsdruckstörung.

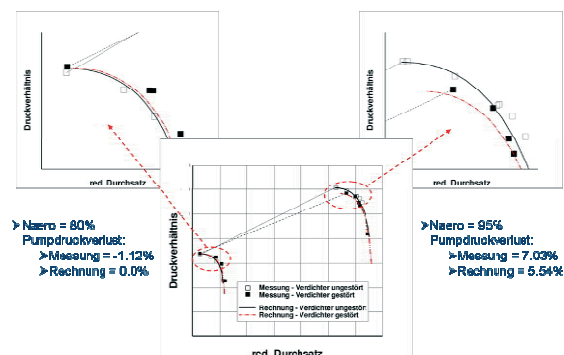


BILD 2. Vergleich Rechnung / Messung für eine Eintrittsdruckstörung

Zur Verbesserung der Vorhersagegenauigkeit und damit der Reduzierung der Durchlaufzeit im Auslegungsprozess wurde ein Kennfeldverfahren auf Basis eines vorhande-

nen Stromlinienkrümmungsverfahren entwickelt. Mit diesem Verfahren ist es möglich, bereits in der Auslegungsphase nach Vorgabe einer Ringraumgeometrie sowie der zugehörigen Arbeits- und Verlustverteilung eines Verdichters im Auslegungspunkt ein komplettes Kennfeld zu berechnen. Ausgangspunkt für die Berechnung ist eine S2-Lösung im Auslegungspunkt, sowie die Auswahl der zu berechnenden Drehzahllinien. Weitere Randbedingungen, wie Verstellgesetze und Gitterspalte als Funktion der Drehzahl sowie Abblasemengen, können interaktiv über eine graphische Benutzeroberfläche eingegeben werden, wie dies in BILD 3 am Beispiel der Vorgabe für ein Verstellgesetz dargestellt ist.

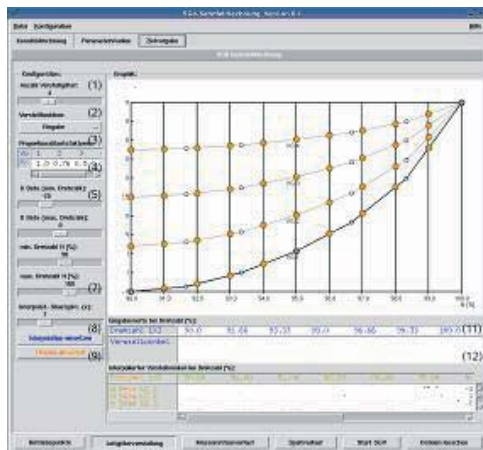


BILD 3. Graphische Benutzeroberfläche zur Vorgabe eines Verstellgesetzes

Nach Vorgabe aller kennfeldrelevanten Größen wird das Stromlinienkrümmungsverfahren für jeden zu berechnenden Betriebspunkt mit den notwendigen Eingabegrößen versorgt und liefert den zugehörigen Kennfeldpunkt. Das Ergebnis der Berechnung wird als Kennfeld dargestellt (siehe BILD 4), eine standardisierte Ausgabe der Ergebnisse zur Weiterverarbeitung in anderen Berechnungen ist ebenfalls vorhanden.

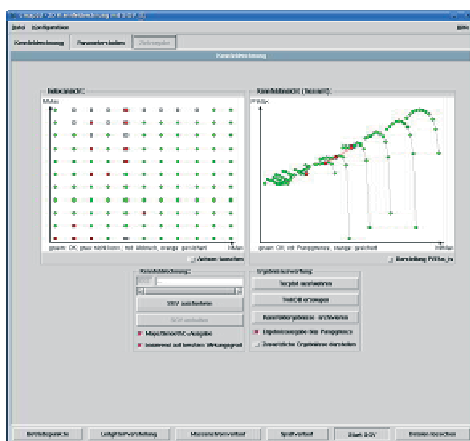


BILD 4. Graphische Darstellung des berechneten Kennfelds

Ergänzend zur Entwicklung des 2D-Kennfeldverfahrens wurden am Institut für Strahlantriebe der UniBw München Kaskadentests durchgeführt, um die Gitterkorrelationen im Stromlinienkrümmungsverfahren auf den Stand heutiger Auslegungsstandards zu bringen. Dabei wurden sowohl Leit- als auch Laufgitter vermessen, um Abhängigkeiten von typischen Einflussgrößen wie Zuströmwinkel, Ma-Zahl und Re-Zahl zu ermitteln.

BILD 5 zeigt beispielhaft das Ergebnis einer solchen Parametervariation anhand der gemessenen Profildruckverteilung.

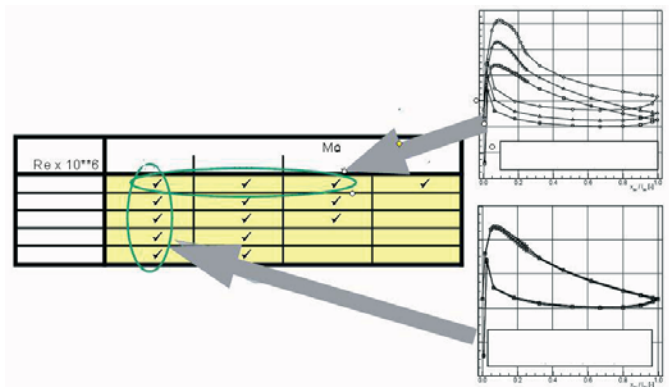


BILD 5. Auswirkung einer Ma-Re-Variation auf die Profildruckverteilung einer vermessenen Kaskade

2.1.2. 3D Beschauelungsauslegung

Zur Erreichung des Ziels, einen validierten Auslegungsprozess für das Verdichterdesign darzustellen, wurde im Laufe des Projekts ein weitgehend neuer Prozessablauf für den 3D-Aero-Entwurf im Auslegungssystem implementiert. Dieser gliedert sich gemäß BILD 6 in die Teile Netzgenerierung, Konfiguration, Solver und Postprocessing. Zusätzlich können im Anschluss an den Standardprozess weitere vorkonfigurierte Module, wie z.B. Kavitäten oder CT, angefügt werden.

Neuer 3D-Aero-Standard-Prozess

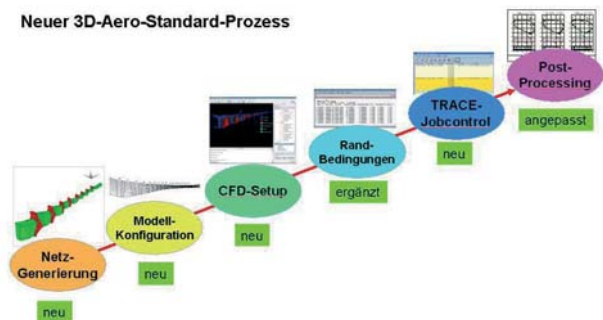


BILD 6. Neu implementierter Prozessablauf für den 3D-Aero-Entwurf

Der Netzgenerierungsprozess wurde um wichtige Funktionalitäten, wie Fillets oder Berücksichtigung von flächenbasierten Daten aus CAD-Systemen erweitert (siehe BILD 7).

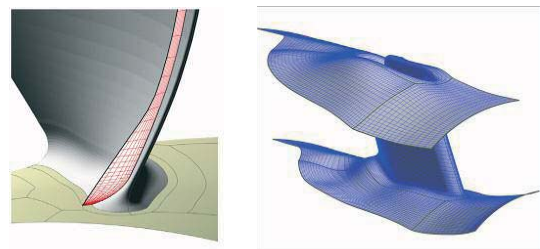


BILD 7. Netzgenerierung unter Einbeziehung von Fillets und flächenbasierten CAD-Daten

Die Konfiguration der Rechnung wird jetzt mit dem grafisch unterstützten Tool „GMC“ (siehe BILD 8) durchgeführt, das die Arbeiten wesentlich vereinfacht.

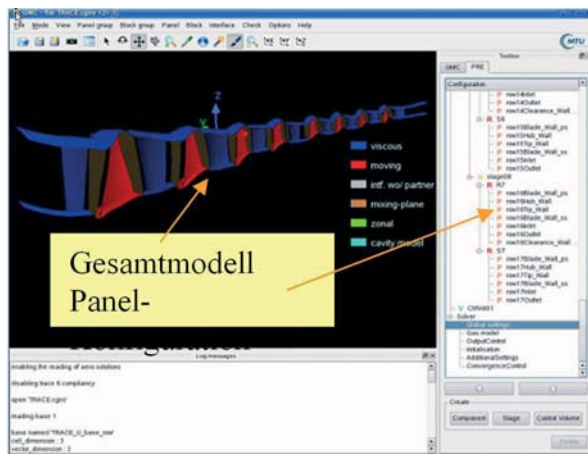


BILD 8. Grafisch unterstütztes Konfigurationstool „GMC“

Im Verlauf des Projekts konnte insbesondere der Solver in seiner Performance deutlich (stationär um den Faktor 2, instationär um den Faktor 10) verbessert werden. Darüber hinaus ist jetzt die instationäre Berechnung von Teilen einer Komponente zusammen mit der stationären Berechnung anderer Komponenten möglich. Dies erlaubt z.B. die effektive Berechnung eines Verdichters mit Casing Treatment.

2.2. Modellierung von Fretting und Verschleiß

Eine feste Randbedingung in der Verdichterauslegung ist die Einhaltung vorgegebener Lebensdauern von Bauteilen. Besonders kritisch sind die Berührungsflächen verschiedener Bauteile, an denen durch kleine Relativbewegungen Fretting und Verschleiß auftreten können, die letztlich die Gefahr des Bauteilversagens in sich bergen. Durch die Untersuchung und Modellierung dieser Schädigungsmechanismen sollten gefährdete Bauteile bereits in der Auslegung erkannt und späteren Schäden durch geeignete Designänderungen vorgebeugt werden. Eine weitere Maßnahme zur Lebensdauererweiterung von Bauteilen ist die Oberflächenverfestigung, die im wesentlichen durch einen geeigneten konventionellen Kugelstrahlprozess erzielt wird. Im Rahmen des Technologieprogramms „HDV-XL“ wurde hierzu ein analytisches Modell erstellt, das unmittelbar in der künftigen Auslegung von Bauteilen angewendet werden kann. Wesentliche Bausteine hierzu sind ein analytisches Lebensdauermodell zur quantitativen Bestimmung der Fretting- und Verschleißlebensdauer und Verfahren zur Stabilitätsvorhersage von Eigenspannungen unter zyklischer mechanischer und thermischer Belastung. Im Folgenden werden die hier erzielten Fortschritte detaillierter dargestellt.

2.2.1. Fretting- und Verschleißlebensdauer

Wesentliches Ziel dieser Aufgabe war die Bereitstellung einer Datenbasis zum Einfluss der wesentlichen Kontaktparameter wie Flächenpressung, Reibwert und Relativverschiebung. Gemeinsam mit dem Laboratoire des Mécaniques des Solides (LMS/Prof. Dang Van) der École Polytechnique Palaiseau wurde hierzu im Vorfeld eine umfassende Sensitivitätsstudie durchgeführt, mit deren Hilfe die nachfolgenden Tests optimal ausgerichtet und bezüglich der zu variierenden Parameter eingestellt werden konnten. Für die Tests selbst wurde bei der MTU zum einen ein neuer biaxialer Fretting-Prüfstand errichtet und

zum anderen ein bestehender Verschleiß-Prüfstand den Anforderungen entsprechend modifiziert und verbessert.

Der biaxiale Fretting-Prüfstand ermöglicht es, alle für das Phänomen Fretting relevanten Parameter unabhängig voneinander zu steuern und somit am Probenversuch die Belastung der tatsächlich im Triebwerk auftretenden Parameter zu simulieren. Darüber hinaus können durch die variable Steifigkeit des Querlaststrangs Proben verschiedener Werkstoffe bei gleichen Parametern (Hauptlast und Relativverschiebung) getestet werden, was in dieser Form einzigartig ist. Die Erweiterung der Datenerfassung für das Online-Monitoring der dissipierten Energie auf dem Verschleiß-Prüfstand ermöglicht eine saubere quantitative Testauswertung. Dabei wird die Messgenauigkeit durch die Anwendung einer optischen Vermessungsmethode (Konoskopie) zusätzlich verbessert, was letztlich erst die genaue Quantifizierung des Materialverschleißes bzw. eine Differenzierung zwischen Materialabtrag und Materialaufschweißungen erlaubt. Schließlich wird mit einem neu entwickelten Verfahren zur automatisierten Auswertung die Entwicklung der Energiedissipation aus den Querkraft-Verschiebungshysteresen bereits während des Versuchs in Echtzeit dargestellt.

Aus den so ermittelten Daten konnte eine Korrelation zwischen der während des Verschleißvorgangs dissipierten Energie und der tatsächlichen Abtragsrate für verschiedene Werkstoffe mit den Materialpaarungen Ti64-Ti64, IN718-IN718 und Ti64-IN718 bei unterschiedlicher Belastung und Temperatur entwickelt werden. Im Rahmen der Modellierung des abrasiven Materialverschleißes wurde auf Basis der durchgeführten Versuche ein energiebasiertes Verschleißmodell nach Fouvry [1] in eine Subroutine für das kommerzielle FE-Programm ABAQUS implementiert und anschließend kalibriert. Die so geschaffenen Methoden ermöglichen es, den auftretenden Materialabrieb bei zyklischen Kontaktrechnungen für zwei- und dreidimensionale Modelle zu berechnen und die Bauteilgeometrie entsprechend anzupassen.

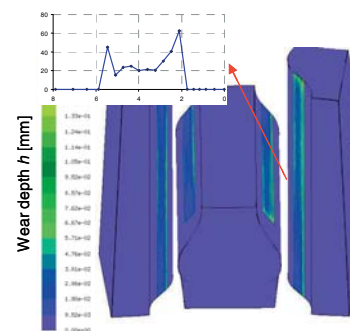


BILD 9. Verschleißtragbild an einer Fansauffel an der Kontaktstelle zwischen Schauffelfuß und Scheibennut

Zur Validierung der Rechenergebnisse wurden sowohl Probengeometrien als auch reale Bauteilbeispiele nachgerechnet und die Simulationsergebnisse mit Versuchsergebnissen abgeglichen. BILD 9 zeigt das Ergebnis einer Validierungsrechnung, die für den Schauffelfuß einer Fansauffel durchgeführt wurde. In diesem Fall stimmt die berechnete Verschleißtiefe von maximal 60 μm sehr genau mit den Versuchsbefunden überein (60-100 μm). Die Entwicklung des Fretting-Lebensdauermodells auf Basis der am biaxialen Fretting-Prüfstand gesammelten Daten

für Ti64 und IN718 wurde ebenfalls abgeschlossen. Unter allen getesteten spannungs-, dehnungs- und energiebasierten Lebensdauermodellen wurde ein Ranking bzgl. der Vorhersagegenauigkeit durchgeführt. Aufgrund der erzielten höchsten Vorhersagegüte wurde das Dang-Van-Modell für die Implementierung in die MTU-Post-processing-Tools ausgewählt.

Beispielhaft ist die Anwendung dieser Vorgehensweise in BILD 10 illustriert. Dargestellt ist die Schädigungsverteilung auf einer Hochdruckverdichterschaufel anhand des Schädigungsparameters nach Dang Van [2]. Deutlich erkennbar ist die Beanspruchung der hoch belasteten Kontaktzonen.

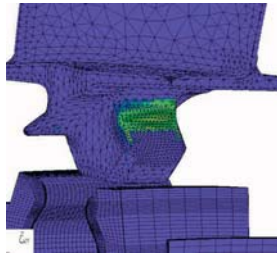


BILD 10. Schädigungsverteilung nach Dang Van am Fuß einer Hochdruckverdichterschaufel

BILD 11 zeigt die Vorhersagegüte des Dang-Van-Modells für die Ti64-Versuche bei Raumtemperatur in einer Gegenüberstellung der berechneten Lebensdauer zur tatsächlich im Versuch ermittelten Lebensdauer. Man erkennt, dass fast alle Versuche innerhalb der eingetragenen Konfidenzgrenzen liegen.

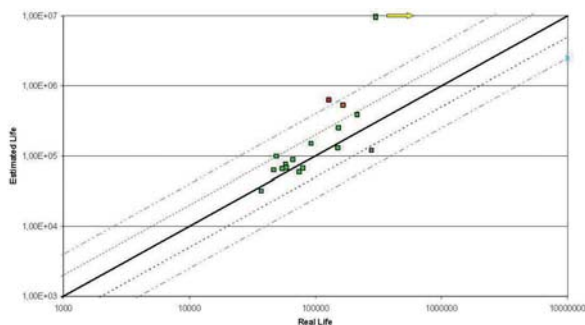


BILD 11. Vorhersagegüte des Dang-Van-Modells für die Ti64-Versuche bei 20°C

2.2.2. Stabilitätsvorhersage Eigenspannungen

Um die lebensdauererweiternde Wirkung von durch Kugelstrahlen in ein Bauteil eingebrachten Eigenspannungen bewerten zu können, ist es zunächst notwendig, ein fundiertes Verständnis über die Stabilität dieser Eigenspannungen unter thermischer und mechanischer Belastung zu gewinnen.

Hierzu wurden in Kooperation mit dem Institut für Werkstoffkunde 1 der Universität Karlsruhe an Ti6242- und IN718-Proben Versuche zur thermischen, quasistatischen und zyklischen Eigenspannungsstabilität durchgeführt (siehe BILD 12), die zur Kalibrierung von analytischen Modellen zur Vorhersage des Eigenspannungsabbaus verwendet werden.

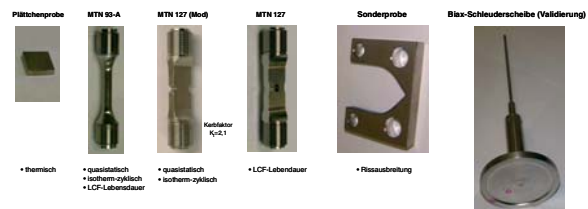


BILD 12. Probengeometrien für Untersuchungen zur Eigenspannungsstabilität

Die so entwickelten Ansätze wurden in computergestützte Tools implementiert, mit deren Hilfe von einem beliebigen Eigenspannungs-Ausgangstiefenprofil das korrespondierende stabilisierte Tiefenprofil nach thermischer Auslagerung und einfacher mechanischer Belastung sowohl für glatte als auch für gekerbte Oberflächen bestimmt werden kann. BILD 13 zeigt die Arbeitsoberfläche des Verfahrens zur Bestimmung des thermischen Eigenspannungsabbaus.

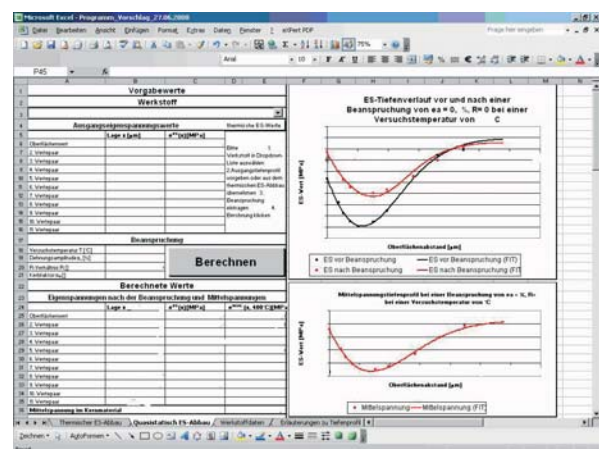


BILD 13. Excel Tool zur Bestimmung des quasistatischen Eigenspannungsabbaus

Aus weiteren zyklischen Versuchen konnte ermittelt werden, dass nach dem ersten Belastungszyklus kein weiterer Eigenspannungsabbau mehr stattfindet, so dass die entwickelten Modelle in unmodifizierter Form auch bei zyklischer Belastung verwendet werden können. Zur Validierung der o.g. Methodik und ihrer Übertragbarkeit auf mehrachsige Spannungszustände wurden zwei Minispin-Tests durchgeführt, bei denen kugelgestrahlte Scheiben aus Ti6242 und IN718 unter definierten zyklischen Versuchsbedingungen geschleudert wurden. Der Test wurde nach 1, 10, 100 und 2000 Zyklen unterbrochen und die verbleibende Oberflächeneigenspannung gemessen.

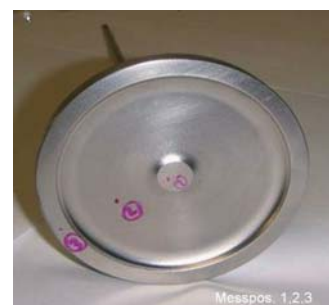


BILD 14. Minispinscheibe ($\varnothing = 76 \text{ mm}$) aus Ti6242 mit Messpositionen zur Überprüfung der Eigenspannungen

BILD 14 zeigt die verwendete Scheibengeometrie, der gemessene Eigenspannungsabbau ist in BILD 15 abgebildet. Er stimmt sehr gut mit der an uniaxialen Proben gemessenen Abbaucharakteristik überein. Dies ist der implizite Nachweis dafür, dass die Modelle, die an uniaxial ermittelten Probendaten kalibriert wurden, auch für multi-axial belastete Bauteile verwendet werden können.

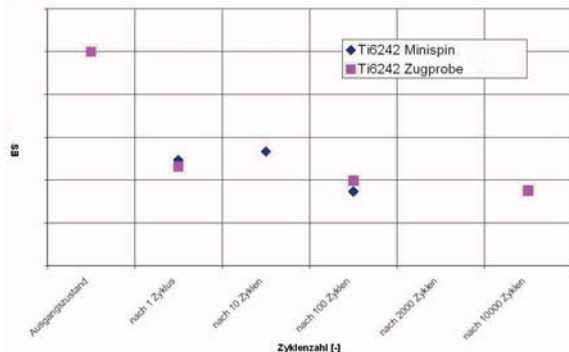


BILD 15. Vergleich des Eigenspannungsabbaus unter zyklischer Belastung zwischen Spintest und Zugprobe bei Ti6242

Die Ergebnisse der LCF Versuche zeigen den zu erwartenden Trend einer Lebensdauerverbesserung der gestrahlten Proben gegenüber unverfestigten Proben. Teilweise liegen die erreichten Lebensdauern der mit höherer Intensität gestrahlten Proben aber unter der von schwächer gestrahlten Proben, was der gängigen Vorstellung der Wirkungsweise des Kugelstrahlens widerspricht. Diese Erkenntnisse erschweren die Lebensdauermodellierung, die in Kooperation mit der Bergischen Universität Wuppertal bearbeitet wurde. Dabei wurde auf Basis des Cruse-Meyer-Lebensdauermodells [3] eine Mittelspannungskorrektur eingeführt, die die ungestrahlte LCF-Kurve in die Kurve für die gestrahlten Proben überführen soll, was jedoch nicht bei allen Belastungs-R-Verhältnissen überzeugende Ergebnisse liefert.

Dies ist in BILD 16 illustriert, dargestellt ist die Anpassung des modifizierten Cruse-Meyer-Modells an die LCF-Versuchsdaten für ungestrahlte (schwarze Symbole) und gestrahlte (blaue Symbole) Proben. Man erkennt, dass die Anpassung an die stark streuenden Daten der gestrahlten Proben nicht überall gut gelingt.

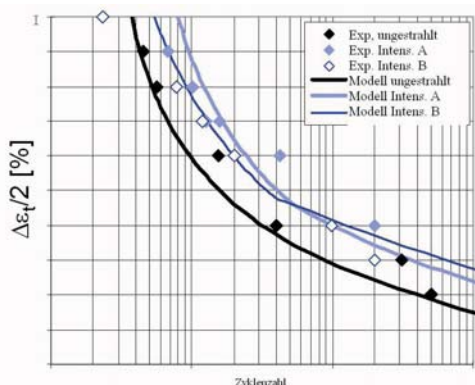


BILD 16. LCF-Kurven für ungestrahlte und gestrahlte Proben mit entsprechender Modellanpassung des Cruse-Meyer-Modells

3. EINZELTECHNOLOGIEN

Neben der im vorherigen Abschnitt beschriebenen intensiven Weiterentwicklung der analytischen Auslegungs- und Rechenverfahren wurden im Rahmen des Vorhabens „HDV-XL“ bei der MTU weitere Einzeltechnologien bis zur Technologiereife vorangetrieben. Exemplarisch werden hier die aerodynamisch optimale Gestaltung von Kavitäten und Dichtsystemen sowie die Erosionsschutz-Beschichtung detaillierter dargestellt.

3.1. Kavitäten- und Dichtungsgestaltung

Eine große Herausforderung in der Verdichterentwicklung ist die weitere Steigerung von Wirkungsgrad und Pumpgrenze trotz des bereits sehr hohen Niveaus aktueller Hochdruckverdichter. Eine Verlustquelle, die es weiter zu verringern gilt, ist die Leakageströmung unter den Innendeckbändern der Leitschaufeln. Aufgrund des Druckunterschiedes zwischen Schaufelaustritt und Schaufeleintritt im Hauptströmungskanal strömt Luft unter den Deckbändern der Leitschaufeln stromaufwärts und erzeugt Strömungsverluste beim Wiedereintritt in die Hauptströmung. Durch eine umfangreiche Vergleichsstudie unterschiedlicher Geometrien im Bereich des Innendeckbands wurde eine optimierte Kavitätengestaltung entwickelt, die sich durch eine verlustarme Mischung der Leakageströmung mit der Hauptströmung auszeichnet.

Die Untersuchungen lieferten zudem wichtige Erkenntnisse über die geeignete CFD-Modellierung von Kavitäten. Insbesondere der aufwendige Vernetzungsprozess konnte hinsichtlich Knotendichte, Grenzschichtauflösung oder Positionierung der Schnittstellen zu anderen Netzteilen wesentlich optimiert werden. BILD 17 zeigt exemplarisch das Ergebnis einer Nachrechnung der Kavitätenströmung.

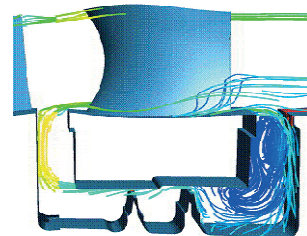


BILD 17. CFD-Nachrechnung der Kavitätenströmung

Da sich die stärksten Unterschiede durch die Variation des Kavitätenaustritts ergaben, wurden die Untersuchungen auf diesen Bereich konzentriert. Im Zuge der numerischen Analysen wurde eine Optimalkonfiguration entwickelt, bei der sich die aus der Kavität austretende Leakageströmung durch eine geeignete Umlenkung in Richtung der Hauptgasströmung möglichst verlustarm mit dieser mischt.

Eine weitere entscheidende Verlustreduzierung kann durch den Ersatz der unter Stator-Innenringen üblichen Labyrinth-Spitzendichtung durch Bürstendichtungen erzielt werden. Dabei kann der verbleibende Leakagestrom deutlich reduziert werden, was sich wiederum unmittelbar positiv auf den Gesamtwirkungsgrad des Verdichters auswirkt. Basierend auf der umfangreichen Erfahrung der MTU mit Bürstendichtungen wurden verschiedene Designkonzepte für die Anwendung in diesem Bereich untersucht (siehe BILD 18).

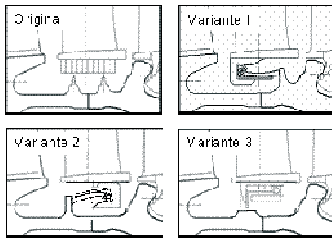


BILD 18. Untersuchte Dichtkonzepte

Besonders kritisch ist hierbei das Anstreifen des Drahtpakets an der Lauffläche. Die aufgrund der Reibleistung entstehende Wärme muss dabei vom Rotor aufgenommen werden können, ohne dass dies zu einer Schädigung führt. Dies macht gegebenenfalls den Einsatz einer entsprechenden Schutzschicht notwendig, die bei Kontakt zwischen Drahtpaket und Welle als Wärmedämmschicht fungiert und somit den Rotor vor übermäßiger Aufheizung schützt.

Im Zuge der konstruktiven Optimierung konnte anhand dieser Untersuchungen eine Variante (siehe BILD 19) entwickelt werden, bei der die Ergebnisse einer Thermalanalyse nur einen sehr geringen zusätzlichen Wärmeeintrag zeigen. Dieser beschränkt sich zudem auf einen örtlich kleinen Bereich am Steg, so dass die Materialtemperaturen der Scheiben praktisch unverändert bleiben.

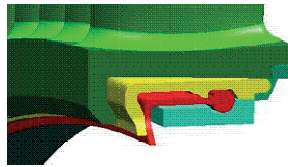


BILD 19. Radiale Bürstendichtungskonfiguration

3.2. Erosionsmodellierung und Erosionsschutz

Die hohen Strömungsgeschwindigkeiten im HDV führen bei partikelbelasteter Luft zu Erosionserscheinungen an den Verdichterschaufeln, die durch die Zunahme der Oberflächenrauigkeit und durch Änderung der Kantenformen zu Wirkungsgradverschlechterungen führen. Im Extremfall, besonders bei Betrieb in sandbelasteter Luft, wie z.B. in den Golfstaaten, kann die Erosionswirkung eine so starke Schädigung verursachen, dass ein vorzeitiger Austausch der Schaufeln nach 3.000 bis 4.000 h im zivilen und 80 bis 150 h im militärischen Bereich erforderlich wird. Da in großen Flugtriebwerken im Allgemeinen eine Staubabscheidung nicht möglich ist, kann eine Abhilfe nur über einen geeigneten Schutz der Schaufeln erfolgen. Die MTU Aero Engines hat hierzu eine Erosionsschutzschicht entwickelt und zugelassen, die eine wesentliche Verlängerung der Schaufellebensdauer ermöglicht. Im Rahmen der Arbeiten im Technologieprogramm „HDV-XL“ wurde diese Beschichtung weiter optimiert, um sie auch bei den höchsten im hinteren Verdichterbereich auftretenden Gastemperaturen einsetzen zu können und gleichzeitig die Erosionsbeständigkeit nochmals deutlich zu erhöhen. Wesentliche Anforderungen waren dabei

- Temperaturstabilität bis 650°C,
- hohe Haftung auf Ni- und Ti-Basiswerkstoffen,
- Verdoppelung der Erosionsbeständigkeit gegenüber bestehenden Schichten,
- Gesamtschichtdicke max. 30µm.

Auf einer neu aufgebauten Beschichtungsanlage wurden zahlreiche Proben unter systematischer Variation der beteiligten Parameter beschichtet. Beispielhaft ist in BILD 20 eine Verdichterbisk mit im Schaufelbereich aufgebracht Hochtemperatur-Multilayer-Schutzschicht abgebildet.



BILD 20. Experimental-Verdichterbisk mit Hochtemperatur-Multilayer-Schutzschicht

Mit Hilfe der Ergebnisse aus umfangreichen Tests zur Ermittlung von Schwingfestigkeit und Erosionsbeständigkeit gelang es schließlich, den Multilayer-Aufbau der aufgetragenen Schutzschicht so zu optimieren, dass die angestrebte Verdoppelung der Erosionsbeständigkeit sogar deutlich übertroffen werden konnte (siehe BILD 21).

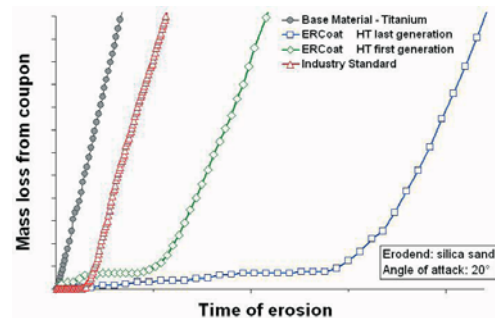


BILD 21. Massenverlustkurven über der Zeit für unbeschichtete und beschichtete Proben

Durch systematische Auswertung von zahlreichen erosionsbelasteten Triebwerken und Erstellung eines zugehörigen analytischen Simulationsmodells konnte ein deutlich besseres Verständnis für die Verteilung und Größe des Erosionsangriffs in Verdichtern erreicht werden. Damit ist es heute möglich, Verdichter mit 2 bis 3 Stufen bezüglich Erosion zu bewerten. BILD 22 zeigt hierzu eine Beispielrechnung der Partikelbahnen in einem 3-stufigen Niederdruckverdichter.

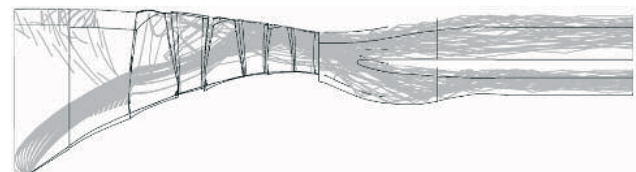


BILD 22. Berechnete Partikelbahnen in einem 3-stufigen Niederdruckverdichter

4. UMSETZUNG UND VALIDIERUNG DER TECHNOLOGIEN IM VERDICHTERRIG

Ein wesentlicher Baustein der Verdichter-Technologieentwicklung ist die Validierung der erarbeiteten Methoden und Designfeatures unter realistischen, triebwerksnahen

Versuchsbedingungen. Zu diesem Zweck wurde bei der MTU ein 8-stufiges Verdichterrig konstruiert, aufgebaut und getestet. Dieser Verdichter wurde mit sehr umfangreicher Instrumentierung und innovativer Messtechnik ausgerüstet, damit die beim Versuchslauf gesammelten Daten eine in dieser Form einmalige, konsistente Basis für die Validierung der Rechenverfahren sowie für die Erweiterung des physikalischen Verständnisses liefern konnten. Weiter wurden verschiedene neu entwickelte Designmaßnahmen implementiert und ihre Wirksamkeit nachgewiesen. Im Folgenden werden der Rigaufbau, einige Designfeatures, die eingesetzte Messtechnik sowie der Prüfstands Aufbau näher beschrieben.

4.1. Rig-Design

Des Design des verwendeten 8-stufigen Verdichters ist ausgelegt für die Anwendung in einem Triebwerk mit ca. 14 klb Schub. Das dabei angestrebte Druckverhältnis von 17 im Auslegungspunkt bedeutet, dass die einzelnen Stufen aerodynamisch hoch belastet ausgeführt werden müssen. Um die damit verbundenen mechanischen, aerodynamischen und aeromechanischen Herausforderungen meistern zu können, wurde der Rotor komplett aus Blisk in Zuganker-Bauweise aufgebaut. Der Querschnitt des Verdichters ist in BILD 23 dargestellt, der fertig montierte Rotor in BILD 24.

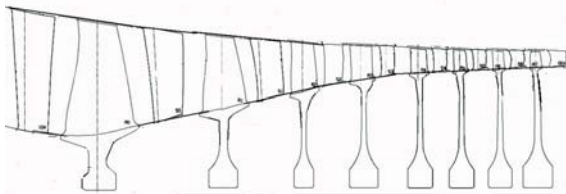


BILD 23. 8-stufiger Verdichter HDV-XL in Blisk-Bauweise



BILD 24. Ansicht des fertig montierten Rotors

4.2. Messtechnik

Zur Gewinnung qualitativ hochwertiger, konsistenter Versuchsdaten für die Toolvalidierung war das Rig besonders aufwändig instrumentiert, dabei kamen ca. 500 stationäre Druck-, 370 Temperatur- und 150 Sondermessstellen zum Einsatz.

4.2.1. Pneumatische Sonden, Traversierungen

Ein Schwerpunkt lag dabei auf der erstmalig umgesetzten Möglichkeit zur Sondentraversierung in insgesamt 10 Messebenen im Bereich der Frontstufe sowie der Stufen 5 und 7 (siehe BILD 25), wobei in bis zu vier Messebenen gleichzeitig traversiert wurde.

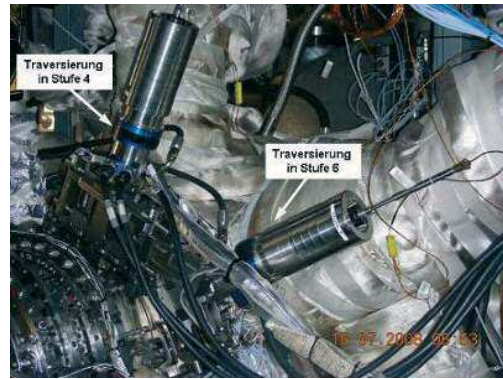


BILD 25. Sondentraversierung im Bereich der Stufen 5 und 7 (im Bild andere Zählweise)

Um in den engen Axialspalten sinnvoll mit Sonden messen zu können und die Beeinflussung der Strömung durch die Sonden minimal zu halten, wurden hierzu spezielle hoch miniaturisierte pneumatische Dreiloch- und Fünflochsonden entwickelt und eingesetzt (BILD 26).



BILD 26. Pneumatische Miniatur-Dreiloch- und Fünfloch-Sonden

4.2.2. Laser-2-Fokus Messungen

Zusätzlich zu den beschriebenen Sondenmessungen wurden in der Frontstufe mittels des Laser-2-Fokus Messverfahrens auch berührungslose Abtastungen des Strömungsfeldes durchgeführt. In Zusammenarbeit mit dem DLR Köln wurden dabei während ca. 100 Verdichterlaufstunden die Strömungsgeschwindigkeiten flächenhaft erfasst.



BILD 27. Versuchsaufbau zur Lasermessung im Bereich der Frontstufe

Der zugehörige Versuchsaufbau kann aus BILD 27 ersehen werden. Durch die Zusammenführung dieser Ergebnisse mit den bereits erwähnten Sondentraversierungen konnten damit erstmalig aus einem triebwerksrelevanten

Verdichterströmungsfeld Informationen zwischen den Schaufelreihen gewonnen werden, die von unschätzbarem Wert für die Validierung der in der MTU eingesetzten CFD-Tools sind.

4.2.3. Berührungsloses Schaufelschwingungs-Meßsystem

Neben der Vermessung des Strömungsfeldes im Verdichter ist die Erfassung der Schaufelschwingungen von entscheidender Bedeutung für die Beurteilung des mechanischen Verhaltens eines Verdichters. Zur Messung der Rotorschaufelschwingungen werden typischerweise Dehnmessstreifen (DMS) verwendet, deren Signale über eine Telemetrie aus dem rotierenden ins ruhende System übertragen werden müssen. Üblicherweise können auf diesem Wege nur einige wenige Schaufeln jeder Stufe instrumentiert werden, da die Übertragungskapazität der Telemetrie und die Verkabelung auf dem Rotor hier Grenzen setzen.

Bei der MTU Aero Engines wurde als Alternative hierzu ein berührungsloses Schaufelschwingungsmesssystem (BSSM) entwickelt, mit dem die Schwingungsinformation sämtlicher Schaufeln einer Rotorstufe mit wenigen, im Gehäuse montierten Messsonden erfasst werden kann. Dabei werden die Durchgangszeitpunkte der Schaufelspitzen an diesen Sonden gemessen und hieraus über mathematische Algorithmen die Schwingungsinformation abgeleitet. Darüber hinaus wird aus den selben Messsignalen der Laufspalt der Schaufeln sowie die Verlagerung des Rotors im Betrieb (Orbiting) bestimmt.

Wesentliche Weiterentwicklungen dieses bereits in verschiedenen Rig- und Triebwerksversuchen erprobten Messsystems konzentrierten sich auf die Erhöhung der Zahl der auflösbaren Schwingungsmoden mittels Software-Timing und auf den Ausbau der Realtime-Fähigkeiten, um alle Messinformationen unmittelbar während der Tests am Prüfstand darstellen zu können.

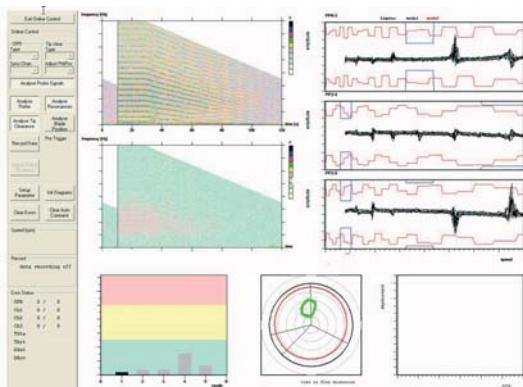


BILD 28. Gemeinsame Darstellung aller wichtigen mechanischen Überwachungsgrößen auf einer Bildschirmseite

Mittlerweile lassen sich so alle wichtigen mechanischen Überwachungsgrößen einer Rotorstufe, wie Resonanzen, Flattern, Minimalspalte und Orbiting, auf einer Bildschirmseite darstellen. Weiterhin wurde auch das Handling der Geräte optimiert, so dass z.B. bei mehrstufigen Verdichtern bzw. Messaufbauten alle Mess-PCs über einen Zentral-PC angesteuert werden können oder auch eine Steuerung via Internet möglich ist.

Die für BSSM verwendeten kapazitiven Sonden (Coulombsonden) wurden ebenfalls weiterentwickelt, um sie auch bei kleinen Verdichtern bzw. Bauräumen und hohen Temperaturen problemlos zur Schwingungsüberwachung und Spaltmessung einsetzen zu können. Hierzu wurden systematisch verschiedene Bauformen (siehe BILD 29), Fertigungsmethoden und Signalkabel untersucht.



BILD 29. Im Projektverlauf untersuchte Sondenbauformen

Die daraus entwickelte optimale Bauform zeichnet sich durch kostengünstige Herstellung und kleine Baugröße aus (BILD 30).



BILD 30. Neu entwickelte Coulombsonde ($\varnothing = 8 \text{ mm}$) nach dem Validierungsversuch

Diese Sonden wurden intensiv getestet, insbesondere durch längere Shakertests bei hohen Schwingbelastungen und gleichzeitigen Temperaturbelastungen bis über 700°C . Weitere Tests bezogen sich auf die Spaltkalibrierung mit diesen Sonden. Auch hier hat sich die neue Bauform bewährt. Abschließend wurden zwei dieser Sonden im HDV-XL-Rig verbaut und konnten so während der Tests mit den bisher verwendeten Sonden verglichen werden. Die neuen Sonden lieferten dabei vergleichbare Signale und zeigten keinerlei Anzeichen für Ausfälle, auch nicht bei Extrembelastungen wie beim Pumpen. Damit wurden die Funktion des neuen Sondentyps für Einsätze in Hoch- und Niederdruckverdichtern abgesichert und gleichzeitig die Sondenkosten um 30% reduziert.

5. VERSUCHSERGEBNISSE

Der 8-stufige Verdichter absolvierte an 45 Versuchstagen insgesamt rund 230 Laufstunden auf dem Verdichterprüfstand der MTU. Nach einer ersten Messkampagne mit Casing Treatment (CT) über dem Rotor der Frontstufe schloss sich eine zweite ohne CT an, um durch den direkten Vergleich beider Konfigurationen die Wirksamkeit des CTs bewerten zu können. Dabei wurden folgende Messungen jeweils mit und ohne CT über dem Rotor der Frontstufe durchgeführt:

- Kennfeldmessungen zur Ermittlung des Einflusses unterschiedlicher Leitradstellungen, Re-Zahlen, Bleedmengen und Radialspalte über den Rotoren,
- Sondentraversierungen (Druck, Temperatur und Winkel) in den Stufen 1, 5 und 7,
- Lasermessungen in der Frontstufe.

Die dabei erfassten Messdaten - mehr als 300 GByte stationäre und mehrere TByte instationärer Daten - ermöglichen neben dem erheblich verbesserten physikalischen Verständnis der Strömungsvorgänge somit eine genaue, quantitative Kalibrierung der in der MTU eingesetzten CFD-Tools.

Beispielhaft ist in BILD 31 ein Vergleich von Geschwindigkeitsfeldern mit und ohne CT hinter dem ersten Rotor dargestellt. Die aus den Laser-Messungen gewonnenen Daten bei einem Teillast-Betriebspunkt nahe der Pumpgrenze zeigen die Wirkung der Rezirkulation in den Gehäusestrukturierungen auf die Rotor-Abströmung. Man erkennt, wie die Blockage an der Gehäusewand, welche mit der Spaltströmung in Verbindung gebracht werden kann, durch das CT deutlich reduziert wird. Die hohe Genauigkeit und die dichte Abtastung des Strömungsfeldes durch das Laser-Messverfahren ermöglicht hier die Wiedergabe der Strömungsphänomene in einer Detailtiefe, wie sie zuvor nur aus CFD-Resultaten bekannt war.

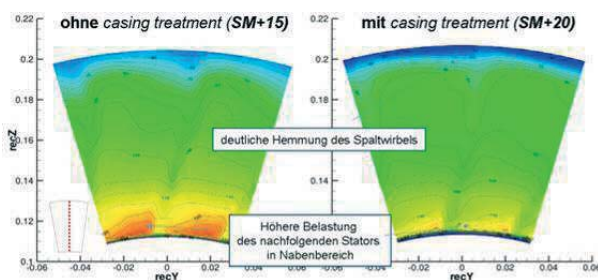


BILD 31. Vergleich zweier Lasermessungen hinter dem Rotor der Frontstufe bei Teillast-Drehzahl

Der positive Effekt des eingesetzten Casing Treatments ist auch an den Stufenkennlinien deutlich erkennbar. BILD 32 zeigt die Druckziffer- und Leistungsziffer-Kennlinien der ersten Stufe bei der gleichen Drehzahl wie zuvor. Die Erhöhung der Arbeitsumsetzung im Laufrad, die durch die Rezirkulation in den Gehäusestrukturierungen hervorgerufen wird, bewirkt eine Aufsteilung der Leistungsziffer-Kennlinie. Die vom CT hervorgerufene Entropiezunahme wird durch Hemmung verlustreicher Strömungsphänomene nahezu kompensiert, so dass auch die Druckziffer-Kennlinie einen steileren Verlauf aufweist. Insgesamt wird so eine deutliche Verbesserung der Stabilität der Stufe erzielt.

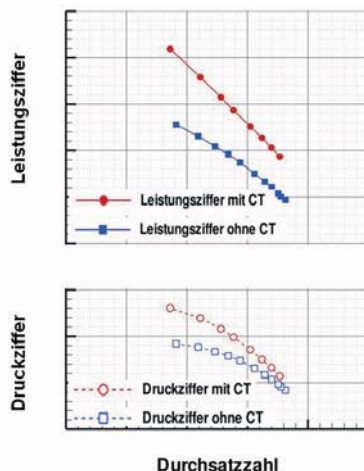


BILD 32. Kennlinie der ersten Stufe in Teillastbetrieb, mit und ohne CT

6. ZUSAMMENFASSUNG

Die Entwicklung von Hochdruckverdichter-Technologien ist ein wichtiger Schwerpunkt der F&E Aktivitäten bei der MTU Aero Engines, um die Produktentwicklung moderner Triebwerke für die nächste Generation von Verkehrsflugzeugen vorzubereiten. Als wesentlicher Baustein wurde in den letzten Jahren das Technologieprogramm „HDV-XL“ durchgeführt.

Das gewählte Vorgehen über die Kombination von Weiterentwicklungen der analytisch-numerischen Auslegungsverfahren mit spezifischen Design-Verbesserungen und ihrer Validierung im Rigtest ermöglichte bedeutende Fortschritte in allen Bereichen. Designkonzepte und Detaillösungen, wie z.B. Erosionsschutzschichten und die Gestaltung von Kavitäten, wurden dabei ebenso intensiv weiterentwickelt wie aerodynamische und strukturelle Rechenmethoden, Instrumentierung und Messtechnik.

Kernstück der Aktivitäten war die Auslegung, Erprobung und Validierung eines hoch innovativen triebwerkstypischen, 8-stufigen Verdichters. Dieser Verdichter wurde mit verschiedenen konventionellen und innovativen Messmethoden untersucht. Neben umfangreichen Traversierungen des Strömungsfeldes mit pneumatischen Miniaturmesssonden wurden auch detaillierte Feldmessungen aller drei Geschwindigkeitskomponenten mit berührungslosen Laser-Messverfahren durchgeführt. Zusätzlich wurde mit ebenfalls berührungslosen Messungen die Schwingungsantwort aller Rotor-Schaufeln erfasst. Die so gesammelten extrem umfangreichen und detaillierten stationären und instationären Messdaten konstituieren einen einzigartigen, konsistenten Datensatz hoher Detailtiefe, der eine wichtige Basis für die Kalibrierung und Validierung der Auslegungsverfahren bei der MTU bildet.

7. DANKSAGUNG

Teile der Arbeiten zur Erlangung der dargestellten Ergebnisse wurden gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages.

8. LITERATUR

- [1] S. Fouvry, "Shakedown Analysis of fretting wear response in gross slip condition", *Wear* 251, pp. 1320-1331, 2001
- [2] Dang Van, Ky, "Introduction to Fatigue Analysis in Mechanical Design by the Multiscale Approach", *High-Cycle Metal Fatigue in the Context of Mechanical Design*, K. Dang Van and I. Papadopoulos, Eds, CISM Courses and Lectures No. 392, 1999, Springer-Verlag, pp. 57-88.
- [3] H. Yuan, J. Liu, "Towards a Quantitative Life Assessment of Shot Peened Parts", Final Report of the MTU Project in the Frame of LuFo3, Project-No.:MB212-2009-004, 2009