

TECHNOLOGIEERPROBUNG FÜR SCHNELLLAUFENDE NIEDERDRUCKTURBINEN FÜR WIRTSCHAFTLICHE UND UMWELTSCHONENDE TRIEBWERKE (Vortrag DGLR-Jahrestagung 2000)

I. Raab, M. Artmeier, G. Wilfert

MTU Aero Engines GmbH
Dachauer Str. 665, 80995 München

ÜBERSICHT

Die Technologiearbeiten zur transsonischen gekühlten Niederdruckturbinen sind ausgerichtet auf das Leitkonzept "Umweltschonender Antrieb, Engine 3E 2010". Diesem Leitkonzept liegt ein Luftstrahltriebwerk mit sehr hohem Nebenstromverhältnis für Anwendungen in künftigen zivilen Verkehrsflugzeugen zugrunde. Die Zielsetzungen dieses Leitkonzeptes sind verbesserte Umweltverträglichkeit durch Reduktion des Lärmpegels und der Schadstoffemission, und erhöhte Wirtschaftlichkeit durch verbesserte Komponententechnologie und Systemoptimierung.

Das hohe Nebenstromverhältnis wird mit einer Vortriebseinheit mit einstufigem Mantelpropfan mit Schaufelverstellung ohne Schubumkehrer realisiert, die über ein Getriebe von einer schnelllaufenden transsonischen Niederdruckturbinen angetrieben wird. Es führt zu einem, gegenüber konventionellen Turbomaschinen deutlich gesteigertem Vortriebswirkungsgrad und damit reduziertem spezifischen Brennstoffverbrauch (SFC). Die niedrigen mittleren Austrittsgeschwindigkeiten reduzieren die Lärmemissionen deutlich.

Anhand von Rigversuchen wurde der Nachweis erbracht, dass hochbelastete, schnelllaufende, transsonische Niederdruckturbinen im Sinne des Engine 3E 2010 Triebwerksleitkonzeptes die geforderten hohen NDT Wirkungsgrade bei gleichzeitig niedriger Lärmerzeugung erreichen können. Hierzu wurde die bereits vorhandene 3-stufige transsonische Niederdruckturbinen eines früheren Demonstratortriebwerks aerodynamisch vermessen und anschließend durch eine Neuprofilierung sämtlicher Schaufelgitter unter Einbeziehung neuester Technologien und Ansätze aus Aerodynamik, Festigkeit und Turbinenkonstruktion auf maximal mögliche Wirkungsgrade bei gleichzeitiger Steigerung der aerodynamischen Belastung gebracht. Die Neuauslegung der Beschaukelung erfolgte unter den Gesichtspunkten voller Flugfähigkeit und den relevanten Lebensduranforderungen.

In einem weiteren Schritt wurden innovative Werkstoffe (TiAl und PM) für neue, höher belastete NDT Beschaukelungen einbezogen. Die Eignung und Herstellbarkeit solcher Schaufeln sollte nachgewiesen, und deren Einführung bis hin zu einem Triebwerkstestlauf vorbereitet werden. Im Rahmen der Neuauslegung der NDT Beschaukelung waren die mit diesen neuen Werkstoffen verbundenen Gewichtseinsparungen aufzuzeigen.

Eine weitere wirkungsvolle Reduktion der CO₂ und NO_x-Emission ist mit einem rekuperativen Triebwerk möglich (Einsatz etwa ab 2020). Dieses von der Europäischen Kommission unterstützte Zukunftskonzept wird im Rahmen des CLEAN Projekts (Component validator for Environmentally friendly Aero-engine) als Demonstratortriebwerk entwickelt und gete-

stet. Dies ermöglicht der MTU, eine schnelllaufende NDT mit noch höheren Eintrittstemperaturen als das E3E Leitkonzept unter realen Triebwerksbedingungen zu validieren und ermöglicht ihr den Einstieg in Design und Integration von Wärmertauschern.

KURZZEICHEN

ADP	Advanced Ducted Propfan
ANTLE	Affordable Near Term Low Emission engine
CLEAN	Component validator for Environmentally friendly Aero-engine
EEFAE	Efficient and Environmentally Friendly Aero-Engine
EULER	European Ultra Low Emission Recuperator-Engine
GTF	Geared Turbofan
LPT	Low Pressure Turbine
LSIP	Large Scale Integrated Platform
SFC	Specific Fuel Consumption
TEC	Turbine Exhaust Case

1. EINLEITUNG

Die Realisierung dieses Leitkonzeptes wird eine erhebliche Verbesserung der Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit von Antrieben für Verkehrsflugzeuge gegenüber Triebwerken der 3. Generation bedeuten. Im einzelnen sollen folgende Ziele erreicht werden:

- Reduktion des spezifischen Brennstoffverbrauchs und damit der CO₂-Emissionen um bis zu 25%
- Erhebliche Reduktion der NO_x-Emissionen um bis zu 85 % relativ zu den gültigen ICAO-Grenzwerten
- Reduktion der Lärmemissionen um bis zu 15dB
- Reduktion der direkten Betriebskosten um bis zu 3%

Grundlage für die angestrebte weitere Effizienzsteigerung der Triebwerke ist ein hoher Vortriebswirkungsgrad, der nur über ein hohes Nebenstromverhältnis erreicht werden kann. Während bei heutigen Triebwerken der 3. Generation Nebenstromverhältnisse von 7-8 Standard sind (PW4084), beinhaltet das neue Triebwerkskonzept Werte von weit über 10. Damit sinkt das Druckverhältnis hinter dem Fan, wodurch das Triebwerk schon auf kleinste Störungen sehr empfindlich reagiert. Dieser physikalischen Grenze kann durch eine betriebsabhängige Winkelverstellung der Fanschaufeln sowie durch die Reduktion der Geschwindigkeit des Fans begegnet werden. Die geringere Strahlgeschwindigkeit bei hohen Nebenstromverhältnissen führt zu einer deutlichen Verringerung des Schubstrahlärms, siehe [1]. Damit erhält der Anteil der Einzelkomponenten Fan, Turbinen und Verdichter am Gesamtärm der Turbinen mehr Bedeutung.

Ein vielversprechendes Konzept für sehr hohe Nebenstromverhältnisse ist der sogenannte Geared Turbofan (GTF), bei dem der Fan über ein Getriebe mit der Niederdruckwelle verbunden ist. Dadurch können die Drehzahlen von Niederdruckverdichter und -turbine deutlich erhöht werden und ein größeres Gesamtdruckverhältnis im Kerntriebwerk realisiert werden. Dies führt zu einem hochbelasteten Expansionssteil, bestehend aus einer supersonischen Hochdruckturbine und einer schnelllaufenden transsonischen Niederdruckturbine. Vor allem die Niederdruckturbine zeichnet sich im Vergleich zum heutigen technologischen Stand durch eine deutlich höhere aero-mechanische und thermische Belastung, eine geringere Stufenzahl und eine reduzierte Baulänge aus. Trotz dieser neuen Herausforderungen sollen die Turbinen die hohen Gesamtwirkungsgrade konventioneller Triebwerke beibehalten und möglichst übertreffen (Bild 1).

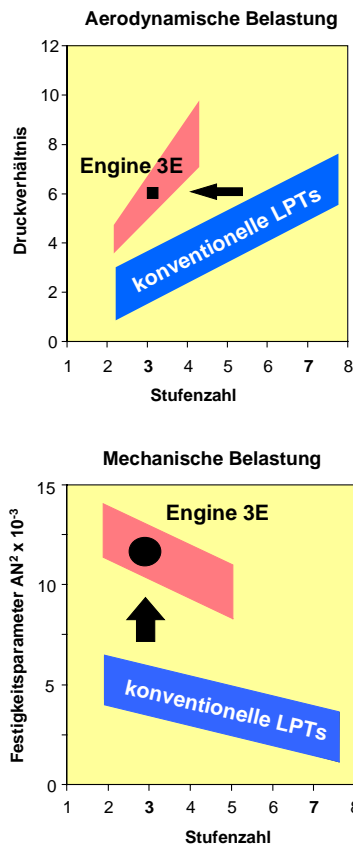


BILD 1. Technologische Herausforderung schnelllaufender transsonischer NDT

Eine Möglichkeit zur Steigerung des thermischen Wirkungsgrades liegt in der Nutzung der thermischen Energie im Abgasstrahl. Durch den Einsatz von Wärmetauscherelementen wird dem heißen Abgas Restenergie entzogen und dem Luftstrom vor der Brennkammer zugeführt. Gleichzeitig erfordert dieser Kreisprozess eine Zwischenkühlung der Luft hinter dem Niederdruckverdichter. Die hohen Verbrennungstemperaturen erfordern außerdem schadstoffarme Verbrennungskonzepte, die eine möglichst vollständige Verbrennung gewährleisten und der Stickoxidbildung entgegenwirken.

Bei diesen Neuentwicklungen muss die mechanische Zuverlässigkeit stets gewahrt und sichergestellt werden. Aus diesem Grund müssen aero-/thermodynamischer Fortschritt und mecha-

nische Absicherung Hand in Hand gehen, d.h., Aero-/Thermodynamik und Mechanik müssen in dem Technologieprogramm gemeinsam weiter entwickelt werden. Bei der Entwicklung neuer Bauarten und Bauweisen ist sicherzustellen, dass die Neuerungen unter dem Aspekt der Systemintegration eingehend analysiert werden. Hierunter wird die Funktion des neuentwickelten Bauteiles in seinem Umfeld mit möglichen Wechselwirkungen verstanden, z.B. aeromechanische Wechselwirkung oder das Verhalten im Fehlerfall.

2. BESCHAUFELUNG SCHNELLLAUFENDER NIEDERDRUCKTURBINEN

Die Realisierung eines Triebwerks nach dem Leitkonzept Engine 3E 2010 hängt in großem Maße von der Möglichkeit ab, im Expansionssteil auf Turbinenkomponenten zurückgreifen zu können, die sich hinsichtlich des Technologieniveaus von den heutigen Komponenten gravierend unterscheiden:

Das große Nebenstromverhältnis und die damit verbundene Leistungsaufteilung bedingt im Kerntriebwerk eine Zunahme des Gesamtdruckverhältnisses. Es resultiert eine sehr hohe Leistungsdichte. Die Niederdruckturbine wird deshalb im Gegensatz zu konventionellen Turbinen transsonisch durchströmt und muss an die Abströmbedingungen (komplexe Verdichtungsstoßsysteme) der Hochdruckturbine angepasst werden. Verbunden mit dem sehr hohen Drehzahlniveau der Niederdruckwelle führt dies zu völlig neuen aerodynamischen, mechanischen und dynamischen Belastungen.

2.1 Auslegungparameter

Ein Vorteil der schnelllaufenden NDT liegt in der drastisch reduzierten Stufenzahl. Damit wird die Baulänge verkürzt und die Teilezahl verringert. Die genaue Schaufelzahl in den einzelnen Gittern wird vor allem von aero- akustischen Gesichtspunkten bestimmt, die zum einen die aerodynamische Belastungsgrenze berücksichtigen, zum anderen aber eine geringe Lärmemission sicherstellen sollen. Hauptursache für die Entstehung des Lärms sind aerodynamische Wechselwirkungen zwischen benachbarten Schaufelreihen, die zu Druckschwankungen an den Schaufeln führen. Grundsätzlich wirken sich große Rotorschaukelzahlen günstig aus, da die entstehenden hohen Frequenzen schneller abklingen. Bei der sogenannten Cut-Off-Auslegung werden die Schaufelzahlverhältnisse zwischen Leit- und Laufschaufeln so gewählt, dass sie der Ausbreitung der Schallmoden in Strömungsrichtung entgegenwirken.

Aufgrund der hohen Drehzahlen ergeben sich extrem hohe statische und dynamische Belastungen für Rotorscheiben und Rotorschaukeln, die sich auf die Schaufelgestaltung ungünstig auswirken. Die gegenüber konventionellen Turbinen in etwa verdoppelten Randlasten erfordern sehr große Profildicken im Nabenbereich, während die hohe Fliehkraftbelastung nur sehr geringe Schaufelquerschnitte im Randbereich zulässt. Die hohen Stufendruckverhältnisse führen darüber hinaus auch bei den Leitschaufeln zu erheblich dickeren Profilschnitten im Gehäusebereich. Bei hohen Drehzahlen wächst auch die Gefahr, dass aerodynamische Schwingungsanregungen in den Bereich der Schaufel eigenfrequenz kommen. Kritische Schaufelschwingungsmoden müssen wiederum über eine entsprechende Schaufelgestaltung unterdrückt werden.

Die detaillierte dreidimensionale Schaufelgestaltung erfolgt nach aerodynamischen Gesichtspunkten unter Berücksichtigung der teilweise extremen Randbedingungen aus Thermomechanik, Dynamik und Werkstoffen (vgl. Bild 2). Die hohe Leistungsdichte der neuen Triebwerksgeneration führt zu transsonischen

Strömungsverhältnissen in fast allen Schaufelgittern der Niederdruckturbinen. Dabei entstehen Überschallgebiete auf den Schaufeloberflächen mit Verdichtungsstößen, die in Wechselwirkung mit der Schaufelgrenzschicht treten. Die Versperrung aufgrund der benötigten großen Profilquerschnitte führt zu einer weiteren Erhöhung der Spitzenmachzahlen auf den Profیلoberflächen. Die Niederdruckturbinen werden außerdem bei deutlich höheren Gastemperaturen betrieben, wobei die Eintrittstemperatur zukünftiger Niederdruckturbinen über der zulässigen Temperatur der zur Verfügung stehenden Materialien liegt, so dass für den zivilen

2.2 Auslegungsverfahren

Um die aerodynamische und mechanische Belastung der Turbinengitter weiter steigern zu können, bzw. die Turbinen auf spezielle Aufgaben optimal abstimmen zu können, müssen dem Ingenieur Auslegungsverfahren zur Verfügung gestellt werden, die die Turbinenströmung, die Mechanik und Dynamik der Beschauelung und die Lärmemission unter den Bedingungen, wie sie bei künftigen Engine 3E 2010 Triebwerken vorherrschen, möglichst genau modellieren und treffsicher vorhersagen.

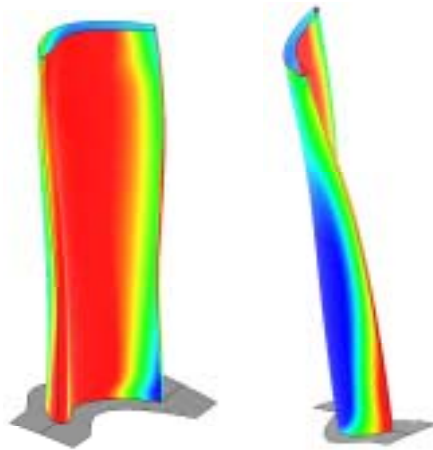


BILD 2. Stark 3D-geformter getaperter Schaufel

Einsatz gekühlte Niederdruckturbinen erforderlich werden. Dies bedeutet zusätzliche aerodynamische Verluste, deren Einfluss auf das Wirkungsniveau beträchtlich sein kann.

Unter diesen erschwerten Bedingungen können die Wirkungsgrade von Niederdruckturbinen nur durch eine Verbesserung der Auslegungsverfahren erreicht werden. Die genannten extremen Anforderungen an die beteiligten Disziplinen beeinflussen einander so stark, dass eine effiziente Auslegungsmethodik erforderlich wird. Sie muss den notwendigen Iterationsprozess unter Berücksichtigung der globalen Kriterien Machbarkeit, Performance, Gewicht und Kosten steuern. Diese geben auch den entscheidenden Ausschlag für die Wahl der Schaufelwerkstoffe und den Einsatz von Voll- oder Hohl-schaukeln.

Im Bereich der Aerodynamik erfordern die hochkomplexen dreidimensionalen Strömungsvorgänge die Integration von reibungsbehafteten 3D-Rechenverfahren in die Auslegung. Nur so können die Stoß-Grenzschicht-Wechselwirkungen und die aus Versperrung und großen Druckgradienten resultierenden starken Sekundärströmungen angemessen erfasst werden. Am leistungsfähigsten sind derzeit 3D-Navier-Stokes-Verfahren, deren Einsatz bei der Schaufelgestaltung aufgrund der gestiegenen Rechnerkapazitäten nun möglich ist. MTU verwendet das Programm Trace. Das Basismodul des Kooperationspartners DLR Köln wurde auf Mehrstufigkeit umgestellt und die numerischen Schemata wurden optimiert, um die Durchlaufzeiten zu verkürzen. Verschieden physikalische Modelle erlauben eine problemabhängige Auflösung des Grenzschichtbereiches sowie die Berechnung von Transitionsvorgängen, vgl. [2]. Pre- und Postprozessing zur Netzgenerierung und zur Ergebnisanalyse wurden an das neue Programm angepasst. Damit können die komplexen Strömungsphänomene in einer Turbomaschine, hier speziell in den Randbereichen der Schaufeln, vorhergesagt werden. Dadurch wird das Risiko einer Turbinenentwicklung minimiert. Dieses Verfahren wird heute routinemäßig in der Auslegung und von Turbinen eingesetzt. MTU ist damit in der Lage, die detaillierte 3D-Analyse einer kompletten 3-stufigen Turbinen mit einer stationären transitionellen Navier-Stokes-Rechnung in 12 Stunden durchzuführen.

In Bild 3 sind die Ergebnisse einer Nachrechnung für ein 3-stufiges Niederdruckturbinen-Rig dargestellt. Die statischen Druckverteilungen entlang dreier Profilschnitte an Leitschaukel 5 zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit den Messergebnissen. In Bild 4 sind exemplarisch die berechneten Wandstromlinien auf Saug- und Druckseite eines Turbinenleitrades erkennbar. Die Ablöseblase auf der Saugseite der Schaufel ist an

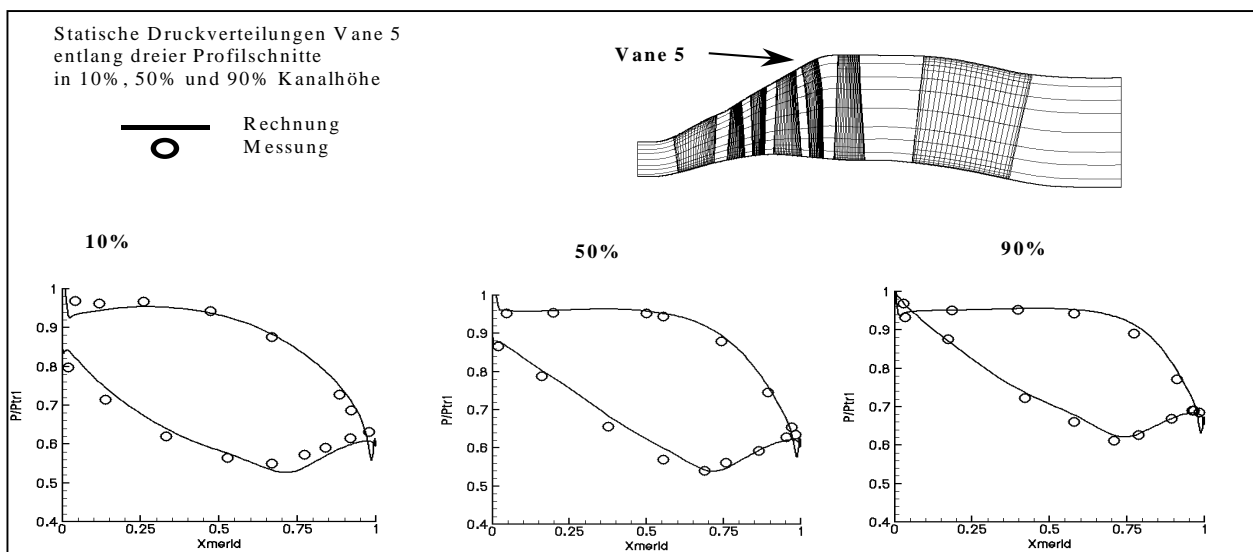


BILD 3. Vergleich der statischen Druckverteilung: Messung -Rechnung

dem konvergenten Stromlinienverlauf gut erkennbar. Ebenso erkennt man auf der Druckseite unten einen Wirbel im Bereich der Vorderkante.

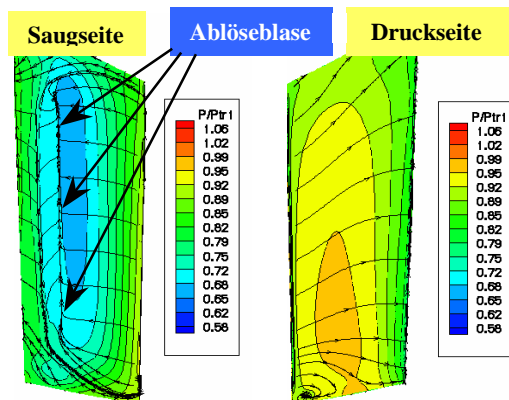


BILD 4. Darstellung der Stromlinien in Wandnähe

Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf der Entwicklung und Verbesserung von Rechenverfahren für die instationäre Aerodynamik, um die lärmarme Auslegung von Beschaufelungen zu ermöglichen. Dazu wurde ein zeitlinearisiertes Euler-Verfahren zur Flutterberechnungen bei Schaufelgittern weiterentwickelt, um es auch zur Berechnung der Schallerzeugung in Turbinengittern einzusetzen. Das Rechenprogramm ermöglicht die Vorgabe von Druck-, Zirkulations- und Entropiestörungen, die von stromauf oder stromab in das Rechenggebiet hineinlaufen, während das Rechenggebiet bezüglich hinauslaufender Störungen reflexionsfrei abgeschlossen ist. Damit wird sowohl die Berechnung der Schallerzeugung des Gitters z. B. infolge des viskosen Nachlaufs eines anderen Gitters, als auch die Berechnung der Ausbreitung von Schallwellen durch das Gitter möglich.

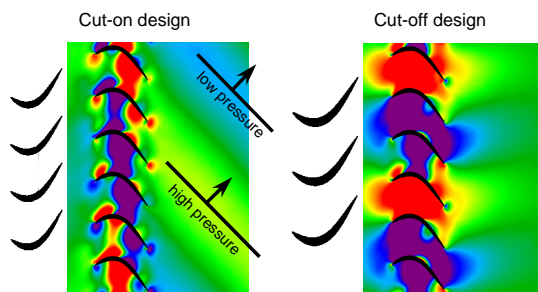


BILD 5. Unterschiedliche Lärmentwicklung für Cut-on- und Cut-off-Auslegung

Für typische Turbinengitter (Rotor und Stator) wurde die Schallerzeugung infolge viskoser Nachläufe in Abhängigkeit von verschiedenen Parametern untersucht. Dabei zeigte sich, dass die Schallpegel stark vom Verhältnis der Schaufelzahlen des nachlauferzeugenden Gitters und des beaufschlagten Gitters abhängen. Einen Sonderfall stellt dabei die Cut-Off-Auslegung dar, bei der sich die Anregung ausbreitungsfähiger Moden vollständig vermeiden lässt (Bild 5).

Als weiterer Schritt wurde ein Rechenverfahren für die Optimierung der mechanischer Integrität entwickelt. Ziel ist es, mit Hilfe von Optimierungsmethoden eine Verschiebung bestimmter Schwingungsformen an einer Schaufel über die Veränderung der Geometrie zu erreichen. Nach Anpassung von Schnittstellen

konnte mit Hilfe des Optimierungsverfahrens eine Sensitivitätsanalyse für Schaufeln erstellt werden. Mit diesem Verfahren erhält man Aussagen welche geometrischen Parameter, wie z.B. die Dicke oder Sehnenlänge des Profils, die Eigenschwingungsformen der Schaufel verändern und damit ein bestimmtes Schwingungsproblem (z.B. 1f Mode) lösen können. Somit kann der Designer gezielt einzelne Schwingungsformen durch Geometrieänderungen beeinflussen.

Angestrebt wird auch eine Verbesserung der Lebensdauermodelle für Laufschaufeln mit Deckbandverspannung und die Weiterentwicklung und Implementierung von Werkstoffmodellen zur Beschreibung viskoplastischer Verformung bei anisotropen Werkstoffen. Das Lösen der Verspannung bei Rotoren mit Deckband wurde untersucht und die wesentlichen Einflüsse ermittelt. Für einen anisotropen Werkstoff wurde unter Mitarbeit der BAM ein Werkstoffmodell aufgebaut. Dieses Modell liefert für einen Testfall Kriechdaten, es bedarf jedoch weiterer Untersuchungen um dieses Modell noch robuster und praxisfreundlicher zu machen.

Zukünftige Auslegungen der Triebwerksturbinen erfordern darüber hinaus eine abgesicherte und effiziente Auslegungsmethodik, um in dem vorgegebenen Zeit- und Kostenrahmen die gesteckten Ziele zu erreichen. Dazu müssen Gestaltungskriterien und Strategien zur Auslegung weiter verbesserter, schnelllaufender, transsonischer Niederdruckturbinen auf eine fundierte Basis gestellt werden. Integrierte Auslegungssysteme sollen dem Ingenieur weitere Unterstützung bei den Auslegungsarbeiten bieten.

3. ERGEBNISSE DER TECHNOLOGIEERPROBUNG

MTU hat bei der Entwicklung schnelllaufender transsonischer Niederdruckturbinen eine führende Rolle eingenommen. Neben eigenfinanzierten Untersuchungen wurden Technologiearbeiten zunächst im Rahmen des vom Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT) unterstützten CRISP Technologieprogramms durchgeführt und dann im nationalen Luftfahrtforschungsprogramm "Engine 3E 2010" konsequent weiterverfolgt, siehe [3, 4]. Abschließende Ergebnisse dieses Technologievorhabens werden im folgenden dargestellt.

3.1 Technologieerprobung durch Turbinen-Rigversuche

Als Basis für eine Neuauslegung wurde eine in 1991 ausgelegte, vorhandene 3-stufige, schnelllaufende, transsonische Niederdruckturbinen eines früheren ADP Demonstratortriebwerks in einem Rig verbaut und Anfang 1997 am Höhenprüfstand des ILA Stuttgart aerodynamisch vermessen (Bau 01). Mit dieser Turbinen wurde ein Wirkungsgrad erreicht, wie er bisher nur von den weltbesten, konventionellen Niederdruckturbinen erreicht wurde. Über diesen Versuchsaufbau wurde bereits auf der DGLR Jahrestagung in 1997 berichtet, siehe[5].

Im Anschluss an diesen Basisversuch wurde eine komplette Neuauslegung (wiederum 3 stufig, schnelllaufend, transsonisch) mit einer dem neuesten Wissens- und Technologiestand entsprechenden Beschaufelung für alle Gitter durchgeführt (Bau 02). Die Neuauslegung sollte alle triebwerksrelevanten Belange berücksichtigen, in einem Rig verbaut und getestet und die Versuchsergebnisse mit denen des Basisversuches Bau 01 verglichen werden.

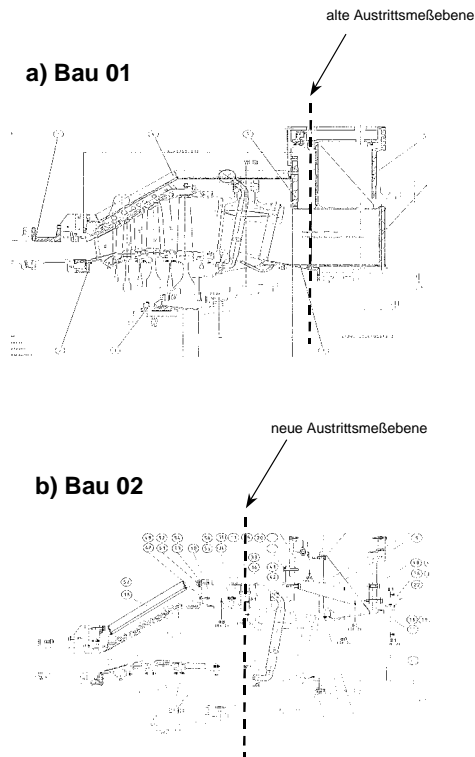


BILD 6. Schnitt durch Rig 446

An die Auslegung wurden folgende Anforderungen gestellt:

- Aerodynamisch anspruchsvolle Auslegung mit gegenüber Bau 01 höherer Belastung. Das Triebwerks-Druckverhältnis wurde von 5.7 (Bau 01) auf 6.3 erhöht, was deutlich höhere Machzahlen und Stufenbelastungen bedeutet.
- Voll flugfähige Auslegung unter Berücksichtigung sämtlicher Flugmissions- und Lebensduranforderungen mit Bezug zu E3E relevanten Triebwerkskonzepten.
- Gleiche Laufschaufelzahl wie im Bau 01, um die Scheiben weiter verwenden zu können
- Der letzte Rotor sollte auch in TiAl und PM darstellbar sein
- Minimierung der Lärmemission

Der Bau 02 entsprach bis auf die neue Beschaufelung dem des Basisversuches. Aufgrund der im Basisversuch gewonnenen Erkenntnisse aus der Versuchsauswertung wurde jedoch das Turbinenausstrittsgehäuse nach hinten verschoben und vor dem Turbinenausstrittsgehäuse bzw. vor den Nachleitschaufeln (NLS) eine neue Messebenen eingeführt. Diese Maßnahme ermöglicht die Beurteilung der Turbine ohne Beeinflussung durch das Turbinenausstrittsgehäuse bzw. den NLS und eine Kontrolle, ob aufgrund der höheren Belastung der Neuauslegung die Strömung auf den Nachleitschaufeln noch anliegt. Bild 6 zeigt den Schnitt durch das Rig für die beiden Aufbauten Bau 01 und Bau 02.

Der Versuch wurde im Juni 1998 wiederum am Höhenprüfstand des ILA Stuttgart durchgeführt. (Bild 7) Die wesentlichen Versuchsinhalte waren:

- Kennfeldmessungen im Drehzahlbereich von 40% - 120% bei Reynoldszahlen von 230.000 - 1.200.000
- Umfangstraversierungen im Austritt bei ausgewählten Lastpunkten
- Spaltmessung mit Coulomb-Sonden über Rotor Stufe 5

- Strömungssichtbarmachung durch Einspritzen von Farbe im Auslegungspunkt



BILD 7. Montiertes Rig

Die erwarteten Leistungswerte der Turbine wurden erreicht, d.h. trotz der im Vergleich zum Basisversuch deutlich gesteigerten aerodynamischen Belastung wurde, das erwartet hohe Wirkungsgradniveau des Basisversuches wieder erreicht. Die Strömungssichtbarmachung auf den Leitschaufeln zeigt kleine Ablösegebiete im Bereich der Hinterkanten. Die Strömungssichtbarmachung auf den NLS zeigte im Vergleich zum Basisversuch, wie erwartet, aufgrund der höheren Belastung ein deutliches Ablösegebiet. Dies hatte aber für die Beurteilung der Turbine und den Vergleich mit dem Basisversuch keine Bedeutung, da die Messebene vor den Nachleitschaufeln liegt.

Im Zuge der numerischen Berechnungen hat sich gezeigt, dass durch die Verwendung der verbesserten Turbulenz-Modelle die Übereinstimmung der Rechnung mit der Messung signifikant gestiegen ist.

Bild 8 zeigt den Vergleich der Strömungsspuren auf der Leitschaufel 4 im Bau B02. In der experimentellen Strömungssichtbarmachung fällt auf, dass je nach betrachteter Schaufel eine mehr oder minder intensive Ablösung nachweisbar ist. Generell zeigen die experimentellen Ergebnisse eine Ablösung an der Hinterkante auf, die auch vom Rechenverfahren ermittelt wird. Die Simulation sagt die Größe der Ablösung etwas zu groß voraus. Sehr interessant ist noch der spiralförmig verwirbelte Ablösepunkt auf der Saugseite bei ca. 20% Kanalhöhe, der in seiner Lage hervorragend von der numerischen Simulation erfasst wird.

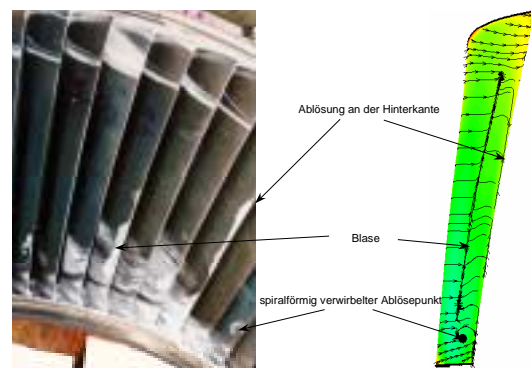


BILD 8. Vergleich der Strömungsspuren auf der Leitschaufel Stufe 4

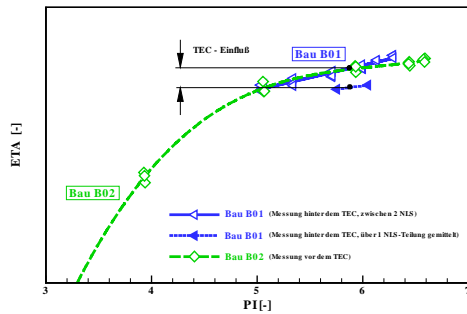


BILD 9. Wirkungsgrade von Bau B01 und B02

Einen Wirkungsgradvergleich der beiden Aufbauten zeigt Bild 9. Es wurde nachgewiesen, dass auch mit schnelllaufenden, hochbelasteten, transsonischen Niederdruckturbinen für zukünftige Propfan-Antriebe mit Getriebe, Wirkungsgrade erreicht werden, wie sie bisher nur von den weltbesten, konventionellen Niederdruckturbinen erreicht wurden. Durch diese Rigversuche liegen exzellente Messdaten vor, die die Kalibrierung und Validierung der Auslegungswerkzeuge für schnelllaufende, hochbelastete, transsonische Niederdruckturbinen technologisch voran bringen und den MTU-Erfahrungsbereich auch für lärmarme Auslegungen beträchtlich erweitern.

3.2 Neue Schaufelwerkstoffe

Für den Einsatz im letzten Rotor wurden alternative Werkstoffen zu Gewichtsreduktion bzw. aus Festigkeitsgründen untersucht.

Schaufeln aus intermetallischen Phasen

Es wurden Schaufelwerkstoffe für Niederdruckturbinen auf der Basis der intermetallischen Phase TiAl (Dichte $3,9 \text{ g/cm}^3$) für Anwendungstemperaturen bis 750 °C entwickelt. Durch den Einsatz dieser Werkstoffe können Gewichtsreduktionen bis zu 40% der Schaufelmassen im Vergleich zu heute eingesetzten Nickel-Superlegierungen für die hinteren Turbinenstufen realisiert werden. Die Nutzung dieses Potentials erfordert die Untersuchung Werkstoffdaten, geeigneter wirtschaftlicher Herstellverfahren, wie Feinguss und Endbearbeitung durch Schleifen, die Entwicklung der geringen Schadenstoleranz, angepasster Konstruktionsprinzipien und eine werkstoffmechanische Modellierung des Verformungsverhaltens. Die relativ geringe Schadenstoleranz in Bezug auf die Anwendbarkeit der TiAl-Werkstoffe für Turbinenlaufschauflern wurde durch betriebsnahe Bauteilprüfungen untersucht.

Untersucht wurde die Kriech- und Ermüdungsfestigkeit im Temperaturbereich bis 750 °C mit gekerbten und rissbehafteten Werkstoffproben. Dabei zeigte sich, dass selbst bei Fehlergrößen bis zu etwa $400 - 500 \text{ }\mu\text{m}$ ausreichende Ermüdungsfestigkeit vorhanden ist (Bild 10). Oxidations- und Korrosionsuntersuchungen ergaben ausreichende Beständigkeit dieses Werkstoffes für den Anwendungsbereich im Heißgas der Turbine.

Auf Basis der Werkstoffdaten wurde eine aerodynamische und strukturmechanische Auslegung durchgeführt, wobei der Sprödigkeit und Gießbarkeit des Werkstoffes durch größere Radien bei Querschnittsübergängen und Aufmassen bei Plattform, Deckband und Dichtfins Rechnung getragen wurde. Ein Tannenbaumdesign kann für den Schaufelfuß nicht verwendet werden,

weil die durch die hohen Kerbfaktoren bedingten Spannungen die Festigkeit des Werkstoffes überschreiten. Als Designkonzept ist für diesen Werkstoff das Schwalbenschwanzdesign anzuwenden, bei dem hohe Kerbspannungen vermieden werden.

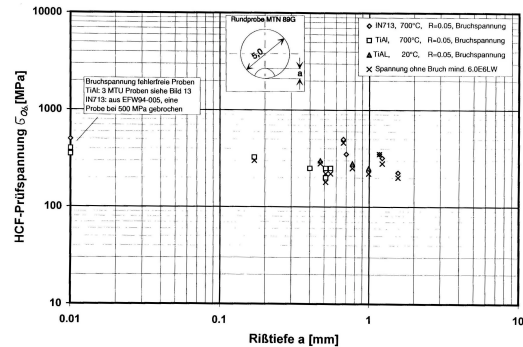


BILD 10. Einfluss der Rissgrößen auf die Dauerermüdungsfestigkeit von TiAl im Vergleich mit Nickel Superlegierungen

Entwickelt wurde ein werkstoffmechanisches Modell für die Kriechverformung und Hochtemperaturermüdung der TiAl Schaufel. Diese Aufgabe wurde von der Ruhr-Universität Bochum, der Universität Gießen, dem Hahn-Meitner-Institut Berlin und dem IFAM Bremen durchgeführt. Als wesentliches Ergebnis der werkstoffmechanischen Modellierung des viskoplastischen Verformungsverhaltens einer TiAl Schaufel ergab sich, daß oberhalb einer bestimmten Höchstspannung die von Mises Vergleichsspannungen nach dem viskoplastischen Modell im Vergleich zur elastischen Berechnung deutlich reduziert sind.

Beim Feingießen der Schaufeln wird die überhitzte TiAl – Legierungsschmelze in vorgewärmte Formschalen gegossen. Die Schaufelgussrohlinge werden durch heiß-isostatisches Pressen nachverdichtet, da sich sonst beim Erstarren der Schmelze Lunker im Inneren der Schaufel bilden. Für den Einsatz im letzten Rotor wurden Testschaufeln aus TiAl hergestellt (Bild 11). Eine Prüfung der Qualität dieser Schaufeln zeigte eine gute Formfüllung und Rissfreiheit, insbesondere in den kritischen Bereichen der Querschnittsübergänge von Blatt zum Deckband bzw. zur Plattform und von der Plattform zum Schaufelfuß. Die Bewertung der Maßhaltigkeit der Schaufeln ergab Abweichungen von der geforderten Geometrie und den Toleranzen, die erst durch ein Heißrichten kompensiert werden konnten. Die Bewertung der Qualität der Gussteile zeigt, dass der Gießprozess für eine Serienanwendung noch weiter zu optimieren ist.



BILD 11. TiAl Turbinenlaufschauflern hergestellt durch Feinguß und endbearbeitet durch Schleifen

Die Kriech- und Ermüdungsbeständigkeit von Einzelschaufeln mit werkstoffgerechter Geometrie, hergestellt durch Feinguss und endbearbeitet durch Schleifen, wurde gemäß den Anforderungen für den Einsatz als Turbinenkomponente untersucht. Als Ergebnis zeigt sich, dass die getesteten Schaufeln für den Einsatz ausreichende Ermüdungsfestigkeit und Lebensdauer für das Schaufelblatt aufweisen.

Laufschaufeln aus Pulvermetall- bzw. Schmiedewerkstoffen

Bei konventionellen Niederdruckturbinen (NDT) werden die Laufschaufeln der letzten Stufen wegen der höheren Betriebstemperaturen und der relativ geringen Schwingbeanspruchung aus Gusslegierungen hergestellt.

Bei einer schnelllaufenden NDT treten an den Laufschaufeln geringere Temperaturen auf, so dass die hohe Kriechbeständigkeit der Gusslegierungen nicht mehr in diesem Maße erforderlich ist. Die höheren Drehzahlen führen aber zu einer Erhöhung der Mittelspannung bei der Schwingbeanspruchung.

Neuartige Werkstoffe und Herstellverfahren wie intermetallische Phasen oder die Pulvermetallurgie bieten das Potential für eine signifikante Verringerung der Schaufelgewichte und somit der Scheibenrandlasten bzw. für eine Verbesserung des Schwingverhaltens, insbesondere für Laufschaufeln in den Austrittsstufen der Niederdruckturbinen. Es handelt sich dabei um höher mittelspannungsbelastbare sowie leichtere und spezifisch steifere Werkstoffe.



BILD 12. Pulvermetallschaufel, hergestellt durch heiß-/isostatisches Pressen in einer Stahlkapsel

Für den Einsatz ist sowohl eine Hohl- als auch eine Vollschaufel verwendbar. Die Herstellung einer Hohl- oder Vollschaufel kann nur pulvermetallurgisch erfolgen. Der Ablaufplan dafür umfasst folgende Schritte:

- Anwendung der Kapseltechnologie
- Kompaktieren durch Heißisostatpressen (HIP)
- Prozessoptimierung und Festlegen der spez. Prozessparameter
- Nachweis der geforderten mech. Eigenschaften
- ECM-Bearbeitung in Ringraum.

Zur Herstellung der Schaufelrohnteile wurden mehrteilige Blechkapseln unter Berücksichtigung des zu erwartenden Schwundmaßes hergestellt. Die Kapsel-einzelteile wurden in einer Vorrichtung zusammenschweißt, entsprechend dem Stand der Technik behandelt, mit Nickelbasislegierungspulver gefüllt und vakuumdicht verschlossen. In Bild 12 ist eine Kapsel mit Kern abgebildet. Um das Blattprofil vermessen zu können, wurden drei Fixierstifte angeschweißt. In diesem Zustand wurde das Schaufelblattprofil in 5 Ebenen aufgezeichnet.

Parallel zur Rohteilherstellung wurden Probekörper gefertigt, mit denen der Werkstoffverbund Schaufelwerkstoff - Innenkapselwerkstoff zur Optimierung und Eigenschaftsermittlung geprüft wurde. Im Zuge der Werkstoffverbundoptimierung wurden die Wärmebehandlungsparameter der jeweiligen Werkstoffpaarung mit dem Ziel variiert, sowohl für Kriech- als auch HCF-Belastung optimale Eigenschaften zu erhalten.

Die Herstellung einer Vollschaufel erfolgte nach folgenden Arbeitsschritten:

- Schmieden einer kleinen Schaufel mit Deckband
- Schmieden einer großen Schaufel mit hohen Umformgraden
- Gefügeoptimierung
- Nachweis der mech. Eigenschaften

Das Schmieden der Nickelbasislegierung U720LI stellt keine grundlegende Neuerung dar und ist aus der Turbinen-Scheibenherstellung bekannt. Das Problem beim Schaufel-schmieden liegt in den veränderten Oberflächen-Volumenverhältnissen und der daraus resultierenden Rissbildungsneigung bei der Umformung.

Schaufeln wurden durch Schmieden hergestellt. Sie weisen über den gesamten Querschnitt ein gleichmäßiges, feines Gefüge auf. Eine gleichmäßige Korngröße ist sehr wichtig, da diese stark die Schwingfestigkeits- und Kriecheigenschaften beeinflusst.

Eine bei MTU durchgeführte Sonderwärmebehandlung führte über wesentliche Bereiche des Schaufelquerschnitts zu einer Korngröße von ASTM 2 bis 4. Aus dem Schaufelfuß wurden Probestäbe zur Ermittlung der Kriech- und HCF-Eigenschaften entnommen.

Die dynamische Prüfung wurde in Form einer Umlaufbiegeprüfung ($R=-1$; RT) und einer HCF-Prüfung ($R=0$; 650 °C) durchgeführt. Gegenüber den herkömmlichen Gusslegierungen ist eine deutliche Anhebung der Mittelspannung um ca. 50% zu erkennen (Bild 13). Im Zugversuch bei Raumtemperatur und 650 °C werden die für Scheibenanwendung spezifizierten Festigkeits- und Duktilitätswerte erreicht. Im Kriechversuch wurde an geschmiedetem Material mit der Korngröße 2 - 4 bei Prüf-temperaturen von mind. 700 °C, sowie einer Mindestspannung von 350 MPa bei mehr als 1000 Stunden Laufzeit, eine maximale plastische Längenänderung unterhalb der zulässigen Dehnung gemessen.

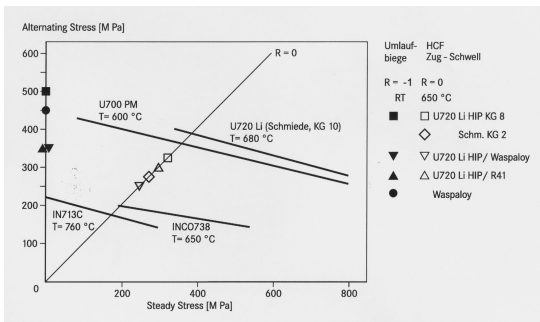


BILD 13. Ergebnisse aus den Probenversuchen: Dynamische Prüfung von U720LI

4. TECHNOLOGIEINTEGRATION IN EIN WÄRME-TAUSCHER-TRIEBWERKSKONZEPT

Eine weitere signifikante Reduktion des Treibstoffverbrauchs ist mit einem Triebwerkskonzept zu erreichen, das mit einer Zwischenkühlung im Verdichter und einem Wärmetauscher im Abgasstrahl ausgestattet ist (Bild 14). Dieses Triebwerkskonzept EULER (European Ultra Low Emission Recuperator-Engine) basiert auf einem Getriebefan mit einer schnelllaufenden Niederdruckwelle. Wie aus Bild 15 zu erkennen ist, kann der thermische Wirkungsgrad durch die Zwischenkühlung im Verdichter und einer Ausnutzung der Energie des Abgasstrahls deutlich verbessert werden. Dieses kombinierte System zeigt erhebliche Vorteile gegenüber dem einfachen Kreisprozess und dem Kreisprozess mit Wärmetauscher, da durch den Zwischenkühler der thermische Wirkungsgrad nur geringfügig vom Druckverhältnis abhängig ist und sich ein Optimum im Bereich 25 bis 30 einstellt. Durch die Zwischenkühlung verringert sich nicht nur der Leistungsbedarf des Verdichters, sondern dies ermöglicht auch eine Absenkung der Verdichterendtemperatur. Dadurch entsteht ein größerer Temperaturunterschied zwischen Verdichterendluft und Abgasstrahl, was zu einer effizienteren Temperaturerhöhung vor der Brennkammer führt. Da Zwischenkühler und Abgaswärmetauscher zusätzliches Gewicht und Kosten bedeuten, ist das Design, d.h. thermische (Austauschgrad) - und aerodynamische (Druckverluste) Effizienz und die Integration dieser Komponenten eine neue technologische Herausforderung.

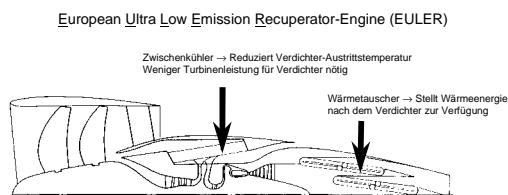


BILD 14. Leitkonzept Wärmetauscher-Triebwerk (EULER)

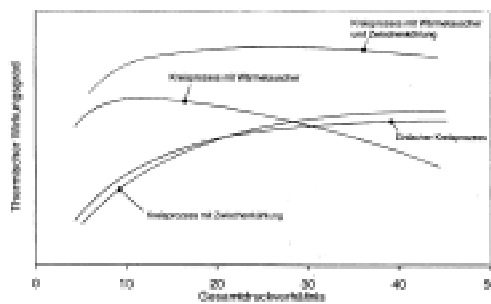


BILD 15. Thermischer Wirkungsgrad über Gesamtdruckverhältnis bei verschiedenen Kreisprozessen

Das 5. EU-Rahmenprogramm für Forschung und Technologieentwicklung fördert neben den einzelnen Technologievorhaben auch Technologieplattformen, sogenannte LSIP's (Large Scale Integrated Platform). Das größte bisher von der EU geförderte Vorhaben ist die Technologieplattform EEFAE (Efficient and Environmentally Friendly Aero Engine) mit einem Volumen von 100 Mio € Dieses Programm startete im März diesen Jahres und hat eine Laufzeit von 4 Jahren. Es beinhaltet zwei Triebwerksplattformen:

- Das ANTLE (Affordable Near-Term Low Emissions) wird von Rolls-Royce geleitet und basiert auf einem 3 Wellen Triebwerkskonzept. Dieses ist neben der Verbesserung der einzelnen Module auch auf eine starke Reduzierung des „Time to Market“ ausgerichtet und wird daher die notwendige Technologie für Triebwerke ab 2008 zur Verfügung stellen.
- Das CLEAN (Component vaLidator for Enviromentally friendly Aero eNgin) wird von MTU und Snecma geleitet und basiert auf dem oben erläuterten Triebwerkskonzept EULER. Snecma entwickelt das Kerntriebwerk zusammen mit Fiat und Techspace Aero. Neben einem neuen Hochdruckverdichter soll eine neue Brennkammer eingebaut werden, die den NO_x-Ausstoß signifikant reduziert. Die schnelllaufende Niederdruckturbine wird von der MTU entwickelt, wobei Volvo das Gehäuse und das Austrittsleitrad beisteuert. Weiterhin ist MTU für den Wärmetauscher und die Wärmetauscherintegration verantwortlich.

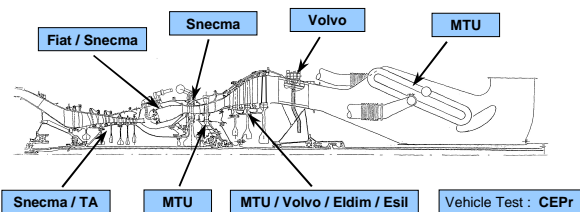


BILD 16: CLEAN -Triebwerk

Die aufgestellten Ziele für beide Triebwerke sind:

	ANTLE 2008	CLEAN 2015
• Reduzierte CO ₂ -Emission	12%	20%
• Reduzierte NO _x -Emission im Vergleich zu ICAO 96	60%	80%
• Reduzierte Betriebskosten	20%	30%
• Verbesserte Betriebssicherheit	60%	60%
• Reduzierte Time to Market	50%	50%
• Reduzierte Lebensdauer	30%	30%

Basierend auf der bereits erläuterten Technologieentwicklung für schnelllaufende Niederdruckturbinen im Rahmen des E3E Programms wird für das CLEAN-Triebwerk eine schnelllaufende Turbine entwickelt, die für noch höhere Turbineneintrittstemperaturen und ein weiter gesteigertes Druckverhältnis ausgelegt ist. Da in den Tests, die bei CEPr in Frankreich stattfinden werden, die Turbine unter realen Bedingungen getestet wird, kann hier das mechanische Verhalten genau analysiert werden.

Mit diesem Vehikel wird nicht nur der Einstieg in ein Wärmetauscher-Triebwerk vorbereitet, sondern auch die bisherigen Technologieentwicklung des Getriebefans sinnvoll fortgeführt.

5. ZUSAMMENFASSUNG

Die hohen Anforderungen an Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit für die nächste Triebwerksgeneration erfordern die Entwicklung neuer Konzepte für das Gesamttriebwerk. Ein vielversprechender Ansatz stellt der sogenannte Geared Turbofan (GTF) für hohe Nebenstromverhältnisse dar, der durch eine sehr hohe Leistungsdichte im Kerntriebwerk gekennzeichnet ist. Im Expansionsteil resultiert eine transsonisch durchströmte, schnelllaufende Niederdruckturbinen mit völlig neuen aerodynamischen, mechanischen und dynamischen Belastungen. In diesem Beitrag werden die technologischen Anforderungen in Bezug auf die Auslegung verlustarmer Beschaukelungen für schnelllaufende Niederdruckturbinen diskutiert und der Stand der Verfahrensentwicklung dargestellt.

MTU ist schon seit Jahren erfolgreich an der Technologieentwicklung für den GTF beteiligt. Aktuelle Messergebnisse von Rigversuchen im Höhenprüfstand belegen, dass auch mit diesen hochbelasteten Komponenten die Wirkungsgrade konventioneller Niederdruckturbinen erreicht werden. Dies ist vor allem auf eine Verbesserung der Auslegungswerkzeuge zurückzuführen, die es ermöglichen, auch komplexe 3-dimensionale Strömungsvorgänge aerodynamisch zu optimieren. Die Einbeziehung neuerer Werkstoffe in die Untersuchungen macht auch die hohen mechanischen und thermischen Anforderungen beherrschbar. Diese Technologien sollen nun in einem Demonstratortriebwerk integriert werden. Die Eckdaten und Möglichkeiten dieser neuen Technologieplattform werden ebenfalls ausführlich dargestellt. Damit ist MTU auch weiterhin führend an der Entwicklung zukunftsweisender Antriebe für Verkehrsflugzeuge beteiligt.

6. LITERATUR

- [1] F. Kennepohl, P. Traub, R. Gumucio, K. Heinig
„Influence of Bypass Ratio on Community Noise of Turbofans...“, First Jointed CEAS/AIAA Aeroacoustics Conference, CEAS/AIAA-95-135, München, Germany, 1995
- [2] J. Gier, S. Ardey, A. Heisler
„Analysis of Complex Three-Dimensional Flow in a Three-Stage LP Turbine by means of Transitional Navier-Stokes Simulation“, ASME Paper 2000-GT-645
- [3] K. Broichhausen, F. Malzacher, R. Niehuis
„Schnelllaufende Niederdruckturbinen für neuzeitliche Antriebe“, DGLR Jahrestagung 1990, Friedrichshafen, DGLR 93-30-045
- [4] J. Sieber

„Das Engine 3E Technologieprogramm der MTU“,
DGLR Jahrestagung 1996, Dresden, DGLR JT96-008

- [5] R. Niehuis, K. Rüd
„Entwicklung schnelllaufender Niederdruckturbinen für künftige wirtschaftliche und umweltschonende ADP Triebwerke“, DGLR Jahrestagung 1997, München, DGLR-JT97-156

Anmerkung

Teile der diesem Bericht zugrundeliegenden Arbeiten wurden mit Mitteln des Bundesministeriums für Forschung und Technologie unter den Förderkennzeichen 20T9505 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren