

EXPERIMENTELLE UND NUMERISCHE UNTERSUCHUNGEN AN EINEM UHBR-FAN

A. Giebmanns, A. Schmitz, E. Nicke, R. Schnell, T. Dabrock,
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Linder Höhe, 51147 Köln, Deutschland

Zusammenfassung

Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) hat einen UHBR-Fan (Ultra-High Bypass Ratio) entworfen, der für lärm- und verbrauchsarme Triebwerke mit einem hohen Nebenstromverhältnis sowie einer niedrigen Fandrehzahl ausgelegt und Gegenstand weitreichender experimenteller und numerischer Untersuchungen ist. Abgeleitet wurde er von einem ebenfalls am DLR und unter der Leitung von SNECMA (Frankreich) entwickelten UHBR-Fan aus dem SILENCE(R)-Programm, eines großen europäischen Forschungsprojekts zur Reduktion von Flugzeuglärm und -treibstoffverbrauch.

Ein Modell des DLR-Fans im Maßstab 1:3 wurde zunächst am Mehrstufen-Zweiwellen-Verdichterprüfstand (M2VP) des Instituts für Antriebstechnik am Standort Köln-Porz im Hinblick auf die aerodynamischen Leistungsdaten und das Betriebsverhalten getestet, begleitend dazu wurden ebenfalls erste numerische Analysen des aerodynamischen Verhaltens durchgeführt.

Da der Schwerpunkt der Versuche auf der Überprüfung der in der Auslegungsphase festgelegten Leistungsparameter lag, wurden besonders die Verteilungen der Strömungsgrößen statischer und Totaldruck sowie Totaltemperatur vor und hinter dem Fan gemessen. Zur ersten Orientierung und zur Unterstützung der Messung diente ein auf Basis des aus der Auslegungsphase vorhandenen groben Rechennetzes numerisch erstelltes Fankennfeld. Für eine detaillierte Analyse der Strömungsvorgänge war allerdings eine Nachrechnung einzelner Betriebspunkte mit Hilfe eines weiteren, deutlich feineren Rechennetzes und der in der Messung ermittelten Randbedingungen hilfreich.

Anhand der experimentellen Daten konnte das Erreichen der Auslegungsziele nachgewiesen werden, ein Vergleich mit den numerischen Daten bestätigte außerdem den Einsatz numerischer Methoden während der Auslegungsphase und verdeutlichte die Effizienz von numerischen Simulationen bei Wahl eines geeigneten Aufbaus der Rechnung.

1. NOMENCLATUR

Abkürzungen

ACARE	Advisory Council for Aeronautics Research in Europe
CO ₂	Kohlendioxid
Cr	Chrom
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
F	Biegeschwingung
ISA	Internationale Standardatmosphäre
M2VP	Mehrstufen-Zweiwellen-Verdichterprüfstand am DLR Köln
NO _x	Stickoxide
Ni	Nickel
PIV	Particle Image Velocimetry
S1	Bezeichnung einer Schnittebene des Rechennetzes
S2M	Bezeichnung einer Schnittebene des Rechennetzes
SILENCE(R)	Significantly Lower Community Exposure to Aircraft Noise (Europäisches Forschungsprojekt)
SRA	Strategy Research Agenda
T	Torsionsschwingung
TRACE	Turbomachinery Research Aerodynamics Computational Environment (Strömungslöser am DLR)
UHBR	Ultra-High Bypass Ratio

Lateinische Buchstaben

D	[%]	relative Verschiebung
Ma	[-]	Machzahl
\dot{m}	[kg/s]	Massenstrom
n	[1/min]	Drehzahl
p	[Pa]	Druck
P	[W]	Leistung
T	[K]	Temperatur

Griechische Buchstaben

η	[-]	Wirkungsgrad
κ	[-]	Isentropenexponent
λ	[-]	Nebenstromverhältnis
Π	[-]	Totaldruckverhältnis

Subskripte

0	Auslegungs-
aus	Austrittsgröße
ein	Eintrittsgröße
is	isentrop
max	maximal
n	auf ISA-Bedingungen normiert
red	reduziert
ref	Referenzgröße
s	statisch
t	Totalgröße

2. EINLEITUNG

Steigende Passagierzahlen und Transportanfragen bewirken, dass der weltweite Flugverkehr stetig wächst. Doch nach heutigem Technologiestand werden bald die Grenzen erreicht und eine weitere Steigerung schwer zu realisieren sein. Auf der einen Seite sind die Kapazitäten von Flughäfen und -routen nahezu erschöpft und es werden immer größere Anforderungen an die Sicherheit und Wirtschaftlichkeit gestellt, zum anderen stellen die bevorstehende Knappheit an Brennstoffen sowie die steigende Belastung der Umwelt durch Lärm- und Schadstoffemissionen große Herausforderungen dar und stehen immer mehr im Interesse der Öffentlichkeit.

Um den Problemen des steigenden Flugverkehrs gewachsen zu sein, sind weitreichende Forschungen in den unterschiedlichsten Fachbereichen notwendig, deren Ziele in Europa in der „European Aeronautics: A Vision for 2020“ und der Strategy Research Agenda (SRA), die durch das im Jahre 2001 gegründete Advisory Council for Aeronautics Research in Europe (ACARE) erarbeitet wurden, festgehalten sind. Im Bereich der Umwelteinflüsse hat man sich auf eine Reduktion des außerhalb wahrnehmbaren Lärms um 50%, eine Verringerung des Brennstoffverbrauchs und der CO₂-Emissionen um ebenfalls 50% und des ausgestoßenen NO_x um 80% geeinigt.

Da das Triebwerk dabei einen besonders großen Einfluss hat, konzentrieren sich die Forschungen gerade auf das Gebiet der Antriebstechnik. Zwar haben sich hier im Laufe der Jahre schon große Erfolge erzielen lassen, dennoch werden für die Zukunft neue weitreichende Verbesserungen erwartet. Erarbeitet werden sollen sie in verschiedenen Forschungsprojekten, zu denen etwa das SILENCE(R)-Programm gehört, ein großes europäisches Lärmforschungsprogramm, in dem sich über 50 Unternehmen zusammengeschlossen haben, um Flugzeuglärm und -treibstoffverbrauch entscheidend zu senken.

Teil der Untersuchungen dieses Programms ist der vom DLR sowie den Kooperationspartnern SNECMA (Frankreich) und COMOTI (Rumänien) entwickelte UHBR-Fan, der zum einen durch seine niedrige Fandrehzahl und zum anderen durch das von ihm repräsentierte große Nebenstromverhältnis zu einer geringeren Lärmemission und einem reduzierten Brennstoffbedarf des Triebwerks beitragen soll. Die wichtigsten Parameter und Ziele während der Auslegung waren:

- hohes Nebenstromverhältnis des Gesamttriebwerks ($\lambda=12$) zur Reduktion des Brennstoffverbrauchs und zur Steigerung der Effizienz
- niedrige Fandrehzahl zur Reduktion des Lärms, der durch mit Verdichtungsstößen einhergehenden Druckschwankungen erzeugt wird, Auslegungsmachzahl an der Schaufelspitze mit $Ma=1,05$ vorgegeben
- im Vergleich zu heutigen Flugzeugtriebwerken ein um 10% höherer spezifischer Massenstrom
- hohe Wirkungsgrade im gesamten Betriebsbereich, besonders für den Auslegungspunkt im Reiseflug

Neben dem Fan, der im Rahmen des SILENCE(R)-Projektes in Frankreich untersucht wurde, entschied man sich am DLR, in Anlehnung an die SILENCE(R)-Konfiguration einen weiteren Fan mit vergleichbarer Aerodynamik für eigene Versuchszwecke zu entwerfen (siehe BILD 1). Die mechanischen Eigenschaften konnten dabei deutlich verbessert werden, insbesondere wurde der hier realisierte Rotor für eine maximale Betriebsdrehzahl von 108% qualifiziert. Da der vorgesehene Prüfstand keine Strömungsteilung aufweist (vgl. BILD 3), musste auf eine Simulation des Kernstromes verzichtet werden und die für die SILENCE(R)-Konfiguration eingesetzten Statorn konnten nicht mehr verwendet werden. Für den Stator war demnach eine Neukonstruktion notwendig, gewählt wurde schließlich eine ungepfeilte Geometrie mit 38 Schaufeln. Die vergleichsweise geringe Schaufelanzahl und der Verzicht auf eine Pfeilung des Stators begründet sich darauf, dass neben aeroelastischen Experimenten Versuche zur aktiven Lärminderung durchgeführt wurden, für die der Fan nicht lärmoptimiert sein sollte. Vielmehr konnte in den Versuchen eine deutliche Lärmemission ausgemacht werden, die mit Hilfe eingespielter Schallwellen reduziert werden sollte (vgl. [1]).

Eine weitere geometrische Vorgabe ergab sich durch die Abmessungen des Prüfstands, die zur Folge hatten, dass das UHBR-Rig in dem gleichen Maßstab wie die SILENCE(R)-Konfiguration von 1:3 gefertigt wurde. Damit reichte der Nabendurchmesser nicht mehr für die klassische Verdichterbauform, bei der die einzelnen Rotorblätter mit Schwalbenschwanzbefestigungen mit der Nabe verbunden werden, aus. Stattdessen musste auf die Blisk-Bauform zurückgegriffen werden, bei der der Fan an einem Stück aus einem Titanblock gefertigt wird. BILD 1 zeigt das im Prüfstand installierte Modell, die wichtigsten Fanparameter sind in TAB 1 aufgelistet.



BILD 1. Installiertes UHBR-Rig

Schaufelanzahl Rotor	[-]	22
Schaufelanzahl Stator	[-]	38
Nabenverhältnis am Rotor	[-]	0,275
Auslegungsdrehzahl	[1/min]	7846
rel. Machzahl (Schaufelspitze)	[-]	1,05
meridionale Machzahl	[-]	0,7

TAB 1. Auslegungsdaten des UHBR-Fans

3. KENNFELDMESSUNGEN

3.1. Verdichterprüfstand M2VP

Die Messungen zur Erstellung des Fankennfeldes wurden am Mehrstufen-Zweiwellen-Verdichterprüfstand des DLR am Standort Köln-Porz durchgeführt. Dieser eignet sich dank seines Wellensystems aus einer Hohl- und einer Kernwelle nicht nur zur Untersuchung ein- oder mehrstufiger Verdichter, sondern ebenfalls für Kombinationen aus Niederdruck- und Hochdruckverdichtern, die bei unterschiedlichen Drehzahlen oder gegenläufig betrieben werden können. Die Bandbreite der Verdichteruntersuchungen reicht von der Vermessung des Verdichterkennfeldes, der Ermittlung der Pumpgrenze über detaillierte Strömungsfeldmessungen bis hin zu Sonderanwendungen, wie z.B. der aktiven Lärmkontrolle an Fans oder an gegenläufigen Propfans.

Der zu vermessende Verdichter wird durch zwei Elektromotoren mit einer Leistung von je $P=5$ MW bei maximaler Drehzahl, die über eine Getriebekombination einen oder beide Stränge des Wellensystems bedienen, angetrieben. Beide Motoren können unabhängig voneinander in Drehzahl und -richtung eingestellt werden. Die maximal mögliche Drehzahl beträgt dabei je Motor $n_{\max}=2000$ 1/min, wodurch sich auf der Abtriebsseite in Abhängigkeit von der verwendeten Getriebekombination Drehzahlen von bis zu $n=20000$ 1/min erreichen lassen.

Der laufende Verdichter zieht über einen Ansaugturm Luft aus der Umgebung ein, die in eine Beruhigungskammer geleitet wird. Hier kommt es durch die extrem langsamen Strömungsgeschwindigkeiten zu einem Turbulenzabbau in der Strömung, woraus sich ein gleichmäßiges Strömungsfeld vor der Düse einstellt. In der Düse wird die Luft dann beschleunigt und trifft in der Messstrecke schließlich auf den Verdichter. Hinter diesem schließen sich eine Drossel, deren Querschnitt während der Messung zur Einstellung verschiedener Betriebspunkte variiert wird, und ein Luftleitungssystem an, dessen Strömungsführung den geforderten Strömungsbedingungen angepasst wird.

Soll ein Verdichter mit kleinem Totaldruckverhältnis, wie etwa der UHBR-Fan, bzw. hohen Massenströmen von bis zu $\dot{m}=180$ kg/s untersucht werden, so reicht eventuell der hinter dem Verdichter aufgebaute Druck nicht aus, um die Strömung aufgrund der Rohrleitungsverluste durch den Kühler zu führen. Zur Unterstützung kann daher ein Hilfsgebläse mit einer Leistung von $P=1,8$ MW eingesetzt werden, das die Luft hinter dem Verdichter absaugt (vgl. BILD 2).

3.2. Instrumentierung

Zur Ermittlung des Kennfeldes werden verschiedene Messsonden benötigt, ihre Positionen im Strömungskanal relativ zu den Schaufelreihen zeigt BILD 3. Dabei werden besonders die Daten aus den Grenzschichttrecken vor dem Rotor sowie aus den Sondenkämmen hinter dem Stator benötigt. Da die angesaugte Luft gleichmäßig und rotationssymmetrisch in den Verdichter strömt, genügen zwei Grenzschichtkämme, die mit jeweils zehn

Sondenköpfen zur Messung des Totaldruckes ausgestattet sind. Hinter dem Verdichter muss dagegen mit einer ungleichmäßigen Strömung gerechnet werden, weshalb hier acht Kämme über den Umfang verteilt sind. Jeder Kamm besteht aus je fünf NiCrNi-Totaltemperatur- und Totaldrucksonden, die in radialer Richtung alternierend angebracht sind. Um für jede der zehn radialen Positionen Werte für Totaldruck und -temperatur zu erhalten, werden zwei Kammversionen verwendet, von denen je vier Kämme vorliegen.

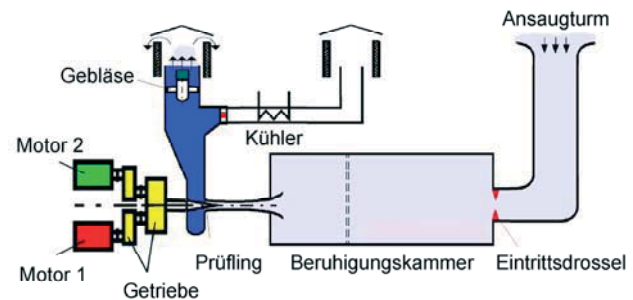


BILD 2. Strömungsführung am M2VP für Verdichter mit kleinem Totaldruckverhältnis

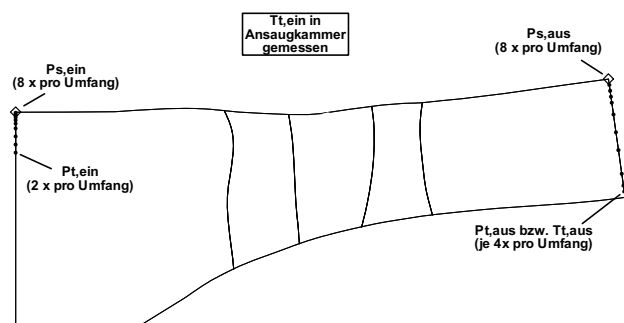


BILD 3. Positionen der Messstellen zur Ermittlung der Kennfeldparameter

Neben den Sondenkämmen vor und hinter dem Fan existieren eine Reihe weiterer Messstellen, so werden z.B. für die Ermittlung des Kennfeldes zusätzlich die Totaltemperatur in der Ansaugkammer und der statische Druck an den Positionen der Sondenkämme benötigt (vgl. BILD 3). Des Weiteren sind etwa Sonden zur Messung des Rotorspaltes oder der Verteilung des statischen Druckes entlang der Gehäuse- und Nabenkontur vorgesehen, BILD 3 beschränkt sich allerdings auf die zur Ermittlung des Kennfeldes benötigten Messstellen.

3.3. Versuchsauswertung

Aus den in Kapitel 3.2 beschriebenen Strömungsparametern werden die Leistungsdaten der Stufe berechnet, besonders interessant sind dabei:

- Reduzierter Massenstrom

$$(1) \quad \dot{m}_{red,n} = \dot{m} \cdot \frac{p_{t,ref}}{p_{t,ein}} \cdot \sqrt{\frac{T_{t,ein}}{T_{t,ref}}}$$

mit \dot{m} als Gesamtmassenstrom, der anhand der gasdynamischen Grundgleichungen aus den

gemessenen Größen in der Eintrittsebene ermittelt und auf die Referenzgrößen der Internationalen Standardatmosphäre (ISA), $p_{t,ref}=101325 \text{ Pa}$ und $T_{t,ref}=288,15 \text{ K}$, bezogen wird.

- Totaldruckverhältnis

$$(2) \quad \Pi = \frac{p_{t,aus}}{p_{t,ein}}$$

- Isentroper Wirkungsgrad

$$(3) \quad \eta_{is} = \frac{T_{t,aus,is} - T_{t,ein}}{T_{t,aus} - T_{t,ein}}$$

mit der Austrittstotaltemperatur bei isentroper Verdichtung:

$$(4) \quad T_{t,aus,is} = T_{t,ein} \cdot \left(\frac{p_{t,aus}}{p_{t,ein}} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$$

$T_{t,ein}$ und $T_{t,aus}$ bzw. $p_{t,ein}$ und $p_{t,aus}$ stehen für die Mittelwerte der Totaltemperatur bzw. des Totaldruckes in den Auswertungsebenen und lassen sich wie folgt ermitteln:

- Die Totaltemperatur in der Beruhigungskammer sowie der statische Druck stromauf und -ab des Fans, der zur Bestimmung der Massenströme benötigt wird, werden arithmetisch gemittelt.
- Der Totaldruck stromauf und -ab des Fans sowie die Totaltemperatur stromab des Fans werden zunächst arithmetisch entlang des Umfangs gemittelt und anschließend die Massenstrommittelung in radialer Richtung angewendet.

Die Auswahl der beschriebenen Mittelungsverfahren begründet sich auf einer nötigen Übereinstimmung mit dem Vorgehen bei der numerischen Simulation. Um den Einfluss kleiner Schwankungen des Betriebspunktes (z.B. durch atmosphärische Störungen) zu reduzieren, wird jeder Betriebspunkt anhand des Mittels aus zwölf in Abständen von zwei Sekunden aufgenommenen Datensätzen berechnet, woraus sich eine gute Reproduzierbarkeit der Leistungsparameter ergibt.

4. NUMERISCHE SIMULATIONEN

4.1. Strömungslöser TRACE

Zur numerischen Berechnung von Strömungen wird in der Abteilung für Fan und Verdichter der am Institut für Antriebstechnik entwickelte Löser TRACE (Turbo-machinery Research Aerodynamics Computational Environment) verwendet.

TRACE ist ein Programmsystem zur stationären und instationären Berechnung von dreidimensionalen Strömungen in mehrstufigen Verdichter- und Turbinenkomponenten mit axialer und radialer Strömungsführung. Neben der Anwendung zur Untersuchung komplexer Strömungen am DLR und vielen weiteren Forschungs- und Universitätsinstituten, wird es seit einigen Jahren ebenfalls

zur Entwicklung und Optimierung von Turbomaschinen, Triebwerken, Gasturbinen in Kraftwerken und ihren Turbokomponenten in der Industrie eingesetzt.

Es basiert auf den Navier-Stokes-Gleichungen, die anhand der Finite-Volumen-Methode diskretisiert werden. Die Größen des erhaltenen Gleichungssystems werden anschließend mit Hilfe des RANS-Verfahrens in einen Mittel- und einen Schwankungswert aufgeteilt. Die dabei neu entstehenden Reynoldsspannungen erfordern die zusätzliche Verwendung eines Turbulenzmodells. Bei TRACE kann zwischen dem Eingleichungsmodell nach Spalart und Almaras und dem k- ω -Modell nach Wilcox, das zu den Zweigleichungsmodellen gehört, gewählt werden. [2]; [3]

4.2. Aerodynamische Rechnungen

4.2.1. Kennfeldrechnungen

Zunächst soll als Grundlage und zum Vergleich mit der Messung das Fankennfeld basierend auf den Vorhersagen aus der Auslegungsphase betrachtet werden. Das sehr grobe Rechennetz (ca. 260 000 Punkte) ist dabei das während des Auslegungsprozesses verwendete, in dem eine Vielzahl an Rechnungen in kurzer Zeit durchgeführt werden mussten, und umfasst den Fan bestehend aus Rotor und Stator. Das entsprechende S2M-Netz und die Rotorprofilschnitte an Gehäuse und Nabe zeigt BILD 4.

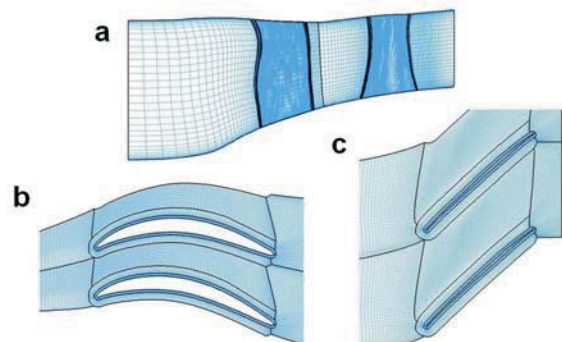


BILD 4. Netztopologie des groben Netzes, a) S2M-Netz, b) S1-Netz des Rotors an der Nabe, c) S1-Netz des Rotors am Gehäuse

Neben dem resultierenden dreidimensionalen Rechennetz werden die Randbedingungen am Netzein- und -austritt für die Durchführung der Rechnung benötigt. Da während der Auslegung noch keine Angaben über die Strömungsverhältnisse am Netzeintritt gemacht werden konnten und das Ziel der Rechnungen eine grobe Vorkenntnis des Leistungsverhaltens des Fans ist, werden die Randbedingungen wie folgt festgelegt:

- Totaltemperatur und -druck konstant nach ISA
- drallfreie Anströmung
- konstante Turbulenzgrößen

Am Austritt des Rechennetzes muss zur Einstellung der unterschiedlichen Betriebspunkte der statische Druck vorgegeben werden. Eine Zunahme des Gegendrucks entspricht dabei einem Androsseln des Verdichters und bedeutet damit im Kennfeld eine Annäherung an die Pumpgrenze.

4.2.2. Nachrechnung einzelner Betriebspunkte

Im Anschluss an die groben Simulationen und die Messung folgt eine genauere Berechnung des Strömungsfeldes, um für einen Vergleich mit den Messdaten die Strömungsgrößen an den Positionen der Sondenkäme zu erhalten. Hierzu reicht das bisher verwendete grobe Rechnetz nicht mehr aus, es muss ein feineres Netz aufgebaut werden, das alle geforderten Positionen einschließt. Das an das zu untersuchende Strömungsfeld angepasste S2M-Netz zeigt BILD 5, das resultierende dreidimensionale Rechnetz besteht aus ca. 5 Mio. Punkten.

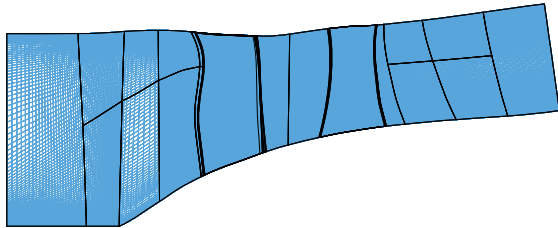


BILD 5. S2M-Netz des feinen Netzes

Zur Einstellung der einzelnen Betriebspunkte werden der statische Druck am Austritt sowie die bereits in Kapitel 4.2.1. aufgezählten Randbedingungen am Eintritt festgelegt. Anstatt eines konstanten Totaldruckes, wie er während der Kennfeldrechnungen verwendet wird, kann nun allerdings ein während der Messung an den Grenzschichtkämmen ermittelter radialer Verlauf vorgegeben werden.

4.2.2.1. Netzstudien

4.2.2.1.1. Variation der Randbedingungen

Da im Voraus nicht bestimmt werden kann, in welchem Bereich der Drehzahllinie der zu ermittelnde Betriebspunkt zu liegen kommt, ist eine genaue Auswahl des geeigneten gemessenen Totaldruckverlaufs zunächst nicht möglich. Stattdessen wird eine Mittelung aus den gemessenen Verläufen je eines Betriebspunktes nahe dem Auslegungspunkt, der Schluck- und der Pumpgrenze angenommen. Steht die Position auf der Kennlinie nach der Berechnung fest, so kann das Totaldruckprofil des nächstgelegenen Betriebspunktes aus der Messung als korrigierte Randbedingung verwendet und eine weitere Simulation durchgeführt werden. Untersuchungen haben aber gezeigt, dass die Totaldruckverteilung am Eintritt kaum Einfluss auf die Rechenergebnisse nimmt und die Verwendung einer gemittelten Verteilung ausreichend genau ist.

4.2.2.1.2. Kennfeldverhalten unter Berücksichtigung der heiß/kalten Rotorgeometrie

In der vorliegenden Studie wird für die Netzgenerierung die heiße Rotorgeometrie im Auslegungspunkt, also die Rotorgeometrie bei Betrieb des Verdichters mit 100% Drehzahl, verwendet und das Netz nicht an den Betriebspunkt, z.B. an die Drehzahl, angepasst. Wie allerdings BILD 6 zeigt, ist bei Vergleich der

Schaufelgeometrien für 41% und 100% Drehzahl eine Verbiegung und Verdrehung der Schaufel zu erkennen. Diese Verformungen lassen sich auf die von der Rotationsgeschwindigkeit abhängige Fliehkraft und variierende Druckbelastungen auf der Rotorschaukel zurückführen. Noch deutlicher wird der Einfluss der Drehzahlabhängigkeit bei Betrachtung z.B. eines Ausschnittes der Hinterkante im Schaufelspitzenbereich für 41%, 74%, 100% und 108% Drehzahl (vgl. BILD 7).

Weiterhin müsste für die Teildrehzahlen berücksichtigt werden, dass sich der Rotor aufgrund der geringeren Fliehkkräfte weniger stark ausdehnt und somit eine größere Spalthöhe vorliegt (vgl. BILD 8).

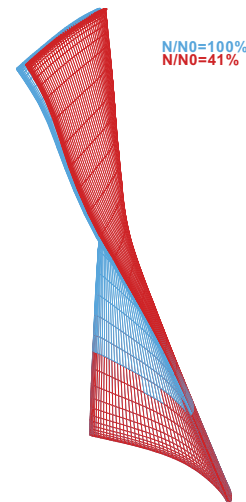


BILD 6. Vergleich der Schaufelgeometrie bei 41% und 100% Drehzahl

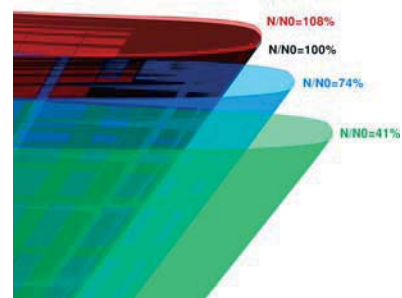


BILD 7. Ausschnitt der Rotorschaukelgeometrien an der Hinterkante für die Drehzahlen 41%, 74%, 100% und 108% [4]

Wie bereits erwähnt, beschränken sich die vorliegenden Untersuchungen auf die Geometrie bei 100% Drehzahl. Um den bei den Teildrehzahlen entstehenden Fehler abschätzen zu können, wurden in diesem Bereich weiterführende Studien angesetzt. Während diese die gleichen Ein- und Austrittsebenen und -bedingungen vorsahen, wurde die Struktur des Netzes geringfügig verändert. Zum einen wurden die Punkte auf ca. 2 Mio. reduziert und zur Berechnung aller Wandgebiete (inklusive der Schaufeln) die Wandfunktion eingesetzt. Insbesondere

konnte für jede ausgewählte Drehzahl (41%, 74%, 100% und 108%) eine angepasste Rotorgeometrie für die Netzerzeugung verwendet werden, welche an dem DLR-Institut für Bauweisen- und Konstruktionsforschung in Stuttgart berechnet wurden [5].

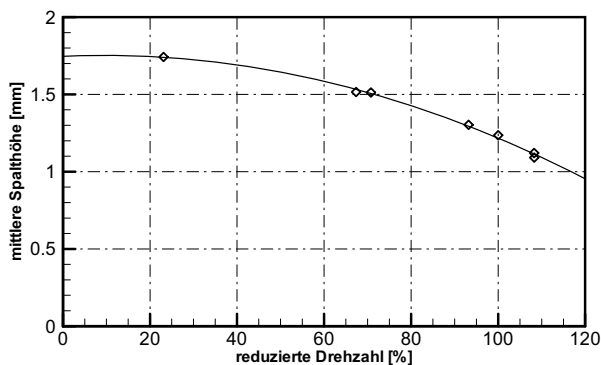


BILD 8. Entwicklung der mittleren Spalthöhe in Abhängigkeit von der reduzierten Drehzahl

Als Spalthöhe wurde für 100% Drehzahl der Mittelwert aus den während der Kennfeldmessungen aufgenommenen Daten verwendet. Da für die Teildrehzahlen nur wenige gemessene Werte vorliegen, wurde hier der anhand der Geometrien ersichtliche Unterschied in der Spalthöhe zu dem gemessenen Wert bei 100% dazu addiert bzw. für 108% Drehzahl von ihm abgezogen. Die sich ergebenden Spalthöhen zeigt TAB 2.

n_{red} [%]	Spalthöhe [mm]		
	Vorderkante	Hinterkante	Mittelwert
41	1,52	2,02	1,77
74	1,48	1,63	1,56
100	1,29	1,18	1,24
108	1,29	1,13	1,21

TAB 2. Spalthöhe in Abhängigkeit von der reduzierten Drehzahl [4]

Aus den vorgegebenen vier Rotorgeometrien sowie den vier mittleren Spalthöhen aus TAB 2, die beide von der reduzierten Drehzahl abhängig sind, erhält man schließlich vier Rechenetze, die zur Ermittlung der Kennfeldparameter eingesetzt werden konnten. Für die Drehzahlen 41%, 74% und 108% wurden die Kennfeldparameter schließlich einmal mit dem an die Schaufelgeometrie angepassten Netz sowie einmal mit dem Netz basierend auf der Schaufelgeometrie bei 100% Drehzahl berechnet. TAB 3 zeigt die ermittelten maximalen Differenzen, die für jede Kennlinie im Bereich nahe der Pumpgrenze auftreten.

n_{red} [%]	$\Delta \dot{m}_{red}$ [%]	$\Delta \Pi$ [%]	$\Delta \eta_{is}$ [%]
41	0,95	0,047	1,04
74	0,91	0,148	0,70
108	0,27	0,071	0,51

TAB 3. Einfluss der drehzahlabhängigen Geometrieänderungen auf die Kennfeldparameter [4]

Wie in TAB 3 abzulesen, ist der Einfluss der eingesetzten Geometrie auf das Rechenergebnis gering und es kann davon ausgegangen werden, dass die Verwendung der Geometrie bei 100% Drehzahl für alle Kennlinien zufriedenstellende Ergebnisse liefert. Allerdings basieren auch diese Untersuchungen auf den gemittelten Spalthöhen. Es ist jedoch bekannt, dass gerade im Teildrehzahlbereich die Spalthöhe über der Sehnenlänge der Schaufel abnimmt. Demnach bieten sich weitere Studien an, in denen der Einfluss des tatsächlichen Verlaufs der Spalthöhe auf die Kennfeldparameter untersucht werden könnte. [4]

4.3. Aeroelastische Untersuchungen

Neben den Schaufelverformungen, die in Kapitel 4.2.2.1.2. beschrieben sind, können die aerodynamischen Belastungen selbsterregte Schaufelschwingungen hervorrufen, die durch die Wechselwirkungen zwischen Strömung und Schaufelstruktur entstehen. Beginnt eine Schaufel in ihrer Eigenfrequenz zu schwingen, verändern diese Bewegungen das angrenzende Strömungsfeld, die hier auftretenden Druckschwankungen können die Schwingung dämpfen oder im schlechteren Fall weiter anregen. Diese selbsterregte und selbstverstärkende Schwingung wird als Flattern bezeichnet und kann zur Zerstörung der Schaufel führen.

Um das Flatterverhalten des UHBR-Fans einschätzen zu können, wurden neben den aerodynamischen ebenfalls aeroelastische Untersuchungen durchgeführt. Hierzu wurde der Strömungslöser TRACE um ein nichtlineares Aeroelastikmodul erweitert und das Rechenetz auf den Rotor und eine Punktzahl von 560 000 Punkten begrenzt. Als Initialisierung für die Flutterrechnung diente die stationäre Lösung eines Betriebspunktes der 100%-Drehzahllinie nahe des Auslegungspunktes sowie die aus dem Campbelldiagramm in BILD 9 anhand des schwarzen Kreises abzulesende Eigenform bei 192 Hz (vgl. BILD 10). Des Weiteren wurde eine Annahme für die Amplitude benötigt und die Phasendifferenzwinkel mit den Werten -180° , -90° , 0° und 90° festgelegt. [6]

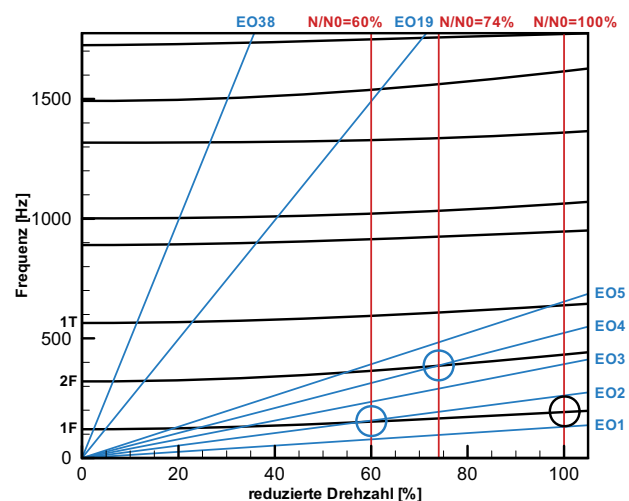


BILD 9. Campbelldiagramm mit eingezeichneter erster Biegeschwingung (1F) [6]

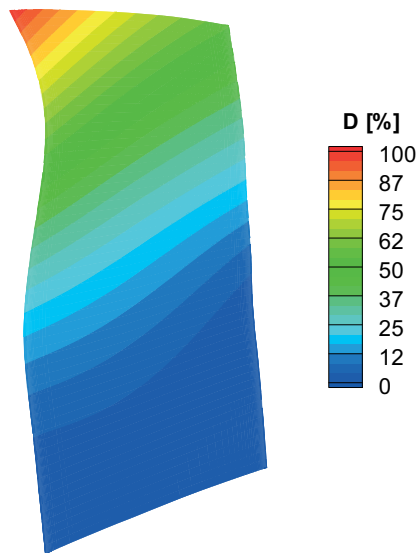


BILD 10. Darstellung der Verschiebungen aufgrund der ersten Biegeschwingung 1F (Werte bezogen auf die Maximalverschiebung) [6]

5. ERGEBNISSE

5.1. Aeromechanische Ergebnisse

5.1.1. Fankennfeld

Ziel der Inbetriebnahme des UHBR-Rigs war es hauptsächlich, das aerodynamische Verhalten im gesamten Betriebsbereich des Verdichters zu untersuchen. Anhand der gemessenen Daten konnte die Qualität der numerischen Kennfeldvorhersagen während der Auslegungsphase beurteilt werden und der Einfluss der Netzstruktur untersucht werden. BILD 11 zeigt einen Vergleich der ermittelten Kennfelder für die gemessenen Ergebnisse und für die numerischen Simulationen mit dem groben Netz aus der Auslegungsphase sowie mit einem deutlich verfeinerten Netz.

Bevor genauer auf die Ergebnisse eingegangen werden kann, sollen einige Anmerkungen bezüglich der untersuchten Bereiche vorweggenommen werden.

Während die Rechnungen mit Hilfe des Netzes aus der Auslegungsphase nahezu den gesamten Betriebsbereich abdecken können, musste man sich bei den Rechnungen mit dem feinen Netz aufgrund des deutlich höheren Rechenaufwandes auf die Auslegungsdrehzahl (100%) sowie eine Teildrehzahl (41%) beschränken. Auch für die Messung ergaben sich Einschränkungen des messbaren Bereichs, die sich aus den schwingungsmechanischen Voruntersuchungen ergaben. So wurden für 60% und 74% Drehzahl deutliche Rotorschwingungen (vgl. blaue Kreise in BILD 9) vorhergesagt, die eine Gefährdung für den Fan bedeuten würden. Anstatt dieser Kennlinien musste daher bei 69% Drehzahl gemessen werden.

Ebenso muss für die in BILD 11 eingezeichneten Grenzen bzw. für die Fahrlinie beachtet werden, dass es sich ausschließlich um eine grobe numerische Abschätzung der Verläufe mit Hilfe des Auslegungsnetzes handelt. Die Fahrlinie lässt sich anhand der Verbindung der Betriebspunkte, in denen der jeweils maximale Wirkungsgrad auf einer Drehzahl erreicht wird, beschreiben. Die Schluckgrenze kennzeichnet die Betriebspunkte, in denen der Bereich des konstanten Massenstromes beginnt. Die Pumpgrenze wurde anhand der Betriebspunkte bestimmt, in denen während der Rechnung mit dem groben Netz das Konvergenzkriterium nicht mehr erreicht werden konnte. Dieses Verfahren reicht allerdings zur genauen Bestimmung der Pumpgrenze nicht aus, zumal die Rechnungen stationär durchgeführt wurden. Für eine exakte Pumpgrenzermittlung müssen zeitgenaue numerische Simulationen durchgeführt werden.

Im Vergleich zu den numerischen Ergebnissen des groben Netzes zeigt sich bei den Messungen eine deutlich geringere Kennfeldausdehnung. Sie wurden im Bereich unterhalb der Schluckgrenze, die eine gute Übereinstimmung mit der theoretisch bestimmten aufweist, begonnen und in kleinen Schritten in Richtung der Pumpgrenze fortgeführt. Sobald der maximale Wirkungsgrad einer Drehzahl erreicht war, wurde die Messung abgebrochen, um den Fan nicht durch ein mögliches Einsetzen des Pumpvorgangs zu gefährden. Um die Pumpgrenze experimentell eindeutig zu bestimmen, müssten spezielle Pumpgrenzversuche durchgeführt werden, die allerdings erst nach Abschluss aller anderen geplanten Messkampagnen stattfinden können.

Bei Betrachtung des Fankennfeldes in BILD 11 lässt sich zunächst erkennen, dass das Auslegungsziel eingehalten wird, das gewünschte Totaldruckverhältnis und der entsprechende reduzierte Massenstrom werden über dem gesamten Betriebsbereich erreicht. Die Rechnung mit dem Auslegungsnetz gibt die Kennfeldcharakteristiken demnach gut wieder und erlaubt eine zufriedenstellende Vorhersage der Verdichterleistung über den gesamten Betriebsbereich.

Eine deutlich bessere Übereinstimmung wird dennoch durch Verbesserungen im Rechnungsaufbau erreicht. So zeigt sich, dass die Ergebnisse, die anhand des verfeinerten Netzes und mit Hilfe realistischer Randbedingungen erhalten wurden, eine weitaus größere Übereinstimmung mit den Messdaten gewährleisten. Die Unterschiede im Totaldruckverhältnis und im reduzierten Massenstrom liegen innerhalb der Messungenauigkeit, der Sperrmassenstrom, also der sich aufgrund des Sperrvorgangs einstellende konstante Massenstrom, kann sogar exakt wiedergegeben werden.

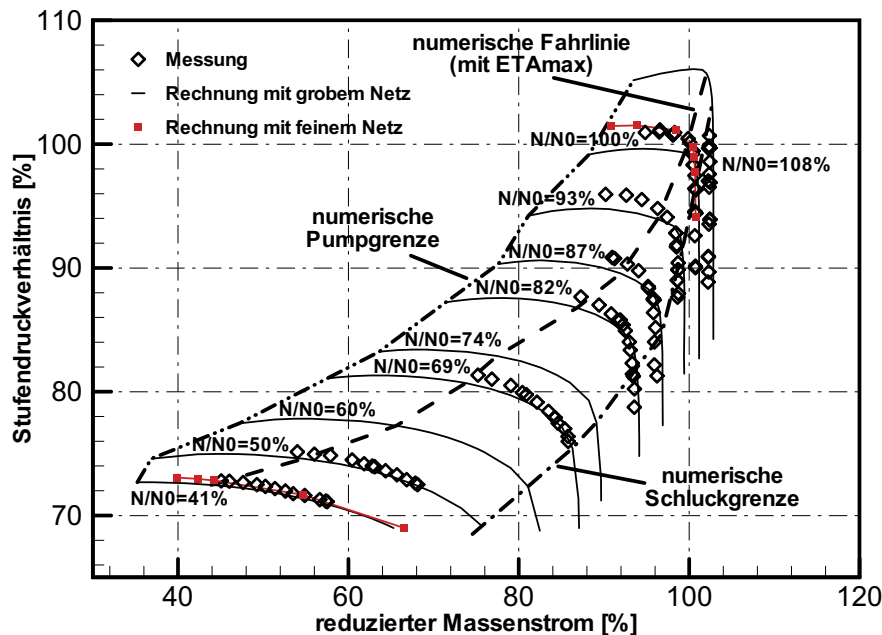


BILD 11. Ermittelter Fankennfeld des UHBR-Rigs

5.1.2. Radiale Verteilung der Strömungsgrößen

Neben den Kennfeldparametern wurden ebenfalls die umfangsgemittelten radialen Verläufe von Totaldruck und -temperatur an den Auswertungsebenen der Sondenpositionen vor und hinter dem Fan ausgewertet. BILD 12 zeigt die Gegenüberstellung der Totaldruckverteilung für einen Betriebspunkt in der Nähe des Auslegungspunktes und für einen Betriebspunkt im gesperrten Bereich. BILD 13 zeigt den entsprechenden Vergleich für den Verlauf der Totaltemperatur. Die angegebenen Messwerte entsprechen den für jede radiale Position umfangsgemittelten Daten, die Fehlerbalken zeigen die Spanne der vier Einzelmesswerte.

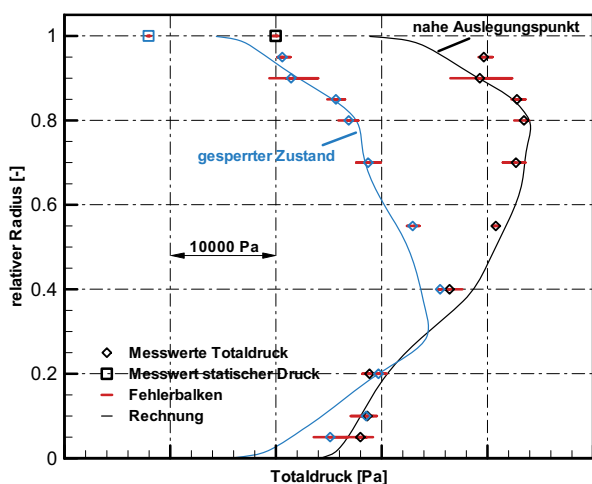


BILD 12. Vergleich der gemessenen und berechneten Totaldruckverteilung am Austritt für je einen Betriebspunkt nahe dem Auslegungspunkt sowie im gesperrten Bereich der 100%-Drehzahllinie

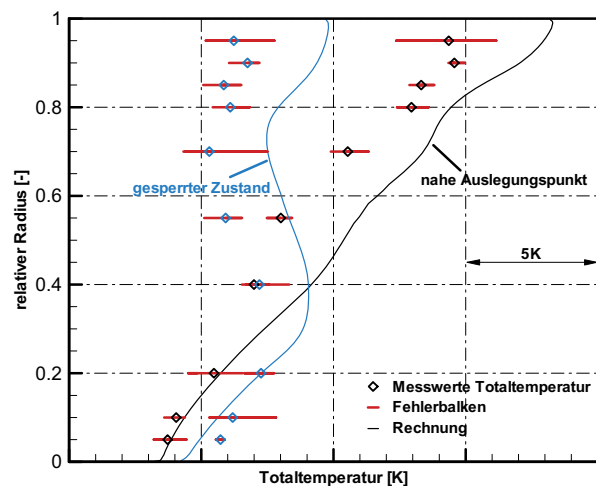


BILD 13. Vergleich der gemessenen und berechneten Totaltemperaturverteilung am Austritt für je einen Betriebspunkt nahe dem Auslegungspunkt sowie im gesperrten Bereich der 100%-Drehzahllinie

In beiden Darstellungen lässt sich der Einfluss der Kennfeldposition deutlich erkennen, im gesperrten Zustand bildet sich im oberen Bereich der Schaufel ein ausgeprägtes Stoßsystem aus (vgl. BILD 14), das einen deutlich höheren Verlust zur Folge hat, der sich auch in den Verläufen der Totalgrößen bemerkbar macht. Der Vergleich zwischen Messung und Rechnung zeigt weiterhin eine hohe Übereinstimmung der Ergebnisse, woraus sich die gute Vereinbarkeit der Kennfeldparameter erklären lässt.

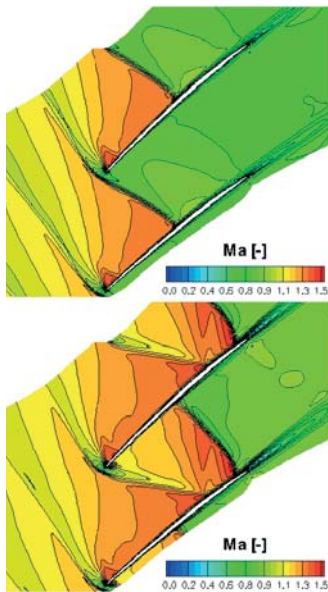


BILD 14. Vergleich des Verdichtungsstoßsystems auf der Saugseite der Rotorschaukel bei je einem Betriebspunkt nahe dem Auslegungspunkt (oben) und im gesperrten Bereich (unten) der 100%-Drehzahllinie

5.2. Aeroelastische Ergebnisse

Als Ergebnis der Flatteruntersuchung erhält man die in BILD 15 dargestellte und auf die maximale kinetische Energie der Schwingung bezogene aerodynamische Dämpfung. Diese ist für alle berechneten Phasendifferenzwinkel positiv und deutet damit auf ein stabiles aeroelastisches Verhalten hin, ein Flattern kann in diesen Punkten demnach ausgeschlossen werden. Allerdings muss erwähnt werden, dass es sich hierbei ausschließlich um die Berechnung der ersten Biegeschwingung bei 100% Drehzahl und in Nähe des Auslegungspunktes handelt. Weitere Studien bezüglich der zweiten Biege- sowie der ersten Torsionsschwingung und für weitere Betriebspunkte bei Voll- und Teillast müssten noch erstellt werden. [6]

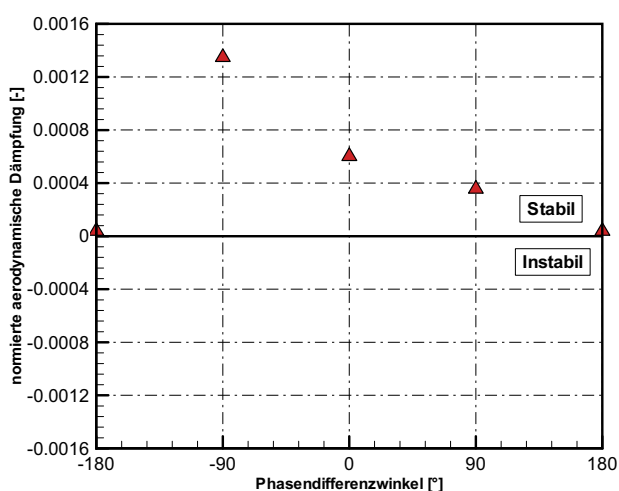


BILD 15. Aerodynamische Dämpfung für verschiedene Phasendifferenzwinkel [6]

6. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Das DLR hat einen UHBR-Fan entworfen, der aufgrund des von ihm repräsentierten hohen Nebenstromverhältnisses und der geringen Fandrehzahl deutlich niedrigere Lärmemissionen und einen geringeren Brennstoffverbrauch des Triebwerks verspricht. Dieser wurde in der Abteilung Fan und Verdichter des Instituts für Antriebstechnik am DLR Köln in Betrieb genommen und anhand seines Betriebsverhaltens sowie seiner aerodynamischen Eigenschaften getestet. Im Rahmen dieser Untersuchungen wurden die am institutseigenen Prüfstand durchgeführten Messungen ausgewertet und mit den Ergebnissen numerischer Simulationen verglichen.

Die erste Messkampagne, die die Inbetriebnahme des Rigs umfasste, zeigt, dass der Fan alle Anforderungen für zukünftige UHBR-Triebwerke erfüllt. Das gewünschte Totaldruckverhältnis sowie der dazugehörige reduzierte Massenstrom wurden während der Kennfeldmessungen im gesamten Betriebsbereich erreicht. Gezeigt werden konnte außerdem, dass die Verwendung eines groben Rechnernetzes in der Auslegungsphase ausreichend genaue Ergebnisse liefert, um die vorgegebenen Ziele zu erreichen. Dennoch bietet die Verfeinerung des Netzes sowie die Verwendung realistischer Randbedingungen die Möglichkeit, das Kennfeld sowie die Verteilungen der Strömungsgrößen in einer deutlich besseren Qualität und in Übereinstimmung mit den Messergebnissen wiederzugeben.

Im Anschluss an die Inbetriebnahme wurden im Zuge der ersten Messkampagne Versuche zur aktiven Lärm-minderung durchgeführt, die Ergebnisse hierzu sind in [1] festgehalten.

In einer zweiten Messkampagne, die für Anfang 2010 vorgesehen ist, sollen Einblasestudien durchgeführt und dabei die Wirksamkeit von Luftereinblasung im Bezug auf eine Pumpgrenzverschiebung und auf eine damit einhergehende Erweiterung des stabilen Betriebsbereichs untersucht werden. Dabei sind, um eine verlässliche Aussage über die Pumpgrenze zu erhalten, instationäre Rechnungen als Grundlage geplant.

In weiteren Messkampagnen sind außerdem zusätzliche detaillierte Untersuchungen des Strömungsfeldes vorgesehen, als Beispiele hierfür können etwa der Einsatz von Dreilochsonden oder die Durchführung von PIV-Messungen genannt werden.

Im Bereich der numerischen Simulationen werden derzeit Studien mit zusätzlichen Netzgeometrien durchgeführt, die aktuellen Untersuchungen sehen die vollständige Vernetzung des Strömungskanal von dem Bellmouth-Eintritt bis zu der Drossel am Austritt vor und sollen die Bewertung der statischen Sonden, die an verschiedenen Positionen von Gehäuse und Nabe angebracht sind, ermöglichen.

7. LITERATUR

- [1] Tapken, U., Raitor, T., Enghardt, L.; „Tonal Noise Radiation from an UHBR Fan – Optimized In-Duct Radial Mode Analysis“; 15th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (30th Aeroacoustics Conference); AIAA 2009-3288; 11-12 May 2009; Miami, Florida, USA
- [2] Kügeler, E.; „Numerisches Verfahren zur genauen Analyse der Kühleffektivität filmgekühlter Turbinenschaufeln“; Forschungsbericht 2005-11; Institut für Antriebstechnik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt in Köln-Porz; September 2004
- [3] Nürnberger, D.; „Implizite Zeitintegration für die Simulation von Turbomaschinenströmungen“; Forschungsbericht 2004-27; Institut für Antriebstechnik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt in Köln-Porz; Juni 2004
- [4] Bou Farhat, C.; „Influence of the blade deformation on the aerodynamic behavior of a UHBR fan“; Studienarbeit am Institut für Antriebstechnik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt in Köln-Porz; Januar 2009
- [5] Plevnik, V., Kocian, F., Schmidt, T.; „Auslegung des UHBR-Fanrigs“; DLR-Bericht IB-435-2007/24; 2007
- [6] Schmitz, A.; „Aeroelastische Untersuchungen an einem UHBR-Fan“; DLR-Bericht IB-2009-11; Diplomarbeit am Institut für Antriebstechnik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt in Köln-Porz; 2009
- [7] Giebmanns, A.; „Beurteilung experimenteller Kennfelduntersuchungen eines UHBR-Fans und numerische Analyse des aerodynamischen Verhaltens“; DLR-Bericht IB-325-09-08; Diplomarbeit am Institut für Antriebstechnik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt in Köln-Porz; Januar 2009
- [8] Kaplan, B.; „Design and Experiments of a Highly Efficient Low-Noise Fan Test Rig with an Ultra High Bypass Ratio“; Forschungsbericht 2007-17; Institut für Antriebstechnik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt in Köln-Porz; 2007
- [9] Kaplan, B.; Nicke, E.; Voss, C.; „Design of a Highly Efficient Low-Noise Fan for Ultra-High Bypass Engines“; GT2006-90363; ASME Turbo Expo 2006: Power for Land, Sea and Air; Barcelona, Spanien; 8.-11.Mai 2006
- [10] Schnell, R.; „Aerodynamic Analysis of a Fan for future Ultra-high bypass ratio Aero Engines“; 19th ISABE Conference; ISOABE 2009-1149; September 7-11-2009; Montreal, Kanada