

# AUFBAU EINES PRÜFSTANDS FÜR DURCHFLUSSMESSUNGEN AN ROTIERENDEN RADIALBOHRUNGEN

J. Soušek, M. Pfitzner  
 Universität der Bundeswehr München  
 Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik  
 Institut für Thermodynamik LRT-10  
 Werner-Heisenberg-Weg 39, 85577 Neubiberg

## 1. ÜBERSICHT

Die Anforderungen an die Einzelkomponenten von Triebwerken und Stationärgasturbinen werden mit der Steigerung der Turbineneintrittstemperatur immer größer. Trotz enormer Verbesserung der zulässigen Werkstofftemperaturen ist eine wirksame Kühlung thermisch belasteter Bauteile unumgänglich. Zu diesem Zweck wird ein internes Luftsysteem in der Turbine verwendet, dessen effiziente aerodynamische Auslegung eine wichtige Aufgabe bei der Entwicklung von Triebwerken und Gasturbinen allgemein darstellt. Die wichtigsten Aufgaben des internen Sekundärluftsysteams sind die Bereitstellung von Kühlluft für die Kühlung von Turbinenschaufeln sowie von Dichtluft in Nebenkammern und Lagerkammern, um einen Einzug von Heißgas in Scheibenzwischenräumen und ein Austreten von Oldämpfen aus Lagerkammern zu verhindern.

Fast 20% des gesamten Luftmassenstroms des Kerntriebwerks wird in Kanälen und Kammern entlang rotierender Wellen und Scheiben und durch unterschiedlich angeordnete Bohrungen zu den entsprechenden Verbraucherstellen geleitet. Unter dem Gesichtspunkt eines möglichst guten thermischen Wirkungsgrades ist es erforderlich, die Massenströme im Sekundärluftsystem auf ein Minimum zu vermindern und gleichzeitig eine sichere Auslegung des Systems zu gewährleisten.

Dazu müssen genaue Kenntnisse über das Durchflussverhalten der Luftmassenströme im Sekundärluftsystem zur Verfügung stehen. In modernen Drei-Wellen Triebwerken muss die Kühlluft durch Bohrungen in stehenden oder rotierenden Teilen geführt werden. Der durchgesetzte Massenstrom, der von einer Vielzahl geometrischer und aerothermodynamischer Einflussparameter abhängig ist, muss mit sehr guter Genauigkeit vorausberechenbar sein, um die Sicherheit des Systems zu gewährleisten und gleichzeitig nicht wertvolle Kühlluft zu verschwenden.

Eine Untersuchung des Luftsysteams am Triebwerk selbst ist äußerst schwierig, da Instrumentierungen und Messungen in realen Gasturbinen aufwändig und teuer sind. Die Zielsetzung einer Vielzahl von Forschungsarbeiten ist daher die Untersuchung von Einzelkomponenten unter Variierung verschiedener relevanter Parameter und schließlich eine Berechnung des Durchflusskoeffizienten des Gesamtsystems auf Basis der so gewonnenen Korrelationen. Obwohl im internen Sekundärluftsystem moderner Gasturbinen und Triebwerke, insbesondere in Dreiwellentriebwerken, Massenströme durch rotierende Radialbohrungen zwischen gleich- und gegenrotierenden Wellen geführt werden, gibt es bisher nur in sehr geringem Um-

fang experimentelle Informationen über das Strömungsverhalten und die Durchflusskoeffizienten in einer solchen Konfiguration. Daher wurde am Institut für Thermodynamik der Universität der Bundeswehr München ein neuer Prüfstand ausgelegt, optimiert und aufgebaut, welcher die Untersuchung der Strömung und des Durchflussverhaltens von Radialbohrungen in gleich- und gegenlaufenden Wellen bei gasturbinentypischen Bedingungen erlaubt.

## 2. EINLEITUNG

In neuerer Zeit kommen immer stärker numerische Verfahren zum Einsatz, welche Korrelationen ersetzen können, falls die numerischen Verfahren für die in Frage kommenden Konfigurationen und im interessierenden Parameterbereich validiert sind. Hierfür sind entsprechende experimentelle Untersuchungen notwendig, um z.B. Durchflusskoeffizienten zu bestimmen. Zusätzlich können aus den gewonnenen Daten direkt Korrelationen abgeleitet oder verbessert werden, welche direkt im Auslegungsprozess verwendet werden können.

Während für axial durchströmte, rotierende Bohrungen sowohl ausführliche experimentelle, als auch numerische Untersuchungen [1, 2, 3, 4, 5] durchgeführt wurden, gibt es bis heute kaum zuverlässige Daten über die radiale Durchströmung von Bohrungen in rotierenden Wellen.

Rohde [6] hat umfangreiche Untersuchungen an nichtrotierenden Radialbohrungen mit Querströmung am Eintritt in die Bohrung durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass der Durchflussmassenstrom hier im Wesentlichen vom Differenzdruck über die Bohrung, der Machzahl der Querströmung, dem Länge/Durchmesser-Verhältnis und vom Verrundungsradius der Bohrung abhängig ist. Rhode [6] zeigte, dass der Eintrittsradius der Bohrungen eine sehr starke Auswirkung auf den Durchflusskoeffizienten hat, sodass bereits bei einem Radius von 0,076 cm ein Durchflusskoeffizient von 0,94 erreicht wird, der fast dem Durchflusskoeffizienten einer Spritzdüse entspricht.

Weitere experimentelle Untersuchungen des Durchflussverhaltens in Strömungen durch Bohrungen, die senkrecht zu einer rotierenden Welle angeordnet sind, wurden von Alexiou [7] durchgeführt. Der Rotor und die Welle wurden separat angetrieben, wobei maximale Drehzahlen der Rotoren von bis zu 10 000 U/min und bis zu 7 000 U/min für die äußere bzw. innere Welle möglich waren. Der (äußere) Rotor war hier mit gasturbinentypischen Scheiben ausgeführt, die (innere) Welle war zylindrisch und enthielt 6 radiale Bohrungen. Die Wanddicke der Welle von 6,75 mm ergab ein L/D-Verhältnis von 0,45, der Radius der

Locheingangskante betrug  $R=1\text{mm}$ . Für Messungen der Drücke direkt an den Bohrungen in der Welle wurde ein Telemetrie-System verwendet. Es wurde festgestellt, dass sich der Durchflusskoeffizient im Vergleich zur stehenden Welle bzw. Bohrung kaum ändert, wenn sich der Rotor und die Welle in die gleiche Richtung und mit gleicher Drehzahl drehen, oder wenn sich die Welle deutlich schneller als der Rotor dreht. Im Gegensatz dazu ist eine wesentliche Absenkung des Durchflusskoeffizienten zu erkennen, wenn die Drehzahl des Rotors größer ist als diejenige der Welle (Gleich- wie Gegenrotation). Es stellte sich heraus, dass der Durchfluss praktisch unabhängig von der Bohrungs-Reynoldszahl und der Lufttemperatur ist.

Wittig et. al [8] haben experimentelle Arbeiten im Bereich rotierender Radialbohrungen durchgeführt. Diese Untersuchung zum Durchflussverhalten rotierender Wellenbohrungen beinhaltet die Variation der Durchströmungsrichtung (zentrifugal, zentripetal). Hier wurde festgestellt, dass eine centrifugal (von innen nach außen) durchströmte Wellenbohrung höhere Durchflusskoeffizienten aufweist als bei zentripetaler Durchströmung (von außen nach innen). Die Ursache hierfür ist die Zentrifugalkraft, welche einen zusätzlichen Pumpeneffekt bewirkt. Mit steigender Umfangsgeschwindigkeit nimmt der Durchflusskoeffizient sowohl für centrifugale als auch für zentripetale Durchströmung der Bohrung ab.

Aufgrund der in der Literatur untersuchten Konfigurationen erschien es notwendig, die Strömung und das Durchflusverhalten von Radialbohrungen in coaxial angeordneten Wellen zu untersuchen, welche gleich- und gegenläufig mit hoher Drehzahl drehen können.

### 3. AUFBAU DES PRÜFSTANDS

#### 3.1. Experimentelle Zielsetzungen

Im Rahmen des FVV-Projekts „Rotierende Radialbohrungen“ sollte daher ein Prüfstand mit zwei unabhängig angetriebenen, gleich- und gegenläufig rotierenden Wellen aufgebaut werden, in dem zunächst die äußere Welle mit Bohrungen unterschiedlicher Anzahl und Durchmesser (bzw. L/d-Verhältnis) versehen werden soll. Es sollen auch Untersuchungen an unterschiedlichen Verrundungsradien möglich sein. Diese Wellen werden in einen ebenfalls coaxialen, zylindrischen Druckbehälter eingebaut, wobei der Ringspalt zwischen Behälterwand und äußerer Welle die Überströmung der äußeren Welle definiert. Den Prinzipaufbau zeigt Bild 1.

Die Zuströmung zu den Radialbohrungen soll sowohl vom äußeren Rinspalt als auch vom inneren Rinspalt (zwischen den Wellen) erfolgen können, wobei für den äußeren Ringspalt die Möglichkeit eines variablen Vordralls der Luft vorgesehen werden soll. Zunächst soll eine Durchströmung der äußeren Welle untersucht werden, Untersuchungen an Bohrungen in der inneren Welle sind einem möglichen Folgevorhaben vorbehalten. Dies gilt auch für die Zu- und Abströmung durch den inneren Ringspalt.

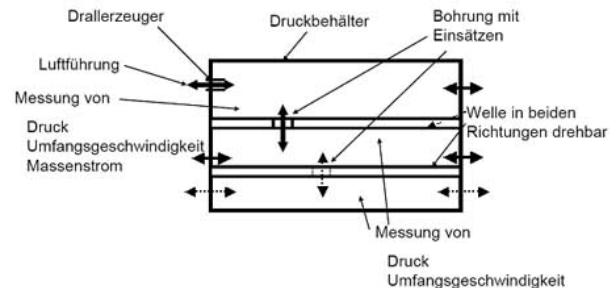


Bild 1: Prüfstandskonzept

An diesem Prüfstand soll der Durchflusskoeffizient bei unterschiedlichen Relativdrehzahlen und unterschiedlichen Konfigurationen der Bohrungen untersucht werden. Es sollen kreisförmige Löcher sowohl mit technisch scharfen als auch mit verrundeten Kanten untersucht werden, wobei verschiedene L/d- Verhältnisse durch die Wahl unterschiedliche Lochdurchmesser realisiert werden können.

Das Druckverhältnis zwischen äußerem und innerem Spalt soll zwischen 1.05 und dem kritischen Druckverhältnis variiert werden können. Je nach Einstellung kann hierbei der höhere Druck im äußeren als auch im inneren Spalt herrschen, sodass sowohl zentripetale als auch centrifugale Durchströmungen untersucht werden können. Die Strömungseigenschaften der Anströmung zur Bohrung werden durch Variation des Massenstroms und des Vordralls verändert.

Zunächst sollen die Messungen für die Bestimmung des Durchflusskoeffizienten durchgeführt werden, wobei auch Messungen der Druckdifferenz über die rotierenden Bohrungen im rotierenden System durchgeführt werden. Aufgrund der Messdaten für die Massenströme und Drücke sollen geeignete Korrelationen für Durchflusskoeffizienten erstellt werden. Zusätzlich sollen CFD-Rechnungen und später laseroptische Messungen der Strömung an den Bohrungen durchgeführt werden, um das Strömungsfeld genauer charakterisieren zu können.

#### 3.2. Rahmenbedingungen für den Prüfstandsaufbau

In den Sitzungen des FVV-Arbeitskreises wurden zahlreiche Forderungen erarbeitet, welche die Konstruktion des Prüfstands entscheidend beeinflusst haben. Im Folgenden sind nur die wichtigsten Forderungen aufgelistet:

Es soll die Möglichkeit der Erzeugung einer centrifugalen, als auch zentripetalen Strömung bestehen. Aufgrund des Wunsches nach realistischen Umfangsgeschwindigkeiten (bis zu  $u=120\text{m/s}$ ) wurde ein Durchmesser von 200 mm für die äußere Welle gefordert. Der Arbeitskreis bestätigte, dass in beiden Rinspalten die Annahme einer maximalen Machzahl von  $\text{Ma} \leq 0,3$  gestattet ist. Ein maximales Druckverhältnis von  $\pi=1,8$  über die rotierende Bohrung soll angestrebt werden.

Die Vordrallgeschwindigkeit sollte bei maximaler Umlenkung die Wellenumfangsgeschwindigkeit bei maximaler Drehzahl erreichen können. Es wurden 3 verschiedene Drallkonfigurationen festgelegt (kein Drall, mittlerer Drall, maximal möglicher Drall). Nur die äußere Welle muss in

beide Richtungen drehbar sein, was einen Gleich- und Gegendrall im äußereren Ringspalt erlaubt.

Als Dichtungen wurden Gleitdichtungen gefordert, um die Leckagen zwischen beiden Spalten und zwischen den Spalten und der Umgebung so klein wie möglich zu halten. Der Abstand zwischen Gehäuse und äußerer Welle soll mindestens 20 mm, der Abstand zwischen den Wellen mindestens 10 mm betragen.

### 3.3. Konstruktion

#### 3.3.1. Geteilte vs. ungeteilte Welle

Aufgrund des Wunsches nach einfacher Konstruktion und geringer Kosten wurden zunächst alle Lager so ausgewählt, dass mit reiner Fettschmierung gearbeitet werden kann. Da diese für die gewünschten Drehzahlen resp. Umfangsgeschwindigkeiten der äußeren Welle im Durchmesser beschränkt sind, wurde eine Konstruktion mit geteilter äußerer Welle gewählt (Bild 2), welche die Lage rung der äußeren Welle auf einem geringeren Durchmes ser als demjenigen der Testsektion erlaubt.

Die Trennstelle der äußeren Welle war wegen der Gefahr einer Unwucht bei dem Aus- und Aufbau des Prüfstands der schwierigste Punkt der Auslegung. An dieser Stelle musste sowohl auf die Zentrierung und die Herstellungs genauigkeit geachtet werden als auch die Wuchtungsmöglichkeit direkt am Prüfstand überprüft werden. Dies hat sich am Ende als fast unmöglich herausgestellt. Zudem ergab diese Konstruktion Probleme mit der Installation der Telemetrie. Hier hätten bei jeder Demontage / Montage die empfindlichen Verbindungen zwischen den rotierenden Drucksensoren und der rotierenden Antenne getrennt und wieder verbunden werden müssen, was große Risiken für die sichere Funktion der rotierenden Drucksensoren mit sich gebracht hätte.

Daher wurde die Konstruktion überarbeitet, sodass eine ungeteilte äußere Welle zum Einsatz kommen kann. Um dieselben hohen Drehzahlen bei nun größerem Lager durchmesser zu erreichen, musste die Schmierung des hinteren Lagers von Fettschmierung auf Ölschmierung umgestellt werden, wodurch ein Ölkreissystem erforderlich wird.

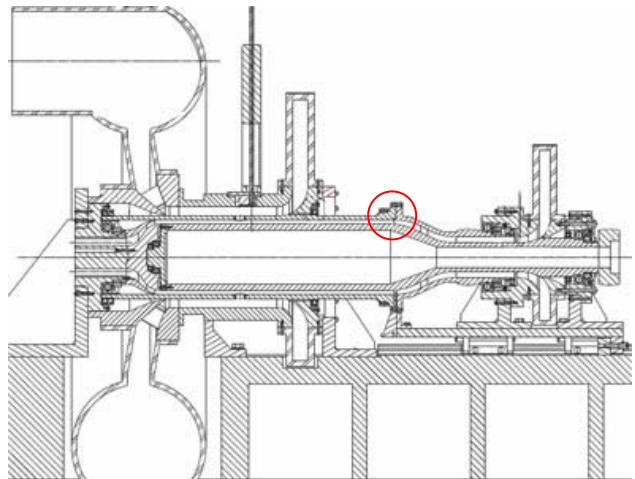


Bild 2: Konstruktion mit geteilter äußerer Welle

Das Öl wird aus zwei Düsen (Durchmesser 1,1 mm) einseitig ununterbrochen auf das Lager gespritzt. Um einen Druckaufbau im Ölsystem und ein Auslaufen von Öl zu vermeiden, speziell am vorderen Rand der Lagerkammer, wurde ein Ölabscheider beschafft, der für die Erzeugung des Unterdrucks in der Lagerkammer und anschließend die Filterung der Luft-Öl-Emulsion sorgt. Zum Abdichten nach außen wurde ein Kaskadendesign vorgesehen.

Die Überarbeitung der Konstruktion ermöglicht jedoch als Ausgleich dafür eine leichtere Montage und Demontage des Prüfstands und einen sichereren Betrieb. (Bild 3)

#### 3.3.2. Luftführung im gesamten Prüfstand

Der Prüfstand wurde entsprechend der Forderungen des Arbeitskreises ausgelegt. In Bild 4 ist das Flusschema des gesamten Prüfstands dargestellt. Die Luftversorgung wird durch einen Schraubenverdichter mit einem maximalen Massenstrom von 6 kg/s bei einem maximalen Druckverhältnis von  $\pi=3$  sichergestellt. Der gesamte Massenstrom wird dabei durch einen Zwischenkühler auf Umgebungstemperatur abgekühlt. Die Aufteilung des Massenstroms vor dem Eintritt in den rotierenden Teil des Prüfstands wird durch eine erste Drosselklappe realisiert. Der Massenstrom, der in den äußeren Spalt einströmen soll, wird vorher noch in die gewünschte Richtung durch den Drallerzeuger umgelenkt. Durch eine zweite Drosselklappe hinter den rotierenden Wellen wird die gewünschte Druckdifferenz zwischen den beiden Ringspalten eingestellt. Die Richtung der Durchströmung der Bohrungen kann einfach durch Austauschen der Drosselklappen im äußeren und inneren Zweig erfolgen.

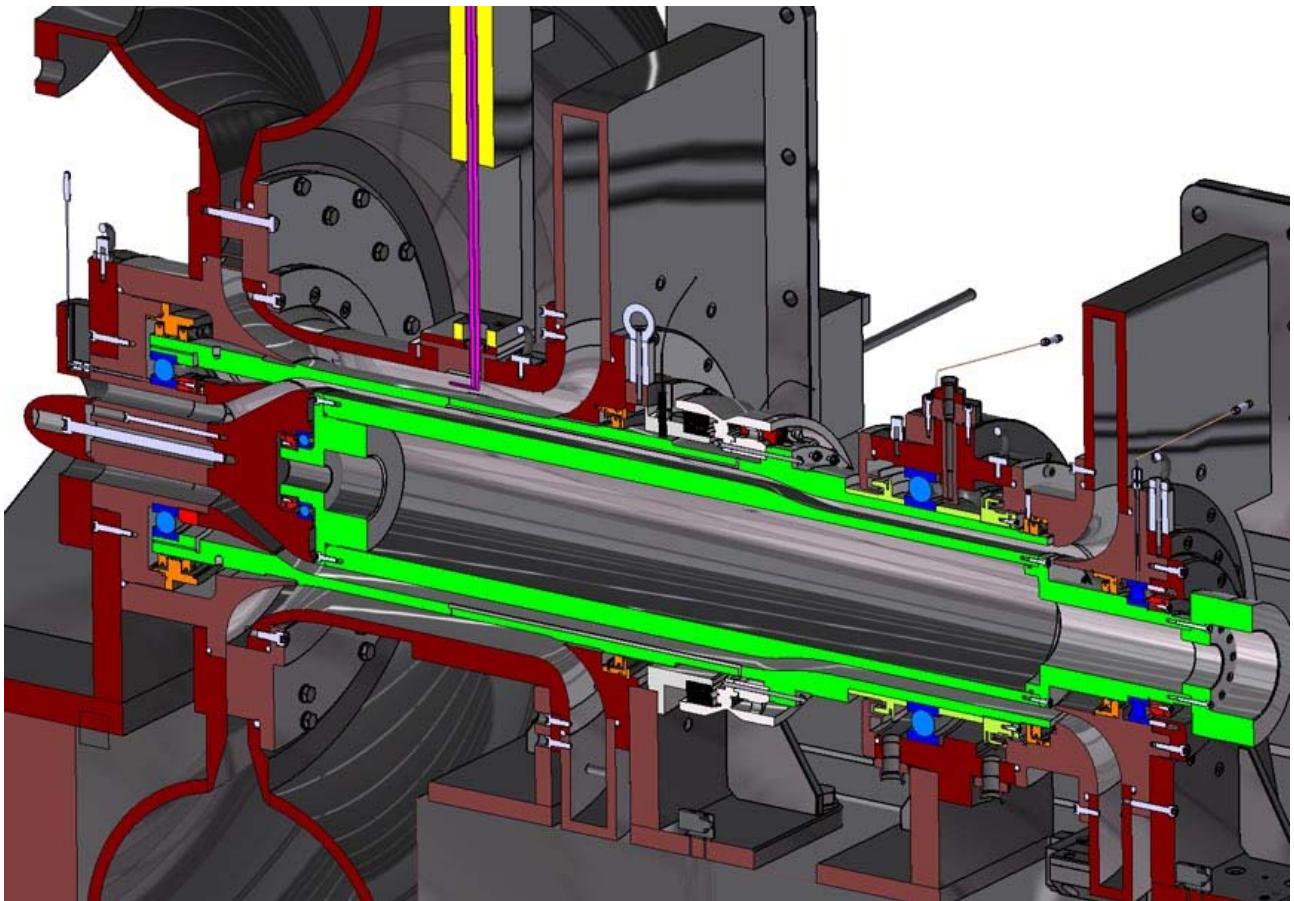


Bild 3: Konstruktion mit ungeteilter äußerer Welle

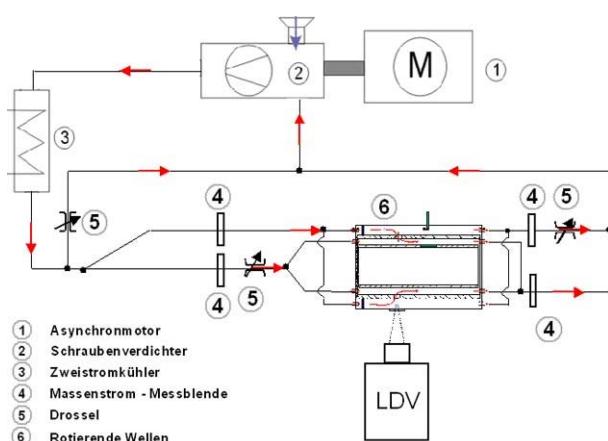


Bild 4: Flussbild des gesamten Prüfstandsaufbaus

### 3.3.3. Luftführung in den Ringspalten

Die Luftführung innerhalb des Kernbereichs des Prüfstands mit den rotierenden Wellen muss so gestaltet sein, dass die geforderten Bedingungen bezüglich Druckverhältnisse, Vordrall, Anströmmachzahlen und Massenstromaufteilungen realisiert werden können und dass an den Bohrungen definierte Strömungsverhältnisse vorlie-

gen. Bild 5 zeigt die Luftführung des inneren und äußeren Luftstroms im Detail.

Die Luft, welche in den Ringspalt zwischen stehendem Außengehäuse und rotierender äußerer Welle eingespeist werden soll, wird durch Leitungen in einen Sammelbehälter geführt, der gleichzeitig als Beruhigungsbehälter dient. Aus diesem Sammelbehälter strömt die Luft radial nach innen durch einen Drallerzeuger und wird anschließend die axiale Richtung in den äußeren Ringspalt umgelenkt. Hier strömt sie den rotierenden Bohrungen zu, wo ein Teil des Luftmassenstroms abgezweigt wird, während der Rest des Luftmassenstroms den Ringspalt über einen weiteren Sammler verlässt.

Die Luft in den inneren Ringspalt wird durch ein zentral angeordnetes Rohr in den Prüfstand eingeleitet und über Langschlitze und eine sich radial erweiternde Durchführung in den inneren Ringspalt eingespeist und strömt von innen zu den rotierenden Bohrungen. Nach Zugabe des Luftmassenstroms durch die Bohrungen aus dem äußeren Ringspalt strömt die Luft im inneren Ringspalt weiter und wird nach einer leichten Radiusreduktion ebenfalls über einen Sammler nach außen geleitet. Die Massenstrommessungen finden in den Rohrleitungen vor und hinter dem Kernteil des Prüfstands statt, wie in Bild 4 gezeigt.

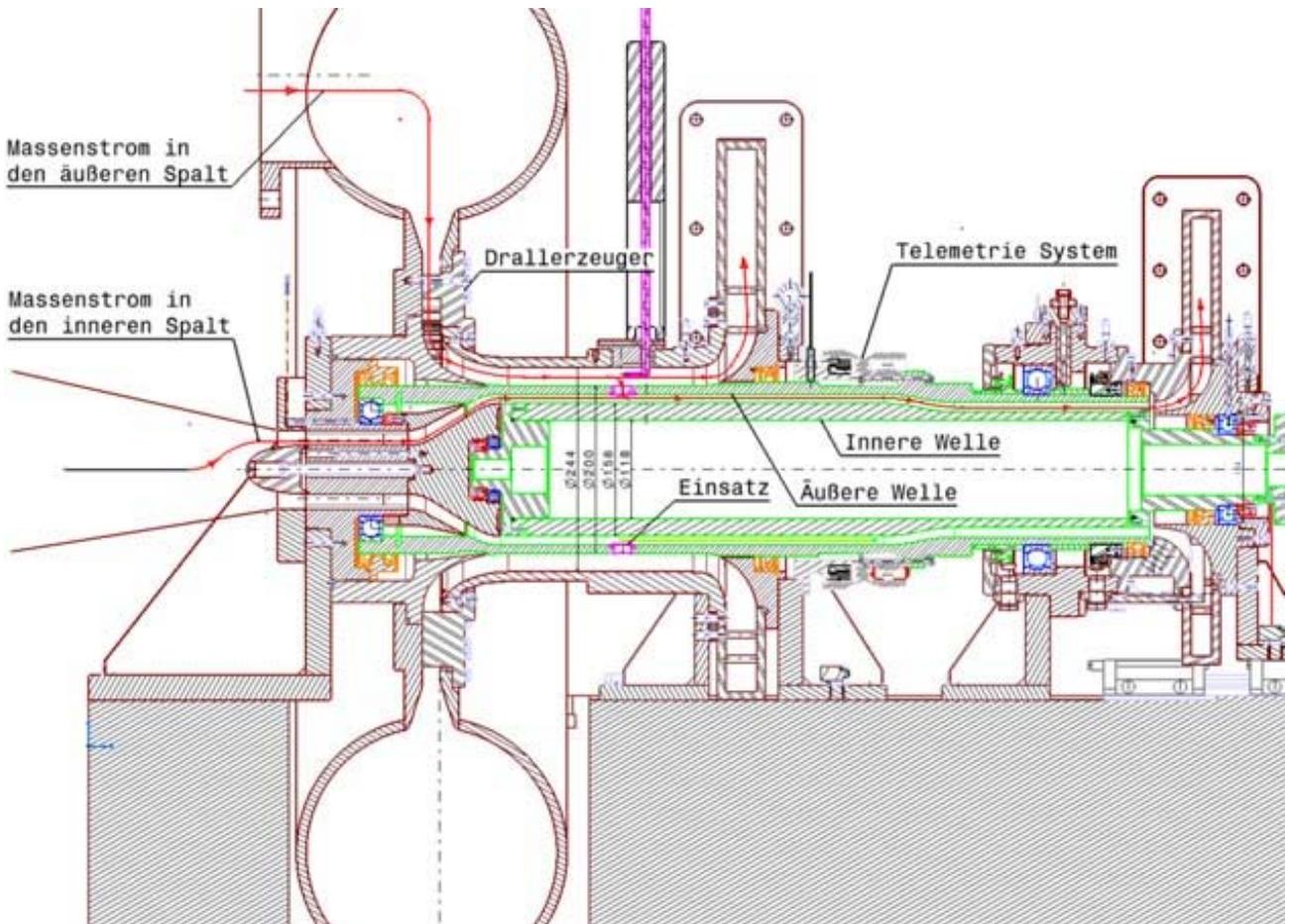


Bild 5: Luftführung in den Ringspalten der rotierenden Wellen

### 3.3.4. Auslegung

Für die Auslegung und Optimierung der wichtigsten Teile des Prüfstands wurden zahlreiche FEM- und CFD-Berechnungen durchgeführt.

#### 3.3.4.1. CFD-Rechnungen

In Bild 6 ist eine Berechnung der Strömung aus dem Zuführungsrohr in den torusförmigen Beruhigungsbehälter mit Zuströmung zum Drallerzeuger gezeigt.

Für eine homogene Zuströmung zu den Bohrungen ist es notwendig, dass der Drallerzeuger möglichst gleichmäßig radial angeströmt wird, wobei die Zuströmung vom Schraubenverdichter durch eine Rohrleitung erfolgt. Deshalb wurde ein Beruhigungsbehälter mittels 3-D-CFD-Verfahren (FLUENT) optimiert, um die Strömung gleichmäßig am ganzen Umfang zu verteilen. Das Bild zeigt links unten ein 3-D-Bild des Prüfstands mit dem torusförmigen Beruhigungsbehälter im Vordergrund und darüber die berechneten Geschwindigkeitsvektoren in der radialen Zuströmung zum Drallerzeuger. Rechts sind Schnitte im Torus (Einfärbung mit Geschwindigkeitsbetrag) gezeigt, welche eine gleichmäßige Beruhigung der Strömung demonstrieren. Wie aus dem Bild 6 deutlich erkennbar ist, erfüllt der optimierte Torus-Beruhigungsbehälter die an ihn gestellten Anforderungen sehr gut. Stromab der Strömungsdurchführung durch die Ringspalte zwischen Ge-

häuse, rotierender Außenwelle und rotierender Innenwelle muss die Luft wieder in eine Rohrleitung gesammelt werden. Auch dieser Sammler wurde optimiert, es wurde schneckenförmige Schweißkonstruktion gewählt.

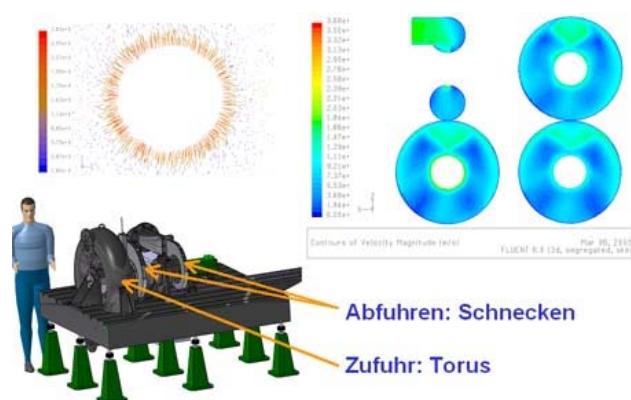


Bild 6: CFD-Simulationen der Strömung im Torussammelbehälter

Um sicherzustellen, dass die im Drallerzeuger stromauf des äußeren Ringspalts erzeugte Drallströmung auch noch bis zum Eintritt in die rotierenden Bohrungen erhalten bleibt, wurden weitere CFD-Rechnungen (2-D rotationssymmetrisch) durchgeführt. Die Rechnungen wurden für drei Werte der Tangentialgeschwindigkeit des verdrallt in den äußeren Ringspalt einströmenden Gases (0, 60 und

120 m/s) und bei Drehzahlen der äußeren Welle von – 1200 bis zu 1200 rad/s durchgeführt.

Bild 7 zeigt Geschwindigkeitsverteilungen im äußeren Ringspalt entlang einer Linie 100mm stromab des Eintritts in den Spalt senkrecht zur Welle bei unterschiedlichem Drall und bei unterschiedlichen Rotationsgeschwindigkeiten der äußeren Welle. Wie aus den Diagramm in Bild 7 zu entnehmen ist, beeinflusst die Rotation der Welle das Strömungsfeld im Ringspalt nur in einem Bereich von 2mm radial um die Welle und am Gehäuse, d.h. die rotierenden Grenzschicht und die Gehäusegrenzschicht bleiben hinreichen dünn, sodass die Strömung im äußeren Ringspalt den im Drallerzeuger generierten Drall im Wesentlichen bis zur Bohrung beibehält.

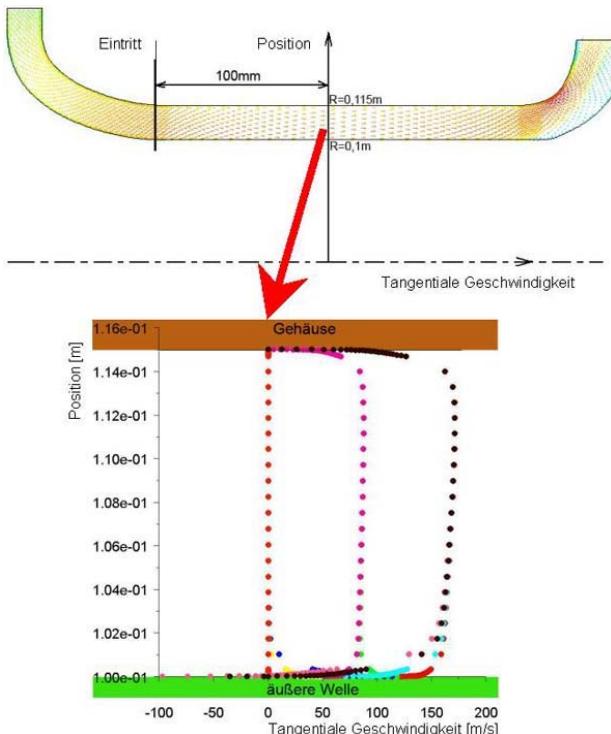


Bild 7: CFD-Rechnungen des äußeren Spalts mit Drall

### 3.3.4.2. FEM- Rechnungen

Zur Absicherung der Konstruktion wurden FEM-Berechnungen der Spannungen in verschiedenen Bauteilen durchgeführt, wobei insbesondere großer Wert auf die Analyse der Spannungen gelegt wurde, welche durch die Locheinsätze in der äußeren Welle entstehen. Tatsächlich ergab die FEM-Analyse, dass die äußere Welle das kritischste Teil des Prüfstands (Bild 8) ist.

Die Orte der größten Spannungen sind an den Aussparungen für die Locheinsätze ( $\sigma=180$  MPa) und bei den Instrumentierungsbohrungen für die mitrotierenden Druckaufnehmer (Kulites) zu finden ( $\sigma=230$  MPa). Eine Nachrechnung der Firma MTU Aeroengines, welche als Partner im Arbeitskreis vertreten ist, konnte die Zulässigkeit der Konstruktion bestätigen.

Als Material für die schnell rotierenden Wellen wurde ein hoch legiertes Aluminium EN AW-7075 im Zustand T7

ausgewählt. Um den einwandfreien Zustand des Materials feststellen zu können, wurden Proben aus dem Kern herausgeschnitten, diese unterschiedlich wärmebehandelt und die Zugprüfung zum Auswerten durchgeführt. Für Tragteile des Prüfstands wird Stahl S355 und für nicht belastete Teile Aluminium EN AW-2007 verwendet.

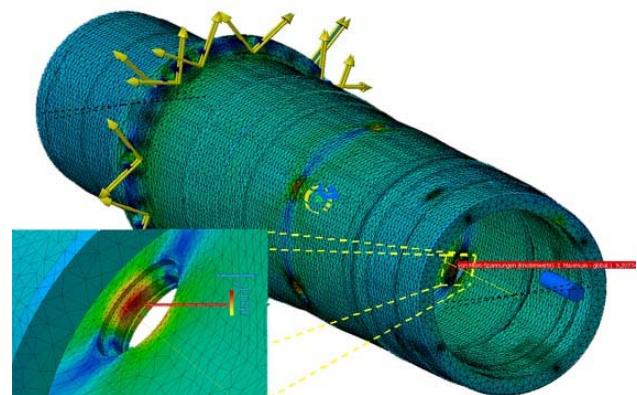


Bild 8: FEM-Rechnungen der äußeren Welle

### 3.3.5. Wichtige Einzelteile

#### 3.3.5.1. Wellen

Aufgrund der hohen Kosten für die äußere Welle wurde eine Konstruktion gewählt, die es erlaubt, verschiedene Lochkonfigurationen durch Verwendung von geeigneten Einsätzen zu realisieren. Die Einsätze sind so gestaltet, dass das L/d-Verhältnis über einen relativ weiten Bereich variiert werden kann, ohne die gesamte Welle und die Instrumentierung austauschen zu müssen. Es sind auch Einsätze mit schrägen Bohrungen möglich.

Die Einsätze werden durch O-Ringe festgehalten, welche so ausgelegt sind, dass die Einsätze im Betrieb ohne Rotation der äußeren Welle nicht nach innen herausfallen können. Um nachzuweisen, dass die O-Ring-Konstruktion als Befestigung ausreichend ist, wurde eine Probeleiste mit vier verschiedenen Nutformen für den O-Ring hergestellt (Bild 9). Anhand dieser Leiste konnte festgestellt werden, dass die O-Ringe in den Nuten genügend Kraft erzeugen, um die Einsätze in den Bohrungen zu halten.

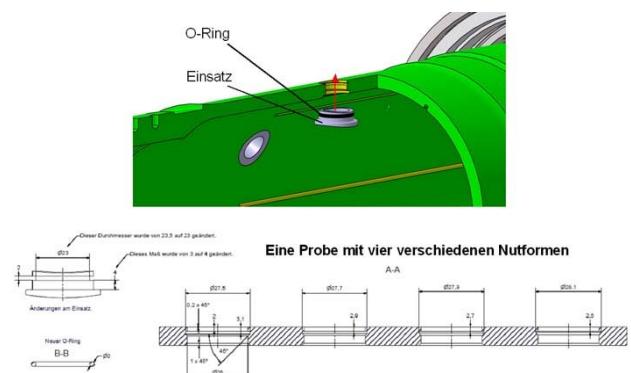


Bild 9: Einsatzlösung und Probeleiste für Nutformen

Um die Einsätze wechseln zu können, muss die innere Welle aus dem Prüfstand herausgezogen werden. Hierzu

wird die innere Welle auf zwei Rollenumlaufeinheiten gelagert (Diese haben sich bei der Montage der äußeren Welle als sehr hilfreich herausgestellt). Der vordere Teil der inneren Welle wird bei der Demontage durch eine lange Stange gestützt, bis diese weit genug aus der Verankerung ragt, um sie mit dem dritten Rollwagen mit einem Doppelkegelrollenlager zu stützen (Bild 10).



Bild 10: Montage der inneren Welle

### 3.3.5.2. Lager, Dichtungen und Drallerzeuger

Die Lagerung der Wellen erfolgt über drei hochpräzise fettgeschmierte Schrägkeramikkugellager mit Dichtungen und ein hochpräzises ölgeschmiertes Schrägkeramikkugellager am größten Durchmesser D=180 mm (In Bild 3 blau hervorgehoben). Die Schrägkugellager brauchen eine axiale Vorspannung von bis zu 1000 N bei der inneren Welle und von bis zu 2000 N bei der äußeren Welle, welche wird mit Federn erzeugt wird.

Als Dichtungen werden, wie vom Arbeitskreis verlangt Radial-Gleitdichtungen, bzw. Kohledichtungen der Firma Burgmann verwendet. Diese sind in der Gesamtansicht des rotierenden Teils des Prüfstands (Bild 3) orangefarbig hervorgehoben. Die Gleitdichtungen haben erheblich kleinere Leckagen als eine konventionellere Labyrinthdichtung, sind jedoch sehr empfindlich gegenüber Vibrationen, weshalb der Rundlauf der Welle im Betrieb ständig kontrolliert werden muss. Hierzu wurden induktive Distanz messende Sensoren im Prüfstand integriert. Die Dichtung benötigt zudem eine genügend harte ( $HRC_{min}=55$ ) Gegenfläche. Aus diesem Grund wurden die gesamte äußere Welle und der hintere Teil der inneren Welle mit einer Schicht von 2 Hundertstel Millimeter vernickelt.

Eine weitere Aufgabe während der Auslegung des Prüfstands war die Optimierung des Drallerzeugers, der zwischen der torusförmigen Beruhigungskammer und dem äußeren Ringspalt angeordnet ist. Der Drall wird der Strömung im Bereich der radialen Einströmung aufgeprägt, anschließend erfolgt die Umlenkung der Strömung in axiale Richtung in den Ringspalt. Der Drall wird durch eine Reihe von relativ dünnen Schaufeln erzeugt, welche in eine Scheibe gefräst werden (Bild 11). Für jeden der drei Drallwinkel (0, mittel, maximal) wird jeweils eine neue Scheibe mit variierendem Schaufeldesign gefertigt. Die Scheiben wurden zweiteilig ausgelegt, um einen raschen Umbau zu ermöglichen, die Teile wurden so gelegt, dass keine Umlenschaufel geschnitten wird.



Bild 11: Drallscheibe für 50°

### 3.3.6. Antrieb der Wellen

Die Wellen werden durch zwei Asynchronmotoren mit stufenloser Steuerung über zwei Frequenzumrichter über Flachriemen angetrieben. Dadurch werden Drehzahlen bis 12 000 U/min ermöglicht, die Motoren besitzen Leistungen von 13,5 kW für innere Welle und 18 kW für die äußere Welle.

### 3.3.7. Messtechnik

Das Mess- und Regelsystem für den Prüfstand wurde für dieses Projekt komplett neu entwickelt. Die Messtechnik besteht zum einen aus Messinstrumenten für die Durchflussmessung und die Messung der Strömungseigenschaften. Der Rest der Messtechnik dient der Beobachtung des Prüfstandsverhaltens. In die erste Gruppe gehören die Blenden zur Messung der Massenströme, die Fünf-Loch-Sonden für die Messung von Totaldruck, statischem Druck und des Geschwindigkeitsvektors sowie Thermoelemente zur Aufnahme der Fluidtemperatur im äußeren Ringraum, in die zweite Gruppe gehören z.B. Aufnehmer der Vibratonen.

Mit einem Telemetrie System der Firma Rolls-Royce Deutschland werden die statischen Drücke, die Differenzdrücke (Kulites Druckaufnehmer) und die Temperaturen im mitrotierenden System direkt an den rotierenden Radialbohrungen der äußeren Welle gemessen. Damit werden potentielle Fehlerquellen bei der Rückrechnung aus dem statischen Druck eliminiert, insbesondere ist es möglich, den Druck im inneren Ringkanal zwischen den rotierenden Wellen direkt in der Nähe der rotierenden Bohrungen zu messen. Die Anordnung der Messaufnehmer in der für diesen Prüfstand speziell entwickelten Aufnahme mit Antenne ist im Bild 12 links gezeigt. Rechts in dieser Abbildung sind die Einzelaufnehmer und das Messwerterfassungssystem zu sehen. Im Schnitt in Bild 3 ist die Anordnung der Telemetrie (weißfarbig) ebenfalls sichtbar. Diese besteht aus den mitrotierenden Messwertaufnehmern, einer Aufnahme mit Antenne, die mit der Welle an einem Flansch verschraubt ist, und der im Gehäuse montierten stehenden Antenne. Die Übertragung zwischen den beiden Antennen erfolgt vollständig digital, wobei weitere potentielle Fehlerquellen vermieden werden.

Die mitrotierenden Druckaufnehmer sind in Röhrchen eingebaut, welche in Nuten am inneren Durchmesser der äußeren Welle eingegossen sind. Die Druckaufnehmer für Absolut-, Differenz- und Relativdruck liegen in der Achsenebene der Bohrungen sowie in einer weiteren Messebene, welche zwei Bohrungsdurchmesser stromauf der

rotierenden Bohrungen angeordnet ist. Zwei Miniaturthermoelemente sind in einer Messebene zwei Bohrungsdurchmesser stromab der rotierenden Bohrungen platziert.



Bild 12: UNIVERS Telemetrie System

Um das Prüfstandsverhalten im Betrieb zu analysieren, werden piezoelektronische Beschleunigungsaufnehmer zur Vibrationsmessung der Lager und Mantelthermoelemente für die Messung der Lagertemperatur verwendet. Zur Beobachtung des Rundlaufs der äußeren Welle werden zwei induktiv Distanz messende Sensoren für die Messung der Wellenauslenkung eingesetzt. Laser Reflexions-Lichttaster werden zur Riemenschlupfkorrektur der Drehzahl der beiden Wellen verwendet.

Für die Erfassung aller Signale und zur Steuerung der Absperrklappen wird ein PXI System verwendet, die Datenbearbeitung erfolgt mit Hilfe des Softwarepaketes LabView 7.1 von der Firma National Instruments.

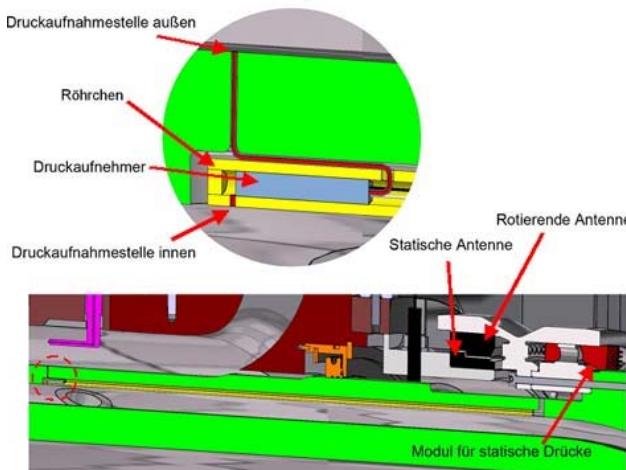


Bild 13: Instrumentierung der Kulites

#### 4. MESSDATEN

Die Messungen werden sich zunächst auf die Bestimmung des Durchflusskoeffizienten konzentrieren. Aufgrund der Messdaten für die Massenströme sollen geeignete Korrelationen für Durchflusskoeffizienten entwickelt werden, wobei auch eine geeignete Methode zur Definition der Bezugsdrücke definiert werden soll.

Es wird angestrebt, ein maximales Druckverhältnis von  $\Pi=1,8$  über die rotierende Bohrung zu erreichen. Die Messmatrix ist in der Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Messmatrix

Drall	0	$\frac{1}{2}$ max.	maximal
I/d Verhältnis	0,5	1,2	2,5
r/d Verhältnis	scharf	0,2	
Drehzahlen	0 bis maximal		

Für ein besseres physikalisches Verständnis der Messergebnisse soll zudem, wo möglich, die sich einstellende Form der Strömungsform untersucht werden. Als Messtechniken kommen hier berührungslose Lasermethoden wie Laser-Doppler-Anemometrie (LDA) oder Particle-Image-Velocimetry (PIV) in Frage, die beide am Institut zur Verfügung stehen.

#### 5. SICHERHEITSMAßNAHMEN

Da es sich um einen Prüfstand mit zwei schnell rotierenden Wellen handelt, ist im unwahrscheinlichen Fall einer massiven Fehlfunktion die Gefahr von umherfliegenden Teilen vorhanden. Es müssen insbesondere auch Bauteile, welche nicht in das Gehäuse eingebaut sind, betrachtet werden. In Frage kommen hier das Telemetrie-Gehäuse, die Riemscheibe der kleinen Welle und die Riemenantriebseinheiten der beiden Motoren.

Um die Umgebung des Prüfstands zu sichern, wird der gesamte rotierende Teil des Prüfstands im Betrieb mit einer Schutzwand abgedeckt. Diese wird aus Stahl- und Holzplatten zusammengebaut. Die erste Schicht besteht aus einem dünnen Stahlblech. Es folgen eine Holz-, eine Stahl- und eine weitere Holzschicht. Die letzte Schicht besteht aus einem massiven Stahlblech. Die erste Schicht kann herumfliegende Teile aufnehmen und ein Zurückprallen verhindern. Die weiteren Schichten sorgen für die Aufnahme der kinetischen Energie der Teile.

Es sind weitere Standard-Sicherheitsmaßnahmen wie Elektro-Notausschalter, Zutrittverbot usw. während des Betriebs vorhanden.

#### 6. STAND DER ARBEIT

In Bild 14 ist der vollständige Versuchsaufbau dargestellt. Um eine ausreichende Strömungsberuhigung zu erreichen, welche für die gewünschte hohe Genauigkeit der Massenstrommessung notwendig ist, müssen die Zu- und Ableitungen insgesamt nahezu 15 m lang sein.

Die Kalibrierung der Messgeräte und die ersten Messabläufe werden derzeit durchgeführt. Die Software zur Steuerung und Regelung wird programmiert. Bis zur DGLR-Tagung wird der Prüfstand voraussichtlich in Betrieb genommen worden sein und es werden erste Versuchsergebnisse vorliegen.

## 7. ZUSAMMENFASSUNG / AUSBLICK

Das FVV-Projekt „Rotierende Radialbohrungen“ soll zur Verbesserung der Vorhersagefähigkeit analytischer Methoden für die Berechnung des Durchflusskoeffizienten radialer rotierender Bohrungen in schnell rotierenden Wellen beitragen. Mit Hilfe der aus den Messungen abzuleitenden Korrelationen können die Massenströme unter Verwendung von Strömungs-Netzwerkprogrammen genauer als bisher berechnet werden.

Auf der Basis der vom FVV-Arbeitskreis vorgegebenen Randbedingungen wurde ein Prüfstand mit zwei unabhängig voneinander steuerbaren Wellen definiert und konstruiert, in dem sowohl die innere wie auch die äußere Welle mit Bohrungen verschiedener Anzahl und Größe versehen werden kann.

Die Auslegung des Prüfstands inklusive CFD- und FEM-Auslegungsrechnungen zur Optimierung einzelner Komponenten des Prüfstands sowie die gesamte Detailkonstruktion wurden abgeschlossen und hier dargestellt. Die Bauteile des Prüfstands sind weitestgehend bestellt und zum größten Teil bereits geliefert, der Prüfstand wird zum Zeitpunkt der Veröffentlichung aufgebaut.

An diesem Prüfstand wird der Durchflusskoeffizient bei unterschiedlichen relativen Drehzahlen und unterschiedlichen Konfigurationen der Bohrungen untersucht werden

können. Durch die verwendeten Locheinsätze ist eine sehr flexible Änderung der Lochkonfigurationen möglich. In dem derzeitigen Projekt wird nur eine Durchströmung der äußeren Welle untersucht werden und die Messungen werden sich auf die Bestimmung des Durchflusskoeffizienten und den Vergleich mit CFD-Rechnungen konzentrieren. Erste Messungen am Prüfstand werden im Frühsummer 2006 erwartet.

Im weiteren Verlauf dieses Projekts oder möglicher Folgeprojekte sollen auch die Strömungsfelder mit berührungslosen Meßmethoden untersucht und die Resultate mit den CFD-Rechnungen verglichen werden

## 8. DANKSAGUNG

Die Autoren möchten sich bei der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V. (FVV, Frankfurt) für die Förderung der Arbeiten im Rahmen des Projekts „Rotierende Radialbohrungen“ und für die Unterstützung der Arbeiten bedanken.

Das Vorhaben wurde von einem Arbeitskreis der FVV unter der derzeitigen Leitung von Frau Dr.-Ing. Michaela Deinert, Rolls-Royce Deutschland, begleitet. Diesem Arbeitskreis gebührt großer Dank für die engagierte Unterstützung und die vielen Diskussionen und Anregungen.

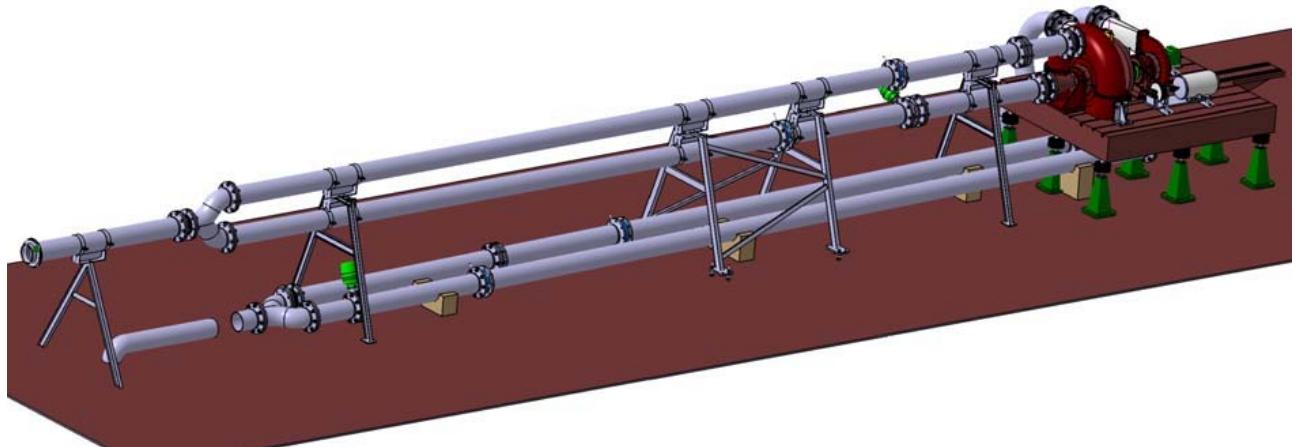


Bild 14: Gesamter Aufbau des Prüfstands

## 9. LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Mo, L., Gao, Zh.: "Experimental Results on the Air Flow Through Liner Holes", Int. J. Turbo and Jet Engines 3, p. 125-138 (1986)
- [2] Mc Greehan W.F., Schotsch M.J.: "Flow characteristics of Long Orifices with Rotation and Corner Radiusing", ASME Paper 87-GT-162 (1987)
- [3] Meyfarth, P.F., Shine, A.J.: "Experimental Study of Flow Through Moving Orifices", J. of Basic Engineering, pp. 1082-1083 (1965)
- [4] Reichert A.W., Brillert D., Simon H.: "Loss Prediction for Rotating Passages in Secondary Air Systems", ASME paper 97-GT-215 (1997)
- [5] Samoilovich G.S.: "Coefficients of Flow Through Pressure Equalizing Holes in Turbine Discs", D.S.I.R. Translation C.T.S. No. 541 (1957)
- [6] Rohde, R.E., Richards H.T., Metger G.W.: "Discharge Coefficients for Thick Plate Orifices with Approach Flow Perpendicular and Inclined to the Orifice Axis", NASA TN D-5467 (1969).
- [7] Alexiou A., Hills N.J., Long C.A., Turner A.B., Wong L.-S., Millward J.A.: "Discharge coefficients for flow through holes normal to a rotating shaft", Int. J. Heat Fluid Flow 21, pp. 701-709 (2000)
- [8] S. Wittig, S. Kim, Th. Scherer, R. Jacoby, I. Weißert: "Rotierende Wellen- und Scheibenbohrungen – Durchfluss an rotierenden Wellen und Scheibenbohrungen und Wärmeübergang an rotierenden Wellen", Abschlußbericht FVV-Vorhaben Nr. 465 und 536, Heft 574 (1995)