

DIE ENTWICKLUNG EINER MESS-STRECKE MIT OPTISCHEM ZUGANG FÜR DEN HEIß-AKUSTIK-TESTSTAND IN BERLIN

T. Schliwka, L. Malzacher & D. Peitsch, Fachgebiet Luftfahrtantriebe, Institut für Luft- und Raumfahrt

Technische Universität Berlin, Marchstr. 12-14, 10587 Berlin, Deutschland

Zusammenfassung

In Kooperation mit dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) wurde ein neuer Teststand für akustische und strömungsmechanische Versuche entwickelt. Der modulare Heiß-Akustik-Teststand bietet die einzigartige Möglichkeit strömungsführende Oberflächen unter realitätsnahen Druck-, Geschwindigkeits- und Temperaturniveaus zu untersuchen, die denen in Gasturbinen ähnlich sind.

Für die Durchführung von strömungsmechanischen Untersuchungen wurde am Fachgebiet Luftfahrtantriebe für den Kanal mit rundem Strömungsquerschnitt eine eckige Mess-Strecke entwickelt, mit deren Hilfe nun auch optische Untersuchungen an durchströmten Oberflächen möglich sind. Durch die integrierte Druckluftversorgung im Plenum der Mess-Strecke, ist die Interaktion zwischen Hauptströmung und Sekundärluft möglich. Die Mess-Strecke und deren Peripherie wurden an den vorhandenen Versuchsstand angepasst und für die erforderlichen Strömungsbedingungen ausgelegt. Die für die Anpassung vom runden Strömungskanal auf die eckige Mess-Strecke erforderlichen Übergangsstücke wurden mittels einer numerischen Strömungssimulation optimiert. Für optische Strömungsuntersuchung wurde ein Versuchsaufbau entwickelt, der Messungen in Strömungen mit hoher Temperatur und hohem Druck ermöglicht. Das Strömungsfeld wurde in ersten Versuchen mittels Druckmessungen und Particle Image Velocimetry (PIV) vermessen.

NOMENKLATUR

λ	[nm]	Wellenlänge des Lasers
κ	[--]	Isentropenexponent
a, b, c	[mm]	Länge der Ellipsenhalbachsen
Ψ	[--]	Durchflussfunktion
ρ	[kg/m ³]	Dichte Luft
d_h	[mm]	hydraulischen Querschnitt
u	[m/s]	Geschwindigkeit
u_∞	[m/s]	Geschwindigkeit der Anströmung
\dot{m}	[kg/s]	Massenstrom
M	[--]	Machzahl
p	[kPa]	Druck
p^*	[kPa]	kritischer Druck
T	[K]	Temperatur
A	[mm ²]	Querschnittsfläche
y^+	[--]	dimensionsloser Wandabstand

1. EINLEITUNG

Die große Herausforderung in der Luftfahrt ist es den Fluglärm und die Schadstoffemissionen zu verringern, um so ein nachhaltiges Wachstum des Luftverkehrs sicher zu stellen. An Luftfahrtantrieben können diese Bestrebungen direkt adressiert werden, denn hier entsteht nicht nur ein Großteil der Schallemissionen, sondern auch die gesamten Schadstoffe, welche in die Atmosphäre emittiert werden.

In modernen Luftfahrtantrieben wird ein erheblicher Anteil

der verdichteten Luft zur Kühlung und Abdichtung gegen Heißgaseinzug in das Turbineninnere genutzt. Diese sogenannte Sekundärluft steht dem Kreisprozess anschließend nicht mehr zur Verfügung und trägt somit auch nicht zur Schuberzeugung bei. Ein Weg um moderne Triebwerke und Gasturbinen effizienter zu gestalten, ist die Reduktion der benötigten Sekundärluft, die nicht zur Schuberzeugung bzw. zur Generierung von Wellenleistung genutzt werden kann. Dazu ist ein detailliertes Verständnis der Interaktion zwischen dem Hauptgasstrom und der Sekundärluft erforderlich. Mit diesen Erkenntnissen kann der Wirkungsgrad erhöht und der spezifische Kraftstoffverbrauch gesenkt werden.

In zahlreichen Windkanälen wird diese Interaktion unter atmosphärischen Bedingungen, teilweise auch mit einer beheizten Strömung simuliert. Mit Hilfe des neuen Heiß-Akustik-Teststands ist es möglich, die Wechselwirkung zwischen dem Heißgas der Hauptströmung und der Sekundärluft unter realitätsnahen Bedingungen zu untersuchen. Diese Wechselwirkung ist charakteristisch für filmgekühlte Oberflächen in Brennkammern und Turbinen, sowie an Kavitäten zwischen rotierenden und statischen Komponenten.

Als weiterer Aspekt ist nun eine simultane Messung von akustischen und strömungsmechanischen Phänomenen zu nennen. So besteht mit Hilfe des Versuchsstands die Option die Entstehung und Interaktion von Schallwellen mit der Kühlluft, die durch Liner in die Brennkammer eintritt, zu klären.

In dieser Arbeit soll der Aufbau des Versuchsstands im Allgemeinen und die Entwicklung der eckigen Mess-Strecke im Speziellen beschrieben werden. Zunächst wird der Aufbau der Anlage und deren Charakteristika hinsichtlich Betriebsbereichen und Messtechnik

vorgestellt. Anschließend wird auf die Auslegung und die Integration der eckigen Mess-Strecke in den Prüfstand eingegangen. In einem nächsten Schritt wird die Auslegung der rund-eckig-Übergänge und deren numerische Strömungsuntersuchung beschrieben. Die durchgeführten PIV-Messungen werden mit der theoretischen Auslegung der Mess-Strecke verglichen. Abschließend wird die durchgeführte Auslegung bewertet und zukünftig geplante Untersuchungen, sowie Ausbaustufen des Prüfstands erörtert.

2. AUFBAU DES HEIß-AKUSTIK-TESTSTANDS

Der Heiß-Akustik-Teststand (HAT) stellt die konsequente Weiterentwicklung des atmosphärischen DUCT-Teststandes der Abt. Triebwerksakustik des DLR dar. Die bereits gewonnenen Erkenntnisse können nun auch in mit Druck und Temperatur beaufschlagten Strömungen überprüft werden und ermöglichen Untersuchungen bei Bedingungen, die der Anwendung in der Turbomaschine schon sehr nahe kommen.

Die Betriebsparameter des Heiß-Akustik-Teststands sind in Tabelle 1 dargestellt.

Parameter	Wert	Einheit
max. Temperatur	820	K
max. Druck	1100	kPa (abs)
Frequenzbereich	160 – 2800	Hz
max. Massenstrom	0,78	kg/s
Machzahl	0 – 0,7	
Kanaldurchmesser	70	mm

TAB 1. Betriebsparameter HAT

Zur Druckerzeugung werden zwei Schraubenkompressoren der Firma Kaeser (ESD 351/EWD 301) verwendet. Sie liefern einen maximalen Versorgungsdruck von 16 bar (absolut) bei einem Massenstrom von 0,78 kg/s. Diese Druckluft steht für die Hauptströmung und für die Sekundärluft zur Verfügung. Der Druck innerhalb der Anlage kann mit Hilfe eines steuerbaren Druckventils von annähernd atmosphärischen Bedingungen auf bis zu 1100 kPa Absolutdruck variiert werden. Der Aufbau stellt sich wie in BILD 1 gezeigt dar. Der Massenstrom kann durch die Installation von Blenden verschiedener Durchmesser (10-55 mm) am Abschluss des Teststands verändert werden. Gemessen wird der Hauptmassenstrom mittels eines VARIOMASS Eco Durchflussmessers, welcher sich

stromauf des Luftherhitzers befindet. Der Kältetrockner, sowie die installierten Filter stellen eine Öl- und kondensatfreie Strömung sicher. Der vom DLR hergestellte Luftherhitzer kann bei einer maximalen Leistung von 540 kW die Strömung auf bis zu 820 K erwärmen.

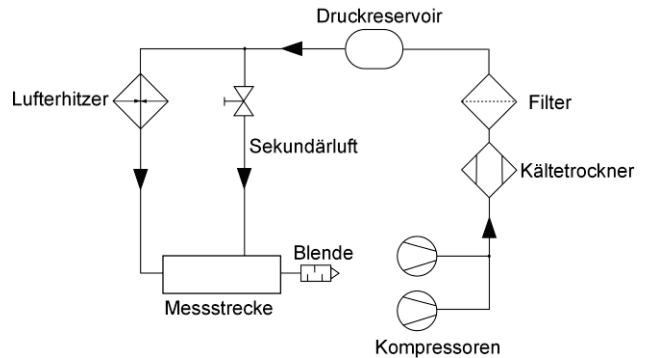


BILD 1: Schaltplan des Heiß-Akustik-Teststands

Um die Wärmeabgabe zwischen Luftherhitzer und Mess-Strecke an die Umgebung zu minimieren, ist der Teststand mit einer Isolation versehen.

2.1. Die Instrumentierung

In diesem Kapitel wird die bisher am Versuchsstand installierte Messtechnik beschrieben.

2.1.1. Temperaturmessung

Die Temperatur in der Hauptströmung wird an sechs Positionen stromauf und stromab der Messstrecke bestimmt. Als Sensoren dienen temperaturabhängige Widerstände (RTD) vom Typ PT100, welche mit einem digitalen Multimeter (Agilent AG34972) verbunden sind. Die Genauigkeit beträgt ±0,5°C, in einem Messbereich von 280-820 K.

2.1.2. Druckmessung

Der statische Druck wird an mehreren Messstellen bestimmt, die stromauf und stromab der Mess-Strecke liegen. An der Blende wird der absolute Druck gemessen. Durch eine redundante Auslegung dient die Differenz zwischen den Messstellen direkt zur Überprüfung der Genauigkeit. Angeschlossen sind nachgeordnet zwei PSI 9116 Druck Scanner.

Zusätzlich kann bei niedrigen Temperaturen über eine Pitotsonde und einer Druckbohrung der Differenzdruck innerhalb der eckigen Mess-Strecke bestimmt werden.

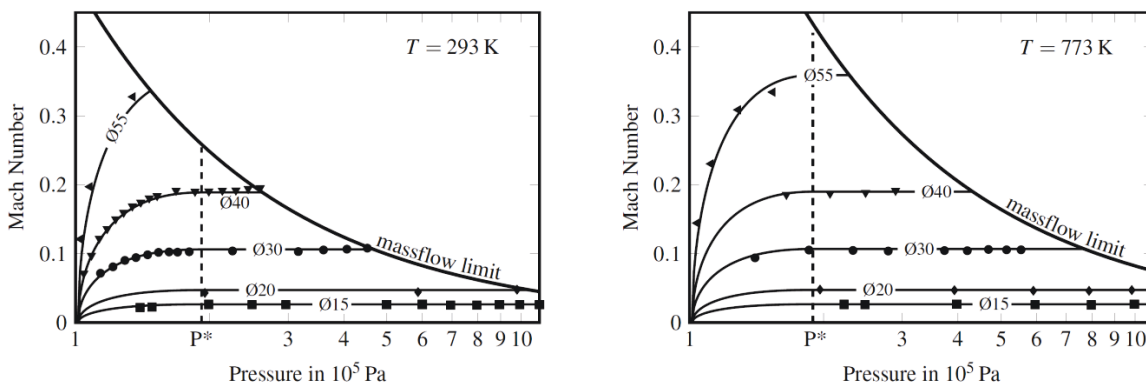


BILD 2: Machzahl Charakteristik für zwei Temperaturen. Die analytische Berechnung ist als durchgehende Linie, die gemessenen Werte als Markierungen dargestellt. [1]

2.1.3. Akustische Druckmessungen

Für aeroakustische Messungen am Teststand befindet sich stromauf und stromab der Mess-Strecke jeweils ein Lautsprecher, um Schallsignale im Kanal zu erzeugen. Zur Aufzeichnung der akustischen Signale kommen eigens vom DLR entwickelte Mikrofonsonden zum Einsatz. Diese werden durch Sekundärluft gekühlt und können bei hohem Drücken von bis zu 2000 kPa und hohen Temperaturen von bis zu 1500 K, wie in [1], [2] beschrieben, eingesetzt werden. Die Anordnung der Lautsprecher und Mikrofonsonden entlang des Teststands ist in BILD 4 zu erkennen.

3. BESTIMMUNG DER BETRIEBSPUNKTE

Die Strömungszustände im Teststand werden über ein Druckventil und die am Abschluss des Kanals installierte Blende festgelegt. Zunächst wird der Druck innerhalb des Teststands eingestellt. Die daraus resultierende Strömungsgeschwindigkeit ist nun durch die Geometrie der Blende definiert. Bei einer Erhöhung des Drucks steigt die Geschwindigkeit bis der kritische Druck an der Blende erreicht ist. Dann herrscht dort die Schallgeschwindigkeit die Machzahl beträgt $M=1$. Bei einer weiteren Druckerhöhung bleibt die Geschwindigkeit konstant. Der kritische Druck p_1^* kann mittels der Isentropenbeziehung bestimmt werden:

$$\frac{p_1^*}{p_2} = \left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \quad (1)$$

Dabei bezeichnet der Index 1 den Zustand im Kanal und der Index 2 den Zustand hinter der Blende, im vorliegenden Fall also den Umgebungsdruck. Nun ist der kritische Druck p_1^* nur noch abhängig vom Isentropenexponenten κ . Da der Isentropenexponent sich nur geringfügig mit den hier betrachteten Drücken und Temperaturen ändert, ergibt sich der kritische Druck zu:

$p_1^* = 191,8 \text{ kPa}$ mit $\kappa = 1,4$ und $p_2 = 101,325 \text{ kPa}$

Der Massenstrom durch eine Düse wird in [3] beschrieben.

$$\dot{m} = A_2 \sqrt{2p_1\rho_1} \Psi \quad (2)$$

Darin beschreibt Ψ das Abblasen des Fluids. Daraus folgt:

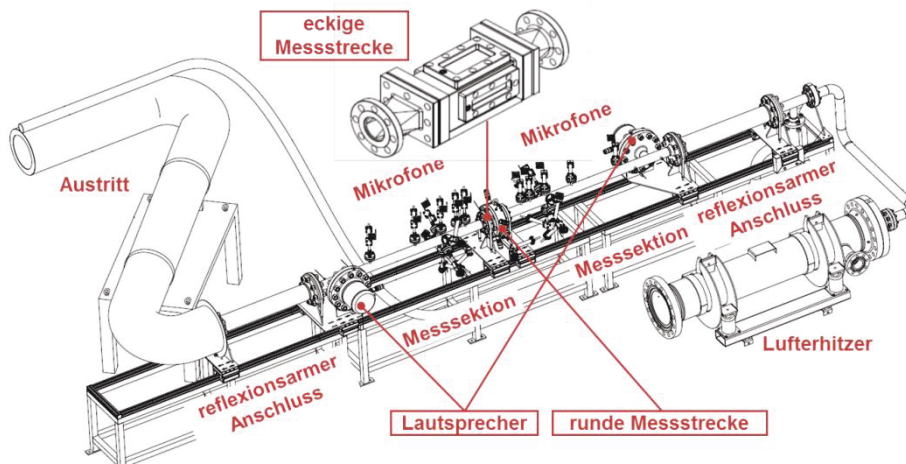


BILD 4: Überblick des Heiß-Akustik-Teststands

$$p_1 < p_1^*: \Psi = \sqrt{\frac{\kappa}{\kappa-1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}} \right]} \quad (3)$$

Und für höhere Drücke:

$$p_1 \geq p_1^*: \Psi = \frac{\kappa}{\kappa-1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}} \right] \quad (4)$$

Aus der Kontinuitätsgleichung kann damit die Machzahl im Rohr bestimmt werden:

$$M_1 = \frac{A_2}{A_1} \sqrt{\frac{2}{\kappa}} \Psi \quad (5)$$

Aus den Formeln 3-5 resultiert die Machzahl Charakteristik für die verschiedenen Blenden. In BILD 2 sind die Charakteristiken für fünf Blenden mit Durchmessern zwischen 15 mm – 55 mm für Temperaturen von 293 K (links) und 773 K (rechts) dargestellt. Die analytischen Ergebnisse sind als Linien dargestellt, die gemessenen Werte als Markierungen. Die Übereinstimmung zwischen den theoretischen und gemessenen Werten ist sehr gut. Wie angenommen ist bleibt die Machzahl konstant, wenn der kritische Druck überschritten wird. Unterhalb des kritischen Drucks ist die Machzahl eine Funktion des Drucks. Exemplarisch ist die Machzahl für verschiedene Temperaturen und Drücke in BILD 3 dargestellt.

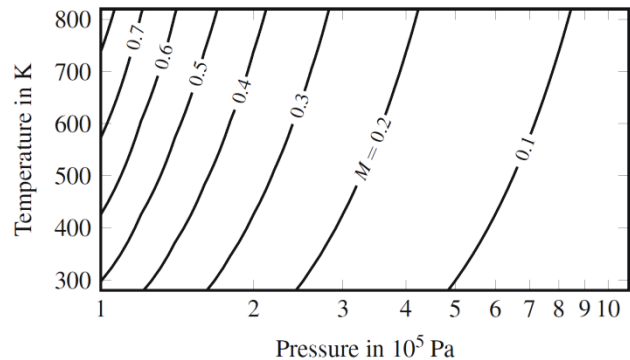


BILD 3: max. Machzahl in Abhängigkeit des Drucks und der Temperatur nach [1]

4. AUSLEGUNG DER MESS-STRECKE

Zur Untersuchung von ebenen durchströmten Oberflächen (sog. Linern) ist eine Mess-Strecke mit rechteckigem Strömungsquerschnitt auszulegen. Optische Messungen, z.B. für die Bestimmung des Wärmeübergangs oder der detaillierten strömungsmechanischen Untersuchung von Kühlluft-Einblasung, sollten durch eine rechteckige Mess-Strecke mit 3-seitigem optischem Zugang realisiert werden. Dafür wird eine rechteckige Mess-Strecke ausgelegt, die gleichzeitig auch ebene Liner (durchströmt/undurchströmt) aufnehmen kann.

Wie bereits bei den Übergängen soll zur Vermeidung der akustischen Reflexionen auch der rechteckige Querschnitt dem Querschnitt des runden Kanals entsprechen. Es wird ein rechteckiger Querschnitt von 43 mm Höhe und 90 mm Breite gewählt, um eine dem Kreisquerschnitt ähnliche Fläche zu erreichen.

Zum Vergleich zwischen einer reinen Rohrströmung und dem rechteckigen Kanal kann der hydraulische Querschnitt d_h nach [4] herangezogen werden.

$$d_h = \frac{4A}{U} \quad (6)$$

Die geometrischen Parameter der Querschnitte sind in Tabelle 2 gegenübergestellt.

Parameter	Parameter	Wert
Runder Querschnitt	Durchmesser [mm]	70
	Fläche A [mm ²]	3848,4
	hydr. Durchmesser d_h [mm]	70
Rechteckiger Querschnitt	Höhe [mm]	43
	Breite [mm]	90
	Fläche A [mm ²]	3870
	Abweichung Kreisfläche [%]	0,56
	hydr. Durchmesser d_h [mm]	58,2

TAB 2. Geometrische Parameter runden und eckiger Strömungsquerschnitt

Es ist zu erkennen, dass sich der hydraulische Querschnitt um ungefähr 12% von 70 mm auf 58 mm verjüngt. An die Mess-Strecke ist ein Plenum (BILD 5) angegliedert. Es kann mittels eines verschraubten Deckels geöffnet werden und bietet die Möglichkeit zur Aufnahme einer Kassette zur Linerbefestigung.

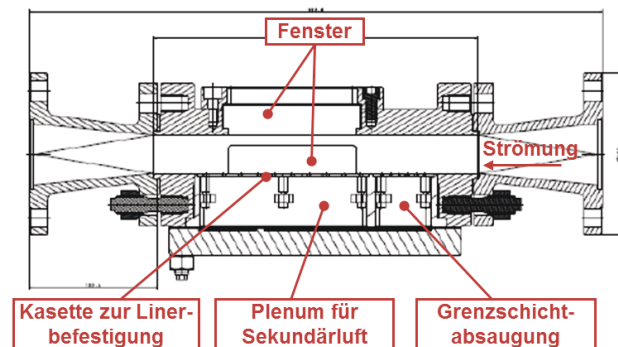


BILD 5: Querschnitt der Mess-Strecke (Strömung von links nach rechts)

Der Raum den das Plenum bildet kann mit Sekundärluft beaufschlagt werden. Des Weiteren dient ein abgegrenzter Teil stromauf zur Integration einer Grenzschichtabsaugung, um eine grenzschichtfreie Anströmung der Mess-Strecke zu realisieren. Der Aufbau der Mess-Strecke und des integrierten Plenums ist zur besseren Visualisierung BILD 6 dargestellt.

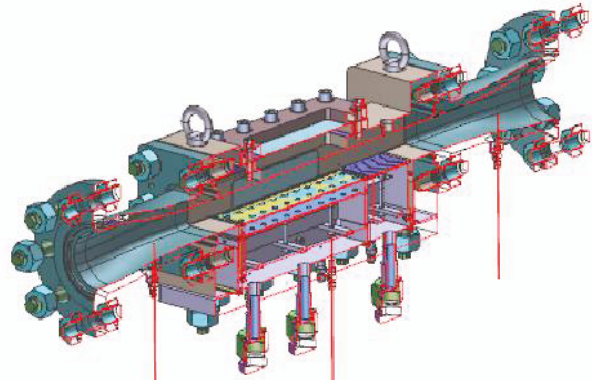


BILD 6: Schnitt durch die Mess-Strecke

In der räumlichen Darstellung ist eine Linerprobe (gelb), sowie der Deckel der Grenzschichtabsaugung (lila) zu erkennen.

5. AUSLEGUNG DER RUND-ECKIG ÜBERGÄNGE

In diesem Kapitel wird auf die Auslegung der Übergänge vom runden Kanalquerschnitt auf den rechteckigen Querschnitt der Mess-Strecke eingegangen.

5.1. Konstruktive Auslegung

Für den Übergang des runden Strömungskanals auf die eckige Mess-Strecke und zurück ist es notwendig einen geeigneten Geometrieverlauf auszulegen. Hierfür sind folgende Kriterien einzuhalten:

- 1) Keine geometrisch verursachten Ablösung der Strömung
- 2) Konstante Querschnittsfläche über den gesamten Verlauf (Bedingung für die Akustik)
- 3) Max. Baulänge von 220mm
- 4) Gewährleistung der Fertigung
- 5) Betrieb bei hohem Druck und Temperatur

Es soll also eine Geometrie gefunden werden, welche einen harmonischen Übergang der Strömung auf den rechteckigen Querschnitt der Mess-Strecke ermöglicht. Aus dem zweiten Kriterium, der konstanten durchströmten Flächen resultiert eine Einschnürung in y-Richtung und eine Aufweitung in z-Richtung. Der kreisrunde Querschnitt von 70 mm Durchmesser wird auf einen Querschnitt von 43 mm x 90 mm überführt. Auch ein quadratischer Querschnitt wäre möglich gewesen, allerdings ist dieser für die Integration von Schaufeln für Kühlungsuntersuchungen unvorteilhaft. Somit handelt es sich bei den Übergangsstücken weder um eine Düse noch um eine reine Diffusorkonfiguration. Daher kann auch nicht auf bereits bekannte Düsen, wie beispielsweise die von Börger [5] für den Unterschall optimierte Windkanaldüse zurückgegriffen werden.

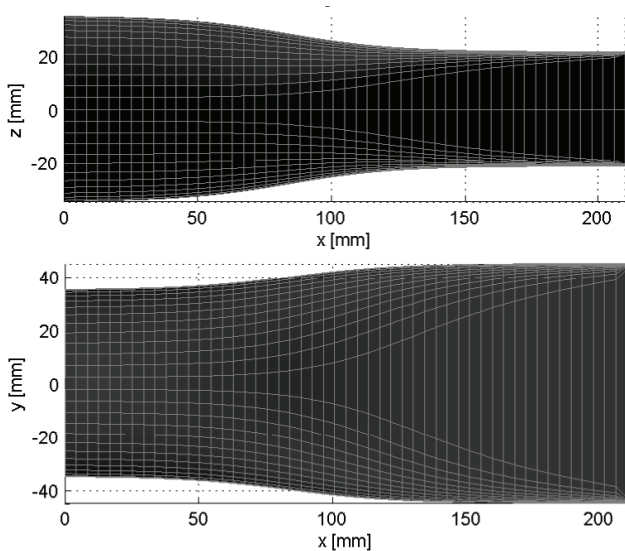


BILD 7. Übergang, Seitenansicht und Draufsicht

Als sehr geeignet für die erforderlichen Kriterien erweist sich die in BILD 7 dargestellte Kontur. Charakteristisch für diese Geometrie ist, dass sie nicht die Eckenradien des rechteckigen Querschnitts linear vergrößert bis ein Kreisquerschnitt entsteht, sondern die Kanten über eine sogenannte Superellipsen-Funktion von rund auf eckig führt. Dabei stellt die Superellipse nach Hein [6] eine Erweiterung der Ellipsenform dar, welche als Mittelung zwischen einem Rechteck und Kreis Verwendung findet. Dabei wird die Superellipse beschrieben durch,

$$\left(\frac{x}{a}\right)^n + \left(\frac{y}{b}\right)^n + \left(\frac{z}{c}\right)^n = 1 \quad (7)$$

mit a, b und c als Halbachsen. Für n = 2 erhält man einen einfachen Ellipsoid. Für Werte n > 2 dann eine Kontur, die sich dem Rechteck nähert. Durch das Hinzufügen der Start- und Endfläche, sowie der im zweiten Kriterium geforderten konstanten Querschnittsfläche, ergibt sich die in BILD 7 gezeigte Form. Es ist zu erkennen, dass sich ein Wendepunkt an der Außenwand einstellt. Dadurch werden große Gradienten in der Konturänderung vermieden.

Um die Fertigung des Bauteils aus warmfestem Stahl unter Einhaltung der vorgegebenen Geometrie zu gewährleisten, wurde gemeinsam mit der Firma Magna Steyr [7] eine Flächenkrümmungsanalyse durchgeführt. Das Ergebnis ist in BILD 8 dargestellt. Es zeigt, dass für die Fertigung der Übergänge nur eine geringe Abweichung von der vergebenen Kontur von 0,014 mm zu erwarten ist.

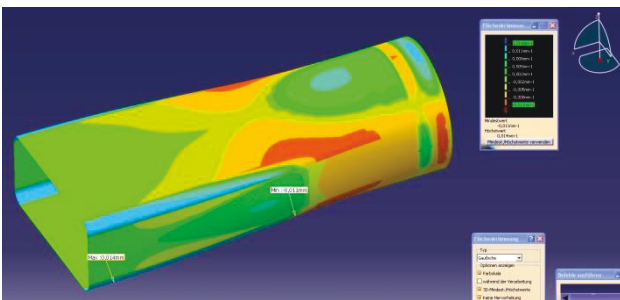


BILD 8. Flächenkrümmungsanalyse [7]

5.2. Numerische Berechnung

Die numerische Simulation wurde mit Ansys CFX durchgeführt. Ansys CFX gehört zu den RANS-Lösern d.h. das CFD - Programm löst die Reynolds-gemittelten Navier-Stokes Gleichungen. Dabei wird der runde Querschnitt als Eintritt für die Strömung modelliert und der eckige Querschnitt als Austritt. Die Kontur wird als reibungsbehaftete Wand betrachtet.

Für die Übergänge werden 2 unterschiedliche Konturen für jeweils 2 Baulängen untersucht. Als Baulängen kommen der zweifache Rohrdurchmesser, also 140mm und der dreifache Rohrdurchmesser, 210mm in Betracht. Eine größere Baulänge lässt sich aus Platzgründen nicht realisieren. Außerdem sprechen als weitere Nachteile, die größere Grenzschichtauflänge und die gesteigerte Wärmeabfuhr an die Umgebung gegen eine noch größere Baulänge der Übergänge.

Die Netze wurden mit dem Ansys Meshing erstellt. Sie sind unstrukturiert und verfügen über ein Grenzschichtgitter. Die y+- Werte an der Wand sind kleiner eins. Drei Fälle wurden berechnet, die Randbedingungen sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

Fall	p _a [kPa]	u [m/s]	T [C°]
#1	1.000	25,9	500
#2	320	298,7	390
#3	260	158,1	25,3

TAB 3. Betriebsparameter HAT

Die Ergebnisse sind für die Konturen mit einer linearen Kontur als Variante a mit der Länge l = 140 mm und als Variante b mit einer Länge von l = 210 mm aufgeführt. Die Kontur mit Superellipse wird für die Länge l = 140 mm als Variante c und mit der Länge l = 210 mm als Variante d aufgeführt.

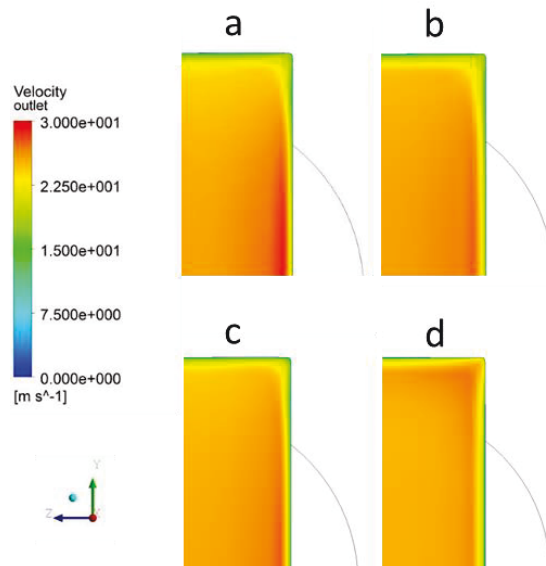


BILD 9. Geschwindigkeit u der Hauptkomponente am Austritt (Viertelschnitt)

In BILD 9 ist die Hauptkomponente der Geschwindigkeit am Eintritt in das eckige Messmodul dargestellt. Aus Gründen der Symmetrie wird jeweils nur ein Viertel des rechteckigen Austritts gezeigt. Es ist zu erkennen, dass

die längeren Übergänge ($l=210$ mm, Varianten b, d) nicht so große Bereiche auftreten, in denen die Austrittsgeschwindigkeiten lokal von der mittleren Austrittsgeschwindigkeit abweichen. Vor allem in den Ecken ist die Grenzschicht bei der Variante d am kleinsten.

In BILD 10 ist die turbulente kinetische Energie dargestellt. Es zeigt sich nur ein geringer Unterschied zwischen den untersuchten Varianten, mit einer homogenen Verteilung in Variante d.

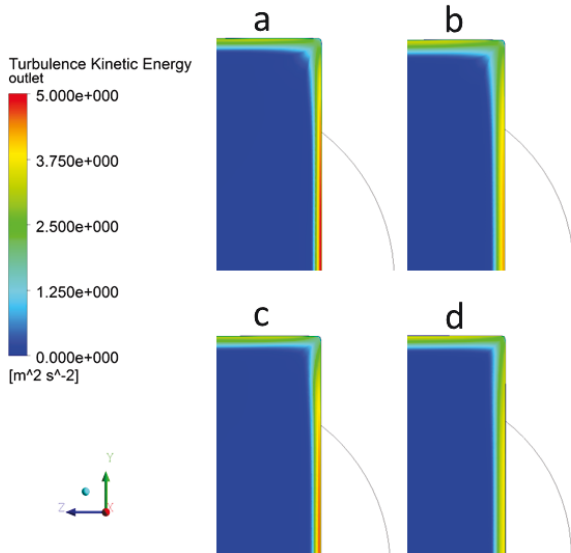


BILD 10. Turbulente kinetische Energie am Austritt (Viertelschnitt)

Die in x-Richtung dargestellten Quergeschwindigkeiten w_x , zeigen im direkten Vergleich bei der längeren Varianten für die lineare Kontur (b) größere Werte in der Mitte des Kanals als die Variante d mit der durch die Superellipse angenäherten Kontur.

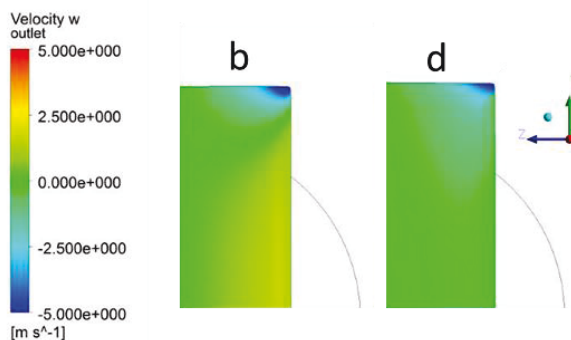


BILD 11. Quergeschwindigkeit w in z-Richtung für die Varianten b und d

Da die Variante d ein homogenes Geschwindigkeitsfeld und geringe Quergeschwindigkeiten aufweist, wurde diese Variante gewählt.

6. PIV-MESSUNGEN

Die Funktionsfähigkeit der eckigen Mess-Strecke im Allgemeinen und der damit gewonnen optischen Zugänglichkeit im Speziellen, soll in Messungen mittels Particle-Image-Velocimetry (PIV) demonstriert werden.

6.1. Versuchsaufbau

Das am Fachgebiet vorhandene PIV-System der Firma LaVision bietet die Möglichkeit, Messungen von 2 oder 3 Geschwindigkeitskomponenten in einer Ebene vorzunehmen. In der vorliegenden Arbeit wird ein planaren 2D Aufbau mit einer Kamera beschrieben. Bei der verwendeten Kamera handelt es sich um die CCD-Kamera ImagerProX der Firma PCO, mit einer Auflösung von 11 Mpx. Der Laserlichtschnitt wird mittels zwei Neodym-YAG Festkörperlaser erzeugt. Diese erzeugen eine Wellenlänge von $\lambda=1064$ nm, die durch einen Dopplerkristall zu einer Wellenlänge von $\lambda=532$ nm, welche grünes Licht entspricht, geändert wird. Nachdem der Lichtstrahl punktförmig aus dem Gehäuse ausgetreten ist, wird dieser durch das Linsensystem geleitet. Eine beidseitig konkave Linse fächert den Lichtschnitt auf, eine einseitig konvexe Linse bündelt den Laserlichtschnitt, während abschließend eine konvexe Zylinderlinse, den Lichtschnitt so auffächert, dass dieser sich verengt. Auf diese Weise wird ein möglichst weit aufgefächerter, dünner Lichtschnitt in der Kameraebene erzeugt [8]. Für die Durchführungen der PIV-Messungen werden die Kamera und die Laseroptik auf einen Messtisch montiert. Ein ähnlicher Aufbau ist bereits bei Bernsdorf [9] beschrieben und angewendet worden. Damit können die Kamera und die Optik in zwei Achsen (x, z) verfahren werden, so dass die Kameraebene immer in der Ebene des Laserlichtschnitts verbleibt. Der beschriebene Aufbau ist in BILD 12 dargestellt. Es ist nicht nötig, den Aufbau in 3 Achsen zu verfahren, da der Bildausschnitt der Kamera größer als das Fenster der Mess-Strecke ist.

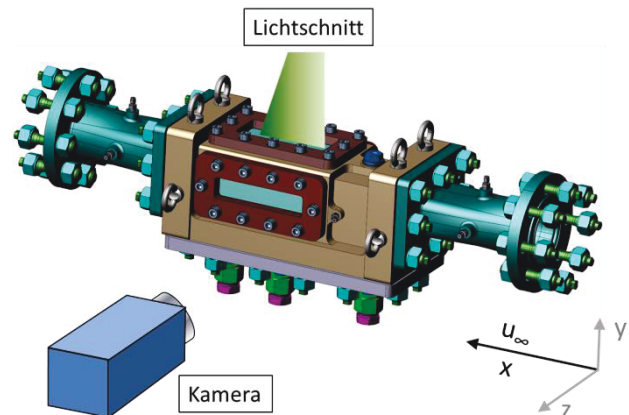


BILD 12: Mess-Strecke mit Laserlichtschnitt und Kamera

6.2. Einbringung des Seedings

Um auch bei hohen Temperaturen PIV-Messungen durchführen zu können, kann nicht auf das bewährte fein zerstäubte Ölseeding, wie beispielsweise Di-Ethyl-Hexyl-Sebacat (DEHS) mit einer Partikelgröße zwischen $0,5 - 1,5 \mu m$ zurückgegriffen werden. Als Alternative wird Titandioxidpulver (TiO_2) mit einer Partikelgröße zwischen $0,1 - 5 \mu m$ als Festkörperseeding verwendet.

Abgesehen von der unterschiedlichen Partikelgröße, ist es eine Herausforderung bei der Verwendung von Festkörperseeding eine kontrollierte, gleichmäßige Partikelverteilung zu erreichen. Das Pulver neigt stark dazu Agglomerate zu bilden, speziell bei kleinen Teilchengrößen, wie sie hier verwendet werden. Daher ist es erforderlich die Partikelagglomerate aufzubrechen, bevor diese in die Mess-Strecke eingeleitet werden. Durch einen

Seedinggenerator wie in BILD 13 dargestellt, ist es möglich, eine druckbeaufschlagte Strömung mit ausreichend Partikeln gleichmäßiger Größe zu generieren.

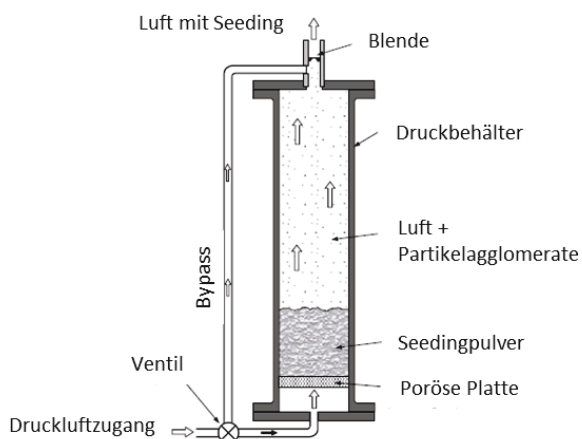


BILD 13. Partikelgenerator nach [8]

Wie in [8], [10] beschrieben, befindet sich das Seeding auf einer perforierten Platte innerhalb eines Zylinders. Durch die Druckluftversorgung unterhalb der Platte werden die kleinen, leichten Partikel aufgewirbelt und Agglomerate aufgebrochen. Die Partikel treten dann durch eine Blende aus dem zylindrischen Seedinggenerator aus. Durch die starke Scherströmung an der Blende werden zusätzlich noch verbleibende Agglomerate aufgebrochen. Ein Bypass dient zur Sicherstellung des Massenstroms auch wenn kein Seeding benötigt wird.

Da der Arbeitsbereich des Strömungskanals bis zu 10 bar Überdruck erreicht, muss der Seedinggenerator einen mindestens um 2 bar höheren Druck aufweisen, um Partikel in die Strömung zu pumpen. Verwendet wird dazu der PIVsolid 10 (PIVTEC), welcher mit einem Druck von bis zu 20 bar betrieben werden kann. Der Aufbau und Anschluss des Seedinggenerators ist in BILD 14 dargestellt.

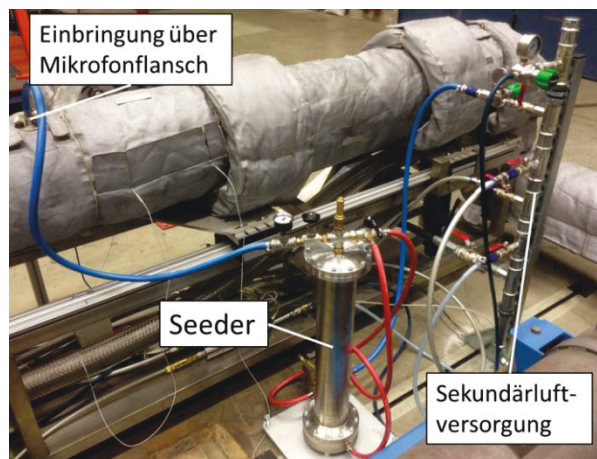


BILD 14: Aufbau zur Einbringung des Seedings in die Mess-Strecke

Die Druckluftversorgung wird dabei von der Sekundärluftversorgung des Teststands übernommen. Vom Seeder gelangt das Partikel-Luft-Gemisch über einen der integrierten Mikrofonflansche in den Kanal.

Bei ersten Aufnahmen zeigt sich eine optimale Seedingverteilung bei einem Differenzdruck zwischen dem Seedinggenerator und dem Kanal von etwa 0,5 bar. In

BILD 15 ist eine Aufnahme im Kanalmittelschnitt mit guter Seedingverteilung dargestellt. Zu erkennen sind die Reflexionen der Partikel die im Laserlichtschnitt (heller Bereich) liegen. Der Ort der Aufnahme ist der Beginn der Messstrecke. Der Laserlichtschnitt hat eine Breite von etwa 35mm. Durch die Benetzung der Fenster mit Partikeln treffen nach einem gewissen Zeitraum Reflexionen an den Fenstern auf, die die spätere Auswertung der Aufnahmen erschweren. Als Gegenmaßnahme werden die Fenster mit Antistatikspray behandelt. Außerdem ist die Messdauer auf einen Zeitraum von 15 Minuten beschränkt. Anschließend ist eine Fensterreinigung erforderlich.

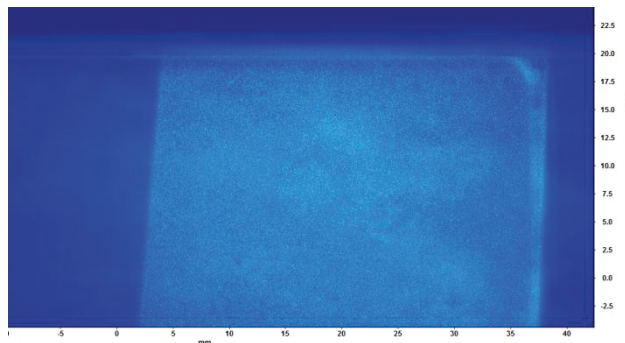


BILD 15: Seedingverteilung in der Messstrecke, Strömung vom rechts kommend

6.3. Ergebnisse der PIV-Messungen

Um das Geschwindigkeitsfeld der Strömung zu bestimmen wird die Eintrittsebene in die Mess-Strecke von Fenster zu Fenster lateral traversiert. Für die Messungen wird eine Strömung mit den in Tabelle 4 dargestellten Parametern am Kanal eingestellt.

Parameter	Wert	Einheit
Blendenöffnung	30	mm
Anströmgeschwindigkeit	34,1	m/s
rel. Druck stromauf	136,1	kPa

TAB 4. Strömungsparameter

In den Ergebnissen ist eine gleichmäßige Geschwindigkeitsverteilung zu erkennen. Es sind keine Wirbel oder ähnliche Störungen zu detektieren. Der Übergang vom runden auf den eckigen Querschnitt verursacht offensichtlich keine Quergeschwindigkeiten. Gegenüber der Druckmessung stromauf im runden Querschnitt ist ein Anstieg der Geschwindigkeit zu erkennen, der vermutlich aus der Verengung des hydraulischen Querschnitts resultiert.

Der auf die Anströmung normierte Geschwindigkeitsverlauf für den Mittelschnitt ist in BILD 16 dargestellt. Es zeigt in einer Höhe von etwa 10 mm über dem Kanalboden das auf die Anströmgeschwindigkeit normierte, zeitlich gemittelte Geschwindigkeitsprofil. Das aus 200 PIV-Aufnahmen gemittelt wurde. Es ist im unteren Teil des Graphen eine Grenzschichtentwicklung zu erkennen, da sich hier die Geschwindigkeit verringert. Die Schwankung der mittleren Geschwindigkeit u_x liegt unter einem 1%.

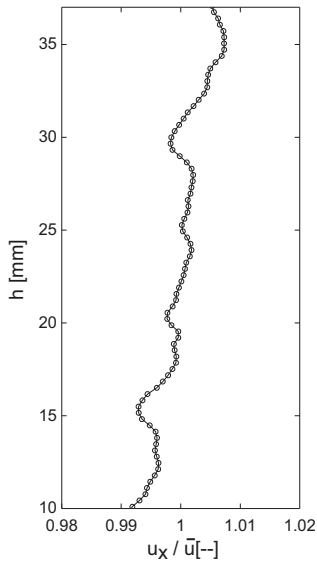


BILD 16: normierte mittlere Geschwindigkeit im Mittelschnitt (Strömung von rechts kommend)

Es ist ersichtlich, dass die durch den Übergang und Mess-Strecke geführte Strömung homogen und gleichmäßig verläuft, und somit die Ergebnisse der numerischen Strömungssimulation bestätigt.

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Für den am Fachgebiet Luftfahrtantriebe der TU Berlin gemeinsam mit dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt betriebenen Heiß-Akustik-Teststand wurde eine Erweiterung der runden Kanalführung auf eine eckige Geometrie mit den entsprechenden Übergängen ausgelegt. Der Teststand ermöglicht die Untersuchung von durchströmten Oberflächen und der damit für Turbomaschinen typischen Interaktion von Heißgas in der Hauptströmung und der kälteren Sekundärluft, die für Kühlung und Abdichtung verwendet wird.

Für den Übergang vom runden Kanalquerschnitt auf den rechteckigen Querschnitt der Mess-Strecke wurden Übergänge ausgelegt. Diese wurden hinsichtlich ihrer Geometrie und des Strömungsfelds optimiert. Es hat sich gezeigt, dass ein Übergang mit der Länge von 210 mm, also des 3-fachem Rohrdurchmessers, dem mit dem 2-fachen Rohrdurchmesser (140 mm) vorzuziehen ist. Als Kontur für den Übergang ist eine Annäherung vom Kreisquerschnitt auf einen rechteckigen Querschnitt mittels einer angepassten Superellipse, dem einer linearen Annäherung durch Aufweitung der Eckenradien des rechteckigen Querschnitts auf den Kreisquerschnitt vorzuziehen. Die gewählte Kontur zeigte eine homogene Geschwindigkeitsverteilung. Auch die Quergeschwindigkeit und Verteilung der turbulenten kinetischen Energie stellten sich bei dieser Kontur am günstigsten dar.

Es wurde eine modular aufgebaute Mess-Strecke entwickelt, welche für vielfältige Untersuchungen angewendet werden kann. So können mittels der im Plenum integrierten Kassette verschiedene Linergeometrien, Oberflächen mit Kavitäten, sowie auch Turbinenschaufeln integriert werden. Die Funktionstüchtigkeit der optischen Zugänge wurde mittels PIV-Messungen unter Zuhilfenahme von Festkörperseeding

überprüft. Dabei konnte eine hinreichende Partikeldichte für die PIV-Aufnahmen beobachtet werden. Es wurde ein gleichmäßiges Geschwindigkeitsfeld beobachtet. Die normierte mittlere Geschwindigkeit wurde im Kanalmittelschnitt bestimmt.

Es ist geplant in zukünftigen Untersuchungen die Messungen mit hohen Temperaturen zu wiederholen und mit denen für diese Arbeit vorgelegten Messungen zu vergleichen. In einem nächsten Schritt sollen mit Sekundärluft durchströmte Linerproben untersucht werden. Um sowohl die Kühlluft-Hauptströmungs-Interaktion zu analysieren, als auch die akustischen Eigenschaften der Liner zu bestimmen. So wird eine ganzheitliche Untersuchung von akustischer Dämpfung und strömungsmechanischer Kühlung angestrebt.

DANKSAGUNG

Der Heiß-Akustik-Teststand wird in Kooperation mit dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Antriebstechnik, Abteilung Triebwerksakustik in Berlin betrieben. Für die Unterstützung des DLR wird ausdrücklich gedankt. Außerdem wird der Firma Magna Steyr für die engagierte Unterstützung bei Konstruktion und Bau der Mess-Strecke gedankt.

Literatur

- [1] C. Lahiri, K. Knobloch, L. Enghardt, F. Bake. Acoustic measurements of perforated liners in hot and pressurized flow. ASME Turbo Expo. GT2013-94674 San Antonio. 2013
- [2] K. Knobloch, C. Lahiri, L. Enghardt, F. Bake, D. Peitsch. Hot-acoustic-testrig (HAT) – a unique facility for thermoacoustic research. ASME Turbo Expo. GT2011-45705. Vancouver. 2011
- [3] H. Schade, E. Kunz. Strömungslehre. 3. Auflage. Walter de Gruyter. Berlin. 2007
- [4] D. Will, N. Gebhardt, H. Ströhl. Hydraulik – Grundlagen, Komponenten, Schaltungen. Springer. Heidelberg. 2007
- [5] G. G. Börger. Optimierung von Windkanaldüsen für den Unterschallbereich. Bochum. 1973.
- [6] E. Vestergaard. Piet Heins Superellipse. <http://www.matematiksider.dk/piethein.html>. 19.08.2013
- [7] T. Friesenbichler. HAT eckig. Critical Design Review. Magna Steyr. Graz. 2012
- [8] M. Raffel, C. Willert, S. Wereley, J. Kompenhans. Particle Image Velocimetry – A Practical Guide. 2. Auflage. Springer. Heidelberg.
- [9] S. Bernsdorf. Experimental Investigation of Film Cooling Flow Structure. VDI Reihe 7, Nr. 476. Düsseldorf. 2006
- [10] C. Willert, M. Jarius. Planar flow field measurements in atmospheric and pressurized combustion chambers. Experiments in Fluids. 2002