

## ENTWICKLUNG EINES PRÜFSTANDES ZUR UNTERSUCHUNG VON EINFLÜSSEN DER AUßENSTRÖMUNG AUF STARK KONTURIERTE EINLAUFSYSTEME

A. Grois, M. Stößel, R. Niehuis  
 Institut für Strahlantriebe  
 Universität der Bundeswehr München  
 Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik  
 Werner-Heisenberg-Weg 39  
 D-85577 Neubiberg

### Zusammenfassung

In Zusammenarbeit mit der Wehrtechnischen Dienststelle 61 in Manching entwickelte das Institut für Strahlantriebe (ISA) der Universität der Bundeswehr München ein stark gekrümmtes, kompaktes Forschungseinlaufsystem. Bereits angestellte Untersuchungen beschränkten sich bisher auf den Bodenstandfall. Zur Erforschung komplexer Einlaufsysteme in realistischen Flugzuständen wird ein von Umgebungsbedingungen unabhängiger Prüfstand konzeptioniert und ausgelegt. Eine schrittweise entwickelte Prozesskette ermöglicht die Überführung der Betriebszustände des Einlaufs im Flugfall auf dedizierte Mach- und Reynolds-Zahl-Bedingungen. Die Integration des Einlaufs in den Prüfstand erfolgt durch ein verkleinertes Modell (MediMEIRD – Medium scaled Military Engine Intake Research Duct) innerhalb einer Drucktonne am Mehrzweckwindkanal (MZW) des ISA. Der experimentell abbildbare Mach- und Reynoldszahlbereich ermöglicht Untersuchungen von Flughöhen zwischen 6 km und 12 km bei Fluggeschwindigkeiten von maximal  $Ma=0,95$ . Dieser Bereich wird durch ein numerisches Berechnungsmodell ergänzt, welches anhand der Ergebnisse aus den experimentellen Messkampagnen kalibriert wird. Die Komponenten des Prüfstandes werden schrittweise konzeptioniert und in erweiterten numerischen Untersuchungen detailliert ausgelegt. Positionen und Anzahl von Druckmessstellen am Einlauf werden aus vorangegangenen Forschungsarbeiten übernommen, um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse herzustellen. Zur Erzeugung einer definierten und störungsfreien Zuströmung am Einlaufeintritt wird eine Ausblasung der Zulaufgrenzschicht aus dem Windkanal untersucht und integriert. Eine Analyse durch eine Fluid-Struktur-Interaktions (FSI) Simulation des Versuchsträgers bestätigt die Festigkeit und zeigt die maximal zu erwartenden Verformungen auf. Der so entwickelte Prüfstand ermöglicht Untersuchungen an stark konturierten Einläufen in Abhängigkeit variabler Bedingungen der Außenströmung durch Abbildung des Betriebspunktes über Mach- und Reynoldszahl am MZW.

### Keywords

Triebwerkseinlauf, S-Duct, Flugfalluntersuchung, Windkanal

### NOMENKLATUR

#### Formelzeichen

$a$	Länge Vorderkante	[m]	$p_t$	Totaldruck	[Pa]
$b$	Halbhöhe Vorderkante	[m]	$\kappa$	Isentropenexponent	[-]
$n$	Index der Ellipse	[-]	Ma	Machzahl	[-]
$\Pi$	Druckverhältnis	[-]	Re	Reynoldszahl	[-]
$T_t$	Totaltemperatur	[K]	$\mu$	Dynamische Viskosität	[Pa s]
R	Gaskonstante	$\left[ \frac{\text{kg m}^2}{\text{s}^2 \text{ mol K}} \right]$	$\kappa_{BD}$	Geschwindigkeitsgleichförmigkeit	[-]
D	Rohrdurchmesser	[m]	<b>Abkürzungen</b>		
$D_s$	Bezugslängenmaß der Sonde	[m]	AIP	Aerodynamic-Interface-Plane	
C	Sutherlandkonstante	[-]	CFD	Computational Fluid Dynamics	
q	Staudruck	[Pa]	DIP	Duct-Inlet-Plane	
p	Druck	[Pa]	DOP	Duct-Outlet-Plane	
			DIN	Deutsches Institut für Normung	

EARSM	Explicit-Algebraic-Re-Stress-Model
EN	Europäische Norm
FSI	Fluid-Struktur-Interaktion
ISA	Institut für Strahlantriebe
ISO	International Org. for Standardization
MEIRD	Military Engine Inlet Research Duct
MediMEIRD	Medium scaled MEIRD
MZW	Mehrzweckwindkanal
SLS	Selektives Lasersintern
SST	Shear Stress Transport Turb.-Modell
UAV	Unbemanntes Luftfahrzeug

**1. EINLEITUNG**

Der Einsatzbereich unbemannter Luftfahrzeuge (UAVs) tritt in den verschiedensten Bereichen vermehrt in den Vordergrund. Insbesondere bei militärischen Anwendungen, aber auch bei einigen modernen zivilen Flugzeugkonzepten wird eine vollständige Integration des Triebwerks in den Rumpf des Flugzeugs bevorzugt umgesetzt. Dies erlaubt die Reduktion des Luftwiderstands, da die Triebwerksgondel im Gegensatz zur konventionellen Bauweise nicht exponiert im Außenbereich des Luftfahrzeugs angebracht ist. Bei militärischen Anwendungen ergeben sich dabei eine Vielzahl an weiteren Vorteilen, wie die Vermeidung der Erfassung der Verdichterschaufeln durch Radarsysteme. Dies wird durch stark konturierte Einlaufsysteme im Rumpf des Luftfahrzeugs erreicht, welche eine direkte Sicht auf das Triebwerk verhindern.

Das Institut für Strahlantriebe (ISA) der Universität der Bundeswehr München entwickelte vor diesem Hintergrund zusammen mit der Wehrtechnischen Dienststelle 61 in Manching ein stark gekrümmtes, kompaktes Einlaufsystem für Forschungszwecke [1]. Bisherige aerodynamische und Triebwerksleistungsuntersuchungen des Forschungseinlaufs MEIRD (Military Engine Inlet Research Duct) am ISA beschränkten sich auf den Bodenstandfall, da die Betriebsumgebung durch einen offenen und außenluftabhängigen Prüfstand begrenzt war. Für weitere und tiefergreifendere Untersuchungen ist es notwendig, die Einflüsse der Veränderung der Strömungsbedingungen unter erweiterten Gesichtspunkten zu betrachten. Vor allem weiterführende Forschungen im Bereich von Auslegungen und Anwendungen entsprechender Strömungsstabilisierungsmaßnahmen hängen verstärkt von den Einflüssen der Fluganwendung ab. Daher wird zur Erforschung komplexer Einlaufsysteme und deren Außenströmungen in realistischen Flugzuständen ein von Umgebungsbedingungen unabhängiger Prüfstand entwickelt und aufgebaut. Dieser ermöglicht experimentelle Untersuchungen variabler Bedingungen am Forschungseinlauf durch Integration eines Einlaufprüfstandes in einer bedruckbaren Tonne am Mehrzweckwindkanal (MZW) des Instituts für Strahlantriebe.

**2. THEORETISCHE AUSARBEITUNG**

Zur Erstellung eines Prüfstandkonzeptes und dessen Anforderungen wurden theoretische Betrachtungen angestellt und breitgefächert diskutiert. Diese umfassen unter anderem Limitierungen aufgrund der vorgegebenen Leistungsdaten des MZW, zu untersuchende Betriebspunkte sowie

die Auslegung und Prüfung der Umsetzbarkeit des Prüfstandkonzeptes.

**2.1. Technische Daten Mehrzweckwindkanal**

Der MZW ist ein geschlossener Windkanal, welcher eine umgebungsunabhängige Einstellung des Betriebspunktes ermöglicht. Dabei ist ein Druckbetrieb als auch ein Unterdruckbetrieb möglich. Der Druckaufbau erfolgt durch einen Schraubenverdichter, der durch einen drehzahlgeregelten 1-MW-Elektromotor ein Druckverhältnis von bis zu  $\pi = 3,2$  erzeugt. Der Unterdruckbetrieb wird durch eine Vakuumpumpe ermöglicht. Der Verdichter versorgt die Messstrecke mit einem konstanten Luftstrom, wobei die Umgebungsluft mit der zurückgeführten Luft aus der Messstrecke gemischt wird. Die durch die Komprimierung stark erhitze Luft wird durch einen wassergekühlten Wärmetauscher, mittels integrierter Totaltemperatursonde, auf einer konstanten Austrittstemperatur gehalten. Die Austrittstemperatur für die Einlaufuntersuchungen beträgt 303,15 K. Der Massenstrom ist aufgrund der Leistungsdaten des Verdichters auf 5,4 kg/s limitiert. Die Regelung erfolgt durch einen variablen Bypass-Kanal, welcher vor der Drucktonne angebracht ist und die entnommene Luft in den Rücklauf führen kann. Die Versuchsumgebung befindet sich innerhalb der Drucktonne.

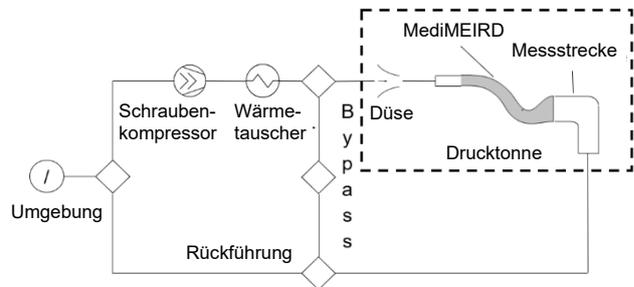


BILD 1. Prinzipskizze des Prüfstandkonzeptes am MZW

Die Regelungssoftware des MZW ermöglicht eine dedizierte Einstellung der Mach- und Reynoldszahl zur Definition des Einlaufbetriebspunktes der experimentellen Untersuchungen. Gemeinsam mit der Totaltemperatur  $T_t$ , der Gaskonstanten für das ideale Gas  $R$ , dem Bezugslängemaß  $D$  und den Sutherlandkonstanten zur Bestimmung der Viskosität  $C_1$  und  $C_2$  können der Staudruck  $q$  und der statische Druck  $p$  in der Druckkammer in Form von Mach- und Reynoldszahl nach folgenden Gleichungen geregelt werden [2].

$$(1) \quad Ma = \sqrt{\left[ \left( 1 + \frac{q}{p} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right] \cdot \frac{2}{\kappa-1}}$$

$$(2) \quad Re = \sqrt{\frac{\kappa}{R}} \cdot \frac{D_S}{C_1} \cdot \frac{Ma \cdot p \cdot \left( \frac{T_t}{1 + \frac{\kappa-1}{2} Ma^2} + C_2 \right)}{\left( \frac{T_t}{1 + \frac{\kappa-1}{2} Ma^2} \right)^2}$$

Der Staudruck  $q$  und die Totaltemperatur  $T_t$  werden vor Eintritt in die Drucktonne anhand einer Totaldrucksonde und einer PT100-Sonde gemessen. Dies ermöglicht die Berücksichtigung der thermischen Verluste der Zuströmung in die Drucktonne.

**2.2. Mach- und Reynolds-Modell**

Durch Voruntersuchungen am ISA wurde die Umsetzbar-

keit und die Rahmenbedingungen des Berechnungsmodells des Versuchsaufbaues festgelegt. Aufgrund der begrenzten Größe der Messstrecke, wird ein verkleinertes Modell des zu untersuchenden Forschungseinlaufs MEIRD ermittelt und untersucht. Unter Berücksichtigung der Maßgabe einer Flugfalluntersuchung erfordert die Anpassung des Originalmaßstabs auf eine skalierte Form explizite Skalierungsparameter, die die Mach- und Reynoldsähnlichkeit erhalten. Mittels der Totaltemperatur  $T_t$  lässt sich unter Annahme eines idealen Gases und einer nach Sutherland temperaturabhängigen dynamischen Viskosität  $\mu$  [3] eine direkte Beziehung zwischen Mach- und Reynoldszahl herleiten. Dies führt nach folgender Gleichung auf eine explizite Bedingung für das statische Druckniveau, bei Vorgabe einer beliebigen Kombination aus Mach- und Reynoldszahl (Gleichung (3)).

$$(3) \quad p = \sqrt{\frac{x}{R}} \cdot \frac{\beta_s Re}{D_{DOP} \left(1 + \frac{x-1}{2} Ma^2\right)^2} \cdot \frac{T_t^2}{Ma \left(\frac{T_t}{1 + \frac{x-1}{2} Ma^2} + S\right)}$$

Die Referenzlänge  $D_{DOP}$  entspricht dabei dem Austrittsdurchmesser des Einlaufs an der Duct-Outlet-Plane (DOP). Bild 2 stellt dazu den Forschungseinlauf MEIRD schematisch mit Kennzeichnung der DOP sowie der Duct-Inlet-Plane (DIP) dar. Die Messebenen sind zur experimentellen und numerischen Auswertung der Oberflächendrücke CS1 bis CS10 befinden sich an definierten Positionen relativ zum MEIRD-Koordinatensystem.

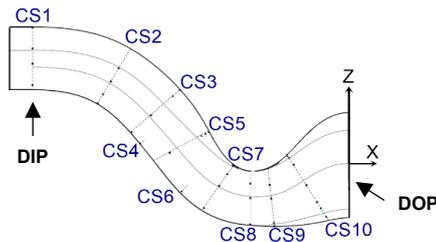


BILD 2. Schematische Darstellung des Military Engine Intake Research Duct (MEIRD) mit Messebenenbezeichnungen (CS1 – CS10) nach Haug et al. [4]

Durch Gleichung (3) beschrieben, erzeugt eine Erhöhung des statischen Druckniveaus eine Reduktion der Modellgröße. Unter Berücksichtigung der Druckbeziehungen von Gleichung (1) ergibt sich zudem eine Vergrößerung des einzustellenden Totaldrucks  $p_t$ . Mithilfe der Zustandsgleichung idealer Gase lassen sich aus den Zielgrößen für Mach- und Reynoldszahl, der Totaltemperatur  $T_t$  sowie den ermittelten Totaldruck  $p_t$ , der in der Messstrecke bereitzustellende Massenstrom  $\dot{m}$  analytisch berechnen. Während der durch die Mach- und Reynolds'sche Ähnlichkeitsbedingung geforderte Totaldruck  $p_t$  bei Verkleinerung des Einlaufmodells steigt, verringert sich der Massenstrom  $\dot{m}$  aufgrund des kleineren durchströmten Modellquerschnitts. Daher ergeben sich für jede experimentell abbildbare Kombination aus Mach- und Reynoldszahl in Abhängigkeit der Modellgröße der Totaldruck  $p_t$ , die Totaltemperatur  $T_t$  und der Massenstrom  $\dot{m}$ , die in der Messstrecke bereitgestellt werden müssen.

Die Mach- und Reynolds'sche Ähnlichkeitsbedingung des skalierten Einlaufs des MEIRD wird anhand der Betriebspunkteinstellungen am MZW hergestellt. Die Unabhängigkeit des Strömungszustandes von der Mach- und Reynoldszahl des skalierten Modells konnte durch numerische

Untersuchungen bestätigt werden. Das skalierte Modell MediMEIRD (Medium scaled MEIRD) resultierte in einem Austrittsdurchmesser von  $D_{DOP,MM} = 0,12m$  gegenüber dem Originalaustrittsdurchmesser von  $D_{DOP} = 0,454m$ . Diese Skalierung ermöglicht in Kombination mit den Rahmenbedingungen des MZW ein erweitertes Spektrum an abbildbaren Betriebspunkten des Einlaufs. Das parallel dazu entwickelte numerische Simulationsmodell ermöglicht die Untersuchung weiterer Betriebspunkte, welche aufgrund der Leistungsdaten des Windkanals experimentell nicht abbildbar sind. Die Messergebnisse der überschneidenden Punkte zwischen geplantem Experiment und CFD-Simulation werden zur Kalibrierung und Validierung des Simulationsmodells verwendet. Dadurch werden die durch die Simulationen erweiterten Betriebspunkte verifiziert und das numerische Modell optimiert.

Aus den Leistungsdaten des MZW ergibt sich ein dedizierter, experimentell abbildbarer Mach- und Reynolds-Zahl-Bereich, welcher die Untersuchung von Flughöhen zwischen 6 km und 12 km sowie Flugeschwindigkeiten bis  $Ma = 0,95$  ermöglicht. Die Erweiterung des MZW durch eine Vakuumabsaugpumpe soll zukünftig die Untersuchung noch größerer Höhen ermöglichen.

Die zu untersuchenden Betriebspunkte beziehen sich auf den Einlauf und stellen vorerst keinen direkten Bezug zum Flugfall dar. Dies ist aufgrund des variablen Flugzeugmodells und der daraus hervorgehenden, nicht festgelegten Zusammenhänge offen. Eine Rückführung auf das jeweilige Flugmodell wird im Nachgang durch eine umgekehrte Berechnung anhand der erzielten Bedingungen aus den ermittelten Betriebspunkten der Mach- und Reynoldsbedingungen ermöglicht. Dadurch kann die Betriebspunktermittlung sowie die gesamte Untersuchung des Einlaufs unabhängig vom Flugzeugmodell durchgeführt werden.

### 2.3. Prüfstandkonzept

Aus den vorhergehenden Überlegungen zur Auslegung des skalierten Einlaufmodells MediMEIRD ergibt sich das Prüfstandkonzept. Dabei steht die modulare Integration der Bauteile in die Messstrecke sowie die Vergleichbarkeit der Messergebnisse mit zuvor getätigten Untersuchungen am ISA im Vordergrund. Der modulare Aufbau ermöglicht sowohl eine spätere Erweiterung des Prüfstandkonzeptes als auch die Adaption auf einen vorhandenen Aufbau. Zur Erzeugung von vergleichbaren Daten, ist simultanes Vorgehen bei Messaufbau und -auswertung gegenüber bereits vorhandenen Prüfständen und Forschungsergebnissen am ISA erforderlich. Die Funktions- und Strömungsformanpassung der Komponenten des Prüfstandes wurden durch erweiterte numerische Simulationen begleitet.

#### 2.3.1. Konzept der Windkanaldüse

Der Aufbau des Prüfstandkonzeptes (Bild 3) beginnt mit einer modularen Zulaufdüse, welche die Aufgabe hat, die Luftströmung möglichst optimal auf den nierenförmigen Eintrittsquerschnitt des Versuchsträgers zu leiten. Fokus der Düsenauslegung ist eine möglichst störungsfreie und eine einer freien Anströmung nachgebildeten Zuströmung am Einlaufeintritt. Dies wird über die Konturierung der Düse, sowie durch ein Konzept zur Abtrennung der Zulaufgrenzschicht aus dem Windkanal vor Eintritt in den MediMEIRD ermöglicht. Um zukünftig auch Versuchsträger mit anderer Eintrittsgeometrie vermessen zu können, wird die Düse modular ausgelegt, sprich es kann der stromab liegende Teil ausgetauscht werden. Daher ist die Zulaufdüse

in axialer Richtung teilbar. Gleichzeitig ermöglicht die Aufteilung der Düse auf zwei Bauteile eine zeitnahe Reproduktion nach Designanpassungen, da aufgrund der dadurch reduzierten Baugrößen der Einzelteile ein 3D-Druck innerhalb der Herstellungsmöglichkeiten der Universität der Bundeswehr München ermöglicht wird. (Bild 4).

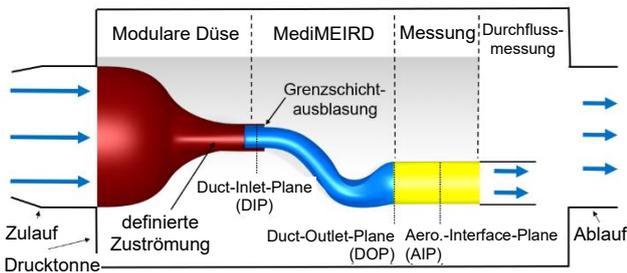


BILD 3. Prüfstandkonzept innerhalb der Drucktonne des MZW

Der kreisrunde, in Strömungsrichtung vordere Teil, ist nach Börger konturiert und durch vorherige Untersuchungen am MZW dementsprechend ausgelegt [5].

Der in Strömungsrichtung hintere Teil der modularen Düse des Prüfstandaufbaus wurde als Freiformdüse mit nierenförmiger Austrittsfläche definiert. Die Nierenform des Düsenaustritts entspricht der Form des nachfolgenden Einlaufs, wodurch eine definierte Zuströmung am Einlauf gestaltet werden kann (Bild 4).



BILD 4. Modulare Düse mit nierenförmigem Endstück

Die Abscheidung der Zulaufgrenzschicht, zur Reduktion von Störungen und zur Nachbildung einer freien Anströmung am Einlauf, wird durch ein Übermaß des nierenförmigen Düsenendstücks gegenüber der Nierenform des Einlaufs erreicht. Die Vorderkante des Einlaufs kann in einen axial verlängerten Teil der nierenförmigen Zulaufdüse hineingeschoben werden, wodurch die Grenzschicht durch den so entstandenen Spalt nach außen in die Drucktonne ausgeblasen wird (Bild 5). Die Untersuchung verschiedener Betriebspunkte des MediMEIRD setzt eine Variation der Grenzschichtausblasung voraus, um die Ausblasung auf die jeweiligen vorherrschenden Bedingungen einstellen zu können. Die Regelbarkeit wird durch die axiale Verschiebung des MediMEIRD innerhalb des horizontalen Auslaufstücks der nierenförmigen Zulaufdüse erreicht. Eine abschließende Dichtlippe dient als Drossel und ermöglicht die Abschaltung der Grenzschichtausblasung im vollständig eingefahrenen Zustand. Die Feinjustierung erfolgt durch Beeinflussung der Lauflänge der Ausblasung, mit Hilfe der axialen Verschiebung.

**2.3.2. Auslegung der Einlaufvorderkante**

Die Einlaufvorderkante soll eine möglichst störungsfreie Strömung ermöglichen. Eine für Messkampagnen relevante Interface-Ebene stellt dabei die DIP dar (Bild 3). Bereiche davor dienen zur Modellierung der freien Anströmung, um die Außenströmungen aufgrund der unterschiedlichen, zu untersuchenden Betriebspunkte aufprägen zu können. Die Formgebung der Einlaufvorderkante wird

durch numerische Simulationen iterativ angepasst (Bild 5).

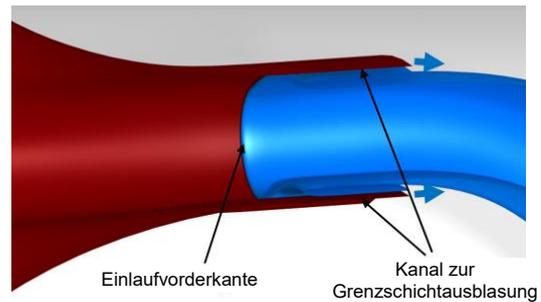


BILD 5. Schnittdarstellung der modularen Düse mit MediMEIRD Einlaufvorderkante

Elliptische Vorderkanten sind bereits aus der Profilauslegung für Verdichter- und Turbinenschauflern bekannt. Die superelliptische Form bietet dabei strömungsmechanische Vorteile, da aufgrund der veränderlichen Krümmung gezielt eine Strömungsablösung verhindert werden kann [6]. Die Super-Ellipse ist nach folgender Gleichung definiert.

$$(4) \left[ \frac{(a-x)}{a} \right]^n + \left( \frac{y}{b} \right)^n = 1; \quad 0 \leq x \leq a; \quad n > 2 \quad [6]$$

Die Länge der Vorderkantennase ist durch  $a$ , die Dicke durch  $2b$  bestimmt. Bei Betrachtung der aus der zweiten Ableitung ergebenden Krümmung  $d^2/dx^2$  zeigt sich, dass für  $x = a$  an der Verbindungsstelle 0 gilt. Daher ergibt sich eine kontinuierliche Krümmung, welche auf einen möglichst kleinen, zu erwartenden, Druckgradienten hindeutet. Bild 6 zeigt anhand von Untersuchungen einen raschen Abfall der Geschwindigkeit für die elliptische Form, wohingegen eine superelliptische Form einen flacheren Verlauf der Geschwindigkeit ermöglicht. Andererseits steigt die Spitzengeschwindigkeit auch mit zunehmendem Index  $n$  an, woraus ein hoher negativer Druckgradient in der Nähe der maximalen Krümmung folgt. Die Untersuchungen resultierten in einer optimierten superelliptischen Form zur Reduktion von Störungen und Ablösungen. Geeignete Werte für eine Vorderkante ergeben sich zu  $a/2b = 3$  und für den Index  $n = 2$ . Diese Ergebnisse werden im Folgenden, bei der numerischen Auslegung der Einlaufvorderkante des MediMEIRDs angewandt und detailliert untersucht, um mögliche Strömungsbeeinflussungen zu identifizieren und zu reduzieren.

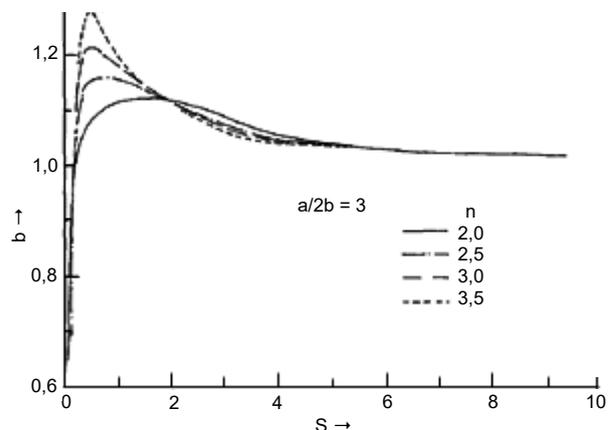


BILD 6. Geschwindigkeitsverteilung an einer ebenen Platte mit superelliptischer Vorderkante, Achsenverhältnis  $a/b = 6$  [6]

### 2.3.3. Durchflussmessung im Einlauf

Zur exakten Ermittlung des Massenstroms innerhalb des Einlaufs ist eine gesonderte Massenstrommessung notwendig, da aufgrund der stromaufwärts stattfindenden Grenzschichtabscheidung nicht der gesamte Massenstrom des Windkanals durch den MediMEIRD geführt wird. Dadurch ist die Verwendung, des durch die Messtechnik des MZW ermittelten Massenstroms nicht möglich. Der Fokus zur Auslegung der Durchflussmesstechnik liegt, wegen des begrenzten Bauraums der Drucktonne, auf einer sehr kompakten Bauweise. Aufgrund der einfachen Integration wird auf das Wirkdruckverfahren zurückgegriffen. Dieses basiert auf der grundlegenden Überlegung der Bestimmung der kinetischen Energie, die das jeweilige Fluid transportiert. Dabei handelt es sich um in die Strömung integrierte Einbauten, an denen eine Druckerhöhung oder ein Druckabfall auftritt. Ein Vorteil ist, dass für die Verwendung der zugehörigen Messfühler und Messtechnik keine bewegten Teile notwendig sind. Diese Art der Durchflussmessung gehört bei den industriellen Anwendungen zu den Standardverfahren. Aufgrund der kurzen Baulänge des Wirkdruckgebers wird eine Normlochblende mit Eckentnahme des anliegenden Drucks verwendet [7]. Dies erfordert jedoch eine sehr lange Zu- und Auslaufstrecke, um Störungen in der Strömung zu minimieren und eine symmetrische Rohrströmung ausbilden zu können. Daher wird die Strömung hinter der Aerodynamic-Interface-Plane (AIP) (Bild 3) auf vier kleinere Rohre durch einen strömungsoptimierten Verteiler aufgeteilt. Dadurch werden geringere Rohrdurchmesser und eine längere relative Vorlaufstrecke erreicht (Kapitel 3.2). Normblenden bieten gegenüber weiteren Wirkdruckverfahren eine geringfügigere Empfindlichkeit gegenüber Einbaustörungen [8], jedoch werden wesentlich geringere Reynoldszahlen (bis  $Re_D = 16000$ ) für den Einsatzbereich empfohlen [9]. Das Nichterfüllen der Normvorgaben erfordert eine gesonderte, strömungsmechanische Vorauslegung der Bauteile und eine für den Prüfstandsfall ausgelegte Kalibrierung der eingebauten Normblenden.

### 2.4. Instrumentierung und Befestigung

Die Auslegung der Instrumentierung ist Grundlage für die Messkampagnen und steht im Fokus der Vergleichbarkeit der Messergebnisse mit früheren Untersuchungen am Forschungseinlauf MEIRD am ISA. Dazu werden die Positionen der Druckmessanschlüsse entlang der Oberfläche des MediMEIRD von dem Originalmodell MEIRD übernommen und entsprechend skaliert.

Die Grenzschichtausblasung wird so gestaltet, dass sich der Staupunkt durch die Aufstauung der Strömung zentral an der Einlaufvorderkante einstellt. Dementsprechend werden im Bereich der Vorderkante des MediMEIRD gegenüber zum MEIRD ergänzende Druckmessstellen integriert (Bild 7).

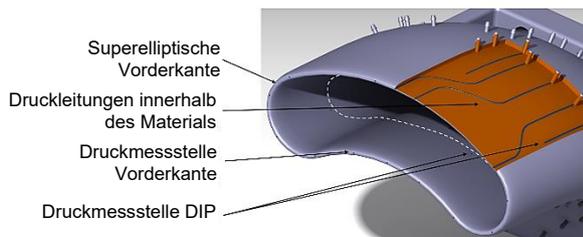


BILD 7. Schnittdarstellung des MediMEIRD mit Vorderkante und Druckmesspunkten

Da aus früheren Untersuchungen das Auftreten eines ausgeprägten Ablösegebietes im MEIRD bekannt ist, wird an dieser Stelle ein in die Strömung eingebrachter Messrechen vorgesehen (Bild 8). Dadurch lassen sich an den jeweiligen Punkten der Sonden Drücke im Strömungsfeld entnehmen und somit mit den späteren numerischen Simulationsdaten vergleichen. So können nicht nur die Oberflächendrücke als Vergleichsreferenz verwendet werden, sondern auch das Strömungsfeld der spezifischen MEIRD-Ablösung. Die finale Instrumentierung des MediMEIRD umfasst 193 Druckmessstellen (Bild 8)

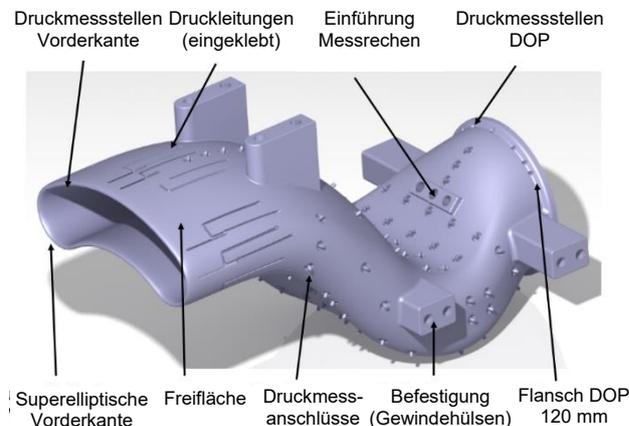


BILD 8. Gesamtbefestigungs- und Druckmesskonzept des MediMEIRD

An der AIP wird ein traversierbarer Messrechen angebracht. Die AIP ist als messtechnische Ebene vor dem Triebwerk definiert [10]. Der Messrechen basiert in Funktion und Design auf einer früheren Entwicklung am ISA [11]. Dieser ermöglicht die Messung des Totaldrucks sowie die Bestimmung der Strömungsvektoren. Eine tiefgreifende Auslegung des Messrechens wird durch ein parallel bearbeitetes Forschungsprojekt am ISA durchgeführt und für den Prüfstandsaufbau des MediMEIRD adaptiert. Dies betrifft unter anderem die radiale Verteilung der verwendeten Fünf-Lochsonden sowie deren Einfluss auf die Strömung.

Die Datenerfassung des MediMEIRD fügt sich nahtlos in das Datenerfassungs- und Regelungssystem, basierend auf bereits am ISA bestehende und bewährte Architekturen, ein. Damit wird eine direkte Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit anderen Experimenten des MEIRD am ISA sichergestellt. Die verwendeten integralen Scanivalve® 64-Kanal Druckaufnehmer werden direkt am Prüfstandsaufbau verbaut. Dies vermeidet das Herausführen der großen Anzahl an Druckleitungen aus der Tonne. Die Architektur zielt auf eine hohe Modularisierung und Vereinheitlichung der Schnittstellen ab. Sowohl Kabeltyp als auch Datenübertragungsprotokoll finden auf Ethernet-Ebene statt. Ein positiver Nebeneffekt der Begrenzung auf wenige Schnittstellen an der Drucktonne ist die zeitgleiche Reduktion von möglichen Leckagenmassenströme.

### 3. NUMERISCHE EXPERIMENTAUSLEGUNGEN

Die Komponenten des Prüfstandsaufbaus wurden durch numerische Experimentauslegung in Form und Funktion angepasst. Dies erlaubt eine schnelle und präzise Gestaltung bereits in der frühen Pre-Design-Phase. Diese Art der Konstruktion tritt immer mehr in den Vordergrund und führt inzwischen zu einer Fülle an einfach zu bedienenden Vorauslegungsprogrammen [12].

Die für die numerischen Studien dieser Arbeit verwendeten

Programme beschränken sich auf den vom DLR entwickelten Strömungslöser TRACE® und auf ANSYS CFX®. Diese werden je nach Komplexität der Problemstellung und Ziel im Austausch verwendet. Aufgrund von vorherigen Untersuchungen wird auf das Helsten EARSM Turbulenzmodell in Verbindung mit TRACE® und das SST-Turbulenzmodell in Verbindung mit CFX® gesetzt [4]. Die CFD-Simulationen werden unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Mach- und Reynoldsbedingungen der im Versuchsaufbau zu untersuchenden Betriebspunkte durchgeführt.

### 3.1. Strömungsmodellierung am Einlauftritt

Zur Erzeugung einer störungsfreien Strömung am Einlauftritt wird die Ausblasung der Zulaufgrenzschicht aus dem Windkanal integriert und untersucht. Dabei wird der MediMEIRD axial in die modulare Zulaufdüse hineingeschoben. Aufgrund des zuvor beschriebenen Übermaßes des nierenförmigen Endstückes der Zulaufdüse, ergibt sich ein umlaufender Spalt zwischen Zulaufdüse und den vorderen Bereich des Einlaufs. Bild 9 zeigt dazu die Geschwindigkeitsverteilung im Längsschnitt mit gekennzeichneten Geschwindigkeitsprofilen (grau).

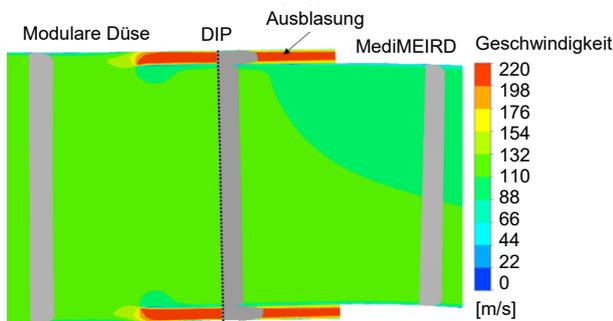


BILD 9. Ausschnitt MediMEIRD und modulare Düse, Geschwindigkeitsprofile (grau) und Geschwindigkeitsverlauf

Hier lässt sich die erfolgreiche Verringerung der Grenzschichtdicke im Einlauf aufgrund der davorliegenden Grenzschichtausblasung erkennen. Dies bestätigt die Annahmen der Konzeptionierung zur Reduktion der Grenzschicht am Eintritt in den Einlauf.

Nach erfolgreicher Überprüfung des grundlegenden Konzeptes der Grenzschichtausblasung an der Zulaufdüse, erfolgt im nächsten Schritt eine Detailuntersuchung der Einlaufvorderkante. Dadurch sollen Ablösungen und Störungen der Strömung aufgrund der Form der Einlaufvorderkante vermieden werden. Da die Form der Vorderkante einen großen Teil des Einflusses auf die dahinterliegende Strömung hat, wird diese zusammen mit der Grenzschichtausblasung in einer weiteren numerischen Simulation detailliert untersucht. Wie bereits in Kapitel 2.3.2 beschrieben, wird eine superelliptische Form der Einlaufkante gewählt, da diese aufgrund ihrer geometrischen Gestaltung besonders resistent gegenüber Strömungsablösungen ist. Dazu zeigt Bild 10 einen vergrößerten Ausschnitt der Geschwindigkeitsvektordarstellung an der Einlaufvorderkante. Hierbei wird die superelliptische Form einer kreisrunden Form gegenübergestellt.

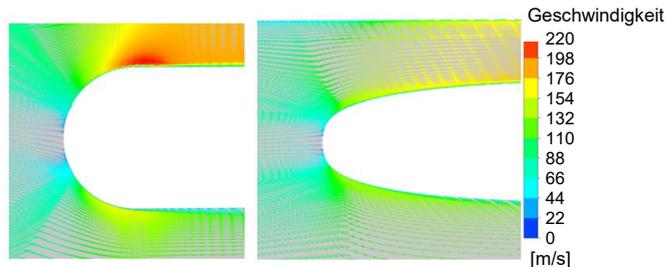


BILD 10. Vergleich einer kreisrunden (links) mit einer superelliptischen (rechts) Vorderkante, Geschwindigkeitsvektordarstellung

Die kreisrunde Vorderkante verursacht, aufgrund der starken Umlenkung der Strömung, eine deutliche Geschwindigkeitsüberhöhung mit nachfolgender Ablösung (unterer Rand). Die superelliptische Vorderkante erzeugt einen stetigen Geschwindigkeitszuwachs bei Umströmung ohne Strömungsabriss. Bei Darstellung der Geschwindigkeitsprofile vor und hinter der Einlaufvorderkante zeigt sich eine deutliche Reduktion der Grenzschichtdicke von 2,33% auf 1,60% der durchströmten Kanalhöhe. Aus den gegebenen Betriebspunkten zeigt sich zudem eine geeignete Spalthöhe von 3mm für den Ausblasekanal, umlaufend außerhalb des vorderen Bereichs des Einlaufs. Die Geschwindigkeitsgleichförmigkeit liegt bei einem Wert von  $\kappa_{BD} = \frac{u_{max} - u_{min}}{\bar{u}} = 0,0295$ , was auf eine qualitativ gute und homogene Geschwindigkeitsverteilung hindeutet [13].

Bei Betrachtung des gesamten Simulationsgebietes, bestehend aus modularer Zulaufdüse, der Grenzschichtausblasung und dem MediMEIRD, ist in Bild 11 die erfolgreiche Umsetzung des Gesamtkonzeptes verdeutlicht.

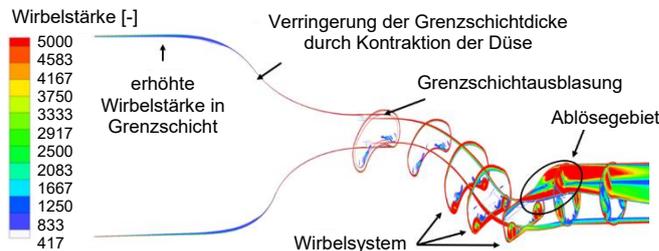


BILD 11. Wirbelstärkeverteilung in der modularen Düse und im MediMEIRD

Hier ist eine deutliche Verringerung der Grenzschichtdicke aufgrund der starken Kontraktion der Zulaufdüse zu erkennen, welche sich zum Ende der modularen Zulaufdüse hin etwas aufdickt. Die Grenzschichtausblasung trennt diesen Teil erfolgreich ab. Innerhalb der Zulaufdüse sind keine Inhomogenitäten der Strömung vorhanden. Die superelliptische Vorderkante verursacht keine weiteren Strömungsstörungen. Die für den MEIRD typischen Wirbelsysteme und das Ablösegebiet entwickeln sich analog im MediMEIRD [4].

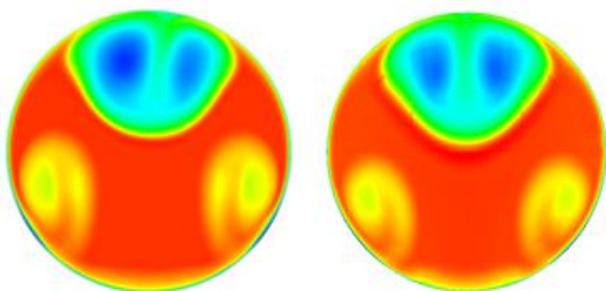


BILD 12. Vergleich der Totaldruckstörmuster in der DOP für MediMEIRD (links) und MEIRD [1] (rechts), (Dimensionen normiert)

Der Vergleich der Totaldruckstörmuster an der DOP zwischen der Simulation des Prüfstandsbaus des MediMEIRD und des MEIRD [1] zeigt eine sehr gute Übereinstimmung. Das zentrale Ablösegebiet sowie die beiden unteren Wirbel sind vergleichbar ausgeprägt.

Der erfolgreiche Vergleich der Ergebnisse mit vorherigen numerischen Untersuchungen des MEIRD am ISA tragen zur Validierung des numerischen Setups bei. Die Experimentalauslegung des Prüfstandsbaus sowie das Prüfstandskonzept wurden untersucht und bestätigt. Dies bedeutet, dass die numerische Experimentalauslegung des Prüfstandes zu einer validierten Modellierung führte. Aufgrund der angepassten Größe des Forschungseinlaufs MediMEIRD sowie der definierten und geführten Zuströmung am Einlauf Eintritt, stellte diese Validierung einen Kernpunkt der numerischen Experimentalauslegung des Prüfstandes und der Modellierung des numerischen Setups dar und ist Grundlage für die CFD-Simulationen zur Erweiterung der Betriebspunkte.

### 3.2. Aufteilung der Strömung

Aufgrund der in Kapitel 2.3.3 beschriebenen Notwendigkeit der Aufteilung der Strömung auf mehrere Rohre zur Durchflussmessung hinter der Prüfstands-Messstrecke, wird eine numerische Auslegung der Kanalführung erstellt. Dadurch soll eine möglichst kompakte Bauform erzeugt und strömungsoptimierende Maßnahmen untersucht werden. Des Weiteren sollen mögliche Einflüsse auf die Durchflussmessung mittels der integrierten Lochblenden ermittelt werden.

Vorausgegangen ist eine Untersuchung des Strömungsfeldes stromab des Einlaufs. Dazu wird das Simulationsgebiet hinter der DOP verlängert und bei einem Meter Entfernung untersucht. Diese Entfernung entspricht der maximalen Länge, welche in den begrenzten Bauraum der Drucktonne integrierbar ist. Die Totaldruckdarstellung in Bild 13 zeigt an dieser Stelle eine deutliche Ausprägung des Strömungsfeldes aufgrund des zuvor auftretenden MediMEIRD Störusters an der DOP. Wie nach DIN EN ISO 5167 zu erwarten, ist an dieser Stelle noch kein vollständig symmetrisches Rohrströmungsprofil ausgebildet und eine fehlerfreie Durchflussmessung mittels Lochblenden nicht möglich [9].

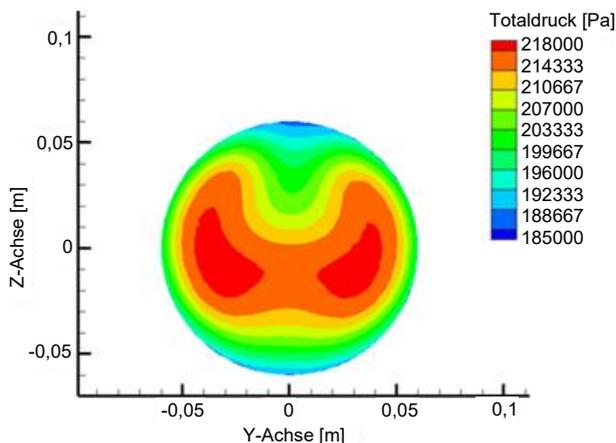


BILD 13. Totaldruckstörmuster in der Ebene der Durchflussmessung (1 m hinter DOP)

Zur Vergrößerung der relativen Vorlaufstrecke der Rohrströmung wird die Aufteilung der Strömung hinter der Prüfstands-Messstrecke auf mehrere Rohre untersucht. Dabei stellte sich eine möglichst effektive Aufteilung der Strömung durch 4 Rohre heraus. Zur Reduktion von Drall und Turbulenzen hinter der Strömungsaufteilung, aufgrund der starken Umlenkung, wird zu Beginn der vier Rohrstücke ein Durchflusskonditionierer in Honigwabenstruktur integriert. Dieser wird in Position und Lauflänge numerischen Untersuchungen unterzogen. Eine möglichst frühzeitige Platzierung hinter der Strömungsaufteilung bei einer Lauflänge von 50 mm stellte sich dabei als zielführend heraus. Bild 14 zeigt das Fluidvolumen des Simulationsgebiets mit MediMEIRD und Strömungsaufteilung.

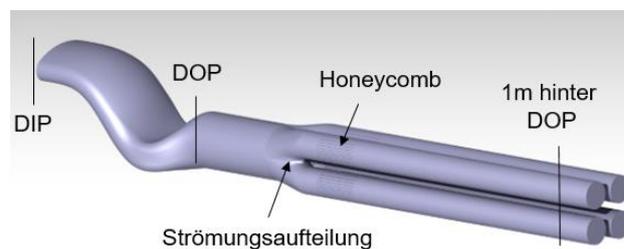


BILD 14. Simulationsgebiet von MediMEIRD und Strömungsaufteilung

Die Darstellung des Totaldrucks ein Meter hinter der DOP, bei Aufteilung der Strömung auf vier Rohre, zeigt eine hinreichend symmetrische Rohrströmung innerhalb der vier Rohrstücke, trotz des aufgeprägten Störprofils des MediMEIRD (Bild 15).

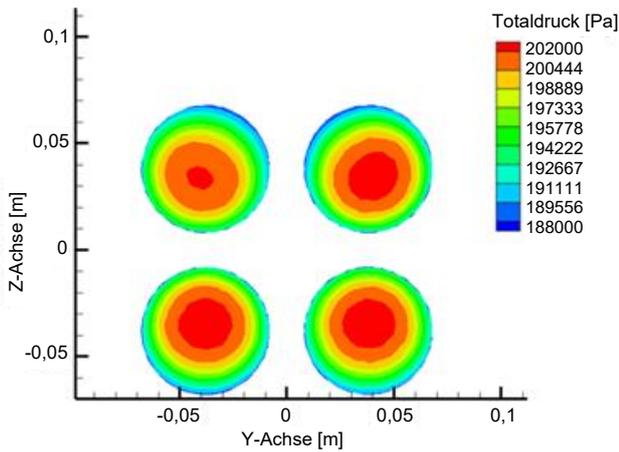


BILD 15. Totaldruckstörmuster in der Ebene der Durchflussmessung (1 m hinter DOP) bei Aufteilung auf vier Rohre

Die Detailuntersuchung des Strömungsaufteilungselements zeigt Ablösungen in den unteren beiden Rohren aufgrund des auftretenden Totaldruckstörprofils des MediMEIRD und der Umlenkung der Strömungsaufteilung. Die in Bild 12 gezeigten Wirbelsysteme im unteren Bereich sind Ursprung dieser Ablösungen.

Die Form der Strömungsaufteilung und der Winkel der Strömungsumlenkung werden daher mithilfe der numerischen Untersuchungen iterativ angepasst. Die Strömungsumlenkung ist auf maximal 15 Grad limitiert, um Ablösungen zu vermeiden. Die Form der vier Rohrstücke in der Strömungsaufteilung wird in einen stetigen Prozess angepasst und auf das aufgeprägte Totaldruckstörprofil des MediMEIRD optimiert. Dadurch wird eine hinreichend gleichmäßige Verteilung des Massenstroms bei möglichst früher Ausprägung eines Rohrströmungsprofils erreicht. Die resultierende Form beinhaltet eine Umlenkung von 15 Grad der beiden oberen Rohre und 11 Grad der beiden unteren Rohre. Die Rohrform ist im Bereich beschleunigter Strömung leicht oval gestaltet, da dies zur besseren Bildung eines Rohrströmungsprofils im nachfolgenden Rohr beiträgt (Bild 16). Die Kanten zur Umlenkung der Strömung wurden entfernt und durch tangential überlaufende Flächen ersetzt. Dadurch ist das weitere Anliegen der Strömung auch außerhalb des untersuchten Betriebsbereiches sichergestellt. Diese komplexe Bauform der Innenkontur wird durch die Fertigung mittels Selektives Lasersintern (SLS) 3D-Druck ermöglicht.

Bild 16 zeigt das fertig ausgearbeitete Bauteil zur Strömungsaufteilung, mit Blick auf die Innenkontur und dahinterliegenden Flansche, zur Befestigung der vier Rohre.

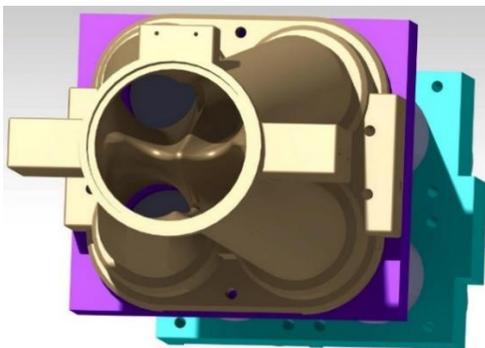


BILD 16. Strömungsaufteilung mit Blick auf die komplexe Innenkontur

### 3.3. Befestigung und Festigkeit

Das erarbeitete Befestigungskonzept ermöglicht die axial verschiebbare Lagerung des Prüfstandaufbaus. Hierbei steht die Festigkeit der einzelnen Bauteile, als auch die vibrationsfeste Steifigkeit des Zusammenbaus im Vordergrund.

Die modulare Düse wird über einen Flansch mit dem Vorderteil der Drucktonne verschraubt und ist nicht beweglich gelagert. Das umliegende Gerüst des Prüfstands besteht aus einem Aluminiumprofilsystem. Das Profilsystem ist auf einem Schienensystem aufgeschraubt und dadurch axial verschiebbar. Dies dient der Regelung der Grenzschichtausblasung. Der MediMEIRD wird über zwölf Befestigungsschrauben mit den Profilen verschraubt. Zur Erzeugung einer hochbelastbaren Fixierung werden in den vorgesehenen Löchern an den Trägern Gewindehülsen eingeklebt. Die sechs Befestigungsträger am Einlauf sind entsprechend der auftretenden Kräfte platziert. Die oberen beiden Träger nehmen dabei die durch die Strömungsumlenkung des S-Ducts auftretenden Reaktionskräfte in Z-Richtung, die seitlichen Träger und der Anschlussring hinter der DOP Reaktionskräfte gegen die X-Richtung auf. Zwischen der DOP und dem Strömungsaufteilungselement befindet sich ein traversierbarer Messrechen in einem Gehäuse, welches durch je einen Gleitlagering davor und dahinter radial beweglich gelagert ist [11]. Die dahinterliegende Strömungsaufteilung, die vier Rohre und die dazugehörigen Flansche werden analog zum MediMEIRD mit den Profilen seitlich verschraubt. Dadurch ist eine hohe axiale Steifigkeit gegeben. Zur Vermeidung von Vibrationen ist am vorderen Teil der Aluminiumprofile ein zusätzliches Schienensystem angebracht, welches axial verschiebbar mit der modularen Düse verbunden ist. Dadurch ist ein möglichst kompakter Kraftschluss und eine relativ hohe Steifigkeit zwischen dem Einlauf und der Zulaufdüse gegeben.

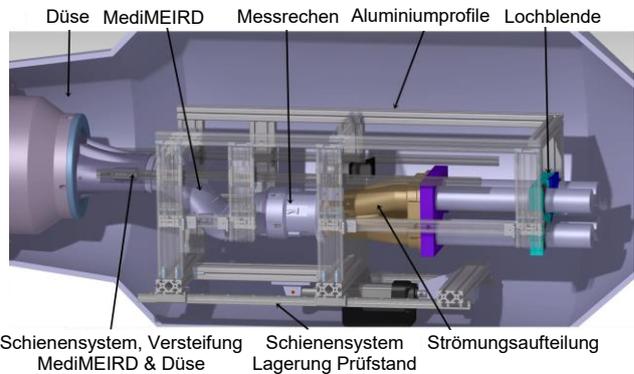


BILD 17. Gesamtaufbau mit Kennzeichnung der Bauteile (Aluminiumprofile teils halbtransparent dargestellt)

Wie zuvor erwähnt, bedarf die Komplexität der Bauteile die Fertigung mittels SLS 3D-Kunststoff-Druck. Aus diesem Grund erfordert die Festigkeitsauslegung dieser Teile eine detaillierte numerische Untersuchung. Es werden hohe Ansprüche aufgrund hoher Drücke und großen Massenströmen an das Bauteil gestellt. Verschiedene zu untersuchende Betriebspunkte ergeben zudem unterschiedliche Festigkeitsanforderungen. Die angebrachte Instrumentierung benötigt eine Vielzahl an Druckanschlüssen, welche zudem aus fertigungstechnischen Gründen mit einer umlaufenden Nut versehen werden müssen. Dies führt zur zusätzlichen Festigkeitsreduktion des Bauteils. Kern der Strukturanalyse ist die Vermeidung von Schäden am Prüf-

stand und insbesondere eine Beschädigung des Schraubenverdichters des geschlossenen Windkanals MZW aufgrund von Versagen der Bauteile.

Daher wird eine Fluid-Struktur-Interaktion (FSI) Simulation der modularen Zulaufdüse mit dem MediMEIRD innerhalb der Drucktonne erstellt. So können die auftretenden aerodynamischen Kräfte analysiert, das Befestigungskonzept und die Festigkeit des Bauteils überprüft werden. Folgendes Bild zeigt dazu das Schnittbild der Machzahl eines exponierten Betriebspunktes mit hoher Beanspruchung an den Einlauf.

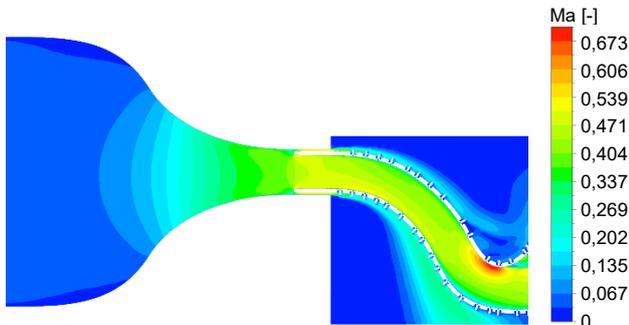


BILD 18. FSI-Simulation mit komplexer Einlaufgeometrie, Machzahlverlauf

Hier lassen sich die Umströmung des Einlaufs aufgrund der Grenzschichtausblasung sowie die Vielzahl an umströmten Druckanschlüssen am Einlauf erkennen.

Die FSI-Simulation wird im Hinblick auf relevante Spannungs- und Dehnungsgrößen sowie Versagenskriterien des Materials ausgewertet. Dabei zeigt sich ein Maximum der elastischen Vergleichsspannung, als auch der Von-Mises-Spannung an den oberen Befestigungsträgern. Die auftretenden Spannungen liegen deutlich unter der maximal zulässigen Spannung des Materials, im elastischen Bereich. Hier könnte durch Verbesserung scharfkantiger Übergänge noch eine weitere Optimierung erreicht werden.

Die maximale Gesamtverformung tritt hingegen am unteren Teil des Einlaufs auf. Aufgrund der starken Umlenkung der Strömung innerhalb des S-Ducts wird hier eine Verformung von maximal 0,39 mm erreicht (Bild 19).

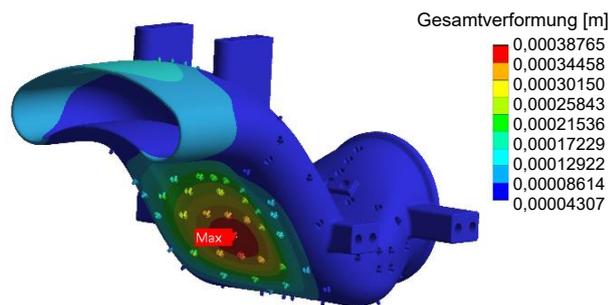


BILD 19. Ermittelte Gesamtverformung MediMEIRD (Ergebnis einer FSI-Simulation)

Die Prüfung von Versagenskriterien zeigen ein maximales Spannungsverhältnis, bewertet nach maximaler Zugkraft, von 0,076 und ein maximales Spannungsverhältnis, bewertet nach Von Mises, von 0,093. Versagen des Materials ist bei einem Wert von 1 zu erwarten. Dies bedeutet einen ausreichend großen Sicherheitsfaktor, insbesondere unter Berücksichtigung von Wechsel- und Dauerbeanspruchung

aufgrund der unterschiedlichen Betriebspunkte und der erwarteten langen Messzeiten.

Die Analyse der Reaktionskräfte verdeutlicht die erfolgreiche Umsetzung des Konzepts der Befestigungsanschlüsse des MediMEIRD. Diese zeigen eine erfolgreiche Aufnahme und Verteilung der Reaktionskräfte auf die Befestigungen. Bemerkenswert ist hier unter anderem, dass in X-Richtung in Summe über 1kN auf das Bauteil wirkt. Da die umliegende Drucktonne aufgrund des eingestellten Betriebspunktes unter Druck steht, resultiert diese Last überwiegend aus dem dynamischen Druckanteil.

Somit lässt sich feststellen, dass die Einspannungen die auftretenden Kräfte gut aufnehmen, sodass eine Verformung nur aufgrund der Aufweitung der Strömungsröhre des MediMEIRD wegen der starken Umlenkung auftritt. Ein Versagen des Materials ist aufgrund des großen Sicherheitsfaktors nicht zu erwarten.

#### 4. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Bisher am Institut für Strahlantriebe erforschte Einlaufkonfigurationen beschränkten sich auf eine Betrachtung unter Bodenstandsbedingungen. Hierbei wurden bereits detaillierte Untersuchungen im Bereich von passiven und aktiven Strömungsstabilisierungsmaßnahmen von Einlaufströmungen am ISA durchgeführt [14]. Um vollumfassende Aussagen bezüglich stark konturierte Einlaufsysteme tätigen zu können, ist darüber hinaus eine Untersuchung unter realistischen Flugbedingungen notwendig.

Daher wurden zunächst die Anforderungen an einem Prüfstand zur Einlaufuntersuchung unter Flugbedingungen erarbeitet und konkretisiert. Die Leistungsdaten des zur Verfügung stehenden Mehrzweckwindkanals am ISA bildeten die Rahmenbedingungen des Versuchsaufbaus. Es konnte eine Prozesskette erarbeitet werden, welche es erlaubt, die Betriebspunkte des Einlaufs individueller Flugpunkte anhand von Mach- und Reynoldszahl abbilden zu können.

Das Prüfstandkonzept wurde sukzessive ausgearbeitet und numerischen Untersuchungen unterzogen, um verschiedene Einflüsse quantifizieren und behandeln zu können. Die Konzeptionierung der Bauteile des Prüfstandes beinhaltet eine funktionale Ausblasung der Zulaufgrenzschicht aus dem Windkanal. Dies ermöglicht eine definierte und homogene Strömung am Einlaufeintritt, wodurch die Darstellung der Bedingungen der Außenströmung einer Flugfalluntersuchung auf die Einstellung von Mach- und Reynoldszahl begrenzt ist. Weitere, detailliertere numerische Untersuchungen befassten sich mit der Formgebung der Einlaufvorderkante, welche neben der Grenzschichtausblasung einen direkten Einfluss auf die Homogenität der Strömung im Einlaufeintritt hat. Hier zeigte eine superelliptische Vorderkante eine große Resistenz gegenüber Strömungsablösungen über den zu untersuchenden Betriebsbereich. Parallel zur numerischen Auslegung der Bauteile erfolgte ein Vergleich der Simulationsergebnisse der Gesamtsimulation des Prüfstandes, welche eine hohe Übereinstimmung des Totaldruckstörnmusters an der DOP sowie die Ausprägung der Ablöseblase zwischen MediMEIRD und MEIRD darstellte.

Zur Messung des Massenstroms im Einlauf musste eine dedizierte Durchflussmessung hinter dem MediMEIRD angebracht werden, da aufgrund der Grenzschichtausblasung nicht der gesamte Massenstrom durch den Einlauf geführt wird. Hier zeigte sich eine Strömungsaufteilung auf vier Rohre in Verbindung mit dem Wirkdruckverfahren mittels

Normlochblende als zielführend. Globale Totaldruckstörungen an der Durchflussmessung konnten erheblich reduziert werden.

Die Festigkeit des MediMEIRD wurde anhand einer FSI-Simulation geprüft und nachgewiesen, wodurch ein Ausfall des Versuchsträgers, als auch eine Beschädigung der Anlage vermieden wird. Die Position und die Anzahl der Druckmessstellen, sowie die Vermessung der Strömung an der AIP wurde von zuvor getätigten Forschungsarbeiten am ISA adaptiert. Dies ermöglicht die Vergleichbarkeit der Ergebnisse.

Der so entwickelte modulare Prüfstand ermöglicht eine Untersuchung von stark konturierten Einläufen unter Berücksichtigung der Bedingungen der Außenströmung eines definierten Flugfalls. Die ausgearbeitete Prozesskette dient dabei der Einstellung von Mach- und Reynoldszahl des jeweiligen Einlaufbetriebspunktes.

Die konzeptionierten und konstruierten Bauteile des Prüfstandes werden größtenteils innerhalb der Fertigungskapazitäten des ISA konventionell hergestellt. Bauteile für additive Fertigung werden am Wehrwissenschaftliches Institut für Werk- und Betriebsstoffe der Bundeswehr gefertigt. Die Installation und Endmontage werden vom technischen Personal des ISA durchgeführt.

Eine Validierung der parallel zur Messkampagne durchgeführten numerischen Simulationen erfolgt im Nachgang. Nach erfolgreicher Durchführung ermöglicht dies eine Erweiterung der am MZW abbildbaren Einlaufbetriebspunkte, wodurch die Untersuchungen der Bedingungen der Außenströmung eines Einlaufs nicht auf die Leistungsdaten des Mehrzweckwindkanals limitiert ist.

## Literaturverzeichnis

- [1] J. P. Haug, M. Stößel und R. Niehuis, Influence of cross-sectional shape on the flow in a highly bent research intake duct for jet engines, Charlotte, NC, USA: ASME Turbo Expo, 2017, GT2017-64338.
- [2] R. Gomes und R. Niehuis, „Aufbau des Mehrzweckwindkanals und Kalibrierung von pneumatischen Fünflochsonden am MZW,“ Institut für Strahlantriebe, Universität der Bundeswehr München, München, 2015.
- [3] E. A. Truckenbrodt, Fluidmechanik, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2008.
- [4] J. P. Haug, R. P. M. Rademakers, M. Stößel und R. Niehuis, Numerical flow field analysis in a highly bent intake duct, Oslo, Norway: ASME Turbo Expo, 2018, GT2018-76633.
- [5] W. T., Design of a Variable Contraction for a Full-Scale Automotive Wind Tunnel, Nashville: AIAA, 1992, 7061992. DOI: 10.2514/6.1992-3929..
- [6] R. Narasimha und S. N. Prasad, Leading edge shape for flat plate boundary layer studies, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1994, DOI:10.1007/BF01874418, pp. 358-360.
- [7] A. Schöne, Meßtechnik, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1997.
- [8] DIN 1952, „Durchflußmessung mit Blenden, Düsen und Venturidüsen in voll durchströmten Rohren mit Kreisquerschnitt (VDI-Durchflußregeln)“. Juli 1982.
- [9] H. AG, Durchflussmessung nach dem Wirkdruckverfahren mit Drosselgeräten, Kamen: DIN EN ISO 5167-1/A1/VDI 2041.
- [10] S. o. A. Engineers, Gas turbine engine inlet flow distortion guidelines, Aerospace Recommended Practice 1420, 2002.
- [11] P. Max, C. Petroll und R. Niehuis, Besondere Herausforderungen für Messrechen zur Untersuchung von stark gekrümmten Triebwerkseinläufen in einer Kleintriebwerksversuchsanlage, Online: Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress, 2020, DLRK2020\_530129.
- [12] U. Sendler, "Siemens PLM Software". In: Das PLM-Kompendium, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2009.
- [13] S. Schilawa, Entwurf dreidimensionaler Windkanaldüsen, Düsseldorf: VDI Verlag, 1984.
- [14] R. P. Rademakers, J. P. Haug, R. Niehuis und M. Stößel, Design and development of a military engine inlet research duct, Korea, Daejeon: 30th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, 2016, ICAS2016-0623.