

# BESONDERE HERAUSFORDERUNGEN FÜR MESSRECHEN ZUR UNTERSUCHUNG VON STARK GEKRÜMMTEN TRIEBWERKSEINLÄUFEN IN EINER KLEINTRIEBWERKSVERSUCHSANLAGE

P. Max\*, C. Petroll†, R. Niehuis\*

\* Institut für Strahlantriebe, Universität der Bundeswehr München  
 Werner-Heisenberg-Weg 39, 85577 Neubiberg, Deutschland

† Wehrwissenschaftliches Institut für Werk- und Betriebsstoffe  
 Institutsweg 1, 85435 Erding, Deutschland

## Zusammenfassung

Zur Bewertung der Verdichterzuströmung nach gekrümmten Triebwerkseinläufen wurde ein traversierbarer Messrechen speziell auf die Anforderungen in einer Kleintriebwerksversuchsanlage konzeptioniert, konstruiert und gefertigt. Dazu wurden zunächst die Anforderungen an einen Messrechen in einer Kleintriebwerksversuchsanlage aufgestellt und der zur Verfügung stehende Bauraum analysiert. Daraufhin wurde unter Berücksichtigung des Bauraums und den Anforderungen die Vor- und Nachteile verschiedener Sondenformen gegenübergestellt, sowie verschiedene Konzepte zur Anordnung dieser erarbeitet und bewertet. Darüber hinaus wurde die Gestaltung und Verlegung der Druckleitungen von der Sonde zum Druckaufnehmer sowie ein geeignetes Fertigungsverfahren berücksichtigt. Das gewählte Konzept besteht aus Kielsonden, welche an drei Armen, die jeweils um  $120^\circ$  in Umfangsrichtung zueinander versetzt angeordnet sind und ebenfalls in Umfangsrichtung traversiert werden können. Ein weiteres Augenmerk wurde auf die Integration des Messrechens in die Kleintriebwerksversuchsanlage gelegt. Aufgrund der einfachen Möglichkeit, die Druckleitungen innerhalb der Arme unterzubringen und nach außen zu führen, wurde als Fertigungsverfahren der 3D-Druck gewählt. Aus dem erarbeiteten Konzept wurde anschließend ein CAD-Modell erstellt. Es erfolgte die Auslegung der Kielsonden sowie des Dichtungssystems und der Lagerung des Messrechens. Während der gesamten Konstruktion wurde eine Fertigung mittels eines 3D-Druckverfahrens berücksichtigt. Mithilfe des Messrechens wird es möglich sein, die Druckstörungen, die durch den Einlauf entstehen, hochaufgelöst und unter großen Schräganströmwinkeln zu erfassen.

## Keywords

Kielsonde; Messrechen; 3D-Druck; Triebwerkseinlauf

## NOMENKLATUR

### Formelzeichen

$a$	Abstand von der Vorderkante des SONDENSCHILDS zur Vorderkante der Sonde	[m]
$A_0$	Austrittsfläche der Belüftungsbohrungen der Kielsonde	[m <sup>2</sup> ]
$A_v$	Kiel-Sonden Eintrittsfläche	[m <sup>2</sup> ]
$\beta$	Winkel	[°]
$D, D_2, d$	Durchmesser	[m]
$t$	Abstand	[m]
$u$	Strömungsgeschwindigkeit in Hauptströmungsrichtung	[m/s]

$v$	Geschwindigkeitskomponente senkrecht zur Hauptströmungsrichtung	[m/s]
$w$	Geschwindigkeitskomponente quer zur Hauptströmungsrichtung	[m/s]

### Abkürzungen

AIP	Aerodynamic Interface Plane
AIR	Aerospace Information Report
ARP	Aerospace Recommended Practice
CAD	Computer Aided Design
CFD	Computer Fluid Dynamics
ISA	Institut für Strahlantriebe
KTVA	Kleintriebwerksversuchsanlage
MEIRD	Military Engine Intake Research Duct

MiniMEIRD Skaliertes Modell des MEIRD

- PA Polyamid
- SAE Society of Automotive Engineers
- SLM Selektives Laserschmelzen
- TVA Treibwerksversuchsanlage

1. EINLEITUNG

Aktuelle Konzeptstudien zu modernen Fluggeräten weisen darauf hin, dass zukünftig die Antriebssysteme vollständig in das Luftfahrzeug integriert sein werden. Die Reduktion des Bauraumes und dadurch des Systemgewichtes sowie die Verkleinerung der Radarsignatur bei militärischen Anwendungen sind hierfür die primären Beweggründe. Da die rotierenden Bauteile des Antriebs eine erhebliche Radarsignatur generieren, werden stark gekrümmte Triebwerkseinläufe verwendet, um eine direkte Sichtlinie auf das Triebwerk zu unterbinden. Im zivilen Bereich werden stark konturierte Triebwerkseinläufe zur Reduktion des erforderlichen Schubs durch die Grenzschichtaufnahme in das Triebwerk eingesetzt. Das Strömungsfeld dieser Einlaufgeometrien ist in der Regel von starken Sekundärströmungen bestimmt, welche unerwünschte inhomogene Strömungsbedingungen in Form von kombinierten Druck- und Drallstörungen an der Austrittsebene des Einlaufsystems nach sich ziehen [1], [2]. Für das Verdichtungssystem des Triebwerks bedeuten diese Strömungsstörungen eine Verschlechterung des Wirkungsgrades sowie eine Verkleinerung des sicheren Betriebsbereiches und somit gegebenenfalls die Gefahr von Verdichterstabilitäten. Mit Hilfe von aktiven oder passiven strömungsverbessernden Maßnahmen [3], [4] kann das Strömungsfeld stark gekrümmter Einlaufgeometrien deutlich verbessert werden.

Eine zentrale Herausforderung in diesem Forschungsbereich ist die Bewertung der Strömungsstörungen beim Eintritt in den Verdichter. Zur Bewertung dieser Störungen kommen u. a. Messrechen mit Druckmesssonden zum Einsatz. Der Messrechen wird vor den Verdichter in der Aerodynamic Interface Plane (AIP) eingebaut. Die AIP ist in der Aerospace Recommended Practice (ARP) 1420 [5] als mit Messtechnik instrumentierte Ebene vor dem Triebwerk definiert. Um die Auswertung der Störparameter zu standardisieren, hat die Society of Automotive Engineers (SAE) in der ARP 1420 [5] eine grundlegende Messrechenkonstruktion definiert (Bild 1). Dieser Standard legt fest, dass mindestens 40 Druckmesssonden in der AIP fest installiert sein sollten. Die Sonden sind in Umfangsrichtung auf acht in gleichen Winkelabständen angeordneten Rechen mit jeweils fünf Sonden pro Rechen platziert. In radialer Richtung sind die Sonden in den Schwerpunkten gleicher Flächen positioniert. Die Konstruktion dieses Messrechens ist in Bild 1 zu sehen und basiert auf

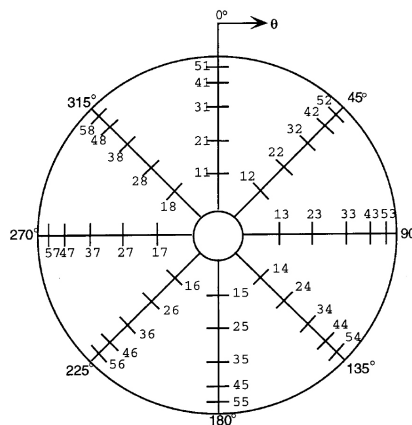


BILD 1. Standardisierter Messrechen aus der SAE ARP 1420 mit 40 Messstellen; Blickrichtung in Strömungsrichtung [5]

Erfahrungen, die über Jahrzehnte vor allem durch Messungen der Totaldruckstörungen gesammelt wurden. Die Ergebnisse sind in dem Aerospace Information Report (AIR) 1419 [6] zusammengefasst.

In Kleintriebwerksversuchsanlagen (KTVA) ist der Triebwerkeintrittsdurchmesser und damit der Bauraum für den Messrechen deutlich kleiner als bei einer standard Triebwerksversuchsanlage (TVA). Dies führt bei einer Messrechenkonstruktion nach ARP 1420 [5] dazu, dass in der KTVA eine große Verblockung vor dem Triebwerk entsteht. Weiterhin skaliert der Sondenabstand zur Außenwand des Messrechengehäuses proportional mit dem Messrechengehäusedurchmesser. Dadurch wird bei kleiner werdenden Triebwerkeintrittsdurchmessern die äußerste Sonde immer näher an das Messrechengehäuse positioniert. Hier müssen sehr kleine Sondendurchmesser verwendet werden, um eine Verschneidung der Sonde mit dem Messrechengehäuse zu vermeiden.

Um dennoch ein Messrechen in einer KTVA einbauen zu können, wird im Folgenden der Entwicklungsprozess von der Konzeptfindung bis zur detaillierten konstruktiven Ausgestaltung eines Messrechens speziell für eine KTVA beschrieben. Dabei wird zunächst die KTVA am Institut für Strahlantriebe (ISA) und der zu untersuchende Triebwerkeinlauf vorgestellt und dann die maßgebenden Randbedingungen, Auslegungsziele und Fertigungsaspekte diskutiert.

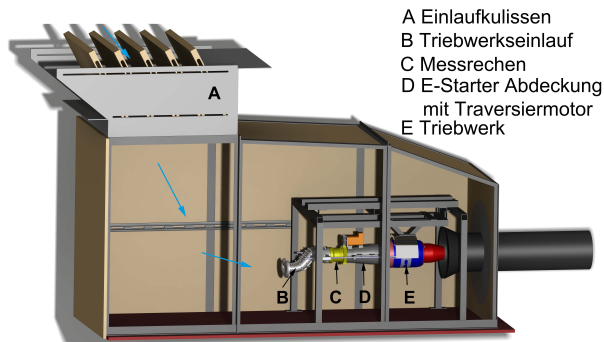
2. VERSUCHSAUFBAU

2.1. Kleintriebwerksversuchsanlage (KTVA)

Das Institut für Strahlantriebe betreibt neben der Triebwerksversuchsanlage (TVA) auch eine Kleintriebwerksversuchsanlage (KTVA), die sowohl für Forschungs- als auf für Lehrzwecke verwendet wird. Die Kleintriebwerksversuchsanlage ist ein Nachbau der TVA des ISA im Maßstab 1:7. Die KTVA wurde

gebaut um zeit- und kosteneffektiv eine große Vielzahl an experimentellen Untersuchungen durchführen zu können. Experimente auf dem skalierten Triebwerksprüfstand haben gegenüber der TVA weitere signifikante Vorteile. Erstens kann ein Testaufbau relativ einfach geändert werden. Dies ermöglicht Untersuchungen zu einer umfangreichen Palette von Parametern in kurzen Zeitspannen. Zweitens sind die Triebwerksbetriebskosten gering. Und drittens kann eine große Datenmenge zur Validierung der CFD generiert werden.

Bei der KTVA wie auch der TVA erfolgt die Triebwerkszuströmung von oben (siehe Bild 2).



**BILD 2. Schematischer Überblick der Kleintriebwerksversuchsanlage am ISA (Frontseitenwände zum besseren Einblick nicht dargestellt)**

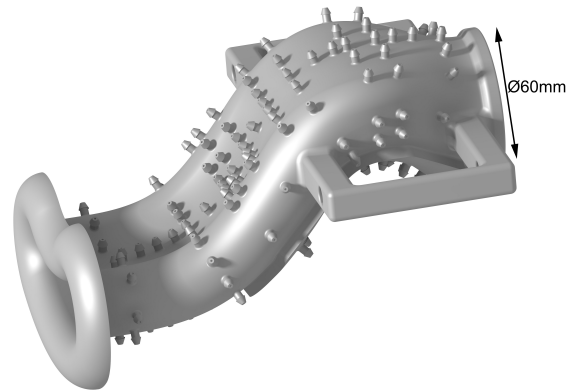
Der Strömungspfad in der KTVA geht zunächst über sogenannte Einlaufkulissen (Bild 2 A). Die Luft trifft danach auf den stark gekrümmten Triebwerkseinlauf (Bild 2 B und Bild 3), strömt über den Messrechen (Bild 2 C und Bild 6), die E-Starter Abdeckung (Bild 2 D und Bild 6) und schließlich durch das Triebwerk (Bild 2 E) in das Mischrohr. Die E-Starter Abdeckung ist notwendig, da das Triebwerk, ein JetCat P300 Pro über einen Elektromotor, welcher vor dem Verdichter angebracht ist, gestartet wird. Um den Aufbau bestehend aus Triebwerkseinlauf und Messrechen ohne Störung durch diesen Elektromotor vor dem Triebwerk anbringen zu können, wird die E-Starter Abdeckung benötigt.

Die effektive Triebwerkseintrittsfläche beträgt nach Abzug der Elektromotorfläche  $2827,4 \text{ mm}^2$ . Dies entspricht einem Kreis mit einem Durchmesser von  $60 \text{ mm}$  und ist gleichzeitig der Eintrittsdurchmesser der E-Starter Abdeckung. Dadurch ist der Durchmesser des Messrechengehäuses auf  $60 \text{ mm}$  festgelegt.

## 2.2. Triebwerkseinlauf

Am Institut für Strahlantriebe werden in mehreren Forschungsprojekten Strömungsuntersuchungen an kompakten und stark konturierten Einlaufsystemen durchgeführt. Dazu wurde ein Forschungseinlauf (MEIRD - Military Engine Intake Research Duct) entwickelt und gebaut, welcher durch seine Geometrie eine kombinierte Druck- und Drallstörung hervorruft [7]. Zu diesem Forschungseinlauf exi-

stiert ebenfalls ein skaliertes Modell für die KTVA, der sogenannte MiniMEIRD (Bild 3 und Bild 2 B). Dieser besitzt eine S-Schlag Kontur und geht von einer nierenförmigen Eintrittsebene auf eine kreisrunde Austrittsebene über. Der Kreisdurchmesser des Einlaufaustritts beträgt  $60 \text{ mm}$  und ist somit für den Messrechengehäusedurchmesser ebenfalls ein bindendes Maß.



**BILD 3. Skaliertes stark gekrümmtes Triebwerkseinlauf (MiniMEIRD)**

In konturierten Einläufen treten nicht vernachlässigbare Sekundärströmungseffekte auf. Diese sind mit in Rohrkrümmern vorkommenden Phänomenen vergleichbar. Durch den S-Schlag in der Einlaufkontur sind solche Kanäle stark gekrümmt. Im Bereich der Krümmung wird die Strömung durch die Zentrifugalkraft zur jeweiligen Außenseite des Kanals gedrückt, sodass dort ein höherer Druck entsteht als auf der Innenseite. Die Zentrifugalkraft ist von der Strömungsgeschwindigkeit abhängig. In der Grenzschicht ist deren Einfluss demnach sehr gering. Hier bewirkt der Druckgradient zwischen Außen- und Innenseite des gekrümmten Kanals eine Ausgleichsbewegung. Das Grenzschichtfluid strömt vom höheren Druck entgegen der Richtung der Zentrifugalkraft zur Innenseite. Die Fluidbewegungen ergänzen sich zu einem entgegengesetzt rotierenden Wirbelpaar [8].

Dieses Wirbelpaar führt dazu, dass die Sonden des Messrechens schräg angeströmt werden. Damit der Messrechen in der AIP den Druck richtig erfassen kann, müssen die Druckmesssonden den Druck bei einem Schräganströmwinkel von  $\pm 30^\circ$  [2] möglichst fehlerfrei erfassen können.

## 3. ENTWICKLUNG UND KONSTRUKTION EINES MESSRECHENS FÜR EINE KLEINTRIEBWERKSVERSUCHSANLAGE

Aus den vorangegangenen Kapiteln wird deutlich, dass vor allem der eingeschränkte Bauraum für einen Messrechen in einer Kleintriebwerksversuchsanlage zur Untersuchung von stark gekrümmten Triebwerkseinläufen zu deutlich anderen Anforderungen als wie für ein Messrechen in einer Triebwerksversuchsanla-

ge führt.

Um hier die Verblockung des Triebwerkseinlaufs durch den Messrechen möglichst gering zu halten aber dennoch eine adäquate Anzahl an Messpunkten zu erhalten, kommt in der Regel eine Traversierung des Messrechens oder der Sonde zum Einsatz. Die Sondenanordnung aus der SAE ARP 1420 [5] kann aufgrund des kleinen Bauraumes und dadurch der Gefahr, dass sich die äußerste Sonde mit der Gehäusewand schneidet, nicht angewendet werden. Hier ist ein neues Konzept zur Platzierung der Messsonden zu erstellen. Weiterhin sollten die Sondenarme eine möglichst gute aerodynamische Form besitzen. Die Messsonden selbst sollten den Druck auch unter einem Schräganströmwinkel von  $\pm 30^\circ$  möglichst fehlerfrei erfassen. Darüber hinaus sollte auch auf die Verlegung der Druckleitungen von einer Sonde bis zur Messrechengäusewand ein besonderes Augenmerk gelegt werden. Gerade bei der Traversierung des Messrechens ist darauf zu achten, dass sich die Druckschläuche nicht verheddern und dadurch ein Weitermessen unmöglich machen. Hier bietet sich ein 3D-Druck Verfahren an, da bei diesem die Druckleitungen direkt in die Gehäusewand integriert werden können und alle Leitungen auf einen Anschlussblock geführt werden können. Von diesem können anschließend die Druckschläuche über ein Kabelschlepp zu den Druckaufnehmern geleitet werden.

Zusammenfassend lauten die Anforderungen an den Messrechen:

- Totaldrucksonde mit hoher Winkelunabhängigkeit
- Sondenanordnung
- Befestigung der Sonde(n) auf einem aerodynamisch angepassten Arm
- Möglichkeit der Traversierung des Messrechens
- Geschickte Verlegung der Druckleitungen, ohne dass diese sich während der Traversierung verheddern
- Einbindungsmöglichkeit in die Kleintriebwerksversuchsanlage

### 3.1. Auswahl geeigneter Druckmesssonden

Mit den Druckmesssonden sollen die Strömungsstörungen vor dem Eintritt in den Verdichter bewertet werden können. Als Bewertungskriterien sollen verschiedene totaldruckabhängige Störkoeffizienten nach SAE ARP 1420 [5] herangezogen werden. Zusätzlich sollen Totaldruckplots der AIP erstellt werden können. Für diese Anwendung können Mehrlochsonden (hauptsächlich Fünflochsonden), Kiel-Sonden und Pitot-Sonden zum Einsatz kommen. Deren Vor- und Nachteile bei einem Einbau in den Messrechen werden kurz erläutert und eine Begründung für die Entscheidung zu Kiel-Sonden gegeben.

#### Fünflochsonden

Fünflochsonden bieten die Möglichkeit, neben dem Erfassen des Totaldruckes, über eine Kalibrier-

korrelation für die Druckdifferenzen zwischen den einzelnen Druckbohrungen, auch den Strömungsvektor zu bestimmen. Mit Fünflochsonden lassen sich demnach alle drei Komponenten  $u$ ,  $v$  und  $w$  eines Strömungsvektors, der Betrag der Anströmgeschwindigkeit und der räumliche Strömungswinkel ermitteln [9], [10], [11]. Nachteilig an Fünflochsonden ist die aufwendige und teure Kalibrierung der Sonden. Weiterhin sollte der Durchmesser der Fünflochsonden möglichst klein sein, um den Einfluss des Sondenkopfes auf die Strömung so klein wie möglich zu halten. Dies führt wiederum zu sehr kleinen Druckbohrungen und damit zu langen Ausgleichszeiten. Darüber hinaus werden pro Sonde im Vergleich zu einer Kiel- oder Pitot-Sonde fünf Druckschläuche und Steckplätze am Druckaufnehmer benötigt.

#### Pitot-Sonden

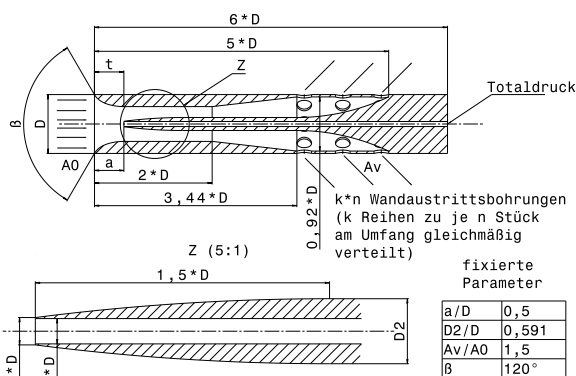
Pitot-Sonden bieten den Vorteil, dass sie bei geringem Innendurchmesser  $d$  einen kleinen Außendurchmesser  $D$  haben können. Somit haben sie keinen großen Platzbedarf. Außerdem sind sie einfach herzustellen und müssen nicht aufwendig kalibriert werden. Ihre Anströmwinkelunabhängigkeit ist jedoch von dem Durchmesser Verhältnis  $d/D$  abhängig. Für das übliche Durchmesser Verhältnis, von  $d/D \approx 0,6$  beträgt nach Nitsche et al. [9] der maximale Anströmwinkel  $\pm 8^\circ$ . In diesem Anströmwinkelbereich kann mit einer korrekten Gesamtdruckmessung gerechnet werden. Da bei einem stark gekrümmten Triebwerkseinlauf in der AIP mit Anströmwinkeln von  $\pm 30^\circ$  zu rechnen ist, würde eine Pitot-Sonde in diesem Fall zu einem zu großen Messfehler führen.

#### Kiel-Sonden

Die Kiel-Sonde ist ein Kompromiss aus den Vor- und Nachteilen der Fünfloch- und Pitot-Sonde. Vorteil gegenüber der Pitot-Sonde ist eine Winkelunabhängigkeit von  $\pm 40^\circ$  bei einer entsprechenden konstruktiven Auslegung. Nachteilig ist, dass die Kiel-Sonde aufgrund ihrer Ummantelung einen etwas höheren Platzbedarf als Pitot-Sonden haben. Gegenüber Fünflochsonden besitzen sie aber den Vorteil, dass sie nicht kalibriert werden müssen. Der Nachteil gegenüber Fünflochsonden ist, dass mit Kiel-Sonden keine Strömungswinkel und Anströmgeschwindigkeiten bestimmt werden können. Durch die einzige Einschränkung, den Drall in der Strömung nicht erfassen zu können, wurde hier entschieden, im Messrechen Kiel-Sonden einzusetzen. Die Kiel-Sonde wurde nach den Richtlinien und Empfehlungen aus [12], [13], [14], [15] konstruiert und ist im Bild 4 dargestellt.

Aus Bild 4 ist zu erkennen, dass sich nahezu alle Parameter der Kiel-Sonde aus dem Eintrittsdurchmesser  $D$  ergeben. Lediglich der Schildwinkel  $\beta$  ist mit  $120^\circ$  unabhängig vom Eintrittsdurchmesser. Da wie bereits erwähnt, der Messrechen aufgrund der besseren Integration der Druckleitungen in einem 3D-Druckverfahren hergestellt werden soll, ist der





**BILD 4. Schnittbild der eingesetzten Kiel-Sonde**

minimal mögliche druckbare Durchmesser hier der entscheidende Faktor für den Eintrittsdurchmesser  $D$ . Der Eintrittsdurchmesser beträgt hier  $D = 4\text{ mm}$ .

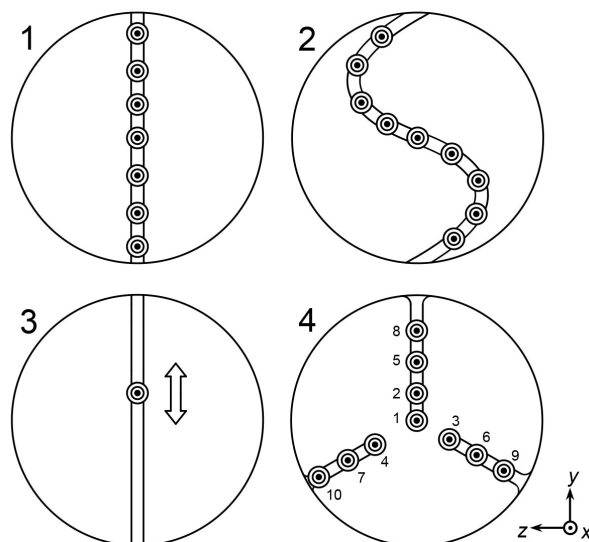
In Tab. 1 sind die wichtigsten Vor- und Nachteile der einzelnen Druckmesssonden bei einem Einbau in einen Messrechen für eine KTVA nochmals aufgelistet.

Sonde	Vorteile	Nachteile
Fünflochsonden	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Strömungswinkel-messung</li> <li>• 3 Geschwindigkeitskomponenten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kalibrierung</li> <li>• Ausgleichszeit</li> </ul>
Pitot-Sonden	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Platzbedarf</li> <li>• keine Kalibrierung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Winkelabhängigkeit</li> </ul>
Kiel-Sonden	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Winkel-unabhängigkeit</li> <li>• keine Kallibrierung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Platzbedarf</li> <li>• keine Strömungswinkel-messung</li> </ul>

**TAB 1. Vergleich unterschiedlicher Druckmesssonden**

### 3.2. Traversierung und Anordnung der Druckmesssonden

Um bei dem kleinen zur Verfügung stehenden Bauraum der KTVA die Anforderung einer hohen Auflösung an Messpunkten und einer geringen Verblockung gerecht zu werden, hilft es, den Messrechen oder eine einzelne Sonde zu traversieren. Die Traversierung des Messrechen erfolgt dabei in Umfangsrichtung. Einzelsonden können auch zusätzlich zur Umfangsrichtung in radiale Richtung traversiert werden. Dabei ist eine geschickte Anordnung der Sonden immer auch abhängig von der gewählten



**BILD 5. Konzepte zur Sondenanordnung**

Traversierung. Bild 5 zeigt vier mögliche Konzepte zur Anordnung der Druckmesssonden.

Bei allen vier Konzepten ist eine Traversierung von  $360^\circ$  in Umfangsrichtung vorgesehen. Alle Sonden in den Konzepten sind als Kiel-Sonden ausgeführt und die Blickrichtung ist in Strömungsrichtung. D. h., man schaut von vorn auf die Kiel-Sonden.

#### Konzept 1

Im ersten Konzept sind die Messsonden auf einem Querbalken - symmetrisches NACA Profil - angebracht. Dabei ist der Sondenabstand in  $y$ -Richtung nicht symmetrisch zur Mittelachse des Messrechengehäuses. D. h., die Sonden messen den Druck bei einer Traversierung in Umfangsrichtung jeweils auf einem anderen Radius. In Kombination mit einer Traversierung um  $360^\circ$  lässt sich dadurch bei gleicher Sondenanzahl eine höhere räumliche Auflösung erreichen, als bei einer symmetrischen Verteilung der Druckmesssonden. Ein Nachteil gegenüber einer symmetrischen Sondenverteilung ist die erforderliche Traversierung um  $360^\circ$  anstatt von  $180^\circ$  bei einer symmetrischen Verteilung und die damit ansteigende Messzeit.

#### Konzept 2

In Konzept 2 sind die Druckmesssonden nicht auf einem Querbalken angebracht, sondern auf einem s-förmigen Steg. Durch die längere Strecke des s-förmigen Stegs gegenüber des Querbalkens, können hier mehr Sonden befestigt werden (9 statt 7). Auch hier wird wieder um  $360^\circ$  traversiert und es besteht keine Symmetrie der Sonden zur Mittelachse des Messrechengehäuses. Allein durch die längere Strecke und der dadurch geschaffenen Möglichkeit, mehr Druckmesssonden auf dem s-förmigen Steg zu platzieren, erzielt man hier eine nochmals höhere räumliche Auflösung als bei Konzept 1. Der s-förmige Steg ist jedoch für die Auswertung

der Positionen, an denen die Drücke aufgenommen werden, gegenüber der Anordnung der Sonden in Konzept 1 benachteiligt. Weiterhin ist der spitze Winkel des s-förmigen Stegs an der Gehäusewand nachteilig. Dieser sorgt für eine Aufstauung der Strömung in diesem Bereich.

### Konzept 3

Das dritte Konzept besteht ähnlich wie Konzept 1 aus einem geradlinigen Querbalken. Mit dem Querbalken ist die Kiel-Sonde jedoch nicht mehr starr verbunden, sondern kann zusätzlich zur Traversierung in Umfangsrichtung auch in radialer Richtung traversiert werden. Die radiale Traversierung kann dabei über einen Querbalken oder direkt über eine Halterung, an deren Ende die Sonde befestigt ist, realisiert werden. Der Nachteil der radialen Traversierung mit Hilfe einer Sondenhalterung gegenüber der eines Querbalkens ist, dass sich mit der radialen Traversierung der Sonde je nach Sondenposition die Verblockung ändert. Vorteile von Konzept 3 gegenüber den anderen Konzepten ist die nahezu beliebig fein erzielbare räumliche Auflösung. Weiterhin ist die Verblockung am geringsten.

Nachteilig ist die extrem ansteigende Messdauer. Da hier jeder Messpunkt einzeln angefahren werden muss. Weiterhin steigt der konstruktive Aufwand auf Grund der zusätzlich erforderlichen radialen Traversiervorrichtung.

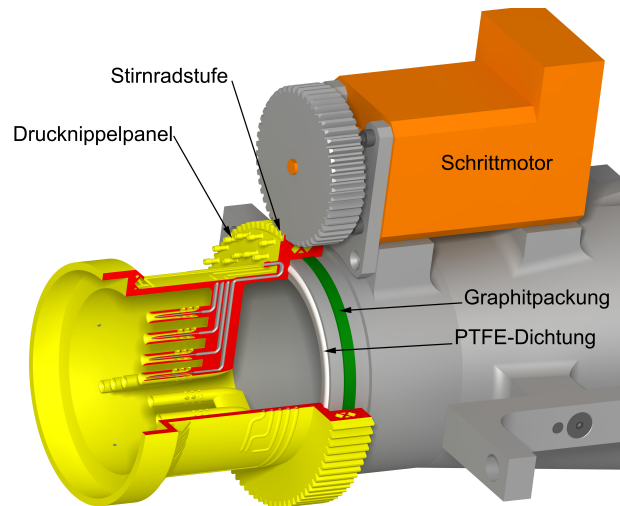
### Konzept 4

Das Konzept 4 ist ein Kompromiss aus Konzept 1 und Konzept 2. Hier kommen drei Arme zum Einsatz, die einen Winkel von  $120^\circ$  zueinander haben. Die Arme treffen sich in der Mitte nicht. Die Sonden sind auch hier wieder auf unterschiedlichen Radien angeordnet und der Messrechen wird um  $360^\circ$  traversiert. Gegenüber Konzept 1 und 2 erzielt man hier die höchste Auflösung (10 Sonden) mit dem Nachteil einer etwas höheren Verblockung.

Um die Messzeit in einem akzeptablen Rahmen bei dennoch sehr guter räumlicher Auflösung und einer einigermaßen geringen Verblockung zu halten, fiel hier die Entscheidung der Sondenanordnung auf Konzept 4.

Die Traversierung des Messrechens erfolgt dabei über eine Stirnradstufe und einen Schrittmotor (vgl. Bild 6 und Bild 2). Gewählt wurde ein Schrittmotor der Firma Nanotec.

Dieser besitzt eine Schrittauflösung von  $1,8^\circ$ . D. h., der Schrittmotor benötigt 200 Impulse für eine komplette Umdrehung. Da der Messrechen jedoch nicht in  $1,8^\circ$ -Schritten sondern in ganzzahligen Gradzahlen traversiert werden soll, ist an der Stirnradstufe eine Untersetzung erforderlich. Bei einem Übersetzungsverhältnis von 1,8 ist es möglich, jeden ganzzahligen Winkel anzufahren. Die Untersetzung hat den weiteren Vorteil, dass das Motordrehmoment erhöht wird. Der Motor ist auf der E-Starter Abdeckung fest-



**BILD 6. Darstellung der Stirnradstufe; Strömungspfad über Messrechen und E-Starter Abdeckung; Messrechendarstellung im 1/4-Schnitt**

geschraubt und wird über ein LabVIEW Programm angesteuert.

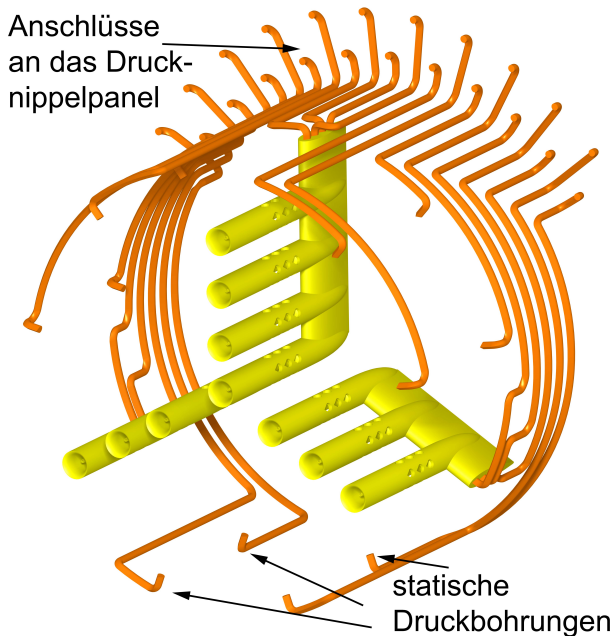
### 3.3. Verlegung der Druckleitungen

Die Verlegung der Druckleitungen ist bei einem traversierbaren Messrechen für eine reibungslose Versuchsdurchführung wichtig. Sie sollte derart gestaltet sein, dass sich die Druckleitungen während des Betriebs nicht verheddern oder an anderen Bauteilen hängen bleiben. Der hier vorgestellte Messrechen wird u. a. aus diesem Grund in einem 3D-Druckverfahren hergestellt. Dadurch können die Druckleitungen in die Messrechengehäusewand integriert werden. Weiterhin können alle Druckleitungen auf ein Druckleitungspanel geführt werden. Dies bietet eine Arbeitserleichterung beim Verschlauchen der Druckmessstellen mit den Druckaufnehmern. Bild 7 zeigt die schematische Verlegung der Druckleitungen im Messrechengehäuse bis zum Drucknippelpanel.

Die Druckleitungen verlaufen über die Kiel-Sonde in ein symmetrisches NACA-Profil weiter innerhalb der Messrechengehäusewand zum Drucknippelpanel. Um das nicht ausgehärtete Pulver aus den Druckleitungen herauszubekommen, besitzen diese einen Durchmesser von 1 mm. Als NACA-Profil wurde ein NACA 0024 gewählt. Dieses Profil bietet bei ausreichendem Platz für maximal vier Druckkanäle noch genügend Stabilität.

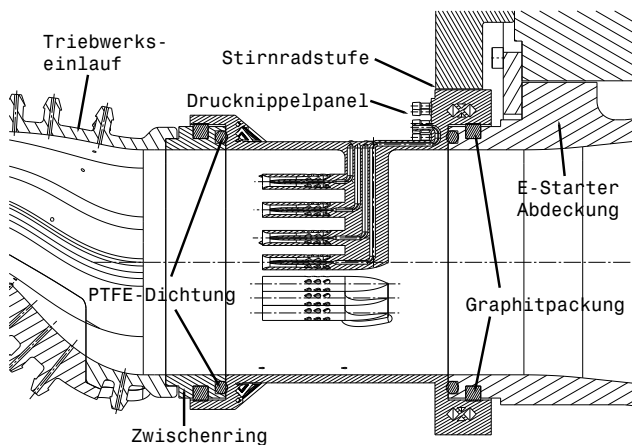
### 3.4. Lagerung und Abdichtung des Messrechens

Um den Messrechen in der KTVA in Betrieb zu nehmen, muss dieser richtig gelagert und gegen etwaige Kriechströmungen aus der Umgebung abgedichtet werden. Als Lagerung können Gleitlager, Kugellager oder wie in diesem Fall eine Graphitpackung zum Einsatz kommen (Bild 8). Die Graphitpackung funktioniert mit einer leichten Spielpassung ohne Fette und Öle. Ein Gleitlager wäre ebenfalls möglich,



**BILD 7. Verlegung der Druckleitungen im Messrechengehäuse**

wäre allerdings eine Sonderanfertigung. Das Kugellager müsste auch sonderangefertigt werden und besitzt den Nachteil des Lagerspiels. Als Dichtung wird an der Stirnseite des Messrechengehäuses eine PTFE-Dichtung verwendet. Diese besitzt gute Gleit- und Dichteigenschaften. Alternativ kann hier auch eine X-Ring Dichtung verwendet werden. Ein O'Ring ist aufgrund seiner Neigung zum Verdrillen während des Traversiervorgangs weniger gut geeignet. Die Dichtwirkung wird dadurch hergestellt, dass die E-Starter Abdeckung und der Triebwerkseinlauf auf Gewindestangen montiert werden und das Messrechengehäuse dazwischen eingebaut wird. Über Muttern kann der Triebwerkseinlauf gegen den Messrechen und die E-Starter Abdeckung geschoben werden. Dadurch wird der Messrechen zwischen Triebwerkseinlauf und E-Starter Abdeckung gespannt.



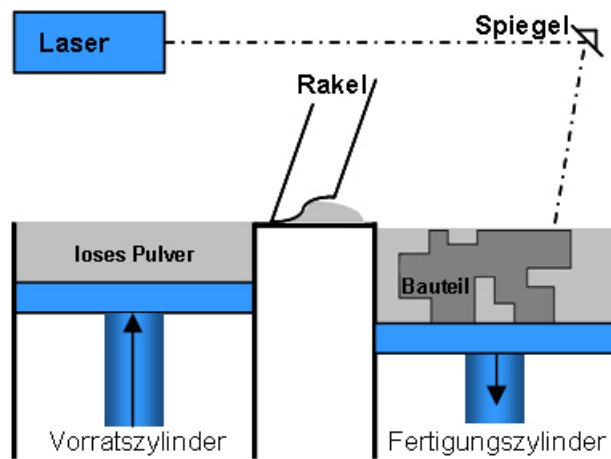
**BILD 8. Schnittbild der Lagerung und Dichtung**

In Bild 8 ist die Lagerung mit der Graphitpackung und die PTFE-Dichtung als Schnittbild dargestellt. Die Lagersitze am Messrechengehäuse sind nach dem 3D-Druck ausgefräst worden. Dies führt zu einer besseren Oberflächengüte und einer exakteren Passung mit der PTFE-Dichtung und der Graphitpackung. Der Zwischenring zwischen Messrechengehäuse und Triebwerkseinlauf dient ebenfalls dazu, eine korrekte Passung herzustellen, da der Triebwerkseinlauf selbst aus Polyamid (PA) gedruckt ist.

**4. FERTIGUNG DES MESSRECHENS**

Die additive Fertigung bietet eine völlig neue Palette von Möglichkeiten für das Produktdesign. Ohne die Einschränkungen herkömmlicher Herstellungsmethoden ist es möglich, neue hochkomplexe Strukturen aus einem Bauteil zu fertigen. Heutzutage ermöglicht diese Art der Fertigung die Herstellung von hochwertigen Metallprodukten aus Materialien, die in der Luft- und Raumfahrtindustrie üblich sind. Da von Bauteilen der Luft- und Raumfahrtindustrie in der Regel höchste Präzision, maximale Festigkeit und lange Produktzyklen gefordert werden, hat sich hier das Verfahren des selektiven Laserschmelzens (SLM) etabliert.

Wie in Bild 9 gezeigt, wird ein Fertigungsprogramm anhand von CAD-Daten Schicht für Schicht generiert. Für jede Schicht werden die einzelnen Laserwege berechnet. Der Prozess geschieht unter einer Schutzgasatmosphäre, um zu verhindern, dass es zu einer Kontamination mit Sauerstoff kommt.



**BILD 9. Schematische Darstellung des SLM-Verfahrens [16]**

- Die Fertigungsschritte sind dabei die folgenden:
- 1) Auf einer Grundplatte wird mit Hilfe einer Rakel (siehe Bild 9) eine dünne Schicht Metallpulver aufgetragen
  - 2) Der Laser bringt das Pulver selektiv zum schmelzen

3) Nach dem Erstarren des Materials wird der Fertigungszyylinder um den Betrag der Schichtdicke abgesenkt und eine neue Pulverschicht aufgetragen. Die Schritte 1 - 4 wiederholen sich solange, bis das fertige Bauteil entnommen werden kann. Der hier vorgestellte Messrechen wird aufgrund der hohen Komplexität des Aufbaus, der vielen innen liegenden Druckkanäle und der dünnen Wandstärken bei den Totaldrucksonden auf einem Trumpf TruPrint 1000 SLM-Drucker hergestellt. Die Schichtdicke betrug dabei 20  $\mu\text{m}$ .

#### 4.1. Material-Spezifikationen

Da sich verschiedene Materialien bei der Herstellung unterschiedlich verhalten und sehr unterschiedliche Herstellungsergebnisse liefern, ist die Auswahl des verwendeten Materials einer der ersten Schritte im Produktdesignprozess der additiven Fertigung. Da die Anwendungen in der Luft- und Raumfahrt eine hohe Materialfestigkeit und lange Produktlebenszyklen ohne Veränderung der Materialeigenschaften erfordern, liegt die Wahl von Metallen gegenüber Polymeren als Konstruktionswerkstoff nahe. Das SLM-Verfahren bietet eine breite Palette von Werkstoffen auf Metallbasis. Für eine Vorauswahl wurden zwei Werkstoffe ausgewählt, die für Niedertemperatur-Luftfahrtanwendungen typisch sind. Es handelt sich hierbei um eine Aluminium-Silizium-Legierung (AlSi10Mg) und eine Titanlegierung (Ti6Al4V). Die vorausgewählten Materialien und ihre Materialeigenschaften sind in Tab. 2 zusammengefasst.

Bei den Material-Spezifikationen ist ebenfalls zu berücksichtigen, dass das nicht ausgehärtete Pulver in den Druckkanälen wieder entfernt werden muss. Wie bei Kern et al. [17] bereits festgestellt wurde, sind die Schüttflusseigenschaften von Aluminiumpulver im Vergleich zu Titanpulver sehr nachteilig. Es ist daher schwieriger, Aluminiumpulver aus den Druckkanälen heraus zu bekommen als Titanpulver. Die Aluminiumpulverkörner neigen dazu, sich untereinander als auch mit der Kanalwand zu verzahnen. Daher ist es sehr unwahrscheinlich, das Aluminiumpulver im Nachhinein vollständig aus den Kanälen zu bekommen. Mit der Wahl von Titan und seiner außerordentlichen Festigkeit ist zu erwarten, dass es bei den Armen im Messrechen zu keinen strukturellen Problemen kommt. Allerdings erzeugen Titanteile während ihrer Herstellung enorme thermische Spannungen, weshalb Materialanhäufungen absolut zu vermeiden sind. Dies wird nachfolgend noch näher erläutert.

Material	Dichte	Genauigkeit	Streckgrenze $R_{P,0,2}$
AlSi10Mg	2,7 $\text{g}/\text{m}^3$	$\pm 100 \mu\text{m}$	230 MPa
Ti6Al4V	4,4 $\text{g}/\text{m}^3$	$\pm 50 \mu\text{m}$	1000 MPa

TAB 2. Vergleich der Materialeigenschaften [17]

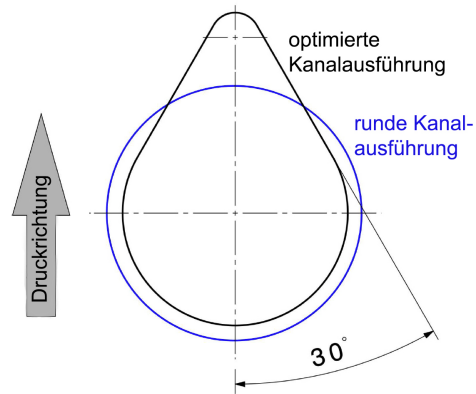


BILD 10. Optimierte Kanalgeometrie [17]

#### 4.2. Konstruktive Besonderheiten

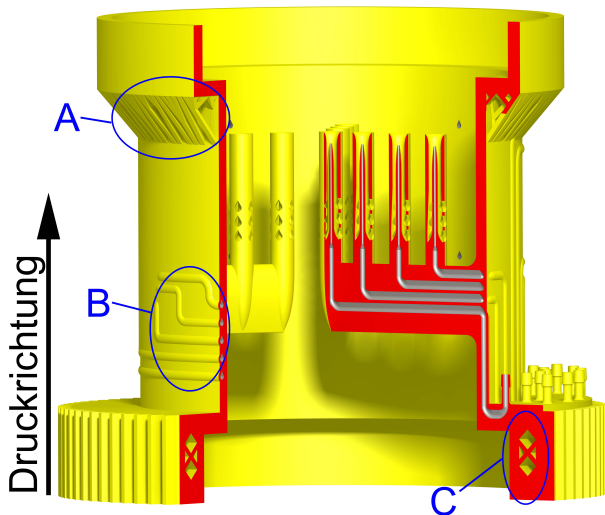
Trotz der nahezu unbegrenzten Möglichkeiten einer Bauteilfertigung durch das SLM-Verfahren gibt es auch bei diesem Verfahren einige konstruktive Dinge zu beachten. So ist es bei diesem Verfahren nicht ohne stützende Support-Strukturen möglich, einen 90° Überhang in das Pulverbett zu drucken. Um dies zu realisieren, wird eine Support-Struktur benötigt. Diese zusätzlich unterstützenden Strukturen müssen aufwendig nach Beendigung des Druckvorgangs entfernt werden. Je mehr Stützstrukturen entfernt werden müssen, desto teurer wird das Bauteil. Die Support-Strukturen beeinflussen dabei auf mehrfache Weise die Kosten: Die benötigte Bauzeit für das Bauteil nimmt zu, der Materialeinsatz ist höher und es entstehen zusätzliche Kosten für die Nachbearbeitung. Daher sollte man sich bereits während der Konstruktion überlegen, in welche Richtung das Bauteil im Drucker später aufgebaut werden soll, um einen Aufbau mit möglichst wenigen Support-Strukturen zu ermöglichen.

Das Problem hierbei sind die horizontal zur Druckrichtung verlaufenden Druckkanäle. Hier würde bei einem kreisrunden Querschnitt die Decke des Kanals einbrechen, was zu einer kleineren Querschnittfläche führen würde und somit das Entfernen des Restpulvers weiter erschwert [17]. Eine Stützstruktur kann hier ebenfalls nicht angebracht werden, da diese im Nachhinein nicht mehr entfernt werden kann. Um dieses Problem zu beheben, wurde die Querschnittsform aller horizontal verlaufender Druckleitungen auf die optimierte Geometrie von Kern et al. [17] wie sie in Bild 10 gezeigt ist, geändert (vgl. auch Bild 11). Diese Nocken- oder Tropfenform besitzt im oberen Teil zwei Flanken, die unter 30° zur Druckrichtung tangential an den Kreis anschließen. Der Radius des kreisförmigen unteren Teils ist reduziert, um die gleiche Gesamtquerschnittsfläche zu erhalten.

Wie bereits erwähnt, generiert Titan während des Druckprozesses enorme thermische Spannungen. Von daher sind unnötige Materialanhäufungen wo immer möglich zu vermeiden. Das SLM-Verfahren kann bis zu einem Winkel von 40° in Druckrichtung



Bauteile ohne Support-Struktur drucken. Dies lässt sich bei der Konstruktion zu nutze machen, um eben diese zu umgehen und Materialanhäufungen zu vermeiden. Hier soll auf einige Designaspekte, wie sie am Messrechen ausgeführt wurden, eingegangen werden. Bild 11 zeigt den Messrechen im 1/4-Schnitt in der Ausrichtung, wie er gedruckt wurde.



**BILD 11. Messrechen im 1/4-Schnitt dargestellt in Druckrichtung**

Um den oberen Lagersitz zu realisieren (Bild 11 A) ist ein  $90^\circ$ -Übergang notwendig. Dieser lässt sich mit Hilfe von Support-Strukturen realisieren oder über einen  $40^\circ$ -Übergang. Support-Strukturen bringen die bereits erwähnten Nachteile mit sich. Ein  $40^\circ$ -Übergang ist zwar prinzipiell druckbar, es hat sich jedoch gezeigt, dass dies durch die entstandene Materialanhäufung am Lagersitz zu Hitzerrissen führt. Um die Materialanhäufung und Stützstrukturen zu vermeiden, sind hier Rippen angeordnet worden, die in ihrer Mitte mehrere Rauten mit  $40^\circ$  Winkeln aufweist. Mit dieser Konstruktion wird eine Materialanhäufung vermieden und es kann auf Stützstrukturen verzichtet werden.

Eine weitere Materialanhäufung entsteht unweigerlich bei der Konstruktion des Messrechengehäuses (Bild 11 B). Dieses war zunächst als Zylinder ausgeführt, dessen Durchmesser durch eine ausreichende Materialstärke der Druckleitungen zur Außenwand vorgegeben war. Um hier die Zylinderwand nicht unnötig stark zu fertigen, wurde bis auf die Stellen, an denen die Druckleitungen verlaufen, überflüssiges Material entfernt. Die Sichtbarkeit der Druckleitungsverläufe an der Außenwand erleichtert zudem etwas die Zuordnung der Messstellen am Druckknippelpanel. Eine weitere Materialanhäufung im Zahnrad konnte durch umlaufende  $40^\circ$ -Rauten vermieden werden (Bild 11 C).

## 5. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Seit einigen Jahren werden am Institut für Strahlantriebe stark gekrümmte Triebwerkseinläufe erforscht. Um hier Aussagen über die Verdichterzuströmung nach einem gekrümmten Triebwerkseinlauf treffen zu können, wird ein Messrechen verwendet. Um diese Zuströmungen zu verbessern kommen u. a. aktive und passive strömungsstabilisierende Maßnahmen zum Einsatz. Um die Vielzahl der dabei auftretenden Parametern experimentell untersuchen zu können und die CFD zu validieren, wird am Institut für Strahlantriebe eine Kleintriebwerksversuchsanlage verwendet. Für diese Kleintriebwerksversuchsanlage (KTVA) wurde ein Messrechen konzeptioniert und konstruiert.

Dabei wurden zunächst die Anforderungen an einen Messrechen für eine KTVA geklärt und der zur Verfügung stehende Bauraum analysiert. Anschließend erfolgte die Bewertung und Auswahl einer geeigneten Druckmesssonde. Weiterhin wurden verschiedene Konzepte zur Sondenanordnung bewertet und analysiert. Ein weiteres Augenmerk galt der Integration des Messrechengehäuses in die bestehende Peripherie der KTVA. Darüber hinaus wurde der 3D-Druck als Fertigungsverfahren festgelegt und die Konstruktion auf dieses Verfahren abgestimmt.

Aus den erarbeiteten Konzepten wurde anschließend ein CAD-Modell entwickelt. Dieses Modell wurde im Speziellen auf das Verfahren des selektive Laserschmelzens hin entworfen.

Mit dem Messrechen wird es möglich sein, die auftretenden Strömungsphänomene in stark gekrümmten Triebwerkseinläufen zu untersuchen. Weiterhin kann die Effektivität von strömungsstabilisierenden Maßnahmen auf die Verdichterzuströmung bewertet werden.

### Kontaktadresse:

[philipp.max@unibw.de](mailto:philipp.max@unibw.de)

### Literatur

- [1] S. WELLBORN, B. REICHERT, and T. OKISHI. An experimental investigation of the flow in a diffusing s-duct. In *28th Joint Propulsion Conference 1992*, page 131. DOI: [10.2514/6.1992-3622](https://doi.org/10.2514/6.1992-3622).
- [2] Ruud Rademakers, Hannes Probst, Tim Schneider, and Reinhard Niehuis. Experimental investigations on a bent engine inlet duct coupled with a turbofan engine. In *AIAA Aerospace Sciences Meeting 2018*, page 2009. DOI: [10.2514/6.2018-1353](https://doi.org/10.2514/6.2018-1353).
- [3] J. W. Hamstra, D. N. Miller, P. P. Truax, B. A. Anderson, and B. J. Wendt. Active inlet flow control technology demonstration. *The Aeronautical Journal*, 104(1040):473–479, 2000.

- [4] M. C. Keerthi, Abhijit Kushari, and Valliammai Somasundaram. Experimental study of suction flow control effectiveness in a serpentine intake. *Journal of Fluids Engineering*, 139(10):2436, 2017. DOI: [10.1115/1.4036827](https://doi.org/10.1115/1.4036827).
- [5] Society of Automotive Engineers. Gas turbine engine inlet flow distortion guidelines. In *Aerospace Recommended Practice 1420, 2002*.
- [6] Society of Automotive Engineers. Inlet total-pressure considerations for gas turbine engines. In *Aerospace Information Report 1419, Rev. B, 2013*.
- [7] R. P.M. Rademakers, J. P. Haug, R. Niehuis, and M. Stöbel. Design and development of a military engine inlet research duct. In *30th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences*, 2016.
- [8] Neal A. Harrison. Active flow control of a boundary layer ingesting serpentine diffuser. In *Masterthesis Virginia Polytechnic Institute 2005*.
- [9] Wolfgang Nitsche and André Brunn. *Strömungsmesstechnik*. VDI-Buch. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2., aktualisierte und bearbeitete auf-lage edition, 2006. ISBN: 978-3540209904. DOI: [10.1007/3-540-32487-9](https://doi.org/10.1007/3-540-32487-9).
- [10] Tony Arts, H. Boerrigter, Mario Carbonaro, J. M. Charbonnier, Gérard Degrez, Domenico Olivari, M. L. Riethmuller, and R. Braembussche. Measurement techniques in fluid dynamics. an introduction, von karman institute for fluid dynamics. *Rhode-Saint-Genese*, pages 43–274, 2001.
- [11] D. W. Bryer and R. C. Pankhurst. *Pressure-probe methods for determining wind speed and flow direction*. National Physical Laboratory. Her Majesty's Stationery Office, London, 1971. ISBN: 978-0114800123.
- [12] Walter R. Russell, William Gracey, William Letko, and Paul G. Fournier. Wind-tunnel investigation of six shielded total-pressure tubes at high angles of attack subsonic speeds. In *National Advisory Committee for Aeronautics, 1951*.
- [13] Albin O. Pearson, Walter R. Russell, and William Gracey. Wind-tunnel investigation of a shielded total-pressure tube at transonic speeds. In *National Advisory Committee for Aeronautics, 1952*.
- [14] G. Kiel. Total-head meter with small sensitivity to yaw. In *Technical Memorandums - National Advisor Committee for Aeronautics, 1935*.
- [15] William Gracey, William Letko, and Walter R. Russell. Wind-tunnel investigation of a number of total-pressure tubes at high angles of attack subsonic speeds. In *National Aeronautics and Space Administration Hampton VA Langley Research Center, 1951*.
- [16] <http://feuerfestkolloquium.de/www/pages/keramik/lasersintern-de.html>; zuletzt geprüft: 19.08.2020.
- [17] Felix Kern, Stefan Bindl, Martin Strasser, and Reinhard Niehuis. Design of an additive manufactured compressor vane with multi-hole pressure probes for the application in a twin-spool turbofan engine. In *52nd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*, page 4508, 2016.