

NEUE BRENNER-GEOMETRIEN FÜR EINE BESSERE VERBRENNUNG DURCH ADDITIVE MANUFACTURING

Nina PAULITSCH¹, Dr. Fabrice GIULIANI¹, DI(FH) Lukas ANDRACHER²,
Daniele COZZI, MSc³, Michael GÖRTLER, MSc

1 Kurzfassung:

Inhalt

Die pulverbettbasierte Fertigung von Metallteilen ist eine neue additive Herstellungstechnik, die es erlaubt, sich bei der Konstruktion von maschinellen Beschränkungen der üblichen Bearbeitungsvorgänge zu befreien. Das zu fertigende Teil muss nicht mehr gedreht, gefräst oder gebohrt werden um die gewünschte Form anzunehmen. Durch additive Fertigung ist es möglich komplexere Geometrien (vor allem auch in den Innenräumen) herzustellen, welche im Vergleich zu den zurzeit herkömmlichen Verfahren nicht fertigbar sind. Darüber hinaus kann das Gewicht als auch die mechanische Belastbarkeit des Bauteiles auf die auftretende Last hin optimiert werden. Zusätzliche Funktionalitäten, wie optimiertes Thermomanagement oder in die Struktur integrierte Kanäle können hergestellt werden.

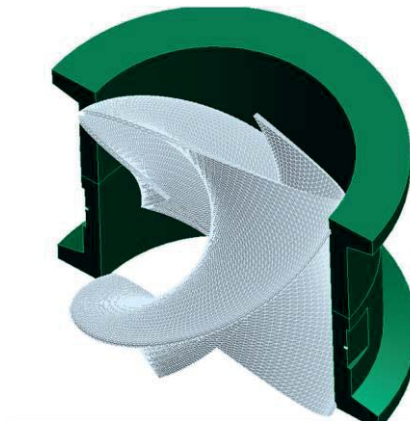


Abb. 1: 3D Konzept des Drallerzeugers

¹ Combustion Bay One e.U, Schützenhofgasse 22, A-8010 Graz, +43 (0)316 22 89 80, nina.paulitsch@cbone.at, fabrice.giuliani@cbone.at, www.cbone.at

² Joanneum Research/Materials, Leonhardstraße 59, A-8010 Graz, +43 (0) 316 876-3308, daniele.cozzi@joanneum.at, michael.görtler@joanneum.at, www.joanneum.at

³ Joanneum Research/Materials, Leonhardstraße 59, A-8010 Graz, +43 (0) 316 876-3308, daniele.cozzi@joanneum.at, michael.görtler@joanneum.at, www.joanneum.at



Abb. 2: Drallstabilisierte, vorgemischte Flamme

1.1 Methodik

Das Konsortium CBOne, JOANNEUM RESEARCH Materials und FH JOANNEUM Aviation möchte ermitteln, in wie fern die Kleinserienfertigung von Premium-Teilen im Bereich Energie- und Antriebstechnik sinnvoll ist. Dabei soll die Anwendbarkeit als auch das Potenzial der additiven Herstellungsmethode SLM-PBF (Selective Laser Melting – Powder Bed Fusion) evaluiert werden.

Bei der Herstellung dieser Teile wird auch ein Vergleich des Kosten- und Arbeitsaufwands zu konventionellen Fertigungsmethoden gezogen. Die Motivation dieses Projektes ist insbesondere die Herstellung eines integrativen, monolithischen Brenners. Der konventionelle Brenner besteht typischerweise aus vier bis zehn Teilen, welche sich aufgrund ihrer unterschiedlichen Materialzusammensetzung und Herstellungsverfahren stets in ihrem thermischen Verhalten unterscheiden. [1], [2]

Die Grundidee ist, einen besseren Brenner mithilfe von additiver Fertigung herzustellen. Folgende Parameter sind dabei zu beachten:

- Gewicht, Volumen, Anzahl an Teilen (alles in ein Teil integrieren soweit wie möglich)
- Herstellung komplexer Strömungswege (Drallerzeugung der Luft, Treibstoffeinspritzung) ohne großen Bedarf an Nachbearbeitung (z.B. Oberflächenbehandlung, Entfernung von Trägerstrukturen)
- Fortgeschrittenes thermisches Management (Nutzung der Flammenwärme mittels Wärmerückführung durch den Brenner um das frische Gemisch vorzuwärmen, und somit die Verbrennungsqualität zu steigern)
- Integrierte Messstellen für Instrumentierungen (Temperatur, Druck).

1.2 Ergebnisse

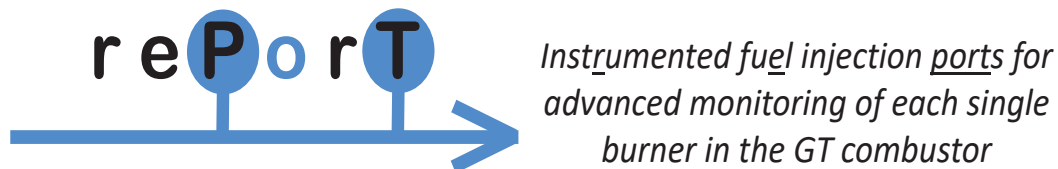
Die Thematik des Projekts bezieht sich auf den Bereich Luftfahrt, jedoch können unsere Technologien und Ergebnisse auch in der Sparte der Industriebrenner angewendet werden. Die neue Form eines effizienten Drallerzeugers wurde konstruiert, mit CFD simuliert, mit

additiver Fertigung aus Inconel 718 hergestellt und letztendlich getestet. Wir berichten über die Frühergebnisse dieses Projekts.

Keywords: Additive Manufacturing, Gasturbinenbrenner, Drallerzeuger, Inconel 718

2 Background / Entwicklung

Die Thematik „Neue Brenner-Geometrien für eine bessere Verbrennung durch Additive Manufacturing“ baut auf dem vorangegangenen Projekt „rePorT“ auf.



„rePorT“ befasste sich mit der integrierten Echtzeitüberwachung der Einspritzung von Luft und Treibstoff in einen Brennraum, welche so nahe wie möglich an der Flamme stattfinden soll. Durch diese Überwachung kann das Verhalten wie auch der Zustand der Flamme in Echtzeit evaluiert und dadurch eine optimale Performance der Verbrennung erzwungen werden.

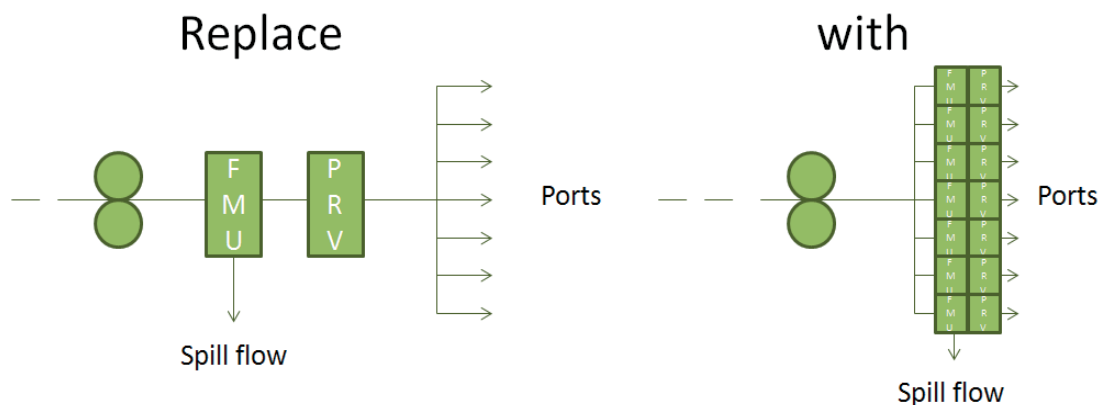


Abb. 3: Konzept des Projekts rePorT

Grundsätzlich soll jeder einzelne Brenner mit spezieller Messtechnik adaptiert werden (Abb.3). Im Bereich des Thermomanagements wird versucht durch Optimierung der Form der Treibstoffzuführung eine Thermostatisierung des Treibstoffs vor der Einspritzung zu erreichen. Dies bewirkt eine wesentliche Verringerung der „Verkokung“ der Einspritzkanäle. Die „Verkokung“ (engl. Coking) führt zu Durchflussblockaden in den Kanälen, wodurch an anderer Stelle mehr Treibstoff eingespritzt wird und sich dadurch Hotspots ausbilden. Die integrierte Messtechnik muss durch ein speziell angepasstes Kühlsystem geschützt werden.

Um diese Problemstellungen lösen zu können, wurde die Herstellungsmethode Additive Manufacturing verwendet. Die Grundidee war das Konzept eines monolithischen Brenners, welcher integrierte Messstellen, ein integriertes Kühlsystem und Thermomanagement aufweist, um eine optimale und effiziente Verbrennung zu gewährleisten.

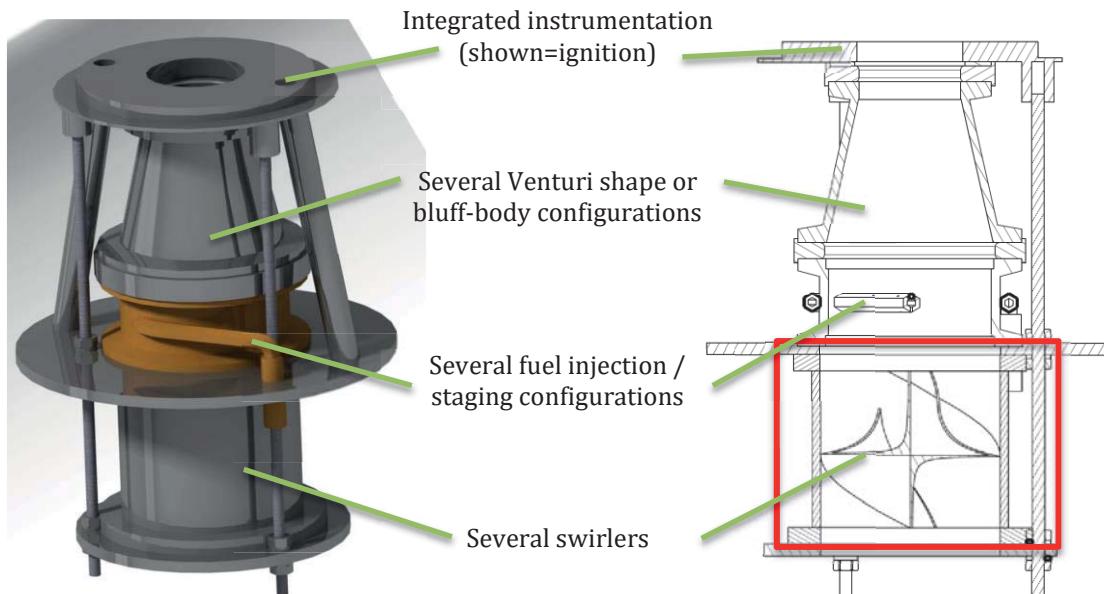


Abb. 4: prinzipieller Aufbau eines Brenners

Die effektive Auslegung und Gestaltung der Geometrie von Gasturbinenbrennern stellt einen wichtigen Grundstein für eine emissionsarme und effiziente Verbrennung. Speziell wird hier im Artikel auf den Nutzen und die Funktion des Drallerzeugers (Abb.4 roter Bereich) eingegangen, und versucht eine neu entwickelte Form und Struktur zu etablieren.

2.1 Funktion des Drallerzeugers in einem Brenner

Die Funktion eines Drallerzeugers besteht darin, die Drallzahl der Strömung im Brenner zu optimieren. Die Drallzahl ist durch Beer und Chigier definiert als das Verhältnis von Tangentialkomponente der Strömungsgeschwindigkeit zur Axialkomponente der Strömungsgeschwindigkeit. [3]

$$\text{Drallzahl } S = \frac{2 \cdot \int_0^{2\pi} \int_0^{r_{\max}} \rho \cdot u \cdot V_{\theta} \cdot r^2 \cdot dr \cdot d\theta}{D \cdot \int_0^{2\pi} \int_0^{r_{\max}} \rho \cdot u^2 \cdot r \cdot dr \cdot d\theta}$$

Im Idealfall wird eine drallstabilisierte Flamme (Abb.2 und Abb.5) mit Drallzahl um 0,6 bei allen Betriebspunkten angestrebt. Befindet sich die Drallzahl S unter 0,4, liegt ein axialer jet-förmiger Strahl vor. Ist die Drallzahl S über 1, bewirkt das eine starke zentrifugierte Strömung. Es wird durch eine drallstabilisierte Flamme das Auftreten von Verbrennungsinstabilitäten verhindert und auch der Verschleiß der Materialien reduziert.

Darüber hinaus wird durch einen optimierten Drallerzeuger eine Steigerung der Turbulenzen ermöglicht, was eine bessere Vormischung von Luft und Treibstoff bewirkt. Dies zieht wiederum eine emissionsärmere und stabilere Performance der Flamme nach sich.

Grundsätzlich unterscheidet man zwischen Axial- und Radialdrallerzeugern.

Der Radialdrallerzeuger erreicht eine höhere Drallzahl bei gleichen Schaufelwinkeln als der Axialdrallerzeuger, erzeugt aber einen wesentlich höheren Druckverlust. Die konventionelle Herstellung des axialen Designs ist einfacher als die Fertigung der radialen Form, jedoch sind beide mit sehr viel Aufwand verbunden. [4]

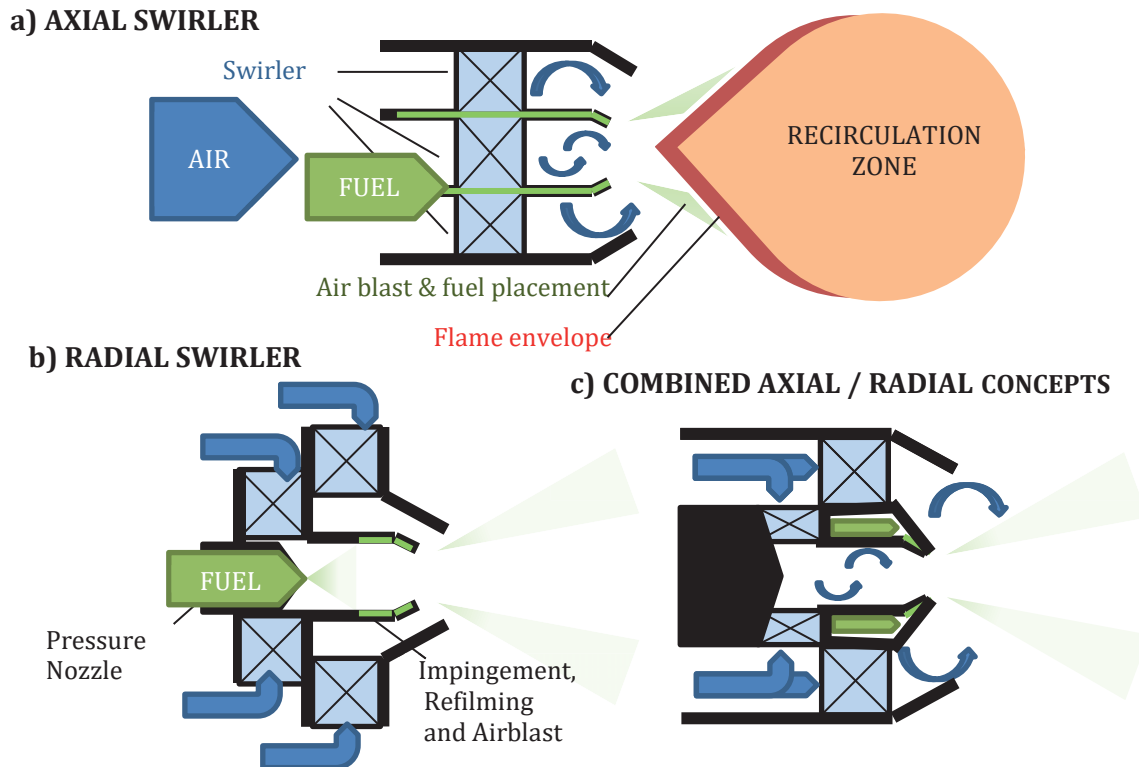


Abb. 5: Wirkungsweise von verschiedenen Drallerzeugertypen

2.2 Neues Drallerzeuger-Design

Die Grundidee lag darin, bereits bestehende mathematisch definierte Flächen und Funktionen, welche durch nur wenige Parameter klar definiert sind, als potenzielle Drallerzeuger-Formen zu verwenden. Grundsätzlich soll mithilfe des neu entwickelten Designs ein besserer Dralleffekt mit gleichzeitig geringerem Druckverlust im Vergleich zu konventionell hergestellten Drallerzeuger-Formen erreicht werden.

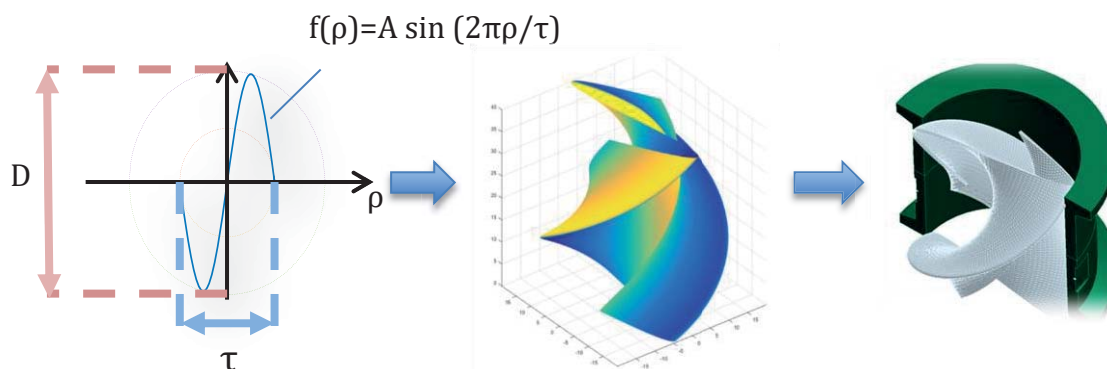


Abb. 6: Generierung des Drallerzeugers von der mathematischen Funktion bis hin zum Volumenkörper

Ausgehend von dieser Idee wurde intuitiv die Sinus-Funktion als potentielles Drallerzeuger-Design gewählt. Sie ist durch zwei Parameter, Amplitude und Periodendauer, definiert und kann durch Variation dieser beiden Eigenschaften viele verschiedene Sinusformen annehmen. Die Sinus-Funktion wurde wie bei herkömmlichen Designs als rechtsgedrehte

Helikoide ausgeführt. Die entstandene Kurve wurde dann im CAD-Programm als Volumenkörper generiert und für Testzwecke in ein Rohr mit KF-Flansch-Verbindung integriert (Abb.6).

Nach der Design-Entwicklung wurde die Parametrisierung der Kurve durchgeführt. Zwei Konfigurationen der Sinus-Funktion wurden entwickelt und hergestellt. Die S1-Konfiguration der Sinusfunktion weist ein Verhältnis von $\frac{A_{ss}}{\tau} = 1$ (Amplitude Spitze/Spitze zu Periode) auf. Die S2-Konfiguration besitzt ein Verhältnis von $\frac{A_{ss}}{\tau} = 2$. [5]

Um einen Vergleich und Referenzwerte für die experimentelle Untersuchung der neu entwickelten Konfigurationen zu bekommen, wurde eine häufig konventionell hergestellte Form des Drallerzeugers im Projekt integriert. Die sogenannte X-Konfiguration (Verhältnis von $\frac{A_{ss}}{\tau} = 0$) wird wie die neuen Formen durch Additive Manufacturing speziell mit der Methode SLM-PBF hergestellt.

Die Drallerzeuger, ob konventionell oder neu entwickelt, weisen alle eine rechtsgedrehte Helikoide mit Steigungswinkel 60° und eine Höhe von 40 mm auf. Darüber hinaus wurden sie auf die annähernd gleichen Werte an Oberfläche, Kantenlänge und Dicke des Grundvolumens definiert.

Ein Teil der Parameteranalyse ist in Tab.1 aufgelistet, der Rest befindet sich in [6].

Benennung	X	S1	S2
Verhältnis A_{pp}/τ	0	1	2
Kurvenlänge [mm]	80	81,5	81,2
Längenverhältnis / X	100%	102%	101%
Schaufeloberfläche [mm ²]	8958	7968	8592
Oberflächenverhältnis / X	100%	89%	96%

Tab. 1: Parameter der Drallerzeuger

3 Herstellung / Produktion der Drallerzeuger

Heutzutage werden im Bereich des Additive Manufacturing unterschiedliche Verfahren für den Druck eines Bauteils angewendet. [7] Die zur Herstellung der Drallerzeuger verwendeten Verfahren waren die Stereolithografie (SLA) und das selektive Laserschmelzen (SLM-PBF).

3.1 Stereolithografie

Bei der Stereolithografie handelt es sich um eine auf einem UV-Laserstrahl basierende Technologie, welche ein Bad aus flüssigem Kunstharz verwendet. Das lichtaushärtende Kunstharz wird mit dem Laserstrahl je nach Form des zu druckenden Bauteils Punkt für Punkt und Schicht für Schicht verfestigt.

Mittels Stereolithografie wurde ein erster Prototyp (Abb. 7) der drei Drallerzeuger auf dem Druckermmodell „Formlabs Form 2“ generiert. Als Material wurde das Kunstharz „Flexible FLFLGR02“ verwendet. Die Schichtdicke betrug pro Lage 0,1 mm.



Abb. 7: gedruckter Drallerzeuger X (links) und Drallerzeuger S2 (rechts)

Ein großer Vorteil der Stereolithografie ist die präzise Druckmöglichkeit und Oberflächenbeschaffenheit der Bauteile. Jedoch ist dieses Verfahren nur für lichtaushärtende Kunstharze ausgelegt, welche im Vergleich zu anderen Werkstoffen sehr filigran sind und kaum Belastungen aushalten.

Für die Anwendung unter nicht reaktiven und kalten Bedingungen konnten diese Prototypen aus Kunstharz verwendet werden und schon gute Einblicke in die Drallverhältnisse liefern.

3.2 SLM – Verfahren (Selective Laser Melting)

Bei dem selektiven Laserschmelz-Verfahren wird der zu verarbeitende Werkstoff in Pulverform in einer dünnen Schicht auf einer Platte aufgebracht. Mittels Laserstrahlung wird dann der Werkstoff lokal aufgeschmolzen und bildet nach dem Erstarren eine feste Materialschicht aus. Die Grundplatte wird dann um die Dicke einer Schicht abgesenkt und erneut Pulver aufgetragen. Dieser Kreislauf wird so oft wiederholt, bis alle Schichten aufgeschmolzen sind bzw. das gewünschte Bauteil fertig ist. [8],[9]

Die drei Drallerzeuger wurden auf dem Gerät Farsoon FS121M mit der Software Farsoon Makestar-M gedruckt. Dieser 3D Drucker arbeitet und druckt unter einer Stickstoffatmosphäre, um Oxidationen zu vermeiden. Die Bauteile wurden aus INCONEL 718 mit einer Schichtdicke von 30 µm hergestellt.

Diese Nickelbasis-Legierung wird für Hochtemperaturbeanspruchungen, wie sie in Brennern vorkommen, verwendet. [10].

Die Dicke aller drei Drallerzeuger-Formen wurde auf 0,7 mm definiert. Die Grenze für die Herstellung einer stabilen Struktur liegt theoretisch unter 0,4 mm. Wenn jedoch eine Nachbearbeitung der Oberfläche notwendig ist, kann eine sehr dünne Wanddicke dadurch zerstört werden (Abb. 8).



Abb. 8: gedruckte Drallerzeuger X, S1, S2 aus Inconel 718

3.3 Nachbearbeitung

Ein wichtiger Aspekt der Fertigungsqualität ist die Beschaffenheit der Oberfläche. Diese ist hauptsächlich von der Bauteilgeometrie, genauer gesagt, vom Winkel der Flächennormalen zur Bauplattformebene abhängig. Je nach Winkellage verändert sich die Oberflächenrauigkeit. Die Oberfläche der additiv gefertigten Drallerzeuger verhält sich in bzw. gegen Fertigungsrichtung variabel. Es wurde eine bessere Qualität der Oberfläche gegen Fertigungsrichtung entdeckt als in Fertigungsrichtung.

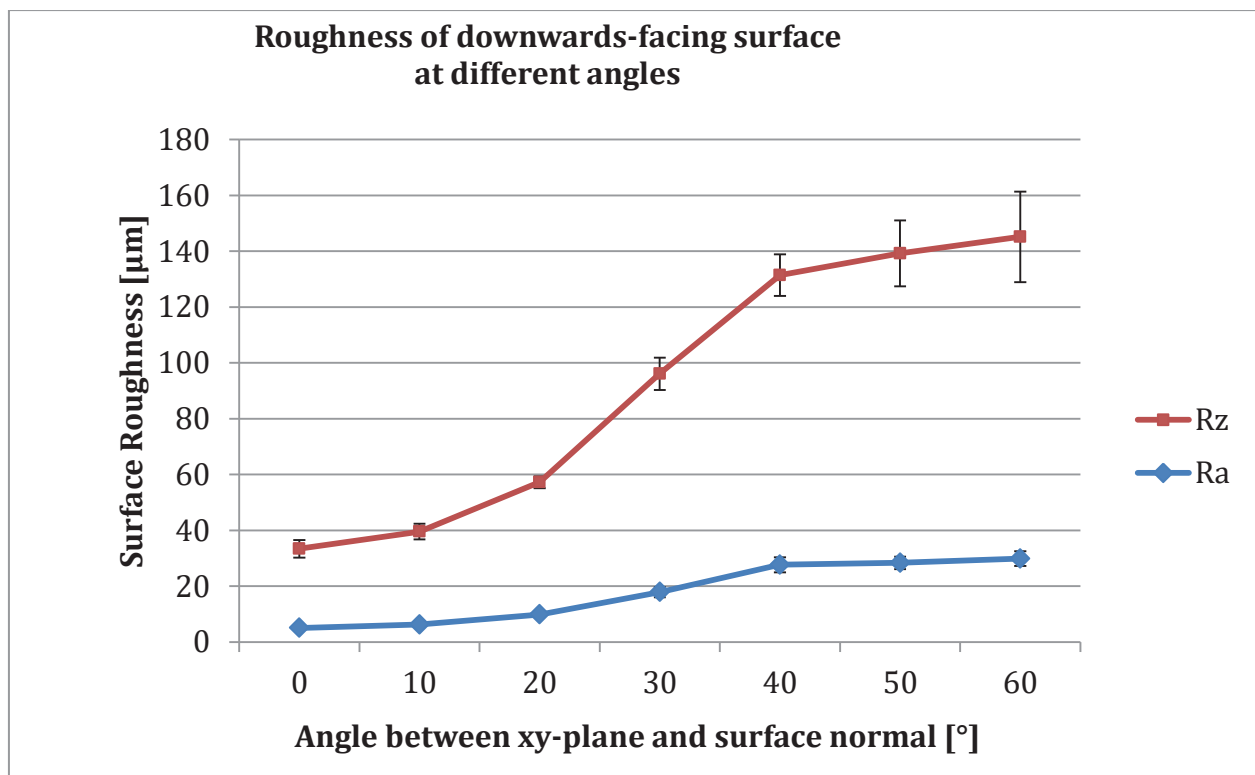


Abb. 9: Winkelabhängigkeit der Oberflächenrauigkeit

Ein Winkel von 0° zur Vertikalen weist eine sehr gute Oberflächenbeschaffenheit, vergleichbar mit einem geschichteten Bauteil, auf. Je größer der Winkel zur Vertikalen wird desto geringer wird die Qualität der Oberfläche (Abb. 9).

Durch die hohe Oberflächenrauigkeit der SLM-gefertigten Prototypen treten Strömungsstörungen auf bzw. der Druckverlust wird erhöht, wodurch die Verbrennung nicht optimal abläuft. Darüber hinaus wird auch die Problematik der „Verkokung“ (engl. Coking) durch die Oberflächenqualität beeinflusst.

Die Oberflächennachbearbeitung gestaltet sich je nach Geometrie des Bauteils unterschiedlich. Sind leicht zugängliche Stellen und keine Leervolumen vorhanden, kann die Oberfläche beispielsweise durch Sandstrahlen verbessert werden. Für komplexere Formen könnten abrasive Flüssigkeiten verwendet werden, welche auch aus Hohlräumen rückstandslos beseitigt werden können.

4 Testverfahren und Ergebnisse

4.1 Testaufbau und Strömungsbedingungen

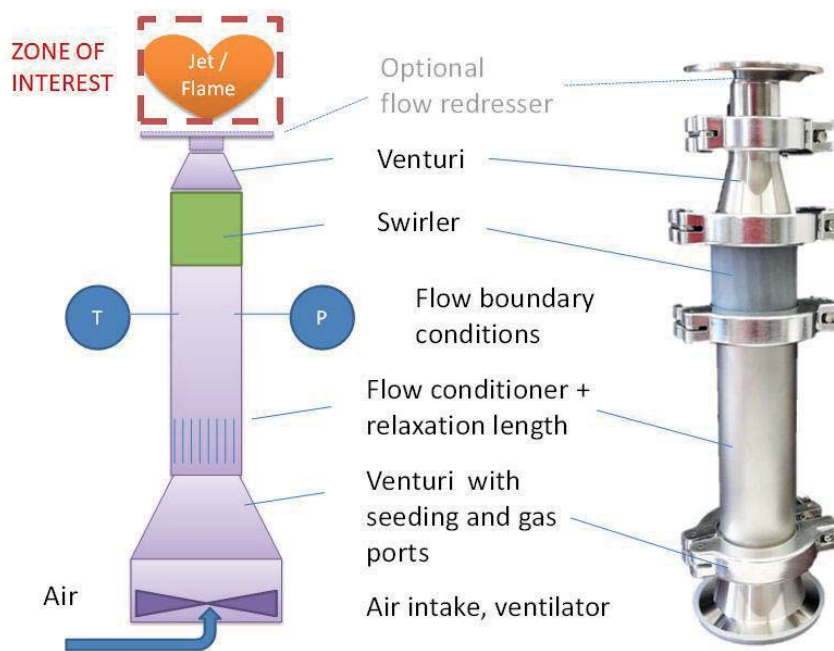


Abb. 10: Testkonfiguration

Die Durchführung des Testaufbaus verlief wie in Abb.10 dargestellt. Die miteinander zu vergleichenden Drallerzeuger wurden nacheinander in diesem Aufbau getestet.

Die eintretende Luftströmung wurde mittels Ventilator mit einer elektrischen Leistung von 1 kW und einem Massenstrom von 60 g/s generiert und durch ein Venturi-Rohr, welches mit „rePorT“-Messstellen adaptiert ist, beschleunigt. Um die Ausbildung einer gleichmäßigen Strömungsfront zu ermöglichen, wurde ein Rohrstück zwischen Drallerzeuger und Eintritt integriert. Nach dem Drallerzeuger wurde die Strömung nochmals durch ein Venturi-Rohr

beschleunigt und optional mit einem Gitter beruhigt, um die Gefahr einer Rückzündung zu verringern.

Bei den experimentellen Vermessungen wurde der statische Druckverlust über den Drallerzeuger durch die Instrumentierung aus dem Projekt „rePorT“ ermittelt. Ein wichtiger Faktor für die Strömungsverluste ist die Durchflussrichtung, in oder gegen die Fertigungsrichtung des additiv hergestellten Bauteils. Hierzu wurde jeweils eine Messung in Fertigungsrichtung und eine gegen die Fertigungsrichtung durchgeführt. Die Ergebnisse wurden in Tab.2 dargestellt.

4.2 Ergebnisse der CFD

CFD bezeichnet die Abkürzung Computational Fluid Dynamics und ist eine computer-numerische Methode zur Analyse der Strömungsmechanik. Dieses Analyseverfahren beinhaltet mehrere Modelle, welche abgestimmt auf die Testbedingungen ausgewählt werden.

Die numerische Simulation der drei Drallerzeuger wurde mit dem Programm Ansys 15 CFX durchgeführt. Das zu Grunde liegende Verfahren ist die FVM (Finite Volumen Methode), welche um die 1,2 Millionen Volumenelemente zur Diskretisierung des Drallerzeugers und 2,2 Millionen Volumenelemente für das restliche, zu testende Areal verwendet.

Als Modell wurde das $k-\varepsilon$ Turbulenzmodell und als Lösungsmethode RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes Gleichung) gewählt. Die Bedingungen wurden auf trockene Luft und nicht-reaktive Strömung definiert.

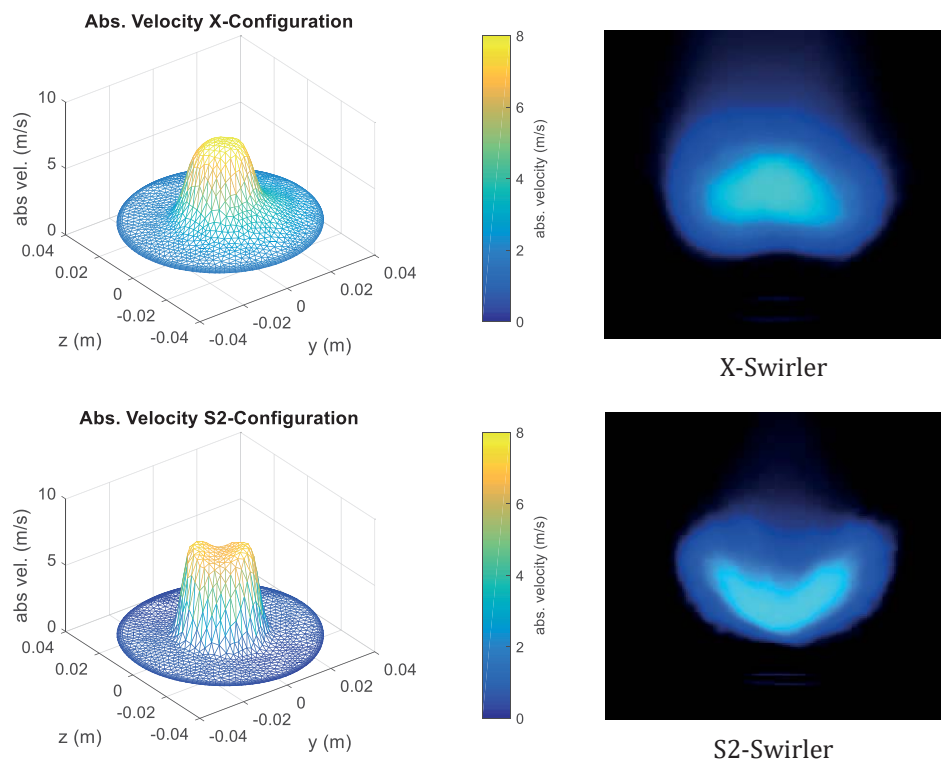


Abb. 11: CFD - 3 dimensionale Darstellung der Strömungsgeschwindigkeit

Wie in Abb.11 dargestellt, weisen die beiden Drallerzeuger Unterschiede in der Form der Flamme auf. Die Flamme der S2-Konfiguration wird in eine V-Form gezwungen und verbreitert. Um den Drall-Effekt grafisch darzustellen, wurden die Axial- und Tangentialgeschwindigkeiten separat ermittelt. Der X-Drallerzeuger weist eine starke Axialsymmetrie auf. Im Gegensatz dazu besitzt der S2-Drallerzeuger eine elliptische Querschnittsfläche in Axialrichtung mit einer größeren Expansion.

Die Tangentialgeschwindigkeitsdarstellung der Konfiguration S2 folgt deutlich der S-Form, die einen guten, am ganzen Umfang verteilten, Drall erzeugt. Auffällig ist die enorme Ausbreitung der Flamme im Vergleich zur X-Form. In der CFD-Auswertung wird die Ausbildung einer Rezirkulationszone bei der S2-Form gut ersichtlich. Die X-Form weist dahingehend keine Rezirkulationszone aber eine jet-ähnliche Ausbreitung in axialer Richtung auf (Abb. 12).

Die in Tab.2 angeführten Werte beinhalten die Druckverlustverhältnisse wie auch die Strömungswiderstandsbeiwerte der einzelnen gedruckten Drallerzeuger. Die Unterscheidung zwischen GLATT und RAU definiert die Oberflächenbeschaffenheit bzw. auch die Durchströmungsrichtung der Drallerzeuger. GLATT kennzeichnet eine Durchströmung gegen die Fertigungsrichtung und RAU eine Durchströmung in Fertigungsrichtung des Drallerzeugers.

Die S2-Geometrie besitzt mit 0,4 die höchste Drallzahl der drei Drallerzeuger. Zusätzlich dazu liegt ein geringerer Druckverlust im Vergleich zur konventionellen X-Form vor.

Durch die mittels Stereolithographie hergestellten Prototypen wird ersichtlich, dass durch eine Nachbearbeitung und Verbesserung der Oberfläche der Metalldruck-Prototypen eine Senkung des Druckverlusts um 0,5 Prozent möglich wäre.

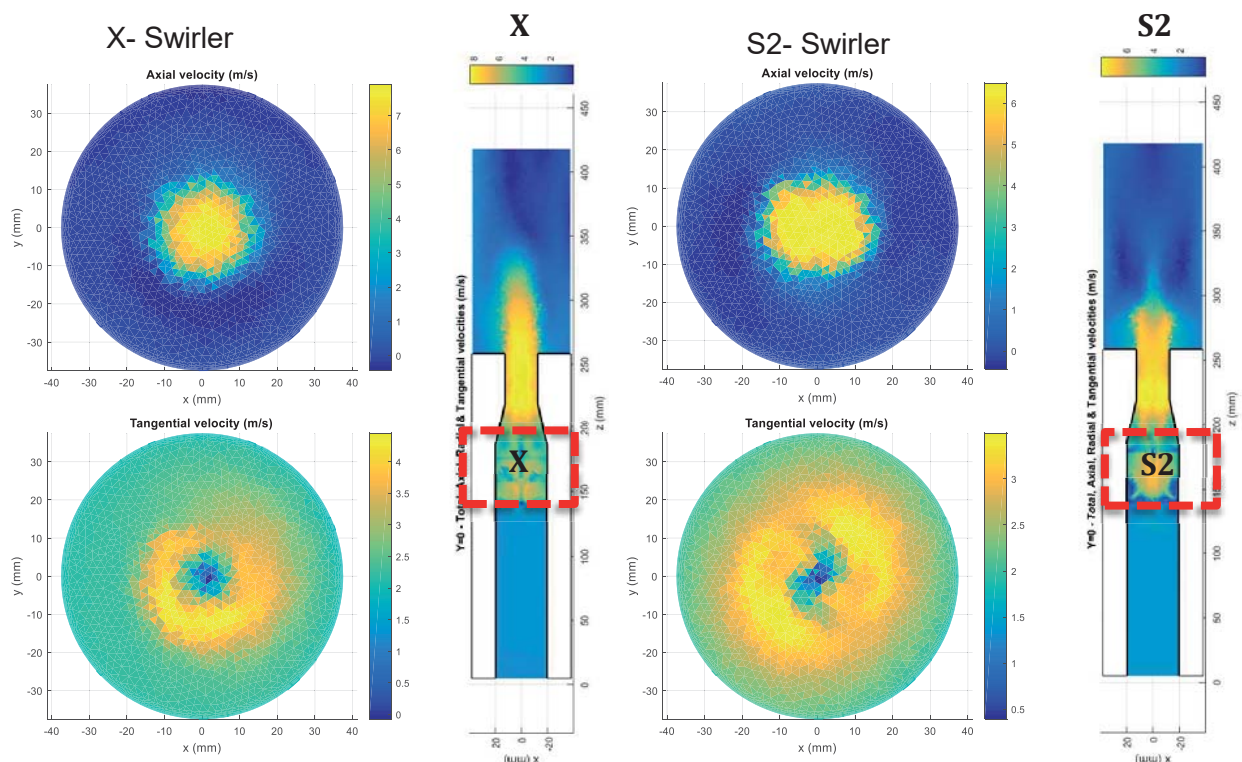


Abb. 12: Axial-, Tangential- und Totalgeschwindigkeit der Drallerzeuger X und S2

Seite	$\Delta P/P$ [%]		C_d [-]	
	GLATT	RAU	GLATT	RAU
X Kunstharz	1,84%	2,09%	1,98	2,16
S2 Kunstharz	1,72%	1,82%	1,84	1,92
X Inconel 718	2,12%	2,36%	2,55	2,9
S1 Inconel 718	1,78%	2,12%	2,09	2,55
S2 Inconel 718	2,04%	2,21%	2,31	2,84

	X	S1	S2
Drallzahl	0,37	0,35	0,40

Tab.2: Ergebnisse Druckverlust, Strömungswiderstandsbeiwert und Drallzahl

5 Conclusio

Das Projekt spiegelt repräsentativ die Thematik der Brenneroptimierung wider und welche positiven Aspekte dadurch erzeugt werden. Die neu entwickelte S2-Konfiguration des Drallerzeugers stellt eine gute Alternative zu den konventionellen Formen dar. Im Vergleich zum herkömmlichen Design konnte ein besserer Drall-Effekt mit geringerem Druckverlust erzielt werden. Darüber hinaus konnte eine bessere Performance in der Umgebung der mageren Löschgrenze durch die S2-Konfiguration erreicht werden (Abb. 13).

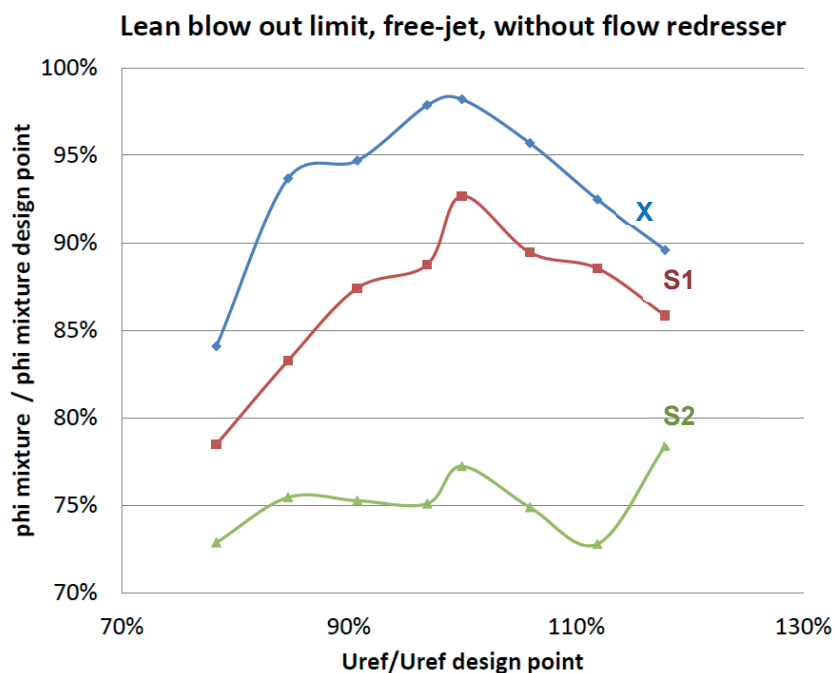


Abb. 13: Performance bei magerer Löschgrenze (LBO)

Das SLM-Verfahren eignet sich gut für die Produktion von komplexen Applikationen. SLM erlaubt es, die „rePorT“ Messtechnik sehr nahe zur Flamme zu bringen und dadurch eine Echtzeitüberwachung der Verbrennung durchzuführen. Die Integration der Messinstrumente ist möglich, solange ein darauf abgestimmtes Thermomanagement passiert.

Der erste Schritt in Richtung optimierter, integrativer, monolithischer Brenner konnte erfolgreich getan werden. In weiterer Folge wird jetzt auf die Verbesserung der Einspritzung in den Brennraum eingegangen. [12]

6 Danksagung

Der Dank gilt der FFG (Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft) und dem BMVIT (Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie), die im Rahmen des „TAKE-OFF“ Programms das Projekt „rePorT“ (Vertragsnr. 850454) wie auch die Machbarkeitsstudie zum Thema additive Fertigung von Brennnerteilen (Vertragsnr. 862837) unterstützt und finanziert haben.

Ein weiteres Dankeschön für die gute Zusammenarbeit im Konsortium.

7 Referenzen:

- [1] Lefebvre, A. H., 1999. Gas Turbine Combustion – Second Edition. Combustion: An International Series. Taylor & Francis.
- [2] Lieuwen, T. C., and Yang, V., 2013. Gas turbine emissions, Vol. 38 of Cambridge Aerospace Series. Cambridge University Press.
- [3] Beèr, J., and Chigier, N., 1972. „Combustion Aerodynamics“ . London, pp. 100–146.
- [4] Lang, A., 2007. „Konstruktion eines Brennkammer-Prüfstandes und Messungen unter mittlerem Druck“, Graz
- [5] Bronshtein, I., Semendyayev, K., Musiol, G., and Mühlig, H., 2015. Handbook of Mathematics. Springer Berlin Heidelberg.
- [6] Giuliani, F., Paulitsch, N., Cozzi, D., Görtler, M., Andracher, L., 2017. „An assessment on the benefits of additive manufacturing regarding new swirler geometries for gas turbine burners“. Paper GT2018-75165
- [7] Navrotsky, V., Graichen, A., and Brodin, H., 2015. “Industrialisation of 3d printing (additive manufacturing) for gas turbine components repair and manufacturing”. VGB PowerTech, 12, pp. 48 -52.
- [8] Siemens Industrial Turbomachinery AB, 2014. Using AM for gas turbine repair.
- [9] Kistler, N. A., 2015. „Characterization of inconel 718 fabricated through powder bed fusion additive manufacturing“. PhD thesis, Bachelor's Thesis, The Pennsylvania State University, University Park, PA, USA.
- [10] Soller, S., Barata, A., Beyer, S., Dahlhaus, A., Guichard, D., Humbert, E., Kretschmer, J., and Zeiss, W., 2016. “Selective laser melting (SLM) of Inconel 718 and stainless steel injectors for liquid rocket engines”. In Space Propulsion Conference 2016, Rome, Italy. SPC2016-312478.
- [11] Boehler Edelstahl, 2017. Additive manufacturing powder AMPO L718.
- [12] Giuliani, F., Diers, O., Gajan, P., and Ledoux, M., 2002. “Characterization of an air-blast injection device with forced periodic entries”. In Pollard A., Candel S. (eds) IUTAM Symposium on Turbulent Mixing and Combustion. Fluid Mechanics and Its Applications, vol 70. Springer, Dordrecht, pp. 327–336.