UNTERSUCHUNGEN ZUR DURCHSTRÖMBARKEIT VON PORÖSEN MEDIEN MIT PARTIKELHALTIGEN GASEN

F. Strauss, N. Gaiser, B. Wirth, A. Gernoth, S. Schlechtriem

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)
Institut für Raumfahrtantriebe, 74239 Hardthausen, Deutschland

Zusammenfassung (Abstract)

Das Verfahren der Transpirationskühlung mit einem Ausströmen des Kühlfluids durch poröse Medien gewinnt im Bereich thermisch hoch belasteter Triebwerke, wie z.B. bei Staustrahltriebwerken und Raketenantrieben, zunehmend an Bedeutung. Ein wichtiger Aspekt liegt hierbei auf der Beschreibung der strömungstechnischen Eigenschaften und der Visualisierung der Grenzschichtströmung im Bereich der Einblasung. Das DLR Lampoldshausen plant Strömungsuntersuchungen in einem SCRamjet-Forschungskanal mit Grenzschichtverbrennung. Aufgrund der hohen thermischen Belastung und der potentiellen Strömungsbeeinflussung durch Messsonden bedarf es in diesem Fall berührungsloser Messverfahren. Für diese Untersuchungen sollen daher optische Messmethoden wie z.B. das Particle Image Velocimetry (PIV)-Verfahren zur Visualisierung der Kühlmitteleinblasung und ihrer Interaktion mit der Hauptströmung zum Einsatz kommen. Dieses Verfahren beruht auf der Beigabe von Streupartikeln (sog. Tracern) in die zu untersuchende Fluidströmung. Daher ist in Experimenten zu untersuchen, unter welchen Bedingungen Tracer-Partikel das poröse Medium zusammen mit dem Kühlfluid passieren können und welche Parameter Einfluss auf die Durchströmbarkeit haben. Das DLR Lampoldshausen stellt hierzu einen messtechnischen Aufbau zur Untersuchung der Durchlässigkeit im Hinblick auf die Partikelgröße im Verhältnis zu strömungsphysikalischen Größen des porösen Mediums vor. Zusätzlich werden wichtige Einflussfaktoren auf die Durchströmung mit partikelhaltigen Gasen erkannt und zukünftiger Forschungsbedarf konkretisiert.

1. EINLEITUNG

In vielen technischen Bereichen kommen poröse Medien zum Einsatz (vgl. [1]). Sie finden eine breite Anwendung als Filtermedien für Fluide oder Gase, als Strömungsgleichrichter und –beruhiger, in der Verfahrens-technik oder der chemischen Industrie.

Im Bereich der Luft- und Raumfahrtantriebe werden diese Materialien in erster Linie zur Realisierung von speziellen Kühlsystemen verwendet. Die porenartige Struktur ermöglicht ein gleichförmiges und großflächiges Ausströmen von Kühlmittel. Diese Methode findet vor allem in der Transpirationskühlung bzw. Effusionskühlung ihre Anwendung (vgl. [2], [3], [4], [5]).

Zur Auslegung der Transpirationskühlsysteme sind die strömungstechnischen Parameter erforderlich. Diese beschreiben die strömungstechnischen und wärme-übergangstechnischen Vorgänge im und beim Austritt aus dem Material. Die Auslegung der wärmetechnischen Parameter bei der Anwendung in SCRamjet-Kammern erfordert die Beschreibung der Vorgänge im Grenzschichtbereich. Zur Untersuchung dieser Vorgänge bieten sich optische Messverfahren wie z.B. Particle Image Velocimetry (PIV) an. Dies erfordert die Beigabe sogenannter Tracer (Streupartikel) zur Strömung.

Diese Tracer müssen vor Passieren des porösen Mediums zugesetzt werden. Dies ermöglicht die Auflösung des gesamten Strömungsfelds in Wandnähe. Gerade bei Feststoff-Tracern, wie z.B. Titandioxid, stellt sich die Problematik vom schlagartigen oder mit der Zeit zunehmenden Verstopfen der porösen Wand ein.

Vor diesem Hintergrund wurde zur Untersuchung der notwendigen Parameter zur Beurteilung der Tracer-fähigkeit von porösen Materialen vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR e.V.) am Institut für Raumfahrtantriebe in Lampoldshausen ein Versuchsstand entwickelt.

2. VERSUCHSAUFBAU

Der Versuchsaufbau (siehe Bild 1) besteht aus einer 3-achsige Positionierungseinheit (*CNC-Step High-Z S-720*). An dieser Verfahreinheit ist eine Aufnahme für eine Mehrlochströmungsmesssonde angebracht (*Aeroprobe 5-hole straight 1,6 mm*). Dies ermöglicht eine Positionier-genauigkeit der Sonde auf der Oberfläche von 0,01 mm. Der Gesamtdruck an jeder Messbohrung der Mehrloch-strömungsmesssonde wird dabei von jeweils einem Differenzdrucksensor (*ALTHEN DPSAZ +- 50 mbar mit*

automatischer Nullpunktanpassung) gemessen und mit dem statischen Umgebungsdruck verglichen (Kennlinienabweichung < ± 0,2% v. Endwert).

Unterhalb der Verfahreinheit ist ein Durchströmtester positioniert. Dieser besteht aus einem an beiden Enden geschlossenem, zylindrischem Plenum (Durchmesser 150 mm, Wandstärke 15 mm) als Beruhigungskammer und Reservoir sowie einer quadratischen Ausströmöffnung im oberen Deckel mit einer Kantenlänge von 45 mm. Dieser Durchströmtester ermöglicht die experimentelle Untersuchung von 5 bzw. 10 mm dicken Materialproben. Als poröse Medien kommen Platten aus gesintertem Edelstahl verschiedener Korngrößen der Firma GKN Sinter Metals zum Einsatz (Sika-R, *http://www.gkn-filters.de/products_de/index.html*). Ihre Dicke betrug jeweils 5 mm. 10 mm dicke Materialproben wurden durch Übereinanderlegen zweier 5 mm-Platten erzeugt. Die genauen Typenbezeichnungen und spezifischen Parameter sind dem Abschnitt 3 *Methodik und Ergebnisse* zu entnehmen.

Innerhalb des Plenums wird sowohl der Absolutdruck (Absolutdrucksensor *ALTHEN HPSA-ACVAA-5A-2M 0-5 bar*) als auch die Temperatur (Thermoelement *Typ K*) bestimmt. Die Messung des Umgebungsdrucks erfolgt mit einem weiteren Absolutdrucksensor (*ALTHEN HPSA-ACVAA-5A-2M 0-5 bar*). Der Massenstrom wurde durch ein Coriolis-Messgerät (*Micro Motion ELITE CMF010M*) direkt in der Medienzuleitung zum Plenum gemessen.

Die Steuerung der Verfahreinheit erfolgt über eine Schrittmotorsteuerung (*CNC-Step Zero 2*) und einer Software zur Werte- bzw. Wegvorgabe (*WinPC-NC Professional*[1]). Die Erfassung und Auswertung der Messdaten aus den Sensoren erfolgt mit einem Programm basierend auf *LabVIEW 8.5*[2] mit einer Datenerfassungshardware *PCI-6031E* und einer Auflösung von 16bit. Die Auswertung der Druckdaten aus den Differenzdrucksensoren sowie die Umrechnung in Strömungsgeschwindigkeiten und -winkel erfolgt durch die Software *AeroFlow*[3] des Sondenherstellers *Aeroprobe*.

Es wurden diskrete Punkte sowie zeitlich vorgegebene Pfade untersucht. Beim Abfahren vorgegebener Pfade wurde der zeitgleiche Start der Messwertaufnahme und der Messfahrt durch einen Trigger sichergestellt. Ein Auslesen der Maschinenposition erfolgte relativ zu magnetischen Referenzschaltern.

Für die Versuche ohne Tracer-Partikel wurde als Medium trockene Druckluft mit einem Vordruck von 7,0 bar verwendet. Durch die Verwendung von Wasserabscheidern wurde die Feuchtigkeit der Druckluft gering gehalten. Der Einfluss hoher Feuchtigkeit auf die Messdaten (Massenstrom, Geschwindigkeiten) wurde so unterbunden.

Für Versuche mit Tracer-Partikeln kam trockener Stickstoff 5.0 zum Einsatz. Die Partikel wurden der Strömung mit Hilfe eines Fluidized-Bed-Seeders (siehe [7]) zugesetzt.

[1] *WinPC-NC Professional* Version 2.1, Burkhard Lewetz Hardware-Software, Meckenbeuren, DE

[2] *LabVIEW* Version 8.5, National Instruments, Austin (TX), USA

[3] *AeroFlow* Version 2.0.0, Aeroprobe Corporation, Blacksburg (VA), USA

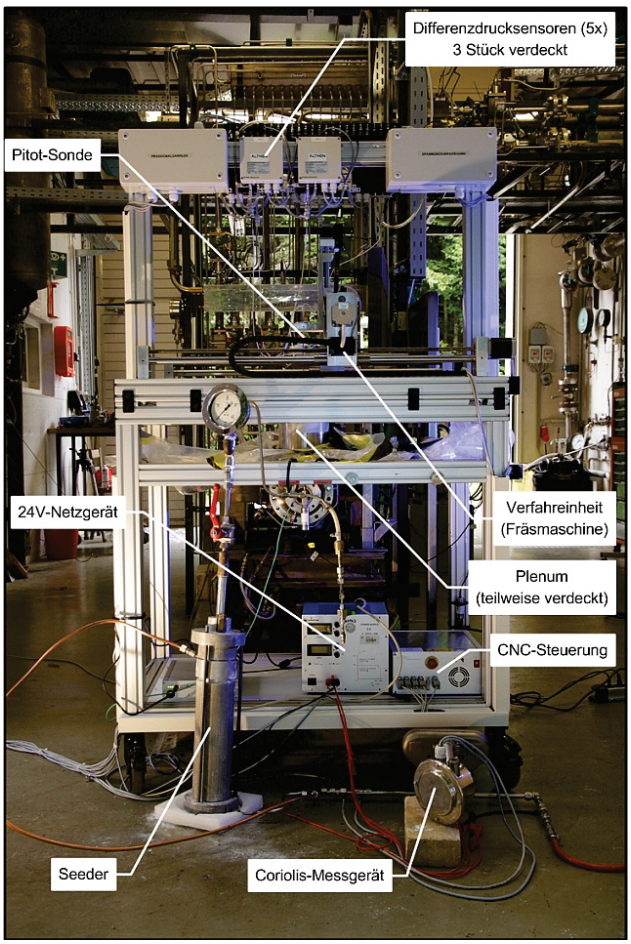

BILD 1. Versuchsaufbau (mit Seeder)

3. METHODIK UND ERGEBNISSE

3.1. Versuche ohne Partikel

Zuerst wurde in einer Versuchsreihe die optimale Sondenhöhe über dem Material bestimmt. Dazu wurden statische Messungen in 40 mm, 30 mm, 20 mm, 10 mm, 5 mm, 2 mm, 1 mm und 0,5 mm über der Probe durchgeführt. Die Sonde stand dabei über dem Mittelpunkt des Materials und wurde seitlich nicht verfahren. In dieser Versuchsreihe stellte sich heraus, dass ein Abstand von 0,5 mm am geeignetsten für die geplanten Messungen ist. Bei diesem Abstand war das Signal- zu Rauschverhältnis optimal. Zusätzlich wurde der ideale Versorgungsdruck für die Messungen ermittelt. Bei einem Versorgungsdruck von 7,0 bar war das Ausströmen aus der porösen Probe über alle Typen hinweg stark genug, um ein Messsignal mit hoher Genauigkeit zu erzielen. Dabei variiert der Druck im Plenum je nach verwendetem Material. Dieser Einfluss wird aufgrund des integrierten Absolutdruck-Sensors berücksichtigt.

Als weiterer Schritt erfolgte zur Bestimmung der Reproduzierbarkeit das Abfahren einfacher, gerader Linienstrecken mit 20 mm Länge. Hierdurch werden ebenfalls einzelne Poren im Material visualisiert. Dieser Schritt wurde erweitert durch das Abfahren paralleler Linien von 20 bzw. 30 mm Länge im Abstand von 1 mm mit einer Geschwindigkeit von 0,1 mm/s. Dadurch wurden entsprechende Felder auf der Oberfläche erfasst (siehe Bild 7). Die Bestimmung der Porosität basiert auf

unterschiedlichen Größen der Felder (40x40 mm, 30x30 mm, 20x20 mm, 10x10 mm). Dies ermöglichte die Beurteilung der Messfeldgröße auf die Porositätswerte. Eine Messfeldgröße von 30x30 mm zeigte hierbei den besten Kompromiss zwischen Messzeit und Genauigkeit.

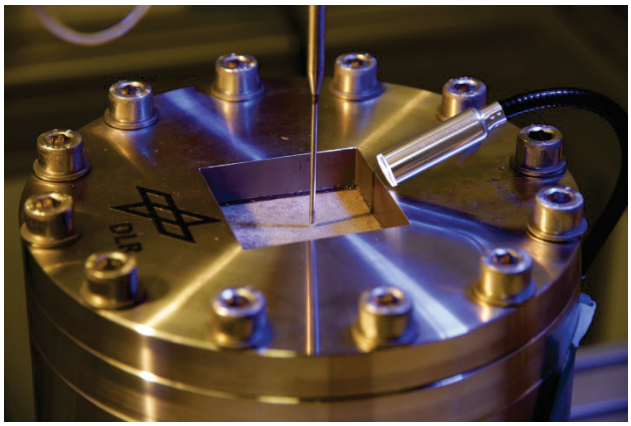

BILD 2. Der Durchströmtester mit Pitot-Sonde

Bei dem Material Sika-R handelt es sich um Edelstahl-Sinter. Dieser besitzt gegenüber dem bekannteren Bronze-Sinter Sika-B (siehe Bild 4) eine deutlich unterschiedliche Mikrostruktur mit wesentlich feineren Poren, da durch die höheren Temperaturen während des Herstellungsprozesses die Kugelstruktur aufgelöst wird (siehe Bild 5). Dadurch ergibt sich ein wesentlich feinerer Abscheidungsgrad des Sika-R (siehe Tabelle 2) und die Durchströmbarkeit ist gegenüber Sika-B geringer. Gleichzeitig lassen sich mit Sika-R jedoch wesentlich kleinere Abscheidegrade realisieren (siehe Bild 6). Zu beachten ist, dass die Abscheidegrade gemäß ASTM F 795 für Flüssigkeiten angegeben werden und für Gase etwa um den Faktor 10 feiner sind (siehe [6]).

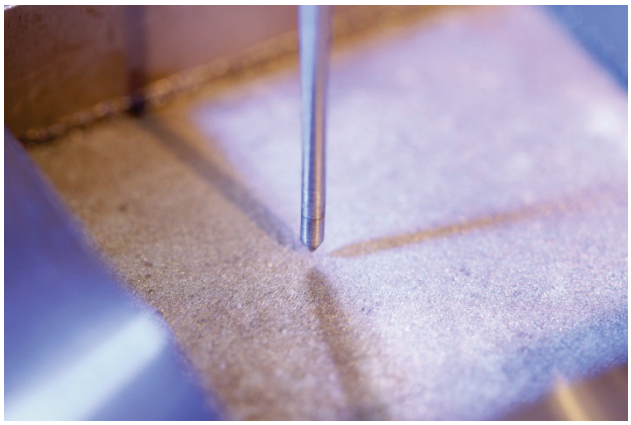

BILD 3. Sondenposition während einer Messung ohne Partikel

Material	Permeabilitäts-koeffizient α [10^{-12} m^2]	Permeabilitäts-koeffizient β [10^{-7} m]
Sika-R 1	0,13	0,6
Sika-R 5	0,8	2,0
Sika-R 10	3,9	24
Sika-R 20	8,3	22
Sika-R 150	117	53
Sika-B 150	248	643

TAB 1. Permeabilitätskoeffizienten von Sika-R / Sika-B nach DIN ISO 4022 (aus [6])

Material	Trenngrad $x_{(T=98\%\ absolute)}$ [µm] (für Flüssigkeiten)
Sika-R 1	1,9
Sika-R 5	6,8
Sika-R 10	9,0
Sika-R 20	26
Sika-R 150	110
Sika-B 150	260

TAB 2. Trenngrade von Sika-R / Sika-B nach ASTM F 795 (aus [6])

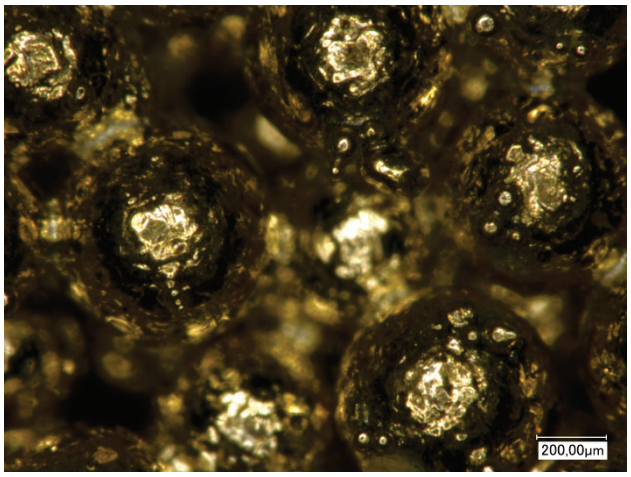

BILD 4. Struktur von Sika-B 150 (Vergrößerung 200x)

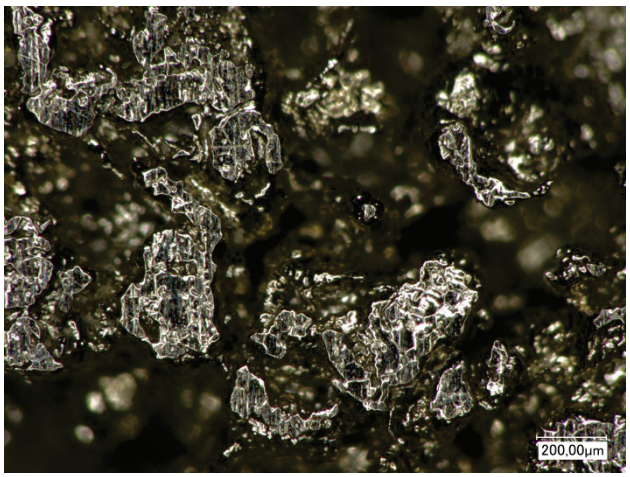

BILD 5. Struktur von Sika-R 150 (Vergrößerung 200x)

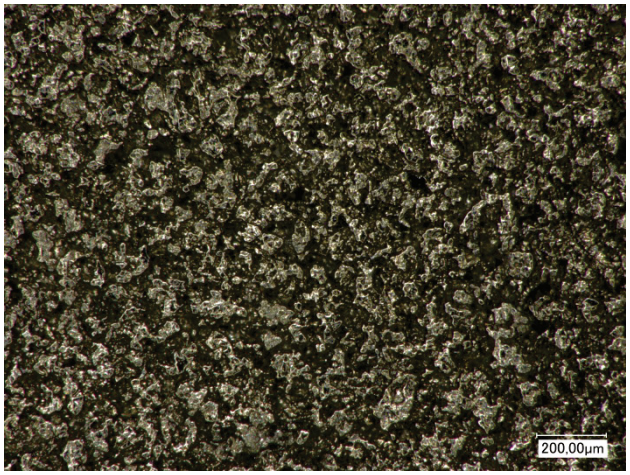

BILD 6. Struktur von Sika-R 1 (Vergrößerung 200x)

Um das Ansprechverhalten der Sonde zu testen, wurden zunächst zwei unterschiedliche gelochte Platten untersucht, die statt einer porösen Platte in den Durchströmtester eingesetzt wurden. Beide Platten verfügten jeweils über ein einzelnes zentrales Loch mit 1 mm bzw. 3 mm Durchmesser. Die Sonde sprach beim Überfahren dieses Lochs, wie erwartet, mit einem zeitlich versetzten Druckanstieg bzw. –abfall in den hintereinander in Fahrtrichtung liegenden Messports an (vgl. Legende in Bild 8).

Bei den Messungen an porösen Proben konnte das gleiche Verhalten beobachtet werden (siehe Bild 8 für einen repräsentativen Messschrieb). Zunächst spricht der in Fahrtrichtung vordere (Port 5) an, dann der zentrale (Port 1) und schließlich der hintere Messport (Port 4). Bei der Interpretation des Diagramms ist zu beachten, dass die äußeren Ports, bedingt durch die Kegelform des Sondenkopfs, einen größeren Abstand zur porösen Probe aufweisen. Dies führt zu einer Reduktion der Geschwindigkeit aufgrund eines vergrößerten Abstands. Da es sich bei der Druckmessung um eine Differenzmessung gegenüber dem Umgebungsdruck handelt, können an der Strömungssonde auch negative Differenzdrücke auftreten.

Die Druckspitzen aus Bild 8 wurden in Bild 9 übereinandergelegt und auf ein Koordinatensystem referenziert. Es ist erkennbar, dass die Maxima an den Druckmessports jeweils an der gleichen Stelle auf der porösen Probe auftreten. Die Messtechnik des Versuchsaufbaus ermöglicht die Auflösung diskreter Poren. Bei wiederholten Fahrten auf der gleichen Bahn waren diese Ergebnisse reproduzierbar. Bei der ersten markierten Pore in Bild 9 sind die Druckmaxima von Port 5 und Port 4 ähnlich. Dies impliziert eine zentral überfahrende Pore. Das gleiche Verhalten ist auch bei der zweiten markierten Pore in Bild 9 ersichtlich. Bei der dritten Pore und gegen Ende des Messschriebs sind die Maximalwerte von Port 5 und Port 4 unterschiedlich ausgeprägt. Die Pore wird in diesem Fall weniger zentral überfahren. Die Maximalwerte von Port 2 und Port 3 sind hierbei ähnlich. Auf eine Darstellung dieser Ports wird jedoch aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet.

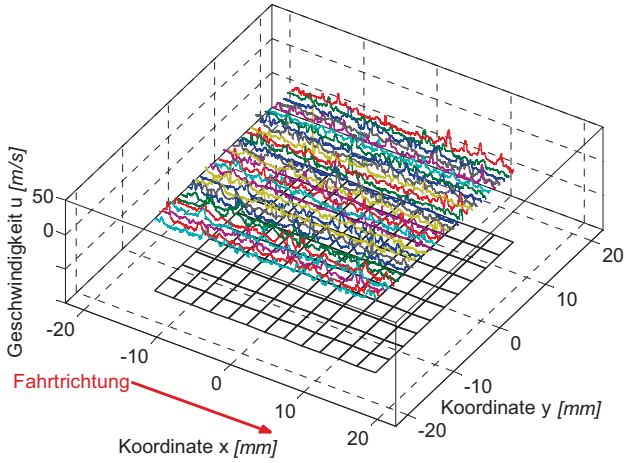

BILD 7. Gesamtmessschrieb für eine 30x30 mm große Fläche auf der Gesamtfläche von 45x45mm (Sika-R 150, 5 mm Dicke, Bahnabstand 1 mm)

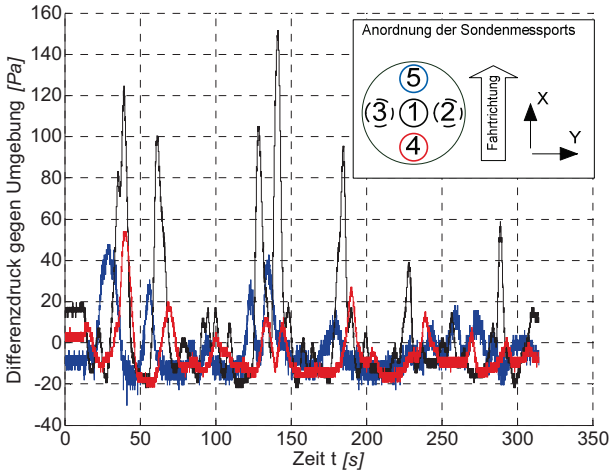

BILD 8. Messschrieb für Ports 5,1 und 4 über Zeit (Sika-R 150, 5 mm Dicke, y= - 4 mm)

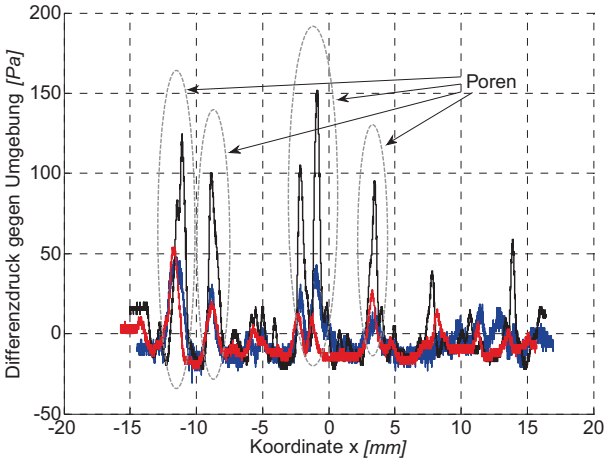

BILD 9. Koordinatenbasierte Verschiebung der Messwerte aus Bild 8 zu Porenvisualisierung

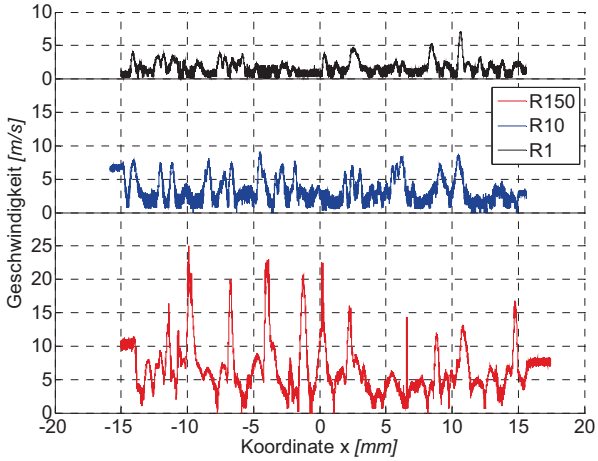

BILD 10. Vergleich der Geschwindigkeiten für Sika-R 1, R 10 und R 150 (Dicke 5mm, y= 0 mm)

Bild 10 zeigt einen Vergleich der vektoriellen Geschwindigkeitswerte für drei verschiedene Sinterplatten (R 1, R 10, R 150). Bei der feinporigsten Platte R 1 betragen die Geschwindigkeitsspitzen an den erkannten Poren nur noch ca. 20% des Maximalwertes der gröbsten Platte (R 150), bei Sika- R 10 noch etwa 50%. Es ist zu erkennen, dass die Druckmaxima im Bereich der Poren bei den großen Poren der Sika-R 150-Platte deutlicher ausgeprägt sind, während sie bei Sika-R 1 deutlich diffuser werden. Allerdings kann die Messtechnik die Poren immer noch auflösen.

Die 5-Loch-Sonde ermöglicht die Auflösung der Geschwindigkeiten in allen drei Raumrichtungen. Die Auswertesoftware bestimmt daraus anschließend einen Geschwindigkeitsvektor. Da bei den Geschwindigkeitsmessungen auch geringe reproduzierbare Querkomponenten aus Seitenströmungen z.B. durch nicht senkrecht verlaufende Poren auftraten, wird die vektorielle Geschwindigkeit als Bezugsgröße für die Diagramme gewählt. Ein Vergleich mit der, zu Beginn verwendeten, gelochten Platten hat gezeigt, dass die Querkomponenten nicht durch Einbauungenauigkeiten der Sonde erzeugt worden sind. Deshalb werden schräg verlaufende Poren bzw. Strömungsturbulenz als ursächlich angenommen.

Der Einsatz eines Coriolis-Massenstrommessgeräts ermöglicht die Bestimmung der Flächenporosität. Hierfür werden die experimentellen Ergebnisse der Geschwindigkeit über die Ausströmfläche integriert. Aufgrund des Durchmessers der Sonde wurden diese Messwerte auf eine Dicke von 0,99 mm bezogen. Der Bezug der integralen Größe auf die Ausströmfläche führt zu einer flächengemittelten Geschwindigkeit. Die Division von Massenstrom durch die flächengemittelte Geschwindigkeit und die Dichte im Plenum ist die Flächenporosität bestimmbar.

In Tabelle 3 sind die Maximalgeschwindigkeiten sowie die flächengemittelten Geschwindigkeiten für die untersuchten Materialien und Materialdicken aufgeführt. Es zeigt sich, dass mit größerer Dicke der Materialprobe die Geschwindigkeit, wie zu erwarten, abnimmt. Der flächengemittelte Geschwindigkeitsverlust von 10 mm gegenüber 5 mm-Proben liegt bei allen untersuchten Proben im Bereich von 0,4 bis 0,6 m/s.

Material	Maximal Geschwindigkeit [m/s]	Flächengemittelte Geschwindigkeit [m/s]
Sika-R 1 5 mm	10.7150	1.7287
Sika-R 5 5 mm	18.7235	3.0425
Sika-R 10 5 mm	15.1490	3.4614
Sika-R 20 5 mm	34.1125	4.3498
Sika-R 150 5 mm	78.0962	6.2447
Sika-R 1 10 mm	4.3664	1.3467
Sika-R 5 10 mm	42.2331	2.4580
Sika-R 10 10 mm	15.0801	3.0338
Sika-R 20 10 mm	20.1154	3.9053
Sika-R 150 10 mm	31.2732	5.7956

TAB 3. Maximalgeschwindigkeiten und flächengemittelte Geschwindigkeiten der untersuchten Materialien

Bei den Maximalgeschwindigkeiten fällt der sehr hohe Messwert für Sika-R 150 5 mm aus dem Rahmen. Dieser Wert kann bedingt durch eine sehr große Pore hervorgerufen werden. Ein Einfluss auf die Flächenporosität ist aufgrund der geringen Ausströmfläche nicht vorhanden.

In Tabelle 4 sind der Massenstrom und die aus den Messwerten errechnete Flächenporosität aufgeführt. Den Werten für den Massenstrom ist zu entnehmen, dass sich nur bei Sika-R 1 und Sika-R 5 Unterschiede zwischen 5 mm und 10 mm dicken Proben ergeben. Die übrigen Massenströme bleiben im Rahmen der Messgenauigkeit konstant. Bei der Flächenporosität ergeben sich deutliche Abweichungen zwischen den beiden Dicken. Definitionsgemäß hängt die Flächenporosität nicht von der Materialdicke ab. Die hier festgestellten Abweichungen können aufgrund der Schichtung zweier 5 mm dicken Platte und einer Änderung der Durchströmeigenschaften resultieren. Durch die Schichtung steht ein Teil der vorher durchströmten Poren im ersten Material als Sackgassen-poren nichtmehr zur Verfügung (Verschluss durch Vollmaterial bei der zweiten Platte). Diese Änderung in der Materialhomogenität ist bei einem 10 mm-Vollmaterial nicht gegeben.

Material	Massenstrom [kg/s]	Flächenporosität [%]
Sika-R 1 5 mm	0.0036	17.6215
Sika-R 5 5 mm	0.0046	23.8018
Sika-R 10 5 mm	0.0047	39.1764
Sika-R 20 5 mm	0.0047	32.0286
Sika-R 150 5 mm	0.0047	29.6489
Sika-R 1 10mm	0.0029	18.7711
Sika-R 5 10 mm	0.0045	21.3295
Sika-R 10 10 mm	0.0047	38.0802
Sika-R 20 10 mm	0.0047	31.4727
Sika-R 150 10 mm	0.0047	29.4868

TAB 4. Massenstrom und ermittelte Flächenporosität der untersuchten Materialien

Innerhalb von Tabelle 4 ist erkennbar, dass ein linearer Zusammenhang zwischen dem Trenngrad und der Flächenporosität nicht abgeleitet werden kann. Im Fall des Sika-R Materials ist ein Maximum der Flächenporosität im Bereich von Sika-R 10. Dies begründet sich auf der nahezu konstanten Dichte im Plenum bei den Materialien R 10 bis R 150. Aufgrund des erwarteten Zusammen-hangs zwischen Feinheit und Geschwindigkeit ist jedoch hier die Interpretation mittels der Dichte im Plenum als wahrscheinlichste Ursache erkennbar. Die Variation der Dichte begründet sich auf der Steigerung der Permeabilitätskoeffizienten (vgl. Tabelle 1). Eine Steigerung der Werte führt aufgrund geringeren Differenzdrucks für die Durchströmung zu einer Reduktion der Dichte im Plenum. Aufgrund des sprunghaften Anstiegs dieser Werte bei dem Material R 10 im Vergleich zu R 5 ist hier eine drastische Verringerung der Dichte erkennbar. Dies führt zu einer drastischen Änderung der Flächenporosität. Ein Bezug der Werte auf die Umgebungsbedingungen (vgl. [3]) wurde in vorliegender Arbeit nicht durchgeführt. Um jedoch für das gesamte Material eine repräsentative Größe ermitteln zu können, wurde die Plenumsdichte verwendet.

3.2. Versuche mit Partikeln

Nach den Versuchen ohne Partikel wurde der Versuchsaufbau leicht modifiziert. Die Medienversorgung wurde von Druckluft auf trockenen Stickstoff 5.0 (beides Raumtemperatur) umgestellt. Dies ist ein übliches Betriebsgas für Seeder, da Titandioxid-Tracer-Partikel stark hydrophil sind (siehe [7], S.26). Auch mittels Wasserabscheider getrocknete Druckluft wäre hierfür zu feucht und würde die Bildung von großen Agglomeraten bzw. ein Verklumpen der Partikel bereits im Seeder fördern. Der durch die Verwendung von Stickstoff erzeugte Messfehler ist wegen der starken Ähnlichkeit der Dichte von Druckluft und Stickstoff bei Zimmertemperatur zu vernachlässigen. Zusätzlich zu der Umstellung in der Medienversorgung wurde ein Fluidized-Bed-Seeder zwischen Coriolis-Massenstrommessgerät und Plenum eingebaut. Die detaillierte Funktionsweise eines Fluidized-Bed-Seeders ist z.B. in [7] beschrieben. Der Seeder verfügt zusätzlich zu seinem Betriebsmodus als herkömmlicher Fluidized-Bed-Seeder über einen Bypass-Anschluss, welcher eine Zyklon-Strömung in der Partikelkammer erzeugt. Nachdem festgestellt wurde, dass der Seeder der Strömung gleichmäßiger Partikel zusetzt, wenn dieser Bypass ebenfalls genutzt wird, wurden beide Betriebsmodi parallel verwendet. Dadurch wurden in der Partikelkammer bereits aufgewirbelte Partikel besser in der Schwebe gehalten. Zusätzlich wurde der Seeder mechanisch in Schwingungen versetzt um verklumpte oder festsitzende Partikel von den Wänden der Partikelkammer zu lösen.

Als Stoff für die Tracer-Partikel kam Titandioxid (TiO_2) vom Typ 2211 der Firma KRONOS Titan zum Einsatz[4]. Dieses Titandioxid ist ein Nachfolgepräparat von Typ 2210, welches in der Vergangenheit beim DLR Lampoldshausen mit demselben Seeder für optische Messaufgaben erfolgreich eingesetzt wurde (siehe [8]).

[4] *KRONOS 2211 Titandioxid*, KRONOS Titan GmbH, Leverkusen, DE

Der mittlere Durchmesser der hier eingesetzten Partikel betrug 0,3 µm.

Begonnen wurden die Messungen jeweils mit einer statischen Messung verschiedener Druckniveaus an einer diskreten Position über der porösen Materialprobe. Es wurden dabei 2,0, 5,0, 7,0 und 10,0 bar als Medienvordruck an der Stickstoffversorgung eingestellt. Zum Einsatz kamen ausschließlich Materialproben von 5 mm Dicke. Der Seeder war dabei nicht angeschlossen und der Strömung wurden noch keine Partikel zugesetzt. Ein anschließendes Verfahren der Sonde von x= -15 mm bis x= +15 mm mit 0,1 mm/s bei einem Vordruck von 7,0 bar bzw. 10,0 bar generierte die notwendigen Vergleichswerte für Stickstoff ohne Partikel. Nach der Vergleichsfahrt wurde der mit Titandioxid befüllte Seeder angeschlossen und der Strömung wurden Partikel zugesetzt. Die Messfahrt von x=-15 mm bis x= +15 mm wurde an gleicher y-Koordinate, gleichem Vordruck und in partikelhaltiger Strömung wiederholt. Als Vergleichsmessung wurde anschließend bei wieder partikelfreier Strömung eine Messung bei statischer Position mit Druckvariation wie zu Beginn durchgeführt. Die mit Partikel versetzte poröse Materialprobe wurde dazu nicht gereinigt oder verändert. Dies ermöglicht einen direkten Vergleich der Durchlässigkeit vor und nach dem Seeding-Prozess. Eine Verstopfung der porösen Platte mit Partikeln ist detektierbar. Ein erhöhter Vordruck von 10,0 bar war bei Sika-R 10, R 5 und R 1 notwendig, um eine ausreichend starke Durchströmung des Seeders zu gewährleisten. Durch häufige Reinigung der Sonde gemäß Herstellerspezifikationen und Vergleichsmessungen mit plausiblen Ergebnissen wurde sichergestellt, dass ein gemessener Geschwindigkeits- bzw. Gesamtdruckabfall nicht durch einen oder mehrere mit Partikeln verstopfte Messports der Strömungsmesssonde verursacht werden konnte.

Das gleichmäßige Passieren der Tracer-Partikel in großer Zahl durch die R 150, R 20 und R 10-Probe konnte bereits mit optisch beobachtet werden (siehe Bild 11). Bei der Sika-R 5-Platte konnte nur kurzzeitig ein Partikelnebel beobachtet werden. Da sich jedoch unter dem Mikroskop auch auf der Oberseite der Platte deutlich Partikelanhäufungen in den Poren zeigen, muss durch entsprechende Messtechnik noch geklärt werden, ob Partikel diese Platte durchströmen können. Eine Detektion unter Verwendung normaler optischer Verfahren ohne hohe Auflösung ist nicht möglich. Bei der R 1-Materialprobe zeigen sich auf der Oberseite unter dem Mikroskop nur wenige Partikel in den Poren. Daher ist hier davon auszugehen, dass die Tracer das Material nicht passieren können. Auch hier muss mit aufwendigerer Messtechnik noch ausgeschlossen werden, dass Partikel in sehr geringen Mengen dieses Material doch durchströmen. Es ist jedoch hier deutlich erkennbar, das die eingesetzte Größe des R 1-Materials ein Seeding zu Messzwecken unterbindet.

Die Partikel setzten die durchströmten Materialproben auch bei längeren Messfahrten (>300 s) nicht so weit zu, dass der Partikelstrom beeinflusst worden wäre. Der Partikelstrom blieb weiterhin homogen und gleichmäßig. Je nach Materialprobe unterscheidet sich jedoch die Zeit bis die ersten Partikel aus der Platte austreten. Bei Sika-R 10 dauerte es nach einem anfänglichen kurzen Partikelausstoß ca. 90 Sekunden bis zu einem deutlich erkennbaren Partikelstrom. Die Messfahrten wurden erst nach Entstehen eines stabilen Partikelstroms begonnen.

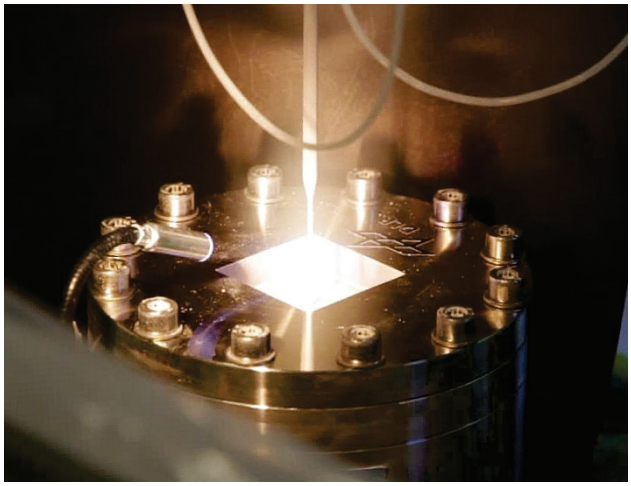

BILD 11. Austritt von Tracer-Partikeln aus einer porösen Platte (Sika-R 10, Dicke 5 mm, Stickstoff)

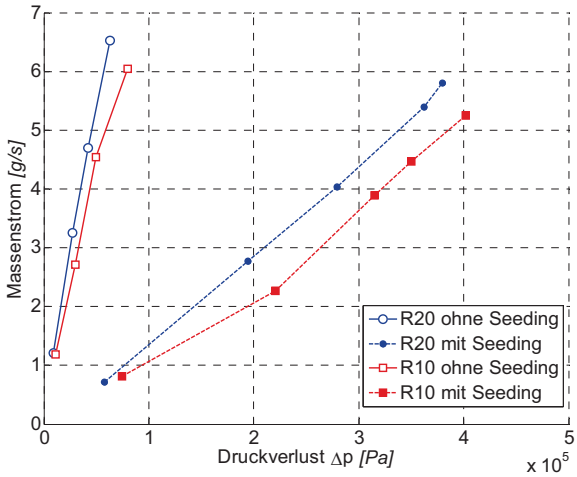

BILD 12. Vergleich der Massenströme und Druckverluste mit und ohne Partikeln in der Strömung

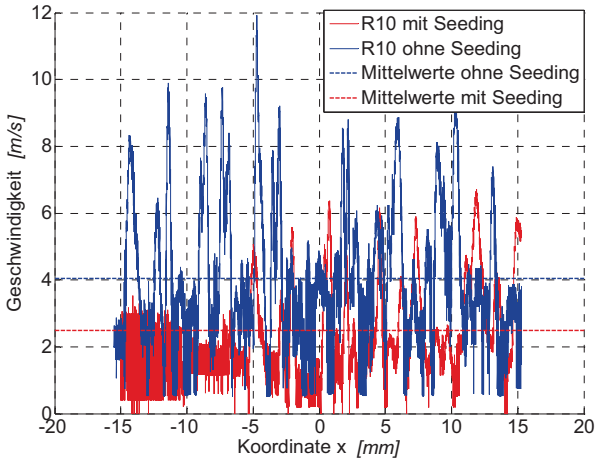

BILD 13. Geschwindigkeitsvergleich Seeding / ohne Seeding (Sika-R 10, 5 mm Dicke, 10,0 bar)

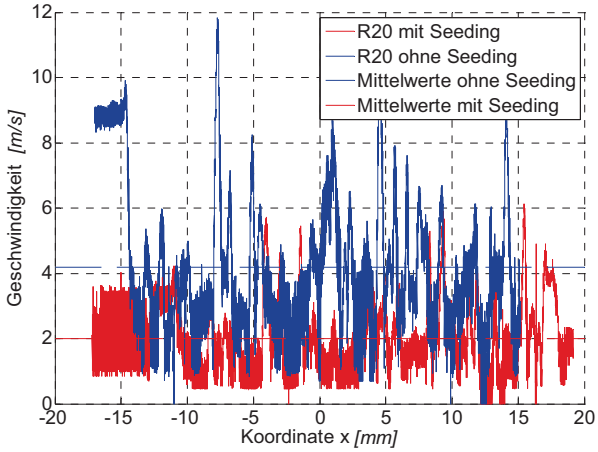

BILD 14. Geschwindigkeitsvergleich Seeding / ohne Seeding (Sika-R 20, 5 mm Dicke, 10,0 bar)

In Bild 12 sind die Auswirkungen der partikelhaltigen Strömung dargestellt. Es ist erkennbar, dass durch das Seeding der notwendige Vordruck bei konstantem Massenstrom stark ansteigt. Dieser Sachverhalt kann nicht nur aus Verstopfungen in den Poren selbst, sondern auch aus der stark den Partikeln ausgesetzten Platten-unterseite resultieren. Um dies genauer beurteilen zu können, finden sich in Bild 13 und Bild 14 genauere Geschwindigkeitsmessschriebe zum Vergleich der Strömungsverhältnisse.

Anhand der Messwerte in Bild 13 und Bild 14 ist die Abnahme der Ausströmgeschwindigkeit durch die poröse Probe beim Zusatz von Partikeln anhand der Mittelwerte erkennbar. Die Abweichung der Mittelwerte zwischen partikelhaltiger und partikelfreier Strömung sind bei Sika-R 10 38,5% und bei Sika-R 20 52,2%. Des Weiteren ändern sich die Anzahl und die Position der erfassten Poren. Dies korreliert mit der Aussage eines deutlich reduzierten Massenstroms und erhöhten Druckverlusts aus Bild 12.

Der oben dargestellte Sachverhalt verhindert das Passieren der Partikel nicht. Allerdings lassen diese Ergebnisse den Schluss zu, dass die Poren mit der Zeit von Partikeln verstopft werden und daher die zur Verfügung stehende Messzeit im Rahmen der gewählten Randbedingungen begrenzt ist. Zusätzlich dazu müssen der stärkere Druckverlust und der niedrigere Massenstrom v.a. bei der Auslegung von Kühlsystemen berücksichtigt werden.

4. ZUSAMMENFASSUNG

Das DLR Lampoldshausen hat einen Versuchsaufbau zur Untersuchung der Durchlässigkeit von porösen Materialien für Tracer-Partikel entwickelt. Dieser ermöglicht die messtechnische Erfassung der wichtigsten für einen Partikeldurchtritt relevanten Materialparameter. Insbesondere lässt sich die Flächenporosität aus Messdaten direkt ermitteln. Es wurden verschiedene Proben aus Edelstahlsinter in Hinblick auf ihre Charakterisierung und Durchströmbarkeit mit partikel-haltigen Gasen untersucht. Die gewählte Messtechnik ist in der Lage Poren des porösen Materials aufzulösen. Zusätzlich können mittels der eingesetzten Mehrloch-sonde die Querströmungen inklusive deren Strömungs-winkel aus schräg endenden Poren erfasst werden. Dies berücksichtigt deren Größe bei der Bestimmung der Flächenporosität.

Bei Versuchen mit partikelhaltigen Gasen konnten Titandioxid-Tracer-Partikel erfolgreich bis zu einem Trenngrad von ca. 0,9 µm durch das poröse Material strömen. Es wurde beobachtet, dass sich der Massenstrom kurz nach Einleiten des partikelhaltigen Gases änderte und danach konstant blieb. Dies traf für die untersuchte Messzeit von 300 Sekunden zu. Zusätzlich war eine Beeinflussung des Partikelstroms nicht erkennbar. Die Beeinflussung des Massenstroms durch die Partikel erfolgt somit aus einer inertialen Beschichtung der Platteninnenseite. Eine weitere wissenschaftliche Untersuchung des vergrößerten Einlassdruckverlustes ist notwendig. Die Regelung der Transpirationskühlung in SCRamjet-Kammern sollte folglich auf Basis des Massenstroms erfolgen. Die erreichte Messzeit reicht jedoch zur Durchführung von PIV-Messungen aus. Innenhalb dieser geplanten PIV-Messreihen ist ein Einsatz der verwendeten Mehrlochsonde ebenfalls möglich. Ein Einfluss der Strömung mit hohem Partikelanteil auf die Mehrlochsonde war nicht erkennbar.

5. AUSBLICK

Zukünftige Untersuchungen sollen klären, wie sich die Durchströmbarkeit der hier untersuchten Materialproben bei einer Dicke von 10 mm ändern. Da nicht ausgeschlossen werden kann, dass die Abweichungen in der ermittelten Flächenporosität mit dem Stapeln von zwei 5 mm-Platten für die 10 mm-Messungen zusammen-hängen, werden auch Platten aus 10 mm Vollmaterial zum Einsatz kommen. Der über die Stapelung induzierte Einfluss auf den Partikelstrom ist so bestimmbar.

Mittels weiterer Messtechnik (z.B. PIV) wird in Zukunft ermittelt, ob die Partikeldichte in der Austrittsströmung aus den porösen Platten für die Verwendung bei den genannten optischen Messverfahren ausreicht. Des Weiteren soll dabei geklärt werden, ob die Sika-R 5 und Sika-R 1-Proben von Partikeln durchströmt werden, die für das menschliche Auge unsichtbar oder schwer zu erkennen sind. Gleichzeitig soll bestimmt werden, ob auch bei den gröberen Materialien bereits zu Beginn kleinere Partikel austreten, bevor der Partikelstrom sichtbar wird. Für diese weiteren Untersuchungen wurde beim DLR Lampoldshausen ein Versuchskanal als Erweiterung des bereits bestehenden Aufbaus entwickelt.

Um mehr Informationen für den Anwendungsbereich der Transpirationskühlung in Staustrahl- und Raketen-triebwerken zu gewinnen, sollen weitere Materialien auf ihre Durchströmbarkeit mit Partikeln hin untersucht werden.

Möglicherweise lassen sich über die Passagezeit, welche die Partikel zum Durchströmen des porösen Mediums benötigen, Rückschlüsse auf die Tortuosität des untersuchten Materials ziehen. Dies gilt es in weiteren Versuchen zu klären.

6. DANKSAGUNG

Die Autoren möchten sich bei Herrn Albert Feinauer, Herrn Hagen Friedrich und Herrn Lukas Werling vom Prüfstand M11 des DLR Lampoldshausen für ihre freundliche Unterstützung bedanken.

7. REFERENZEN

[1] Greuel, Dirk. *Untersuchungen zur Strömung und Wärmeübertragung an effusiv gekühlten faserkeramischen Schubkammerlinern kryogener H2 / O2 - Raketenantriebe*. Doktorarbeit, RWTH Aachen, 2012.

[2] Langener, Tobias; von Wolfersdorf, Jens; Kuhn, Markus; Streelant, Johan.*Transpiration cooling with supersonic flows and foreign gas injection*. AIAA 2010-6794, AIAA - American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2010.

[3] Langener, Tobias. *A Contribution to Transpiration Cooling for Aerospace Applications Using CMC Walls*. Doktorarbeit, Universität Stuttgart, 2011.

[4] Strauss, Friedolin. *Numerische Untersuchung des Strömungsverhaltens bei der Kühlmittelausblasung durch eine poröse CMC-Innenschale von effusiv gekühlten Düsenerweiterung in Raketentriebwerken.* Diplomarbeit, Universität Stuttgart, 2011.

[5] Sutton, George P.. *History of Liquid Propellant Rocket Engines*. AIAA - American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2006.

[6] *GKN Sinter Metals, Datenblatt Filterelemente (Hochporöse Sinterteile Sika-R...AX und Sika-B)*.

[7] Raffel, M.; Willert, C.; Werely, S.; Kompenhans, J.. *Particle Image Velocimetry - A Practical Guide*. Springer Verlag, Second Edition, 2007

[8] Weisgerber, H.; Martinuzzi, R.; Brummund, U.. *PIV measurements in a supersonic model combustion chamber.* 9th International Symposium on Flow Visualization, S.315–1 bis S.315–10, 22-25 August 2000.