

WÄRMEÜBERGANGS-VERSUCHE AN EINER GENERISCHEN KÜHLKANALGEOMETRIE

H. Rochlitz, P. Scholz
TU Braunschweig, Institut für Strömungsmechanik,
Hermann-Blenk-Str. 37, 38108 Braunschweig, Deutschland

Zusammenfassung

In dem vorliegenden Beitrag werden die Motivation zum Bau, die Auslegung, der Aufbau, Ergebnisse der Qualifikation, und erste exemplarische Messergebnisse eines Prüfstands eines generischen Kühlkanals mit einseitiger thermischer Belastung beschrieben. Es wird gezeigt, dass das Experiment genau definierte Randbedingungen aufweist und somit auch als Validierung für numerische Berechnungen verwendet werden kann. Mittels optischen Feldmesstechniken werden zeitsynchrone und hochaufgelöste Informationen über das Strömungs- und Temperaturfeld gewonnen. Mit Particle Image Velocimetry (PIV) wird das Geschwindigkeitsvektorfeld der Strömung erfasst, und mit Laser Induzierte Fluoreszenz (LIF) wird das Temperaturfeld bestimmt. Die durch PIV ermittelten Geschwindigkeitsprofile verschiedener Fälle werden miteinander verglichen und diskutiert. Für die LIF-Messungen wird Rhodamin B als fluoreszierender Farbstoff verwendet. Eine Intensitäts-Temperatur-Kurve und ein Temperaturprofil über den Kanal mit beheizter Wand werden gezeigt und erläutert. Informationen über die mittlere Wassertemperatur außerhalb der Grenzschicht und über die Temperaturgrenzschicht werden gezeigt und diskutiert.

1. EINLEITUNG

In Raketebrennkammern werden Verbrennungstemperaturen bis etwa 3500 K und Drücke von mehreren MPa erreicht. Die Kühlung der Brennkammerstruktur ist unter diesen Bedingungen komplex und wichtig. Bei regenerativ gekühlten Raketebrennkammern wird die Wärme durch außen an der Brennkammerwand vorbeiströmenden überkritischen Brennstoff aufgenommen. Der Brennstoff wird dabei durch Kühlkanäle geführt. Die Kühlleistung muss ausreichen, um eine gewisse maximal zulässige Temperatur an der Innenwand der Brennkammer nicht zu überschreiten. Zwischen der Innenwand und der Außenwand der Brennkammer stellen sich dabei hohe Wärmestromdichten ein.

Der derzeitige primäre strukturmechanische Schadensfall, der unter diesen Randbedingungen und bei zyklischer Belastung an der Kühlkanalstruktur auftritt, wird als Dog-House-Effekt bezeichnet [1]. Bei diesem strukturmechanische Versagen der Brennkammerwand durch den Dog-House-Effekt bricht der vorher rechteckige Kühlkanal auf und Brennstoff tritt direkt in die Brennkammer ein. Um zukünftige Kühlsysteme sicherer, also mit präziser Aussage über das Auftreten des Dog-House-Effekts, und effizienter auslegen zu können, ist ein präziseres Verständnis der Prozesse des Wärmeübergangs von der heißen Kühlkanalwand in das Kühlmedium notwendig. Da die Triebwerksmasse und auch der Druckabfall über die Kühlkanallänge so gering wie möglich sein sollen, ist eine genau angepasste und optimierte Kühlung erforderlich. Dazu ist das detaillierte Wissen über das Verhalten der Strömung in einem solchen Kühlkanal erforderlich.

In bisherigen generischen Experimenten wurden zumeist, nicht zuletzt auch wegen der harschen Umgebungsbedingungen, nur integrale Daten der Kühlkanalströmung, wie

Einlauf- und Auslauftemperatur für eine kalorimetrische Analyse, erhoben [2]. In einigen Fällen wurde an stark vergrößerten Kanälen zwar auch das Geschwindigkeitsfeld vermessen [3], bislang wurden jedoch keine simultanen Daten über das Geschwindigkeits- und das Temperaturfeld aufgenommen. Im vorliegenden Beitrag wird ein generisches Grundlagenexperiment mit vereinfachten Umgebungsbedingungen beschrieben, bei dem eine simultane Messung von Geschwindigkeits- und Temperaturfeld ermöglicht wird. Dies ist mit der Kombination der Particle Image Velocimetry (PIV) und der Laser-Induzierten Fluoreszenz (LIF) möglich. Durch die quantitativen und hochaufgelösten Messungen von Geschwindigkeits- und Temperaturfeld soll die Strömung, insbesondere die auftretenden Temperaturschichten im Kühlkanal, die induzierten Sekundärströmungen im Krümmer, die Turbulenzeigenschaften und der Wärmeübergang experimentell ermittelt werden. Diese Ergebnisse dienen unter anderem zur Schaffung einer Validierungsplattform zum Vergleich mit den Ergebnissen numerischer Berechnungen (LES und RANS).

2. AUSLEGUNG UND KONSTRUKTIVER AUFBAU

Der verwendete Teststand besteht aus einem geraden sowie einem gekrümmten Kanalabschnitt, welche von dem Kühlfluid durchströmt werden. In dem geraden Abschnitt soll die Strömung ohne den Einfluss des Krümmers untersucht werden. In dem gekrümmten Abschnitt hingegen soll eben dieser Einfluss betrachtet werden. Die Kanalseitenwände sowie die Oberseite bestehen aus durchsichtigem Polymethylmethacrylat (PMMA), damit ein für PIV und LIF Messungen optischer Zugang ungehindert möglich ist. BILD 1 zeigt den prinzipiellen Aufbau des Experiments.

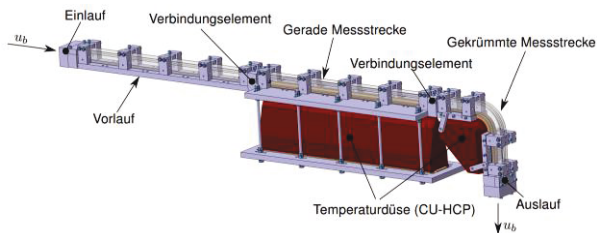


BILD 1. Prinzipaufbau des Experiments.

An den Kühlkanal beziehungsweise den Prüfstand werden diverse Anforderungen gestellt: Eine durchsichtige Flüssigkeit ist für den Einsatz von PIV und LIF erforderlich. Zu Beginn der Messungen soll Wasser als Kühlmedium verwendet werden, daher wird der Kanal auf einen Betrieb mit Wasser ausgelegt. Der fokussierte Laserlichtschnitt weist eine Breite von etwa 0,5 mm bis 1 mm auf. Ein definierter Lichtschnitt innerhalb des Kanals ist für gute und aussagekräftige Messergebnisse erforderlich. Daher sollte die Kanalbreite mindestens 5 mm betragen. Die Streckung des Kanals soll ähnlich zu der eines modernen Raketentriebwerk sein. Als Referenz wird daher der SFB-TR 40 Testcase mit einer Streckung von 4,3 verwendet [4]. Der Kanal soll einen Vorlauf mit einer Mindestlänge von 60 hydraulischen Durchmessern aufweisen. So wird eine voll ausgebildete turbulente Strömung bei Kanaleintritt sichergestellt. Zusätzlich soll der Kanal selbst ebenfalls die gleiche Mindestlänge aufweisen um die volle Ausbildung der thermischen Grenzschicht zu ermöglichen. Im Krümmer soll eine anliegende Strömung vorherrschen. Die mittlere Höchsttemperatur des Kühlmediums darf die Dauerbetriebstemperatur des PMMA nicht übersteigen. An der beheizten Wand soll kein Sieden des Kühlmediums auftreten. Für ein hohes Signal-zu-Rausch Verhältnis der LIF-Messung soll die Differenztemperatur zwischen Wand und mittlerer Wassertemperatur groß sein.

Eine wesentliche Motivation ist, aus dem Experiment hochwertige Validierungsdaten für LES- und RANS-Simulationen zu generieren. Für erstere muss eine Konfiguration erstellt werden, die mit heutigen Simulationsmethoden auch gerechnet werden kann. Es wurde hierzu mit einer Abschätzung die notwendige Zellenzahl für diverse Randbedingungen berechnet und eine Variante - im folgenden "Konfiguration 1" genannt - so ausgewählt, dass die Zahl der notwendigen Zellen unter 400 Mio. bleibt, was zur Zeit als das technisch sinnvolle Limit angesehen wird [5]. Die Zellenzahl für LES wird bei einer großen Wassertemperatur, einer kleinen Strömungsgeschwindigkeit und einer geringen Wandtemperatur der beheizten Wand klein. In einer anderen Variante - Konfiguration 2 - soll der Prüfstand, so weit dies mit dem Konzept technisch möglich ist, mit einer hohen Wärmestromdichte und großen Reynoldszahlen betrieben werden, um möglichst den SFB-TR 40 Testcase nachzubilden.

Für die Auslegung wurde das Kühlmedium (Wasser) als inkompressibel betrachtet. Es wurde eine angepasste Nusseltbeziehung für turbulent durchströmte, rechteckige Kanäle mit der Reynoldszahl Re , der Prandtlzahl Pr , der Wandtemperatur T_w und der mittleren Wassertemperatur, die als Bulk-Temperatur T_b bezeichnet wird, verwendet [6]:

$$(1) \quad Nu = 0,023 \times Re^{0,8} \times Pr^{0,4} \times \left(\frac{T_w}{T_b} \right)^{-0,3}$$

Eine Parameterstudie führte zu zwei Konfigurationen, die die beschriebenen Anforderungen am besten erfüllt. Demnach hat der Kanal eine Breite von 6 mm, eine Streckung von 4,3 (eine Höhe von 25,8 mm) und eine Länge von 600 mm. Der mittlere Radius des Krümmers wurde auf 60 mm festgelegt. Die mittlere Wassertemperatur beträgt 333 K und die Wandtemperatur beträgt 373 K. Die gewählte Geometrie ist in BILD 2 skizziert. Der beheizte Kanalboden ist dabei in rot dargestellt.

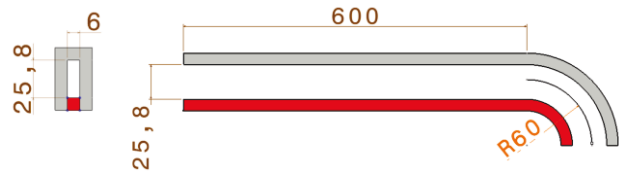


BILD 2. Geometrie des generischen Kühlkanals

Die beiden oben beschriebenen Konfigurationen sind über einen unterschiedlichen Kühlmittel-Volumenströmen definiert. Bei Konfiguration 1 beträgt der Kühlmittel-Volumenstrom 50 l/min. Dadurch wird eine Zellenzahl für die LES von ca. 400 Mio. erreicht. Die Konfiguration 2 hat einen Kühlmittel-Volumenstrom von 200 l/min und zeichnet sich durch eine große Wärmestromdichte sowie hohe Reynolds-, Prandtl-, und Nusselt-Zahlen aus. Die charakteristischen Kenngrößen des generischen Kühlkanals bei den ausgewählten Konfigurationen sind in TAB 1 gegeben.

		Konfigura- tion 1	Konfigura- tion 2
Volumen- strom	[l/min]	50	200
T_b	[K]	333	333
T_w	[K]	373	373
Wärmestrom- dichte	[MW/m ²]	1,1	3,3
Pr	[-]	3,0	3,0
Re	[-]	111274	444334
Nu	[-]	376	1137
α	[W/(m ² K)]	25061	75907
De	[-]	31695	126563
Zellenanzahl für LES	10 ⁶	393	(14891)

TAB 1. Kenngrößen des generischen Kühlkanals bei ausgewählten Konfigurationen.

Der Ein- und der Auslauf des Kanals sind zwei-dimensionale Düsen, durch die eine gleichförmige und störungsfreie Kontraktion der Strömung erzielt wird. Der Kanalboden besteht aus einem beheizten Element, der sogenannten Temperaturdüse, sodass ein Wärmeeintrag in das Kühlfluid stattfindet. Die Temperaturdüse besteht aufgrund der großen Wärmeleitfähigkeit des Materials von 385 W/mK aus Cu-HCP. Die Temperaturdüse ist auf der Unterseite breit, damit eine große Wärmekapazität und eine gleichmäßige Verteilung der Wärme in Ort und Zeit erreicht wird. Nach oben hin läuft die Temperaturdüse zu, sodass die 6 mm der Kanalunterseite erreicht werden. In die Unterseite der Temperaturdüse sind 23 Heizpatronen eingelassen, die über eine Regelung die Wandtemperatur konstant halten. Das in direktem Kontakt zu der Temperaturdüse stehende Material ist ein aus Polyetheretherketon (PEEK) bestehender thermischer Isolator, sodass die Wärme nicht über andere Bauteile als das Kühlfluid abgegeben wird. PEEK hat eine thermische Leitfähigkeit von 0,27 W/mK und ist hochtemperaturbeständig sowie resistent gegenüber heißem Wasser und Wasserdampf. Die Temperaturdüse kann bei Bedarf durch Hochtemperaturglaswolle des Typs Promaglaf HTI-1200 (die Wärmeleitfähigkeit beträgt 0,05 W/(mK)) bedeckt und so die Verluste durch Strahlung und Konvektion signifikant verringert werden. Da die Wärmeleitfähigkeiten der Isolierungen um mehrere Größenordnungen größer sind als die Wärmeleitfähigkeit der Temperaturdüse kann davon ausgegangen werden, dass nur ein Wärmestrom von den Heizpatronen über die Temperaturdüse in das Kühlfluid stattfindet. Der Aufbau des geraden Abschnitts des generischen Kühlkanals ist in BILD 3 gezeigt.

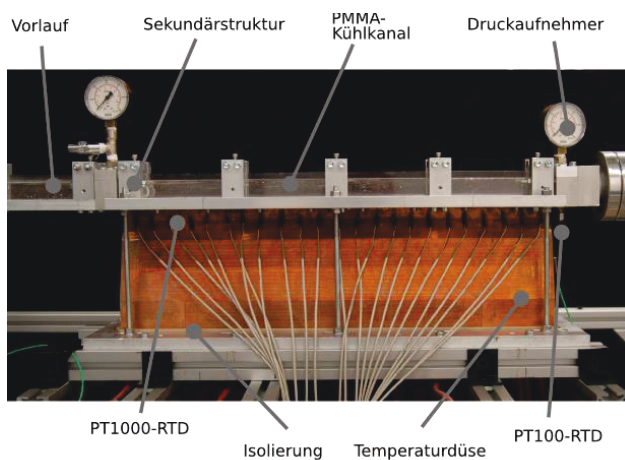


BILD 3. Generischer Kühlkanal (gerader Abschnitt).

Das Experiment hat einen geschlossenen Wasserkreislauf mit einem Zwischentank (Tankvolumen 50 L). Der Volumenstrom wird über ein magnetisch-induktives Durchflussmessgerät bestimmt. Der Absolutdruck im Kanal wird vor und nach jedem Segment (Vorlauf, gerade Messstrecke, etc) mit Drucksensoren erfasst. An den gleichen Positionen entlang des Kanals sind vieradrige PT-100 Kl. AA Widerstandsthermometer montiert. Mit ihnen kann die Temperatur des Kühlfluids T_b und somit auch die Aufheizung über den Kanal bestimmt werden. Die Temperatur an der Spitze der Temperaturdüse wird entlang des Kanals über PT-1000 Widerstandsthermometer bestimmt. Diese Temperaturinformationen werden für die Regelung der Heizpatronen verwendet.

Die Rauheiten der Kanalwände wurden mit einer mechanischen Tastspitze bestimmt. Die mittlere Rauheit R_a des PMMA beträgt 0,041 μm , und die der Temperaturdüse 0,341 μm . Die gemittelte Rautiefe R_z beträgt 0,607 μm für das PMMA und 3,978 μm für die Temperaturdüse. Eine Abschätzung der Sandrauhigkeit k_s aus R_a gemäß den in [7, 8] vorgestellten Beziehungen führt zu Verhältnissen der Sandrauhigkeit über dem hydraulischen Durchmesser von $1,5e-5$ mm beziehungsweise $2,1e-4$ mm. Damit können alle Kanalwände bei den Reynoldszahlen der zwei vorgestellten Konfigurationen als hydraulisch glatt betrachtet werden, wenngleich zu bemerken ist, dass die Rauheit an der beheizten Wand um ein Vielfaches größer ist als an den anderen Wänden.

3. QUALIFIKATION

Bei diesem Experiment sollen die Randbedingungen genau definiert sein. Dazu gehört insbesondere die Betrachtung der Wandtemperatur T_w . Die Aufheizung der Temperaturdüse ist ein stabiles Regelsystem ist: Nach einer Aufheizphase stellen sich konstante Temperaturen ein. Zur Validierung wurde die Temperaturverteilung entlang der Temperaturdüse mittels Infrarotthermografie bestimmt. Dazu ist eine Seite der Temperaturdüse mit Nextel Velvet Coating 811-21 (RAL 900 15 tiefschwarz matt) lackiert. Der Emissionsgrad von Nextel Velvet Coating 811-21 beträgt 0,973 und ist annähernd konstant für einen Abstrahlwinkel bis 60° [9]. Es wurde eine Infrarotkamera des Typs ImageIR 8300 der Firma Infratec mit einem 25 mm Objektiv verwendet. Die Infrarotkamera befand sich in einem Abstand von 880 mm vor der Temperaturdüse. Das Objektiv war parallel zu dem Kühlkanal ausgerichtet. Mit diesem Aufbau wurde etwa die Hälfte der Temperaturdüse betrachtet. Es wurde eine Belichtungszeit von 600 μs verwendet, sodass Temperaturen bis etwa 423 K gemessen werden konnten (die tatsächlichen Temperaturen liegen in diesem Messbereich). Vor den Messungen wurde eine Ungleichförmigkeitskorrektur und nach den Messungen eine Temperaturkalibrierung mit einem Schwarzstrahler durchgeführt. BILD 4 zeigt die Infrarotaufnahme einer Hälfte der Temperaturdüse, die Länge des Abschnitts beträgt etwa 350 mm. Der Prüfstand ist dabei in Betrieb. Oben in der Abbildung ist die Halteplatte zu erkennen, unten die Bodenplatte. Unter der Halteplatte sind Schraubenköpfe und Kondenswasser als kältere Bereiche sichtbar. An den beiden Seiten sind die Verbindungsstreben aufgrund der geringeren Temperatur zu erkennen. Wie zu erwarten stellt sich ein Temperaturgradient zwischen der unteren Hälfte und dem Steg der Temperaturdüse ein. Die Temperaturdüse weist in der unteren Hälfte Maximaltemperaturen von etwa 408,15 K auf. An der oberen Spitze der Temperaturdüse beträgt die Temperatur die eingestellten 373 K. Der Temperaturverlauf entlang der in dieser Abbildung eingezeichneten Linie, die parallel zum Kühlkanal verläuft (es liegt eine Verzerrung aufgrund der verwendeten Optiken vor), ist in BILD 5 gezeigt.

Die Durchschnittstemperatur beträgt 372,96 K und die durchschnittliche absolute Abweichung von dem Mittelwert 0,27 K. Die Temperatur von 368,15 K bei der Position von etwa 53 % entlang der Messlinie war durch eine lokale und kurzzeitige Benetzung der Temperaturdüse mit Kondenswasser bedingt. Der Temperaturverlauf entlang der Temperaturdüse bei gleicher Höhe kann damit als konstant angenommen werden. Zudem stimmt die tat-

sächliche mittlere Wandtemperatur von 372,96 K gut mit der beabsichtigten Wandtemperatur von $T_w = 373$ K überein. Die Temperaturabweichung über die Zeit ist klein im Vergleich zu der Abweichung über den Raum. Die Regelung der Wandtemperatur ist somit erfolgreich und die Randbedingungen können als genau definiert angenommen werden.

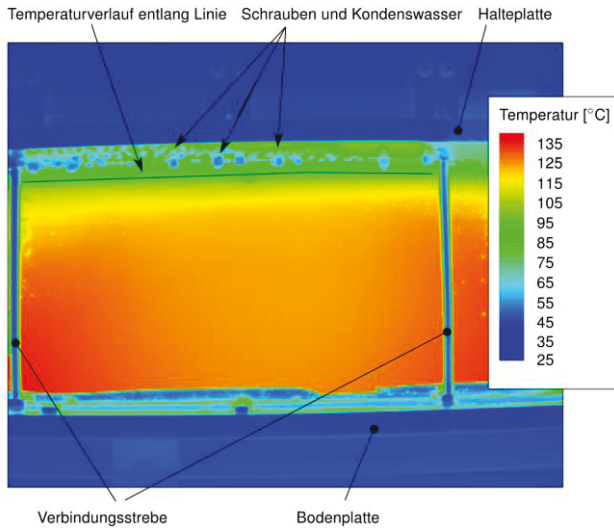


BILD 4. Infrarotaufnahme der beheizten Temperaturdüse.

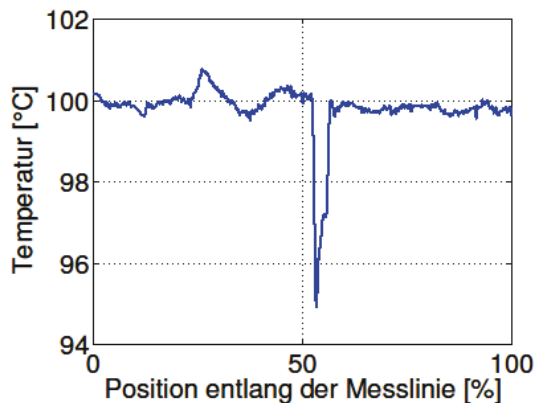


BILD 5. Temperaturverlauf auf der Temperaturdüse parallel zum Kühlkanal.

4. EXPERIMENTELLER AUFBAU

4.1. Optische Messtechniken

Die Strömung wird mittels Particle Image Velocimetry (PIV) und Laser-Induzierten Fluoreszenz (LIF) vermessen.

PIV ist ein optisches, nichtinvasives Messverfahren, mit dem Geschwindigkeitsvektorfelder in einer Messebene erfasst werden können (Ganzfeldmesstechnik), siehe [10]. Als Seedingpartikel wurden silber-beschichtete runde Glaskugeln mit einem Durchmesser von 10 μm verwen-

det. Diese Glaskugeln haben eine ähnliche Dichte wie Wasser und erzeugen demnach keinen relevanten Abtrieb oder Auftrieb. Zudem reflektieren sie durch die Silberbeschichtung das Laserlicht sehr stark.

LIF ist ebenfalls ein optisches, nichtinvasives Messverfahren, welches von einem Laser angeregte temperaturempfindliche fluoreszierende Farbstoffe verwendet um Temperaturen zu messen. Der Farbstoff ist dabei im flüssigen Fluid gelöst. Der Farbstoff absorbiert die Energie eines auftreffenden Laserstrahls und befindet sich nun in einem angeregten Zustand. Anschließend tritt Fluoreszenz, also die spontane Emission von Licht, auf und es wird wieder der Grundzustand erreicht. Da nur ein Teil der vorher absorbierten Energie emittiert wird, weist das Licht eine größere Wellenlänge als das vorher absorbierte Licht auf. Zumeist wird, ähnlich wie beim PIV, eine Lichtschnittebene von dem Laser aufgespannt, in dessen Ebene der Messbereich liegt. Dies wird als planar-LIF oder PLIF bezeichnet. Das Fluoreszenz-Signal wird anschließend von einer Kamera erfasst. Ein vorgeschalteter Interferenzfilter absorbiert die Wellenlängen, die kleiner als die emittierten Wellenlängen sind. So wird nur das Fluoreszenz-Signal erfasst, das zur Anregung verwendete Laserlicht kann den Filter nicht durchdringen. Die Intensität des emittierten Fluoreszenz-Signals ist dabei von der Temperatur abhängig, sodass auf die Temperatur geschlossen werden kann. In diesem Experiment wird Rhodamin B als fluoreszierender Farbstoff verwendet. In zukünftigen Versuchen soll zusätzlich Rhodamin 110 als nicht temperaturabhängiger Farbstoff zu Rhodamin B verwendet werden. Die Fluoreszenzintensität ist bei Rhodamin 110 annähernd konstant über die Temperatur. Diese kalorimetrische beziehungsweise Zwei-Farben LIF-Technik hat den Vorteil, dass das Verhältnis der Emissionsintensitäten der beiden Farbstoffe zur Temperaturbestimmung genutzt werden kann und das Verfahren somit fast unabhängig von der Laserleistung ist. Damit ist eine Erhöhung der Messgenauigkeit des Verfahrens möglich. Bei den hier vorgestellten Messungen wurde eine Rhodamin B- Konzentration in Wasser von 66 $\mu\text{g/l}$ verwendet. Bei einer geringeren Konzentration war die Fluoreszenzintensität zu gering. Eine höhere Konzentration wurde nicht verwendet um eine möglichst kleine Absorption des Laserlichts durch das Rhodamin bei Durchlaufen des Kanals zu erreichen.

4.2. Messaufbau

Der Messaufbau mit dem Vorlauf, der geraden Messstrecke und der Messtechnik ist in BILD 6 gezeigt. Als Laserlichtquelle wurde ein Nd:YAG Doppel-Puls Laser mit einer Wellenlänge von 532 nm und einer Pulsenergie von 60 mJ sowohl zur Belichtung der Seedingpartikel für das PIV-Bild als auch zur Anregung des Rhodamins B verwendet. Die Pulslänge betrug 4-6 ns und das Δt zwischen den beiden Laserpulsen betrug 28 μs . Dadurch wurde eine Verschiebung der Seedingpartikel in der mittleren Kanalströmung von etwa 10 px erreicht. Der Laserlichtschnitt wurde über eine plan-konkave Linse mit einer Brennweite von -50 mm und einer plan-konvexen Linse mit einer Brennweite von 100 mm fokussiert. Der Laserlichtschnitt wurde mit einer Zylinderlinse mit einer Brennweite von -25 mm aufgespannt. Der Laserlichtschnitt hatte

* LIF kann unter Verwendung anderer Farbstoffe ebenfalls zur Messung von Konzentrationen dienen.

eine Dicke von etwa 1 mm. Zwei Imager pro / proX 11M Kameras (PCO 4000) mit Tamron SP AF 180 mm Objektiven wurden verwendet. Eine Kamera nahm die PIV-Doppelbilder und eine Kamera (LIF-T) die temperatursensitive Fluoreszenz des Rhodamin B auf. Bandpassfilter waren vor die Kameras geschaltet, sodass nur die passende Wellenlänge zu dem jeweiligen Messbereich aufgenommen wurde. Der Bandpassfilter für die PIV Kamera ließ nur das grüne Laserlicht, welches an den PIV-Partikeln reflektiert wurde, durch. Der Bandpassfilter vor der LIF-Kamera transmittierte die entsprechenden Fluoreszenzwellenlängen des Rhodamins. Die Belichtungszeit der LIF-Kamera betrug 50 µs. Damit lagen beide Laserpulse in der Belichtungszeit der LIF-Kamera.

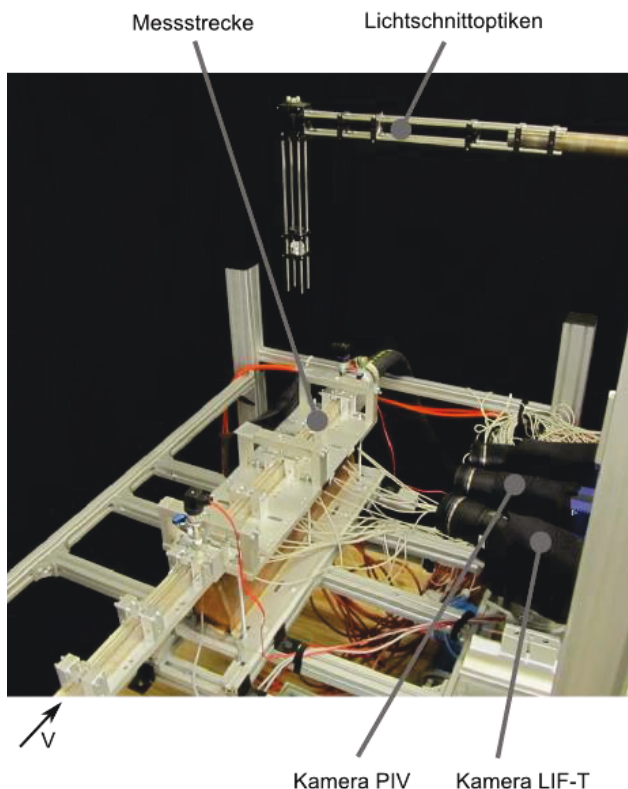


BILD 6. Messaufbau mit Messstrecke und Messtechnik.

Die Kamerablenden hatten einen Wert von 11 für die PIV-Kamera und von 3,5 für die LIF-Kamera. Mit diesen Werten wurde bei der PIV-Kamera die Abbildungstiefe und bei der LIF-Kamera die Helligkeit des Fluoreszenzsignals vergrößert. Bei der LIF-Kamera war 2x2 Hardware Binning aktiviert um das Signal-zu-Rausch Verhältnis zu vergrößern. Beim Hardware Binning werden je 2x2 Pixel der Kamera gemeinsam ausgelesen. Dies verringert die Auflösung, vergrößert jedoch die Sensitivität. Bei der PIV war Binning nicht aktiv. Die PIV und die LIF-Kamera waren auf den Interessensbereich (Area of Interest - AOI) fokussiert, siehe Bild 7. Eine Bildkorrektur wurde in der Bildnachverarbeitung angewendet um die verschiedenen Betrachtungswinkel herauszurechnen. Eine Alternative zu diesem Aufbau ist die Verwendung eines Strahlteilers. Bei diesem sind die Betrachtungswinkel aller Kameras konstant. Allerdings tritt in dem Strahlteiler eine entsprechende Verringerung der Intensität auf was zu einem bedeutend schlechteren Signal-zu-Rausch Verhältnis führt. Die Syn-

chronisation zwischen dem Laser und den Kameras erfolgte über eine programmierbare Steuereinheit. Die maximale Aufnahmefrequenz betrug 1,5 Bilder pro Sekunde, sie ist limitiert durch die maximale Datenübertragungsrate zwischen den Kameras und dem Datenerfassungscomputer. Der Interessensbereich, also der betrachtete Bereich der Strömung, befand sich etwa 375 mm bis 425 mm nach Beginn der geraden Messstrecke. Bei dieser Länge des Interessensbereichs befanden sich die Kameras unter Verwendung der beschriebenen Objektive in einer Distanz um ebenfalls die komplette Kanalhöhe aufzunehmen. Einer Verkleinerung des Interessensbereichs in Strömungsrichtung / horizontale Richtung (Heranzoomen) führt aufgrund des fixen Seitenverhältnisses der Kameraschips unweigerlich zu einer Verkleinerung des Interessensbereichs in vertikale Richtung. Somit kann dann nicht die ganze Kanalhöhe betrachtet werden und es gehen Informationen verloren. Eine Vergrößerung des Interessensbereichs in Strömungsrichtung (Herauszoomen) ist ebenfalls nachteilig da damit die flächenspezifische Auflösung des Interessensbereichs verringert wird und kleine Strukturen in der Strömung somit nicht mehr erfasst werden können.

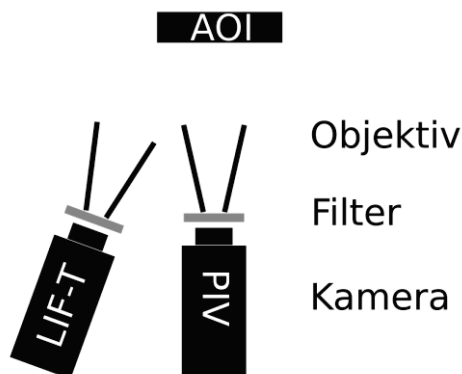


BILD 7. Aufbau der Kameras mit Filter und Objektiv im Vergleich zur der AOI.

Der Prüfstand wurde auf wenige zehntel Grad genau ausgerichtet. Der Einlauf und die gerade Messstrecke befinden sich in einer geraden Linie. Auch der Kanal wurde auf wenige hundertstel Millimeter genau gefertigt und anschließend geprüft. Der Laserlichtschnitt wurde parallel zur Strömungsrichtung ausgerichtet. Dabei lag der Laserlichtschnitt sowohl über dem mittig im Kanal positionierten Kalibriergitter als auch innerhalb für die Ausrichtung aufgebracht Markierungen auf dem Kanal. Die Ausrichtung des Laserlichtschnitts orthogonal zur Kanalströmung erfolgte mit einem Anschlagwinkel, der zu diesem Zweck auf den Kanal gestellt wurde. Ein Schenkels des Anschlagwinkels befindet sich parallel zur Strömungsrichtung des Kanals, sodass der zweite Schenkels orthogonal zum Kanal zeigt (nach oben). Der Laserlichtschnitt wurde dann genau parallel zu diesem Schenkel ausgerichtet. Alle Ortsgrößen (Ausrichtung, Orientierungen, Längen) sind demnach auf mindestens 0,1 mm präzise.

5. ERGEBNISSE

Die PIV- und LIF-Daten wurden zeitsynchron aufgenommen. Je Fall liegen 1500 Doppelbilder für PIV und 1500 Einzelbilder für LIF vor. Mit dieser Bildanzahl wird sichergestellt, dass alle Größen wie die Geschwindigkeitsvektoren

ren, die durchschnittliche Standardabweichung der einzelnen Geschwindigkeiten vom Mittelwert etc. auskonvergiert sind, sich also bei Hinzufügen weiterer Bilder in der Statistik nicht mehr entscheidend ändern. Eine zweidimensionale Bildverzerrung und Ortskalibrierung wurde angewendet um die verschiedenen Betrachtungswinkel als auch Störungen in den Optiken zu bereinigen. Dazu wurde ein Kalibriergitter mit einem Gitterabstand von 2 mm mittig im Kanal positioniert. Bilder des Kalibriergitters wurden unter Verwendung einer längeren Belichtungszeit und mit einer externen Lichtquelle, die Wellenlängen in allen von den Bandpassfiltern transmittierenden Bereichen hat, aufgenommen. Die Kreuze des Gitters wurden erkannt und es wurde eine polynomische Funktion dritter Ordnung als Mapping-Funktion verwendet. Die durchschnittliche Abweichung der Kreuze des entzerrten Bildes von den Kreuzen des idealen Gitters beträgt bei beiden Kameras 0,5 Pixel. Die spezifische Datenauswertung der PIV- und LIF-Daten erfolgte aufgrund der verschiedenen Vorgehensweisen getrennt voneinander. Die PIV- und die LIF-Auswertungen erfolgten mit der kommerziellen Software Davis in der Version 7.2.2.

5.1. PIV

Nach der Entzerrung wurde ein Mittelwertbild mit den Mittelwerten jedes Pixels über die Zeit, also die Anzahl der Bildreihe, erstellt. Dieses Mittelwertbild wurde von jedem individuellen Doppelbild abgezogen. Dadurch wurde das Hintergrundrauschen des Bildes reduziert und das Signal-zu-Rausch Verhältnis erhöht. Zudem wurden Reflexionen des Laserlichtschnitts an der Kanalunterseite durch dieses Verfahren minimiert. BILD 8 zeigt ein solches bearbeitetes PIV-Bild. Die Farbskala ist für eine bessere Darstellung invertiert.

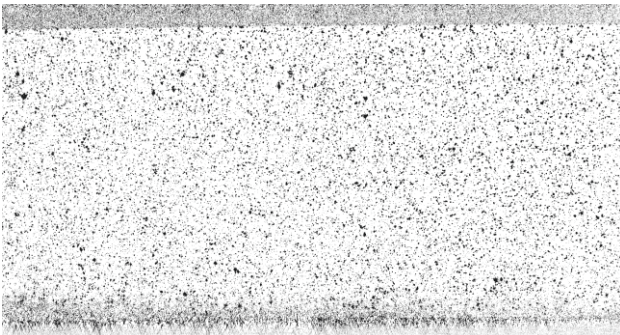


BILD 8. Bearbeitetes PIV-Bild mit invertierter Farbskala.

Auf der Kanalunterseite sind nach wie vor Reflexionen des Laserlichtschnitts zu erkennen. Diese Bereiche sind anschließend maskiert worden. In der Strömung sind die Seedingpartikel deutlich sichtbar. Es liegt eine gleichmäßige Verteilung von Seedingpartikeln in der Strömung sowohl in horizontale als auch vertikale Richtung vor. Im oberen Bildbereich ist die Kanaloberseite zu sehen.

Mit den so erstellten Bildern wird pro Doppelbild eine Kreuzkorrelation durchgeführt und Geschwindigkeitsvektoren werden erstellt. Dazu werden die obere und untere Kanalwand mit den dort auftretenden Reflexionen ausmaskiert um keinen Korrelationspeak bei einem Shift von 0 px zu erhalten. Dies kann ansonsten zu physikalisch

inkorrekten Geschwindigkeitsvektoren in Wandnähe führen. Es wird ein Multipass-Verfahren mit Auswertefenstern von $64 \times 64 \times \text{px}^2$ (1 Pass) bis $16 \times 16 \times \text{px}^2$ (2 PASSES) mit einem Overlap von 50% durchgeführt. Eine Variation der Größe der Auswertefenster hat ergeben, dass bei größeren Auswertefenstern Informationen der Strömung verloren gehen, und dass bei kleineren Auswertefenstern aufgrund der endlichen Anzahl von Seedingpartikeln pro Fläche kein Informationsgewinn erzielt wird. Es wird keine Vektor-Nachbearbeitung in dem Sinne durchgeführt, dass Vektoren aufgrund bestimmter Eigenschaften entfernt und die Lücken durch Interpolation der Nachbarvektoren wieder aufgefüllt werden. Die so berechneten Vektorbilder werden anschließend gemittelt und die Standardabweichungen der einzelnen Geschwindigkeiten vom Mittelwert über die Zeit beziehungsweise die Bilderreihe bestimmt.

BILD 9 zeigt das Vektorfeld einer solchen Mittelung und BILD 10 die dazugehörigen Standardabweichungen. Die Strömung bewegt sich bei diesem und allen folgenden Abbildungen von links nach rechts. Zur besseren Darstellung ist nur jeder vierte Vektor in x- sowie y-Richtung dargestellt. Dargestellt ist eine Strömung mit einem Volumstrom von 50 l/min und einer Wassertemperatur T_b von 303 K. Es liegt keine Aufheizung durch die untere Wand vor und die Wände werden als adiabat betrachtet.

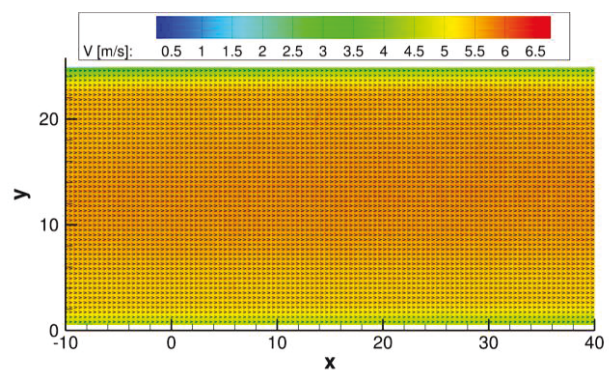


BILD 9. Geschwindigkeitsvektorfeld der Strömung ohne beheizte Unterseite.

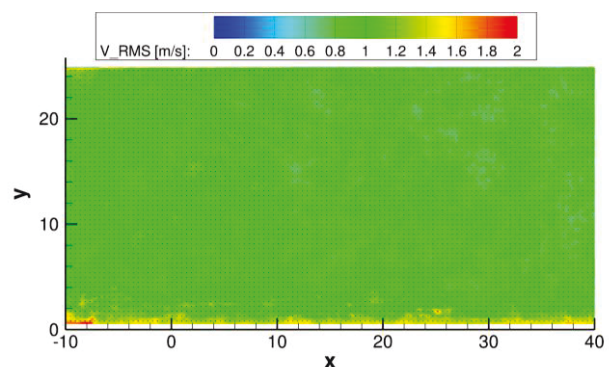


BILD 10. Standardabweichungen des Geschwindigkeitsvektorfelds der Strömung ohne beheizte Unterseite.

Deutlich sind in BILD 9 die Geschwindigkeitsgrenzschichten an der unteren und oberen Wand zu erkennen. Zudem zeigt diese Abbildung die Gleichförmigkeit der Strömung entlang der Strömungsrichtung. In BILD 10 ist gut die Gleichmäßigkeit der Standardabweichung der Geschwindigkeitsvektoren gezeigt.

BILD 11 zeigt das über x gemittelte Geschwindigkeitsprofil und die Standardabweichung bei der Kanalströmung ohne beheizte Wand des gerade betrachteten Falls bei einem Volumenstrom von 50 l/min und einer Wassertemperatur von $T_b=303$ K.

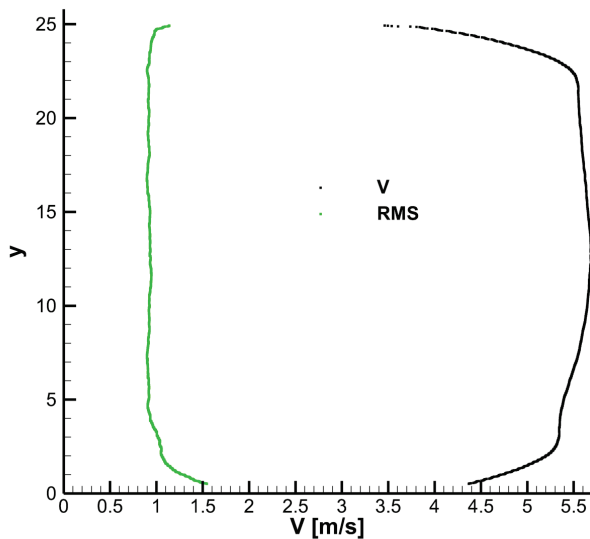


BILD 11. Gemittelte Geschwindigkeitsprofil und Standardabweichung des Geschwindigkeitsvektorfelds der Kanalströmung ohne beheizte Wand.

Sichtbar ist auch hier die Geschwindigkeitsgrenzschicht an der unteren als auch oberen Wand des Kanals. Aufgrund der Reflexionen des Laserlichtschnitts an der Kanalunterseite ist die Geschwindigkeitsgrenzschicht an der Kanalunterseite nicht so weit aufgelöst wie die Geschwindigkeitsgrenzschicht an der oberen Wand. Zwei Merkmale der Geschwindigkeitsgrenzschicht sind besonders auffallend. Da es sich hier um eine Strömung ohne beheizte Wände handelt und die Wände als adiabat angenommen werden ist eine zur Mittelachse bei $y=12,9$ mm des Kanals symmetrische Strömung zu erwarten. Dies ist jedoch, wie in BILD 11 zu erkennen, nicht gegeben. Stattdessen ist die Strömung auf beiden Seiten der Mittelachse verschieden. Nichts desto trotz liegt das Maximum der Geschwindigkeit genau auf der Mittelachse. Die zweite Auffälligkeit ist das Plateau in der Geschwindigkeitsgrenzschicht bei $y=3$ mm. Das Plateau ist in abgeschwächter Form ebenfalls bei $y=22,8$ mm zu erkennen.

Die Standardabweichung im Strömungsfeld außerhalb der Grenzschichten ist im Bereich von kleiner 1 m/s und homogen in x sowie in y Richtung. Der daraus resultierende Turbulenzgrad T_U beträgt etwa 16 %. In der unteren Grenzschicht erhöht sich die Standardabweichung auf Werte von 1,55 m/s, in der oberen Grenzschicht auf 1,16 m/s.

Die Vermessung der Kanalströmung wurde mit größter Sorgfalt und Genauigkeit durchgeführt. Der Versuchsaufbau wurde präzise durchgeführt (siehe Kapitel 4.2), sodass der Grund für das asymmetrische Geschwindigkeitsprofil durch einen falschen Aufbau ausgeschlossen werden kann.

Die unterschiedliche Rauheit der oberen und unteren Wand des Kühlkanals ($R_{a,oben} = 0,041 \mu\text{m}$; $R_{a,unten} = 0,341 \mu\text{m}$) kann, obwohl beide Wände als hydraulisch glatt betrachtet werden können, ein Grund für das asymmetrische Geschwindigkeitsprofil darstellen. Zwischen dem Vorlauf und der geraden Messstrecke ragt ein Temperatursensor wenige Millimeter in die Strömung. Der Temperatursensor hat einen Durchmesser von 1,5 mm. Der Messbereich befindet sich allerdings 375 mm nach dieser kleinen Störung, sodass davon ausgegangen werden kann, dass keine Einflüsse des Temperatursensors in der Strömung mehr vorhanden sind und der Temperatursensor nicht das asymmetrische Geschwindigkeitsprofil bedingt.

BILD 12 zeigt zusätzlich zu dem Fall mit adiabater Wand die über x gemittelten normierten Geschwindigkeitsprofile verschiedener Wasser- und Wandtemperaturen bei konstantem Volumenstrom von 50 l/min. Der Fall mit der Wandtemperatur $T_w = 373$ K ist dabei die oben beschriebene Konfiguration 1. Die qualitativen Geschwindigkeitsprofile sind in allen Fällen ähnlich und weisen die gerade beschriebenen Merkmale auf. Im Gegensatz zu dem Fall mit adiabater Wand ist bei den Fällen mit beheizter Wand festzustellen, dass die Grenzschichten an der beheizten Wand größer sind. Im Gegenzug ist die Grenzschicht des unbeheizten Falls an der oberen, immer unbeheizten, Wand kleiner als die der Fälle mit beheizter unterer Wand.

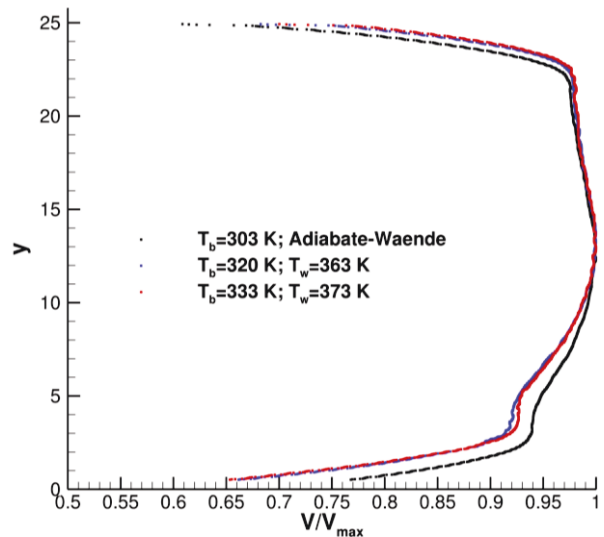


BILD 12. Gemittelte und normierte Geschwindigkeitsprofile der Kanalströmung für verschiedene Randbedingungen.

5.2. LIF

Die LIF-Daten werden in mehreren im Folgenden beschriebenen Schritten ausgewertet. Während der Messkampagne wurde eine Bildreihe mit geschlossener Kame-

ralinse aufgenommen. Dadurch wurde das Dunkelrauschen, welches insbesondere durch den Dunkelstrom hervorgerufen wird, quantifiziert. Die Bilder dieser Bildreihe wurden anschließend gemittelt und es liegt somit ein durchschnittliches Hintergrundbild vor. Alle weiteren Aufnahmen wurden durch Subtraktion dieses Hintergrundbildes von dem Dunkelrauschen bereinigt.

Als nächster Schritt wurde eine Lichtschnittkorrektur erstellt. Diese ist erforderlich, da der Laserlichtschnitt gegebenenfalls keine homogene Ausleuchtung des Interessengebiets bietet. Diese Inhomogenitäten des Lasers würden ohne Korrektur zu systematischen Fehlern führen. Für die Lichtschnittkorrektur wurde die Fluoreszenz des Rhodamin B in der Strömung bei gleicher Temperatur, also mit adiabater Wand, betrachtet. Die Mittelung einer solchen Bildreihe führt demnach zu einem Referenzbild und wurde für die Lichtschnittkorrektur verwendet. Diese Lichtschnittkorrektur wurde, nach Subtraktion des Hintergrundbildes, bei jeder weiteren Aufnahme angewendet.

Als weiterer Punkt wurde eine Temperaturkalibrierung erstellt, die jeder Intensität der Fluoreszenz eine Temperatur zuordnet. Dazu wurden Aufnahmen bei bekannten, variierenden Wassertemperaturen mit adiabater Wand erstellt. Die Kalibrierung direkt in der Messstrecke hat gegenüber einer externen Kalibrierung den Vorteil, dass alle optischen Komponenten identisch zu den eigentlich Messungen sind und so gleiche Bedingungen vorherrschen. Die erstellte Temperaturkalibrierung ist in BILD 13 gezeigt. Die Intensität nimmt um etwa 2 % pro Kelvin ab. Dieser Wert entspricht damit Werten in der Literatur, siehe zum Beispiel [11].

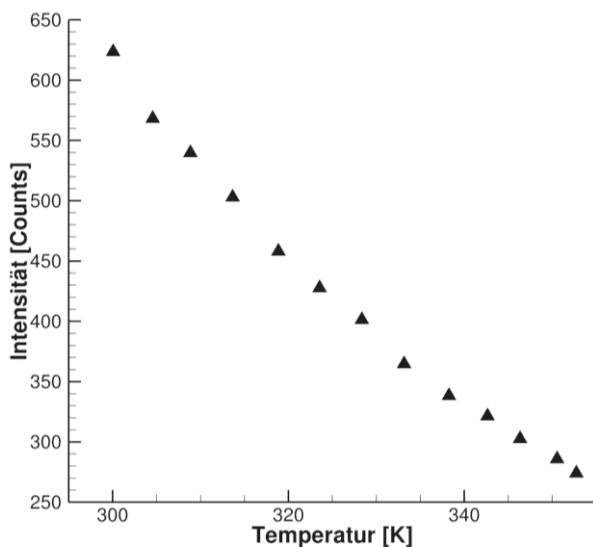


BILD 13. Temperaturkalibrierung.

Temperaturen über dem bei der Kalibrierung vorliegenden Temperaturmaximum von 352 K werden extrapoliert. Eine höhere Maximaltemperatur ist bei der Kalibrierung im Prüfstand nicht möglich, da ansonsten die Festigkeit des PMMA nicht mehr gewährleistet ist. Bei jeder Messung wird zudem die Wassertemperatur T_b vor der beheizten Messstrecke gemessen, sodass durch eine In-Situ Kalibrierung systematische Abweichungen, die beispielsweise

durch das Ausbleichen des Rhodamin B entstehen können, korrigiert werden können.

BILD 14 zeigt beispielhaft die über x gemittelte Temperaturverteilung in dem generischen Kühlkanal. Dabei beträgt die Wassertemperatur $T_b=320$ K, die Wandtemperatur $T_w=363$ K und der Volumenstrom 50 l/min. Die Temperaturverteilung wurde mit einem Savitzky-Golay-Filter zweiter Ordnung über 51 Pixel geglättet. Dadurch werden einzelne Ausreißer eliminiert, der grundsätzliche, qualitative und quantitative, Verlauf des Temperaturprofils bleibt jedoch bestehen.

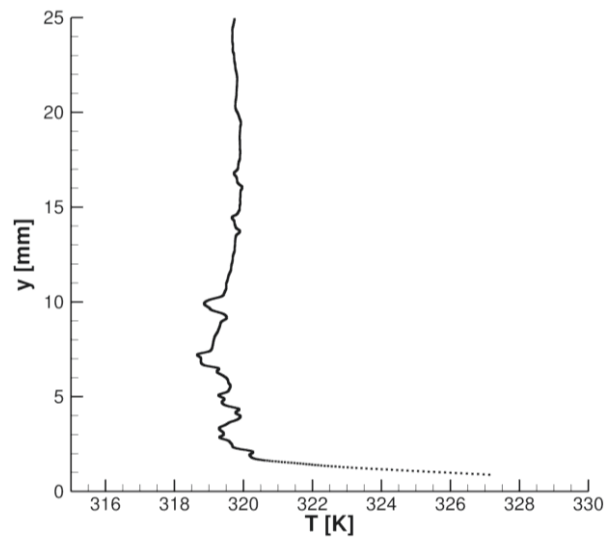


BILD 14. Temperaturprofil bei beheizter Wand.

Deutlich zu erkennen ist die homogene Temperaturverteilung bei $y > 10$ mm, die den Wert der mittleren Wassertemperatur von $T_b = 320$ K annimmt. Einzelne Ausreißer in der Temperaturverteilung sind einzelnen Schmutzpartikeln geschuldet.

Im Bereich $3 < y < 10$ wurde eine leicht schwankende Temperatur gemessen. Dies ist ebenfalls der Bereich, in dem das Plateau des Geschwindigkeitsfeldes liegt.

Deutlich sichtbar ist die Temperaturgrenzschicht im Bereich $y < 3$ mm. Hier steigt die Temperatur auf einen gemessenen Maximalwert von 327 K bei $y = 0,88$ mm an. Die Temperatur wird bei sinkendem Abstand zur beheizten Wand weiter zunehmen, dieser Bereich ist jedoch wegen störenden Reflexionen auf der unteren Kanalwand ausmaskiert.

6. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Ein Prüfstand für Wärmeübergangs-Versuche an einer generischen Kühlkanal-Geometrie wurde entworfen, mit dem die Kühlkanalströmung mittels hochwertiger optischer Feldmesstechnik (PIV und LIF) untersucht werden kann. Der Versuchsaufbau dient dabei unter anderem der Schaffung einer Validierungsplattform für Simulationen. Die Auslegung des Kanals erfolgte unter Berücksichtigung diverser Anforderungen und Einschränkungen. Aus diesen Bedingungen ergibt sich, dass eine Kühlkanalgeo-

metrie mit einer Breite von 6 mm, einer Höhe von 25,8 mm und einer Länge von 600 mm am besten geeignet ist. Die Konstruktion und die Qualifikation des Experiments wurden dargelegt. Es wurde gezeigt, dass die Randbedingungen des Experiments sehr genau definiert werden können. Demnach ist der Versuch als Referenzexperiment geeignet. Die verwendete Messtechnik (PIV, LIF) wurde beschrieben und der Messaufbau dargelegt. Die Vorgehensweise der Auswertung der Messergebnisse wurde detailliert dargelegt.

Mit der PIV-Messtechnik ist es möglich ein Geschwindigkeitsvektorfeld der Strömung zu erstellen. Die Datenerfassung als auch die Datennachbearbeitung und Datenauswertung sind problemlos möglich. Es wurden ein Geschwindigkeitsvektorfeld, die Standardabweichungen des Geschwindigkeitsvektorfelds und Profile dieser Felder mit unbeheizter Wand gegeben. Die Geschwindigkeitsgrenzschichten an der oberen und unteren Kanalwand sind erkennbar und der Turbulenzgrad in der Strömung außerhalb der Geschwindigkeitsgrenzschichten wurde zu 16 % bestimmt. Das Geschwindigkeitsprofil ist asymmetrisch. Dies kann auf die unterschiedlichen Rauheiten der oberen und unteren Kanalwand zurückgeführt werden. Eine Variation der Wandrauheit der beheizten Wand wird daher angestrebt. Es wurden Geschwindigkeitsprofile mit beheizter Wand im Vergleich zu dem Fall mit unbeheizter Wand gezeigt. Die Geschwindigkeitsprofile der beheizten Fälle unterscheiden sich von dem des unbeheizten Falls. So ist etwa die Geschwindigkeitsgrenzschicht an der beheizten Wand größer als bei dem Fall mit unbeheizter Wand. An der unteren (beheizten) Wand des Kanals treten Reflexionen des Laserlichtschnitts auf. Dadurch kann in Wandnähe keine Auswertung erfolgen. Es wird daher angestrebt, diese Reflexionen in zukünftigen Versuchen zu vermeiden. Möglichkeiten dazu sind zum Beispiel das schräge Einbringen des Laserlichtschnitts, so dass der Laserlichtschnitt nicht orthogonal auf die Wand trifft. Eine weitere Methode, mit der die Reflexionen verringert werden können, ist die Verringerung der Oberflächenrauheit der Temperaturdüse. Der einfallende Laserlichtschnitt wird auf einer sehr glatten Oberfläche mehr gespiegelt und weniger gestreut als das bei Oberflächen mit einer größeren Rauheit der Fall ist.

Die LIF-Messtechnik wurde in dem generischen Kühlkanal angewendet. Das Problem bei der Datenerfassung liegt in der notwendigen präzisen Erfassung von Helligkeiten, die sehr sensibel auf alle Art von Störungen ist. Die Datennachbearbeitung- und Auswertung ist mit der beschriebenen Methode möglich. Eine Intensitäts-Temperatur-Kurve wurde erstellt. Die Intensität nimmt um ca. 2 % je steigendem Kelvin ab. Ein Temperaturprofil der beheizten Kanalströmung wurde gezeigt. Die durchschnittliche Wassertemperatur und die Temperaturgrenzschicht konnte dargestellt und aufgelöst werden. Dabei wurden sinnvolle mittlere Profile bestimmt, mit der bislang verwendeten Ein-Farben Technik ist jedoch die Messung eines instantanen Temperaturfeldes nicht sinnvoll möglich. In zukünftigen Versuchen soll die bereits beschriebene Zwei-Farben LIF-Technik angewendet werden, um die Sensitivität der Messung zu erhöhen.

Die Daten der PIV- und LIF-Messungen werden zeitsynchron aufgenommen. Daher ist das langfristige Ziel auch eine Betrachtung der instantanen Zustände der Geschwindigkeit und der Temperatur durchzuführen. Des Weiteren ist derzeit nur die gerade Messstrecke vermes-

sen. Die gekrümmte Messstrecke ist ausgelegt und gefertigt und wird in zukünftigen Messkampagnen vermessen werden.

DANKSAGUNG

Diese Arbeit wurde im Rahmen des Sonderforschungsbereichs Transregio 40 durchgeführt und durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) finanziert.

LITERATUR

- [1] Riccius, J., Haidn, O., Zametaev, E.: *Influence of Time Dependent Effects on the Estimated Life Time of Liquid Rocket Combustion Chamber Walls*. In: 40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Seiten 1-12, 2004
- [2] Meyer, M. L.: *The effect of cooling passage aspect ratio on curvature heat transfer enhancement*. NASA TN 107426, 1997
- [3] Neuner, F., Preclik, D., Popp, M., Funke, M., Kluttig, H.: *Experimental and analytical investigation of local heat transfer in high aspect ratio cooling channels*, AIAA-Paper 1998-3439-123, 1998
- [4] Knab, O., Wiedmann, D.: *TR-40 Test Case Thrust Chamber: 40 kN LOX/H₂ Rocket Thrust Chamber*, 2009
- [5]: Pasquariello, V.: Persönliche Kommunikation, Lehrstuhl für Aerodynamik der TU München, Mai 2013.
- [6] MEYER, M. L.: *Electrically Heated Tube Investigation of Cooling Channel Geometry Effects*. NASA TM 106985, 1995
- [7] Gersten, K.: *Fully Developed Turbulent Pipe Flow*. In Merzkirch, W. (Hrsg): *Fluid Mechanics of Flow Metering*. Springer Verlag 2005, Seiten 1-22
- [8] Sigloch, H.: *Technische Fluidmechanik*, 8. Auflage, Springer Verlag, 2012
- [9] Lohrengel, J. ; Todtenhaupt, R.: *Wärmeleitfähigkeit, Gesamtemissionsgrade und spektrale Emissionsgrade der Beschichtung Nextel-Velvet-Coating 811-21 (RAL 900 15 tiefschwarz matt)*. In: PTB-Mitteilungen, Band 106, Nr. 4 (1996), S. 259-265
- [10] Raffel, M., Willert, C.E., Wereley, S.T., Kompenhans, J.: *Particle Image Velocimetry: A Practical Guide*, 2. Auflage, Springer Verlag, 1998
- [11] Coolen, M. C. J., Kieft, R. N., Rindt, C. C. M., Van Steenhoven, A. A.: *Application of 2-D LIF temperature measurements in water using a Nd:YAG laser*. In: Experiments in Fluids, Band 27, Nr. 5 (1999), Seiten 420-426