

Particle Image Velocimetry (PIV)

Dominik Huber, Simon Heinzmann, Hannes Albers

Experimental Methods for Engineers

ETH Zürich, D-MAVT, Group 26, 11.2019

1. Einleitung

Mit der zunehmenden Entwicklung von numerischen Methoden und bildgebenden Verfahren im letzten Jahrhundert, hat sich die PIV Methode als eine der geeignetsten Techniken zur Untersuchung von Strömungsfeldern etabliert. Ohne eine umfangreiche Kalibrierung des Versuchsaufbaus erhält man so eine gute Annäherung des Geschwindigkeitsfeldes. In unserem Versuch haben wir den Marangoni-Effekt in Paraffinöl untersucht. Zwei Phänomene finden beim Marangoni-Effekt statt, falls eine Temperaturdifferenz in einem Fluid herrscht. Generell bekannt als Auftrieb, treibt das erwärmte Fluid mit geringerer Dichte entgegen dem Gravitationsfeld. Der Marangoni-Effekt ist neben der Temperatur auch von der Oberflächenspannung abhängig. Es findet eine Strömung von der schwächeren zur stärkeren Oberflächenspannung statt. Wir haben die Positionen, der sich im Fluid befindenden Partikel, zu verschiedenen Zeiten mit einer Kamera aufgezeichnet und die wahrscheinlichsten Verschiebungen dieser Partikel von einer Instanz zur anderen bestimmt. Den Mittelwert der möglichen Geschwindigkeiten bzw. der wahrscheinlichsten Verschiebungen haben wir in einem Vektorfeld schlussendlich dargestellt. Durch die Anpassung unserer Parameter und Filter in Bezug auf window, subwindow, Correlation-map-sizes, Allowable maximal shifts und threshold für Correlation-peaks, ergab unsere Analyse genaue Näherungen.

2. Versuchsaufbau

2.1 Die Mischung und Zelle

Für dieses Experiment wurde unser Fluid Paraffinöl mit Polyamid Partikel vermischt. Wichtig hierbei war, dass die Partikel ungefähr die gleiche Dichte haben wie das entsprechende Fluid. Um eine gleichmässige Strömung zu erzeugen wurde die Zelle an der rechten Seite mit 0.5 Watt Leistung erwärmt, was zum oben erwähnten Marangoni-Effekt führt, und somit das erwärmte Fluid als Resultat zusammen mit den Partikeln aufsteigt. Auf der linken Seite wird durch ein Kupferblock die Wärme wieder abgeführt (Wärme-Senke, mit Raumtemperatur) und verursacht so das absinken des Fluides auf der kühleren Seite.

2.2 Laser

Laserlicht wird verwendet, da es einerseits für einen guten Kontrast von Fluid und Partikel sorgt und andererseits weil man mit Laserlicht zusammen mit einem Pulse Synchronizer (Model 500 Pulse Generator, Berkeley Nucleonics BNC) eine extrem kurze Belichtungszeit erreichen kann (10 ms). Um die Partikel zu beleuchten wurde ein Laser mit einer Powell Linse verwendet, sodass auf den Bildern die Partikel klar vom Fluid zu unterscheiden waren. Der Lichtstrahl wurde am unteren Ende der Platte reflektiert und durch ein schwarzes Blatt abgedeckt. Der Laser spannte somit

eine dünne, zu unterscheidende Ebene auf. Um eine optimale Beleuchtung der Fluidzelle zu erhalten wurde ein Karton über die ganze Apparatur gelegt, was zudem das Risiko einer Schädigung der Augen minimierte und die Zelle vor äusserem Licht abschirmte.

2.3 Kamera

Für die Aufnahmen wurde eine digitale CCD (charged-coupled device) Kamera verwendet. Um genaue Resultate zu erzielen musste diese folgende Punkte erfüllen:

- Global Shuttering, diese stellt sicher, dass die der Sensor simultan einheitlich beleuchtet wird, anstelle der Reihe nach, was zu einem verschwommenen Bild führt.

- Der Sensor braucht eine spezifische Architektur, welche ihm kurze dead times zwischen den Frames ermöglicht, und gleichzeitig jedem Pixel die Möglichkeit gibt ein zweiten Frame einzulesen, während der Erste noch aus seinem Speicherbereich ausgelesen wird.

- des Weiteren braucht es noch eine genügend grosse Auflösung, was aber heutzutage kein limitierender Faktor mehr ist.

2.4 Synchronisation:

Aufgrund des technischen Limits der Kamera bezüglich der exposure time, können wir diese verkürzen indem wir die Fluidzelle nur während einem Bruchteil der Belichtungszeit, durch zeitgesteuerte Laserpulse beleuchten.

3. Vorgehen

3.1 Datenerhebung

Der Laser wird installiert, sodass die gesamte Messzelle beleuchtet wird. Die Heizplatte muss eingeschaltet werden. Ein schwarzer Stoff schirmt das Laserlicht ab und sorgt dafür, dass kein direktes Licht in die Kamera fällt. Bevor wir mit den Aufzeichnungen beginnen, muss noch die Frame Trennzeit berechnet werden.

$$\Delta t = \frac{L}{N_{pix}} \frac{1}{u_{max}} \delta_{max}$$

Δt : Zeit zwischen den Bildern: 0.81s

δ_{max} : erlaubte maximale Pixelverschiebung des Partikels: 10 Pixel

u_{max} : maximale Geschwindigkeit des Fluids: 0.5 mm/s:

L : Referenzlänge: 10 mm:

N_{pix} : Anzahl Pixel in der Referenzlänge: 247 Pixel

Der Laser und die Kamera werden an den Impulsgenerator angeschlossen, welcher wiederum mit dem Computer verbunden ist. Wird ein Aufnahmebefehl am Computer ausgelöst, wird ein Signal an die Kamera gesendet und wandert von dort weiter an

den Impuls Generator. Dieser sendet im richtigen Moment ein Signal an den Laser. Insgesamt werden so, in unserem Fall, 100 Bilder gemacht.

3.2 Auswertung der Bilder:

Folgende Schritte werden anschliessend durchgeführt, um die Geschwindigkeiten der von uns Daten zu bestimmen:

1. Wir konvertieren unsere Bilder vom Lichtblatt in ein Matrix, bei dem jedes Pixel einen Intensitätswert auf einer Greyscale Skala annimmt.
2. Wir subtrahieren die minimalen Intensitäten, um die minimalen Intensitäten auf Null zu verschieben, so dass die relativen Differenzen immer auf das Minimum bezogen werden, was der Hintergrund ist. Es gibt in der Zelle Partikel, die nicht wandern (zB. Verunreinigung am Glas), diese sind einerseits nicht interessant für uns und andererseits verschlechtern sie das Resultat. Deshalb werden die Pixel, welche diese Störpartikel darstellen ersetzt. Mittels einer Pixelsubtraktion in Matlab wurde dieser Störhintergrund entfernt.
3. Schritt drei definiert ein Meshgrid aus Abschnitten unserer Pixel mit einer bestimmten Breite und Höhe aus einem Vektor, der die Größe des Interrogation-windows enthält. Diese Fenster stellen einen Punkt in einem definierten Meshgrid dar. Auf Grund der grossen Teilchenstückzahl im Öl wird Untersuchungsfenster von 64 X 64 Pixel gewählt.
4. In jedem der Interrogation-windows werden kleinere sub-windows erzeugt. Der Grund für die Suche nach Gruppen und nicht nach einzelnen Partikeln ist, dass es schwierig wäre, das identische Partikel in einem dicht besetzten Fluss zu finden. Er definiert um wie viele Pixel das Untersuchungsfenster in einem Schritt bewegt wird. Der Shift ist in unserem Fall als 10 Pixel definiert.
5. Wenn wir zwei Bilder miteinander vergleichen, versuchen wir, in jedem Interrogation-window die jeweiligen Unterfenster zu vergleichen. Hier findet die sogenannte Correlation statt. Dadurch wird für jedes Teilfenster eine Correlation-map, und damit die höchste Wahrscheinlichkeit einer möglichen Verschiebung, berechnet. Dies geschieht in beiden Dimensionen (horizontal und vertikal).
6. Um den Prozess genauer zu gestalten, können wir eine so genannte "Sub-Pixel-Interpolation" durchführen. Diese muss durchgeführt werden, da Partikel, d.h. die resultierenden Spitzen in der Correlation-map, meist größer als ein Pixel sind und mehrere Pixel auf einmal belegen würden. Durch die Anpassung einer geeigneten Funktion, wird eine höhere Genauigkeit erreicht.
7. Die berechneten Verschiebungen in horizontaler und vertikaler Richtung stellen den Geschwindigkeitsvektor dar. Da die Zeit zwischen beiden Verschiebungen ebenfalls bekannt ist aus der Zeit zwischen den Aufnahmen, kann so daraus das Geschwindigkeitsfeld erstellt werden.

Interrogation-window size	64×64
Maximum Window-shift	16×16
Window-offset	0.5×0.5
max search size	10×10
Threshold: Direct Vector Map Averaging	0.3
Threshold: Correlation Map Averaging	0.3

Tab. 1: Ausgewählte Parameter der PIV-Base Funktion für die Nachbearbeitung in MATLAB

4. Resultate

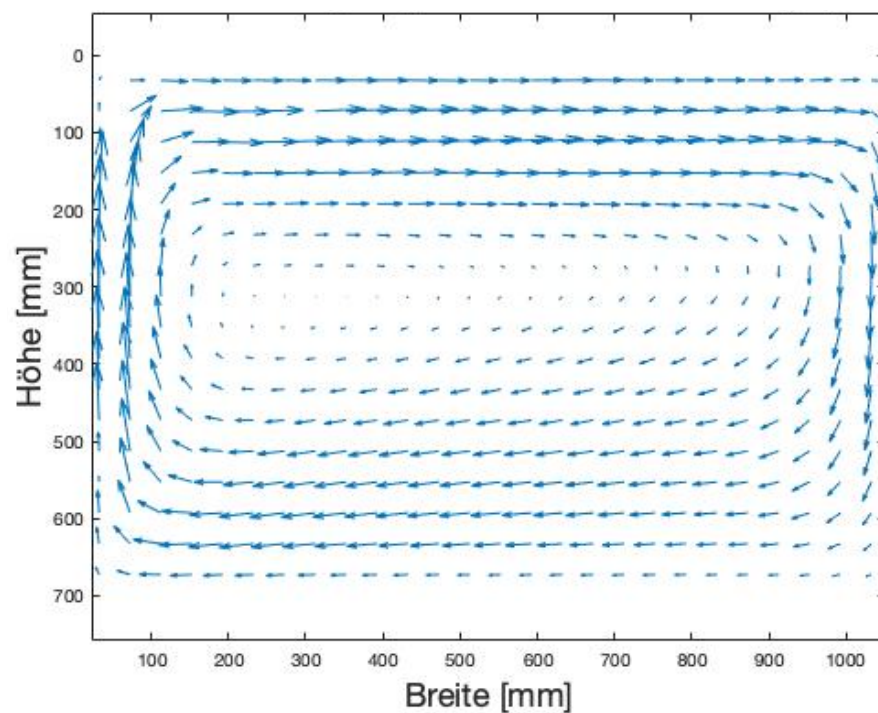


Abb. 1: Berechnete Geschwindigkeitsvektoren für die Zelle mit Correlation-map Averaging Technik

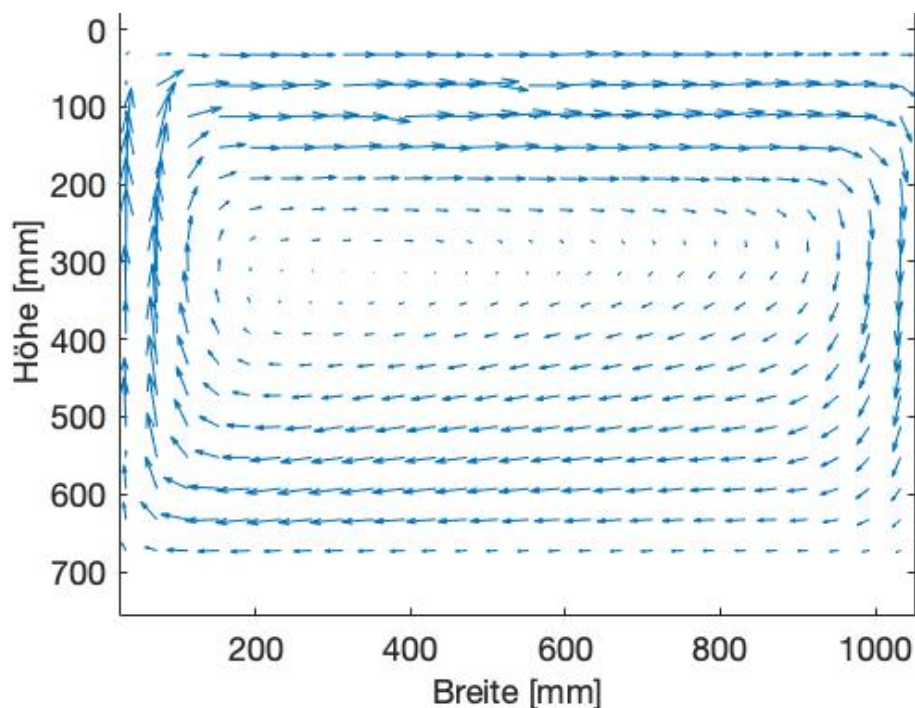


Abb. 2: Berechnete Geschwindigkeitsvektoren für die Prü fzelle ohne Correlation-map averaging Technik

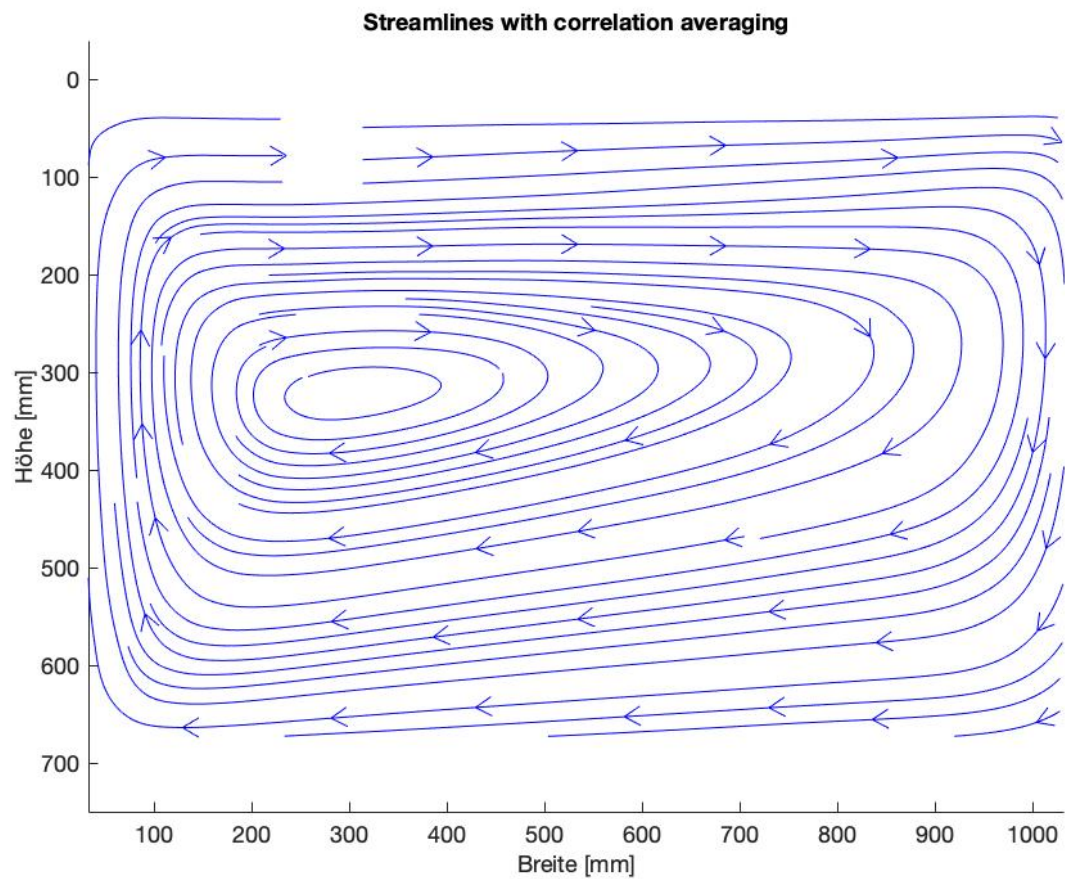


Abb. 3: Stromlinien mit Correlation-map averaging Technik

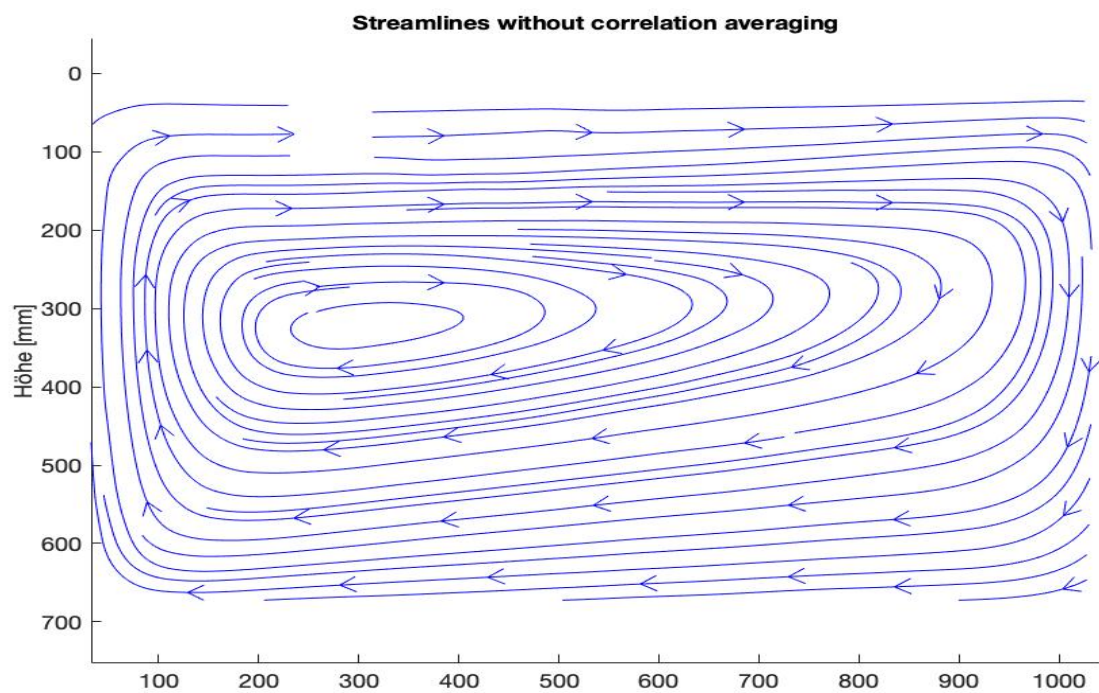


Abb. 4: Stromlinien ohne Correlation-map averaging Technik

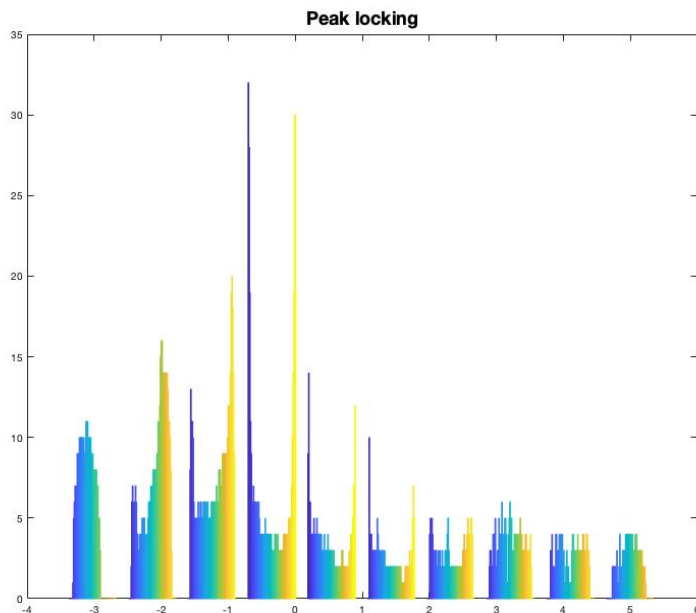


Abb. 5: Histogramm der horizontalen Pixelverschiebungen für die Correlation-map averaging Technik

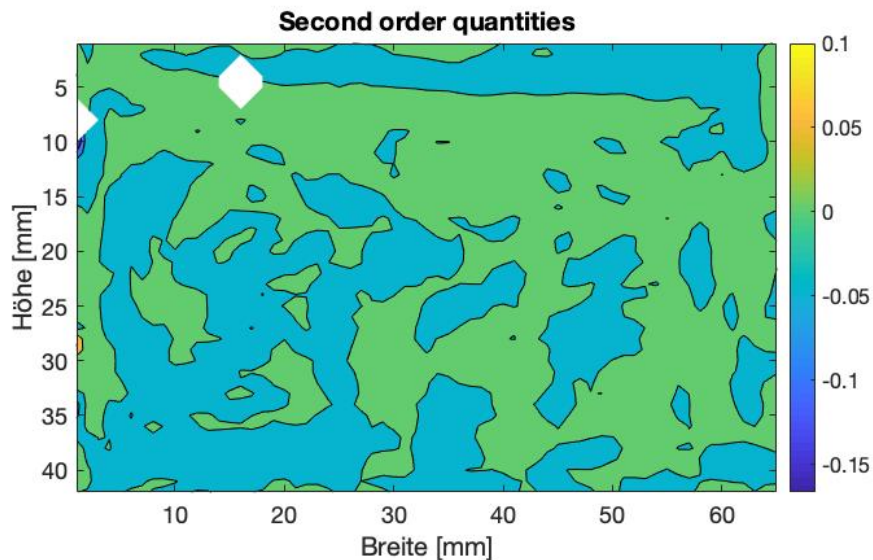


Abb. 6: Divergenz Plot für die Correlation-map averaging Methode

5. Diskussion

5.1 Das Strömungsfeld

Die grössten Geschwindigkeiten sind wie zu erwarten waren am Rand entlang der Heizplatte, dort wird das Fluid aufgrund der Thermik beschleunigt (siehe Abb. 1 und 2). In der Mitte der Zelle hat das Fluid fast keine Geschwindigkeiten. Ein Correlation-map averaging Wert von 0,3 und Window-shift Wert von 0.5 wurden als die besten Parameter bestimmt, um das gesamte Vektorfeld ohne fehlende oder Ausreißervektoren zu berechnen.

5.2 Die Stromlinien

Die resultierenden Stromlinien für die gegebenen Parameter sind in den Abb. 3 und 4 dargestellt. Man sieht praktisch ungestörte, laminare Strömung. Am oberen Rand sind einige Stromlinien unterbrochen. Vermutlich ist dieses "Loch" bei der Berechnung der Stromlinien entstanden. Es könnte sein, dass gewisse Einträge in

der Verschiebungsmatrix aufgrund des Trashholds nicht übernommen worden sind. Dies ist in unserem Fall nicht unerwünscht. Denn die dort berechneten Verschiebungen machen physikalisch keinen Sinn. Ansonsten kann man fast keine Unterschiede ausmachen zwischen den Stromlinien mit und ohne Correlation-map averaging. Gut zu erkennen ist, dass auch die Stromlinien innerhalb der Randregionen sehr gut berechnet wurden, obwohl die Geschwindigkeit dort sehr gering ist. Dies ist auch die Erklärung, dass nicht die Stromlinien des Marangoni-Effekts mit der PIV Methode nicht beliebig nahe im Zentrum der Zelle berechnet werden können.

5.3 Divergenz des Verschiebungsfeldes

Das der Bereich der Divergenz leicht um 0 variiert (Abb. 6), ist damit zu erklären, dass weder Quellen noch Senken vorhanden sind in der Zelle. Aus der Theorie der Kontinuumsmechanik ist jedoch bekannt, dass für inkompressible Strömungen die Divergenz Null sein muss. Wir sehen, dass dies für den gesamten Abschnitt eindeutig nicht der Fall ist, es sind Schwankungen sichtbar. Eine mögliche Erklärung dafür ist, dass unsere Werte für die Verschiebungen fehlerbehaftet sind. Eine Erhöhte Divergenz am linken Rand ist mit dem dort herrschenden höheren Geschwindigkeitsgradienten zu erklären. Das Loch im oberen, linken Bereich entstand in Folge früher entstandenen Lochs im Strömungsfeld.

5.4 Einfluss der Mittelung

Der Einfluss der Correlation-map-averaging ist beim Vergleich der beiden Strömungsfelder kaum auszumachen. Vermutlich wird der Effekt des Correlation-map averaging erst bei der Berechnung des Strömungsfeldes anhand von nur wenigen Bildern einen Unterschied machen. Da wir in unserem Versuch aber 100 Aufnahmen verwendet haben, hat die Direct-vector-map averaging Methode auch gute Werte ergeben bei der Berechnung der Verschiebungen.

5.5 Eignung von PIV für das gemessene Strömungsfeld

Aufgrund der langsamen Strömung und dem kleinen Medium eignet sich die PIV Methode sehr gut um das Experiment durchzuführen. Vor allem da Unreinheiten in dem Fluid gut durch die verwendete Methode in der Bildbearbeitung kompensiert werden konnte. Die PIV- Methode wird heutzutage meist zu Forschungszwecken verwendet. Ein Praxisbeispiel ist die Klimatisierung eines Fahrzeugs für den Insassenkomfort. Wichtig für das Empfinden der Klimatisierung sind einerseits Temperatur- und Luftverteilung, andererseits speziell bei den Düsen die Ausströmrichtung und Geschwindigkeit. Das Auströmungsverhalten einer Düse hat anscheinend einen Einfluss auf das Wohlbefinden der Fahrgäste. Zu hohe Strömungsgeschwindigkeiten werden teilweise als unangenehm wahrgenommen (Zugerscheinung), zu geringe Strömungsgeschwindigkeiten können aber auch eine zu geringe Leistungsfähigkeit der Klimaanlage bedeuten. Um das Verhalten der Düse genau zu analysieren wird hierbei die PIV-Technik erfolgreich verwendet.

Die zeitnahe Analyse und Visualisierung des Strömungsfeldes ist die Grundlage für einen schnellen Optimierungsprozess. Aus diesem Grund wird die PIV-Technik innerhalb von Entwicklungsprojekten mit strömungstechnischen Problemstellungen eingesetzt.

5.6 Grenzen der PIV-Technik und mögliche Ansätze zu ihrer Überwindung

Die PIV Methode kann nur für laminare Strömungen angewendet werden. Denn die Partikelmuster, welche Matlab benutzt um Korrelationen zwischen den Bildabfolgen herzustellen, kann für turbulente Strömungen nur aufwendig bis unmöglich nachverfolgt werden. Für sehr schnelle Strömungen und somit auch Bildabfolgen, kann die Kamera der limitierende Faktor sein. Diese, trotz globalem Shutter, kann das Bild nicht genug schnell generieren. Als Resultat erscheinen die Pixel verschwommen. Um diesem Effekt entgegenzuwirken kann der Laser mit einer viel kürzeren Pulszeit, im Vergleich zur Kamera, betrieben werden, sodass die beleuchtete Ebene nur während einem Teil eines Schnappschusses aufleuchtet und die Partikel in einer Position festhält.

Ein leistungsfähigeren Computer hätte in unserem Fall eine höhere Auflösung ergeben. Für wesentlich komplexere Studien könnte ein sehr schnelles Rechenggerät oder ein effizienterer Algorithmus diese Velocimetry-Technik optimieren. Ein Nachteil des verwendeten PIV-Aufbaus ist, dass man nur zweidimensionale Strömungen untersuchen kann. Eine Lösung für dieses Problem wäre ein zusätzlicher Kameraaufbau um die Messungen der Trajektorien aus verschiedenen Winkeln (Stereo PIV) durchzuführen. Auch das Einbringen von Tracerpartikeln in das System, auch wenn sie nur geringfügige Verzerrungen verursachen würden, kann problematisch sein. Für verschiedene Flüssigkeiten kann es schwierig sein, Partikel zu finden, die mit der Dichte der untersuchten Flüssigkeit übereinstimmen. Ein weiterer Nachteil der PIV Methode ist, dass nicht beliebig langsame Strömungen visualisiert werden können. Für solche Strömungen, wie zum Beispiel Schleichströmungen, eignet sich die Background Oriented Schlieren (BOS) Methode passender.

6. Fazit

Die PIV-Methode ist sowohl für die Strömungsvisualisierung als auch für qualitative Messungen gut geeignet. Die Sub-window-interpolation funktioniert jedoch nur bei stationären Strömungen wie in diesem Experiment. Die PIV-Methode erfordert klare Versuchseigenschaften: Das Fluid muss transparent sein, die Partikel in der Strömung müssen klein sein, sowie die gleiche Dichte wie das Fluid und einen starken Kontrast zur Strömung aufweisen. Ein grosser Nachteil dieser Methode ist, dass sie stark von der Rechenleistung des Computers abhängt: Wenn größere Strömungen untersucht werden, oder die Genauigkeit hoch sein muss, stösst man auf Rechengrenzen, vor allem wenn 3 Dimensionale Strömungen untersucht werden müssen.