

# Masterarbeit

# Laseroptische Fallfilmuntersuchungen

**Vorgelegt von:**

Mag. Alexandra Wegleitner  
9630599

**Betreuer/Gutachter:**

Univ.-Prof.Dipl.-Ing.Dr.-Ing. Markus Lehner

Leoben, Februar 2014

## **EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG**

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Masterarbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche erkenntlich gemacht habe.

## **AFFIDAVIT**

I declare in lieu of oath, that I wrote this thesis and performed the associated research myself, using only literature cited in this volume.

## **DANKSAGUNG**

Bedanken möchte ich mich beim ganzen Team des Verfahrenstechnikinstitutes, hier insbesondere bei meinem Betreuer Herr Prof. Lehner, der mir immer mit Rat und Tat zur Seite gestanden ist und für meine Situation Verständnis aufgebracht hat. Auch sollte Herr Hannes Rieder erwähnt werden, da wir bei den Versuchen ein sehr tolles Team abgegeben haben und er mir mit seiner Hilfe einige Fahrten nach Leoben erspart hat.

Ein großes Dankeschön gebührt meiner Familie und da vor allem meiner 3jährigen Tochter Ranja Marie, da sie in den letzten Wochen sehr oft auf mich verzichten musste.

# **Kurzfassung**

## **Laseroptische Fallfilmuntersuchungen**

Filmströmungen sind freie Strömungen entlang einer ebenen oder gekrümmten Oberfläche und spielen in vielen industriellen Prozessen eine wichtige Rolle. Auf diesem Gebiet wurden vor allem im Bereich der Ermittlung von Filmdicke und Filmgeschwindigkeit schon einige Arbeiten veröffentlicht.

Diese Arbeit befasst sich mit der laseroptischen Fallfilmuntersuchung. Hierbei wird mit Hilfe eines Hochleistungslasers, einer hochempfindlichen Digitalkamera, einer geeigneten Lichtschnittoptik und einer PIV-unterstützenden Software das zweidimensionale Filmgeschwindigkeitsprofil eines Fallfilms gemessen.

## **Abstract**

### **Laser optical falling film case studies**

Falling films are free flows along a planar or curved surface and play an important role in many industrial processes. In this field, the determination of film thickness and film speed, there have been published several works published.

This work deals with the laser optical film case study. Here, the two-dimensional velocity profile of a falling film, is measured with the aid of a high power laser, a high-sensitive digital camera, a suitable light sheet optics and PIV-supporting software.

# Inhaltsverzeichnis

	Seite
<b>1 EINLEITUNG .....</b>	<b>3</b>
1.1 Problemstellung .....	3
1.2 Zielsetzung .....	3
<b>2 HYDRAULIK DES FLÜSSIGKEITFILMES .....</b>	<b>4</b>
2.1 Vorkommen des Flüssigkeitsfilmes.....	4
2.2 Die Filmkennzahlen .....	5
2.3 Flüssigfilme auf glatten Oberflächen.....	5
2.3.1 Nusselt-Theorie .....	5
2.3.2 Strömungsregime und Wellenphänomene .....	7
2.4 Literaturrecherche zu optischen experimentellen Fallfilmuntersuchungen.....	9
<b>3 PARTICLE IMAGING VELOCIMETRY (PIV) IM FLÜSSIGFILM.....</b>	<b>14</b>
3.1 Grundlagen des Meßprinzipes .....	14
3.1.1 Autokorrelation (single frame / double exposure) .....	16
3.1.2 Kreuzkorrelation (double frame / double exposure).....	16
<b>4 2D-PIV MESSUNG AN EINEM RIESELFILM.....</b>	<b>18</b>
4.1 Laser Litron LDY 303HE PIV .....	18
4.2 Kamera – Imager pro HS4M .....	19
4.3 Laserführungsarm.....	20
4.4 Lichtschnittoptik .....	22
4.5 High Speed Controller.....	23
4.5.1 DaVis 8.1 Software .....	25
4.6 Versuchsaufbau .....	25
4.6.1 Versuchsanlage .....	27
4.6.2 Verwendete Einstellungen für PIV Messungen .....	27
4.7 Versuchseinstellungen und Versuchsergebnisse .....	27
4.7.1 Recording .....	28

4.7.2	Kalibrierung des Kamerabildes .....	31
4.7.3	Laser.....	39
4.7.4	Rohbildaufnahme.....	40
4.7.5	Vektorkalkulation .....	43
4.7.6	Versuchsergebnisse .....	71
<b>5</b>	<b>DISKUSSION DER ERGEBNISSE .....</b>	<b>72</b>
<b>6</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG .....</b>	<b>73</b>
<b>7</b>	<b>VERZEICHNISSE .....</b>	<b>75</b>
7.1	Literatur.....	75
7.2	Abkürzungsverzeichnis .....	76
7.3	Formeln.....	78
7.4	Tabellen.....	78
7.5	Abbildungen.....	78

# 1 Einleitung

Fallfilme haben heutzutage in den verschiedensten industriellen Prozessen einen großen Stellenwert. Daher wird es immer wichtiger sich mit deren Messung auseinanderzusetzen. Hierzu sollte man sich im Klaren sein, dass die Kenntnis von einigen dimensionslosen Kennzahlen und von den verschiedenen Strömungsregimen und Wellenphänomenen von Vorteil ist. Außerdem sollte eine Grundkenntnis des Messsystems PIV (Particle Imaging Velocimetry) vorhanden sein. Auch der Umgang mit einem Hochleistungslaser (zur Beleuchtung), mit Digitalkameras und einer PIV-unterstützenden Software muss geübt werden, um brauchbare Ergebnisse erlangen zu können.

## 1.1 Problemstellung

Durchführung einer laseroptischen Fallfilmuntersuchung. Als Messmethode soll PIV Anwendung finden.

## 1.2 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist es sich mit der Hardware und Software zur Ermittlung von Filmgeschwindigkeiten bei Fallfilmen vertraut zu machen. Und diese Erkenntnisse dann anhand eines Beispiels genau aufzuzeigen.

Diese Arbeit soll eine Art Handbuch darstellen, mit dem ein anderer Wissenschaftler den Versuch genau nachstellen kann.

## 2 Hydraulik des Flüssigkeitsfilmes

Eine freie Strömung entlang einer ebenen oder gekrümmten Oberfläche wird Filmströmung genannt. Diese wird durch die angreifenden Massenkräfte hervorgerufen. Die nachfolgende Abbildung 1 zeigt eine schematische Zeichnung eines welligen Rieselfilmes entlang einer schrägen Wand. [1] [2]

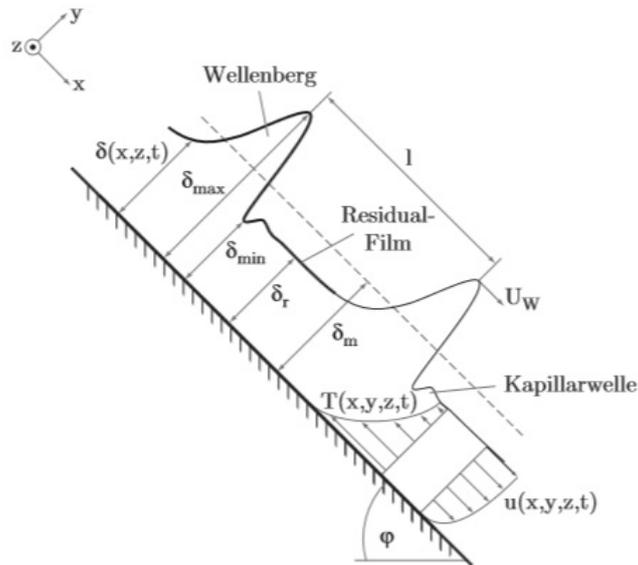


Abbildung 1: schematische Darstellung eines welligen Rieselfilmes [1]

### 2.1 Vorkommen des Flüssigkeitsfilmes

Rieselfilme spielen in vielen industriellen Prozessen eine wichtige Rolle. Durch ihre Übertragung von großen Wärme- und Stoffmengen bei geringem Druckverlust eignen sie sich besonders für Prozesse in der Energie- und Verfahrenstechnik. Hierin findet man sie hauptsächlich in Kondensatoren, in Fallfilmreaktoren bzw. – verdampfern.

Weitere Anwendungsgebiete von Rieselfilmen sind:

- Entsalzung von Meerwasser (in Fallfilmverdampfern und Füllkörperkolonnen)
- Kühlung von Milchprodukten in der Lebensmitteltechnik und von Schwefelsäure in der chemischen Industrie (Rieselfilmwärmeübertrager als Kondensatoren von Kühlaggregaten)
- thermischer Schutz vor lokaler Überhitzung von Raketentriebwerken und Reaktoren (Flüssigkeitsfilme an den Brennkammerwänden)
- Oberflächenbehandlung von Metall- und Kunststoffoberflächen

- in Brennkammern mit flüssiger Ascheaustragung in der Kraftwerkstechnik
- in der Abgasnachbehandlung [1] [3]

## 2.2 Die Filmkennzahlen

Zur Beschreibung von Rieselfilmströmungen sind einige dimensionslose Kennzahlen notwendig. Diese werden in der nachfolgenden Tabelle näher beschrieben. [1]

Tabelle 1: gebräuchliche Filmkennzahlen [1]

Name	Formel	
Reynolds-Zahl	$Re \equiv \frac{\dot{m}}{b\eta}$	Verhältnis von Trägheits- zu Reibungskräften
Kapitza-Zahl	$Ka \equiv \frac{\rho\sigma^3}{g\eta^4}$	Stoffwerte
Prandtl-Zahl	$Pr \equiv \frac{\eta c_p}{\lambda}$	Verknüpft das Temperaturfeld mit dem Strömungsfeld
Nußelt-Zahl	$Nu \equiv \frac{\alpha}{\lambda} \cdot \left(\frac{v^2}{g}\right)^{1/3}$	Wärmeübergang
Froude-Zahl	$Fr \equiv \frac{V^2}{\cos(\varphi)b^2 g \delta_m^3}$	Verhältnis von Trägheits- zu Schwerkraften
Strouhal-Zahl	$Sr \equiv \frac{f_w \delta_{max}}{U}$	Frequenz der charakteristischen Länge
dimensionslose Filmstärke	$\delta_x^+ = \delta_x \cdot \left(\frac{g \sin(\varphi)}{v^2}\right)^{1/3}$	$x = \min, r, m, \max$

## 2.3 Flüssigfilme auf glatten Oberflächen

Besonders das Verhalten von Flüssigfilmen auf glatten Oberflächen wurde schon vielfach untersucht. Die wichtigste Theorie zur Berechnung von Filmstärke und Filmgeschwindigkeit ist hierbei die Wasserhaut-Theorie von Nusselt. Damit die Nusselt-Theorie Anwendung finden kann, sind eine sehr kleine Reynoldszahl und eine glatte schubspannungsfreie Oberfläche notwendig. [4] [1]

### 2.3.1 Nusselt-Theorie

Mit der Nusselt-Theorie gilt nach Aufstellung einer Kräftebilanz folgende Differentialgleichung.

Formel 1: Differentialgleichung für einen Fallfilm bei laminarer Strömung [4]

$$\eta_f \frac{d^2 w_x(y)}{dy^2} + \rho_f g \sin \alpha = 0$$

Diese ist jedoch nur für einen gravitationsgetriebenen flüssigen Fallfilm auf einer glatten Oberfläche und unter der Annahme einer newtonschen, inkompressiblen Flüssigkeit bei laminaren Strömungen gültig.

Als Lösung von Formel 1 erhält man das Geschwindigkeitsprofil von der Gas-Flüssig-Phasengrenzfläche ( $y = 0$ ) bis zur Wand bzw. der mittleren Filmdicke ( $y = \delta_N$ ):

Formel 2: Geschwindigkeitsprofil [4]

$$w_N(y) = \frac{g \sin \alpha \delta_N^2}{2 \nu_f} \left( 1 - \left( \frac{y}{\delta_N} \right)^2 \right)$$

Einen Überblick hierüber gibt die nachfolgende Abbildung.

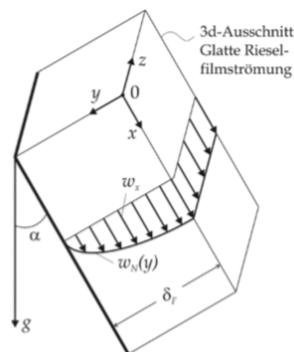


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Rieselfilmströmung auf geneigter Wand [4]

Um Formel 2 zu erhalten setzt man in Formel 1 folgende Randbedingungen ein. Die erste Randbedingung ist, dass keine Wandhaftung vorliegt ( $w_x (y = \delta_N) = 0$ ) und auch keine Schubspannung über die Filmoberfläche erfolgt ( $(dw_x/dy)_{y=0} = 0$ ). Mit der zweiten Randbedingung, dass die maximale Nusseltfilmgeschwindigkeit  $w_{N,max}$  bei  $y = 0$  liegt, erhält man aus Formel 2 nachfolgende Formel 3. [4]

Formel 3: maximale Filmgeschwindigkeit nach Nusselt [4]

$$w_{N,max}(y) = \frac{g \sin \alpha \delta_N^2}{2 \nu_f}$$

Durch Umformen von Formel 3 erhält man die Nusselt-Filmdicke.

Formel 4: Nusselt-Filmdicke [4]

$$\delta_N = \sqrt[3]{\frac{3 \dot{V}_f \nu_f}{B g \cos \alpha}}$$

Hierzu wurde die Länge  $x = L$  und die Breite  $z = B$  gesetzt und der Flüssigkeitsinhalt mit  $V_f = B \cdot L \cdot \delta_N$  bestimmt. Somit gilt für die Phasengrenzfläche  $A = B \cdot L$  und für die Filmströmung  $V_f = w \cdot B \cdot \delta_N$ .

Obwohl sich die Ableitungen der Nusselt-Gleichungen nur auf laminare Rieselfilme mit einer kleinen Reynoldszahl von  $Re < 3 - 5$  beziehen, erreichen sie auch für höhere Reynoldszahlen  $Re < 400$  eine gute Näherung. [4]

### 2.3.2 Strömungsregime und Wellenphänomene

Da die Strömungsregime stark von den dimensionslosen Kennzahlen abhängen, ergeben sich für den Flüssigfilm unterschiedliche Strömungsregime und Wellenphänomene. Wie in Tabelle 2 ersichtlich ergeben sich drei unterschiedliche Strömungsregime mit zwei Übergangsbereichen. Diese weisen nur je nach Autor unterschiedliche Grenzen auf. [4]

Tabelle 2: Strömungsregime von Flüssigfilmen [4]

Strömungsregime	Ishigai et al. [1972]	Al-Sibai [2005]
Laminarer, glatter Film	$Re \leq 0,47 Fi^{0,1}$	$Re \leq 0,6 Fi^{0,1}$
1. Übergangsbereich	$0,47 Fi^{0,1} \leq Re \leq 2,2 Fi^{0,1}$	$0,6 Fi^{0,1} \leq Re \leq Fi^{0,1}$
Stabil welliger Film	$2,2 Fi^{0,1} \leq Re \leq 75$	$Fi^{0,1} \leq Re \leq 25 Fi^{0,09}$
2. Übergangsbereich	$75 \leq Re \leq 400$	$25 Fi^{0,09} \leq Re \leq 192 Fi^{0,06}$
Turbulente Film	$Re \geq 400$	$Re \geq 192 Fi^{0,06}$

Wie in Abbildung 3 ersichtlich bildet sich am Beginn ein laminarer Film, der anschließend in einen quasi laminaren und danach in einen turbulenten Film übergeht. Auch kann man ausgeprägte Übergangsbereiche ausmachen, die vor allem zwischen dem quasi laminaren und dem turbulenten Film sehr komplex ausfallen können. Aufgrund der unterschiedlichen Geschwindigkeiten zerfallen nach der Ausbildung der 2D nicht linearen Wellen die Wellen und es bilden sich 3D U- und V-Wellen, welche vollkommen in den turbulenten Bereich übergehen. [2]

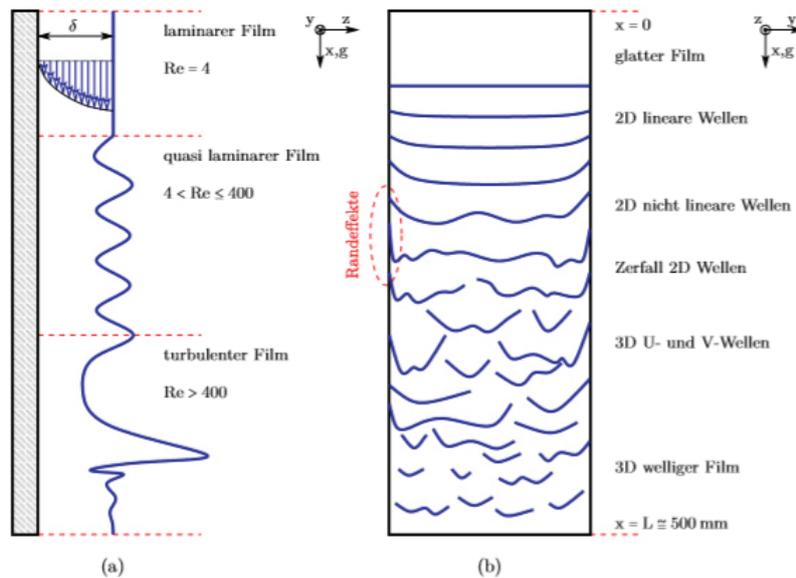


Abbildung 3: Strömungsregime des Flüssigfilmes entlang einer glatten Platte (a) in Abhängigkeit der Reynoldszahl nach Bauer (1971) (b) in Abhängigkeit der Lauflänge bei hohen Reynoldszahlen nach Helbig (2007) [2]

Eine realere Anschauung dieses Phänomens bietet Abbildung 4.

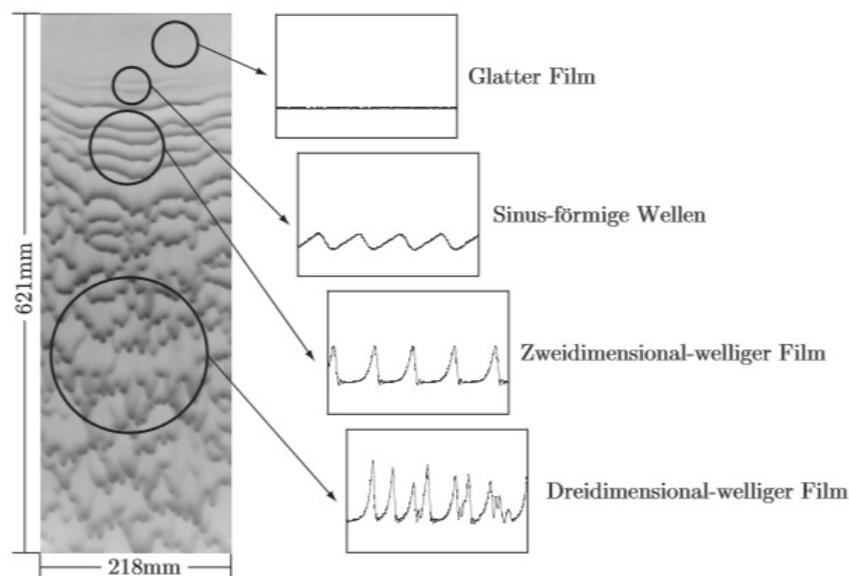


Abbildung 4: Filmkonturen eines Flüssigfilmes [1]

Da man nicht nur anhand der Reynoldszahl Strömungsregime charakterisieren kann, muss man auch die Kapitzazahl verändern. Die Auswirkungen der unterschiedlichen Reynolds- bzw. Kapitzazahlen werden in Abbildung 5 gezeigt. [1]

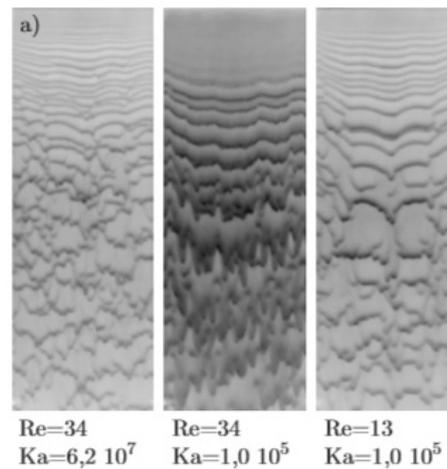


Abbildung 5: Einfluss unterschiedlicher Reynolds- und Kapitazahlen auf die Strömung [1]

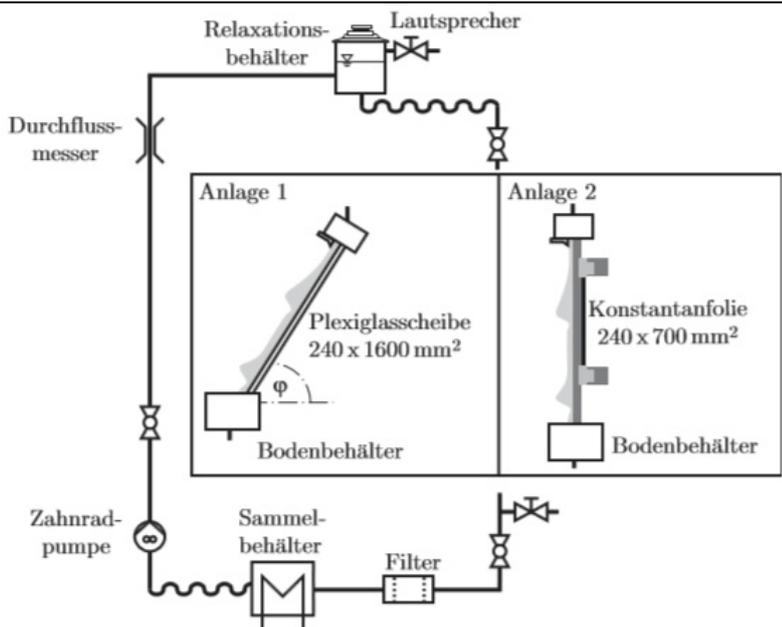
## 2.4 Literaturrecherche zu optischen experimentellen Fallfilmuntersuchungen

Um einen kurzen Überblick über die bisherigen Arbeiten zu diesem Thema zu erhalten, wurde eine umfangreiche Literaturrecherche durchgeführt. Im Mittelpunkt der Recherche standen die jeweilige Zielsetzung, die optischen Meßmethoden und der Versuchsaufbau. Beim Versuchsaufbau war es wichtig, Versuchsanlagen mit schräger Oberfläche zu finden und keine Fallrohre, wie sie früher bei den Versuchen sehr häufig verwendet wurden. Nachfolgend findet sich ein kurzer Überblick über annähernd ähnliche Versuche, wie in dieser Arbeit in Kapitel 4 beschrieben.

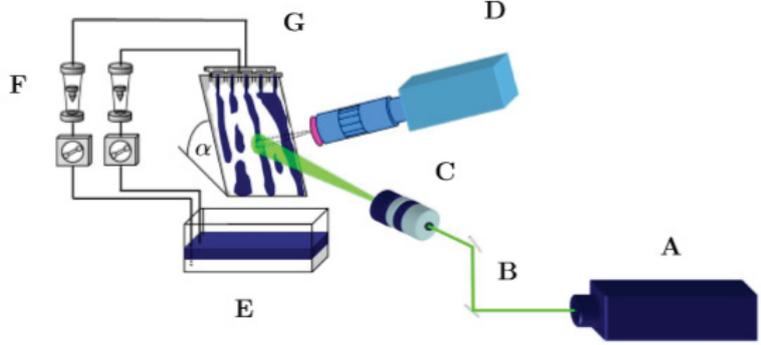
**Instantaneous hydrodynamics of a laminar wavy liquid film [5]**

<b>Autor:</b>	Moran K., Inumaru J., Kawaji M.
<b>Jahr:</b>	2001
<b>Ort:</b>	Department of Chemical Engineering and Applied Chemistry, University of Toronto
<b>Zielsetzung:</b>	Gleichzeitig Daten zur Filmdicke, zum Geschwindigkeitsprofil und zur Wandschubspannung in einer viskosen Flüssigkeit entlang einer geneigten, glatten Platte zu erhalten.
<b>Optische Meßmethoden:</b>	Highspeedvideofotographie und photochrome Farbstoffaktivierungstechnik zur Messung des momentanen axialen Profils der welligen Flüssigkeitsdicke und des Geschwindigkeitsprofils
<b>Versuchsaufbau:</b>	<p><b>LEGEND</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Constant Head Tank</li> <li>2. Overflow Line</li> <li>3. Upper Plenum</li> <li>4. Test Section</li> <li>5. Rotameter One</li> <li>6. Rotameter Two</li> <li>7. Storage Tank</li> <li>8. Liquid Pump</li> <li>9. Collection Vessel</li> <li>10. Drainage Line</li> <li>11. Filter</li> <li>12. Thermometer</li> </ol> <p>⊠ Gate, Ball Valves ⊙ Needle Valve</p>

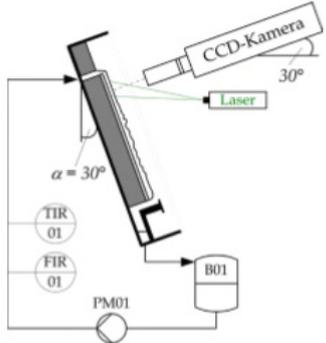
### Experimentelle Untersuchung der Strömungscharakteristik und des Wärmeübergangs bei welligen Rieselfilmen [1]

<b>Autor</b>	Al-Sibai Faruk
<b>Jahr</b>	2004
<b>Ort</b>	Fakultät für Maschinenwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
<b>Zielsetzung</b>	Hydrodynamik und Wärmetransport von Rieselfilmen
<b>Optische Meßmethoden</b>	<p>Fluoreszenz-Intensitäts-Methode zur Berechnung der Filmdicke und der Wellengeschwindigkeit</p> <p>PIV zur Messung der Filmgeschwindigkeit</p> <p>Infrarot-Thermografie zum Überprüfen des Einflusses der Welligkeit auf die Wärmeübertragung</p>
<b>Versuchsaufbau</b>	 <p>Der Neigungswinkel <math>\varphi</math> der Anlage 1 kann bis zu <math>90^\circ</math> betragen.</p>

## Experimentelle Analyse ein- und zweiphasiger Filmströmungen auf glatten und strukturierten Oberflächen [2]

<b>Autor</b>	Paschke Steve
<b>Jahr</b>	2011
<b>Ort</b>	Fakultät III – Prozesswissenschaften der Technischen Universität Berlin
<b>Zielsetzung</b>	Analyse zweiphasiger Flüssigkeitsströmungen auf geneigten Oberflächen
<b>Optische Meßmethoden</b>	Entwicklung eines neuen $\mu$ PIV-Ansatzes zur Messung der Strömungsgeschwindigkeit
<b>Versuchsaufbau</b>	 <p>A: ND:YAG-Laser, B: Spiegel, C: Lichtschnittoptik, D: CCD-Kamera mit Mikroobjektiv und Bandpassfilter, E: Vorlagebehälter bzw. Dekanter, F: Schlauchpumpen mit Rotameter, G: Feedaufgabe, <math>\alpha</math>: Plattenneigungswinkel</p>

## Experimentelle Untersuchung von Stofftransport und Fluidynamik bei Rieselfilmströmungen auf mikrostrukturierten Oberflächen [4]

<b>Autor</b>	Kohrt Martin
<b>Jahr</b>	2012
<b>Ort</b>	Fakultät III – Prozesswissenschaften der Technischen Universität Berlin
<b>Zielsetzung</b>	Einfluss mikrostrukturierter Oberflächen auf den Stofftransport
<b>Optische Meßmethoden</b>	<p>Geschwindigkeitsmessungen mit der PIV-Methode</p> <p>Filmdickenmessung mit der LIF-Methode</p> <p>Farbfadenuntersuchungen zur Visualisierung von Stromlinien</p> <p>Benetzungstests</p>
<b>Versuchsaufbau</b>	 <p>The diagram illustrates the experimental setup. A reservoir (B01) is connected to a channel with a microstructured surface, inclined at an angle <math>\alpha = 30^\circ</math>. A laser sheet is directed at the channel, and a CCD camera is positioned to capture the flow. The system includes a pump (PM01) and sensors (TIR 01, FIR 01) for flow measurement.</p>

### 3 Particle Imaging Velocimetry (PIV) im Flüssigfilm

#### 3.1 Grundlagen des Meßprinzipes

Die technischen und wissenschaftlichen Entwicklungen der Neuzeit erfordern ein neues Messsystem. Dieses sollte Geschwindigkeitsverteilungen über einen größeren Bereich eines Strömungsfeldes messen können. Aus diesem Grund hat sich in den letzten 20 Jahren das Particle Image Velocimetry (PIV) entwickelt. PIV ist eine optische, nicht intrusive Methode, die Strömungsvisualisierung und Lichtpunkttechniken miteinander verbindet. Daher kann diese Technik eine genaue quantitative Messung vom momentanen Strömungsgeschwindigkeitsfeld über eine ebene Fläche eines Strömungsfeldes anbieten. Dies konnte bisher nicht erreicht werden. Denn entweder ging die momentane Struktur verloren und nur ein durchschnittliches Feld blieb erhalten, oder die Messtechniken waren nur qualitativ oder semi-quantitativ.

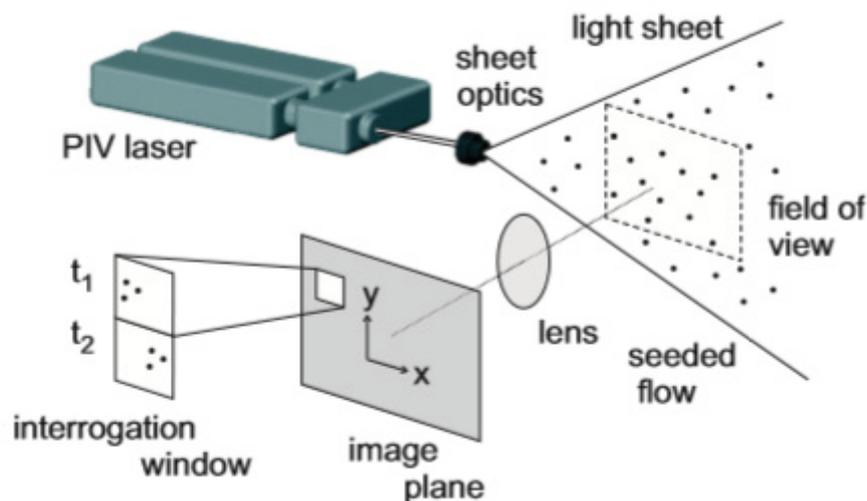


Abbildung 6: allgemeiner Aufbau eines 2D PIV Systems [6]

PIV wurde zu einem wichtigen Werkzeug für die quantitative und sofortige Messung von Laborströmen. Hierzu werden in die Strömungen winzige, neutral schwimmende Partikel, so genannte „Tracer“, hinzugefügt. Dies können zum Beispiel Öl- oder Wasseraerosole in der Luft oder feste Teilchen in Flüssigkeiten oder Flammen sein. Mit Verwendung eines Lichtschnittes, der von einem Doppelpuls-Laser erzeugt wird, werden die Partikel zweimal kurz hintereinander beleuchtet.

Die Verschiebung der Teilchen zwischen den beiden Laserimpulsen wird aufgezeichnet, und zwar entweder als einzelnes, zweimal belichtetes Bild oder als zwei einzeln belichtete Bilder. Das aufgezeichnete Partikelverschiebungsfeld wird lokal über das gesamte Sichtfeld der Bilder gemessen, von der Bildvergrößerung skaliert und dann durch den bekannten

Pulsabstand des Lasers dividiert, um eine Strömungsgeschwindigkeit für einen jeden einzelnen Punkt zu erhalten. Eine Kamera ist typischerweise senkrecht auf die Lichtschnittebene positioniert, um das von den Partikeln gestreute Licht zu erfassen. In Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit und vom Bildvergrößerungsfaktor der Kameralinsen ist die Verzögerung von den beiden Pulsen so zu wählen, dass angemessene Verschiebungen von den Partikeln auf dem CCD (charge-coupled device bzw. ladungsgekoppeltes Bauteil) angezeigt werden. Aus der Laufzeit zwischen den beiden Beleuchtungen und der Verschiebung der Tracerpartikel kann ein Geschwindigkeitsvektor berechnet werden.

Für die Auswertung der Partikelbilder wird vorausgesetzt, dass die Tracer der lokalen Strömungsgeschwindigkeit zwischen den beiden Beleuchtungen folgen. Die (digitale) PIV-Aufnahme wird in kleine Teilbereiche unterteilt, so genannte „interrogation windows“. Mit Hilfe statistischer Korrelationstechniken wird für ein jedes interrogation window ein lokaler Verschiebungsvektor bestimmt. Aus diesem Grund wird die Größe dieses interrogation window so gewählt, dass sich alle Teilchen innerhalb des interrogation windows in die gleiche Richtung und mit dem gleichen Abstand bewegen. Für gute Ergebnisse sollte die Anzahl der Teilchen innerhalb eines interrogation window mindestens zehn betragen.

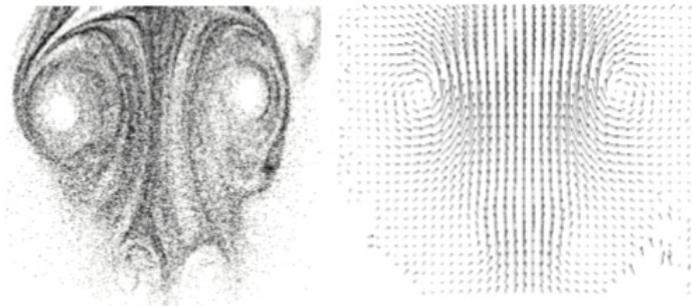


Abbildung 7: Wirbel mit Tracerpartikeln und entsprechendes Strömungsfeld [6]

Die Auswertung der Partikelbilder hängt von der Art, wie diese Bilder von der verwendeten Kamera aufgezeichnet wurden, ab. Eine Möglichkeit ist, das Streulicht von beiden Beleuchtungen in einem frame zu speichern. Dies wird „single frame / double exposure“ genannt. Diese Bilder können dann durch Autokorrelation ausgewertet werden. Die andere Möglichkeit besteht darin, das Streulicht von der ersten Beleuchtung in einem frame und das Streulicht der zweiten Beleuchtung in einem anderen frame abzuspeichern. Dies wird „double frame / double exposure“ genannt. Diese Doppelframebilder können dann durch Kreuzkorrelation ausgewertet werden. [6]

### 3.1.1 Autokorrelation (single frame / double exposure)

Das Streulicht von der ersten und der zweiten Partikelbelichtung werden in einem Bild gespeichert. Das komplette Bild wird unterteilt in so genannte interrogation windows und jedes Fenster wird einzeln durch Autokorrelation ausgewertet.

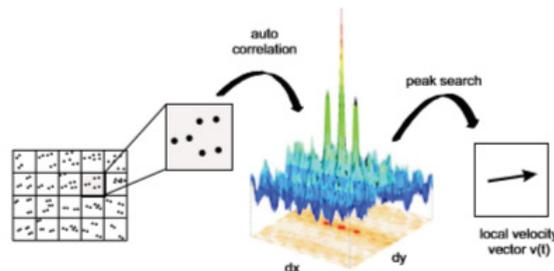


Abbildung 8: Auswertung der PIV-Aufnahmen mittels Autokorrelation [6]

Die Autokorrelationsfunktion ist charakterisiert durch zwei identische Korrelationsspitzen rotationssymmetrisch um den zentralen Höchstwert angeordnet und die Nullpunktverschiebung anzeigend. Eine Konsequenz daraus ist, dass man die Anzeichen einer Verschiebung nicht erkennt, da man nicht weiß, welcher Partikel vom ersten und welcher vom zweiten Laserpuls beleuchtet worden ist. Somit sind die Informationen von der Autokorrelation mehrdeutig und nicht schlüssig. Außer man hat bereits bekannte Informationen von der beobachteten Strömung. Ein weiteres Problem ist der Nachweis von sehr kleinen Verschiebungen, da in diesem Fall die Korrelationsspitzen sehr nahe an der zentralen Spitze liegen. Im Vergleich zur Kreuzkorrelation sind die Autokorrelationsspitzen deutlich kleiner. Außerdem erhöht eine hohe Störanfälligkeit die Möglichkeit, dass die Verschiebungskorrelationsspitze im Hintergrund verschwindet. [6]

### 3.1.2 Kreuzkorrelation (double frame / double exposure)

Das Streulicht von der ersten und der zweiten Belichtung der Partikel wird in zwei verschiedenen Bildern gespeichert. Das komplette Bild wird in interrogation windows unterteilt und ein jedes Fenster wird durch Kreuzkorrelation ausgewertet.

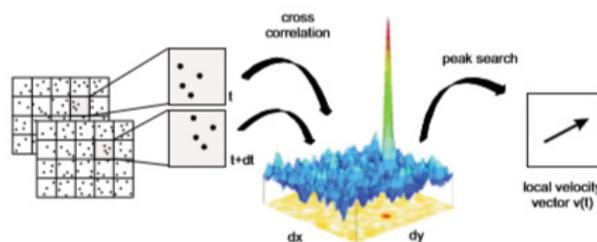


Abbildung 9: Auswertung der PIV-Aufnahmen mittels Kreuzkorrelation [6]

Für Kreuzkorrelationen wird üblicherweise eine doppelt verriegelnde CCD-Kamera verwendet, um die Bilder mit „double frame / double exposure“ aufzuzeichnen. Die Mindestverzögerungszeit zwischen den beiden Laserpulsen wird begrenzt durch die Zeit, die für die Frameübertragung von der Kamera notwendig ist. Wenn der zweite Frame nicht verriegelt werden kann, haben die beiden Frames verschiedene Hintergrundintensitäten und man muss vor dem Objektiv der Kamera einen geeigneten Filter anbringen. Im Vergleich zur Autokorrelation erhält man bei der Kreuzkorrelation jedoch eine höhere und eindeutigere Korrelationsspitze. [6]

Im nachfolgenden Versuch kommt die Kreuzkorrelation (cross-correlation) zur Anwendung.

## 4 2D-PIV Messung an einem Rieselfilm

Zum Standard für ein planares PIV-System gehören ein Doppelpuls-Laser, eine Lichtschnittoptik, Seedingpartikel, eine Highspeedkamera, Bilddigitalisierungshardware und ein Computer zur Datenspeicherung und -analyse.

### 4.1 Laser Litron LDY 303HE PIV



Abbildung 10: Laser LDY 300 Serie [7]

Die LDY300 Serie ist ein diodengepumptes, Doppelpuls-, Nd: YLF Lasersystem. Es ist ideal zur Bildverarbeitung, wie PIV-Anwendungen geeignet. Die Laser sind um eine robuste selbst tragende Invar-Schiene, die eine hervorragende mechanische und optische Stabilität besitzt, gebaut. Dies führt zu hervorragenden Ausgangsstrahlen, die räumlich und zeitlich extrem glatt und stabil sind. Somit kommen Lichtschnitte zustande, die eine fast identische Schuss zu Schuss Beleuchtung anbieten.

Das robuste Design dieses Lasers passt zu den härtesten industriellen Anwendungen und Forschungsanwendungen. [7]

Tabelle 3: Technische Daten LDY 303HE PIV

Pulsenergie:	2 x 2,5 mJ @ 1000 Hz
Wellenlänge:	527 nm
Strahldurchmesser:	3 mm

max. Frequenz:	20 kHz pro Kavität
Abgedichteter Laserkopf	
Laserklasse 4, gemäß EN 60825-10:2001-11	

## 4.2 Kamera – Imager pro HS4M



Abbildung 11: Imager pro HS 4M [8]

Die Imager pro HS 4M ist eine Digitalkamera mit hoher Empfindlichkeit und hoher Auflösung und wird im LaVision FlowMaster Hochgeschwindigkeits-PIV-System angewendet. Die Kamera hat einen fortschrittlichen CMOS-Sensor und ermöglicht Bildraten von bis zu 1279 Hz bei voller Auflösung von 2k x 2k Pixel und 4502 Hz bei einer reduzierten Fläche von 1k x 1k. Außerdem ist ein PIV Modus enthalten, der sehr kurze Interframezeiten ermöglicht. [8]

Tabelle 4: Technische Daten Imager pro HS 4M [8]

Auflösung:	2016 x 2016 Pixel
Frequenz:	1279 Hz @ 2016 x 2016 Pixel (bis 4502 kHz mit 1008 x 1008 Pixel)
min. Interframe Zeit:	3,15 $\mu$ s
Pixelgröße:	11 $\mu$ m x 11 $\mu$ m
Sensorformat:	22,18 x 22,18 mm <sup>2</sup>
Dynamikbereich A/D:	12 bit

Speicher:	18 oder 36 GByte
Anschluss:	CamLink
Dimension:::	170 mm x 185 mm x 290 mm (Breite x Höhe x Länge)
Gewicht:	7 kg
Arbeitstemperatur:	6 – 40 °C
Spannungsversorgung:	90 V – 260 V Wechselstrom Optional: Gleichstrombetrieb mit 12 V
Objektivfassung:	F

### 4.3 Laserführungsarm



Abbildung 12: Laserführungsarm [9]

Der Laserführungsarm wird für alle typischen Nd:YLF Laser, die im LaVision FlowMaster integriert sind, verwendet. Er erhöht die Lasersicherheit und die Laserflexibilität und er gewährleistet eine schnelle Anwendung auf die verschiedenen Experimente. Doppelt beschichtete Spiegel für PIV- (532 nm oder 527 nm) und LIV-Anwendungen (266 nm oder 355 nm) sind Standard. [9]

Tabelle 5: Technische Daten Laserarm [9]

Konfiguration:	Standardmäßig 7 Spiegelanordnungen
Gleichgewicht:	Arm wird von einem Gegengewicht ausgeglichen
Material:	Eloxiertes Aluminium (extern) und Edelstahlkomponenten (intern) werden mit außergewöhnlich starken Rohren kombiniert. Dies garantiert eine Langzeitstabilität und Leistung auch in den strengsten Testumgebungen.
Strahlwandern:	<p>Positionsfehler am entfernten Anschluss:</p> <p>&lt; +/- 1,0 mm vom Zentrum an allen Positionen</p> <p>&lt; +/- 0,5 mm vom Zentrum zu den meisten Positionen</p> <p>Winkelfehler am entfernten Anschluss:</p> <p>&lt; +/- 1 mrad</p>
Optik:	<p>Spiegelgröße: 25,4 mm Durchmesser, 3 mm Dicke mit hoher LDT Beschichtung</p> <p>&gt; 96 % Übertragung für 532 nm und 527 nm</p> <p>andere Wellenlängen auf Anfrage</p> <p>15 mm Blende über den gesamten Arm</p> <p>Schadengrenze für 532, 527, 355 und 266 nm: 2J/cm<sup>2</sup>, 5 ns</p>
Gewicht:	18 kg

## 4.4 Lichtschnittoptik



Abbildung 13: optisches Gehäuse [10]



Abbildung 14: Streulinse [10]

Die Lichtschnittoptik verwendet eine Kombination aus zwei sphärischen Linsen und einer Zylinderstreulinse, um einen dünnen Lichtbogen von einem Laserstrahl zu erzeugen.

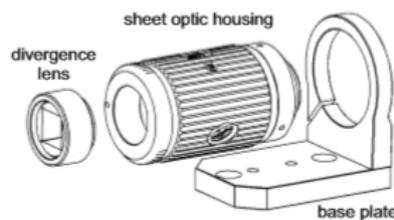


Abbildung 15: Lichtschnittoptikmontage auf der Grundplatte [11]

Die Kombination von zwei sphärischen Linsen ist notwendig, um das Licht auf eine bestimmte Dicke zu fokussieren. Die Dicke des Lichtschnittes kann durch die Trennung der sphärischen Linsen gesteuert werden. Die Blendeneinstellung und die Größe des Lichtschnittes werden hauptsächlich durch die Brennweite der Streulinse und des Laserstrahldurchmessers vorgegeben. Die Lichtschnittgröße erfolgt durch die Änderung der Streulinse. Hierzu stehen Objektive in den verschiedenen Brennweiten zur Verfügung. Der Objektivanschluss ermöglicht eine schnelle und einfache Auswechslung der Objektive und eine freie Ausrichtung des Lichtschnittes. [10]

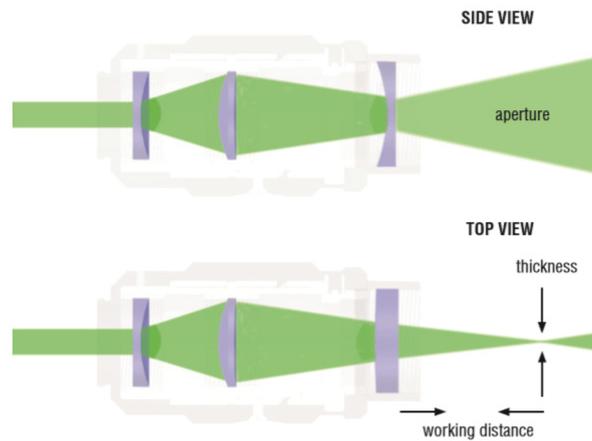


Abbildung 16: Arbeitsweise der Linsen [10]

Die Teleskoplinsen sind im Inneren des Lichtschnittoptikgehäuses angeordnet. Durch Drehen des Fokusrings kann die Trennung der beiden sphärischen Linsen geändert werden. Damit wird die Dicke des Lichtschnitts eingestellt. Im Falle einer schmalen Trennung der Linsen beträgt die Brennweite ca. 2000 mm, mit einem vergrößerten Abstand wird die Brennweite auf ca. 300 mm verringert. [11]

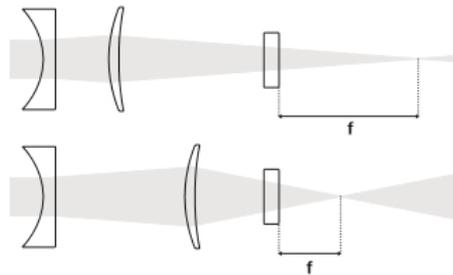


Abbildung 17: Fokussierung der Lichtschnittoptik [11]

## 4.5 High Speed Controller



Abbildung 18: High Speed Controller [12]

Der komplett softwaregesteuerte High Speed Controller (HSC) ist ein eingebettetes System für die Erstellung von komplexen Impulsmustern (Sequenzen) mit sehr genauem Timing auf mehreren Ausgängen (bis zu 16 unabhängige Kanäle). Er wird für die Synchronisation der Intelligent Imaging Systems von LaVision verwendet. Der HSC ist ein eigenständiges USB-Gerät. Die Impulsbreite und das Intervall zwischen den Impulsen wird automatisch von der Davis Software programmiert und richtet sich nach der Art der Anwendung, nach der angeschlossenen Hardware (Laser, Kamera, usw.) und nach den Benutzereinstellungen in den Dialogfenstern innerhalb von Davis.

Die mikroprozessorgesteuerte Zeitsequenz kann entweder von einem externen Trigger gestartet werden oder wird ständig von einem internen Frequenzgenerator generiert (z.B. bei einer bestimmten Laserwiederholungsrate).

Die gesamte Funktionalität ist eingebettet in ein FPGA (Field Programmable Gate Array), welches System-Updates und –Upgrades erlaubt. [12]

Tabelle 6: Technische Daten High Speed Controller [12]

Output Treiber:	TTL 50 Ohm
Zeitauflösung:	10 ns
Typische Schwankung zwischen allen Outputs:	< 1 ns
Triggerquellen:	intern: Generator extern: TTL Eingang
Bildtrigger:	Intern / extern
Geräte:	Mehrere HS-Kameras, A/D Wandler, IRO, E-Monitor, Laser
Version:	USB
Digitaleingänge:	Opto coupled TLL
Schwankungen beim Asynchronisieren von externen Signalen:	+/- 5 ns

### 4.5.1 DaVis 8.1 Software

DaVis ist ein von LaVision entwickeltes CDD Bildaufnahme- und Verarbeitungsprogramm. Die Software ist speziell für LaVision Kamerasysteme entwickelt worden und kontrolliert auch viele andere Geräte, wie Schrittmotoren, Spektrographen und Laser. Durch das breite Spektrum der kompatiblen Geräte und die jahrelange Erfahrung von LaVision kann DaVis auch eine breite Palette von Abbildungen und spektrometrischen Messungen (z.B. PIV und PIVT „Particle Image and Tracking Velocimetry“, Spray Analysis, Rayleigh, Raman, LIF „Laser Induced Fluorescence“, Tracer-LIF, Picosecond Lifetimes) vornehmen. [13]

Für den nachfolgenden Versuch benötigt man das DaVis FlowMaster Modul. In diesem können die ganzen Einstellungen bezüglich Laser, Kamera, Aufnahmeparameter, PIV-Kalkulation usw. vorgenommen werden.

## 4.6 Versuchsaufbau

Der genaue Versuchsaufbau ist in der Diplomarbeit „Konstruktion eines Versuchsstands für laseroptische Vermessungen von Rieselfilmen“ von Herrn Foith Peter an der Montanuniversität ersichtlich. In meiner Arbeit findet sich nur eine kurze Beschreibung als Überblick wieder.

Die in weiterer Folge verwendete Versuchsanlage besteht aus einem Aufgabeebehälter, einer Auflage für die Platte, einer Platte, einem Auffangbehälter und einem Grundgerüst. Das Grundgerüst besteht aus Aluminium Profilen, die individuell einstellbar sind. Die Anlage hat insgesamt eine Größe von 450 x 310 x 700 mm [L x B x H].

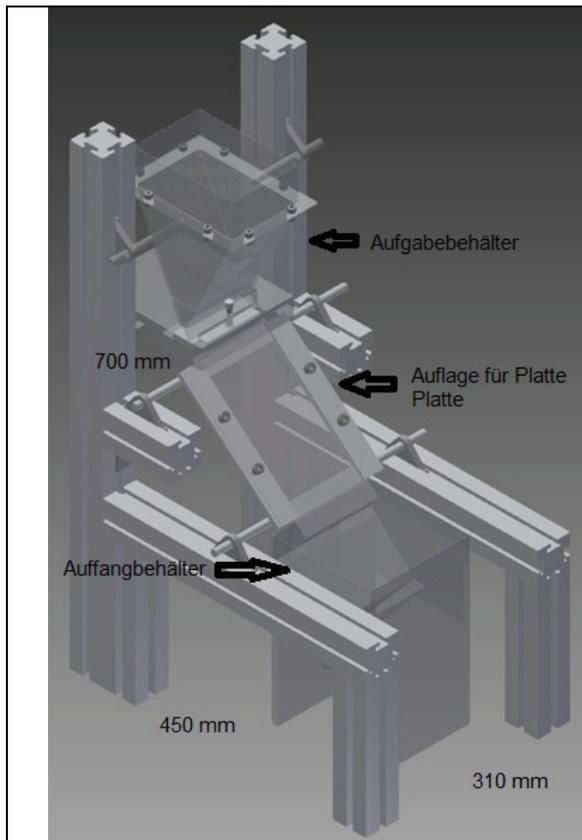


Abbildung 19: Konzept des Versuchsstands in Autodesk Inventor Profession 2014 [14]



Abbildung 20: Foto des Versuchsstands

Für die Platte mit einer Größe von 110 x 230 x 1 mm (B x H x D) kann eine Neigung von 10 ° bis 80 ° eingestellt werden. Außerdem können auf der Auflage verschiedene Platten angebracht werden.

### 4.6.1 Versuchsanlage

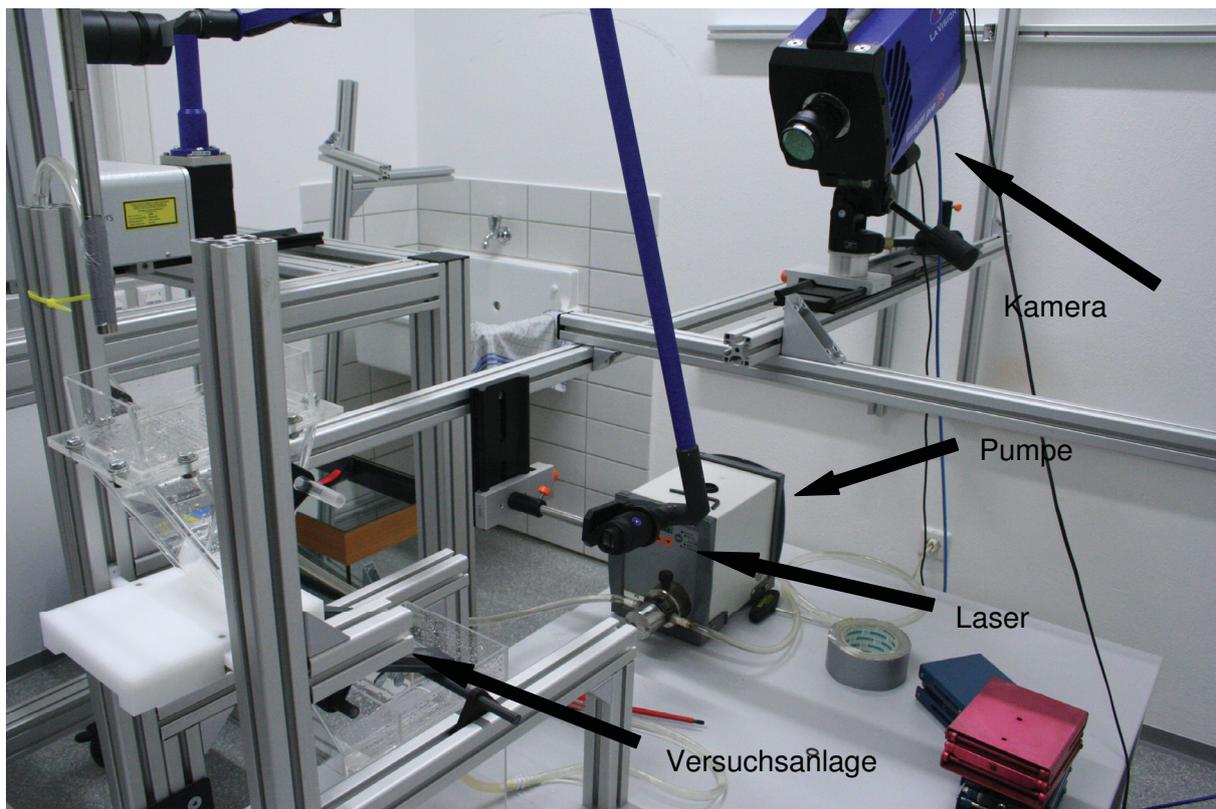


Abbildung 21: Foto des Versuchsaufbaus

Beim Versuchsaufbau wurden nach mehrmaligem Umbau sowohl die Kamera als auch der Laserlichtschnitt direkt auf die Platte gerichtet. Mit dem Laser von der Seite, wie in vielen Publikationen vorgeschlagen wurden keine brauchbaren Ergebnisse erzielt.

### 4.6.2 Verwendete Einstellungen für PIV Messungen

Als Seeding wurden PMMA – Rhodamin B-Partikel (20 – 50 $\mu$ m) in Pulverform verwendet. Die Konzentration beträgt 60 mg Rhodamin / 400 ml Flüssigkeit (100 ml Ethanol, 300 ml H<sub>2</sub>O). Das Ethanol wird beigemischt, da sich das Rhodamin darin besser auflöst als in Wasser alleine.

Die Rieselfilmplatte weist eine Neigung von 40 ° auf und der Volumenstrom beträgt 1,5 l/min.

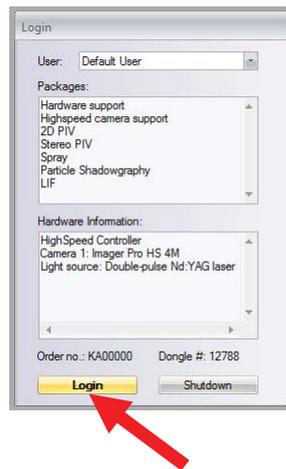
## 4.7 Versuchseinstellungen und Versuchsergebnisse

Um einen Versuch durchführen zu können, sind vorab einige Einstellungen vorzunehmen.

### 4.7.1 Recording

Die DaVis PIV-Software bietet umfangreiche Werkzeuge zur Datenerfassung, Auswertung und Visualisierung von Strömungsfeldern. Wenn man sich als Standardbenutzer anmeldet, startet DaVis mit dem **PIV Project Manager**. Es ist sicherzustellen, dass im Login-Dialog alle PIV-Pakete aufgeführt sind, die von der DAVIS-Version unterstützt werden sollten. [15]

Zu allererst muss **Davis High Speed** gestartet und nach Erscheinen des Loginfensters der **Login** button gedrückt werden.



Hier ein vorhandenes Projekt öffnen, oder ein neues Projekt erstellen. Es ist darauf zu achten, dass der *Type of project* auf PIV gestellt ist, ansonsten kann es sein, dass das Projekt gewisse Software-Funktionen nicht erlaubt. [15]

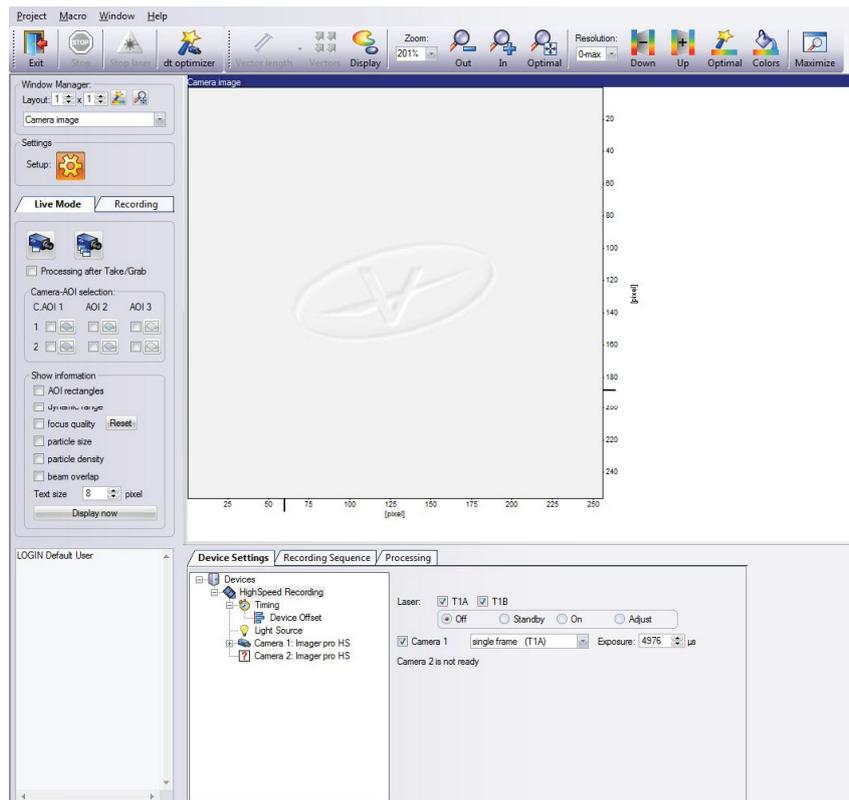
Anschließend erscheint das Hauptmenü, in dem wiederum ein bestehendes Projekt auszuwählen oder ein neues Projekt anzulegen ist.



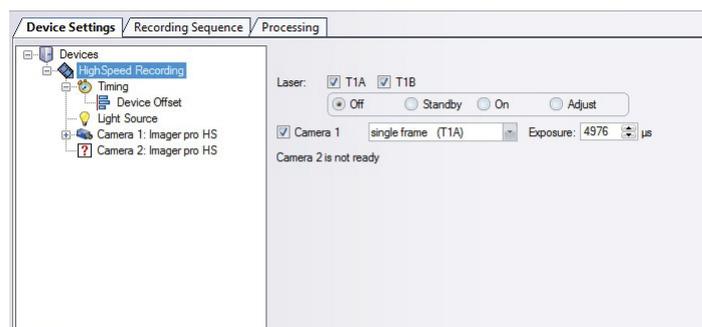
Um die ersten Einstellungen wie Belichtungszeit, Bildrate usw. einstellen zu können muss der **Recording** button gedrückt werden.



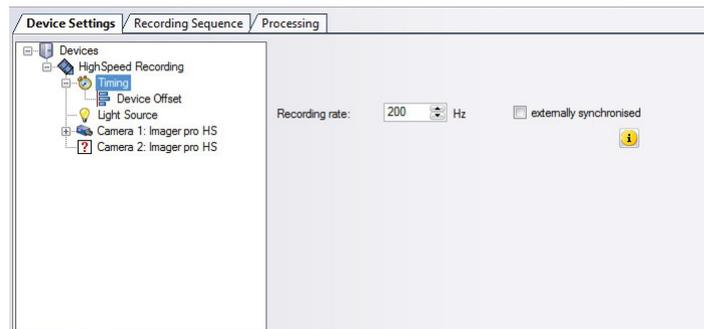
Im nun erscheinenden Hauptmenü zuerst im **Device Settings** die benötigten Einstellungen vornehmen. Im Device Settings kann man Kamera- und Geräteeinstellungen, wie z. B. Belichtungszeit, Triggermodus, Lasereinstellungen, ... ändern. [15]



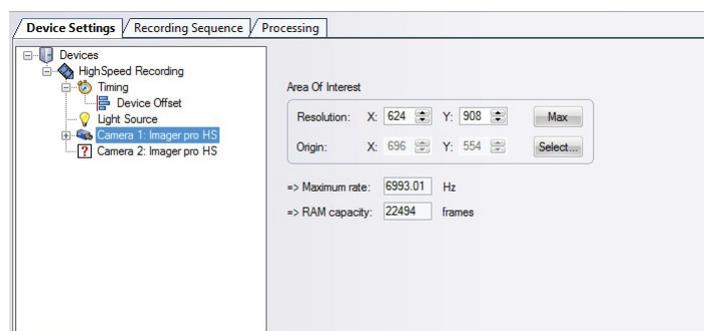
Zuerst beim *HighSpeed Recording* auf *single frame (T1A)* und die Belichtungszeit so hoch wie möglich einstellen. Da die Kamera für diesen Versuchsaufbau nur eine *maximale Belichtungszeit* (Exposure) von  $5000 \mu\text{s}$  hat,  $4976 \mu\text{s}$  auswählen. Je kleiner der Bildschirmausschnitt ist, umso größer kann die Belichtungszeit sein. Wichtig ist, dass für die Kalibrierung kein Laser eingeschaltet wird, sondern das zur Verfügung stehende Tageslicht ausreichen soll.



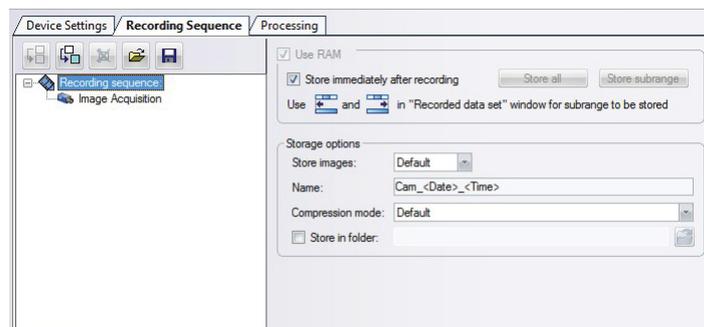
Anschließend bei *Timing* die Kamerabildrate auswählen. Für diesen Versuch sind das  $200 \text{ Hz}$ , also 200 Bilder pro Sekunde.



Der nächste Schritt ist die Einstellung des Bildausschnittes. Hierzu geht man zu *Camera 1: Imager pro HS*. Außerdem werden hier auch die *maximale Kamerabildrate* (maximum rate) und die *maximal speicherbare Bilderanzahl* (RAM capacity) eingestellt.



Die Einstellung der Device Settings ist nun abgeschlossen, und man geht zur **Recording Sequence** über. Hier werden die Aufnahmesequenzprodukte und / oder –parameter geändert, z. B. die Anzahl der Bilder, die aufgenommen werden sollen. [15]



*Use RAM* bedeutet, dass alle Bilder zuerst im PC- oder Kameraspicher (abhängig vom Kameratyp) gespeichert werden. Dieser Modus kann verwendet werden, um Bilder mit der maximalen Wiederholrate der Kamera zu erfassen, d.h. die maximale Anzahl von Bildern wird durch die PC-Kamera oder den Speicher begrenzt.

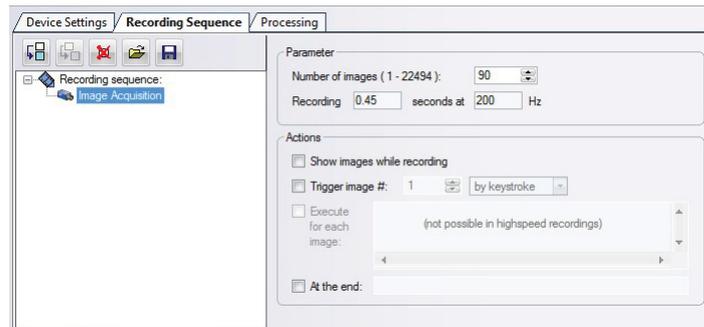
Für diesen Versuch ist *Store immediately after recording* einzustellen, d.h. nach dem Abschluss einer Aufnahme (Set) werden die Bilder auf die Festplatte kopiert.

In *Store images* kann der Zielordner für die Datenspeicherung festgelegt werden. *Default* speichert die Bilder in einem DAVIS-Datensatz mit dem Namen:

„Cam\_<date>\_<time>“

(date: aktuelles Datum, time: aktuelle Zeit). [15]

Als letzter Schritt sind noch die Einstellungen unter *Image Acquisition* vorzunehmen. Die *Image Acquisition* ist das Standardelement zur Erfassung und Speicherung von Bildern.



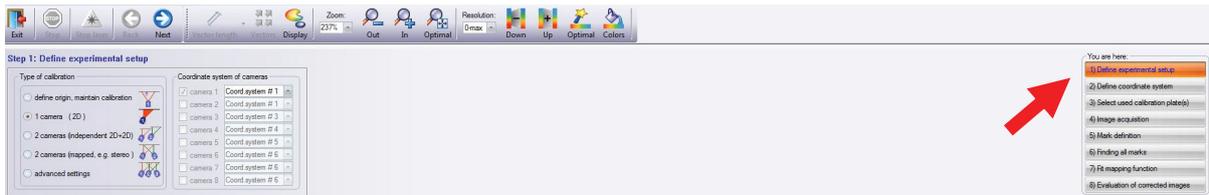
Unter *Number of images* ist die maximale Anzahl von Bildern, die gespeichert werden soll auszuwählen. [15]

Das **Recording** ist somit beendet und es kann mit dem **Exit** button verlassen werden.

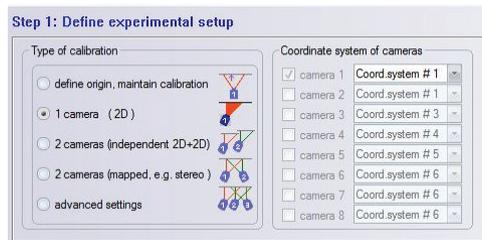
## 4.7.2 Kalibrierung des Kamerabildes

Wenn die aufgenommenen Bilder verzerrt sind, brauchen sie eine Korrektur, basierend auf einer räumlichen Kalibrierung. Dazu benötigt man den **Calibration dialog**. Hierzu setzt man eine Kalibrierplatte (flach oder mit zwei Ebenen) mit äquidistanten Markierungen (Punkte oder Kreuze) in die Lichtschnittebene. Danach die Kamera einstellen und ein Bild der Platte aufnehmen (sollte scharf sein). Der **Calibration Wizard** führt die Kalibrierung in acht Schritten durch. Jeder Schritt befasst sich nur mit einem speziellen Thema. Wenn alle erforderlichen Auswahlen und Einträge getätigt wurden, dann geht man mit dem **Next** button in der Werkzeugleiste zum nächsten Schritt über, oder mit dem **Back** button zu einem vorangegangenen Schritt. Wenn in einem Schritt noch Eingaben fehlen, dann ist der **Next** button deaktiviert. Um nun eine Kalibrierung für eine stereoskopische PIV Messung durchführen zu können durchläuft man folgende Schritte. [15]

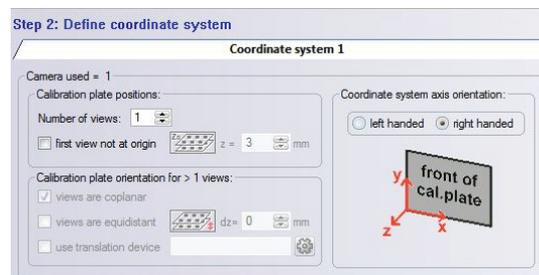
Zu allererst drückt man den **Calibration** button und der Startbildschirm zur Kalibrierung erscheint. Hier sind am rechten Rand die einzelnen Schritte für die Kalibrierung angeführt und der Schritt, den man gerade durchführt ist markiert.



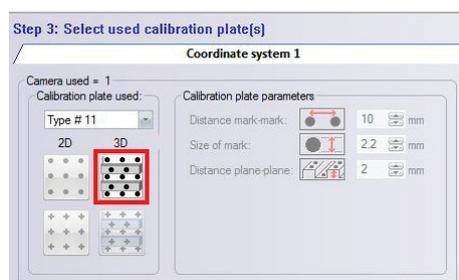
Beim **1. Schritt (Define experimental setup)** ist die Anzahl der verwendeten Kameras (*Type of calibration*) auszuwählen. In diesem Fall ist das nur eine Kamera, da nur 2D-Messungen durchgeführt werden.



In **Schritt 2 (Define coordinate system)** sind die Ansichten (*Number of views*) und die Ausrichtung des Koordinatensystems (*Coordinate system axis orientation*) auszuwählen. Bei diesem Versuch werden eine Ansicht und das *right handed* Koordinatensystem verwendet. Hier ist auch noch einmal zu kontrollieren, ob die Kalibrierplatte sich im Lichtschnitt befindet und *first view not a origin* deaktiviert ist. [15]



In **Schritt 3 (Select used calibration plate(s))** wird die benutzte Kalibrierplatte (*Calibration plate used*) ausgewählt. Da eine Kalibrierplatte von LaVision benutzt wird, reicht es die Typennummer einzutragen. Dadurch werden alle Plattenparameter auf die richtigen Werte gesetzt. Bei diesem Versuch findet die 3D Kalibrierplatte Type #11 Anwendung. [15]



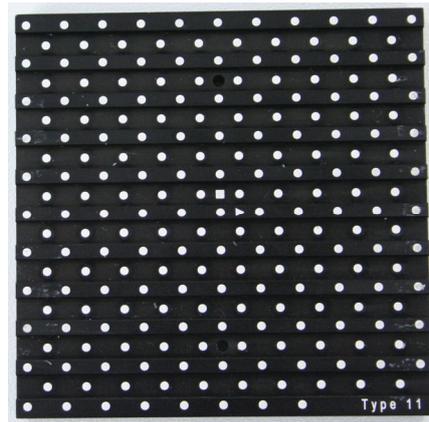
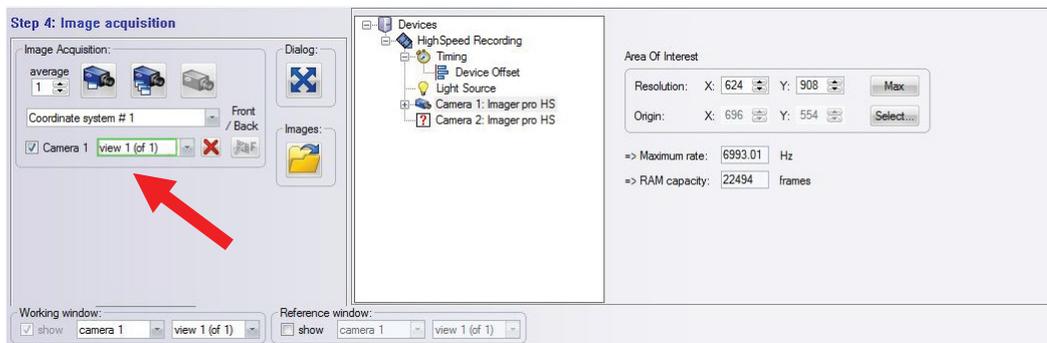
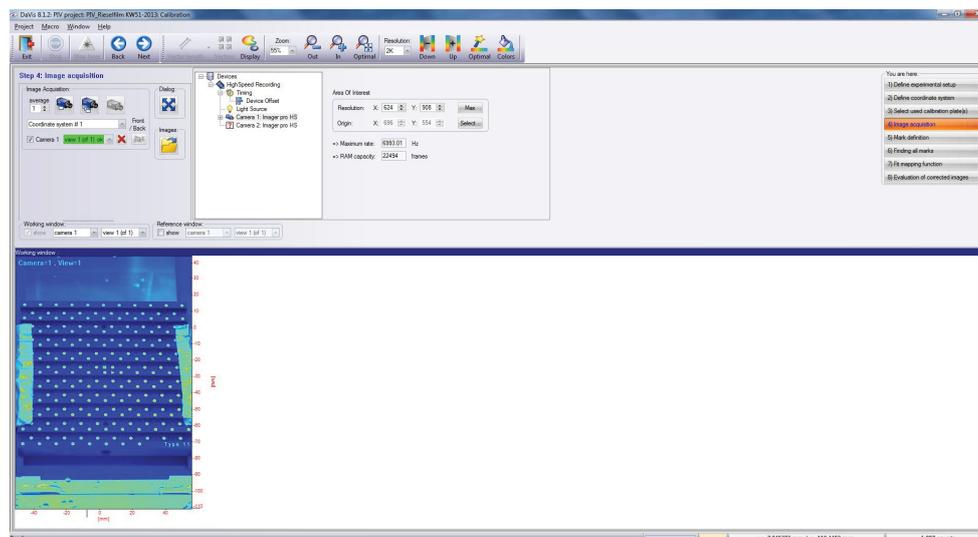


Abbildung 22: Kalibrierplatte Type 11

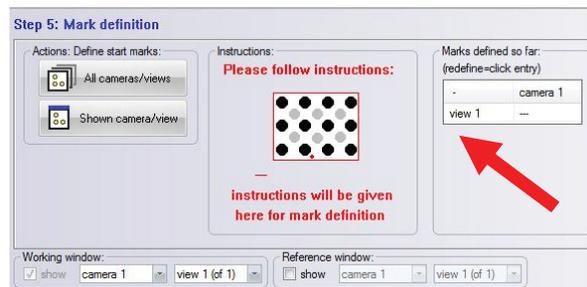
Im **Schritt 4 (Image acquisition)** wird die Kalibrierplatte an der Versuchsanlage befestigt und das Bild durch drehen der Kamerablende scharf gestellt.



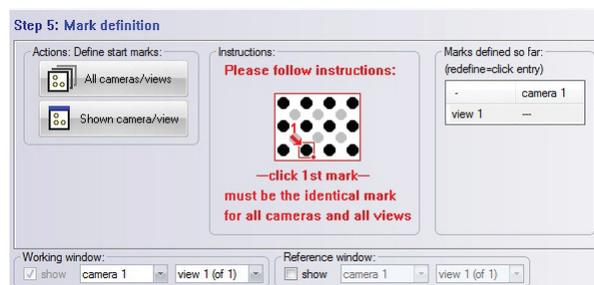
In diesem Schritt werden die erforderlichen Bilder der Kalibrierungsplatte für alle Kameras und alle Ansichten erstellt. Nur dann darf man zu den nächsten Schritten fortfahren. Wenn man ein gültiges Bild erhält, dann wird das Auswahlfeld *view 1 (of 1)* grün. [16]



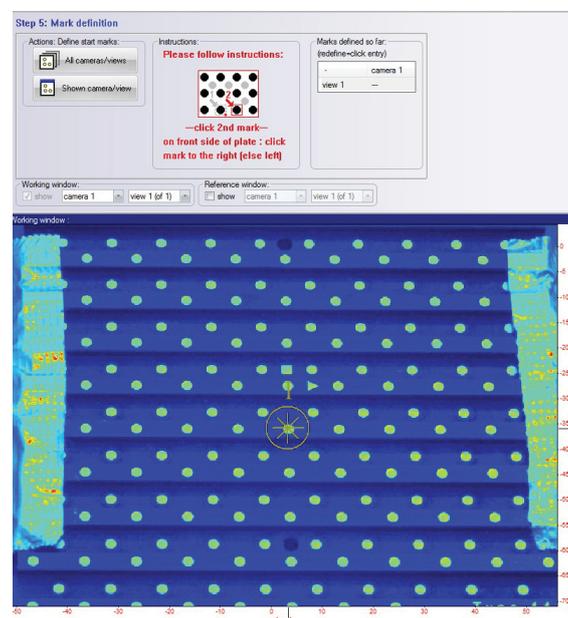
In **Schritt 5 (Markdefinition)** müssen drei Startzeichen für die Markersuche definiert werden. Dazu ist zuerst die Taste *Shown camera/view* zu drücken, um die Startmarkierungen im aktuell sichtbaren Bild im Arbeitsfenster zu definieren.



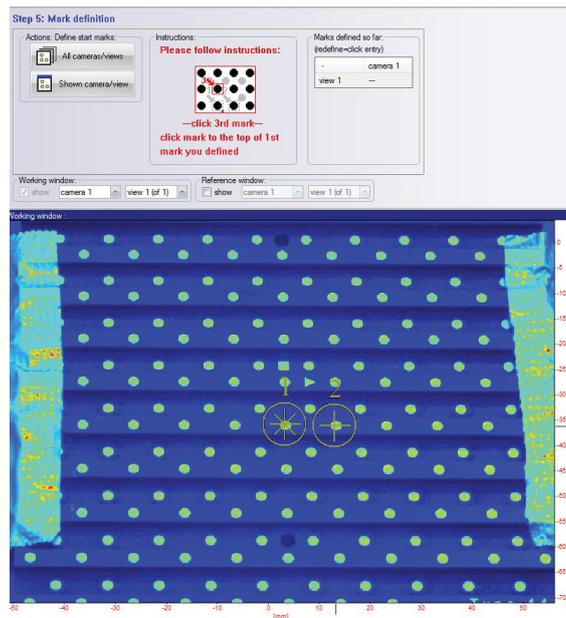
Im *Instructions* Dialogfeld wird Schritt für Schritt angezeigt, wie man die Marker findet:



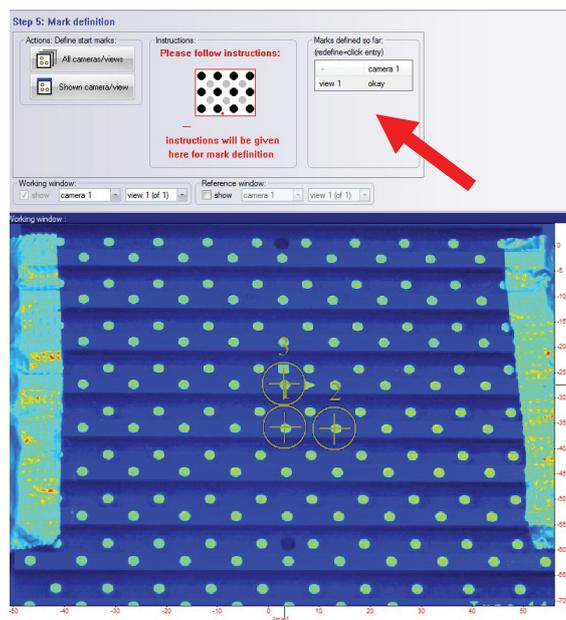
1. Klicke einen Startreferenzmarker (der gleiche in allen Kamerabildern und Ansichten)



2. Klicke den Nachbarmarker auf der rechten Seite

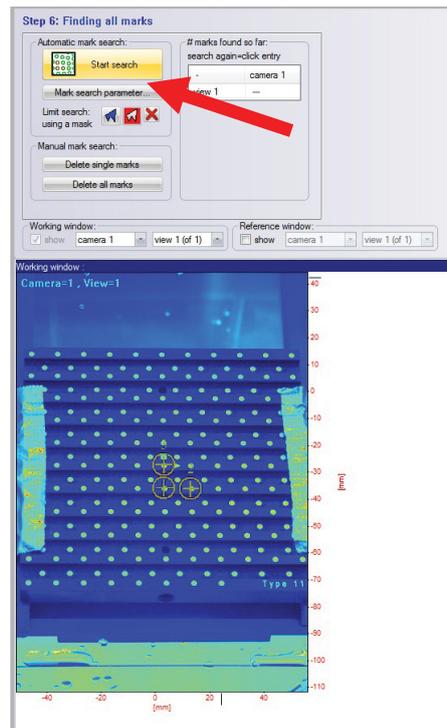


3. Klicke den Marker oberhalb des ersten ausgewählten Marker

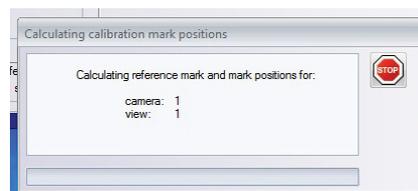


Achtung! Es ist sicherzustellen, dass sich die ausgewählten Marker auf der vorderen Ebene einer 3D-2-Level-Kalibrierungsplatte befinden! Wenn man alle drei Marker erfolgreich gesetzt hat, wechselt der Tabelleneintrag für diese Kamera auf Okay. [16]

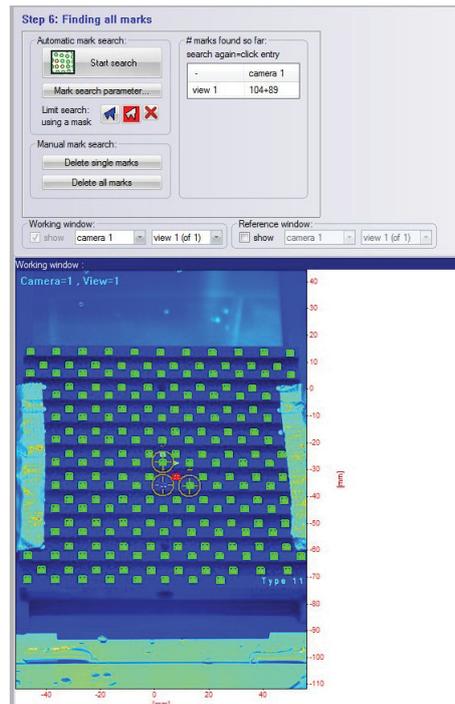
**Schritt 6 (Finding all marks)** ist ein automatischer Prozess und benötigt keine Benutzerinteraktion. Hierzu braucht nur der **Start search** button gedrückt zu werden. [15]



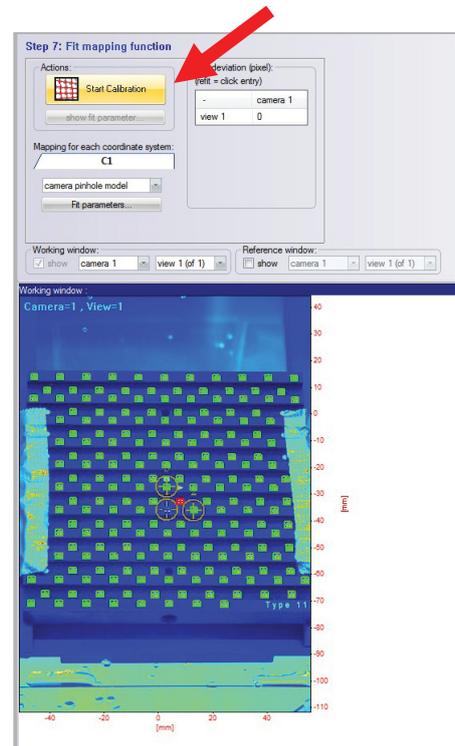
Das Fenster *Calculating calibration mark positions* erscheint.



Nach Abschluss von Schritt 6 wird das Ergebnisfenster angezeigt.

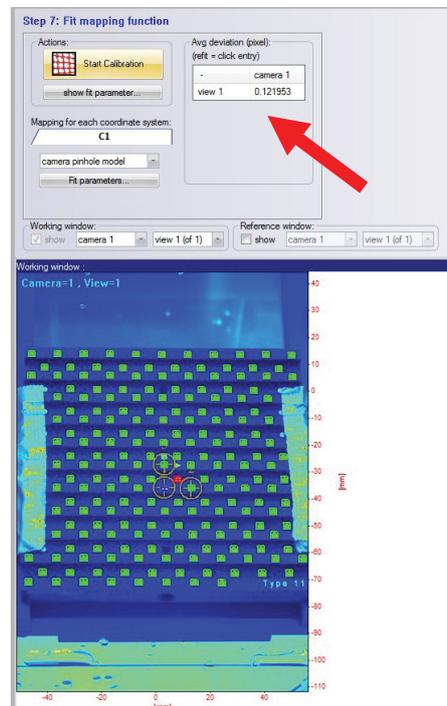


**Schritt 7 (Fit mapping function)** ist wiederum ein automatischer Prozess und wird durch das Drücken des **Start Calibration** button gestartet.

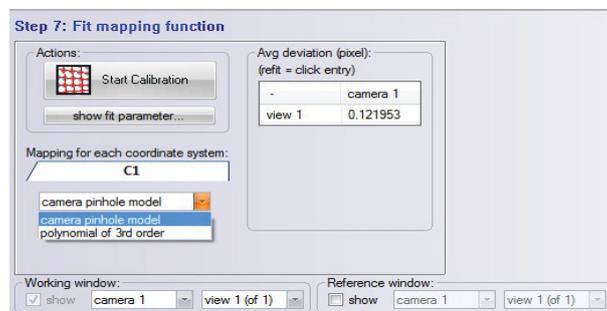


In der Tabelle auf der rechten Seite wird für jedes Bild die Durchschnittsabweichung der gesetzten Marker zum idealen regelmäßigen Gitter angezeigt. Für eine 2-Megapixel-Kamera ist ein Wert weniger als 1 Pixel gut, ein Wert von weniger als 0,3 Pixel ist ausgezeichnet. Werte über zwei Pixel sind fraglich und die Kalibrierung sollte hinterfragt werden bzw. es

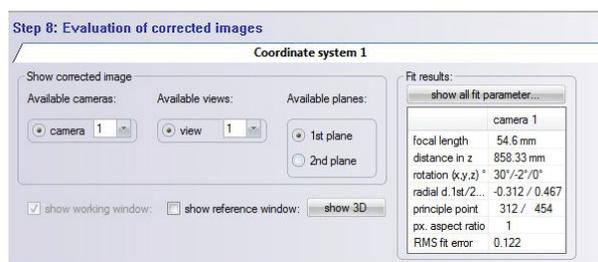
sollte kontrolliert werden, ob zum Beispiel die Vorderseite der Kalibrierplatte im Sichtfeld der Kamera steht. Für die getätigten Einstellungen zeigt die Kalibrierung eine Abweichung von 0,121953, d.h. es handelt sich um ein sehr gutes Ergebnis. [16]



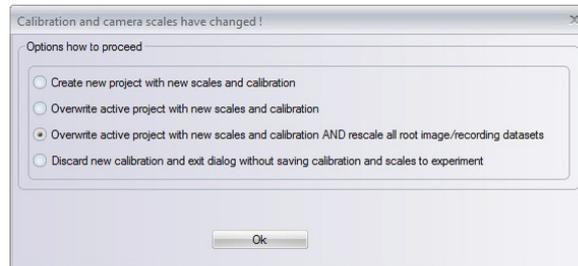
Zum Abschluss von Schritt 7 ist noch das *Camera pinhole model* auszuwählen.



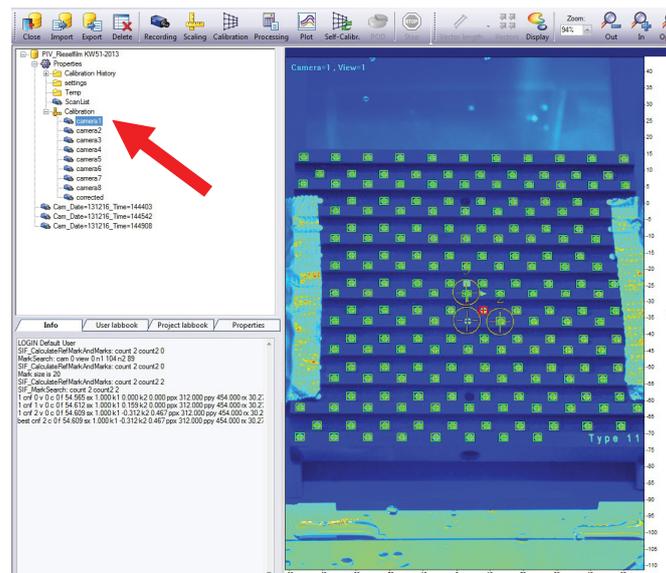
Der letzte **Schritt 8 (Evaluation of corrected images)** dient dazu, die Anpassungsergebnisse visuell auszuwerten.



Wenn die Kalibrierung OK ist, dann auf den **Finish** button in der Werkzeugleiste drücken, um die Kalibrierung zu akzeptieren. Anschließend erscheint ein Speicherfenster. In dem wählt man für den Versuch den 3. Punkt *Overwrite active project with new scales and calibration AND rescale all root image/recording datasets* aus, d.h. es wird die Kalibrierung des derzeit aktiven Projekts überschrieben und alle ursprünglichen Bilder und Datensätze werden neu skaliert. [16]



Die nachfolgende Abbildung zeigt, wo die Kalibrierung im laufenden Projekt abgespeichert ist.



### 4.7.3 Laser

Als nächster Schritt bei der Versuchsvorbereitung ist der Laser einzuschalten. Hierzu werden der Schlüssel auf **Laser System ON** und der Notausschalter leicht nach rechts gedreht und herausgezogen. Anschließend werden von oben nach unten die Systeme hochgefahren, d.h. das System auf ON und dann die Pumpe auf ON stellen.



Danach sollte man ca. 5 Minuten warten, bis die Dioden eine Temperatur von 70 °C erreicht haben.



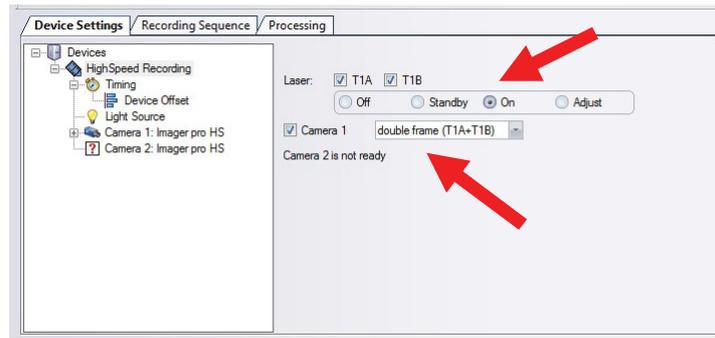
Jetzt kann der Laser auf ON und der Shutter auf OPEN geschaltet werden. Die Power wird für diesen Versuch auf 90 % eingestellt. Die Einstellung *Mode1 TRIG Q* und *Mode2 TRIG Q* zeigt an, dass der Laser mit dem Highspeed Controller verbunden ist, daher ist der Laser erst aktiv, wenn man in DAVIS die Kamera aktiviert.



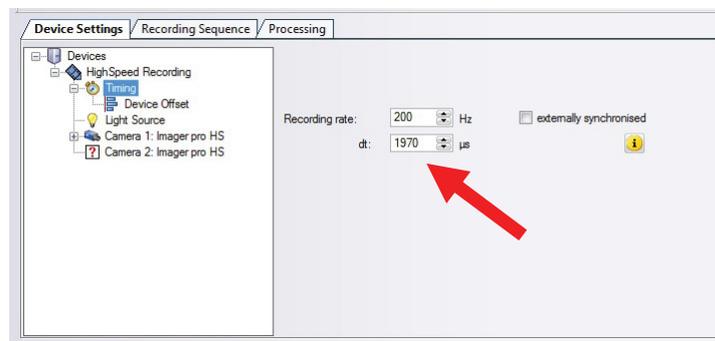
#### 4.7.4 Rohbildaufnahme

Als nächster Schritt werden die Lasereinstellungen bezüglich der Rohbildaufnahme durchgeführt. Hierzu den **Recording** button drücken.

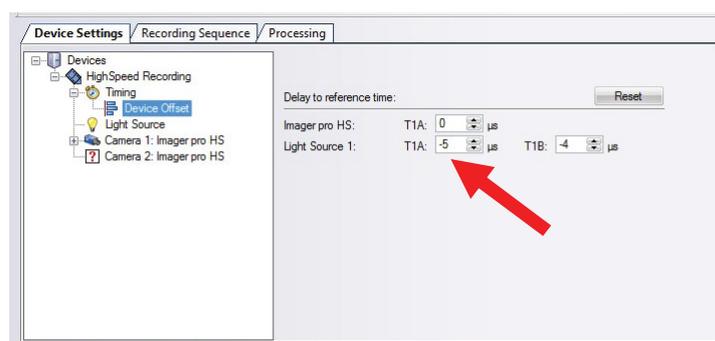
Anschließend auf die *Device Settings* und *HighSpeed Recording* gehen. Hier auf *double frame (T1A + T1B)* umstellen und den Laser einschalten (ON).



Unter *Timing* ist der zeitliche Versatz zwischen den Kamerabildern auszuwählen. Dies wird durch Ausprobieren ermittelt und beträgt in diesem Fall  $1970 \mu\text{s}$ . Die Wegstrecke sollte ungefähr 5 Pixel und maximal ein Viertel des interrogation windows<sup>1</sup> betragen. [6]

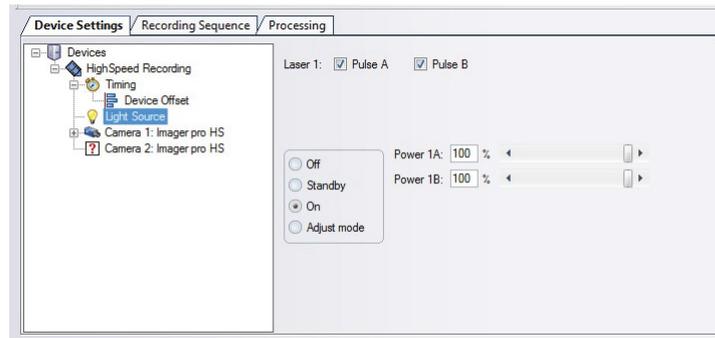


Im *Device Offset* wird der zeitliche Versatz von Lichtpuls 1 zu Lichtpuls 2 eingegeben. Dies wird wiederum durch Ausprobieren ermittelt. Für diesen Versuch sind das die Werte  $-5\mu\text{s}$  für T1A und  $-4\mu\text{s}$  für T1B. Für die Kamera wird kein zeitlicher Versatz eingegeben. Die Lichtpulse sollten so eingestellt sein, dass der Lichtpuls schon da ist, bevor die Kamera das Bild aufzeichnet.



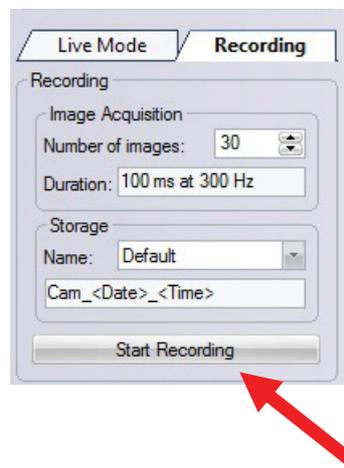
In *Light Source* belassen wir die Standardeinstellungen.

<sup>1</sup> Für die Einschätzung von Bildern mittels der Korrelation wird das ganze Bild in so genannte ‚interrogation windows‘ (Befragungsfenster) geteilt. [6]



Für die Rohbildaufnahmen wird auf das Kameraobjektiv ein VZ-Image Filter for LIF, 540 nm cut-off, aufgeschraubt, um die Reflexionen vom Plexiglas abzuschwächen. Dieser Filter schneidet alle Wellenlängen über 540 nm weg.

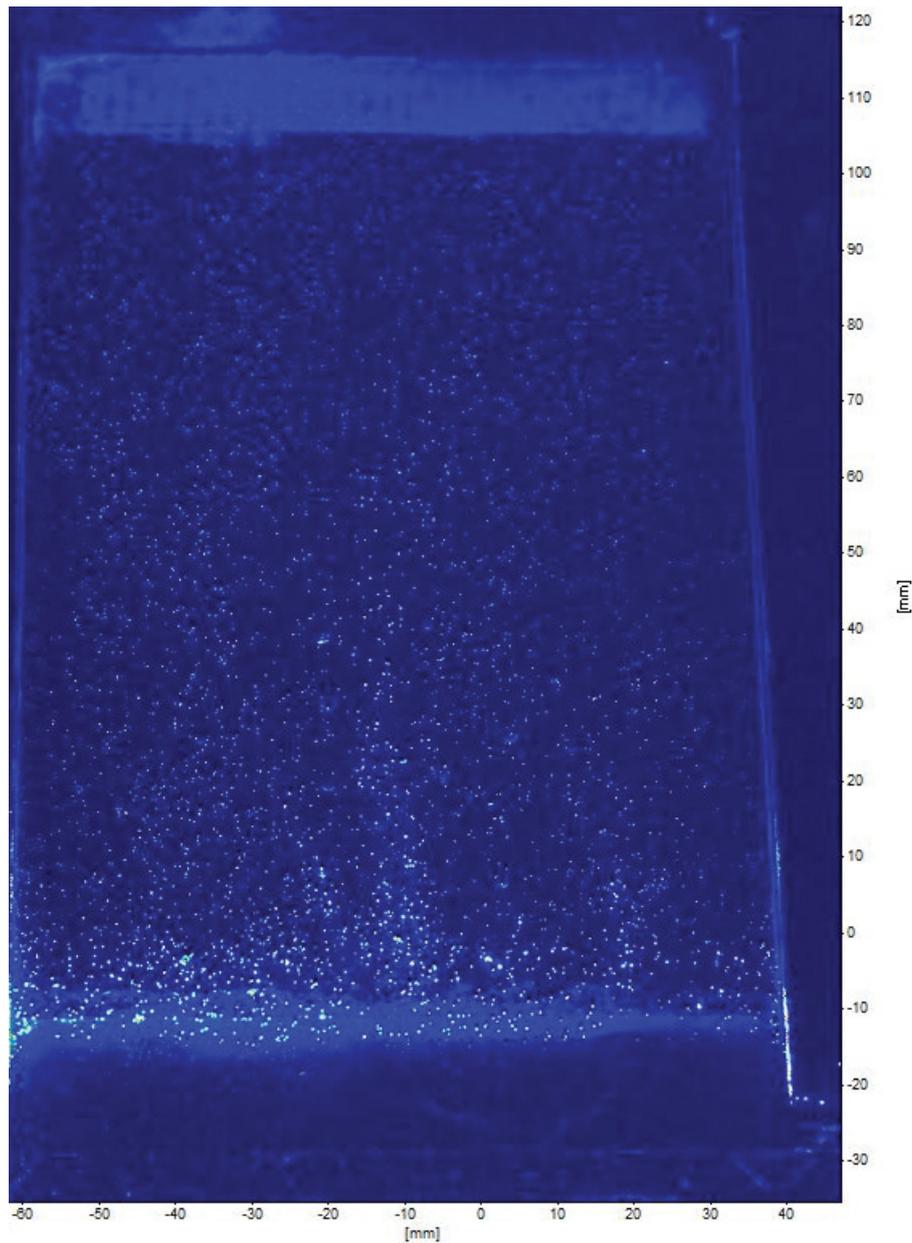
Als nächsten Schritt in die *Recording* Karteikarte wechseln und nach Überprüfung der Einstellungen den **Start Recording** button drücken.



Das *Recording status* Kontrollfenster erscheint.



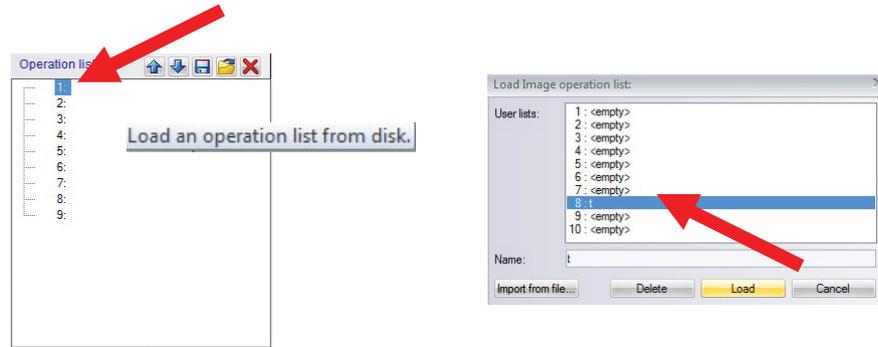
Um die Rohbildaufnahme zu beenden auf den **Stop** button in der Menüleiste drücken und es erscheinen die Rohbilder.



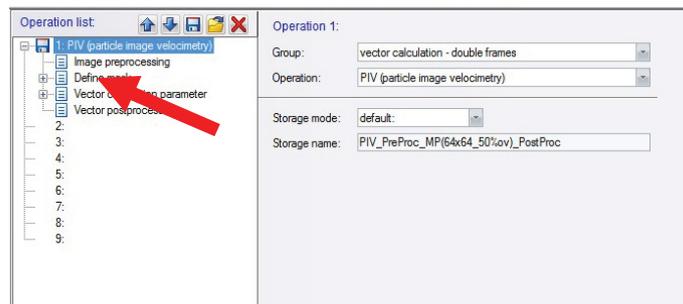
#### 4.7.5 Vektorkalkulation

Um eine Vektorkalkulation durchführen zu können, ist im Projektordner eines der Rohbilder auszusuchen und dann der **Processing** button zu drücken.

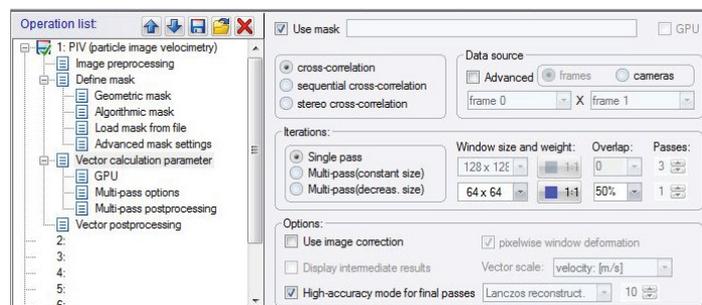
Im nun erscheinenden Startfenster befindet sich die so genannte *Operation list*. Als nächsten Schritt klickt man auf die 1 und das *Load Image Operation list* Fenster öffnet sich. In diesem ist in der *User lists* 8:t auszuwählen und der **Load** button zu drücken.



Um die noch notwendigen Einstellungen vornehmen zu können, auf *PIV* drücken und die Unterpunkte erscheinen.



Die Unterpunkte *Image preprocessing* und *Define mask* am Anfang überspringen und mit den Einstellungen unter *Vector calculation parameter* beginnen. [6]



Hier werden folgende Einstellungen vorgenommen.

*Use mask*: Bestimmt, ob die Maske, die in *Define mask* ausgewählt wurde, für die Vektorberechnung in Betracht kommt.

*cross-correlation*: Für die Auswertung von Bildern mittels dieser Korrelation wird das ganze Bild in so genannte interrogation windows (Befragungsfenster) unterteilt. Die Korrelation erarbeitet die Intensität in einem jeden interrogation window und durchläuft die gesamte PIV-Aufzeichnung. Die Auswertung ergibt dann für ein jedes interrogation window einen Geschwindigkeitsvektor. [6]

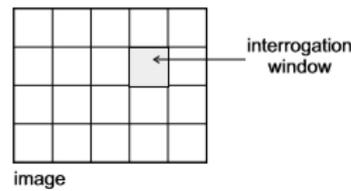


Abbildung 23: die Trennung eines Bildes in einzelne interrogation windows [6]

Im cross-correlation Modus besteht das Originalbild aus zwei frames (1st und 2nd frame). Der erste frame (= frame 0) beansprucht die erste Stelle und der zweite frame (= frame 1) beansprucht die zweite Stelle. [6]

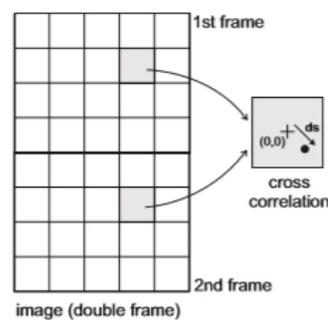


Abbildung 24: Cross-correlation [6]

*Single pass*: Die Vektorberechnung erfolgt in einem Durchgang. Es gibt keine Nachbearbeitung während der Vektorkalkulation.

*64 x 64 Pixel*: Die Fenstergröße definiert die Breite und Höhe der interrogation windows.

*1:1*: Im Allgemeinen verbessert ein runder Gewichtungsfaktor die Genauigkeit in der Vektorfeldberechnung. Ein Nachteil ist die höhere Berechnungszeit.

*Overlap 50 %*: Das overlap definiert die Überlappung von benachbarten interrogation windows. Je größer die Überlappung ist, umso enger ist das Raster der berechneten Geschwindigkeitsvektoren (Die Pixelanzahl für jedes interrogation window ist nicht betroffen). [6]

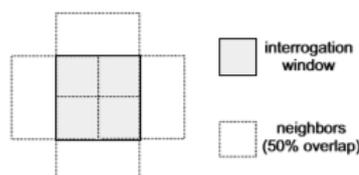


Abbildung 25: Beispiel für eine 50%ige Überlappung der interrogation window [6]

Die Größe des interrogation window und die Fensterüberlappung bestimmen die Rastergröße der Vektorfelder. Zum Beispiel würde eine Fenstergröße von 32 x 32 Pixel und eine Überlappung von 0 % eine Rastergröße von 32 Pixel, eine Fenstergröße von 32 x 32 Pixel und eine Überlappung von 50 % eine Rastergröße von 16 Pixel ergeben. Die Position des ersten Vektors links oben wird nur von der Rastergröße bestimmt. Grundsätzlich ist die Pixelposition (x/y) bei der Hälfte der Rastergröße festgelegt. Zum Beispiel ist bei einer Rastergröße von 32 Pixel der erste Vektor links oben an der Position (16/16) und bei einer Rastergröße von 16 Pixel an der Stelle (8/8). Dieser Grundsatz erlaubt eine Vektorberechnung von Vektorfeldern die in unterschiedlich großen interrogation windows kalkuliert wurden, aber in gleich großen Rastern. [6]

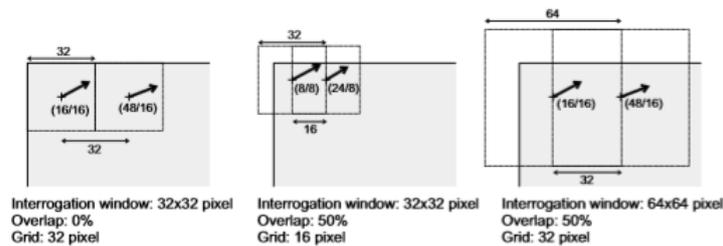
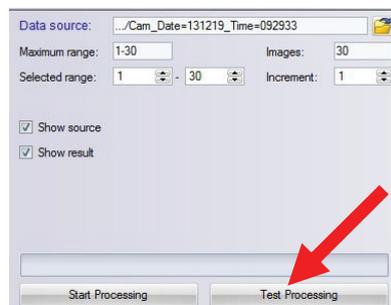
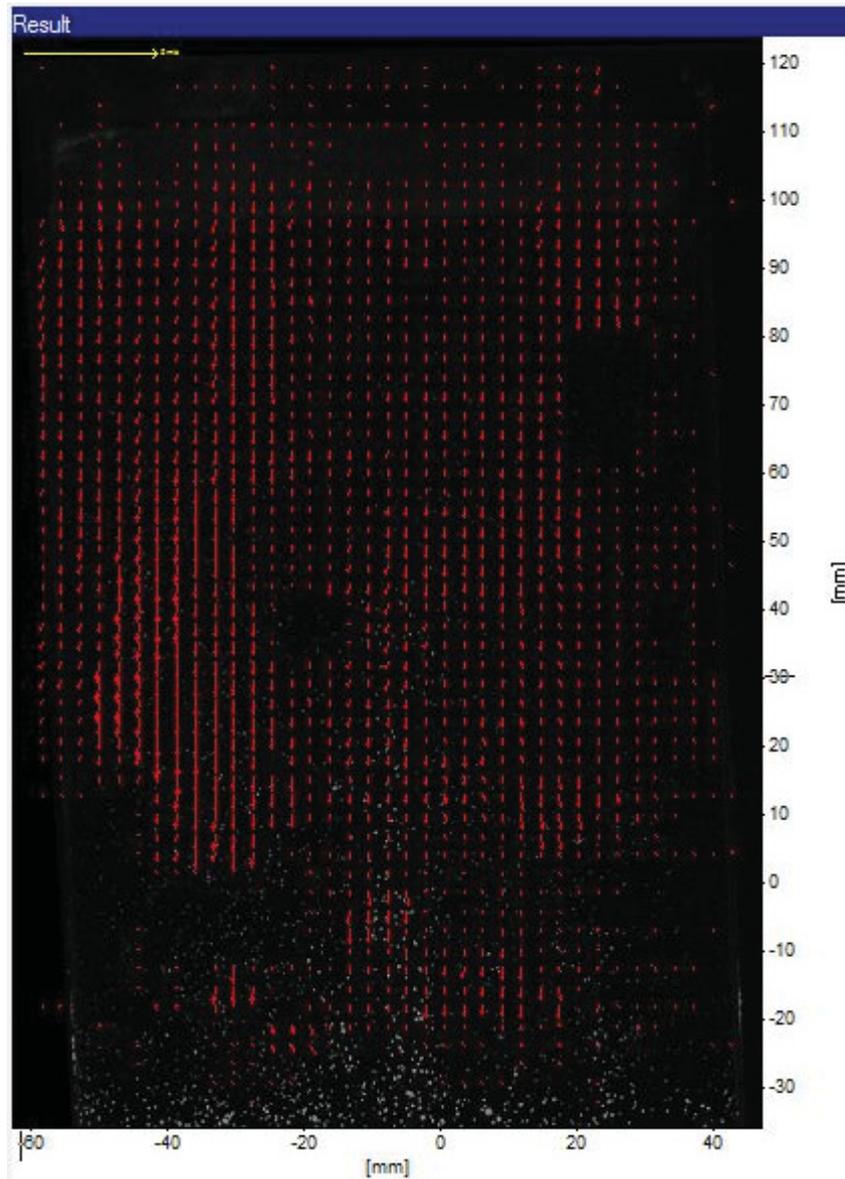


Abbildung 26: verschiedene Vektorpositionen (abhängig von der Größe der interrogation windows und der Überlappung) [6]

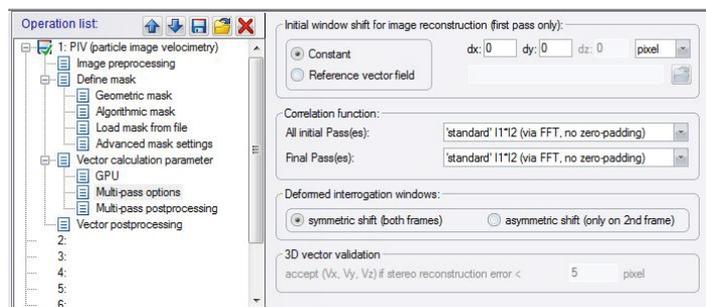
*High-accuracy mode for final passes:* man kann einen anspruchsvolleren Rekonstruktionsalgorithmus für die Bildkorrektur und die Rekonstruktion verwenden. [6]



Nach Beendigung der Einstellungen kann durch Drücken des **Test Processing** button vorab schon einmal angesehen werden, was die Einstellungen bewirken bzw. wie das Endbild aussehen würde.



Die nächsten Einstellungen erfolgen in *Multi pass options*.



*Constant:* Wenn die mittlere Geschwindigkeit in x- oder y-Richtung bekannt ist, kann die entsprechende Separation in das dx und dy Textfenster eingetragen werden (in Pixel oder in Betrag). Der Standardwert für die Verschiebung ist dx = 0, dy = 0. [6]

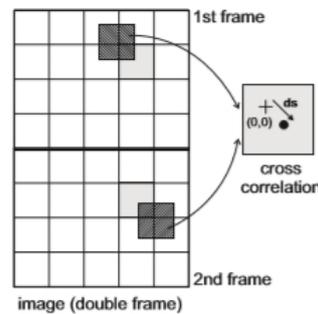


Abbildung 27: Fensterverschiebung für cross-correlation [6]

Im cross-correlation Modus befinden sich die interrogation windows in zwei getrennten frames. Jedes interrogation window ist verschoben um  $(\pm dx/2 / \pm dy/2)$ , sodass die Position des interrogation window im zweiten frame in Bezug auf das interrogation window im ersten frame um  $(dx/dy)$  verschoben ist.

*Correlation function:* Standard  $I_1 * I_2$  (via FFT, no zero-padding): Diese Korrelation verwendet folgende Gleichung

Formel 5: Korrelation [6]

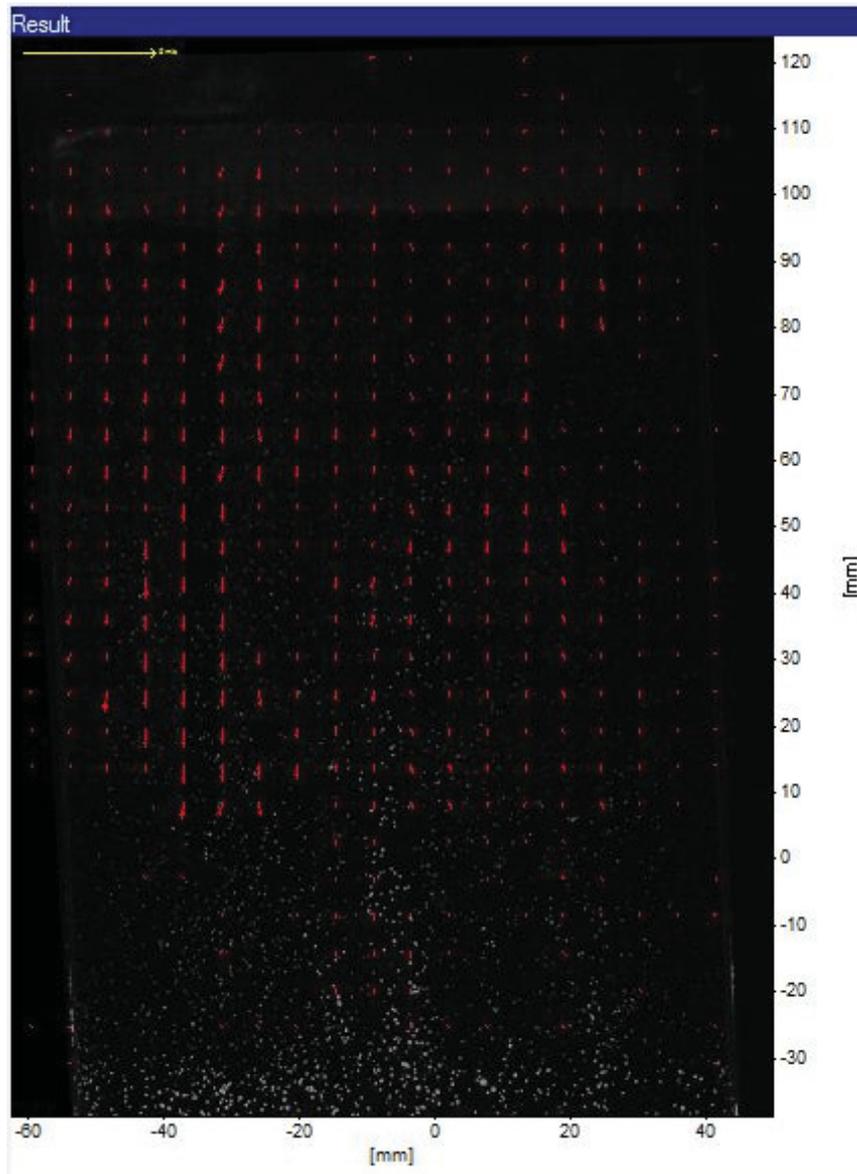
$$C(dx, dy) = \sum_{x=0, y=0}^{x < n, y < n} I_1(x, y) I_2(x + dx, y + dy), -\frac{n}{2} < dx, dy < \frac{n}{2}$$

$I_1$  und  $I_2$ : ist die Bildintensität des ersten und zweiten interrogation window

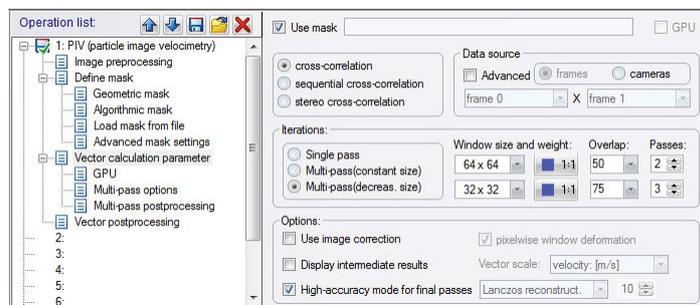
$C$ : ist die Korrelationskraft aller ganzzahliger Verschiebungen  $(dx, dy)$  zwischen den beiden interrogation windows

$n$ : ist die Größe der interrogation windows und meist auch die Größe der Korrelationsebene, d.h.  $\pm n / 2$  ist die maximal berechnete Verschiebung

*Symmetric shift (both frames):* Erlaubt anzugeben, ob der Vektor symmetrisch in der Mitte zwischen interrogation window / Bild (gewöhnlich der Fall in PIV), oder an der Position des ersten interrogation window / Bild (gewöhnlich in Zeitreihenexperimenten wie Deformierungsprozesse, die hinsichtlich des ersten Bildes berechnet werden) ist. [6]



As nächster Schritt sind noch die Optimierungen der Einstellungen im Unterpunkt *Vector calculation parameter* vorzunehmen.



*Multi-pass (decreas. size):* Das Vektorfeld wird kalkuliert von einer beliebigen Anzahl von Wiederholungen  $N_x$  mit abnehmender Größe der interrogation windows. Die anfängliche interrogation window Größe kann in der Auswahlbox in der ersten Reihe bestimmt werden und die Endgröße der interrogation windows in der zweiten Reihe. Die Auswertung startet im ersten Durchgang mit der anfänglichen interrogation window Größe und kalkuliert ein Referenzvektorfeld. Im nächsten Schritt ist die Fenstergröße nur noch halb so groß wie im vorhergehenden Schritt und der Vektor der im ersten Schritt kalkuliert wurde wird als beste Wahl der Fensterverschiebung benutzt. Auf diese Weise wird die Fensterverschiebung verbessert, um die Vektoren in den folgenden Schritten genauer und zuverlässiger schätzen zu können. Dies stellt sicher, dass die gleichen Partikel miteinander korrelieren, auch wenn man kleine interrogation windows verwendet, wo weniger Partikel in das interrogation window ein- bzw. austreten. [6]

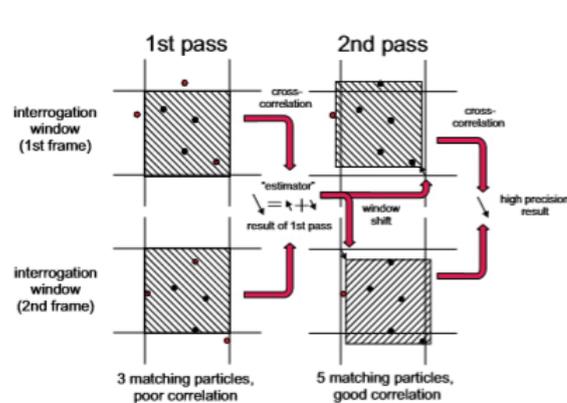
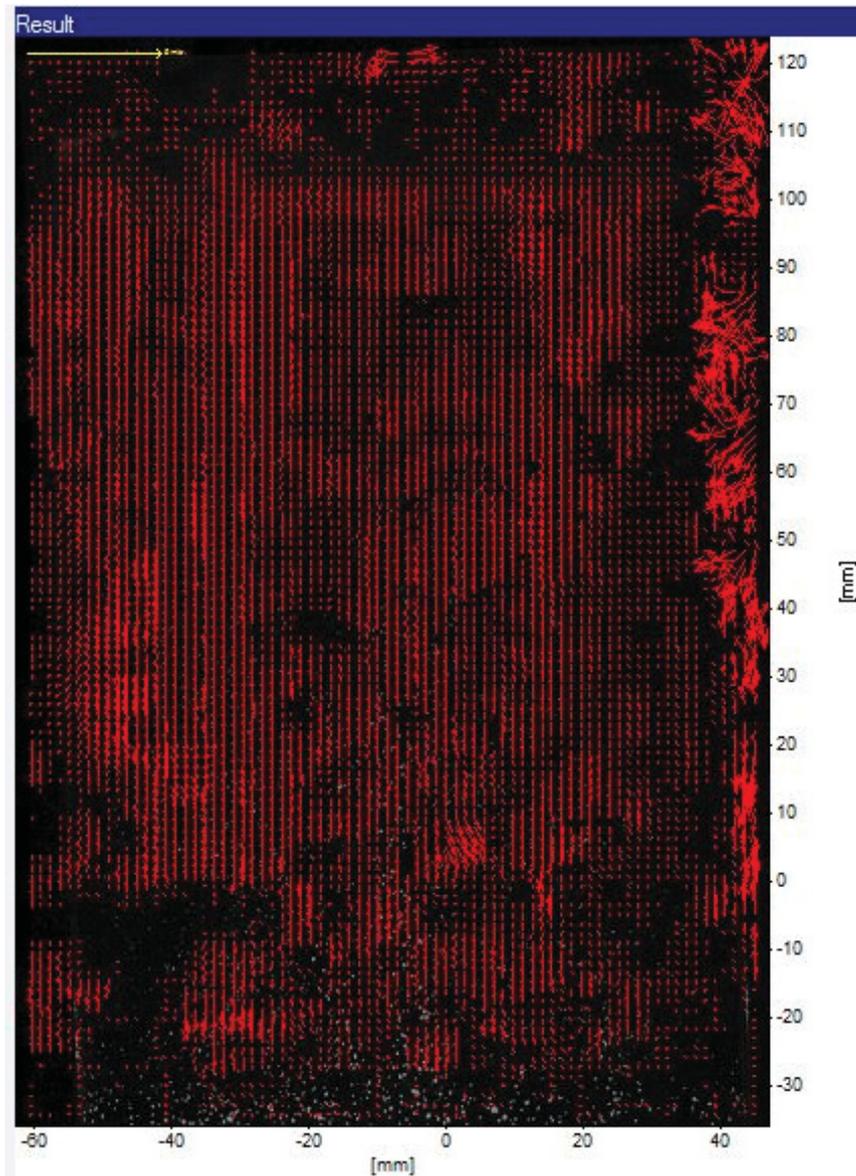
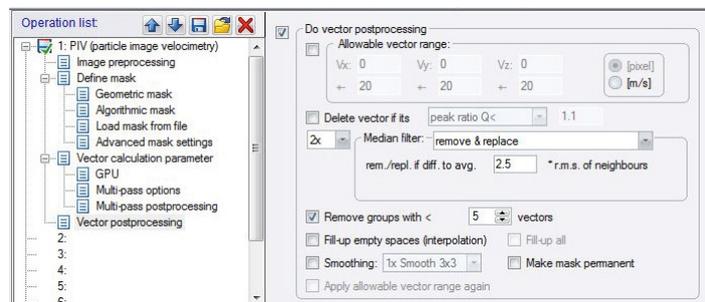


Abbildung 28: multi-pass mit konstanter Größe der interrogation windows [6]

Der multi-pass mit abnehmender Fenstergröße erlaubt viel kleinere Endgrößen der interrogation windows, als es ohne Fensterverschiebung möglich wäre. Dies verbessert die räumliche Auflösung des Vektorfeldes und produziert weniger fehlerhafte Vektoren. [6]



Nun geht man zum Unterpunkt *Vector postprocessing* über.



*Medianfilter*: Er berechnet einen Medianvektor von einer Gruppe von benachbarten Vektoren und vergleicht den Mittelvektor mit diesem Medianfilter  $\pm$  der Abweichung der Nachbarvektoren. [6]

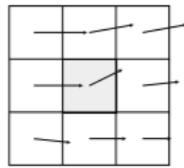


Abbildung 29: lokaler Medianfilter [6]

Kriterien zur Erhaltung eines Vektors:

$$U_{\text{median}} - U_{\text{rms}} \leq U \leq U_{\text{median}} + U_{\text{rms}}$$

AND

$$V_{\text{median}} - V_{\text{rms}} \leq V \leq V_{\text{median}} + V_{\text{rms}}$$

$U_{\text{median}}$  = Medianwert aller U Komponenten der Nachbarvektoren,

$V_{\text{median}}$  = Medianwert aller V Komponenten der Nachbarvektoren,

$U_{\text{rms}}$  = Abweichung von U Komponenten der Nachbarvektoren,

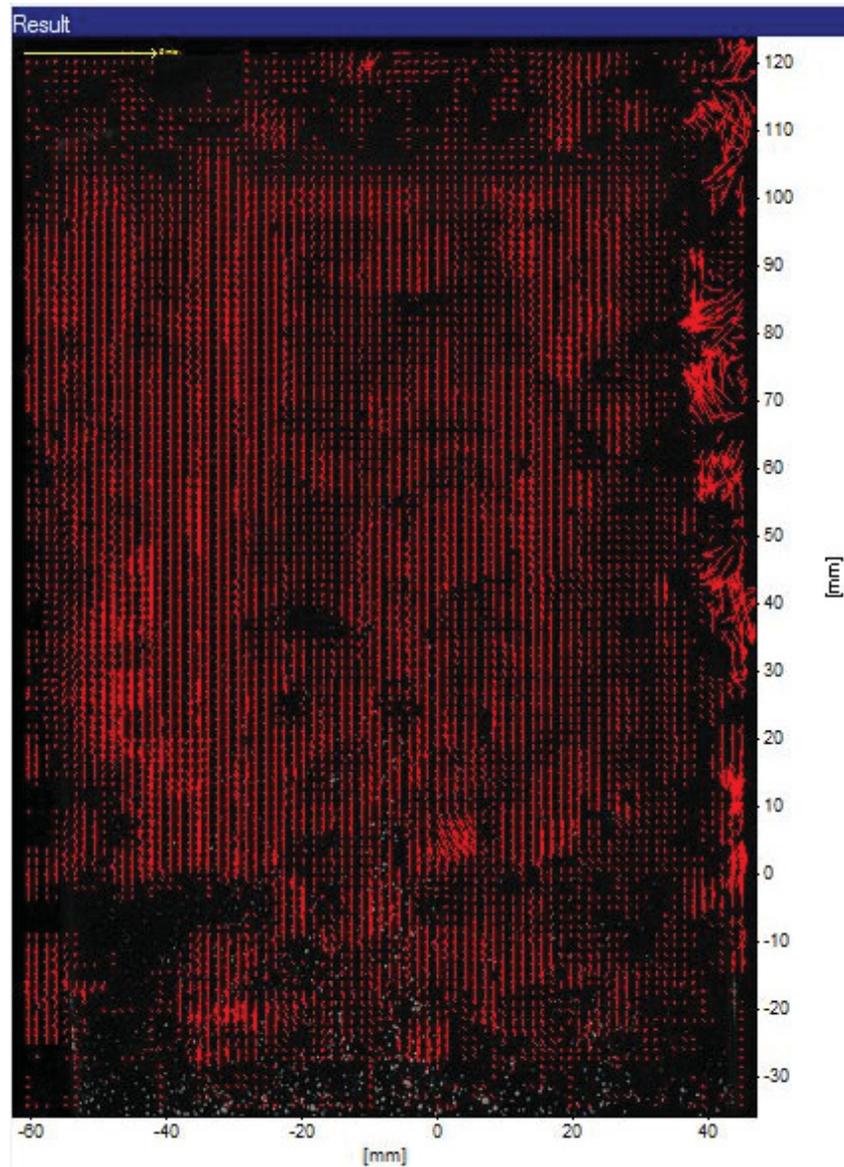
$V_{\text{rms}}$  = Abweichung von V Komponenten der Nachbarvektoren.

Der Medianwert bedeutet, dass z.B. alle U Komponenten nach ihrem Wert sortiert werden und der mittlere Wert wird genommen. D.h. von fünf sortierten Vektoren wird der dritte Vektor und von 6 sortierten Vektoren wird der Mittelwert vom dritten und vierten Vektor genommen. Diese Vorgehensweise hat den Vorteil, dass große Ausreißer an den Enden der sortierten Liste den Medianwert nicht verändern, wie sie das bei der Berechnung des einfachen Durchschnitts tun würden.

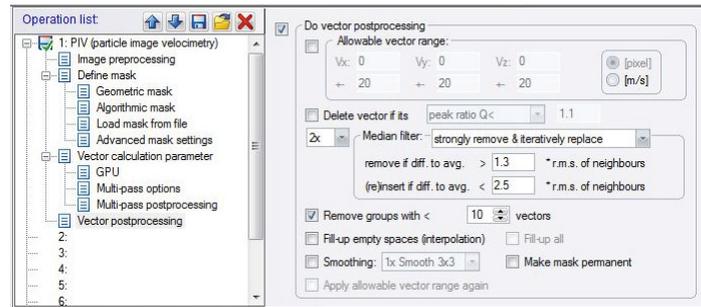
*Remove & replace:* Zuerst wird überprüft welche der 8 Nachbarvektoren sind selbst unechte Vektoren und wurden nicht für die Berechnung des Durchschnitts und der Abweichung verwendet. Wenn ein Vektor als falsch identifiziert wurde, dann werden auch die anderen 3 höchsten Korrelationsspitzen (die auch im Vektorpuffer gespeichert sind) dahingehend überprüft, ob sie ins Bild passen. Wenn dem so ist, dann wird einer von ihnen stattdessen genommen. Dies ist eine sehr zuverlässige Methode, um unechte Vektoren zu identifizieren, selbst wenn es viele unechte Vektoren gibt. (Die ersetzten Vektoren können durch eine spezielle Farbe, abhängig von der Höhe der entsprechenden Korrelationsspitze, identifiziert werden).

**Hinweis:** Es wird die Eingabe von Faktoren zwischen 1 und 3 empfohlen, abhängig von der Turbulenz der Vektoren, die verarbeitet werden müssen.

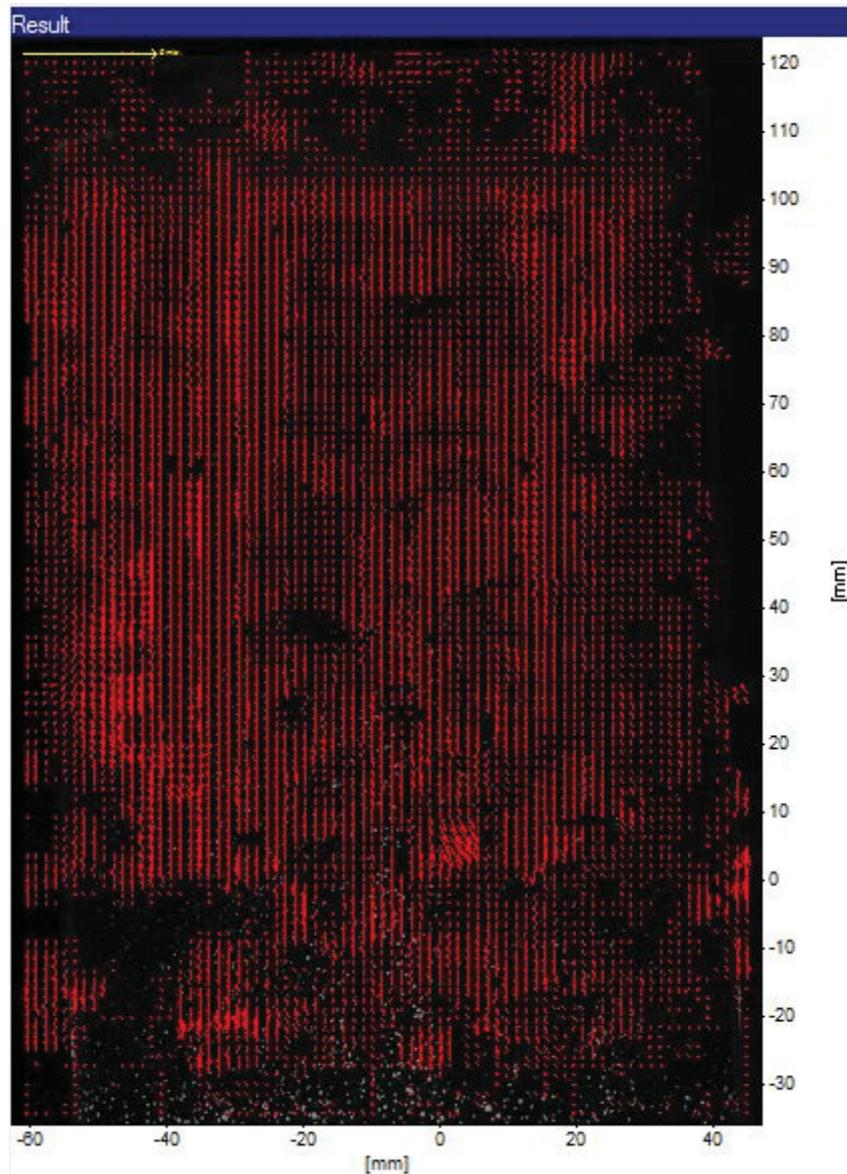
*Remove groups*: Insbesondere wenn eine große Überlappung bei der Auswertung der Partikelbilder verwendet wird, ist es möglich, Gruppen von falschen Vektoren zu erhalten, wenn man einen Fehler (beispielsweise einen Reflex) an einer Position in dem Bild hat. Wenn dieser Fehler einen großen Beitrag zum Korrelationsignal hat, dann erhält man eine Gruppe von Vektoren, die offensichtlich falsch sind. Aber man hat ähnliche Vektoren in der Nachbarschaft und diese wurden vom Medianfilter nicht entfernt. [6]



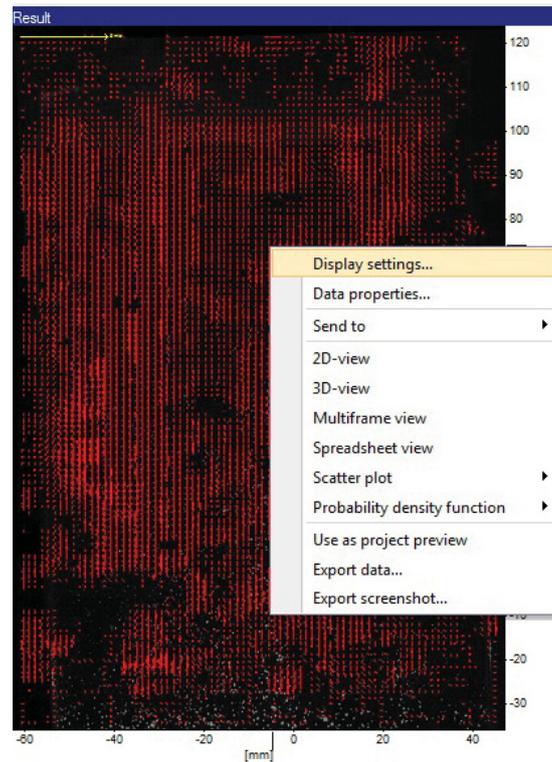
Nach Durchsicht des Probeergebnisses sind die Einstellungen in *Vector Postprocessing* zu optimieren.



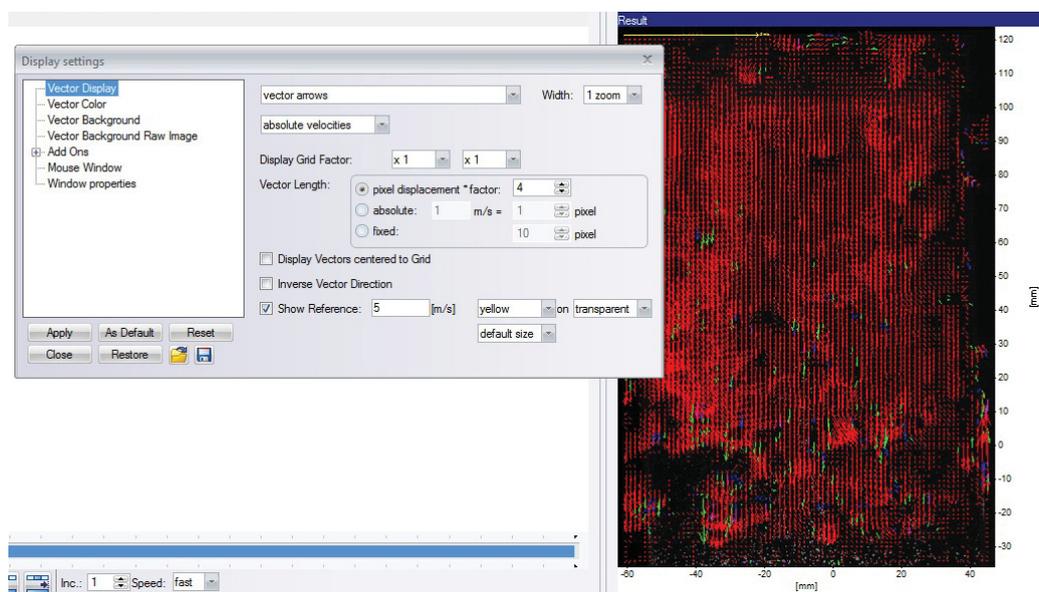
*Strongly remove & iteratively replace*: Dies ist ein Regionalmedianfilter der in vier Arbeitsschritten arbeitet und dazu fähig ist, Gruppen von unechten Vektoren zurückzuweisen. Dieser Filter ist ideal, wenn das Vektorfeld keine unechten Vektoren enthalten soll. Der Nachteil ist jedoch, dass auch einige gute Vektoren zurückgewiesen werden. [6]



Um die nächsten Einstellungen vornehmen zu können ist im Vektorbild die rechte Maustaste zu drücken und das *Display settings* Fenster erscheint.



Im Punkt *Vector Display* werden die allgemeinen Einstellungen für die Vektordarstellung definiert.



*Vector arrows*: ist ein Vorgabewert, um Vektoren anzuzeigen

*Width*: Die Breite (in Pixel) der angezeigten Vektoren kann zwischen konstanten 1 Pixel für alle Zoomfaktoren, oder 1 bis 9 Pixel gezoomt eingestellt werden. Wenn man in die Anzeige zoomt, dann wird die Breite mit dem Zoomfaktor multipliziert, somit wird die Breite beim Zoom größer. Der Standardwert ist 1 Pixel, um Vektoren mit einer kleinen Breite malen zu können, unabhängig vom Zoom.

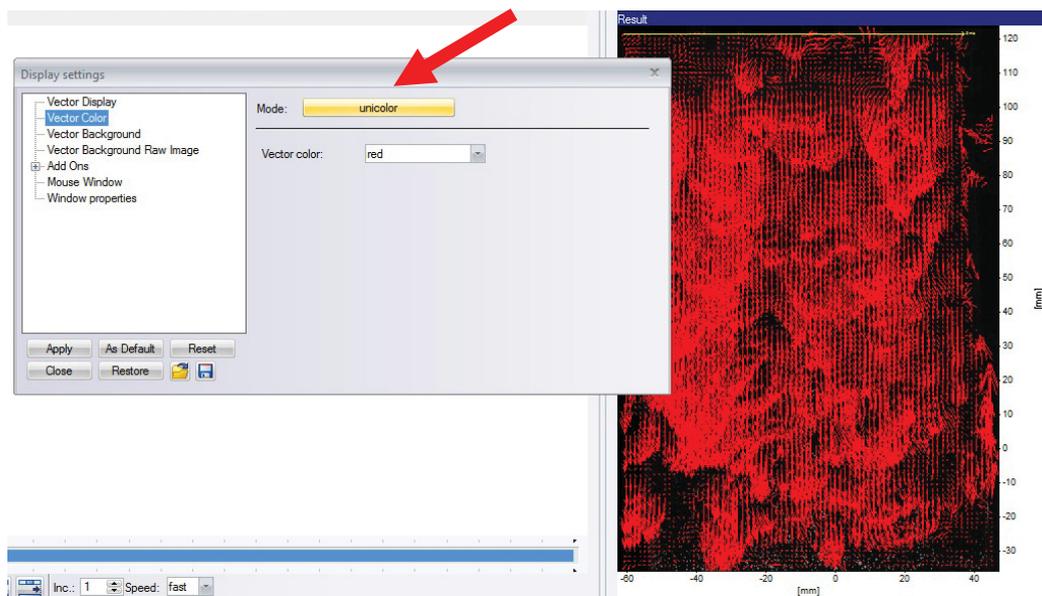
*Absolute velocities*: wird standardmäßig angezeigt

*The display grid factor*: definiert die Zahl der angezeigten Vektoren

*The vector length*: Die Vektoren werden für einen besseren Überblick an die Messwerte angepasst. Es kann ein beliebiger Faktor für die Pixelversetzung eingetragen werden.

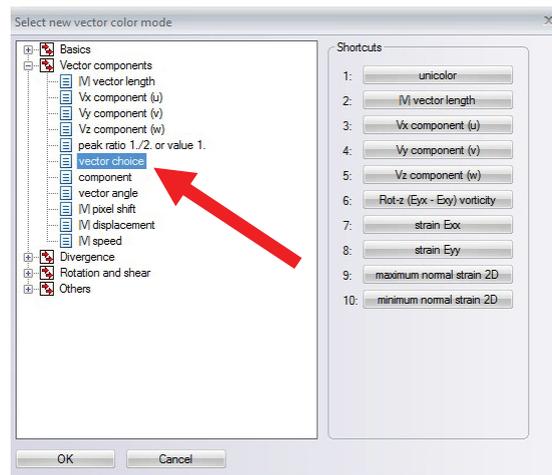
*Show reference*: Hier wird ein Referenzvektor im oberen linken Eck des Vektorbildes angezeigt. Man kann die Farbe und die Länge des Vektors (z.B. 5 m/s) auswählen. [13]

Im Punkt *Vector Color* kann die Farbe, die für die Vektorpfeile verwendet werden soll, eingestellt werden.



*Unicolor*: alle Vektoren werden mit der gleichen Farbe dargestellt, die man aus einer Liste von 16 vordefinierten Farben auswählen kann. [13]

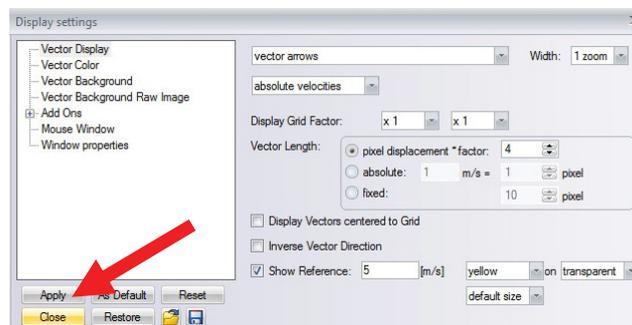
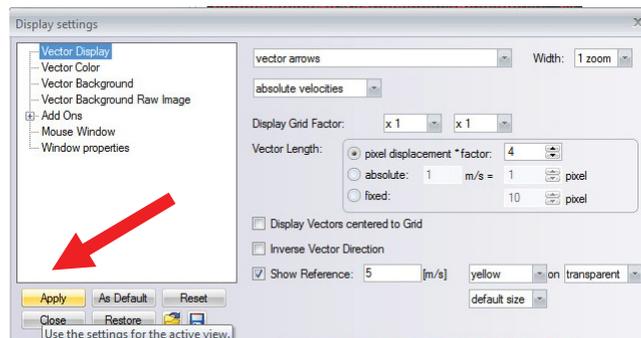
Durch drücken des **Unicolor** button erscheint nachfolgendes Fenster.



Hier wählt man im Punkt *Vector components* den Unterpunkt *Vector choice* aus.

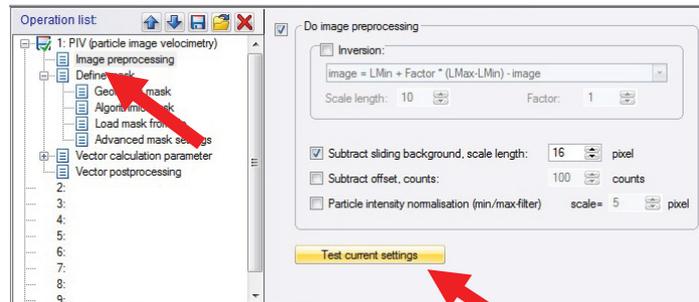
*Vector choice*: hier kann man Farben für alle vier Vektorarten sowie für die gefüllten bzw. die geglätteten Vektoren auswählen. [13]

Zum Abschluss der bisherigen Einstellungen unter *Display Settings* sind der **Apply** button und anschließend der **Close** button zu drücken.



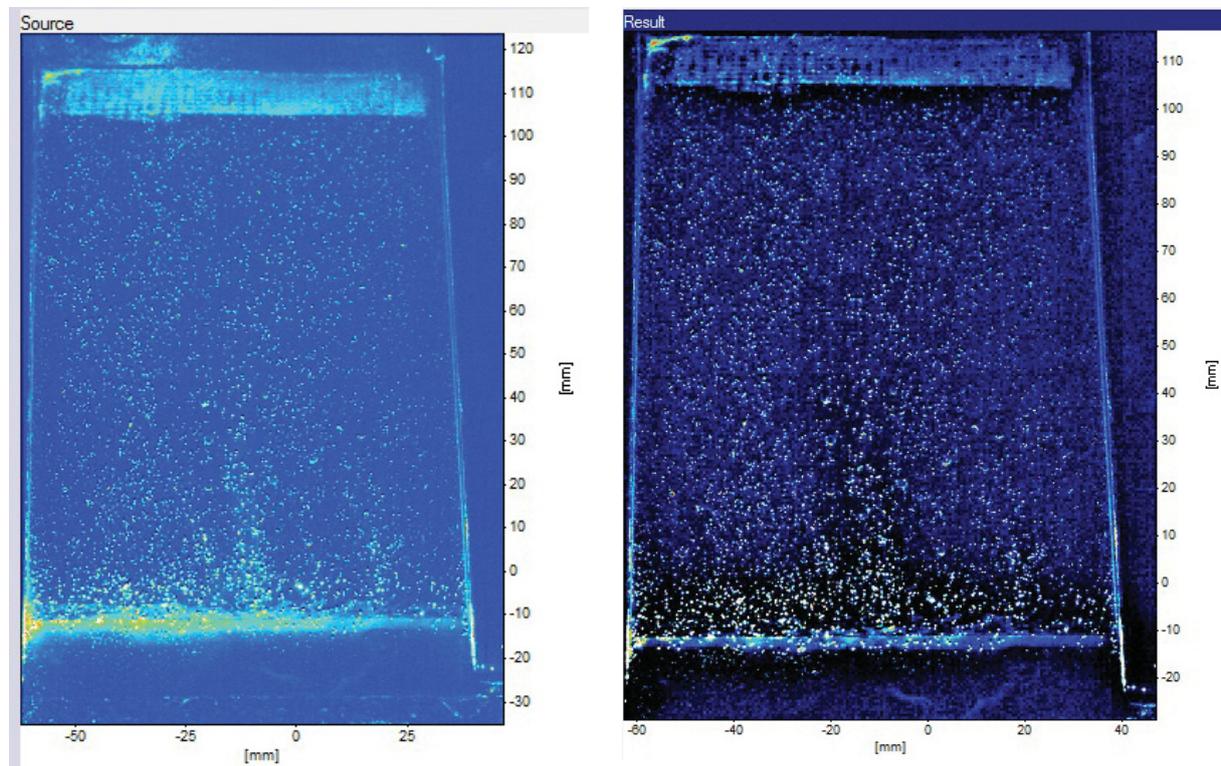
Die weiteren Einstellungen erfolgen unter *Image Preprocessing*.

Hier hat man die Möglichkeit das Partikelbild vor der Vektorkalkulation zu manipulieren. Dies hilft oft die Qualität der Resultate zu verbessern, vor allem wenn man mit hohen oder sich lokal ändernden Hintergrundintensitäten arbeiten muss. [6]



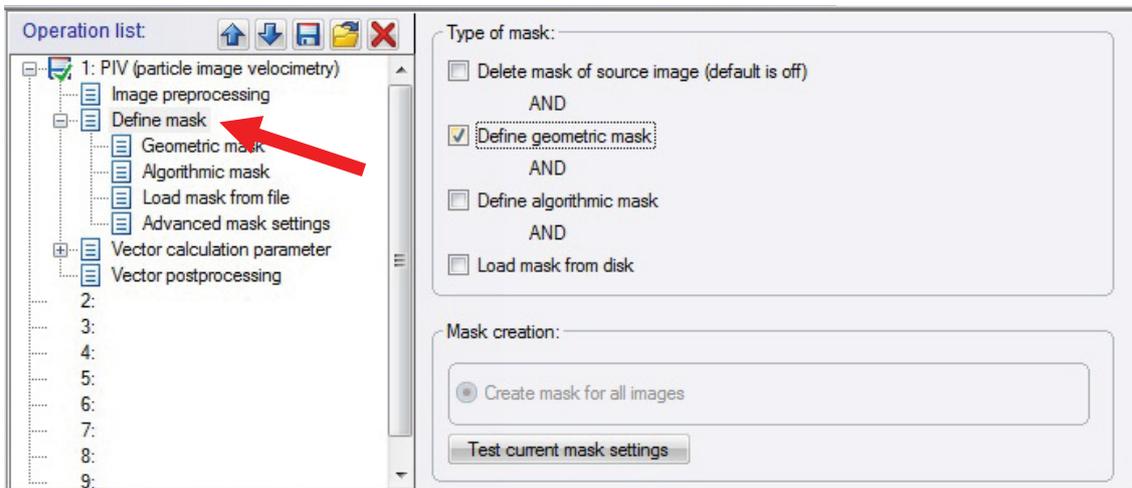
*Subtract a sliding background:* Dies kann nützlich sein, wenn man Intensitätsschwankungen im Hintergrund nicht verhindern kann (Reflexionen, ...). Die Skalenlänge sollte mindestens doppelt so groß wie der mittlere Partikeldurchmesser sein.

Durch Drücken des **Test current settings** buttons, werden die aktuellen Einstellungen der Bildvorverarbeitung auf das derzeit aktive Quellbild (linkes Fenster) angewendet und das Ergebnis wird im Ergebnisfenster (rechtes Fenster) gezeigt. Dies ermöglicht eine Überprüfung dahingehend, ob der aktuelle Parameter-Setup dazu geeignet ist, die Bildqualität vor der Vektorberechnung zu verbessern. [6]

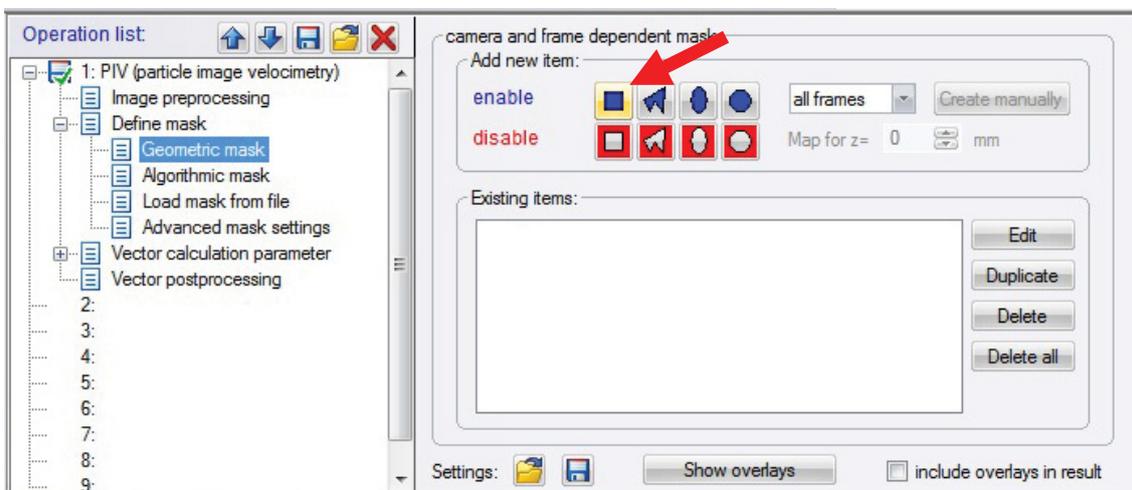


Jetzt sind nur noch die Einstellungen unter *Define mask* vorzunehmen.

*Define Mask*: Hier kann die Methode ausgewählt werden, mit welcher man die Maske definieren möchte.



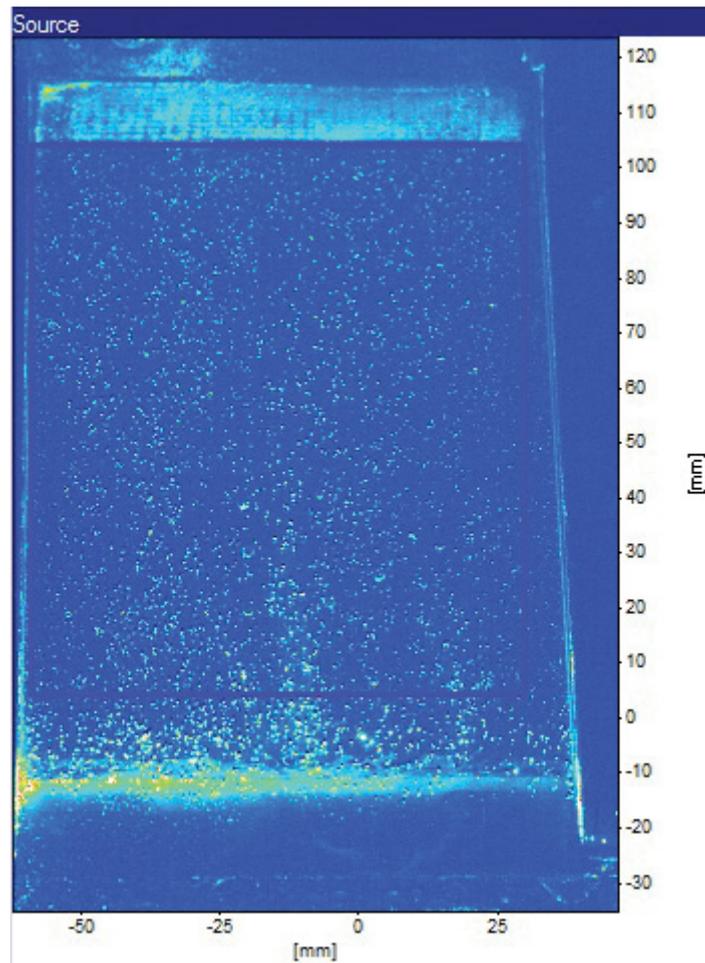
*Define geometric mask*: Erlaubt aus einer Anzahl von geometrischen Formen auszuwählen.



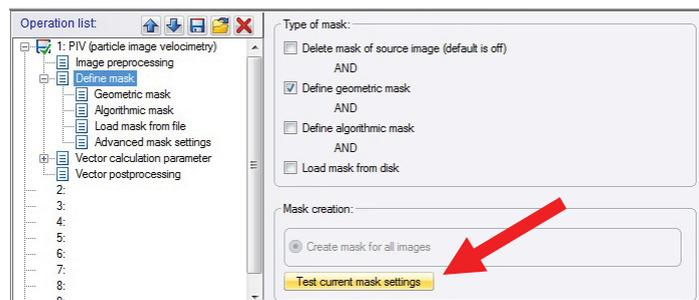
*Geometric mask*: Dies ist der Standardmaskendefinitionsmodus für fixe geometrische Formen.

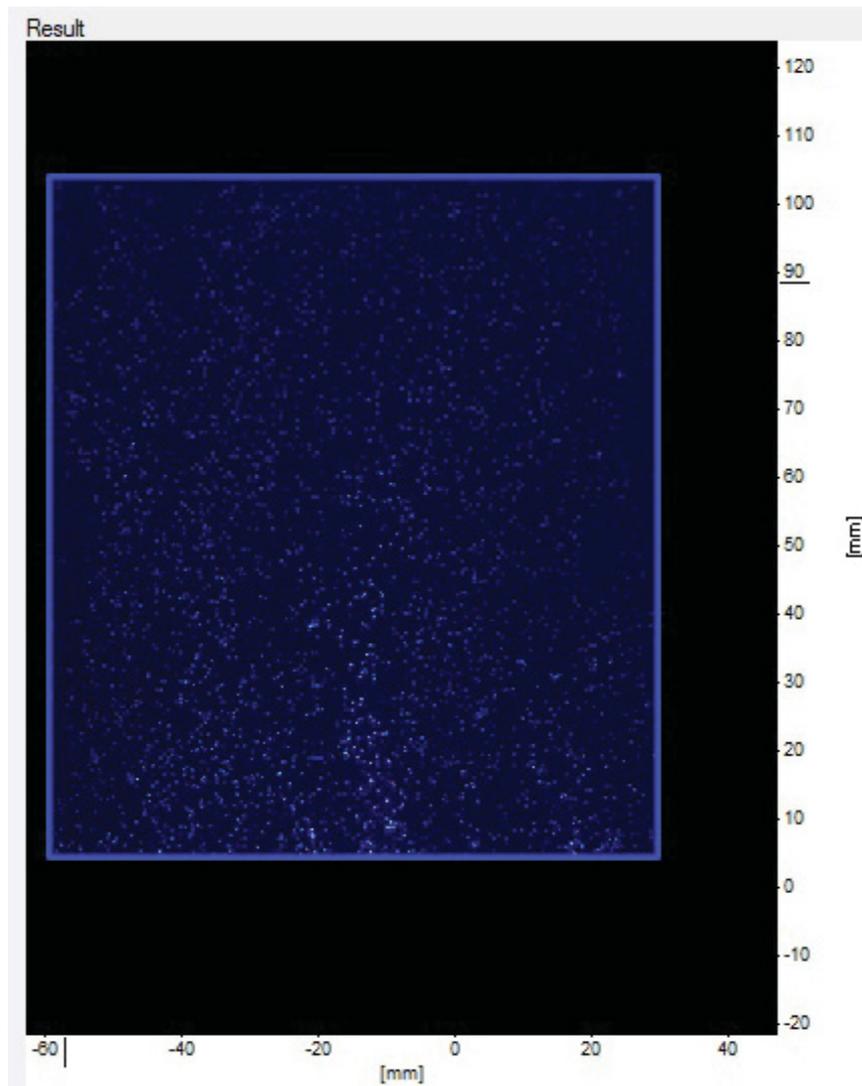
Man definiert eine Region, indem man auf einen der acht buttons drückt. Die blauen buttons bedeuten, dass die Pixel innerhalb verwendet werden und die Pixel außerhalb der geometrischen Figur werden ausgeblendet. Die roten buttons bedeuten, dass die Pixel außerhalb der geometrischen Figur verwendet und die Pixel innerhalb ausgeblendet werden.

*Rechteck*: Der erste Mausklick definiert eine Ecke des Rechtecks im Quellbild (linkes Bild) und der zweite Mausklick definiert die gegenüberliegende Ecke. Hier ist nicht wichtig mit welcher Ecke man beginnt. [6]

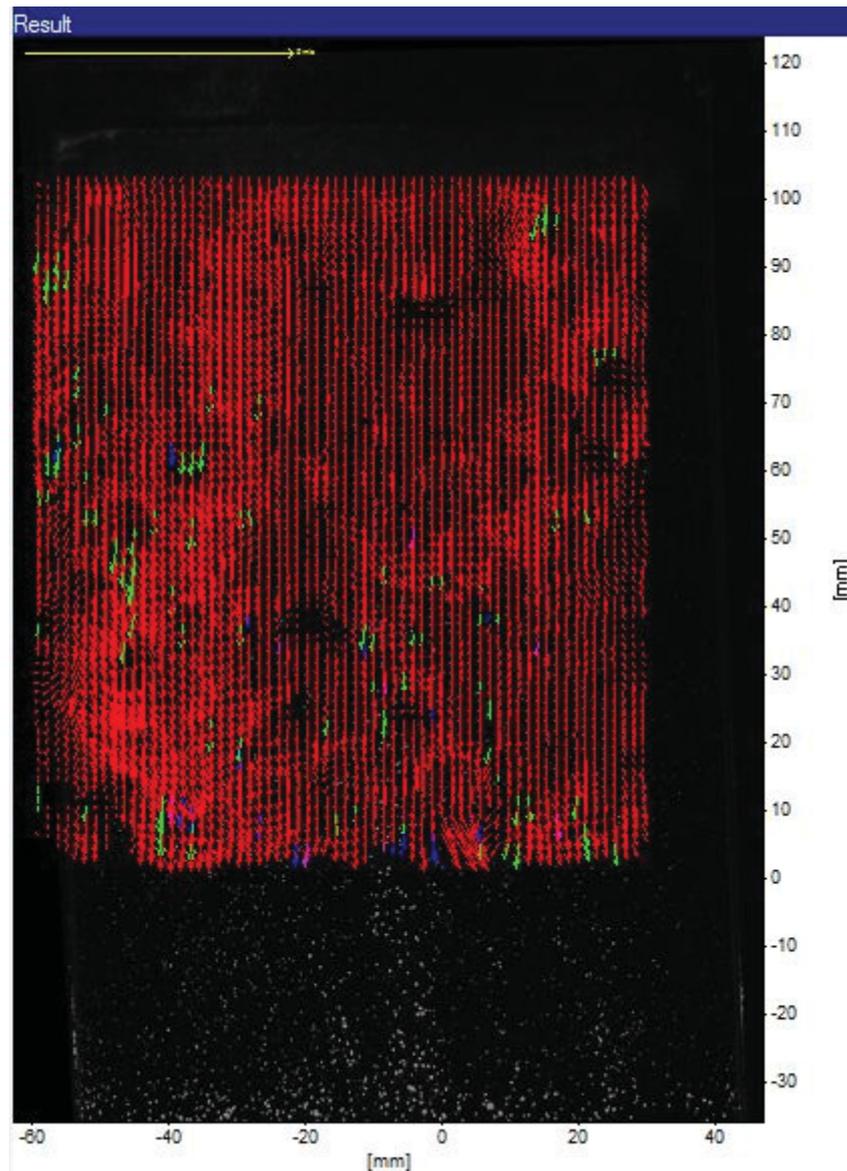


Durch drücken des **Test current mask settings** button erscheint das vorläufige Resultat des Versuchs.



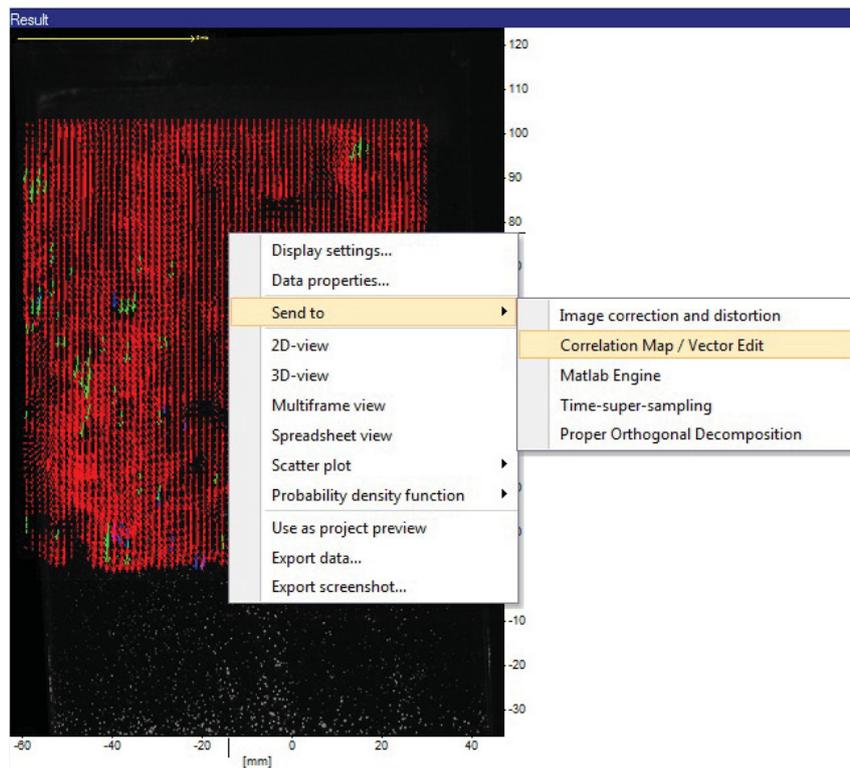


Anschließend wird unter *Image Preprocessing* der **Test current mask settings** button gedrückt und das nachfolgend abgebildete vorläufige Endresultat erscheint.

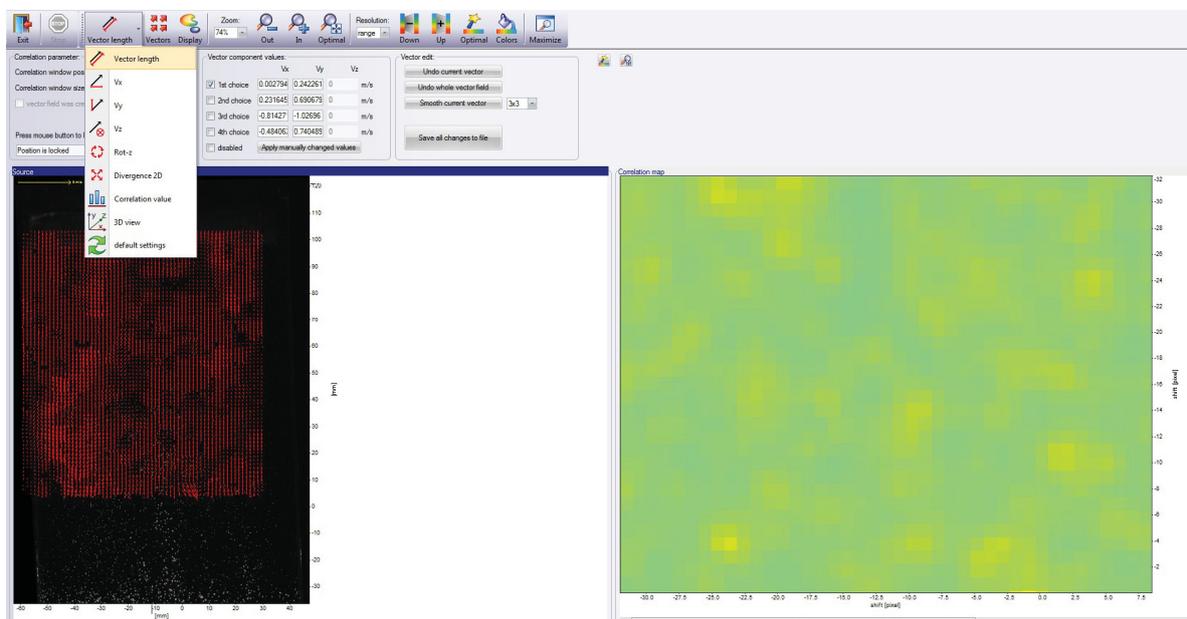


Um das Endergebnis anschaulicher zu machen müssen noch einige Verbesserungen der Einstellungen vorgenommen werden. Hierzu werden die Schritte nicht mehr detailliert erklärt, da dies größtenteils in den Seiten davor getan wurde.

Als nächster Schritt mit der rechten Maustaste ins Ergebnisfenster klicken und *Send to Correlation Map / Vector Edit* auswählen.



Anschließend mit der linken Maustaste in das Vektorbild klicken und dann *Vector Length* auswählen.



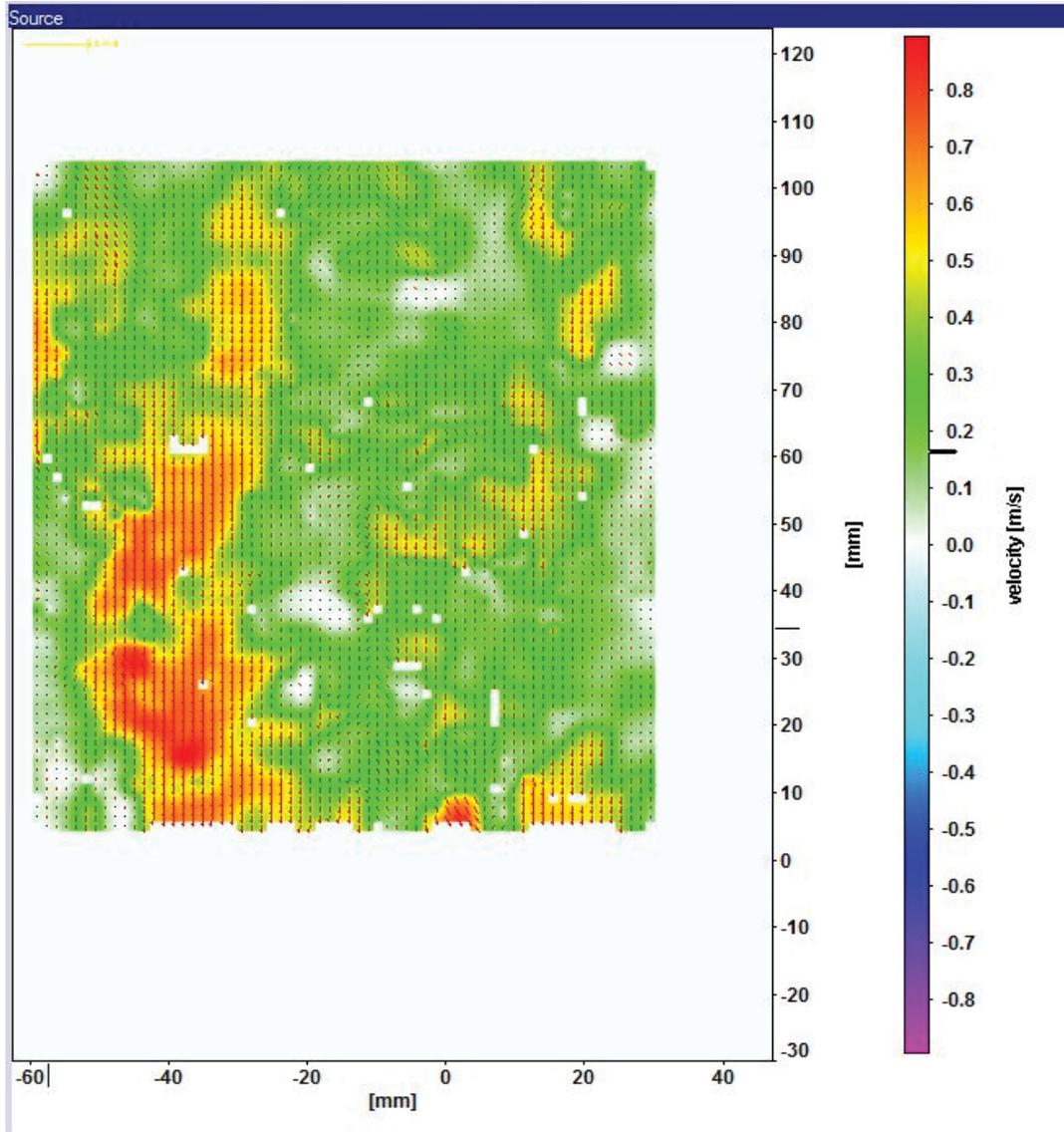
Correlation parameter:   
 Correlation window position:    
 Correlation window size:    
 vector field was created using image correction   
 Press mouse button to lock in selection   
 Position is locked

Vector component values:   

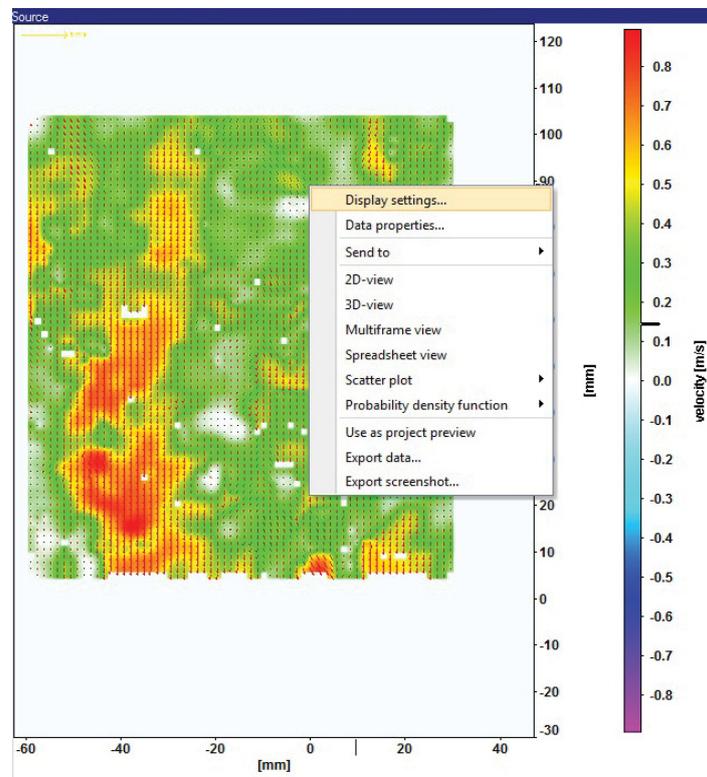
	Vx	Vy	Vz	
<input type="checkbox"/> 1st choice	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	m/s
<input type="checkbox"/> 2nd choice	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	m/s
<input type="checkbox"/> 3rd choice	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	m/s
<input type="checkbox"/> 4th choice	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	m/s

 disabled

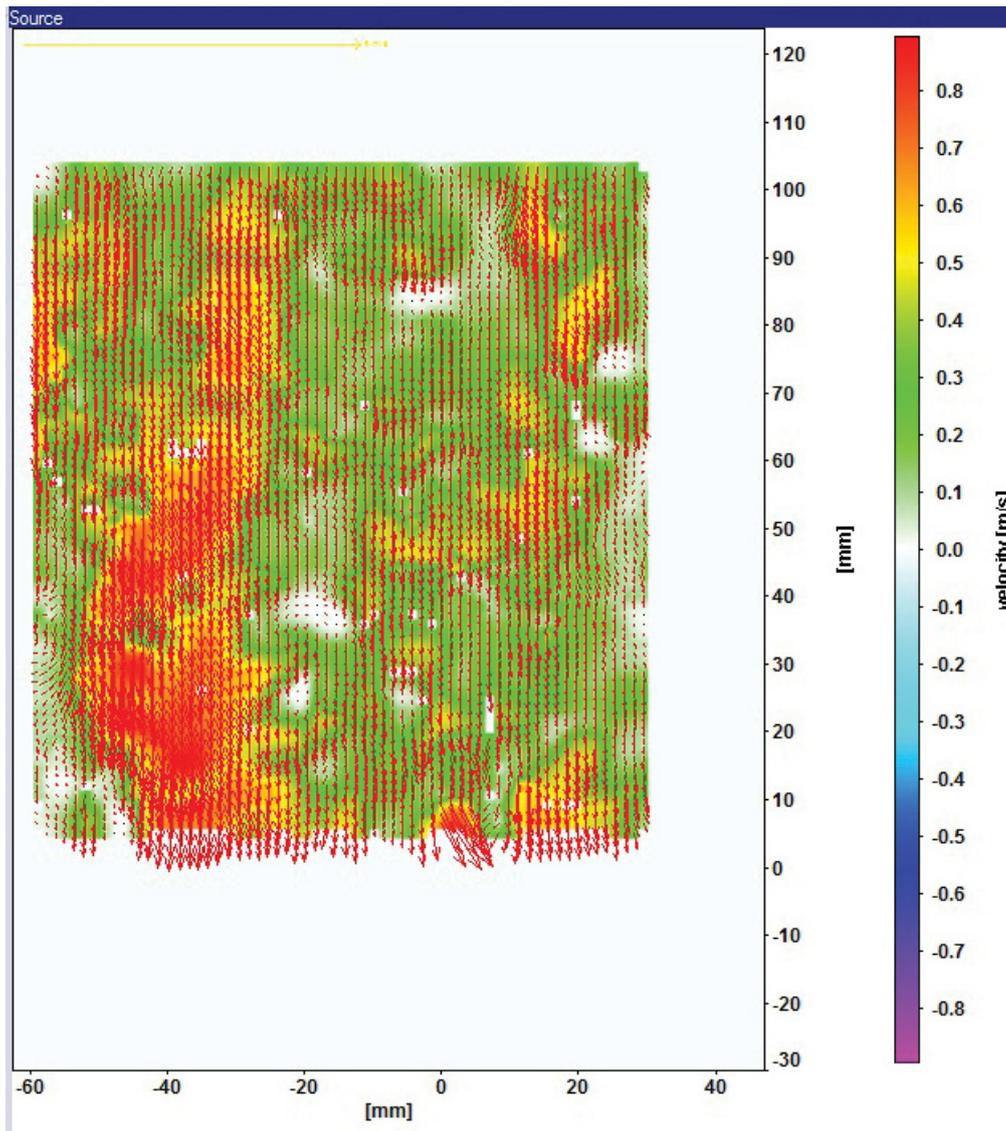
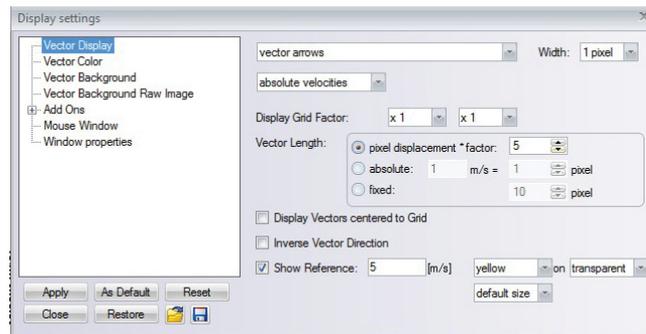
Vector edit:



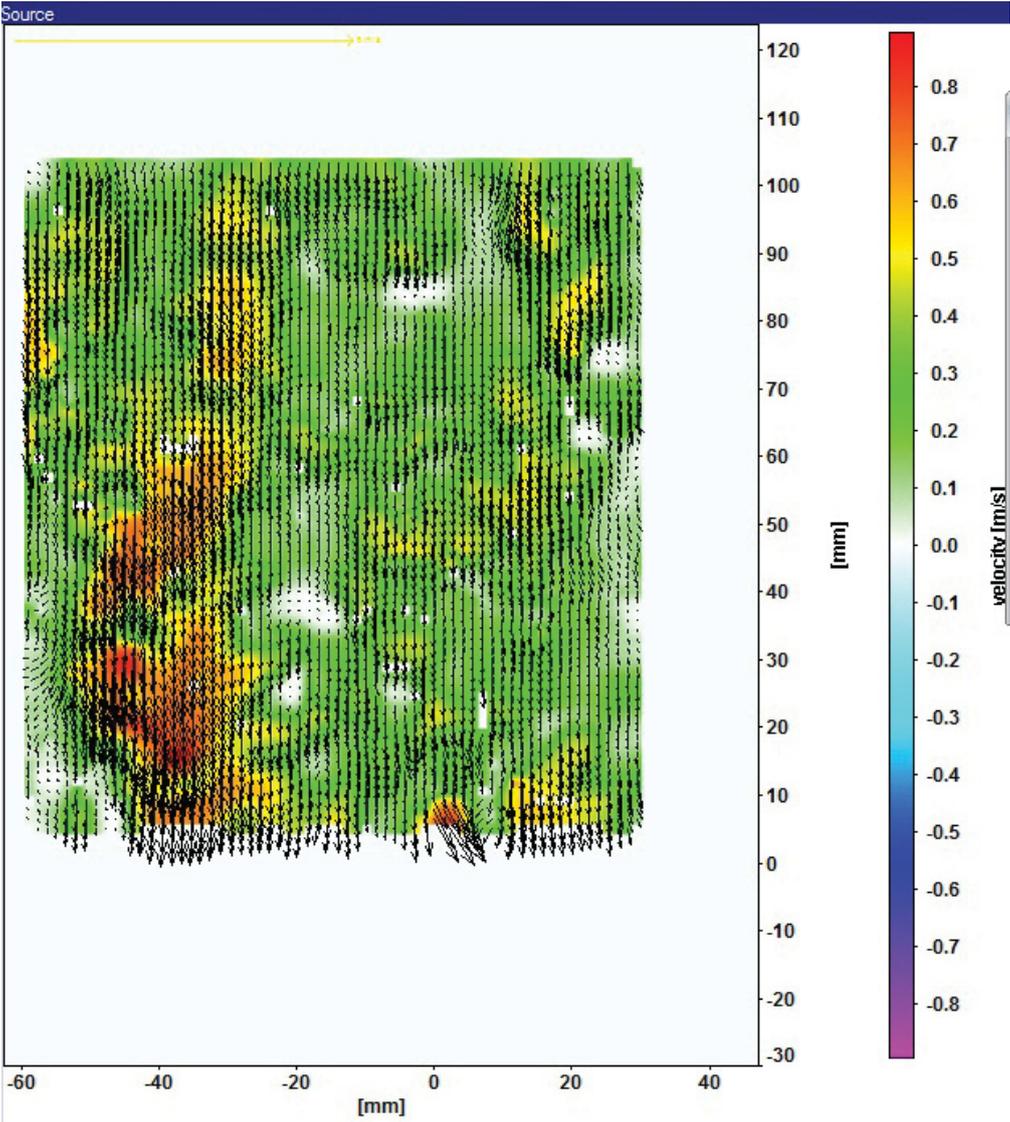
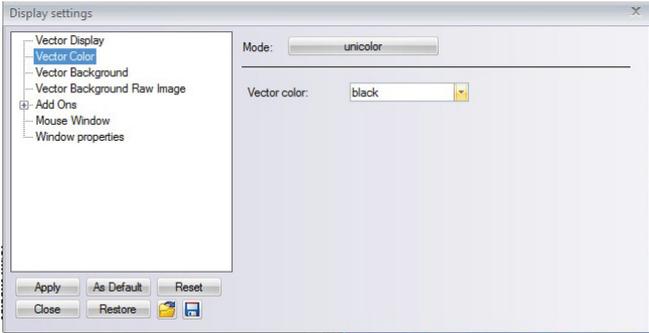
Mit der rechten Maustaste in das Ergebnisfenster klicken und auf *Display settings* drücken.



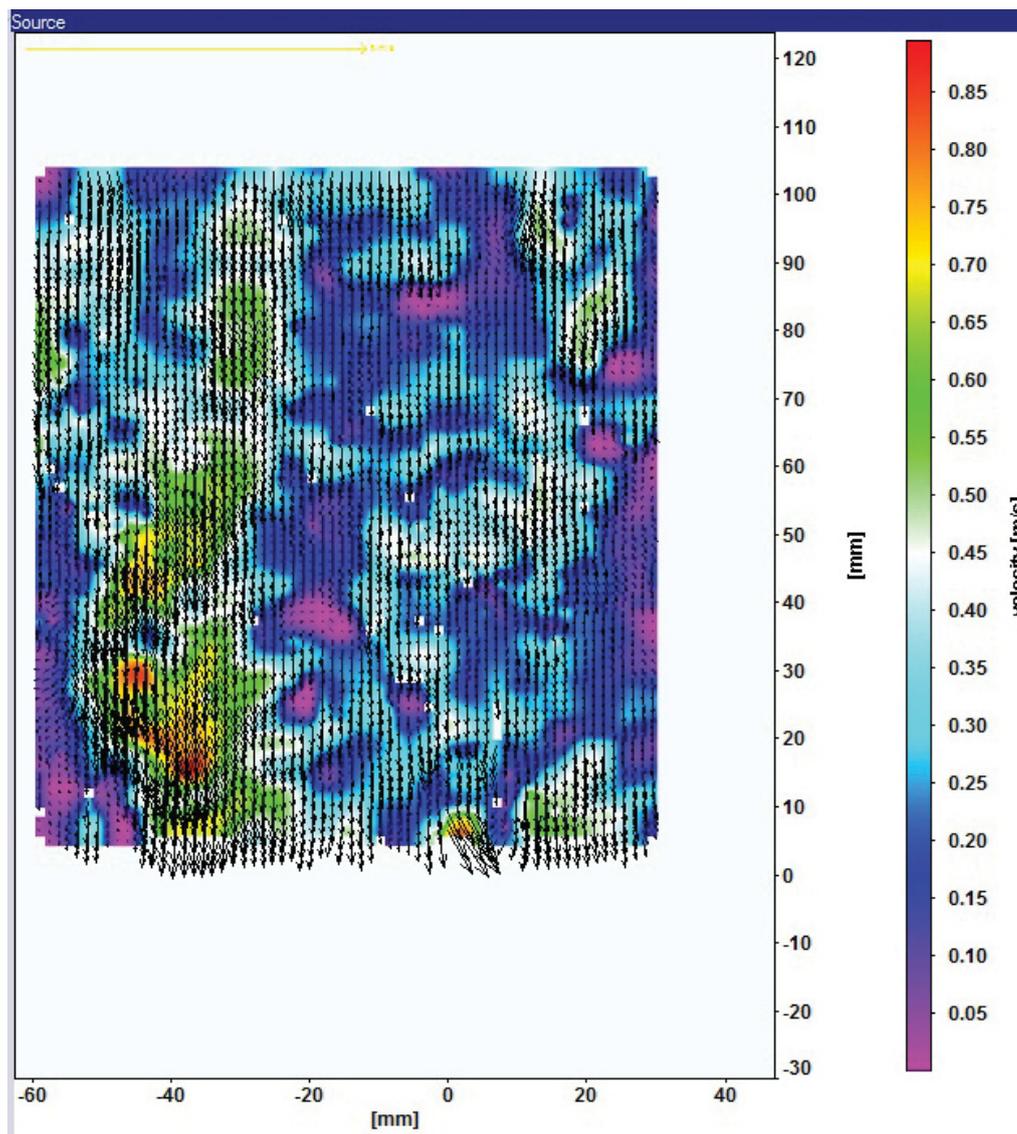
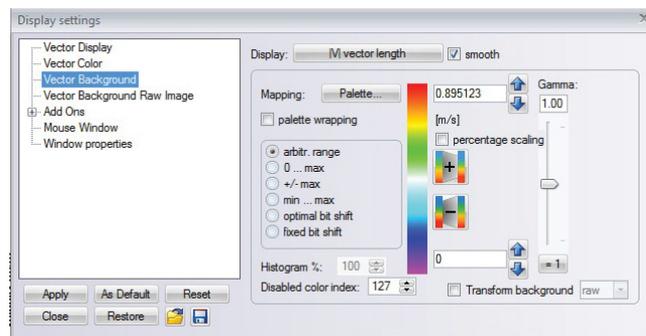
Vector Display

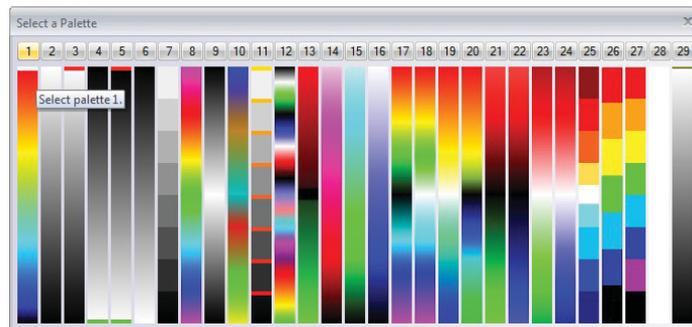
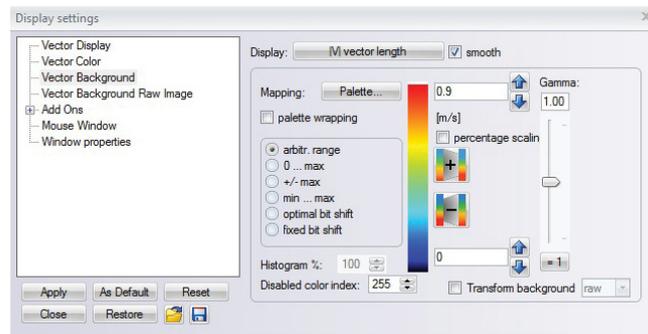


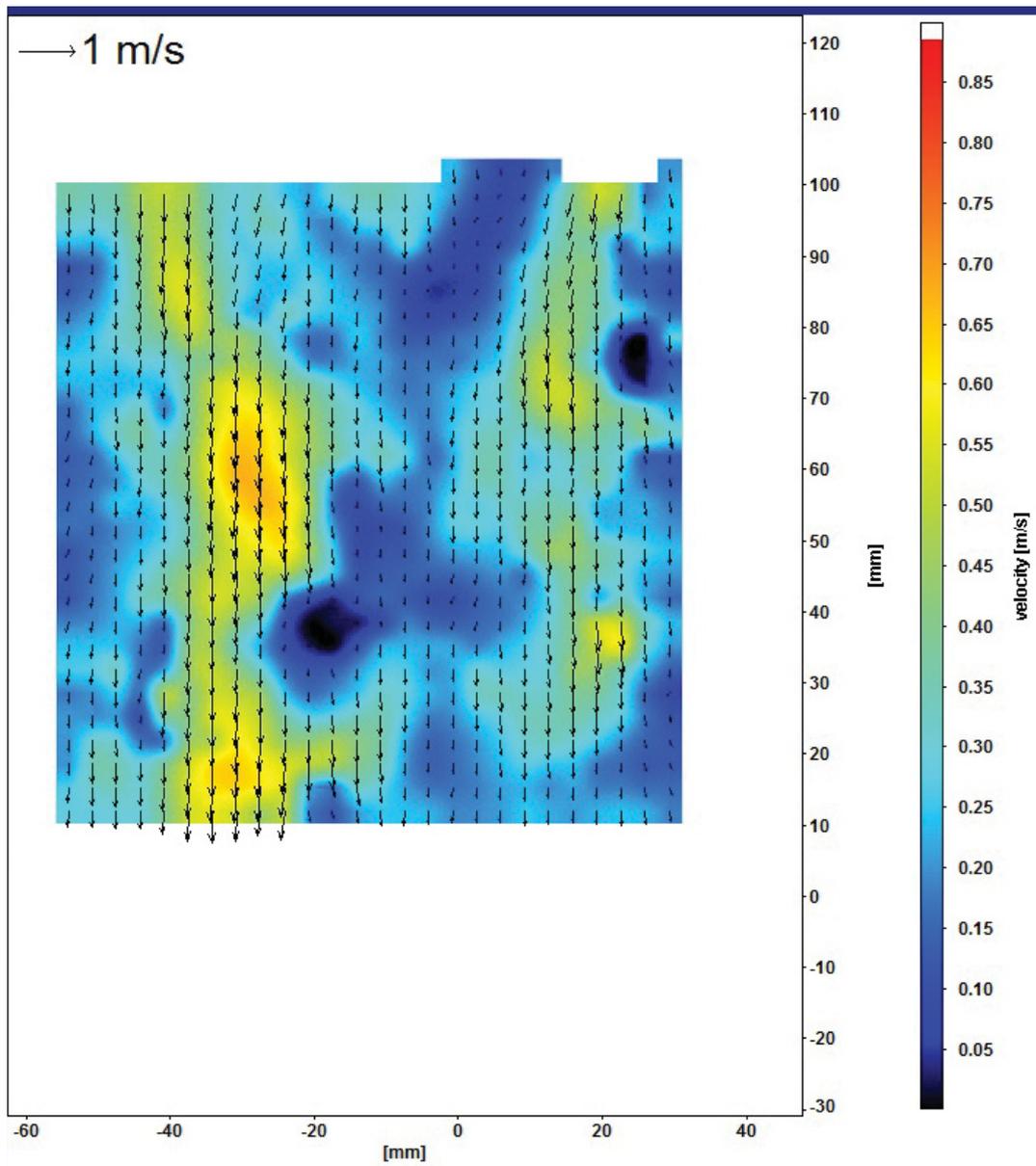
Vector color



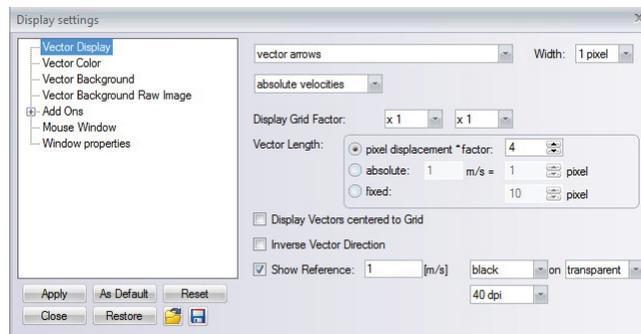
Vector Background



Optimierungen unter *Vector Background*

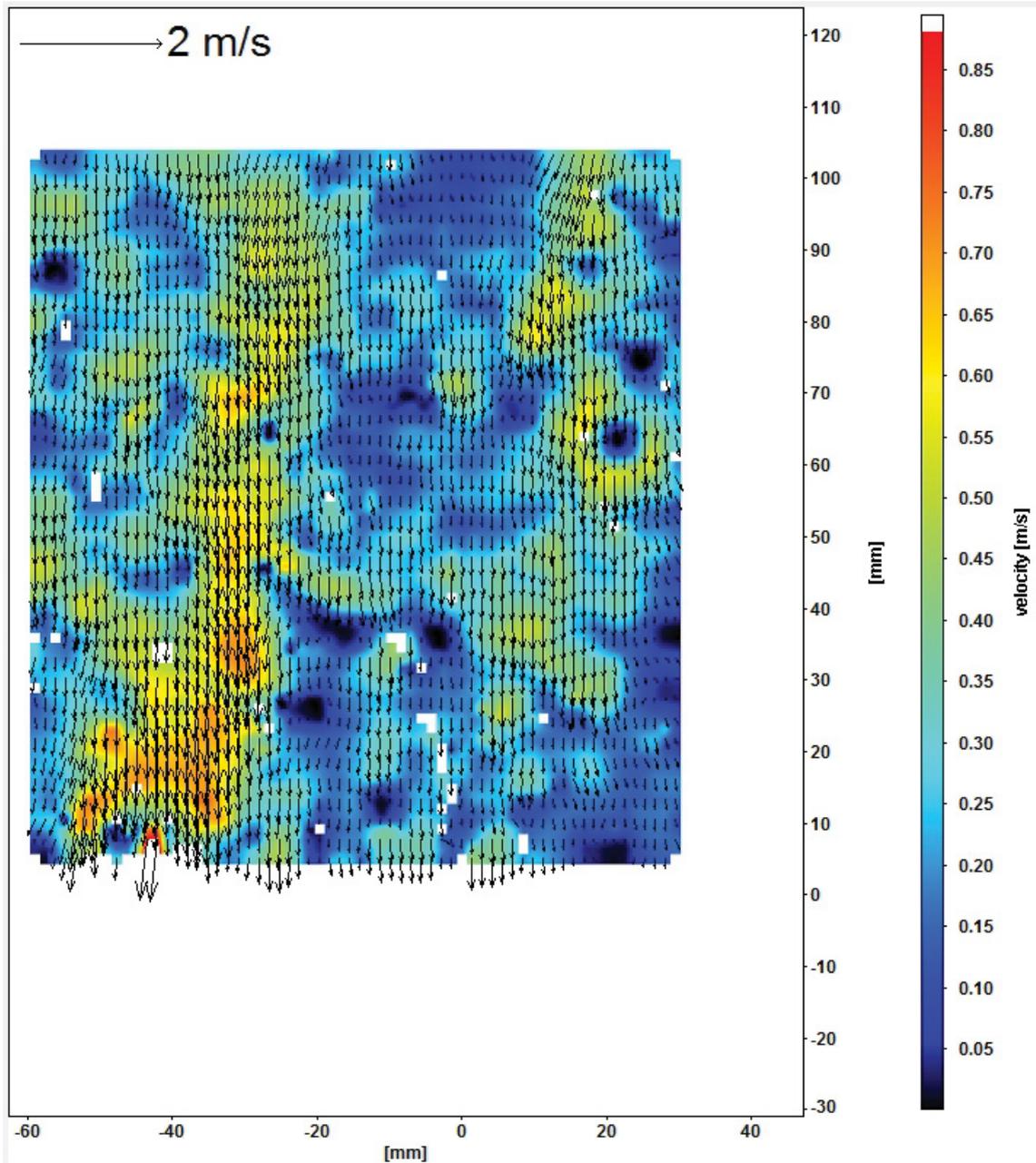


*Vector Display*



Auf 2 m/s, black on transparent und 40 dpi umstellen.

### 4.7.6 Versuchsergebnisse



Das Versuchsergebnis zeigt sehr deutlich, dass sich die Geschwindigkeitsverteilung sehr unterschiedlich gestaltet. Außerdem ist sehr gut ersichtlich, dass der Filmstrom nicht gleichmäßig ist und immer wieder abreißt. Daher ist die Geschwindigkeit auf der linken Seite des Bildes in einem Streifen sehr schnell und auf der rechten Bildseite sehr durchwachsen. Die dunkelblauen Stellen zeigen, dass es hier überhaupt keine Geschwindigkeit gibt, d.h. dass es keinen Filmstrom gegeben hat. Auch ist sehr deutlich zu erkennen, dass die Wasseraufgabe nicht reibungslos funktioniert, d.h. dass schon kein gleichmäßiger Wasserfilm aufgegeben wird.

## 5 Diskussion der Ergebnisse

Wie dieser Versuch sehr deutlich zeigt, hängen die Versuchsergebnisse sehr stark vom Versuchsaufbau ab. Die nachfolgende Tabelle zeigt, welche Probleme durch den Versuchsaufbau aufgetaucht sind und wie man diese vielleicht beseitigen könnte.

Tabelle 7: Probleme und Beseitigungsvorschläge

Probleme	Beseitigungsvorschläge
Der Versuchsaufbau war nicht ausnivelliert.	Einbau von Wasserwaagen und Feingewindestellschrauben.
Der Versuchsaufbau war sehr instabil.	Sollte irgendwo fest verankert werden, da er bei leichter Berührung des Tisches wieder komplett neu einzustellen war.
Der Versuchsaufbau war undicht.	Anbringen von so genannten Dichtungslippen (ähnlich wie beim Kaffeefilteraufsatz), damit kann der Wasserfilm in die richtigen Bahnen gelenkt werden.
Ein auf der ganzen Breite gleichmäßiger Wasserfilm war nicht möglich.	Steht aber höchstwahrscheinlich mit der Undichtheit und mit dem Fehlen der Ausnivellierung in Zusammenhang.
Absetzen von Tracerpartikeln am Lochdeckel des Wasseraufgabebehälters.	Entweder Verzicht des Lochdeckels, oder eine andere Form von Lochdeckel. Ansonsten in regelmäßigen Abständen Reinigung des Lochdeckels durchführen.
Absetzen von Tracerpartikeln im Auffangbehälter.	Entweder andere Form von Auffangbehälter (rund ohne Kanten) oder es ist ein regelmäßiges Umrühren notwendig.
Absetzen von Tracerpartikeln im Aufgabebehälter.	Ist durch regelmäßige Reinigung lösbar, da es sich nicht um eine größere Menge handelt, da das Wasser im Aufgabebehälter nie steht, sondern nur durchfließt.

## 6 Zusammenfassung

Fallfilme haben in verschiedenen industriellen Prozessen eine große Stellenordnung. Daher wird es immer wichtiger sich mit der Messung von Geschwindigkeitsprofilen in Fallfilmen auseinanderzusetzen. Aus diesem Grund wurde bei dieser Arbeit eine zweidimensionale laseroptische Fallfilmuntersuchung mit dem Messsystem PIV (Particle Imaging Velocimetry) durchgeführt. Ziel dieser Arbeit soll eine Art Handbuch sein, anhand dessen man den Versuch mit dem gleichen Equipment überall nachstellen kann.

Für die Beschreibung von Rieselfilmströmungen ist die Kenntnis von einigen dimensionslosen Kennzahlen, wie Reynolds-Zahl ( $Re$ ), Kapitza-Zahl ( $Ka$ ), Prandtl-Zahl ( $Pr$ ), Nußelt-Zahl ( $Nu$ ), Froude-Zahl ( $Fr$ ), Strouhal-Zahl ( $Sr$ ) und die dimensionslose Filmstärke ( $\delta_x^+$ ) notwendig.

Die wichtigste Theorie zur Berechnung von Filmstärke und Filmgeschwindigkeit ist die Wasserhaut-Theorie von Nusselt. Damit diese jedoch Anwendung finden kann, sind eine sehr kleine Reynoldszahl und eine glatte schubspannungsfreie Oberfläche notwendig. Aber wie Versuche zeigen, erreicht sie auch für höhere Reynoldszahlen  $Re < 400$  eine gute Näherung.

Die gebildeten Strömungsregime und Wellenphänomene sind sehr stark von den dimensionslosen Kennzahlen (vor allem von der Reynolds- und von der Kapitzazahl) abhängig. Auf glatten Oberflächen ergeben sich drei unterschiedliche Strömungsregime (laminar, quasi laminar, turbulent) mit zwei Übergangsbereichen (je nach Autor mit unterschiedlichen Grenzen). D.h. man hat zu Beginn einen glatten Film, danach sinusförmige Wellen, die dann in einen zweidimensional-welligen Film übergehen und zum Schluss einen dreidimensional-welligen Film bilden.

Das verwendete Messsystem PIV ist eine optische, nicht intrusive Methode, die Strömungsvisualisierung und Lichtpunkttechniken miteinander verbindet. Daher kann diese Technik eine genaue quantitative Messung vom momentanen Strömungsgeschwindigkeitsfeld über eine ebene Fläche eines Strömungsfeldes anbieten. Hierzu werden in die Strömung winzige, neutral schwimmende Partikel, so genannte „Tracer“, hinzugefügt. Die Verschiebung der Teilchen zwischen den beiden Laserimpulsen kann entweder auf einem einzelnen, zwei Mal belichteten Bild (single frame) oder auf zwei einzeln belichteten Bildern (double frame) aufgezeichnet werden. Dies führt jedoch dazu, dass auch die Auswertung anders erfolgen muss, daher werden in single frame abgespeicherte Bilder mit der so genannten Autokorrelation und double frame Bilder mit der so genannten Kreuzkorrelation (cross-correlation) ausgewertet.

Zum Standard für ein planares PIV-System gehören unter anderem ein Doppelimpulslaser, eine Lichtschnittoptik, Seedingpartikel, eine Highspeedkamera, Bilddigitalisierungshardware und ein Computer zur Datenspeicherung und -analyse. Für diesen Versuch wurden ein Laser Litron LDY 303HE PIV, eine Imager pro HS4M, ein Laserführungsarm,

Lichtschnittoptik aus zwei sphärischen Linsen und einer Zylinderstreulinse, ein High Speed Controller und die DaVis 8.1 Software verwendet.

Der Versuchsanlage besteht aus einem Ausgabebehälter, einer Auflage für die Platte, einer Platte, einem Auffangbehälter und einem Grundgerüst (aus Aluminium Profilen). Die Neigung der Platte kann zwischen 10 und 80 ° verstellt werden. Für diesen Versuch wurde die Neigung auf 40 ° gestellt, der Volumenstrom betrug 1,5 l/min und als Seeding wurden PMMA B-Partikel (20 – 50 µm) mit einer Konzentration von 60 mg Rhodamin / 400 ml Flüssigkeit (100 ml Ethanol, 300 ml H<sub>2</sub>O) verwendet. Außerdem wurde die Kamera im 90 ° Winkel auf die Platte gerichtet und der Laser beleuchtete die Platte von unten entlang der Oberfläche.

Vor der Durchführung des Versuches sind noch einige Einstellungen vorzunehmen. Und zwar sind im *Recording* unter anderem die Belichtungszeit, die Kamerabilddate, der Bildausschnitt, die Anzahl der Bilder und der Zielordner für die Datenspeicherung einzustellen. Anschließend ist die **Kalibrierung** des Kamerabildes notwendig, da die aufgenommen Bilder meistens verzerrt sind. Dies erfolgt unter *Calibration* in acht Schritten.

Nach der Kalibrierung kann der **Laser eingeschalten** werden. Hierbei ist darauf zu achten, dass die Systeme immer von oben nach unten hochgefahren und von unten nach oben heruntergefahren werden. Für diesen Versuch wird die Power des Lasers auf 90 % gestellt.

Nun kann die **Rohbildaufnahme** erfolgen. Hierzu muss der *Recording* button gedrückt und anschließend auf double frame umgestellt und der Laser auf ON gestellt werden. Außerdem ist nun auch der zeitliche Versatz zwischen den Kamerabildern, sowie der zeitliche Versatz von Lichtpuls 1 zu Lichtpuls 2 einzugeben. Damit alle Wellenlängen über 540 nm weggeschnitten werden, schraubt man auf das Kameraobjektiv einen VZ-Image Filter for LIF, 540 nm cut-off.

Nach der Aufnahme der Rohbilder wird eine **Vektorkalkulation** durch Drücken des *Processing* button durchgeführt. Hier werden unter anderem die Einstellungen cross-correlation, Multi-pass (decreas. size), die Fenstergröße, die Überlappung, der Medianfilter, die Vektorfarbe, die Maskendefinition, ... vorgenommen. Anschließend werden noch die Vektorlänge, der Vektordisplay, die Vektorfarbe und der Vektorhintergrund nachbearbeitet, um das Ergebnis anschaulicher zu machen.

Das erhaltene Versuchsergebnis zeigt sehr deutlich, dass sich die Geschwindigkeitsverteilung sehr unterschiedlich gestaltet. Außerdem ist sehr gut ersichtlich, dass der Filmstrom nicht gleichmäßig ist und immer wieder abreißt und auch die Wasseraufgabe nicht reibungslos funktioniert. Dieser Versuch zeigt daher sehr deutlich, dass die Versuchsergebnisse sehr stark vom Versuchsaufbau abhängen.

Auch sind während des Versuchs einige Probleme aufgetreten, wie z.B. dass der Versuchsaufbau nicht ausnivelliert, sehr instabil und auch undicht gewesen ist, und daher ein Zustandekommen eines gleichmäßigen Wasserfilms nicht möglich gewesen ist. Außerdem kam es immer wieder zu Ablagerungen der Tracerpartikeln.

## 7 Verzeichnisse

### 7.1 Literatur

- [1] Al-Sibai, F., 2004. Experimentelle Untersuchung der Strömungscharakteristik und des Wärmeübergangs bei welligen Rieselfilmen; Dissertation RWTH Aachen.
- [2] Paschke, St., 2011. Experimentelle Analyse ein- und zweiphasiger Filmströmungen auf glatten und strukturierten Oberflächen; Dissertation TU Berlin.
- [3] Adomeit, P., 1996. Experimentelle Untersuchung der Strömung laminar-welliger Rieselfilme; Dissertation RWTH Aachen.
- [4] Kohrt, M., 2012. Experimentell Untersuchung von Stofftransport und Fluidodynamik bei Rieselfilmströmungen auf mikrostrukturierten Oberflächen; Dissertation TU Berlin.
- [5] Moran, K., Inumaru, J., Kawaji, M., 2002. Instantaneous hydrodynamics of a laminar wavy liquid film; Int. J. Multiphase Flow, Vol. 28, p. 731-755.
- [6] La Vision, Juli 2012. Flow Master; Göttingen. Document name: 1003005\_Flow Master\_D81.pdf
- [7] Litron Lasers. Online im WWW unter URL: [http://www.litronlasers.com/pages/ldy300\\_piv.html](http://www.litronlasers.com/pages/ldy300_piv.html). Stand: Jänner 2014
- [8] La Vision, Dezember 2010. Imager pro HS 4M; Göttingen. Document name: DS\_Imager\_pro\_HS4M.pdf
- [9] La Vision, März 2010. Laser Guiding Arm; Göttingen. Document name: DS\_LaserGuidingArm.pdf
- [10] La Vision, Februar 2011. Light Sheet Optics; Göttingen. Document name: DS\_Sheetoptics.pdf
- [11] La Vision, Oktober 2012. Sheet Optics Divergent; Göttingen. Document name: 1003034\_SheetOpticsDivergent\_D81.pdf
- [12] La Vision, Jänner 2012. High Speed Controller; Göttingen. Document name: 1006382\_HighSpeedController\_D81.pdf
- [13] La Vision, Juli 2012. DaVis; Göttingen. Document name: 1003001\_DaVis\_D81.pdf
- [14] Foith, P., 2014. Konstruktion eines Versuchsstands für laseroptische Vermessungen von Rieselfilmen; Diplomarbeit Montanuniversität Leoben.

- [15] La Vision, Juli 2012. Flow Master Getting Started; Göttingen. Document name: 1003004\_Flow MasterGettingStarted\_D81.pdf
- [16] La Vision, Juli 2012. Imaging Tools; Göttingen. Document name: 1003012\_ImagingTools\_D81.pdf

## 7.2 Abkürzungsverzeichnis

### Lateinische Symbole

b	m	Filmbreite
B	m	Breite
$c_p$	J/(kgK)	Spezifische Wärmekapazität
D	m	Dicke
f	m	Brennweite
g	m/s <sup>2</sup>	Erdbeschleunigung
H	m	Höhe
l	m	Wellenlänge
L	m	Länge
$\dot{m}$	kg/s	Massenstrom
t	s	Zeit
T	K	Temperatur
u	m/s	Filmgeschwindigkeit
$U_w$	m/s	Wellengeschwindigkeit
$\dot{V}$	m <sup>3</sup> /s	Volumenstrom
$w_N$	m/s	Nusselt-Geschwindigkeit
$w_x$	m/s	Geschwindigkeitskomponente in x-Richtung

x	m	Ortskoordinate
y	m	Ortskoordinate
Y	-	Koordinate der Filmdicke
z	m	Ortskoordinate

### Griechische Symbole

$\alpha$	W/(m <sup>2</sup> K)	Wärmeübergangskoeffizient
$\alpha$	°	Neigungswinkel zur Vertikalen
$\delta$	m	Filmdicke
$\delta_N$	m	Nusselt-Filmdicke
$\eta$	kg/(ms)	dynamische Viskosität
$\lambda$	W/(mK)	Wärmeleitfähigkeit
$\nu$	m <sup>2</sup> /s	Kinematische Viskosität
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	Dichte
$\sigma$	N/m	Oberflächenspannung
$\varphi$	°	Neigungswinkel

### Indizes

f	Flüssigphase
m	Mittel
max	Maximum
min	Minimum
r	Residualfilm
w	Welle

### 7.3 Formeln

Formel 1: Differentialgleichung für einen Fallfilm bei laminarer Strömung [4].....	6
Formel 2: Geschwindigkeitsprofil [4].....	6
Formel 3: maximale Filmgeschwindigkeit nach Nusselt [4].....	6
Formel 4: Nusselt-Filmdicke [4].....	7
Formel 5: Korrelation [6].....	48

### 7.4 Tabellen

Tabelle 1: gebräuchliche Filmkennzahlen [1].....	5
Tabelle 2: Strömungsregime von Flüssigfilmen [4].....	7
Tabelle 3: Technische Daten LDY 303HE PIV.....	18
Tabelle 4: Technische Daten Imager pro HS 4M [8].....	19
Tabelle 5: Technische Daten Laserarm [9].....	21
Tabelle 6: Technische Daten High Speed Controller [12].....	24
Tabelle 7: Probleme und Beseitigungsvorschläge.....	72

### 7.5 Abbildungen

Abbildung 1: schematische Darstellung eines welligen Rieselfilmes [1].....	4
Abbildung 2: Schematische Darstellung der Rieselfilmströmung auf geneigter Wand [4].....	6
Abbildung 3: Strömungsregime des Flüssigfilmes entlang einer glatten Platte (a) in Abhängigkeit der Reynoldszahl nach Bauer (1971) (b) in Abhängigkeit der Lauflänge bei hohen Reynoldszahlen nach Helbig (2007) [2].....	8
Abbildung 4: Filmkonturen eines Flüssigfilms [1].....	8
Abbildung 5: Einfluss unterschiedlicher Reynolds- und Kapitza-Zahlen auf die Strömung [1]..	9
Abbildung 6: allgemeiner Aufbau eines 2D PIV Systems [6].....	14
Abbildung 7: Wirbel mit Tracerpartikeln und entsprechendes Strömungsfeld [6].....	15
Abbildung 8: Auswertung der PIV-Aufnahmen mittels Autokorrelation [6].....	16
Abbildung 9: Auswertung der PIV-Aufnahmen mittels Kreuzkorrelation [6].....	16

Abbildung 10: Laser LDY 300 Serie [7].....	18
Abbildung 11: Imager pro HS 4M [8].....	19
Abbildung 12: Laserführungsarm [9].....	20
Abbildung 13: optisches Gehäuse [10] .....	22
Abbildung 14: Streulinsen [10].....	22
Abbildung 15: Lichtschnittoptikmontage auf der Grundplatte [11] .....	22
Abbildung 16: Arbeitsweise der Linsen [10].....	23
Abbildung 17: Fokussierung der Lichtschnittoptik [11] .....	23
Abbildung 18: High Speed Controller [12].....	23
Abbildung 19: Konzept des Versuchsstand in Autodesk Inventor Profession 2014 [14].....	26
Abbildung 20: Foto des Versuchsstands .....	26
Abbildung 21: Foto des Versuchsaufbaus .....	27
Abbildung 22: Kalibrierplatte Type 11 .....	33
Abbildung 23: die Trennung eines Bildes in einzelne interrogation windows [6].....	45
Abbildung 24: Cross-correlation [6] .....	45
Abbildung 25: Beispiel für eine 50%ige Überlappung der interrogation window [6].....	45
Abbildung 26: verschiedene Vektorpositionen (abhängig von der Größe der interrogation windows und der Überlappung) [6].....	46
Abbildung 27: Fensterverschiebung für cross-correlation [6] .....	48
Abbildung 28: multi-pass mit konstanter Größe der interrogation windows [6] .....	50
Abbildung 29: lokaler Medianfilter [6].....	52