

## **FLEXPIV – EIN INNOVATIVES VERFAHREN DER STRÖMUNGSANGEPASSTEN PIV-AUSWERTUNG**

### **FLEXPIV – AN INNOVATIVE METHOD FOR FLOW ADAPTED PIV PROCESSING**

**Dr.-Ing. Oliver Pust and Thomas I. Nonn**

Dantec Dynamics A/S

Tonsbakken 16–18

2740 Skovlunde

Dänemark

FlexPIV, PIV-Algorithmen, strömungs- und geometrieangepasst, flexible PIV-Auswertung

FlexPIV, PIV algorithms, adapted to flow and geometry, flexible PIV processing

## **Zusammenfassung**

Seit der Entwicklung der Particle Image Velocimetry (PIV) vor mehr als 20 Jahren hat es viele Erweiterungen und Verbesserungen des ursprünglichen Verfahrens gegeben. Von der Auto-korrelation über die Kreuzkorrelation bis hin zur adaptiven Kreuzkorrelation, die heute als das Standardverfahren gilt, ist die Leistungsfähigkeit der PIV stark gestiegen. Auch Verfahren für spezielle Anwendungen – wie die Summenkorrelation für  $\mu$ PIV oder hybride Verfahren aus PIV und Particle Tracking (PTV) – für eine verbesserte räumliche Auflösung haben ihren Eingang in die Praxis gefunden. Den bisher letzten Schritt in der Entwicklung stellte die Berücksichtigung von nicht nur translatorischen Verschiebungen sondern von auch dehnungs- und rotationsbehafteten Verschiebungen dar (Deformed Windows).

Dennoch sind die Ergebnisse all dieser Verfahren (außer PTV) Vektorfelder auf einem kartesischen (typischerweise quadratischen) Gitter. Darüber hinaus werden alle Vektoren mit denselben konstanten Parametern berechnet (Größe der Interrogation Area, Art der Validierung usw.). Eine individuelle Berücksichtigung der lokalen Geometrie- und Strömungsverhältnisse findet nicht statt.

Erst die Entwicklung eines Verfahrens zur flexiblen, strömungs- und geometrieangepassten PIV-Auswertung (FlexPIV) beseitigt die oben beschriebenen Einschränkungen.

## **1 Einleitung**

Das Prinzip der PIV beruht auf der Beobachtung kleiner Partikel, die dem strömenden Fluid zugesetzt werden oder auch schon in ihm enthalten sein können. Die Partikel werden durch

einen Lichtschnitt angestrahlt, und das von ihnen reflektierte Licht wird zu zwei kurz aufeinander folgenden Zeitpunkten aufgenommen. Mit geeigneten Algorithmen werden Teilbilder mathematisch ausgewertet, um die Partikelverschiebung zwischen den beiden Belichtungen zu bestimmen. Man erhält auf diese Weise viele lokale Verschiebungsvektoren, die mit der Zeitdifferenz, welche zwischen den beiden Bildern liegt, und dem Abbildungsmaßstab in Geschwindigkeitsvektoren umgerechnet werden. Als Ergebnis erhält man so eine *vector-map* von zwei-dimensionalen Geschwindigkeitsvektoren, die in der beleuchteten Ebene liegen.

Im folgenden Abschnitt werden das zur Auswertung der Partikelbilder verwendete Korrelationsverfahren und seine verschiedenen Varianten erläutert. Hierbei wird nur auf die wichtigsten Varianten eingegangen. Eine Übersicht über weitere in der Praxis gebräuchliche Varianten findet sich in [3]. Dort werden auch weitere Quellen zum Thema genannt.

## 2 Korrelationsverfahren

Als Ausgangspunkt der Auswertung liegen zwei einzeln belichtete Bilder der Größe  $M' \times N'$  der Strömung vor: Bild 1 zum Zeitpunkt  $t_0$  und Bild 2 zum Zeitpunkt  $t_0 + \Delta t$ . Das Ziel ist nun, eine Approximation für das Verschiebungsfeld (d. h. eine räumliche Transformation) zu finden, die das erste Bild  $F(M, N)$  in das zweite Bild  $G(M, N)$  überführt. Der generische Lösungsansatz führt auf folgenden Algorithmus: das Bild 1 wird in viele Teilbilder  $f(i, j)$  gleicher, vorher festzulegender Größe – z. B.  $20 \text{ px} \times 20 \text{ px}$  – unterteilt. Im nächsten Schritt sucht man in Bild 2 das Teilbild  $g(k, l)$  gleicher Größe, das die höchste Übereinstimmung mit dem Teilbild aus Bild 1 aufweist. Der so bestimmte Ort  $(k, l)$  legt mit dem Ort  $(i, j)$  den lokalen Verschiebungsvektor  $(k - i, l - j)$  fest. Da man den zeitlichen Abstand zwischen den beiden Bildern kennt, erhält man unter Berücksichtigung des Abbildungsmaßstabes durch Division des Verschiebungsvektors durch die verstrichene Zeit den gesuchten lokalen Geschwindigkeitsvektor.

In den meisten kommerziellen und nicht-kommerziellen Programmen zur Bestimmung der Partikelverschiebung finden Korrelationsverfahren Anwendung. Oben wurde gesagt, dass in Bild 2 das Teilbild  $g(k, l)$  gesucht wird, das die höchste Übereinstimmung mit dem Teilbild aus Bild 1 aufweist. Sieht man sich die folgenden Formeln genauer an, stellt man fest, dass die Implementierung etwas anders vorgenommen wird. Das oben beschriebene Vorgehen würde letztlich erfordern, dass man das Teilbild aus Bild 1 mit allen theoretisch möglichen Teilbildern aus Bild 2 korreliert. Der entstehende Rechenaufwand wäre allerdings kaum noch zu bewältigen. Daher vergleicht (korreliert) man in der Praxis zwei Teilbilder miteinander, die am selben Ort im Gesamtbild liegen.

Aufgrund des hohen Rechenaufwandes der oben beschriebenen direkten (im Ortsraum durchgeführten) Kreuzkorrelation wird sie numerisch fast ausnahmslos über die schnelle Fourier-Transformation (FFT) implementiert. Denn die direkte Kreuzkorrelation über der  $x$ - $y$ -Ebene läßt sich nach einer FFT der beiden Teilbilder durch eine komplex konjugierte Multiplikation im Frequenzraum und eine inverse FFT des Ergebnisses darstellen. Diese Identität zwischen Kreuzkorrelation und konjugiert komplexer Multiplikation im Frequenzraum gilt allerdings nur für die nach Gleichung 1 über einem unendlich ausgedehnten Grundgebiet definierte Korrelationsfunktion. Die negativen Folgen der Anwendung der FFT auf endliche Grundgebiete wird in [1] und [2] detailliert dargestellt.

## 2.1 Kreuzkorrelation

Liegen beide Belichtungen auf einem Bild vor, spricht man von Autokorrelation; erfolgen die beiden Belichtungen auf getrennten Bildern, spricht man von Kreuzkorrelation. Im weiteren wird nur auf die Kreuzkorrelation eingegangen, da sie neben der Möglichkeit zur Richtungsbestimmung des Geschwindigkeitsvektors auch ein höheres Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) aufweist. Bei Korrelationsverfahren handelt es sich um eine statistische Herangehensweise. Die kontinuierliche zweidimensionale Kreuzkorrelationsfunktion ist definiert als:

$$\Phi_{fg}(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(\xi, \zeta) g(\xi + x, \zeta + y) d\xi d\zeta \quad (1)$$

Da digital aufgenommene Bilder nicht kontinuierlich, sondern als diskretes Signal vorliegen, schreibt man für die diskrete Kreuzkorrelationsfunktion:

$$\Phi_{fg}(m, n) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} \sum_{j=-\infty}^{\infty} f(i, j) g(i + m, j + n) \quad (2)$$

Weiterhin haben die Bilder eine endliche Größe, daher werden die Summen endlich:

$$\Phi_{fg}(m, n) = \sum_i \sum_j f(i, j) g(i + m, j + n) \quad (3)$$

Der Ort des Maximums der so definierten diskreten Kreuzkorrelationsfunktion zeigt nun den Verschiebungsvektor  $(m, n)$  an, für den die Übereinstimmung zwischen den Teilbildern am größten wird.

Um den *in plane loss off pairs* zu begrenzen, muss die Zeit zwischen den beiden Laserpulsen so kurz gewählt werden, dass der Verschiebungsvektor maximal ein Viertel der Kantenlänge der *interrogation area* beträgt, im obigen Beispiel 5 px. Damit der Dynamikumfang wie in diesem Beispiel nicht nur auf 1:5 beschränkt bleibt, versucht man durch Interpolation des Korrelationspeaks die Verschiebung auf bis zu 0,1 px genau zu bestimmen. Dennoch würde der Dynamikumfang in der Praxis auf ca. 1:20 beschränkt bleiben.

## 2.2 Adaptive Kreuzkorrelation

Um die Beschränkungen der Kreuzkorrelation zu umgehen und größere Geschwindigkeitsunterschiede und -gradienten in einer Messung handhaben zu können, wurde die adaptive Kreuzkorrelation entwickelt. In Anlehnung an die Numerik (CFD) handelt es sich hierbei um ein Mehrschrittverfahren, bei dem das Auswertegitter iterativ verfeinert wird. In der Praxis werden allerdings selten mehr als zwei oder drei Schritte durchgeführt. Das Prinzip ist in Abbildung 1 dargestellt. In einem ersten Schritt wird auf einem groben Gitter mit großen *interrogation areas* ein Geschwindigkeitsfeld berechnet. Hierbei erkennt man in der linken Skizze auch den *in plane loss off pairs* bei Partikeln, die sich während der ersten Belichtung am rechten und oberen Rand der *interrogation area* befunden haben. Außerdem sind am unteren und linken Rand neue Partikel hinzugekommen. Diese ungepaarten Partikel verringern das SNR der Messung. Im zweiten Schritt wird das grobe Geschwindigkeitsfeld aus dem ersten Schritt als Startwert

benutzt, um die *interrogation areas* gegeneinander zu verschieben. Dadurch wird der *in plane loss off pairs* minimiert. Außerdem wird in der Regel im zweiten Schritt die Größe der *interrogation areas* (typischerweise) um den Faktor zwei verringert. Dies vervierfacht die Anzahl der Vektoren pro Vektorfeld und erhöht entsprechend die räumliche Auflösung. Weiterhin können durch die kleineren *interrogation areas* Geschwindigkeitsgradienten besser verarbeitet werden (siehe Abbildung 2). Geschwindigkeitsgradienten führen zu einem breiteren und schwächeren Korrelationspeak; die Gefahr von Fehlvektoren steigt. Durch die schrittweise Verkleinerung der *interrogation areas* kann dem entgegengewirkt werden.

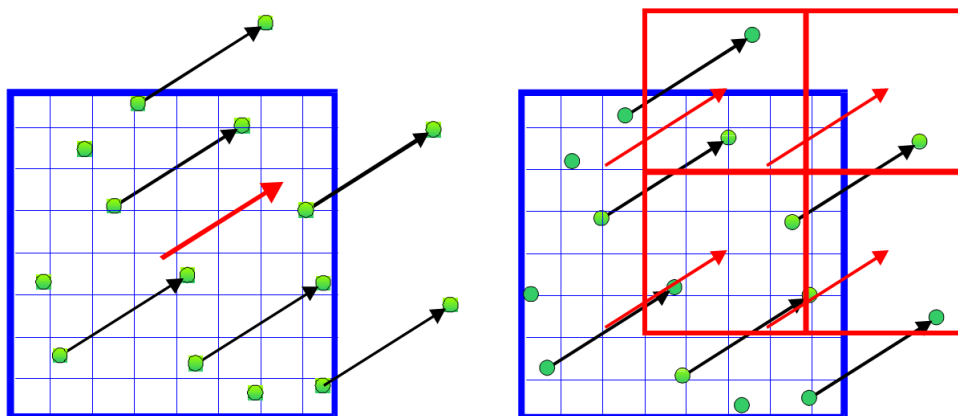


Abbildung 1: Prinzip der adaptiven Kreuzkorrelation

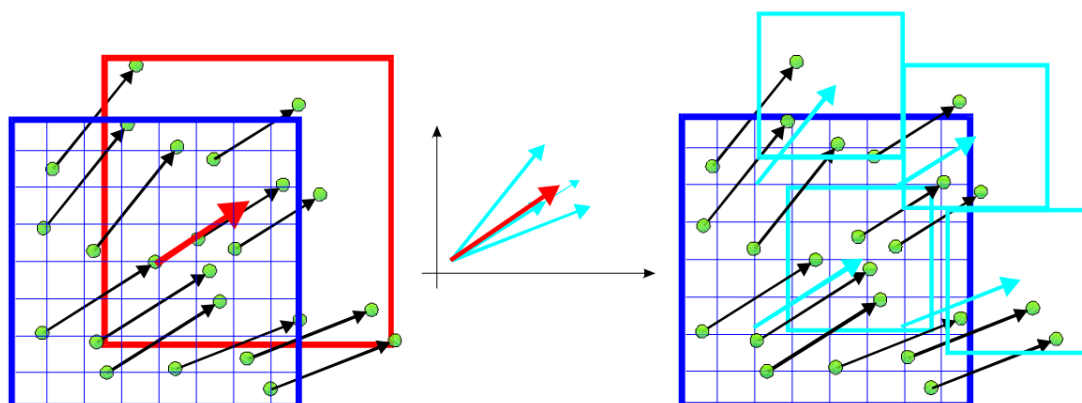


Abbildung 2: Adaptive Kreuzkorrelations und Geschwindigkeitsgradienten

### 3 Strömungs- und geometrieangepasste PIV-Auswertung

In Abschnitt 2 wurden exemplarisch zwei häufig verwendete Korrelationsverfahren dargestellt. Darüber hinaus gibt es weitere fortschrittliche Verfahren wie z. B. das Verformen der *interrogation areas* vor Durchführung der Kreuzkorrelation, um Geschwindigkeitsgradienten noch besser handhaben zu können. Auch kommen hybride Verfahren unter Einsatz von Particle Tracking Velocimetry (PTV) vor.

Dennoch ist es für alle Verfahren (außer PTV) typisch, dass das Ergebnis Vektorfelder auf einem kartesischen (typischerweise quadratischen) Gitter sind. Darüber hinaus werden alle Vektoren mit denselben konstanten Parametern berechnet (Größe der Interrogation Area, Art der Validierung usw.). Eine individuelle Berücksichtigung der lokalen Geometrie- und Strömungsverhältnisse findet nicht statt. Erst die Entwicklung eines Verfahrens zur flexiblen, strömungs- und geometriangepassten PIV-Auswertung (FlexPIV) beseitigt diese Einschränkungen.

Hierbei wird ein weiteres Konzept aus der numerischen Strömungssimulation (CFD) auf die PIV übertragen. In der CFD ist es seit langem üblich und selbstverständlich, die Rechengitter an die Natur der Strömung und die geometrischen Begrenzungen des Strömungsraumes anzupassen. Dieses Vorgehen hat für die PIV einige Vorteile:

- Geschwindigkeitsvektoren werden nur noch da berechnet, wo ein Gitter vorhanden ist. Durch das heute in der PIV übliche Maskieren können zwar Bereiche von der Auswertung ausgenommen werden. Aber ansonsten wird die Korrelation immer für das gesamte Bild durchgeführt.
- Die Anzahl und Position der Geschwindigkeitsvektoren werden von der Größe der *interrogation areas* entkoppelt.
- Für unterschiedliche Verhältnisse in der Strömung können auch unterschiedlich dichte Gitter definiert werden. Auch ist es möglich, die Auswerteparameter für verschiedene Gitterbereiche unabhängig voneinander festzulegen.
- In der Praxis kommt es häufig vor, dass Wände durch *interrogation areas* hindurchlaufen. Dadurch werden die dort berechneten wandnahen Vektoren verfälscht. Die Definition eines Wandobjektes verhindert dies, indem der Bereich der *interrogation areas*, der zur Wand gehört, nicht in die Kreuzkorrelation einfließt.

Die genannten Vorteile gegenüber den herkömmlichen starren Gittern machen eine flexible und strömungsangepasste Auswertung von PIV-Bildern möglich. FlexPIV liefert damit Ergebnisse, die weit über das bisher bekannte hinausgehen. In Abschnitt 4 wird das anhand von Anwendungsbeispielen verdeutlicht.

### 3.1 Gittergenerierung

Wie auch in der CFD muss vor der eigentlichen Strömungsberechnung das Rechengitter bereitgestellt werden. Dies geschieht über ein separates Modul (FlexGrid), auf dessen Gitterdefinitionen FlexPIV zurückgreift. In FlexGrid kann auf grafischem Weg jedes komplexe Gitter mit der Maus definiert und gegebenenfalls über Tastatureingaben modifiziert werden. Jedem Gitter werden über Eingabefelder die Parameter für die Kreuzkorrelation zugewiesen. Als Gitterformen stehen Rechtecke bzw. Quadrate, Ellipsen bzw. Kreise und Polygonzüge zur Verfügung. Die Gitterformen können dann mit den Gittertypen kartesisch, polar, elliptisch und Delauny verknüpft werden (siehe Abbildung 3). Einem Objekt lässt sich außerdem noch eine der Eigenschaften *Gitter*, *Loch*, *falsches Loch* oder *Wand* zuweisen. Die Objekteigenschaft *Gitter* ist der oben beschriebene Standardfall. Mit einem Objekt der Eigenschaft *Loch* lassen sich Bereiche innerhalb eines Gitters von der Berechnung aussparen (siehe drittes Objekt von links in Abbildung 3). Mit einem Objekt der Eigenschaft *falsches Loch* lässt sich innerhalb eines Gitters ein weiteres Gitter definieren, ohne dass dort Vektoren doppelt berechnet werden. Die

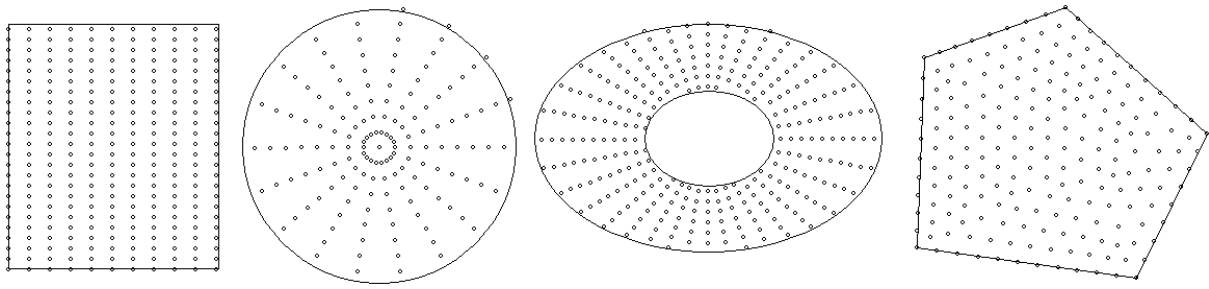


Abbildung 3: Gitterformen und Gittertypen

Objekteigenschaft *Wand* sorgt dafür, dass die dort vorhandenen Grauwertinformation bei der Kreuzkorrelation nicht berücksichtigt werden. Eine komplexe Gitterdefinition und das resultierende Geschwindigkeitsfeld kann man in Abbildung 4 am Beispiel eines Zylindernachlaufes erkennen.

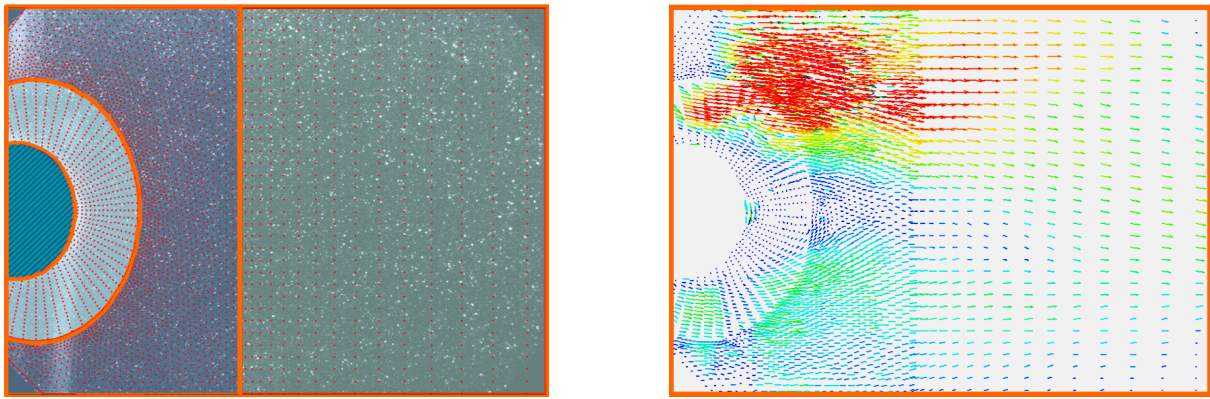


Abbildung 4: Gitterdefinition mit FlexGrid und Strömungsfeld mit FlexPIV

## 4 Anwendungsbeispiele

Im diesem Abschnitt werden zwei Anwendungsbeispiele aus der Praxis vorgestellt, die die Leistungsfähigkeit des neuen Verfahrens in der PIV-Auswertung verdeutlichen.

### 4.1 Zwei-Phasen-Strömung im Mikrokanal

Bei dieser Anwendung (<http://www.ilw.agrl.ethz.ch/vt/research/projects/mrd/>) besteht die Herausforderung darin, die beiden Phasen voneinander zu trennen und mit verschiedenen Parametern auszuwerten. Die feste Kanalwand soll nicht ausgewertet werden und ihr (numerischer) Einfluss auf die Kanalströmung unterbunden werden. In Abbildung 5 werden das invertierte Partikelbild und das Ergebnis der adaptiven Kreuzkorrelation gezeigt. Deutlich ist zu erkennen, dass ein herkömmlicher Algorithmus dieser Strömung nicht gerecht wird. Die Strömung innerhalb der Tropfen lässt sich kaum von der Kanalströmung trennen. Auch ist der

Einfluss der Kanalwand auf die Kanalströmung zu erkennen. In Abbildung 7 ist das erheblich verbesserte Ergebnis durch Verwendung der in Abbildung 6 gezeigten angepassten Gitter dargestellt.

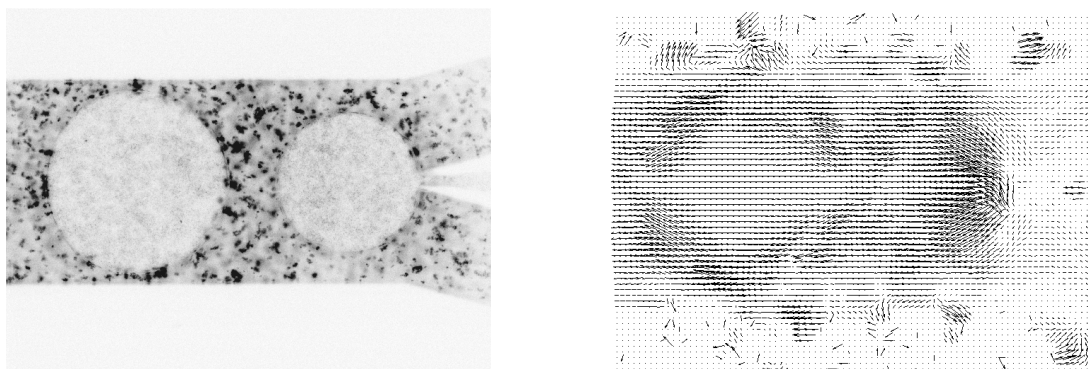


Abbildung 5: Invertiertes Partikelbild und Ergebnis der adaptiven Kreuzkorrelation (Manuela Duxenneuner, ETH Zürich)

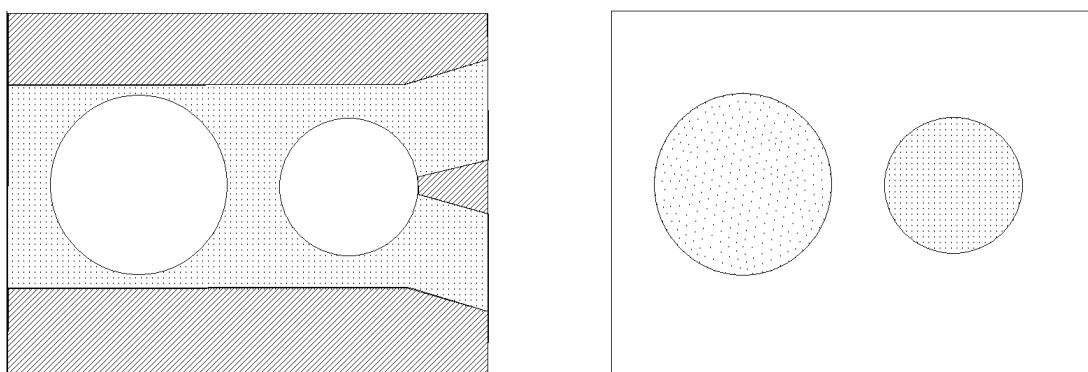


Abbildung 6: Rechengitter für den Kanal und die Tropfen (Manuela Duxenneuner, ETH Zürich)

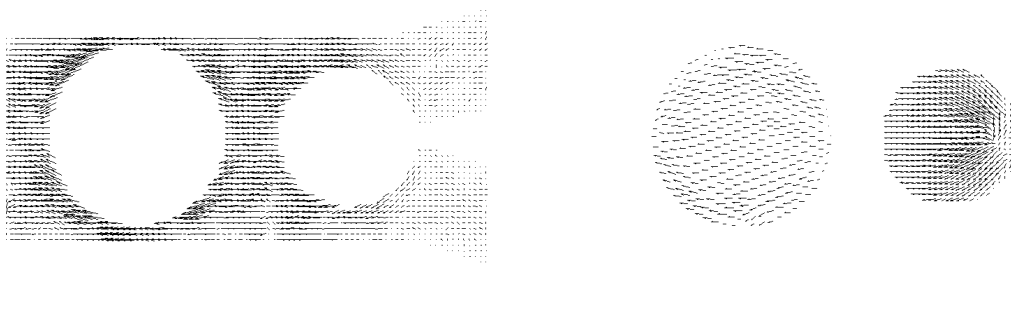


Abbildung 7: Geschwindigkeitsfeld für den Kanal und die Tropfen (Manuela Duxenneuner, ETH Zürich)

## 4.2 Strömung in einem Kunstherz

Bei dieser Strömung in einem Kunstherz liegt eine komplexe Geometrie zugrunde, der mit FlexGrid und FlexPIV sehr einfach gefolgt werden kann.

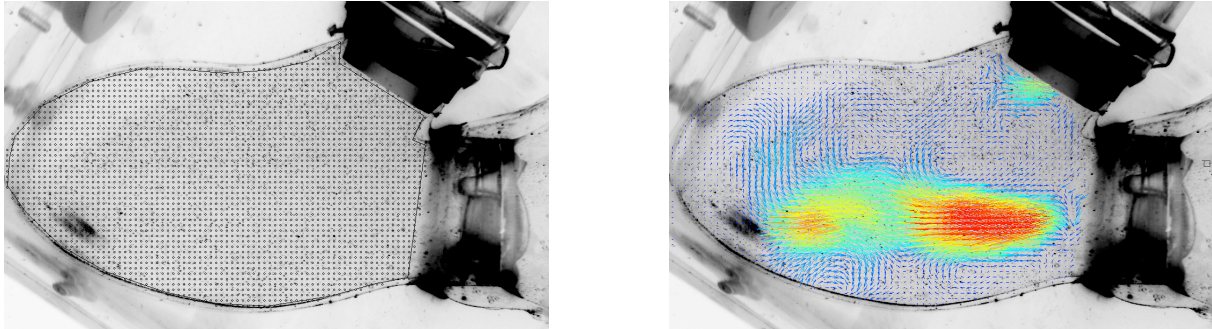


Abbildung 8: Gitterdefinition und Geschwindigkeitsfeld im Kunstherz  
(Quelle: Institut für Robotik und Mechatronik,  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt)

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Es wurden die gängigsten Korrelationsverfahren erläutert und ihre Beschränkungen für praktische Anwendungen dargestellt. Ein neuartiges Verfahren zur flexiblen, strömungs- und geometrieangepassten PIV-Auswertung (FlexPIV) wurde vorgestellt und seine Leistungsfähigkeit an praktischen Beispielen verdeutlicht.

Der nächste logische Schritt in der Entwicklung von FlexPIV wird sein, auch beweglichen Geometrien durch *Feature Tracking* gerecht zu werden. Ein vorgeschalteter Bildverarbeitungsalgorithmus soll bewegliche Geometrien erkennen, und FlexGrid daraufhin die Objektgenerierung vornehmen. Der Anwender braucht anschließend nur noch die Auswerteparameter zuzuweisen. In einem weiteren Schritt könnte auch dies automatisch erfolgen.

## Literatur

- [1] PUST, O. : PIV: Direct Cross-Correlation compared with FFT-based Cross-Correlation. In: *Proceedings of the 10th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics (CD-ROM), 10–13 July 2000, Lisbon, Portugal, 2000*
- [2] PUST, O. : *Quantitative Visualisierung komplexer verfahrenstechnischer Strömungsvorgänge mit der digitalen Particle Image Velocimetry. Berichte aus der Strömungstechnik.* Aachen : Shaker Verlag, 2001
- [3] RAFFEL, M. ; WILLERT, C. ; WERELEY, S. ; KOMPENHANS, J. : *Particle image velocimetry: a practical guide.* 2. Aufl. Berlin : Springer, 2007