

## **Volumetrische High-Speed-Strömungsmessungen mittels plenoptischer Hochgeschwindigkeitskamera**

### **Volumetric high-speed flow measurements with a plenoptic high-speed camera**

**Andreas Fischer, Christian Kupsch, Johannes Gürtler, Jürgen Czarske**

Technische Universität Dresden, Professur für Mess- und Sensorsystemtechnik,

Helmholtzstraße 18, 01062 Dresden

E-Mail: andreas.fischer2@tu-dresden.de

Instationäres Spray, Hochgeschwindigkeits-Lichtfeldkamera, 4D-Geschwindigkeitsmessung  
Unsteady spray flow, high-speed light field camera, 4d velocity measurements

### **Zusammenfassung**

Um für komplexe, hochdynamische Strömungsprozesse wie bei Einspritzungen in Verbrennungsmotoren eine hohe Datenrate zu erreichen, d.h. eine große Voxelanzahl im dreidimensionalen Messvolumen und eine hohe Messrate, wird der Aufbau einer Lichtfeld-High-Speed-Kamera sowie deren Anwendung für ein frequenzmoduliertes Doppler-Global-Velozimeter (FM-DGV) vorgestellt. Die Lichtfeldauswertung gestattet die 3D-Rekonstruktion des Messvolumens für jedes aufgenommene Bild, und das DGV-Messprinzip nutzt hierbei die Kamerapixel effizient aus, weil aus jedem einzelnen Pixel ein Messwert generiert werden kann. Folglich können durch die Verwendung einer Lichtfeld-High-Speed-Kamera und eines spektroskopisch arbeitenden Messprinzips Messrate und Bildauflösung maximiert werden. Das Messsystem wird zunächst für zwei simultan beobachtete Messebenen aufgebaut und an einer stationären Freistrahlsströmung erprobt. Darüber hinaus wird die Untersuchung eines instationären Sprays demonstriert.

### **1. Motivation, Ziel und Struktur der Arbeit**

Für die Untersuchung schneller, komplexer Strömungsphänomene wird ein volumetrisch (3D) messendes Verfahren mit Messraten im kHz-Bereich benötigt. Beispielsweise dauern typ. Hochdruckinjektionen von Treibstoff nach Wu et al. 2006 wenige ms. Um das vollständige zeitliche Verhalten einzelner solcher Injektionen auflösen und instationäre Phänomene identifizieren zu können, müssen demnach Messraten von mehreren 10 kHz verfügbar sein. Dabei sind volumetrische (3D) Messungen unabdingbar, da sich das instationäre Sprayverhalten einzelner Injektionen nicht reproduzieren lässt und komplexe dreidimensionale Strömungsphänomene auftreten.

Bildgebende Strömungsgeschwindigkeitsmessungen mit hohen Bildraten bis 25 kHz lassen sich beispielsweise mit der Doppler-Global-Velozimetrie mit sinusförmiger Laserfrequenzmodulation (FM-DGV) erreichen, wenn man eine Hochgeschwindigkeitskamera mit Bildraten bis 1 Mfps einsetzt, siehe Fischer et al. 2014a. Vorteilhaft ist beim FM-DGV speziell mit Hinblick auf die bei schnellen Framraten limitierte Anzahl an nutzbaren Kamerapixeln, dass aus jedem einzelnen Kamerapixel ein Messwert resultiert und damit eine effiziente Pixelnutzung,

d.h. eine hohe Bildauflösung erreicht werden kann. Durch die Kombination der Kamerames- sungen mit einem Tiefenscanning wurden zudem volumetrische FM-DGV-Messungen von Fischer et al. 2014b erreicht. Weil sich jedoch prinzipbedingt beim Scannen des 3D- Messvolumens die resultierende Messrate verringert, wird ein neuer messtechnischer Ansatz für 3D-FM-DGV-Messungen mit höheren Messraten benötigt. Ein tomographischer Ansatz soll nicht vertieft werden, weil zwecks begrenzter optischer Zugangsmöglichkeiten bei der Untersuchung von Hochdruckeinspritzungen eine Einkameramesstechnik angestrebt wird.

Hierfür wird erstmals eine Lichtfeld-High-Speed-Kamera und deren Verwendung für ein High-Speed-3D-FM-DGV-Messsystem für die Untersuchung instationärer Sprays vorgestellt. Mit der Lichtfeldauswertung lässt sich aus jedem einzelnen Frame die Tiefeninformation extrahieren und infolgedessen das 3D-Messvolumen mit maximaler Messrate mit nur einer Kamera rekonstruieren. Im Abschnitt 2 wird zunächst der Aufbau der Lichtfeld-High-Speed-Kamera und das Messkonzept vorgestellt. Daran schließt sich im Abschnitt 3 die Diskussion der ersten Messergebnisse bei der Untersuchung eines instationären Sprays an sowie eine kurze Zusammenfassung der Ergebnisse und Erkenntnisse im Abschnitt 4.

## 2. Messprinzip und Aufbau des Messsystems

Das hier zu Grunde liegende Messkonzept ist in Abb. 1 skizziert. Das zu untersuchende Strömungsvolumen wird mit parallel angeordneten Lichtschnitten (Messebenen, Tiefenebenen) beleuchtet, die simultan von einer Lichtfeld-High-Speed-Kamera beobachtet werden. Die Lichtfeldauswertung gestattet die nachträgliche Trennung der verschiedenen Messebenen gemäß dem Refokussierungsalgorithmus einer plenoptischen bzw. Lichtfeld-Kamera, wie er beispielsweise von Ng 2005 beschreiben worden ist. Anstelle der Beobachtung eines gesamten 3D-Raums wird nachfolgend zur Demonstration des Messkonzeptes vereinfachend zunächst eine simultane Erfassung von zwei Messebenen untersucht. Dabei sollen zunächst grundlegende offene Fragen geklärt werden, z.B. ob mit einer High-Speed-Kamera, die für das Erreichen der erforderlichen Messraten im kHz-Bereich zwingend benötigt wird, eine Lichtfeldauswertung gelingt und wie groß die resultierende Tiefenauflösung sowie der Refokussierungsbereich sind.

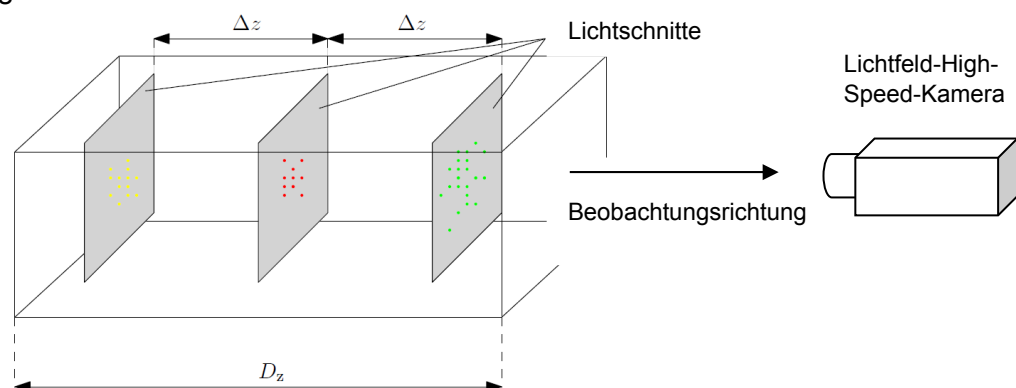


Abb. 1. Erfassung des 3D-Messvolumens durch parallel angeordnete Messebenen (Tiefenebenen), die durch Lichtschnitte beleuchtet sind und von einer Lichtfeld-High-Speed-Kamera simultan beobachtet werden.

Als High-Speed-Kamera wird hier eine des Typs Phantom v1610 von der Firma Vision Research eingesetzt, die bei reduzierter Bildauflösung Frameraten bis 1 MHz ermöglicht. Die Pixelgröße von  $28 \mu\text{m} \times 28 \mu\text{m}$  und die maximale Pixelanzahl von  $1024 \times 1280$  verdeutlichen bereits, dass typ. CMOS High-Speed-Kameras größere und weniger Pixel aufweisen als langsamere CCD und sCMOS Kameras, die bislang für plenoptische Kameras wie z.B. von Prevedel et al. 2014 eingesetzt werden. Da bei der Lichtfeldtechnik die axiale (Tiefen-) Auf-

lösung auf Kosten der lateralen Bildauflösung erhalten wird, vgl. Lumsdaine et al. 2009, und bei hohen Frameraten nur eine reduzierte Bildauflösung verfügbar ist, ist das Erreichen einer hinreichenden Tiefenauflösung und laterale Auflösung der refokussierten Bilder eine messtechnische Herausforderung und bedarf einer Optimierung des Aufbaus der Lichtfeldkamera. Der hier verwendete Aufbau der Lichtfeld-High-Speed-Kamera ist in der Abb. 2 dargestellt und entspricht gemäß Ng 2005 einer plenoptischen Kamera der Version 1.0. Hierbei wird die im Messvolumen befindliche Objektebene mit der Hauptlinse (Brennweite 75 mm) auf ein Mikrolinsenarray (Brennweite 0,86 mm, Pitch 0,25 mm, 25 x 25 Mikrolinsen) abgebildet. Mangels Zugänglichkeit konnte der Kamerasensor nicht direkt in der Fokusebene des Mikrolinsenarrays angebracht werden, sondern wird über eine Relaylinse (Brennweite 50 mm) an den optischen Aufbau angekoppelt. Der Abstand zwischen Hauptlinse und Mikrolinsenarray beträgt 171 mm, zwischen Mikrolinsenarray und Relaylinse 73,18 mm und zwischen Relaylinse und Kamerasensor 162 mm. Mit diesem Aufbau ergibt sich gemäß der Anzahl der verwendeten Mikrolinsen eine laterale Auflösung der refokussierten Bilder von 25 x 25 Pixel, wobei die Ausdehnung eines Pixels einer Länge von 0,2 mm in der Objektebene entspricht. Zur Überprüfung der Funktionstüchtigkeit der Refokussierung wurde ein beleuchtetes Pinhole mit dem Durchmesser von 50  $\mu\text{m}$  als Punktlichtquelle verwendet und axial (z-Achse) traversiert. Die auf die Position des Pinholes refokussierten Bilder sind in der Abb. 3 oben dargestellt. Die Trennung der Tiefenebenen ist hingegen anhand der unten dargestellten Bilder demonstriert, wo das Pinhole bei der Position  $z=0$  belassen worden ist.

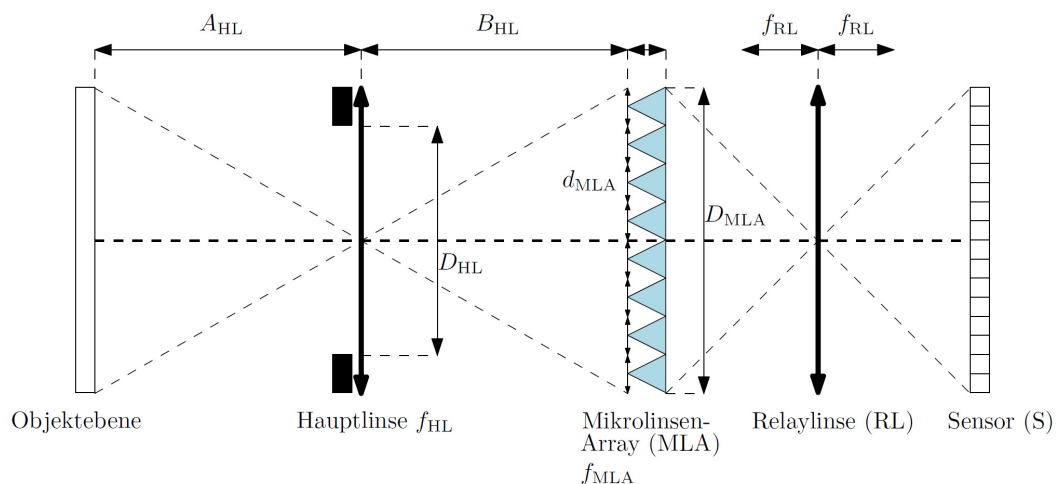


Abb. 2. Erfassung des 3D-Messvolumens durch parallel angeordnete Messebenen (Tiefenebenen), die durch Lichtschnitte beleuchtet sind und von einer Lichtfeld-High-Speed-Kamera simultan beobachtet werden.

optimal refokussierte Bilder				
Refokussierungsfaktor $r$	0,45	0,75	1	1,15
$\frac{z}{\text{mm}}$	-400	-200	0	200
Mit $r = 1$ refokussierte Bilder				

Abb. 3. Refokussierung eines beleuchteten Pinholes, welches (Bildreihe oben) axial verschoben wurde und (Bildreihe unten) bei  $z=0$  belassen wurde.

Vertiefende optische Simulationen und Validierungsexperimente haben darüber hinaus übereinstimmend einen Refokussierungsbereich von 21 mm bei einem mittleren Arbeitsabstand von der Hauptlinse von 128 mm sowie eine Schärfentiefe von z.B. 1 mm (Arbeitsabstand 121,6 mm) und 2 mm (Arbeitsabstand 133,6 mm) ergeben. Letztgenannte Parameter sind für die beiden Messebenen maßgeblich, die für die folgenden Messungen verwendet werden. Im Ergebnis sind demnach Lichtfeldauswertungen mit der in Abb. 2 dargestellten Lichtfeld-High-Speed-Kamera möglich und sie kann prinzipiell für eine simultane und dennoch separate Erfassung der beiden Messebenen mit hoher Messrate erfolgen.

### 3. Messergebnisse

Die Lichtfeld-High-Speed-Kamera wird nun für das FM-DGV-Messsystem, das z.B. ausführlich in Fischer et al. 2013a, 2013b, 2014a, 2014b beschrieben ist, verwendet, um eine simultane Strömungsmessung in zwei Ebenen mit einer hohen Messrate im kHz-Bereich mit nur einer Kamera zu realisieren. Zur Validierung des Messsystems erfolgten zunächst Messungen an einem Freistrah, s. Abb. 4. Der Abbildung sind die Positionierung der beiden Messebenen in Relation zum Freistrah und ebenso die erwarteten gegensätzlichen Geschwindigkeitsprofile zu entnehmen. In den Messergebnissen zeigte sich jedoch zunächst ein Signalübersprechen zwischen den beiden Messebenen, was wegen der hohen Seedingpartikelkonzentration auftrat. So wurde erkannt, dass die Defokussierung der aktuell nicht refokussierten Messebene an zwei Bedingungen geknüpft ist. Einerseits müssen die Partikelbilder möglichst dieselbe Ausdehnung besitzen wie die Kamerapixel, andererseits muss die Anzahl der Partikel pro Pixel kleiner als eins sein, damit die für die Trennung der Messebenen erforderliche Reduzierung der Signalintensität eintritt. Weil diese Bedingungen hier nicht zutrafen wurde anstelle einer erneuten Optimierung des plenoptischen Aufbaus eine zusätzliche Signaltrennung mit einem Frequenzmultiplexverfahren angewendet, vgl. Fischer et al. 2011. Hierbei wurde für jede Messebene ein eigener Laser (Wellenlängen 895 nm und 852 nm) mit einer unterschiedlichen Modulationsfrequenz (1 kHz und 1,5 kHz) verwendet. Damit konnte das Übersprechen eliminiert werden, wobei die Anwendung der plenoptischen Refokussierung nach wie vor eine hohe laterale Ortsauflösung der gemessenen Geschwindigkeitsfelder sicherstellt, die ohne Refokussierung unscharf wären. Die so erhaltenen stationären Geschwindigkeitsfelder der Messebene 1 und 2 sind in der Abb. 5 gegeben, die qualitativ mit den erwarteten Geschwindigkeitsprofilen in sehr guter Übereinstimmung sind.

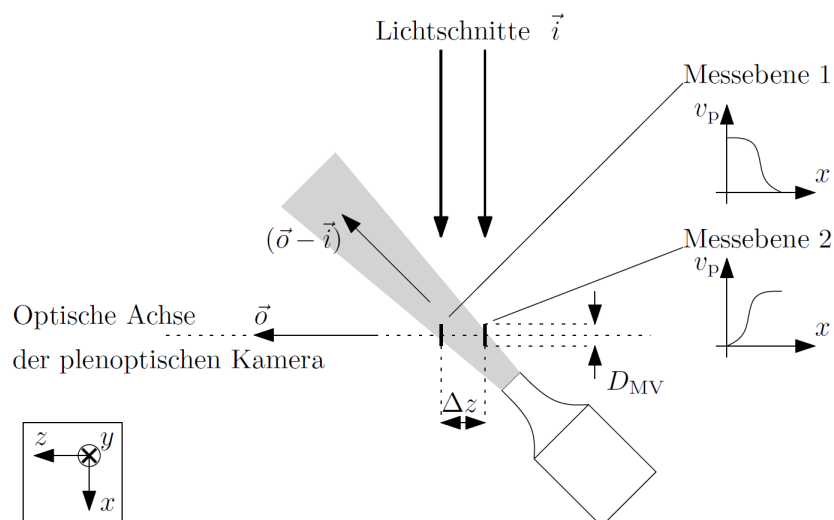


Abb. 4. Messanordnung an der stationären Düsenströmung. Die Düse ist um 45° zur Beobachtungsrichtung geneigt.

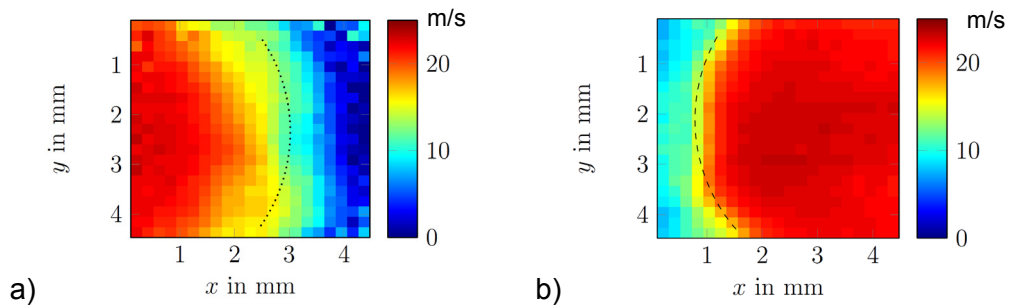


Abb. 5. Lichtfeld-FM-DGV-Messergebnisse der Strömungsgeschwindigkeit vom Freistrah für a) Messebene 1 und b) Messebene 2.

Zwecks quantitativer Validierung der Messergebnisse wurde eine Vergleichsmessung mit einem Laser-Doppler-Anemometer (LDA) durchgeführt. Das gemessene Geschwindigkeitsprofil ist zusammen mit der Lichtfeld-FM-DGV-Messung und dem 95%-Konfidenzintervall über dem Ort aufgetragen. Im Ergebnis stimmen beide Messungen im Rahmen der Messunsicherheit überein, so dass das Lichtfeld-FM-DGV-Messsystem validiert werden konnte.

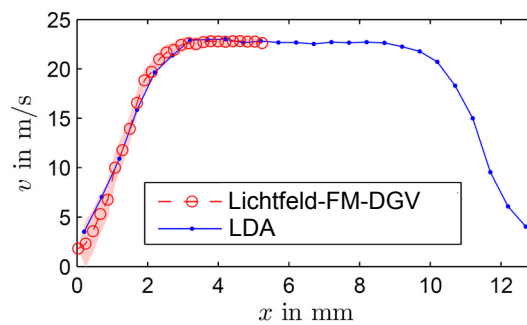


Abb. 6. Validierung der Lichtfeld-FM-DGV-Messung durch Referenz-LDA-Messungen. Das eingezeichnete Band kennzeichnet das 95%-Vertrauensintervall, in welchem beide Messkurven liegen und damit im Rahmen der Messunsicherheit übereinstimmen.

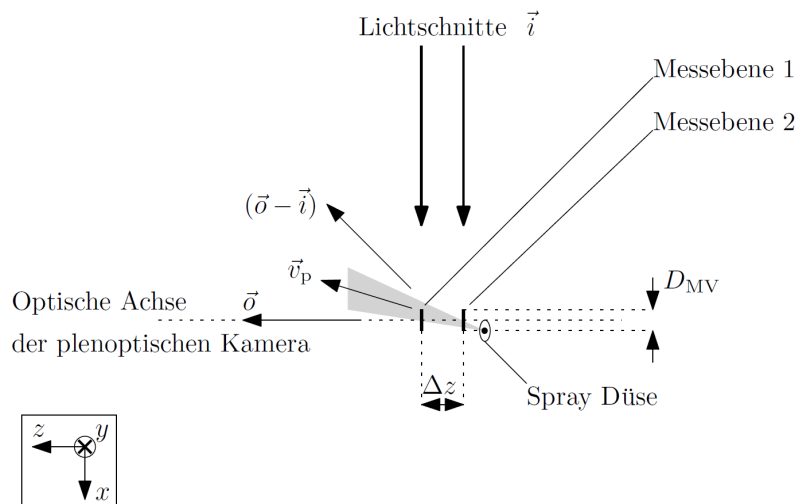


Abb. 7. Messanordnung am instationärem Spray. Die Düse ist um  $5^\circ$  zur Beobachtungsrichtung geneigt.

Schließlich wurde das neue Messsystem zur Untersuchung eines instationären Sprays eingesetzt, um damit die hohe Messrate zu demonstrieren. Die Messanordnung ist in Abb. 7

dargestellt und unterscheidet sich von der Messung an der Düse hinsichtlich der unterschiedlichen Lage der Hauptströmungsrichtung des Sprays. Darüber hinaus ist zu bemerken, dass hier keine Seedingpartikel zugeführt worden sind und direkt das an den Spraytröpfchen gestreute Licht ausgewertet worden ist. Das Spray wurde manuell zweimal hintereinander für ca. 1 s ausgelöst, was in den Zeitreihen in Abb. 8 der Messung klar zu erkennen ist. Vor allem wegen der manuellen, ungleichen Auslösung des Sprays treten nicht reproduzierbare instationäre Effekte vor allem bei der Beginn- und der Endphase der einzelnen Sprühstöße auf, die dank der hier verwendeten hohen Messrate von 0,5 kHz vollständig aufgelöst werden konnten. Als Beispiel sind darüber hinaus ausgewählte simultan gemessene Strömungsgeschwindigkeitsfelder des transienten Startvorgangs in Abb. 9 gezeigt. Bei einer zu geringen Lichtleistung wurde der Messwert als nicht valide betrachtet und verworfen, weshalb keine Messwerte außerhalb des Sprühkegels dargestellt sind. Im Ergebnis sind somit erstmals Lichtfeld-High-Speed-FM-DGV-Messungen an einem instationären Spray gelungen, womit die Funktionstüchtigkeit des hier dargelegten Messkonzepts belegt werden konnte.

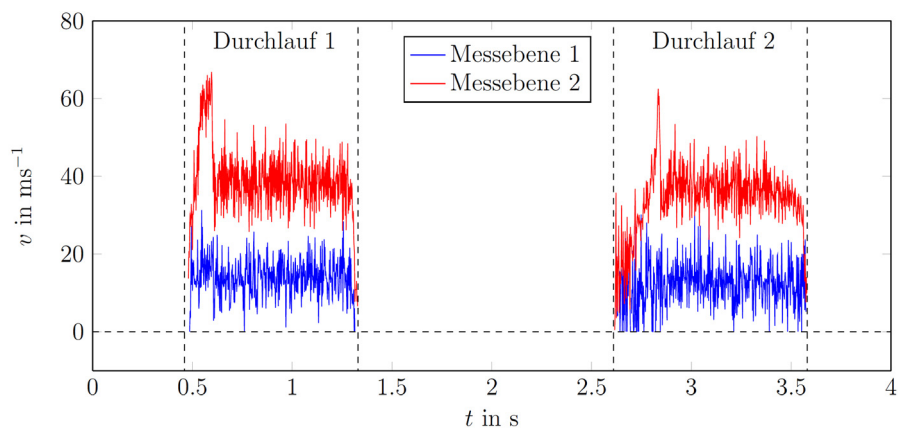


Abb. 8. Messanordnung an dem instationärem Spray.

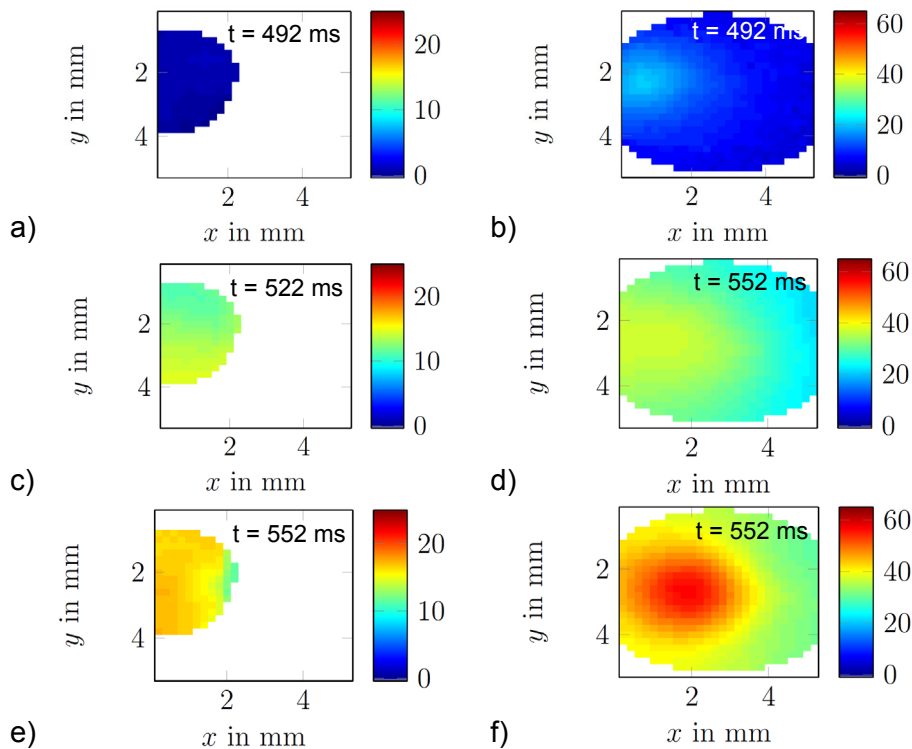


Abb. 9. Messergebnisse für die Geschwindigkeitsfelder der Messebene 1 (a,c,e) und Messebene 2 (b,d,f) während der Startphase des Sprühstoßes in m/s.

#### **4. Zusammenfassung**

Mittels Plenoptik kann das gesamte Messvolumen aus einer einzigen Bildaufnahme rekonstruiert werden. Um zugleich der Forderung nach einer hohen Messrate gerecht zu werden, wurde erstmals eine plenoptische Hochgeschwindigkeitskamera realisiert und für schnelle volumetrische FM-DGV-Messungen eingesetzt. Eine Herausforderung ist hierbei die geringere zur Verfügung stehende Pixelanzahl, weil beim plenoptischen Ansatz die Tiefenauflösung des Messvolumens zugunsten einer Verringerung der lateralen Auflösung erkaufte wird. Diesbezüglich ist das spektroskopisch arbeitende FM-DGV-Messprinzip vorteilhaft, dass prinzipbedingt aus jedem einzelnen Pixel einen Messwert generieren kann und deshalb eine maximale Datenrate bietet. Im Ergebnis wurde ein plenoptisches High-Speed-3D-FM-DGV-Messverfahren unter Verwendung eines Mikrolinsenarrays, einer Hochgeschwindigkeitskamera und eines FM-DGV-Messsystems realisiert. Damit konnten zwei Tiefenebenen mit 25 x 25 Pixel simultan mit 0,5 kHz Rate gemessen werden, wobei sich die Messrate beispielsweise durch die Nutzung einer Frequenzumtastung nach Müller et al. 2007 anstelle einer sinusförmigen Laserfrequenzmodulation noch steigern lässt. Das plenoptische High-Speed-3D-FM-DGV wurde schließlich erstmals an einer stationären Düsenströmung erprobt und zur Untersuchung eines instationären Sprays angewendet. Dabei konnte demonstriert werden, dass das plenoptische High-Speed-FM-DGV für die Untersuchung hochdynamischer Strömungsprozesse geeignet ist.

Aufgrund der hohen Konzentration der Spraytröpfchen wurden bei den hier betrachteten Experimenten mehrere Partikel auf ein Pixel abgebildet und die Partikelbilder waren kleiner als ein Pixel. Deswegen reichte eine plenoptische Refokussierung nicht aus, um die Signale der zwei verschiedenen Tiefenebenen zu trennen. Zur Reduzierung des Übersprechens zwischen den beiden Tiefenebenen kam deshalb zusätzlich eine Mehrebenen-Lichtschnittbeleuchtung (hier zwei Ebenen) sowie ein Frequenzmultiplexverfahren zum Einsatz. Ausblickend auf zukünftige Arbeiten ist der optische Aufbau hinsichtlich der Maximierung der Schärfentiefe zu optimieren und der minimale Abstand der Messebenen für eine Messung ohne ein zusätzliches Multiplex zu identifizieren. Darüber hinaus lassen sich für kleinere Abstände Multiplex-Techniken wie ein Code-Multiplex implementieren, so dass dichter angeordnete und mehr Messebenen möglich sind. Wegen der Einzelpixelauflösung von DGV-Messprinzipien ist das vorgeschlagene Verfahren zudem für die Verwendung von Bildleitern und damit für endoskopische Messungen geeignet, vgl. Nobes et al. 2004. Damit können auch „Schlüssellochzugänge“ für die Untersuchung schwer zugänglicher Strömungen genutzt werden. Schließlich bietet die hohe Messrate und die hohe örtliche Auflösung einen neuen messtechnischen Zugang, um instationäre Phänomene in Sprays auch nah der Düsenaustrittsöffnung identifizieren und untersuchen zu können, vgl. den in Fansler et al. 2015 beschriebenen aktuellen Forschungsbedarf zur Untersuchung von Sprays.

#### **Danksagung**

Die finanzielle Unterstützung zur Beschaffung der Hochgeschwindigkeitskamera durch die Deutschen Forschungsgemeinschaft, Großgeräteantrag INST 269/536-1 FUGG, sei dankbar erwähnt.

## Literatur

Fansler TD, Parrish SE, 2015: "Spray measurement technology: a review", *Measurement Science and Technology* 26:012002 (34 pp.).

Fischer A, Wilke U, Schlüßler R, Haufe D, Sandner T, Czarske J, 2014a: "Extension of frequency modulated Doppler global velocimetry for the investigation of unsteady spray flows", *Optics and Lasers in Engineering* 63:1-10.

Fischer A, Schlüßler R, Haufe D, Czarske J, 2014b: "Lock-in spectroscopy employing a high-speed camera and a micro-scanner for volumetric investigations of unsteady flow's", *Optics Letters* 39(18):5082-5085.

Fischer A, König J, Haufe D, Schlüßler R, Büttner L, Czarske J, 2013a: "Optical multi-point measurements of the acoustic particle velocity with frequency modulated Doppler global velocimetry", *Journal of Acoustical Society of America* 134(2):1102-1111.

Fischer A, König J, Czarske J, Leitgeb T, Woisetschläger J, 2013b: "Analysis of flow oscillations in flames by optical flow field measurements with a high measurement rate", *Experiments in Fluids* 54(2):1622 (18 pp.).

Fischer A, Büttner L, Czarske J, 2011: „Simultaneous measurements of multiple flow velocity components using frequency modulated lasers and a single molecular absorption cell", *Optics Communications* 284:3060-3064.

Lumsdaine A, Georgiev T, 2009: "The focused plenoptic camera", *IEEE International Conference on Computational Photography (ICCP)*, 16.-17. April 2009.

Müller H, Eggert M, Czarske J, Büttner L, Fischer A, 2007: "Single-camera Doppler global velocimetry based on frequency modulation techniques", *Experiments in Fluids* 43:223-232.

Ng R, Levoy M, Brédif M, Duval G, Horowitz M, Hanrahan P, 2005: "Light Field Photography with a Hand-held Plenoptic Camera", *Stanford Tech Report CTSR 2005-02*.

Nobes DS, Ford HD, Tatam RP, 2004: "Instantaneous, three-component planar Doppler velocimetry using imaging fibre bundles", *Experiments in Fluids* 36:3–10.

Prevedel R, Yoon YG, Hoffmann M, Pak N, Wetzstein G, Kato S, Schrödel T, Raskar R, Zimmer M, Boyden ES, Vaziri A, 2014: "Simultaneous whole-animal 3D imaging of neuronal activity using light-field microscopy", *Nature Methods* 11:727-730.

Wu Z, Zhu Z, Huang Z, 2006: "An experimental study on the spray structure of oxygenated fuel using laser-based visualization and particle image velocimetry", *Fuel* 85: 1458–1464.