

## Untersuchung von instationären Strömungsphänomenen während einer einzelnen Hochdruck-Einspritzung

### Investigation of unsteady phenomena during a single high-pressure fuel injection

**Johannes Gürtler, Raimund Schlübler, Jürgen Czarske, Andreas Fischer**

Technische Universität Dresden, Professur für Mess- und Sensorsystemtechnik

Helmholtzstr. 18, 01069 Dresden

e-mail: johannes.guertler@tu-dresden.de

Hochdruck-Einspritzung, Hochgeschwindigkeitskamera, Frequenzmodulation, Analyse instationärer Sprays, Spray-Geschwindigkeitsmessungen

high-pressure injection, high-speed camera, frequency modulation technique, unsteady spray analysis, spray velocity measurement

### Zusammenfassung

In diesem Beitrag werden zeitlich hoch aufgelöste, kontinuierliche Messungen der Geschwindigkeitsfelder eines Treibstoffsprays bei einer Hochdruck-Diesel-Einspritzung mit Drücken bis 1400 bar und Treibstoffgeschwindigkeiten bis 380 m/s präsentiert. Die Messungen erfolgten unter atmosphärischen Umgebungsbedingungen mittels eines Doppler-Global-Velozimeters mit sinusförmiger Laserfrequenzmodulation in Kombination mit einer Hochgeschwindigkeitskamera (bis 1 Mfps), wodurch Messraten bis 200 kHz erreicht wurden. Mit diesem System ist es ohne Zugabe von Streupartikeln oder dem Vorhandensein korrelierbarer Strukturen möglich, die zeitlich aufgelösten Geschwindigkeitsfelder kompletter Einspritzvorgänge ab einem Abstand von 60  $\mu\text{m}$  zur Austrittsöffnung des Diesel-Injektors zu messen. Es wird gezeigt, dass diese Einspritzvorgänge örtliche sowie zeitliche Fluktuationen im  $\mu\text{m}$ - bzw.  $\mu\text{s}$ -Bereich aufweisen. Somit erlaubt das vorgestellte Messsystem neue Einblicke bei der Analyse moderner Hochdruck-Einspritzsysteme, wie die Untersuchung instationären Verhaltens einzelner Einspritzungen und ermöglicht damit die Entwicklung neuartiger Prozesse zur Effizienzsteigerung moderner Motoren.

### Einleitung

Die Treibstoffeinspritzung in modernen Dieselmotoren mittels Hochdruck-Injektoren beeinflusst direkt den Kraftstoffverbrauch sowie die Schadstoff- und Lärmemission des Motors. Zur Optimierung der Einspritzung und somit der Motoreigenschaften, ist ein tiefer gehendes Verständnis des Einspritzvorgangs notwendig. Dies erfordert zeitlich hoch aufgelöste Geschwindigkeitsmessungen vollständiger Einspritzungen, um das instationäre Verhalten der injizierten Treibstofftröpfchen für einzelne Einspritzungen auflösen zu können.

Die Messung der Tröpfchengeschwindigkeit an einem Hochdruck-Diesel-Injektor stellt eine große Herausforderung dar. Aufgrund typischer Einspritzdauern im Bereich weniger ms, sind eine hohe Messrate größer als 100 kHz und eine hohe Zeitauflösung im  $\mu\text{s}$ -Bereich notwendig. Darüber hinaus soll das instationäre Verhalten der Einspritzungen durch eine kontinuierliche Messung mehrerer Einspritzvorgänge untersucht werden, was eine Messdauer von mehreren

Sekunden erforderlich macht. Weiterhin erfolgen bei modernen Hochdruck-Injektoren mit Injektordrücken bis 2000 bar Sprünge der Geschwindigkeit auf mehr als 300 m/s in einer Zeitdauer von weniger als 100  $\mu$ s, vgl. Cao et al. (2000) und Wu et al. (2006), weshalb ein Messsystem mit großem Messbereich und einer hohen Dynamik notwendig ist.

Aufgrund der Bedeutung der Treibstoffeinspritzung für die Effizienz eines Dieselmotors erfolgten bereits zahlreiche Messungen unterschiedlicher physikalischer Größen an Hochdruck-Injektoren. Ein vergleichender Überblick über diese Messungen erfolgte durch Fansler et al. (2015), wobei eine Unterteilung des Treibstoffsprays in Bereiche vorgenommen wurde. Diese Bereiche umfassen bezüglich unterschiedlicher Charakteristiken des Sprays mit zunehmender Entfernung zur Düse die

1. Fluidströmung im Inneren des Injektors, die
2. Spraybildung nahe der Injektoröffnung (Nahfeld), das
3. entwickeltes Spray (Fernfeld) und das
4. Auftreffen des Sprays auf die Zylinderwand.

Die vorliegenden Messungen dienen der Untersuchung der Treibstoffgeschwindigkeit im Nahfeld (Bereich 2), wo Treibstoff als geschlossener Fluidkegel den Injektor verlässt und erst mit zunehmender Entfernung Tropfen entstehen. Weiterhin erfolgen Messungen im Fernfeld (Bereich 3), wo die Ausbildung des Treibstoffsprays vollständig abgeschlossen ist.

Geschwindigkeitsmessungen an Hochdruck-Injektoren mit einer Zeitauflösung bis wenige  $\mu$ s durch Particle Image Velocimetry (PIV) mit gepulsten Lasern wurden mehrfach gezeigt (Cao et al. (2000); Lee et al. (2003); Wernet (2007); Wu et al. (2006); Zhang et al. (2014); Zhu et al. (2012)). Jedoch basiert die PIV auf Bildkorrelation, weshalb korrelierbare Strukturen erfasst werden müssen. Deshalb ist es nicht möglich, Messungen mittels PIV im Bereich 2 nahe der Injektoröffnung ohne die Zugabe von Streupartikeln durchzuführen.

Messungen der Geschwindigkeit einer flüssigen Phase ohne Zugabe von Streupartikeln können im Bereich 2 durch Laser-Doppler-Anemometrie, Phasen-Doppler-Anemometrie (Bodoc et al. (2009); Wigley et al. (2004)) und Doppler-Global-Velocimetrie (DGV) (Fischer et al. (2000); Röhle (1996)) realisiert werden. Die beschriebenen Systeme genügen mit Messraten unter 1 kHz jedoch nicht der Forderung nach einer Messrate von mehr als 100 kHz.

Diese Forderung kann prinzipiell durch den Einsatz eines Doppler-Global-Velocimeters mit sinusförmiger Laserfrequenzmodulation (FM-DGV) erfüllt werden. Zweidimensionale (2D) Geschwindigkeitsmessungen an einem langsameren Spray durch die Kombination des FM-DGV mit einer Hochgeschwindigkeitskamera wurden von Fischer et al. (2014b) und Fischer et al. (2014a) präsentiert, wobei Messraten bis 25 kHz erreicht wurden. Für die Nutzung des FM-DGV zur Vermessung der Einspritzungen ist diese Messrate jedoch zu gering.

Um diese Limitierung zu überwinden, wird in diesem Beitrag der Einsatz eines 2D-FM-DGV-Systems zur zeitlich aufgelösten, kontinuierlichen Messung der Geschwindigkeit bei einer Einspritzung präsentiert. Das System ermöglicht Messraten bis 200 kHz durch die Lichtdetektion mit einer Hochgeschwindigkeitskamera und erlaubt Messungen im Nah- und Fernfeld des Injektors bis Geschwindigkeiten von 380 m/s.

## **Messaufbau**

Der Messaufbau ist in Abb. 1a schematisch dargestellt. Er besteht grundsätzlich aus dem FM-DGV als Messsystem (rot) und dem Injektorsystem (blau).

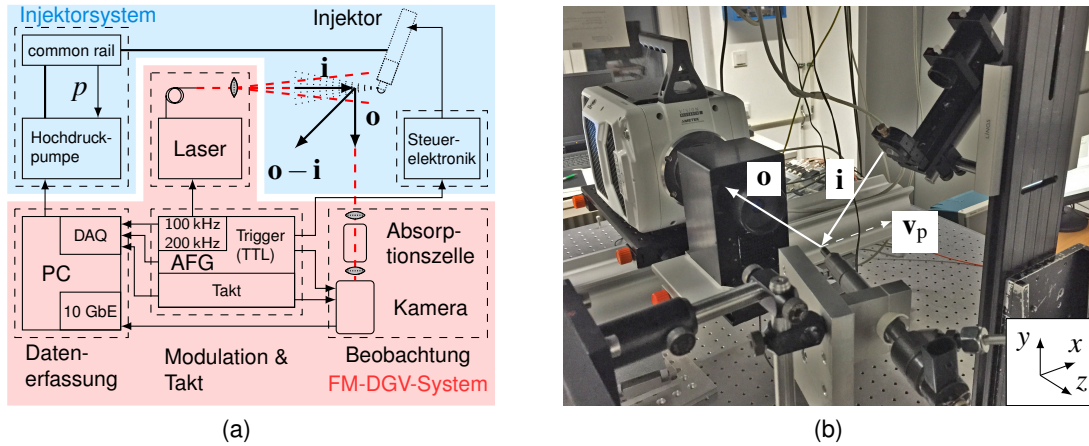


Abb. 1: (a) Schematische Darstellung des Messaufbaus mit FM-DGV-System (rot) und Injektorsystem (blau) und (b) Photo des Messaufbaus mit eingezeichneter Beobachtungs- und Beleuchtungsrichtung.

Das Prinzip des FM-DGV ist detailliert in Fischer et al. (2007) und Fischer et al. (2008) dargestellt. Es basiert auf der Auswertung der Doppler-Frequenzverschiebung

$$f_D = \frac{|\mathbf{o} - \mathbf{i}|}{\lambda} \cdot v_{\mathbf{o},\mathbf{i}} \quad \text{mit } v_{\mathbf{o},\mathbf{i}} = \frac{(\mathbf{o} - \mathbf{i})}{|\mathbf{o} - \mathbf{i}|} \cdot \mathbf{v}_p \quad (1)$$

des einfallenden Lichts mit der Wellenlänge  $\lambda$  bei der Streuung an Partikeln oder den Brechungsindexsprüngen zwischen Diesel und Luft, die sich mit der Geschwindigkeit  $\mathbf{v}_p$  bewegen. Wie in Abb. 1 dargestellt, erfolgen die Beleuchtung und die Beobachtung in Richtung  $\mathbf{i}$  bzw.  $\mathbf{o}$ , wobei  $|\mathbf{i}| = |\mathbf{o}| = 1$ . Um die Frequenz  $f_D$  zu bestimmen, wird das Streulicht durch eine Absorptionszelle geführt und mit einer Kamera detektiert. Die Zelle des genutzten Systems ist mit Cäsium gefüllt, dessen frequenzabhängige Transmission die Frequenzverschiebung in eine Intensitätsänderung umwandelt. Um die Querempfindlichkeit des gemessenen Intensitätssignals zur Streulichtleistung zu eliminieren, wird zur Beleuchtung eine sinusförmig frequenzmodulierte Laserquelle mit der Modulationsfrequenz  $f_m$  genutzt. Mittels einer Kalibrierung kann die Doppler-Frequenz  $f_D$  aus dem Quotienten

$$q(f_D) = \frac{A_1(f_D)}{A_2(f_D)} \quad (2)$$

der Amplituden  $A_1$  und  $A_2$  der ersten und zweiten Harmonischen des Intensitätssignals bestimmt werden. Die Geschwindigkeitskomponente  $v_{\mathbf{o},\mathbf{i}}$  der Streupartikel in Richtung  $\mathbf{o} - \mathbf{i}$  ergibt sich schließlich aus Gl. (1).

Bei dem in Abb. 1a dargestellten Messsystem wird ein MOPA-Laser (engl.: master oscillator power amplifier) mit maximaler Ausgangsleistung 600 mW bei einer Wellenlänge von 895 nm zur Beleuchtung genutzt, dessen Lichtstrahl zu einem Schnitt mit der Dicke 500  $\mu\text{m}$  aufgeweitet wird. Die Messungen werden mit den Modulationsfrequenzen 100 kHz und 200 kHz durchgeführt. Um die zweiten Harmonischen dieser Frequenzen abtasten zu können, wird die Kamera mit entsprechend hohen Bildraten von 0.5 MHz bzw. 1 MHz betrieben, was die maximale Bildgröße auf 128 px  $\times$  64 px bzw. 128 px  $\times$  16 px limitiert. Die Absorptionszelle befindet sich zwischen zwei Linsen, die ein Keplerteleskop mit dem Abbildungsmaßstabs von 1 : 2 bilden. Somit folgt aus der Pixelanzahl, der Pixelgröße von 28  $\mu\text{m}$   $\times$  28  $\mu\text{m}$  und der Lichtschnittdicke Messvolumen von 6.4 mm  $\times$  3.2 mm  $\times$  0.5 mm bzw. 6.4 mm  $\times$  0.8 mm  $\times$  0.5 mm bei einer Ortsauflösung von 56  $\mu\text{m}$   $\times$  56  $\mu\text{m}$   $\times$  500  $\mu\text{m}$ . Mit dem in Abb. 1b gezeigten Messaufbau wird die

Geschwindigkeitskomponente  $v_{0,i}$  bestimmt. Mittels Projektion wird diese Komponente in die Geschwindigkeit  $u$  in  $x$ - bzw. Injektions-Richtung überführt und erlaubt die Messung von Geschwindigkeitswerten bis 380 m/s.

Das genutzte Injektorsystem besteht aus einer Hochdruck-Pumpe, welche Injektordrücke bis zu 1400 bar ermöglicht, einem Injektor der Fa. Bosch mit Magnetventil und der Steuerelektronik, welche die Dauer des Haltestroms für die Öffnung des Ventils bestimmt. Über einen Signalgenerator können die Einspritzdauer und -rate variabel vorgegeben werden. Gemäß Abb. 1b erfolgt die Einspritzung hauptsächlich in  $x$ -Richtung des gezeigten Koordinatensystems.

## Validierung

Um die Ergebnisse der Messungen mittels 2D-FM-DGV zu validieren und zusätzlich einen direkten Vergleich mit anderen Messsystemen zu ermöglichen, werden die Messungen an der Einspritzdüse sowohl mit einem PIV als auch mit einem 1D-FM-DGV wiederholt.

Das dafür genutzte PIV-System besteht aus einem diodengepumpten Nd:YAG cw-Laser mit maximaler Ausgangsleistung von 5 W zur Beleuchtung und der Hochgeschwindigkeitskamera mit einer minimalen Belichtungsdauer von 0.452  $\mu$ s und einer maximalen Messrate von 1 MHz zur Beobachtung. Der Messaufbau des 1D-FM-DGV ist identisch zum Aufbau in Abb. 1a, mit der Ausnahme, dass statt der Kamera ein Array aus 8 Photodetektoren genutzt wird, die punktförmige Messungen im Abstand von 880  $\mu$ m auf einer Linie in der Messebene erlauben.

In Abb. 2 sind die Zeitverläufe der Geschwindigkeit  $u$  in Injektionsrichtung für je einen Messpunkt im Nah- (Abb. 2a) und im Fernfeld (Abb. 2b) dargestellt. Die Zeitverläufe sind durch einen gleitenden Median mit 10 Messwerten geglättet. Das Unsicherheitsband besteht aus den Standardabweichungen der jeweils genutzten Messwerte. Für einen besseren Vergleich der Systeme sind die Zeitverläufe außerdem über jeweils 50 Einspritzungen gemittelt, ebenso wie die zugehörigen Unsicherheitsbänder. Basierend auf dem Bildkontrast der PIV-Daten bzw. der detektierten Lichtleistung der FM-DGV-Daten, werden Messwerte mit zu geringem Kontrast bzw. zu geringer Lichtleistung verworfen. Diese nicht validen Werte sind ohne Unsicherheitsband dargestellt. Vor allem bei den Ergebnissen der PIV, jedoch auch bei denen des 1D-FM-DGV, nimmt die Zahl nicht valider Werte mit Nähe zur Injektoröffnung zu, wohin-

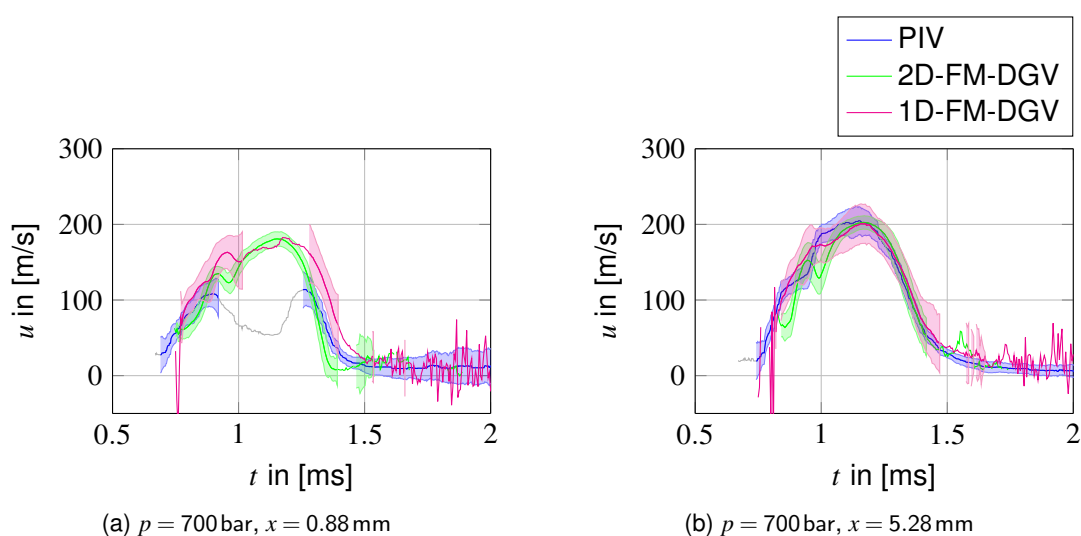


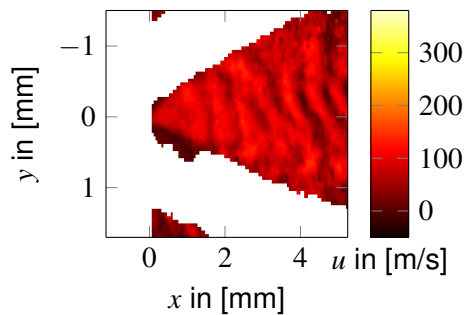
Abb. 2: Vergleich der gemessenen Zeitverläufe der Geschwindigkeit  $u$  an der Position (a)  $x = 0.88$  mm und (b)  $x = 5.28$  mm in Entfernung zur Injektoröffnung bei einem Injektordruck von 700 bar. Gemessen mit PIV, 1D-FM-DGV und 2D-FM-DGV, jeweils in Kombination mit einer Hochgeschwindigkeitskamera.

gegen die Messung mittels 2D-FM-DGV auch in diesem Bereich valide Werte erzeugt. Die Ergebnisse der Messungen im Fernfeld sind innerhalb der angegebenen Unsicherheiten für alle Messsysteme identisch. Die Systeme validieren sich somit gegenseitig.

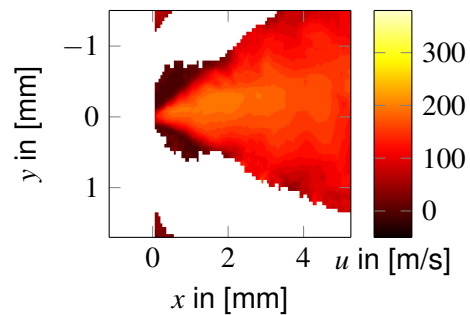
### Messergebnisse

Die Messungen mit dem 2D-FM-DGV erlauben sowohl die Untersuchung des örtlichen Verhaltens zu einem diskreten Zeitpunkt, als auch des zeitlichen Verhaltens an einem Ort. In Abb. 3 und Abb. 4 sind die 2D-Darstellungen der Geschwindigkeit  $u$  zu je drei Zeitpunkten  $t = \{0.81\text{ ms}; 1\text{ ms}; 1.3\text{ ms}\}$  bezogen auf die Triggerung des Haltestroms dargestellt. Weiß dargestellte Bereiche weisen eine Lichtleistung kleiner 50 pW auf und wurden als nicht valide verworfen. Die genutzten Injektordrücke sind 900 bar und 1400 bar und die Zeitdauer des Haltestroms beträgt 1 ms. Die Laserfrequenz wurde mit 100 kHz moduliert.

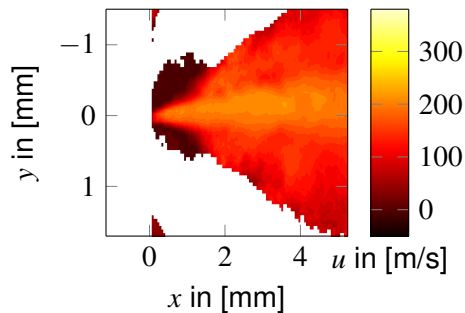
Anhand der 2D-Darstellung kann die Verteilung der Geschwindigkeit ab einer Entfernung von 60  $\mu\text{m}$  von der Injektoröffnung untersucht werden. Die maximalen Geschwindigkeiten treten



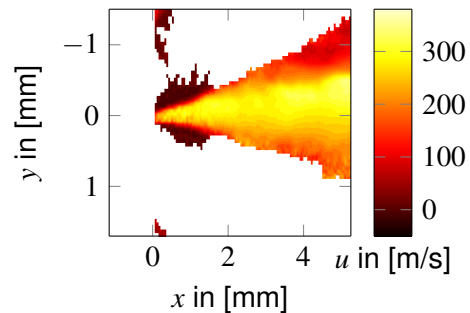
(a)  $p = 900\text{ bar}, t_1 = 0.81\text{ ms}$



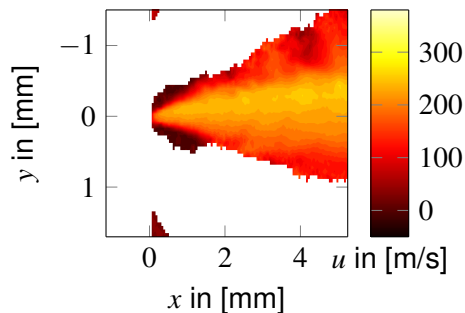
(a)  $p = 1400\text{ bar}, t_1 = 0.81\text{ ms}$



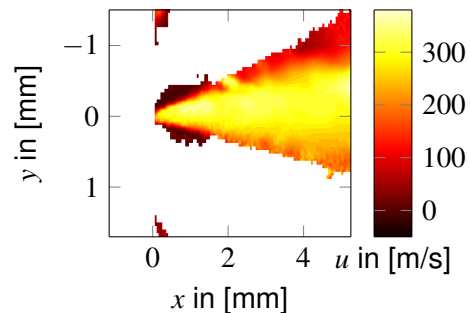
(b)  $p = 900\text{ bar}, t_2 = 1.00\text{ ms}$



(b)  $p = 1400\text{ bar}, t_2 = 1.00\text{ ms}$



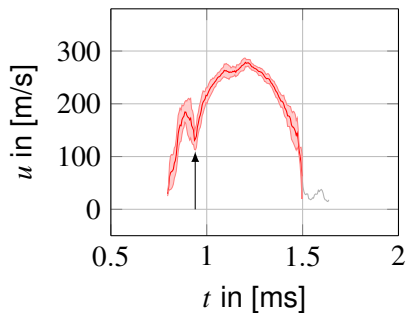
(c)  $p = 900\text{ bar}, t_3 = 1.30\text{ ms}$



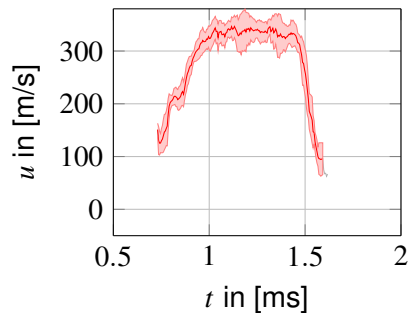
(c)  $p = 1400\text{ bar}, t_3 = 1.30\text{ ms}$

Abb. 3: 2D-Darstellung der Geschwindigkeit  $u$  zu drei verschiedenen Zeitpunkten bei einem Injektordruck von 900 bar.

Abb. 4: 2D-Darstellung der Geschwindigkeit  $u$  zu drei verschiedenen Zeitpunkten bei einem Injektordruck von 1400 bar.



(a)  $p = 900 \text{ bar}$ ,  $x = 5.28 \text{ mm}$



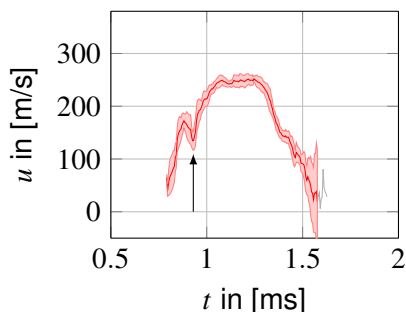
(b)  $p = 1400 \text{ bar}$ ,  $x = 5.28 \text{ mm}$

Abb. 5: Zeitverlauf der Geschwindigkeit  $u$  an der Position  $x = 5.28 \text{ mm}$  in Entfernung zur Injektoröffnung bei einem Injektordruck von 900 bar und 1400 bar.

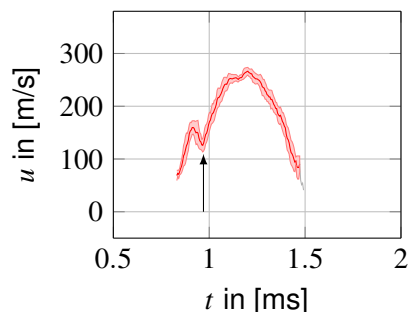
erwartungsgemäß direkt am Injektor auf und betragen 230 m/s bei 900 bar und 320 m/s bei 1400 bar. Entsprechend nimmt die maximale Geschwindigkeit des Treibstoffs mit dem Injektordruck zu. Weiterhin nimmt die Geschwindigkeit nicht kontinuierlich mit zunehmender Entfernung zur Öffnung ab, sondern fluktuiert örtlich. Dies ist insbesondere in Abb. 3a zu erkennen.

Um die Fluktuation der Geschwindigkeit auch zeitlich zu analysieren, sind in Abb. 5 die Zeitverläufe der Geschwindigkeit  $u$  an der Position  $x = 5.28 \text{ mm}$  für die Injektordrücke 900 bar und 1400 bar dargestellt. Die genutzte Haltedauer beträgt wie zuvor 1 ms. Da eine möglichst genaue Analyse der zeitlichen Fluktuationen erfolgen soll, wurde die Messrate auf 200 kHz erhöht, um somit eine höhere Zeitauflösung zu erhalten. Diese ergibt sich zu  $50 \mu\text{s}$  aufgrund der in Abs. „Validierung“ erläuterten Glättung der Verläufe mit einem gleitenden Median aus 10 Werten. Aus der Standardabweichung dieser 10 Werte wurde ebenfalls das Unsicherheitsband gebildet. Nicht valide Werte, sind aufgrund einer Unsicherheit von mehr als 40 m/s ausgegraut und ohne Unsicherheitsband dargestellt.

Anhand der Darstellungen ist der charakteristische Verlauf der Einspritzung zu erkennen. Beispielsweise startet die Einspritzung mit 900 bar in Abb. 5a zum Zeitpunkt 0.8 ms nach der Triggerung mit einer Startgeschwindigkeit von 30 m/s. Innerhalb von 0.5 m/s steigt die Geschwindigkeit auf den Maximalwert von 280 m/s und fällt anschließend bis zum Zeitpunkt 1.5 ms nach Triggerung auf 20 m/s ab. Die Dauer der Einspritzungen beträgt somit 0.7 ms bei einer Haltedauer von 1 ms. Diese Differenz erklärt sich vor allem durch die mechanische Trägheit des Magnetventils. Aus Abb. 5b bei 1400 bar ist zu entnehmen, dass die Dauer der Einspritzung,



(a)



(b)

Abb. 6: Gegenüberstellung der Zeitverläufe der Geschwindigkeit verschiedener Einspritzungen mit identischen Parametern an der Position  $x = 5.28 \text{ mm}$  in Entfernung zur Injektoröffnung bei einem Injektordruck von 900 bar.

sowie die Maximalgeschwindigkeit mit dem Injektordruck ansteigen. Weiterhin beginnt die Einspritzung mit steigendem Druck früher.

Das instationäre Verhalten der Einspritzungen ist anhand des mit einem Pfeil markierten Geschwindigkeitseinbruchs zu erkennen. Diese Einbrüche traten ebenfalls bei weiteren Einspritzungen auf und waren auch in den Aufnahmen der Kamera mit bloßem Auge zu sehen. Eine Erklärung für dieses Verhalten wäre ein Druckabfall innerhalb des Injektors nach der Öffnung des Ventils. Weiterhin zeigt der Vergleich verschiedener Einspritzungen mit identischen Parametern in Abb. 6, dass die Verläufe bzgl. ihrer Charakteristiken stark variieren. Somit ist es ebenfalls gelungen Instationaritäten im Zeitverhalten der Einspritzungen zu erfassen.

## **Abschlussdiskussion**

Es wurden zeit- und orts aufgelöste Messungen des Geschwindigkeitsfeldes der Einspritzung eines Hochdruck-Diesel-Injektors gezeigt. Dabei gelang unter atmosphärischen Umgebungsbedingungen die Messung von Geschwindigkeiten bis 320 m/s bei Injektordrücken bis 1400 bar. Dank Messdauern von rund 6 s, Messraten bis 200 kHz und einer Zeitauflösung bis 50  $\mu$ s konnten komplette aufeinander folgende Einspritzungen gemessen und sowohl zeitliche als auch örtliche Instationaritäten aufgelöst werden.

## **Dankesworte**

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgesellschaft (DFG Projekt INST 269/536-1 FUGG) für die finanzielle Unterstützung und Prof. Hans Zellbeck und Kay Mahler von der Professur für Verbrennungsmotoren der Technischen Universität Dresden für die Leihgabe des Injektorsystems.

## **Literatur**

Bodoc, V., Laurent, C., Biscos, Y., Lavergne, G., 2009: "Advanced Measurement Techniques for Spray Investigations", Optical Diagnostics of Flows, Vol. 1, 1 (15 pp.)

Cao, Z.-M., Nishino, K., Mizuno, S., Torii, K., 2000: "PIV measurement of internal structure of Diesel fuel spray", Experiments In Fluids, 211 (9 pp.)

Fansler, T. D., Parrish, S. E., 2015: "Spray measurement technology: a review", Measurement Science and Technology, Vol. 26, No. 1, 012002 (34 pp.)

Fischer, A., Büttner, L., Czarske, J., Eggert, M., Grosche, G., Müller, H., 2007: "Investigation of time-resolved single detector Doppler global velocimetry using sinusoidal laser frequency modulation", Measurement, Science and Technology, Vol. 18, 2529 (16 pp.)

Fischer, A., Büttner, L., Czarske, J., Eggert, M., Müller, H., 2008: "Measurement uncertainty and temporal resolution of Doppler global velocimetry using laser frequency modulation", Applied Optics, Vol. 47, 3941 (12 pp.)

Fischer, A., Schlübler, R., Haufe, D., Czarske, J., 2014a: "Lock-in spectroscopy employing a high-speed camera and a micro-scanner for volumetric investigations of unsteady flows", Optics Letters, Vol. 39, No. 17, 5082 (3 pp.)

Fischer, A., Wilke, U., Schlübler, R., Haufe, D., Sandner, T., Czarske, J., 2014b: "Extension of frequency modulated Doppler global velocimetry for the investigation of unsteady spray flows", Optics and Lasers in Engineering, Vol. 63, 1 (10 pp.)

- Fischer, M., Heinze, J., Matthias, K., Röhle, I., 2000: "Doppler global velocimetry in flames using a newly developed, frequency stabilized, tunable, long pulse Nd:YAG laser", in: 10th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, Portugal, Nr. 35.3 (12 pp.)
- Lee, K., Lee, C., Joo, Y., 2003: "Application technique of particle image velocimetry and entropy analysis to investigate spray structure for gasoline direct injection injector", Measurement Science and Technology, Vol. 14, No. 7, 953 (11 pp.)
- Röhle, I., 1996: "Three-dimensional Doppler global velocimetry in the flow of a fuel spray nozzle and in the wake region of a car", Flow Meas. Instrum., Vol. 7, No. 3/4, 287 (7 pp.)
- Wernet, M. P., 2007: "Temporally resolved PIV for space-time correlations in both cold and hot jet flows", Measurement Science and Technology, Vol. 18, No. 5, 1387 (16 pp.)
- Wigley, G., Goodwin, M., Pitcher, G., Blondel, D., 2004: "Imaging and PDA analysis of a GDI spray in the near-nozzle region", Experiments In Fluids, Vol. 36, 565 (9 pp.)
- 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, Vol. 85, 1458 (6 pp.)
- Zhang, M., Xu, M., Hung, D. L. S., 2014: "Simultaneous two-phase flow measurement of spray mixing process by means of high-speed two-color PIV", Measurement Science and Technology, Vol. 25, No. 9, 095204 (9 pp.)
- Zhu, J., Kuti, O. A., Nishida, K., 2012: "An investigation of the effects of fuel injection pressure, ambient gas density and nozzle hole diameter on surrounding gas flow of a single Diesel spray by the laser-induced fluorescence-particle image velocimetry technique", International Journal of Engine Research, Vol. 14, No. 6, 630 (15 pp.)