

WEITERENTWICKLUNG EINER 2D DOPPELPULS LIF MESSTECHNIK MIT FLUORESCENCE MOTION ANALYSIS ZUR UNTERSUCHUNG VON MISCHUNGSPROZESSEN

FURTHER DEVELOPMENT OF A 2D DOUBLE-PULSE LIF TECHNIQUE WITH FLUORESCENCE MOTION ANALYSIS FOR MIXING INVESTIGATIONS

Scholz J.¹, Wiersbinski T.¹, Ruhnau P.², Kondermann D.³, Hain R.⁴, Beushausen V.¹

¹ Laser-Laboratorium Göttingen e.V., Abt. Photonische Sensorik

² Uni Mannheim, Computer Vision, Graphics and Pattern Recognition Group

³ Uni Heidelberg, Digital Image Processing Group

⁴ TU Braunschweig, Institut für Strömungsmechanik

LIF, FARLIF, FMA, GIV, Kraftstoff- Luft-Verhältnis, optischer Fluss, Bewegungsanalyse
Fuel/Air Ratio, Fluorescence Motion Analysis, Optical Flow, Mixture Formation

Zusammenfassung

Es wurde ein Konzept zur dynamischen Gemischbildungsuntersuchung entwickelt und validiert, dass ebenso auf viele andere Anwendungen der Laser-induzierten Fluoreszenz (LIF) übertragen werden kann. Fluoreszenz Doppelbilder werden aufgenommen, um Einblicke in die Dynamik der Gemischbildung zu erhalten, wobei mit Hilfe des FARLIF-Konzeptes (fuel/air ratio LIF) aus den LIF-Aufnahmen quantitative Kraftstoff/Luft –Gemischverteilungen gewonnen werden können. Für diese Doppelbilder werden zwei Auswertemöglichkeiten untersucht. Die erste ergibt die zweidimensionale Verteilung der zeitlichen Ableitung des Mischungsverhältnisses, wodurch deutlich wird, wo sich das Mischungsverhältnis wie stark verändert. Das zweite Auswertungskonzept benutzt „Methoden des optischen Flusses“, um die Bewegung von Fluoreszenzstrukturen (hier Mischungsstrukturen) zu verfolgen. Für diese „Fluorescence Motion Analysis“ (FMA) werden zwei Auswertungsmethoden vorgestellt – die „Gradienten basierte Methode“ und die „Kreuzkorrelations basierte Methode“. Zur Validierung beider Methoden werden synthetisch generierte LIF Doppelbilder mit bekanntem Verschiebungsfeld verwendet. Dabei beweisen beide Methoden ihre Einsatzfähigkeit wobei die „Gradienten basierte Methode“ bei stark verrauschten Ursprungsbildern bislang die zuverlässigeren Ergebnisse liefert. Schließlich wird die Einsatzfähigkeit der Doppelpuls LIF Technik in einem Transparentmotor demonstriert. Dabei ergibt sich ein neues Einsatzfeld für die FMA-Auswertung: Mit ihrer Hilfe kann die Ausbreitung des verbrannten Gemisches nach der Zündung und damit auch die Ausbreitung der Flammfront untersucht werden.

Alle untersuchten Konzepte und Auswertungsstrategien, die in diesem Beitrag vorgestellt werden, können auf eine Vielzahl anderer LIF-Anwendungen (in denen das LIF-Signal z.B. die Spezies-Konzentration, Temperatur oder Dichte repräsentiert) übertragen werden und ermöglichen damit Einblicke in einen weiten Bereich dynamischer Prozesse.

Einleitung

Die Kenntnis der räumlichen Verteilung von einzelnen Substanzen ist zur Verbesserung vieler technischer Prozesse notwendig, wie bei reagierenden Strömungen, Mischungsvorgän-

gen in chemischen Reaktoren oder der Gemischbildung in Verbrennungsmaschinen. Die planare Laserinduzierte Fluoreszenz (PLIF) ist hier eine etablierte Messmethode, die weite Verbreitung gefunden hat. So konnten wir in unseren neueren Arbeiten die Einsatzfähigkeit der FARLIF-Technik (fuel/air ratio measurement by laser-induced fluorescence) für die quantitative Detektion des Mischungsverhältnis von Kraftstoff und Luft für den Einsatz in Transparentmotoren validieren (Scholz et al. 2006a, Scholz et al. 2006b, Scholz et al. 2007). Jedoch spielt in vielen Anwendungen – wie der Gemischbildung – nicht nur die momentane Speziesverteilung sondern auch deren zeitliche Veränderung eine Schlüsselrolle beim Verständnis und der Verbesserung des Prozesses. Neuere Entwicklungen auf dem Laser- und Kameramarkt haben die Anwendung von 2D High-Speed LIF zur Untersuchung solcher Vorgänge ermöglicht (siehe z.B. Smith und Sick 2006), jedoch unterliegt diese Technik noch einigen Einschränkungen: Einerseits schrecken die hohen Anschaffungskosten eines solchen Messsystems aus Hochgeschwindigkeitskamera, Hochgeschwindigkeitsbildverstärker und Hochgeschwindigkeits-Laser ab, andererseits sind die Bildwiederholraten solcher Systeme auf einige wenige kHz beschränkt. Weiterhin sind diese Systeme durch die bei ausreichender Laserintensität erreichbare Wellenlänge eingeschränkt, so dass zur Zeit kommerziell nur Systeme mit Wellenlängen hinab bis 355nm erhältlich sind – die für LIF-Untersuchungen oft verwendete Anregungswellenlänge von 266nm stehen jedoch noch nicht zur Verfügung.

Aus diesem Grund verwenden wird in dieser Arbeit ein Doppelpuls- LIF System mit 266nm Anregungswellenlänge zur Detektion von Mischungsfeldveränderungen bei der Gemischbildung von Kraftstoff und Luft – zunächst zur Erprobung in einer Druckzelle, dann in einem Transparentmotor. Dieses System wurde aus einem konventionellen PIV System (zwei Nd:Yag Laser @532nm und eine Dual-Frame Kamera) aufgebaut, indem weitere Frequenzverdoppler und ein modularer Bildverstärker ergänzt wurden. Daher sollte ein solches System für viele Labore in der Strömungsmesstechnik, die bereits ein PIV-System besitzen, erschwinglich sein.

Ein LIF- Doppelbild an sich gibt schon einen Eindruck der dynamischen Vorgänge einer Mischungssituation wieder. In einigen Situationen ist allerdings eine quantitativere Analyse notwendig. Daher wurden zwei Auswertestrategien für LIF-Doppelbilder untersucht. Einerseits kann man aus dem Doppelbild die zweidimensionale zeitliche Ableitung des Mischungsverhältnissfeldes generieren. Eine weitere Möglichkeit der Analyse stellt die „Fluorescence Motion Analysis“ (FMA) dar, die von uns erstmalig bereits 2005 auf einer GALA Tagung vorgestellt wurde (Scholz et al. 2005) und mit deren Hilfe die Bewegung von Mischungsstrukturen verfolgt werden kann.

Diese FMA Auswertetechnik wurde nun mit Hilfe von synthetischen Bildpaaren weiterentwickelt und validiert. Dazu wurden synthetische Bildpaare von Mischungssituationen mit bekanntem Verschiebungsfeld bei unterschiedlichen Signal/Rausch-Verhältnissen generiert, die Auswertungsalgorithmen hieran optimiert und ihre Zuverlässigkeit erprobt.

Schließlich konnte die Doppelpuls LIF Technik an einem Transparentmotor erprobt werden.

Experimenteller Aufbau

Die experimentellen Aufbauten sind im Wesentlichen bereits in Scholz 2006 a und b detailliert dargestellt. Daher soll hier nur ein kurzer Überblick gegeben werden. Der Aufbau für Doppelpuls LIF-Aufnahmen wurde auf der Grundlage eines Standard-PIV Setups gebildet, um so vergleichsweise kostengünstig zeitaufgelöste LIF-Untersuchungen durchführen zu können. Hierzu wurden zwei frequenzverdoppelte Nd:Yag-Laser mit zusätzlichen Frequenzverdopplern und einer entsprechenden Strahlzusammenführung ausgerüstet, um so Doppelpulse bei einer Wellenlänge von 266nm zu erhalten. Das benötigte Lichtband wurde durch

eine Standard PIV- Lichtschnittoptik realisiert, die allerdings mit Quarzlinen ausgestattet wurde.

Um verschiedene Vermischungssituationen unter kontrollierten Bedingungen erzeugen zu können, wurde ein heizbares druckfestes Strömungsmodul mit einer Koaxialdüse verwendet. Der Gasfluss der einströmenden Gase und des Gasauslasses wurde mit Hilfe von Dosierventilen geregelt und die Gasbedingungen innerhalb des Strömungsmoduls mit Druckaufnehmern und Thermoelementen kontrolliert. Drei rechtwinklig zueinander angeordnete Quarzfenster ermöglichen es, das Anregungs-Lichtband durch die Messstrecke zu führen und die induzierte Fluoreszenz senkrecht dazu zu beobachten. Als Detektor diente eine PIV-typische Doppelbildkamera die zusätzlich mit einem modularen Bildverstärker ausgerüstet wurde. Die Laser- und Kamerasteuerung wurde durch einen Steuerrechner mit kommerzieller PIV-Software (Davis 6.2, LaVision) durchgeführt.

Dieses Doppelpuls LIF-System arbeitet bei 266nm Anregungswellenlänge mit bis zu 8 mJ/Puls Anregungsenergie bei Pulslängen von ca. 5ns, mit einem minimalen zeitlichen Abstand von $\Delta t = 0.8 \mu s$ zwischen den Aufnahmen eines Bildpaares (entsprechend 1.25MHz) und einer Repetitionsrate von 10Hz von Bildpaar zu Bildpaar. Einerseits sind 10Hz eine recht geringe Frequenz von Bildpaar zu Bildpaar, so dass jedes Bildpaar immer nur eine Momentaufnahme der Mischungsdynamik eines transienten Vorgangs widerspiegelt. Daher ist dieses Messkonzept auch am besten für zyklische oder „triggerbare“ Strömungssituationen geeignet, bei denen man die Gesamtsituation durch ein zeitliches Abrastern erfassen kann. Andererseits liefert diese relativ kostengünstige Messapparatur im Vergleich zu High-Speed LIF Apparaturen recht hohe Pulsenergien (und damit starke Fluoreszenzsignale) selbst bei der niedrigen Anregungswellenlänge von 266nm und deutlich kürzere Zeiten zwischen den zwei Bildern eines Bildpaares (entsprechend 1.25MHz wobei High-Speed LIF Apparaturen nur in den Bereich einiger kHz kommen). Daher sollte immer im Einzelfall anhand der gegebenen Messaufgabe und der verfügbaren (finanziellen) Mittel entschieden werden, welches Messsystem am besten geeignet ist.

Planare Doppelpuls FARLIF Messungen

In unseren früheren Arbeiten konnte gezeigt werden, dass das Fluoreszenzsignal von Toluol als Tracer in Isooktan, als auch die Eigenfluoreszenz eines speziellen realitätsnahen Mehrkomponentenkraftstoffs (Shell „Ottokraftstoff farblos“, OKF) unter bestimmten Umgebungsbedingungen (Druck, Temperatur und Mischungsverhältnis) direkt proportional zum Kraftstoff/Luft Verhältnis ist (Scholz et al. 2006 a und b und Scholz et al. 2007). Die Nutzung einer solchen Proportionalität zur Messung des Kraftstoff/Luft Verhältnisses (z.B. in Transparentmotoren) ist auch als FARLIF (Fuel/Air Ratio Laser-Induced Fluorescence) bekannt und wurde erstmals von Reoux et al. (1994) vorgestellt.

So ist die Anwendbarkeit dieses FARLIF-Konzeptes für „Ottokraftstoff farblos“ bei Kraftstoff/Luft-Mischungen über 2.5bar mit ausreichendem Luftanteil $\lambda \geq 0.4$ und Temperaturen zumindest bis 550K erfüllt (Scholz et al. 2007). Bei diesen Bedingungen können also planare LIF- Aufnahmen (bzw. Bildpaare) mit entsprechend vermessenden Kalibriergeraden in Kraftstoff/Luft-Verhältnis Karten (bzw. Äquivalenzverhältnis-Karten) überführt werden. In Abbildung 1 ist ein Beispiel eines solchen kalibrierten FARLIF-Bildpaares dargestellt. Die Grauwerte entsprechen dem lokalen Äquivalenzverhältnis, d.h. dem auf stöchiometrische Verhältnisse normierten Kraftstoff/Luft-Verhältnis. In dem Beispiel sieht man die Bewegung und Ausbreitung eines fetten Kraftstoff-Pulses in der umgebenden Luft bei einer Temperatur von 500K und einem Druck zwischen 5 und 6bar. Dieses Bildpaar entstand nach kurzem Öffnen des Kraftstoff Ventils während des erneuten Schließens (der Einlass ist unten in Abbildung 1, die Strömungsrichtung geht von unten nach oben).

30.4

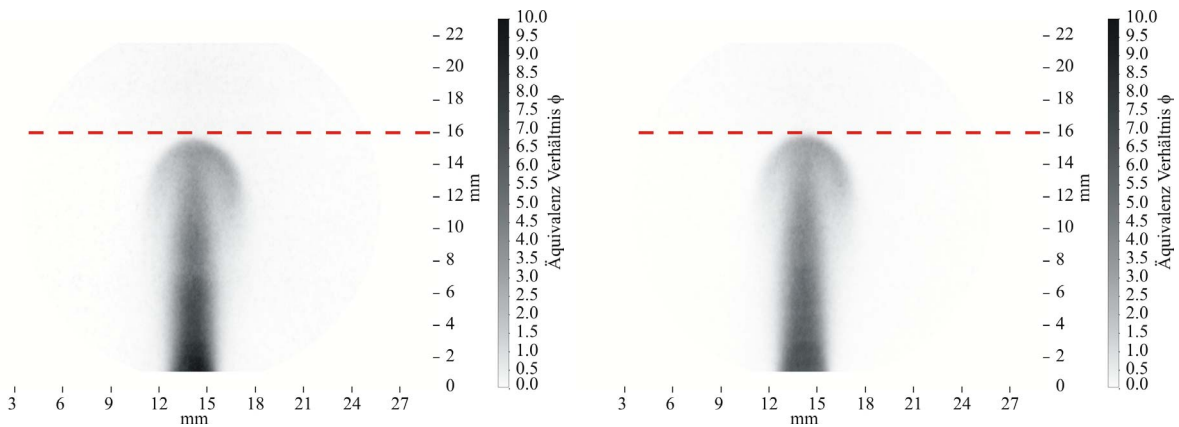


Abb. 1: Doppelpuls FARLIF Aufnahme, die die zeitliche Veränderung des Mischungsverhältnis zeigt

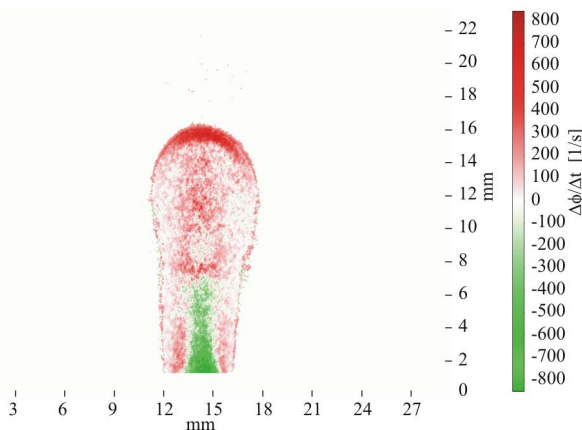


Abb. 2: Zeitliche Ableitung von Abb. 1. Rot markiert Zuwachs, grün Abnahme des Kraftstoffanteils

Der zeitliche Abstand beider Bilder beträgt $\Delta t = 2.5 \text{ ms}$. Der Vergleich beider Bilder zeigt die Bewegung des Puls-Kopfes von unten nach oben (vergleiche Abstand zur eingetragenen Hilfslinie), die Streckung der gesamten Struktur und das Verschmieren der Intensitätsgradienten aufgrund der Vermischung. Das heißt, schon die genaue Betrachtung des Doppelbildes gibt einen qualitativen Eindruck der Mischungsfeldynamik wieder.

Quantitativere Aussagen über die Dynamik lassen sich durch Bildung der zeitlichen Ableitung des Äquivalenzverhältnisses gewinnen.

Hierzu wird einfach pixelweise die Differenz beider kalibrierter Bilder gebildet und diese durch den Zeitversatz geteilt. Das Ergebnis ist ein zweidimensionales Ableitungsfeld. Abbildung 2 zeigt als Beispiel die entsprechende zeitliche Ableitung des Bildpaares aus Abbildung 1. Das Bild ist farbcodiert, wobei die Gebiete mit Zuwachs des Äquivalenzverhältnisses (und damit steigendem Kraftstoffanteil) rot und Gebiete mit Abnahme des Äquivalenzverhältnisses grün dargestellt sind. Das Spekle-artige Rauschen in Gebieten mit geringer zeitlicher Ableitung ist maßgeblich auf das Rauschen des bildverstärkten Kamerasystems bei sehr hoher Verstärkung zurückzuführen, und könnte durch räumliche Filterung verringert werden. Abbildung 2 zeigt wie zu erwarten den größten Zuwachs des Äquivalenzverhältnisses am oberen Kopf des Kraftstoff-Pulses. Hier bewegt sich die Kraftstoffwolke mit dem Gasfluss von unten nach oben und überstreicht Gebiete, in denen im ersten Bild das Äquivalenzverhältnis 0 war. Weiterhin zeigen die blass roten Gebiete die Verteilung und Mischung des Kraftstoffes von den fetten inneren Bereichen nach außen. Lediglich in den Gebieten mit sehr hohem Kraftstoffanteil im ersten Bild (mittig unten, direkt am Düsenaustritt) weisen eine negative Ableitung und damit eine Abnahme des Kraftstoff/Luft Verhältnisses auf, da sich das Kraftstoffventil zur Zeit der Aufnahme im Schließprozess befand und damit das Nachströmen des Kraftstoffes nachließ. Dieses Beispiel verdeutlicht, dass diese Methode mit FARLIF-Doppelbildern die zeitliche Ableitung des Mischungsverhältnisses zur detektieren einen quantitativen Einblick in die Dynamik des Mischungsfeldes bietet, wobei das Ergebnis zeigt *wo* sich das Mischungsverhältnis *wie* ändert. Natürlich lässt sich dieses Vorgehen auf eine Vielzahl anderer LIF Anwendungen übertragen, bei denen z.B. das LIF-Signal eine Konzentration oder eine Temperatur repräsentiert. Von daher bietet sich diesem Konzept ein weites Anwendungsfeld.

Fluorescence Motion Analysis (FMA)

Eine weitere Methode zur quantitativen Auswertung von Doppelpuls-LIF-Bildern ist die Bewegungsanalyse. Dieser Ansatz ist ähnlich zur "gaseous image velocimetry (GIV)" von Grünefeld et al. (Grünefeld et al. 2000a, Grünefeld et al. 2000b, Krüger 2001) oder auch der "correlation image velocimetry (CIV)" von Tokumaru und Dimotakis (1995). Im Gegensatz zu diesen Methoden wird jedoch in der vorliegenden Arbeit nicht versucht das Strömungsgeschwindigkeitsfeld zu messen, sondern die quantitative Bewegung der Fluoreszenzstrukturen analysiert. Deshalb vermeiden wir in diesem Zusammenhang den missverständlichen Begriff "velocimetry" und verwenden den präziseren Ausdruck "fluorescence motion analysis (FMA)", wenn es um die Auswertung von Doppelpuls-LIF-Bildern geht.

Darüberhinaus werden für FMA andere Auswertungsmethoden verwendet. In den Methoden von Grünefeld et al. und Tokumaru et al. wird ein stark nicht-konvexes Optimierungsproblem gelöst, das viele lokale Minima besitzen kann (Krüger 2001, Tokumaru und Dimotakis 1995). Um nicht ein solches lokales Optimum als Lösung zu erhalten, ist eine Startlösung unabdingbar, die nah am globalen Optimum liegt, wodurch die Lösung des Problems stark von der Initialisierung abhängt. In unseren Ansätzen verwenden wir zwei Techniken, um dieses Problem zu reduzieren: Einerseits zerlegen wir die ursprüngliche Formulierung in eine Sequenz jeweils konvexer Optimierungsprobleme; andererseits verwenden wir einen Multiskalenansatz, der in der Lage ist, irrelevante lokale Minima weitestgehend zu vermeiden.

Die hier verwendeten globalen Methoden zur Bewegungsschätzung, die sich mittels Variationsrechnung lösen lassen, wurden bereits in den frühen achtziger Jahren vorgeschlagen (Horn und Schunck 1981) und wurden seitdem konsequent weiterentwickelt (z.B. Barron et al 1994, Beauchemin und Barron 1995).

Die durch die Doppelpuls-FARLIF Technik visualisierten Bilddaten besitzen drei Charakteristika, die eine große Herausforderung für die Bewegungsanalyse darstellen:

- 1) Nur zwei aufeinander folgende Bilder sind sichtbar
- 2) Die Intensitäten zwischen beiden Bildern fluktuieren aufgrund Änderungen der Laser-Intensität
- 3) Die Bilder unterliegen einem durch Intensitätsmangel verursachtem, sehr starkem Rauschen

Globale Methoden sind dabei die ideale Wahl zur Bewegungsschätzung. Zwei Ansätze zur Behandlung der starken Intensitätsfluktuationen werden nun vorgestellt und angewandt. Ersterer führt einen linearen Quellterm zur Modellierung der Schwankungen ein, wohingegen letzterer auf der Kreuzkorrelation basiert, die unabhängig von linearen Helligkeitsänderungen ist. Beide Methoden liefern ein dichtes Flussfeld, da Flussvektoren mittels Regularisierung in Regionen mit fehlenden Informationen propagiert werden. Nichtsdestotrotz entfernen wir alle Flüsse in unsicheren Regionen anhand der Signalamplitude und der räumlichen Bildgradienten.

Globale, gradientenbasierte Methode mit linearem Quellterm

Sei $I(x_1, x_2, t)$ der an Position $(x_1, x_2)^T$ aufgenommene Grauwert zu Zeit t . Die Grundannahme der meisten Methoden ist die Konstanz des Grauwertes I über die Zeit:

$$I(x_1 + u_1 \Delta t, x_2 + u_2 \Delta t, t + \Delta t) = I(x_1, x_2, t) \quad (1)$$

Diese Annahme wird in unserer Anwendung durch Rauschen und Helligkeitsänderungen verletzt. Deshalb ersetzen wir (1) durch

$$I(x_1 + u_1 \Delta t, x_2 + u_2 \Delta t, t + \Delta t) = I(x_1, x_2, t) + b(x_1, x_2, t) \quad (2)$$

wobei $b(x_1, x_2, t)$ ein Skalarfeld darstellt, das die o.g. unerwünschten Effekte kompensiert. Wir haben diesen einfachen, additiven Term gewählt, da die Helligkeit sich aufgrund einer Viel-

30.6

zahl von kaum separierbaren Effekten (insbesondere Bewegungen senkrecht zur Bildebene, Eigenschaften des Laser-Lichtschnitts und Kamerarauschen) ändern kann.

Aus Sicht der Variationsrechnung und der Algorithmik ist die direkte Minimierung des stark nicht-konvexen Funktionals

$$\int_{\Omega} [I(x_1 + u_1(x_1, x_2)\Delta t, x_2 + u_2(x_1, x_2)\Delta t, t + \Delta t) - I(x_1, x_2, t) - b(x_1, x_2, t)]^2 dx \quad (3)$$

problematisch. Eine übliche Methode, um dieses Problem anzugehen ist (i) diesen Energieterm weiter zu vereinfachen bis das Problem mathematisch behandelbar wird und (ii) den Ansatz auf eine Multiskalen-Repräsentation des Bildes anzuwenden (siehe z.B. Ruhnau et al 2005). Ersteres führt, analog zu Horn und Schunck (1981) (zur Einfachheit ohne die Parameter (x_1, x_2, t)), auf:

$$\int_{\Omega} \left[\nabla I \cdot \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix} + \partial_t I - b \right]^2 dx \quad (4)$$

Räumliche und zeitliche Ableitungen können z.B. durch FIR-Filter geschätzt werden (z.B. Ruhnau et al 2005). Offensichtlich ist das aufgestellte Problem noch nicht gut gestellt, da jedes Vektorfeld mit Komponenten $\nabla I \cdot (u_1, u_2)^T - b = -\partial_t I$ Gleichung (4) minimiert.

Dieses so genannte Aperturproblem wird üblicherweise durch Regularisierung des Flussfeldes gelöst. Unregelmäßige Flüsse und starke Helligkeitsänderungen werden unterdrückt, indem die räumlichen Gradienten der Unbekannten u_1 , u_2 , und b minimiert werden:

$$J(u_1, u_2, b) = \int_{\Omega} \left\{ \left[\nabla I \cdot \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix} + \partial_t I - b \right]^2 + \lambda (|\nabla u_1|^2 + |\nabla u_2|^2) + \mu |\nabla b|^2 \right\} dx, \quad 0 < \lambda, \mu \in \mathbb{R} \quad (5)$$

wobei λ und μ Benutzerparameter darstellen. Wir diskretisieren (5) unter Verwendung von finiten Elementen erster Ordnung und berechnen u_1 , u_2 und b mit einem entsprechenden iterativen Löser (Hackbush 1993).

Globale Kreuzkorrelation

Ein weiterer Ansatz basiert auf der globalen Formulierung der Kreuzkorrelation, da diese ebenfalls unabhängig von linearen Helligkeitsänderungen ist. Seien I_1 und I_2 die Bilder zu den Zeiten t bzw. $(t+\Delta t)$ und sei $x := (x_1, x_2)$ und das Flussfeld $u(x) := (u_1(x), u_2(x))$. Die kontinuierliche Formulierung der negativen Kreuzkorrelation lautet dann:

$$E_{cc}(I(x), u(x)) = -\frac{\text{cov}^2(I_1(x), I_2(x + u(x)))}{\text{var}(I_1(x)) \cdot \text{var}(I_2(x + u(x)))} \quad (6)$$

Kovarianz und Varianz der Bildintensitäten in Abhängigkeit von $u(x)$ werden bezeichnet durch cov and var .

Wie bereits oben beschrieben, kann dieser Ansatz in einer globalen Methode zur Fluss-schätzung verwendet werden, indem Gleichung (4) durch (6) ersetzt wird. Ersetzt man die Regularisierer in Gleichung (5) durch den allgemeinen Term E_r , erhält man das Minimierungsproblem:

$$\int_{\Omega} \{ E_{cc}(I(x), u(x)) + \lambda E_r(I(x), u(x)) \} dx \quad (7)$$

wobei Ω wieder den zu untersuchenden Bildbereich und λ einen Benutzerparameter darstellt. Dieser Ansatz wurde von Hermosillo et al. (2002) vorgestellt und bisher u.a. im Bereich der medizinischen Registrierung angewandt. Aus den bereits oben genannten Gründen wurde hier der gleiche Glattheitsterm wie in (5) angewandt. Der Energieterm kann mit Hilfe der Va-

riationsrechnung in eine partielle Differentialgleichung umgewandelt werden. Die resultierenden Euler-Lagrange-Gleichungen lauten:

$$0 = \Delta u(x) - \frac{\text{cov}(I_1, I_2)}{\text{var}(I_2)} \left(\frac{I_1 - \langle I_1 \rangle}{\text{var}(I_1)} \right) - E_{cc} \cdot \left(\frac{I_2 - \langle I_2 \rangle}{\text{var}(I_2)} \right) \quad (8)$$

wobei Δ den Laplace-Operator und $\langle \cdot \rangle$ den Mittelwert bezeichnet. Die Differentialgleichung wurde mit finiten Differenzen diskretisiert und durch Simulation gelöst. Aus oben bereits genannten Gründen wurde auch hier ein Multiskalen-Ansatz implementiert.

Anwendungsbeispiel für FMA

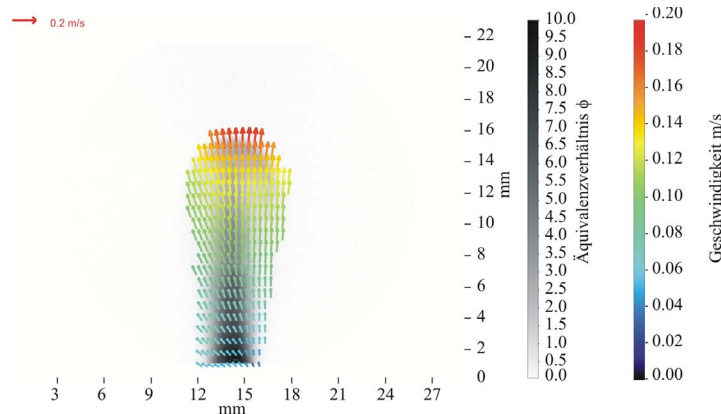


Abb. 3: Fluorescence Motion Analysis (FMA) aus Abb. 1

Abbildung 3 zeigt ein Anwendungsbeispiel der gradientenbasierten FMA Auswertungsmethode. Hier ist das Bewegungsfeld des Bildpaares aus Abbildung 1 wiedergegeben. Auf den ersten Blick wird eine natürliche Eigenschaft dieser Methode deutlich: Nur dort wo deutliche Intensitätsstrukturen vorliegen und diese sich auch verändern, können Verschiebungen detektiert werden. Abbildung 3 gibt wie erwartet die schnellere Bewegung des Puls-

Kopfes und die langsamere Bewegung der nachfolgenden sich ausbreitenden Wolke wieder. Dabei wird auch der Vorteil dieser Auswertemethode, die unsichere Vektoren in Gebieten mit zu schwachen Intensitäten unterdrückt, deutlich. Dieses Beispiel demonstriert die Fähigkeit der FMA-Strategie, Bewegungen von Mischungsstrukturen quantitativ wiederzugeben.

Validierung der FMA

Um quantitative Aussagen über die Genauigkeit der Bewegungsanalyse treffen zu können, muss die exakte Verschiebung bekannt sein. Da dies experimentell nur schwer zu erreichen ist, werden Simulationen verwendet, die den Aufnahmevorgang sowie die Verschiebung der Struktur nachahmen. Auf diese Weise lassen sich beliebige Muster und Verschiebungen realisieren. Um synthetische Aufnahmen zu erzeugen, die möglichst realitätsnah sind, werden für die Erzeugung die folgenden Schritte durchgeführt:

1. Eine echte LIF-Aufnahme (Abb. 4 links) wird genutzt, um eine Maske an den Stellen zu definieren, die fluoreszierende Strukturen enthalten (Abb. 4 Mitte).
2. In den Bereichen, die durch die Maske definiert sind, werden synthetische Partikelbilder mit Gauß'scher Intensitätsverteilung auf einem äquidistantem Netz platziert (ein Partikel pro 0,5px, siehe Abb. 5). Der Partikelbilddurchmesser d_p wird nach der folgenden Gleichung berechnet, wobei sich der Grauwert G an der Position eines Partikels durch bilineare Interpolation aus den umgebenden Pixelgrauwerten ergibt.

$$d_p = \text{const.} \cdot \sqrt{G} \quad (9)$$

3. Das synthetische Bild mit Struktur wird berechnet ($\text{Image}_{1, \text{struc}}$). Dies wird mit einer in-house Software (Institut für Strömungsmechanik, TU Braunschweig) durchgeführt, die mittels des "EUROPIV Synthetic Image Generator" (Stanislas et al. 2004) validiert



Abb. 4 Synthetische Bild-Generierung: Original Bild (links), Maske für die LIF Struktur (mitte) und synthetisches Bild mit Hintergrund-Wichtung von 40% (rechts)

wurde. Die Partikelbild-Grauwertverteilung wird als Gaußförmig angenommen. Pixel-Grauwerte werden addiert, wenn ein Pixel durch mehrere Partikelbilder beleuchtet wird.

4. Die Partikelbilder werden durch eine vorgegebene Gleichung verschoben. Danach wird Bild 2 mit Struktur erzeugt (Image_{2, struc}).
5. Die bis hier erzeugten künstlichen Bilder enthalten nur die nachgeahmte, bewegte LIF Struktur. Um den Hintergrund zu füllen, wurden zuvor zwei Bilder im Experiment aufgenommen, die nur verrauschten Hintergrund und keine LIF Struktur enthalten (Image_{1, back} und Image_{2, back}). Für die Zusammenführung der Bilder Image_{1, struc} und Image_{1, back} zu Bild Image₁ werden die Pixelgrauwerte an den durch die Maske definierten Stellen durch die nachfolgende Gleichung miteinander verrechnet:

$$\text{Image}_1(x, y) = W \cdot \text{Image}_{1, \text{back}}(x, y) + (1.0 - W) \cdot \text{Image}_{1, \text{struc}}(x, y) \quad (10)$$

W stellt dabei den Hintergrund-Wichtungsfaktor (und damit den Rauschanteil) dar. An den Stellen ohne Maske werden die Grauwerte von Image_{1, back} gesetzt. Um einen kontinuierlichen Übergang zwischen Hintergrund und Struktur zu erzielen, wird der Wichtungsfaktor W bei den äußeren 5 Pixeln der als LIF Struktur definierten Bereiche linear zwischen 1 und dem vorgegebenen Wichtungsfaktor skaliert. Ein Ergebnis mit einer Hintergrundwichtung von 40% ist in Abb. 4 (rechts) gegeben. Image₂ wird auf dem gleichen Wege erzeugt.

Diese synthetischen Bildpaare können nun zur Validierung und Überprüfung der Genauigkeit der FMA-Auswertung benutzt werden. In Abbildung 6 wird ein Original-Verschiebungsfeld mit dem Ergebnis der auf Kreuzkorrelation basierenden FMA-Auswertung verglichen. In beiden Fällen ist im Hintergrund des Vektorfeldes das erste Bild des synthetischen Bildpaares dargestellt. Der Vergleich beider Verschiebungsfelder zeigt in den meisten Regionen eine sehr gute Übereinstimmung. Hier liegt die relative Abweichung unter 10%. Lediglich in den oberen Regionen mit sehr schwachen Strukturintensitäten weicht die Auswertung vom Originalfeld deutlicher ab. Über alle Gebiete gemittelt liegt die relative Abweichung vom Originalfeld bei 15%.

Noch besser stellt sich die Situation bei der Gradienten basierten Auswertungsmethode dar. In Abbildung 7 ist farbkodiert die Relativabweichung von FMA-Ergebnis zu Original für verschiedene „Rauschanteile“ (Hintergrund-Wichtungsfaktoren W in Gleichung 10) dargestellt. Ohne Rauschanteil ($W=0$) liegt die Abweichung in den meisten Gebieten weit unter 3%. Nur an den extrem schwachen Strukturen wie der Insel oben rechts werden 15% erreicht, wobei der Mittelwert der Gesamtstruktur bei 2.4% liegt. Bei 15% zusätzlichem Rauschen (Abb. 6(b), $W=0.15$) steigt die Abweichung vom Originalfeld, liegt aber im Mittel immer noch bei 3.1%. Selbst bei starkem zusätzlichem Rauschen (Abb. 6 (c), $W=0.4$) bleibt die Abweichung im Be-

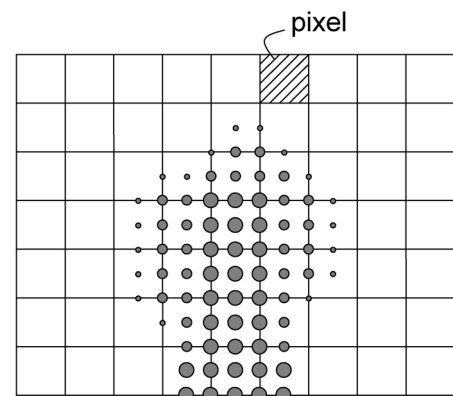


Abb. 5 Partikelbildverteilung

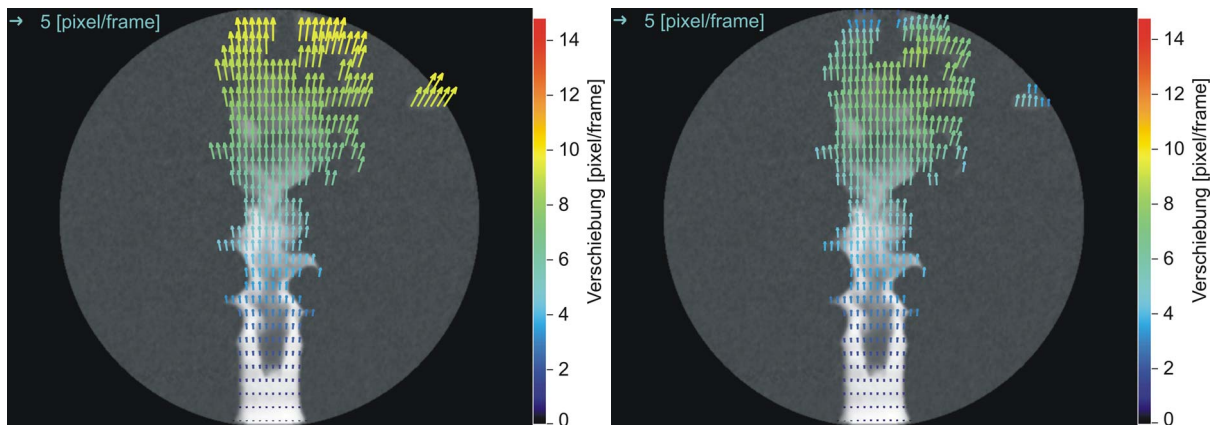
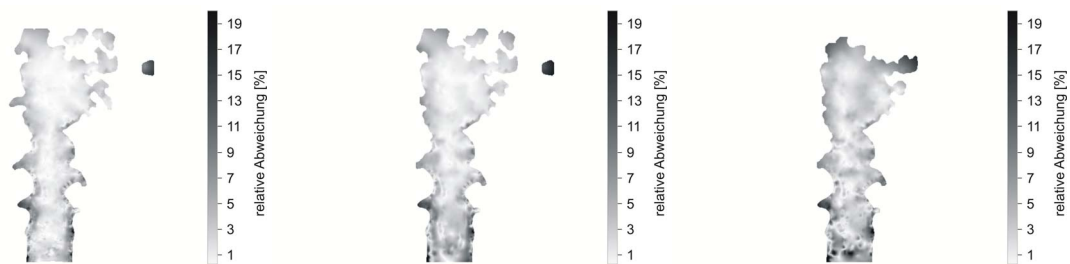


Abb. 6 Validierung der FMA Auswertung. Links original Verschiebungsfeld, rechts FMA Ergebnis



(a) ohne Rauschen

(b) 15% Rauschen

(c) 40% Rauschen

Abb. 7 Relative Abweichung einer FMA-Auswertung vom Originalfeld bei verschiedenem Rauschen

reich von 5% (Mittelwert 4.0%) bei maximalen Abweichungen von 20%. Hier kommt der Vorteil dieser Methode zum Vorschein, dass Gebiete mit unsicheren Auswerteergebnis durch die Methode selbst erkannt und ausgegrenzt werden. Daher ist das Berechnungsgebiet in Abb. 6 (c) auch deutlich kleiner. Diese Ergebnisse zeigen, dass die vorgestellten FMA Auswertemethoden verlässliche Ergebnisse liefern, wobei zum derzeitigen Entwicklungsstand die „Gradienten basierte Methode“ die genaueren Berechnungen liefert. Da jedoch bei beiden Methoden entsprechendes Potential gesehen wird, soll an der Weiterentwicklung und ggf. der Kombination beider Methoden festgehalten werden.

Erster Einsatz im Motor

Die beschriebene und validierte Bewegungsanalyse konnte bereits in einem Transparentmotor eingesetzt werden. Diese Untersuchungen sind Gegenstand der aktuellen Arbeiten und zeigen prinzipiell die Einsatzfähigkeit der Doppelpuls FARLIF-Methode in technischen Strömungen.

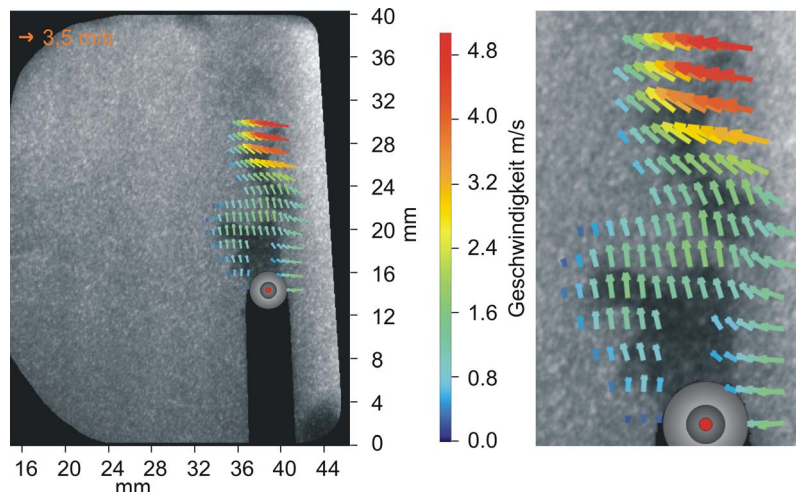


Abb. 8 FMA im Transparentmotor: Ausbreitung der Verbrennung

Als eine weitere Einsatzmöglichkeit der FMA-Auswertung hat sich dabei die Beobachtung der sich ausbreitenden Gebiete mit verbranntem Gemisch nach der Zündung herausgestellt. So zeigt Abbildung 8 einen Lichtschnitt in der Ebene der Zündkerze bei homogener Gemischverteilung 1.9 ms nach der Zündung. In diesem ersten Bild des Bildpaares ist der

Schattenwurf (von oben nach unten) durch die Zündkerze (hier ausmaskiert) erkennbar. Die dunklen Bereiche über der Zündkerze stellen das bereits verbrannte Gemisch dar. Das eingetragene Vektorfeld entstammt einer FMA-Auswertung und verdeutlicht, dass mit dieser Methode auch Einblicke in die Entwicklung der Verbrennung, in die Flammausbreitung gewonnen werden können. So könnten auf diese Weise ggf. Flammfrontgeschwindigkeiten vermessen werden. Diese zusätzliche, viel versprechende Anwendungsmöglichkeit der FMA wird in den aktuellen Arbeiten weiter verfolgt und verdeutlicht umso mehr die Vielseitigkeit der vorgestellten Methodik.

Dankesworte

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG für die Unterstützung der Projekte die im Rahmen des Schwerpunkt Programms SPP 1147 gefördert wurden. Dieses Schwerpunkt Programm machte erst die hier dokumentierte Kooperation möglich.

Literatur

- Barron J., Fleet D. and Beauchemin S., 1994: Performance of optical flow techniques. *International Journal of Computer Vision*, 39:43-77
- Beauchemin S. S. and Barron J. L., 1995: The computation of optical flow. *ACM Comput. Surv.*, 27(3):433-466
- Grünefeld G., Bartelheimer J., Finke H., Krüger S., 2000a: Gas-phase velocity field measurements in sprays without particle seeding. *Experiments in Fluids* 29, p. 238-246
- Grünefeld G., Finke H., Bartelheimer J., Krüger S., 2000b: Probing the velocity fields of gas and liquid phase simultaneously in a two phase flow. *Experiments in Fluids* 29, p. 322-330
- Hackbusch W., 1993: *Iterative Solution of Large Sparse Systems of Equations*, volume 95 of *Applied Mathematical Sciences*. Springer
- Hermosillo G., Ched'hotel C. and Faugeras O., 2002: *Variational methods for multimodal image matching*. *International Journal of Computer Vision*, 50(3): p. 329-343.
- Horn B. and Schunck B., 1981: Determining optical flow. *Artificial Intelligence*, 17:185-203
- Krüger S., 2001: *Laser Diagnostics in Two Phase Flows*. PhD thesis, Faculty of Physics, University of Bielefeld, Germany
- Reboux J., Puechberty D., Dionnet F., 1994: "A new approach of PLIF applied to fuel/air ratio measurement in the compression stroke of an optical SI engine," SAE technical paper series No. 941988
- Ruhnau P., Kohlberger T., Nobach H., Schnörr C., 2005: Variational optical flow estimation for particle image velocimetry. *Exp. in Fluids*, 38:21-32
- Ruhnau P., Stahl A., Schnörr C., 2007: On-line variational estimation of dynamical fluid flows with physics-based spatio-temporal regularization. *Meas. Sci. Technol.*, 18(3): 755-763
- Scholz J., Röhl M., Beushausen V., 2005: Mischungsfeldanalyse mit Fuel-Air-Ratio-LIF. *Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik*, 13. Fachtagung der Deutschen Gesellschaft für Laser-Anemometrie GALA e.V., Cottbus, 6.-8.Sept. 2005
- Scholz J., Röhl M., Wiersbinski T., Beushausen V., 2006a: Verification and Application of Fuel-Air-Ratio-LIF, 13th Int. Symp. on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, Portugal, 26-29 June, 2006
- Scholz J., Wiersbinski T., Beushausen V., 2006b: Planare Fuel-Air-Ratio-LIF und PIV zur Gemischbildungsanalyse von Realkraftstoff, *Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik*, 14. Fachtagung der Deutschen Gesellschaft für Laser-Anemometrie GALA e.V., Braunschweig, 5.-7. Sept. 2006
- Scholz J., Wiersbinski T., Beushausen V., 2007: Planar Fuel-Air-Ratio-LIF with Gasoline for dynamic mixture-formation investigations, SAE Paper 2007-01-0645
- Smith J. D. and Sick V., 2006: A multi-variable, high-speed imaging study of ignition instabilities in a spray-guided, direct-injected, spark-ignition engine. SAE Paper 2006-01-1264
- Stanislas M., Westerweel J., Kompenhans J., 2004: The EUROPIV Synthetic Image Generator (S.I.G.). In: *Particle Image Velocimetry: Recent Improvements*. Springer, Berlin Heidelberg, Germany
- Tokumaru P.T., Dimotakis P.E., 1995: Image correlation velocimetry. *Exp. in Fluids* 19: 1-15