

MISCHUNGSFELDANALYSE MIT FUEL-AIR-RATIO-LIF

Jochen Scholz, Markus Röhl, Volker Beushausen

Laser-Laboratorium Göttingen e.V., Hans-Adolf-Krebs-Weg 1, 37077 Göttingen

Zusammenfassung

Diese Untersuchungen dienen der Entwicklung eines bildgebenden Messverfahrens zur Detektion des Mischungsverhältnisses von Kraftstoff und Luft bei Mischprozessen in Verbrennungsmaschinen. Als Modellkraftstoff wird Toluol in Isooktan eingesetzt. Das Verfahren nutzt die fluoreszenzlöschende Eigenschaft von Sauerstoff auf die Toluolfluoreszenz, so dass bei ausreichendem Druck und Sauerstoffanteil die Fluoreszenzintensität ein direktes Maß für das Mischungsverhältnis wird. Es konnte gezeigt werden, dass dieses Fuel-Air-Ratio-LIF Prinzip bei 266 nm Anregung in einem weiten Bereich bei λ -Werten schon ab $\lambda = 0.2$ und Drücken ab 1.5 bar bei Temperaturen zumindest bis 150°C anwendbar ist. Beruhend auf diesem FARLIF-Prinzip konnten flächige Mischungsverhältnissfelder im Nachlauf einer Koaxialdüse vermessen werden. Durch Entwicklung und Einsatz einer Doppelbild-LIF-Technik erschließt sich dem Messverfahren darüber hinaus auch die Dynamik der Mischungsprozesse. Erste Ergebnisse verschiedener Dynamikauswertungsmethoden beruhend auf PIV-Algorithmen und der Methode des optischen Flusses werden vorgestellt.

Einleitung

In vielen Bereichen der Technik spielen Mischungsprozesse verschiedenster Fluide eine wichtige Rolle. Das Mischen flüssiger Substanzen wird in großem Umfang in der chemischen und pharmazeutischen Industrie durchgeführt, um gezielt den Ablauf chemischer Reaktionen herbeizuführen und eine große Vielfalt verschiedenster Chemikalien zu produzieren. Doch auch die definierte Mischung gasförmiger Substanzen besitzt einen wesentlichen Stellenwert in der technischen Anwendung. Insbesondere die Generierung brennbarer Kohlenwasserstoffgemische im Bereich der Energieerzeugung, wie z.B. Kraftstoff/Luft-Gemische in der motorischen Verbrennung, Turbinen, Kraftwerken oder Haushaltsbrennern, stellt einen Eckpfeiler heutiger Technik dar. Vor dem Hintergrund knapper werdender Ressourcen, dramatisch steigender Umweltprobleme und einer daraus resultierenden sich stetig verschärfenden Umweltgesetzgebung ist eine effiziente Ausnutzung der vorhandenen fossilen Energieträger und die Reduktion des Schadstoffausstoßes von Energieerzeugungsanlagen unabdingbar. Diese strengen umwelt- und wirtschaftspolitischen Randbedingungen führten in den letzten Jahren zur Entwicklung immer komplexerer Brennverfahren. Derzeit ist dabei ein Zustand erreicht, an dem eine rein empirische Optimierung aufgrund der Komplexität der technischen Strömungssysteme nicht mehr konvergiert, so dass heute eine Optimierung der Anlagen ohne den Einsatz berührungsloser Messverfahren nicht mehr möglich ist. Für die technische Weiterentwicklung derartiger Anlagen ist die genaue Kenntnis über das dynamische Verhalten der sich mischenden Gase vor der Zündung, also den Gemischbildungsprozess, von herausragender Bedeutung.

Vor diesem Hintergrund wird im Laser-Laboratorium Göttingen derzeit ein Messverfahren entwickelt, mit dem das Mischungsverhältnis von Kraftstoff und Luft quantitativ und bildge-

bend während des Mischungsprozesses bestimmt werden kann. Es wird zunächst als Modellkraftstoff Isooktan verwendet, dem auch in realen Kraftstoffen vorkommendes Toluol im Prozentbereich als Fluoreszenztracer zugemischt wird. Zur Detektion von Mischungsverhältnissfeldern wird mit einem typischen Laser-Lichtschnittaufbau die laserinduzierte Fluoreszenz (LIF) des aromatischen Kohlenwasserstoffs flächig erfasst. Hierbei wird der Effekt ausgenutzt, dass aufgrund der stark fluoreszenzlöschenden Eigenschaft des Sauerstoffs (Quenching) mit steigendem Druck und ausreichender Sauerstoffkonzentration das LIF-Signal druckunabhängig und ein direktes Maß für das Mischungsverhältnis von Kraftstoff und Luft wird.

Dieses „fuel-air-ratio-LIF“ (FARLIF) Prinzip wurde schon 1994 von Reboux et al. vorgeschlagen und seine Einsatzfähigkeit bei Raumtemperatur nachgewiesen (Reboux et al. 1994). Etliche Arbeitsgruppen haben in der Folgezeit dieses Messprinzip auch bei höheren Temperaturen eingesetzt ohne allerdings die Anwendbarkeit bei diesen Temperaturen zu überprüfen. Koban et al. 2005 (a+b) und Schulz et al. 2005 weisen jedoch nach neuesten Untersuchungen daraufhin, dass die Einsatzfähigkeit dieses Prinzips bei höheren Temperaturen fragwürdig werde und schließlich versage. Allerdings wurden diese Untersuchungen bei einem Gesamtdruck von nur 1 bar durchgeführt und aus den gemessenen Sauerstoffquenchraten auf die Anwendbarkeit des FARLIF-Konzeptes geschlossen (Koban et al. 2005), eine direkte Überprüfung des FARLIF-Prinzips fand nicht statt.

Im Rahmen der hier vorgestellten Arbeiten soll nun die Quantifizierbarkeit des FARLIF-Prinzips mit Toluol als Tracer in Isooktan in einem weiten Mischungsverhältnisbereich erstmals direkt bei Temperaturen bis 150°C und Drücken bis 10 bar experimentell überprüft und seine Einsatzfähigkeit nachgewiesen werden. Hierzu wird neben der integralen Fluoreszenzintensität auch die Messung der Fluoreszenzlebensdauer in die Untersuchungen mit einbezogen, um zwischen Fluoreszenzlöschung durch Sauerstoffstöße und eventuellen verfälschenden Absorptionseffekten unterscheiden zu können.

Neben diesen grundlegenden Untersuchungen wird die 2D-ortsauflösende Detektion von Mischungsverhältnissfeldern vorangetrieben. Ziel sind neben quantifizierbaren flächigen Momentaufnahmen von Mischungsfeldern auch – ähnlich der PIV-Technik – Doppelbilder des Mischungsfelds mit kurzem Zeitversatz durch Einsatz eines Doppelpulslasers und einer bildverstärkten Doppelbildkamera. Mit Hilfe dieser Doppelbilder ist die Verfolgung der zeitlichen Mischungsdynamik möglich. Zur Auswertung dieser Doppelbilder, die anders als PIV-Bilder kontinuierliche Intensitätsverteilungen (mit flachen Grauwertgradienten) darstellen, werden neben Kreuzkorrelationsmethoden auch Auswertungen mit der Methode des optischen Flusses erprobt.

Das FARLIF-Prinzip

Reboux et al. 1994 haben ein Messkonzept zur Bestimmung des Mischungsverhältnisses von Kraftstoff und Luft mittels Laserinduzierter Fluoreszenz vorgeschlagen, das im Folgenden als FARLIF-Prinzip (fuel-air-ratio-laser-induced-fluorescence) bezeichnet wird und hier erläutert werden soll. Für das Fluoreszenzsignal I_f gilt im Bereich linearer LIF (schwache Anregung) die Proportionalität

$$I_f \propto E_{\text{Las}} \sigma_{\text{abs}} n_t q_f \quad 1$$

mit der eingestrahlten Laserenergie E_{Las} , dem Absorptionskoeffizienten σ_{abs} , der Teilchenanzahldichte der Fluoreszenz-Tracersubstanz n_t und der Fluoreszenzquantenausbeute q_f , die sich nach

$$q_f = k_{\text{rad}} / (k_f + k_q n_q) \quad 2$$

aus dem Ratenkoeffizient für spontane Emission k_{rad} , dem Ratenkoeffizienten für alle intramolekularen Deaktivierungen k_f und der Anzahldichte des Stoßpartners n_q und entsprechendem Quenchkoeffizienten k_q zusammensetzt.

Der wesentliche Teil des FARLIF-Prinips besteht nun darin, dass Sauerstoffquenchen der weit überwiegende Deaktivierungsmechanismus für den angeregten Zustand ist. Aus Gl. 1 und 2 folgt für Sauerstoff als maßgeblichen Stoßpartner

$$I_f \propto \sigma_{abs} \frac{k_{rad} n_t}{k_f + k_{qO_2} n_{O_2}} \quad . \quad 3$$

Bei starkem Sauerstoffquenchen, also $k_f \ll k_{qO_2} \cdot n_{O_2}$ kann man k_f vernachlässigen und es gilt

$$I_f \propto \sigma_{abs} \frac{k_{rad} n_t}{k_{qO_2} n_{O_2}} \quad . \quad 4$$

Das heißt für feste Mischungsverhältnisse von Tracer und Luft wird die Fluoreszenzintensität mit steigendem Druck und damit steigendem $(k_{qO_2} n_{O_2})$ druckunabhängig und der erreichte Plateauwert proportional zum Mischungsverhältnis n_t/n_{O_2} . Dieses Mischungsverhältnis ist wiederum proportional zu $1/\lambda$, wobei der λ -Wert das stöchiometrische Luft-Kraftstoff-Verhältnis (die Luftzahl) darstellt (für stöchiometrische Gemische gilt $\lambda=1$, zündfähige Gemische liegen im Bereich $0.5 < \lambda < 1.4$). Das FARLIF-Signal wird also druckunabhängig und invers proportional zum λ -Wert.

Experimentelles

Um eine quantitative Mischungsanalyse bei späteren Strömungsuntersuchungen zu ermöglichen ist zunächst eine grundlegende Untersuchung des Fluoreszenzverhaltens von Kohlenwasserstoff/Luft-Gemischen bei unterschiedlichen definierten Temperaturen und Drücken notwendig. Als Versuchsapparatur diente eine druckfeste heizbare Versuchszelle, in der Temperaturen von Raumtemperatur bis 160°C und Drücke von 1 mbar bis 10 bar eingestellt werden konnten. Als Testgas wurden Toluol, 5% bzw. 10% Toluol in Isooktan und deren

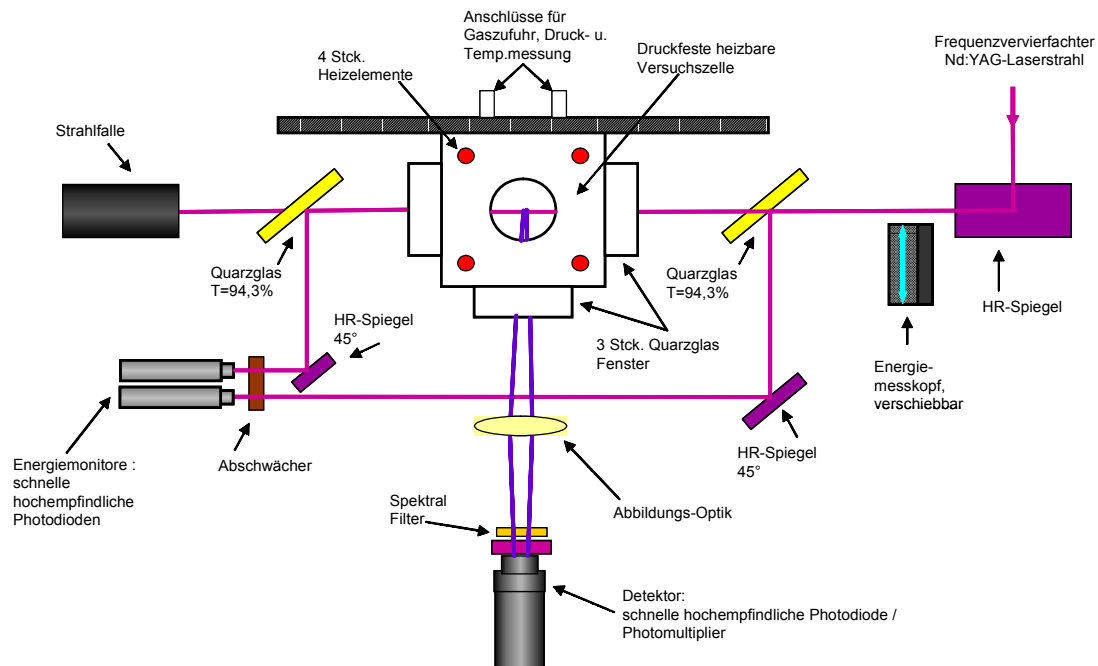


Abb. 1: Optischer Aufbau für grundlegende Untersuchungen

Gemische mit Stickstoff, Sauerstoff oder synthetischer Luft (20% O₂ , 80% N₂) verwendet. Die Testgase wurden in einem druckfesten heizbaren Vorratsbehälter mit ca. 3.5 l Volumen homogen vorgemischt.

Der optische Aufbau ist in Abbildung 1 skizziert. Der frequenzvervierfachte Laserstrahl eines Nd:YAG Lasers ($\lambda=266$ nm) wird durch die Quarzfenster der Druckzelle geführt und endet in einer Strahlfalle. Vor und nach der Versuchszelle werden jeweils ca. 6% der Laserstrahlung ausgekoppelt und mit Hilfe von Umlenkspiegeln auf schnelle Photodioden als Energiemonitor geleitet. Ein Abschwächer sorgt dafür, dass die Intensität auf den Photodioden in deren Linearitätsbereich bleibt. Durch diese Energiemessung vor und nach der Versuchszelle kann einerseits die eingestrahelte Laserenergie simultan als Referenz mitgemessen und somit Fluoreszenzsignale bezüglich Puls-zu-Puls-Schwankungen der Laserenergie korrigiert werden. Andererseits kann aus dem Verhältnis von eingestrahelter zu transmittierter Laserenergie die Absorption in der Zelle gemessen und damit die Toluolkonzentration des Testgases überprüft werden. Gegebenenfalls können die Fluoreszenzsignale bezüglich der Anregungsabschwächung aufgrund der Absorption korrigiert werden. Ein geeichter Energiemesskopf kann zur Ermittlung von Absolutintensitäten in den Strahlengang vor der Zelle geschoben werden, was auch eine Kalibrierung der Energiemonitore ermöglicht.

Die in der Zelle durch die Lasereinstrahlung angeregte Fluoreszenz des Testgases wird senkrecht zum Anregungsstrahl mit Hilfe einer Abbildungsoptik und eines schnellen Detektors (schnelle hochempfindliche Photodiode oder Photomultiplier) mit einem digitalen Speicheroszilloskop zeitaufgelöst aufgezeichnet und der weiteren Auswertung zugeführt. Vor dem Detektor befindet sich eine Filterkombination, die die Anregungswellenlänge blockt, so dass mögliche Laserreflexionen und Streuungen unterdrückt werden und nur das Fluoreszenzlicht (breitbandig) detektiert wird. Die Abbildungsoptik ist so justiert, dass nur der zentrale Bereich in Zellenmitte auf dem Detektor abgebildet wird (ein Bereich von ca. 3-5mm Kantenlänge).

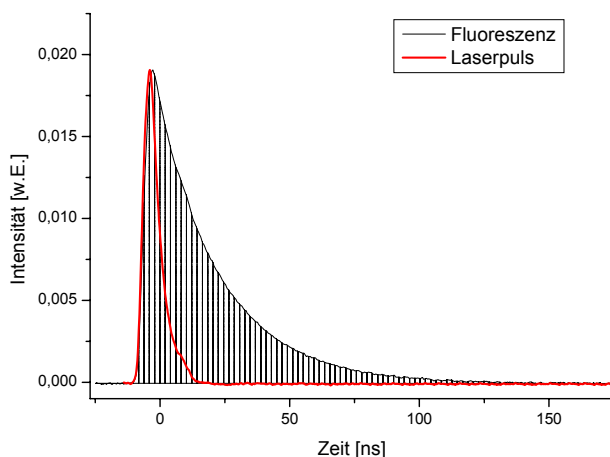


Abb. 2: Typisches detektiertes Fluoreszenzsignal

Das zu untersuchende Gasgemisch wird im Vorratsbehälter angemischt und mit dem gewünschten Druck bei der gewählten Versuchstemperatur in die Zelle gegeben. Abbildung 2 zeigt ein typisches detektiertes Fluoreszenzsignal von 50 mbar Toluol bei 125°C. In das Bild rot mit eingefügt ist die Pulsform des Anregungslasers. Deutlich ist die lange Fluoreszenzlebensdauer noch nach abgeklungenem Laserpuls zu erkennen. Die schraffierte Fläche unter der Kurve ist die integrierte Fluoreszenz und stellt in den weiteren Betrachtungen die Fluoreszenzintensität I_f dar. Aus dem monoexponentiellen Abklingverhalten nach dem Laseranregungspuls

kann mittels monoexponentiellem Fit die Fluoreszenzlebensdauer bestimmt werden. Hier liegt der entscheidende Vorteil, warum diese grundlegenden Untersuchungen mit einem zeitauflösenden Detektor statt eines zeitlich integrierenden durchgeführt werden: Zusätzlich zu den integralen Intensitäten liefern die Messungen die Fluoreszenzlebensdauer, die zusätzlich intensitätsunabhängig Aufschluss über die Fluoreszenzlöschung gibt. Diese Information dient dann zur Überprüfung und Ergänzung der Schlussfolgerungen aus den reinen Intensitätsauswertungen.

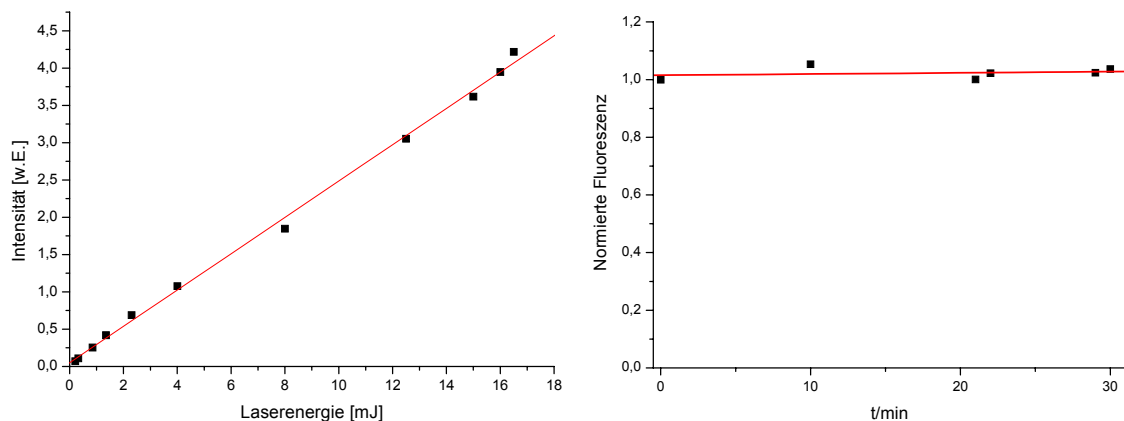


Abb. 3: Überprüfung linearer Laserinduzierter Fluoreszenz (l.) und photochemischer Stabilität (r.)

Überprüfung der Anwendbarkeit von FARLIF

Bevor die eigentliche Überprüfung des Anwendbarkeitsbereichs für das vorgeschlagene Messprinzip begonnen werden konnte, mussten einige grundlegende Fragen der Fluoreszenzeigenschaften geklärt werden. Das FARLIF-Prinzip setzt lineare Fluoreszenz voraus, das heißt, dass das Fluoreszenzsignal linear mit der eingestrahlten Laserenergie steigen muss und sich insbesondere keine Sättigungserscheinungen (ein Abflachen der Intensitätskurve) zeigen darf.

Abbildung 3 zeigt diesen experimentell überprüften linearen Zusammenhang zwischen Fluoreszenzintensität und eingestrahlter Laserenergie weit über den für spätere Messungen relevanten Energiebereich von 0.1 bis 4mJ/Laserpuls hinaus. Daher kann das Vorliegen von linearer LIF von Toluol bestätigt werden.

Weiterhin ist für die praktische Anwendbarkeit in statischen Untersuchungen die photochemische Stabilität wichtig. Hierzu wurde eine Mischung aus 12.5 mbar Toluol, 50 mbar synthetischer Luft und ca 940 mbar Stickstoff in die Druckzelle gefüllt und 30 Minuten lang bei einer Laserfrequenz von 10 Hz mit 0.3 mJ/Puls Laserenergie bestrahlt. Die Versuchstemperatur lag mit 125°C auch im oberen Temperaturbereich der Versuchsanordnung, so dass gleichzeitig die thermische Stabilität mit überprüft wurde. Zu verschiedenen Zeiten in der Versuchszeitspanne wurde die Fluoreszenzintensität vermessen, die auf den Startwert normiert in Abbildung 3 aufgetragen ist. Deutlich ist die Stabilität von Toluol zu beobachten,

Ein weiterer wesentlicher Punkt für die Anwendbarkeit des FARLIF-Prinzips ist die Forderung, dass Sauerstoff hauptverantwortlich für die Fluoreszenzlöschung – also der Hauptquencher – ist. Für steigende Anzahldichte n_q des fluoreszenzlöschenden Stoßpartners folgt aus Gleichungen 1 und 2

$$I_f^0/I_f = 1 + k_q/k_f n_q, \quad 5$$

wobei I_f^0 die Fluoreszenzintensität ohne Quenchpartner ist (im Fall, dass das Eigenquenchen des Fluoreszenztracers Toluol nicht vernachlässigt werden soll oder kann, ist in Gl. 5 k_f durch $k_f' = k_f + k_{q, \text{Tol}} n_{\text{Tol}}$ zu ersetzen, wobei n_{Tol} die Toluolanzahldichte und $k_{q, \text{Tol}}$ der zugehörige Quenchkoeffizient ist). Trägt man nun also in einer so genannten Stern-Volmer-Auftragung das Fluoreszenzintensitätsverhältnis $I_f^0/I_f - 1$ gegen die Anzahldichte des Stoßpartners bzw. gegen den ihr proportionalen Partialdruck auf, so gibt die Steigung die Stärke des Quencheinflusses des Stoßpartners q wieder. Abbildung 4 zeigt eine Stern-Volmer-Auftragung für Luft und Stickstoff als Stoßpartner von Toluol (50mbar Partialdruck) bei 125°C. Zusätzlich ist noch eine Messung für Stickstoff in der Anwesenheit von 200 mbar Luft eingetragen (in An-

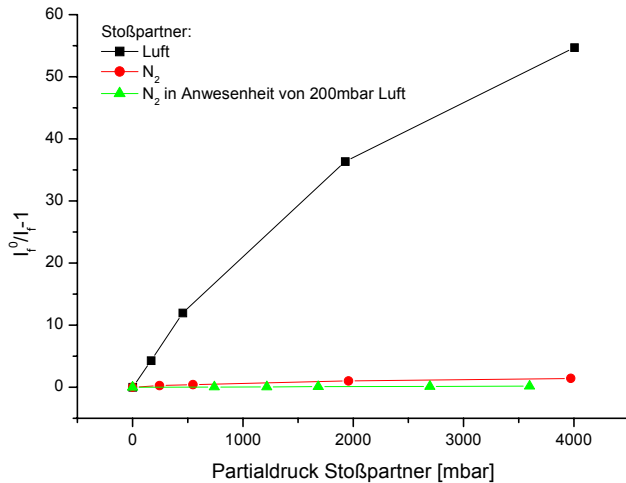


Abb. 4: Stern-Volmer-Auftragung

Stoßpartner	$k_q [10^{-18} \text{ m}^3 / \text{s}]$
Sauerstoff	242
Toluol Eigenquenchen	16
Isooktan	8.5
Stickstoff	0.73
N ₂ in Anw. von Luft	0.25

Tabelle 1: Quenchkoeffizienten

lehnung an die Vorgängermessungen in Rebox et al. 1994). Es ist deutlich zu erkennen, dass die Kurve für Luft die größte Steigung besitzt und somit Sauerstoff den weitaus dominierenden Einfluss auf die Fluoreszenzlöschung hat. Während die Stickstoffkurve noch eine geringe Steigung besitzt, hat Stickstoff in Anwesenheit von nur geringen Mengen Sauerstoff einen vernachlässigbaren Quencheinfluss, wie es schon für Raumtemperatur (und Anwesenheit von Sauerstoff) von Rebox gezeigt wurde. All diese Ergebnisse werden durch die durchgeführten Lebensdaueruntersuchungen bestätigt. In Tabelle 1 sind die aus den Lebensdaueruntersuchungen und Stern-Volmer-Auftragungen ermittelten Quenchkoeffizienten für alle relevanten Stoßpartner eingetragen. Betrachtet man noch, dass der Tracer Toluol mit maximal 10% Anteil in Isooktan verwendet wird und für ein stöchiometrisches Gemisch auf ein Teil Isooktan 12.5 Teile Sauerstoff kommen, so kann Sauerstoff bei den betrachteten Gasgemischen eindeutig als Hauptquencher angesehen werden.

Nach diesen Voruntersuchungen konnte die direkte Überprüfung des FARLIF-Prinzips vorgenommen werden. In Abbildung 5 links ist mit 5% Toluol in Isooktan für verschiedene Kraftstoff-Luft Gemische die Fluoreszenzintensität in Abhängigkeit der Toluol-Partialdichte bei einer Versuchstemperatur von 150°C aufgetragen. Die Fluoreszenzintensitäten sind über 128 Einzelmessungen gemittelt und bezüglich Anregungsintensitätsschwankungen (Puls-zu-Puls-Schwankungen und Absorption) gemäß

$$I_f^{\text{kor}} = I_f / (T \cdot R)^{0.5}$$

6

korrigiert, wobei T und R das mit den Photodioden gemessenes Transmissions- bzw. Refe-

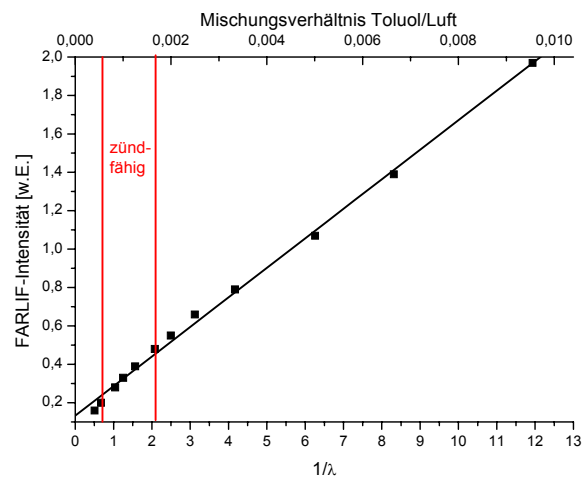
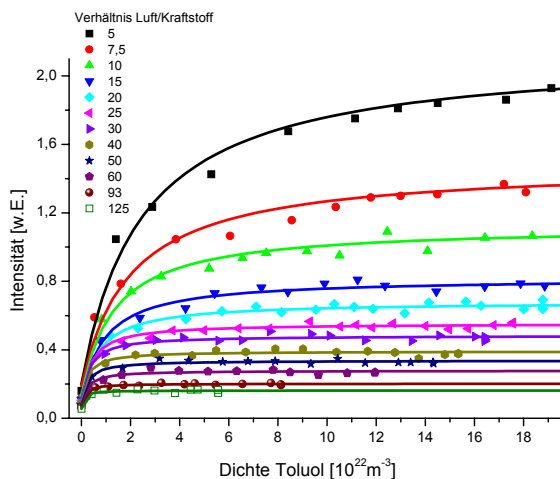


Abb. 5: Überprüfung der Anwendbarkeit des FARLIF-Prinzips

renzsignal darstellen. Wie erwartet zeigen die Intensitäten mit steigendem Druck ein Sättigungsverhalten, dass um so ausgeprägter ist, je mehr Luft – und damit Sauerstoff – in der Mischung vorhanden ist. Schon bei einem Kraftstoff-Luft Gemisch von 1:7.5 ist eine deutliche Plateaubildung zu erkennen und bei einem Mischungsverhältnis von 1:15 ist das Plateau bereits ab einer Toluol-Partialdichte von $8 \cdot 10^{22} \text{ m}^{-3}$ völlig ausgeprägt, was einem Gesamtdruck von 1.5 bar entspricht. Bei dem höchsten untersuchten Mischungsverhältnis von 1:125 ist das Plateau in Abbildung 5 links bereits ab $0.9 \cdot 10^{22} \text{ m}^{-3}$ ausgeprägt, was dem vergleichbaren Gesamtdruck von 1.3 bar entspricht. Das heißt, dass bei ausreichendem Luftanteil $p(\text{Luft})/p(\text{Kraftstoff}) \geq 15$ (entsprechend einem λ -Wert von ca. 0.2) ab einem Gesamtdruck von etwa 1.5 bar FARLIF-Messungen, die unabhängig vom Gesamtdruck sind, bei Temperaturen von 150°C möglich sind. Für geringere Luftanteile muss der Gesamtdruck entsprechend höher liegen. In Abbildung 5 rechts ist der Plateauwert aus der linken Auftragung gegen $1/\lambda$, also gegen das Mischungsverhältnis Kraftstoff/Luft eingetragen. Deutlich ist der aus Gleichung 4 für FARLIF erwartete lineare Zusammenhang erkennbar, der weit über den für technische Anwendungen besonders wichtigen zündfähigen Bereich erfüllt ist. Weitere Untersuchungen bei Temperaturen zwischen 80°C und 150°C zeigten ebenso eindrucksvoll die Anwendbarkeit des FARLIF-Prinzips, wobei jedoch im Rahmen der Messgenauigkeit bei gleichen Mischungsverhältnissen ein Ansteigen der Fluoreszenzintensität mit steigender Temperatur erkennbar wurde und somit die Steigung der FARLIF-Kalibrationskurve mit der Temperatur stieg. Diese Temperatureffekte werden im laufenden Projekt weiter untersucht.

Entwicklung bildgebender FARLIF-Detektion

Nachdem die Einsatzfähigkeit des FARLIF-Prinzips gezeigt werden konnte, wurde die 2D-ortsauflösende Detektion von Mischungsverhältniszfeldern vorangetrieben. Die Versuchszelle aus Abb. 1 wurde durch ein Strömungsmodul mit Koaxialdüse ersetzt, an Stelle des Multipliers kam eine intensivierete Doppelbild-CCD-Kamera zum Einsatz und die Transmissions- und Referenzmessung wurde ebenfalls mit einer Doppelbild-CCD-Kamera mit vorgeschaltetem Fluoreszenzschirm realisiert. Neben quantifizierten flächigen Momentaufnahmen von Mischungsfeldern sind hiermit auch – ähnlich der PIV-Technik – Doppelbilder des Mischungsfelds mit kurzem Zeitversatz durch Einsatz eines Doppelpulslasers möglich. Diese Doppelbilder ermöglichen dann die Verfolgung der zeitlichen Mischungsdynamik.

Abb. 6 zeigt eine Momentaufnahme der Vermischungssituation im Nachlauf der Koaxialdüse. Als Kraftstoff wurde 10% Toluol in Isooktan verwendet und bereits ein vorgemischtes Kraft-

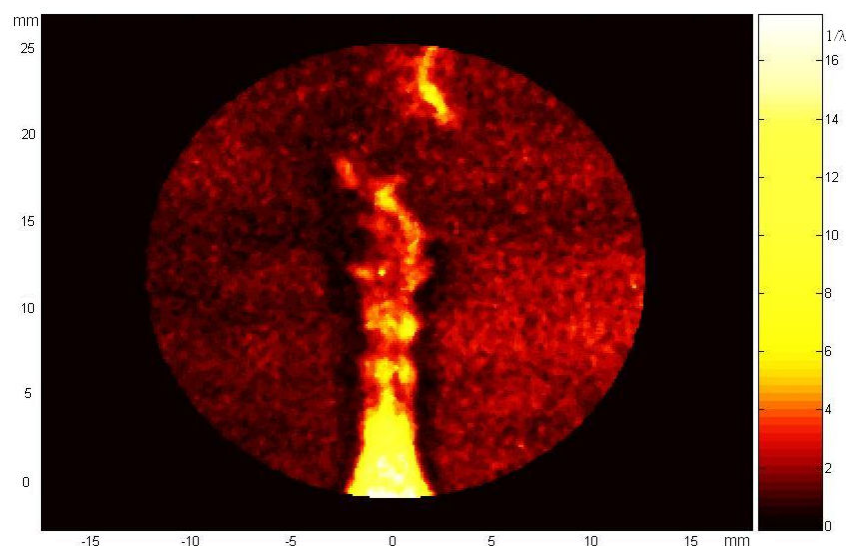


Abb. 6: Kalibrierte FARLIF-Aufnahme bei $T=125^\circ\text{C}$, $p=3\text{bar}$, Vermischung im Nachlauf der Koaxialdüse

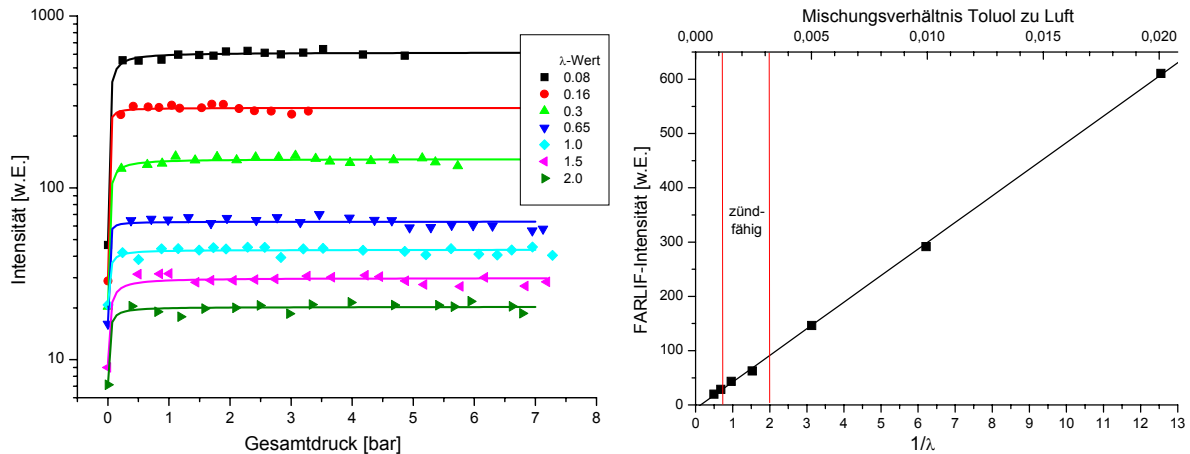


Abb. 7: FARLIF-Kalibrierung der Kamera mit 10% Toluol in Isooktan bei 125°C

stoff/Luft-Gemisch im Verhältnis 1:3 eingeströmt. Hohe Intensitäten entsprechen hier einem hohen Kraftstoff/Luft-Verhältnis. Deutlich ist in Abb. 6 unten der Schnitt durch die koaxiale Strömung zu erkennen: Mittig strömt das helle Kraftstoffgemisch, links und rechts davon sieht man einen dunklen Streifen der durch die koaxial herum einströmende Luft hervorgerufen wird. Weiter außen steigt die Signalintensität wieder an, da hier ein bereits verdünntes Kraftstoff-Luft-Gemisch vorliegt. Die Körnigkeit der Aufnahme liegt an dem hohen Verstärkungsgrad des Bildverstärkers und der Tatsache, dass die Kamera mit einem 4x4 Pixel-Binning betrieben wurde. Dies kann durch die Verwendung eines empfindlicheren Kamerasystems verbessert werden.

In Abbildung 7 ist das Ergebnis der FARLIF-Kalibrierungsversuche für die Kamera gezeigt, die analog zu der oben beschriebenen Überprüfung des FARLIF-Prinzips durchgeführt wurde. Links wird wieder deutlich, dass ab spätestens 1.5 bar mit steigendem Druck die Intensität konstant bleibt und somit das FARLIF-Prinzip anwendbar ist. Rechts zeigt sich wieder der erwartete lineare Zusammenhang zwischen FARLIF-Intensität (=Plateauintensität) und $1/\lambda$. Mit Hilfe solcher Messreihen können dann Aufnahmen wie in Abb. 6 kalibriert werden, wodurch quantitative flächige FARLIF-Messungen zumindest im untersuchten Temperatur- und Druckbereich möglich sind.

Verfolgung der zeitlichen Mischungsdynamik

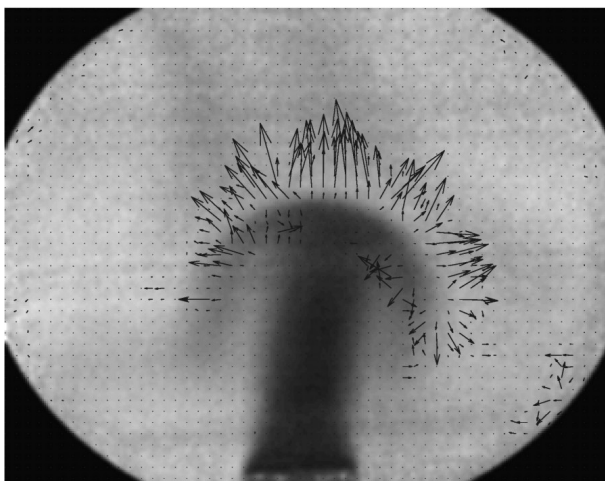


Abb. 8: Verfolgung der Mischungsdynamik

Neben der beschriebenen Entwicklung quantitativer flächiger FARLIF-Detektion wurden auch Möglichkeiten zur zeitlichen Verfolgung der Mischungsdynamik untersucht. Einerseits kann bei langsamen Mischungsvorgängen die maximale Einzelbildrepetitionrate des Kamerasystems (4.5 Hz) für die Erstellung von längeren Bildsequenzen genutzt werden. Diese Bildsequenzen können dann mit der Methode des optischen Flusses bezüglich der mittleren Verschiebungsvektoren der Mischungsverhältnissfelder ausgewertet werden (eine Übersicht zu dieser Methode findet sich in Barron et al. 1994). In Abbildung 8 ist das Ergebnis

einer solchen Auswertung dargestellt, die durch Dr. C. Garbe aus der Arbeitsgruppe von Prof. Jähne, Uni. Heidelberg, erstellt wurde. Zu sehen ist das mittlere von 5 Bildern einer Sequenz beim langsamen Einströmen von Luft in ein Kraftstoff-Luft-Gemisch kurz nach Öffnen des Einlassventils. Die Vektoren geben die erwartete Einströmgeschwindigkeit von ca. 10 mm/s und das Ausbreiten des „Pilzkopfes“ gut wieder, wengleich noch etliche Fehlvektoren zu beobachten sind.

Bei schnelleren Mischungsvorgängen findet der beschriebene Doppelpuls-Laser und die Doppelbildkamera Verwendung. Hiermit sind Fluoreszenz-Bildpaare mit einem minimalen Zeitversatz von 50 μs erfassbar. Auch solche Bildpaare können mit der Methode des optischen Flusses bezüglich Mischungsfeldverschiebungen ausgewertet werden, wobei jedoch die Genauigkeit im Vergleich zu Bildsequenzen leidet. Eine weitere Möglichkeit der Auswertung sind Kreuzkorrelationsmethoden, wie sie auch bei der Particle Image Velocimetry (PIV) eingesetzt werden. In Abbildung 9 ist ein Vergleich von 3 Auswertungsansätzen für ein Bildpaar mit einem Zeitversatz von 200 μs gezeigt. Links ist die Auswertung mit einem kommerziellen PIV-Algorithmus unter Verwendung sukzessive kleiner werdender Korrelationszellen (adaptive Multipass) dargestellt, in der Mitte ist mit der Methode des optischen Flusses mit lokalem Ansatz (siehe Garbe et al. 2003) wieder durch Dr. C. Garbe ausgewertet worden, während rechts eine Auswertung mit der Methode des optischen Flusses mit globalem Ansatz (siehe Ruhnau et al. 2005) dargestellt ist, die von P. Ruhnau aus der Arbeitsgruppe von Prof. Schnörr, Uni. Mannheim, zur Verfügung gestellt wurde. Alle Methoden geben die aus einer Durchflussmessung bestimmte Hauptgeschwindigkeitskomponente mit ca. 2 m/s richtig wieder. Die PIV-Auswertung scheint nur die großen Strukturen, vornehmlich die Hauptgeschwindigkeitskomponente zu verfolgen. Der optische Fluss mit lokalem Ansatz gibt wesentlich besser Strömungsdetails, wie den Wirbel rechts der Bildmitte wieder, jedoch sind hier auch noch eine große Anzahl offensichtlicher Fehlvektoren augenfällig, die durch geeignete Filter unterdrückt werden müssten. Einen wesentlich glatteren Eindruck macht die optische-Fluss-Auswertung mit globalem Ansatz, wobei auch hier Details wie der Wirbel rechts erhalten bleiben. Jedoch kann durch die in diese Auswertung eingehende Randbedingung „glatter Strömungsfelder“ auch dazu führen, dass Strömungsinformation in Nachbargebiete mit hineingezogen und somit delokalisiert wird. Da bei allen Ansätzen noch erhebliches Verbesserungspotential gesehen wird, soll in Zukunft eng mit den genannten bildverarbeitenden Gruppen aus Heidelberg und Mannheim an einer Weiterentwicklung der Auswertemethoden gearbeitet werden.

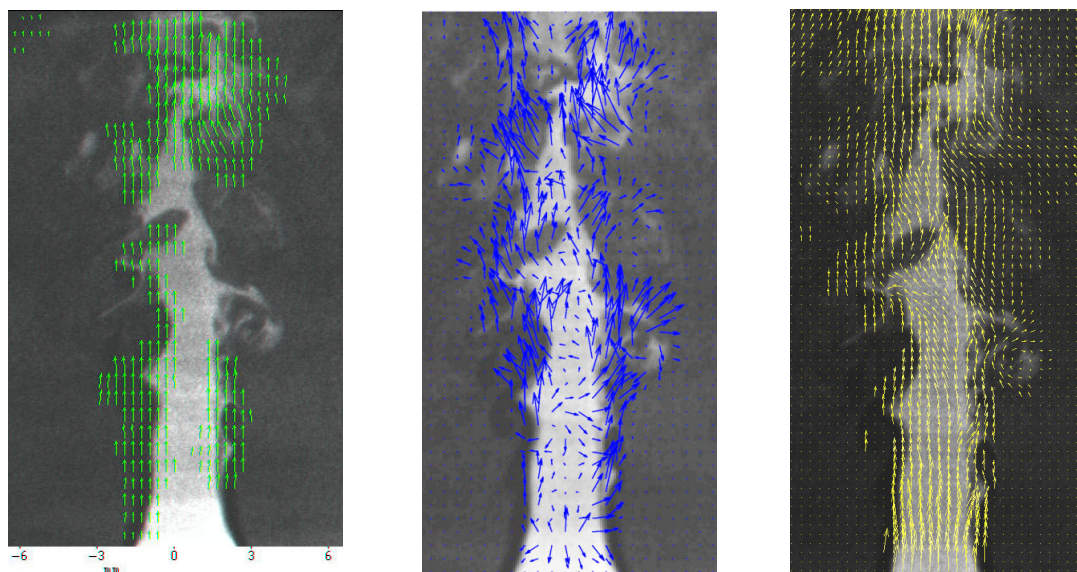


Abb. 9: Vergleich verschiedener Auswertemethoden, PIV (l.), opt. Fluss lokal (m.), opt. Fluss global (r.)

Schlussfolgerung und Ausblick

Die vorgestellten Untersuchungen haben die Anwendbarkeit des FARLIF-Prinzips mit 5% bis 10% Toluol in Isooktan für Fluoreszenzanregung bei 266 nm und Temperaturen bis 150°C im Druckbereich von 1.5 bar bis 10 bar gezeigt. Diese Ergebnisse stehen nicht im Widerspruch zu den Untersuchungen von Koban et al. 2005 (a+b) und Schulz et al. 2005, sondern relativieren nur die dort getroffene Aussage, dass bei höheren Temperaturen das Prinzip nicht mehr anwendbar sei: Ein Versagen des Prinzips sollte zumindest erst über 150°C einsetzen. Allerdings sind auch in den vorliegenden Untersuchungen Temperaturabhängigkeiten aufgefallen, die die Notwendigkeit einer Temperaturkorrektur für FARLIF-Untersuchungen bei nicht-isothermen Versuchsbedingungen wahrscheinlich macht. Diese Fragestellung wird in dem fortlaufenden Projekt weiter untersucht.

Beruhend auf diesem FARLIF-Prinzip konnte eine quantitative 2D-ortsauflösende Mischungsfelddetektion realisiert werden, die durch den Einsatz einer Doppelbild-LIF-Technik dem Messverfahren auch die Dynamik der Mischungsfelder erschließt. Erste Dynamikauswertungen mit verschiedenen Auswertestrategien konnten Strömungsstrukturen sichtbar machen und ein grobes Maß für die Bewegung von Gebieten gleicher Mischungsverhältnisse geben. Hier besteht allerdings noch ein erhebliches Entwicklungspotential bezüglich der Dynamikauswertung von teilweise verrauschten Fluoreszenzdoppelbildern, die anders als übliche PIV-Bilder großflächige Grauwertgradienten statt scharfer Partikelbilder aufweisen. Zurzeit wird der Methode des optischen Flusses das größte Entwicklungspotential für diese Aufgabe zugesprochen, da diese Methode schon auf die Verfolgung von Grauwertgradientenbildern ausgelegt ist. Die begonnene enge Kooperation zwischen Experimentatoren und Bildverarbeitern soll hier eine rasche Entwicklung ermöglichen, bei der auch die Messstrategie auf die Auswertungsanforderungen angepasst wird.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG für die finanzielle Unterstützung dieses Projekts im Rahmen des Schwerpunktprogramms SPP 1147 „Bildgebende Messverfahren für die Strömungsanalyse“.

Literatur

- Barron J. L., Fleet D. J., Beauchemin S. S., 1994, "Performance of optical flow techniques", *International Journal of Computer Vision*, 12(1), 43–77
- Garbe C., Spies H., Jähne B., 2003, "Estimation of Surface Flow and Net Heat Flux from Infrared Image Sequences", *Journal of Mathematical Imaging and Vision* 19, 159–174
- Koban W., Koch J.D., Handson R.K., Schulz C., 2005 a: "Toluene LIF at elevated temperatures: implications for fuel–air ratio measurements", *Appl. Phys. B* 80, 147–150
- Koban W., Koch J.D., Handson R.K., Schulz C., 2005 b: "Oxygen quenching of toluene fluorescence at elevated temperatures", *Appl. Phys. B* 80, 777–784
- 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", *Experiments in Fluids* 38, 21-32
- Schulz C., Sick V., 2005: "Tracer-LIF Diagnostics: Quantitative Measurement of fuel concentration, temperature and air/fuel ratio in practical combustion situations" *Prog. Energy Combust Sci.* 31, 75 (2005)