

Thermometrie an mikrometrischen Ethanoltröpfchen basierend auf laserinduzierter Fluoreszenz unter Nutzung einer Farbstoffmischung

Thermometry in Micrometric Ethanol Droplets Based on Laser-Induced Fluorescence Using a Dye Mixture

Hannah Ulrich^{1,2}, Lars Zigan^{1,2}

¹Institut für Thermodynamik, Professur für Energiewandlung, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, Universität der Bundeswehr München (UniBw M), Neubiberg, Deutschland

²Erlangen Graduate School in Advanced Optical Technologies (SAOT), Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU), Erlangen, Deutschland

Thermometrie, 2-Farben LIF, Farbstoffe, Fluorescein Natriumsalz, Sulforhodamin
Thermometry, 2-color LIF, Dyes, Droplets, Fluorescein, Sulforhodamin

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird eine optimierte Zwei-Farben laserinduzierter Fluoreszenz (engl. two color LIF, 2c-LIF) Methode angewandt, um Temperaturen in einer mikrometrischen Tropfenkette zu kalibrieren. Hierzu wird eine Farbstoffmischung aus Fluorescein Natriumsalz (FL) und Sulforhodamin 101 (SRh) genutzt und ein sensitives Signalverhältnis aus je einem temperaturabhängigen und einem temperaturunabhängigen Fluoreszenzfarbstoff gebildet. Die Zugabe und anschließende Anregung der Farbstoffmischung ermöglicht eine simultane Detektion des Fluoreszenzsignals mit einem Spektrometeraufbau und einem Kamerasystem. Hierdurch können spektrale und auch örtlich aufgelöste Informationen gewonnen werden. Zusätzliche Absorptionsmessungen zeigen die unterschiedlich temperaturabhängigen Wellenlängenbereiche der Spektren auf und demonstrieren in welchen Bereichen es zu Reabsorptionen kommen kann. Durch eine gezielte Filterauswahl kann die Detektion von Morphologie-abhängigen Resonanzeffekten (engl. Morphology-dependent Resonances, MDR) im Tropfen vermieden und gleichzeitig ein optimales Signalverhältnis gebildet werden. Anhand des temperaturabhängigen Signalverhältnisses wird eine Kalibrierkurve für weitere Temperaturmessungen ausgearbeitet.

Einleitung

Zerstäubungsverfahren haben eine große Bedeutung in technischen Anwendungen, welche von Kraftstoffeinspritzung und Verbrennungsprozessen in Turbinen bis hin zu anderen Systemen der Energie- und Verfahrenstechnik wie z.B. zum Kühlen, Schneiden und Lackieren reichen. Unterschiedlichste Messtechniken zielen auf eine genauere Analyse des Strahlaufbruchs und der Verdunstung in Sprays ab. Eine wichtige Einflussgröße auf den Verdunstungsvorgang ist die Tropfentemperatur. In dieser Arbeit wird die laserinduzierte Fluoreszenz (LIF) mit einer in Ethanol gelösten Farbstoffmischung zur Temperaturmessung mit der Zwei-Farben Methode (2c-LIF) monodisperser Tropfen angewendet. Die Anregung erfolgt mit einem gepulsten Nd:YAG-Laser bei 532 nm. Zwei Detektionssysteme – ein fasergekoppeltes Spektrometer und ein mikroskopischer bildgebender Aufbau mit zwei sCMOS-Kameras – sind um einen Tropfengenerator angeordnet und ermöglichen die Detektion von sowohl spektraler als auch räumlich aufgelöster Tropfenfluoreszenz.

Zwei-Farben LIF ist eine vielversprechende Methode zur Bestimmung des Temperaturfeldes in gasförmigen Umgebungen und wurde in mehreren Arbeiten erfolgreich angewendet [Schulz et al. 2005]. Die Temperatur wird meist für einen Farbstoff durch ein LIF-Signalverhältnis zweier detektierter Farbkanäle bestimmt. Die Kanäle stellen jeweils unterschiedlich temperatursensitive Wellenlängenbereiche dar, die im Aufbau durch optische Filter realisiert werden. Die Übertragung dieses Ansatzes auf die flüssige Phase bringt viele Herausforderungen mit sich, wie bspw. Streueffekte an den Phasengrenzen und die Notwendigkeit eines geeigneten sensitiven Fluoreszenzfarbstoffes. Für diesen Zwei-Farben Ansatz wurden in der Literatur verschiedenste Farbstoffe in unterschiedlichen Flüssigkeiten gelöst und bezüglich des jeweiligen Fluoreszenzsignals vermessen [Prenting et al. 2020; Mishra et al. 2020]. Weitere Arbeiten berichten von erfolgreichen Temperaturmessungen in Tropfen mit Photomultipliern (PMT) [Lavielle et al. 2001; Perrin et al. 2015]. Chaze et al. konnten mittels eines Kamerasystems und einer Farbstoffkombination Temperaturmessungen in großen (im mm Bereich) Wassertropfen durchführen, die auf einer Wand auftreffen [Chaze et al. 2017]. Prenting et al. berichten von Temperaturfeldmessungen mit einem einzelnen Farbstoff (Coumarin 153) in einem SpraySyn-Brenner [Prenting et al. 2020]. Eine der Herausforderung bei Aufnahmen von LIF-Signalen in sphärischen Tropfen ist die Vermeidung der Detektion entstehender Resonanzeffekte (sog. Morphologie-abhängigen Resonanzen, MDR). Aufgrund der Form und der daraus resultierenden Winkel im Inneren des Tropfens können hierbei an der Phasengrenze mehrfach Totalreflexionen auftreten. Dadurch werden bestimmte Wellenlängenbereiche des Fluoreszenzsignals verstärkt, was zu einem ausgeprägten Störsignal in den Emissionsspektren führt. Palmer et al. konnten die Detektion der MDR vermeiden, indem für den Farbstoff Pyromethen 597-8C9 ein zusätzlicher, nicht fluoreszierender Farbstoff (Oil Blue N) zugefügt wurde. Dieser führt durch Absorption im Bereich des überlagerten Lichts zu einem Energietransfer zwischen den Farbstoffen [Palmer et al. 2016]. Die Signalintensitäten wurden durch dieses Konzept jedoch sehr stark reduziert und die Temperatursensitivität ist relativ gering.

In dieser Arbeit wird, wie von Chaze et al. [Chaze et al. 2017] vorgeschlagen, eine Farbstoffmischung aus Fluorescein Natriumsalz (FL, auch als „Uranin“ bekannt) und Sulforhodamin 101 (SRh) in Ethanol gelöst. Dabei führt die Zugabe des zweiten fluoreszierenden Farbstoffs zu einer Verschiebung der MDR zu höheren Wellenlängenbereichen im Vergleich zu den Emissionsspektren der Farbstoffe. Absorptions- und Emissionsmessungen in einem Temperaturbereich von 293 K bis 343 K werden in unserem Beitrag dargestellt. Die bildgebend bestimmte Kalibrierkurve wird mit den spektralen Messdaten verglichen. Einzelmessungen der Tropfen werden präsentiert und das Potential dieser Technik wird diskutiert.

Experimenteller Aufbau

Abb. 1 zeigt den experimentellen Messaufbau mit einem gepulsten Nd:YAG Laser bei einer Anregungswellenlänge von 532 nm. Der aufgeweitete, kollimierte Laserstrahl wird durch eine monodisperse Tropfenkette, justiert auf eine Tropfengröße von 100 μm , geleitet. Der Tropfengenerator (FMAG 1520, TSI) ist an zwei rezirkulierende Umwälzkühler angeschlossen, mit denen die Probe auf Temperaturen von 293 K bis zu 343 K temperiert wird. Dieser Temperaturbereich ist nach oben durch den Siedepunkt von Ethanol limitiert. Für die Messungen im Tropfen wird Ethanol mit 750 mg/l FL (CAS: 518-47-8) und 75mg/l SRh (CAS: 60311-02-6) gemischt. Diese Konzentrationen sind höher als in vorigen Arbeiten, siehe [Chaze et al. 2017; Mishra et al. 2020], da in den mikrometrischen Tropfen nur erschwert Signal detektierbar ist.

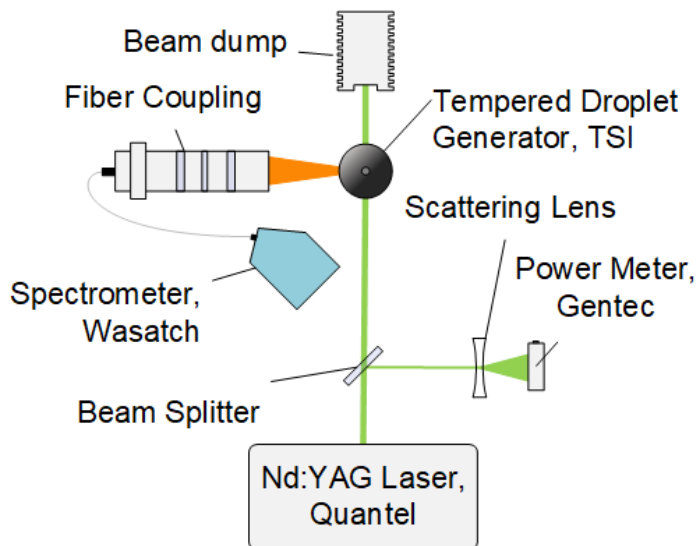


Abb. 1: Optischer Aufbau mit spektraler Detektion der Fluoreszenzemission um einen temperierten Tropfengenerator.

Nach Guénot et al. [Guénot et al. 2020] konnte bei der Zumischung eines Fluoreszenzfarbstoffes kein Einfluss auf die Flüssigkeitseigenschaften festgestellt werden. Um dies zu verifizieren, wurden Messungen der Dichte, Oberflächenspannung und der dynamischen Viskosität für drei unterschiedliche Proben bei 293 K durchgeführt, siehe Tabelle 1. Bezüglich der Dichte und der Oberflächenspannung konnte kein Unterschied erkannt werden. Die dynamische Viskosität zeigt einen leichten Anstieg durch die hohe Aufkonzentrierung von Fluorescein in der Flüssigkeit.

Tabelle 1: Flüssigkeitseigenschaften von reinem Ethanol und Ethanol unter Zumischung der Fluoreszenzfarbstoffe

	Dichte / kg/m ³	Oberflächen- spannung / mN/m	Dyn. Viskosität / mPas
Ethanol	790	22,3	1,156
Ethanol + FL	790	22,3	1,194
Ethanol + FL + SRh	790	22,3	1,194

Unter einem Detektionswinkel von 90° zum Laserstrahl ist ein LD (long-distance) Mikroskop (Infinity K2, Distamax) an ein bildgebendes Messsystem angebracht. Dieses beinhaltet einen dichroitischen Spiegel, der das Signal in zwei Wellenlängenbereiche aufteilt. Beide entsprechenden Signale durchlaufen einen jeweiligen Bandpassfilter (554/23 BrightLine HC und 615/24 BrightLine HC) und treffen auf eine sCMOS Kamera (Imager, LaVision). Die Wellenlängenbereiche sind in Abb. 3 anhand der schattierten Farbbänder erkennbar. Auf der gegenüberliegenden Seite des Tropfengenerators ist ein fasergekoppeltes Spektrometer (WP-VIS-A-S-50, Wasatch Photonics) an einem optischen System inkl. zwei achromatischer Doublets und einem Notch Filter montiert. 100 Spektren, jeweils mit einer Integrationszeit von 50 ms aufgenommen, werden durch die Detektionssoftware gemittelt. Die Messung wird an drei unterschiedlichen Tagen fünffach wiederholt, wodurch sich eine Summe von 1500 Einzelspektren je gemessener Temperatur ergibt. Für die bildgebenden Messungen werden jeweils 2000 Bilder an drei unterschiedlichen Tagen aufgenommen. Jedes Bild beinhaltet zwei oder drei Tropfen. Die zwei zusammengehörigen Bilder der beiden Kameras werden mittels einer Transformationsmatrix und einem Warming-Mechanismus aufeinander angepasst. Mithilfe einer Binärisierung werden die Kanten der Tropfen erkannt und weiter ausgewertet. Einzelne Tropfen

werden je nach Größe oder Form des Tropfens weiterverarbeitet oder vernachlässigt. Mit diesen Spezifikationen wird ein Minimum von 12.000 Tropfen je betrachteter Temperatur für die weitere Auswertung genutzt. Das integrierte LIF Signal ist in der Tropfenmitte am stärksten, da der Tropfen hier auch die maximale Tiefe (in z-Richtung) hat. Am Rand liegt ein geringes Signal-Rausch-Verhältnis vor und das geringe Signal führt zu einer größeren Unsicherheit. Daher wird der Tropfenrand nicht mit einberechnet, sondern nur das Signal aus dem Tropfeninneren gemittelt und ein Signalverhältnis gebildet. Mit dem beschriebenen Messaufbau ist es möglich, simultan spektrale und örtliche Informationen aufzunehmen, womit klare Informationen bzgl. MDR Effekten im Tropfen erhalten werden.

Zusätzlich zu den bisher beschriebenen Messungen wird die Ethanol-Farbstoffmischung mit einem UV/VIS Spectrophotometer (V-750, Jasco) in einer Küvette hinsichtlich ihrer Absorption untersucht. Durch eine temperierte Küvetten Halterung können temperaturabhängige Absorptionsspektren aufgezeichnet werden. Die Konzentration für Absorptionsmessungen ist deutlich niedriger als die in der Tropfenkette, da eine längere Weglänge (10 mm) durchlaufen wird und das Licht bei der höheren Konzentration absorbiert werden würde. Für Absorptionsmessungen werden Konzentrationen von 10 mg/l und 1 mg/l (FL:SRh) genutzt. Das Temperaturspektrum wird an drei Tagen durchgeföhren und die jeweiligen Spektren gemittelt.

Ergebnisse

Fluoreszenzmessungen in sphärischen Tropfen zeigen oftmals das Problem interner Totalreflexionen an der Tropfen-Luft-Phasengrenze, welche zu Lasing Effekten - sog. MDR - führen. Diese verstärkten Emissionssignale entstehen durch die Form des Tropfens, die ihn als optische Kavität wirken lässt, wenn Resonanzen des Lichts im Tropfeninneren entlang des Randes laufen. Die Resonanzwellenlängen sind von der Morphologie des streuenden Mediums abhängig, welche Form und Größe der Tropfen beinhaltet. Für 2c-LIF Thermometrie stellen MDR einen großen Einflussfaktor dar und stören das Signalverhältnis, wenn sie in einem der detektierten Wellenlängenbereiche liegen. Eine Lösung zur Vermeidung der MDR-Detektion ist eine kontrollierte Farbverschiebung der Störsignale hin zu Wellenlängen, die nicht im detektierten Bereich liegen [Zheng et al. 2018].

Diese Farbverschiebung basiert auf einem effektiven Energietransfer zwischen den Farbstoffmolekülen. Hierzu kann ein zusätzlicher Absorber-Farbstoff eingesetzt werden. In der präsentierten Arbeit wird für den 2c-LIF Ansatz eine Mischung aus zwei Farbstoffen in Ethanol gelöst. Emissionsspektren beider einzelner Farbstoffe – FL und SRh – und deren Mischung in Ethanoltropfen sind in Abb. 2 dargestellt. Das Spektrum von FL zeigt eine Lücke, die durch den Notch Filter um 532 nm entsteht, sowie einen MDR Peak bei 571 nm. Im SRh Spektrum ist ein Emissionsmaximum bei 593 nm und ein weiterer Lasing Peak bei 648 nm zu erkennen. Durch die Mischung der beiden Farbstoffe wird die Fluoreszenzemission von FL reduziert und ein Anstieg des SRh Signals ist sichtbar. Dies kann durch Reabsorption der FL Emission durch die SRh Moleküle erklärt werden.

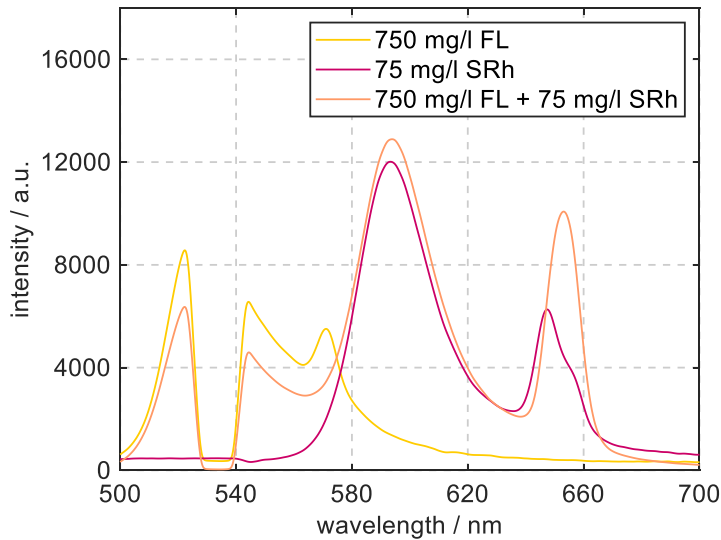


Abb. 2: Emissionsspektren der Einzelstoffe FL und SRh, sowie dem Farbstoffpaar in Ethanoltröpfchen bei 293 K.

Zusätzlich zu der Reabsorption des FL Signals wird das MDR Signal von FL durch SRh in der Mischung absorbiert. Stattdessen zeigt das Spektrum der gelösten Farbstoffmischung einen Peak bei 652 nm, also bei höheren Wellenlängen als in der Lösung des Einzelfarbstoffs SRh. Entsprechend der MDR Peaks wurde ein Filterpaar gewählt, dessen Transmissionsbereiche außerhalb des Wellenlängenbereichs der MDR liegen.

Für einen besseren Einblick in den Prozess der Fluoreszenz wurden zusätzliche temperaturabhängige Absorptionmessungen durchgeführt. Die Absorptionsspektren der Farbstoffmischung in Ethanol bei Temperaturen von 293 K und 333 K sind in Abb. 3 dargestellt. Beide zeigen zwei Hauptmaxima bei ca. 500 nm und ca. 550 nm. Das erste Maximum beruht auf der Absorption durch FL und ist deutlich höher als das zweite, das Maximum von SRh. Dieser Unterschied beruht auf dem Konzentrationsunterschied von 10:1 (FL:SRh). Bei einer höheren Temperatur steigt der FL Peak an, während der SRh Peak nur eine leichte Blauverschiebung zeigt. Dies liegt vermutlich an der Überlagerung mit dem erhöhten FL Peak.

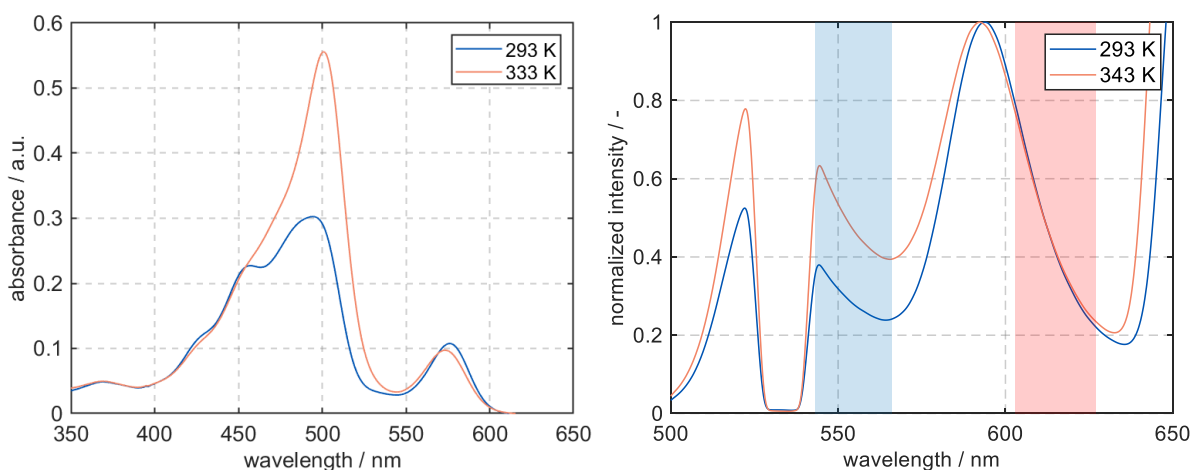


Abb. 3: Absorptionsspektren der Mischung FL und SRh in Ethanol bei 293 K und 333 K (links) Emissionsspektren der Mischung FL und SRh in mikrometrischen Ethanoltröpfchen bei 293 K und 343 K (rechts).

Der rechte Graph in Abb. 3 zeigt die Fluoreszenz-Emission der Farbstoffmischung in Ethanoltröpfchen bei 293 K und 343 K. Der Anstieg des Signals bei Wellenlängen über 640 nm ist auf MDR Signale zurückzuführen. Die beiden schattierten Wellenlängenbereiche stellen die Farbkanäle für die 2c-LIF Detektion dar. Die jeweiligen Signale in diesen Bereichen werden im Folgenden für die Erstellung der Kalibriergerade genutzt. Die Kombination aus dem temperaturabhängigen FL und temperaturunabhängigen SRh führt zu einer hohen Temperatursensitivität des Signalverhältnisses. Für dieses Verhältnis wurden die beiden Farbkanäle nach einer Ausarbeitung einer optimal hohen (blau) und niedrigen (rot) Temperatursensitivität bestimmt und entsprechende Filter für das Kamerasystem ausgewählt. Ergebnisse aus spezifischen MDR Studien mit Tropfengrößen-, Fluenz- und Konzentrationsvariationen wurden auch einbezogen.

Beispiele von (mit dem Kamerasystem aufgenommenen) Einzeltröpfchen durch die beiden spektralen Farbkanäle, jeweils bei unterschiedlichen Temperaturen sind in Abb. 4 dargestellt. Die oberen Tröpfchenbilder haben eine Temperatur von 293 K, in den unteren Bildern wurde die Flüssigkeit auf 343 K aufgeheizt. Beim Vergleich der „kalten“ zu den „warmen“ Tropfen ist ein signifikanter Intensitätsunterschied zwischen den beiden Farbkanälen zu sehen. Der „blaue“ Kanal (channel 1) zeigt das mit der Temperatur ansteigende Signal von FL, während im „roten“ Farbkanal (channel 2) der nur geringe Intensitätsunterschied von SRh ersichtlich ist.

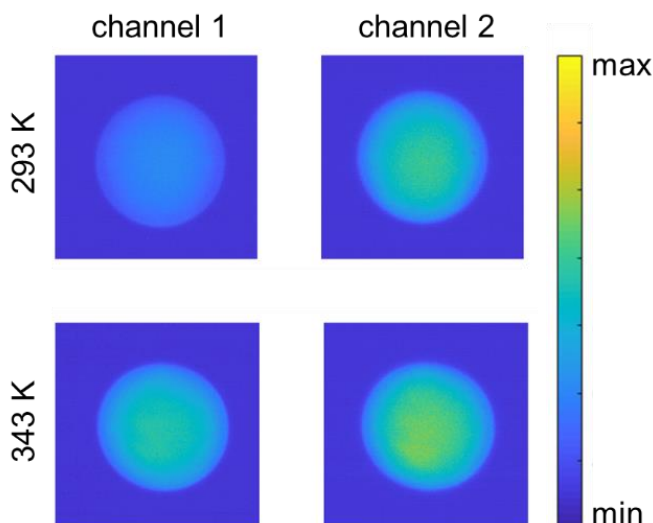


Abb. 4: Beispielbilder eines Tropfens bei 293 K und bei 343 K. Die linke Spalte zeigt die Aufnahme des "blauen" Spektralbands (FL), die rechte Spalte die des "roten" Spektralbands (SRh).

Durch die Aufnahme der Tropfen in sehr limitierten Wellenlängenbereichen konnte die Detektion von MDR ausgeschlossen werden und die Bilder zeigen keine Ringstrukturen, die auf diese Störeffekte hindeuten. Eine Umgehung der MDR Detektion konnte somit mit einer geeigneten Filterauswahl erreicht werden.

Abb. 5 zeigt die normierten LIF Intensitätsverhältnisse bei allen gemessenen Temperaturen und den resultierenden linearen Fit, sowohl für Spektrometernaufnahmen (s), als auch für die Aufnahmen mit dem Kamerasystem (c). Die Steigung der Kalibriergerade spiegelt die Temperatursensitivität des Signalverhältnisses wieder. Die Kurve für die Kameramessungen ist etwas steiler als die Kurve der Spektrometermessungen. Dies beruht vermutlich auf einer gezielteren Signalauswahl bei der bildgebenden Methode für Einzeltröpfchen während der Bildbearbeitung. Mithilfe des Spektrometeraufbaus wird immer an derselben Stelle detektiert, wobei keine genaue Messposition der mikrometrischen Tropfen in der Kette unterhalb des Tropfengenerators genannt werden kann.

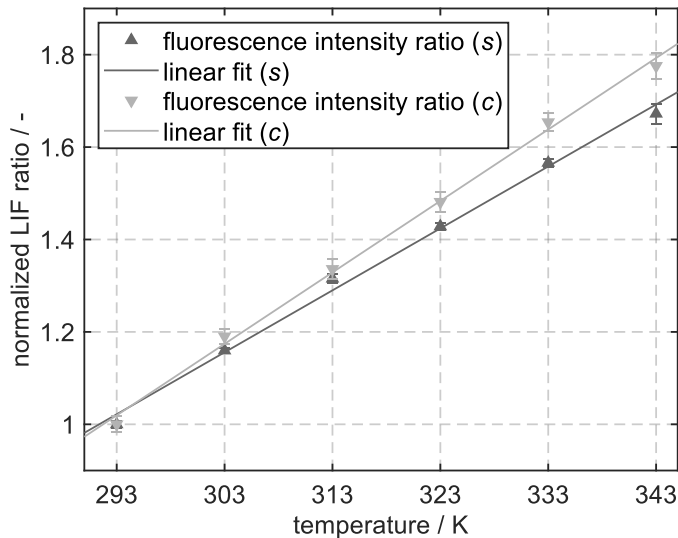


Abb. 5: Normiertes Fluoreszenz-Intensitätsverhältnis der beiden integrierten spektralen Farbkanäle für Messungen mit dem Spektrometeraufbau (s) und dem Kamerasystem (c) mit jeweiliger Standardabweichung. Die Signalverhältnisse sind auf 293 K normiert.

Die Kalibrierkurve des Spektrometers liefert eine Sensitivität von 1.71 %/K, während die des Kamerasystems etwas höher bei 2.02 %/K liegt. Im Vergleich dazu haben Chaze et al. [Chaze et al. 2016] und Mishra et al. [Mishra et al. 2020] höhere Werte von 2.5 %/K - 3 %/K (in Wasser) und 2.39 %/K (in Ethanol) für die Sensitivität erlangt. Hierfür wurden jedoch andere Aufbauten bzw. unterschiedliche Fluide verwendet und keine Standardabweichung angegeben. Zusätzlich wurden andere Farbkanäle, also auch Filter verwendet, was zu einem Unterschied in der Sensitivität führt. Es wurde von erhöhten Schwankungen im temperaturunabhängigen SRh Kanal berichtet, was möglicherweise an Ringstrukturen in den Tropfen liegt, von denen Chaze et al. in einer späteren Arbeit berichten [Chaze et al. 2017]. Wie in dieser Arbeit gezeigt wurde, kann die Detektion dieser Resonanzeffekte durch eine gezielte Filterauswahl vermieden werden. Ein direkter Vergleich der Sensitivitäten ist dementsprechend jedoch nicht sehr aussagekräftig.

Zusammenfassung und Ausblick

Diese Arbeit zeigt die Optimierung des zwei Farben LIF Ansatzes mit einer dafür ausgewählten Fluoreszenzfarbstoffkombination aus Fluorescein Natriumsalz und Sulforhodamin 101. In Ethanol gelöst, konnte die Temperatursensitivität der Farbstoffmischung genutzt werden, um in einer mikrometrischen Tropfenkette (100 μm) spektrale und bildgebende Kalibrierdaten in einem Temperaturbereich von 293 K bis 343 K aufzunehmen. Zusätzlich wurden temperaturabhängige Absorptionsspektren aufgenommen, um die Farbstoffkombination bezüglich Reabsorptionseffekten zu untersuchen. Die Detektion von Resonanzsignalen in den sphärischen Tropfen konnte durch eine adäquate Filterauswahl ausgeschlossen werden. Hierzu wurden zwei Farbkanäle - um 554 nm für das temperaturabhängige FL-Signal und um 615 nm für das temperaturunabhängige SRh-Signal - gewählt, welche die MDR Effekte, beginnend ab ca. 640 nm, ausschließen. In den Einzelbildern der Kameradetektion sind hiermit keine Ringstrukturen mehr ersichtlicher. Temperatursensitivitäten von 1.71 %/K bzw. 2.02 %/K konnten für die Aufnahmen mit dem Spektrometer bzw. dem Kamerasystem ermittelt werden. Basierend auf den Kalibrierdaten sollen Temperaturmessungen entlang der Tropfenkette erfolgen und die Anwendbarkeit des vorgeschlagenen Konzeptes bestätigt werden.

Danksagung

Wir sind der Universität der Bundeswehr München dankbar für die Finanzierung der Arbeit und bedanken uns beim WiWeb (Wehrwissenschaftliches Institut für Werk- und Baustoffe) für das Bereitstellen der Stoffdatenmessungen in den Flüssigkeiten. Die Autoren bedanken sich für die Unterstützung der Erlanger School of Advanced Optical Technologies (SAOT) des Bayerischen Staatsministeriums für Wissenschaft und Kunst.

Literaturverzeichnis

- Chaze, W., Caballina, O., Castanet, G., Lemoine, F., 2016: "The saturation of the fluorescence and its consequences for laser-induced fluorescence thermometry in liquid flows", *Experiments in Fluids*, Vol. 57, No. 4, pp. 1–18.
- Chaze, W., Caballina, O., Castanet, G., Lemoine, F., 2017: "Spatially and temporally resolved measurements of the temperature inside droplets impinging on a hot solid surface", *Experiments in Fluids*, Vol. 58, No. 8, pp. 1–16.
- Guénot, D., Svendsen, K., Björklund Svensson, J., Ekerfelt, H., Persson, A., Lundh, O., Berrocal, E., 2020: "Simultaneous laser-driven x-ray and two-photon fluorescence imaging of atomizing sprays", *Optica*, Vol. 7, No. 2, pp. 131–134.
- Lavieille, P., Lemoine, F., Lavergne, G., Lebouché, M., 2001: "Evaporating and combusting droplet temperature measurements using two-color laser-induced fluorescence", *Experiments in Fluids*, Vol. 31, No. 1, pp. 45–55.
- Mishra, Y.N., Yoganantham, A., Koegl, M., Zigan, L., 2020: "Investigation of Five Organic Dyes in Ethanol and Butanol for Two-Color Laser-Induced Fluorescence Ratio Thermometry", *Optics*, Vol. 1, No. 1, pp. 1–17.
- Palmer, J., Reddemann, M.A., Kirsch, V., Kneer, R., 2016: "Temperature measurements of micro-droplets using pulsed 2-color laser-induced fluorescence with MDR-enhanced energy transfer", *Experiments in Fluids*, Vol. 57, No. 12, pp. 1–14.
- Perrin, L., Castanet, G., Lemoine, F., 2015: "Characterization of the evaporation of interacting droplets using combined optical techniques", *Experiments in Fluids*, Vol. 56, No. 2, pp. 1–16.
- Prenting, M.M., Bin Dzulfida, M.I., Dreier, T., Schulz, C., 2020: "Characterization of tracers for two-color laser-induced fluorescence liquid-phase temperature imaging in sprays", *Experiments in Fluids*, Vol. 61, No. 3, pp. 1–15.
- Schulz, C., Sick, V., 2005: "Tracer-LIF diagnostics: quantitative measurement of fuel concentration, temperature and fuel/air ratio in practical combustion systems", *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 31, No. 1, pp. 75–121.
- Zheng, L., Zhi, M., Chan, Y., Khan, S.A., 2018: "Multi-color lasing in chemically open droplet cavities", *Scientific Reports*, Vol. 8, No. 1, pp. 14088.