

Anwendung laserinduzierter Zweifarben-Fluoreszenzspektroskopie auf „Green Solvent“ Tropfen aus Wasser und Ethanol

Application of two-color laser-induced-fluorescence on "green solvent" droplets containing water and ethanol

Hannah Ulrich^{1,2}, Richard Weiß¹, 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, Gemischzusammensetzung, Fluoreszenz, Green Solvents
Thermometry, 2-color LIF, Dyes, Mixture Composition, Fluorescence, Spectroscopy

Zusammenfassung

Dieses Paper konzentriert sich auf Zweifarben Laser-induzierte Fluoreszenz (2c-LIF) Messungen in Ethanol, Wasser und deren Mischungen. Fluorescein-Disodium (FL) und Sulforhodamin 101 (SRh) werden auf deren Absorptions- und Emissionsverhalten in verschiedenen Ethanol/Wasser Mischungen untersucht. Das Farbstoffpaar wurde vorgeschlagen für die Thermometrie in Wasser von Chaze et al. (Chaze et al. 2016). Die Absorptionsspektren der Farbstoffmischung werden bei Temperaturen von 293 K bis 343 K mit einem Spektralphotometer gemessen, wodurch Daten zur temperaturabhängigen Absorption und auch zu Reabsorptionseffekten gewonnen werden. Die Fluoreszenz wird spektral und mit einem Kamerasystem analysiert. Ein Fokus ist die Messung in kleinen Tropfen unter 50 µm und damit die Bestimmung des Detektionslimits des spektralen Detektionssystems. Dabei wird außerdem die Anwendung der Messtechnik auf verschiedene Lösungsmittelgemischen untersucht. Der Einsatz von 2c-LIF zur Untersuchung der Zusammensetzung der Ethanol/Wasser Mischungen wird bewertet.

Einleitung

Um mehr Nachhaltigkeit in der Industrie zu erreichen, ist die Verwendung von sogenannten „green solvents“ in vielen technischen Anwendungen entscheidend. Wasser und Ethanol ersetzen komplexere Lösungsmittel und weisen Vorteile wie eine ökologische Herstellung, Wiederverwendbarkeit oder biologische Abbaubarkeit auf. Beide Flüssigkeiten werden in verschiedenen industriellen Bereichen eingesetzt, von der Verwendung als Zusatzstoffe in Biokraftstoffen über Kühlmittel bis hin zu Lösungsmitteln für die Extraktion in der pharmazeutischen, medizinischen oder Lebensmittelindustrie. Eine wichtige Variable bei diesen industriellen Prozessen ist die Flüssigphasen-Temperatur. Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt auf der Zweifarben laserinduzierten Fluoreszenz in Ethanol, Wasser und deren Mischungen. Aufbauend auf der bisherigen Arbeit der Autoren wird das Detektionslimit in Tropfen mit Größen unter 50 µm untersucht (Ulrich et. al, 2023). Zusätzlich wird die Messmethode hinsichtlich der Anwendbarkeit zur Bestimmung der Gemischzusammensetzung erprobt.

Die Flüssigphasenthermometrie mittels 2c-LIF erfordert eine Auswahl geeigneter Fluoreszenzfarbstoffe im Hinblick auf Löslichkeit, Temperaturempfindlichkeit und die Wechselwirkung zwischen den Farbstoffen selbst. Eine Mischung aus einem temperaturempfindlichen und einem temperaturunempfindlichen Farbstoff wird verwendet, um eine möglichst große Temperatursensitivität des Signalverhältnisses zu erreichen. In dieser Arbeit werden zwei Farbstoffe - Fluorescein Natriumsalz (FL) und Sulforhodamin 101 (SRh) - hinsichtlich ihres Absorptions- und Emissionsverhaltens in verschiedenen Lösungsmittelmischungen analysiert. Die Absorptionsspektren der gelösten Farbstoffmischung werden mit einem Spektralphotometer bei Temperaturen von 293 K bis 343 K gemessen. Es werden Informationen über die temperaturabhängige Absorption der einzelnen Farbstoffe, sowie zu Reabsorptionseffekten in der Farbstoffmischung gewonnen. Zusätzlich wird die Fluoreszenzemission der Mischungen spektral und mit einem Kamerasystem analysiert. Dabei werden ein fasergekoppeltes Spektrometer und ein bildgebendes System mit zwei sCMOS-Kameras, die mit einem „Long Distance“ Mikroskop (LD) ausgestattet sind, eingesetzt. Es erfolgt eine simultane Detektion des Signals der temperierten Lösungen in einer monodispersen Tropfenkette. Die vorliegende Veröffentlichung gibt einen Überblick über Kalibrierungsdaten und spektroskopische LIF-Messungen in der Tropfenkette, während eine detaillierte Beschreibung in (Ulrich et al. EXIF 2024, eingereicht) gegeben wird.

In dieser Arbeit wird eine Untersuchung von Tropfen mit Größen zwischen 30 μm und 50 μm für verschiedene Lösungsmittelgemische durchgeführt. Anhand dieser Messungen wird die Detektionsgrenze des Messsystems bestimmt und diskutiert. Um den möglichen Einfluss unterschiedlicher Tropfengrößen auf die Ergebnisse zu bestimmen, werden mithilfe einer zusätzlichen Studie Ethanoltröpfchen von 30 μm bis 120 μm vermessen. Durch einen Vergleich der entsprechenden Kalibriergeraden kann ein Einfluss der Tropfengröße ausgeschlossen werden. Die Nutzung der vorgeschlagenen Farbstoffe zur Thermometrie in verschiedenen Ethanol/Wasser Gemischen wird untersucht. Hierzu dienen neben temperaturabhängigen Emissionsmessungen auch Untersuchungen des Absorptionsverhaltens. Das verwendete Farbstoffpaar wurde von Chaze et al. für die Thermometrie in millimetergroßen Wassertropfen genutzt, die auf einer heißen Oberfläche auftreffen (Chaze et al. 2017). Dieselbe Farbstoffmischung wurde von Collignon et al. für die Thermometrie in wellenförmigen Flüssigkeitsfilmen übernommen (Collignon et al. 2021). Frühere Arbeiten präsentierten die Thermometrie in relativ großen Einzeltropfen im Bereich von 0,5 mm bis 1 mm (Volkov und Strizhak 2020). Nur wenige weitere Arbeiten befassen sich mit der Thermometrie in einzelnen μm -großen Tropfen. Palmer et al. untersuchten beispielsweise Temperaturverteilungen in Tropfen mit einem Durchmesser von 67 μm (Palmer et al. 2016). In unserer vorherigen Arbeit wurde das Farbstoffpaar FL und SRh für die Kalibrierung der Temperatur sowie für Untersuchungen der Erwärmung und Kühlung von Tropfen verwendet. 100 μm große Ethanol Tropfen wurden dafür in einer monodispersen Tropfenkette untersucht (Ulrich et al. 2023). Anhand der gemessenen Emissionsspektren wird außerdem die Anwendbarkeit von 2c-LIF zur Bestimmung der Zusammensetzung von Ethanol/Wasser-Gemischen diskutiert. Bisher wurden Fluorophore selten in Tropfen für die Analyse ihrer Zusammensetzungen eingesetzt. Koegl et al. nutzten Nilrot zur Messung von Isooktan/Ethanol-Mischungen (für Ethanol Anteile zwischen 0 Vol% und 100 Vol%) mit einem 2c-LIF-Konzept (Koegl et al. 2022). Maqua et al. wandten 3c-LIF mit Rhodamin B für Thermometrie in binären Ethanol/Aceton Tropfen unterschiedlicher Zusammensetzungen an (Maqua et al. 2006). Bisher gibt es jedoch keine LIF-Technik zur Untersuchung von binären Ethanol/Wasser-Mischungen. Andere Diagnostiken zur Bestimmung von Tropfenzusammensetzungen, die auf Lichtstreuung basieren (Raman, Rainbow-Refraktometrie etc.) werden in der Übersicht von Lemoine und Castanet beschrieben (Lemoine und Castanet 2013).

Messtechnik und Methodik

Die Messungen für die aktuelle Arbeit wurden vorwiegend mit einem spektralen Aufbau durchgeführt. Mit diesem wird die Fluoreszenz einer Mischung aus Farbstoffen und Lösungsmittel in einer Tropfenkette detektiert. Dabei werden die weit verbreiteten Lösungsmittel Wasser und Ethanol, sowie deren Mischungen untersucht. Für eine vereinfachte Ausdrucksweise des jeweils untersuchten Fluids, wird die Lösungsmittelmischung nach ihrem Ethanol Anteil bezeichnet. Somit wird reines Wasser als EtOH0 und reines Ethanol als EtOH100 benannt. Den Lösungsmitteln wird eine Mischung aus zwei fluoreszierenden Farbstoffen, $750 \text{ mg}_{\text{FL}}/\text{l}$ und $75 \text{ mg}_{\text{SRH}}/\text{l}$ beigemischt. Die Verwendung eines Zwei-Farbstoff LIF Ansatzes bietet viele Vorteile für spektrale Untersuchungen. Durch die Auswahl von Farbstoffen mit gegensätzlich temperaturabhängigem Verhalten kann eine höhere Temperatursensitivität des Intensitätsverhältnisses erreicht werden. Dies liegt daran, dass das breite Spektrum der Farbstoffmischung mehr Möglichkeiten bietet, ausgewählte Farbkanäle zur Bildung des Intensitätsverhältnisses zu nutzen. Störende Lasing Effekte, die in den relevanten, temperatursensitiven Wellenlängenbereichen auftreten, können durch die Kombination der beiden Farbstoffe in andere Wellenlängenbereiche verschoben werden. Die beobachteten Strukturen innerhalb des Tropfens (siehe auch Abb. 2 rechts) sind MDR (Morphology-Dependent Resonances). Sie entwickeln sich an der Phasengrenze sphärischer Tropfen, die als optischer Resonator wirken. Weiterhin wird der Einfluss der Flüssigkeitsverdampfung und dem entsprechend unterschiedlichen Absorptionsverhalten auf das Intensitätsverhältnis durch die Verwendung eines Farbstoffpaares minimiert. Das Massenverhältnis der im Tropfen verbleibenden Farbstoffe wird durch die Verdampfung des Lösungsmittels nicht beeinflusst.

Im Versuchsaufbau erzeugt ein gepulster Nd-YAG Laser (Q-SMART 850, Quantel) einen Laserstrahl mit 8 mm Strahldurchmesser bei 532 nm. Mit einer Frequenz von 10 Hz wird der Strahl durch einen Strahlteiler geleitet. Anhand des abgespaltenen Anteils wird die Laserleistung gemessen und die Laserfluenz auf $2,4 \text{ mJ}/\text{cm}^2$ reguliert. Anschließend trifft der Strahl auf die Tropfenkette, die von einem piezoelektrischen Tropfengenerator (FMAG 1520, TSI) erzeugt wird. Zur Größenkalibrierung und Veranschaulichung der Tropfen in beiden Farbkanälen ist ein Kamerasystem im 90° -Winkel zum Laserstrahl verbaut. Die von den Tropfen emittierte Fluoreszenz wird durch ein Mikroskop auf zwei sCMOS-Kameras (Imager, LaVision) geleitet. Diese sind jeweils mit dem entsprechenden Bandpassfilter ausgestattet. Die in dieser Arbeit betrachteten Messdaten werden jedoch mit dem spektralen Detektionssystem aufgenommen, das orthogonal zum Laserstrahl positioniert ist. Eine Fasereinkopplung ermöglicht die Erfassung der lichtschwachen Fluoreszenzemission mit einem VIS-Spektrometer (WP-VIS-A-S-50, Wasatch Photonics).

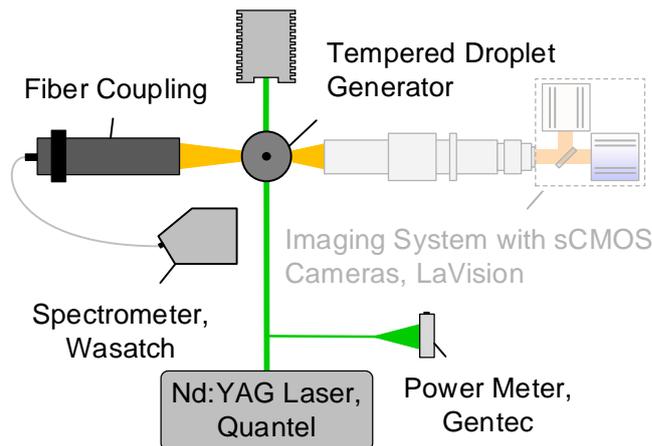


Abb. 1: Schematische Darstellung des Messaufbaus um den temperierten Tropfengenerator.

Ein Vergleich der Signalintensitätsverhältnisse berechnet aus Emissionsspektren und den detektierten Bildern des Kamerasystems liefert nahezu dieselben Ergebnisse (Ulrich et al. 2023). Dabei ermöglicht die spektrale Detektion eine vereinfachte und zeiteffiziente Datenanalyse, wobei nur wenig Speicherplatz und Aufbaufläche benötigt werden. Für jede Messung werden fünf Spektren mit einer Integrationszeit von jeweils 50 ms aufgezeichnet, die aus 100 zeitlich gemittelten Einzelspektren bestehen. Die Daten werden mit einer Hintergrundsubtraktion und Basislinienanpassung bearbeitet. Anschließend werden die Spektren gemittelt und ein Verhältnis der Intensitätssignale beider Farbkanäle gebildet.

Zusätzlich zu den Emissionsmessungen werden Untersuchungen des Absorptionsverhaltens durchgeführt. Dazu werden mit einem UV/VIS-Spektrophotometer (V-750, Jasco) temperaturabhängige Absorptionsspektren in einer Küvette aufgezeichnet. Aufgrund der großen Pfadlänge in der Küvette muss die Konzentration der Farbstoffe im Lösungsmittel verringert werden. Die untersuchten Mischungen enthalten jeweils 50 mg_{FL}/l und 5 mg_{SRh}/l.

Ergebnisse

Die vorgestellten Messungen untersuchen mikrometrische Tropfen in einem Größenbereich bis 30 µm. Hiermit soll das Größenlimit der Tropfen analysiert werden, bis zu dem die Signaldetektion für eine Temperaturmessung in den Tropfen möglich ist. Darüber hinaus wird die Anwendung der Zwei-Farbstoff 2c-LIF Technik auf verschiedene Ethanol/Wasser-Gemische untersucht und diskutiert.

Durch Anpassung des Fluidmassenstroms und der Frequenz des Tropfenerzeugers können Tropfengrößen von 30 µm bis 120 µm erzeugt werden. Das Fluoreszenzsignal von unterschiedlich großen Tropfen wird spektral aufgezeichnet, um den Einfluss der Tropfengröße auf MDR und auch das Signalverhältnis zu analysieren. Auf das SRh-Signalmaximum normierte Fluoreszenzspektren unterschiedlicher Tropfengrößen sind in Abbildung 2 dargestellt. Ohne Normierung kann eine starke Tropfengrößen-Abhängigkeit der Signalintensität beobachtet werden, wie es aufgrund der d^3 -Abhängigkeit erwartet wird. Während die 120 µm großen Tropfen ein Spektrum mit maximalen Intensitäten von etwa 2150 Counts zeigen, wird bei den kleinen Tropfen (30 µm) nur eine geringe Emission von etwa 25 Counts detektiert. In den Spektren sind drei Maxima bei ca. 530 nm (durch einen Notch-Filter blockiert), bei 595 nm und ein drittes Maximum bei etwa 650 nm ersichtlich. Die ersten beiden Maxima basieren auf den Spektren der beiden Farbstoffe - FL bei niedrigeren Wellenlängen und SRh bei höheren Wellenlängen.

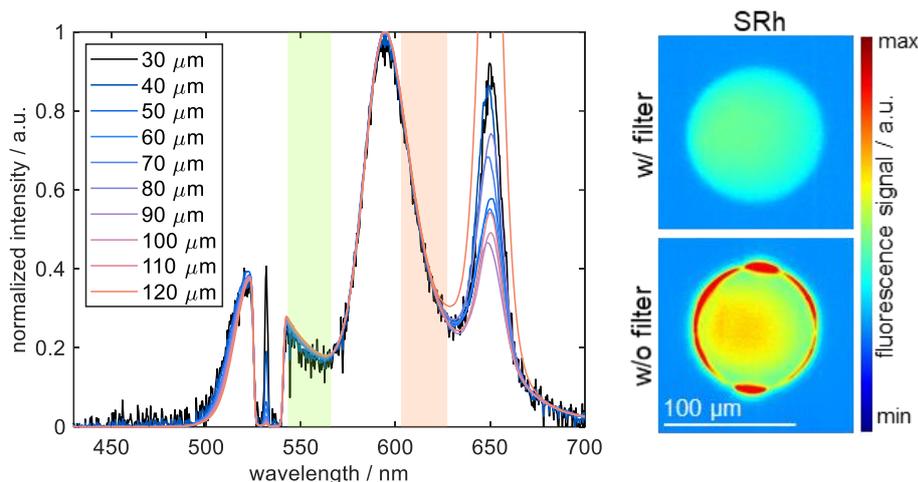


Abb. 2: Links: Normierte Fluoreszenzsignale des Farbstoffpaars in Ethanol-Tropfen unterschiedlicher Größe bei 293 K. Die Messungen erfolgen 4 mm unterhalb der Düse. Rechts: Tropfenbilder der Fluoreszenzsignale über 588 nm (Cut-off des dichroitischen Filters vor den Kameras). Im oberen Bild ist ein zusätzlicher Bandpass-Filter vor der Kamera verbaut (im Spektrum links rot schattiert).

Das dritte Maximum ist auf MDR-Effekte zurückzuführen. Diese MDR-Effekte sind im unteren Bild auf der rechten Seite in Abbildung 2 zu erkennen. Im Vergleich zum oberen Bild befindet sich kein Bandpassfilter vor der Kamera und alle Wellenlängen über 588 nm, einschließlich des Lasing-Signals, werden detektiert. In der Analyse der Spektren kann kein Einfluss der Tropfengröße auf die Position des MDR-Peaks festgestellt werden. Kalibrierkurven, die aus temperaturabhängigen Signalverhältnissen resultieren, zeigen eine vergleichbare Temperaturempfindlichkeit von 1,5 %/K für alle untersuchten Tropfengrößen. Daher wird die Anwendbarkeit des 2c-LIF-Ansatzes für die Thermometrie in Prozessen mit einer polydispersen Tropfenverteilung, wie z.B. Sprays, angenommen. Darüber hinaus reicht das geringe Signal, das in Tropfen unter 50 μm detektiert wird, aus, um die Spektren ohne Informationsverlust auswerten zu können.

In Abbildung 3 sind die Absorptionsspektren des Farbstoffpaars in Ethanol und Wasser bei 283 K und 343 K dargestellt. Die Spektren zeigen zwei Maxima, die jeweils einem der Farbstoffe zugehören. Der erste Peak, sichtbar bei Wellenlängen von 410 nm bis 540 nm, ist hauptsächlich auf das Absorptionsspektrum von FL zurückzuführen. Zusätzlich absorbiert SRh Licht in einem Wellenlängenbereich von 555 nm bis 610 nm. Bei 283 K ist die Absorption von FL in Wasser höher, während der Peak im Vergleich zu Ethanol blauverschoben ist. Dies könnte eine mögliche Erklärung für niedrigere Emissionssignale in Wasser sein. Bei höheren Temperaturen steigt die Absorption von FL sowohl in Ethanol als auch in Wasser. In Ethanol ist ein starker Anstieg bei Temperaturerhöhung sichtbar, wobei die Absorption bei 343 K größer als in Wasser ist. Das Absorptionsverhalten des zweiten Farbstoffs, SRh, unterscheidet sich von dem von FL. Eine verringerte Absorption kann bei steigender Temperatur beobachtet werden. Im Gegensatz zur FL-Absorption zeigt das SRh-Spektrum in Wasser eine Rotverschiebung im Vergleich zum Spektrum in Ethanol. Dadurch wird weniger Laserlicht von SRh in Wasser absorbiert, was wiederum zu einem niedrigeren Emissionssignal beiträgt.

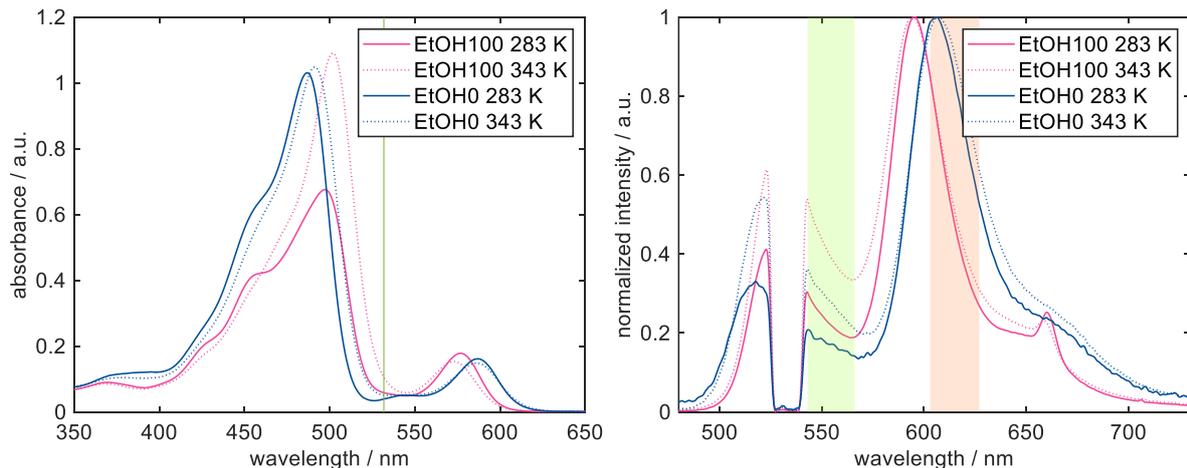


Abb. 3: Links: Absorptionsspektren der Farbstoffmischung in Wasser und in Ethanol, jeweils bei unterschiedlichen Temperaturen. Die Laser-Anregungswellenlänge 532 nm ist mit grün markiert. Rechts: Fluoreszenzspektren, gemessen in 100 μm großen Ethanol und Wassertropfen bei unterschiedlichen Temperaturen. Die schattierten Flächen stellen die Farbkanäle da, deren Signale für die Berechnung des Signalverhältnisses genutzt werden.

Das rechte Diagramm in Abbildung 3 zeigt normierte Fluoreszenzspektren, die bei einer Tropfengröße von 100 μm in der Tropfenkette gemessen wurden. Der Messort befand sich 4 mm unterhalb der Düse des Tropfengenerators. Aufnahmen von temperierten Ethanol- und Wassertropfen werden bei 283 K und 343 K gezeigt. Ähnlich wie bei den Absorptionsspektren zeigt der FL-Peak in Wasser eine Blauverschiebung und der SRh-Peak eine Rotverschiebung im Vergleich zu Spektren der Ethanol-Tropfen. Für beide Flüssigkeiten ist bei erhöhter Temperatur ein Signalanstieg im ersten Farbkanal sichtbar. Die Temperaturabhängigkeit im zweiten Farbkanal ist nur marginal. Dadurch ist in beiden Lösungsmitteln, sowie in binären Ethanol/Wasser-Mischungen, eine ausreichende Temperaturempfindlichkeit für 2c-LIF zu erkennen.

Da in den Spektren eine zusätzliche Lösungsmittelabhängigkeit sichtbar ist, wird die Anwendungsmöglichkeit des 2c-LIF-Ansatzes zur Bestimmung von Mischungsverhältnissen untersucht. Abbildung 4 zeigt im linken Diagramm die normierte Fluoreszenzemission sechs unterschiedlicher Lösungsmittelzusammensetzungen von reinem Ethanol (EtOH100) bis zu reinem Wasser (EtOH0). Alle Spektren werden in 50 μm großen Tropfen bei 293 K aufgezeichnet und auf das Maximum des SRh-Spektrums normiert. Das niedrigste Signal wird in der Farbstofflösung in Wasser detektiert. Dies kann durch die geringere Absorption der Farbstoffe in Wasser bei einer Anregungswellenlänge von 532 nm erklärt werden, wie oben genauer beschrieben. Um die Zusammensetzungsabhängigkeit des 2c-LIF-Verhältnisses zu analysieren, werden dieselben Farbkanäle wie für die Thermometrie verwendet. Die gegensätzlichen Peak-Verschiebungen von FL und SRh mit zunehmendem Ethanol-Gehalt sind für diesen Ansatz günstig. Im rechten Diagramm in Abbildung 4 ist mithilfe der durchgezogenen Linie das resultierende Intensitätsverhältnis dargestellt. Für Ethanol Anteile über 20 Vol% zeigt das Verhältnis eine zuverlässige Abhängigkeit von der Gemisch-Zusammensetzung.

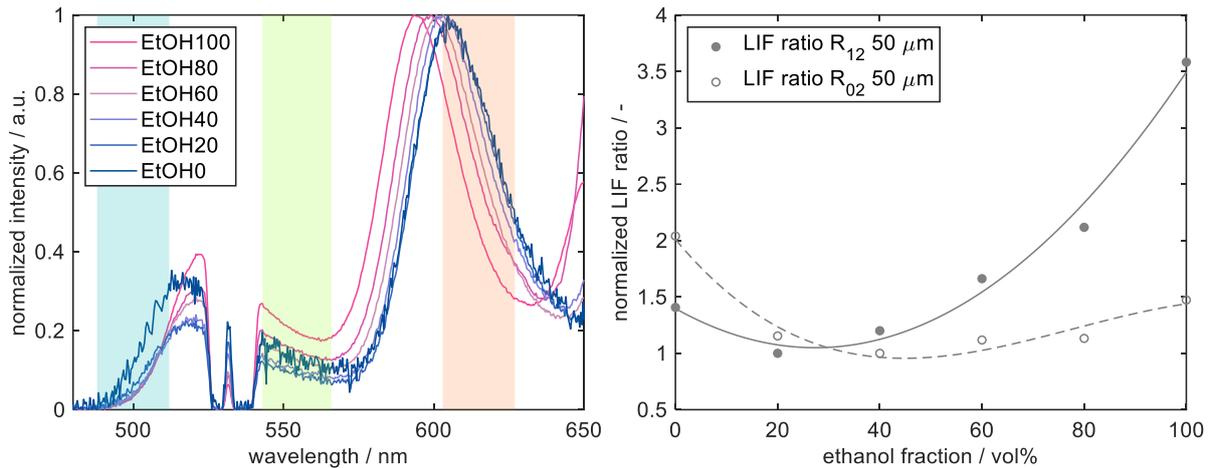


Abb. 4: Links: Fluoreszenzspektren 50 μm großer Tropfen unterschiedlicher Ethanol/Wasser-Mischungen bei 293 K. Die schattierten Bereiche beschreiben die Farbkanäle, in denen die Signale zur Bildung der zusammensetzungsabhängigen Signalverhältnisse bestimmt werden (zentrale Wellenlänge bei 500 nm (Kanal 0), 554 nm (Kanal 1) und 615 nm (Kanal 2)). Rechts: LIF Signalverhältnisse, berechnet aus den Intensitäten aus jeweils zwei Farbkanälen mit zugehöriger Polynomannpassung.

Um anhand des Signalverhältnisses auch niedrigere Ethanol-Anteile bestimmen zu können, wird ein dritter Farbkanal "Kanal 0", basierend auf einem kommerziell erhältlichen Bandpassfilter (500/24 BrightLine HC) festgelegt. Die Methode der 3c-LIF wurde auch von Maqua et al. für PMT-Messungen in Ethanol/Aceton-Gemischen vorgeschlagen (Maqua et al. 2006). Im dritten Wellenlängenbereich (Abb. 4, blau schattiert) ist das Emissionsverhalten von FL sehr sensitiv für niedrige Ethanol Anteile. Mit dem zweiten Farbkanal (rot schattiert) wird ein zweites Signalverhältnis R_{02} gebildet. Das zusätzliche Verhältnis ist im rechten Diagramm durch eine gestrichelte Kurve dargestellt. Für Ethanol-Anteile zwischen 0 Vol% und 40 Vol% wird eine starke Zusammensetzungsabhängigkeit des Verhältnisses festgestellt. Um eine eindeutige Zuordnung eines Ethanol-Gehalts zu erhalten, müssen beide Signalverhältnisse bestimmt werden.

Zusammenfassung und Ausblick

Diese Arbeit präsentiert die Anwendung eines Zwei-Farbstoff 2c-LIF-Ansatzes für die Thermometrie in einer Tropfenkette mit Tropfengrößen bis 30 μm . Ein Spektrometer-Aufbau wurde zur Detektion des Farbstoffpaares FL und SRh in Ethanol/Wasser-Mischungen verwendet. Für die Größenkalibrierung und Einblicke in das Tropfenverhalten wurde zusätzlich ein Kamerasystem genutzt. Eine Tropfengrößenstudie wurde für Ethanol Tropfen mit Größen zwischen 30 μm und 120 μm durchgeführt. Da Fluoreszenzsignale eine d^{β} -Abhängigkeit zeigen, wurde eine Nachweisgrenze des 2c-LIF-Ansatzes erwartet. Beim Vergleich der temperaturabhängigen Signalverhältnisse in unterschiedlich großen Tropfen konnte kein Einfluss der Tropfengröße und auch keine größenabhängigen MDR-Effekte festgestellt werden. Selbst die niedrigen Signale der kleinen Tropfen führten zu einem ähnlichen Signalverhältnis und auch zu einer vergleichbaren Temperatursensitivität des Verhältnisses.

Die Anwendung des 2c-LIF-Ansatzes wurde zudem in verschiedenen Zusammensetzungen von Wasser und Ethanol getestet. Die Absorptionsspektren der Flüssigkeiten bieten Erklärungen für die niedrigeren Signale in Wassertropfen. Beide Farbstoffe, FL und SRh, zeigen in Wasser eine spektrale Verschiebung weg von der Laserlinie bei 532 nm im Vergleich zu Ethanol. Neben der Verwendung zur Thermometrie wurde 2c-LIF für Messungen der Zusammensetzung von Ethanol/Wasser-Mischungen in Betracht gezogen. Eine zusammenset-

zungsabhängige Kalibrierungskurve wurde unter Verwendung der gleichen Farbkanäle wie beim Thermometrie Ansatz erstellt. Da das Signalverhältnis nur in Mischungen mit Ethanolanteil über 20 Vol% sensitiv ist, wurde ein dritter Farbkanal für die Bildung eines zweiten Signalverhältnisses ausgewählt. Dieser 3c-LIF-Ansatz ermöglicht mit der Bestimmung beider Verhältnisse eine eindeutige Zuordnung der Mischungszusammensetzung aus detektierten Spektren.

Die Kombination beider Methoden, des 2c-LIF-Thermometrieansatzes und 3c-LIF zur Untersuchung der Tropfen-Zusammensetzung, würde enorme Vorteile für die Untersuchung von Lösungsmittelgemischen bieten. Darüber hinaus würden Studien des Farbstoffpaares in anderen Lösungsmitteln (und deren Mischungen) wie Propanol, Butanol und Wasser mit unterschiedlichem pH-Wert den Anwendungsbereich erweitern.

Dankesworte

Die Autoren bedanken sich für die Unterstützung der Erlanger School of Advanced Optical Technologies (SAOT) des Bayrischen Staatsministeriums für Wissenschaft und Kunst. Wir sind der Universität der Bundeswehr München dankbar für den finanziellen Support.

Literatur

- 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*, 57(4), 1–18. <https://doi.org/10.1007/s00348-016-2142-8>
- 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*, 58(8), 1–16. <https://doi.org/10.1007/s00348-017-2375-1>
- Collignon R, Caballina O, Lemoine F, Castanet G** (2021) Temperature distribution in the cross section of wavy and falling thin liquid films. *Experiments in Fluids*, 62(5). <https://doi.org/10.1007/s00348-021-03175-x>
- Koegl M, Dai H, Baderschneider K, Ulrich H, Zigan L** (2022) Polarization-dependent LIF/Mie ratio for sizing of micrometric ethanol droplets doped with Nile red. *Applied Optics*, 61(14), 4204–4214. <https://doi.org/10.1364/AO.457685>
- Lemoine F, Castanet G** (2013) Temperature and chemical composition of droplets by optical measurement techniques: A state-of-the-art review. *Experiments in Fluids*, 54(7), 1–34. <https://doi.org/10.1007/s00348-013-1572-9>
- Maqua C, Castanet G, Lemoine F, Doué N, Lavergne G** (2006) Temperature measurements of binary droplets using three-color laser-induced fluorescence. *Experiments in Fluids*, 40(5), 786–797. <https://doi.org/10.1007/s00348-006-0116-y>
- Palmer J, Reddemann MA, 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*, 57(12), 1–14. <https://doi.org/10.1007/s00348-016-2253-2>
- Ulrich H, Sigl S, Möhnle M, Berrocal E, Zigan L** (2023) Droplet thermometry based on an optimized two dye two-color laser-induced fluorescence concept. *Frontiers in Physics*, 11. <https://doi.org/10.3389/fphy.2023.1235847>
- Volkov RS, Strizhak PA** (2020) Using Planar Laser Induced Fluorescence to determine temperature fields of drops, films, and aerosols. *Measurement*, 153. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107439>