

Filmtemperatur- und Filmdickenbestimmung eines Prallkühlungsprozesses für elektrische Anwendungen basierend auf der laserinduzierten Fluoreszenz

Determination of the film temperature and thickness of an impingement cooling process for electric applications based on laser-induced fluorescence

M. Koegl^{1,*}, Nikita Mil'to¹, L. Zigan^{1,2}

¹ Institut für Thermodynamik, Professur für Energiewandlung, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik, Universität der Bundeswehr München (UniBw M), D-85577 Neubiberg, Deutschland

² Erlangen Graduate School in Advanced Optical Technologies (SAOT), Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU), D-91052 Erlangen, Deutschland

* Kontakt: matthias.koegl@unibw.de

Prallkühlung, laserinduzierte Fluoreszenz, Filmtemperatur, Filmdicke, Nilrot

Impingement cooling, laser-induced fluorescence, film temperature, film thickness, Nile red

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit charakterisiert einen Prallkühlungsprozess, wie er bei der Kühlung elektrischer Komponenten auftreten kann. Eine beheizbare zylindrische Stirnfläche ($\varnothing = 15$ mm) wird hierzu zentrisch von einem Ölstrahl ($\varnothing = 1$ mm, $Re = 508$, $Pr = 48.7$) getroffen. Der ausgebildete Ölfilm sorgt dabei durch Wärmeaufnahme für eine Kühlung der beheizten Festkörperoberfläche.

Sowohl die Filmtemperatur als auch die Filmdicke wurden simultan mit Hilfe einer laserbasierten 2-Farbenmessmethode basierend auf der Fluoreszenzspektroskopie bestimmt. Das Wärmeträgeröl Marlotherm LH wurde zu diesem Zweck mit dem temperatursensitiven Fluoreszenzfarbstoff Nilrot versetzt. Die spektralen Untersuchungen erfolgten mit einem UV-VIS Spektrometer, die bildgebende Temperaturbestimmung erfolgte über zwei Kameras in Kombination mit ausgewählten Bandpassfiltern. Spektrale Voruntersuchungen des Öl-Farbstoffgemisches wurden zunächst durchgeführt, um mögliche Farbstoffkonzentrationsgrenzen aufzuzeigen.

Vor den eigentlichen Untersuchungen des Prallkühlprozesses wurde der Einfluss der Filmdicke und Temperatur auf das Fluoreszenzsignal sowohl spektral als auch bildgebend untersucht in einem Kalibrierlaufbau. Dabei wurden zunächst der Einfluss der Farbstoffkonzentration bei unterschiedlichen Filmdicken als auch der Einfluss der Festkörpertemperatur (bzw. 3 mm unterhalb der Wandoberfläche) mit Hilfe eines separaten Aufbaus untersucht. Die Untersuchungen bei konstanter Filmtemperatur zeigten eine Filmdickenabhängigkeit bei hohen Farbstoffkonzentrationen durch auftretende Reabsorptionseffekte, welche zu einer Wellenlängenverschiebung mit zunehmender Filmdicke in Richtung höherer Wellenlängen führen.

Die Untersuchungen des Prallkühlprozesses wurden daher bei geringer Farbstoffkonzentration und bei konstanter Öltemperatur und Ölmassenstrom und variierender Festkörpertemperatur durchgeführt. Mit zunehmender Festkörpertemperatur erhöht sich die Filmtemperatur auf Grund des hohen Temperaturgradienten mit zunehmendem Abstand zum Aufprallpunkt des

Jets. Die mit zunehmender Filmtemperatur abnehmende Viskosität des Ölfilms führt dabei zu einer radialen Abnahme der Filmdicke bei hohen Festkörpertemperaturen.

Einleitung

Aus unserem Alltag sind elektrische und elektronische Geräte/Systeme sowie Leistungselektronik nicht mehr wegzudenken. Viele Bereiche (Industrie, Luftfahrt, Automotive, Energie etc.) sind regelrecht darauf angewiesen. Eine Optimierung dieser Systeme hat meist das Ziel die Baugröße bei gleichzeitiger Leistungssteigerung zu verkleinern. Dieses Ziel ist meist nur durch effektive Wärmemanagementsysteme erreichbar, bei denen die hohen Wärmeströme effektiv abgeführt werden können und eine homogene Temperaturverteilung der Komponenten erreicht werden kann. Eine sehr kompakte und effiziente Kühlung wird meist durch Prall oder Spraykühlung erreicht (Labergue et al., 2015). Hierbei trifft ein Strahl auf eine heiße Oberfläche auf, der dabei entstehende Flüssigkeitsfilm sorgt für eine starke Wärmeabfuhr.

Bisher haben sich nur einige wenige Studien mit der simultanen Detektion der Filmdicke und Filmtemperatur derartiger Prozesse beschäftigt. Schagen et al. untersuchten die Filmdicke und Temperatur eines laminaren, welligen Wasserfilms (Wasser versetzt mit Biacetyl). Die vorgestellte Messtechnik basiert darauf, dass Biacetyl bei UV-Anregung sowohl Fluoreszenz- als auch Phosphoreszenzstrahlung emittiert (Schagen et al., 2006). Hierbei wurde die lokale Filmdicke mit der Fluoreszenz und die Temperatur mit der Phosphoreszenz bestimmt. Borgetto et al. untersuchten die Filmtemperatur und Dicke eines flüssigen Heptanfilms entlang einer Wand mit einer Interferenzmesstechnik. Die Messtechnik zeigte einige Einschränkungen: die minimale Filmdicke wird über die Kohärenzlänge der Lichtquelle ($20 \mu\text{m}$ @ 1310 nm) und der Einfluss von Oberflächenwellen begrenzt. Huang et al. untersuchten das Temperaturprofil und die Dicke eines Schmierfilms während eines Bearbeitungsprozesses basierend auf der laserinduzierten Fluoreszenz (LIF). Die Autoren verwendeten einen Temperatur-insensitiven (Fluoreszenz Pink) und einen Temperatur-sensitiven Farbstoff (Europium 3 Thenoyltrifluoroacetate (EuTTA) (Huang et al., 2014). Wu et al. untersuchten die Filmdicke und Temperatur eines Wasserfilms mit einer Laserabsorptionsmessmethode. Ihre vorgestellten Ergebnisse zeigten eine gute Übereinstimmung mit Thermoelementmessungen (Temperaturabweichung: 2.0%) und Ultraschall Puls-Echo Messungen (Abweichung der Filmdicke : 3.3%) (Wu et al., 2021). Collignon et al. untersuchten dünne Flüssigkeitsfilme, die eine angestellte beheizte Platte hinunterfließen mit einer Zwei-Farben-Messtechnik basierend auf LIF. Sie bestimmten die Temperatur und Filmdicke des Wasserfilm simultan und quantifizierten den Wärmeübergangskoeffizienten (Collignon et al., 2022).

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der simultanen Bestimmung der Filmdicke und Temperatur eines Prallkühlungsprozesses einer zylindrischen Geometrie basierend auf einer Zwei-Farben-Messtechnik (Voruntersuchungen siehe (Koeogl, Delwig, et al., 2022)). Zu diesem Zweck wurde der Fluoreszenzfarbstoff Nilrot in dem Wärmeträgeröl Marlotherm LH gelöst. Die vorliegende Arbeit gibt einen Überblick über die Kalibration und die planaren LIF Messungen, eine detailliertere Beschreibung ist (Koeogl et al., 2024) zu entnehmen.

Die durchgeführten Untersuchungen sind wie folgt strukturiert: Zunächst werden konzentrationsabhängige spektrale Untersuchungen bei unterschiedlichen Filmdicken durchgeführt. Anschließend wird der Temperatureinfluss bei variable Filmdicke und konstanter Farbstoffkonzentration spektral als auch bildgebend untersucht. Im Anschluss wird die Temperatur und Filmdicke eines Prallkühlungsprozesses bei unterschiedlichen Oberflächentemperaturen ermittelt. Abschließend wird neben einer kurzen Zusammenfassung ein Ausblick auf zukünftige Untersuchungen gegeben.

Experimenteller Aufbau

Für die Untersuchungen wurden zwei Messaufbauten entworfen. Der Messaufbau für die Kalibrierung der Temperatur und Filmdicke ist in Abb. 1, der Aufbau für die Prallkühlung in Abb. 2 dargestellt. Ein Dauerstrich-Laser (Modell: LSR532F-2500, 532 nm, 2,5 W, lasever, China) kommt in beiden Fällen für die Beleuchtung des Messbereichs zum Einsatz. Ein ferngesteuerter Shutter gewährleistet eine Probenbeleuchtung nur während der Messungen und folglich können Photobleichungseffekte so gering wie möglich gehalten werden. Ein Strahlaufler vergrößert den Strahl anschließend um den Faktor 8. Über einen Strahlteiler wird die Laserleistung simultan detektiert (Modell: S425C & PM10D, Thorlabs, USA). Der transmittierte Laserstrahl trifft unter einem Winkel von 75° auf den Messbereich auf. Ein fasergekoppeltes Spektrometer (Modell: Maya 2000-Pro, Ocean Optics, USA, Wellenlängenbereich: 200,5-1120,4 nm, Pixel: 2048, Spaltgröße 25 μm , Integrationszeit: 100 ms, 20 aufeinander folgende Spektren werden für jede Messung gemittelt) mit einer Detektionsoptik und einem Kamerasystem (für weitere Details siehe (Koegl et al., 2024)) kommen für die Detektion zum Einsatz. Die Detektionsoptik befindet sich 100 mm über dem Messbereich und detektiert das Fluoreszenzsignal auf einer Fläche von 10 mm^2 im Zentrum des Films (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

2.1 Kalibriermessaufbau

Die Kalibrierung des Films wurde wie folgt durchgeführt: Um Filme mit unterschiedlicher Dicke zu erzeugen, wurden beheizbare Einsätze mit unterschiedlicher Taschentiefe (0,3 mm – 2 mm) spanend gefertigt. Die Einsätze wurden aus demselben Material wie die zylindrische Oberfläche des Prallkühlungsmessaufbaus (Aluminium 7075, gleiche Charge) mit der gleichen Oberflächenbehandlung (Sandstrahlen) gefertigt, um eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Das Öl-Farbstoff-Gemisch wird mit einer Spitze in der Tasche platziert. Ein Deckglas (Dicke: 0,16 mm) in Kombination mit einem Metallring sorgt für eine konstante Dicke des Flüssigkeitsfilms. Ein kleines Thermoelement (Typ K, Durchmesser: 0,25 mm, tc-direct, Kitzingen, Germany; Messgenauigkeit $\pm 0,3$ K) in der Flüssigkeit stellt gleichbleibende Messbedingungen sicher. Der Flüssigkeitsfilm wird über eine modifizierte Lötstation (Modell WT 1010H, Weller, Besigheim, Germany) beheizt und dessen Temperatur konstant gehalten.

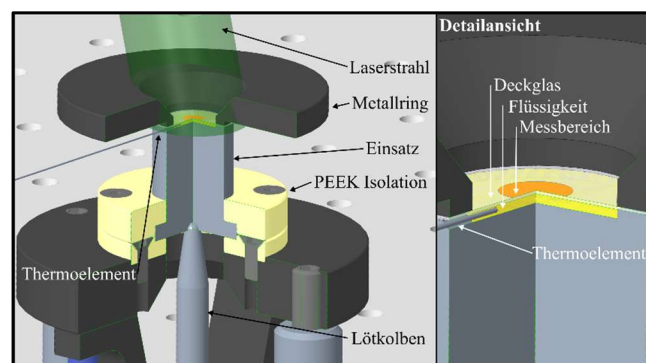


Abb. 1: Optischer Aufbau für spektrale Untersuchungen.

2.2 Prallkühlungsmessaufbau

Der optische Aufbau für die Messungen des Prallkühlungsprozesses ist in Abb. 2 abgebildet. Die Beleuchtung des Messbereichs entspricht der des vorherigen Abschnittes. Anstatt des fasergekoppelten Spektrometers kommt ein Kamerasystem, welches mit einem Mikroskop ausgestattet (Modell: Infinity, Distamax K2, Centennial, CO, USA) ist zum Einsatz. Die zwei Detektionsbänder des LIF Signals werden dabei simultan aufgezeichnet. Die LIF Detektionsbänder werden mit geeigneten Bandpass Filtern (Edmund optics: filter1: 568 nm (#65-221), filter2: 632 nm (#65-166); 10 FWHM) abgebildet, welche in einer vorangegangenen Studie

bereits selektiert wurden (Koegl, Delwig, et al., 2022). Das Öl-Farbstoff-Gemisch wird in einem geschlossenen System (2000 ml Flüssigkeitsvolumen) mit einer steuerbaren Zahnradpumpe (Modell: UP3, Marco s.p.a., Castenedolo, Italy) im Kreis gepumpt. Über einen Bypass fließt das Gemisch durch ein gezogenes Edelstahlrohr (Innendurchmesser: 1 mm), tritt mit 2,03 m/s aus der Düse aus und trifft unter 90° zentral auf die geheizte Zylinderfläche (Durchmesser: 15 mm) auf. Die Oberfläche (Aluminium 7075) wird über eine Heizpatrone (Modell: RS PRO 200W, RS-Components, Frankfurt am Main, Germany) in Kombination mit einem Heizungsregler (Modell: LR 316, Jumo, Fulda, Germany) beheizt. Die Reynolds und Prandtl Zahlen bei 293 K betragen an der Düsenspitze $Re = 508$ und $Pr = 48,7$. Die Stoffeigenschaften des eingesetzten Wärmeträgeröls sind in Tabelle 1 abgebildet.

Die Temperatur T_s des Zylinders wird 1 mm unterhalb der Oberfläche mit einem Thermoelement (Typ K, tc-direct GmbH, Kitzingen, Germany; Messgenauigkeit $\pm 0,3$ K) gemessen und wird im Folgenden als Festkörpertemperatur bezeichnet. Die Oberfläche ist sandgestrahlt, um eine homogene Oberfläche frei von Bearbeitungsspuren und einem gleichmäßigen Reflexionsverhalten sicherzustellen. Die Temperatur des Öl-Farbstoff-Kreislaufs wird über einen Gegenstromwärmetauscher und ein Kälteumlaufthermostat (Modell: CP50, Thermo Fisher Scientific, Waltham, MA, USA) konstant gehalten. Zahlreiche Thermoelemente (type K, tc-direct GmbH, Kitzingen, Germany) an der Düsenspitze, vor der Pumpe und nach dem Wärmetauscher sorgen für die Überwachung und Regelung von konstanten Messbedingungen.

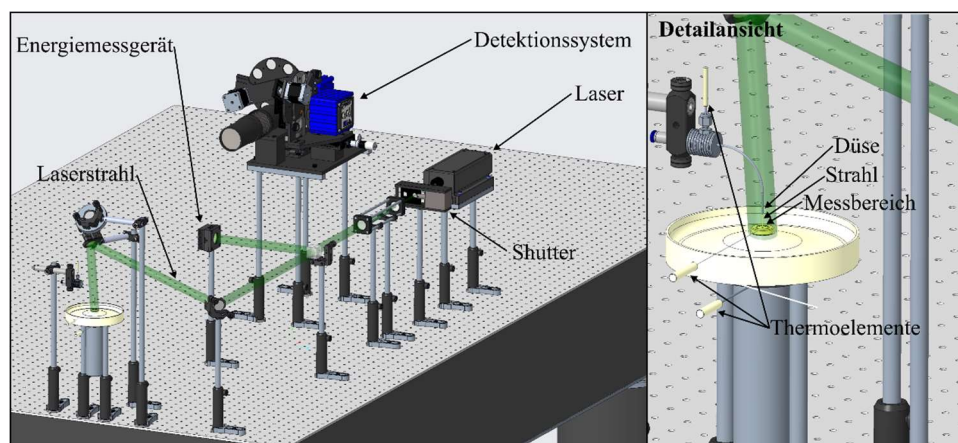


Abb. 2: Optischer Aufbau für die bildgebenden Untersuchungen (links) und Detailansicht des Prallkühlungsaufbaus (rechts).

2.3 Verwendetes Wärmeträgeröl und Farbstoff

In der vorliegenden Studie wird das Emissionssignal des Wärmeträgeröls Marlotherm LH (Sasol Germany GmbH, Hamburg, Germany) in Kombination mit dem Fluoreszenzfarbstoff Nilrot untersucht. Die Stoffeigenschaften von Marlotherm LH sind Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1: Stoffeigenschaften von Marlotherm LH (Eastman chemical company, 2022; McClintock, 2003).

Eigenschaft	Einheit	Marlotherm LH
Dichte	g/cm^3	9,960 (293 K)
Wärmeleitung	$\text{W/(m}\cdot\text{K)}$	0,132 (293 K)
Kinematische Viskosität	mm^2/s	4,00 (293 K)
Spezifische Wärmekapazität	$\text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$	1,614 (293 K)

Der zum Einsatz kommende Farbstoff Nilrot ist in Alkanen als auch in Mehrkomponenten-Kraftstoffen löslich (Durst et al., 2018). Minimal wurde eine Farbstoffmenge von 3,75 mg mit einer Feinwaage (Modell: Mettler Toledo XS 205, geprüfte Wiederholbarkeit 0,05 mg)

abgewogen. Der Farbstoff löste sich dabei vollständig in dem Wärmeträgeröl. Nilrot weist einen Schmelzpunkt von 476 K bis 479 K (Roth, 2019) auf, diese Temperatur liegt weit über der Maximaltemperatur der durchgeführten Messungen. Für die vorliegende Studie wurden Farbstoffkonzentrationen von 0,59 mg/L – 37,5 mg/L untersucht. Die zahlreichen Farbstoffkonzentrationen wurden durch Verdünnung der Ausgangskonzentration erreicht.

2.4 Zwei-Farben-Messtechnik für die Temperaturbestimmung

Die Temperatur des Öl-Farbstoffgemisches kann über das Intensitätsverhältnis r der zwei Detektionskanäle CH1 and CH2 bestimmt werden. Nach der Bestimmung der lokalen Filmtemperatur über das Intensitätsverhältnis r kann die Filmdicke über wahlweise die Intensität von CH1 (wurde hier verwendet) oder CH2 ermittelt werden. In einer vorangegangenen Untersuchung wurden die Intensitätsverhältnisse für den Farbstoff Nilrot in unterschiedlichen Ölen bei einer Konzentration von 9,38 mg/L bestimmt. Die Fit-Parameter und die entsprechenden R^2 Werte können (Koegl, Delwig, et al., 2022) entnommen werden. In der vorliegenden Studie sind die Farbstoffkonzentrationen wesentlich geringer (0,59 mg/L), was zu deutlich reduzierten Reabsorptionseffekten führt. Darüber hinaus wurde ein anderes Detektionssystem verwendet, was eine erneute Berechnung der Fit-Parameter erfordert. Das Intensitätsverhältnis r kann über den Quotienten die beiden Produkte der Transmissionskurven τ der entsprechenden Filter und der spektralen Fluoreszenzemissionen I_{CH1} und I_{CH2} bestimmt werden: (wenn die optischen Wirkungsgrade des optischen Aufbaus (z.B. Kameras) vernachlässigt werden):

$$r = \frac{\sum \tau_{Filter_568nm} \cdot I_{LIF}}{\sum \tau_{Filter_632nm} \cdot I_{LIF}} = \frac{I_{CH1}}{I_{CH2}} \quad (1)$$

Ergebnisse

Der Ergebnisteil ist wie folgt gegliedert: Anfangs werden spektrale Messungen bei variierender Farbstoffkonzentration für unterschiedliche Filmdicken bei konstanter Temperatur durchgeführt. Dabei wird der Einfluss der Filmdicke auf die Spektren hinsichtlich Reabsorptionseffekten untersucht. Anschließend werden die Temperatur und Filmdicke spektral und bildgebend bei geeigneter Farbstoffkonzentration kalibriert. Anschließend wird der Prallkühlungsprozess untersucht und die Temperatur und Filmdicke bei unterschiedlichen Oberflächentemperaturen ermittelt. Die spektralen Ergebnisse werden im sichtbaren Bereich dargestellt (380 nm-780 nm), da dieser Bereich für die Absorption und die Emission von Nilrot relevant ist (Koegl et al., 2019).

3.1 Spektrale Messungen

3.1.1 Filmdickenvariation

Die Emissionsspektren von Nilrot gelöst in Marlotherm LH bei unterschiedlichen Farbstoffkonzentrationen für zahlreiche Filmdicken sind in Abb. 3 dargestellt.

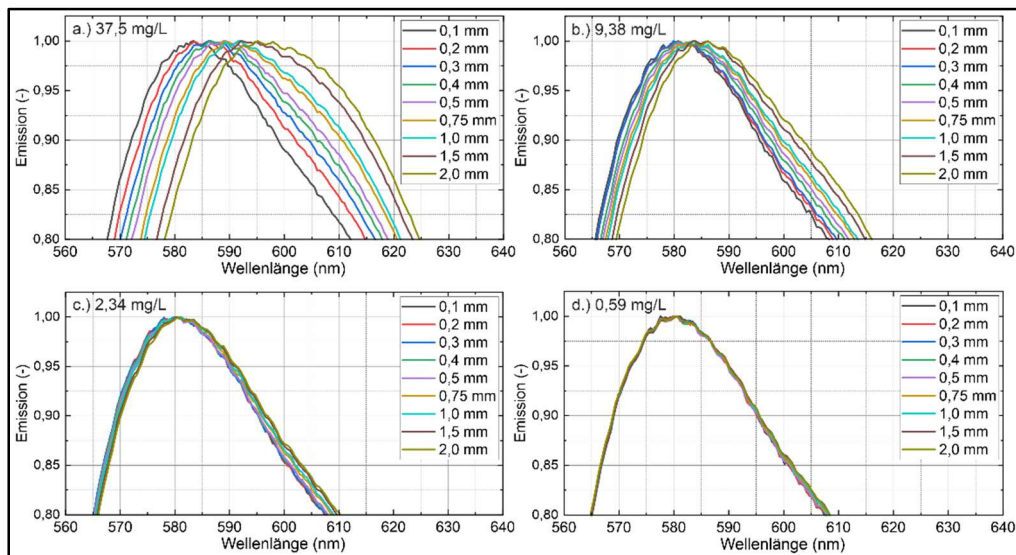


Abb. 3: Normierte Emissionsspektren von Nilrot in Marlotherm bei unterschiedlichen Konzentrationen und Filmdicken, 298 K.

In der Abbildung sind die Bereiche der Maxima vergrößert dargestellt, da die spektrale Verschiebung für die Messgenauigkeit der angewendeten Messtechnik ausschlaggebend ist. Die Messungen zeigten eine spektrale Verschiebung der Maxima und beider Flanken mit zunehmender Filmdicke hin zu höheren Wellenlängen. Dieses Verhalten ist auf Reabsorptionseffekte zurückzuführen, da die Emission bei niedrigen Wellenlängen innerhalb des Absorptionsspektrums liegt und vermutlich zu einer erneuten Anregung des Farbstoffes führt. Eine genauere Untersuchung der Absorption und Emission des eingesetzten Öl-Farbstoff-Gemisches wurde bereits in einer früheren Studie näher beleuchtet (Koeogl, Delwig, et al., 2022). Eine Abnahme der Farbstoffkonzentration führt zu einer Abnahme der filmdickenabhängigen spektralen Verschiebung, da die Reabsorption mit abnehmender Farbstoffkonzentration sinkt. Eine Zwei-Farben-Messtechnik ist nur anwendbar, wenn die temperaturabhängige Wellenlängenverschiebung nicht von der Filmdicke abhängt. Auf der anderen Seite ist eine ausreichende Signalintensität für ein ausreichendes Signal/Rauschen-Verhältnis und damit eine zuverlässige Messung unabdingbar. Hierbei ist eine hohe Bestrahlungsintensität meist von Vorteil. Hohe Bestrahlungsintensitäten können aber zu einer Dissoziation des Farbstoffs (Photobleichung) führen. Daher sind Dauerstrich-Laser gegenüber gepulsten Lasern vorzuziehen. Diese Laser erlauben längere Belichtungszeiten (hier 100 ms), während gepulste Laser meist im Bereich von 6 bis 8 ns liegen. Gegenüber LEDs (30 nm FWHM und größer) verfügen CW-Laser über eine sehr schmalbandige Emission (bis zu 1 nm FWHM für Raman-Laser). Vorangegangene Untersuchungen des selben Öl-Farbstoff-Gemisches wiesen bei 20 minütiger Beleuchtung durch einen ND:YAG Laser keine messbaren Photodissoziationseffekte auf (Koeogl, Delwig, et al., 2022). Der CW-Laser in Kombination mit der hohen Bestrahlungsleistung und Dauer in Kombination mit den geringen Filmdicken des spektralen Messaufbaus führten zu signifikanten Photodissoziationseffekten. Diese wurden durch einen ständigen Austausch der Messflüssigkeit nach jeder Messung berücksichtigt. Der Einfluss der Photobleichung war für den Prallkühlungsaufbau vernachlässigbar gering, da das Flüssigkeitsvolumen im System bezogen auf die Messzeit groß genug war. Die spektrale Verschiebung für den untersuchten Bereich (0,1 mm – 2,0 mm) für zahlreiche Farbstoffkonzentrationen ist in Tabelle 2 aufgeführt. Die spektrale Peak-Verschiebung von 13,6 nm (@ 37,5 mg/L) nahm mit abnehmender Farbstoffkonzentration auf 0,1 nm (@ 0,59 mg/L) ab. Für die folgenden Untersuchungen wurde eine Farbstoffkonzentration von 0,59 mg/L verwendet.

Tabelle 2: Filmdickenabhängige spektrale Verschiebung der Emissionsmaxima bei unterschiedlichen Farbstoffkonzentrationen.

Farbstoffkonzentration (mg/L)	Spektrale Verschiebung (nm)
37,5	13,6
9,38	5,5
2,34	1,4
0,59	0,1

3.1.2 Temperaturuntersuchung

Die temperaturabhängige Filmdicke wurde spektral als auch bildgebend untersucht. Die planaren Untersuchungen wurden mit einem Kamerasystem (siehe Abb. 2) mit entsprechenden Bandpassfiltern durchgeführt. Für die bildgebenden Messungen wurden die Fluoreszenzintensitäten innerhalb des Messbereichs (siehe Abb. 1) integriert und anschließend das Intensitätsverhältnis bestimmt. Die Emissionsspektren von Nilrot gelöst in Marlotherm LH bei einer Filmdicke von 0,5 mm sind in Abb. 4 dargestellt. Dabei sind die Bereiche der Maxima wieder vergrößert dargestellt, da dieser Bereich für die Genauigkeit der Messtechnik ausschlaggebend ist. Die Messungen ergaben eine spektrale Verschiebung von 6,3 nm der Maxima und der beiden Flanken mit zunehmender Temperatur in Richtung abnehmender Wellenlängen. Eine Variation der Filmdicke beeinflusst nicht die Emissionsspektren, da die gewählte Farbstoffkonzentration niedrig genug ist (siehe vorangegangener Abschnitt).

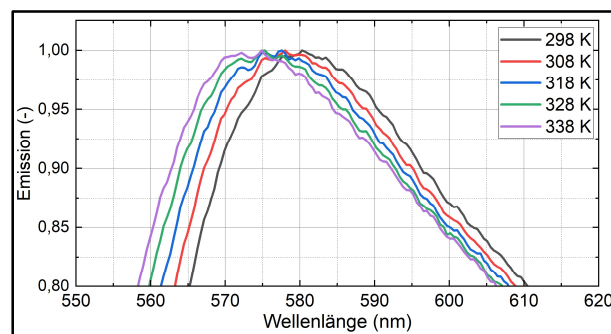


Abb. 4: Normierte Emissionsspektren von Nilrot in Marlotherm bei unterschiedlichen Filmtemperaturen bei einer Filmdicke von 0,5 mm.

3.2 Bildgebende Messungen

Für die folgenden Messungen wurde eine Farbstoffkonzentration von 0,59 mg/l verwendet. Da das bildgebende Detektionssystem abweichende optische Wirkungsgrade (Filter, Linsen, Spiegel, Quanteneffizienz der Kameras) im Vergleich zum spektroskopischen Aufbau aufweist, mussten die Temperatur- und Filmdicken-abhängigen Messungen bei konstanter Farbstoffkonzentration erneut durchgeführt werden. Nur so ist eine Kalibrierung für den jeweiligen Messaufbau möglich. Die Ergebnisse der Kalibrierung sind (Koegl et al., 2024) zu entnehmen. Der Wärmeübergang bei der Prallkühlung findet hauptsächlich im Bereich der Aufprallzone und der Strahl-Wand-Interaktionszone statt (Liu et al., 2014). Für die Experimente kann nur die Strahl-Wand-Interaktionszone ausgewertet werden, da sogenannte morphologisch abhängige Resonanzen (engl. *morphologic dependent resonances*, MDRs) ab dem hydraulischen Sprung radial nach außen auftreten. Diese Effekte emittieren Signale bei hohen Wellenlängen und können daher zu großen Messabweichungen führen (Koegl, Dai, et al., 2022). Die vorliegenden Untersuchungen beschäftigen sich mit der Strahl-Wand-Interaktionszone, da dieser Bereich den Wärmeübergang bestimmt und dort keine MDRs auftreten. Die Temperatur und Filmdicke werden über die Kalibrierkurven des Kalibriermessaufbaus ermittelt (siehe Abb. 1).

Das temperatur- und filmdickenabhängige Intensitätsverhältnis und die entsprechenden Standardabweichungen sind in Abb. 5 dargestellt. Da das Intensitätsverhältnis bei geringen Farbstoffkonzentrationen unabhängig von der Filmdicke ist (siehe Abb. 3), wurde ein Mittelwert für die Bestimmung der Temperatur herangezogen.

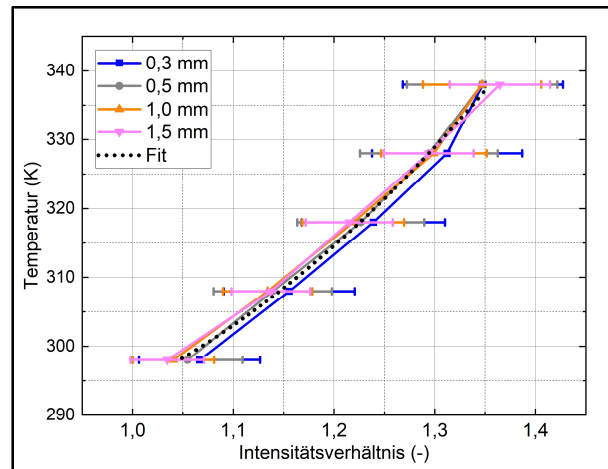


Abb. 5: Kalibrierung des von der Filmtemperatur und Filmdicke abhängigen Intensitätsverhältnisses der bildgebenden Detektion. Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung der räumlichen Variation innerhalb des Messbereichs.

Der Polynomfit wurde so gewählt, dass ein bestmöglicher R^2 -Wert zu liefern (0,99851). Die räumlichen Standardabweichungen des Intensitätsverhältnisses sind im Bereich von 0,0365 – 0,0795, was einem Variationskoeffizienten von 3,4 % - 5,9 % entspricht. Die Temperatursensitivität nimmt nahezu linear von 1,02 bei 298 K auf 0,51 bei 338 K ab.

Die Filmdicke t_{Film} ist von der Signalintensität I_{CH1} und der Temperatur T_{Film} (siehe Abb. 3) abhängig. Die durchgeführten Messungen ergaben eine Filmdicke und Filmtemperatur im Bereich von [298 K – 318 K] und [0,2 mm – 0,5 mm]. Die Messwerte, der zugehörige Fit und die Standardabweichungen sind in Abb. 6 dargestellt. Der nichtlineare Anstieg der Filmdicke mit der Signalintensität ist auf Extinktionseffekte zurückzuführen, welche zu einer Abnahme der mittleren Bestrahlungsintensität im Flüssigkeitsfilm führen, als auch auf Reabsorptionseffekte. Es sollte angemerkt werden, dass der Kalibrierprozess mit einem Deckglas durchgeführt wurde, während die eigentliche Messung am Prallkühlprozess ohne Glas durchgeführt wurde. Dies sorgt für unterschiedliche Signalintensitäten bei beiden Versuchen. Die Dicke des verwendeten Deckglases betrug 0,16 mm, die Transmission bei einer Wellenlänge von 532 nm betrug 0,92. Reflexionseffekte auf der Flüssigkeitsoberfläche sorgen auch für eine Abnahme der Beleuchtungsintensität. Dies hat aber nur einen Einfluss auf die Filmdickenbestimmung und könnte durch eine Anpassung der Bestrahlungsleistung kompensiert werden. Die Temperaturbestimmung erfolgt über das Intensitätsverhältnis und ist daher weniger von einer Variation der Bestrahlungsstärke abhängig.

Die räumliche Variation (Variationskoeffizient) ist im Bereich von 3,4 % - 4,7 % und ist hauptsächlich auf die Inhomogenitäten der Laserbeleuchtung zurückzuführen. Für komplexe geschwungene Geometrien (z.B. wellige Flüssigkeitsfilme) ist eine homogene Beleuchtung meist nicht möglich. Wird die inhomogene Beleuchtung nicht berücksichtigt, führt dies zu Messungenauigkeiten im Bereich der Filmdicke.

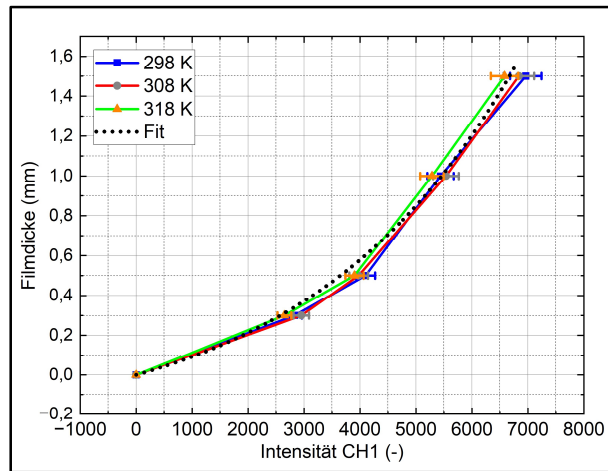


Abb. 6: Regressionskurve für die Filmdicke als Funktion der Temperatur und der Signalintensität I_{CH1} . Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung der räumlichen Variation innerhalb des Messbereichs.

Das Intensitätsverhältnis, die Temperatur als auch die Filmdicke für verschiedene Oberflächentemperaturen sind in Abb. 7 dargestellt. Die entsprechenden Festkörpertemperaturen und die ursprüngliche Temperatur des Strahls sind in Tabelle 3 abgebildet.

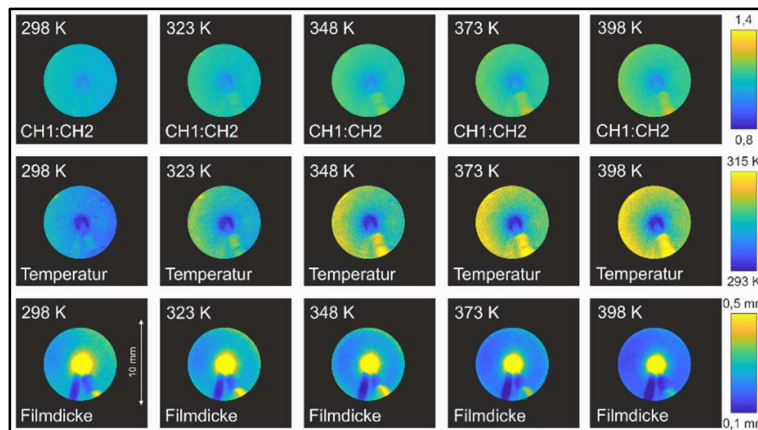


Abb. 7: Verteilung von Intensitätsverhältnis (oben), Filmtemperatur (mittig) and Filmdicken (unten) für unterschiedliche Festkörpertemperaturen.

Die Signalintensitäten beider Detektionskanäle befinden sich bei niedrigen Temperaturen auf ähnlichem Niveau. Das Intensitätsverhältnis steigt mit zunehmender Oberflächentemperatur, da die Emissionsspektren in Richtung niedriger Wellenlängen verschoben werden (siehe Abb. 3). Da die Strahl-Wand-Interaktionszone nicht komplett symmetrisch ist, (Orientierung der Düse und durch Krümmung gestörtes Strömungsfeld), ist die Filmdicke auf der linken Seite im Vergleich zur rechten Seite kleiner. Dies führt zu leicht höheren Filmtemperaturen auf der linken im Vergleich zur rechten Seite. Die räumlich gemittelte Filmtemperatur nimmt mit zunehmender Oberflächentemperatur von 298 K auf 308 K zu. Der Temperaturunterschied zwischen der linken und der rechten Seite liegt für höhere Temperaturen (≥ 348 K) im Bereich von 4 K. Bei höheren Festkörpertemperaturen nimmt die Filmtemperatur mit Abstand zu der Aufprallzone zu. Dies ist auf den mit steigender Festkörpertemperatur zunehmenden Temperaturgradienten und die abnehmende Viskosität mit zunehmender Filmtemperatur zurückzuführen. Die gemittelte Filmdicke nimmt mit zunehmender Oberflächentemperatur von 0,3 mm auf 0,2 mm ab. Dieses Verhalten ist auf die abnehmende Viskosität bei höheren Temperaturen als auch die größeren Strömungsgeschwindigkeiten durch die beheizte Oberfläche zurückzuführen.

Tabelle 3: Festkörper- und Strahltemperatur (Messgenauigkeit: $\pm 0,3$ K).

Festkörpertemperatur (K)	298	323	348	373	398
Strahltemperatur (K)	295,4	295,9	295,6	295,9	295,9

Es sollte darauf hingewiesen werden, dass die thermische Grenzschicht (Filmoberfläche) die Messergebnisse beeinflussen könnte. Das vorgestellte Messverfahren kann nur räumlich über die Filmtiefe gemittelte Messergebnisse liefern. Wenn die Filmdicke schmäler als die theoretische thermische Grenzschicht wäre, würde dies einen größeren Einfluss auf die Temperaturbestimmung haben.

Zusammenfassung und Ausblick

Die Studie beschäftigt sich mit der Charakterisierung eines Prallkühlungsprozesses mit vereinfachter zylindrischer Geometrie. Durch eine auf der laserinduzierten Fluoreszenz basierenden Zwei-Farben Messtechnik wird simultan die Temperatur als auch die Filmdicke bestimmt. Das Fluoreszenzsignal wird durch eine Beimischung des Farbstoffs Nilrot zu dem Wärmeträgeröl Marlotherm LH erreicht. Eine spektrale Untersuchung zeigte eine Farbstoffkonzentrationsabhängigkeit des Emissionssignales bei unterschiedliche Filmdicken. Bei hohen Farbstoffkonzentrationen (bis zu 37,5 mg/L) führen Reabsorptionseffekte zu einer spektralen Verschiebung hin zu höheren Wellenlängen mit zunehmender Filmdicke. Geringe Farbstoffkonzentrationen (0,59 mg/L) weisen keine spektrale Verschiebung mit zunehmender Filmdicke auf. Eine Variation der Filmtemperatur bei niedrige Farbstoffkonzentration zeigte mit zunehmender Temperatur eine Wellenlängenverschiebung in Richtung niedrigerer Wellenlängen.

Die Untersuchung des Prallkühlprozesses zeigte eine Zunahme der Filmtemperatur und eine Abnahme der Filmdicke mit steigender Festkörpertemperatur. Die gemittelte Filmtemperatur nahm mit zunehmender Festkörpertemperatur von 298 K (Festkörpertemperatur 298 K) auf 308 K (Festkörpertemperatur 398 K) zu. Bei höheren Festkörpertemperaturen nahm die Filmtemperatur mit zunehmendem Abstand zur Aufprallzone zu. Die gemittelte Filmdicke nahm mit zunehmender Festkörpertemperatur von 0,24 mm auf 0,17 mm ab. Bei hohen Festkörpertemperaturen nahm die Filmtemperatur mit radialem Abstand zur Aufprallzone zu. Dies ist auf den mit zunehmender Oberflächentemperatur steigenden Temperaturgradienten und die mit steigender Filmtemperatur abnehmende Viskosität zurückzuführen.

Die Temperatursensitivität des Intensitätsverhältnisses betrug 0,51 %/K – 1,02 %/K, die räumliche Temperaturgenauigkeit betrug 3,4 % - 5,9 % und räumliche Genauigkeit der Filmdicke betrug 3,4 % - 4,7 %. Die vorgestellte Messtechnik funktioniert gut bei der gewählten vereinfachten Zylindergeometrie. Eine Anwendung für die Messung von Strahl- und Spraykühlungsprozessen an Realgeometrien (Kühlkörper und andere komplexe Geometrien) ist Teil zukünftiger Studien.

Danksagung

We acknowledge financial support by Universität der Bundeswehr München (UniBw M).

Literatur

- Collignon, R., Caballina, O., Lemoine, F., Markides, C., & Castanet, G., 2022:** "Heat Transfer Enhancement in Wavy Films Falling on a Heated Inclined Plate", *SSRN Electronic Journal*, doi:10.2139/ssrn.4172033
- Durst, A., Wensing, M., & Berrocal, E., 2018:** "Light sheet fluorescence microscopic imaging for the primary breakup of diesel and gasoline sprays with real-world fuels", *Applied Optics*, 57, 2704-2714, doi:10.1364/AO.57.002704
- Eastman chemical company. (2022).** Marlotherm LH. Retrieved from https://www.eastman.com/Literature_Center/S/SFEHTF10985.pdf
- Huang, C.-Y., Murthy, T. G., & Chandrasekar, S., 2014:** "Simultaneous Measurements of Thickness and Temperature Profile of the Lubricant Film at Chip-tool Interface during Machining Process Using Luminescent Sensors", *Procedia Engineering*, 79, 9-16, doi:<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.06.303>
- 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, doi:10.1364/AO.457685
- Koegl, M., Delwig, M., & Zigan, L., 2022:** "Characterization of Fluorescence Tracers for Thermometry and Film Thickness Measurements in Liquid Coolants Relevant for Thermal Management of Electric and Electronic Components", *Sensors*, 22(22), 8892,
- Koegl, M., Mil'to, N., & Zigan, L., 2024:** "Simultaneous film temperature and film thickness measurements for jet impingement applications using two-color laser-induced fluorescence", *Experiments in Fluids*, 65(4), 41, doi:10.1007/s00348-024-03782-4
- Koegl, M., Mull, C., Baderschneider, K., Wislicenus, J., Will, S., & Zigan, L., 2019:** "Characterization of Nile Red as a Tracer for Laser-Induced Fluorescence Spectroscopy of Gasoline and Kerosene and Their Mixture with Biofuels", *Sensors*, 19(12), 2822,
- Labergue, A., Gradeck, M., & Lemoine, F., 2015:** "Comparative study of the cooling of a hot temperature surface using sprays and liquid jets", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 81, 889-900, doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.11.018>
- Liu, Y.-C., Guessous, L., Sangeorzan, B., & Alkidas, A., 2014:** "Laboratory Experiments on Oil-Jet Cooling of Internal Combustion Engine Pistons: Area-Average Correlation of Oil-Jet Impingement Heat Transfer", *Journal of Energy Engineering*, doi:10.1061/(ASCE)EY.1943-7897.0000227
- McClintock, P. V. E., 2003.** Cryogenics. In R. A. Meyers (Ed.), *Encyclopedia of Physical Science and Technology (Third Edition)* (pp. 37-59). New York: Academic Press.
- Roth, C. (2019).** Nile red properties. Retrieved from <https://www.carlroth.com/medias/SDB-7726-IE-EN.pdf?context=bWFzdGVyfHNIY3VyaXR5RGF0YXNoZWV0cy9oNWQvaDliLzG5NjUwMTE4MDAwOTQucGRmfGQzYzliZWViOGRIMDU5MGQ0MTMwMDk4YTkwODk5YTgxNGUyZjI2NmJiOTExMzk0Y2FiNzRiZjg0ZWY3OGU1ZGY>
- Schagen, A., Modigell, M., Dietze, G., & Kneer, R., 2006:** "Simultaneous measurement of local film thickness and temperature distribution in wavy liquid films using a luminescence technique", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49(25), 5049-5061, doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.06.010>
- Wu, W., Kong, S., Xu, X., Tao, J., Li, C., Wang, J., Su, M., Yang, H., 2021:** "Simultaneous measurement of liquid film thickness and temperature on metal surface", *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 257, 119804, doi:<https://doi.org/10.1016/j.saa.2021.119804>