

# **Simultane Visualisierung von Öl- und Kraftstoffschichten in der Kolbengruppe eines direkteinspritzenden Ottomotors durch laserinduzierte Fluoreszenz**

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Abteilung Maschinenbau und Verfahrenstechnik

der

Universität Duisburg-Essen

zur Erlangung des akademischen Grades

eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften

Dr.-Ing.

genehmigte Dissertation

von

Torben Müller

aus

Rorschach

Gutachter: Prof. Dr. Sebastian Kaiser  
Prof. Dr. Gerhard Poll

Tag der mündlichen Prüfung: 19.12.2018



## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Doktorandentätigkeit in der Abteilung Tribologie am Daimler Research & MBC Development Zentrum Ulm. Die universitäre Betreuung erfolgte am Institut für Verbrennung und Gasdynamik der Universität Duisburg-Essen.

An erster Stelle möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. Sebastian Kaiser für die Ermöglichung der Promotion, die zahlreichen Anregungen und hilfreichen Diskussionen bedanken. Herrn Prof. Dr. Gerhard Poll danke ich für das Interesse an der Arbeit und die Übernahme des Koreferats.

Seitens der Daimler AG danke ich Herrn Dr. Hans-Jürgen Füßer für die Ermöglichung der Promotion und das entgegengebrachte Vertrauen. Durch die unverzichtbare fachliche Unterstützung und die gute Zusammenarbeit hat Herr Dr. Stefan Wigger maßgeblich zum Entstehen dieser Arbeit beigetragen. Herrn Dr. Johannes König und Herrn M.Sc. Michael Simon danke ich für die fachliche und moralische Unterstützung. Für die Unterstützung im Labor und am Prüfstand danke ich Herrn Alexander Klaiber, Herrn Dipl.-Ing. Guntmar Schulz, Frau Dr. Petra Obert und Herrn Dipl.-Phys. Erwin Löffler.

Wertvolle Hilfe bei der Messtechnik-Entwicklung leisteten mein Vater Herr Prof. Dr. Hartmut Müller und Herr Dr. Michael Busch. Herrn Dr. Daniel Fuhrmann und Herrn M.Sc. Muhammad Ali Shahbaz danke ich für die Unterstützung seitens des Instituts für Verbrennung und Gasdynamik der Universität Duisburg-Essen.

Herrn M.Sc. Jonathan Schöler und Herrn B.Sc. Philipp Baumeister danke ich für die wertvolle Zuarbeit im Rahmen ihrer Abschlussarbeiten.

Meiner Familie, insbesondere meiner Freundin Hannah, danke ich für die Unterstützung und das große Maß an Verständnis vor und während meiner Doktorandenzeit.

Esslingen, Dezember 2018

Torben Müller



## Kurzfassung

Im Rahmen der vorliegenden Dissertation wurden Öl- und Kraftstoffschichten in der Kolbengruppe eines optisch zugänglichen Ottomotors mit Benzin-Direkteinspritzung durch das Verfahren der laserinduzierten Fluoreszenz (LIF) untersucht. Zur Optimierung der Kolbengruppe hinsichtlich Reibung, Verschleiß, NVH (Noise, Vibration, Harshness) und Emissionen müssen die komplexen Wechselwirkungen zwischen Öl, Kraftstoff und Brennraumgas analysiert, sowie quantitative Daten für Simulationsmodelle bereitgestellt werden.

Die Untersuchung der Phänomene in der Kolbengruppe erfolgte in einem optisch zugänglichen Einzylindermotor mit auf Druck- und Gegendruckseite seitlich in die Zylinderwand eingesetzten Saphirfenstern. Die optischen Zugänge ermöglichen die Abbildung der Kolbengruppe über nahezu den vollständigen Kolbenhub. In dieser Arbeit wurden Untersuchungen bei Lasten bis 8,5 bar (effektiver indizierter Mitteldruck) und Drehzahlen bis  $2200 \text{ min}^{-1}$  durchgeführt. Durch die hohe Zylindrizität und die Oberflächentopographie mit der für Zylinderlaufbahnen typischen Honstruktur wurden realitätsnahe Bedingungen hinsichtlich des Ringanlageverhaltens und der Oberflächenbenetzung gewährleistet.

Zur Analyse des Ölhaushalts in der Kolbengruppe und der Kolbensekundärbewegung kam ein phasengekoppeltes LIF-Messsystem mit einer maximalen Wiederholrate von 100 Hz am Einzylindermotor zum Einsatz. Eine Mischung aus kommerziellem Motoröl mit  $0,015 \pm 0,005 \text{ mmol/L}$  Pyrromethen 567 wurde mit einem Nd:YAG-Laser bei 532 nm angeregt und das rotverschobene Fluoreszenzlicht mit jeweils einer CMOS-Kamera auf Druck- und Gegendruckseite zweidimensional abgebildet. Voruntersuchungen in einer Dünnfilmküvette und ein umfangreicher Bildverarbeitungsprozess mit einer in situ Kalibrierung ermöglichten die zweidimensionale Quantifizierung der Ölfilmdicke im Kontaktbereich Kolbenhemd/Zylinderlaufbahn, sowie die qualitative Analyse der Kolbensekundärbewegung und des globalen Ölhaushalts in der Kolbengruppe. Die Untersuchungen zeigten, dass Kolbensekundärbewegung und Ölfilmdicke im Kontaktbereich Kolbenhemd/Zylinderlaufbahn voneinander abhängen. Die niedrigste Ölfilmdicke trat im Expansionstakt auf und betrug  $3,0 \mu\text{m}$ . Außerdem konnte ein Zusammenhang zwischen Kraftstoff-Wandbenetzung und Ölhaushalt in der Kolbengruppe gezeigt werden.

Um neben Ölschichten auch Kraftstoffschichten zeitlich hochaufgelöst zu visualisieren, wurde im zweiten Abschnitt der Arbeit ein Messsystem zur simultanen, kurbelwinkelaufgelösten Visualisierung von Kraftstoff und Öl durch LIF entwickelt. Der Öl-Farbstoff Pyrromethen 567 wurde aus dem phasengekoppelten LIF-Messsystem übernommen und ein geeigneter Kraftstoff-Tracer gesucht. Die Mischungen Kraftstoff/Tracer und Öl/Farbstoff wurden mit einem Nd:YAG-Laser mit einer maximalen Repetitionsrate von 10 kHz bei 266 nm und 532 nm angeregt. Das Fluoreszenzlicht der beiden Fluide wurde spektral getrennt und von zwei Hochgeschwindigkeits-Kameras zweidimensional abgebildet. Zwei Kraftstoff/Tracer-Mischungen wurden im Einzylinderaggregat und in einer Dünnschichtkuvette untersucht: Toluol in iso-Oktan und Anisol in einem neu entwickelten Multikomponenten-Kraftstoff mit hoher Oktanzahl (ROZ = 101) und einer Siedelinie entsprechend der eines kommerziellen Kraftstoffs. Die zweite Kombination wurde aufgrund des realitätsnahen Verdampfungsverhaltens und der stärkeren Fluoreszenz für die Motorexperimente ausgewählt. Durch tribologische und optische Voruntersuchungen konnte außerdem ein Surrogat-Öl identifiziert werden, das kommerziellem Öl aufgrund geringerer optischer Wechselwirkungen mit Kraftstoff-LIF für die optischen Motorexperimente überlegen ist. Im Einzylinderaggregat wurden mit diesem System Kraftstoff-Wandbenetzung, Kraftstofftransport durch das Ringpaket, sowie der Einfluss der Kraftstoff-Wandfilmbildung auf den Ölhaushalt in der Kolbengruppe im befeuerten und geschleppten Motorbetrieb visualisiert und analysiert. Im befeuerten Motorbetrieb mit Benzin-Direkteinspritzung wurde das Auftreffen des Kraftstoffsprays und die Bildung eines Flüssigkeitsfilms auf der Zylinderwand visualisiert. Unter den untersuchten Bedingungen verblieb ein flüssiger Wandfilm aufgrund unvollständiger Verdampfung auf der Zylinderwand. Der Kraftstoff wurde durch die Kolbenringe teilweise von der Zylinderwand abgekratzt und durch die Ringstöße transportiert. Außerdem wurde durch flüssigen Kraftstoff auf den Kolben-Ringstegen Öl aus der Top-Ring-Nut auf den Feuersteg und den 2. Ringsteg transportiert.

## Abstract

This thesis presents the analysis of liquid fuel and oil films in the piston group of a direct-injection spark-ignition (DISI) engine by laser-induced fluorescence (LIF). To optimise the piston group in terms of friction, wear, NVH (noise, vibration, harshness) and emissions, the interaction between oil, fuel and combustion gas must be understood. Also, quantitative data is required to improve simulation models.

The investigation of the phenomena in the piston group was performed in an optically accessible single cylinder research engine with two honed-in sapphire windows that provide optical access to the cylinder on the thrust and on the anti-thrust side. This enables the observation of the piston including ring area and skirt as well as the cylinder surface. Here, the maximum speed of the engine was  $2200 \text{ min}^{-1}$  at a maximum indicated mean effective pressure of 8.5 bar. Due to the high cylindricity of the research engine, the sealing function of the piston rings is very similar to that in a production engine. Also, the honing structure in the cylinder surface provides realistic conditions in terms of surface wetting.

To investigate the oil distribution in the piston group as well as the piston's secondary motion, a phase-locked LIF-imaging system with a maximum image acquisition rate of 100 Hz was used in the research engine. First-fill engine oil was doped with traces of the laser dye pyromethene 567, which fluoresces red after excitation by 532 nm laser radiation. The fluorescence from oil was simultaneously detected by two cameras, one on the thrust side and one on the anti-thrust side. Preliminary studies were performed in a thin-film cuvette and an image processing routine including an in-situ calibration was developed. This enabled quantification of the oil film thickness in the tribological contact between the piston skirt and the cylinder liner. Also, the piston's secondary motion and the global oil distribution in the piston group were investigated. One main finding was that the piston's secondary motion correlates with the oil film thickness in the contact area between piston skirt and cylinder liner. The minimal oil film thickness in this tribological contact was found during the expansion stroke and was  $3.0 \mu\text{m}$ . Also, a correlation between fuel impingement on the cylinder wall and the oil distribution in the piston group was shown.

To obtain a higher temporal resolution and to simultaneously visualise fuel films, a LIF system for simultaneous kHz-rate LIF-imaging of fuel and oil films was developed in

the second part of this work. Again, engine oil was doped with traces of the laser dye pyrromethene 567 and excited at 532 nm. Simultaneously, the liquid fuel was visualised by UV fluorescence of an aromatic “tracer” in a non-fluorescent surrogate fuel excited at 266 nm. Two combinations of fuel and tracer were investigated, iso-octane and toluene, as well as a multi-component surrogate and anisole. The multi-component surrogate fuel had an evaporation curve similar to that of commercial pump fuel and a high research octane number (RON = 101). Anisole added to the multi-component surrogate fuel provided a higher fluorescence intensity than toluene and was therefore used for engine experiments. Since the first-fill engine oil provided significant cross-talk in the fuel channel, a low-additive surrogate oil was examined for optical and tribological characteristics. The surrogate oil exhibited similar tribological characteristics and it was superior to the commercial oil in terms of cross-talk with fuel LIF. The surrogate oil was therefore used for engine experiments. Experiments were performed in the research engine in fired and motored engine operation. Besides fuel wall wetting, fuel transport across the piston ring pack and the impact on the lubricant conditions in the piston group can be seen in the images. With direct fuel injection fuel wall wetting and film formation on the cylinder wall was detected. In the conditions examined here, a liquid fuel film remained on the cylinder wall due to incomplete evaporation. Some fuel was scraped off the cylinder wall by the piston rings and transported through the ring gaps. Furthermore, the presence of liquid fuel on the piston lands initiated oil transport from out of the top ring groove onto the first and second piston lands.



# Inhaltsverzeichnis

Vorwort .....	I
Kurzfassung.....	III
Abstract .....	V
Inhaltsverzeichnis .....	VII
Nomenklatur .....	IX
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Die Tribologie der Kolbengruppe.....</b>	<b>4</b>
2.1 Komponenten der Kolbengruppe.....	4
2.2 Physikalische Prozesse in der Kolbengruppe.....	10
2.3 Tribologische Untersuchung der Kolbengruppe durch LIF .....	13
2.3.1 Physikalische Grundlagen der laserinduzierten Fluoreszenz.....	14
2.3.2 Untersuchung von Ölschichten in der Kolbengruppe .....	17
2.3.3 Untersuchung von Kraftstoffschichten in der Kolbengruppe .....	20
<b>3 Optisch zugängliches Einzylinderaggregat .....</b>	<b>30</b>
3.1 Mechanischer Aufbau und Prüfstandsperipherie .....	30
3.2 Optisches Zylinderrohr .....	32
<b>4 Optische Analyse des Ölhaushalts in der Kolbengruppe.....</b>	<b>39</b>
4.1 Phasengekoppeltes LIF-Messsystem.....	39
4.1.1 Optische Komponenten .....	39
4.1.2 Voruntersuchungen in der Dünnschichtkuvette .....	43
4.2 Quantifizierung der Ölfilmstärke im Bereich des Pleuellagers .....	49
4.2.1 Bildverarbeitungsprozess.....	51
4.2.2 In situ Kalibrierung .....	60
4.2.3 Abschätzung der Messgenauigkeit .....	73
4.3 Ölfilmstärke im Bereich des Pleuellagers .....	79
4.4 Ausblick und weitere Effekte in der Kolbengruppe .....	84

<b>5</b>	<b>Simultane Hochgeschwindigkeits-Visualisierung von Kraftstoff und Öl ...</b>	<b>89</b>
5.1	Auswahl des optischen Systems .....	89
5.1.1	Kraftstoff-Tracer, Öl-Farbstoff und optische Filter .....	89
5.1.2	Strahlengang und optische Komponenten .....	93
5.2	Auswahl der Betriebsstoffe .....	103
5.2.1	Iso-Oktan als Ersatzkraftstoff .....	103
5.2.2	Multikomponenten-Kraftstoff .....	103
5.2.3	Surrogat-Öl .....	106
5.3	Voruntersuchungen der Tracer-LIF, Verdampfungsverhalten des .....	
	Multikomponenten-Kraftstoffs und cross-talk.....	110
5.3.1	Charakterisierung der Tracer-LIF .....	110
5.3.2	Verdampfungsverhalten des Multikomponenten-Kraftstoffs.....	113
5.3.3	Cross-talk.....	115
5.3.4	Zwischenfazit .....	125
5.4	Öltransport, Kraftstoff-Wandbenetzung und Kraftstoff-Öl-Interaktion .....	126
5.5	Ausblick.....	138
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>142</b>
	Veröffentlichungen.....	148
	Literaturverzeichnis .....	149

# Nomenklatur

## *Lateinische Buchstaben*

<b>Symbol</b>	<b>Bedeutung</b>	<b>Einheit</b>
A	Fläche	mm <sup>2</sup>
c	Konzentration	-
d	Schichtdicke	µm
e	Euler-Zahl	-
E	Energie	J
f	Frequenz	s <sup>-1</sup>
F	Kraft	N
h	Plancksches Wirkungsquantum	J·s
I	Bildmatrix	-
M	Drehmoment	Nm
p <sub>mi</sub>	Indizierter Mitteldruck	bar
S	Bewegungsrichtung	-
t	Zeit	s
T	Temperatur	°C
x,y	Kartesische Koordinate	-
X <sub>50%</sub>	Verbrennungsschwerpunkt	°KW

## *Griechische Buchstaben*

<b>Symbol</b>	<b>Bedeutung</b>	<b>Einheit</b>
α	Winkel	°
ε	Absorptionskoeffizient	dm <sup>3</sup> /(cm·mol)
λ	Wellenlänge	nm
μ	Reibkoeffizient	-
σ	Standardabweichung	-

$\Phi_f$	Quanteneffizienz	-
$\Phi_{det}$	Detektionseffizienz	-

### *Abkürzungen*

<b>Symbol</b>	<b>Bedeutung</b>
CCD	Charge-coupled device
CMOS	Complementary metal-oxide semiconductor
DISI	Direct-Injection Spark-Ignition
DS	Druckseite
GDS	Gegendruckseite
LIF	Laser-induzierte Fluoreszenz
KS	Kraftstoff
KW	Kurbelwinkel
MFM	Motoröl-Farbstoff-Mischung
Nd:YAG	Neodym-dotierter Yttrium-Aluminium-Granat Laser
n.ZOT	Nach Zünd-OT
NVH	Noise, Vibration, Harshness
OT	Oberer Totpunkt
PTU	Programmable Timing Unit
ROZ	Research Oktanzahl
UV	Ultraviolett
VIS	Visible
v.ZOT	Vor Zünd-OT

# 1 Einleitung

Zur Einhaltung zukünftiger Grenzwerte von CO<sub>2</sub>- und Partikelemissionen werden moderne Ottomotoren stetig weiterentwickelt. Durch die Reduzierung des Hubvolumens in Verbindung mit Direkteinspritzung und Aufladung (Downsizing) nimmt die Leistungsdichte zu. Die Verschiebung der Lastpunkte hin zu höheren Mitteldrücken, bzw. in günstigere Wirkungsgradbereiche und die Entdrosselung der Teillast durch die Reduzierung der Zylinderzahl führen zu Verbrauchsvorteilen [1]. Auch durch Reibungsreduzierung kann der Wirkungsgrad erhöht werden, wobei die Kolbengruppe das größte Potential zur Senkung der innermotorischen Reibung bietet [2, 3]. Das tribologische System der Kolbengruppe besteht aus Kolben, Kolbenringen, Zylinderlaufbahn sowie Motoröl als Zwischenmedium und bildet ein bewegliches Dichtsystem, das Brennraum und Kurbelgehäuse gegeneinander abdichtet.

Die Maßnahmen zur Optimierung des Verbrennungsmotors beeinflussen die Kolbengruppe und die Wechselwirkungen zwischen Öl, Kraftstoff und Brennraumgas in vielerlei Hinsicht. Downsizingkonzepte führen zu höherer tribologischer Bauteilbeanspruchung aufgrund hoher Brennraumdrücke und -temperaturen. Die hierdurch verursachten Reibungs- und Verschleißmechanismen beeinflussen Wirkungsgrad und Lebensdauer des Systems. Außerdem führen hohe Gaskräfte bei unvollständiger Abdichtung zu größeren Gasströmungen vom Brennraum durch das Ringpaket in Richtung Kurbelgehäuse, wodurch der Wirkungsgrad sinkt und Kraftstofftransportvorgänge in Richtung Kurbelgehäuse initiiert werden. Direkteinspritzung und kleinere Zylinderdurchmesser begünstigen die Kraftstoff-Wandbenetzung, die zu Rußbildung und Ölverdünnung mit Kraftstoff führt. Hybridisierung des Antriebsstrangs führt zu häufigen Kaltstarts bei niedrigen Wandtemperaturen, wodurch die Kraftstoff-Wandfilmbildung ebenfalls zunimmt. Außerdem wird die Interaktion von Kraftstoff und Öl innerhalb der Kolbengruppe u.a. als Ursache von extremen Verbrennungsphänomenen (Vorentflammung) vermutet.

Die Kolbengruppe unterliegt komplexen und teilweise konkurrierenden Anforderungen und wird simulativ und experimentell untersucht. Hierdurch wird einerseits das Systemverständnis durch die Aufklärung physikalischer Prozesse verbessert, andererseits werden für Reibungssimulationsmodelle quantifizierte Eingangsgrößen, z.B. die Schmierfilmhöhe im tribologischen Kontakt, bereitgestellt.

Zur experimentellen Untersuchung der Kolbengruppe kommen Forschungsmotoren mit optischen Zugängen zum Einsatz. Der Einfluss des optischen Zugangs auf das Systemverhalten soll dabei möglichst gering sein, um die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf das Realsystem sicherzustellen. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein hochlastfähiges, realitätsnahes Einzylinderaggregat mit Direkteinspritzung und zwei großflächigen Saphirfenstern in der Zylinderwand auf Druck- und Gegendruckseite vorgestellt. Die optischen Zugänge ermöglichen die zweidimensionale Visualisierung des Kolbens, Kolbenhemds und Ringpakets über nahezu den vollständigen Hub. Zur Untersuchung der Phänomene in der Kolbengruppe kommt das Verfahren der laserinduzierten Fluoreszenz (LIF) in Verbindung mit CMOS-Kameras zum Einsatz.

Im ersten Teil dieser Arbeit liefert ein LIF-Messsystem mit hoher räumlicher Auflösung Erkenntnisse über die Kolbensekundärbewegung und die Ölverteilung in der Kolbengruppe. Das Fluoreszenzlicht einer Motoröl-Farbstoff-Mischung wird zwei CMOS-Kameras zugeführt, die Druck- und Gegendruckseite des optischen Einzylinderaggregats simultan, zweidimensional abbilden. Voruntersuchungen in einer Dünnschichtkuvette liefern wichtige Erkenntnisse über die optischen Eigenschaften der Motoröl-Farbstoff-Mischung. Durch einen umfangreichen Bildbearbeitungsprozess mit in situ Kalibrierung kann die Schmierfilmhöhe im Kontaktbereich Kolbenhemd/Zylinderlaufbahn unter befeuerten Motorbedingungen quantifiziert und die Kolbensekundärbewegung visualisiert werden. Außerdem werden Öltransportmechanismen gezeigt, deren Ursachen aufgrund der geringen zeitlichen Auflösung des Messsystems und der fehlenden Möglichkeit Kraftstoff abzubilden nur unvollständig geklärt werden können.

Im zweiten Teil der Arbeit wird daher eine LIF-Messtechnik zur simultanen, kurbelwinkelaufgelösten Visualisierung von Kraftstoff und Öl entwickelt. Das Verfahren beruht auf der spektralen Trennung von Kraftstoff- und Öl-LIF durch geeignete Filter und der simultanen Detektion mit zwei kHz-Kameras. Da kommerzielle Kraftstoffe und Öle keine eindeutige spektrale Trennung zulassen, werden durch tribologische und optische Voruntersuchungen geeignete Mischungen aus LIF-Tracer/Ersatz-Kraftstoff und LIF-Farbstoff/Surrogat-Öl identifiziert. Der Fokus der Messtechnikauslegung liegt auf zwei Aspekten: Erstens sind bei der Untersuchung von Kraftstoff-Wandfilmen durch LIF die Verdampfungseigenschaften des Kraftstoffs entscheidend, weshalb ein realitätsnaher Multikomponenten-Kraftstoff mit geeigneten optischen Eigenschaften entwickelt wird. Zweitens werden die beiden optischen Kanäle hinsichtlich

Wechselwirkungen durch unvollständige spektrale Trennung von Öl- und Kraftstoff-LIF (cross-talk) bewertet, um die Unterscheidung von Kraftstoff- und Ölschichten im Motorbetrieb zu ermöglichen. Die Adaption des LIF-Messsystems am optischen Einzylinderaggregat ermöglicht die simultane, kurbelwinkelaufgelöste Untersuchung von Kraftstoff und Öl unter realistischen Betriebsbedingungen. Hierdurch können Öltransportvorgänge, Kraftstoff-Wandbenetzung und Kraftstoff-Öl-Interaktion visualisiert werden.





Kolbengruppe zugeordnet werden. Im Folgenden werden die Komponenten dieses tribologischen Systems charakterisiert.

## Kolben

In Abbildung 2-2 ist der Kolben eines Ottomotors mit charakteristischen Bereichen dargestellt.

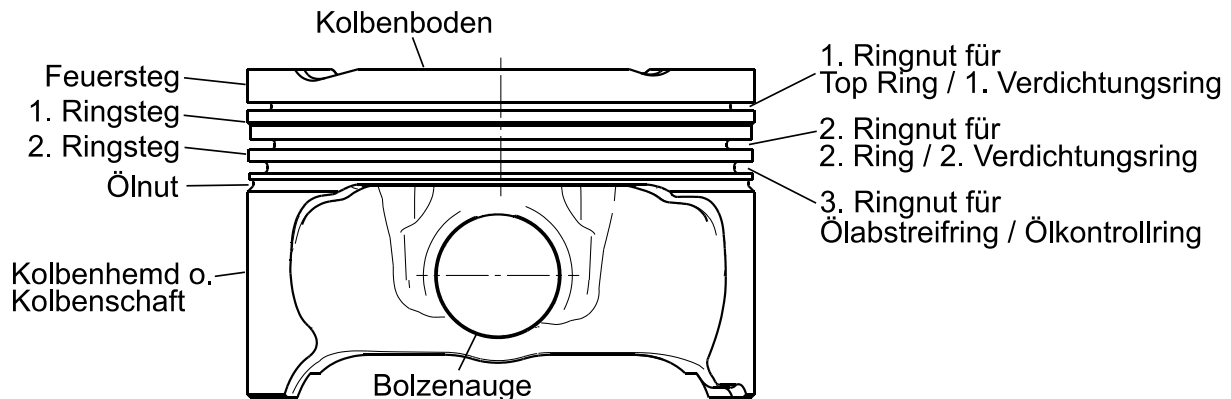


Abbildung 2-2: Charakteristische Bereiche eines Pleuellagers. Eigene Darstellung nach Daimler-interner Konstruktionszeichnung.

Der Pleuellager dient der Volumenänderung des Pleuraums und der Übertragung der Pleukraft über den im Pleuellager gelagerten und mit dem Pleuel verbundenen Pleuel auf die Pleuelwelle. Die Pleuellager werden vom Pleuellager im Bereich des Pleuellagerfelds aufgenommen und dienen zusammen mit dem Pleuellager der Abdichtung des Pleuraums gegen Öl aus dem Pleuellagergehäuse und der Abdichtung des Pleuellagergehäuses gegen Pleuelgas. Durch die geometrische Gestaltung des Pleuellagers wird zusammen mit dem Pleuellagerdach die Pleuellagerform definiert und abgegrenzt. Über den Pleuellager wird ein Teil der Pleuelwärme über die Pleuellagerlaufbahn dem Pleuelmittel zugeführt. Das Pleuellagerhemd dient der kinematischen Führung des Pleuellagers in der Pleuellagerbohrung.

Der Pleuellager unterliegt wechselnden Beanspruchungen durch Gas- und Massenkräfte, hohe Temperaturen durch den Wärmefluss vom Pleuellager, Reibkräfte und Bewegungen quer zur Pleuellagerichtung durch Pleuellagerkräfte. Abbildung 2-3 gibt eine Übersicht über die Kräfte und Bewegungsrichtungen des Pleuellagers im Pleuellagerstakt.

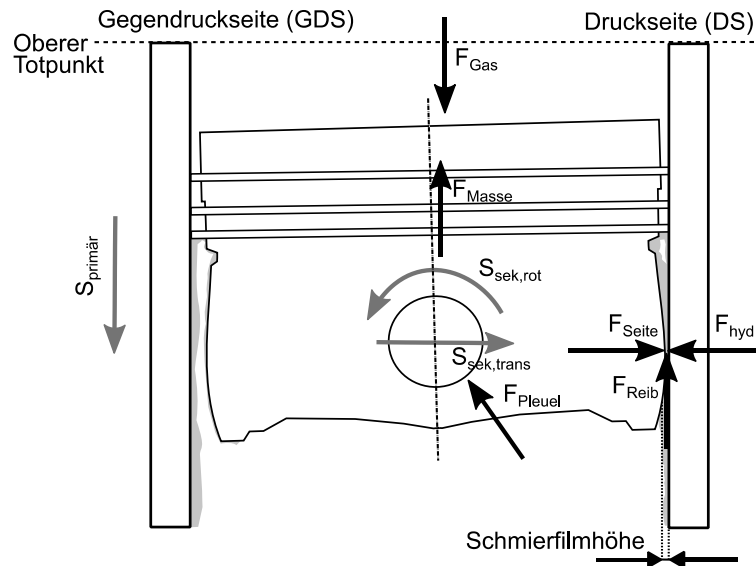


Abbildung 2-3: Kinematische Führung des Kolbens im Zylinder mit Kräften und Bewegungsrichtungen (primär und sekundär) im Expansionstakt nach [5-7].

Die senkrecht wirkende Gaskraft  $F_{\text{Gas}}$  wird über den Kolben und das Pleuel auf die Kurbelwelle übertragen (über  $F_{\text{Pleuel}}$ ). Durch die geometrische Anbindung des Kolbens am Pleuel und durch den Spalt zwischen Zylinderwand und Kolben (Kolbenspiel) erfährt der Kolben neben der primären Auf- und Abwärtsbewegung  $S_{\text{primär}}$  zusätzlich eine Sekundärbewegung. Diese setzt sich aus einer Rotation um den Pleuelbolzen  $S_{\text{sek,rot}}$  und einer Bewegung  $S_{\text{sek,trans}}$  in Richtung der Zylinderwand zusammen. Da der Kolben die Anlageseite an der Zylinderwand innerhalb eines Arbeitsspiels wechselt, wird zwischen Druck- und Gegendruckseite unterschieden. Die Druckseite ist hierbei die Seite, auf der der Kolben nach dem Zünd-OT (oberer Totpunkt, in dem die Zündung erfolgt) anliegt. In Abhängigkeit des Betriebspunktes kann die Seitenkraft  $F_{\text{Seite}}$  in Folge der hohen Dynamik und Last auf mehrere Tausend Newton ansteigen. Der Schmierfilm dämpft den Kolbeneinschlag beim Anlagewechsel durch die aus dem hydrodynamischen Druck resultierende Kraft  $F_{\text{hyd}}$  [5].

Zur Realisierung geringer oszillierender Massen werden Kolben für Ottomotoren u.a. aus einer AlSi-Legierung gegossen. Lokal werden einzelne Kolbenbereiche entsprechend der mechanischen und thermischen Beanspruchung modifiziert, z.B. durch Beschichtung des Pleuelhemds oder Bewehrung der Ringträger mit Eisenwerkstoffen. Zur Abführung der Verbrennungswärme werden Kolben mit einer Standdüse am Pleuelgehäuse mit Öl angespritzt. Eine größere Temperaturabsenkung wird mit ölgefüllten Kühlkanälen im Inneren des Pleuels erreicht [8].

## Kolbenringe

Das Ringpaket moderner Ottomotoren besteht aus zwei Kompressionsringen und einem Ölabstreifring (Vgl. Abbildung 2-4). Die Abdichtung des Brennraums erfüllen die beiden Verdichtungsringe zusammen mit dem Kolben. Der Ölhaushalt auf der Zylinderwand und auf den Ringstegen wird durch den Ölabstreifring reguliert. Ein Teil der Verbrennungswärme wird dem Kühlmittel im Zylindermantel über die Kolbenringe zugeführt.

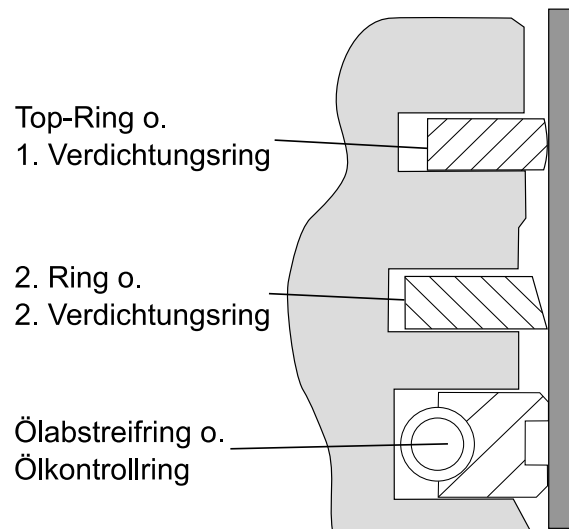


Abbildung 2-4: Das Kolbenringpaket eines Viertakt-Ottomotors.

Das Dichtsystem Kolben/Kolbenring/Zylinderlaufbahn unterliegt komplexen Zusammenhängen aus Gas-, Reib- und Massenkräften. Abbildung 2-5 zeigt die Kräfte am Top-Ring während der Expansion.

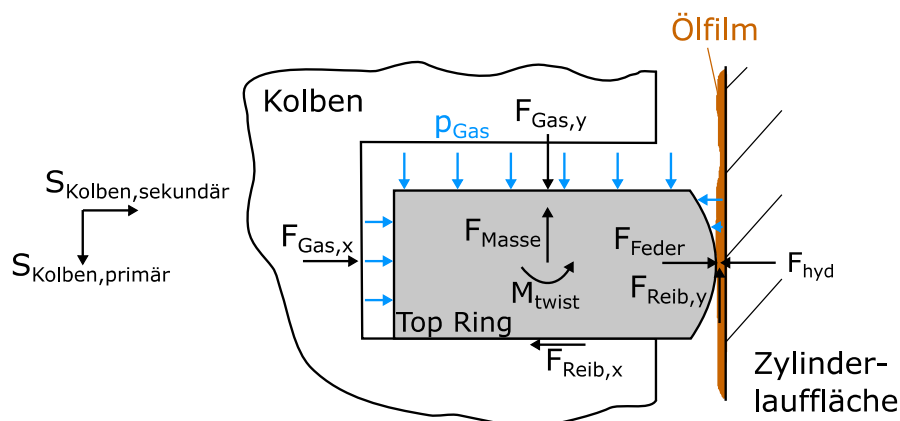


Abbildung 2-5: Kräfte am Top-Ring im Expansionstakt nach [9, 10].

Der Kolbenring wird im Fertigungsprozess aufgetrennt (Ringstoß). Im eingebauten Zustand ist der Ring dadurch mit der radialen Federkraft  $F_{Feder}$  vorgespannt, wodurch die Anlage des Rings an der Zylinderwand über den gesamten Kolbenhub

sichergestellt werden soll. Durch das Axialspiel des Rings wirkt die aus Verdichtungs- und Verbrennungsdruck resultierende Gaskraft  $F_{\text{Gas},x}$  auf die Ringflanke in Richtung Zylinderwand, wobei die aus dem hydrodynamischen Druck resultierende Kraft  $F_{\text{hyd}}$  und die Reibkraft  $F_{\text{Reib},x}$  entgegenwirken. Die aus diesem Kräftegleichgewicht resultierende Kraft  $F_x$  definiert das Anlageverhalten, bzw. die Dichtfunktion des Rings.

Aus der Kraft  $F_x$  und dem Reibwert  $\mu$  geht aus dem Zusammenhang  $F_{\text{Reib},y} = \mu \cdot F_x$  die Reibkraft hervor. Die Reibkraft und die Massenkraft  $F_{\text{Masse}}$  entgegen der Hauptbewegungsrichtung des Kolbens  $S_{\text{Kolben,primär}}$  wirken der Gaskraft  $F_{\text{Gas},y}$  entgegen. Im Betrieb werden Anlagewechsel des Rings zwischen oberer und unterer Nutflanke durch dieses Kräftegleichgewicht bestimmt. Hierbei kann es zu einem Ringkollaps oder Ringflattern kommen, wodurch der Ring nicht an der Laufbahn anliegt und die Dichtfunktion des Rings gestört wird [11]. Allerdings ist die Bewegung des Rings in der Ringnut erforderlich, um den Ölaustausch in diesem Bereich zu gewährleisten und somit das Ringstecken durch Öl-Verkokung zu vermeiden [8]. Das System wird auch durch die Kolbensekundärbewegung beeinflusst. Durch das Moment  $M_{\text{twist}}$ , z.B. durch Anfasen der Ringkanten, kann außerdem das Anlageverhalten des Rings gezielt manipuliert werden.

Der dargestellte Ring weist eine ballige Form im Kontaktbereich zur Zylinderwand auf. Weitere geometrische Ausführungen, Werkstoffe und Beschichtungen der Kolbenringe sind in der DIN ISO 6621 Teil 1 und in [8] ausführlich dargestellt.

### **Zylinderlaufbahn**

Im Rahmen von Leichtbaumaßnahmen kommen in modernen Ottomotoren u.a. AlSi-Legierungen als Kurbelgehäusematerial zum Einsatz. Da die Zylinderlaufbahn den Grundkörper des tribologischen Systems der Kolbengruppe bildet und der Aluminiumwerkstoff aus tribologischer Sicht ungünstige Eigenschaften aufweist, werden Laufbuchsen aus Grauguss in das Kurbelgehäuse eingegossen oder eisenbasierte Spritzschichten aufgebracht [12]. Im anschließenden Fertigungsprozess wird durch Honen die funktionelle Oberfläche aus sich kreuzenden Riefen und Plateaus mit geringer Rauheit erzeugt. Vereinfacht betrachtet, dienen die Honriefen als Ölrückhaltevolumen für den Reibkontakt Kolbenring/Zylinderlaufbahn und die Plateaus als reibungsarme Kontaktfläche der Kolbenringe [13]. Weitere Details zu Werkstoffen, Ausführungen und Anforderungen bietet [8].

## Schmierstoffe

In Verbrennungsmotoren kommt Schmieröl als Zwischenmedium zum Einsatz, um den unmittelbaren Kontakt der Reibpartner Kolben/Kolbenring/Zylinderlaufbahn zu unterbrechen und somit Reibung und Verschleiß zu reduzieren. Als Grundöl werden Mineralöle bestehend aus Paraffinen, Naphthenen und Aromaten oder synthetische Öle, z.B. Polyalphaolefine, Polyetheröle oder Siliconöle verwendet [14]. Um die Funktionalität des Schmierstoffs auch bei Kontakt-, bzw. Laufbahntemperaturen von 190-220 °C im Bereich des oberen Totpunkts [15] sicherzustellen, werden dem Schmierstoff Additive zugesetzt (bis zu 20 vol.-%). Eine Übersicht der Eigenschaften, Zusammensetzung und Wirkungsweise wichtiger Additive bieten [16, 17]. Das Motoröl übernimmt im Verbrennungsmotor folgende Funktionen:

- Kraftübertragung
- Wärmeabfuhr
- Dichtfunktion
- Reinigung
- Korrosionsschutz
- Verschleißschutz

Eine wichtige Kennzahl des Motoröls ist die Viskosität, die den Schmierzustand des Systems beeinflusst. Die Viskosität beschreibt den Widerstand gegen Verformung, ist ein innerer Reibkoeffizient und ist abhängig von Druck, Temperatur und Schergeschwindigkeit [14].

## 2.2 Physikalische Prozesse in der Kolbengruppe

In direkteinspritzenden Ottomotoren treten Öl, Kraftstoff und Gase in Wechselwirkung. Abbildung 2-6 zeigt eine Übersicht der physikalischen Prozesse in der Kolbengruppe. Im Folgenden werden die einzelnen Phänomene und deren Auswirkungen beschrieben.

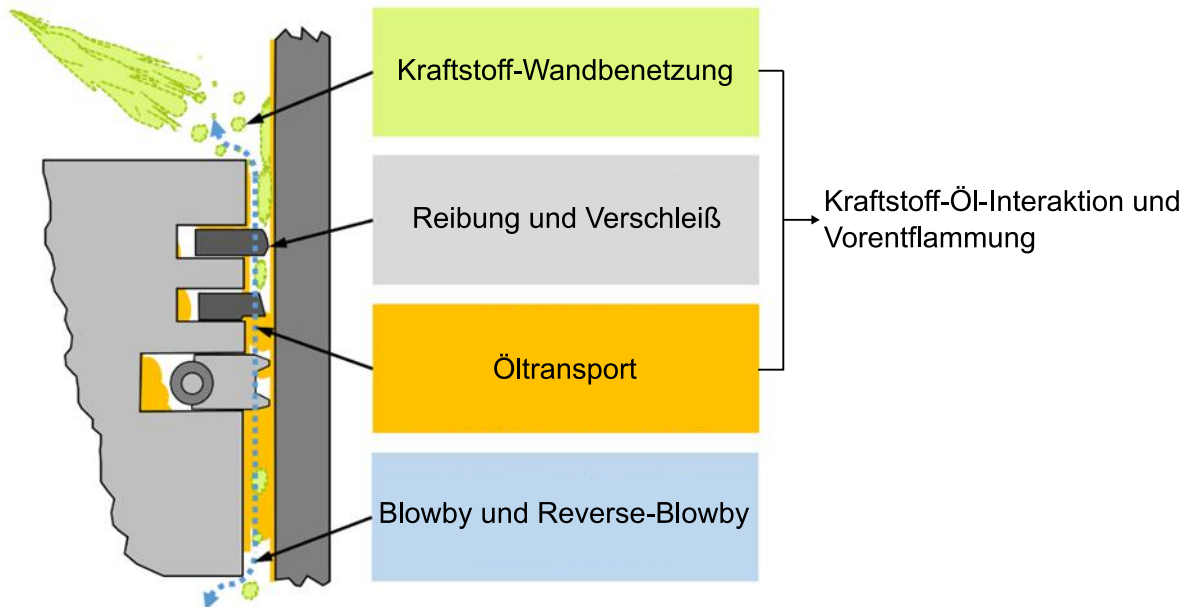


Abbildung 2-6: Physikalische Prozesse in der Kolbengruppe eines Verbrennungsmotors mit Direkt-Einspritzung (grün: Kraftstoff; gelb: Motoröl; blau: Gasströmung) nach [4].

### Reibung und Verschleiß

Reibung und Verschleiß sind in den Kontaktbereichen von Pleuhschale/Zylinderlaufbahn und Pleuhemd/Zylinderlaufbahn, sowie in den Ringnuten relevant und hängen vom Beanspruchungskollektiv des tribologischen Systems ab. Im Kontaktbereich zwischen Pleuhemd und Zylinderwand wird die Reibung u.a. durch den Schmierzustand beeinflusst (Vgl. Abbildung 2-3). Die Optimierung des Pleuhemds hinsichtlich Reibung, Verschleiß und Geräuschentwicklung ist Gegenstand simulativer [7, 18, 19] und experimenteller [20-25] Forschung. Durch die Pleuhemdbeschichtung [21, 26], -strukturierung [22] und die Auslegung der Pleuhemdgeometrie [20, 23] und -steifigkeit [24, 25] können Schmierzustand, Reibung, Verschleiß und Geräuschentwicklung des Pleuels beeinflusst werden. Auch das Ringpaket und die Zylinderlaufbahn werden stetig weiterentwickelt. Durch Pleuhschalenbeschichtungen [27] und Optimierung der Kontaktgeometrie Pleuhschale/Zylinderlaufbahn [28] soll das Reib-Verschleiß-Verhalten des Ringpakets verbessert werden, wobei auch die Laufbahntopographie von entscheidender

Bedeutung ist [29]. Zur Reibungsoptimierung werden aktuell auch niedrigviskose Öle untersucht [30, 31].

In Reibungssimulationsmodellen ist der Schmierzustand, bzw. die Ölfilmdicke im tribologischen Kontakt entscheidend. Mansouri legt seinem Simulationsmodell in [7] unterschiedliche Schmierfilmhöhen am Kolbenhemd zugrunde. Die Ölfilmdicke bestimmt dabei als Eingangsgröße den Schmierzustand (Mischreibung oder hydrodynamische Reibung) und ist maßgeblich für die resultierende Reibkraft. Auch bei der Reibungssimulation des Tribosystems Kolbenring/Zylinderlaufbahn ist die Ölfilmdicke im Kontaktbereich eine wichtige Eingangsgröße des Modells [13].

### **Blowby und Reverse-Blowby**

Zwischen Brennraum und Kurbelgehäuse herrscht ein Druckgefälle. Während der Verbrennung ist der Brennraumdruck höher als der Druck im Kurbelgehäuse. Unvollständige Abdichtung des Ringpakets führt jedoch zu Leckage-Gas vom Brennraum in Richtung Kurbelgehäuse (Blowby), woraus Wirkungsgradverluste [32] und Öl- und Kraftstofftransportvorgänge [33, 34] resultieren. Andererseits verhindern Blowby-Gase übermäßigen Öltransport, der wiederum durch entgegengesetztes Leckage-Gas vom Kurbelgehäuse in Richtung Brennraum (Reverse-Blowby) gefördert wird. Reverse-Blowby tritt z.B. bei niedrigem Ansaugdruck auf, da dann der Druck im Kurbelgehäuse zeitweise höher ist als im Brennraum [35]. Die Leckage-Gase beeinflussen die Druckverhältnisse auf den Ringstegen und in den Ringnuten (Vgl. Abbildung 2-5) und sind somit auch von entscheidender Bedeutung für Öltransportvorgänge und das Anlageverhalten der Ringe [36].

### **Öltransport**

In den Reibkontakten soll eine ausreichende Ölmenge bereitgestellt werden, ohne übermäßigen Öltransport in den Brennraum zu verursachen, da Ölemission zu Partikelbildung und Vergiftung der Abgasnachbehandlung durch Aschebildung führt [37]. Das Ölangebot, das den Verdichtungsringen zur Verfügung steht, wird maßgeblich durch den Ölabstreifring beeinflusst. Die Reibungsoptimierung des Ringpakets steht teilweise in Konkurrenz zur Dichtfunktion. Frommer et. al [38] untersuchen den Zusammenhang zwischen Reibung und Ölemission. Durch die Reduzierung der Federkraft des Ölabstreifrings sinkt zwar die Reibung, jedoch nimmt die Ölemission zu. Mit dem Design der Nut des Ölabstreifrings und durch Durchgangsbohrungen in der Nut kann der Öltransport vom Kurbelgehäuse in

Richtung Brennraum beeinflusst werden [39]. Dabei wird mit steigender Anzahl von Ölrücklaufbohrungen eine Reduzierung der Ölemission festgestellt.

Thiruoard et al. [40, 41] führten ausführliche optische Untersuchungen der Öltransportvorgänge in der Kolbengruppe durch. Hierbei werden folgende Öltransportmechanismen in den charakteristischen Bereichen des Kolbens (Vgl. Abbildung 2-2) identifiziert:

- Auf den Ringstegen werden Öltransportvorgänge in axialer Richtung durch Massenträgheit und Gaskraft beeinflusst. In Umfangsrichtung ist der Öltransport von der Gaskraft und somit hauptsächlich von der Motorlast abhängig.
- Öl wird durch den Ring von der Zylinderlaufbahn „abgekratzt“ und über die obere oder untere Ringflanke auf die Ringstege transportiert. Beim „Bridging“ wird Öl vom Ringsteg über die Kolbenringflanke auf die Zylinderwand transportiert.
- Aufgrund des Anlagewechsels des Kolbenrings zwischen oberer und unterer Ringnutflanke wird Öl aus der Nut heraus- oder hineingedrückt („squeezing“ und „pumping“). Der Öltransport im Bereich der Ringnut wird auch durch Kolbensekundärbewegung, Massenträgheit und Gaskraft beeinflusst.
- Durch Blowby-Gase wird Öl durch den Ringstoß vom Brennraum in Richtung Kurbelgehäuse transportiert. Reverse-Blowby führt zu entgegengesetztem Öltransport.

### **Kraftstoff-Wandbenetzung**

Hybridisierungsmaßnahmen bei Ottomotoren führen zu häufigeren Kaltstarts und aus Downsizingmaßnahmen resultieren kleinere Durchmesser der Zylinderbohrung. Niedrige Wandtemperaturen und ein geringer Düse/Wand-Abstand bei direkt-einspritzenden Motoren begünstigen die Akkumulation von Kraftstoff in Form von Wandfilmen auf Kolbenboden und Zylinderwand. Während der Verbrennung führen diese fetten Zonen unverdampften Kraftstoffs zu Diffusionsflammen („pool fire“) und Rußbildung [42-46]. Die Wandfilmbildung kann u.a. durch das Einspritztiming [42] und den Einspritzdruck [47] beeinflusst werden.

### **Kraftstoff-Öl-Interaktion und Vorentflammung**

Durch die Kraftstoff-Wandfilmbildung kann flüssiger Kraftstoff mit dem Motoröl in der Kolbengruppe in Wechselwirkung treten. Budde et. al [48] stellen eine Korrelation zwischen Kraftstoff-Wandfilmbildung und Ölemission bei einem direkteinspritzenden



Ottomotor fest. Dabei nimmt die Ölemission mit geringerer Wandfilmbildung ab. Sagawa et. al [53] stellen einen Einfluss des Einspritztimings auf die Ölverdünnung fest. Die Kraftstoff-Wandbenetzung führt zur Ölverdünnung mit Kraftstoff [49] und einer Absenkung der Viskosität [33, 50]. Hierdurch nehmen sowohl Ölemission [51], als auch HC-Emissionen [52] zu. Außerdem führt die Ölverdünnung mit Kraftstoff zur Ölschädigung, da Additive oxidieren und korrosive Säuren entstehen können [49].

Bei einer Vorentflammung entzündet sich das Kraftstoff-Luft-Gemisch noch vor dem festgelegten Zündzeitpunkt. Hieraus resultieren hohe Spitzendrücken im Brennraum, die zur Schädigung der Ringstege und Kolbenringe führen können. Als mögliche Ursachen für Vorentflammungen werden u.a. die Formulierung des Additivpakets des Motoröls [54] und einzelne Öl-Komponenten, wie z.B. Calcium [55] genannt.

Die Vorentflammungsneigung wird auch durch die Auslegung der Kolbengruppe beeinflusst. Magar et. al [56] stellt bei einer höheren Vorspannung des Top-Rings eine Abnahme der Vorentflammungsneigung fest. Die Auswirkungen einer geänderten Feuersteggeometrie auf die Vorentflammungen untersuchen Amann et. al [57] und Zahdeh et. al [58].

Der Einfluss der Kraftstoff-Wandbenetzung auf Vorentflammungsphänomene wird ebenfalls untersucht. Hierbei wird ein Anstieg der Vorentflammungshäufigkeit festgestellt, wenn die Kraftstoffeinspritzung im Ansaugtakt hin zu einem späteren Zeitpunkt verschoben wird [59, 60]. Mit steigender Wandtemperatur wird hingegen eine geringere Vorentflammungsneigung beobachtet [61, 62]. Diese Beobachtungen korrelieren mit Erkenntnissen aus Kraftstoff-Wandfilm-Untersuchungen. Die Kraftstoff-Wandfilmmasse nimmt mit steigender Temperatur ab und kann durch das Einspritztiming beeinflusst werden [47].

### **2.3 Tribologische Untersuchung der Kolbengruppe durch LIF**

Zur Analyse tribologischer Phänomene in der Kolbengruppe können verschiedene Messverfahren angewendet werden. Einen Überblick über nicht-optische Messverfahren bieten [4, 63, 64]. Zur Detektion flüssiger Wandfilme in tribologischen Systemen hat sich u.a. das Prinzip der laserinduzierten Fluoreszenz (LIF) etabliert [4, 40, 41, 63, 65-73]. Der größte Vorteil des LIF-Verfahrens ist die Möglichkeit tribologische Phänomene mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung über einen großen Messbereich zu visualisieren. Im Folgenden werden die physikalischen Grundlagen der laserinduzierten Fluoreszenz (Vgl. Kapitel 2.3.1) und deren

Anwendung zur Detektion von Ölfilmen in tribologischen Systemen erläutert (Kapitel 2.3.2). Auf die Untersuchung von Kraftstoff-Wandfilmen und die simultane Kraftstoff-Öl-Visualisierung durch LIF wird in Kapitel 2.3.3 eingegangen.

### 2.3.1 Physikalische Grundlagen der laserinduzierten Fluoreszenz

Lichtstrahlung, die auf eine Materie trifft, kann mit dieser in Wechselwirkung treten. Die Intensität der einfallenden Strahlung  $I_0$  teilt sich in reflektierte Strahlung  $I_r$ , elastisch und inelastisch gestreute Strahlung  $I_s$ , absorbierte Strahlung  $I_a$  und transmittierte Strahlung  $I_t$  auf:

$$I_0 = I_r + I_s + I_a + I_t \quad (\text{Gleichung 2.1})$$

Bei Vernachlässigung der Reflektion und Streuung des Anregungslichts ist die Intensität  $I_a$  des absorbierten Lichts gegeben durch:

$$I_a = I_0 - I_t \quad (\text{Gleichung 2.2})$$

Das Lambert-Beersche Absorptionsgesetz beschreibt die Lichtabsorption  $I_a$  eines transparenten Mediums in Abhängigkeit von Schichtdicke  $d$ , Konzentration eines Absorbers  $c$  und dem stoff- und wellenlängenabhängigen Absorptionskoeffizienten  $\epsilon$  [74]. Die Intensität der absorbierten Strahlung lässt sich durch folgende Abklingkurve beschreiben:

$$I_a = I_0 \cdot (1 - e^{-\epsilon cd}) \quad (\text{Gleichung 2.3})$$

Die Lichtabsorption geht mit einer Änderung des energetischen Zustands des Absorbermoleküls einher. Durch die Absorption eines Photons mit der Energie  $h \cdot f$  mit dem Planckschen Wirkungsquantum  $h$  und der Frequenz der elektromagnetischen Welle  $f$  wird das Molekül in einen angeregten Zustand überführt. Die Anregung des Moleküls erfolgt nur, wenn die Strahlungsenergie des Photons, bzw. die Frequenz der elektromagnetischen Welle der für den Übergang erforderlichen Anregungsenergie entspricht. Die Wahrscheinlichkeit der Überführung eines Moleküls in den angeregten Zustand, bzw. die Absorption des Photons wird durch den wellenlängenabhängigen, molekularen Absorptionsquerschnitt  $\epsilon$  beschrieben. Je nach Aufbau der lichtabsorbierenden Verbindung (Chromophor) eines Moleküls wird nur Lichtstrahlung eines spezifischen Wellenlängenbereichs, bzw. mit einer spezifischen Energie absorbiert [75].

Das Jablonski-Diagramm in Abbildung 2-7 zeigt die Überführung eines Moleküls in den angeregten Zustand, sowie die Deaktivierungsprozesse zur Rückführung des Moleküls in den Grundzustand.

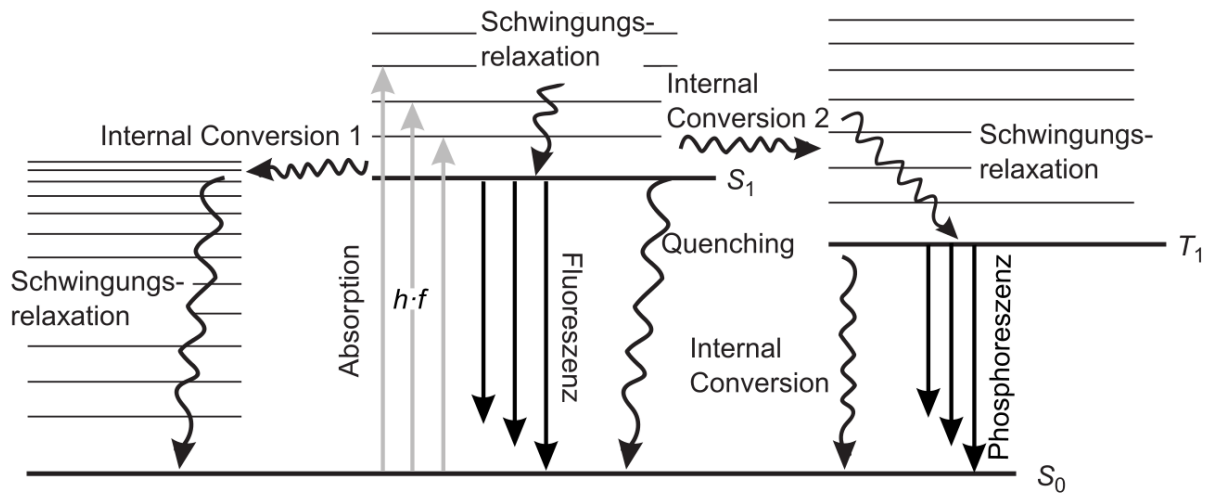


Abbildung 2-7: Jablonski-Diagramm mit Deaktivierungsprozessen eines angeregten Moleküls nach [74]. *Fette, schwarze Linien:* Elektronenenergie; *Dünne, schwarze Linien:* Schwingungszustände; *Hellgraue Pfeile:* Energieabsorption; *Schwarze, geradlinige Pfeile:* Übergang mit Strahlungsemission; *Schwarze, wellige Pfeile:* Strahlungslose Übergänge.

Der elektronische Zustand der meisten organischen Moleküle kann in Singulett- und Triplett-Zustände unterteilt werden. Ein Singulett-Zustand liegt vor, wenn alle Elektronenpaare antiparallele Spins aufweisen. Im Triplett-Zustand besitzen zwei ungepaarte Elektronenpaare den gleichen Spin. Wird nun ein Photon mit geeigneter Wellenlänge absorbiert, geht das Molekül vom Grundzustand  $S_0$  in eines der Schwingungsniveaus des angeregten Singulett-Zustands  $S_1$  über. Die Schwingungsenergie wird durch die Kollision mit anderen Molekülen in Form von Wärme abgegeben und das Molekül relaxiert in das thermische Gleichgewicht des ersten angeregten Zustands (Kasha-Regel). Von diesem Energieniveau sind verschiedene Übergänge in den Grundzustand möglich. Das Molekül kann die Energie durch einen strahlungslosen Übergang in ein Schwingungsniveau des Grundzustands  $S_0$  (Internal Conversion 1) mit anschließender Schwingungsrelaxation abgeben. Ein weiterer strahlungsloser Übergang ist durch die Energieübertragung auf ein anderes Molekül durch Quenching möglich. Durch die Abgabe eines Photons in Form von Fluoreszenzlicht kann das Molekül vom untersten Schwingungsniveau von  $S_1$  in ein Schwingungsniveau von  $S_0$  mit anschließender Schwingungsrelaxation in den Grundzustand von  $S_0$  übergehen. Durch die zahlreichen Schwingungsniveaus des Moleküls unterliegt die Lichtabsorption und Emission einer Wahrscheinlichkeits-

verteilung, die sich in einem kontinuierlichen Absorptions- und Emissionsspektrum äußert. Aufgrund der Schwingungsrelaxation nach der Photonenabsorption weist das als Fluoreszenz emittierte Photon außerdem eine geringere Energie, bzw. größere Wellenlänge auf. Das Emissionsspektrum eines Moleküls ist daher in Richtung größerer Wellenlängen rotverschoben (Stokes-Shift).

Ein weiterer Prozess ist der Übergang von  $S_1$  auf ein Schwingungsniveau des Triplett-Zustands  $T_1$  durch Internal Conversion 2 gefolgt von einer Relaxation auf das niedrigste Schwingungsniveau. Der Übergang von  $T_1$  in den Grundzustand  $S_0$  erfolgt dann entweder über Internal Conversion oder der Abgabe eines Photons in Form von Phosphoreszenzlicht. Phosphoreszenz ist aufgrund der langen Lebensdauer des Triplett-Zustands durch längere Abklingzeiten (bis zu 100 s) verglichen mit Fluoreszenzstrahlung ( $10^{-7}$ - $10^{-9}$  s) charakterisiert.

Das Verhältnis der Anzahl der Photonen, die als Fluoreszenzlicht emittiert werden ( $n_f$ ), zur Anzahl aller absorbierten Photonen ( $n_{abs}$ ) wird durch die Quantenausbeute oder Quanteneffizienz  $\Phi_f$  ausgedrückt:

$$\Phi_f = \frac{n_f}{n_{abs}} \quad \text{(Gleichung 2.4)}$$

Das Lambert-Beer-Gesetz, das die Lichtabsorption beschreibt, kann durch die Quanteneffizienz erweitert werden. Gleichung 2.5 fasst die Fluoreszenzintensität als Produkt aus absorbiertem Licht und Quanteneffizienz zusammen:

$$I_f = \Phi_f \cdot I_0 \cdot (1 - e^{-\epsilon cd}) \quad \text{(Gleichung 2.5)}$$

In der LIF-Spektroskopie wird die Rotverschiebung des Emissionsspektrums genutzt, um das Fluoreszenzlicht von gestreutem und reflektiertem Anregungslicht durch optische Filter abzutrennen. Die Filter bilden zusammen mit Objektiven, Sensoren, etc. den optischen Pfad des bildgebenden Messsystems. Die Sammeleffizienz des Systems kann durch die Kollektions- und Detektionseffizienz  $\Phi_{det}$  zusammengefasst werden, woraus die detektierte Fluoreszenzintensität  $I_{f,det}$  resultiert:

$$I_{f,det} = \Phi_{det} \Phi_f I_0 \cdot (1 - e^{-\epsilon cd}) \quad \text{(Gleichung 2.6)}$$

Da  $I_{f,det}$  von der Konzentration und der Schichtdicke des absorbierenden Mediums abhängt, kann bei bekannter Konzentration  $c$  die Schichtdicke  $d$  anhand der LIF-Intensität bestimmt werden. Für schwaches Anregungslicht  $I_0$  und dünne Schichtdicken, sowie niedrige Konzentrationen ist  $I_{f,det}$  proportional zur Schichtdicke.

$$I_{f,det} \propto \Phi_{det} \Phi_f I_0 \cdot \epsilon c \cdot d \quad (\text{Gleichung 2.7})$$

### 2.3.2 Untersuchung von Ölschichten in der Kolbengruppe

Im Folgenden wird die Anwendung des bildgebenden Verfahrens der laserinduzierten Fluoreszenz zur Untersuchung von Ölfilmen in Tribometern und optisch zugänglichen Motoren beschrieben. Einen Überblick über die Analyse von flüssigen Kraftstoff-Schichten durch LIF bietet Kapitel 2.3.3.

Die Anwendung von LIF zur Untersuchung von Ölfilmen in tribologischen Kontakten bietet den Vorteil flächige Informationen (2D-LIF) über die Ölverteilung berührungslos bereitzustellen. Durch eine geeignete Kalibrierung kann gemäß dem Lambert-Beer-Gesetz eine quantitative Schichtdicke aus der Proportionalität zur LIF-Intensität bestimmt werden (Vgl. Kapitel 2.3.1). Die Herausforderung der Messmethode ist es, den tribologischen Kontakt optisch zugänglich zu machen und dabei nicht zu ändern.

Der Ölfilm im tribologischen Kontakt eines Rollenlagers wurde von Ford und Foord [65] durch LIF untersucht. Der optische Zugang wurde durch Lichtleiterfasern in einem Messpunkt (1D-LIF) umgesetzt und das Fluoreszenzlicht mit einem Photomultiplier detektiert. Zur Detektion größerer Filmdicken und zur Verminderung von Bleichungseffekten wurde dem Schmierstoff ein Laserfarbstoff beigemischt. 1D-LIF realisieren Arcoumanis et. al [66] an einem Einzylinder-Dieselmotor mit drei Messpunkten in der Zylinderlaufbahn. Die natürliche Fluoreszenz des Öls nach Anregung mit 488 nm eines Argon-Ionen-Lasers wird spektral von der Anregung getrennt und mit einem Photomultiplier detektiert. Takiguchi et. al [67] verwenden ebenfalls 1D-LIF mit Fasern in der Zylinderlaufbahn eines Forschungsmotors. Hierbei wird eine Mischung aus Motoröl und  $5 \times 10^{-4}$  mol/L Coumarin 6 mit einem He-Cd Laser (442 nm) angeregt. Am Massachusetts Institute of Technology (MIT) setzen Wong und Hoult [68] ein Quarzfenster in die Zylinderlaufbahn eines Einzylinder-Dieselaggregats ein. Zur Sicherstellung eines bündigen Übergangs zwischen Fenster und Laufbahn wird die Zylinderbuchse im Verbund gehont. Die Detektion der Ölfluoreszenz erfolgt nach Anregung mit 441,6 nm eines He-Cd-Lasers durch einen Photomultiplier (1D-

LIF). Die Möglichkeit der Untersuchung des Ölfilms über einen größeren Bereich durch 1D-LIF realisiert Hoult et. al [69] durch die Verwendung eines Forschungsmotors mit großflächigem Quarzfenster in der Zylinderwand. Die Position der Faser kann somit über den gesamten Kolbenhub angepasst werden, bleibt aber während der Messung ortsfest. Diese „Scanning-LIF“ Methode wird auch von Sanda et. al angewendet [70]. Eine kurbelwinkelaufgelöste Untersuchung des Schmierfilms ermöglicht Weimar [63] durch ein Koppel-Schwinge-System und 1D-LIF. Optische Messsonden werden in das Ringfeld des Kolbens eingebracht und über flexible Lichtleiterfasern, die im Kolbeninneren zwischen bewegtem Pleuel und feststehendem Kurbelgehäuse geführt werden, mit dem Photomultiplier verbunden. Weimar verwendet eine Mischung aus Öl und dem Fluoreszenzfarbstoff Lumilux CD 345, die mit 488 nm eines Argon-Ionen-Lasers angeregt wird.

Die 1D-LIF-Messtechnik mit Lichtleiterfasern und Photomultiplier ist durch einen minimal-invasiven Eingriff der Optik in das Realsystem gekennzeichnet, was insbesondere im Hinblick auf hohe Beanspruchungen im Verbrennungsmotor durch Gaskräfte und Temperaturen vorteilhaft ist. Allerdings werden keine Informationen über die räumliche Ölverteilung und Öltransportvorgänge gewonnen. In der Vergangenheit wurden daher auch Zylinderlaufflächen mit großen optischen Zugängen ausgestattet. Hierbei stellt die thermomechanische Belastung im befeuerten Motorbetrieb eine Herausforderung an das transparente Material und den Verbund aus Grund- und Fenstermaterial dar. Hierdurch ist der Last- und Drehzahlbereich des optischen Motors zumeist eingeschränkt [35, 70, 71]. Die 2D-LIF-Messverfahren basieren auf der Anregung einer Öl-Farbstoff-Mischung und der flächigen Detektion des Fluoreszenzlichts mit einer Kamera. Zur Vermeidung von Bewegungsunschärfe kommen dabei häufig gepulste Lichtquellen zum Einsatz [4, 35, 71, 76]. Inagaki et. al [71] entwickeln eine 2D-LIF-Messtechnik am optisch zugänglichen Motor aus [70]. Im geschleppten Betrieb wird eine Mischung aus Motoröl und  $7 \times 10^{-4}$  mol/L Coumarin 6 mit einer Xe-Blitzlampe (Pulsdauer 10  $\mu$ s) angeregt und das Fluoreszenzlicht mit einer CCD-Kamera detektiert. Diese Messtechnik wird an einem Einzylindermotor mit jeweils einem Saphirfenster der Größe  $4 \times 71 \text{ mm}^2$  (Breite x Höhe) auf Druck- und Gegendruckseite appliziert und Untersuchungen im befeuerten und geschleppten Motorbetrieb durchgeführt. In Abbildung 2-8 ist eine LIF-Messung von Inagaki et. al [71] dargestellt. Diese zeigt den Übergang vom befeuerten in den geschleppten

Motorbetrieb und die Auswirkungen des Schließens der Drosselklappe („Throttle Closing“) auf den Ölhaushalt in der Kolbengruppe.

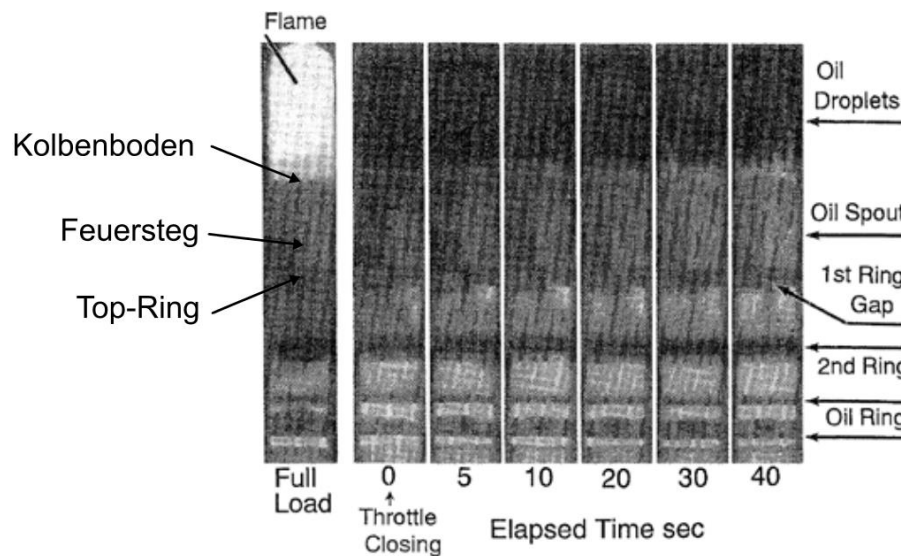


Abbildung 2-8: LIF-Aufnahmen der Kolbengruppe im Expansionstakt beim Lastwechsel von befeuerten zu geschlepptem Betrieb [71].

Während im befeuerten Motorbetrieb („Full load“) das Flammleuchten im Brennraum oberhalb des Kolbenbodens zu erkennen ist, wird im geschleppten Betrieb kein Flammleuchten detektiert. Im zeitlichen Verlauf der Aufnahmen nimmt die LIF-Intensität im Bereich des Feuerstegs („Oil Spout“) und des Brennraums („Oil Droplets“) zu. Die Zunahme der Fluoreszenzintensität wird auf Öltropfen auf dem Feuersteg und im Brennraum zurückgeführt.

Thirouard et. al [35, 40] setzen ein Saphirfenster mit der Größe  $18 \times 98,5 \text{ mm}^2$  (Breite x Höhe) in die Zylinderlauffläche eines Forschungsmotors am MIT ein. Die Autoren entwickeln eine LIF-Messmethode bei der die Temperaturabhängigkeit der Fluoreszenz durch den Einsatz von zwei Laserfarbstoffen im Motoröl minimiert werden soll. Eine Mischung aus Motoröl mit  $1 \times 10^{-4} \text{ mol/L}$  Rhodamin 640 und  $1 \times 10^{-4} \text{ mol/L}$  Pyrromethen 567 wird mit der 532 nm-Strahlung eines Nd:YAG-Lasers angeregt. Die maximale Repetitionsrate des Lasers von 20 Hz ermöglicht eine Aufnahme pro Umdrehung für Drehzahlen bis  $1200 \text{ min}^{-1}$ . Picard et. al [77] verwenden dieses LIF-Messsystem zur Untersuchung der Öltransportvorgänge in den Brennraum eines optisch zugänglichen Wankelmotors. Zanghi et. al [76] erweitern die LIF-Messtechnik hinsichtlich der zeitlichen Auflösung durch die Verwendung eines Nd:YAG-Lasers und einer Hochgeschwindigkeits-Kamera mit einer maximalen Wiederholrate von 30 kHz. Mit Hilfe des LIF-Messsystems mit hoher zeitlicher Auflösung untersuchen die Autoren Öltransportmechanismen in der Kolbengruppe, sowie den Schmierfilmaufbau im

tribologischen Kontakt Kolbenhemd/Zylinderlaufbahn. Abbildung 2-9 zeigt LIF-Aufnahmen von Zanghi et. al [76] im geschleppten Motorbetrieb.

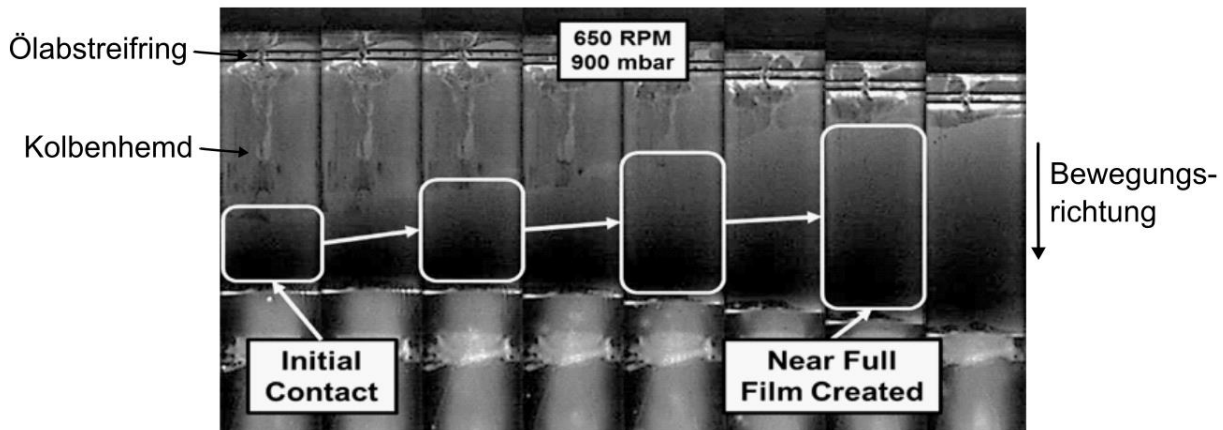


Abbildung 2-9: Kurbelwinkelaufgelöste LIF-Aufnahmen der Kolbengruppe auf der Druckseite im Expansionsstakt im geschleppten Motorbetrieb [76]. Weiße Rechtecke markieren den Kontaktbereich zwischen Kolbenhemd und Zylinderlaufbahn.

Die LIF-Bilder wurden während des Expansionsstaktes aufgenommen und der Kolben bewegt sich im zeitlichen Verlauf der Aufnahmen nach unten. Im Bereich des Ölabstreifrings werden in allen Aufnahmen höhere LIF-Intensitäten als im Bereich des Kolbenhemds detektiert. In der ersten LIF-Aufnahme ist der Kontaktbereich zwischen Kolbenhemd und Zylinderwand im unteren Bereich des Kolbens durch einen geschlossenen Ölfilm (weißes Rechteck) gekennzeichnet. Der Kontaktbereich, bzw. die Größe des geschlossenen Ölfilms nimmt während der Abwärtsbewegung zu und ein nahezu vollständig geschlossener Ölfilm wird in den letzten beiden Aufnahmen der Bilderserie detektiert. Im Vergleich zu Abbildung 2-8 ist eine verbesserte Bildqualität, weniger Rauschen und ein höheres räumliches Auflösungsvermögen zu erkennen. Gründe hierfür sind u.a. die Reduzierung der Bewegungsunschärfe durch die kurze Pulsdauer des Lasers (20 ns [76] vs. 10  $\mu$ s [71]) und die Weiterentwicklung der CMOS-Kameratechnologie.

### 2.3.3 Untersuchung von Kraftstoffschichten in der Kolbengruppe

#### Kraftstoff-Wandbenetzung

Bei der Untersuchung von Kraftstoff-Wandfilmen sind im Gegensatz zur Untersuchung von Ölfilmen die Verdampfungsvorgänge entscheidend. Für die Untersuchung von Kraftstoff-Wandfilmen können analog zur Untersuchung von Ölfilmen nicht-optische Verfahren, die in [4, 63, 64] beschrieben sind, angewendet werden. Neben der LIF-Messmethode kommen auch alternative optische Verfahren zum Einsatz: Drake et al.



[43] und Grzeszek [106] untersuchen Kraftstoff-Wandfilme mit der Methode „Refractive Index Matching (RIM)“. Das Verfahren basiert auf der Detektion von Lichtstreuung, deren Intensität vom Benetzungsgrad der Oberfläche abhängt. Die Autoren wenden das Verfahren in einem optisch zugänglichen Motor auf der Oberfläche eines transparenten Kolbens an. Popiolek [107] und Schulz et. al [108] verwenden Hochgeschwindigkeits-Infrarot-Thermometrie zur Untersuchung der Wandfilmbildung in einem Modelltest. Das Messverfahren basiert auf der Veränderung der Schwarzkörperstrahlung einer metallischen Oberfläche durch die lokale Temperaturabnahme bei Auftreffen eines Kraftstoff-Sprays. Mittal et. al [109] untersuchen die Kraftstoff-Wandbenetzung des Kolbens und der Zylinderwand durch Mie-Streuung an einem DISI-Einzyliermotor mit Quarzzylinder.

Bei der Untersuchung von Kraftstoffwandfilmen bietet das Verfahren der laser-induzierten Fluoreszenz die gleichen Vorteile gegenüber alternativer Messverfahren wie bei der Untersuchung von Ölschichten. LIF ermöglicht die berührungslose Visualisierung von Öl- und Kraftstofffilmen mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung, wobei prinzipiell große Schichtdickenunterschiede abgebildet werden können. Das Verfahren lässt durch den direkten und instantanen Charakter direkte Rückschlüsse auf die Ursachen der Phänomene zu und kann im optisch zugänglichen Motor unter realitätsnahen Bedingungen eingesetzt werden.

Die Anwendung von LIF-Messmethoden zur Untersuchung von Kraftstoff-Wandfilmen erfolgt u.a. in zahlreichen Modelltests. Senda et. al [110] nutzen zur Untersuchung der Wandbenetzung im Saugrohr einen Modelltest, bei dem ein Kraftstoff-Spray bei Raumtemperatur und atmosphärischem Druck auf eine Quarzscheibe gespritzt wird. Als Ersatz-Kraftstoff kommt eine Mischung aus 6 % Biacetyl (LIF-Tracer) und iso-Oktan zum Einsatz. Die optische Anregung des Tracers erfolgt durch einen Nd:YAG-Laser mit einer Emissionswellenlänge von 355 nm. Zur Detektion der Fluoreszenz im Bereich von 480 nm verwenden die Autoren eine bildverstärkte CCD-Kamera. In einem ähnlichen Versuchsaufbau, bei dem die Kamera auch unterhalb einer Quarzscheibe installiert wird, untersuchen Alonso et. al [111] die Wandfilmbildung auf einem Quarzkolben. Als Ersatz-Kraftstoff kommt hier eine Mischung aus iso-Oktan und 10 % 3-Pentanon zum Einsatz. Das Fluoreszenzlicht wird durch einen Strahlteiler vom Anregungslicht (Nd:YAG-Laser mit 266 nm) abgetrennt und einer bildverstärkten CCD-Kamera zugeführt. Zur Vermeidung eines Hintergrundsignals durch verdampften Kraftstoff oberhalb des Wandfilms wird das Laserlicht über Totalreflektion in den

Kolben eingeleitet. Hierdurch wird sichergestellt, dass nur der auf der Wand haftende Kraftstofffilm angeregt wird, da dieser einen ähnlichen Brechungsindex wie Quarz aufweist.

Die Anwendung von LIF-Messverfahren erfolgte auch an optisch zugänglichen Forschungsmotoren mit Saugrohreinspritzung. Das LIF-Messsystem von Cho et. al [46] basiert ebenfalls auf Totalreflektion. Zur Untersuchung der Kraftstoff-Zylinderwandbenetzung wird die gepulste Laserstrahlung eines N<sub>2</sub>-Lasers (Wellenlänge 337,1 nm, Pulsenergie 0,4 mJ, Pulslänge 5 ns) in den Quarzzylinder im Bereich des oberen Totpunkts eines optischen Forschungsmotors eingekoppelt und das vom Anregungslicht spektral abgetrennte Fluoreszenzlicht mit einer CCD-Kamera detektiert. Abbildung 2-10 zeigt den von den Autoren verwendeten optischen Zugang des Forschungsmotors (rechts) und die resultierenden LIF-Aufnahmen des Kraftstoffwandfilms (links).

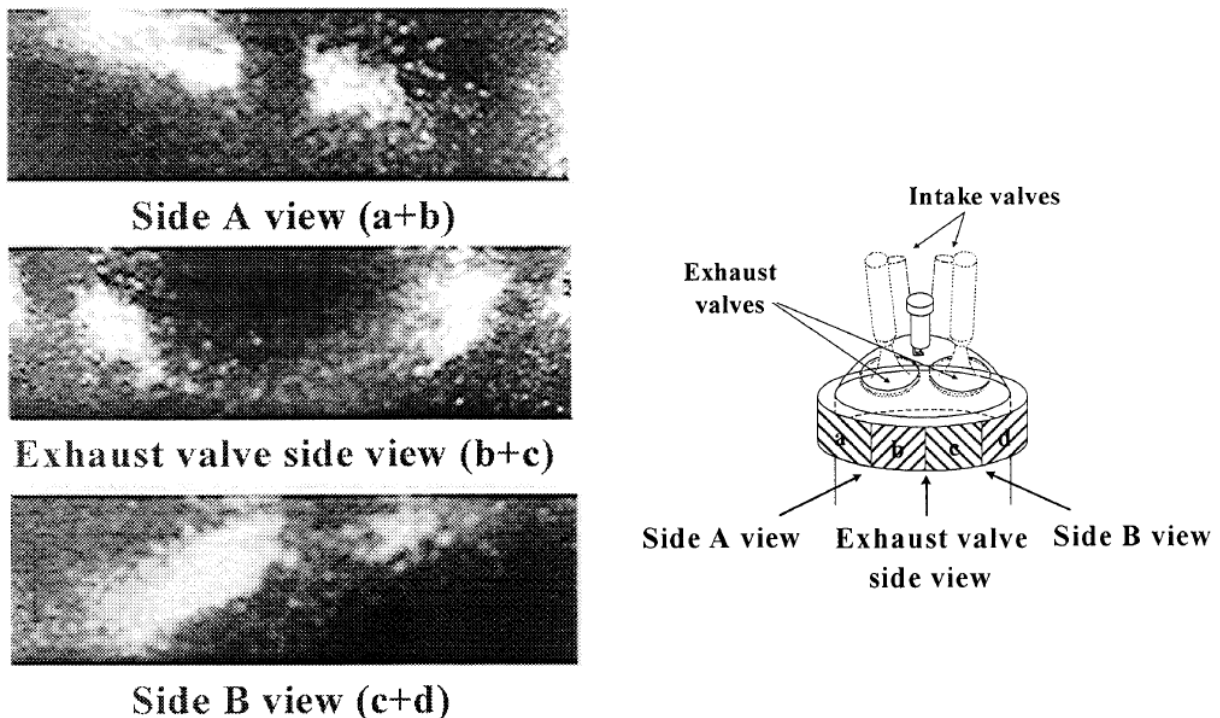


Abbildung 2-10: Rechts: Quarzring als optischer Zugang eines Forschungs-Einzylindermotors. Links: LIF-Aufnahmen des Kraftstoff-Wandfilms auf dem Quarzring aus verschiedenen Perspektiven [46].

Anhand der 2D-LIF-Aufnahmen (links) ist die Kraftstoffverteilung auf der Zylinderwand im Bereich des Auslassventils zu erkennen. Cho et. al [46] überführen die LIF-Intensität mit Hilfe eines Kalibrierverfahrens in eine Schichtdicke und untersuchen den Einfluss des Einspritztimings auf die Kraftstoff-Wandbenetzung.

LeCoz und Baritaud [89] verwenden Faser-LIF zur punktuellen Untersuchung von Kraftstoff-Wandfilmen in einem optisch zugänglichen Saugrohr. Sie setzen eine Mischung aus iso-Oktan und 2,3-Hexandion ein und detektieren das Fluoreszenzlicht mit einem Photomultiplier. Im Gegensatz zur Untersuchung unter atmosphärischen Bedingungen werden durch die Berücksichtigung des Luftmassenstroms realitätsnähere Saugrohrbedingungen hinsichtlich der Kraftstoffverdampfung hergestellt als in [110]. Takahashi et. al [93] verwenden Faser-LIF zur punktuellen Untersuchung von Wandfilmen im Saugrohr eines Vollmotors. Als Kraftstoff kommt ein Multikomponentengemisch mit 2-3-Butandion als LIF-Tracer zum Einsatz. Park und Gandhi [112] verwenden Faser-LIF zur punktuellen Untersuchung der Wandfilmbildung auf dem Kolbenboden. Parks et. al [113] nutzen einen Stickstofflaser mit 337,1 nm zur Anregung des Wandfilms, der Öl und Kraftstoff enthält, auf der Zylinderwand eines Einzylinderaggregats. Das Laserlicht wird durch eine Quarzscheibe im Zylinderkopf eingekoppelt und das Fluoreszenzlicht des Wandfilms einem Spektrometer durch Lichtleiter zugeführt. Der Kraftstoffeintrag in den Ölfilm auf der Wand wird anhand des LIF-Spektrums und des Abgleichs von geschlepptem (ohne Kraftstoffeintrag im Ölfilm) und befeuerten (mit Kraftstoffeintrag im Ölfilm) Betrieb bestimmt. Hentschel et. al [114] wenden verschiedene Spektroskopie-Verfahren an einem direkt einspritzenden Motor mit optischem Quarzzylinder an. Durch Mie-Streuung, LIF und Raman-Spektroskopie wird die simultane Untersuchung von Spray, Wandfilmen und Gemischbildung ermöglicht.

Die Kraftstoff-Wandbenetzung des Kolbens wird an optischen Forschungsmotoren mit transparenten Kolben („Bowditch“) untersucht. Bei diesem Versuchsaufbau sind CCD-Kamera und Lichtquelle typischerweise unterhalb des Kolbens positioniert und Anregungs- und Fluoreszenzlicht werden durch einen Strahlteiler spektral getrennt. Stevens und Steeper [42] verwenden kommerziellen Kraftstoff, der mit 266 nm zur Fluoreszenz angeregt wird. Hier wird der Zusammenhang zwischen Kraftstoff-Wandbenetzung des Kolbens und Rußbildung untersucht. In einem ähnlichen Versuchsaufbau untersucht Hochgreb [115] den Einfluss des Einspritztimings und der Kolbentemperatur auf die Wandfilmbildung. In einer aktuellen Studie (2017) untersuchen Geiler et. al [73] die Wandfilmbildung auf dem Kolbenboden durch LIF. Hierbei werden wichtige Aspekte, die zur Filmhöhen-Kalibrierung erforderlich sind, z.B. Flachfeldkorrektur, Tracer-Konzentration oder Quenching durch das Umgebungsgas systematisch untersucht. Als Ersatz-Kraftstoff kommt eine Mischung aus iso-Oktan

und 0,5 % Toluol zum Einsatz. Fortschritte hinsichtlich der Quantifizierung von Kraftstofffilmen zeigen auch die Arbeiten von Schulz et. al [47, 72]. Hier werden Kraftstoff-Wandfilme unter definierten Bedingungen in einer Druckkammer untersucht und verschiedene Kalibriermethoden verglichen. Als Kraftstoff wird eine Mischung aus iso-Oktan und 3-Pentanon verwendet. Zur Quantifizierung der Wandfilmdicke werden die LIF-Aufnahmen in einem umfangreichen Bildverarbeitungsprozess bearbeitet. Hierbei ist u.a. die Inhomogenität des Laserstrahlprofils zu berücksichtigen. Ähnlich wie Zanghi et. al [76] und Alonso et. al [111] verwenden Schulz et. al [72] einen optischen Diffusor zur Strahlhomogenisierung. Abbildung 2-11 zeigt die Intensitätsverteilung eines aufgeweiteten Laserstrahls ohne (links) und mit (rechts) optischem Diffusor.

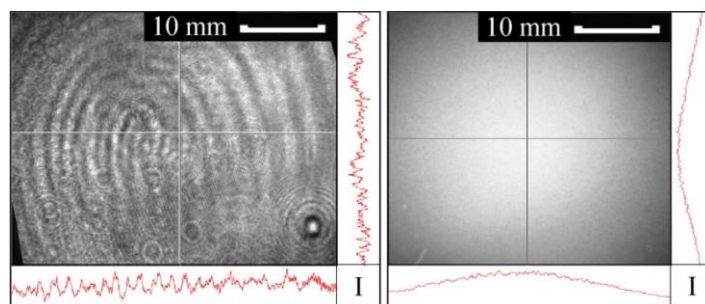


Abbildung 2-11: Intensitätsverteilung eines Laserstrahls nach Aufweitung mit einer plankonkaven Linse (links) und mit einem Diffusor (rechts). Die Intensitätsprofile entlang der vertikalen und horizontalen Linien wurden jeweils auf den Wert 1 normiert [72].

Das aufgeweitete Strahlprofil ohne Diffusor (links) ist durch wellenartige Inhomogenitäten, die in den Profilschnitten höhere Frequenzen hervorrufen, gekennzeichnet. Das Wellenmuster ist bei Verwendung eines Diffusors (rechts) nicht zu erkennen und die Profilschnitte sind durch eine deutliche Glättung gekennzeichnet. Die homogene Intensitätsverteilung durch Verwendung des optischen Diffusors bietet Vorteile hinsichtlich Bildqualität und Bildverarbeitungsprozess. Die Repetitionsrate des Nd:YAG-Lasers, den Schulz et. al [72] in ihren Untersuchungen verwenden, beträgt 10 Hz. Die Inhomogenitäten in der Intensitätsverteilung sind bei Lasern mit höherer Repetitionsrate ausgeprägter [132].

Neben den Eigenschaften der Lichtquelle zur optischen Anregung sind auch die Charakteristika des Detektionspfades entscheidend. Kraftstoff-LIF weist aufgrund der Molekülstruktur von Kraftstoff-Tracern häufig Wellenlängen unterhalb von 400 nm auf [75]. Zur Detektion von Kraftstoff-LIF kommen Bildverstärker zum Einsatz [72, 110, 111]. Schulz et. al [72] untersuchen qualitativ den Einfluss eines Bildverstärkers auf das räumliche Auflösungsvermögen einer CCD-Kamera. Abbildung 2-12 zeigt

Aufnahmen einer Zahlenskala, die mit einer CCD-Kamera mit (links) und ohne (rechts) Bildverstärker aufgenommen wurden.

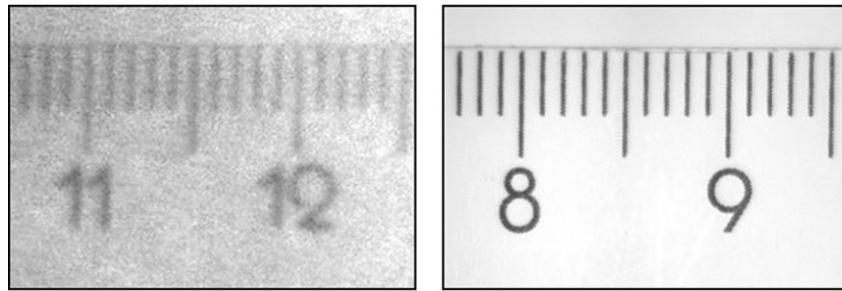


Abbildung 2-12: Aufnahme einer Zahlenskala mit einer CCD-Kamera mit (links) und ohne (rechts) Bildverstärker [72].

Die Aufnahme mit Bildverstärker (links) ist durch ein geringeres räumliches Auflösungsvermögen und stärkeres Rauschen gekennzeichnet. Der Bildverstärker hat einen negativen Einfluss auf die Bildqualität der CCD-Kamera.

### **Ölverdünnung mit Kraftstoff**

Neben der beschriebenen Untersuchung der Kraftstoff-Wandfilmbildung auf einer trockenen Oberfläche [47,72-73], wird auch die Kraftstoff-Wand-Interaktion benetzter Oberflächen untersucht. Uchida et. al [116] untersuchen das Verhalten eines Kraftstoff-Tropfens, der auf einen Ölfilm trifft, mit einer Hochgeschwindigkeits-Kamera. Die Unterscheidung von Öl und Kraftstoff erfolgt durch LIF. Als Kraftstoff kommt eine Mischung aus n-Heptan, Ethanol und Rhodamin 6G, die mit 532 nm-Strahlung angeregt wird, zum Einsatz. Im Rahmen der Untersuchungen liegen die Ölfilmthicken zwischen 200-1000  $\mu\text{m}$ . Seel et. al [117] entwickeln eine Vorrichtung, mit der Ölfilmthicken von 15  $\mu\text{m}$  erzeugt werden können, und untersuchen die Interaktion des Kraftstoff-Sprays mit dem Ölfilm durch Phase Doppler Anemometrie (PDA). Im Vergleich zu einer trockenen Wand ist die absolute Filmhöhe einer mit Öl benetzten Wand nach Auftreffen des Kraftstoff-Sprays geringer. Dieses Phänomen wird auf die Scherung und Verformung des Ölfilms bei Auftreffen des Sprays zurückgeführt. Kouchi et. al [118] vergleichen die Spray-Wand-Interaktion einer trockenen Wand mit einer Öl-benetzten Wand (10  $\mu\text{m}$  Filmhöhe) durch Hochgeschwindigkeits-LIF. Die Autoren beobachten eine längere Verdampfungsdauer des Kraftstoff-Wandfilms, wenn der Kraftstoff auf einen Ölfilm anstatt auf eine trockene Wand gespritzt wird.

Die unvollständige Verdampfung von Kraftstoff-Wandfilmen kann zur Ölverdünnung mit Kraftstoff führen [49]. Artmann et. al [119] nutzen Massenspektrometrie zur Untersuchung dieses Phänomens. Hierzu werden Proben aus dem Ölsumpf

entnommen und die Mischungskomponenten mit einem Massenspektrometer identifiziert. Behn et. al [120] realisieren eine Entnahmestelle der Massenspektrometer-Proben durch eine Glaskapillare in der Zylinderwand. Die Vorteile der Massenspektrometrie sind die Applikationsmöglichkeiten am Vollmotor und die hohe Sensitivität, sodass bereits geringe Kraftstoffmengen im Öl nachweisbar sind. Allerdings ist die Systemantwort auf die Variation der Eingangsgrößen, z.B. Einspritztiming oder Lastpunktänderung, verzögert. Hierdurch ist die Aufklärung der Mechanismen, die zur Ölverdünnung mit Kraftstoff führen, aufgrund des indirekten und integrierenden Charakters des Messverfahrens nicht möglich.

Parks et. al [121] untersuchen die Ölverdünnung mit Kraftstoff durch LIF an einem Vollmotor. Hierzu wird dem verwendeten Diesel-Kraftstoff ein Fluoreszenzfarbstoff (0,05-0,1 Masse-% Model TP-3400, Tracerline) beigemischt. Die optische Anregung des Öls im Ölkreislauf mit 532 nm erfolgt durch Lichtleiterfasern, über die auch das Fluoreszenzlicht einem Spektrometer zugeführt wird. Anhand des LIF-Spektrums wird eine Zunahme der Farbstoff-Konzentration im Öl festgestellt. Die Autoren führen die Zunahme auf eine Ölverdünnung mit Kraftstoff zurück. Wigger [4] verwendet eine Mischung aus kommerziellem E10-Kraftstoff und Pyrromethen 567, die mit 532 nm eines Nd:YAG-Lasers angeregt wird. Die LIF-Untersuchungen wurden im optisch zugänglichen Einzylinderaggregat mit Direkteinspritzung, das auch in dieser Arbeit zum Einsatz kommt, durchgeführt. Abbildung 2-13 zeigt eine LIF-Aufnahme der Kolbengruppe aus den Untersuchungen von Wigger [4].

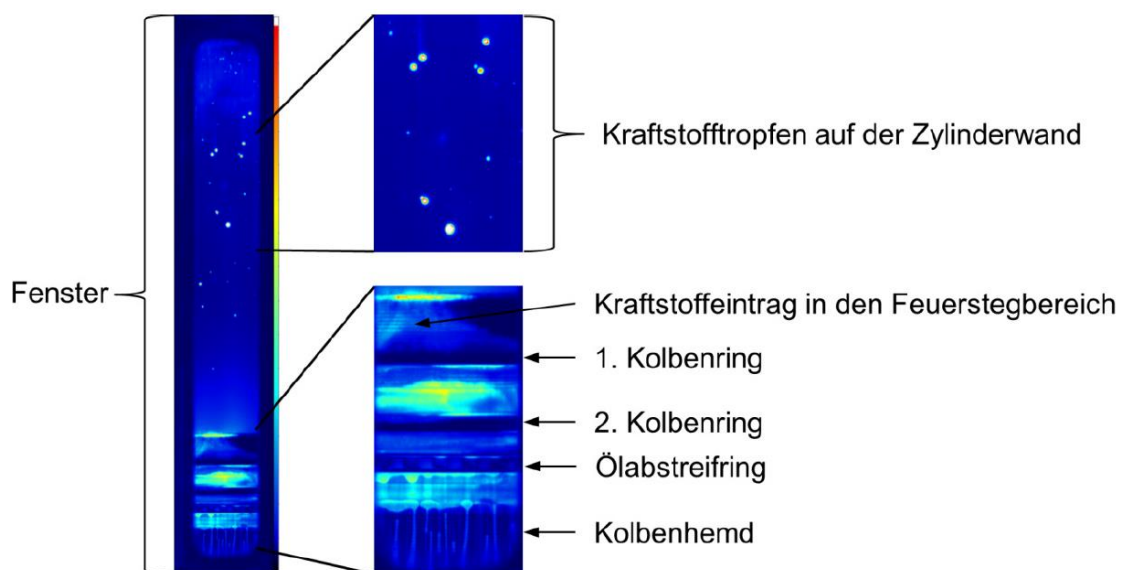


Abbildung 2-13: LIF-Aufnahme der Kolbengruppe im befeuerten Motorbetrieb (180 °KW v.ZOT) mit Benzin-Direkteinspritzung [4].

Der Kolben befindet sich im unteren Totpunkt, weshalb lediglich das Ringfeld (vergrößerte Darstellung) erkennbar ist. Das Fluoreszenzlicht auf der Zylinderwand und in den Bereichen unterhalb des 1. Kolbenrings, bzw. auf den Ringstegen und in der Ölnut wird auf die Anreicherung von Kraftstoff zurückgeführt.

In den Messverfahren von Parks et. al [121] und Wigger [4] werden die Verdampfungseigenschaften des Kraftstoffs nur unzureichend berücksichtigt. Hierdurch kann nicht ausgeschlossen werden, dass der Kraftstoff verdampft und lediglich Farbstoffmoleküle mit größerer Masse aufgrund unvollständiger Verdampfung auf der Zylinderwand, bzw. im Öl und auf dem Kolben angereichert werden. Bei der Untersuchung der Verdampfungsprozesse von Kraftstoff-Wandfilmen ist die gleichmäßige Verdampfung von Kraftstoff und LIF-Tracer („Co-evaporation“) entscheidend.

Die simultane Visualisierung von Kraftstoff und Öl durch spektral getrennte LIF realisieren Kambe et. al [122] in einem einfachen Modelltest. Hier wird ein Diesel-Kraftstoff mit 0,01 Masse-% Perylen auf eine Öl-benetzte Quarzscheibe (Motoröl mit 0,04 Masse-% Rhodamin B) gespritzt. Beide Flüssigkeiten werden mit einer UV-LED ( $\lambda = 375 \text{ nm}$ ) zur Fluoreszenz angeregt. Das Fluoreszenzlicht wird mit einem Strahlteiler auf zwei Hochgeschwindigkeits-Kameras, die mit unterschiedlichen Bandpassfiltern ausgestattet sind, aufgeteilt. Die spektrale Trennung ermöglicht die separate Detektion des Öl-Farbstoffs (Rhodamin B) und des Kraftstoff-Tracers (Perylen). Abbildung 2-14 zeigt simultane LIF-Aufnahmen eines Ölfilms und eines Kraftstoff-Wandfilms aus der Arbeit von Kambe et. al [122].

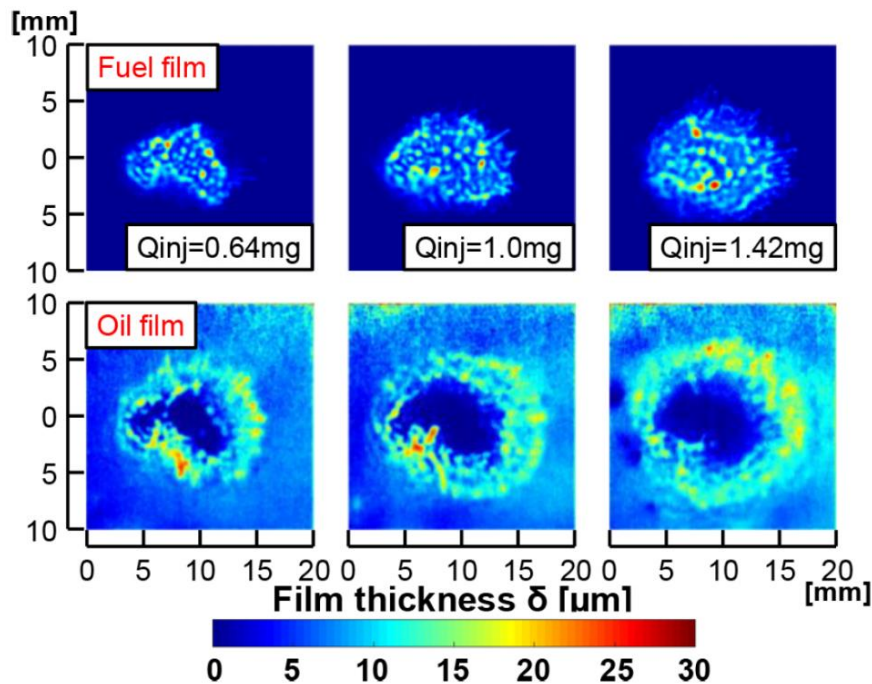


Abbildung 2-14: Simultane Messung der Ölfilm- und Kraftstoff-Wandfilmdicke durch spektral getrennte LIF [122].

Die LIF-Intensitäten von Kraftstoff und Öl wurden durch einen Kalibrierprozess jeweils in eine Schichtdicke überführt. Im mittleren Bildbereich (LIF-Aufnahmen oben) ist der Kraftstoffwandfilm zu erkennen. Im entsprechenden Bildbereich der Öl-LIF-Aufnahmen (unten) ist der Ölfilm unterbrochen und weist ringförmig eine erhöhte Schichtdicke auf. Die Autoren führen diese Beobachtung darauf zurück, dass der Ölfilm beim Auftreffen des Kraftstoff-Sprays verformt wird und sich lokal anreichert. Diese Erkenntnisse entsprechen denen von Kouchi et. al [118], die die lokale Schichtdickenerhöhung des Ölfilms auf eine Verformung und Scherung durch das Auftreffen des Kraftstoffsprays zurückführen.

In der Literatur wird die systematische Untersuchung von Ölfilmen (Vgl. Kapitel 2.3.2) und Kraftstoff-Wandfilmen durch LIF unter definierten Umgebungsbedingungen ausführlich beschrieben. Wigger [4] führt in seiner Arbeit umfangreiche LIF-Untersuchungen der optischen Eigenschaften einer Motoröl-Farbstoff-Mischung durch. Er appliziert ein 2D-LIF-Messsystem an einem Tribometer und entwickelt einen Bildverarbeitungsprozess zur Quantifizierung der Ölfilm- und Kraftstoff-Wandfilmdicke im Reibkontakt Kolbenring/Zylinderlaufbahn. Außerdem appliziert er das LIF-Messsystem an einem optisch zugänglichen Einzylindermotor zur Untersuchung der Ölverteilung in der Kolbengruppe. Der erste Teil der vorliegenden Arbeit (Kapitel 3 und 4) baut auf seinen Erkenntnissen auf. Zunächst wird in Kapitel 3 ein optimiertes optisches



Einzylinderaggregat vorgestellt und auf Hochlastfähigkeit überprüft. In Kapitel 4 erfolgt die Weiterentwicklung der LIF-Messtechnik aus [4]. Hierbei wird ein Verfahren zur Quantifizierung der Ölfilmdicke im tribologischen Kontakt Kolbenhemd/ Zylinderlaufbahn im befeuerten Motorbetrieb durch in situ Kalibrierung entwickelt. Im zweiten Teil der Arbeit (Kapitel 5) wird eine LIF-Messtechnik zur simultanen Hochgeschwindigkeits-Visualisierung von Kraftstoff und Öl in der Kolbengruppe entwickelt. Die Herausforderungen der simultanen Visualisierung sind u.a. die spektrale Trennung von Kraftstoff- und Öl-LIF und die Abbildung der Verdampfungseigenschaften des Kraftstoffs.

### 3 Optisch zugängliches Einzylinderaggregat

Basierend auf den Erkenntnissen von Thirouard et. al [35, 40] wurde in der Abteilung „Tribologie und Werkstoffe“ der Daimler AG ein Einzylindermotor mit optischen Zugängen aus Saphir in der Zylinderlaufbahn entwickelt und in [4, 6, 78] vorgestellt. Im Folgenden werden Mechanik und Prüfstandsperipherie des Einzylindermotors, sowie das optische Zylinderrohr vorgestellt.

#### 3.1 Mechanischer Aufbau und Prüfstandsperipherie

Die Mechanik des Forschungs-Einzylindermotors basiert auf dem 2,0 L-Vierzylinder-Ottomotor (M270/M274 DE20 LA) von Daimler [79]. In Abbildung 3-1 ist der Forschungsmotor „LOTTE“ (Laser-Optischer Transparenter Itribologie-Einzylinder-motor) fotografisch dargestellt.

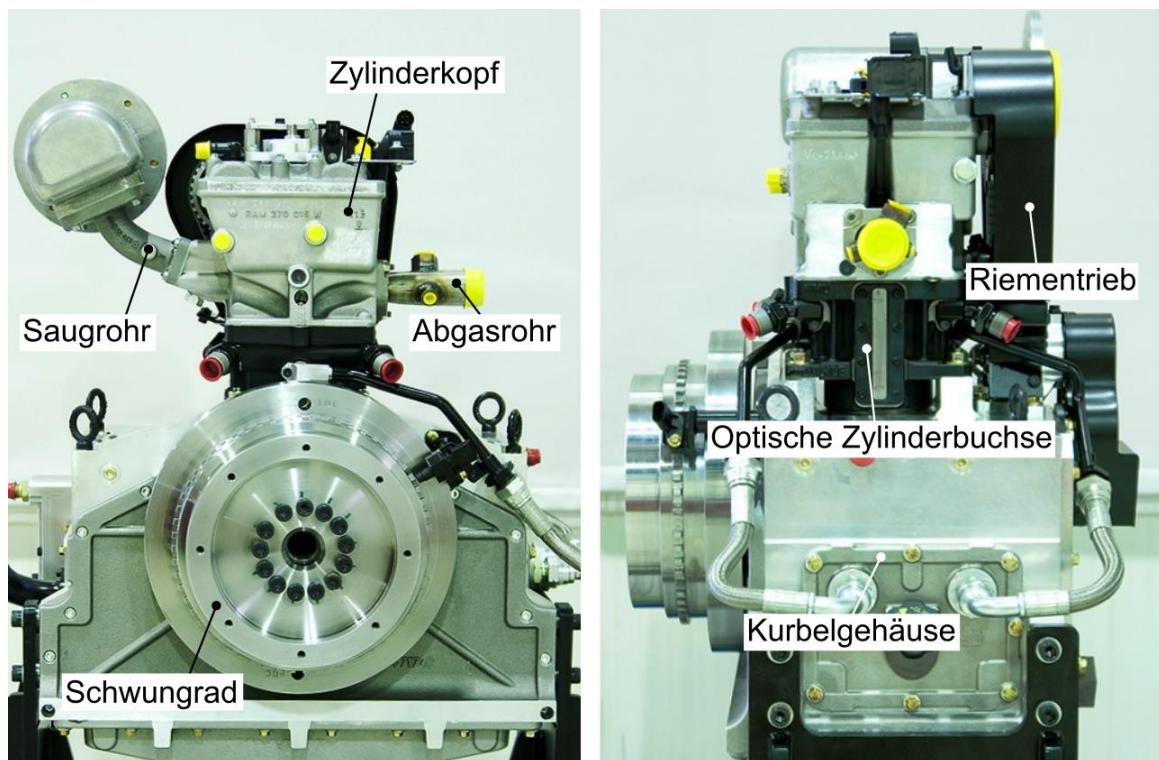


Abbildung 3-1: Fotografie des Forschungs-Einzylindermotors, abtriebsseitig (links) und in der Seitenansicht (rechts) nach [4].

Das Aluminiumkurbelgehäuse und das Grauguss-Zylinderrohr sind getrennt ausgeführt, sodass das Zylinderrohr austauschbar ist. Durch die Ausgleichung der Massenkräfte erster und zweiter Ordnung durch vier Ausgleichswellen sind Drehzahlen bis  $6000 \text{ min}^{-1}$  möglich. Das Kurbelgehäuse ist mit Ölspritzdüsen zur Kühlung des Kolbens ausgestattet. Das Zylinderrohr beinhaltet Kühl- und Ölkanäle, die an den Zylinderkopf angebunden sind. Die Brennraumgeometrie des Zylinderkopfs

(pent-roof) mit vier Ventilen entspricht der Ausführung des Vollmotors, allerdings mit festen Ventilsteuerzeiten. Saug- und Abgasrohr sind so ausgeführt, dass der optische Zugang in der Zylinderlauffläche nicht verdeckt wird. Der maximal ertragbare, indizierte Mitteldruck hängt von der Ausführung des optischen Zugangs in der Zylinderlauffläche ab und beträgt 14-25 bar. Der Einzylindermotor wird durch eine E-Maschine (nicht dargestellt), die über Kardanwelle und Kupplung an das Schwungrad, bzw. die Kurbelwelle angebunden ist, betrieben. Die E-Maschine ist drehzahleregelt und ermöglicht geschleppten (Antrieb durch E-Maschine) und befeuerten Motorbetrieb (Bremsen durch E-Maschine). Zur Bereitstellung definierter Betriebsbedingungen sind Kühlwasser- und Öltemperatur über externe Kreisläufe zwischen 20-110 °C frei konditionierbar. Durch eine Luftkonditionierung wird außerdem die Ladeluft mit definierter Temperatur und Ladedruck geliefert.

Zur Kraftstoffversorgung wird eine Diesel-Hochdruckpumpe durch einen Drehstrom-Asynchronmotor angetrieben und mit einer konventionellen Niederdruck-Kraftstoffpumpe gespeist. Die Dieselpumpe ermöglicht die Einspeisung des Kraftstoffs mit 1,9 kg/min in eine Rail, die mit Absteuerventil und Rücklauf zum Kraftstofftank ausgestattet ist. Die Rückführung des überschüssigen Kraftstoffs erfolgt über einen wassergekühlten Wärmetauscher und die Kraftstoff-Temperatur wird konstant unterhalb von 30 °C gehalten. Der Raildruck kann auf 350 bar eingestellt werden und wird auf das Druckniveau des verwendeten Kraftstoffinjektors angepasst: Durch ein Niederdruck- (5 bar) oder Hochdruck-Magnetventil (150/200 bar) kann der Kraftstoff in das Saugrohr eingespritzt werden (KE-Einspritzung). Die Direkteinspritzung in den Brennraum (DI) wird durch den Bosch HDEV 4.1 Piezo-Injektor (Einspritzdruck: 200 bar) realisiert. Mit dem Piezo-Injektor können bis zu acht Einspritzungen pro Arbeitsspiel in Voll- oder Teilhüben abgesetzt werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde der Motor ausschließlich mit DI-Einspritzung betrieben.

Durch eine umfangreiche Indizier-Messtechnik wird die Erfassung thermodynamischer Größen wie z.B. Zylinderdruckverlauf, Verbrennungsschwerpunkt, Klopfen, Verbrennungsluftverhältnis und Laufruhe ermöglicht.

Die Motorapplikation erfolgt mit einer frei programmierbaren Motorsteuerung. Durch die Drosselklappenstellung kann der Ansaugdruck bei konstanter Drehzahl eingeregelt werden. Das Einspritztiming ist hinsichtlich Einspritzbeginn (SOI), Einspritzdauer und Anzahl der Einspritzungen pro Arbeitsspiel (bis zu acht) frei wählbar, sodass

gewünschtes Luftverhältnis (hier: stöchiometrisch,  $\lambda = 1$ ) und Gemischaufbereitung erreicht werden. Die Steuerung ermöglicht auch die freie Wahl des Zündzeitpunktes, wodurch der Verbrennungsschwerpunkt (hier:  $X_{50\%} = 8$  °KW nach Zünd-OT) realisiert wird.

Tabelle 3-1 fasst die technischen Daten des Forschungs-Einzyliermotors zusammen.

Tabelle 3-1: Technische Daten des Forschungs-Einzyliermotors.

Brennkammer	pent-roof, 4 Ventile
Verdichtungsverhältnis	9,8
Hubraum [cm <sup>3</sup> ]	498
Bohrung / Hub [mm]	83 / 92
Max. Drehzahl [min <sup>-1</sup> ]	6000
Max. Mitteldruck abh. von Fenstergröße [bar]	14 (25)
Kraftstoffeinspritzung	DI mit zentralem Piezo-Injektor
Einspritzdruck [bar]	200

## 3.2 Optisches Zylinderrohr

### Saphirfenster in der Zylinderlaufbahn

Der optische Zugang ist durch zwei Saphirfenster in der Grauguss-Zylinderlauffläche auf Druck- und Gegendruckseite realisiert. Abbildung 3-2 zeigt das Zylinderrohr mit einem der Saphirfenster.

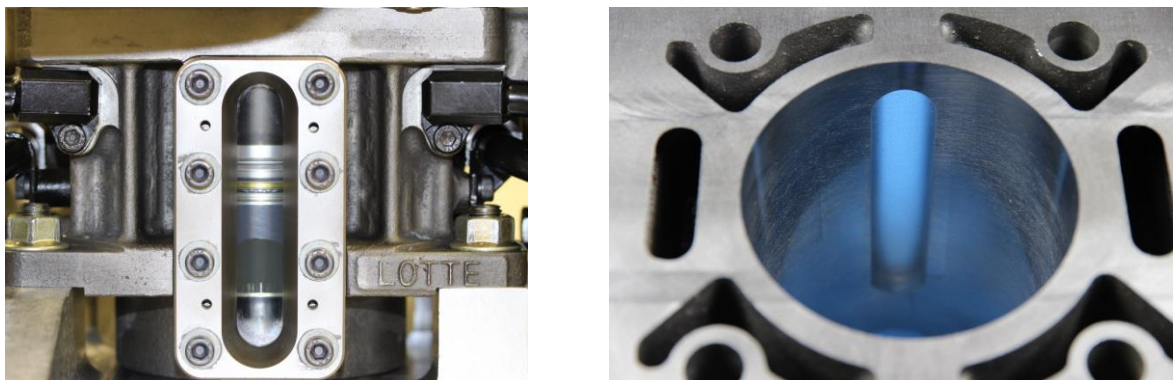


Abbildung 3-2: Optischer Zugang der Zylinderbuchse auf der Druckseite. Links: Außenaufnahme im eingebauten Zustand mit Kolben. Rechts: Innenansicht mit ausgebautem Kolben.

Durch die optischen Zugänge auf Druck- (DS) und Gegendruckseite (GDS) können Kolben, Ringpaket und Zylinderlauffläche visualisiert und Schmierungsbedingungen,

Kolbensekundärbewegung oder Kraftstoff-Zylinderwandbenetzung untersucht werden. Der maximal ertragbare, indizierte Mitteldruck ( $p_{mi}$ ) hängt von der Fenstergröße ab. Das Fensterdesign in Abbildung 3-2 mit einer freien Apertur von  $18 \times 93 \text{ mm}^2$  (Breite x Höhe) wurde bis  $p_{mi} = 14 \text{ bar}$  getestet (Vgl. Abbildung 3-6). Kleinere Fenster (nicht Teil dieser Arbeit) ermöglichen Lasten bis  $p_{mi} = 25 \text{ bar}$  (aufgeladene Volllast des Vollmotors beträgt  $p_{mi} = 22 \text{ bar}$ ).

## Werkstoffe

Im Motorbetrieb unterliegt das Zylinderrohr verschiedenen Beanspruchungen u.a. durch den Verbrennungsdruck und den Eintrag von Verbrennungswärme. Insbesondere die thermischen Eigenschaften qualifizieren Saphir gegenüber Quarz als Fensterwerkstoff [4]. Die Wärmeausdehnungskoeffizienten von Saphir und Grauguss liegen in der gleichen Größenordnung und die Wärmeleitfähigkeit der beiden Materialien ist ähnlich. Um thermische Spannungen gering zu halten, wurde daher die Werkstoffkombination Saphir/Grauguss gewählt. Tabelle 3-2 fasst die Materialeigenschaften der verwendeten Werkstoffe zusammen.

Tabelle 3-2: Materialeigenschaften der Grauguss-Zylinderbuchse und des Saphirfensters.

Eigenschaft	Saphir ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )	Grauguss
Dichte [ $\text{g/cm}^3$ ]	3,98	7,2
Schmelzpunkt [ $^\circ\text{C}$ ]	2053	1150
Wärmeausdehnung [ $10^{-6}/\text{K}$ ]	5,4-6,2 (abh. von Kristallgitter)	11,7
E-Modul [GPa]	345	103-116
Wärmeleitfähigkeit [ $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ]	40 (bei $25 \text{ }^\circ\text{C}$ )	48,5

## Topographie

Die Oberfläche der Zylinderlauffläche beeinflusst den Schmierzustand in der Kolbengruppe und soll daher im optischen Einzylindermotor realitätsnah ausgeführt werden. Einen Vergleich der rheologischen Eigenschaften verschiedener Laufflächenmaterialien und Topographien führt Wigger [4] durch. Er verdeutlicht, dass die Honriefen entscheidend für die Benetzungseigenschaften der Lauffläche sind. Grauguss-Zylinderrohr und Saphirfenster wurden daher in einem mehrstufigen Fertigungsprozess im Verbund bearbeitet und die Oberfläche im letzten

Bearbeitungsschritt gehont. Die Topographie wurde mit einem 3D-Konfokalmikroskop ( $\mu$ surf der Firma nanofocus) im Bereich des Saphirfensters vermessen und die Daten mittels Software ( $\mu$ Soft Analysis der Firma nanofocus) ausgewertet. Die Konfokalmikroskopie ist ein berührungsfreies optisches Messverfahren, bei dem eine Oberfläche mit einer punktförmigen Lichtquelle beleuchtet wird. Der Mikroskopie-Sensor detektiert nur die reflektierte Strahlung, die innerhalb der Fokusebene liegt (Lichtquelle und Detektor sind dann konfokal). Die Erfassung der Höheninformation der Oberfläche erfolgt durch die Variation der Fokusebene des Detektors [80]. Abbildung 3-3 vergleicht die ungefilterte Topographie der Zylinderlauffläche des Saphirfensters (rechts) mit der Lauffläche eines Vollmotors (links) im Messbereich von  $2 \times 2 \text{ mm}^2$ .

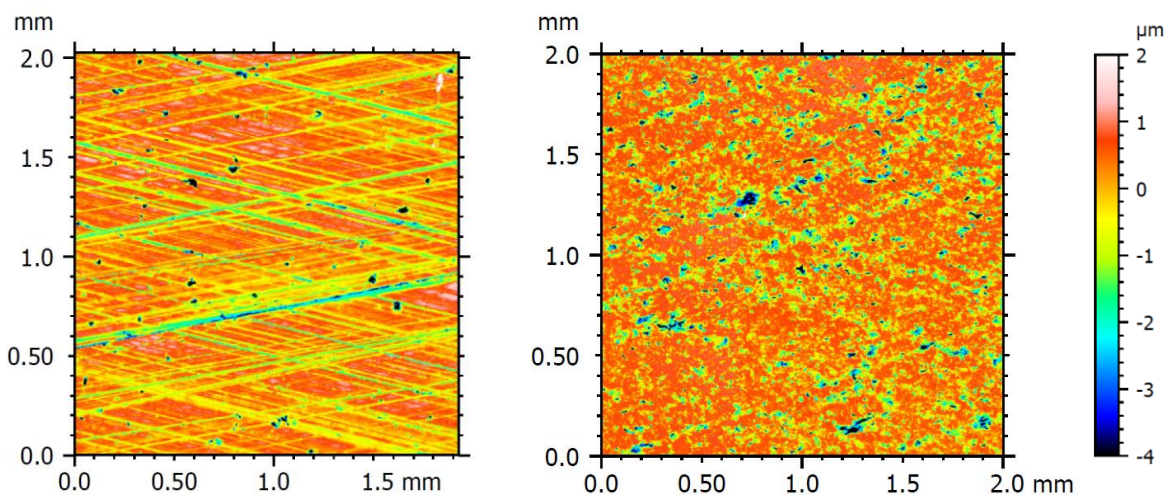


Abbildung 3-3: Ungefilterte Topographien gehonter Zylinderlaufflächen. Links: Grauguss-Zylinder aus einem Vollmotor. Rechts: Saphirfenster der optischen Zylinderbuchse.

Durch den Honprozess konnten die für Zylinderlaufflächen von Verbrennungsmotoren charakteristischen plateauartigen Bereiche und die parallelen, sich kreuzenden Honriefen in das Saphirfenster eingebracht werden. Obwohl die Honriefen im Saphir teilweise unterbrochen und in den Plateaus kleine Ausbrüche erkennbar sind, konnte insgesamt eine realitätsnahe Oberfläche erzeugt werden. Tabelle 3-3 bestätigt dieses Ergebnis anhand gängiger Parameter zur Charakterisierung gehonter Oberflächen.

Tabelle 3-3: Flächenbezogene Parameter zur Beschreibung der Oberflächenbeschaffenheit aus Abbildung 3-3 auf Basis der 2D-Parameter nach DIN EN ISO 13565-2.

Parameter	Definition	Beschreibung	Grauguss	Saphir
Sk [ $\mu\text{m}$ ]	Kernrauheit	Belastbarkeit der Oberfläche im Kernbereich	1,45	1,33
Spk [ $\mu\text{m}$ ]	Reduzierte Riefentiefe	Höhe der herausstehenden Riefen im Kernbereich	0,289	0,212
Svk [ $\mu\text{m}$ ]	Reduzierte Spitzenhöhe	Höhe der herausstehenden Kuppen im Kernbereich	1,51	1,91

## Zylinderform

Die Form des optischen Zylinderrohrs beeinflusst das Anlageverhalten des Ringpakets, bzw. dessen Dichtfunktion und wurde durch ein taktilen Messverfahren mit einem Incometer V200 von Hommel-Etamic [81] untersucht. Zur Durchführung der Messung müssen Zylinderkopf und Kolben demontiert werden. Um die thermischen und mechanischen Verzüge des Zylinderrohrs trotz demontierten Zylinderkopfs zu berücksichtigen, wird eine sogenannte Honbrille in der Zylinderkopfebene montiert. Hierdurch ist das Zylinderrohr entsprechend der Zylinderkopf-Montagevorschrift vorgespannt und durch die Zylinderkopfdichtung abgedichtet, was die Konditionierung auf 90 °C ermöglicht. Das mobile Messgerät Incometer V200 wurde durch aufspreizbare Klemmbacken im oberen Bereich der Zylinderbuchse fixiert, sodass die stangenförmige Messsonde mit einem rotierenden Kugeltaster in die Zylinderbohrung ragt. Die Zylinderbohrung wird in mehreren Ebenen durch die umlaufende Bewegung der Messspitze kreisförmig abgetastet. Zusätzlich erfolgt die Abtastung in Zylinderlängsrichtung. Per Software werden Temperatureinflüsse, Exzentrizitäten und Schrägstellungen der Zylinderachse korrigiert und verschiedene Geometrieparameter als Abweichung von einer Idealform ausgegeben. Abbildung 3-4 vergleicht die Rundheit der optischen Zylinderbuchse mit der eines Vollmotor-Zylinders in mehreren Ebenen.

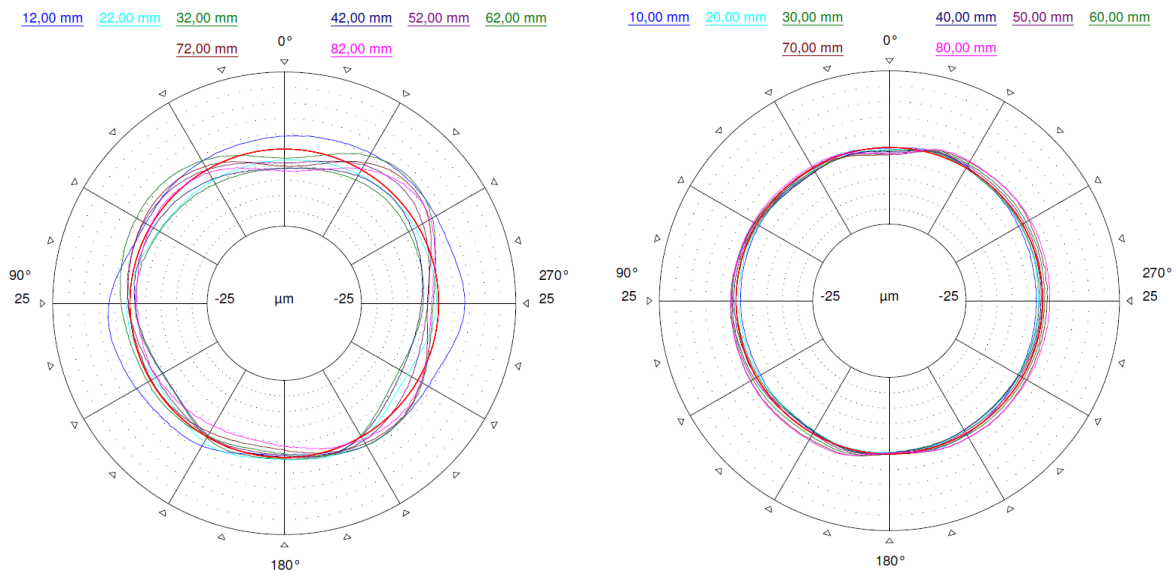


Abbildung 3-4: Über den Kolbenhub erstellte Radialschnitte zur Bewertung der Rundheit eines Vollmotor-Zylinders [82] (links) und der optischen Zylinderbuchse im eingebauten Zustand (rechts) verspannt mit Honbrille (0° = Druckseite, 180° = Gegendruckseite) nach DIN EN ISO 12181-1.

Die Rundheit des optischen Zylinderrohrs weicht über den gesamten Kolbenhub weniger von der Idealform ab als der Vollmotor-Zylinder. Außerdem ist auf DS (0°) und GDS (180°) nahezu kein Einfluss der Saphirfenster auf die Rundheit erkennbar. Durch die Verbundbearbeitung schließen Fenster und Grundmaterial bündig zueinander ab. Nach DIN EN ISO 12180-1 wird durch die Zylindrizität die gesamte Zylinderform beschrieben, indem neben der Rundheit aus Abbildung 3-4 weitere geometrische Eigenschaften eines Zylinders (Geradheit und Parallelität der Mantellinie) erfasst werden. Die Abweichung der Zylinderform des optischen Zylinderrohrs von der Idealform ist mit 11,3 µm um einen Faktor von etwa zwei geringer verglichen mit dem Vollmotor-Zylinder (22 µm).

### Festigkeitsnachweis

Vor der Inbetriebnahme wurde das optische Zylinderrohr einem Belastungstest unterzogen. Abbildung 3-5 zeigt den Versuchsaufbau des Belastungstests.



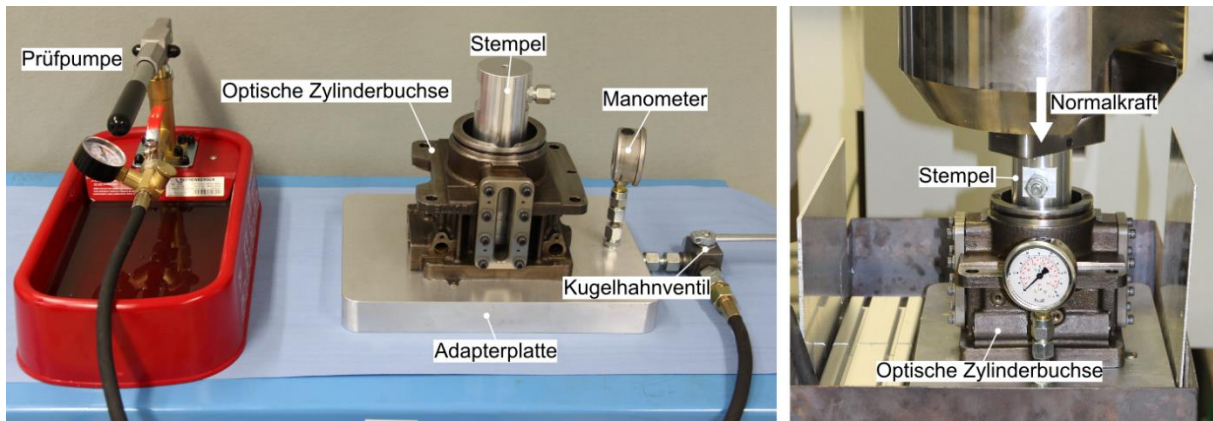


Abbildung 3-5: Vorrichtung zur Ölbefüllung und Abdichtung der optischen Zylinderbuchse (links). Adapterplatte mit montierter optischer Zylinderbuchse und eingeschobenem Stempel in der Prüfkammer der Zug-Druck-Prüfmaschine (rechts).

Das Zylinderrohr wird mit der Dichtfläche nach unten auf einer Adapterplatte verschraubt. Zur Abdichtung der Grenzfläche kommt eine konventionelle Zylinderkopfdichtung zum Einsatz. Mit Hilfe der Prüfpumpe wird der Zylinder mit Öl befüllt und durch Schließen des Kugelhahnventils abgedichtet. In der Zug-Druck-Prüfmaschine (rechts) wird über den durch O-Ringe abgedichteten Stempel eine Kraft aufgebracht und durch das näherungsweise inkompressible Fluid der Zylinderinnendruck eingestellt. In der Nullposition ist der Stempel vollständig in der Zylinderbuchse versenkt und sitzt auf der Adapterplatte auf (Kolbenweg = 0 mm,  $V_{\text{Öl}} = 0 \text{ cm}^3$ ). Durch Verfahren des Stempels wird der Kolbenweg eingestellt und der Zylinder dann durch die Prüfpumpe mit Öl befüllt. Nach Abdichten des Zylinders wird eine definierte Kraft über den Stempel eingeleitet und über eine Dauer von 1 min konstant gehalten. Abbildung 3-6 zeigt den Zylinderinnendruckverlauf eines Vollmotors ( $p_{\text{mi}} = 14 \text{ bar}$ ) und den simulierten Druck aus dem Belastungsversuch in Abhängigkeit des Kolbenwegs. Die optische Zylinderbuchse bietet eine ausreichende Festigkeit für den Zylinderdruckverlauf bei  $p_{\text{mi}} = 14 \text{ bar}$  und einer Überlastung mit Faktor 1,4 sowie einen Spitzendruck von 100 bar.

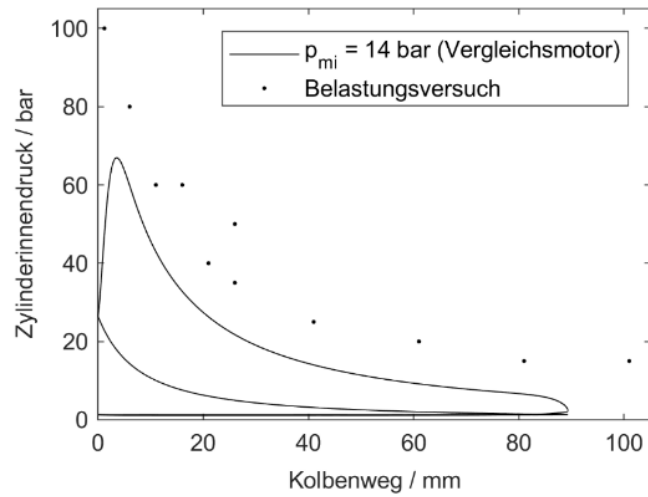


Abbildung 3-6: Kolbenwegabhängiger Zylinderinnendruck eines Arbeitsspiels bei  $p_{mi} = 14$  bar (Vierzylinder-Vollmotor) und simulierter Zylinderinnendruck mit Hilfe des Aufbaus aus Abbildung 3-5.

## **4 Optische Analyse des Ölhaushalts in der Kolbengruppe**

Dieses Kapitel basiert auf vorangegangenen Entwicklungen von Wigger [4] zur Untersuchung der Ölverteilung in der Kolbengruppe. Für Simulationsmodelle ist insbesondere die Schmierfilmhöhe in den Tribokontakten eine wichtige Eingangsgröße und entscheidend für den Schmierungszustand und die Reibung (Vgl. Kapitel 2). In Kapitel 4.1 wird die LIF-Messtechnik beschrieben und mit Hilfe einer Dünnschichtkuvette charakterisiert. Zur Quantifizierung der Ölfilmstärke im Bereich des Kolbenhemdes wird eine in situ Kalibrierungsmethode (Kapitel 4.2) entwickelt, die in [6] bereits veröffentlicht wurde. Das vollständig kalibrierte Arbeitsspiel (Kapitel 4.3) wurde im Rahmen der Masterarbeit von Jonathan Schöler [83] gemessen.

### **4.1 Phasengekoppeltes LIF-Messsystem**

#### **4.1.1 Optische Komponenten**

##### **Öl/Farbstoff-Mischung und optisches Filter**

Motoröl weist eine natürliche Fluoreszenz auf [63]. Eine Steigerung der Fluoreszenzintensität des Motoröls kann durch den Zusatz eines Fluoreszenzfarbstoffes realisiert werden [4, 35, 65]. Thirouard [35] verwendet eine Kombination der Farbstoffe Pyrromethen 567 und Rhodamin B in Verbindung mit 532 nm Anregungswellenlänge. Hierdurch versucht der Autor die temperaturabhängige Fluoreszenzabnahme zu reduzieren. Im Rahmen dieser Arbeit wird auf die Verwendung von Rhodamin B verzichtet. Einerseits ist die temperaturabhängige Fluoreszenzabnahme von Pyrromethen 567 verglichen mit Rhodamin B geringer [4]. Andererseits absorbiert Rhodamin B UV-Licht [147], was ungünstig im Hinblick auf Kraftstoff-LIF (Vgl. Kapitel 5) ist. Abbildung 4-1 zeigt das Absorptions- und Emissionsspektrum des im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Farbstoffs Pyrromethen 567. Ein Teil des rotverschobenen Fluoreszenzlichts (Stokes-Shift) nach Anregung mit Licht der Wellenlänge 532 nm liegt im Transmissionsbereich des verwendeten Bandpassfilters zwischen 565-580 nm.

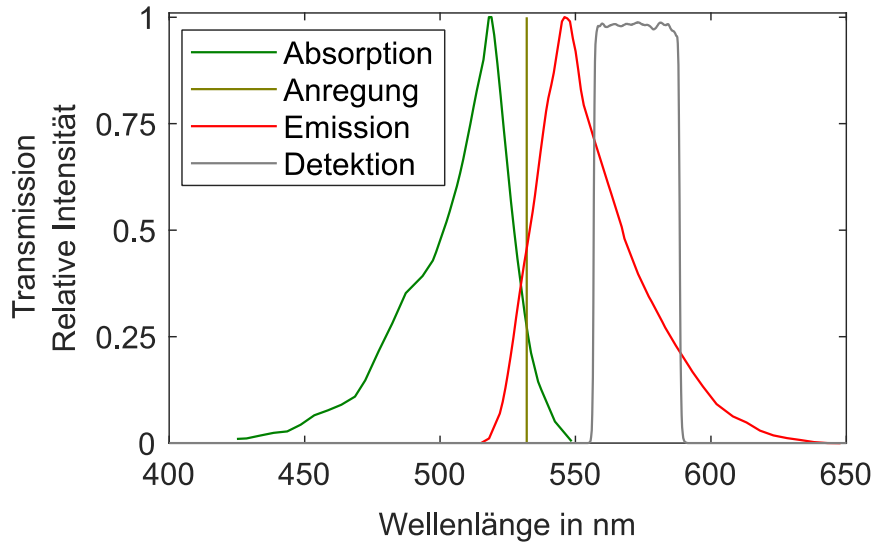


Abbildung 4-1: Spektrale Auslegung des phasengekoppelten LIF-Messsystems. Absorptions- und Emissionsspektrum von Pyrromethen 567 nach [84]. Detektion des Fluoreszenzlichts im Transmissionsbereich des Filters [85].

### Strahlengang am optischen Einzylindermotor

Abbildung 4-2 zeigt die Applikation des optischen Messsystems am Einzylindermotor mit der Farbgebung des optischen Pfads gemäß Abbildung 4-1. Im Folgenden werden die Einzelkomponenten erläutert.

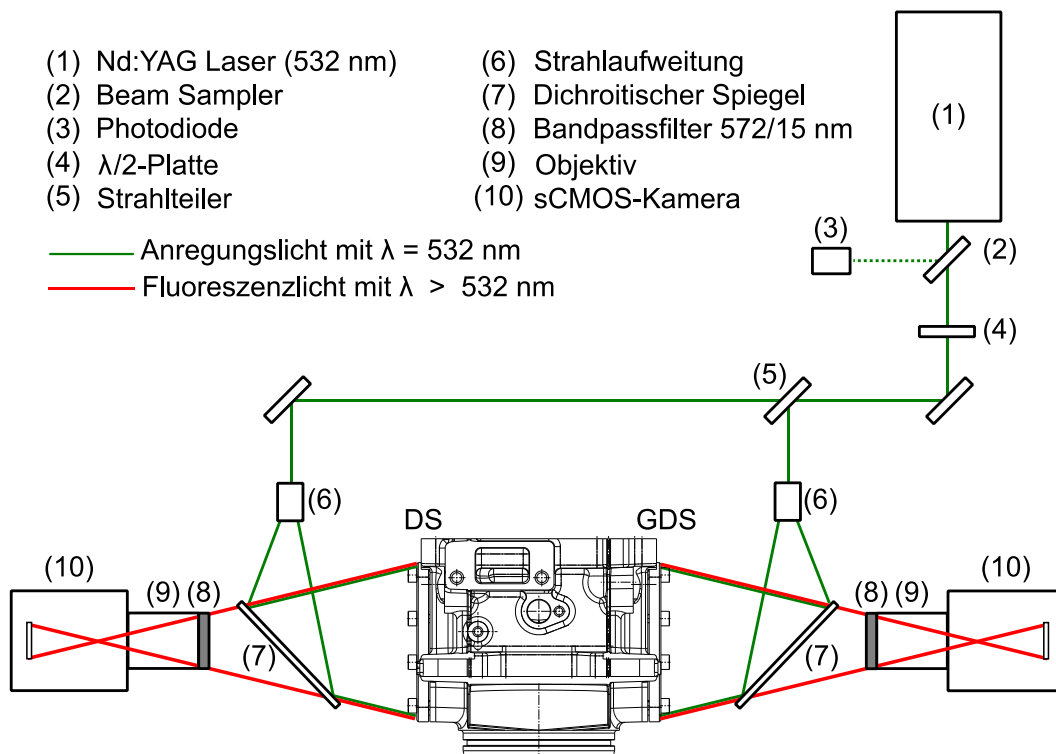


Abbildung 4-2: Strahlengang des phasengekoppelten LIF-Messsystems. Farbgebung entsprechend Abbildung 4-1.

## Anregung

Als Lichtquelle (1) dient ein blitzlampengepumpter, frequenzverdoppelter Nd:YAG-Laser (Litron LPY704-100PIV). Durch die Frequenzverdopplung der Grundwellenlänge 1064 nm wird Licht mit der Wellenlänge von 532 nm und einer maximalen Pulsenergie von 124 mJ bei einer Pulslänge von 10-12 ns emittiert. Die maximale Repetitionsrate beträgt 100 Hz. Zur Erfassung der zeitlichen Pulsenergievariation wird ein Teil des Laserstrahls (ca. 4 %) durch einen Beam Sampler (2) ausgekoppelt und von einer Photodiode (3) erfasst. Das Verhältnis von transmittierter und reflektierter Laserenergie des Strahlteilers (5) ist polarisationsabhängig und wird mit einer  $\lambda/2$ -Platte (4) abgestimmt (Vgl. Abbildung 4-3). Die Aufweitung (6) des runden Strahls mit einem Durchmesser von 6,5 mm und einer näherungsweise gaußförmigen Verteilung auf die Größe der beiden Saphirfenster erfolgt auf DS und GDS mit jeweils zwei Teleskop-Linsen und zwei plankokaven Linsen (Brennweiten:  $f = -50$  mm und  $f = -100$  mm). Über einen dichroitischen Spiegel (7) wird das Laserlicht in Richtung der Messstelle reflektiert. Das rotverschobene Fluoreszenzlicht der Öl-Farbstoff-Mischung transmittiert den Langpass-Filter und wird von der Aufnahmeoptik detektiert.

Abbildung 4-3 zeigt die transmittierte Laserleistung des Strahlteilers (Komponente 5 in Abbildung 4-2) in Abhängigkeit der Verdrehung der Verzögerungsplatte (Komponente 4 in Abbildung 4-2).

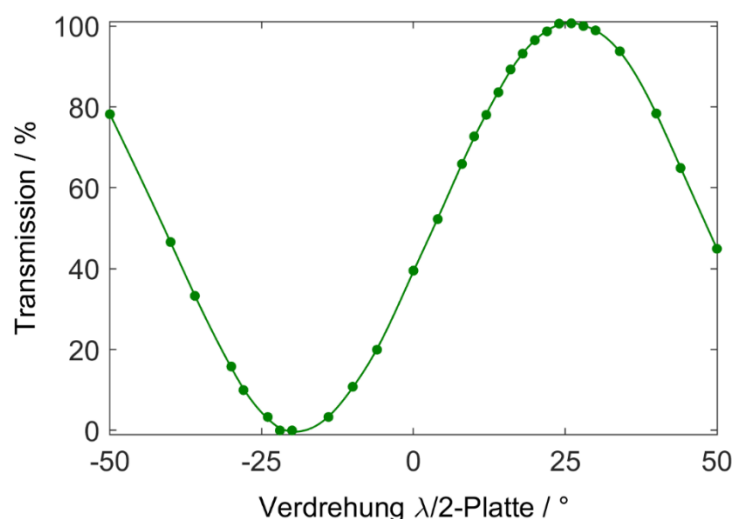


Abbildung 4-3: Zusammenhang der Lichttransmission des Strahlteilers (Komponente 5 in Abbildung 4-2) und Verdrehung der  $\lambda/2$ -Platte (Komponente 4 in Abbildung 4-2).

Die Laserstrahlung kann durch die Verzögerungsplatte vollständig geblockt werden. Ein gleichmäßiges Verhältnis von Reflexion zu Transmission erfolgt bei einer  $3,3^\circ$ -Verdrehung der  $\lambda/2$ -Platte.

### Detektion

Da der Dichroit (Komponente 7 in Abbildung 4-2) gestreute Laserstrahlung nicht vollständig blockiert und das Anregungslicht hierdurch auf den Kamerasensor treffen kann, kommen mit (8) zusätzliche Bandpassfilter ( $572 \pm 7,5$  nm, [85]) zum Einsatz. Diese werden auf den Objektiven (9, AF-Nikkor 85 mm, 1:1,8 D, eingestellte Blendenzahl 1,8) adaptiert. Die Detektion der Fluoreszenzstrahlung erfolgt durch sCMOS-Kameras (10, PCO edge 5.5) mit einer maximalen Auflösung von  $2560 \times 2160$  Pixel bei einer Pixelgröße von  $6,5 \times 6,5 \mu\text{m}^2$  und einer Digitalisierungstiefe von 16 Bit [86]. Die Belichtungszeit wurde auf  $100 \mu\text{s}$  festgelegt. Durch die kurze Belichtungszeit (Laserpulsdauer 10 ns) wird eine geringe Bewegungsunschärfe erreicht. Die projizierte Pixelgröße kann durch die Abbildung eines Schachbrettmusters an der Innenseite des optischen Zugangs mit bekannter Kantenlänge bestimmt werden (Vgl. Abbildung 4-4). Aus dem Verhältnis Kantenlänge/Pixelanzahl folgt die projizierte Pixelgröße von ca.  $50 \mu\text{m}/\text{Pixel}$  auf DS und GDS.

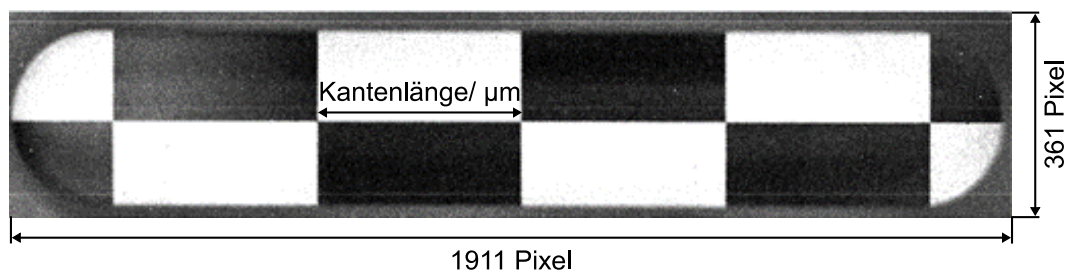


Abbildung 4-4: Bestimmung der projizierten Pixelgröße anhand eines Schachbrettmusters an der DS-Innenseite des optischen Zugangs.

### Timing

Die Auslösung eines Laserpulses und die Bildaufnahme erfolgt im Motorversuch phasengekoppelt zum Drehwinkelgeber der Kurbelwelle mit Hilfe der „Programmable Timing-Unit“ von LaVision [86]. Aufgrund der maximalen Wiederholrate des Lasers von 100 Hz kann pro Arbeitsspiel eine LIF-Aufnahme getätigt werden, wodurch zwei Aufnahmestrategien möglich sind. Entweder erfolgt die Aufnahme über einen Datensatz bei einem fixen Kurbelwinkel oder pro Arbeitsspiel um eine beliebige Gradzahl  $\Delta\alpha$  ( $^\circ\text{KW}$ ) verzögert. Um ein Arbeitsspiel komplett abbilden zu können, sind dann  $720/\Delta\alpha$  Zyklen erforderlich.

## Messaufbau im Prüfstand

Abbildung 4-5 zeigt den Versuchsaufbau unter Laborbedingungen. Zu erkennen ist die Strahlführung durch Führungsarme, die optischen Zugänge des Einzylindermotors und die Detektionspfade auf DS und GDS.

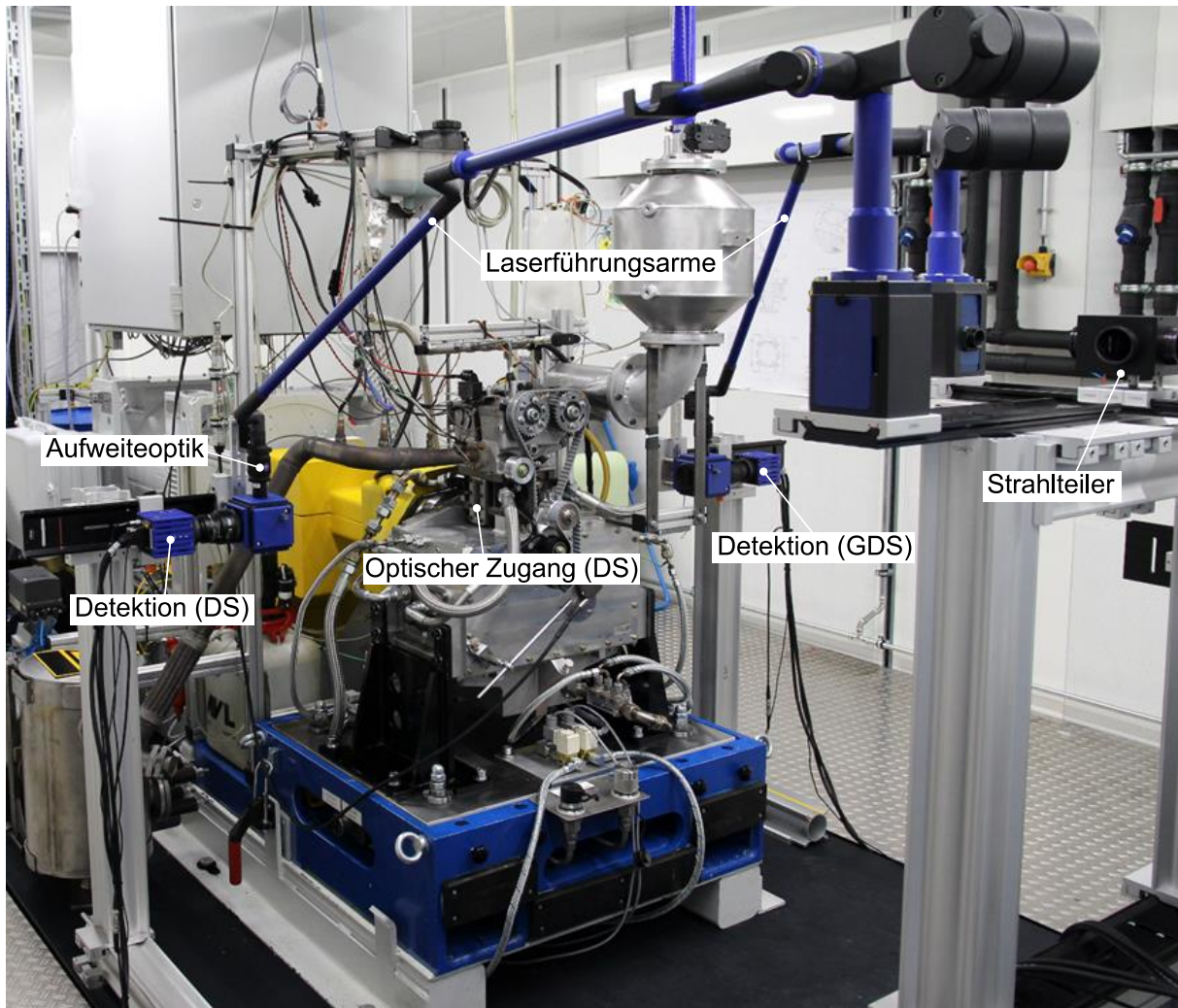


Abbildung 4-5: Applikation des phasengekoppelten LIF-Messsystems am optischen Einzylindermotor.

### 4.1.2 Voruntersuchungen in der Dünnschichtküvette

Bei der Verwendung von Pyrromethen 567 zur Erhöhung der LIF-Intensität von Motoröl ist die Bestimmung einer geeigneten Konzentration erforderlich. Wigger [4] weist die Proportionalität zwischen Fluoreszenzintensität und Schichtdicke (bis  $100\ \mu\text{m}$ ) bei einer Farbstoffkonzentration von  $0,05\ \text{mmol/L}$  nach. Die Farbstoffkonzentration im Ölkreislauf des Einzylindermotors wurde zunächst auf ca.  $0,01\ \text{mmol/L}$  eingestellt, da Filmdicken oberhalb von  $100\ \mu\text{m}$  in der Kolbengruppe erwartet wurden. Danach wurde die Konzentration schrittweise erhöht, bis ein ausreichendes Signalniveau im befeuerten Motorbetrieb erreicht wurde. Da die Ölmenge im Ölkreislauf des Motors

nicht exakt bekannt ist, liegt die Farbstoffkonzentration, die zu einem ausreichenden Signalniveau führt, im Bereich von  $0,015 \pm 0,005$  mmol/L. Gemäß dem Lambert-Beerschen Absorptionsgesetz (Vgl. Gleichung 2.6) gelten die proportionalen Zusammenhänge zwischen Absorberkonzentration, Schichtdicke und Anregungslicht nur unter bestimmten Voraussetzungen. Die Motoröl-Farbstoff-Mischung (MFM) wird daher hinsichtlich des Fluoreszenzverhaltens in einer Dünnschichtküvette unter definierten Bedingungen untersucht.

### Dünnschichtküvette

Abbildung 4-6 zeigt die Küvette, bei der ein Quarzglasfenster und eine Hintergrundscheibe (Gegenkörper) in einem Aluminiumzylinder mit einem federbelasteten Stempel gegeneinander gepresst werden. Die Höhe des Spalts wird durch Präzisionsfolien definiert und die Küvette mit der zu untersuchenden Flüssigkeit befüllt. Die Temperatur der Flüssigkeit ist über drei Heizpatronen geregelt einstellbar. Zur Vermeidung von Dampfblasen ist die Küvette durch temperaturbeständige O-Ringe abgedichtet und wird über zusätzliche Bohrungen und Stickstoffleitungen (nicht in der Abbildung dargestellt) mit einem Druck von 3 bar beaufschlagt. Weitere Details des Küvettedesigns können [4] entnommen werden.

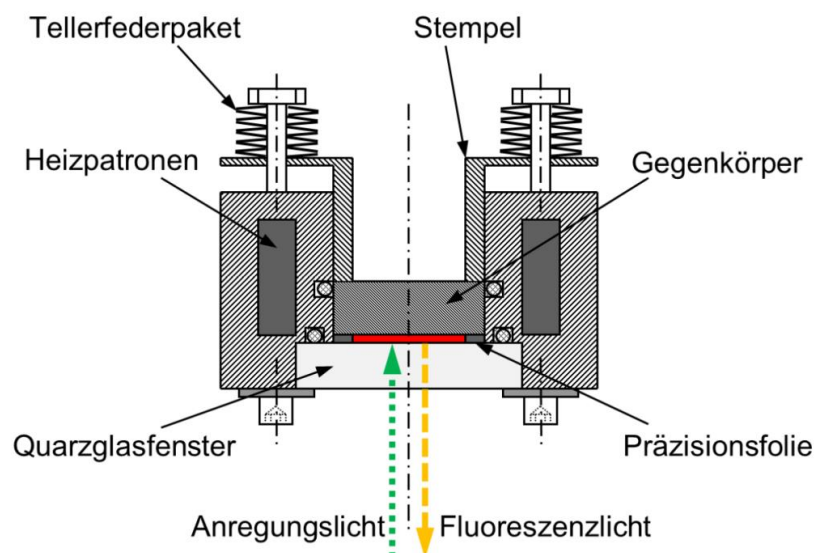


Abbildung 4-6: Aufbau der Dünnschichtküvette zur Erzeugung einer Flüssigkeitsschicht mit definierter Filmhöhe und Temperatur [4].

Das Quarzfenster weist aufgrund der Materialeigenschaften und der geringeren Dicke andere Transmissionseigenschaften auf als das Saphirfenster. Die beiden Fenster wurden daher hinsichtlich der Transmittivität mit einem Powermeter untersucht. Die Transmission von 266 nm-Strahlung (für Kraftstoff-LIF in Kapitel 5) hinter dem



Saphirfenster ist um 33 % geringer als hinter dem Quarzfenster. Die Transmission von 532 nm-Strahlung ist um 28 % geringer. Aufgrund der höheren Licht-Transmittivität der Küvetten-Quarzscheibe gegenüber des Saphirfensters, wird die Fluenz durch Verdrehung der  $\lambda/2$ -Platte (Vgl. Abbildung 4-3) angepasst. Die Fluenz beträgt ca.  $7 \times 10^{-3} \text{ mJ/mm}^2$  (532 nm).

Abbildung 4-7 zeigt eine Photographie des Versuchsaufbaus. Die Dünnschichtküvette wird im Strahlengang (Vgl. Abbildung 4-2) vor dem optischen Zugang positioniert und Kamera sowie Strahlführungsoptik so positioniert, dass die Oberfläche des Küvetten-Gegenkörpers in der Fokusebene liegt.

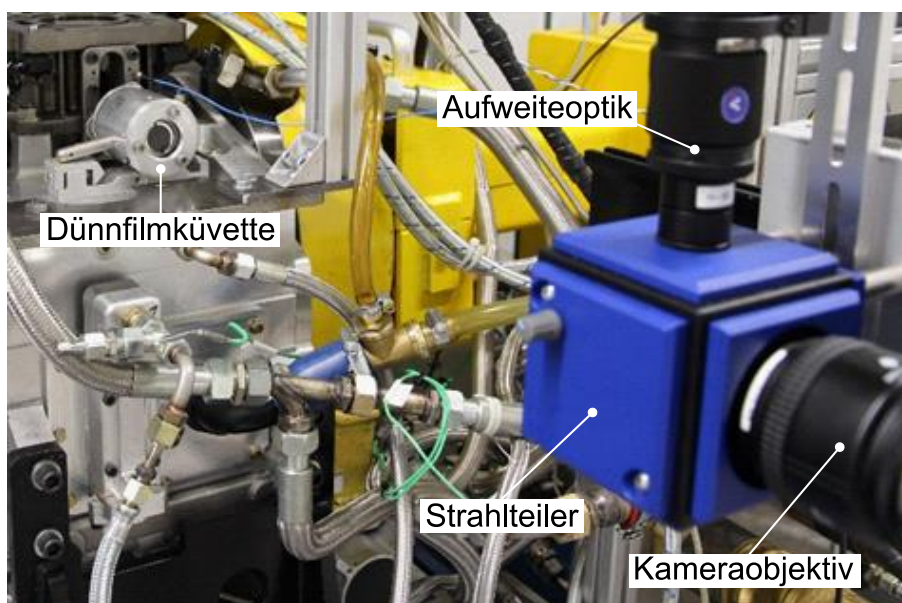


Abbildung 4-7: Dünnschichtküvette zur Untersuchung der Fluoreszenzeigenschaften der Motoröl-Farbstoff-Mischung (MFM) im Strahlengang des phasengekoppelten LIF-Messsystems.

### Versuchsdurchführung

Abbildung 4-8 zeigt das hintergrundkorrigierte Ensemblemittel aus 100 LIF-Aufnahmen der Küvette mit eingestellter Ölfilmstärke von  $10 \mu\text{m}$ . Die Hintergrundkorrektur erfolgt durch die Subtraktion eines Ensemblemittels aus 100 LIF-Aufnahmen der leeren und vollständig gereinigten Küvette.

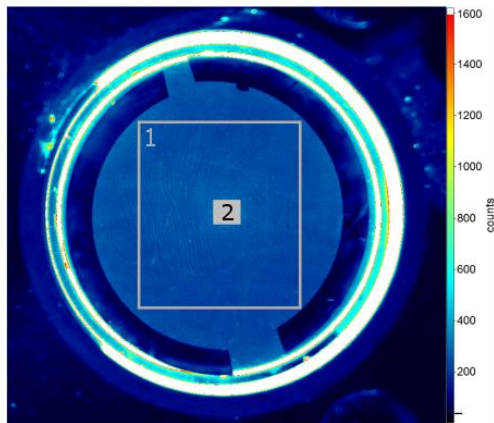


Abbildung 4-8: Hintergrundkorrigiertes Ensemblemittel der Dünnschichtkuvette mit 10 µm MFM-Schichtdicke. Nummerierte Rechtecke markieren den Auswertebereich.

Die LIF-Intensität ist durch die Ansammlung größerer Ölmengen außerhalb des Auswertebereichs hoch. Im inneren Bildbereich sind die halbkreisförmigen Präzisionsfolien zur Einstellung der Ölfilmstärke zu erkennen. Ein skalarer LIF-Intensitätswert wird durch die räumliche Mittelung des Signals im Bereich 1 und unter Aussparung des Bereichs 2 ermittelt.

Mit dieser Messprozedur werden die Fluoreszenzeigenschaften der MFM hinsichtlich Fluenz, Schichtdicke, Einfluss des Hintergrundmaterials und Temperatur untersucht. Die Fehlerabschätzung des Messsystems erfolgt im Rahmen der in situ Kalibrierung in Kapitel 4.2.3, weshalb auf eine Betrachtung der Messgenauigkeit innerhalb der Voruntersuchungen verzichtet wird.

### **Fluenz und Schichtdicke**

Hohe Bestrahlungsstärken und Schichtdicken können Sättigungseffekte bei der Anwendung der LIF-Messtechnik hervorrufen [4, 87]. Zur Bewertung des Fluoreszenzverhaltens in Abhängigkeit der Fluenz wurde die Bestrahlungsstärke durch die Verdrehung der  $\lambda/2$ -Platte variiert. Abbildung 4-9 zeigt links die LIF-Intensität in Abhängigkeit der Fluenz für unterschiedliche Schichtdicken. Rechts ist die LIF-Intensität über der Schichtdicke bei der Fluenz aus dem Motorversuch geplottet.

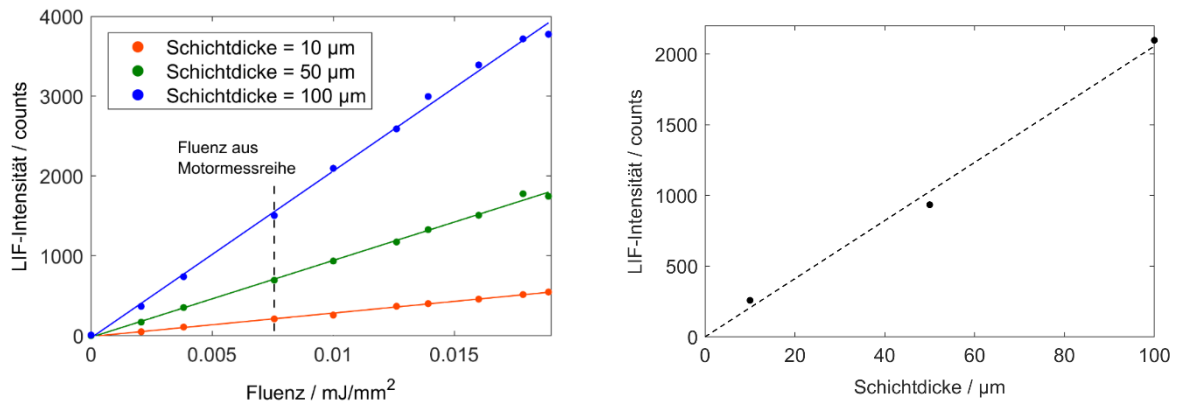


Abbildung 4-9: Links: Fluenzabhängigkeit der MFM-LIF bei unterschiedlichen Schichtdicken. Gestrichelte Linie markiert die Fluenz aus der Motormessreihe. Rechts: Linearer Zusammenhang zwischen MFM-LIF und Schichtdicke bei der Fluenz aus der Motormessreihe.

Die LIF-Intensitäten der untersuchten Schichtdicken weisen im Bereich  $\leq 100 \mu\text{m}$  einen proportionalen Zusammenhang zur Fluenz auf und die Geraden aus der linearen Regression verlaufen durch den Ursprung. Die Ergebnisse bestätigen die Ergebnisse von Wigger [4]. Er zeigt, dass keine Sättigungseffekte des LIF-Signals bei Farbstoffkonzentrationen zwischen 0,01-0,02 mmol/L und einer Fluenz von  $0,3 \text{ mJ/mm}^2$  bei  $100 \mu\text{m}$  Schichtdicke auftreten. Die zeitlichen Laserenergieschwankungen z.B. durch Kristalltemperaturvariationen liegen im Bereich  $< 3 \%$  [86]. Diese Variation der Beleuchtungsstärke führt bei der gewählten Öl-Farbstoff-Mischung nicht zu Sättigungserscheinungen. Im rechten Teil der Abbildung wird der lineare Zusammenhang zwischen LIF-Intensität und Schichtdicke bei der Fluenz aus dem Motorversuch deutlich.

### Einfluss des Hintergrundmaterials

Der Einfluss des Materials und der Topographie des Hintergrunds auf das Fluoreszenzverhalten wurde ausführlich von Wigger [4] untersucht. Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Versuche mit Aluminium- und Stahlhintergrund wiederholt und um das Hintergrundmaterial der Kolbenhemdbeschichtung ergänzt. Abbildung 4-10 zeigt die LIF-Intensität in Abhängigkeit von der Schichtdicke für die Hintergrundmaterialien, die in der Kolbengruppe zum Einsatz kommen. Die Signalintensitäten sind auf die maximal gemessene Intensität (Hintergrund: Aluminium, Schichtdicke =  $50 \mu\text{m}$ ) normiert.

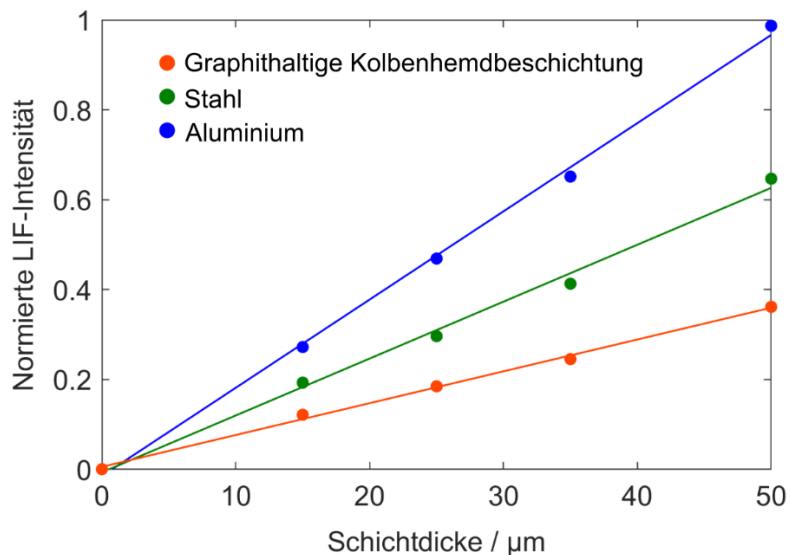


Abbildung 4-10: Einfluss des Hintergrundmaterials auf die MFM-LIF bei unterschiedlichen Schichtdicken.

Die LIF-Intensität steigt bei allen Hintergrundmaterialien linear mit der Schichtdicke und es sind keine Sättigungseffekte bei Schichtdicken  $\leq 50 \mu\text{m}$  erkennbar. Stahl führt zu einem um 38 %, die graphithaltige Beschichtung zu einem um 64 % reduzierten Signal gegenüber Aluminium. Wigger [4] stellt ein um 33 % reduziertes LIF-Signal eines Stahl- gegenüber eines Aluminium-Hintergrunds aufgrund des niedrigeren Reflexionsgrads fest.

### Temperaturabhängigkeit

Die Fluoreszenzintensität einer Öl-Farbstoff-Mischung wird durch die Temperatur beeinflusst [4, 35, 63]. Da die Öltemperatur in der Kolbengruppe während des Motorbetriebs variiert, ist die Kenntnis des LIF-Temperaturverhaltens erforderlich. Abbildung 4-11 zeigt die Temperaturabhängigkeit der MFM-LIF normiert auf den Ausgangswert bei  $T = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ .

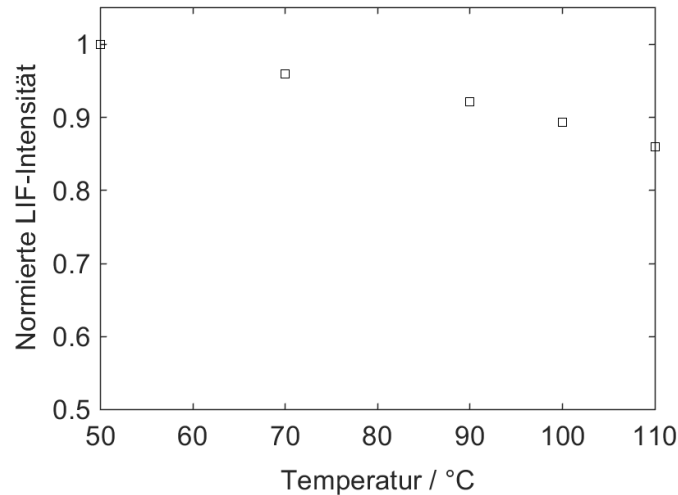


Abbildung 4-11: Temperaturabhängigkeit der MFM-LIF. Intensitäten sind auf den Wert bei  $T = 50\text{ °C}$  normiert.

Die LIF-Intensität nimmt mit steigender Temperatur ab. Bezogen auf das Signal bei  $T = 50\text{ °C}$  beträgt die Signalintensität bei  $T = 90\text{ °C}$ : 92 %, bei  $T = 100\text{ °C}$ : 89 % und bei  $T = 110\text{ °C}$  noch 86 %.

## 4.2 Quantifizierung der Ölfilmdicke im Bereich des Kolbenhemds

Die Voruntersuchungen der Motoröl-Farbstoff-Mischung (MFM) haben grundlegende Eigenschaften des Messsystems unter definierten Bedingungen aufgezeigt, die bei der Signalinterpretation im Motorversuch zu berücksichtigen sind. Eine Konzentration von  $0,015 \pm 0,005\text{ mmol/L}$  Pyrromethen 567 im Motoröl führt zu einer ausreichenden Signalintensität im Motorversuch. In der Dünnschichtkuvette wurde die Proportionalität zwischen LIF-Intensität und Ölfilmdicke bei konstanter Konzentration und Fluenz nachgewiesen. Hierdurch gilt das vereinfachte Lambert-Beer-Gesetz (Gleichung 2.7) für Ölfilmdicken bis  $100\text{ }\mu\text{m}$  (Vgl. Abbildung 4-9). Außerdem führt eine Fluenzvariation mit dem Faktor 0,5-1,9 bezogen auf die eingestellte Fluenz im Motorversuch nicht zu Sättigungseffekten im Fluoreszenzverhalten. Neben unterschiedlichen Reflexionsgraden des Hintergrundmaterials beeinflusst auch die Öltemperatur die LIF-Intensität.

Im Folgenden wird der Ölhaushalt in der Kolbengruppe im befeuerten Motorbetrieb mit Hilfe des vorgestellten Messsystems am optischen Einzylindermotor (Vgl. Abbildung 4-2) untersucht. In Abbildung 4-12 ist ein LIF-Rohbild (DS) aus dem Motorversuch in einem stationären Betriebspunkt  $90\text{ °KW}$  nach Zünd-OT (rechts) einer fotografischen Aufnahme des verwendeten Kolbens (links) gegenübergestellt.

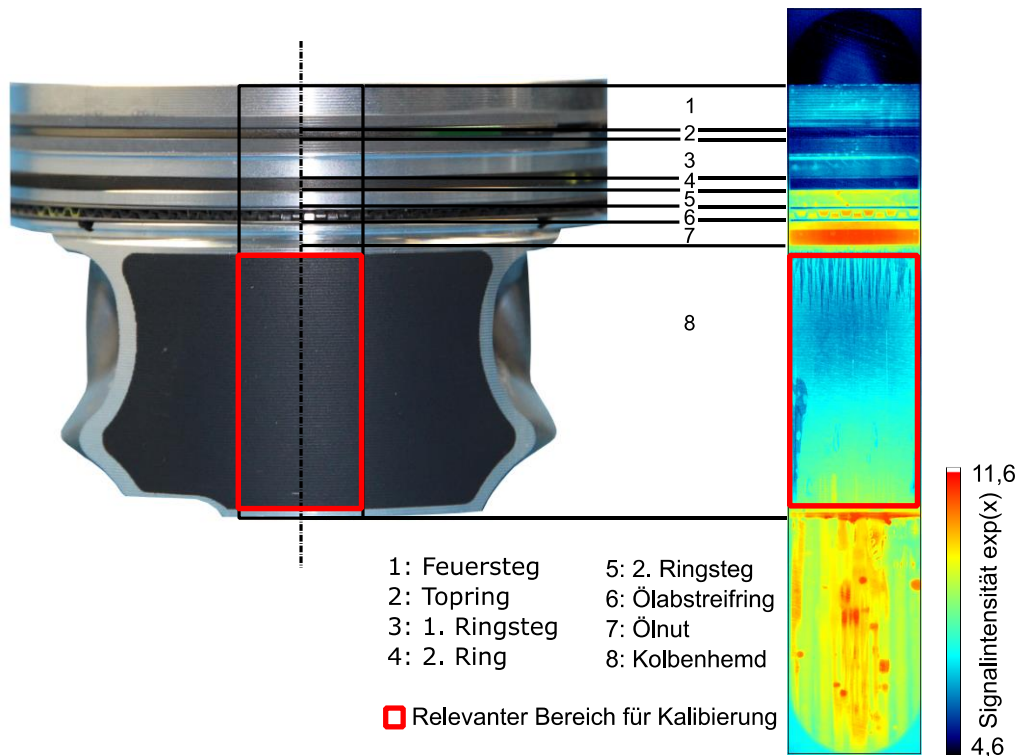


Abbildung 4-12: Fotografie des verwendeten Pleiers (links) zur Identifizierung charakteristischer Bereiche und LIF-Rohbild (rechts) aus dem Motorversuch in logarithmierter Falschfarbendarstellung.

Die Fotografie des Pleiers ermöglicht die Einteilung in charakteristische Bereiche und deren Zuordnung zur LIF-Aufnahme. Zu erkennen sind Top-Ring (2) und zweiter Ring (4), Ölabstreifring (6), Ölnut (7) und das Pleienhemd mit der graphithaltigen Beschichtung (8). Die charakteristischen Bereiche sind durch unterschiedliche LIF-Signalausprägungen (rechts) gekennzeichnet. Die großen Unterschiede in den lokalen Ölfilmstärken entsprechen einem hohen Dynamikbereich im LIF-Signal. Um sowohl Bereiche mit geringer Signalstärke (z.B. Pleienring) als auch Abschnitte mit hoher Signalintensität (z.B. unterhalb des Pleienhemds) visualisieren zu können, werden die Werte hier logarithmisch auf einer Falschfarbenskala dargestellt, wobei der Farbverlauf von blau nach rot einer zunehmenden Schichtstärke entspricht. Das hohe Signal unterhalb des Pleienhemds resultiert aus der großen Ölmenge durch die Pleienspritze, die zur Kühlung der Pleienunterseite dient und aus Ölverwirbelungen im Pleiengehäuse. Hohe LIF-Intensität wird auch im Bereich der Ölnut durch das große Ölvolumen hervorgerufen. Oberhalb des Feuerstegs (1) und in den Kontaktbereichen Ring/Zylinderwand werden nur geringe Fluoreszenzintensitäten detektiert, d.h. die Ölfilmstärken sind in diesen Bereichen minimal. Die Intensität des detektierten Fluoreszenzlichts im Bereich des Pleienhemds (rote Markierung) wird im anschließenden Bildverarbeitungsprozess in eine Schichtstärke überführt.

### 4.2.1 Bildverarbeitungsprozess

Der Bildverarbeitungsprozess zur Quantifizierung der Ölfilmdicke umfasst neben der Hintergrundkorrektur, die Korrektur der ungleichmäßigen Ausleuchtung und Übertragung des optischen Pfads (Flachfeld-Korrektur), die Korrektur der Pulsvariation, sowie die Überführung der Signalintensität in eine Schichtdicke durch einen Kalibrierfaktor. Die Nomenklatur, die im Rahmen der einzelnen Prozessschritte verwendet wird, ist folgendermaßen definiert:

Tabelle 4-1: Abkürzungen im Bildverarbeitungsprozess.

Abkürzung	Beschreibung
$I_{\text{Prozessschritt}}$	Bildmatrix mit Spezifizierung des Prozessschritts im Index
$\langle I_{\text{Prozessschritt}} \rangle$	Ensemblemittel aus einer Bilderserie
$i_{\text{Prozessschritt}}$	Skalare Größe mit Spezifizierung des Prozessschritts im Index
$[i_{\text{Prozessschritt}}]$	Ensemblemittel aus einer Serie skalarer Größen
$\bar{k}$	Räumliches Mittel eines Bildbereichs
$I_{\text{Prozessschritt,DS}}$	Unterscheidung zwischen Druck- und Gegendruckseite durch DS und GDS im Index

#### Hintergrundkorrektur

Die Hintergrundkorrektur dient der Korrektur des gemessenen Grundsignals in Abwesenheit des zu messenden Phänomens. Neben Dunkelstrom des Kamerasensors und Offset des A/D-Wandlers werden hierdurch auch Reflektionen des Anregungslichts oder Fluoreszenzstrahlung des optischen Zugangs erfasst. Abbildung 4-13 zeigt links das Ensemblemittel aus 150 DS-Aufnahmen des gereinigten optischen Zugangs mit eingebautem Kolben in Abwesenheit der Motoröl-Farbstoff-Mischung (1). In der Mitte ist das Ensemblemittel aus 50 DS-Aufnahmen unter Lichtausschluss mit verschlossenem Objektiv (2) und rechts die Differenz aus (1) und (2) dargestellt.

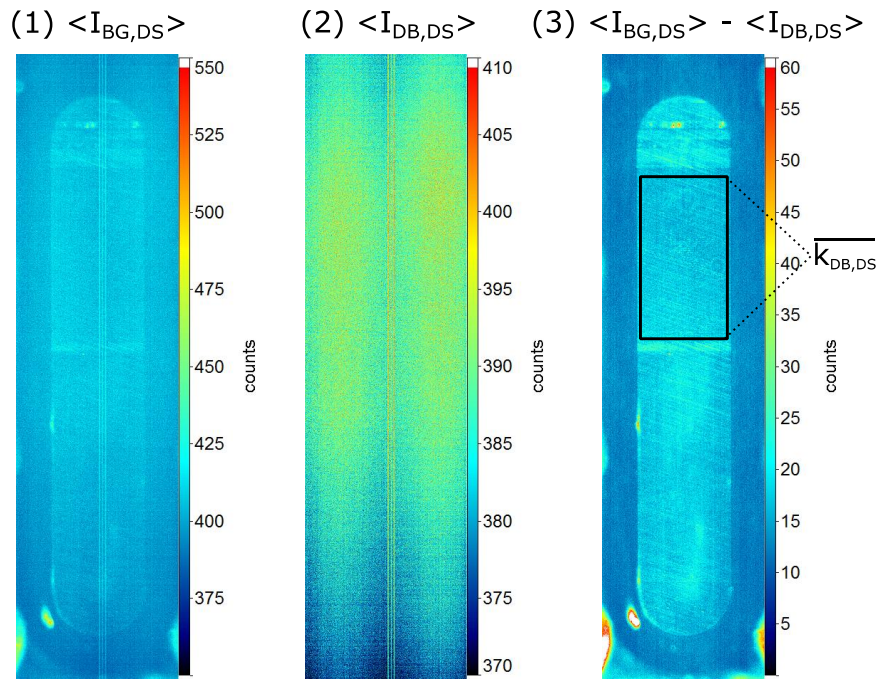


Abbildung 4-13: (1) Ensembledittel aus Hintergrundaufnahmen mit eingebautem Kolben, (2) Ensembledittel aus Dunkelbildaufnahmen mit verschlossenem Objektiv, (3) Differenz aus (1) und (2).

Das Dunkelbild ist durch Signale aufgrund der im Sensor durch Wärme spontan freigesetzten Elektronen (Dunkelstrom) gekennzeichnet. Das Hintergrundbild  $\langle I_{BG,DS} \rangle$  weist ein zum Dunkelbild  $\langle I_{DB,DS} \rangle$  erhöhtes Signal im Bereich des Kolbenhemds auf. Daher ist für eine korrekte Hintergrundkorrektur eine Aufnahme des eingebauten Kolbens in Abwesenheit der Öl-Farbstoff-Mischung für alle Kolbenpositionen erforderlich. Dieses Vorgehen ist im Motorversuch nicht praktikabel, da bei einer Aufnahme pro Kurbelwinkel 360 Hintergrundaufnahmen für eine vollständige Umdrehung der Kurbelwelle, bzw. Auf- und Abwärtsbewegung des Kolbens erforderlich sind. Stattdessen wird anhand des dunkelbildkorrigierten Hintergrunds ein im Bereich des Kolbenhemds gemittelter Korrekturwert  $\overline{k_{DB,DS}}$  bestimmt und auf das Dunkelbild  $\langle I_{DB,DS} \rangle$  addiert. Die ermittelten Werte sind  $\overline{k_{DB,DS}} = 17,5 \pm 3$  counts und  $\overline{k_{DB,GDS}} = 8,1 \pm 0,34$  counts. Die Hintergrundkorrektur des LIF-Rohbilds  $I_R$  kann folgendermaßen zusammengefasst werden:

$$I_{R,BG} = I_R - (\langle I_{DB} \rangle + \overline{k_{BG}}) \quad (\text{Gleichung 4.1})$$



## Flachfeldkorrektur

Die Intensität innerhalb des Laserstrahlprofils ist nicht gleichmäßig verteilt (Vgl. Abbildung 2-11), wodurch die Fluenz nach der Strahlaufweitung über den Messbereich des Saphirfensters variiert. Durch die Aufnahme eines Flachfelds können die ungleichmäßige Verteilung der Fluenz und andere Effekte (z.B. Vignettierung des Kamerasystems) korrigiert werden. Neben der Fluoreszenzantwort geeigneter dünner Materialien [73] kann auch die verwendete MFM zur Flachfelderzeugung genutzt werden. Aufgrund von Sättigungseffekten liegt die optimale Ölfilmdicke des Flachfelds im Bereich der zu erwartenden Schichtdicke im Versuch. Allerdings ist die Erzeugung einer gleichmäßigen dünnen Ölschicht aufgrund der Krümmung des Zylinders schwer zu realisieren. Wigger [4] zeigt, dass ein Flachfeld bei niedriger Fluenz auch durch die LIF-Aufnahme einer unendlichen dicken Schicht entsteht, da die geforderte Proportionalität zwischen Intensität des Anregungs- und des Fluoreszenzlichts erhalten bleibt. Die in situ Flachfeldbedingungen realisiert er durch die Vollfüllung des Zylinders mit fluoreszenzmarkiertem Öl. Abbildung 4-14 zeigt den zur Durchführung dieses Verfahrens vollständig mit MFM gefüllten Zylinder mit demontiertem Zylinderkopf und Kolben. Das Zylinderrohr ist mit Hilfe eines Stopfens gegen das Kurbelgehäuse abgedichtet.

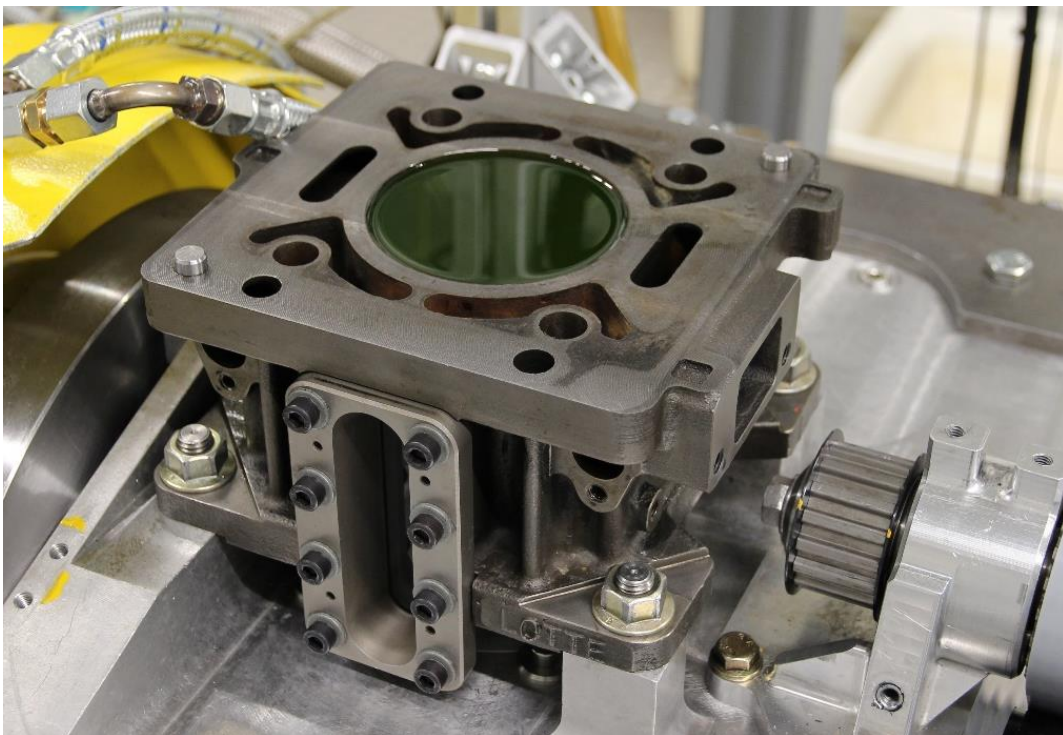


Abbildung 4-14: Zur Flachfeld-Erzeugung vollständig mit MFM gefüllter Zylinder mit demontiertem Zylinderkopf und Kolben.

In Abbildung 4-15 sind die Ensemblemittel aus 300 dunkelbildkorrigierten Flachfeld-Aufnahmen auf DS und GDS dargestellt.

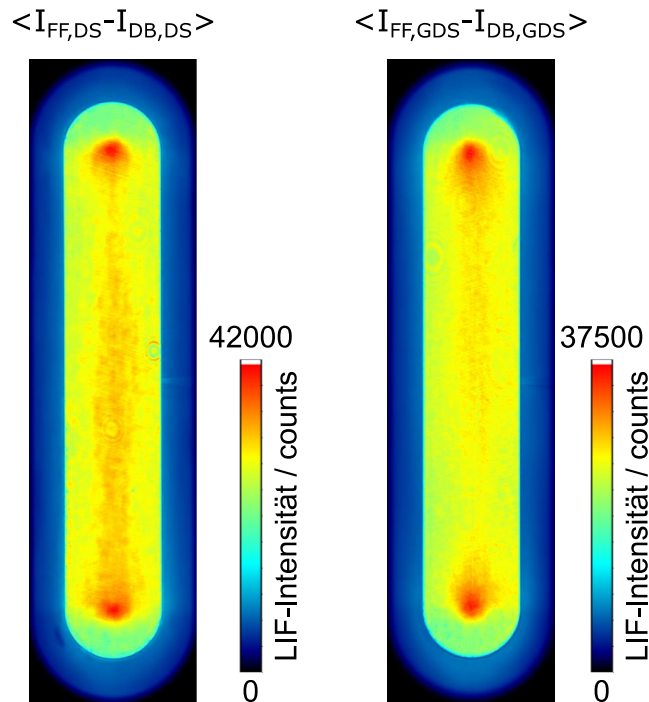


Abbildung 4-15: Dunkelbildkorrigierte Ensemblemittel der Flachfeld-Aufnahmen auf DS (links) und GDS (rechts).

Der Fensterbereich grenzt sich durch LIF-Intensitäten  $> 20 \times 10^3$  counts vom Fensterhalter (blaue Umrandung) ab. In beiden Flachfeldern werden im oberen und unteren Fensterbereich lokal erhöhte Signalstärken (LIF-Spots) detektiert. Die LIF-Intensität nimmt im Bereich zwischen den LIF-Spots vom Fensterrandbereich zur Fenstermitte hin zu (Vgl. Abbildung 4-28). Das Signalniveau auf der DS ist höher als auf der GDS. Das Messobjekt ist auf DS und GDS identisch, daher wird die unterschiedliche LIF-Intensität auf eine ungleichmäßige Aufteilung des Anregungslichts durch den polarisationsabhängigen Strahlteiler (Vgl. Kapitel 4.1.1) zurückgeführt. Die Flachfeldkorrektur der hintergrundkorrigierten LIF-Aufnahme kann folgendermaßen zusammengefasst werden:

$$I_{R,BG,FF} = (I_{R,BG}) \cdot \frac{1}{\langle I_{FF,DB} \rangle} \quad (\text{Gleichung 4.2})$$

### Pulsvariation

Die Laserenergie wird durch stochastische Schwankungen und andere Einflüsse (z.B. Laser-Kristalltemperatur) beeinflusst und unterliegt zeitlichen und räumlichen Variationen. Anhand der Flachfeld-Aufnahmen können die Puls-zu-Puls-

Abweichungen untersucht werden [88]. Die Pulsenergie jedes Einzelschusses wird durch Beam Sampler/Photodiode (Vgl. Komponenten (2) und (3) in Abbildung 4-2) aufgezeichnet und der entsprechenden LIF-Einzelaufnahme zugeordnet. Abbildung 4-16 zeigt den Zusammenhang zwischen LIF-Intensität und Pulsenergie. Hierzu ist die räumlich gemittelte LIF-Intensität der Flachfeld-Einzelaufnahmen normiert auf den mittleren Intensitätswert des Bilderensembles über der auf die mittlere Pulsenergie des Ensembles normierte Pulsenergie des zugehörigen Einzelschusses aufgetragen.

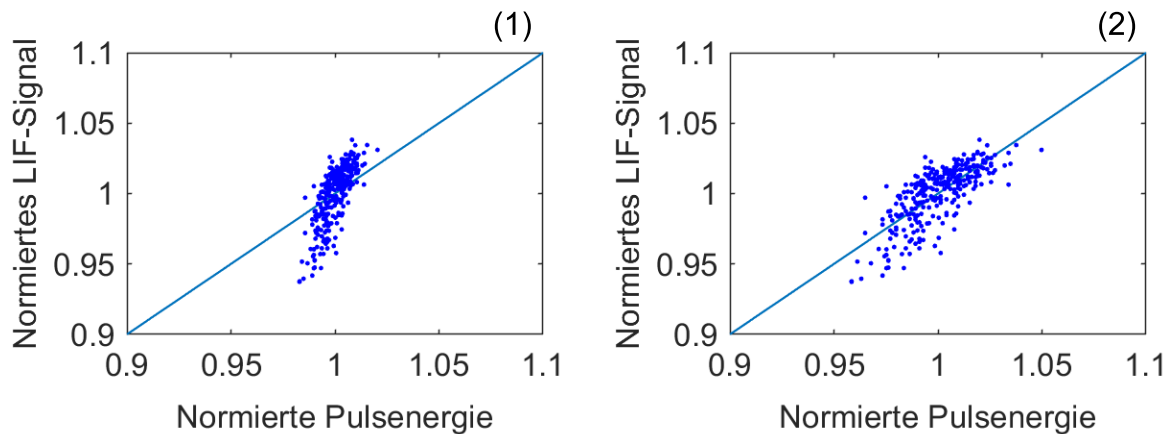


Abbildung 4-16: Zusammenhang zwischen MFM-LIF und Pulsenergie vor (1) und nach (2) der Subtraktion eines Offsets.

Die LIF-Intensität steigt proportional mit der Pulsenergie (Vgl. Abbildung 4-9). Allerdings weicht in (1) die Ausgleichsgerade der Messpunkte von der Ursprungsgeraden ab. Die Subtraktion eines konstanten Offsets von der Pulsenergie vor der Normierung führt zu einem korrekten Zusammenhang zwischen LIF-Intensität und Pulsenergie (2). Folglich wurden alle Pulsenergien um den konstanten Offset korrigiert. Die Korrektur der Pulsenergie eines Einzelschusses erfolgt dann in Bezug auf einen Referenzwert, der im Folgenden bestimmt wird.

Neben den Puls-zu-Puls-Schwankungen innerhalb einer Messreihe variiert die mittlere Pulsenergie zwischen verschiedenen Messreihen. Abbildung 4-17 zeigt die mittleren, offset-korrigierten Pulsenergien der vier Messreihen, die in Kapitel 4.2.2 zur Kalibrierung verwendet werden.

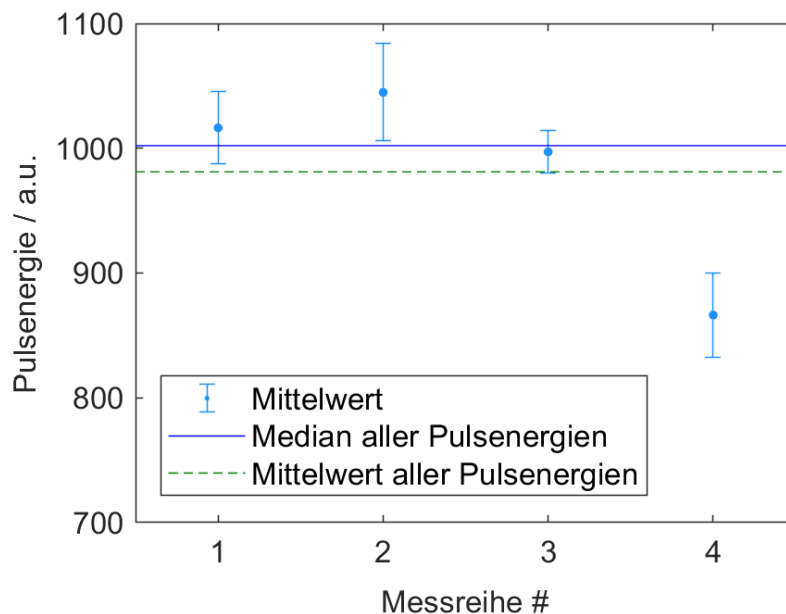


Abbildung 4-17: Mittelwerte der mit einer Photodiode gemessenen Pulsenergien aus verschiedenen Messreihen.

Die mittleren Pulsenergien der Messreihen 1-3 weichen weniger voneinander ab als die von Messreihe 4. Die größten Abweichungen (Standardabweichung  $\sigma$ ) vom jeweiligen Mittelwert ( $\mu$ ) weisen Messreihe 2 mit 3,7 % und Messreihe 4 mit 3,9 % auf. Da die Abweichungen innerhalb der Messreihen 2-3 niedriger sind, liegt die gesamte mittlere Pulsvariation mit 3 % im Bereich der Herstellerangaben [86]. Die maximale Energieabweichung einzelner Laserpulse vom Mittelwert der Pulsenergien über alle Messreihen beträgt +15 %, die der minimalen Pulsenergie -19 %. Dies entspricht nach Abbildung 4-9 einer Fluenzvariation zwischen 0,006-0,008 mJ/mm<sup>2</sup>. Da innerhalb dieser Schwankung keine Sättigungseffekte auftreten und die mittleren Pulsenergien der Messreihen 1-3 weniger voneinander abweichen als Messreihe 4, wird im Folgenden der Median aller Pulsenergien ( $[e_{\text{Ref}}] = 1002,1$ ) als Referenzwert für die Pulskorrektur verwendet. Die Pulskorrektur der hintergrund- und flachfeldkorrigierten LIF-Einzelaufnahme kann folgendermaßen zusammengefasst werden:

$$I_{\text{R,BG,FF,e}} = I_{\text{R,BG,FF}} \cdot \frac{[e_{\text{Ref}}]}{e_{\text{R,BG,FF}}} \quad (\text{Gleichung 4.3})$$

## Vollständiger Bildbearbeitungsprozess

Der vollständige Bildverarbeitungsprozess umfasst die Hintergrund- und Flachfeldkorrektur, sowie die Korrektur der Puls-zu-Pulsabweichung und kann folgendermaßen zusammengefasst werden:

$$I_{R,BG,FF,e} = (I_R - \langle I_{DB} \rangle - \overline{k_{BG}}) \cdot \frac{1}{\langle I_{FF,DB} \rangle} \cdot \frac{[e_{Ref}]}{e_R} \quad (\text{Gleichung 4.4})$$

Zur Quantifizierung ist die Überführung der LIF-Intensität der korrigierten LIF-Aufnahme in eine Schichtdicke  $d$  durch einen Kalibrierfaktor  $c_{kal}$  erforderlich:

$$d = I_{R,BG,FF,e} \cdot c_{kal} \quad (\text{Gleichung 4.5})$$

In Abbildung 4-18 sind die einzelnen Prozessschritte der Bildverarbeitung exemplarisch für eine LIF-Aufnahme aus dem Motorversuch auf der GDS dargestellt.

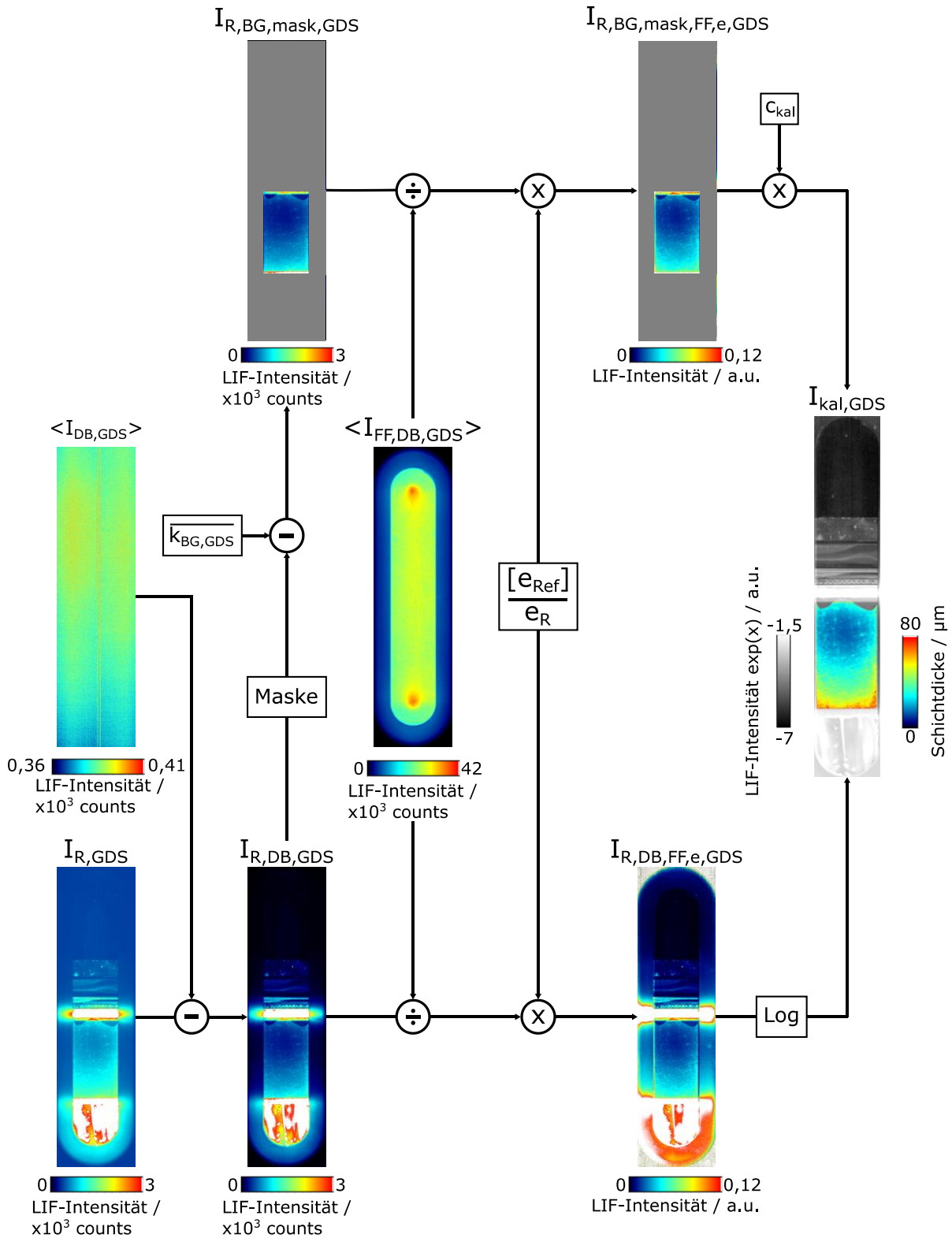


Abbildung 4-18: Bildverarbeitungsprozess der LIF-Rohbilder aus dem Motorversuch.

Vom LIF-Rohbild  $I_{R,GDS}$  wird das Ensemblemittel einer Dunkelbildserie mit verschlossenem Objektiv  $\langle I_{DB,GDS} \rangle$  subtrahiert. Dieser Prozessschritt wird bei der gewählten Skalierung insbesondere im Bereich niedriger LIF-Intensitäten (z.B. Zylinderwand oberhalb des Kolbens) und im Bereich des Fensterhalters außerhalb des

Fensterbereichs deutlich. Im Folgenden wird die dunkelbildkorrigierte LIF-Aufnahme  $I_{R,DB,GDS}$  in zwei unterschiedlichen Prozessen weiterverarbeitet.

Im oberen Pfad werden die zur Quantifizierung im Bereich des Kolbenhemds notwendigen Prozessschritte beschrieben. Da nur im Bereich des Kolbenhemds quantifiziert wird, wird dieser Bereich durch eine Maske freigeschnitten und der Hintergrund mit dem Korrekturwert  $\overline{k_{DB,GDS}}$  gemäß Abbildung 4-13 korrigiert. Die Division der hintergrundkorrigierten LIF-Aufnahme  $I_{R,BG,mask,GDS}$  durch das Ensemblemittel der Flachfeldaufnahme  $\langle I_{FF,DB,GDS} \rangle$  und die Multiplikation mit dem Puls Korrekturfaktor führen zur LIF-Aufnahme  $I_{R,BG,mask,FF,e,GDS}$ . Die Pulsenergiekorrektur ist aufgrund des geringen Einflusses auf die LIF-Intensität nicht gesondert dargestellt. Im letzten Prozessschritt des oberen Pfads wird die LIF-Intensität durch einen Kalibrierfaktor in eine Schichtdicke überführt. Der Kalibrierfaktor wird in Kapitel 4.2.2 hergeleitet.

Im unteren Pfad des Bildverarbeitungsprozesses erfolgen die Prozessschritte „Flachfeldkorrektur“ und „Pulsenergiekorrektur“ der LIF-Aufnahme  $I_{R,DB,GDS}$  analog zum oberen Pfad. Da die Signalintensität im Flachfeld im Bereich des Fensterhalters nahe Null liegt, führt eine Division durch das Flachfeld zu hohen Werten außerhalb des Fensters. Im letzten Prozessschritt werden die LIF-Intensitäten von  $I_{R,DB,FF,e,GDS}$  logarithmiert und in eine schwarz-weiß Skala überführt.

Die Zusammenführung der beiden Prozesspfade resultiert in der partiell kalibrierten LIF-Aufnahme  $I_{kal,GDS}$ . Quantifizierte Schichtdicken im Bereich des Kolbenhemds werden mit einer Falschfarbenskala dargestellt. Der übrige Messbereich wird mit einer logarithmierten Schwarz-weiß Skala abgebildet. Durch die Anwendung zweier Farbskalen kann einerseits der quantifizierte Bereich identifiziert und die Skalierung passend gewählt werden. Andererseits ermöglicht die logarithmierte Skala die Abbildung des großen Dynamikumfangs der LIF-Intensitäten, um qualitative Aussagen über die Ölverteilung in der Kolbengruppe treffen zu können (Vgl. Abbildung 4-12).

Der Kalibrierfaktor  $c_{kal}$  wird über den Abgleich einer definierten Filmdicke der zu vermessenden Flüssigkeit mit dem resultierenden LIF-Signal bestimmt. Hierbei kommen verschiedene Verfahren zum Einsatz. In [4, 71, 72, 87, 89-91] wird die Kalibrierspaltmethode angewendet. Hierbei wird ein Spalt mit definierter Geometrie erzeugt und vollständig mit einer fluoreszierenden Flüssigkeit gefüllt. Zur Erzeugung einer konstanten Flüssigkeitsschicht mit definierter Filmhöhe kommen in [46, 73, 92-

94] Kalibriervorrichtungen ähnlich der hier verwendeten Dünnschichtkuvette zum Einsatz. Die Schichtdicke des Flüssigkeitsfilms kann über Präzisionsfolien oder Schrauben eingestellt werden. Eine weitere Möglichkeit ist der Abgleich einer bekannten Bauteilgeometrie mit dem resultierenden LIF-Signal. Der Vergleich der LIF-Intensität mit der Kontur eines Kolbenrings wird in [4, 67, 69, 95] gezeigt. Wong et. al [68] nutzt chemisch geätzte Markierungen im Bereich des Kolbenhemds zur Kalibrierung. In [4, 35] werden die Riefen im Kolbenhemd, die aus der Drehbearbeitung des Kolbens hervorgehen, zur Kalibrierung genutzt. Wigger [4] schlägt dazu eine Vergrößerung des Abbildungsmaßstabs vor, um die Riefen mit der verwendeten Kamera räumlich aufzulösen. Die Vergrößerung des Abbildungsmaßstabs führt allerdings zu einem Informationsverlust, da nicht mehr der gesamte optische Zugang des Einzylindermotors auf den Kamerasensor abgebildet werden kann. Die Erzeugung eines definierten Spalts an der Fensterinnenseite erwies sich aufgrund der Krümmung des Zylinderrohrs als schwierig [4] und die Applikation einer Kalibriervorrichtung ist durch das begrenzte Volumen des Zylinders und der Veränderung des optischen Pfads durch zusätzliche Quarzscheiben ungeeignet. Im befeuerten Motorbetrieb sind außerdem Temperatur, Hintergrundreflektivität der unterschiedlichen Kolbenbereiche und die Veränderung der LIF-Eigenschaften des Motoröls durch Photobleaching [63], Ölalterung und Rußeintrag zu berücksichtigen. Aus diesen Gründen ist eine in situ Kalibrierung im Motorbetrieb ohne Veränderung des Abbildungsmaßstabs wünschenswert.

#### **4.2.2 In situ Kalibrierung**

Die Bestimmung des Kalibrierfaktors für den Bereich des Kolbenhemds erfolgt mit Hilfe des in situ Verfahrens, das bereits in [6] veröffentlicht wurde. Hierzu wird die Geometrie des Kolbenhemds, die im Motorbetrieb durch LIF-Messtechnik bestimmt werden kann, mit der durch Konfokalmikroskopie ex situ ermittelten Geometrie abgeglichen.

#### **Messungen mit dem Konfokalmikroskop**

Das Kolbenhemd weist eine Balligkeit zur Optimierung der Schmierfilmbildung auf (Vgl. Kapitel 2.1). Die genaue Form hängt vom Dreh- und Beschichtungsprozess ab und wurde mit einem Konfokalmikroskop vermessen. Abbildung 4-19 zeigt eine photographische Aufnahme des Kolbens unter dem Mikroskop.



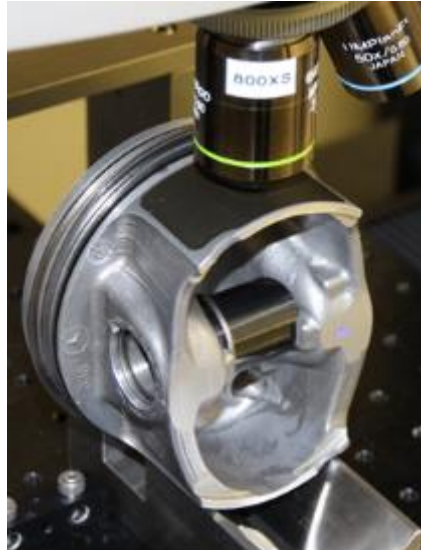


Abbildung 4-19: Vermessung der Kolbenhemdgeometrie durch Konfokalmikroskopie.

Abbildung 4-20 zeigt links die durch Konfokalmikroskopie gemessene GDS-Topografie des Kolbenhemds im Messbereich von  $0,645 \times 30 \text{ mm}^2$  und einem Abbildungsmaßstab von  $1,626 \text{ } \mu\text{m}/\text{Pixel}$ . Im rechten Teil der Abbildung ist die über die Breite des Messbereichs (lateral) gemittelte Kolbenhemdkontur abgebildet.

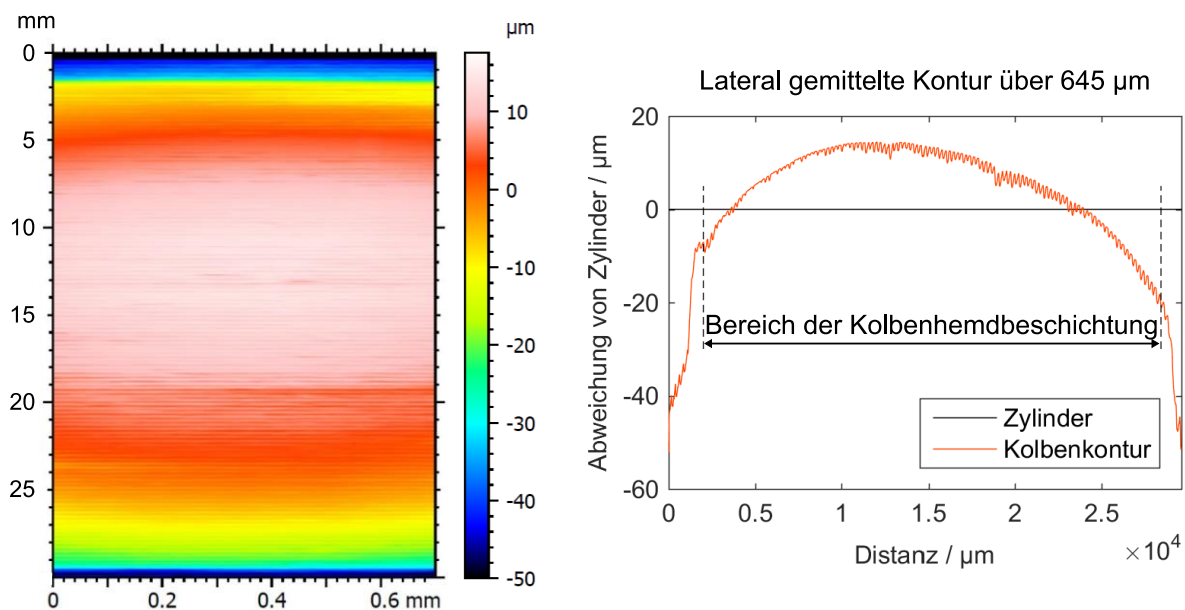


Abbildung 4-20: Oberflächentopographie des GDS-Kolbenhemds gemessen mit Konfokalmikroskopie (links). Lateral gemittelte Kolbenhemdkontur (rechts).

Die Kontur des Kolbenhemds ist durch Merkmale auf verschiedenen Größenskalen gekennzeichnet. Bei der Betrachtung des globalen Verlaufs ist zu erkennen, dass das Kolbenhemd nicht ein exakter Zylinder, sondern ballig ist. Außerdem führen Welligkeit und Rauheit zu höheren Frequenzen innerhalb der Oberflächenstruktur. Während die Welligkeit durch die Drehbearbeitung im Fertigungsprozess in den Kolben eingebracht

wird, ist die Rauheit auf die Drehbearbeitung und die graphithaltige Beschichtung des Kolbenhemds zurückzuführen. In den Randbereichen, bzw. im Bereich des Kolben-Grundmaterials ohne Beschichtung, ist die Abweichung von der Zylinderform am größten.

### **Messungen mit LIF-Messsystem**

Im Folgenden wird die in situ Kalibrierung anhand des Abgleichs der Kolbenhemdgeometrie aus der Konfokalmikroskopie-Messung (Vgl. Abbildung 4-20) mit LIF-Messreihen am Einzylindermotor auf GDS bei  $T = 110\text{ °C}$  und DS bei  $T = 50\text{ °C}$  erläutert. Der Motor wurde für die Kalibriermessungen auf verschiedene Öl- und Kühlwassertemperaturen vorkonditioniert. Um thermische und mechanische Deformationen des Kolbenhemds durch Gas- und Massenkräfte möglichst gering zu halten, wurde der Motor mit einer Drehzahl von  $800\text{ min}^{-1}$  geschleppt.

Zur in situ Kalibrierung anhand der Kolbenhemdkontur wird eine Kolbenposition gesucht, bei der der Ölfilm zwischen Kolbenhemd und Zylinderlaufbahn vollständig geschlossen ist. Daher ist zunächst die Identifikation geeigneter Kolbenpositionen innerhalb des Kolbenhubs im Motorversuch erforderlich. Alle im Folgenden verwendeten LIF-Aufnahmen wurden nach dem in Abbildung 4-18 dargestellten Prozess korrigiert. Abbildung 4-21 zeigt die simultan auf DS und GDS aufgenommenen LIF-Aufnahmen im geschleppten Motorbetrieb (Saugrohrdruck =  $960\text{ mbar}$ ,  $n = 800\text{ min}^{-1}$ ) bei  $86\text{ °KW v.ZOT}$  und einer Öl- und Wassertemperatur von  $110\text{ °C}$ . Im rechten Teil der Abbildung sind die auf DS und GDS im Bereich des Kolbenhemds lateral über 13 Pixel gemittelten LIF-Intensitäten dargestellt (grüner und blauer Profilschnitt). Zur optischen Unterscheidung der verschiedenen Bereiche der Kolbengruppe sind die LIF-Aufnahmen unmaskiert (Vgl. Abbildung 4-18).

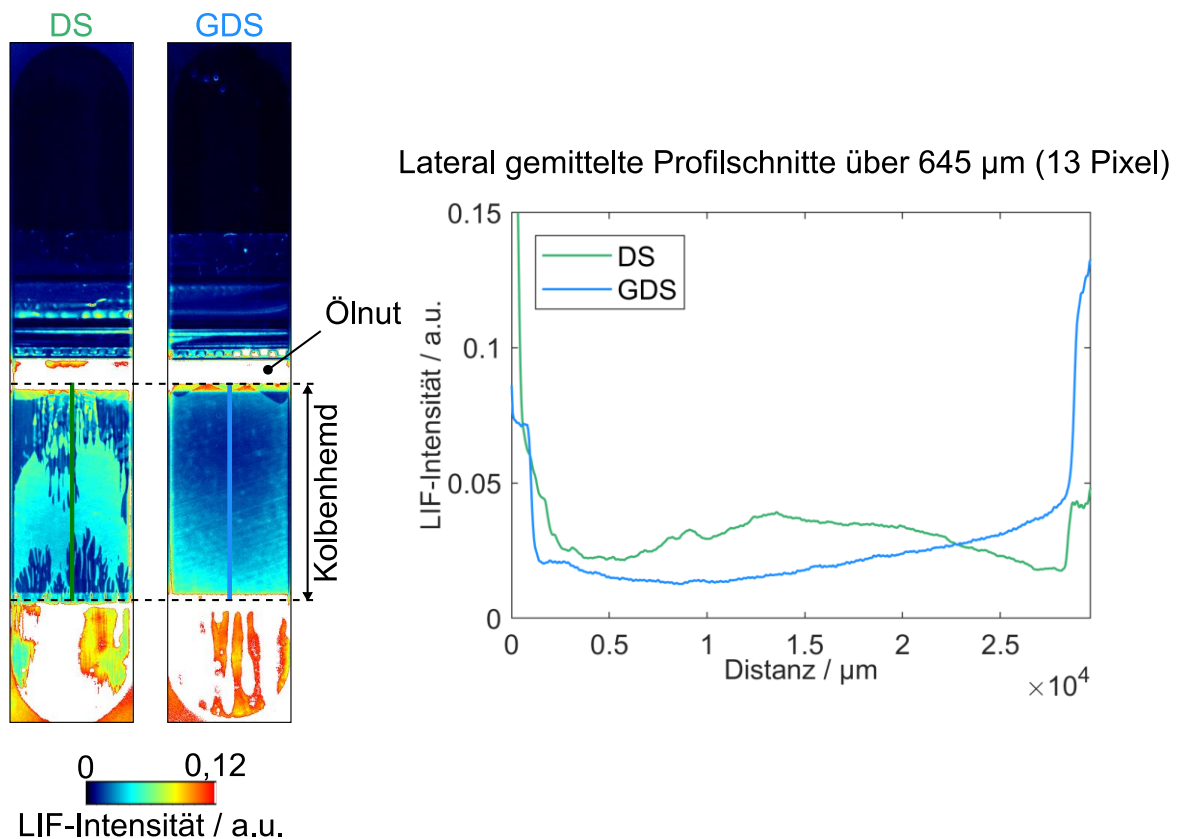


Abbildung 4-21: LIF-Aufnahmen aus geschlepptem Motorbetrieb bei 86 °KW v.ZOT auf DS und GDS (links). Lateral gemittelte Profilschnitte im Bereich des Kolbenhemds (rechts).

Die Ölverteilung entspricht der aus Abbildung 4-12, d.h. mit geringen LIF-Intensitäten im Kolbenbereich oberhalb der Ölnut und auf der Zylinderwand oberhalb des Kolbens. Hohe LIF-Intensitäten werden in Bereichen mit großen Ölvolumina (Ölnut und unterhalb des Kolbenhemds) detektiert. Die Farbskalierung ist auf den Bereich des Kolbenhemds angepasst, weshalb der Bereich unterhalb des Kolbens weiß (oberhalb der Farbskala) erscheint.

Der DS-Profilschnitt (grün) ist zunächst durch einen deutlichen Signalabfall gekennzeichnet. Im weiteren Verlauf steigt die Kurve auf einem niedrigeren Signalniveau zur Kurvenmitte an und fällt zum Kurvenende ab. Im rechten Randbereich steigt das Signal wieder sprunghaft an. Bei der Betrachtung der LIF-Aufnahme (links) kann der Kurvenverlauf anhand der Ölverteilung im Kolbenhemdbereich erklärt werden. Die sprunghaften Signalverläufe in den Randbereichen resultieren aus den Übergängen von graphithaltiger Beschichtung zum Aluminium-Grundmaterial. Hierdurch steigt einerseits die Ölfilmstärke durch die größere Abweichung von der Zylinderform (Vgl. Abbildung 4-20), andererseits führt der Aluminiumhintergrund zu einer Erhöhung der LIF-Intensität (Vgl. Abbildung 4-10). Der Kurvenverlauf im Bereich der graphithaltigen Beschichtung ist durch die inhomogene

Ölverteilung geprägt. Der Spalt zwischen Kolbenhemd und Zylinderwand ist im mittleren Hemdbereich vollständig mit Öl gefüllt, woraus die größte LIF-Intensität im mittleren Hemdbereich resultiert. Die unvollständige Spaltfüllung führt zu einem Signalabfall in Richtung der Randbereiche des Kolbenhemds.

Auf der GDS (blaue Kurve) sind ebenfalls sprunghafte Signalanstiege durch den Aluminium-Hintergrund in den Randbereichen zu erkennen. Im Bereich der graphithaltigen Beschichtung ist die LIF-Intensität aufgrund kleinerer Schichtdicken und geringerem Reflexionsgrad des Hintergrunds geringer. In der LIF-GDS-Aufnahme (links) ist ein geschlossener Ölfilm im Bereich des Kolbenhemds erkennbar. Hieraus resultiert der ballige Verlauf der blauen Kurve, der die Kontur des Kolbenhemds (Vgl. Abbildung 4-20) abbildet.

Zur Kalibrierung auf der DS wurde die Kolbenposition 43 °KW n.ZOT (Expansionstakt) gewählt. Die LIF-Aufnahmen auf DS und GDS, sowie die resultierenden Profilschnitte sind in Abbildung 4-22 dargestellt.

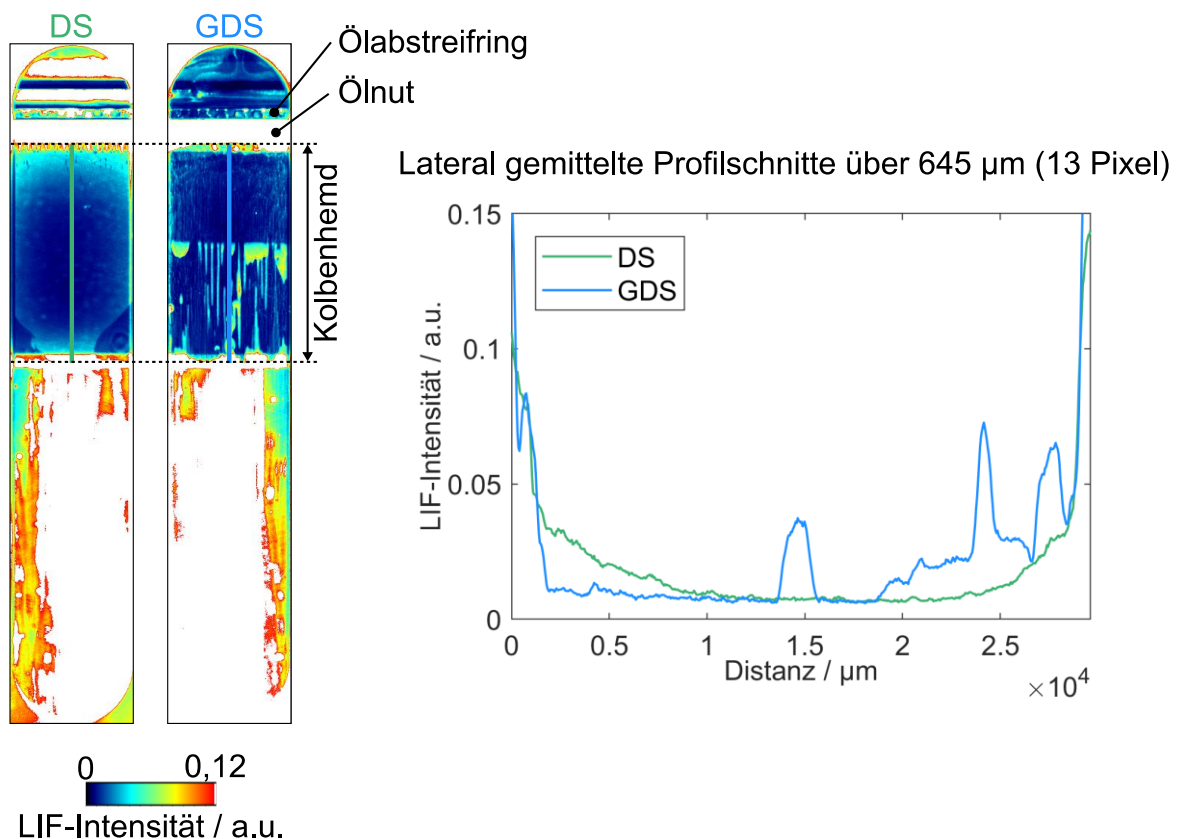


Abbildung 4-22: LIF-Aufnahmen aus geschlepptem Motorbetrieb bei 43 °KW n.ZOT auf DS und GDS (links). Lateral gemittelte Profilschnitte im Bereich des Kolbenhemds (rechts).

In den Randbereichen beider Kurvenverläufe steigt das Signal durch den Aluminium-Hintergrund sprunghaft an. Das DS-Profil bildet die Hemdkontur aufgrund der

homogenen Ölverteilung und vollständigen Spaltfüllung ab. Auf der GDS führt die geringe Ölmenge über große Bereiche des Kolbenhemds zu einem flachen Signalverlauf auf niedrigem Niveau und vereinzelte Ölsammlungen führen zu einzelnen Signalpeaks.

Im Expansionstakt (43 °KW n.ZOT) liegt der Kolben auf der DS an, woraus eine homogene Ölverteilung im Kontakt Kolbenhemd/Zylinderlaufbahn resultiert. Die Bedingung eines vollgefüllten Spalts wurde auf der GDS im Kompressionstakt (86 °KW v.ZOT) gefunden. Allerdings unterliegt die Bedingung eines vollgefüllten Spalts zyklischen Schwankungen. Abbildung 4-23 zeigt die LIF-Aufnahmen und die resultierenden Kurvenverläufe der Profilschnitte im Bereich der Kolbenhemdbeschichtung zweier aufeinanderfolgender Zyklen auf der GDS bei 86 °KW v.ZOT.

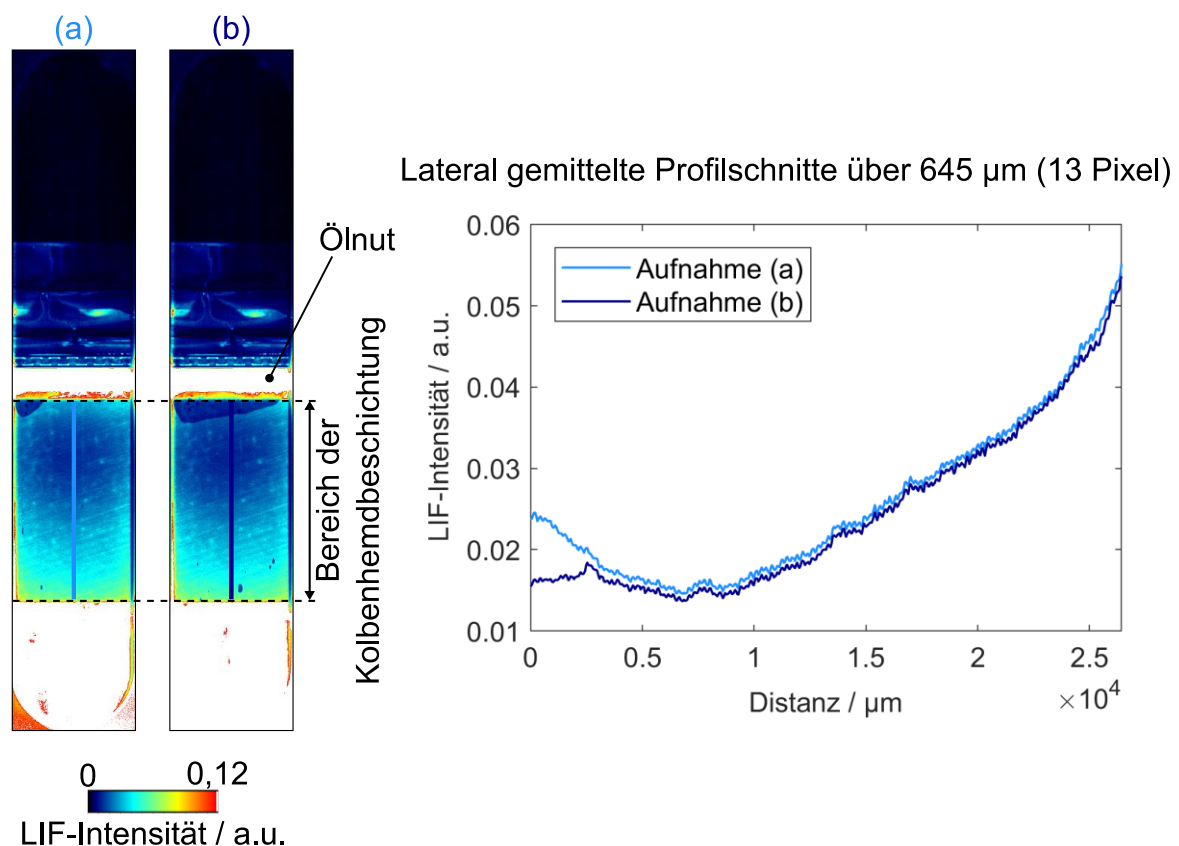


Abbildung 4-23: LIF-Aufnahmen aus geschlepptem Motorbetrieb bei 86 °KW v.ZOT. Links: Vollständig (a) und unvollständig (b) gefüllter Spalt zwischen Kolbenhemd und Zylinderwand. Rechts: Im Bereich der Kolbenhemdbeschichtung lateral gemittelte Profilschnitte von (a) und (b).

Bei der Betrachtung der LIF-Aufnahme ist zu erkennen, dass der Ölfilm im Bereich der Kolbenhemdbeschichtung in Aufnahme (b) im Vergleich zu Aufnahme (a) nicht vollständig geschlossen ist. Die inhomogene Ölverteilung in (b) führt zu einem Signalabfall am Kurvenanfang (rechtes Diagramm). Während die Kolbenhemdkontur

von Aufnahme (b) somit nicht vollständig abgebildet wird, führt eine homogene Ölverteilung in (a) zum erwarteten Kurvenverlauf.

### Affintransformation zur Bestimmung des Kalibrierfaktors

Zur in situ Kalibrierung wurden die LIF-Aufnahmen ausgewählt, bei denen der Spalt zwischen Zylinderwand und Kolbenhemd mit Öl gefüllt ist und somit die Kolbenhemdkontur vollständig durch den LIF-Signalverlauf abgebildet wird. In Abbildung 4-24 sind die Profilschnitte einer Serie von LIF-Aufnahmen auf GDS (86 °KW v.ZOT, T = 110 °C) und DS (43 °KW n.ZOT, T = 50 °C) der jeweils durch Konfokalmikroskopie vermessenen Kolbenhemdkontur gegenübergestellt.

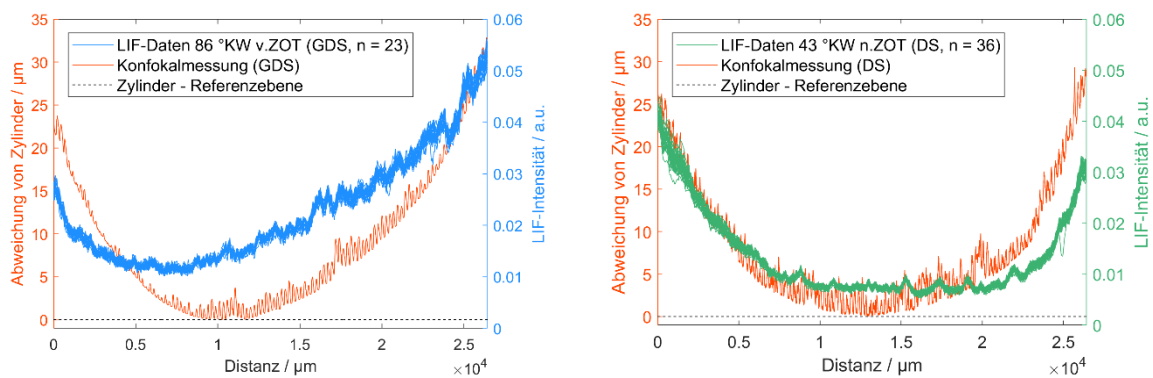


Abbildung 4-24: Kolbenhemdkontur gemessen mit LIF-Messsystem (LIF-Daten) und Konfokalmikroskopie (Konfokalmessung) auf GDS (links) und DS (rechts).

In beiden Diagrammen ist das Kolbenhemdprofil mit Merkmalen auf unterschiedlichen Größenskalen (Vgl. Abbildung 4-20) anhand der Konfokalmessung erkennbar. Die Kolbenhemdkontur wird auch durch die Kurvenverläufe der LIF-Aufnahmen reproduzierbar abgebildet, wobei neben der Balligkeit auch höhere Frequenzen im Signalverlauf erkennbar sind.

Die Tal- und Spitzenlänge der Rauheit der Beschichtung liegt unterhalb von 10 µm und kann durch das LIF-Messsystem aufgrund des begrenzten räumlichen Auflösungsvermögens (projizierte Pixelgröße ca. 50 µm/Pixel) nicht abgebildet werden. Die Welligkeit des Kolbenhemds mit Tallängen > 50 µm kann auch vom LIF-Messsystem detektiert werden, allerdings gibt das LIF-Signal die Ölfilmstärke im Spalt, der sich aus der Oberfläche des Kolbenhemds und der Oberfläche des Saphirfensters zusammensetzt, wieder. Der LIF-Signalverlauf, der aus der Welligkeit des Kolbenhemds zu erwarten ist, wird demnach durch die Welligkeit des Saphirfensters mit gleicher Größenordnung (Vgl. Abbildung 3-3) überlagert. Da die unterschiedlichen Welligkeiten von Saphir und Kolbenhemd nicht separiert werden können, ist die

eindeutige Zuordnung der Welligkeit aus der Konfokalmessung zur Welligkeit des LIF-Signalverlaufs nicht möglich. Somit eignen sich weder Rauheit noch Welligkeit zur Kalibrierung, stattdessen erfolgt die Kalibrierung anhand der globalen Verläufe, die Informationen über die Makrokontur des Kolbenhemds beinhalten. Die Zylinderform wird hingegen nicht berücksichtigt, da der Zylinder näherungsweise eine ideale Zylinderform aufweist (Vgl. Abbildung 3-4).

Die Makrokonturen der Kurvenverläufe aus LIF- und Konfokalmessung weichen hinsichtlich Skalierung, Translation und Rotation voneinander ab. Die Verkippung und Verschiebung des LIF-Verlaufs sind abhängig von der Kolbensekundärbewegung, die des Konfokal-Verlaufs von der Einbaulage des Kolbens im Konfokalmikroskop. Insgesamt resultiert die Lagebeziehung in einer relativen Translation und Rotation zwischen beiden Kurvenverläufen. Der Maßstabsfaktor zur Überführung der LIF-Skala in die Konfokal-Skala entspricht dem zur Kalibrierung der LIF-Aufnahmen erforderlichen Skalierungsfaktor  $c_{kal}$ .

Die Überführung des LIF-Verlaufs in den Kurvenverlauf der Konfokalmessung erfolgt durch eine affine Koordinatentransformation [96, 97] jeweils auf DS und GDS. Durch eine Affintransformation, oder 6-Parameter Transformation wird das Punktfeld eines Ausgangssystems (LIF-Messung:  $x_l, y_l$ ) mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate in ein Zielkoordinatensystem (Konfokal-Messung:  $X_l, Y_l$ ) überführt. Hierbei werden folgende geometrische Operationen durchgeführt:

- Translation (x-Richtung:  $X_0$ , y-Richtung:  $Y_0$ )
- Rotation (x-Achse:  $\alpha_x$ , y-Achse:  $\alpha_y$ )
- Skalierung (x-Richtung:  $m_x$ , y-Richtung:  $m_y$ )

Aus den sechs Transformationsparametern ergeben sich die Grundgleichungen des Modells:

$$X_l = X_0 + m_x \cdot \cos(\alpha_x) \cdot x_l - m_y \cdot \sin(\alpha_y) \cdot y_l \quad (\text{Gleichung 4.6})$$

$$Y_l = Y_0 + m_x \cdot \sin(\alpha_x) \cdot x_l + m_y \cdot \cos(\alpha_y) \cdot y_l \quad (\text{Gleichung 4.7})$$

Zur Modellbildung ist eine diskrete Datenbasis erforderlich und die LIF- und Konfokal-Kurvenverläufe werden jeweils durch ein Polynom vierten Grades angenähert. Beide Profilverläufe (Ausgangs- und Zielsystem) werden auf der gleichen x-Achse abgebildet. In erster Näherung wird die Translation der Abszisse zu Null ( $X_0 = 0$ ) und

die Skalierung zu Eins gesetzt ( $m_x = 1$ ). Entsprechend wird die Richtung der Ordinate in erster Näherung beibehalten ( $\alpha_y = 0$ ). Für kleine Winkel gilt außerdem  $\sin(\alpha_x) = \alpha_x$  und  $\cos(\alpha_x) = 1$ . Daraus ergeben sich folgende Grundgleichungen in vereinfachter Form:

$$X_1 = x_1 = x'_1 \quad (\text{Gleichung 4.8})$$

$$Y_1 = Y_0 + \alpha_x \cdot x_1 + m_y \cdot y_1 \quad (\text{Gleichung 4.9})$$

Die unbekanntenen Transformationsparameter  $m_y$ ,  $\alpha_x$ ,  $Y_0$  können mit Hilfe einer Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate berechnet werden:

$$\alpha_x = \frac{\sum_{l=1}^n \bar{y}_l^2 \cdot \sum_{l=1}^n \bar{x}'_l \bar{Y}_l - \sum_{l=1}^n \bar{x}'_l \bar{y}_l \cdot \sum_{l=1}^n \bar{y}_l \bar{Y}_l}{\sum_{l=1}^n \bar{x}'_l^2 \sum_{l=1}^n \bar{y}_l^2 - (\sum_{l=1}^n \bar{x}'_l \bar{y}_l)^2} \quad (\text{Gleichung 4.10})$$

$$m_y = \frac{\sum_{l=1}^n \bar{x}'_l^2 \cdot \sum_{l=1}^n \bar{y}_l \bar{Y}_l - \sum_{l=1}^n \bar{x}'_l \bar{y}_l \cdot \sum_{l=1}^n \bar{x}'_l \bar{Y}_l}{\sum_{l=1}^n \bar{x}'_l^2 \sum_{l=1}^n \bar{y}_l^2 - (\sum_{l=1}^n \bar{x}'_l \bar{y}_l)^2} \quad (\text{Gleichung 4.11})$$

$$Y_0 = Y_s - \alpha_x x'_s - m_y y_s \quad (\text{Gleichung 4.12})$$

mit

$$\bar{x}'_l = x'_l - x'_s \quad \text{mit} \quad x'_s = \frac{\sum_{l=1}^n x'_l}{n}$$

$$\bar{y}_l = y_l - y_s \quad \text{mit} \quad y_s = \frac{\sum_{l=1}^n y_l}{n}$$

$$\bar{Y}_l = Y_l - Y_s \quad \text{mit} \quad Y_s = \frac{\sum_{l=1}^n Y_l}{n}$$

Abbildung 4-25 zeigt die berechneten Parameter  $m_y$ ,  $\alpha_x$ ,  $Y_0$  zur Transformation der LIF-Datensätze aus Abbildung 4-24 für DS und GDS.



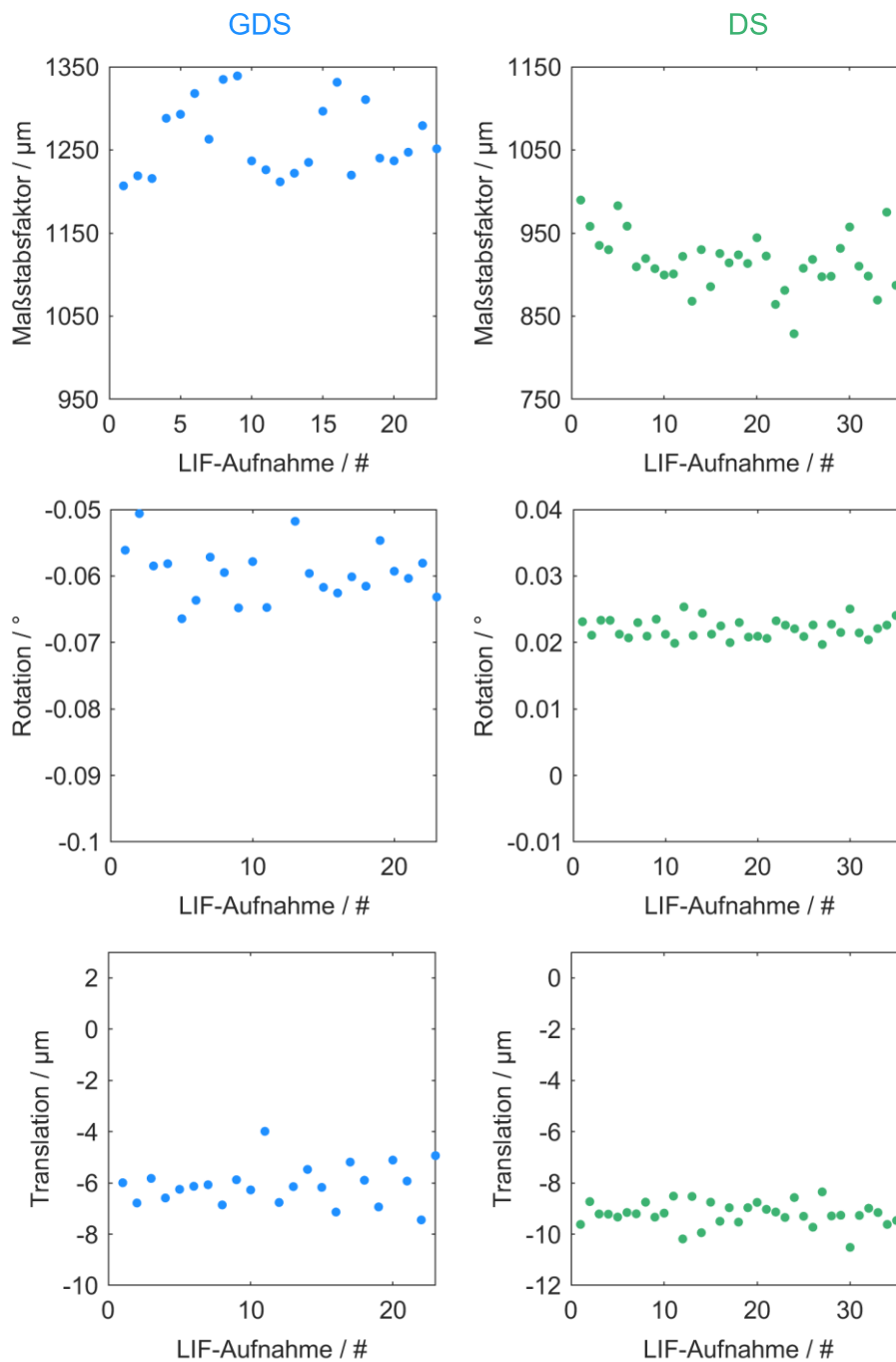


Abbildung 4-25: Transformationsparameter zur Überführung der LIF-Kurven in die Konfokal-Kurven auf GDS (links) und DS (rechts).

Die Maßstabsfaktoren sind auf der GDS höher als auf der DS. Die Rotation auf der GDS ist mathematisch negativ, die auf der DS mathematisch positiv, wobei die Winkel auf der GDS stärker streuen als auf der DS. Alle LIF-Kurven (DS und GDS) werden relativ zur Konfokal-Kurve in negative y-Richtung verschoben.

Die Rotationsrichtungen der LIF-Kurven gegenüber der Konfokal-Kurven sind in Abbildung 4-24 ersichtlich. Kolbensekundärbewegung und zyklische Schwankungen beeinflussen Verkippung und Translation der LIF-Kurven. Aufgrund der

Kolbenkinematik ist die Rotation der LIF-Kurve in Bezug auf die Zylinder-Referenzebene auf der GDS größer als auf der DS. Eine mögliche Ursache für die größere Streuung der GDS-Rotationsparameter sind größere zyklische Schwankungen während des Verdichtungstakts im Vergleich zur Expansion.

Das Ergebnis der Transformation der LIF-Kurven aus Abbildung 4-24 gemäß Gleichung 4.9 zeigt Abbildung 4-26.

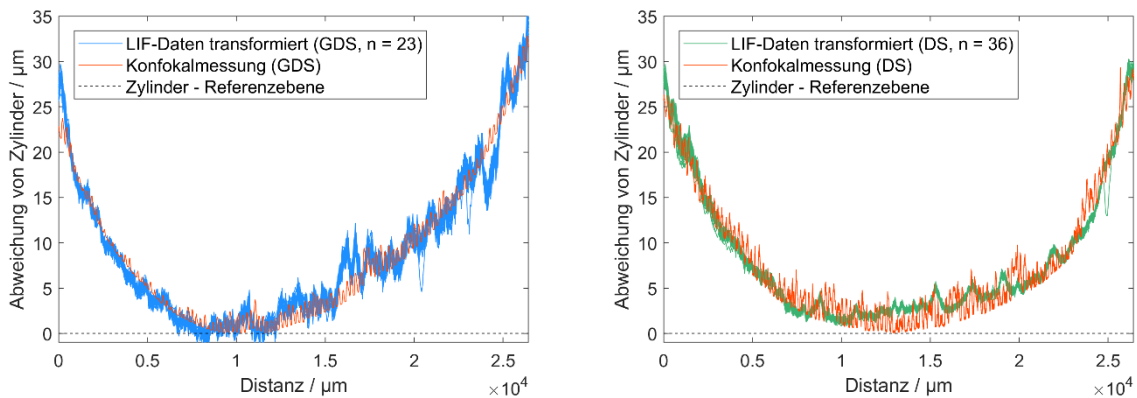


Abbildung 4-26: Konfokal-Kurven und transformierte LIF-Kurven auf GDS (oben) und DS (unten).

Die transformierten LIF-Kurven bilden die Balligkeit des Kolbenhemds auf DS und GDS ab. Die höheren Frequenzen in der LIF-Kurve weichen von denen der Konfokal-Kurve ab, da der LIF-Verlauf aus dem Spalt zwischen Fenster und Hemd resultiert und diese Merkmale nicht im Konfokal-Verlauf abgebildet sind. Die Affintransformation ist somit geeignet zur Bestimmung des in situ Kalibrierfaktors anhand der Makrokontur des Kolbenhemds. Auch eine simulierte Veränderung der Verkipfung und Translation der LIF-Kurven im Ausgangssystem hatte keine Auswirkungen auf den Maßstabsfaktor und den Verlauf der transformierten LIF-Kurven.

### Temperaturabhängigkeit des in situ Kalibrierfaktors

Wie in Abbildung 4-11 gezeigt wurde, ist die MFM-LIF temperaturabhängig. Im Folgenden wird daher der Einfluss der Öltemperatur auf das in situ Kalibrierverfahren untersucht. Hierzu wurde der Motor auf unterschiedliche Temperaturen konditioniert und die Transformationsparameter anhand der LIF-Messungen durch Affintransformation bestimmt. Die Translations- und Rotationsparameter beschreiben lediglich die relative Lage der LIF-Kurve zur Konfokal-Kurve und sind zur Ermittlung der Kalibrierfaktoren nicht relevant.

Abbildung 4-27 zeigt links die in situ Maßstabsfaktoren in Abhängigkeit der Temperatur auf DS (grün) und GDS (blau), sowie die durch lineare Regression ermittelten Ausgleichsgeraden. Das Diagramm beinhaltet auch die ex situ LIF-Daten aus Abbildung 4-11. Die ex situ Daten sind jeweils auf den Wert der in situ Messung bei  $T = 50\text{ °C}$  auf DS (Quadrate) und GDS (Rauten) normiert. Im Motorversuch wurde die Bedingung des vollgefüllten Spalts zwischen Kolbenhemd und Zylinderwand auf der GDS bei  $T = 70\text{ °C}$  nicht erfüllt und die LIF-Daten konnten nicht zur Kalibrierung verwendet werden. Die Öltemperatur im Kontakt Kolbenhemd/Zylinderlaufbahn ist unbekannt und muss abgeschätzt werden. Im rechten Teil der Abbildung ist die Kolbenhemdtemperatur aus einem befeuerten Motorversuch eines Vollmotors über der Laufzeit aufgetragen. Außerdem sind die Zeitpunkte von Messstart ( $t_1$ ) und –ende ( $t_2$ ), wie sie innerhalb der LIF-Messung am optischen Einzylindermotor gesetzt sind, dargestellt.

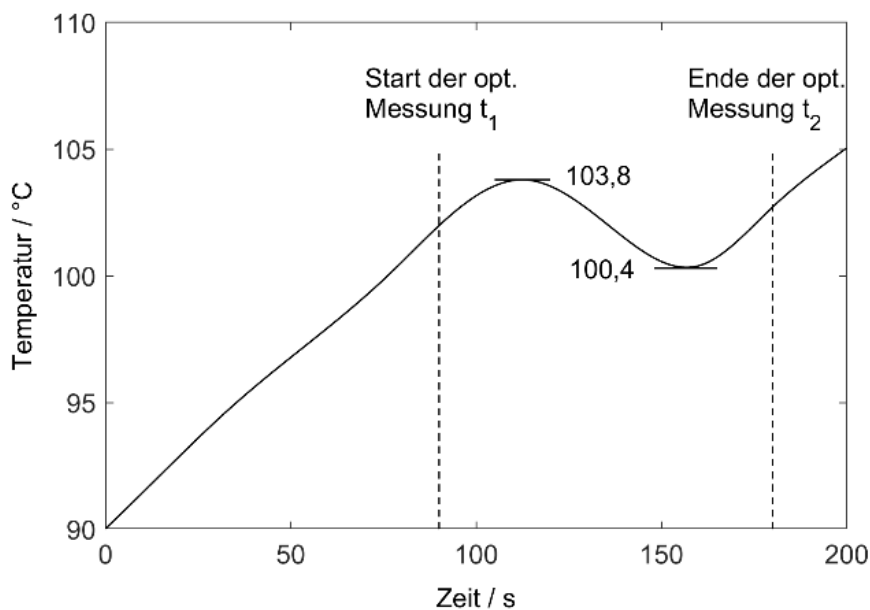
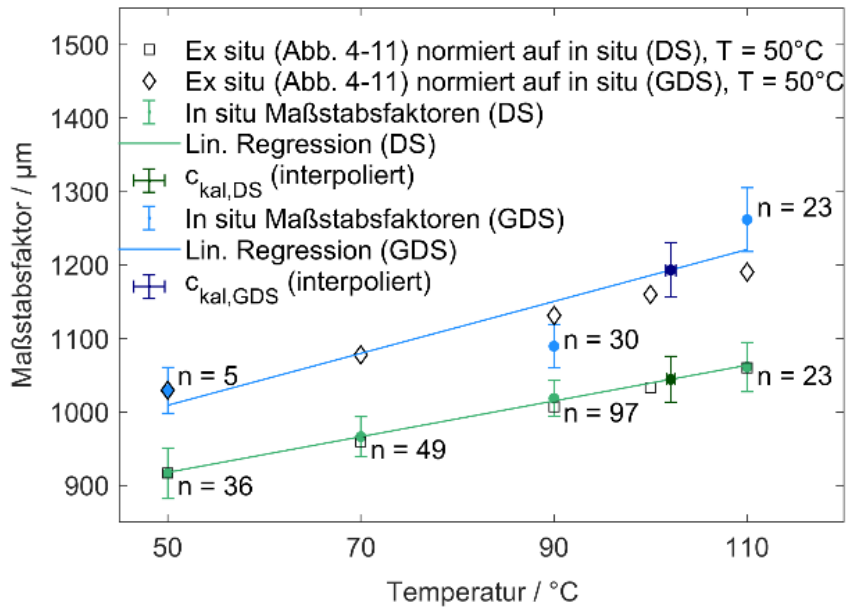


Abbildung 4-27: Links: Temperaturabhängigkeit der in situ Maßstabsfaktoren mit Ausgleichsgeraden auf DS (grün) und GDS (blau). Interpolierte Maßstabsfaktoren auf DS (dunkelgrün) und GDS (dunkelblau). Ex situ Temperaturabhängigkeit der MFM-LIF aus Abbildung 4-11 normiert auf den in situ Wert bei  $T = 50\text{ °C}$  auf DS (Quadrate) und GDS (Rauten). Rechts: Temperaturverlauf im Bereich des Kolbenhemds während des befeuerten Motorlaufs eines Vollmotors ( $p_{mi} = 7\text{ bar}$ ,  $n = 1600\text{ min}^{-1}$ , Kolbenspritze an) [82]. Zeitpunkte  $t_1$  und  $t_2$  entsprechen Messstart bzw. -ende während der LIF-Messung am optischen Einzylindermotor.

Die in situ Kalibrierfaktoren nehmen auf DS und GDS mit steigender Temperatur zu, wobei das Gesamtniveau auf der GDS höher ist als auf der DS. Der Anstieg der Kalibrierfaktoren deckt sich auf DS und GDS mit den Erkenntnissen aus Abbildung 4-11. Allerdings ist die Übereinstimmung der ex situ mit den in situ Daten auf der DS größer als auf der GDS. Unter der Annahme, dass die Messwerte einer

Normalverteilung folgen, beträgt die mittlere, relative Standardabweichung dividiert durch den Mittelwert für die Messwerte auf der DS  $\sigma_{DS,MW}/\mu_{DS} = 3 \%$  und auf der GDS  $\sigma_{GDS,MW}/\mu_{GDS} = 3,1 \%$ .

Der rechte Teil der Abbildung zeigt den Temperaturverlauf im Bereich des Kolbenhemds während des befeuerten Motorlaufs eines Vollmotors ( $p_{mi} = 7 \text{ bar}$ ,  $n = 1600 \text{ min}^{-1}$ , Kolbenspritze an). Am Versuchsanfang entspricht die Ausgangstemperatur des Kolbenhemds der Motoröl- und Kühlwassertemperatur im geschleppten Betrieb ( $T = 90 \text{ °C}$ ). Im befeuerten Betrieb steigt die Kolbenhemdtemperatur an. Die Hemdtemperatur beträgt im Zeitpunkt  $t_1$   $102 \text{ °C}$ . Im weiteren Verlauf wird die im Messzeitraum maximale gemessene Hemdtemperatur  $T_{max} = 103,8 \text{ °C}$  nach  $110 \text{ sec}$  erreicht. Danach sinkt die Temperatur nach  $155 \text{ sec}$  auf  $T = 100,4 \text{ °C}$ . Im Zeitpunkt  $t_2 = 180 \text{ sec}$  beträgt die Temperatur  $102,7 \text{ °C}$ .

Die Kolbenhemdtemperatur im Vollmotor beträgt während der Messdauer der optischen Messung  $100,4\text{-}103,8 \text{ °C}$ . Unter der Annahme, dass die Öltemperatur im Bereich des Kolbenhemds der Kolbenhemdtemperatur entspricht, wird für die Ermittlung des Kalibrierfaktors ein Temperaturbereich des Motoröls von  $102,1 \pm 1,7 \text{ °C}$  angenommen. Anhand der Ausgleichsgeraden im linken Diagramm ergeben sich durch Interpolation bei  $T = 102,1 \text{ °C}$  und der mittleren Abweichung vom jeweiligen Mittelwert in y-Richtung (DS:  $3 \%$ ; GDS:  $3,1 \%$ ) die Kalibrierfaktoren  $c_{kal,DS} = 1044,5 \pm 31,3 \text{ }\mu\text{m}$  und  $c_{kal,GDS} = 1193,3 \pm 37 \text{ }\mu\text{m}$ . Die Temperaturungenauigkeit von  $\pm 1,7 \text{ °C}$  ergibt eine zusätzliche relative Abweichung des Kalibrierfaktors in x-Richtung auf DS von  $\pm 0,4 \%$  und GDS von  $\pm 0,5 \%$ .

### **4.2.3 Abschätzung der Messgenauigkeit**

Bei der Quantifizierung der Ölfilmdicke im Bereich des Kolbenhemds beeinflussen die verschiedenen Elemente des Messsystems und die Prozessschritte der Bildverarbeitung die Messgenauigkeit.

#### **Dunkelbild- und Hintergrundkorrektur**

Im ersten Bildverarbeitungs-Prozessschritt wurde das Ensemblemittel aus 150 Dunkelbildern mit ausgeschaltetem Laser und abgedecktem Objektiv von der LIF-Einzelaufnahme subtrahiert (Vgl. Abbildung 4-13 und Abbildung 4-18). Hierdurch werden Reflektionen und Fluoreszenz der Kolbenhemdbeschichtung und des optischen Zugangs bei eingeschaltetem Laser und offenem Objektiv nicht

berücksichtigt. Aufgrund der Hubbewegung des Kolbens ist für jede Kolbenposition eine Hintergrundaufnahme des Messbereichs in Abwesenheit von Öl mit eingeschaltetem Laser und offenem Objektiv erforderlich. Im optischen Einzylinderaggregat ist dieses Vorgehen nicht praktikabel, weshalb diese Messung lediglich für eine Kolbenposition durchgeführt wurde. Die skalare Größe aus der räumlichen Mittelung der Signalintensität im Bereich des Kolbenhemds wird zusätzlich von jeder LIF-Aufnahme abgezogen, wodurch das Hintergrundsignal bei allen Kolbenpositionen berücksichtigt wird.

### Flachfeldkorrektur

Zur Flachfeldkorrektur wurde die hintergrundkorrigierte LIF-Aufnahme durch das Ensemblemittel des Flachfelds dividiert. In Abbildung 4-15 wurden im oberen und unteren Fensterbereich lokale Signalerhöhungen (LIF-Spots) detektiert. Zur Untersuchung der LIF-Spots im oberen und unteren Messbereich wurde der Einfluss der Reflektion des metallischen Fensterhalters untersucht. Abbildung 4-28 zeigt die dunkelbildkorrigierten Ensemblemittel verschiedener Flachfelder. Beim mittig abgebildeten Flachfeld (2) ist der Fensterhalter mit schwarzem Klebeband abgedeckt, um die Reflexion des Metalls zu unterbinden. Links ist ein reguläres Flachfeld mit nicht abgedecktem Fensterhalter (1), rechts die Differenz der beiden Bilder (3) dargestellt.

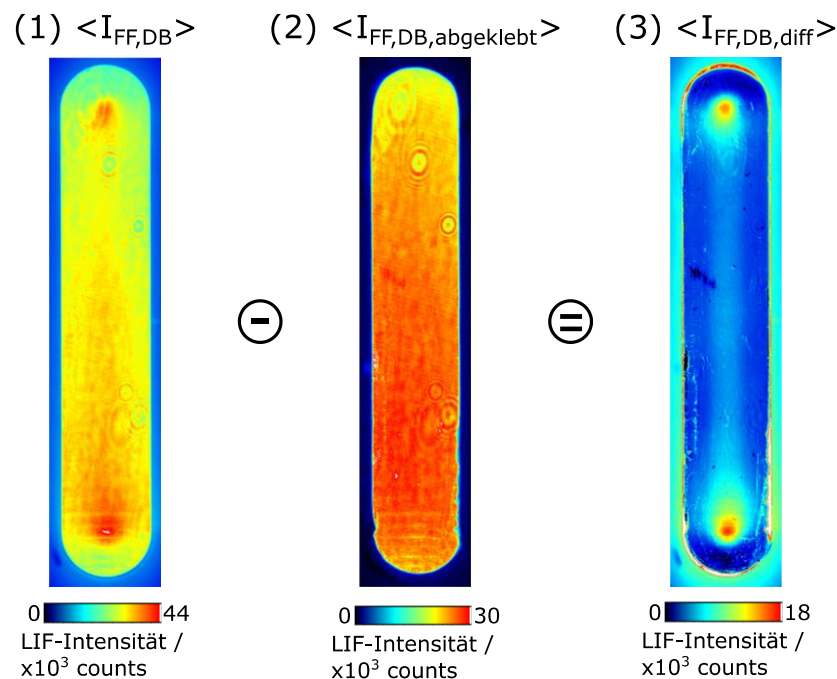


Abbildung 4-28: (1) Ensemblemittel aus dunkelbildkorrigierten Flachfeld-Aufnahmen, (2) Ensemblemittel aus dunkelbildkorrigierten Flachfeld-Aufnahmen mit abgedecktem Fensterhalter, (3) Differenz aus (1) und (2).

In (1) sind wie in Abbildung 4-15 lokal erhöhte Signalstärken im oberen und unteren Bereich des Flachfelds (LIF-Spots) sichtbar. In (2) ist die Intensitätsverteilung homogen über den Messbereich verteilt, im oberen Fensterbereich nimmt das Signal ab. Die Differenz der beiden Flachfelder (3) verdeutlicht die Unterschiede in der Intensitätsverteilung. Neben den LIF-Spots wird auch die in Abbildung 4-15 sichtbare Signalerhöhung zur Fenstermitte zwischen den LIF-Spots deutlich. Die Reflexion des konischen Fensterhalters führt zu einer lokal erhöhten Fluenz und somit zu einer höheren LIF-Intensität. Die Inhomogenität in der Laserintensitätsverteilung wird hauptsächlich durch den optischen Zugang selbst verursacht.

Die Flachfeldkorrektur der hintergrundkorrigierten LIF-Aufnahme aus dem Motorversuch führt zu Abbildung 4-29. Links ist die LIF-Aufnahme im Bereich des Kolbenhemds vor und rechts nach der Flachfeldkorrektur dargestellt.

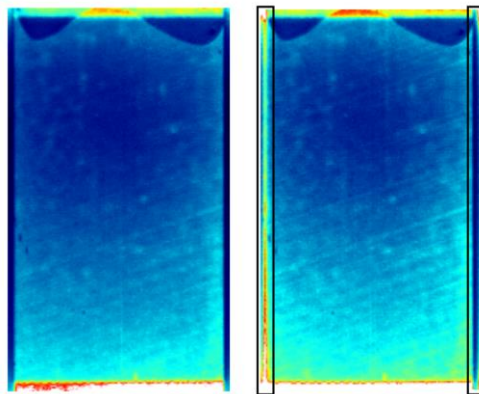


Abbildung 4-29: Dunkelbildkorrigierte LIF-Aufnahme im Bereich des Kolbenhemds vor (links) und nach der Flachfeldkorrektur (rechts).

Die Flachfeldkorrektur führt innerhalb der schwarzen Markierung zu einer streifenförmigen Signalerhöhung im linken Hemdbereich. Diese Erhöhung resultiert aus der Relativbewegung des optischen Zugangs zum Detektionspfad während des Motorversuchs. Da die Flachfeldaufnahme im Motorstillstand aufgenommen wird, ist die LIF-Aufnahme aus dem Motorversuch relativ zum Flachfeld verschoben. Die Randbereiche werden bei der Quantifizierung nicht berücksichtigt. Allerdings wird durch die relative Verschiebung des Flachfelds zur LIF-Aufnahme im Motorversuch und die Reflektion des Fensterhalters (Vgl. Abbildung 4-28) auch im mittleren Fensterbereich eine Unsicherheit induziert. Zur Bewertung dieser Ungenauigkeit wurde das Flachfeld (Aufnahme 1 in Abbildung 4-28) künstlich um 15 Pixel verschoben, was der Verschiebung der Flachfeldaufnahme zur LIF-Aufnahme aus

dem Motorversuch entspricht und durch das ursprüngliche Flachfeld dividiert. Das Ergebnis zeigt Abbildung 4-30.

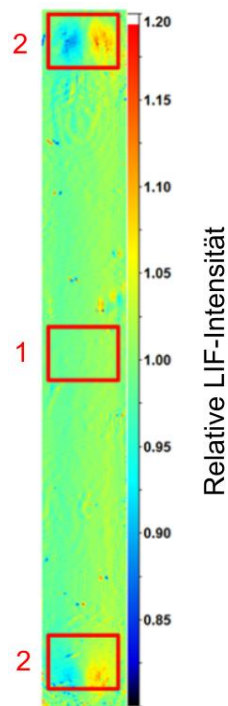


Abbildung 4-30: Künstlich verschobenes Flachfeld dividiert durch ursprüngliches Flachfeld.

In Bereich 1 ist die Abweichung des verschobenen Flachfelds vom ursprünglichen Flachfeld gering. In Aufnahme 3 aus Abbildung 4-28 ist ersichtlich, dass aus der Reflektion in der Fenstermitte nur geringe Intensitätserhöhungen resultieren. Das räumliche Mittel der relativen Standardabweichung in Bereich 1 beträgt  $\sigma_{1,\text{Verschiebung}} = 1,2\%$ . Im Bereich 2 resultiert aus der lokalen Intensitätserhöhung aufgrund von Reflexionen (Vgl. LIF-Spots in Abbildung 4-28) eine größere Unsicherheit. Das räumliche Mittel der relativen Standardabweichung in Bereich 2 beträgt  $\sigma_{2,\text{Verschiebung}} = 5,5\%$ .

### Kamera und Laser

Neben der Schwankung der räumlich gemittelten Laserenergie, die durch die Pulskorrektur (Vgl. Abbildung 4-17) korrigiert wird, kann das Laserstrahlprofil von Schuss-zu-Schuss über den Messbereich variieren und durch die Strahlaufweitung lokale Unterschiede in der Bestrahlungsintensität verursachen. Abbildung 4-31 zeigt die Ensemble-Standardabweichung der 300 pulskorrigierten Flachfeld-Aufnahmen auf DS und GDS dividiert durch das jeweilige Ensemblemittel dieser Bilderserie (Vgl. Abbildung 4-15). Neben der Berücksichtigung der Variation des Anregungslichts



werden bei dieser Betrachtung auch Variationen in der Signalübertragung und Digitalisierung jedes Pixels des Bildsensors berücksichtigt.

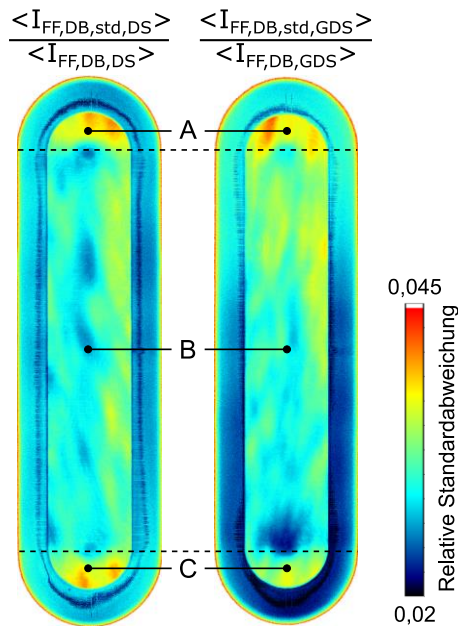


Abbildung 4-31: Relative Standardabweichung jedes Pixels bezogen auf das Ensemblemittel des Flachfelds auf DS (links) und GDS (rechts).

Auf DS und GDS liegen die größten relativen Standardabweichungen in den Randbereichen des Messbereichs. Die Einteilung in die Bereiche A-C führt zu folgenden relativen Abweichungen auf DS und GDS.

Tabelle 4-2: Räumlich gemittelte, relative Standardabweichung der LIF-Intensität in drei Fensterbereichen auf DS und GDS angegeben in % vom Mittelwert.

Bereich	$\sigma_{rel,avg,DS}$	$\sigma_{rel,max,DS}$	$\sigma_{rel,avg,GDS}$	$\sigma_{rel,max,GDS}$
A	3,73	4,21	3,73	4,29
B	3,04	3,76	3,1	4,21
C	3,64	4,17	3,27	3,84

Die maximalen relativen Standardabweichungen liegen auf DS und GDS nur geringfügig über den mittleren relativen Standardabweichungen. Außerdem sind die Unterschiede in den Bereichen A-C ebenfalls gering. Als Abweichung wird auf DS und GDS die mittlere relative Standardabweichung über die Bereiche A-C gemittelt, woraus  $\sigma_{DS,var} = 3,5 \%$  und  $\sigma_{GDS,var} = 3,4 \%$  resultieren.

### In situ Kalibrierung

Um die Verformung des Kolbenhemds zu minimieren, wurde zur in situ Kalibrierung ein Betriebspunkt mit niedrigen Gas- und Massenkräften ausgewählt. Die thermische

Deformation des Kolbenhemds im geschleppten Betrieb entspricht einer gleichmäßigen Ausdehnung, wodurch die Balligkeit des Kolbenhemds näherungsweise unverändert bleibt. Die Seitenkraft auf der GDS ist bei -86 °KW v.ZOT aufgrund der niedrigen Gaskraft gering [5], weshalb die mechanische Deformation des Kolbenhemds auf der GDS als vernachlässigbar klein eingeschätzt wird. Die Kalibrierung auf der DS erfolgt hingegen im Expansionstakt bei höherer Gaskraft. Hierdurch ist auch die Seitenkraft größer und die mechanische Deformation kann die Kolbenhemdform beeinflussen. Die Kontur im Motorversuch weicht dann von der durch das Konfokalmikroskop ermittelten Form ab. Durch die Polynomisierung des LIF-Verlaufs im Rahmen der Affintransformation wird der Einfluss der Deformation auf den Maßstabsfaktor als gering eingeschätzt. Im Rahmen dieser Arbeit wird bei der Fehlerabschätzung auf die Berücksichtigung einer möglichen Deformation verzichtet.

Bei der Ermittlung der Kalibrierfaktoren wurden in Abbildung 4-27 die Unsicherheiten des Interpolationspunktes (y-Richtung) mit  $\sigma_{DS,kal} = 3 \%$  und  $\sigma_{GDS,kal} = 3,1 \%$  bestimmt. Die Unsicherheit aus der Bestimmung der Öltemperatur (x-Richtung) beträgt  $\sigma_{DS,T} = 0,4 \%$  und  $\sigma_{GDS,T} = 0,5 \%$ .

### **Gesamtunsicherheit**

Die Unsicherheiten aus Abbildung 4-30 und Abbildung 4-31 können nicht als statistisch unabhängig betrachtet werden. Im Folgenden werden daher nur die Unsicherheiten aus Abbildung 4-31 berücksichtigt, da insbesondere der mittlere Fensterbereich von Interesse ist. In diesem Messbereich sind die Unsicherheiten aus Abbildung 4-31 größer als die aus Abbildung 4-30 und werden daher im Folgenden berücksichtigt. Unter der Annahme unabhängiger, normalverteilter Unsicherheiten ergeben sich aus der Fehlerfortpflanzung für die DS und GDS folgende Gesamtunsicherheiten:

$$\sigma_{gesamt,avg,DS} = \sqrt{\sigma_{DS,var}^2 + \sigma_{DS,kal}^2 + \sigma_{DS,T}^2} = 4,6 \% \quad (\text{Gleichung 4.13})$$

$$\sigma_{gesamt,avg,GDS} = \sqrt{\sigma_{GDS,var}^2 + \sigma_{GDS,kal}^2 + \sigma_{GDS,T}^2} = 4,6 \% \quad (\text{Gleichung 4.14})$$

Die Aufnahme der LIF-Bilder, die Bestimmung der Flachfelder, sowie der Kalibrierprozess wurden auf DS und GDS unabhängig voneinander durchgeführt. Die Identifizierung einer gleichen Gesamtunsicherheit weist auf eine gute Präzision des Kalibrierprozesses hin. Wigger [4] identifiziert bei seinen Untersuchungen am

Tribometer eine Gesamtunsicherheit von 5,3 % mit dem gleichen LIF-Messsystem. Die höhere Unsicherheit ist auf die größere Einzelunsicherheit bei der Bestimmung des Kalibrierfaktors zurückzuführen.

### **4.3 Ölfilmdicke im Bereich des Kolbenhemds**

In diesem Abschnitt werden die Ölverteilung in der Kolbengruppe und die Kolbensekundärbewegung anhand eines befeuerten Arbeitsspiels untersucht. Dazu wird ein befeuerter Betriebspunkt mit  $n = 1300 \text{ min}^{-1}$ ,  $p_{mi} = 8,5 \text{ bar}$ ,  $T_{\text{Motoröl}} = T_{\text{Kühlwasser}} = 90 \text{ °C}$  und eingeschalteter Kolbenspritze betrachtet. Um stationäre Betriebsbedingungen zu gewährleisten, wurde der Motor vor Messbeginn 90 Sekunden beheizt. Die LIF-Aufnahmen wurden simultan auf DS und GDS aufgezeichnet und mit dem Prozess gemäß Abbildung 4-18 korrigiert. Die Ölfilmdicke wird im Bereich des Kolbenhemds auf einer Falschfarbenskala quantifiziert dargestellt, wenn der Spalt zwischen Kolbenhemd und Zylinderwand vollständig mit Öl gefüllt ist ( $0 \text{ }\mu\text{m} = \text{dunkelblau}$ ,  $100 \text{ }\mu\text{m} = \text{rot}$ ). In den anderen Bereichen der Kolbengruppe ist die Ölfilmdicke qualitativ mit einer logarithmierten schwarz-weiß-Skala dargestellt, um die große Dynamik der LIF-Intensitäten abzubilden. In Abbildung 4-32 und Abbildung 4-33 sind jeweils sechs LIF-Aufnahmen aus jedem Arbeitstakt auf DS und GDS dargestellt.

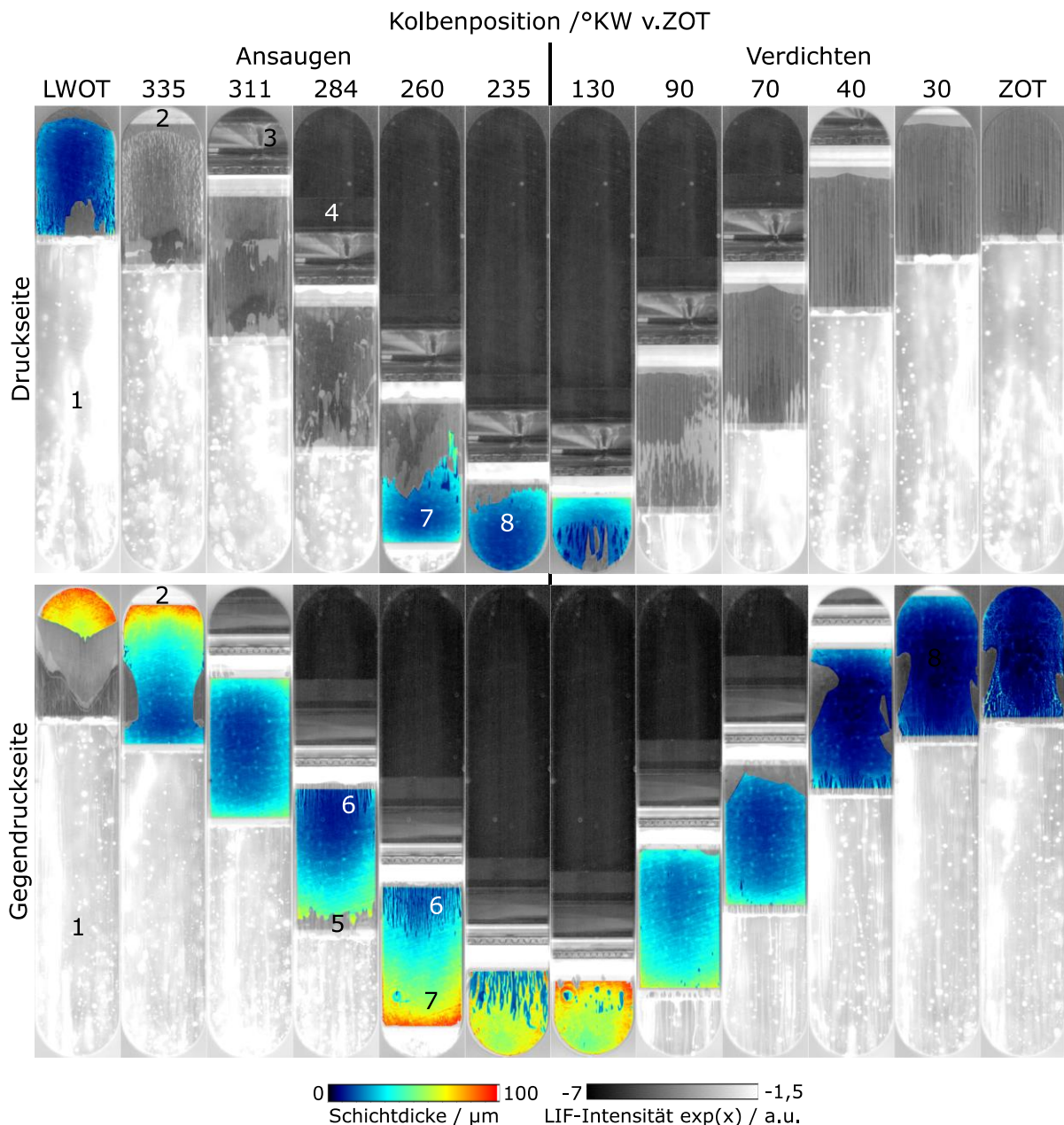


Abbildung 4-32: Simultane LIF-Aufnahmen auf DS (oben) und GDS (unten) während des Ansaug- und Verdichtungsstaktes im befeuerten Motorbetrieb ( $n = 1300 \text{ min}^{-1}$ ,  $\text{pmi} = 8,5 \text{ bar}$ ). Quantifizierte Schichtdicken im Bereich des Kolbenhemds werden mit Falschfarben-Skala abgebildet, sonstige LIF-Intensitäten mit logarithmierter schwarz-weiß-Skala. Die Diskussion der nummerierten Phänomene erfolgt im Text.

Zum Messbeginn befindet sich der Kolben im Ladungswechsel-OT (LWOT) und der Kolbenbereich unterhalb der Ölnut ist im Sichtbereich. Unterhalb des Kolbenhemds (1) erzeugen Ölverwirbelungen und die Kolbenspritze hohe Signalintensitäten. Das Kolbenhemd liegt an der DS an und die Ölfilmstärke im Spalt zwischen Kolbenhemd und Zylinderwand ist auf der DS niedriger als auf der GDS. Durch die Abwärtsbewegung des Kolbens während des Ansaugtakts wird bei 335 °KW v.ZOT eine hohe Signalintensität am oberen Fensterrand durch den Eintritt der Ölnut in den Sichtbereich hervorgerufen (2). Auf der DS ist eine verästelte Ölstruktur zu erkennen,

auf der GDS ist der Spalt über einen großen Bereich des Kolbenhemds vollständig mit Öl gefüllt. Hierbei ist die Ölfilmdicke im unteren Hemdbereich niedriger als im oberen Bereich. Die Kolbensekundärbewegung verursacht die Bewegung des Kolbenhemds von der DS in Richtung GDS. Hierdurch wird der geschlossene Ölfilm auf der DS aufgelöst und gleichzeitig auf der GDS aufgebaut. Bei 311 °KW v.ZOT sind alle Kolbenringe im Sichtbereich. Auf der DS ist der Ringstoß des zweiten Rings (3) zu erkennen. Hier verursachen Gasströmungen ein sanduhrförmiges Muster in der Ölverteilung auf dem 2. Ringsteg. Der Ölfilm im Hemdbereich auf der GDS ist vollständig geschlossen und die Ölfilmdicke im mittleren Hemdbereich aufgrund der Balligkeit niedriger als im oberen und unteren Bereich. Im Bereich des Feuerstegs ist die LIF-Intensität aufgrund folgender Ursachen gering (4): Einerseits ist wenig Öl vorhanden, da das Öl in diesem Bereich verdampft und verbrennt, sowie durch Blowby-Gas aufgrund des hohen Brennraumdrucks in Richtung Kurbelgehäuse transportiert wird. Andererseits führt die Verbrennung zu hohen Temperaturen im Feuerstegbereich, wodurch die Fluoreszenz des noch vorhandenen Öls schwächer ist. Bei der Abwärtsbewegung des Kolbens sind unterer (5) und oberer (6) Hemdbereich durch unvollständige Spaltfüllungen, bzw. durch einen Schmierfilmabriss gekennzeichnet. Dieser Schmierfilmabriss ist auf hohe Gleitgeschwindigkeiten zurückzuführen [4], die im mittleren Hubbereich auftreten. Bei 260 °KW ist die Ölfilmdicke im unteren Hemdbereich auf der GDS höher als auf der DS im entsprechenden Bereich (7). Dies ist auf eine Verkippung des Kolbens zurückzuführen, wodurch sich das Kolbenhemd im unteren Bereich von der GDS in Richtung DS bewegt und dort mit der Zylinderwand in Kontakt tritt. Bei 235° ist der Kontaktbereich Kolbenhemd/Zylinderlaufbahn auf der DS aufgrund der Kolbenkinematik in Richtung Ölnut verschoben (8). Aus der Betrachtung des Ansaugtakts geht hervor, dass das Öl auch während der Kolbenbewegung hauptsächlich auf dem Kolben und nicht auf der Zylinderwand haftet. Diese prinzipielle Ölverteilung in der Kolbengruppe konnte unter verschiedensten Betriebsbedingungen betätigt werden und ist auch in den folgenden Ausführungen ersichtlich.

Aufgrund der beschränkten Sichtbarkeit des Kolbens bei weiterer Abwärtsbewegung, zeigt die nächste Aufnahme den Kolben bereits bei 130 °v.ZOT. Die Ölfilmdicke auf der GDS ist weiterhin höher als auf der DS. Während der Aufwärtsbewegung des Kolbens ist der DS-Hemdbereich durch ein streifenförmiges Ölverteilungsmuster geprägt. Auf der GDS nimmt die Ölfilmdicke während der Verdichtung im mittleren

Hemdbereich von 130° bis ZOT ab. Aufgrund des zunehmenden Brennraumdrucks nimmt die Seitenkraft in Richtung GDS zu, wodurch die Ölfilmdicke kontinuierlich abnimmt. Der Ölfilm weist hierbei Inhomogenitäten in Form von unvollständiger Spaltfüllung und Schmierfilmaabrissen auf. In ZOT verursacht das Ablösen des Kolbens von der GDS ein verästeltes Muster im Ölfilm, ähnlich wie es im LWOT auf der DS auftritt. Im Folgenden werden Expansions- und Ausstoßtakt, die in Abbildung 4-33 dargestellt sind, diskutiert.

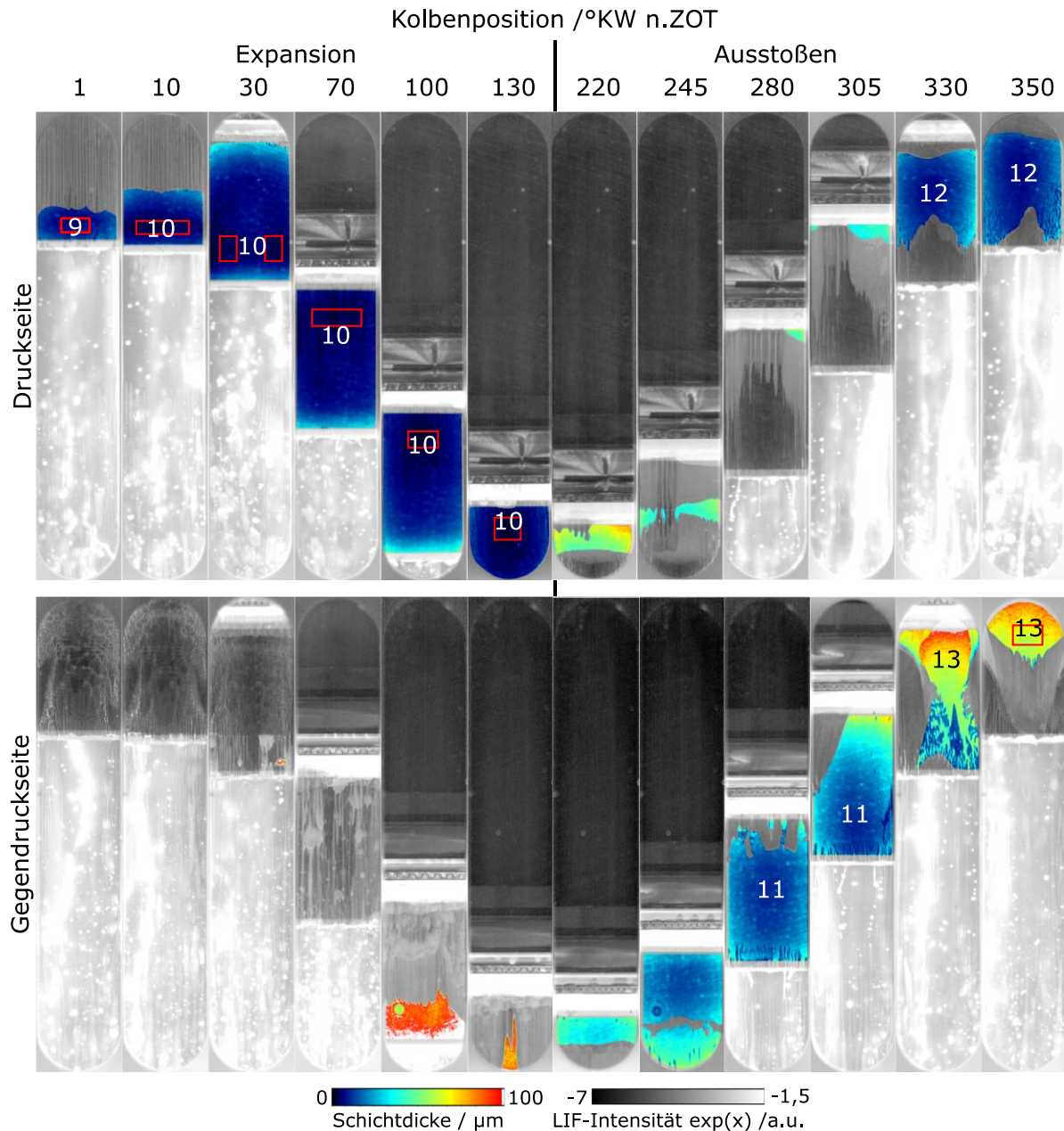


Abbildung 4-33: Simultane LIF-Aufnahmen auf DS (oben) und GDS (unten) während des Expansions- und Ausstoßtaktes im befeuerten Motorbetrieb ( $n = 1300 \text{ min}^{-1}$ ,  $\text{pmi} = 8,5 \text{ bar}$ ) mit Farbskalierung entsprechend Abbildung 4-32. Die Diskussion der nummerierten Phänomene erfolgt im Text.

Das Ölbenetzungsmuster durch Ablösen des Kolbenhemds ist auf der GDS bei den Kolbenpositionen 1-30° erkennbar. Gleichzeitig tritt das Kolbenhemd auf der DS in Kontakt mit der Zylinderwand (9). Die Größe des Kontaktbereichs nimmt während der Abwärtsbewegung des Kolbens zu, bis der Bereich des Kolbenhemds bei 30° eine homogene Ölverteilung aufweist. Diese Erkenntnisse decken sich mit denen von Zanghi et. al [76], die einen ähnlichen Schmierfilmaufbau auf der DS im Expansionstakt beobachten (Vgl. Abbildung 2-9). Die in Richtung DS wirkende Seitenkraft führt zu einer Sekundärbewegung des Kolbens von GDS in Richtung DS. Durch den Brennraumdruck führt die hohe Seitenkraft zu einer niedrigen Schmierfilmhöhe während des gesamten Expansionstakts. Dabei bewegt sich der Bereich der minimalen Ölfilmstärke (10, rotes Rechteck) während der Abwärtsbewegung in den oberen Hemdbereich. 1 °n.ZOT beträgt die mittlere Ölfilmstärke im rot markierten Bereich  $5,7 \pm 0,3 \mu\text{m}$  und 10 °n.ZOT  $3,8 \pm 0,2 \mu\text{m}$ . Bei 30 °n.ZOT liegt der Bereich der minimalen Filmhöhe in den Randbereichen und beträgt links  $4,3 \pm 0,2 \mu\text{m}$  und rechts  $4,4 \pm 0,2 \mu\text{m}$ . Bei 70 °KW n.ZOT ist der Bereich der minimalen Ölfilmstärke in den oberen Hemdbereich verschoben und die mittlere Filmhöhe beträgt  $3,0 \pm 0,1 \mu\text{m}$ . Die minimale Ölfilmstärke im Bereich des Kolbenhemds ist im Vergleich zu den anderen Arbeitstakten aufgrund der Seitenkraft während des gesamten Expansionstakts gering. Kato et. al [90] bestimmen die niedrigsten Filmhöhen im Bereich des Kolbenhemds ebenfalls während des Expansionstakts. Die niedrigsten Schichtdicken werden mit Werten unterhalb von  $5 \mu\text{m}$  quantifiziert. Baba et. al [87] und Inagaki et. al [71] bestimmen eine minimale Ölfilmstärke im Bereich des Kolbenhemds unterhalb von  $10 \mu\text{m}$  während der Expansion. Die in Abbildung 4-33 ermittelten Schmierfilmhöhen liegen somit im Bereich der Literaturwerte.

Während des Ausstoßtakts wird durch die Kolbensekundärbewegung ein weiterer Anlagewechsel des Kolbenhemds von der GDS (11) in Richtung DS (12) initiiert. Gegen Ende des Ausstoßtaktes werden hohe Ölfilmstärken im oberen Hemdbereich auf der GDS detektiert (13). Die mittlere Ölfilmstärke im Bereich des roten Rechtecks beträgt  $64,0 \pm 2,9 \mu\text{m}$ . Dieser Anstieg der Filmhöhe ist auf einen Öltransport von der Ölnut auf die Zylinderlaufbahn zurückzuführen. Während des Abbremsens des Kolbens gegen Ende des Kolbenhubs wirkt die Trägheitskraft auf das Öl in der Ölnut, wodurch das Öl relativ zum Kolben nach oben bewegt wird. Dort trifft das Öl auf den Ölabstreifring und wird an dessen Unterseite auf die Zylinderwand transportiert. Hierdurch ist der Spalt auf der GDS teilweise gefüllt, obwohl das Hemd auf der DS

anliegt (13). Dieser Öltransportvorgang führt zu relativ großen Ölfilmstärken im Hemdbereich auf der GDS während des Ansaugtakts (Vgl. Abbildung 4-32) und wurde von Thirouard [35] als „bridging“ bezeichnet. Weiterführende Untersuchungen zu last- und drehzahlabhängigen Ölfilmstärken im Bereich des Kolbenhemds sind in [83] dokumentiert.

#### **4.4 Ausblick und weitere Effekte in der Kolbengruppe**

Mit dem phasengekoppelten System kann die Ölverteilung innerhalb der Kolbengruppe und die Kolbensekundärbewegung zwischen Druck- und Gegendruckseite untersucht und die Ölfilmstärke im Kontaktbereich Kolbenhemd/Zylinderlaufbahn mit einer Unsicherheit von  $\pm 4,6\%$  quantifiziert werden. Das hochlastfähige Einzylinderaggregat ermöglicht Drehzahlen bis  $6000\text{ min}^{-1}$  und Lasten bis  $p_{mi} = 14\text{ bar}$ , wodurch Untersuchungen des Schmierungs Zustands in der Kolbengruppe über große Bereiche des Motorkennfelds möglich sind. Im Rahmen aktueller Forschungsprojekte werden experimentell ermittelte Daten mit den Ergebnissen vorhandener Simulationsmodelle [18] abgeglichen. Der Abgleich zwischen experimentell und simulativ ermittelten Daten ist nicht Bestandteil dieser Dissertation.

In Kapitel 2.2 wurde der Einfluss des Kolbenhemd designs auf die Reibungsverluste beschrieben. Mit dem LIF-Messsystem ist die systematische Untersuchung des Schmierungs Zustands unterschiedlicher Kolbenhemdformen und -beschichtungen möglich. Auch hier dienen die LIF-Daten der Verbesserung der Simulationsmodelle, um das Kolbenhemd design zukünftig simulativ auslegen zu können.

##### **Ausblick**

Eine Erweiterung des LIF-Messsystems ist die Untersuchung von Öl- und Bauteiltemperaturen im befeuerten Motorbetrieb. Einerseits führt die Kenntnis der Öltemperatur zur Verbesserung des in situ Kalibrierprozesses (Vgl. Kapitel 4.2.2) und liefert wichtige Erkenntnisse über die Viskosität und somit den Schmierungs Zustand (Vgl. Kapitel 2.2). Andererseits beeinflusst die Bauteiltemperatur die Deformation des Kolbens, die wiederum einen maßgeblichen Einfluss auf den Reibungs Zustand hat [20]. Zur Öltemperaturmessung stellt die Zwei-Farben-LIF-Methode (2CLIF) eine geeignete Methode dar [98-101]. Das Verfahren ist aus Gasphase-Messungen bekannt und beruht auf der temperaturabhängigen Rotverschiebung des Emissionsspektrums ausgewählter LIF-Tracer. Zur Anwendung in Ölfilmen muss



zunächst eine Motoröl-Farbstoff-Mischung mit geeigneten photophysikalischen Eigenschaften identifiziert werden. Zur Messung der Bauteiltemperaturen kann z.B. das auf Phosphoreszenz (Vgl. Kapitel 2.3.1) basierende Spektroskopie-Verfahren angewendet werden [102-104]. Hierzu werden thermografische Phosphore in einer Oberfläche eingebettet und über die temperaturabhängige Abklingzeit der Phosphoreszenz Rückschlüsse auf die Oberflächentemperatur gezogen. Neben der Identifizierung thermografischer Phosphore mit geeigneten photophysikalischen Eigenschaften, ist auch die Einbettung der Phosphore in tribologisch beanspruchte Oberflächen eine Herausforderung.

Die Quantifizierung der Ölfilmstärke im Bereich des Kolbenhemds erfolgte im Rahmen dieser Arbeit mit einer geometrischen Auflösung, die die Abbildung des gesamten optischen Zugangs des Einzylinderaggregats mit einer Kamera ermöglichte. Im Rahmen der in situ Kalibrierung ist die Betrachtung der makroskopischen Kolbenhemdform zweckmäßig, da diese über einen großen Messbereich abgebildet wird. Allerdings ist eine in situ Kalibrierung im Kontaktbereich Kolbenring/Zylinderlaufbahn aufgrund des gewählten Abbildungsmaßstabs nicht möglich. Wird auf die Abbildung der kompletten Kolbengruppe verzichtet, kann durch eine Verkleinerung des Abbildungsmaßstabs eine Vergrößerung der geometrischen Auflösung des Kontaktbereichs Kolbenring/Zylinderlaufbahn erzielt werden. Der hier entwickelte Bildverarbeitungsprozess mit Affintransformation zur Bestimmung des Kalibrierfaktors ist dann übertragbar, da auch die Kolbenringkontur eine Balligkeit aufweist (Vgl. Kapitel 2.1). Eine Herausforderung stellt die Bestimmung des Auflösungsvermögens des LIF-Messsystems dar, da in diesem tribologischen Kontakt Schmierfilmdicken im Bereich der Oberflächenrauheit erwartet werden [13].

### **Weitere Effekte in der Kolbengruppe: Dichtfunktion des Ringpakets**

Neben der quantitativen Untersuchung der Ölfilmstärke in den tribologischen Kontakten in der Kolbengruppe, liefert das LIF-Messsystem Informationen über die Ölverteilung innerhalb der gesamten Kolbengruppe. Das Ringpaket dient zur Abdichtung des Brennraums, um Wirkungsgradverluste und übermäßigen Öltransport in den Brennraum durch Gasströmungen zu minimieren. Abbildung 4-34 zeigt LIF-Aufnahmen im Verdichtungstakt ( $n = 1300 \text{ min}^{-1}$ ,  $95 \text{ °KW v.ZOT}$ ) während befeuertem (links,  $p_{mi} = 8,5 \text{ bar}$ ) und geschlepptem Betrieb (rechts, Saugrohrdruck =  $300 \text{ mbar}$ ). Die LIF-Intensitäten sind logarithmisch auf einer Falschfarbenskala dargestellt.

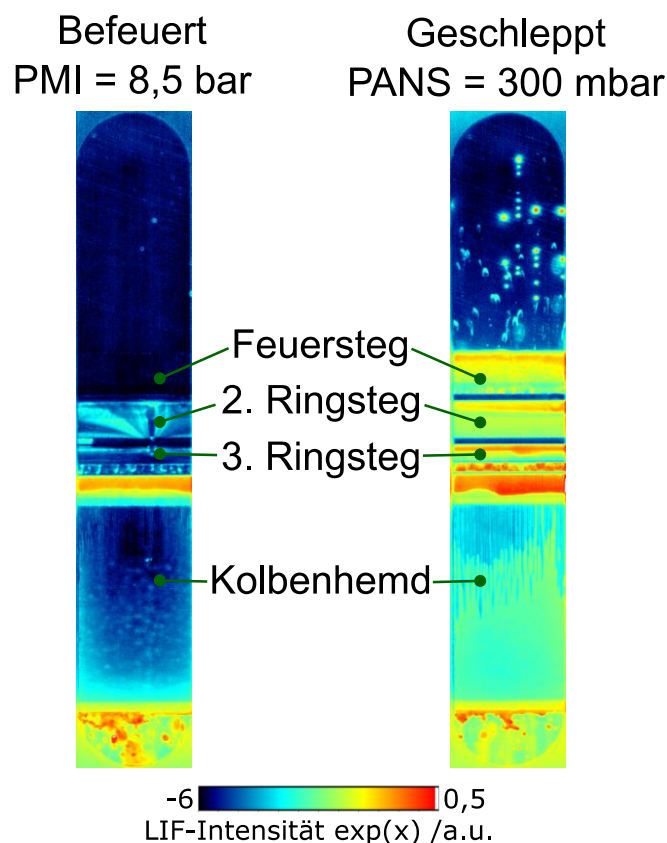


Abbildung 4-34: LIF-Aufnahmen aus befeuerten (links) und geschlepptem (rechts) Motorbetrieb 95 °KW n.ZOT.

Die LIF-Intensitäten der beiden Aufnahmen können nicht direkt verglichen werden, da die Temperaturverteilungen innerhalb der Kolbengruppe zwischen befeuerten und geschlepptem Betrieb nicht übereinstimmen und die LIF-Intensität temperaturabhängig ist (Vgl. Abbildung 4-11). Dennoch wird der Unterschied in der Ölverteilung deutlich. Im befeuerten Betrieb wird im Feuersteg kein Öl detektiert und im Bereich des 2. und 3. Ringstegs sind die LIF-Intensitäten gering (Vgl. Phänomen 4 in Abbildung 4-32). Im Vergleich dazu erzeugen Ölsammlungen im Bereich der Ringstege hohe LIF-Intensitäten im geschleppten Betrieb. Außerdem werden zahlreiche Öltropfen im Brennraum detektiert. Die Ursache der unterschiedlichen Ölverteilung wird auf die unterschiedlichen Druckverhältnisse zurückgeführt: Im angedrosselten Schubbetrieb herrscht ein Druckgefälle vom Kurbelgehäuse in Richtung Brennraum. Hieraus resultiert eine aufwärtsgerichtete Gasströmung (Reverse-Blowby), die den Öltransport in Richtung Brennraum begünstigt. Reverse-Blowby und Massenträgheit führen bei der Abwärtsbewegung des Kolbens zu einem Abschleudern von Öl in den Brennraum. Diese Öltransportvorgänge werden maßgeblich durch die Dichtfunktion der Ringe beeinflusst und können mit dem phasengekoppelten LIF-Messsystem im stationären Motorbetrieb visualisiert werden.

Eine genaue Analyse der Gasströmungen und Öltransportvorgänge ist aufgrund des eingeschränkten zeitlichen Auflösungsvermögens nicht möglich. Hierdurch können auch transiente Übergänge, z.B. durch Drehzahl- oder Laständerungen, nur bedingt untersucht werden. Zur Untersuchung dieser Phänomene ist eine Hochgeschwindigkeits-Ölmesstechnik wünschenswert.

### Weitere Effekte in der Kolbengruppe: Kraftstoff-Öl-Interaktion

Undichtigkeiten des Ringpakets verursachen Öltransport in den Brennraum, was zu Ölemission und Partikelbildung führt [37, 38, 51]. Aber auch die Interaktion von flüssigem Kraftstoff mit dem Öl und der Zylinderwand verursacht Probleme bei der Verbrennung und Schmierung [42, 43]. Die Kraftstoff-Wandfilmbildung kann durch das Einspritztiming beeinflusst werden. Abbildung 4-35 zeigt eine Variation des Einspritztimings ( $\lambda = 1$ ,  $p_{mi} = 4,5\text{bar}$ ,  $n = 1500\text{ min}^{-1}$ ) anhand dunkelbildkorrigierter LIF-Aufnahmen auf der GDS im Verdichtungsstakt  $90^\circ\text{KW v.ZOT}$ . Die Kühlwassertemperatur beträgt  $50^\circ\text{C}$ , die Öltemperatur  $40^\circ\text{C}$ . Die LIF-Intensität ist logarithmiert auf einer Falschfarbenskala dargestellt.

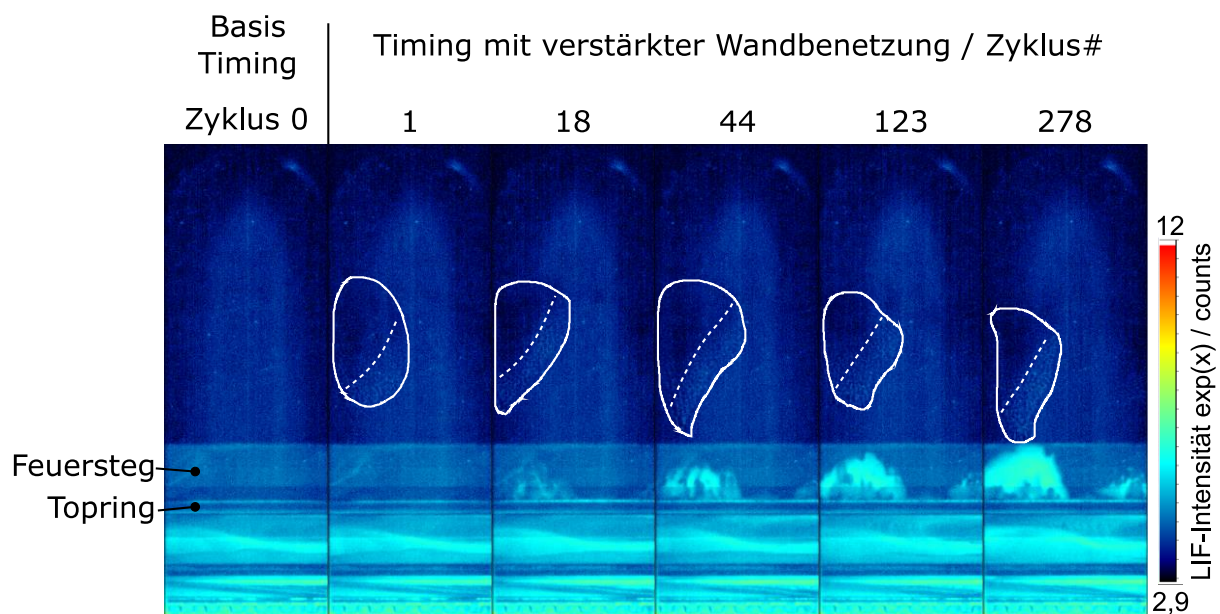


Abbildung 4-35: LIF-Aufnahmen aus 279 aufeinanderfolgenden Zyklen ( $90^\circ\text{KW v.ZOT}$ ) im befeuerten Motorbetrieb mit unterschiedlichen Einspritztimings. *Basis Timing*: 4-fach Einspritzung, *Timing mit verstärkter Wandbenetzung*: 1-fach Einspritzung mit  $\text{SOI} = 210^\circ\text{KW v.ZOT}$ . Weiße Linien markieren Bereiche der Kraftstoff-Wandbenetzung.

Zyklus 0 zeigt den letzten befeuerten Zyklus mit einem Basis-Einspritztiming im stationären Betrieb, wobei oberhalb des Top-Rings kaum Öl auf dem Feuersteg sichtbar ist. In den darauffolgenden LIF-Aufnahmen sind die Zyklen 1-278 mit 1-fach Einspritzung mit  $\text{SOI} = 210^\circ\text{KW v.ZOT}$  dargestellt. Innerhalb der weißen Markierung

ist die LIF-Intensität links von der gestrichelten Linie geringer verglichen mit Zyklus 0 und der Ölfilm weist rechts von der gestrichelten Linie ein blasenförmiges Muster auf. Im Bereich des Feuerstegs nimmt die LIF-Intensität mit steigender Zykluszahl zu. Das Kraftstoffspray trifft aufgrund des ungünstigen Einspritztimings auf die Zylinderwand im Bereich der weißen Markierung, wodurch der Ölfilm teilweise weggespült wird (Vgl. Abbildung 2-14). Im Bereich des Feuerstegs nimmt die LIF-Intensität mit steigender Zykluszahl aufgrund von Ölakkumulation zu. Dieses Phänomen führt zu der Schlussfolgerung, dass einerseits Öl vom Kraftstoff aus der Ringnut gespült wird. Andererseits führt die Ölverdünnung mit Kraftstoff zu einer Verringerung der Viskosität [33, 50], wodurch der Öltransport durch Gas- und Massenkräfte in Richtung Brennraum begünstigt wird.

Anhand der Phänomene, die in Abbildung 4-34 und Abbildung 4-35 dargestellt sind, werden die Grenzen des phasengekoppelten LIF-Messsystems deutlich. Zur Untersuchung der Schmierfilmbildung und -auflösung oder der Bewegung einzelner Öltröpfen ist eine höhere zeitliche Auflösung erforderlich. Auch die Interaktion von flüssigem Kraftstoff mit der Zylinderwand und dem Öl innerhalb der Kolbengruppe wecken den Wunsch einer Messtechnik zur Untersuchung von Kraftstoff und Öl im optisch zugänglichen Einzylinderaggregat. Im Folgenden wird eine LIF-Messtechnik entwickelt, die die simultane, kurbelwinkelaufgelöste Visualisierung von Öl und Kraftstoff durch spektral getrennte LIF ermöglicht.

## **5 Simultane Hochgeschwindigkeits-Visualisierung von Kraftstoff und Öl**

In Kapitel 2 wurden physikalische Prozesse in der Kolbengruppe direkteinspritzender Ottomotoren beschrieben und optische Messverfahren zur Untersuchung von Kraftstoff-Wandfilmen und Kraftstoff-Öl-Interaktion vorgestellt. Die Phänomene Kraftstoff-Wandbenetzung und Kraftstoff-Öl-Interaktion können mit dem phasengekoppelten LIF-Messsystem nur unzureichend untersucht werden (Vgl. Kapitel 4.3). Im Folgenden wird daher ein SHSLIF-Messsystem (Simultaneous High-Speed-LIF) zur simultanen, kurbelwinkelaufgelösten Visualisierung von Kraftstoff und Öl im optisch zugänglichen Einzylinderaggregat entwickelt.

Die spektrale Auslegung des Messsystems, die Berechnung der Modulationstransferfunktionen (Kapitel 5.2.2) und die spektrometrischen Untersuchungen verschiedener Surrogat-Öle (Kapitel 5.3.3) wurden in Zusammenarbeit mit dem Institut für Verbrennung und Gasdynamik der Universität Duisburg-Essen durchgeführt. Die tribologische Bewertung verschiedener Öle (Kapitel 5.3.3) und die Untersuchungen zur Kraftstoffverdampfung durch Gaschromatographie/Massenspektrometrie wurden von internen Abteilungen der Daimler AG durchgeführt. Die Inhalte dieses Kapitels wurden teilweise in [105] veröffentlicht.

### **5.1 Auswahl des optischen Systems**

Im Folgenden werden die spektrale Auslegung und die optischen Komponenten der LIF-Messtechnik zur simultanen Hochgeschwindigkeits-Visualisierung von Kraftstoff und Öl unter realen Motorbedingungen erläutert. Hierzu werden zunächst geeignete Kraftstoff-Tracer und optische Filter identifiziert. Danach wird die verwendete Messtechnik charakterisiert.

#### **5.1.1 Kraftstoff-Tracer, Öl-Farbstoff und optische Filter**

Zur Untersuchung von Kraftstoff-Wandfilmen durch LIF kann die natürliche Fluoreszenz von kommerziellem Kraftstoff genutzt werden [42]. Allerdings ist die genaue Zusammensetzung kommerzieller Kraftstoffe unbekannt und variiert chargenabhängig. Die verschiedenen aromatischen und nicht-gesättigten Bestandteile fluoreszieren in Abhängigkeit der jeweiligen Konzentration und ihren spezifischen, photophysikalischen Eigenschaften. Außerdem weisen die fluoreszierenden

Verbindungen unterschiedliche physikalische Eigenschaften auf, wodurch sich die Zusammensetzung des Kraftstoffs und somit die Fluoreszenzeigenschaften während des Verdampfungsprozesses ändern. Da bei der Betrachtung von Wandfilmen die Verdampfungseigenschaften entscheidend sind, weist die fluoreszierende Komponente des Kraftstoffs im Idealfall eine zum Ausgangszustand konstante Konzentration während des Verdampfungsprozesses auf, bzw. der LIF-Tracer folgt der Verdampfung des Kraftstoffs. Im Fall der simultanen Visualisierung von Kraftstoff und Öl durch LIF ist außerdem die spektrale Trennung von Anregungs- und Emissionsspektren entscheidend. Daher sind nicht-fluoreszierende Ersatz-Kraftstoffe, z.B. iso-Oktan [72, 73, 89, 110, 111] oder Multikomponenten-Kraftstoffe [123-127] in Verbindung mit LIF-Tracern, z.B. Ketone oder Aromate mit bekannten photophysikalischen Eigenschaften [75] geeignet. Die Anwendung von LIF zur Visualisierung von Öl durch den Einsatz einer Motoröl-Farbstoff-Mischung wurde in Kapitel 4 ausführlich diskutiert. Der Farbstoff Pyrromethen 567 ist mit der 532 nm-Strahlung eines Nd:YAG-Lasers (Vgl. Abbildung 4-1) anregbar und soll aufgrund der bekannten photophysikalischen Eigenschaften auch in diesem LIF-Messsystem verwendet werden. Durch die Frequenzvervierfachung können mit einem Nd:YAG-Laser weitere Anregungswellenlängen (355 nm und/oder 266 nm) bereitgestellt werden. In der Regel weisen Moleküle mit kleinen Chromophoren eine kürzere Absorptionswellenlängen, z.B. 266 nm, auf [75]. Diese photophysikalische Eigenschaft kleinerer Moleküle ist auch günstig hinsichtlich des Verdampfungsverhaltens der LIF-Tracer. Toluol ist beispielsweise eine Komponente von kommerziellem Ottokraftstoff und weist, bedingt durch die Stoffeigenschaften (Molekulargewicht = 92,14 g/mol, Dichte = 0,865 g/cm<sup>3</sup>) eine Siedetemperatur von 110 °C auf [138]. Hierdurch kann die Anforderung, dass der LIF-Tracer der Verdampfung des Kraftstoffs folgt, prinzipiell erfüllt werden. Insgesamt können folgende Anforderungen an den idealen LIF-Tracer zusammengefasst werden:

- Die Verdampfungseigenschaften des LIF-Tracers entsprechen denen des Ersatz-Kraftstoffs (Co-evaporation), bzw. Kraftstoff und Tracer weisen ähnliche Eigenschaften hinsichtlich Molekulargewicht und Dichte auf.
- Der LIF-Tracer ist im Ersatz-Kraftstoff löslich.
- Die Anregung des LIF-Tracers erfolgt mit der Frequenzverdreifachung (355 nm) oder -vervierfachung (266 nm) der 1064 nm-Strahlung des Nd:YAG-Lasers.

- Das Emissionsspektrum des LIF-Tracers weist einen ausreichenden Abstand zum Absorptions- und Emissionsspektrum von Pyrromethen 567 auf, um eine spektrale Trennung von Öl- und Kraftstoff-LIF zu ermöglichen.
- Der LIF-Tracer weist eine hohe Quantenausbeute auf, da die Fluenz aufgrund der Strahlaufweitung auf die Fläche der Saphirfenster des Einzylindermotors und der hohen Wiederholrate des kHz-Lasers limitiert ist.
- Die photophysikalischen Eigenschaften hinsichtlich Quenching und Abhängigkeit von Druck und Temperatur sind bekannt.

Mischungen aus iso-Oktan mit Toluol [73] und iso-Oktan mit 3-Pentanon [72] wurden aufgrund der günstigen photophysikalischen und physikalischen Eigenschaften erfolgreich zur LIF-Untersuchung von Kraftstoff-Wandfilmen verwendet. Anisol ist ein weiterer LIF-Tracer, der in Gasphase-Untersuchungen zum Einsatz kommt [128]. Die drei Verbindungen können mit 266 nm-Strahlung angeregt werden und emittieren rotverschobenes Fluoreszenzlicht. Die Wahl der LIF-Tracer fiel aus zwei Gründen auf die aromatischen Verbindungen Toluol und Anisol:

1. Die Quanteneffizienz von Toluol ist höher als von 3-Pentanon [129]. Anisol weist eine noch höhere Quantenausbeute auf [128, 130].
2. Das Maximum des Emissionsspektrums von 3-Pentanon liegt oberhalb von 400 nm [72], wodurch prinzipiell auf den Einsatz eines UV-sensitiven Bildverstärkers verzichtet werden kann. Allerdings überlappt das Emissionsspektrum mit dem Absorptionsspektrum von Pyrromethen 567, wodurch die Tracer-Fluoreszenz möglicherweise vom Farbstoff re-absorbiert wird. Der Abstand der Emissionsspektren der aromatischen Verbindungen Toluol und Anisol zum Pyrromethen-Absorptionsspektrum ist größer als von 3-Pentanon.

Abbildung 5-1 zeigt die wellenlängenabhängigen Absorptionskoeffizienten der im Folgenden verwendeten LIF-Tracer Toluol und Anisol.

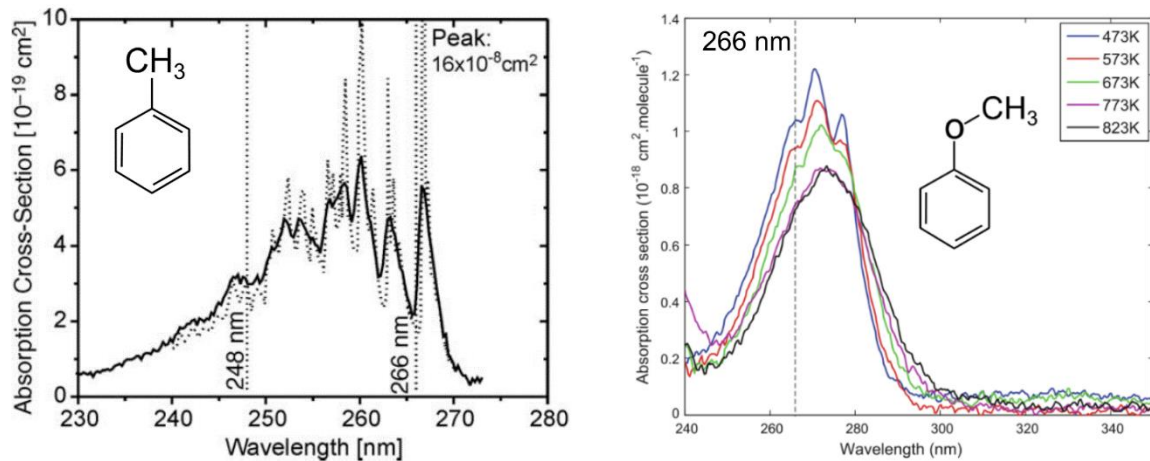


Abbildung 5-1: Absorptionskoeffizient in Abhängigkeit der Anregungswellenlänge von Toluol [75] und Anisol [131].

Beide Tracer können durch 266 nm Strahlung angeregt werden, wobei Absorptionsquerschnitt und Quanteneffizienz von Anisol höher sind als von Toluol [128, 130]. In Abbildung 5-2 sind die Emissionsspektren von Anisol und Toluol nach Anregung mit 266 nm und das Absorptions- und Emissionsspektrum von Pyrromethen 567 nach Anregung mit 532 nm dargestellt. Außerdem sind die Transmissionskurven der verwendeten Filter [85] zur spektralen Trennung der emittierten Strahlung eingetragen.

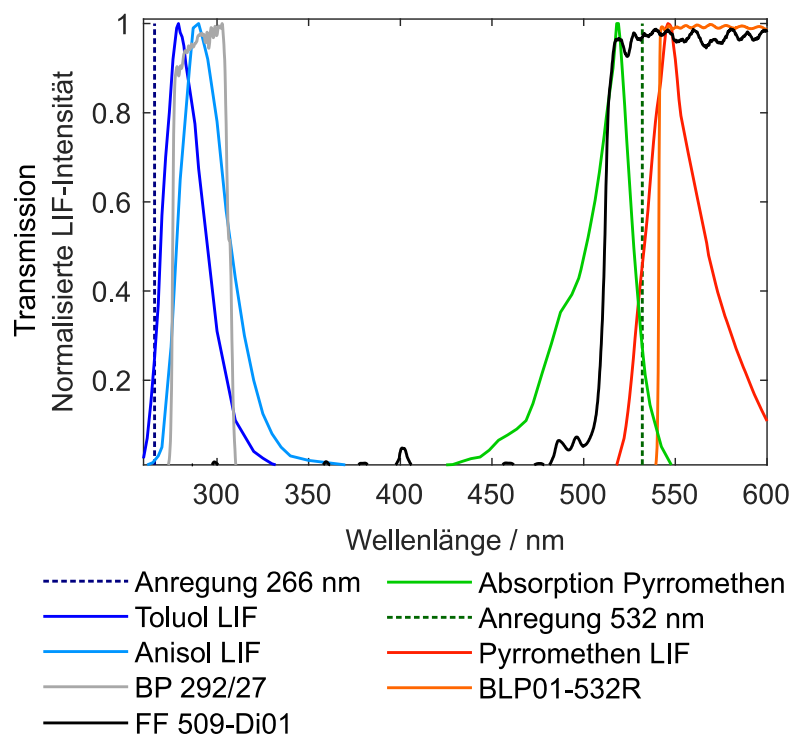


Abbildung 5-2: Spektrale Auslegung des SHSLIF-Messsystems. Emissionsspektren von Toluol und Anisol nach Anregung mit 266 nm nach [128], Absorptions- und Emissionsspektrum von Pyrromethen 567 nach Anregung mit 532 nm nach [84], Transmissionspektren der Filter [85].



Das emittierte Fluoreszenzlicht der Tracer (Anisol bzw. Toluol) liegt im Transmissionsbereich des Bandpassfilters (BP 292/27) zwischen 278-306 nm. Die Fluoreszenz von Pyrromethen 567, sowie die Anregungswellenlängen 266 nm und 532 nm werden vom Bandpassfilter abgeblockt. Die Fluoreszenzspektren der Tracer zeigen keine Überlappung mit dem Absorptionsspektrum von Pyrromethen 567. Zur spektralen Trennung von Tracer- und Farbstoff-LIF kommt ein Strahlteiler (FF 509-Di01) mit einem Langpassfilter (BLP01-532R) zum Einsatz. Diese Filterkombination ermöglicht die spektrale Trennung der Fluoreszenz von Pyrromethen 567 von den Anregungswellenlängen und Tracer-Fluoreszenzspektren im Bereich oberhalb von 532 nm.

### 5.1.2 Strahlengang und optische Komponenten

Abbildung 5-3 zeigt den Strahlengang auf der Gegendruckseite des optischen Einzylindermotors mit dem die spektrale Trennung von Farbstoff- und Tracer-LIF aus Abbildung 5-2 umgesetzt wurde.

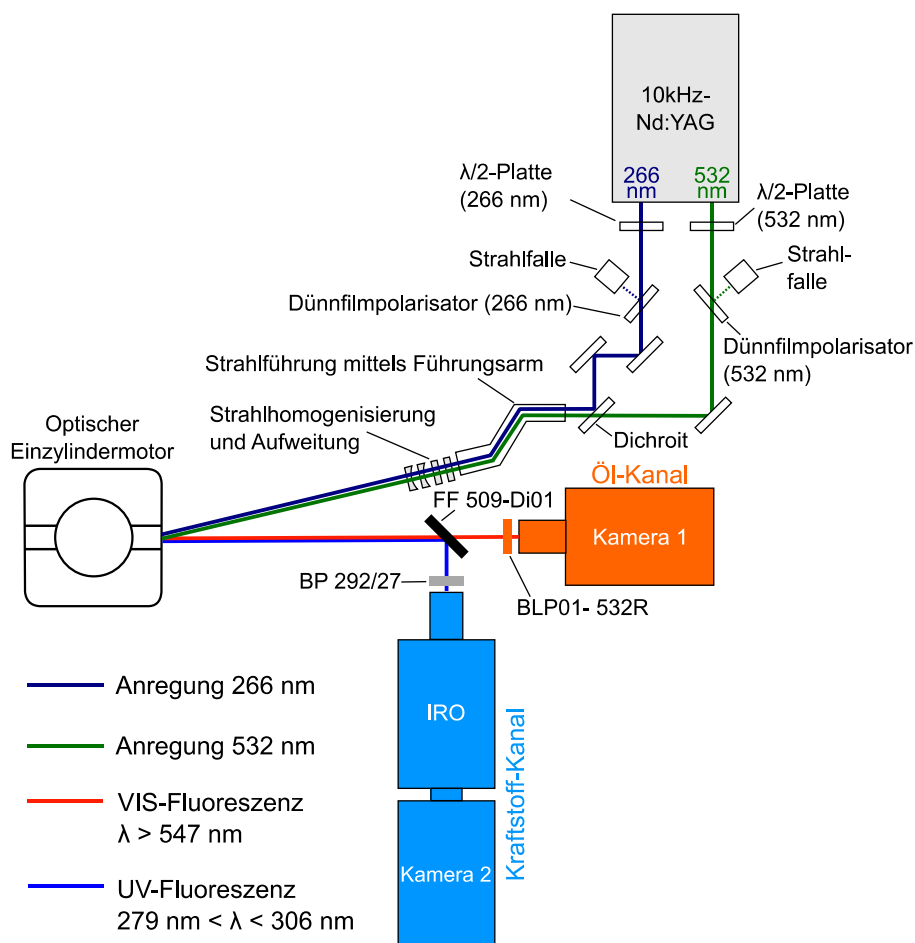


Abbildung 5-3: Strahlengang des SHSLIF-Messsystems am optischen Einzylindermotor. Farbgebung der Filter und Strahlung entsprechend Abbildung 5-2.

Gepulste Laserstrahlung der Wellenlängen 266 nm und 532 nm wird von einem Nd:YAG-Laser mit einer maximalen Pulsrate von 10 kHz durch zwei Ausgänge emittiert. Zur unabhängigen Pulsenergievariation kommen wellenlängenspezifische Verzögerungsplatten und Dünnpolarisatoren zum Einsatz. Die Strahlen werden über mehrere Spiegel und einen dichroitischen Strahlkombinierer zusammengeführt und mit Hilfe eines Strahlführungsarms in Richtung Messstelle geleitet. Das Laserstrahlprofil wird durch Homogenisierer und Zylinderlinsen ( $f = -20$  mm und  $f = -50$  mm) homogenisiert und auf die Größe des Saphirfensters aufgeweitet.

Im Detektionspfad werden Tracer- und Farbstoff-Fluoreszenz mit einem Langpassfilter (FF 509-Di01) spektral getrennt. Licht mit der Wellenlänge kürzer als 509 nm (Tracer-LIF) wird reflektiert, längere Wellenlängen (Farbstoff-LIF) transmittieren den Filter. Zur Abblockung reflektierter und gestreuter Laserstrahlung wird ein zweiter Langpassfilter (BLP01-532R) auf Kamera 1 adaptiert. Die Detektion der Tracer-LIF erfolgt im Transmissionsbereich des Bandpassfilters (BP 292/27) mit einer bildverstärkte (IRO) Kamera 2.

Abbildung 5-4 zeigt eine Fotografie des SHSLIF-Messsystems. Die Messtechnik ist am optischen Einzylindermotor auf der Gegendruckseite appliziert.

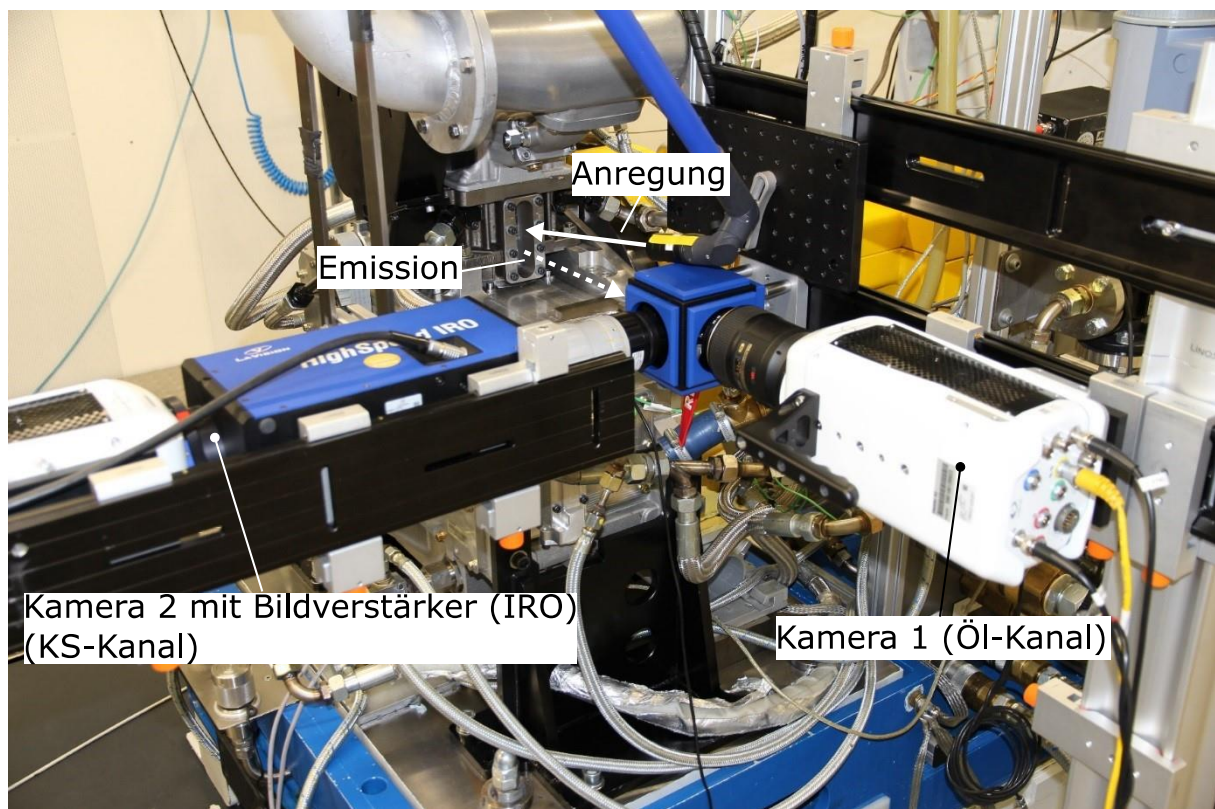


Abbildung 5-4: Applikation des SHSLIF-Messsystems am optischen Einzylindermotor.

Im Folgenden werden die Komponenten des SHSLIF-Messsystems vorgestellt. Hierbei wird „Kraftstoff“ durch KS abgekürzt.

## Laser

Als Lichtquelle kommt ein Nd:YAG-Laser (InnoSlab Laser IS400 von Edgewave) zum Einsatz. In Abbildung 5-5 ist der Aufbau des Lasers dargestellt.

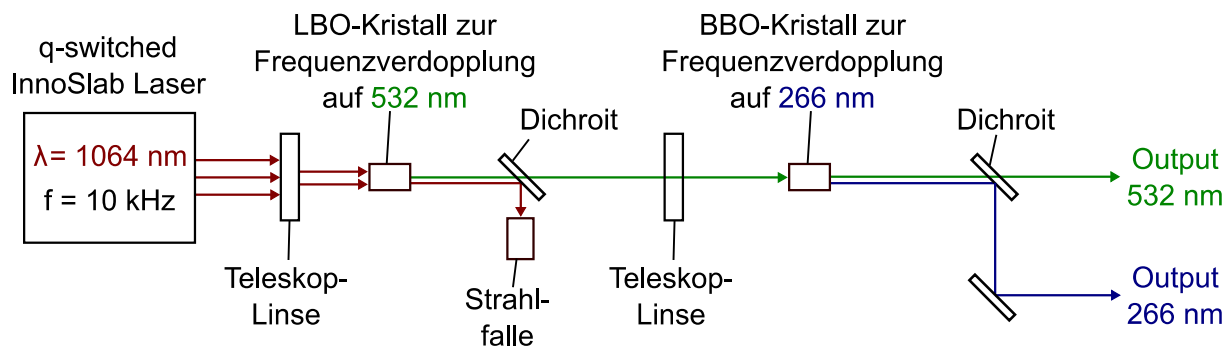


Abbildung 5-5: Prinzip der Frequenzverdopplung des Nd:YAG-Lasers nach [132].

Gepulste Laserstrahlung (Güteschaltung: Q-Switch) der Wellenlänge  $1064 \text{ nm}$  wird mit der maximalen Frequenz von  $10 \text{ kHz}$  vom diodengepumpten InnoSlab Laser emittiert und mit einer Teleskoplinse auf den Lithiumtriborat-Kristall (LBO) zur Frequenzverdopplung fokussiert. Der dichroitische Filter trennt die nicht umgewandelte  $1064 \text{ nm}$  Strahlung von der  $532 \text{ nm}$ -Strahlung, die auf den Bariummetaborat-Kristall (BBO) fokussiert wird. Ein Teil der Strahlung wird auf  $266 \text{ nm}$  frequenzverdoppelt, sodass an den zwei Laserausgängen  $266 \text{ nm}$  und  $532 \text{ nm}$  emittiert werden. Die Laserpulsenergie der beiden Wellenlängen hängt von der Stromstärke der Dioden und der Temperatur des BBO-Kristalls ab, wobei die Pulslänge  $10 \text{ ns}$  beträgt. Zur Vermeidung thermischer Zersetzung des BBO-Kristalls ist lediglich ein „Burst-Betrieb“ mit maximal 300 aufeinanderfolgenden Pulsen (30 % duty cycle) zulässig.

Zur Ermittlung der maximalen Umwandlungseffizienz des BBO-Kristalls wird die Temperatur des Kristalls bei Diodenstrom  $45 \text{ A}$ , Frequenz  $10 \text{ kHz}$  und Duty cycle  $10 \%$  variiert und die Pulsenergie der  $266 \text{ nm}$ -Strahlung mit Hilfe eines Powermeters ermittelt. Abbildung 5-6 zeigt den Zusammenhang zwischen der  $266 \text{ nm}$ -Pulsenergie und der BBO-Kristalltemperatur (links) und den Zusammenhang zwischen Diodenstrom und Pulsenergie der  $266 \text{ nm}$ - und  $532 \text{ nm}$ -Strahlung bei einer BBO-Kristalltemperatur von  $40 \text{ °C}$  (rechts).

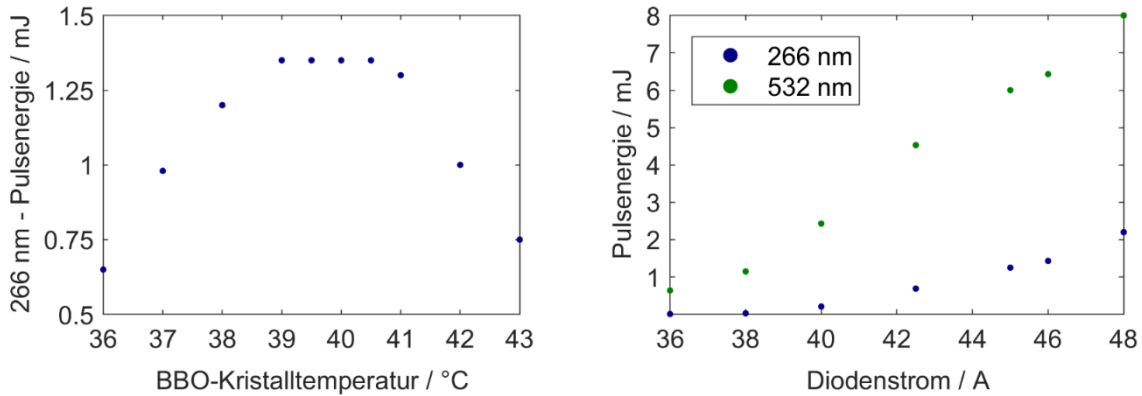


Abbildung 5-6: Links: Zusammenhang zwischen BBO-Kristalltemperatur und 266 nm-Pulsenergie. Rechts: Zusammenhang zwischen Diodenstrom und Pulsenergie der frequenzverdoppelten (532 nm) und frequenzvervierfachen (266 nm) Pulsenergie (BBO-Kristalltemperatur = 40 °C).

Die maximale Pulsenergie der 266 nm-Strahlung liegt im Bereich zwischen 39-40,5 °C. Die BBO-Kristalltemperatur wurde daher konstant auf 40 °C eingestellt. Die Pulsenergie steigt nahezu linear mit dem Diodenstrom an. Beim maximal zulässigen Diodenstrom (48 A) beträgt die Pulsenergie 2,2 mJ (266 nm), bzw. 8 mJ (532 nm).

Die Laserstrahlung kann bei konstantem Diodenstrom durch die Änderung der Polarisationsrichtung mit einer  $\lambda/2$ -Platte und polarisationsabhängiger Transmission des Dünnpolarisators abgeschwächt werden. Abbildung 5-7 zeigt die Transmission des Dünnpolarisators in Abhängigkeit der Verdrehung der Verzögerungsplatte für 266 nm und 532 nm.

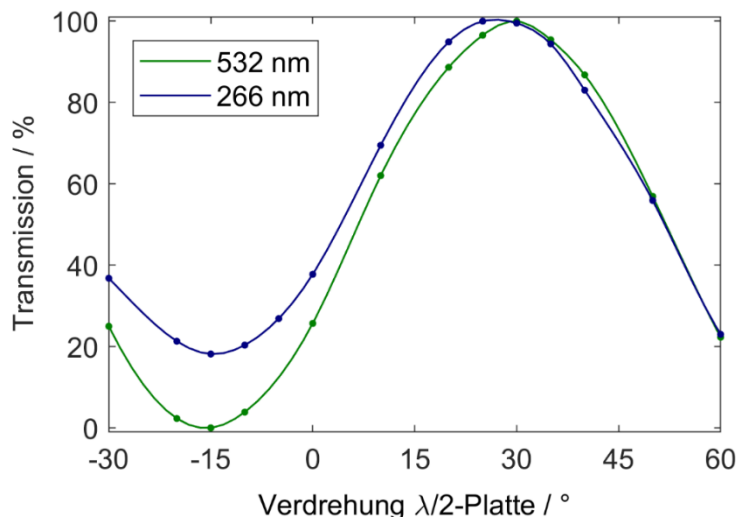


Abbildung 5-7: Zusammenhang zwischen Lichttransmission der wellenlängenspezifischen Dünnpolarisatoren und Verdrehung der wellenlängenspezifischen  $\lambda/2$ -Platte (Vgl. Abbildung 5-3).

Durch die Polarisationsänderung der Verzögerungsplatte kann der 532 nm-Strahl vollständig geblockt werden. Bei der 266 nm-Strahlung verbleibt eine Transmission

von ca. 20 %. Eine mögliche Ursache ist die Abweichung des Einfallswinkels der Laserstrahlung vom Brewster-Winkel, der zur idealen Polarisation erforderlich ist.

Das Strahlprofil des verwendeten Lasers weist Inhomogenitäten in der Intensitätsverteilung auf [132]. Zur Homogenisierung des Strahlprofils können neben Diffusoren (Vgl. Abbildung 2-11) weitere optische Bauteile, z.B. diffraktive optische Elemente (DOE) und Mikrolinsenarrays (MLA) verwendet werden. Das Funktionsprinzip des DOEs [133] basiert auf optischer Beugung, das des MLAs [134] auf der Vervielfältigung und Überlagerung des Strahlbilds.

Zur Untersuchung der Modifizierung des 532 nm-Strahlprofils wurde die Fluoreszenz einer Ölschicht in der Dünnschichtkuvette (Vgl. Abbildung 4-6), die im Strahlengang des LIF-Messsystems positioniert wurde, visualisiert. Abbildung 5-8 zeigt oben die resultierenden LIF-Aufnahmen im Bereich von 110 Pixel x 110 Pixel. Zur Dunkelbildkorrektur wurde das Ensemblemittel einer Bilderserie aus 100 Aufnahmen bei ausgeschaltetem Laser subtrahiert. Die Pulsenergie wurde zur Vermeidung von Kamerasättigung durch lokale Fluenzerhöhungen mit der  $\lambda/2$ -Platte abgeschwächt, weshalb das absolute Signalniveau der LIF-Aufnahmen nicht vergleichbar ist. Die LIF-Intensität wurde daher jeweils auf das Maximum des Ensemblemittels normiert. Im unteren Bereich der Abbildung sind die Profilschnitte entlang der gestrichelten Linie dargestellt.

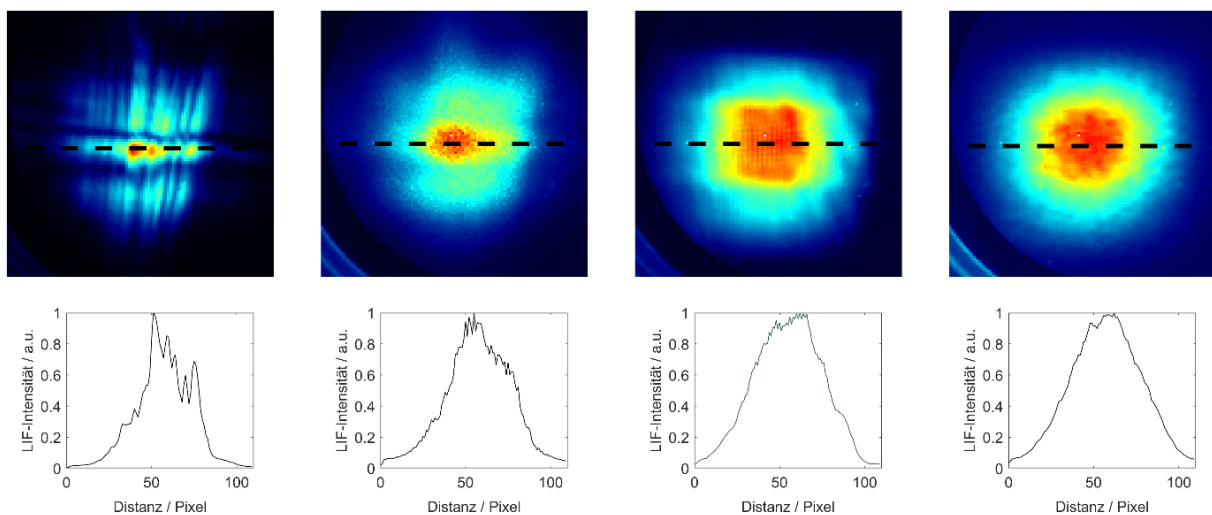


Abbildung 5-8: Oben: LIF-Signal im Öl-Kanal nach Anregung mit 532 nm, gemessen in der Dünnschichtkuvette (50  $\mu\text{m}$  Ölfilmstärke), normiert auf den jeweiligen Maximalwert. Unten: Profilschnitte entlang der gestrichelten Linie. Strahlprofil wurde von links nach rechts mit folgenden Elementen homogenisiert: Ohne Homogenisierung (Standard), Diffraktives Optisches Element (DOE), Mikrolinsenarray (MLA), MLA + DOE.

Ohne Homogenisierer weist das Strahlprofil große Unstetigkeiten in der Intensitätsverteilung ( $>$  Faktor 2) auf. Beim Einsatz des DOEs weist die LIF-Intensität eine lokale Erhöhung auf und im Profilschnitt sind höherfrequente Anteile erkennbar. Die lokale Intensitätserhöhung ist beim MLA nicht erkennbar, höhere Frequenzen sind im Profilschnitt erkennbar. Die größte Glättung des Profilschnitts wird bei der Verwendung von MLA und DOE erreicht. Im Folgenden wird diese Variante zur Strahlhomogenisierung verwendet. Die Fluenz beträgt nach der Homogenisierung und der Aufweitung mit zwei Zylinderlinsen ( $f = -20$  mm und  $f = -50$  mm) ca.  $0,07$  mJ/cm<sup>2</sup> (532 nm) und  $0,012$  mJ/cm<sup>2</sup> (266 nm).

### **Kamera und Bildverstärker**

Im Ölkanal kommt eine CMOS-Kamera (Vision Research Phantom v611) zum Einsatz. Die Pixelgröße beträgt  $20 \times 20$   $\mu\text{m}^2$  und der Dynamikumfang des A/D-Wandlers 12 bit. Bei der maximalen Auflösung von  $1280 \times 800$  Pixel beträgt die Repetitionsrate 6242 Hz. Die Rate kann durch die Reduzierung der Bildgröße gesteigert werden. Die zulässige Betriebstemperatur zur Vermeidung unerwünschter Dunkelströme liegt im Bereich der Labortemperatur zwischen  $0$ - $40$  °C. Die Kamera wird mit einem Makro-Objektiv mit 105 mm Brennweite und einer maximalen Blendenzahl von  $f/2,8$  ausgestattet (Nikon AF-S 105/2,8). Die minimale Belichtungszeit der Kamera beträgt  $1$   $\mu\text{s}$ , in den Versuchen wurde die Belichtungszeit auf  $100$   $\mu\text{s}$  festgelegt.

Zur Detektion der UV-LIF wird im KS-Kanal ein High-Speed IRO („intensified relay optics“ von LaVision [86]) auf einer zweiten CMOS-Kamera (Vision Research Phantom v611) adaptiert. Der Bildverstärker wird mit einem UV-Objektiv („UV lens enhanced“ von Cerco, 100 mm,  $f/2,8$ , Transmissionsbereich: 200-900 nm) ausgestattet und dient der Vervielfachung der detektierten Photonen und der spektralen Verschiebung der UV-Fluoreszenz des KS-Tracers in das Detektionsspektrum der Kamera. Die Belichtungszeit im Bildverstärker erfolgt mittels gepulstem, elektronischem Shutter (Gate). Während des Gates werden Photonen durch eine UV-sensitive Photokathode (S20) in Elektronen konvertiert und in einem MCP (Multi-Channel Plates) verstärkt, wobei der Verstärkungsfaktor über die Einstellung der Beschleunigungsspannung (Einstellgröße „Gain“: 0-100) erfolgt. Die vervielfachten Elektronen erzeugen ein Bild auf einem Phosphorschirm (P46, Abklingzeit  $< 1$   $\mu\text{s}$  für kHz-Anwendungen), das im spektralen Detektionsbereich der CMOS-Kamera liegt. Die Belichtungszeit des IROs wird durch die Dauer des Gate festgelegt und liegt zwischen 10 ns-80 ms. Im Versuch

wurde das Gate auf 10  $\mu\text{s}$  festgelegt. Die Ansteuerung und die Einstellung von Gain und Gate erfolgte mittels der Software „DaVis“ von LaVision.

Die projizierte Pixelgröße beträgt in beiden Kanälen ca. 85  $\mu\text{m}/\text{Pixel}$ .

### Dunkelbild

Abbildung 5-9 zeigt links das Ensemblemittel aus 100 Dunkelbilddaufnahmen der Kamera mit (a) und ohne (b) IRO. Im rechten Teil der Abbildung ist die Ensemblestandardabweichung aus 100 Dunkelbilddaufnahmen der Kamera mit (c) und ohne (d) IRO dargestellt. Der IRO-Gain beträgt 60.

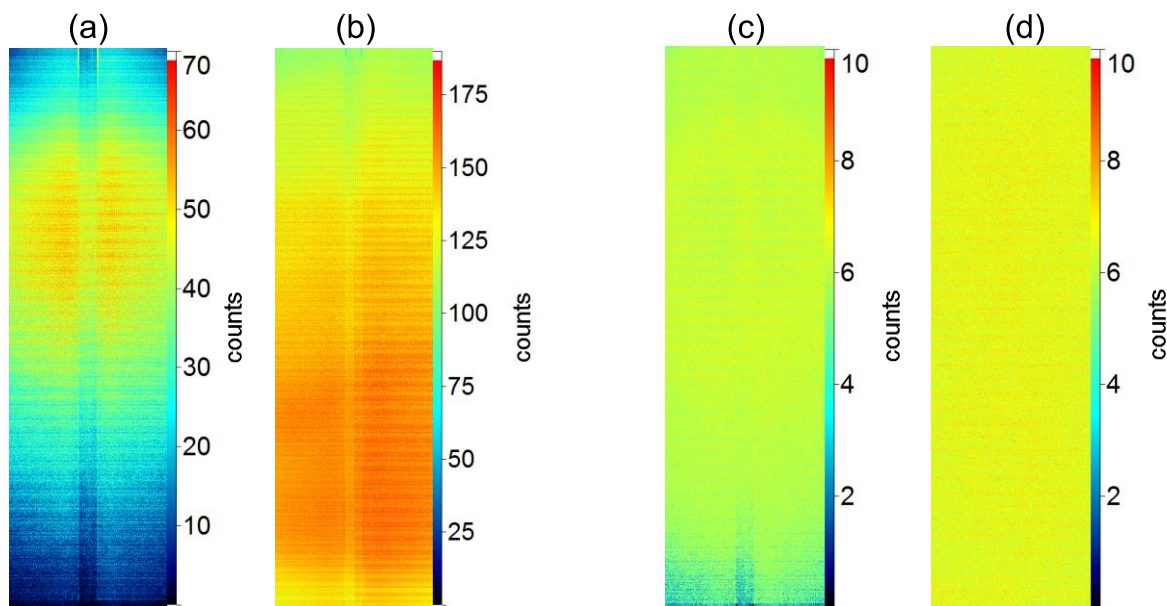


Abbildung 5-9: Ensemblemittel aus 100 Dunkelbilddaufnahmen mit (a) und ohne (b) IRO, Ensemble-Standardabweichung von 100 Dunkelbilddaufnahmen mit (c) und ohne (d) IRO mit IRO-Gain = 60.

Das Dunkelbildsignal der Kamera ohne IRO ist höher als das der Kamera mit IRO und der Mittelwert aller Bildpunkte beträgt 32 counts (mit IRO), bzw. 142 counts (ohne IRO). Die räumlich gemittelte Abweichung der 100 Dunkelbilder ist in beiden Bilderserien ähnlich und beträgt 5,9 counts (mit IRO), bzw. 6,6 counts (ohne IRO).

### IRO-Gain

Die Intensität des mit einer CMOS-Kamera detektierten Fluoreszenzlichts wird im KS-Kanal durch den IRO-Gain verstärkt. Abbildung 5-10 zeigt den Zusammenhang zwischen LIF-Intensität und IRO-Gain, sowie die resultierende Gainfunktion.

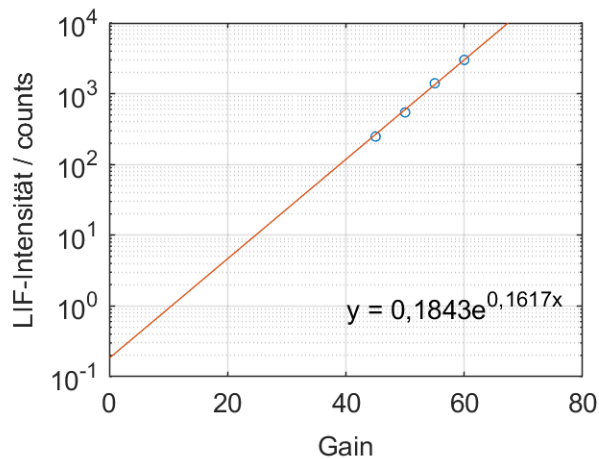


Abbildung 5-10: Zusammenhang zwischen LIF-Intensität und IRO-Gain.

Die Erhöhung des IRO-Gains um 5 Einheiten führt zu einer Signalverstärkung um Faktor 2,2. Die Signalverstärkung des IROs entspricht den Herstellerangaben [86].

Zur Bewertung des Rauschverhaltens für unterschiedliche IRO-Gains zeigt Abbildung 5-11 die Standardabweichung von 100 Dunkelbild-Aufnahmen für unterschiedliche Gainsettings (40-80).

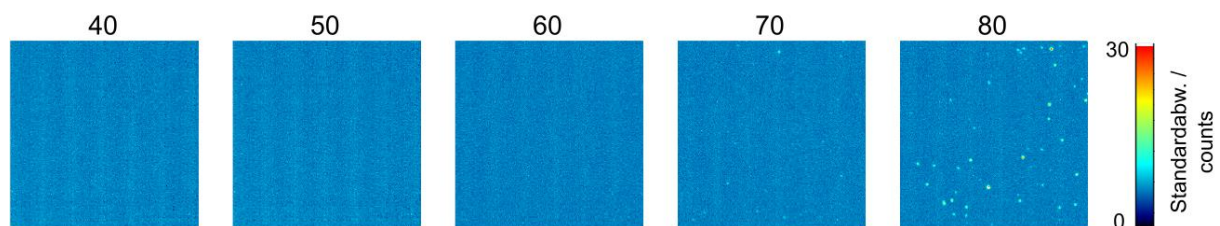


Abbildung 5-11: Standardabweichung von 100 Dunkelbildaufnahmen der CMOS-Kamera mit IRO in einem Bereich von 200 Pixel x 200 Pixel für unterschiedliche Gains (40-80).

Das mittlere Dunkelbildsignal (nicht dargestellt) liegt bei allen Gainsettings bei  $43,5 \pm 0,5$  counts und die mittlere Standardabweichung bei  $6,27 \pm 0,07$  counts. Bei Gainsettings oberhalb von 70 werden zusätzliche, stochastisch verteilte Signalerhöhungen detektiert. Durch die Elektronenvervielfachung des IROs wird bei höherem Gain das Rauschen des Dunkelbilds verstärkt [86].

### **Einfluss des IROs auf das räumliche Auflösungsvermögen der Kamera**

Der Bildverstärker beeinflusst das räumliche Auflösungsvermögen der Kamera (Vgl. Abbildung 2-12). Mit Hilfe der „slanted edge method“ wird die Modulationstransferfunktion (MTF) bestimmt, anhand derer eine Aussage über das Auflösungsvermögen der Kamera mit und ohne Bildverstärker (IRO) getroffen werden kann [135].



Hierzu wurde eine scharfe Kante mit einem Fühlerlehreband an der Fensterinnenseite des optischen Zylinders erzeugt. Die simultane Erzeugung von UV- und VIS-Fluoreszenzlicht erfolgte durch die simultane Anregung mit 266 nm- und 532 nm-Strahlung eines Hintergrundmaterials aus zwei Schichten. Dazu wurde eine im Transmissionsbereich des Langpassfilters (BLP01-532R) fluoreszierende Folie (Anregung mit 532 nm) hinter einer Plexiglas-Scheibe (Anregung mit 266 nm), die im UV-Bereich fluoresziert, installiert. Das Fühlerlehreband wurde zwischen dem Saphirfenster und der fluoreszierenden Folie installiert. Zur Erzeugung des Flachfelds wurde das Fühlerlehreband entfernt und die Fluoreszenz der beiden Hintergrundmaterialien detektiert. Die Hintergrundkorrektur erfolgte durch die Subtraktion des Ensemblemittels aus 100 Aufnahmen des optischen Zugangs nach Entfernung der Hintergrundmaterialien bei eingeschaltetem Laser. Abbildung 5-12 (oben) zeigt das Ergebnis dieses Versuchs. Die Aufnahmen (191 Pixel x 151 Pixel) sind die flachfeld- und hintergrundkorrigierten Ensemblemittel aus 300 LIF-Aufnahmen ohne (links) und mit (rechts) IRO. Im unteren Bereich der Abbildung sind die jeweiligen Modulationstransferfunktionen abgebildet.

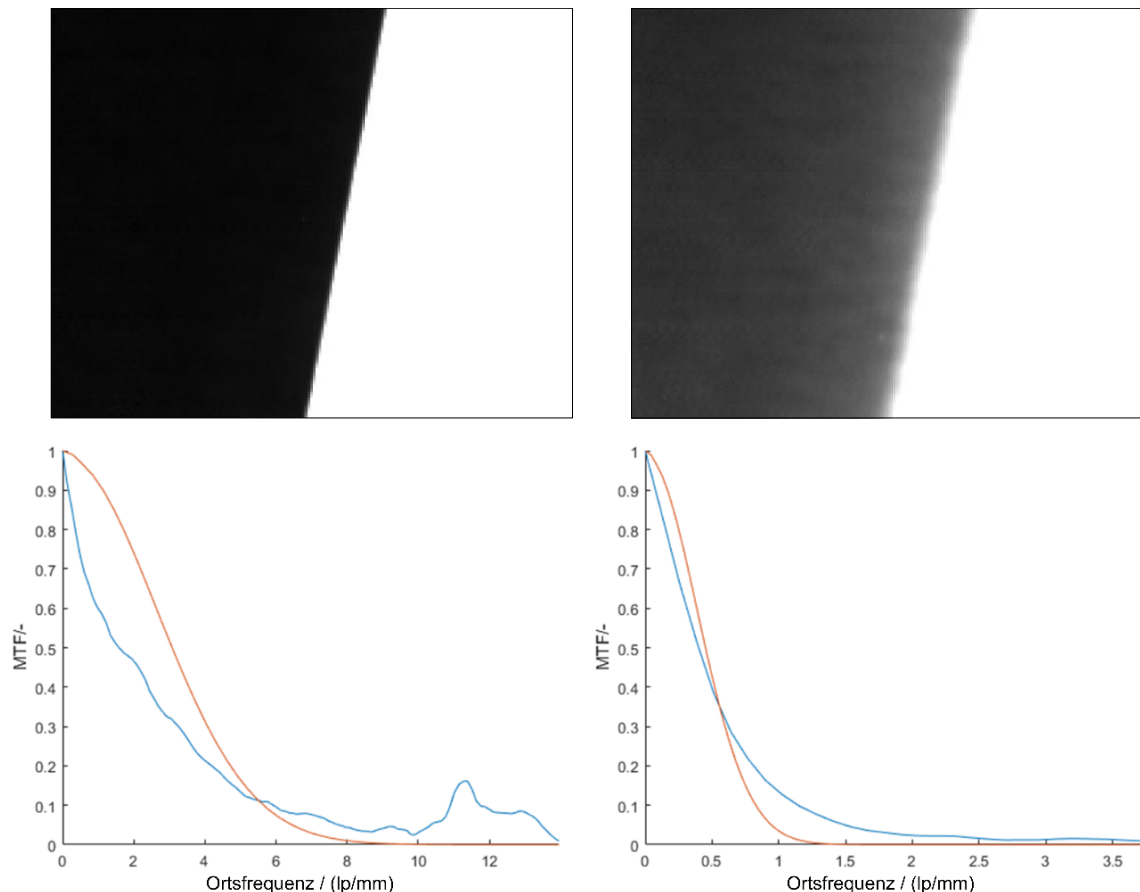


Abbildung 5-12: Vergleich der Auflösung einer scharfen Kante mit Phantom v.611 ohne (links) und mit (rechts) IRO. Oben: Hintergrund- und Flachfeld-korrigierte Ensemblemittel von 100 LIF-Aufnahmen. Unten: Modulationstransferfunktion (rote Linie: basierend auf Gauß-fit Line Spread Function, blaue Linie: basierend auf Line Spread Function) [136].

Frequenzen mit einem MTF Wert nahe Eins werden von der Kamera näherungsweise mit der originalen Modulation abgebildet. Mit zunehmender Frequenz nimmt die MTF ab und bei einem MTF-Wert von Null kann die Frequenz nicht mehr abgebildet werden. Die Frequenz entsprechend einem MTF-Wert von 0,5 kann zum Vergleich der Kamera mit und ohne IRO herangezogen werden. Aus dem Vergleich der Halbwertsbreite (FMHW) der beiden MTFs resultiert hier ein um Faktor 3,8 verringertes Auflösungsvermögen durch den IRO.

### Timing

Die Auslösung eines Laserpulses und die Bildaufnahme erfolgen im Motorversuch mit Hilfe der „Programmable Timing-Unit“ von LaVision [86]. Bei einer der maximalen Wiederholrate des Lasers von 10 kHz können kurbelwinkelaufgelöste Aufnahmen bei Motordrehzahlen bis  $1667 \text{ min}^{-1}$  getätigt werden. Bei höheren Drehzahlen wird der Abstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden LIF-Aufnahmen entsprechend der

Motordrehzahl um  $\Delta\alpha$  (°KW) vergrößert. Das Messsystem bietet außerdem die Möglichkeit phasengekoppelte Aufnahmen durchzuführen (Vgl. Kapitel 4).

## **5.2 Auswahl der Betriebsstoffe**

Zur simultanen Visualisierung von KS und Öl durch LIF unterliegen die Betriebsstoffe verschiedenen Anforderungen (Vgl. Kapitel 5.1.1). Im Folgenden werden die im Motorversuch verwendeten Kraft- und Schmierstoffe vorgestellt. Hierbei wird Kraftstoff(e) durch KS abgekürzt.

### **5.2.1 Iso-Oktan als Ersatzkraftstoff**

Zur Untersuchung von KS-Wandbenetzung durch LIF kommt bei der Verwendung von Toluol als LIF-Tracer (Vgl. Kapitel 5.1.1) der fluoreszenzfreie Ersatz-Kraftstoff iso-Oktan zum Einsatz [73, 75, 137]. Der Single-Tracer Ansatz erleichtert die systematische Untersuchung der photophysikalischen Eigenschaften. Somit konnten im Rahmen quantitativer Wandfilmuntersuchungen die Fluoreszenzeigenschaften hinsichtlich Quenching, Druck- und Temperatur untersucht werden [73]. Aufgrund des Molekulargewichts (Toluol: 92,14 g/mol, iso-Oktan: 114,23 g/mol) und der Dichte (Toluol: 0,865 g/cm<sup>3</sup>, iso-Oktan: 0,69 g/cm<sup>3</sup>) weisen beide Kohlenwasserstoffe ähnliche Siedetemperaturen (Toluol: 110 °C, iso-Oktan: 99 °C) auf, weshalb eine Co-evaporation angenommen wird. Im Vergleich zu anderen Modell-KS ist außerdem die Oktanzahl 100 von iso-Oktan zur Umsetzung realitätsnaher Zündzeitpunkte günstig für den Einsatz im befeuerten Motorbetrieb.

### **5.2.2 Multikomponenten-Kraftstoff**

Die Sprayeigenschaften eines in die Brennkammer eingespritzten KS werden u.a. durch die Eindringtiefe und die Aufweitung der Sprayfront charakterisiert und hängen von der KS-Zusammensetzung ab [123]. Abbildung 5-13 vergleicht die Schattenbilder der Sprays von kommerziellem KS (links) und iso-Oktan (rechts) nach der Einspritzung in eine optisch zugängliche Druckkammer.

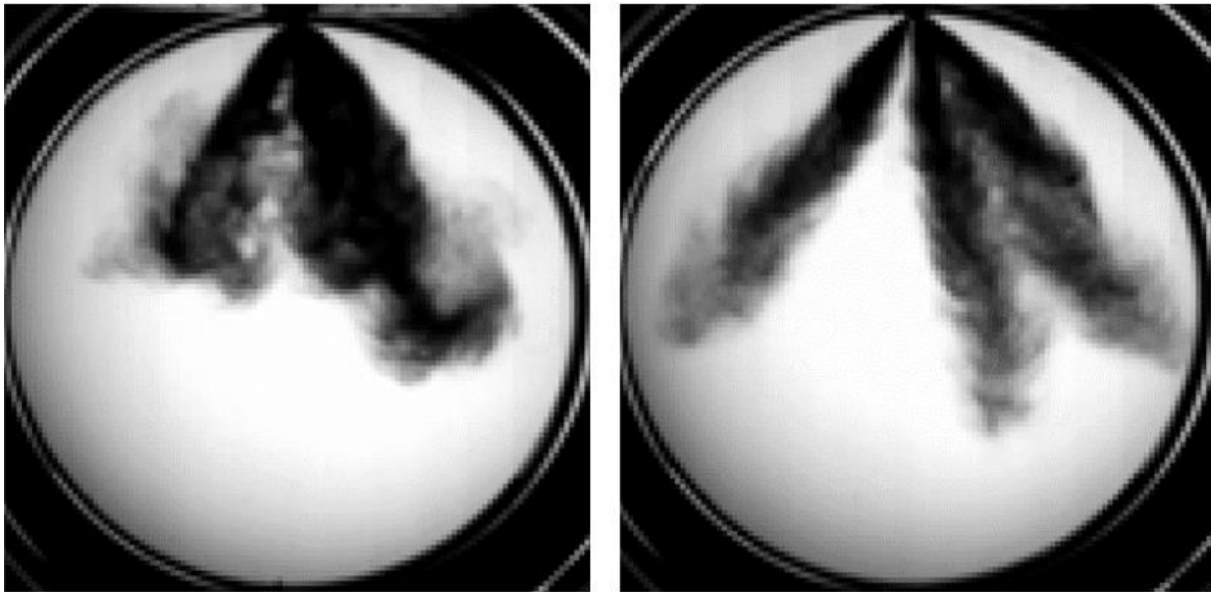


Abbildung 5-13: Spraybilder von kommerziellem Kraftstoff (links) und iso-Oktan (rechts) in einer Druckkammer durch Shadowgraphy [123].

Das Spraybild von kommerziellem KS ist im Vergleich zu iso-Oktan durch eine größere Aufweitung der Sprayfront und eine geringere Eindringtiefe in die Druckkammer gekennzeichnet. Der Vergleich der beiden KS verdeutlicht, dass iso-Oktan die Ausbreitung des Sprays in der Brennkammer und somit ggf. die KS-Wandbenetzung unter realen Motorbedingungen unzureichend abbildet. Außerdem hängt die Verdampfung des Wandfilms von der KS-Zusammensetzung ab.

In der Literatur sind daher unterschiedliche Multikomponenten-KS für LIF-Anwendungen dokumentiert. Tabelle 5-1 zeigt Komponenten verschiedener MKKS eingeteilt in drei Siedebereiche.

Tabelle 5-1: Übersicht der Komponenten verschiedener Multikomponenten-Kraftstoffe für LIF-Anwendungen.

Siedebereich [°C]	Williams et. al [123]	Styron et. al [124]	Andersson et. al [125]	Itani et. al [126]	VanDerWege et. al [127]
< 99	Butan	Iso-Pentan	Iso-Pentan	n-Pentan	2-Methylbutan
	Iso-Pentan	Hexan	Cyclopentan		Cyclopentan
99-170	Iso-Oktan	Iso-Oktan	Iso-Oktan	Iso-Oktan	Iso-Oktan
	n-Octan		Cyclooktan		Isopropylbenzol
> 170	Iso-Dodekan n-Dekan	n-Dekan	Decalin	n-Undekan	1,3-Diisopropylbenzol

Auf Grundlage von Tabelle 5-1 wurde ein Ersatz-KS entwickelt, der die Verdampfungseigenschaften und Dichte von kommerziellem KS (E10) möglichst gut abbildet, eine hohe Oktanzahl und keine Fluoreszenz im UV-Bereich aufweist.

Zur Vermeidung von Eigenfluoreszenz wurde auf aromatische Verbindungen und Moleküle mit Doppelbindungen verzichtet. Für die Anwendung des Ersatz-KS im optischen Einzylindermotor im aufgeladenen Betrieb ist die Klopfestigkeit entscheidend, um realitätsnahe Zündzeitpunkte zu realisieren. Daher wurden verzweigte Kohlenwasserstoffe (Isoparaffine) den unverzweigten n-Paraffinen aufgrund der höheren Oktanzahl [32] vorgezogen. Zusätzlich wurde dem Gemisch 10 % Ethanol beigemischt.

Eine Mischung aus 15 % iso-Pentan, 10 % Ethanol, 52,5 % iso-Oktan, 22,5 % iso-Dodekan wurde als geeigneter Multikomponenten-Ersatz-Kraftstoff (MKKS) identifiziert. Die Komponente iso-Dodekan weist nur eine 80 %ige Reinheit auf, d.h. dass Kohlenwasserstoffe mit mehr als 12 Kohlenstoffatomen zu einem Anteil von maximal 20 % enthalten sind.

Abbildung 5-14 vergleicht die Siedelinie eines kommerziellen E10-KS in Tankstellenqualität mit der des MKKS und den Siedepunkten der verwendeten Tracer. Bei Temperaturen oberhalb von 110 °C weichen die Siedelinien bis zu 10 % voneinander ab, insgesamt weisen die Linien einen sehr ähnlichen Siedeverlauf auf.

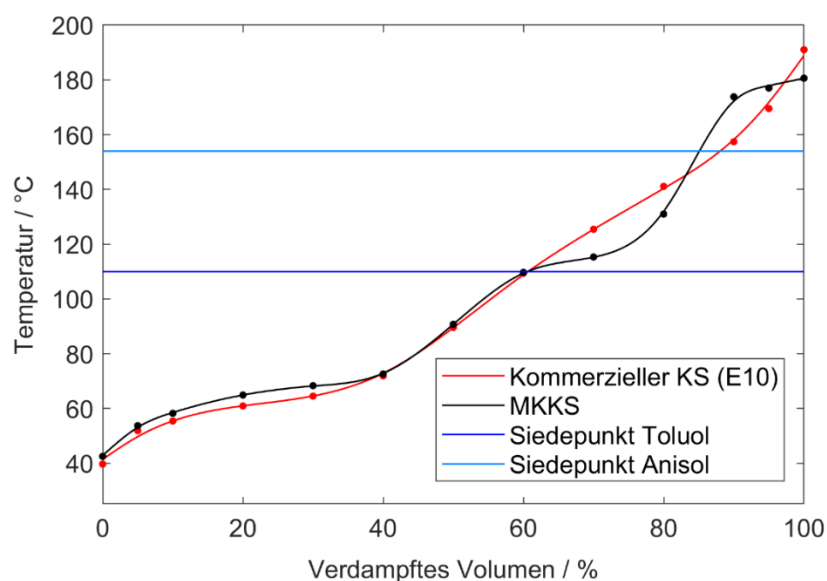


Abbildung 5-14: Siedelinie von kommerziellem Kraftstoff (KS) und Multikomponenten-Kraftstoff (MKKS) und Siedepunkte von Toluol und Anisol.

Tabelle 5-2 vergleicht die Materialeigenschaften des kommerziellen KS (E10), des MKKS und der verwendeten Tracer. Mit einer ROZ von 101 weist der MKKS eine sehr gute Klopfestigkeit auf.

Tabelle 5-2: Materialeigenschaften verschiedener Kraftstoffe und Tracer.

Eigenschaft	Kommerzieller KS (E10)	iso-Oktan	MKKS	Toluol [138]	Anisol [138]
Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	0,78	0,69	0,71	0,865	0,995
Siedepunkt oder -bereich [°C]	30-215	99	30-175	110	154
Research Oktan Zahl	>95	100	101*	116	103
Heizwert [MJ/kg]	41	47	45	35,27	33,19

\*gemessen

### 5.2.3 Surrogat-Öl

Kommerzielle Motoröle weisen eine natürliche Fluoreszenz auf, da in den Grundölen und Additivpaketen der Schmierstoffe u.a. aromatische Komponenten enthalten sind [63, 65]. Zur Vermeidung unerwünschter Wechselwirkung des Öls mit dem KS-Kanal wurden verschiedene Öle hinsichtlich der optischen Eigenschaften untersucht. Tabelle 5-3 vergleicht drei Surrogat-Öle (A, B, C) mit einem vollformulierten Serienöl (OEM-Öl).

Tabelle 5-3: Zusammensetzung verschiedener Öle.

Bestandteile	OEM-Öl	Öl A	Öl B	Öl C
Additive [%]	16,4	7	1	~0
Grundöl [%]	83,4	93 % (PAO)	99 % (PAO)	~100 % (PAO)

Das OEM-Öl weist den höchsten Additivanteil auf, die genaue Zusammensetzung des Grundöls ist unbekannt. Die Surrogat-Öle (A, B, C) bestehen größtenteils aus synthetischen Polyalphaolefinen (PAO), wobei Öl C nur Spuren von Additiven enthält.

### Spektrale Voruntersuchungen des Surrogat-Öls

Die Öle aus Tabelle 5-3 wurden hinsichtlich der spektralen Eigenschaften vom Institut für Verbrennung und Gasdynamik der Universität Duisburg-Essen (IVG) untersucht. Zur Untersuchung der Transmissionseigenschaften wurde ein Spektrophotometer eingesetzt, die Fluoreszenz wurde mit einem Spektrofluorometer bestimmt. Abbildung

5-15 zeigt links die wellenlängenabhängige Transmission unterschiedlicher Flüssigkeiten. Im rechten Teil der Abbildung ist die LIF-Intensität der Flüssigkeiten (Schichtdicke 20 µm) nach Anregung mit 266 nm dargestellt.

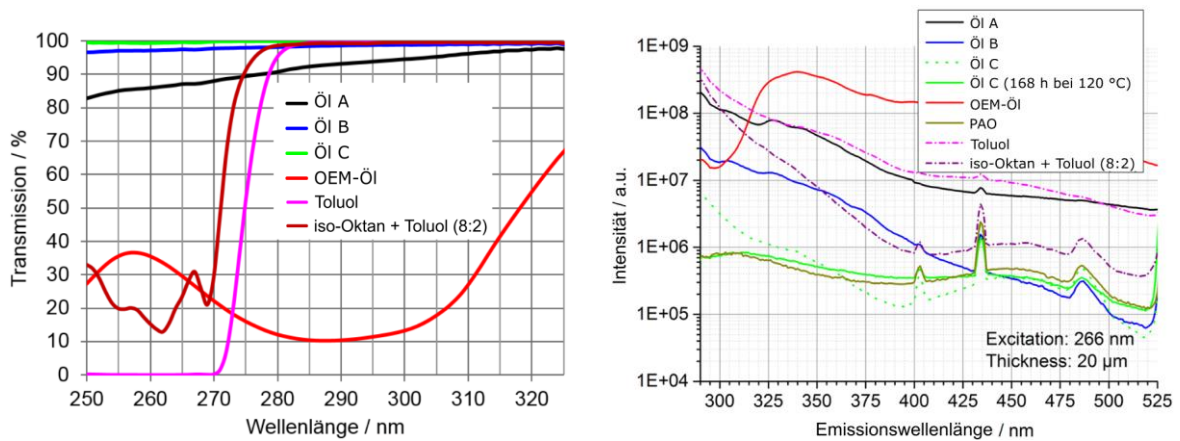


Abbildung 5-15: Wellenlängenabhängige Transmission unterschiedlicher Flüssigkeiten (links). LIF-Intensität unterschiedlicher Flüssigkeiten nach Anregung mit 266 nm (rechts) nach [139].

Im Bereich der Laseranregungswellenlänge (266 nm) weisen Öl B und Öl C eine Transparenz > 95 % auf. Die Transmission von Öl A liegt bei ca. 85 %, die des Serienöls und einer Mischung aus iso-Oktan/Toluol (8:2) bei ca. 30 %. Bei reinem Toluol wird keine 266 nm-Strahlung transmittiert.

Die Messungen von reinem Toluol und der Mischung iso-Oktan/Toluol wurden zur Einschätzung der KS-Fluoreszenzeigenschaften im Vergleich zur Fluoreszenz der verschiedenen Öle durchgeführt (rechtes Diagramm).

Die geringste Fluoreszenzintensität im Detektionsbereich des KS-Kanals ( $292 \pm 14$  nm) wird bei reinem PAO und einem über 168 h auf 120 °C erhitzten Öl C (zum Ausheizen der enthaltenen Aromate) detektiert. Frisches Öl C, Öl B und OEM-Öl liegen im mittleren Intensitätsbereich, die Fluoreszenzintensität von Öl A liegt in der Größenordnung von Toluol und iso-Oktan/Toluol.

Im Folgenden wird eine Mischung aus Öl C mit 0,1 mmol/L Pyrromethen 567 hinsichtlich der Fluoreszenzeigenschaften untersucht. Abbildung 5-16 zeigt links die Emissionsspektren von Öl C mit unterschiedlichen Zusätzen nach Anregung mit 266 nm. Im rechten Teil der Abbildung ist das Fluoreszenzspektrum der Öle nach Anregung mit 532 nm dargestellt.

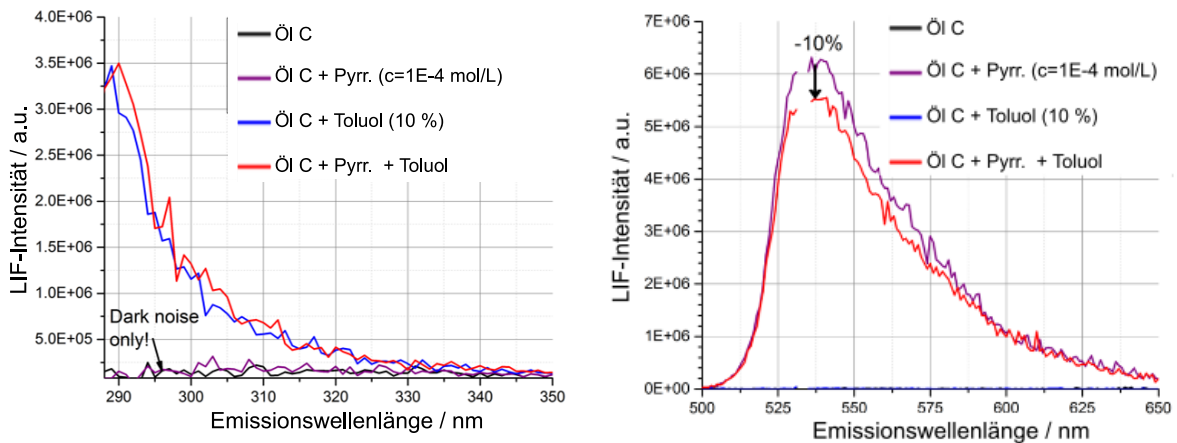


Abbildung 5-16: Emissionsspektrum von Öl C mit unterschiedlichen Zusätzen im UV-Bereich nach Anregung mit 266 nm (links). Emissionsspektrum von Öl C mit unterschiedlichen Zusätzen nach Anregung mit 532 nm im VIS-Bereich (rechts) nach [139].

Die Fluoreszenz von Öl C und Öl C mit Pyrromethen nach Anregung mit 266 nm weisen kaum Unterschiede im Detektionsbereich des KS-Kanals ( $292 \pm 14$  nm) auf (linkes Diagramm). Die Mischung mit Toluol führt in beiden Fällen zu einem Signalanstieg gleicher Ausprägung.

Im Wellenlängenbereich zwischen 500-650 nm (rechtes Diagramm, nach Anregung mit 532 nm) wurde keine Eigenfluoreszenz von Öl C und Öl C mit Toluol detektiert. Öl C mit Pyrromethen fluoresziert, wobei die maximale Fluoreszenz oberhalb von 530 nm liegt (Vgl. Abbildung 4-1). Eine Mischung aus Öl C mit Pyrromethen und 10 % Toluol führt zu einer Abnahme der maximalen Intensität um ca. 10 %.

Eine Mischung aus Öl C und 0,1 mmol/L Pyrromethen 567 weist günstige Eigenschaften hinsichtlich Transmissions- und Fluoreszenzeigenschaften auf: Strahlung im UV-Bereich wird transmittiert und das Öl weist die niedrigste Eigenfluoreszenz der untersuchten Öle im UV-Bereich auf. Allerdings kann die niedrige Additivierung negative Auswirkungen auf die tribologischen Eigenschaften haben (Vgl. Kapitel 2.2). Zur tribologischen Absicherung wird Öl C im Folgenden in einem Modelltest mit dem Serienöl (OEM-Öl) verglichen.

### Tribologische Absicherung des Surrogat-Öls (Öl C)

Die tribologische Überprüfung der Öle erfolgte im Schwing-Reib-Verschleiß-Tribometer [15]. Abbildung 5-17 zeigt die Photographie des Modellprüfstands und der Versuchsmaterialien.



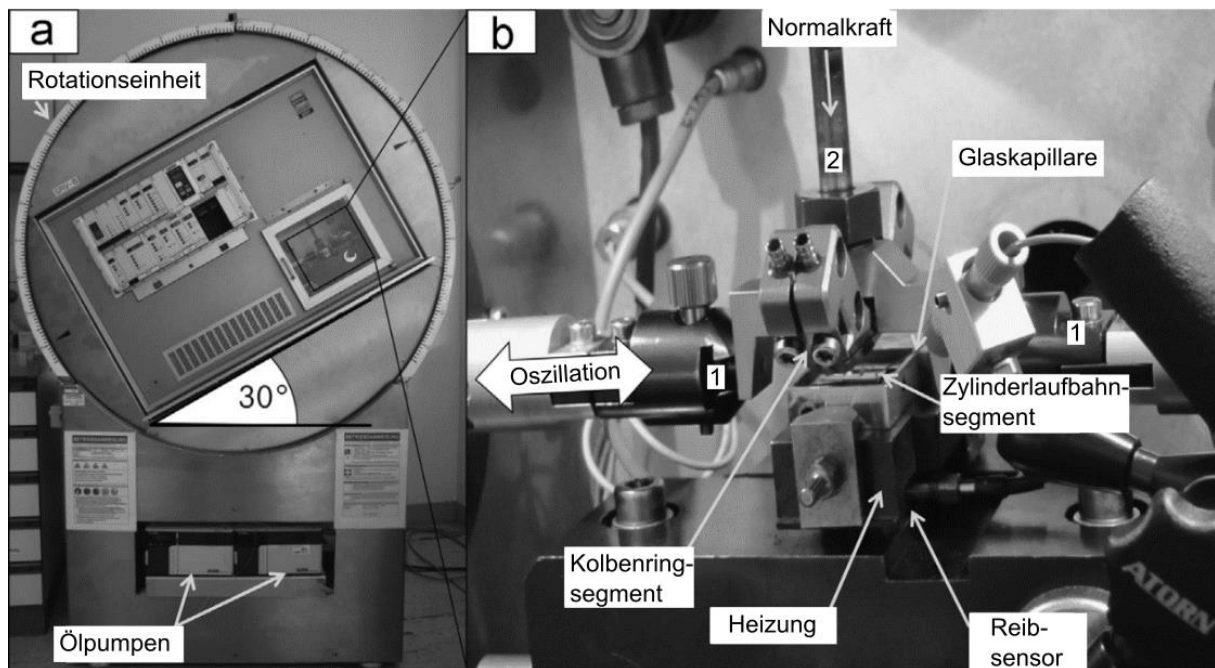


Abbildung 5-17: (a) SRV®3-Tribometer um 30 ° rotiert. (b) Prüfzelle mit Zylinderliner-Segment, Kolbenring-Segment und Kapillare zur Ölzufuhr [15].

Im Modelltest werden Segmente von Zylinderlaufbahnen (Grundkörper) und Kolbenringen (Gegenkörper) aus dem Serienmotor eingesetzt. Die Ringsegmenthalter sind seitlich mit den Antriebsarmen (1) verschraubt und werden mit der Normalkraft  $F_N$  über die Schubstange (2) beaufschlagt. Durch einen Elektromotor erfolgt die oszillierende Bewegung des Gegenkörpers (Kolbenring) gegen das Laufbahnsegment. Durch die 30° Schrägstellung der Versuchsanordnung wird mit einer Glaskapillare die Zufuhr von Schmiermittel realisiert. Die Versuchsdurchführung erfolgt unter definierten Bedingungen hinsichtlich Temperatur, Weg, Last und Ölzufuhr. Mit diesem Versuchsaufbau und einer definierten Testprozedur kann das Fressverhalten verschiedener Tribopartner anhand der ertragbaren Last in Abhängigkeit der Temperatur bestimmt werden. Die ertragbare Last ist folgendermaßen definiert: Bei konstanter Last, Temperatur, Weg und Ölzufuhr verbleibt der Reibwert von drei Versuchen über eine Versuchsdauer von 6 h unterhalb von 0,3. Weitere Details zur Testprozedur und Bestimmung der ertragbaren Last sind in [15] ausführlich dargestellt.

Abbildung 5-18 zeigt die ertragbare Last in Abhängigkeit der Temperatur für Öl C, OEM-Öl und OEM-Öl mit Pyrrromethen 567.

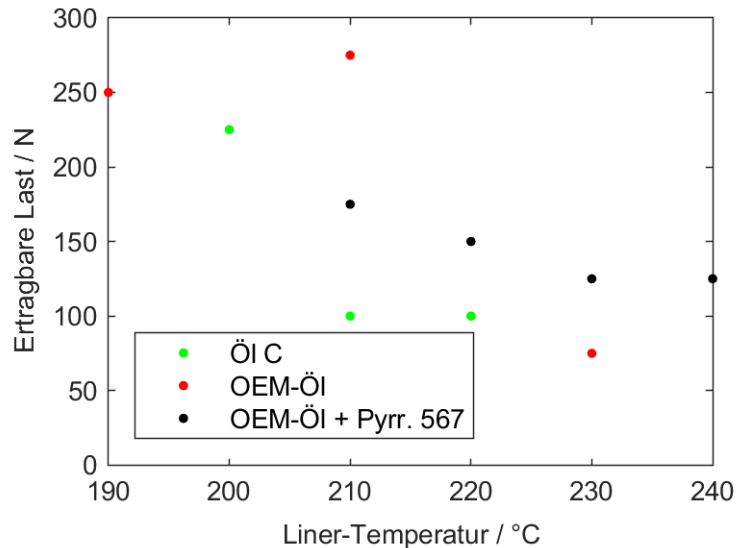


Abbildung 5-18: Ertragbare Last verschiedener Öle in Abhängigkeit der Liner-Temperatur [82].

Die ertragbare Last der Öle nimmt mit steigender Temperatur ab. Die maximal ertragbare Last von Öl C beträgt 100 N bei 220 °C. Das untersuchte OEM-Öl erreicht 75 N bei 230 °C, OEM-Öl mit Pyrrmethen 567 erreicht 125 N bei 240 °C. Nach [15] ist u.a. die Temperatur entscheidend für das Fressverhalten eines Öls. Hier liegt die Temperatur bei der die ertragbare Last von Öl C erreicht wird nur 10 °C unterhalb vom OEM Öl. Außerdem konnte kein negativer Einfluss des Farbstoffs auf das Fressverhalten vom OEM-Öl festgestellt werden.

Öl C mit Pyrrmethen 567 erwies sich durch spektrale Untersuchungen und die tribologische Überprüfung als gut geeignet für den Einsatz im optischen Einzylindermotor.

### 5.3 Voruntersuchungen der Tracer-LIF, Verdampfungsverhalten des Multikomponenten-Kraftstoffs und cross-talk

Im Folgenden werden zunächst die verwendeten Tracer Toluol und Anisol optisch untersucht und das Verdampfungsverhalten des MKKS bewertet. Danach wird das LIF-Messsystem hinsichtlich des optischen Übersprechens von KS- und Öl-Kanal (cross-talk) überprüft.

#### 5.3.1 Charakterisierung der Tracer-LIF

Hohe Tracer-Konzentrationen können zu Effekten wie Sättigung [72, 73] und Selbst-Quenching [140] führen. Die KS-Tracer Toluol und Anisol wurden hinsichtlich des Fluoreszenzverhaltens nach Anregung mit 266 nm in der Dünnschichtküvette (Abbildung

4-6) bei Raumtemperatur und verschiedenen Schichtdicken ( $d = 10\text{-}100\ \mu\text{m}$ ) untersucht. Zur Verdünnung der Tracer wurden die Ersatz-KS verwendet, wobei Toluol mit iso-Oktan und Anisol mit MKKS gemischt wurden. Die Konzentration der Toluol/iso-Oktan-Mischung wurde zwischen  $c = 0,075\text{-}0,768\ \text{mol/dm}^3$ , die der Anisol/MKKS-Mischung zwischen  $c = 0,005\text{-}0,066\ \text{mol/dm}^3$  variiert.

Die Bildverarbeitung umfasst die Bestimmung des Ensemblemittels aus 275 hintergrundkorrigierten LIF-Aufnahmen. Zur Hintergrundkorrektur wurde die Küvette mit purem Ersatz-KS gefüllt, wobei keiner der Ersatz-KS eine Eigenfluoreszenz aufweist. Ein skalarer LIF-Intensitätswert wird durch das räumliche Mittel in einem Auswertebereich von 65 Pixel x 65 Pixel gewonnen.

Abbildung 5-19 zeigt die Ergebnisse für iso-Oktan mit Toluol (links) und MKKS mit Anisol (rechts) als Funktion des Produkts von Konzentration  $c$  und Schichtdicke  $d$ . Die LIF-Intensität ist jeweils auf den maximalen Kamera Read-out (4096) dividiert durch 1000 counts normiert. Gleichung 2.6 wird mit den Parametern  $a$  ( $= \Phi_f \Phi_{\text{det}l_0}$ ) und  $\varepsilon$  auf den kompletten Datensatz gefittet (durchgezogene Linie). Außerdem ist das linearisierte Lambert-Beersche-Gesetz (Gleichung 2.7) mit den Fittingparametern  $a$  und  $\varepsilon$  geplottet (gestrichelte Linie).

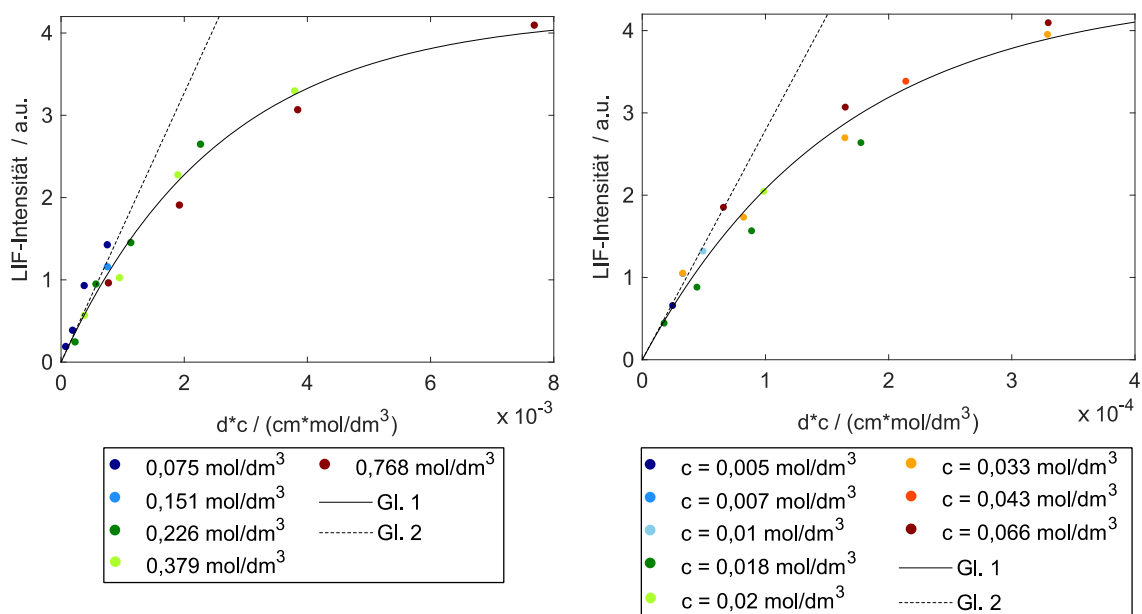


Abbildung 5-19: Variation der Schichtdicke  $d$  und Konzentration  $c$ . Durchgezogene Linie: Globaler fit gemäß Gleichung 2.6, gestrichelte Linie: Gleichung 2.7 mit den Fit-Parametern aus Gleichung 2.6 für Toluol in iso-Oktan (links) und Anisol in MKKS (rechts).

In beiden Fällen weisen die globalen Fittings einen nicht-linearen Verlauf auf. Der Absorptionskoeffizient von Toluol  $\varepsilon_{\text{Toluol}}$  beträgt  $387,1\ \text{dm}^3/(\text{cm}\cdot\text{mol})$  und liegt im

Bereich der Literaturwerte  $190 \text{ dm}^3/(\text{cm}\cdot\text{mol})$  [130],  $280 \text{ dm}^3/(\text{cm}\cdot\text{mol})$  [137] und  $538,3 \text{ dm}^3/(\text{cm}\cdot\text{mol})$  [73]. Der Absorptionskoeffizient von Anisol beträgt  $\epsilon_{\text{Anisol}} = 6237 \text{ dm}^3/(\text{cm}\cdot\text{mol})$ . Damit ist der Absorptionskoeffizient von Anisol um Faktor 16 höher als der von Toluol, aus Berlman [130] geht ein Faktor von ca. 8 hervor. Die höhere Quanteneffizienz [128, 130, 131, 141] führt zu einer stärkeren Fluoreszenz von Anisol verglichen mit Toluol.

Für die Motorversuche wurden 3 Masse-% Toluol in iso-Oktan und 0,5 Masse-% Anisol in MKKS gewählt. Hieraus resultiert bei der iso-Oktan/Toluol-Mischung eine Abweichung des nicht-linearen Lambert-Beer-Zusammenhangs von der linearen Annäherung von ca. 10 % bei  $25 \mu\text{m}$ , 19 % bei  $50 \mu\text{m}$  und 33 % bei  $100 \mu\text{m}$ . Bei der Anisol/MKKS-Mischung beträgt die Abweichung 22 % bei  $25 \mu\text{m}$ , 38 % bei  $50 \mu\text{m}$  und 58 % bei  $100 \mu\text{m}$ .

Die LIF-Intensität von KS-Tracern ist temperaturabhängig [75]. Toluol und Anisol wurden hinsichtlich der temperaturabhängigen Fluoreszenz zwischen  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  und dem jeweiligen Siedepunkt (Toluol:  $111 \text{ }^\circ\text{C}$ , Anisol:  $154 \text{ }^\circ\text{C}$ ) untersucht. Die Tracer-Konzentrationen waren 3 Masse-% Toluol in iso-Oktan und 0,5 Masse-% Anisol in iso-Dodekan an Stelle von MKKS, die Schichtdicke betrug  $50 \mu\text{m}$ . Zur Vermeidung von Dampfblasenbildung wurde die Dünnschichtküvette mit 3 bar Stickstoff beaufschlagt. Abbildung 5-20 zeigt die Ergebnisse dieses Versuchs.

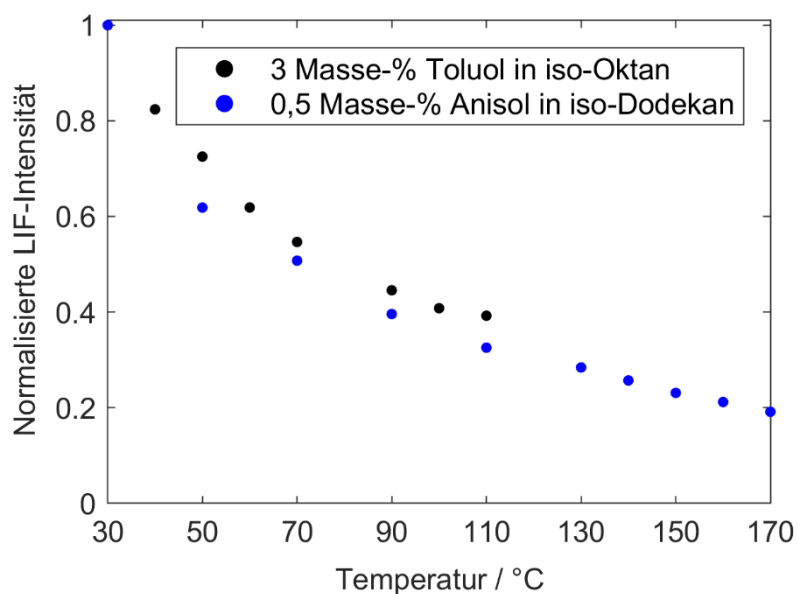


Abbildung 5-20: Temperaturabhängigkeit der Toluol- und Anisol-Fluoreszenz bei 3 bar. LIF-Intensitäten sind auf den Wert bei  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  normiert.

Die Daten sind auf den jeweiligen Wert bei 30 °C normiert. Beide Tracer weisen einen ähnlichen Abfall der LIF-Intensität mit steigender Temperatur auf. Das Signal sinkt auf ca. 50 % bei einer Temperatur von 70 °C. Am Siedepunkt beträgt das Toluol-Signal 40 % vom Ausgangswert. Geiler et. al [73] dokumentiert 20 % Restsignal bei der gleichen Temperatur, allerdings bei einer geringeren Toluol-Konzentration (0,5 vol-%). Anisol weist ein Restsignal von 20 % am Siedepunkt auf, der jedoch mit 154 °C deutlich höher liegt (Toluol = 110 °C).

### 5.3.2 Verdampfungsverhalten des Multikomponenten-Kraftstoffs

Die Zusammensetzung des MKKS kann während der Verdampfung aufgrund unterschiedlicher Eigenschaften der Einzelkomponenten variieren. Zur Untersuchung der Verdampfungseigenschaften wurde eine Mischung aus MKKS mit 0,5 % Anisol im Temperaturbereich 30-170 °C in einem offenen Gefäß unter Umgebungsdruck erhitzt. Die Temperatur wurde langsam erhöht und Proben der verbleibenden Flüssigphase im Abstand von 20 °C entnommen. Die Mischungs-Zusammensetzung der Proben wurde mit einem Gas-Chromatograph mit Massenspektrometer (GC-MS, Agilent Technologies 7890B GC Systems) von der Abteilung „Chemische Analytik“ (Daimler AG) bestimmt. Abbildung 5-21 zeigt das Massenspektrum der Probe bei 50 °C.

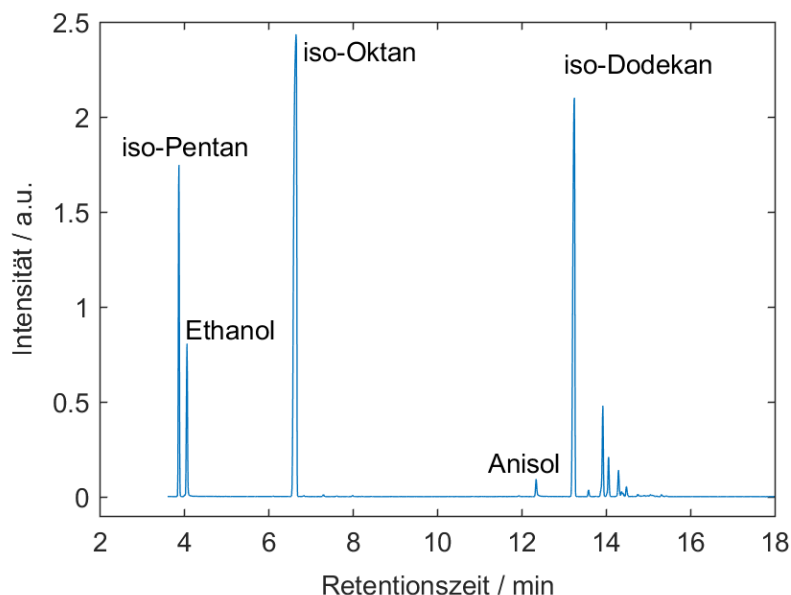


Abbildung 5-21: Massenspektrum des MKKS mit Anisol nach Aufheizen auf 50 °C gemessen mit einem Gas-Chromatographie mit Massenspektrometrie (GC/MS) [82].

Die Komponenten des MKKS können eindeutig unterschieden werden. Im Detektionsbereich oberhalb von 12,5 min werden mehrere Peaks identifiziert, was auf

die 80 %ige Reinheit der iso-Dodekan-Mischung (Vgl. Kapitel 5.2.2) zurückzuführen ist. Im Folgenden werden diese Peaks unter „iso-Dodekan“ zusammengefasst.

Die Konzentration der Einzelkomponenten im Gemisch erfolgt durch die Bestimmung des Flächenanteils eines Einzelpeaks an der Gesamtfläche. Die Mischungs-Zusammensetzungen der Proben in Abhängigkeit von der Temperatur zeigt Abbildung 5-22 links. Im rechten Teil der Abbildung werden die resultierenden LIF-Intensitäten des Gemischs in Abhängigkeit der Temperatur mit den Ergebnissen aus Abbildung 5-20 verglichen.

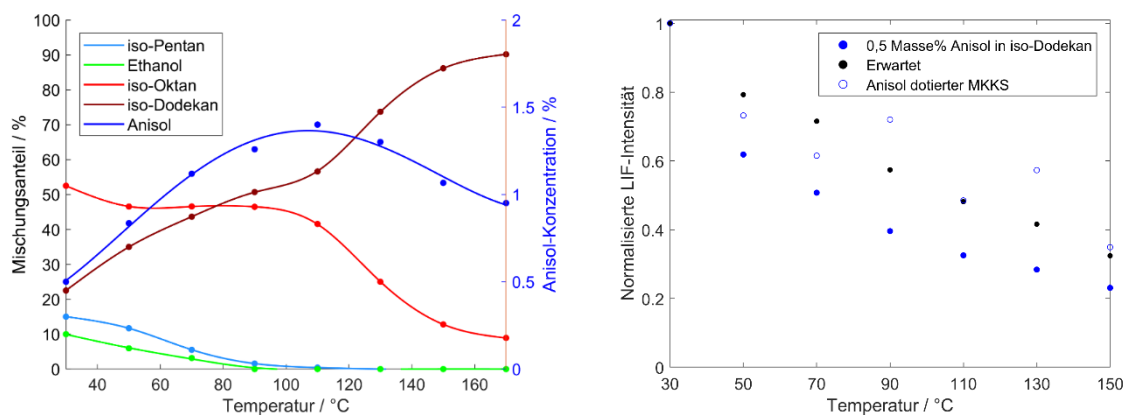


Abbildung 5-22: Links: Zusammensetzung des MKKS mit Anisol bei unterschiedlichen Temperaturen gemessen mit GC/MS. Rechts: Temperaturabhängigkeit der LIF-Intensität von MKKS/Anisol, iso-Dodekan/Anisol aus Abbildung 5-20 und erwartete Intensität (Erläuterung im Text). Die LIF-Intensitäten sind auf den Wert bei 30 °C normiert.

Iso-Pentan und Ethanol verdampfen bei Temperaturen unterhalb von 90 °C und sind bei Temperaturen oberhalb von 90-110 °C nicht mehr in der Mischung enthalten. Die Anisol-Konzentration steigt und erreicht bei 110 °C das Maximum (1,4 %). Im Bereich zwischen 110-140 °C sinken die Konzentrationen von iso-Oktan und Anisol. Am Siedende beinhaltet die Mischung 90 % iso-Dodekan, 9 % iso-Oktan und 1 % Anisol.

Anhand der Anisol-Konzentrationen im Gemisch kann die erwartete LIF-Intensität in Abhängigkeit der Temperatur berechnet werden. Hierzu werden die Anisol-Konzentrationen aus Abbildung 5-22 (links) in Gleichung 2.6 (mit  $d = 50 \mu\text{m}$ ;  $a = 4,473$ ;  $\epsilon_{\text{Anisol}} = 6237 \text{ dm}^3/(\text{cm}\cdot\text{mol})$ ) eingesetzt und auf den Wert bei 30 °C normiert.

Die LIF-Intensitäten des Anisol-dotierten MKKS und die erwartete Intensität liegen über dem gesamten Temperaturbereich oberhalb der Anisol/iso-Dodekan-Mischung. Der Anstieg der Anisol-Konzentration in der verbleibenden Flüssigphase des MKKS während der Verdampfung führt zu einem relativen Anstieg der LIF-Intensität. In diesem Experiment unter Quasi-Gleichgewichts-Bedingungen wird die temperatur-

bedingte Fluoreszenzabnahme bei konstanter Anisol-Konzentration durch den Konzentrationsanstieg im MKKS teilweise kompensiert. Bei der Verdampfung realer KS-Wandfilme sind Verdampfung und Temperatur weniger gekoppelt und diese Teilkompensation weicht ab. Allerdings sollte bei der Verwendung des MKKS der Zusammenhang zwischen Anstieg der Filmtemperatur und Verdampfung prinzipiell bestehen. Die Kompensation der temperaturabhängigen Fluoreszenzabnahme der MKKS/Anisol-Mischung bietet hierdurch Vorteile gegenüber der iso-Oktan/Toluol-Mischung, bei der kein Anstieg der Toluolkonzentration während der Verdampfung zu erwarten ist.

### **5.3.3 Cross-talk**

Bei der Anwendung von Multi-Tracer Ansätzen und der Verwendung mehrerer Kameras kann es zu Wechselwirkungen zwischen den optischen Kanälen (cross-talk) kommen [126, 142]. Im Folgenden wird das optische Messsystem hinsichtlich des unerwünschten Übersprechens von Öl- und KS-Kanal untersucht.

#### **Cross-talk I: Reflektion und Streuung des Anregungslichts und Hintergrundaufnahmen**

Abbildung 5-23 zeigt die dunkelbildkorrigierten (Vgl. Abbildung 5-9) Ensembledaten aus 100 Aufnahmen im KS- und Öl-Kanal nach unterschiedlicher Anregung. Die Aufnahmen wurden im leeren Zylinderrohr mit ausgebautem Kolben und in Abwesenheit von Öl und Kraftstoff durchgeführt.

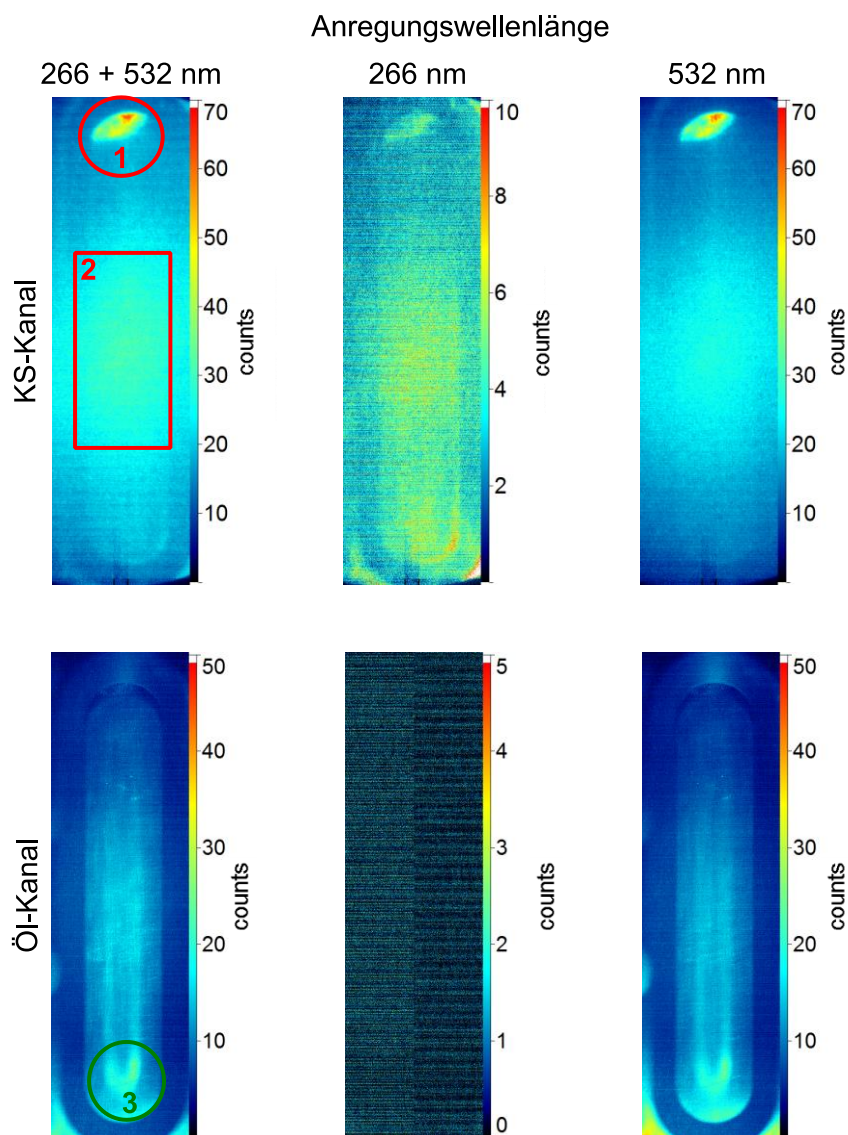


Abbildung 5-23: Dunkelbildkorrigierte Ensemblemittel aus 100 Hintergrund-Aufnahmen des optischen Zugangs nach unterschiedlicher Anregung mit ausgebautem Kolben im KS-Kanal (oben) und Öl-Kanal (unten).

Die Aufnahme nach Anregung mit 266 nm und 532 nm entspricht dem Zustand im Experiment. Hierbei ist in beiden Kanälen eine Abweichung des Hintergrunds vom Dunkelbild erkennbar. Durch die Blockung der einzelnen Wellenlängen kann bestimmt werden, welche Anregungswellenlänge den Detektor erreicht. Hierbei wird deutlich, dass das Signal in beiden Kanälen hauptsächlich durch die 532 nm-Strahlung verursacht wird. Im KS-Kanal resultiert die Belichtung im oberen Messbereich (1) in einer maximalen Signalerhöhung im Vergleich zum Dunkelbild um Faktor 2,2, im mittleren Messbereich (2) beträgt der Faktor 1,6. Im unteren Messbereich im Öl-Kanal (3) beträgt der Faktor 1,2. Spätere Untersuchungen haben gezeigt, dass die Signalerhöhungen in den Bereichen 1-3 durch Veränderungen der Ausleuchtung des optischen Zugangs reduziert werden können, ohne die Beleuchtung an der



Fensterinnenseite zu verändern. Dies führt zu der Schlussfolgerung, dass die detektierten Signalerhöhungen durch direkte Reflexionen des Anregungslichts und nicht durch Eigenfluoreszenz des Saphirfensters hervorgerufen werden.

### Cross-talk II: Übersprechen von Öl-LIF in den KS-Kanal

In Abschnitt 5.2.3 wurden die optischen Eigenschaften unterschiedlicher Öle und deren Wechselwirkung mit Tracer-dotiertem Ersatz-KS anhand von Spektrometermessungen bewertet. Im Folgenden werden unterschiedliche Öl/KS-Kombinationen im KS-Kanal unter motorischen Bedingungen im optischen Einzylinderaggregat und in der Dünnfilmküvette untersucht.

Abbildung 5-24 zeigt hintergrundkorrigierte LIF-Aufnahmen im KS-Kanal im geschleppten Motorbetrieb (100 °KW v.ZOT) in Abwesenheit von Kraftstoff. Im linken Bild war der Ölkreislauf mit OEM-Öl mit  $0,015 \pm 0,005$  mmol/L Pyrromethen 567 (im Folgenden als OEM-Öl\* bezeichnet) befüllt. Das rechte Bild wurde nach Austausch des OEM-Öls\* durch Öl C mit  $0,015 \pm 0,005$  mmol/L Pyrromethen 567 (im Folgenden als Öl C\* bezeichnet) aufgenommen.

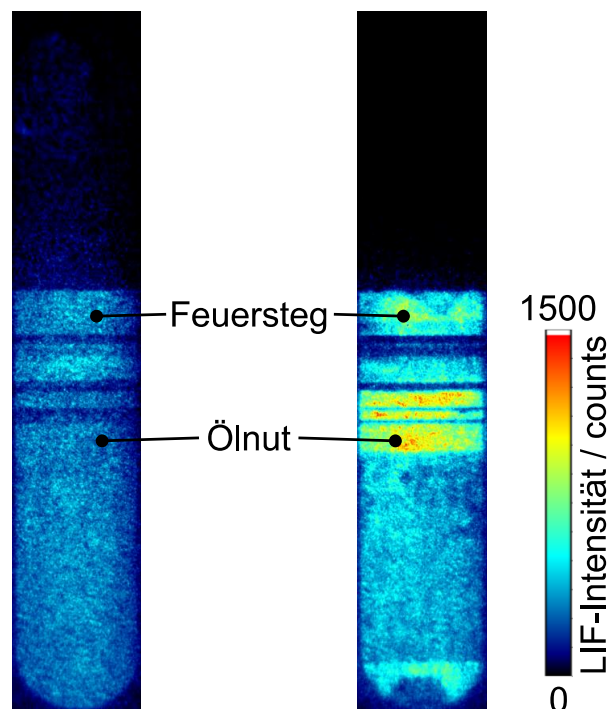


Abbildung 5-24: LIF-Aufnahme (KS-Kanal) im geschleppten Motorbetrieb (ohne KS-Einspritzung) bei 100 °KW v.ZOT nach Anregung mit 266 nm. Links: OEM-Öl\* (OEM-Öl mit  $0,015 \pm 0,005$  mmol/L Pyrromethen 567 in Einzylindermotor), rechts: Öl C\* (Öl C mit  $0,015 \pm 0,005$  mmol/L Pyrromethen 567 in Einzylindermotor). Hintergrundkorrektur gemäß Abbildung 5-23.

Die Ölverteilung in der Kolbengruppe ist aus Kapitel 4 bekannt. OEM-Öl\* (links) führt zu einer homogenen Intensitätsverteilung im Bereich des Kolbens und die

charakteristischen Bereiche (Ölnut und Ringstege) sind durch ein ähnliches Signalniveau gekennzeichnet. Öl C\* (rechts) führt zu einer höheren LIF-Intensität im Bereich großer Ölvolumina (Ölnut, 3. Ringsteg) und auch im Bereich des Feuerstegs wird Öl-LIF detektiert. Die höhere Fluoreszenz von Öl C\* widerspricht den Erwartungen aus Abbildung 5-15 (rechts), wonach eine geringere Fluoreszenz von Öl C\* im Vergleich zu OEM-Öl\* zu erwarten ist. Daher wurden weitere Untersuchungen in der Dünnschichtkuvette mit einer eingestellten Schichtdicke  $d = 50 \mu\text{m}$  mit Hintergrundkorrektur entsprechend Abbildung 4-8 durchgeführt. Abbildung 5-25 zeigt die LIF-Intensität von OEM-Öl gemischt in frischem Öl C. Die gestrichelte Linie entspricht der LIF-Intensität von Öl C\* aus dem Ölkreislauf des Motors (Vgl. Abbildung 5-24 rechts). Die LIF-Intensität von reinem Öl C, bzw. 0 Vol.-% OEM-Öl ist auf den Wert 1 normiert.

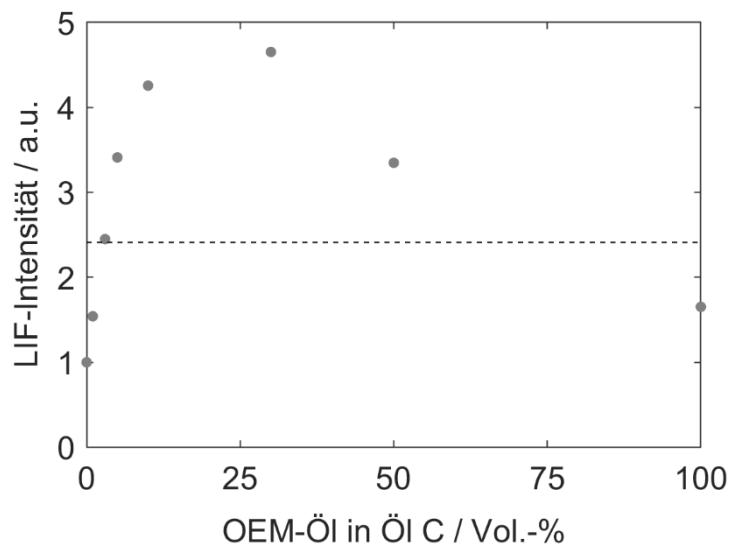


Abbildung 5-25: LIF-Intensität von frischem OEM-Öl gemischt in frischem Öl C detektiert im KS-Kanal nach Anregung mit 266 nm. Gestrichelte Linie: LIF-Intensität von Öl C\*. LIF-Intensitäten sind auf den Wert von 0 Vol.-% OEM-Öl normiert.

Die LIF-Intensität von reinem OEM-Öl ist um Faktor 1,7 höher verglichen mit frischem Öl C. Allerdings steigt die LIF-Intensität von Öl C mit zunehmender OEM-Öl-Konzentration an. Die maximale Intensität wird bei 30 Vol.-% detektiert. Bei einer Konzentration von 50 Vol.-% liegt die LIF-Intensität im Bereich des Signals bei 5 Vol.-%. Öl C\* (Öl C mit Pyromethen entnommen aus dem Ölkreislauf des Einzylindermotors) liefert ein um Faktor 2,4 erhöhtes Signal verglichen mit frischem Öl C.

Die Ergebnisse bestätigen die Erkenntnisse aus Abbildung 5-15, da frisches Öl C eine geringere Fluoreszenz aufweist als OEM-Öl. Mit diesem Experiment kann auch das unerwartete Ergebnis aus Abbildung 5-24 erklärt werden. Geringe Konzentrationen

von OEM-Öl in Öl C, z.B. durch Ölreste im Kreislauf des Einzylindermotors, führen zu einer Erhöhung der LIF-Intensität. Die Konzentration von OEM-Öl in Öl C im Ölkreislauf beträgt demnach ca. 3 Vol.-%. Mögliche Ursachen für die Abnahme der Fluoreszenz bei Konzentrationen oberhalb von 30 Vol.-% sind die geringe Transmission von OEM-Öl in diesem Wellenlängenbereich (Vgl. Abbildung 5-15), bzw. Selbst-Quenching oder Re-Absorption [140]. Hieraus resultiert das über den Kolben und somit über unterschiedliche Ölfilmstärken homogene Signal in Abbildung 5-24 links.

Durch die Transmissions- und Fluoreszenzeigenschaften von OEM-Öl\* und Öl C\* kann es zu Wechselwirkungen mit der KS-Fluoreszenz kommen. Abbildung 5-26 zeigt die LIF-Intensität unterschiedlicher KS/Öl-Mischungen im KS-Kanal nach Anregung mit 266 nm.

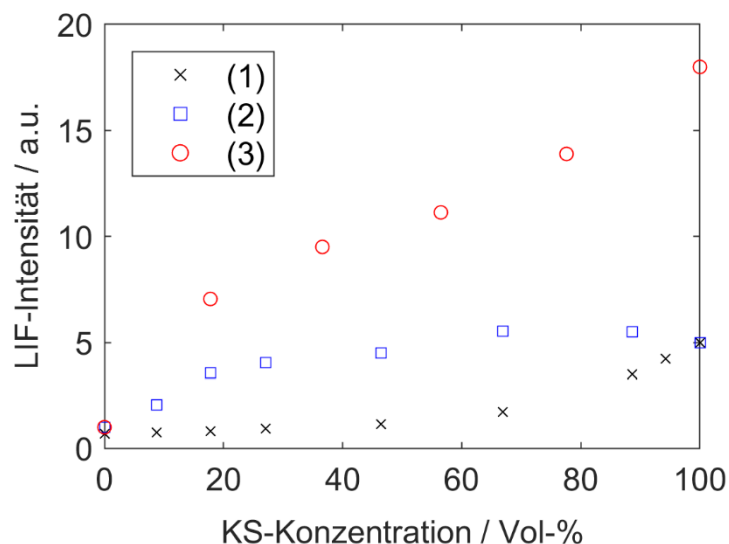


Abbildung 5-26: LIF-Intensität verschiedener KS/Öl-Paarungen gemessen im KS-Kanal nach Anregung mit 266 nm. Legende: (1) Iso-Oktan + 3 Masse-% Toluol in OEM-Öl\*, (2) iso-Oktan + 3 Masse-% Toluol in Öl C\*, (3) MKKS + 0,5 Masse-% Anisol in Öl C\*. Erläuterung der Intensitäten-Skalierung erfolgt im Text.

Die Messreihen der KS/Öl-Paarungen (2) und (3) wurden mit Öl C\* durchgeführt und die LIF-Intensität bei 0 % KS auf den Wert 1 a.u. normiert. Mit steigender KS-Konzentration (iso-Oktan/Toluol und MKKS/Anisol) nimmt die LIF-Intensität zu. Das Signal von MKKS/Anisol steigt mit steigender KS-Konzentration an und erreicht eine maximale Intensität von 18 a.u.. Das Signal von iso-Oktan/Toluol in Öl C\* steigt nicht linear an und zeigt Sättigungseffekte bei höheren KS-Konzentrationen. Bei 100 % KS erreicht diese Mischung eine Intensität von 5 a.u.. Im Folgenden wird dieser Wert als Referenzwert für 100 % iso-Oktan/Toluol für die Skalierung der Paarung (1) verwendet.

Die Messungen der KS/Öl-Paarung (2) und (1) wurden mit iso-Oktan/Toluol gemischt in Öl C\*, bzw. OEM-Öl\* durchgeführt. Die LIF-Intensität von (1) bei 100 % KS ist auf den Referenzwert 5 a.u. von (2) normiert. Im Gegensatz zur Mischung mit Öl C\* nimmt die LIF-Intensität der Mischung mit OEM-Öl\* bei KS-Konzentrationen unterhalb von 50 % nicht zu. Dieses Ergebnis deckt sich mit Abbildung 5-15, wonach OEM-Öl\* die Toluol-Fluoreszenz absorbiert. Außerdem wird die Erkenntnis aus Abbildung 5-25 bestätigt, da die Fluoreszenz von OEM-Öl\* geringer ist als die von Öl C\*.

Eine näherungsweise lineare Signalantwort und das größte Verhältnis zwischen 100 % KS- und 100 % Öl-Fluoreszenz bietet KS/Öl-Paarung (3). Daher ist Paarung (3) zur Detektion kleiner KS-Konzentrationen in Öl besonders geeignet.

Die optischen Eigenschaften der verschiedenen KS/Öl-Mischungen wurden auch im optischen Einzylinderaggregat untersucht. Zur Simulation von Kaltstartbedingungen betrug die Kühlwasser- und Öltemperaturen 40 °C und die Drehzahl 1500 min<sup>-1</sup> im angedrosselten Betrieb (500 mbar Saugrohrdruck). Im befeuerten Betrieb (= mit KS-Einspritzung) wurde das Einspritztiming so gewählt, dass eine Detektion der KS-Wandbenetzung möglich war. Abbildung 5-27 zeigt hintergrundkorrigierte LIF-Aufnahmen des KS-Kanals im Verdichtungsstakt 100 °KW v.ZOT (110 °KW nach der KS-Einspritzung). Die KS/Öl-Paarungen werden anhand des befeuerten und geschleppten (in Abwesenheit von KS) Betriebs verglichen. Die KS/Öl-Paarungen sind jeweils so skaliert, dass die mittlere LIF-Intensität im markierten Bereich 1 a.u. beträgt. Die Nummerierung der Paarung entspricht Abbildung 5-26.

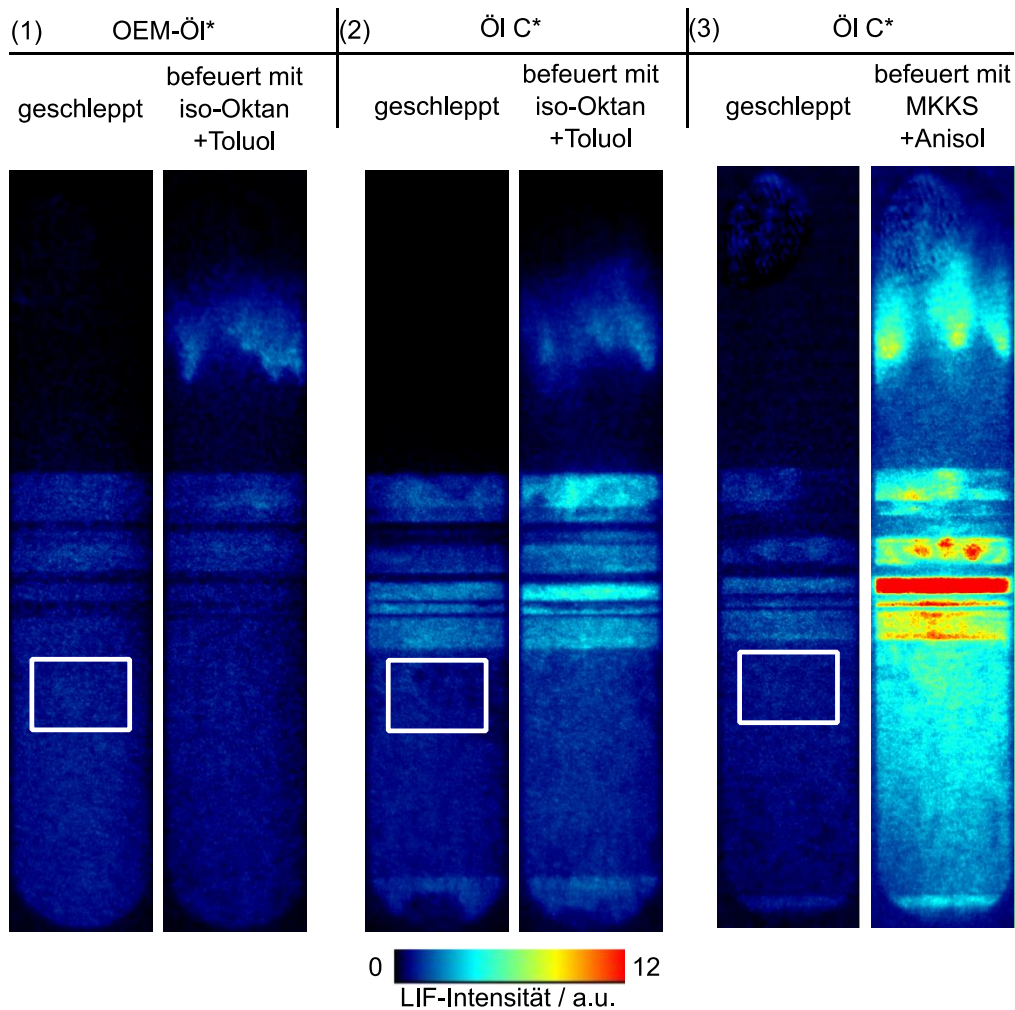


Abbildung 5-27: KS-Kanal im geschleppten und befeuerten Motorbetrieb mit verschiedenen KS/Öl-Paarungen nach Anregung mit 266 nm und 532 nm. Legende: (1) Iso-Oktan + 3 Masse-% Toluol und OEM-Öl\*, (2) iso-Oktan + 3 Masse-% Toluol und Öl C\*, (3) MKKS + 0,5 Masse-% Anisol und Öl C\* (Kolben mit längerem Hemd, aber gleicher Krone). Erläuterung der Intensitäten-Skalierung erfolgt im Text.

Insgesamt ist die LIF-Intensität im geschleppten Betrieb gering. Im befeuerten Betrieb wird bei KS/Öl-Paarung 1 (links: OEM-Öl\* und iso-Oktan/Toluol) KS-Wandbenetzung oberhalb des Kolbens sichtbar. Im Bereich des Kolbens ist kein Unterschied der LIF-Intensität zwischen geschlepptem und befeuerten Betrieb erkennbar.

Bei KS/Öl-Paarung 2 (mittig: Öl C\* und iso-Oktan/Toluol) ist die KS-Wandbenetzung ebenfalls im befeuerten Betrieb erkennbar. Durch die erhöhte Fluoreszenz von Öl C\* sind die charakteristischen Bereiche des Kolbens im geschleppten Motorbetrieb erkennbar (Vgl. Abbildung 5-24). Außerdem wird im befeuerten Betrieb ein erhöhtes LIF-Signal im Kolbenbereich detektiert. Wie später in Kapitel 5.4 deutlich wird, führt das gewählte Einspritztiming zu KS-Ölverdünnung im Bereich des Kolbens. Die Erkenntnisse aus Abbildung 5-27 decken sich mit vorangegangenen Ergebnissen: Die Eigenfluoreszenz von Öl C\* ist höher als von OEM-Öl\*. Allerdings führen bereits

geringe KS-Konzentrationen in Öl C\* zu einer deutlichen Signalerhöhung. Die KS-Ölverdünnung wird bei Paarung 1 nicht sichtbar und bestätigt daher die Erkenntnis, dass die Toluol-Fluoreszenz von OEM-Öl\* absorbiert wird.

KS/Öl-Paarung 3 (rechts: Öl C\* und MKKS/Anisol) weist den größten Anstieg der LIF-Intensität im befeuerten Betrieb auf. Das gilt für den Bereich des Wandfilms und für die KS/Öl-Mischung im Kolbenbereich. Hierdurch werden die Ergebnisse aus Abbildung 5-26 bestätigt, wonach Paarung 3 das größte Signalverhältnis von KS-LIF zu Öl-LIF (cross-talk) aufweist. Im roten Bereich der LIF-Aufnahme wird die Sättigung des Sensors durch die hohe LIF-Intensität erreicht.

Neben der LIF-Intensität unterscheidet sich auch die Form des Wandfilms bei Verwendung verschiedener Ersatz-KS. Iso-Oktan/Toluol (links und mittig) erzeugt eine unregelmäßige Form mit einer leichten Signalerhöhung im rechten Bildbereich. Bei MKKS/Anisol werden drei getrennte KS-Spots detektiert. Hierdurch wird die Annahme aus Abbildung 5-13 bestätigt, dass die KS-Wandbenetzung von der Spraybildung, bzw. den Eigenschaften des Ersatz-KS wesentlich beeinflusst wird.

In Abbildung 5-23 wurde der Hintergrund mit ausgebautem Kolben und in Abwesenheit von KS und Öl mit unterschiedlicher Belichtung untersucht. Abbildung 5-28 zeigt ein hintergrundkorrigiertes LIF-Einzelbild im KS-Kanal im geschleppten Motorbetrieb (90 °KW v.ZOT) nach Anregung mit 266 nm (links) und 532 nm (rechts).

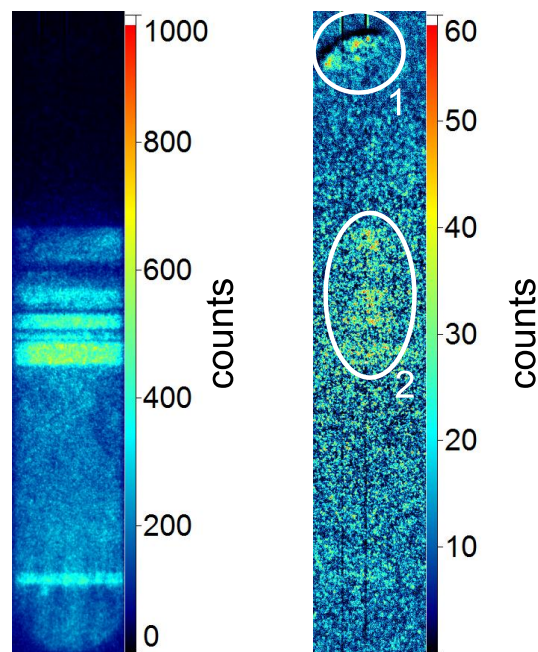


Abbildung 5-28: LIF-Aufnahme (KS-Kanal) im geschleppten Motorbetrieb mit Öl C\* (ohne KS-Einspritzung) bei 90 °KW v.ZOT nach Anregung mit 266 nm (links) und Anregung mit 532 nm (rechts). Hintergrundkorrektur gemäß Abbildung 5-23.

Nach Anregung mit 266 nm (links) wird die Eigenfluoreszenz von Öl C\* detektiert (siehe oben). Die Anregung mit 532 nm führt zu Signalen, die durch die Hintergrundkorrektur nicht vollständig korrigiert werden. Die Verschiebung des Motors (Vgl. Kapitel 4.2.3) äußert sich in der Signalverteilung im oberen Bereich (1). Unterschiedliche Reflexionsgrade des Kolbens (Vgl. Abbildung 4-10) verursachen Signale im mittleren Bildbereich (2). Das IRO-Rauschen führt zu einer stochastisch verteilten Signalverstärkung über den gesamten Messbereich.

### Cross-talk III: Übersprechen von KS-LIF in den Öl-Kanal

Zur Untersuchung der Wechselwirkung von KS-LIF mit dem Öl-Kanal zeigt Abbildung 5-29 die in der Küvette gemessene LIF-Intensität einer Mischung aus Öl C\* und iso-Oktan/Toluol nach Anregung mit 266 nm und 532 nm. Die Gerade resultiert aus der linearen Regression des Datensatzes.

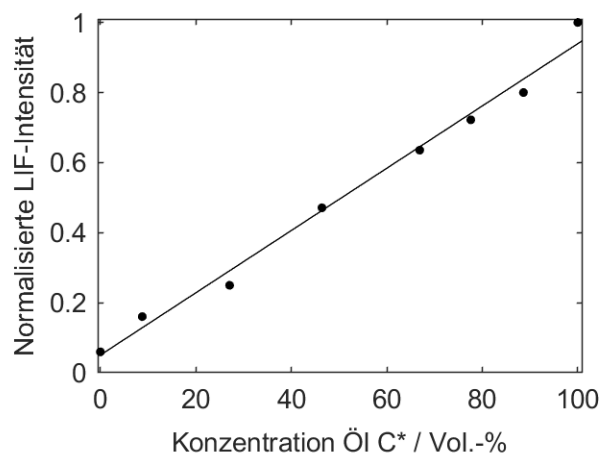


Abbildung 5-29: LIF-Intensität von iso-Oktan + Toluol in Öl C\* im Öl-Kanal nach Anregung mit 266 nm und 532 nm. LIF-Intensität auf den Wert von reinem Öl C\* normiert.

Die LIF-Intensität steigt proportional zur Öl-Konzentration. Bei purem KS (0 % Öl C\*) beträgt das Signal ca. 5 % der Intensität von reinem Öl C\*. Der cross-talk von KS-LIF im Öl-Kanal ist somit gering.

Der cross-talk im Öl-Kanal wurde auch am optischen Einzylindermotor untersucht. Abbildung 5-30 zeigt ein hintergrundkorrigiertes LIF-Einzelbild im Öl-Kanal bei 90 °KW v.ZOT im geschleppten (1 und 2) und befeuerten (3 und 4) Motorbetrieb nach Anregung mit 266 nm (1 und 3) und 532 nm (2 und 4).

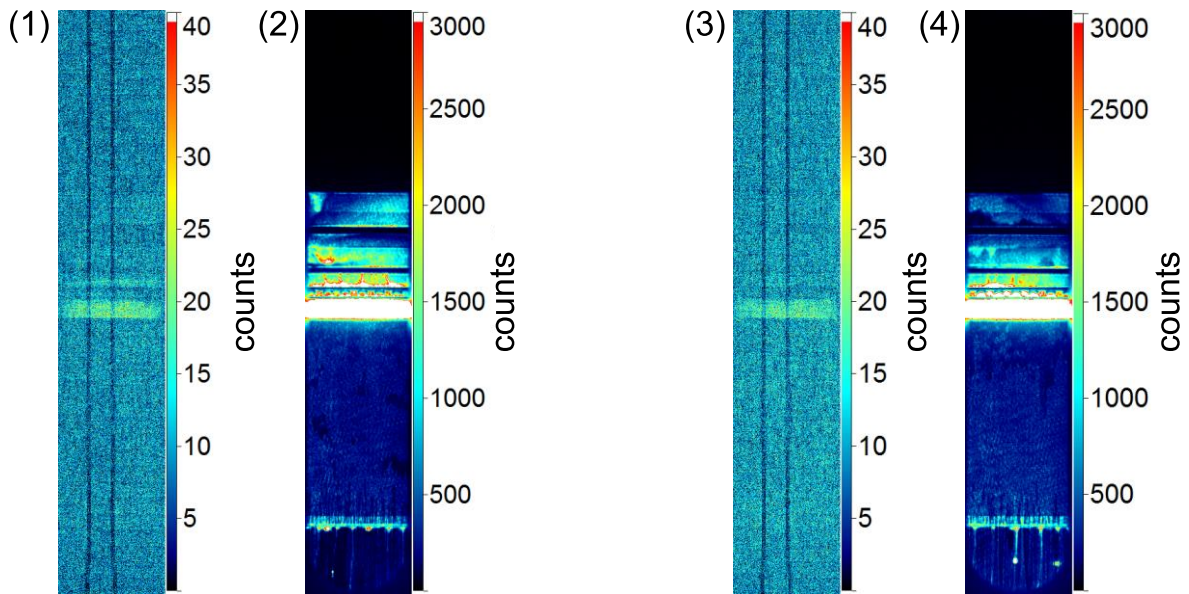


Abbildung 5-30: LIF-Aufnahme im Öl-Kanal mit Öl C\* bei 90 °KW v.ZOT. Links: Geschleppter Motorbetrieb nach Anregung mit 266 nm (1) und 532 nm (2). Rechts: Befeuerter Motorbetrieb nach Anregung mit 266 nm (3) und 532 nm (4). Hintergrundkorrektur gemäß Abbildung 5-23.

Nach Anregung mit 266 nm im geschleppten (1) und befeuerten (2) Betrieb entspricht die Signalstärke über große Teile des Messbereichs dem Ergebnis aus Abbildung 5-9. Im mittleren Messbereich wird streifenförmig (quer) ein erhöhtes Signal detektiert. Die Anregung von Öl C\* mit 266 nm führt zur Fluoreszenz im Detektionsbereichs des Öl-Kanals, woraus eine Signalerhöhung durch das große Ölvolumen in der Ölnut resultiert. Im geschleppten (ohne KS) und befeuerten (mit KS) Betrieb ist kein Unterschied in der Intensitätsverteilung erkennbar und der aus Abbildung 5-27 bekannte KS-Wandfilm wird nicht detektiert.

Nach Anregung mit 532 nm (2 und 4) ist die bekannte Ölverteilung im Kolbenbereich erkennbar. Zwischen geschleppten (ohne KS) und befeuerten (mit KS) sind keine wesentlichen Unterschiede erkennbar.

Im optischen Einzylindermotor wird somit keine KS-Fluoreszenz nach Anregung mit 266 nm und 532 nm im Öl-Kanal detektiert. Reines Öl C\* fluoresziert nach Anregung mit 266 nm und 532 nm im Öl-Kanal.



## Zusammenfassung des cross-talks

Tabelle 5-4 fasst die Ergebnisse aus den cross-talk-Untersuchungen zusammen.

Tabelle 5-4: Zusammenfassung des cross-talks mit Symbolisierung der qualitativen Bewertung: Beabsichtigte LIF (++); vernachlässigbare LIF (/); ungünstige LIF (-); keine LIF (o). Öl C\* und OEM-Öl\* wurden jeweils nach den Motorexperimenten aus dem Ölkreislauf des Einzylinderaggregats entnommen und enthalten  $0,015 \pm 0,005$  mmol/L Pyrromethen 567.

		Anregung							
		266 nm				532 nm			
		Ersatz-KS	KS-Tracer	Öl-Farbstoff	Öl C* und OEM-Öl*	Ersatz-KS	KS-Tracer	Öl-Farbstoff	Öl C* und OEM-Öl*
Detektionskanal	KS	o	++	o	-	o	o	o	o
	Öl	o	o	o	/	o	o	++	++

### 5.3.4 Zwischenfazit

Ersatz-KS, Surrogat-Öl und Mischungen aus beiden Flüssigkeiten wurden hinsichtlich der Verdampfungs- und Fluoreszenzeigenschaften und das Surrogat-Öl hinsichtlich tribologischer Eigenschaften untersucht. Hierbei wurden Messungen im Spektrometer und in der Dünnschichtkuvette unter definierten Bedingungen durchgeführt, sowie Ergebnisse aus geschleppten und befeuerten Motorversuchen diskutiert. Im Folgenden werden die wichtigsten Erkenntnisse zusammengefasst:

- Surrogat-Öl C mit  $0,015 \pm 0,005$  mmol/L Pyrromethen 567 ist hinsichtlich optischer und tribologischer Eigenschaften für den Einsatz im optischen Einzylinderaggregat geeignet.
- Ein Multi-Komponenten-Kraftstoff (MKKS) ohne Eigenfluoreszenz wurde entwickelt. Der MKKS bietet ähnliche Eigenschaften wie kommerzieller Kraftstoff (E10) hinsichtlich Verdampfung und Klopfbarkeit.
- Anisol weist im Vergleich zu Toluol eine höhere LIF-Intensität auf.
- Die Fluoreszenzintensität von Anisol und Toluol nimmt mit steigender Temperatur gleichermaßen ab.

- Anisol verdampft im Bereich des MKKS-Siedeendes, wodurch die Anisolkonzentration in der verbleibenden Flüssigphase des Gemischs während des Verdampfungsvorgangs nicht konstant verglichen zur Ausgangskonzentration ist. Die Temperaturabhängigkeit der Anisol-LIF wird hierdurch teilweise kompensiert.
- Öl C\* verursacht cross-talk im KS-Kanal. Die Wechselwirkung wird hauptsächlich durch Reste von OEM-Öl\* im Ölkreislauf hervorgerufen.
- KS/Tracer ist bei Verwendung von OEM-Öl\* nicht in der Kolbengruppe detektierbar, da OEM-Öl\* die Tracer-LIF absorbiert und im UV-Bereich nur eine geringe Transparenz aufweist.
- KS/Tracer ist bei Verwendung von Öl C\* in der Kolbengruppe detektierbar.
- Cross-talk von KS/Tracer im Öl-Kanal ist vernachlässigbar.

Basierend auf den Voruntersuchungen wurden für die Motorversuche im Folgenden Öl C\* mit  $0,015 \pm 0,005$  mmol/L Pyrromethen 567 und der Multi-Komponenten-Kraftstoff mit 0,5 Masse-% Anisol verwendet. Die Messungen wurden auf der GDS durchgeführt, da hier bereits Kraftstoff-Öl-Interaktion mit Hilfe des phasengekoppelten LIF-Messsystem detektiert wurde (Vgl. Abbildung 4-35).

## **5.4 Öltransport, Kraftstoff-Wandbenetzung und Kraftstoff-Öl-Interaktion**

In den folgenden Abbildungen ist die Falschfarben-Skala jeweils so angepasst, dass bestimmte Merkmale in den LIF-Aufnahmen bestmöglich visualisiert werden können, wobei der Farbverlauf von blau nach rot einer zunehmenden Schichtdicke entspricht. Alle LIF-Aufnahmen sind gemäß Abbildung 5-23 hintergrundkorrigiert. Die Kolbenposition wird in Grad Kurbelwinkel ( $^{\circ}$ KW) vor (v.ZOT) und nach (n.ZOT) dem oberen Zünd-Totpunkt (ZOT) angegeben. Merkmale in den Abbildungen, die durch Nummern und Pfeile gekennzeichnet sind, werden im Text diskutiert.

### **Ölverteilung in der Kolbengruppe im geschleppten und befeuerten Betrieb**

In Abbildung 5-31 sind der Verdichtungs- und Expansionstakt im Öl-Kanal dargestellt. Die Motordrehzahl beträgt  $2200 \text{ min}^{-1}$  und die Kühlwasser- und Öltemperatur  $50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Bei dieser Drehzahl beträgt die Bildwiederholrate 6,6 kHz und der Abstand zwischen zwei LIF-Aufnahmen beträgt  $2 \text{ }^{\circ}\text{KW}$ . Die Aufnahmen in der ersten und zweiten Zeile zeigen geschleppten Motorbetrieb (ohne KS-Einspritzung) mit unterschiedlichen

Ansaugdrücken. In der dritten Zeile ist der befeuerte Motorbetrieb dargestellt. Die charakteristischen Kolbenbereiche (Vgl. Abbildung 4-12) sind im rechten Teil der Abbildung in der ersten Zeile angegeben.

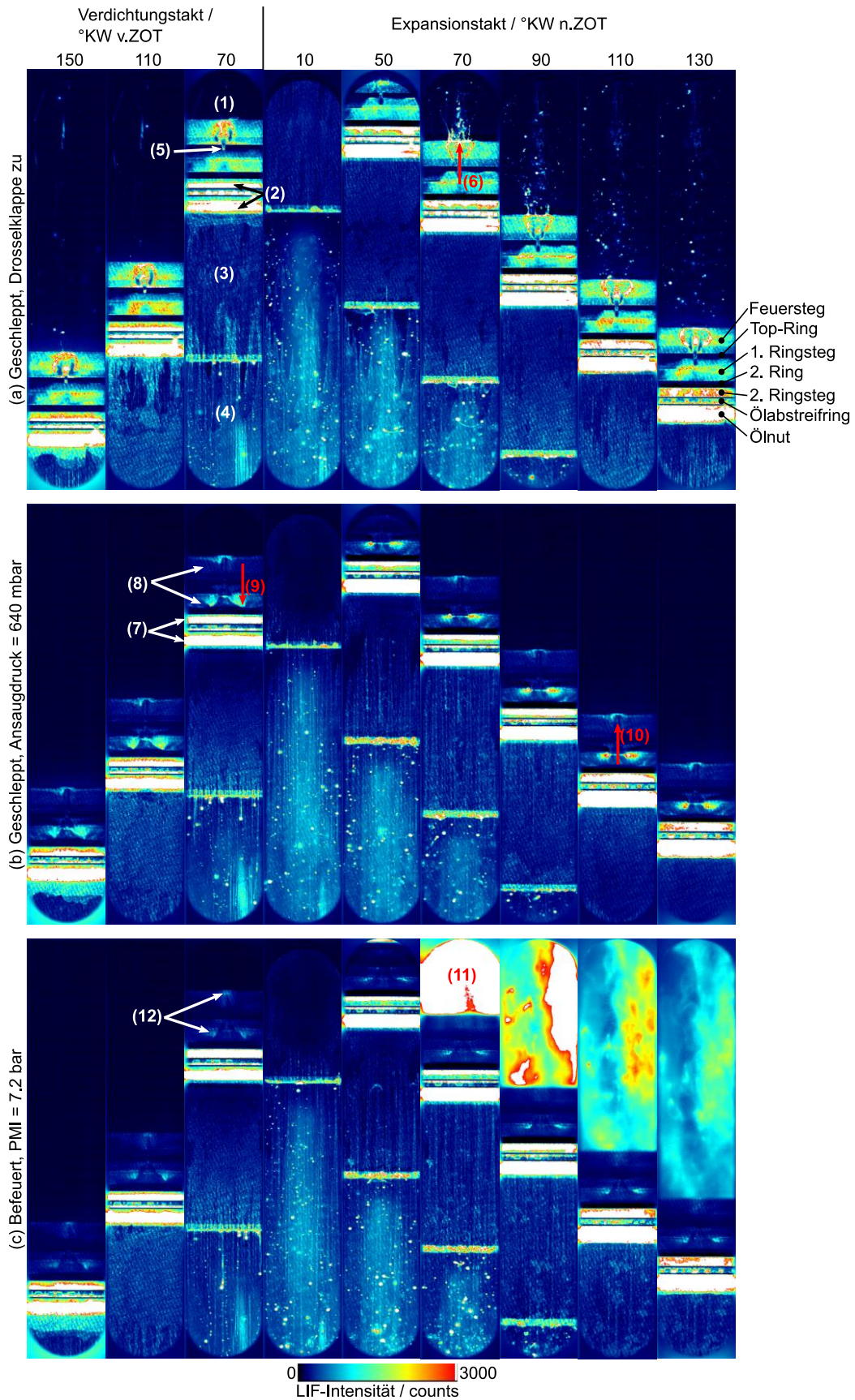


Abbildung 5-31: LIF-Aufnahmen im Öl-Kanal: Visualisierung der Ölverteilung in der Kolbengruppe im Verdichtungs- und Expansionsstakt im geschleppten und befeuerten Betrieb. Diskussion der nummerierten Merkmale erfolgt im Text.

Im Folgenden wird die Aufnahme bei 70 °KW v.ZOT in (a) (erste Zeile) diskutiert. Im Bereich oberhalb des Kolbens (1) ist die LIF-Intensität auf der Zylinderwand gering. Im Bereich des zweiten Ringstegs und der Ölnut (2) ist das Signal hoch. Der gesamte Kolben befindet sich im Sichtfeld, sodass Ringpaket und Kolbenhemd (3) sichtbar sind. Abbildung 5-31 bestätigt die Erkenntnis aus Abbildung 4-32, dass das Öl während der Kolbenbewegung hauptsächlich auf dem Kolben und nicht auf der Zylinderwand haftet.

Unterhalb des Kolbens werden Öltropfen detektiert (4). Die Öltropfen stammen aus der Kolbenspritze, die Öl zur Kühlung von unten an den Kolben spritzt. In diesem Experiment ist der Top-Ring in der Ringnut gegen Rotation gesichert, sodass der Ringspalt im Bereich des Sichtfelds fixiert ist (5). In (1) ist die LIF-Intensität gering, da nur eine geringe Ölmenge auf der Zylinderwand verbleibt, nachdem Öl durch die Kolbenringe abgekratzt wurde. Das abgekratzte Öl wird oberhalb und unterhalb des Ölabstreifrings akkumuliert und verursacht eine hohe LIF-Intensität (2). In den Kontaktbereichen der Kolbenringe und des Hemds (3) mit der Zylinderlaufbahn ist die LIF-Intensität aufgrund niedriger Ölfilmstärken gering (Vgl. Kapitel 4).

In (a) ist der geschleppte Motorbetrieb mit geschlossener Drosselklappe dargestellt. Im Bereich des Feuerstegs und des 1. Ringstegs ist die LIF-Intensität aufgrund von Ölakkumulation während des gesamten Kolbenhubs hoch. Die großen Ölmengen resultieren aus Druckdifferenzen und Trägheitskräften, die begünstigt durch Undichtigkeiten des Ringpakets zum Öltransport in Richtung Brennraum führen. Die Ursachen für die beobachteten Phänomene werden im Folgenden erläutert und sind in Abbildung 5-32 skizziert. Durch die geschlossene Drosselklappe ist der Ansaugdruck  $p_1$  im Ansaugtakt (links) gering, wodurch der Druck im Kurbelgehäuse  $p_3$  höher ist als im Brennraum. Hierdurch wird eine aufwärtsgerichtete Gasströmung („Reverse-Blowby“), bzw. Öltransport in Richtung Brennraum initiiert. Außerdem wird der aufwärtsgerichtete Öltransport durch die der Beschleunigungsrichtung entgegenwirkende Massenkraft begünstigt. Im Kompressionstakt (mittig) steigt der Druck im Brennraum und in geringerem Maß zwischen 1. und 2. Kompressionsring ( $p_2$ ) an, woraus eine abwärtsgerichtete Gasströmung („Blowby“) resultiert. Im Expansionstakt (rechts) nimmt der Druck im Brennraum schneller ab als im Bereich des 1. Ringstegs, woraus ein aufwärtsgerichteter Gasstrom „Reverse-Blowby“ (6 in Abbildung 5-31) große Ölmengen durch den Ringstoß in den Brennraum transportiert [35]. Im Expansionstakt werden daher Öltropfen oberhalb des Kolbens detektiert. Anhand dieser kurbelwinkelaufgelösten Messung wird der Ringstoß als

Öltransportweg identifiziert und die Ursache für die Öltropfen im Brennraum, die mit dem phasengekoppelten System ebenfalls detektiert wurden (Vgl. Abbildung 4-34), identifiziert.

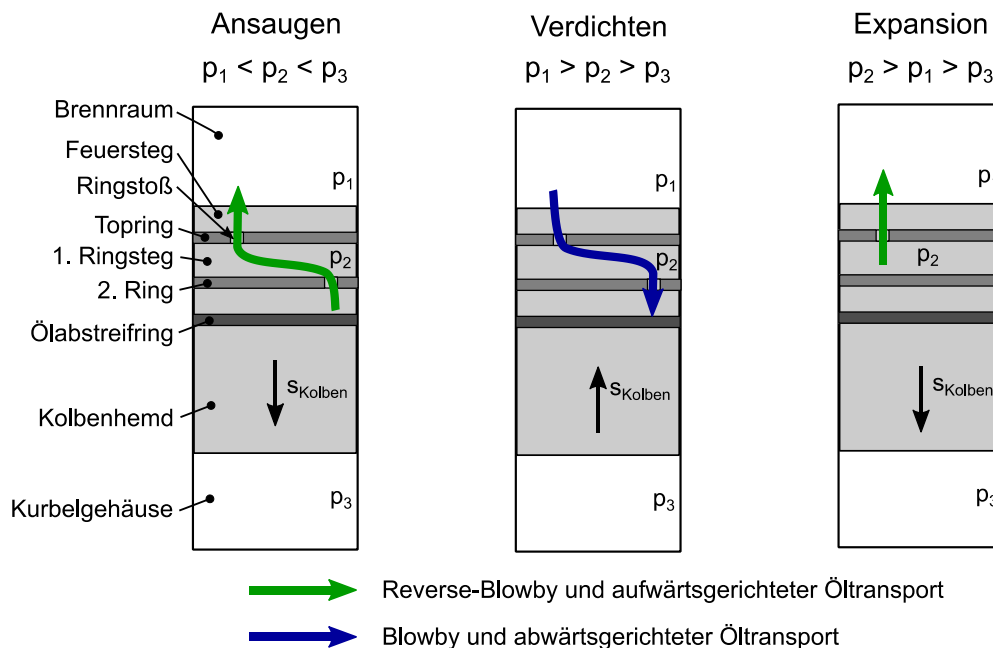


Abbildung 5-32: Druckverhältnisse in der Kolbengruppe während des Kolbenhubs im geschleppten Motorbetrieb mit geschlossener Drosselklappe und resultierende Gasströmungen, bzw. Öltransportrichtungen.

In Abbildung 5-31 (b) ist der geschleppte Motorbetrieb im angedrosselten Betrieb (Ansaugdruck = 640 mbar) dargestellt. Hohe LIF-Intensität wird im Bereich des 2. Ringstegs und der Ölnut aufgrund großer Ölsammlung durch Ringabkratzen detektiert (7). Die LIF-Intensität im Bereich des Feuerstegs und 1. Ringstegs ist aufgrund geringerer Ölmengen niedriger im Vergleich zu (a) und es werden keine Öltropfen im Brennraum während der Expansion detektiert. Durch Öffnen der Drosselklappe wird durch den im Vergleich zu (a) höheren Verdichtungsdruck eine abwärtsgerichtete Gasströmung „Blowby“ (9) initiiert. Dieser Gasstrom schiebt das auf dem Kolben haftende Öl in Richtung Kurbelgehäuse. Gegen Ende des Expansionstakts tritt auch Reverse-Blowby auf (10). Im Gegensatz zu (a) wird aufgrund der geringen Ölmenge auf dem Feuersteg keine signifikante Ölmenge in den Brennraum transportiert.

In Abbildung 5-31 (c) ist der befeuerte Motorbetrieb mit  $p_{mi} = 7,2$  bar dargestellt. Die Verbrennung ist anhand der Lumineszenz im Expansionstakt oberhalb des Kolbens erkennbar (11). Die LIF-Intensität im Bereich der Ringstege ist gering verglichen mit (a) und Öltropfen werden nicht detektiert. Die LIF-Intensität im Bereich des Feuerstegs

und 1. Ringsteg (12) ist geringer im Vergleich zu (b), Merkmal (8). Hierfür gibt es zwei Ursachen, die nur im befeuerten Betrieb auftreten: Einerseits ist der Blowby-Gasstrom durch den Verbrennungsdruck höher, wodurch der Öltransport in Richtung Kurbelgehäuse verstärkt wird. Andererseits verursacht der Transport der Verbrennungswärme einen Anstieg der Kolben- und Öltemperatur, wodurch die LIF-Intensität abnimmt (Vgl. Abbildung 4-11).

Die Unterschiede in der Ölverteilung zwischen geschlepptem und befeuertem Betrieb decken sich mit den Ergebnissen aus Kapitel 4.3/4.4 und erklären die Ursachen der dort beobachteten Phänomene. Anhand der kurbelwinkel aufgelösten Messung konnte der Mechanismus „Reverse-Blowby“, der maßgeblich für den Öltransport in den Brennraum verantwortlich ist, visualisiert werden.

### Kraftstoff-Wandbenetzung und Kraftstoff-Transport auf die Ringstege

Abbildung 5-33 zeigt LIF-Aufnahmen des Ansaugtaktes im KS-Kanal zwischen 270-185 °KW v.ZOT im befeuerten Betrieb mit  $n = 1500 \text{ min}^{-1}$ ,  $p_{mi} = 5 \text{ bar}$  und stöchiometrischer Verbrennung ( $\lambda = 1$ ). Bei dieser Drehzahl wird eine LIF-Aufnahme pro Kurbelwinkel getätigt und die Bildwiederholrate beträgt 9 kHz. Die Kühlwasser- und Öltemperatur beträgt 40 °C, der KS wird mit Einfachspritzung 210 °KW v.ZOT (SOI) eingespritzt.

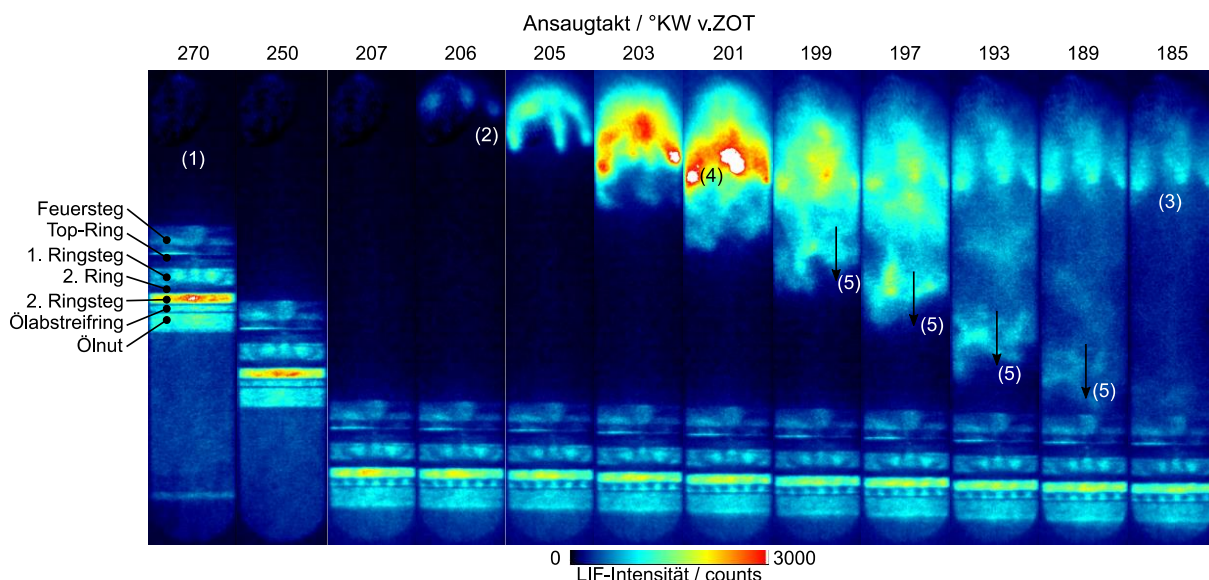


Abbildung 5-33: LIF-Aufnahmen im KS-Kanal: Visualisierung der KS-Einspritzung und KS-Wandbenetzung im Ansaugtakt. Diskussion der nummerierten Merkmale erfolgt im Text.

Die LIF-Aufnahme bei 270 °KW v.ZOT erfolgt vor Einspritzbeginn und die Signalverteilung in der Kolbengruppe entspricht der aus Abbildung 5-31 (Öl-Kanal). Wie in Kapitel 5.3.3 diskutiert wurde, enthält der KS-Kanal KS-LIF und Öl-LIF (cross-

talk). Die LIF-Intensität oberhalb des Kolbens (1) und in den Kontaktbereichen von Kolbenringen und Hemd ist aufgrund niedriger Filmdicken gering. Im Bereich des 2. Ringstegs und der Ölnut ist das Signal aufgrund größerer Ölvolumina, die auch Kraftstoff enthalten können, hoch. Während der Abwärtsbewegung des Kolbens (250 °KW) ist keine Veränderung der räumlichen Verteilung erkennbar. Bei 206 °KW (4 °KW nach SOI) befindet sich der Kolben in der Nähe des unteren Totpunkts und das Kolbenhemd ist außerhalb des Sichtfelds. Im oberen Bereich des Fensters (2) wird Fluoreszenz durch das Hohlkegel-KS-Spray, das den Sichtbereich erreicht, initiiert. Das LIF-Signal breitet sich in den darauffolgenden Aufnahmen (205-201 °KW) über einen größeren Bereich aus und die LIF-Intensität nimmt zu. Dieses LIF-Signal wird durch die Ausbreitung des KS-Sprays im Brennraum und KS-Wandbenetzung (4) hervorgerufen. Bei 201-197 °KW prallt ein Teil des auf die Zylinderwand auftreffenden KS in Richtung des Kolbens ab (5). Bei 193-185 °KW nimmt die globale LIF-Intensität im Bereich des Brennraums durch die Sprayverdampfung ab und der KS-Wandfilm ist in Form von drei Spots im oberen Fensterbereich sichtbar (3). Aufgrund der unvollständigen KS-Verdampfung verbleibt der KS-Wandfilm in der spezifischen Form auf der Zylinderwand.

In Abbildung 5-34 ist der auf den in Abbildung 5-33 dargestellten Ansaugtakt folgende Verdichtungsakt zwischen 111-56 °KW v.ZOT dargestellt. Die erste Zeile zeigt den KS-Kanal, die zweite den simultan aufgezeichneten Öl-Kanal.



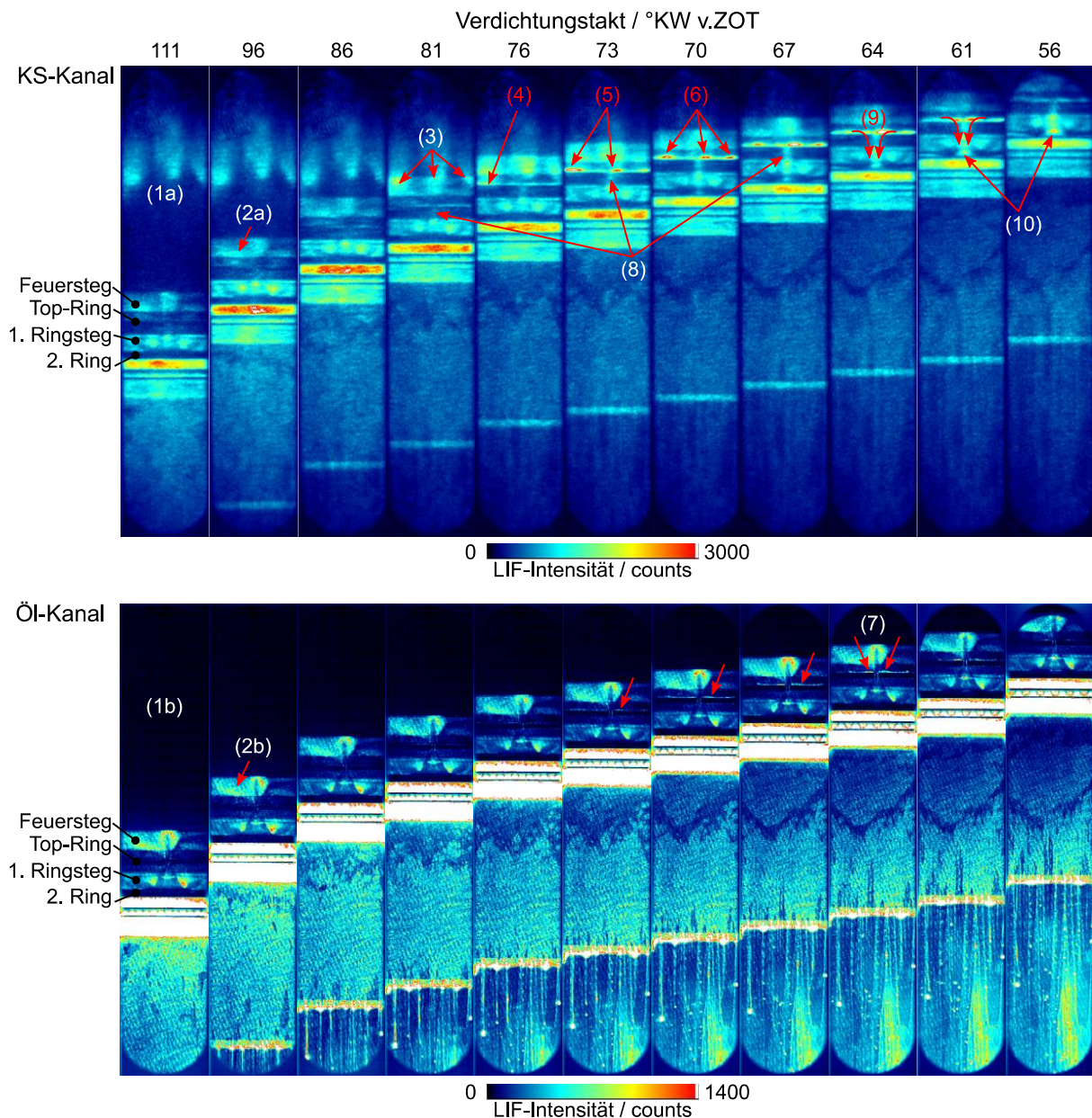


Abbildung 5-34: KS-Transport von der Zylinderwand auf die Kolben-Ringstege durch Abkratzen der Ringe. Simultane LIF-Aufnahmen des Kompressionstages eines Einzelzyklus im KS-Kanal (oben) und Öl-Kanal (unten). Diskussion der nummerierten Merkmale erfolgt im Text.

Bei 111 °KW v.ZOT ist die Fluoreszenz des unverdampften KS-Wandfilms auf der Zylinderwand (Vgl. Abbildung 5-33) im oberen Messbereich im KS-Kanal sichtbar (1a). Da KS-LIF keinen cross-talk im Öl-Kanal verursacht (Vgl. Tabelle 5-4), ist der KS-Wandfilm im entsprechenden Bereich im Öl-Kanal nicht sichtbar (1b). Die globale LIF-Intensitätsverteilung entspricht Abbildung 5-31 und Abbildung 5-33. Im Öl-Kanal wird eine Ölsammlung auf dem Feuersteg detektiert (2b). Aufgrund von cross-talk durch Öl-LIF im KS-Kanal wird im entsprechenden Bereich im KS-Kanal (2a) Fluoreszenzlicht detektiert.

Bei 81 °KW nimmt die LIF-Intensität zu verglichen mit 86 °KW (3). Da die KS-Menge auf der Zylinderwand nicht zugenommen haben kann, wird die Signalerhöhung auf die Reflexion (Vgl. Abbildung 4-10) des Laserlichts (verstärkte Anregung) und der KS-LIF durch den Kolben im Hintergrund des KS-Wandfilms zurückgeführt. Bei 76 °KW wird ein schmaler Streifen erhöhter LIF-Intensität im linken (4) bei 73 und 70 °KW im mittleren (5) und rechten (6) Messbereich detektiert. Der Top-Ring kratzt den KS-Wandfilm ab. Im Öl-Kanal wird ebenfalls eine entsprechende Signalerhöhung an der oberen Kante des Top-Rings detektiert (rote Pfeile (7) bei 73-64 °KW v.ZOT). Das führt zu der Schlussfolgerung, dass Öl durch KS-Wandbenetzung aus der Top-Ring-Nut gespült und auf den Feuersteg transportiert wird.

Der Anstieg der LIF-Intensität im Ringspalt (8) bei 73 und 67 °KW verglichen mit 81 °KW wird durch zwei Phänomene verursacht: Einerseits wird im Ringspalt kein KS von der Zylinderwand abgekratzt, andererseits wird auf der Top-Ring-Oberseite akkumulierter KS durch Blowby-Gas durch den Ringspalt geschoben. Dieser KS sammelt sich im Bereich des 1. Ringstegs (10) an.

Anhand dieser LIF-Aufnahmen wird deutlich, wie der unverdampfte KS-Wandfilm vom Top-Ring abgekratzt und von der Zylinderwand über die obere Ringflanke auf den Kolben und in die Ringnut transportiert wird. Durch den Ringstoß wird der KS außerdem in die unteren Bereiche des Kolbens und in Richtung Kurbelgehäuse transportiert. Die beschriebenen Transportmechanismen sind in Abbildung 5-35 skizziert. Im Folgenden wird die KS-Öl-Interaktion über mehrere Zyklen untersucht.

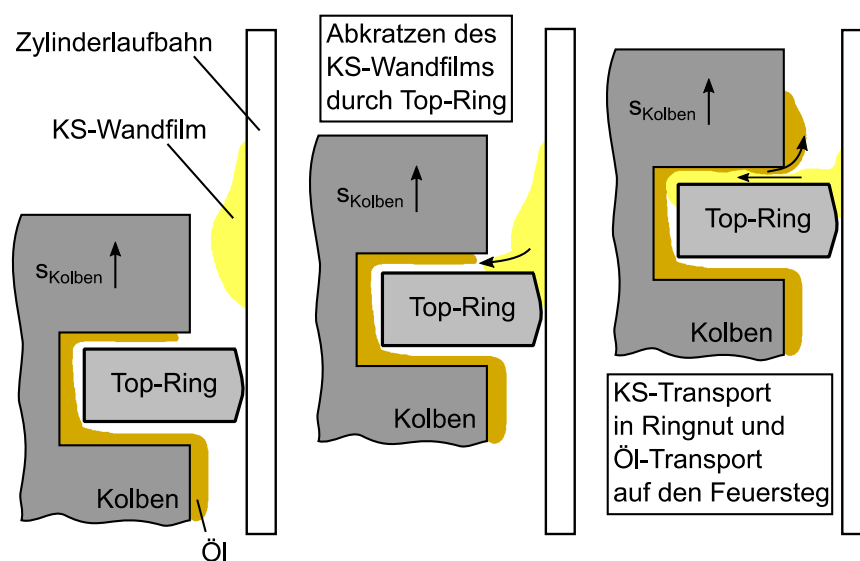


Abbildung 5-35: Transportvorgang des flüssigen Kraftstoffs von der Zylinderwand in die Ringnut des Kolbens durch Abkratzen des Top-Rings und Öltransport von der Ringnut auf den Feuersteg.

## **Interaktion von Kraftstoff und Öl**

Abbildung 5-36 zeigt simultane LIF-Aufnahmen im KS- (oben) und Öl-Kanal (unten). Im Gegensatz zu den drei vorherigen Abbildungen zeigen die Aufnahmen den Verdichtungstakt bei 100 °KW v.ZOT phasengekoppelt über 496 Zyklen, wodurch Langzeiteffekte im transienten Motorbetrieb sichtbar werden. Die Betriebsbedingungen entsprechen denen aus Abbildung 5-33 und Abbildung 5-34. Zunächst wird der Motor für 100 Zyklen im angedrosselten Betrieb geschleppt. Danach folgen 200 Zyklen befeuerter Betrieb mit einem optimierten Einspritztiming, bzw. minimaler KS-Wandbenetzung. Ab Zyklus 302 wird der Motor weiterhin befeuert, allerdings mit geändertem Einspritztiming mit ausgeprägter KS-Wandbenetzung. In diesem Experiment ist der Top-Ring ebenfalls gegen Rotation gesichert, allerdings ist der Ringstoß hier auf der DS und somit außerhalb des Sichtfeldes fixiert (1). Die Artefakte in (2) resultieren aus einer Reflektion des Anregungslichts (Vgl. Abbildung 5-23), die durch die Hintergrundkorrektur nur unvollständig korrigiert wurde.

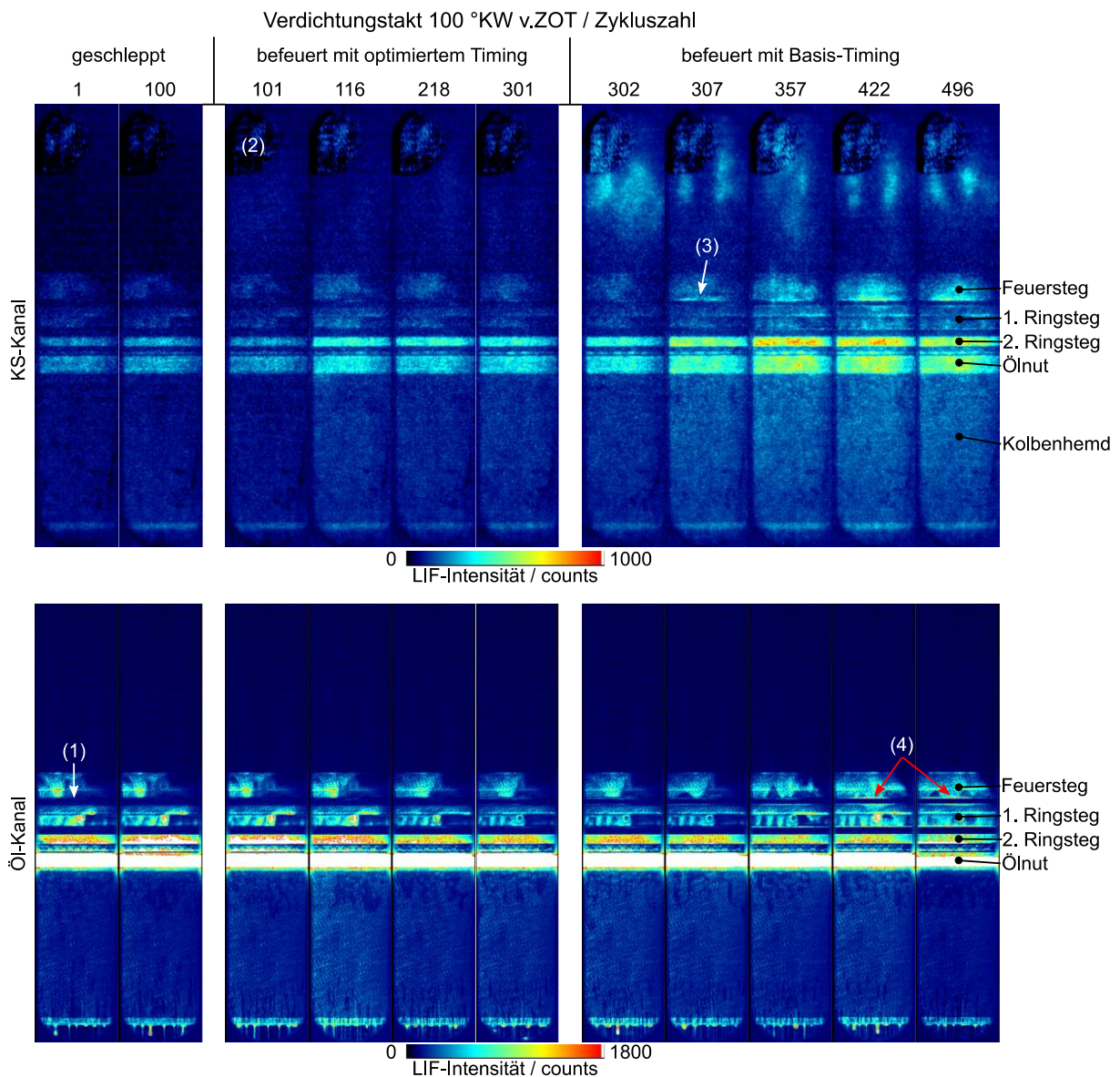


Abbildung 5-36: LIF-Aufnahmen im KS-Kanal (oben) und Öl-Kanal (unten). Phasengekoppelte Aufnahmen über 496 Zyklen bei 100 °KW v.ZOT im geschleppten und befeuerten Motorbetrieb mit verschiedenen Einspritztimings. Diskussion der nummerierten Merkmale erfolgt im Text.

In Zyklus 1 wird im KS-Kanal im Bereich großer Ölvolumina (Ölnut, 2. Ringsteg) Fluoreszenz in Abwesenheit von KS (geschleppter Betrieb ohne KS-Einspritzung) durch Öl cross-talk detektiert (Vgl. Abbildung 5-27). Die Intensitätsverteilung im Öl-Kanal entspricht der des KS-Kanals, wobei auf dem Feuersteg und 1. Ringsteg im linken Bildbereich Öl-LIF detektiert wird. Die Intensitätsverteilungen in Zyklus 100 stimmen mit denen aus Zyklus 1 überein.

In Zyklus 101-302 wird der Motor mit einem optimierten KS-Einspritztiming befeuert. Im gesamten Bereich oberhalb des Kolbens steigt das LIF-Signal im KS-Kanal an. Diese Signalerhöhung wird auf verdampften KS im Brennraum zurückgeführt. Allerdings ist kein ausgeprägter KS-Wandfilm sichtbar.

In Zyklus 116 wird im KS-Kanal eine Signalerhöhung in den Bereichen Feuersteg, 1. und 2. Ringsteg, Ölnut und Kolbenhemd, die auf eine KS-Anreicherung zurückgeführt wird, festgestellt. Mögliche Ursache für die KS-Akkumulation sind KS-Transport in Richtung Kurbelgehäuse durch Blowby-Gase und Abkratzen der KS-Wandfilme durch den Top-Ring (Vgl. Abbildung 5-34) außerhalb des Sichtfeldes. Im Öl-Kanal nimmt die LIF-Intensität im Bereich des Feuerstegs und 1. Ringstegs ab. Mögliche Ursachen wurden bereits im Rahmen des Vergleichs von geschlepptem und befeuerten Motorbetrieb in Abbildung 5-31 diskutiert. Insgesamt sind die Unterschiede in der KS- und Ölverteilung zwischen geschlepptem und befeuerten Betrieb mit optimiertem Einspritztiming gering. In Zyklus 301 erreichen die LIF-Signale ein konstantes Niveau und eine konstante Verteilung, was auf einen quasi-stationären Zustand hinsichtlich Öl- und KS-Verteilung hinweist.

In Zyklus 302 wird das Einspritztiming vom optimierten Timing auf ein ungünstiges Timing mit ausgeprägter KS-Wandbenetzung umgestellt. Im KS-Kanal entspricht die LIF-Intensität im Kolbenbereich der in Zyklus 301, wobei oberhalb des Kolbens ein KS-Wandfilm sichtbar ist. Die Form des Wandfilms variiert über die Zyklen, wird allerdings in jedem Zyklus detektiert. Dies weist darauf hin, dass die KS-Wandbenetzung beim ungünstigen Einspritztiming systematisch und reproduzierbar auftritt.

In Zyklus 307 wird ein Signalanstieg an der oberen Kante des Top-Rings detektiert (3). Dies entspricht den Erkenntnissen aus Abbildung 5-34 und Abbildung 5-35: KS wird durch das Abkratzen des KS-Wandfilms durch den Top-Ring auf der oberen Ringflanke akkumuliert. In Zyklus 357-496 steigt das LIF-Signal im Bereich der Ölnut und des 2. Ringstegs verglichen mit Zyklus 301, was auf die Anreicherung von KS im Öl zurückzuführen ist. Auch im Bereich des Kolbenhemds wird ein höheres LIF-Signal detektiert. Mit KS verdünntes Öl wird aus der Ölnut in den Kontaktbereich von Kolbenhemd und Zylinderwand transportiert. In Zyklus 357-496 ändert sich die räumliche LIF-Intensitätsverteilung auch im Öl-Kanal. In (4) ist eine dünne Linie mit erhöhtem LIF-Signal erkennbar. Da kein cross-talk durch KS-LIF im Öl-Kanal vorkommt, stammt die Signalerhöhung von Öl-LIF und wird darauf zurückgeführt, dass Öl durch den KS aus der Ringnut gespült wird (Vgl. Abbildung 5-35). KS-Wandbenetzung und Ölverdünnung mit KS können mit dem SHSLIF kurbelwinkelaufgelöst visualisiert werden. Die Folgen dieser Phänomene sind u.a. Verringerung der Viskosität und Öltransport in Richtung Brennraum. Dieser durch KS-Wandbenetzung verursachte Öltransport bestätigt das Phänomen, das in der Messung

mit dem phasengekoppelten Messsystem (Vgl. Abbildung 4-35) bereits beobachtet wurde.

## 5.5 Ausblick

Das SHSLIF-Messsystem ermöglicht die kurbelwinkelaufgelöste, simultane Visualisierung von Kraftstoff und Öl unter realitätsnahen Betriebsbedingungen. Verschiedene Messungen am optisch zugänglichen Einzylindermotor liefern qualitative Erkenntnisse über Phänomene in der Kolbengruppe wie z.B. Kraftstoff-Wandbenetzung und Ölverdünnung mit Kraftstoff. Hierdurch kann das Grundverständnis der Interaktion der Fluide Kraftstoff, Öl und Gas in der Kolbengruppe gesteigert werden.

In Kapitel 4 wurde ein Kalibrierprozess zur Quantifizierung der Schmierfilmhöhe im Kontaktbereich Kolbenhemd/Zylinderlaufbahn entwickelt. Wie in Kapitel 2 erläutert wurde, ist die Schmierfilmhöhe eine wichtige Eingangsgröße für Reibungssimulationsmodelle. Auch die Kraftstoff-Wandbenetzung und das Abdampfen des Kraftstoff-Wandfilms werden simulativ untersucht [146], wobei die Kraftstoffmasse ein entscheidender Modellparameter ist. Mit Hilfe der LIF-Messungen kann die Kraftstoffmasse bei bekannter Dichte anhand der Höhe des Wandfilms und dessen flächenmäßiger Verteilung bestimmt werden. Die Überführung der LIF-Intensität der Kraftstoff-Wandfilme in quantitative Größen ist nicht Gegenstand dieser Dissertation. Im Folgenden werden dennoch Bildverarbeitungs-Prozessschritte und Herausforderungen bei der Quantifizierung von Kraftstoff-Wandfilmen auf Grundlage von Kapitel 4 und Erkenntnissen aus der Literatur diskutiert, um Ansatzpunkte für nachfolgende Forschungsarbeiten zu liefern.

Eine Verbesserung des LIF-Messsystems stellt die Reduzierung des cross-talks von Öl-LIF im KS-Kanal dar. Als Ursache für den cross-talk wurde die Kontamination des Surrogat-Öls mit Restöl (OEM-Öl\*) im Ölkreislauf des Einzylindermotors identifiziert. Durch den Einsatz von reinem Surrogat-Öl kann die Öl-LIF-Intensität im KS-Kanal theoretisch um Faktor 2,4 verringert (Vgl. Abbildung 5-25) und somit das Verhältnis KS-LIF/Öl-LIF (Vgl. Abbildung 5-26) gesteigert werden.

Die Hintergrundkorrektur der LIF-Aufnahmen wurde im Rahmen dieser Arbeit durch die Subtraktion des Ensemblemittels einer Bilderserie mit gereinigtem Zylinder ohne Kolben durchgeführt. In Abbildung 5-36 wurde eine Signalerhöhung im Brennraum durch verdampften Kraftstoff festgestellt, wodurch das hier gewählte Verfahren den

Hintergrund nicht vollständig korrigiert. Alonso et. al [111] vermeiden die optische Anregung des verdampften Kraftstoffs hinter dem Wandfilm, indem das Anregungslicht in den transparenten Kolben eingekoppelt wird und durch Totalreflektion lediglich der flüssige Kraftstofffilm auf der Wand angeregt wird (Vgl. Kapitel 2.3.3). Eine Einkopplung des Laserstrahls in das Saphirfenster des optisch zugänglichen Einzylindermotors ist zwar denkbar, erfordert jedoch einen erheblichen konstruktiven Aufwand. Eine alternative Vorgehensweise ist der befeuerte Betrieb des Motors mit Saugrohreinspritzung. Hierdurch kann die Bildung eines Kraftstofffilms auf der Zylinderwand vermieden, das Signal des verdampften Kraftstoffs im Brennraum dennoch berücksichtigt werden. Geiler et. al [73] stellen bei der Verwendung einer iso-Oktan/Toluol-Mischung nur geringe Auswirkungen des verdampften Kraftstoffs auf das Hintergrundsignal fest, da Aromaten-LIF in der Gasphase von Sauerstoff gequenchet wird. Zur Bewertung dieser unterschiedlichen Erkenntnisse sind weitere Untersuchungen am optisch zugänglichen Einzylindermotor erforderlich. Neben der Hintergrunduntersuchung mit Saugrohreinspritzung kann auch der Einfluss des Umgebungsgases auf die LIF-Intensität durch Sauerstoff-Quenching untersucht werden, indem reiner Stickstoff anstatt Umgebungsluft in den Brennraum eingebracht wird.

Zur Flachfeldkorrektur ist die räumlich gleichmäßig verteilte Fluoreszenzantwort eines geeigneten Materials nach Anregung mit Laserlicht im KS- und Öl-Kanal erforderlich. Hierzu können z.B. dünne Materialien mit spektral geeigneter LIF eingesetzt werden [73]. Das SHSLIF-Messsystem verfügt über zwei spektral getrennte Kanäle für Kraftstoff und Öl und das Surrogat-Öl (Öl C\*) fluoresziert nach Anregung mit 266 nm und 532 nm in beiden optischen Kanälen (Vgl. Tabelle 5-4). Dadurch ist auch das in Kapitel 4.2.1 vorgestellte Verfahren, das auf der Völlfüllung des Zylinderrohrs mit Motoröl basiert, zur Flachfeldkorrektur geeignet.

Die Laser-Pulsvariation kann durch die Verwendung eines Beam-Samplers und einer zeitlich hochauflösenden Photodiode (Vgl. Strahlengang des phasengekoppelten Messsystems in Abbildung 4-2) und entsprechend des in Kapitel 4.2.1 vorgestellten Verfahrens untersucht und korrigiert werden.

Die Absolutwert-Kalibrierung der Kraftstoff-Wandfilmhöhe stellt eine Herausforderung dar. Die Verdampfungseigenschaften beeinflussen die Sprayausbildung im Brennraum (Vgl. Abbildung 5-13) und sind entscheidend für die Wandfilmbildung (Vgl.

Abbildung 5-27). Im Rahmen dieser Arbeit werden daher die Verdampfungseigenschaften von kommerziellem Kraftstoff durch die Verwendung eines Multi-komponenten-Kraftstoffs mit Anisol abgebildet (Vgl. Kapitel 5.3.2). Allerdings ist die Anisolkonzentration während der Verdampfung nicht konstant (Vgl. Abbildung 5-22 links) und stellt damit neben der Filmhöhe eine zweite Unbekannte des Lambert-Beer-Gesetzes (Gleichung 2.6) dar. Durch die Konzentrationsänderung während der Verdampfung wird jedoch auch die temperaturbedingte Fluoreszenzabnahme (Vgl. Abbildung 5-20) teilweise kompensiert (Vgl. Abbildung 5-22 rechts). Bei der Kalibrierung des LIF-Signals ist eventuell auch die Nicht-Linearität der Tracer-LIF (Vgl. Abbildung 5-19) zu berücksichtigen, da der wie in Kapitel 4 angenommene, lineare Zusammenhang zwischen Signalintensität und dem Produkt aus Schichtdicke und Tracerkonzentration gemäß Gleichung 2.7 nur näherungsweise gilt. Neben Temperatur und Konzentration können auch der Umgebungsdruck und die Zusammensetzung des Umgebungsgases die Tracer-LIF beeinflussen. Geiler et. al [73] führen systematische Untersuchungen der photophysikalischen Eigenschaften von Aromaten-LIF in der Flüssigphase durch, wodurch bereits umfangreiche Vergleichsdaten zur Verfügung stehen. Die Bestimmung der Wandfilmhöhe sollte zunächst im Ansaugtakt erfolgen, da die Umgebungsbedingungen hinsichtlich Gaszusammensetzung, Druck und Temperatur in erster Näherung bekannt sind.

Zur Visualisierung hochsiedender Kraftstoffkomponenten, die bei der Verdampfung des Kraftstoff-Wandfilms kritisch sind, ist der Einsatz eines Tracers mit einem höheren Siedepunkt als Anisol, z.B. Methylnaphthalin [143-145], denkbar. Allerdings ist hierdurch eine eventuell auftretende Verstärkung des cross-talks zwischen Öl- und Kraftstoff-Kanal zu berücksichtigen, da große aromatische Moleküle mit höherem Siedepunkt im Bereich größerer Wellenlängen fluoreszieren.

Auch die Verwendung mehrerer Tracer zur Visualisierung der unterschiedlichen Siedebereiche des Multikomponenten-Kraftstoffs ist denkbar [142]. Hierbei ist ein Einfluss der Tracer-spezifischen Konzentrationsänderung auf das Fluoreszenzverhalten während der Verdampfung zu erwarten. Bei der Verwendung mehrerer Tracer können neben der Tracer-spezifischen Konzentrationsänderung weitere Effekte, wie z.B. Re-Absorption auftreten. Thirouard [35] und Wigger [4] verwenden eine Mischung aus kommerziellem Motoröl mit zwei Laserfarbstoffen (Pyromethen 567 und Rhodamin B). Durch die Re-Absorption des von Pyromethen 567 emittierten Fluoreszenzlichts durch Rhodamin B wird der Temperatureinfluss auf die Fluoreszenz-



eigenschaften der Öl-Farbstoff-Mischung reduziert. Da im Multikomponenten-Kraftstoff die Tracer-Konzentration während der Verdampfung nicht konstant ist, sind die Re-Absorptionseigenschaften im Zusammenhang mit dem konzentrationsbedingten LIF-Verhalten schwer vorherzusagen und erfordern experimentelle Untersuchungen. Die in Kapitel 5.3 bereitgestellten Daten und Vorgehensweisen zur Untersuchung der Verdampfungseigenschaften und des LIF-Verhaltens der MKKS/Anisol-Mischung bieten eine Grundlage für nachfolgende Forschungsarbeiten hinsichtlich der Absolutwert-Kalibrierung der Kraftstoff-Wandfilmhöhe.

## 6 Zusammenfassung

Downsizing und Direkteinspritzung sind Maßnahmen zur Optimierung moderner Ottomotoren. Hieraus resultieren höhere Zylinderdrücke und Temperaturen. Außerdem führt Benzin-Direkteinspritzung im Zusammenhang mit kleineren Zylinderdurchmessern und häufigen Kaltstarts durch den intermittierenden Motorbetrieb hybridisierter Antriebsstränge zu verstärkter Kraftstoff-Wandbenetzung und Ölverdünnung. Das tribologische System der Kolbengruppe umfasst Kolben, Kolbenringe, Zylinderlaufbahn und Motoröl und bietet das größte Potential zur Reduzierung der innermotorischen Reibung als wirkungsgradsteigernde Maßnahme. Steigende Anforderungen an das System erfordern u.a. die Untersuchung der Interaktion von Motoröl, Kraftstoff und Leckage-Gas (Blowby) innerhalb der Kolbengruppe. Hierbei sind sowohl ein grundlegendes Verständnis der physikalischen Phänomene als auch die Quantifizierung von Messwerten als Eingangsparameter für Simulationsmodelle von Interesse. In der Vergangenheit haben sich experimentelle Methoden, wie z.B. das Verfahren der laser-induzierten Fluoreszenz (LIF) zur Untersuchung der Kolbengruppe etabliert.

Ziel dieser Arbeit war es, LIF-Messverfahren zur Untersuchung flüssiger Kraftstoff- und Ölschichten unter realitätsnahen Bedingungen in einem optisch zugänglichen Einzylindermotor zu entwickeln.

### **Optisch zugängliches Einzylinderaggregat**

Im Rahmen dieser Arbeit kam ein hochlastfähiges ( $p_{mi} \leq 14$  bar), optisches Einzylinderaggregat mit Benzin-Direkteinspritzung zum Einsatz. Der Forschungsmotor verfügt über seitlich in die Zylinderlaufbahn eingebrachte Saphirfenster (Breite x Höhe: 18x93 mm<sup>2</sup>) auf Druck- und Gegendruckseite, durch die nahezu der komplette Kolbenhub abgebildet werden kann. Die Abweichung der Zylinderform des optischen Zylinderrohrs von der Idealform ist mit 11,3 µm um einen Faktor von etwa zwei geringer verglichen mit dem Vollmotor-Zylinder (22 µm) eines Serienmotors. Durch die Honbearbeitung der Oberfläche des Saphirfensters wurde eine zum Vollmotor vergleichbare Oberflächentopographie erzielt. Durch den seriennahen Fertigungsprozess des optischen Zylinderrohrs wurden realitätsnahe Bedingungen hinsichtlich des Ring-Anlageverhaltens, bzw. der Dichtfunktion des Ringpakets, sowie der Benetzbarkeit der Oberfläche sichergestellt.

## Optische Analyse des Ölhaushalts in der Kolbengruppe

Im ersten Abschnitt dieser Arbeit wurde ein bestehendes LIF-Messsystem mit zwei CMOS-Kameras und einer maximalen Repetitionsrate von 100 Hz zur simultanen Abbildung des Ölhaushalts in der Kolbengruppe auf Druck- und Gegendruckseite des Einzylinderaggregats weiterentwickelt. Hierbei kam eine Mischung aus kommerziellem Motoröl (OEM-Öl) mit  $0,015 \pm 0,005$  mmol/L Pyrromethen 567 zum Einsatz, die mit 532 nm eines Nd:YAG-Lasers angeregt wurde. Optische Eigenschaften der Motoröl-Farbstoff-Mischung wurden in einer Dünnschichtzelle, die die Erzeugung einer definierten Schichtdicke und Temperatur ermöglichte, untersucht. Hierbei wurde ein proportionaler Zusammenhang zwischen Fluoreszenz und Schichtdicke bis zu einer Filmhöhe von 100  $\mu\text{m}$  nachgewiesen. Außerdem wurde die Abnahme der LIF-Intensität mit steigender Temperatur beobachtet. Bezogen auf das Signal bei  $T = 50$  °C nahm die Signalintensität bei  $T = 110$  °C um 14 % ab. Basierend auf diesen Erkenntnissen wurde ein Bildverarbeitungsprozess zur Quantifizierung der Ölfilmhöhe im Reibkontakt Kolbenhemd/Zylinderlaufbahn im befeuerten Motorbetrieb mit einer in situ Kalibriermethode entwickelt. Hierzu wurde die Geometrie des Kolbenhemds im Motorbetrieb durch LIF-Messtechnik und ex situ durch Konfokalmikroskopie bestimmt. Aus dem Abgleich der beiden Messsysteme anhand der Kolbenhemdform wurde mit Hilfe einer Koordinatentransformation ein Kalibrierfaktor bestimmt. Aus dem Bildverarbeitungsprozess ging eine Gesamtunsicherheit von  $\pm 4,6$  % für die Quantifizierung der Schmierfilmhöhe auf Druck- und Gegendruckseite hervor. Im Rahmen dieser Arbeit wurde das komplette Arbeitsspiel eines ausgewählten Betriebspunktes ( $n = 1300$  min<sup>-1</sup>,  $p_{mi} = 8,5$  bar) ausführlich diskutiert. Die erste Erkenntnis war, dass das Öl hauptsächlich auf dem Kolben und nur wenig Öl auf der Zylinderwand haftete. Die simultane Quantifizierung der LIF-Aufnahmen auf Druck- und Gegendruckseite ermöglichte Aussagen über den Zusammenhang zwischen Schmierfilmhöhe im Kontakt Kolbenhemd/Zylinderlaufbahn und Kolbensekundärbewegung. Der Kolben wechselte die Anlagenseite im Zylinder mehrmals pro Arbeitsspiel. Die niedrigste Schmierfilmhöhe stellte sich im Expansionstakt aufgrund der hohen Seitenkraft auf der Druckseite mit 3,0  $\mu\text{m}$  ein. Die größte Ölfilmhöhe (64,0  $\mu\text{m}$ ) wurde auf der Gegendruckseite im Bereich des Ladungswechsel-OT identifiziert.

Durch die gute optische Qualität des Messsystems und den umfangreichen Bildverarbeitungsprozess konnte die Schmierfilmhöhe im tribologischen Kontakt

Kolbenhemd/Zylinderlaufbahn mit einer geringen Unsicherheit quantifiziert werden. Die maximale Wiederholrate von 100 Hz beschränkte die Anwendung des Messsystems allerdings auf eine Aufnahme pro Arbeitsspiel, wodurch dynamische Effekte, wie z.B. einzelne Tropfen und Gasströmungen kaum untersucht werden konnten. Beim Motorbetrieb mit Direkteinspritzung wurde beobachtet, wie der Ölfilm auf der Zylinderwand vom auftreffenden Kraftstoffstrahl verdrängt wurde.

Um eine höhere zeitliche Auflösung zu realisieren und zur Visualisierung von Kraftstoff wurde im zweiten Teil der Arbeit ein neues LIF-Messsystem entwickelt.

### **Simultane Hochgeschwindigkeits-Visualisierung von Kraftstoff und Öl**

Ziel des zweiten Teils der Arbeit war es, ein LIF-Messsystem zu entwickeln, das die simultane, kurbelwinkelaufgelöste Visualisierung von Kraftstoff und Öl unter realitätsnahen Bedingungen ermöglicht. Kraftstoff und Öl wurden ein Tracer, bzw. ein Farbstoff (Pyromethen 567) beigemischt und mit einem Nd:YAG-Laser mit einer maximalen Wiederholrate von 10 kHz bei 266 nm und 532 nm angeregt. Das Fluoreszenzlicht der beiden Fluide wurde spektral getrennt und von zwei Kameras detektiert. Zur Detektion von UV-Kraftstoff-LIF wurde eine Kamera mit einem Bildverstärker ausgestattet, der das räumliche Auflösungsvermögen der Kamera um Faktor 3,8 verringerte. Um das Verdampfungsverhalten von kommerziellem Kraftstoff abzubilden, wurde ein neuer Multikomponenten-Kraftstoff mit realitätsnaher Siedelinie, ohne Eigenfluoreszenz und mit hoher Oktanzahl (ROZ = 101) entwickelt. Die photophysikalischen Eigenschaften des optischen Systems hinsichtlich LIF-Intensität in Abhängigkeit der Tracer-Konzentration, Filmdicke, Filmtemperatur und die Wechselwirkung der optischen Kanäle (cross-talk) wurden in Voruntersuchungen in einer Dünnschichtkuvette und im optischen Einzylinderaggregat untersucht.

Toluol (Siedepunkt 110 °C) in iso-Oktan wurde bereits zur Visualisierung flüssiger Kraftstofffilme durch LIF verwendet und diente in dieser Arbeit als Basis-Mischung. Eine Konzentration von 3 Masse-% Toluol in iso-Oktan wurde als geeignet für die Motorexperimente identifiziert. Zur Visualisierung höhersiedender Komponenten des Multikomponenten-Kraftstoffs wurde Anisol als zweiter Tracer untersucht. Der Absorptionsquerschnitt von Anisol war um Faktor 16 größer als der von Toluol. Die Konzentration von 0,5 Masse-% Anisol wurde für die Motorexperimente gewählt. Hierdurch wurde bereits eine erhebliche Abweichung der näherungsweise linearen

Abhängigkeit von LIF-Intensität von der Schichtdicke identifiziert, die allerdings zugunsten eines stärkeren Signals akzeptiert wurde.

Die LIF-Intensität von Toluol und Anisol wies eine signifikante Abnahme mit steigender Temperatur auf. Am Siedepunkt (110 °C) betrug das Fluoreszenzsignal von 3 Masse-% Toluol in iso-Oktan noch 40 % des Signals bei 30 °C. Die LIF-Intensität von 0,5 Masse-% Anisol in iso-Dodekan betrug bei 154 °C noch 20 % des Ausgangssignals bei 30 °C. In einem quasistationären Verdampfungsversuch wurde im Bereich des Siedeendes in der verbleibenden Flüssigphase eine erhöhte Anisol-Konzentration nachgewiesen. Dadurch wurde die temperaturbedingte Fluoreszenzabnahme während der Verdampfung durch die Anisolanreicherung in der verbleibenden Flüssigphase teilweise kompensiert.

Während cross-talk durch Kraftstoff-LIF im Öl-Kanal vernachlässigbar war, verursachte Öl-LIF erheblichen cross-talk im Kraftstoff-Kanal (279-305 nm). Das OEM-Öl aus dem ersten Teil der Arbeit wurde mit einem niedrigadditivierten Surrogat-Öl hinsichtlich optischer und tribologischer Eigenschaften verglichen. Im Schwingreib-Verschleiß-Tribometer wurde die Proben temperatur als Kennzahl für das Fressverhalten herangezogen. Die Proben temperatur des Surrogat-Öls lag nur 10 °C unterhalb des OEM-Öls und das Surrogat-Öl erwies sich als geeignet für den Einsatz im optischen Einzylindermotor. Hinsichtlich der optischen Eigenschaften der beiden Öle waren die Unterschiede deutlicher. Im Kraftstoff-Kanal wies das OEM-Öl einerseits eine niedrige Eigenfluoreszenz auf, andererseits war das Öl durch eine niedrige Transparenz für Fluoreszenzlicht charakterisiert. Hierdurch konnte Kraftstoff gemischt in OEM-Öl unterhalb einer Konzentration von 50 % nicht detektiert werden. Das Surrogat-Öl war ebenfalls durch eine niedrige Eigenfluoreszenz, allerdings durch eine hohe Transparenz von Fluoreszenzlicht charakterisiert. Durch eine Kontamination des Surrogat-Öls mit Rückständen des OEM-Öls im Ölkreislauf des Einzylindermotors war die Eigenfluoreszenz im Motorversuch zwar erhöht, aufgrund der noch immer hohen Transparenz hinsichtlich Kraftstoff-LIF dennoch für die Motorexperimente geeignet.

In den Motorexperimenten kamen das Surrogat-Öl und der Multikomponenten-Kraftstoff mit 0,5 Masse-% Anisol zum Einsatz. Mit dieser Kombination verursachten bereits niedrige Kraftstoff-Konzentrationen im Öl einen deutlichen Anstieg der LIF-Intensität im Kraftstoff-Kanal. Die Untersuchungen im optischen Einzylindermotor

wurden unter geschleppten und befeuerten Betriebsbedingungen im Drehzahlbereich zwischen  $1500\text{-}2200\text{ min}^{-1}$  und bei Lasten bis  $p_{mi} = 7,2\text{ bar}$  durchgeführt. Zur Simulation von Kaltstartbedingungen oder des intermittierenden Motorbetriebs von hybridisierten Antriebssträngen betrug die Kühlwasser- und Öltemperatur  $50\text{ °C}$ . Zunächst konnten die Erkenntnisse aus dem ersten Teil der Arbeit bestätigt werden: Während nur geringe Ölmengen auf der Zylinderwand verblieben, wurden große Ölvolumen auf den Ringstegen und in der Ölnut des Kolbens detektiert. Im geschleppten Motorbetrieb herrschte aufgrund des niedrigen Ansaugdrucks ein Druckgefälle vom Kurbelgehäuse in Richtung Brennraum. Die unvollständige Abdichtung des Ringpakets führte zu einer aufwärtsgerichteten Gasströmung, durch die Öl vom Kurbelgehäuse in Richtung Brennraum, insbesondere durch den Ringstoß, transportiert wurde. Im befeuerten Motorbetrieb mit Direkteinspritzung wurde das Auftreffen des Kraftstoffsprays auf die Zylinderwand und die Wandfilmbildung durch Kraftstoff-LIF visualisiert. Unter den hier untersuchten Bedingungen verblieb der Kraftstoffwandfilm aufgrund unvollständiger Verdampfung auf der Zylinderwand. Der Kraftstoff wurde teilweise vom Top-Ring abgekratzt und durch den Ringstoß in Richtung Kurbelgehäuse transportiert. Durch die Optimierung des Einspritztimings konnte die Kraftstoff-Wandfilmbildung deutlich reduziert werden. Eine geringere Wandfilmbildung führte zu einer Reduzierung der Ölverdünnung auf den Ringstegen und im Gegensatz zur verstärkten Wandbenetzung zur Vermeidung von Öltransportvorgängen von der Top-Ring-Nut auf den 1. und 2. Ringsteg.

Die im ersten Teil dieser Arbeit weiterentwickelte LIF-Messtechnik bot die Möglichkeit der Untersuchung der Kolbensekundärbewegung unter realitätsnahen Bedingungen und deren Zusammenhang mit quantitativen Ölfilmthicken im Reibkontakt Kolbenhemd/Zylinderlaufbahn. Hieraus wurden wichtige Erkenntnisse für die reibungsoptimierte Auslegung neuer Kolbensysteme gewonnen und eine entscheidende Eingangsgröße für Reibungssimulationsmodelle bereitgestellt. Das neu entwickelte LIF-Messsystem im zweiten Abschnitt der Arbeit erlaubte die simultane, kurbelwinkelaufgelöste Visualisierung von Kraftstoff und Öl, wodurch die Interaktion dieser Fluide innerhalb der Kolbengruppe untersucht werden konnte. Aufgrund des qualitativen Charakters bot das Messsystem u.a. die Möglichkeit der Optimierung des Einspritztimings zur Reduzierung der Kraftstoff-Wandbenetzung und Ölverdünnung. Mit den hier untersuchten Eigenschaften des LIF-Messsystems hinsichtlich Photophysik der LIF-Tracer, cross-talk zwischen den optischen Kanälen

und Bildverarbeitung wurde eine Grundlage für weitere Forschungsarbeiten in Richtung simultaner Quantifizierung von Kraftstoff- und Ölfilmdicken bereitgestellt.

## Veröffentlichungen

Füßer, H.-J., Wigger, S. und Müller, T. "Visualisierung der Öl- und Kraftstoffverteilung mittels LIF in der Kolbengruppe an einem optisch zugänglichen Einzylindermotor," *VDI-Tagung Zylinderlaufbahn, Kolben, Pleuel*, 2018.

Müller, T., Wigger, S., Fuesser, H.-J. und Kaiser, S., "Development of a LIF-imaging system for simultaneous high-speed visualization of liquid fuel and oil films in an optically accessible DISI engine," *SAE Technical Paper 2018-01-0634*, 2018.

Müller, T., Wigger, S., Füßer, H.-J. und Kaiser, S. "Visualization of Fuel Wall Wetting, Oil Dilution by Fuel, and Oil Transport Mechanisms in an Optically Accessible Engine by LIF Imaging," *5<sup>th</sup> International Conference on Knocking in Gasoline Engines*, 2017.

Müller, T., Wigger, S., Füßer, H.-J. und Kaiser, S. "Optische Untersuchung der Schmierungsverhältnisse im Reibkontakt Kolbenhemd/Zylinderlaufbahn mittels laserinduzierter Fluoreszenz an einem optisch zugänglichen Einzylindermotor," *Tribologie und Schmierungstechnik*, 64(6/17), 2017.

Wigger, S., Müller, T. und Füßer, H.-J. "Tribologieanalyse der Kolbengruppe mittels optisch zugänglichem Forschungsmotor," *MTZ – Motortechnische Zeitschrift*, 78(7-8): 46-51, 2017.

Müller, T., Wigger, S., Füßer, H.-J. und Kaiser, S. "Optische Untersuchung der Schmierungsverhältnisse im Reibkontakt Kolbenhemd/Zylinderlaufbahn mittels laserinduzierter Fluoreszenz an einem optisch zugänglichen Einzylindermotor," *Fachtagung der Gesellschaft für Tribologie*, 2016.

Obert, P., Müller, T., Füßer, H.-J. und Bartel, D., "The influence of oil supply and cylinder liner temperature on friction, wear and scuffing behavior of piston ring cylinder liner contacts – A new model test," *Tribology International*, 94: 306-314, 2016.

## Betreute Abschlussarbeiten

Schöler, J. "Untersuchung der Schmierölverteilung in der Kolbengruppe eines Ottomotors durch laserinduzierte Fluoreszenz," Masterarbeit, Universität Duisburg-Essen, Institut für Verbrennung und Gasdynamik, Gutachter: Prof. Sebastian Kaiser, 2017.

Baumeister, P. "Vergleichende Ölemissionsmessungen an einem optisch zugänglichen Einzylindermotor mittels Massenspektrometrie" Bachelorarbeit, Hochschule für angewandte Wissenschaften München, Fakultät 03 für Maschinenbau, Fahrzeugtechnik, Flugzeugtechnik, Gutachter: Prof. Martin Doll, 2016.



## Literaturverzeichnis

1. Golloch, R., "Downsizing bei Verbrennungsmotoren," 1. Auflage, Springer-Verlag Berlin-Heidelberg, 2005.
2. Schommers, J., Scheib, H., Hartweg, M. und Bosler, A., "Reibungsminimierung bei Verbrennungsmotoren," *MTZ - Motortechnische Zeitschrift*, 74(7): 566-573, 2013.
3. Tung, S.C. und McMillan, M.L., "Automotive tribology overview of current advances and challenges for the future," *Tribology International*, 37(7): 517-536, 2004.
4. Wigger, S., "Charakterisierung von Öl- und Kraftstoffschichten in der Kolbengruppe mittels laserinduzierter Fluoreszenz," Dissertation, Universität Duisburg-Essen, 2014.
5. Takahashi, M., Isarai, R. und Hara, H., "Measurement of Piston Secondary Motion Using the New Digital Telemeter," *SAE International Journal of Engines*, 6(1): 577-586, 2013.
6. Müller, T., Wigger, S., Füller, H.-J. und Kaiser, S.A., "Optische Untersuchung der Schmierungsverhältnisse im Reibkontakt Kolbenhemd/Zylinderlaufbahn mittels laserinduzierter Fluoreszenz an einem optisch zugänglichen Einzylinderomotor," *Tribologie und Schmierungstechnik*, 6/2017: 35-42, 2017.
7. Mansouri, S.H. und Wong, V.W., "Effects of Piston Design Parameters on Piston Secondary Motion and Skirt-Liner Friction," *SAE Technical Paper 2004-01-2911*, 2004.
8. Mahle, "Zylinderkomponenten," 2. Auflage, Springer Vieweg, 2015.
9. Liu, Y. und Tian, T., "Development and Application of Ring-Pack Model Integrating Global and Local Processes. Part 1: Gas Pressure and Dynamic Behavior of Piston Ring Pack," *SAE International Journal of Engines*, 10(4): 1927-1939, 2017.
10. Liu, Y., Li, Y. und Tian, T., "Development and Application of Ring-Pack Model Integrating Global and Local Processes. Part 2: Ring-Liner Lubrication," *SAE International Journal of Engines*, 10(4): 1969-1983, 2017.
11. Przesmitzki, S. und Tian, T., "Oil Transport Inside the Power Cylinder During Transient Load Changes," *SAE Technical Paper 2007-01-1054*, 2007.
12. Bobzin, K., Ernst, F., Zwick, J., Schlaefer, T., Cook, D., et al., "Coating Bores of Light Metal Engine Blocks with a Nanocomposite Material using the Plasma Transferred Wire Arc Thermal Spray Process," *Journal of Thermal Spray Technology*, 17(3): 344-351, 2008.
13. Chen, H., "Modeling the Lubrication of the Piston Ring Pack in Internal Combustion Engines Using the Deterministic Method," Massachusetts Institute of Technology, 2011.
14. Czichos, H. und Habig, K.-H., "Tribologie-Handbuch," 3. Auflage, Vieweg+Teubner Verlag, 2015.

15. Obert, P., Müller, T., Füßer, H.-J. und Bartel, D., "The influence of oil supply and cylinder liner temperature on friction, wear and scuffing behavior of piston ring cylinder liner contacts – A new model test," *Tribology International*, 94: 306-314, 2016.
16. Möller, U.J. und Nassar, J., "Schmierstoffe im Betrieb," 2. Auflage, Springer-Verlag Berlin-Heidelberg, 2002.
17. Grote, K.-H. und Feldhusen, J., "Dubbel," 24. Auflage, Springer Vieweg, 2014.
18. Bai, D., "Modeling Piston Skirt Lubrication in Internal Combustion Engines," Dissertation, Massachusetts Institute of Technology, 2012.
19. J, A.P. und Agarwal, V.K., "Effect of Design and Operational Parameters of Piston Skirt on the Performance and Efficiency of a Small Gasoline Engine," *SAE Technical Paper* 2014-01-2016, 2014.
20. Deuß, T., Ehnis, H., Freier, R. und Künzel, R., "Reibleistungsmessungen am befeuerten Dieselmotor — Einfluss der Schaftgeometrie," *MTZ - Motortechnische Zeitschrift*, 74(12): 966-971, 2013.
21. Deuß, T., Ehnis, H., Rose, R. und Künzel, R., "Friction power measurements of a fired diesel engine – influence of piston skirt coatings," *MTZ worldwide*, 72(4): 18-23, 2011.
22. Westerfield, Z., Totaro, P., Kim, D. und Tian, T., "An Experimental Study of Piston Skirt Roughness and Profiles on Piston Friction Using the Floating Liner Engine," *SAE Technical Paper* 2016-01-1043, 2016.
23. Totaro, P.P., Westerfield, Z. und Tian, T., "Introducing a New Piston Skirt Profile to Reduce Engine Friction," *SAE Technical Paper* 2016-01-1046, 2016.
24. Shibuya, N., Onogawa, K., Akasaka, Y., Mochida, O. und Watanabe, H., "Development of a Low Friction Piston with a New Flexible Skirt Structure for a 3.5-L V6 Gasoline Engine," *SAE Technical Paper* 2002-01-0491, 2002.
25. Werkmann, M., Bitter, A. und Künzel, R., "Einfluss der Schaftsteifigkeit auf das Kolbengeräusch," *MTZ - Motortechnische Zeitschrift*, 72(7): 552-557, 2011.
26. Blümm, M., Baberg, A., Dörnenburg, F.T.H. und Leitzmann, D., "Innovative Schaftbeschichtungen für Otto- und Dieselmotorkolben," *MTZ - Motortechnische Zeitschrift*, 77(2): 54-59, 2016.
27. Biberger, J., "Tribologisch induzierte Oberflächenveränderungen im Reib-Verschleiß-Kontakt Kolbenring gegen Zylinderlaufbahn," Dissertation, Technische Universität Berlin, 2017.
28. Dickinson, M.W., "Optimising Piston Ring Contact Face Chamfer for High Performance Engines," *SAE Technical Paper* 2013-01-0965, 2013.
29. Sabeur, M., Ibrahim, D., Mohamed, E.M. und Hassan, Z., "Energy efficiency optimization of engine by frictional reduction of functional surfaces of cylinder ring-pack system," *Tribology International*, 59: 240-247, 2013.
30. Holmberg, K., Andersson, P. und Erdemir, A., "Global Energy Consumption due to Friction in Passenger Cars," *Tribology International*, 47: 221-234, 2012.
31. Luther, R. und Harperscheid, M., "Multifunktionstalent Motorenöl Zielkonflikte bei der Reibungsminderung," *MTZ - Motortechnische Zeitschrift*, 77(12): 10-15, 2016.

32. Pischinger, S., "Vorlesungsumdruck - Verbrennungsmotoren Band 1," 22. Auflage, RWTH Aachen, 2001.
33. Schwarze, H., Brouwer, L., Knoll, G., Schlerege, F., Müller-Frank, U., et al., "Lubricant degradation and wear behaviour in a spark-ignition engine," *MTZ worldwide*, 69(10): 60-67, 2008.
34. Shayler, P.J., Winborn, L.D. und Scarisbrick, A., "Fuel Transport to the Crankcase, Oil Dilution and HC Return with Breather Flow During the Cold Operation of a SI Engine," *SAE Technical Paper* 2000-01-1235, 2000.
35. Thirouard, B., "Characterization and Modeling of the Fundamental Aspects of Oil Transport in the Piston Ring Pack of Internal Combustion Engines," Dissertation, Massachusetts Institute of Technology, 2001.
36. Przesmitzki, S. und Tian, T., "An Experimental Study of the Time Scales and Controlling Factors Affecting Drastic Blow-by Increases during Transient Load Changes in SI Engines," *SAE Technical Paper* 2008-01-0794, 2008.
37. Yilmaz, E., Tian, T., Wong, V.W. und Heywood, J.B., "The Contribution of Different Oil Consumption Sources to Total Oil Consumption in a Spark Ignition Engine," *SAE Technical Paper* 2004-01-2909, 2004.
38. Frommer, A., Deuß, T., Ehnis, H. und Künzel, R., "Auslegung der Tangentialkraft des Ölabstreifrings — Ölemission versus Reibung," *MTZ - Motortechnische Zeitschrift*, 77(1): 50-55, 2016.
39. Papadopoulos, I., Becker, S., Ehnis, H., Kunzel, R. und Frommer, A., "Influence of Oil Drain Holes on Oil Emission of a Turbocharged Gasoline Engine," *SAE Technical Paper* 2017-01-1045, 2017.
40. Thirouard, B. und Tian, T., "Oil Transport in the Piston Ring Pack (Part I): Identification and Characterization of the Main Oil Transport Routes and Mechanisms," *SAE Technical Paper* 2003-01-1952, 2003.
41. Thirouard, B. und Tian, T., "Oil Transport in the Piston Ring Pack (Part II): Zone Analysis and Macro Oil Transport Model," *SAE Technical Paper* 2003-01-1953, 2003.
42. Stevens, E. und Steeper, R., "Piston Wetting in an Optical DISI Engine: Fuel Films, Pool Fires, and Soot Generation," *SAE Technical Paper* 2001-01-1203, 2001.
43. Drake, M.C., Fansler, T.D., Solomon, A.S. und Szekeley, G.A., "Piston Fuel Films as a Source of Smoke and Hydrocarbon Emissions from a Wall-Controlled Spark-Ignited Direct-Injection Engine," *SAE Technical Paper* 2003-01-0547, 2003.
44. Witze, P.O. und Green, R.M., "Comparison of Single and Dual Spray Fuel Injectors During Cold Start of a PFI Spark Ignition Engine Using Visualization of Liquid Fuel Films and Pool Fires," *SAE Technical Paper* 2005-01-3863, 2005.
45. Li, J., Matthews, R.D., Stanglmaier, R.H., Roberts, C.E. und Anderson, R.W., "Further Experiments on the Effects of In-Cylinder Wall Wetting on HC Emissions from Direct Injection Gasoline Engines," *SAE Technical Paper* 1999-01-3661, 1999.

46. Cho, H., Kim, M. und Min, K., "The Effect of Liquid Fuel on the Cylinder Liner on Engine-Out Hydrocarbon Emissions in SI Engines," *SAE Technical Paper* 2001-01-3489, 2001.
47. Schulz, F., Samenfink, W., Schmidt, J. und Beyrau, F., "Systematic LIF fuel wall film investigation," *Fuel*, 172: 284-292, 2016.
48. Budde, M., Brandt, S., Krause, S. und Gohl, M., "Einfluss der Gemischbildung auf die Ölemissionen von Verbrennungsmotoren," *MTZ - Motortechnische Zeitschrift*, 72(1): 62-67, 2011.
49. Triebisch, P., "Kraftstoffeintrag ins Motoröl von aufgeladenen, direkteinspritzenden Ottomotoren," Dissertation, Universität Magdeburg, 2015.
50. Bregar, J., Rienäcker, A., Gohl, M. und Knoll, G., "Fuel Transport across the Piston Ring Pack: Development of a Computationally Efficient Simulation Model," *SAE Technical Paper* 2015-24-2534, 2015.
51. Krause, S., "Massenspektrometrisches Verfahren zur Charakterisierung der Ölverdampfung im Brennraum von Ottomotoren," Dissertation, Technische Universität Hamburg-Harburg, 2009.
52. Landsberg, G.B., Heywood, J.B. und Cheng, W.K., "Contribution of Liquid Fuel to Hydrocarbon Emissions in Spark Ignition Engines," *SAE Technical Paper* 2001-01-3587, 2001.
53. Sagawa, T., Fujimoto, H. und Nakamura, K., "Study of Fuel Dilution in Direct- Injection and Multipoint Injection Gasoline Engines," *SAE Technical Paper* 2002-01-1647, 2002.
54. Takeuchi, K., Fujimoto, K., Hirano, S. und Yamashita, M., "Investigation of Engine Oil Effect on Abnormal Combustion in Turbocharged Direct Injection - Spark Ignition Engines," *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*, 5(3): 1017-1024, 2012.
55. Hirano, S., Yamashita, M., Fujimoto, K. und Kato, K., "Investigation of Engine Oil Effect on Abnormal Combustion in Turbocharged Direct Injection - Spark Ignition Engines (Part 2)," *SAE Technical Paper* 2013-01-2569, 2013.
56. Magar, M., Spicher, U., Palaveev, S., Gohl, M., Müller, G., et al., "Experimental Studies on the Occurrence of Low-Speed Pre-Ignition in Turbocharged GDI Engines," *SAE International Journal of Engines*, 8(2): 495-504, 2015.
57. Amann, M., Alger, T., Westmoreland, B. und Rothmaier, A., "The Effects of Piston Crevices and Injection Strategy on Low-Speed Pre-Ignition in Boosted SI Engines," *SAE International Journal of Engines*, 5(3): 1216-1228, 2012.
58. Zahdeh, A., Rothenberger, P., Nguyen, W., Anbarasu, M., Schmuck-Soldan, S., et al., "Fundamental Approach to Investigate Pre-Ignition in Boosted SI Engines," *SAE International Journal of Engines*, 4(1): 246-273, 2011.
59. Kassai, M., Torii, K., Shiraishi, T., Noda, T., Goh, T.K., et al., "Research on the Effect of Lubricant Oil and Fuel Properties on LSPI Occurrence in Boosted S. I. Engines," *SAE Technical Paper* 2016-01-2292, 2016.
60. Inoue, T., Inoue, Y. und Ishikawa, M., "Abnormal Combustion in a Highly Boosted SI Engine - The Occurrence of Super Knock," *SAE Technical Paper* 2012-01-1141, 2012.

61. Morikawa, K., Moriyoshi, Y., Kuboyama, T., Yamada, T. und Suzuki, M., "Investigation of Lubricating Oil Properties Effect on Low Speed Pre-Ignition," *SAE Technical Paper* 2015-01-1870, 2015.
62. Dahnz, C., Han, K.-M., Spicher, U., Magar, M., Schiessl, R., et al., "Investigations on Pre-Ignition in Highly Supercharged SI Engines," *SAE International Journal of Engines*, 3(1): 214-224, 2010.
63. Weimar, H.-J., "Entwicklung eines laser-optischen Messsystems zur kurbelwinkelaufgelösten Bestimmung der Ölfilmstärke zwischen Kolbenring und Zylinderwand in einem Ottomotor," Dissertation, Universität Karlsruhe, 2002.
64. Mills, R., Avan, E.Y. und Dwyer-Joyce, R., "Measuring Lubricant Films at the Piston-Cylinder Contact: An Overview of Current Technologies with Focus on Ultrasound," *SAE Technical Paper* 2013-01-0294, 2013.
65. Ford, R.A.J. und Foord, C.A., "Laser-based fluorescence techniques for measuring thin liquid films," *Wear*, 51(2): 289-297, 1978.
66. Arcoumanis, C., Duszynski, M., Lindenkamp, H. und Preston, H., "Measurements of the Lubricant Film Thickness in the Cylinder of a Firing Diesel Engine Using LIF," *SAE Technical Paper* 982435, 1998.
67. Takiguchi, M., Nakayama, K., Furuhashi, S. und Yoshida, H., "Variation of Piston Ring Oil Film Thickness in an Internal Combustion Engine - Comparison Between Thrust and Anti-Thrust Sides," *SAE Technical Paper* 980563, 1998.
68. Wong, V.W. und Hoult, D.P., "Experimental Survey of Lubricant-Film Characteristics and Oil Consumption in a Small Diesel Engine," *SAE Technical Paper* 910741, 1991.
69. Hoult, D.P., Lux, J.P. und Wong, V.W., "Calibration of Laser Fluorescence Measurements of Lubricant Film Thickness in Engines," *SAE Technical Paper* 881587, 1988.
70. Sanda, S., Murakami, M., Noda, T. und Konomi, T., "Analysis of Lubrication of a Piston Ring Package : Effect of Oil Starvation on Oil Film Thickness," *JSME International Journal Series B*, 40(3): 478-486, 1997.
71. Inagaki, H., Saito, A., Murakami, M. und Konomi, T., "Measurement of Oil Film Thickness Distribution on Piston Surface Using the Fluorescence Method : Development of Measurement System," *JSME International Journal Series B*, 40(3): 487-493, 1997.
72. Schulz, F., Schmidt, J. und Beyrau, F., "Development of a sensitive experimental set-up for LIF fuel wall film measurements in a pressure vessel," *Experiments in Fluids*, 56(5): 1-16, 2015.
73. Geiler, J.N., Grzeszik, R., Quaing, S., Manz, A. und Kaiser, S.A., "Development of laser-induced fluorescence to quantify in-cylinder fuel wall films," *International Journal of Engine Research*, 19(1): 134-147, 2017.
74. Sauer, M., Hofkens, J. und Enderlein, J., "Handbook of Fluorescence Spectroscopy and Imaging," Wiley-VCH, 2011.
75. Schulz, C. und Sick, V., "Tracer-LIF diagnostics: quantitative measurement of fuel concentration, temperature and fuel/air ratio in practical combustion systems," *Progress in Energy and Combustion Science*, 31(1): 75-121, 2005.

76. Zanghi, E. und Tian, T., "Development of a High Speed Laser Induced Fluorescence (HSLIF) System in a Single Cylinder Engine for Oil Transport Studies," *SAE Technical Paper* 2016-01-0642, 2016.
77. Picard, M., Hidaka, H., Tian, T., Nishino, T., Arai, E., et al., "Visualization of the Rotary Engine Oil Transport Mechanisms," *SAE International Journal of Engines*, 7(3): 1477-1488, 2014.
78. Wigger, S., Müller, T. und Füller, H.-J., "Tribologieanalyse der Kolbengruppe mittels optisch zugänglichem Forschungsmotor," *MTZ - Motortechnische Zeitschrift*, 78(7): 46-51, 2017.
79. Mürwald, M., Kemmler, R., Waltner, A. und Kreitmann, F., "Die neuen Vierzylinder-Ottomotoren von Mercedes-Benz," *MTZ - Motortechnische Zeitschrift*, 74(11): 832-841, 2013.
80. Nanofocus, "Messprinzip der Konfokalmikroskopie," <https://www.nanofocus.de/technologie/messprinzipien/usurf-technologie/video-konfokaltechnik>, abgerufen im März 2018.
81. Jenoptik, "Incometer v200," <https://www.jenoptik.com/products/metrology/form-metrology/form-and-roundness-measurement-in-cylinder-bores/hommel-etamic-incometer-v>, abgerufen im März 2018.
82. Daimler AG, "Interne Messungen," 2017.
83. Schöler, J., "Untersuchung der Schmierölverteilung in der Kolbengruppe eines Ottomotors durch laserinduzierte Fluoreszenz," Masterthesis, Universität Duisburg-Essen, 2017.
84. Assor, Y., Burshtein, Z. und Rosenwaks, S., "Spectroscopy and laser characteristics of copper-vapor-laser pumped Pyrromethene-556 and Pyrromethene-567 dye solutions," *Applied Optics*, 37(21): 4914-4920, 1998.
85. Semrock, "Filter-Transmissionsspektren," <https://www.semrock.com/product-families.aspx>, abgerufen im Oktober 2017.
86. LaVision, "Komponenten der LIF-Messtechnik," <https://www.lavision.de/de/>, abgerufen im Februar 2018.
87. Baba, Y., Suzuki, H., Sakai, Y., Teck Wei, D.L., Ishima, T., et al., "PIV/LIF measurements of oil film behavior on the piston in I. C. engine," *SAE Technical Paper* 2007-24-0001, 2007.
88. Salazar, V.M., Kaiser, S.A. und Halter, F., "Optimizing Precision and Accuracy of Quantitative PLIF of Acetone as a Tracer for Hydrogen Fuel," *SAE International Journal of Engines*, 2009.
89. Le Coz, J.-F. und Baritaud, T., "Application of Laser Induced Fluorescence for Measuring the Thickness of Evaporating Gasoline Liquid Films," in *Developments in Laser Techniques and Applications to Fluid Mechanics: Proceedings of the 7th International Symposium Lisbon, Portugal, 11–14 July, 1994*, R.J. Adrian, et al., Editors. Springer-Verlag Berlin-Heidelberg: p. 115-131, 1996.
90. Kato, M., Fujita, K., Suzuki, H., Baba, Y., Ishima, T., et al., "Analysis of Lubricant Oil Film Behavior on the Piston Surface According with Piston Shapes by Means of LIF and PIV," *SAE Technical Paper* 2009-28-0003, 2009.

91. Ohsawa, K., Kiyama, S., Nakamura, Y., Ochiai, Y., Nakagawa, S., et al., "Visualization Study on Lubricant Oil Film Behavior around Piston Skirt," *SAE Technical Paper* 2011-01-2119, 2011.
92. Hentschel, W., Grote, A. und Langer, O., "Measurement of Wall Film Thickness in the Intake Manifold of a Standard Production SI Engine by a Spectroscopic Technique," *SAE Technical Paper* 1997.
93. Takahashi, Y., Nakase, Y. und Ichinose, H., "Analysis of the Fuel Liquid Film Thickness of a Port Fuel Injection Engine," *SAE Technical Paper* 2006.
94. Arcoumanis, C., Duszynski, M., Pyke, E. und Preston, H., "Cold-start Measurements of the Lubricant Film Thickness in the Cylinder of a Firing Diesel Engine," *SAE Technical Paper* 982436, 1998.
95. Shaw II, B.T., Hoult, D.P. und Wong, V.W., "Development of Engine Lubricant Film Thickness Diagnostics Using Fiber Optics and Laser Fluorescence," *SAE Technical Paper*, 920651, 1992.
96. Müller, H., "Vorlesungsskript - Koordinatentransformation," U.o.A. Sciences, University of Applied Sciences Mainz, 2016.
97. Beineke, D., "Verfahren zur Genauigkeitsanalyse für Altkarten," Dissertation, Universität der Bundeswehr München, 2001.
98. Gessenhardt, C., Schulz, C. und Kaiser, S.A., "Endoscopic temperature imaging in a four-cylinder IC engine via two-color toluene fluorescence," *Proceedings of the Combustion Institute*, 35(3): 3697-3705, 2015.
99. Tea, G., Bruneaux, G., Kashdan, J.T. und Schulz, C., "Unburned gas temperature measurements in a surrogate Diesel jet via two-color toluene-LIF imaging," *Proceedings of the Combustion Institute*, 33(1): 783-790, 2011.
100. Luong, M., Zhang, R., Schulz, C. und Sick, V., "Toluene laser-induced fluorescence for in-cylinder temperature imaging in internal combustion engines," *Applied Physics B*, 91(3): 669, 2008.
101. Zegers, R.P.C., Yu, M., Bekdemir, C., Dam, N.J., Luijten, C.C.M., et al., "Temperature measurements of the gas-phase during surrogate diesel injection using two-color toluene LIF," *Applied Physics B*, 112(1): 7-23, 2013.
102. Pareja, J., Litterscheid, C., Kaiser, B., Euler, M., Fuhrmann, N., et al., "Surface thermometry in combustion diagnostics by sputtered thin films of thermographic phosphors," *Applied Physics B*, 117(1): 85-93, 2014.
103. Fuhrmann, N., Litterscheid, C., Ding, C.-P., Brübach, J., Albert, B., et al., "Cylinder head temperature determination using high-speed phosphor thermometry in a fired internal combustion engine," *Applied Physics B*, 116(2): 293-303, 2014.
104. Brübach, J., Pflitsch, C., Dreizler, A. und Atakan, B., "On surface temperature measurements with thermographic phosphors: A review," *Progress in Energy and Combustion Science*, 39(1): 37-60, 2013.
105. Müller, T., Wigger, S., Fuesser, H.-J. und Kaiser, S., "Development of a LIF-imaging system for simultaneous high-speed visualization of liquid fuel and oil films in an optically accessible DISI engine," *SAE Technical Paper* 2018-01-0634, 2018.

106. Grzeszik, R., "Optische Messtechniken zur Bewertung innermotorischer Wandfilme," *9. Tagung Diesel- und Benzindirekteinspritzung*, 2014.
107. Popiolek, G., "Sprühstrahl-Wand-Wechselwirkungen bei der Benzindirekteinspritzung " Dissertation, Universität Magdeburg, 2007.
108. Schulz, F., Schmidt, J., Kufferath, A. und Samenfink, W., "Gasoline Wall Films and Spray/Wall Interaction Analyzed by Infrared Thermography," *SAE International Journal of Engines*, 7(3): 1165-1177, 2014.
109. Mittal, M., Hung, D.L.S., Zhu, G. und Schock, H., "A Study of Fuel Impingement Analysis on In-Cylinder Surfaces in a Direct-Injection Spark-Ignition Engine with Gasoline and Ethanol-Gasoline Blended Fuels," *SAE Technical Paper 2010-01-2153*, 2010.
110. Senda, J., Ohnishi, M., Takahashi, T., Fujimoto, H., Utsunomiya, A., et al., "Measurement and Modeling on Wall Wetted Fuel Film Profile and Mixture Preparation in Intake Port of SI Engine," *SAE Technical Paper 1999-01-0798*, 1999.
111. Alonso, M., Kay, P.J., Bowen, P.J., Gilchrist, R. und Sapsford, S., "A laser induced fluorescence technique for quantifying transient liquid fuel films utilising total internal reflection," *Experiments in Fluids*, 48(1): 133-142, 2010.
112. Park, S. und Ghandhi, J.B., "Fuel Film Temperature and Thickness Measurements on the Piston Crown of a Direct-Injection Spark-Ignition Engine," *SAE Technical Paper 2005-01-0649*, 2005.
113. Parks, J., Armfield, J., Storey, J., Barber, T. und Wachter, E., "In Situ Measurement of Fuel Absorption into the Cylinder Wall Oil Film During Engine Cold Start," *SAE Technical Paper 981054*, 1998.
114. Hentschel, W., Block, B., Hovestadt, T., Meyer, H., Ohmstede, G., et al., "Optical Diagnostics and CFD-Simulations to Support the Combustion Process Development of the Volkswagen FSI® Direct-Injection Gasoline Engine," *SAE Technical Paper 2001-01-3648*, 2001.
115. Hochgreb, S., "Liquid Fuel Impingement on the Piston Bowl of a Direct-Injection, Spark-Ignited (DISI) Engine under Stratified Operation," *SAE Technical Paper 2001-01-3646*, 2001.
116. Uchida, R., Tanaka, D., Noda, T., Okamoto, S., Ozawa, K., et al., "Impingement Behavior of Fuel Droplets on Oil Film," *SAE Technical Paper 2015-01-0913*, 2015.
117. Seel, K., Reddemann, M.A., Baltaci, T. und Kneer, R., "Impact of Lubricating Oil Films on Spray-Wall Interaction," *SAE Technical Paper 2015-01-2043*, 2015.
118. Kouchi, S., Okamoto, S., Ozawa, K., Kawashima, H., Ishima, T., et al., "Observation and Analysis of Behavior of Spray Impingement on a Liquid Film," *SAE Technical Paper 2015-01-2006*, 2015.
119. Artmann, C., Kaspar, M., Rabl, H.-P. und Mayer, W., "A New Measurement Technique for Online Oil Dilution Measurement," *SAE International Journal of Engines*, 6(3): 594-604, 2013.



120. Behn, A., Feindt, M., Matz, G., Krause, S. und Gohl, M., "Fuel Transport across the Piston Ring Pack: Measurement System Development and Experiments for Online Fuel Transport and Oil Dilution Measurements," *SAE Technical Paper* 2015-24-2535, 2015.
121. Parks, J., Partridge, B. und Whitacre, S., "Rapid In Situ Measurement of Fuel Dilution of Oil in a Diesel Engine using Laser-Induced Fluorescence Spectroscopy," *SAE Technical Paper* 2007-01-4108, 2007.
122. Kambe, H., Mizobuchi, N. und Matsumura, E., "Simultaneous Measurement of Fuel Droplet Deposition Amount and Oil Film Thickness on Spray Impingement Using Double Laser Induced Fluorescence Method," *SAE Technical Paper* 2017-01-2371, 2017.
123. Williams, B., Ewart, P., Stone, R., Ma, H., Walmsley, H., et al., "Multi-Component Quantitative PLIF: Robust Engineering Measurements of Cyclic Variation in a Firing Spray-Guided Gasoline Direct Injection Engine," *SAE Technical Paper* 2008-01-1073, 2008.
124. Styron, J.P., Kelly-Zion, P.L., Lee, C.F., Peters, J.E., White, R.A., et al., "Multicomponent Liquid and Vapor Fuel Distribution Measurements in the Cylinder of a Port-Injected, Spark-Ignition Engine," *SAE Technical Paper* 2000-01-0243, 2000.
125. Andersson, M., Warnberg, J., Hemdal, S., Dahlander, P. und Denbratt, I., "Evaporation of Gasoline-Like and Ethanol-Based Fuels in Hollow-Cone Sprays Investigated by Planar Laser-Induced Fluorescence and Mie Scattering," *SAE Technical Paper* 2011-01-1889, 2011.
126. Itani, L.M., Bruneaux, G., Di Lella, A. und Schulz, C., "Two-tracer LIF imaging of preferential evaporation of multi-component gasoline fuel sprays under engine conditions," *Proceedings of the Combustion Institute*, 35(3): 2915-2922, 2015.
127. VanDerWege, B.A. und Hochgreb, S., "Effects of Fuel Volatility and Operating Conditions on Fuel Sprays in DISI Engines: (1) Imaging Investigation," *SAE Technical Paper* 2000-01-0535, 2000.
128. Faust, S., Goschütz, M., Kaiser, S.A., Dreier, T. und Schulz, C., "A comparison of selected organic tracers for quantitative scalar imaging in the gas phase via laser-induced fluorescence," *Applied Physics B*, 117(1): 183-194, 2014.
129. Koban, W., Schorr, J. und Schulz, C., "Oxygen-distribution imaging with a novel two-tracer laser-induced fluorescence technique," *Applied Physics B*, 74(1): 111-114, 2002.
130. Berlman, I.B., "Handbook of Fluorescence Spectra of Aromatic Molecules," 2. Auflage, Academic Press, 1971.
131. Tran, K.H., Morin, C., Kühni, M. und Guibert, P., "Fluorescence spectroscopy of anisole at elevated temperatures and pressures," *Applied Physics B*, 115(4): 461-470, 2014.
132. Edgewave, "Technical Guidelines," 2017.
133. Holoor, "Diffraktives optisches Element," [http://www.holoor.co.il/Diffractive\\_Optics\\_Products/Diffractive\\_Beam\\_Homogenizers/homogenizer-diffuser.php](http://www.holoor.co.il/Diffractive_Optics_Products/Diffractive_Beam_Homogenizers/homogenizer-diffuser.php), abgerufen im März 2018.

134. Edmundoptics, "Mikrolinsenarray," <https://www.edmundoptics.de/optics/optical-lenses/specialty-lenses/microlens-array-10-x-10mm-300um-pitch-2deg-divergence-c035d946/>, abgerufen im März 2018.
135. Xiang, C., Chen, X., Chen, Y., Zhou, J. und Shen, W., "MTF measurement and imaging quality evaluation of digital camera with slanted-edge method," *Photonics Asia* 2010.
136. Shahbaz, M.A., "Interne Berechnung," *Universität Duisburg-Essen*, 2018.
137. Lin, M.-T. und Sick, V., "Is Toluene a Suitable LIF Tracer for Fuel Film Measurements?," *SAE Technical Paper* 2004-01-1355, 2004.
138. Tian, M., McCormick, R.L., Ratcliff, M.A., Luecke, J., Yanowitz, J., et al., "Performance of lignin derived compounds as octane boosters," *Fuel*, 189(Supplement C): 284-292, 2017.
139. Fuhrmann, D., "Interne Messung," *Universität Duisburg-Essen*, 2015.
140. Fuhrmann, D., Benzler, T., Fernando, S., Endres, T., Dreier, T., et al., "Self-quenching in toluene LIF," *Proceedings of the Combustion Institute*, 36(3): 4505-4514, 2017.
141. Faust, S., Dreier, T. und Schulz, C., "Photo-physical properties of anisole: temperature, pressure, and bath gas composition dependence of fluorescence spectra and lifetimes," *Applied Physics B*, 112(2): 203-213, 2013.
142. Kranz, P., Schulz, C. und Kaiser, S.A., "LIF-based visualization of preferential evaporation of a multi-component fuel in an SIDI engine," *Proceedings of the European Combustion Meeting*, 2017.
143. Kaiser, S.A. und Long, M.B., "Quantitative planar laser-induced fluorescence of naphthalenes as fuel tracers," *Proceedings of the Combustion Institute*, 30(1): 1555-1563, 2005.
144. Lind, S., Retzer, U., Will, S. und Zigan, L., "Investigation of mixture formation in a diesel spray by tracer-based laser-induced fluorescence using 1-methylnaphthalene," *Proceedings of the Combustion Institute*, 36(3): 4497-4504, 2017.
145. Miles, P.C., Sahoo, D., Busch, S., Trost, J. und Leipertz, A., "Pilot Injection Ignition Properties Under Low-Temperature, Dilute In-Cylinder Conditions," *SAE International Journal of Engines*, 6(4): 1888-1907, 2013.
146. Köpple, F., Jochmann, P., Kufferath, A. und Bargende, M., "Investigation of the Parameters Influencing the Spray-Wall Interaction in a GDI Engine - Prerequisite for the Prediction of Particulate Emissions by Numerical Simulation," *SAE International Journal of Engines*, 6(2): 911-925, 2013.
147. Bartasun, B., Cieslinski, H., Bujacz, A., Wierzbicka-Wos, A. Kur, J., "A Study on the Interaction of Rhodamine B with Methylthioadenosine Phosphorylase Protein Sourced from an Antarctic Soil Metagenomic Library," *PLOS ONE*, 8(1), 2013.