

**Visualisierung von Mehrphasen-Phänomenen
in der Kolbengruppe eines direkteinspritzenden Ottomotors**

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

Jonathan Schöler
aus
Filderstadt

Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Sebastian Kaiser
Prof. Dr.-Ing. habil. Lars Zigan

Tag der mündlichen Prüfung: 25.01.2024

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand in der Abteilung seriennahe Motortechnologien in der Daimler AG am Standort Ulm, beziehungsweise durch Verlagerung des Standortes und Umfirmierung in Teilen in der Mercedes-Benz AG am Standort Stuttgart-Untertürkheim. Die universitäre Betreuung erfolgte durch Prof. Dr. Sebastian Kaiser am Institut für Verbrennung und Gasdynamik der Universität Duisburg-Essen.

Zunächst bedanke ich mich bei Prof. Dr. Sebastian Kaiser für die Betreuung dieser Arbeit, vor allem auch für seine Anregungen, die konstruktive Kritik und seine große Geduld, sei es beim Gegenlesen von Veröffentlichungen, oder in fachlichen Diskussionen. Prof. Dr.-Ing. habil. Lars Zigan danke ich für das Interesse an dieser Arbeit und die Übernahme des Koreferats. Bei Dr. Stefan Wigger möchte ich mich für die Betreuung der Arbeit von Seiten der Mercedes-Benz AG bedanken. Sein fachlicher Rat und der ein oder andere Motivationsschub haben maßgeblich zu dieser Arbeit beigetragen. Vielen Dank auch an Sebastian Schiefer für die Durchführung der CFD-Simulationen.

Meinem Teamleiter Dr. Hans-Jürgen Füber danke ich für sein Vertrauen und die Möglichkeit, meine Promotion im Unternehmen durchführen zu können. Alexander Klaiber danke ich für die Unterstützung bei der Auslegung und Konstruktion diverser Bauteile. Guntmar Schulz möchte ich für die Unterstützung bei Messungen, aber auch die Gesellschaft und Hilfe am Motorprüfstand danken. Dr. Matthias Martin danke ich für die Unterstützung in fachlichen Themen, aber auch die aufmunternden Worte, wenn ich doch wieder einmal erst nach Sonnenuntergang zurück in unser Büro kam.

Ich möchte außerdem die Gelegenheit nutzen, Tobias Hanschke, Dr. Johannes König, Hannes Mayer, Dr. Torben Müller, aber auch allen anderen ehemaligen Arbeitskollegen für die gute Zusammenarbeit, das angenehme Arbeitsklima und nicht zuletzt die entstandenen Freundschaften zu danken.

Meiner Familie, meinen Freunden und meiner Freundin Sarah möchte ich für die moralische Unterstützung, den Rückhalt, aber auch den nötigen Ausgleich während der Promotion danken!

Kurzfassung

Aufgrund der fortschreitenden Hybridisierung von PKWs und gleichzeitiger Verschärfung gesetzlicher Grenzwerte zu Partikelemissionen und Verbrauchswerten steigen die Anforderungen an den Verbrennungsmotor stetig an. Zur optimalen Auslegung der Komponenten ist dabei ein detailliertes Verständnis der Prozesse im Motorzylinder entscheidend. In dieser Arbeit werden innermotorische Phänomene, die durch die Wechselwirkung der Medien Kraftstoff, Öl, und Umgebungsluft bzw. Verbrennungsgase in der Kolbengruppe ausgelöst werden, bildgebend untersucht. Dazu werden laserinduzierte Fluoreszenz (LIF) sowie die Erfassung von natürlichem Flammenleuchten der Verbrennungsgase eingesetzt. Die Untersuchungen werden an einem optisch zugänglichen Einzylindermotor durchgeführt, in dessen Zylinderlaufbahn Saphirfenster eingesetzt sind. Die Zylindereinheiten sind austauschbar und unterscheiden sich in der Größe und Position der Fenster.

Zur Untersuchung von Öltransportphänomenen in der Ölnut unter dem Ölabbstreifring wird dem Schmieröl der Laserfarbstoff Pyrromethen 567 in geringer Konzentration zugesetzt und durch die Laserpulse eines frequenzverdoppelten Nd:YLF Lasers bei 527 nm zur Fluoreszenz angeregt. Die bildgebenden Messungen erfolgen simultan auf der Druck- und Gegendruckseite des Motors durch CMOS-Kameras. Die Versuche werden durch dreidimensionale CFD-Simulationen ergänzt, die mithilfe der Experimente kalibriert und anschließend genutzt werden, um zusätzliche Informationen aus dem Querschnitt der Ölnut zu gewinnen. Durch den kombinierten experimentell-simulativen Ansatz können die durch Trägheitskräfte und die Kolbensekundärbewegungen ausgelösten Phänomene, wie Öltransport vom Kolben auf die Zylinderlaufbahn (Bridging) und die Ausbildung einer kreisförmigen Strömung in der Nut, im Detail beschrieben werden.

Im zweiten Teil der Arbeit werden Kraftstofffilmdicken auf der Zylinderwand mit Wiederholraten im kHz-Bereich bildgebend gemessen. Dazu wird einem nicht-fluoreszierendem Surrogat-Kraftstoff Anisol zugegeben, das durch die frequenzvervierfachte Strahlung eines Nd:YAG Laser bei 266 nm angeregt wird. Gleichzeitig wird Pyrromethen 567 im Öl durch die frequenzverdoppelte Laserstrahlung bei 532 nm angeregt. Das Fluoreszenzlicht wird durch einen dichroitischen Spiegel spektral aufgeteilt und zwei CMOS-Kameras, für Kraftstoff-LIF in Kombination mit einem Bildverstärker, zugeführt. Zur Absolutwertkalibrierung wird ein definierter Spaltverlauf durch das Anpressen einer konvexen Linse gegen die Fensterinnenseite eingestellt und der entstehende, radial zunehmende Spalt mit der Kraftstoff-Tracer Mischung gefüllt. Es werden zwei Einspritztimings untersucht, 285 °KW und 240 °KW vor zünd-oberem Totpunkt (vZOT). Für beide Einspritztimings werden ähnliche maximale Kraftstofffilmdicken von 16 µm ermittelt. Interessanterweise verdampft der Wandfilm bei der späteren Einspritzung im Mittel schneller, sodass die Kraftstofffilmdicke für beide Einspritzzeitpunkte auf 8 µm sinkt, bis der erste Kolbenring den Wandfilm erreicht. Abgestreifter Kraftstoff sammelt sich auf dem ersten Kolbenring an und wird teilweise nach unten zum zweiten und dritten Kolbenring transportiert. In den simultanen Öl-Aufnahmen ist die Auswaschung von Schmieröl durch den Kraftstoff zu sehen.

Im letzten Teil der Arbeit wird die Flammenausbreitung in den Feuersteg des Kolbens (TLFP) untersucht. Natürliches Flammenleuchten wird durch eine Hochgeschwindigkeits-CMOS-Kamera mit Farbkanälen auf der Gegendruckseite des Motors in den frühen Teilen des Expansionshubes erfasst.

Die Farbkanäle der Kamera ermöglichen dabei die Unterscheidung von ideal vorgemischten und rußenden Bereichen der Verbrennung. Es werden die zwei Motorlasten 14 und 26,5 bar indiziertem Mitteldruck (p_{mi}) bei einer Drehzahl von 2000 min^{-1} verglichen. TLFP kann grundsätzlich in den meisten Zyklen nachgewiesen werden. Leuchtendes Gas dringt bis zum Ringstoß des ersten Kolbenringes in den Feuersteg ein, erlöscht hier jedoch in allen untersuchten Zyklen. Motorklopfen scheint TLFP hoher Intensität zu begünstigen, ist jedoch keine Voraussetzung für das Phänomen. In einigen Zyklen, in denen Klopfen und TLFP gleichzeitig auftritt, zeigte das Verbrennungsgas eine oszillierende Bewegung innerhalb des Feuerstegs, was vermutlich auf hochfrequente Druckschwankungen aufgrund von Motorklopfen zurückzuführen ist.

Abstract

With the ongoing hybridization of passenger cars and the simultaneous tightening of legal limits on particulate emissions and fuel consumption, the demands on the combustion engine are constantly increasing. A detailed understanding of the occurring phenomena is crucial for an optimal design of the engine components. In this work, in-cylinder phenomena triggered by the interaction of the fluids fuel, oil, and ambient air or combustion gas are investigated by imaging. For this, laser-induced fluorescence (LIF) and the detection of natural flame luminosity are used. The investigations are performed in an optically accessible single-cylinder engine with sapphire windows inserted into the cylinder liner. The cylinder units are interchangeable and differ in the size and position of the windows.

To investigate oil transport phenomena in the oil chamfer under the oil control ring, the laser dye pyromethene 567 is added to the lubricating oil in small concentration and is excited to fluoresce by the laser pulses of a frequency-doubled Nd:YLF laser at 527 nm. Fluorescence is detected simultaneously on the thrust- and anti-thrust side of the engine using CMOS cameras. The experiments are accompanied by three-dimensional CFD simulations, which are calibrated using the experiments and then utilized to gain additional information from the cross-section of the oil chamfer. The combined experimental-numerical approach allows the phenomena caused by inertial forces and the piston secondary motions, such as oil transport from the piston to the cylinder liner (bridging) and the formation of a circular flow in the groove, to be described in detail.

In the second part of this work, the fuel film thickness on the cylinder wall is measured by quantitative imaging at kHz repetition rates. Anisole is added to a non-fluorescent surrogate fuel as a tracer and is excited at 266 nm by the fourth harmonic of a Nd:YAG laser. Simultaneously, pyromethene 567 in the oil is excited at 532 nm by the second harmonic of the laser. The fluorescence light is spectrally separated by a dichroic mirror and detected by two CMOS cameras, for fuel LIF in combination with an image intensifier. For absolute value calibration, a defined gap is created by pressing a convex lens against the inside of the window and the resulting radially increasing gap is filled with the fuel-tracer mixture. Two injection timings are investigated: 285 °KW and 240 °KW before ignition top dead center (bTDC). The maximum fuel film thickness is found to be similar for both injection timings with 16 µm. Interestingly, the wall film evaporates faster for the later injection, so that the fuel film thickness decreases to 8 µm for both injection timings by the time the first piston ring reaches the wall film. Scraped-off fuel accumulates on top of the first ring and is partially transported downwards to the second and third piston ring. In the simultaneous oil images, washout of lubricating oil by fuel can be seen.

In the last part of this work, flame propagation into the piston top land (TLFP) is investigated. Natural flame luminosity is imaged by a high-speed CMOS color channel camera on the anti-thrust side of the engine in the early parts of the expansion stroke. The color channels of the camera allow for a distinction of premixed and sooting regions of combustion. The two engine loads of 14 and 26,5 bar indicated mean effective pressure are compared at an engine speed of 2000 min⁻¹. TLFP is seen in most cycles. Flame luminosity penetrates the first land as far as the first ring gap, but extinguishes here in all cycles examined. Engine knock seems to facilitate high-intensity TLFP, but is not necessary for the phenomenon to occur. In some cycles with a knock event and TLFP occurring simultaneously, the flame

luminosity shows an oscillating motion inside the top land, presumably due to high-frequency pressure oscillations caused by knock.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	I
Kurzfassung	II
Abstract	IV
Inhaltsverzeichnis	VI
Nomenklatur	VIII
1 Einleitung	1
2 Grundlagen	3
2.1 Der direkteinspritzende Ottomotor	3
2.1.1 Arbeitsspiel eines Viertakt-Ottomotors	4
2.1.2 Direkteinspritzung	6
2.1.3 Kolbengruppe	9
2.2 Optische Messtechniken	14
2.2.1 Überblick relevanter optische Messtechniken	14
2.2.2 Laserinduzierte Fluoreszenz (LIF)	15
2.2.3 Flammeneigenleuchten	18
2.3 Hardware: optisch zugängliche Motoren, Lichtquellen und Detektoren	21
2.3.1 Optisch zugängliche Motoren	21
2.3.2 Nd:YAG und Nd:YLF Laser	23
2.3.3 CMOS-Bildsensoren und Bildverstärker	25
3 Stand der Technik	29
3.1 Visualisierung von innermotorischen Flüssigfilmen	29
3.1.1 Ölfilme	29
3.1.2 Kraftstofffilme	32
3.2 Flammenausbreitung im Feuersteg	36
4 Versuchsträger	38
4.1 Triebwerk und Prüfstandsperipherie	38
4.2 Optisch zugängliche Zylinder	39
5 Visualisierung und Simulation von Öltransportphänomenen in der Ölnut	42
5.1 Versuchsaufbau	42
5.1.1 Bildverarbeitung	45
5.2 Versuchsdurchführung	47
5.3 CFD-Simulation	48
5.4 Schmierölverteilung in der Ölnut	51
5.4.1 Ansaugen	51
5.4.2 Kompression	53
5.4.3 Expansion	57
5.4.4 Ausstoßen	59

5.5	Literaturvergleich	62
5.6	Zwischenfazit	63
6	Quantitative Visualisierung von Kraftstoff-Wandfilmen	65
6.1	Versuchsaufbau	65
6.1.1	Optischer Versuchsaufbau	66
6.1.2	Bildverarbeitung	69
6.2	Absolutwertkalibrierung der LIF-Messtechnik	73
6.2.1	Kalibriervorrichtung	74
6.2.2	Kalibrierprozess	75
6.2.3	Abschätzung der Präzision und Genauigkeit	81
6.2.4	Halo-Effekte	82
6.3	Motorversuche	83
6.4	Ergebnisse	84
6.4.1	Kraftstofffilmdicken	85
6.4.2	Öltransportvorgänge	92
6.5	Zwischenfazit	93
7	Visualisierung der Flammenausbreitung in die Ringstege	95
7.1	Versuchsaufbau	95
7.1.1	Mechanischer Versuchsaufbau	95
7.1.2	Optischer Versuchsaufbau	95
7.2	Bildverarbeitung	97
7.3	Versuchsdurchführung	99
7.4	Ergebnisse	101
7.4.1	Hohe Motorlast (26,5 bar p_{mi})	101
7.4.2	Niedrige Motorlast (14,5 bar p_{mi})	106
7.5	Zwischenfazit	108
8	Zusammenfassung und Ausblick	110
	Literaturverzeichnis	114
	Eigene Veröffentlichungen	125
	Betreute Abschlussarbeiten	125
A	Anhang zu Kapitel 7	126
A.1	Auswahl des Filters zur Rauschunterdrückung	126

Nomenklatur

Lateinische Buchstaben

Symbol	Bedeutung	Einheit
A	Fläche	m^2
A_{I50}	Verbrennungsschwerpunkt	$^{\circ}KW$
c	Stoffmengenkonzentration	mol/dm^3
c	Lichtgeschwindigkeit	m/s
d	Schichtdicke	μm
E_{Photon}	Photonenenergie	J
f	Frequenz	Hz
F	Kraft	N
F_{Feder}	Federkraft	N
F_{Hyd}	Hydrodynamische Kraft	N
F_{Masse}	Massenkraft	N
$F_{R,Ax}$	Axiale Reibkraft	N
$F_{R,Rad}$	Radiale Reibkraft	N
h	Plank'sches Wirkungsquantum	J·s
I_A	Intensität des absorbierten Lichts	W/m^2
I_F	Intensität des Fluoreszenzlichts	W/m^2
I_0	Intensität des einfallenden Lichts	W/m^2
K	Boltzmann-Konstante	J/K
M	Drehmoment	Nm
M_{Twist}	Twist-Drehmoment	Nm
m_L	Luftmasse	g
$m_{L,st}$	Luftmasse für stöchiometrische Verbrennung	g
M_{λ}^S	Spektrale flächenspezifische Strahlung	$W/m^2 \cdot nm$
n	Motordrehzahl	min^{-1}
p_{max}	Zylinderspitzendruck	bar
p_{me}	Effektiver Mitteldruck	bar
p_{mi}	Indizierter Mitteldruck	bar
p_{mr}	Reibmitteldruck	bar
p_o	Druck oberhalb des Kolbenringes	bar
p_{saug}	Saugrohrdruck	bar
$P_{Strahlung}$	Strahlungsleistung	W
p_u	Druck unterhalb des Kolbenringes	bar
T	Temperatur	K
V_c	Kompressionsvolumen	cm^3
V_h	Hubvolumen	cm^3
W_k	Nutzbare Arbeit	MJ
$X_{50\%}$	Verbrennungsschwerpunkt	$^{\circ}KW$

Griechische Buchstaben

Symbol	Bedeutung	Einheit
ε^*	Extinktionskoeffizient	$\text{dm}^3/\text{mol}\cdot\text{cm}$
η	Detektionseffizienz	-
λ	Kraftstoff-Luft-Verhältnis	-
λ	Wellenlänge	nm
ν	Kinematische Viskosität	mm^2/s
ρ	Dichte	kg/m^3
σ	Oberflächenspannung	mN/m
σ	Stefan-Boltzmann-Konstante	$\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}^4$
τ	Transmissionsgrad	-
Φ	Fluoreszenz-Quantenausbeute	-
Ω	Kollektionseffizienz	-

Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
AÖ	Auslassventil öffnet
AS	Auslassventil schließt
BBO	B-Bariumborat
CFD	Computational Fluid Dynamics
CMOS	Complementary metal-oxide semiconductor
DS	Druckseite
DSNU	Dark Signal non Uniformity
EÖ	Einlassventil öffnet
ES	Einlassventil schließt
fps	Frames per Second
FQA	Fluoreszenz-Quantenausbeute
GDS	Gegendruckseite
HI-TLFP	Hochintensitäts-TLFP
IRO	Intensified Relay Optics
KFD	Kraftstofffilmdicke
°KW	Grad Kurbelwinkel
LES	Large Eddy Simulation
LIF	Laserinduzierte Fluoreszenz
LII	Laserinduzierte Inkandeszenz
LOTTE	Laser-Optischer Transparent-Tribologie-Einzyliermotor
LWOT	Ladungswechsel-oberer Totpunkt
MCP	Microchannel Plate
MLV	Mehrlochventil
OCR	Oil Control Ring (Ölabstreifring)
OT	Oberer Totpunkt
Nd:YLF	Neodym-dotierter Yttrium-Lithium-Fluorid Laser
Nd:YAG	Neodym-dotierter Yttrium-Aluminium-Granat Laser
NLM	Non-local means
PAO	Polyalphaolefin
PRNU	Photo Response non Uniformity
PTU	Programmable Timing Unit
QE	Quanteneffizienz
RIM	Refractive Index Matching
ROI	Region of Interest
RON	Research Octane Number
SNR	Signal to noise ratio (Signal/Rauschverhältnis)
SOI	Start of Injection (Einspritzbeginn)
vSOI	Vor Start of Injection
nSOI	Nach Start of Injektion
TLFP	Top Land Flame Propagation
UHC	Unburned Hydrocarbons (Unverbrannte Kohlenwasserstoffe)
UT	Unterer Totpunkt
UV	Ultraviolett

ZOT	Zünd-oberer Totpunkt
vZOT	Vor Zünd-oberer Totpunkt
nZOT	Nach Zünd-oberer Totpunkt
ZZP	Zündzeitpunkt

1 Einleitung

In den letzten Jahren lag der Fokus bei der Weiterentwicklung von Verbrennungsmotoren zur Einhaltung der kontinuierlich sinkenden gesetzlichen Grenzwerte auf der Reduktion von CO₂- und Partikelemissionen. Zu diesem Zweck werden oft Motoren mit reduziertem Hubraum und einer verringerten Zylinderzahl (Downsizing) in Kombination mit einer Benzin-Direkteinspritzung und Abgasturboladern eingesetzt. Diese Maßnahmen reduzieren zum einen auftretende Reibverluste, zum anderen kann der Motorbetrieb in Lastbereiche verschoben werden, in denen höhere Wirkungsgrade erzielt werden können [1].

Die beiden Ziele einer hohen Effizienz und einer geringen Partikelemission stehen dabei jedoch oft im Konflikt miteinander. Geringe Bohrungsdurchmesser begünstigen aufgrund des verringerten Abstands zwischen dem Kraftstoffinjektor und der Brennraumwand die Benetzung letzterer durch Kraftstoff. Kann sich dieser bis zum Einsetzen der Verbrennung nur unzureichend mit der angesaugten Luft vermischen, oder bleiben flüssige Kraftstofffilme zurück, bilden sich lokal Verbrennungszonen unter Sauerstoffmangel aus. Folge sind u.a. erhöhte Partikelemissionen und die Emission von unverbrannten Kohlenwasserstoffen. Außerdem kann flüssiger Kraftstoff mit dem vorhandenen Schmieröl auf der Zylinderwand und im Bereich des Kolbens interagieren. Durch die Verdünnung des Schmieröls mit Kraftstoff werden die tribologischen Eigenschaften des Öls verschlechtert. Gleichzeitig kann aufgrund der verringerten Viskosität Kraftstoff-Öl-Gemisch ausgewaschen werden und in den Brennraum gelangen. Folgen sind ein erhöhter Ölverbrauch und erhöhte Partikelemissionen [2]. Zusätzlich wird die Durchmischung von Kraftstoff und Öl als möglicher Auslöser für extreme Verbrennungsanomalien, sogenannte Vorentflammungen, gesehen. Das Phänomen bezeichnet die Selbstzündung des Kraftstoff-Luft-Gemisches im Brennraum vor der durch die Zündkerze eingeleitete Fremdzündung und hat stark erhöhte Zylinderdrücke zur Folge, wodurch schon einzelne Vorentflammungs-Ereignisse einen kapitalen Motorschaden verursachen können.

Die beschriebenen Problemstellungen werden durch die fortschreitende Hybridisierung von Personenkraftwagen noch verstärkt. Durch die intermittierende Zu- bzw. Abschaltung des Verbrennungsmotors wird dieser vermehrt bei niedrigen Motortemperaturen betrieben, was eine unvollständige Verdampfung von Kraftstoff begünstigt. Um auch in Zukunft Verbrennungsmotoren mit optimaler Effizienz und gleichzeitiger Einhaltung der gesetzlichen Grenzwerte auslegen zu können, ist ein detailliertes Verständnis der Interaktionen der Medien Kraftstoff, Öl und Verbrennungsgase erforderlich.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit sollen ausgewählte Phänomene innerhalb der Kolbengruppe untersucht werden, die durch die Interaktion der Medien Kraftstoff, Öl und (Verbrennungs-)Gase ausgelöst werden. Die Untersuchungen werden an einem optisch zugänglichen Einzylindermotor durchgeführt. Die optische Zugänglichkeit des Motors ist durch in die Zylinderlaufbahn eingelassene Saphirfenster realisiert. Die Zylindereinheiten sind austauschbar, sodass auf die Messaufgabe angepasste Fenstergeometrien verwendet werden können.

Für die Messungen kommen CMOS-Kameras zum Einsatz, um die Vorgänge in der Kolbengruppe bildgebend mit einer hohen zeitlichen Auflösung erfassen zu können. Zur Untersuchung der Medien Kraftstoff und Motoröl wird das Messverfahren der laserinduzierten Fluoreszenz (LIF) angewendet. Dazu werden den beiden Medien unterschiedliche fluoreszenzfähige Stoffe (Fluorophoren) beigemischt. Zur Visualisierung der Verbrennungsgase wird das natürliche Flammenleuchten der Verbrennung bildgebend erfasst.

Im ersten Teil der Arbeit werden die Öltransportvorgänge im oberen Kolbenhemdbereich innerhalb der Ölnut untersucht. Die Ölnut stellt ein Reservoir für Motoröl, das durch die Kolbenringe abgestreift wird dar und kann maßgeblich die Ölemissionen eines Motors beeinflussen. Durch eine geeignete Gestaltung der Nutgeometrie können Öltransportphänomene genutzt werden, um die Schmierölversorgung während Arbeitsspiels zu optimieren und so Reibverluste und Ölemissionen zu minimieren. Dazu wird eine dreidimensionale CFD-Simulation mithilfe der Experimente kalibriert, um den Einfluss unterschiedlicher Nutgeometrien systematisch untersuchen zu können.

Im zweiten Teil wird eine Methodik zur Quantifizierung der Kraftstofffilmdicken auf der Zylinderwand durch LIF mit einer Hochgeschwindigkeitsmesstechnik übertragen. Die hohe zeitliche Auflösung ermöglicht es, die Verdampfung von flüssigen Kraftstofffilmen kurbelwinkel-aufgelöst zu untersuchen. Auf diese Weise sollen Einspritztimings im Hinblick auf Kraftstoffeintrag in das Motoröl und Schadstoffemissionen optimiert werden. Die Absolutwertkalibrierung der Messtechnik erfolgt in-situ durch die Applikation definierter Kraftstofffilmdicken auf der Zylinderwand. Zur Visualisierung der Ölverdünnung durch Kraftstoff soll außerdem simultan die Schmierölverteilung bildgebend erfasst werden.

Im dritten und letzten Teil der Arbeit wird die Propagation von Verbrennungsgasen in den Feuersteg des Kolbens untersucht. Verbrennungsanomalien (bspw. Vorentflammungen) stellen nach wie vor besonders bei hochaufgeladenen Motoren ein Problem dar, weshalb die Untersuchungen bei hoher Motorlast durchgeführt werden. Aufgrund der kurzen Zeitspannen, in denen Verbrennungsprozesse stattfinden, ist eine hohe Aufnahmezeitrate notwendig. Durch die Anwendung einer Kamera mit Farbkanälen sowie geeigneter optischer Filter und Postprocessing der Aufnahmen soll eine Unterscheidung von Bereichen ideal vorgemischter und rußender Verbrennung ermöglicht werden.

2 Grundlagen

2.1 Der direkteinspritzende Ottomotor

Der Verbrennungsmotor ist eine Wärmekraftmaschine, in der die chemische Energie eines Fluids in einer Verbrennung in mechanische Energie umgesetzt wird und auf einen Verdränger übertragen wird. Eine weitere Unterteilung von Verbrennungsmotoren erfolgt unter anderem nach dem Arbeitsverfahren, Bewegungsablauf und dem Gemischbildungsverfahren [1]. Gegenstand dieser Arbeit ist der direkteinspritzende Hubkolben-Ottomotor, der in Abbildung 2-1 links schematisch anhand eines Schnittes durch einen Zylinder gezeigt ist.

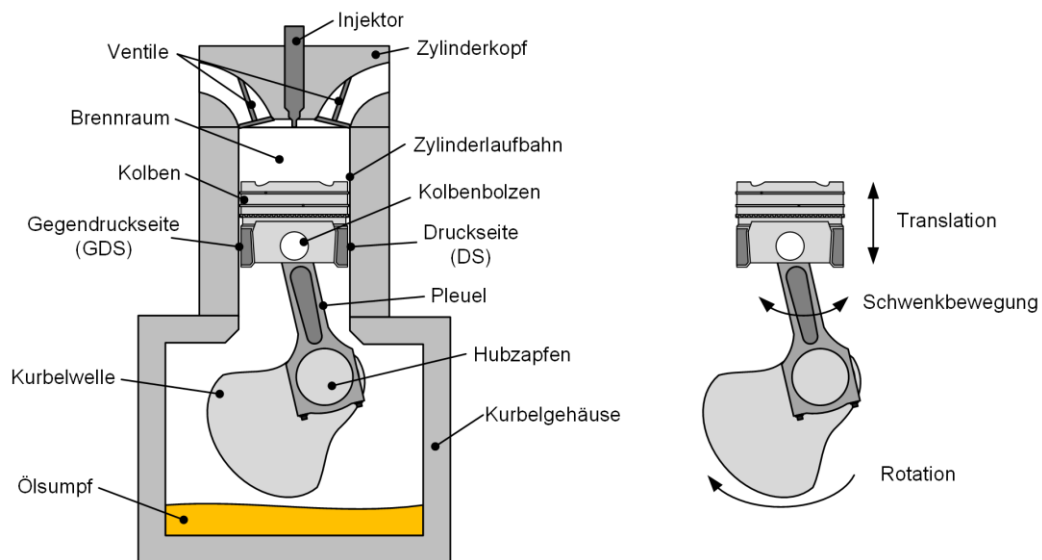


Abbildung 2-1: *Links:* Schematische Darstellung eines direkteinspritzenden Hubkolben-Ottomotors. *Rechts:* Komponenten des Kurbeltriebes und deren Bewegung.

Ursprünglich dem Dieselmotor vorbehalten, werden heutzutage auch Ottomotoren, vor allem aufgrund von Leistungsvorteilen, mit Direkteinspritzung betrieben [3]. Das heißt, der Kraftstoff wird durch den Injektor direkt in den Brennraum eingebracht (vgl. Kapitel 2.1.2) und vermischt sich hier mit der zuvor angesaugten bzw. durch einen Kompressor oder Abgasturbolader vorverdichteten Umgebungsluft. Das Kraftstoff-Luft-Gemisch wird durch eine Zündkerze (nicht gezeigt) fremdgezündet und die resultierende Gaskraft wird durch den Kolben aufgenommen.

Der Kurbeltrieb beinhaltet den Kolben, das Pleuel und die Kurbelwelle und ist in Abbildung 2-1 rechts dargestellt. Das Pleuel ist durch den drehbar gelagerten Pleuelbolzen mit dem Pleuel und am Pleuelbolzen ebenfalls drehbar gelagert mit der Kurbelwelle verbunden. Durch Bohrungen in der Kurbelwelle werden die Lagerstellen an den Pleuelbolzen mit Öl versorgt. Der Pleuel bewegt sich oszillierend im Zylinder auf und ab, wodurch die Kurbelwelle in Drehung versetzt wird. Der Pleuel erreicht Geschwindigkeiten in der Größenordnung von 20 m/s. Aufgrund der oszillierenden Bewegung ist die auf den Pleuel wirkende Beschleunigung hoch und erreicht je nach Drehzahl Werte von mehr als 10000 m/s². Als Bindeglied zwischen Pleuel und Kurbelwelle führt das Pleuel eine Schwenkbewegung in der Pleuelkreisebene aus. Seitenkräfte, die aufgrund der wechselnden Schiefstellung des Pleuels relativ zum Pleuel auf den Pleuel wirken, drücken den Pleuel während

eines Zyklus mehrfach gegen die Zylinderwände. Die Motor- und Kolbenseite, die während des Expansionstaktes kurz nach der Zündung des Kraftstoff-Luft-Gemisches in Kontakt stehen, wird als Druckseite (DS) bezeichnet, die gegenüberliegende Kolben- und Motorseite als Gegendruckseite (GDS). Der Übergang des Kolbens von einer Motorseite auf die andere wird als Anlagewechsel bezeichnet. Der Kolben ist innerhalb des Zylinders geführt und bewegt sich entlang der Zylinderlaufbahn. Diese translatorische Bewegung wird über das Pleuel auf die Kurbelwelle übertragen. Die Kurbelwelle treibt außerdem die Nockenwellen an, die sich mit halber Kurbelwellendrehzahl drehen und das Öffnen und Schließen der Ventile steuern.

2.1.1 Arbeitsspiel eines Viertakt-Ottomotors

In Personenkraftwagen werden heutzutage aufgrund von Wirkungsgradvorteilen und geringerem Schadstoffausstoß ausschließlich Viertaktmotoren verwendet. Jede vollständige Hub- oder Senkbewegung des Kolbens wird als ein Takt bezeichnet. Je vier Takte, also zwei Kurbelwellenumdrehungen, stellen ein Arbeitsspiel dar, das sich zyklisch wiederholt. Die beiden Umkehrpunkte, an denen die Kolbengeschwindigkeit kurzzeitig Null ist, werden als oberer Totpunkt (OT) und unterer Totpunkt (UT) bezeichnet. Üblicherweise wird die zeitliche Position innerhalb des Arbeitsspiels in Grad Kurbelwellenrotation ($^{\circ}$ KW) bezogen auf den OT angegeben. Bei Motoren mit Schränkung, d.h. mit einem Versatz der Kurbelwelle bezogen auf die Zylindermittelachse, sind die Totpunkte im Vergleich zum ungeschränkten Motor leicht verschoben.

Ansaugen

Im Ansaugtakt wird die für die Verbrennung notwendige Umgebungsluft angesaugt. Der Ansaugtakt beginnt im OT, der zur besseren Unterscheidung der Totpunkte als Ladungswechsel – oberer Totpunkt (LWOT) bezeichnet wird, und endet im darauffolgenden UT. Der Kolben bewegt sich während des Ansaugens im Zylinder abwärts, erhöht so das Zylindervolumen und saugt aufgrund des entstehenden Unterdrucks durch das das Einlassventil Luft an. Die angesaugte Luftmenge wird über die Stellung der Drosselklappe im Ansaugtrakt geregelt. Das Einlassventil des Motors wird üblicherweise bereits kurz vor LWOT geöffnet. Das Auslassventil schließt erst kurz nach dem LWOT vollständig. Durch den kurzen Zeitbereich, in dem beide Ventile geöffnet sind, der Ventilüberschneidung, wird eine verbesserte Spülung des Brennraumes erreicht [1]. Während des Ansaugens kann bereits ein Teil oder der gesamte für die Verbrennung notwendige Kraftstoff in den Brennraum eingebracht werden.

Verdichten

In Verdichtungstakt wird das Kraftstoff-Luft-Gemisch durch die Aufwärtsbewegung des Kolbens auf etwa ein Zehntel des ursprünglichen Volumens verdichtet. Oft wird während des Verdichtens ein weiterer Teil des Kraftstoffes eingebracht. Das Einlassventil schließt erst während der Aufwärtsbewegung des Kolbens, da Umgebungsluft nach dem UT noch einige Zeit weiter in den Zylinder strömt. Der OT am Ende der Verdichtung wird als Zünd-oberer Totpunkt (ZOT) bezeichnet, da zeitlich im Bereich des ZOT die Verbrennung durch die Zündkerze eingeleitet wird. Typische Werte für den Zündzeitpunkt (ZZP) liegen, abhängig von der Motorlast und Motordrehzahl, zwischen 40° KW vor ZOT (v ZOT) und 20° KW nach ZOT (n ZOT) [4].

Expansion

Durch die Verbrennung des Kraftstoff-Luft-Gemisches steigt der Druck im Brennraum rapide an. Die wirkende Gaskraft wird durch den Kolben aufgenommen und über das Pleuel auf die Kurbelwelle übertragen. Typische Zylinderspitzen drücke bei direkteinspritzenden Ottomotoren liegen in der Größenordnung von 100 bar. Höhere Spitzen drücke haben zur Folge, dass sich unabhängig von der Zündung unverbrannte Gemischbereiche im Brennraum selbst entzünden können (Klopfen). Charakteristisch für Klopfen sind hochfrequente Druckschwingungen während der Expansion, die hohe mechanische und thermische Belastungen darstellen und zur Beschädigung des Motors führen können [4]. In modernen Verbrennungsmotoren wird eine Klopfregelung eingesetzt, die Motorklopfen erkennt und den ZZP auf einen späteren Zeitpunkt verschiebt, um den Spitzen druck zu senken und weiteren Klopfereignissen entgegenwirkt.

Ausstoßen

Im Ausstoßen werden die Abgase der Verbrennung durch die Auslassventile aus dem Zylinder ausgeschoben, bevor im darauffolgenden Ansaugtakt wieder Umgebungsluft für das nächste Arbeitsspiel angesaugt wird. Das Auslassventil öffnet auch hier vor dem Erreichen des unteren Totpunktes bereits im späten Verlauf der Expansion, um beim Ausstoßen ein Anstauen von Abgasen im Zylinder und einen erhöhten Gegendruck im Abgasrohr zu vermeiden.

Während in der Expansion Arbeit am Kolben verrichtet wird, muss in den drei anderen Takten Arbeit aufgewendet werden. Abbildung 2-2 zeigt links schematisch ein pV-Diagramm eines Viertakt-Arbeitsspiels. Die Fläche, die von der oberen Schleife (Hochdruckschleife) eingeschlossen wird, ist die an den Kolben abgegebene Arbeit und die Fläche, die von der unteren Schleife (Ladungswechselschleife) eingeschlossen wird, die für das Ansaugen und Ausstoßen aufgewendete Arbeit. Die nutzbare Arbeit ergibt sich aus der Differenz der Hochdruckschleife und der Ladungswechselschleife.

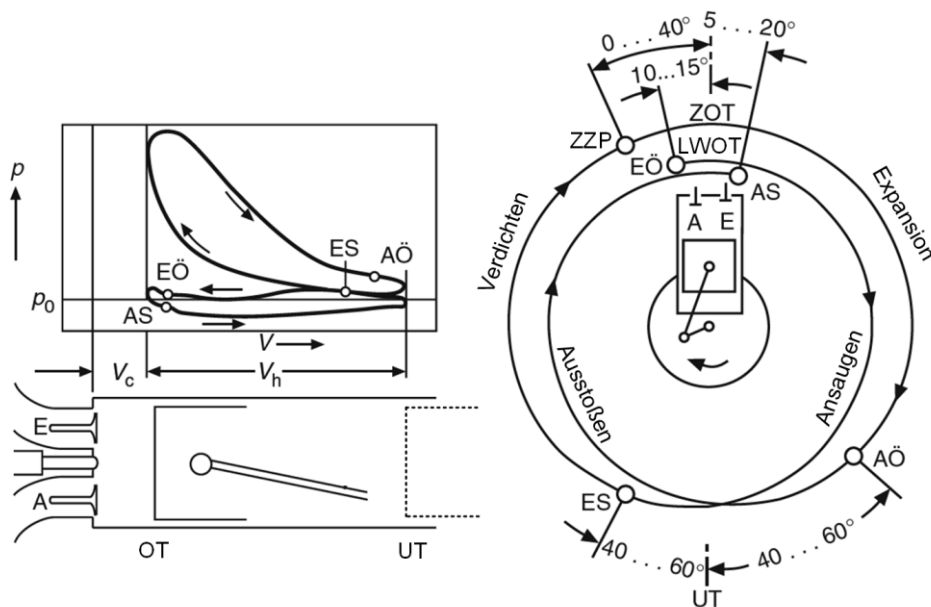


Abbildung 2-2: Links: Schematisches pV-Diagramm eines Viertakt-Ottomotors. Rechts: Schematisches Steuerdiagramm (E: Einlass, A: Auslass, EÖ: Einlass öffnet, AS: Auslass schließt, AÖ: Auslass schließt, ES: Einlass schließt, p_0 : Umgebungsdruck, V_h : Hubvolumen, V_c : Kompressionsvolumen) nach [4].

Das Hubvolumen V_h eines Zylinders ist das Volumen, das der Kolben während eines Hubes vom OT und UT durchläuft. Das Kompressionsvolumen V_c ist das im OT vorliegende minimale Brennraumvolumen. Aus diesen beiden Größen ergibt sich das Verdichtungsverhältnis ϵ eines Motors nach Gleichung (2.1):

$$\epsilon = \frac{V_h + V_c}{V_c} \quad (2.1)$$

Zur besseren Vergleichbarkeit von Betriebspunkten unterschiedlicher Motoren wird ein fiktiver Druck, der indizierte Mitteldruck p_{mi} eingeführt, der sich aus der nutzbaren Arbeit des Arbeitsspiels W_K und dem Hubvolumen V_h nach Gleichung (2.2) ergibt:

$$p_{mi} = \frac{W_K}{V_h} \quad (2.2)$$

Die Kenngröße p_{mi} berücksichtigt keine Verluste durch Reibung und Nebenaggregate des Motors. Diese werden im Reibmitteldruck p_{mr} zusammengefasst, sodass sich nach Gleichung (2.3) der effektive Mitteldruck p_{me} ergibt:

$$p_{me} = p_{mi} - p_{mr} \quad (2.3)$$

Auch p_{me} und p_{mr} werden analog zu Gleichung (2.2) auf das Hubvolumen V_h bezogen.

2.1.2 Direkteinspritzung

Bei der Direkteinspritzung bringt ein Einspritzventil den Kraftstoff unter hohem Druck direkt in den Brennraum ein. Typische Einspritzdrücke liegen derzeit bei 200 bis 350 bar. Dadurch, dass zunächst nur Umgebungsluft angesaugt wird und Kraftstoff erst im Brennraum zugeführt wird, ermöglicht die

Direkteinspritzung im Vergleich zur Saugrohreinspritzung höhere Verdichtungsverhältnisse. Zusätzlich kühlt der eingebrachte Kraftstoff das Gemisch, wodurch die Klopfneigung sinkt. Oft wird die Direkteinspritzung mit einer Aufladung, d.h. der Verdichtung der angesaugten Luft mithilfe eines durch den Abgasstrom angetriebenen Verdichters (Turbolader) kombiniert, um die spezifische Leistung des Motors zu erhöhen. Dadurch kann der Hubraum des Motors bei gleichbleibender Leistung verringert werden (Downsizing), um Reibungsverluste zu senken. Die Direkteinspritzung ermöglicht außerdem eine flexiblere Betriebsweise des Motors. So kann beispielsweise bei Bedarf durch eine späte Einspritzung während der Kompression die Abgastemperatur erhöht werden, um die Komponenten der Abgasnachbehandlung aufzuheizen und die Schadstoffemissionen des Motors zu reduzieren [3].

Das Mischungsverhältnis aus Luft und Kraftstoff im Brennraum wird oft durch das sogenannte Luftverhältnis λ nach Gleichung (2.4) angegeben:

$$\lambda = \frac{m_L}{m_{L,st}} \quad (2.4)$$

Mit der im Motor vorhandenen Luftmasse m_L und der für eine stöchiometrisch vollständigen Verbrennung notwendigen Luftmasse $m_{L,st}$. Ein Kraftstoffüberschuss ($\lambda < 1$) wird als fettes Gemisch, ein Kraftstoffmangel ($\lambda > 1$) als mageres Gemisch bezeichnet. Insbesondere im Englischen wird oft der Kehrwert $\phi = 1/\lambda$, das sogenannte Äquivalenzverhältnis, verwendet.

Direkteinspritzende Ottomotoren können mit zwei Betriebsstrategien betrieben werden: dem Homogenbetrieb, oder dem Schichtladebetrieb. Beim Homogenbetrieb liegt idealerweise überall im Brennraum eine homogene Kraftstoff-Luft-Mischung mit $\lambda = 1$ vor und die Leistungsregelung des Motors erfolgt über eine Variation der angesaugten Luftmasse durch die Drosselklappe. Im Schichtladebetrieb liegt im Motor größtenteils ein mageres Gemisch mit $\lambda > 1$ vor, wobei sichergestellt werden muss, dass im Bereich der Zündkerze zum ZZZ ein zündfähiges Kraftstoff-Luft-Verhältnis ($\lambda \approx 1$) entsteht. In dieser Betriebsstrategie erfolgt die Leistungsregelung über die eingespritzte Menge an Kraftstoff, während die Drosselklappe möglichst weit geöffnet ist, um Strömungsverluste im Saugrohr zu reduzieren und somit effektiv einen geringeren Kraftstoffverbrauch zu erreichen. Der Schichtladebetrieb wird vor allem im unteren Teillastbereich des Motors eingesetzt [1].

Gemischbildung

Bei direkteinspritzenden Ottomotoren werden drei Arten von Gemischbildungsverfahren unterschieden, die in Abbildung 2-3 dargestellt sind. Bei der wandgeführten und luftgeführten Gemischbildung ist der Abstand zwischen Injektor und Zündkerze relativ groß. Die Gemischbildung und der Transport eines zündfähigen Gemisches zur Zündkerze erfolgen bei der wandgeführten Gemischbildung durch Interaktion des Kraftstoff-Strahls mit geometrischen Features am Kolben oder der Brennraumwand. Bei der luftgeführten Gemischbildung erfolgen die Prozesse nur durch die einlassseitig generierte Ladungsbewegung.

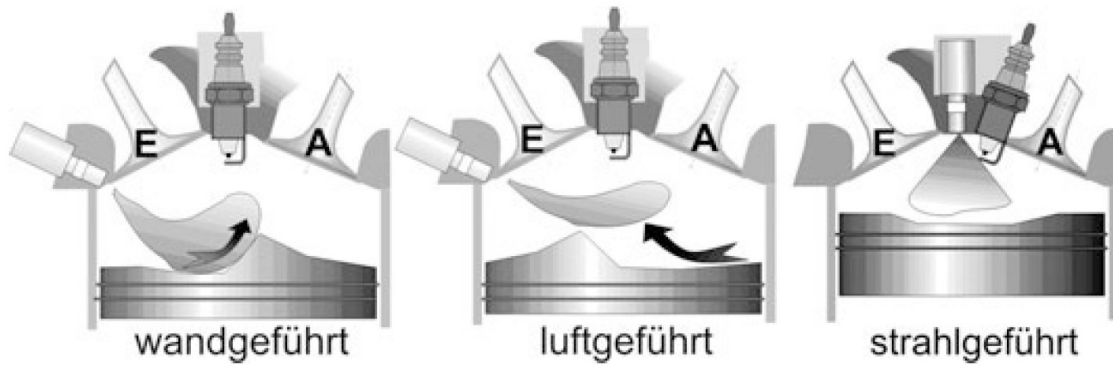


Abbildung 2-3: Einteilung der Gemischbildungsverfahren im direkteinspritzenden Ottomotor nach [5].

Bei der strahlgeführten Gemischbildung ist der räumliche Abstand zwischen Injektor und Zündkerze gering und die Gemischbildung wird primär durch die zeitliche und räumliche Ausdehnung des Kraftstoff-Strahls gesteuert. Aufgrund der räumlichen Nähe zwischen Injektor und Zündkerze kann durch eine späte Einspritzung im Schichtladebetrieb ein zündfähiges Gemisch an der Zündkerze erzeugt werden, weshalb der Schichtladebetrieb bevorzugt mit einer strahlgeführten Gemischbildung kombiniert wird [3]. Unabhängig vom Gemischbildungsverfahren ist das Ziel immer eine vollständige Verdampfung des Kraftstoffes und eine ausreichende Vermischung mit der angesaugten Luft. Die Gemischbildung wird durch verschiedene Faktoren beeinflusst, die in Abbildung 2-4 zusammengefasst sind.

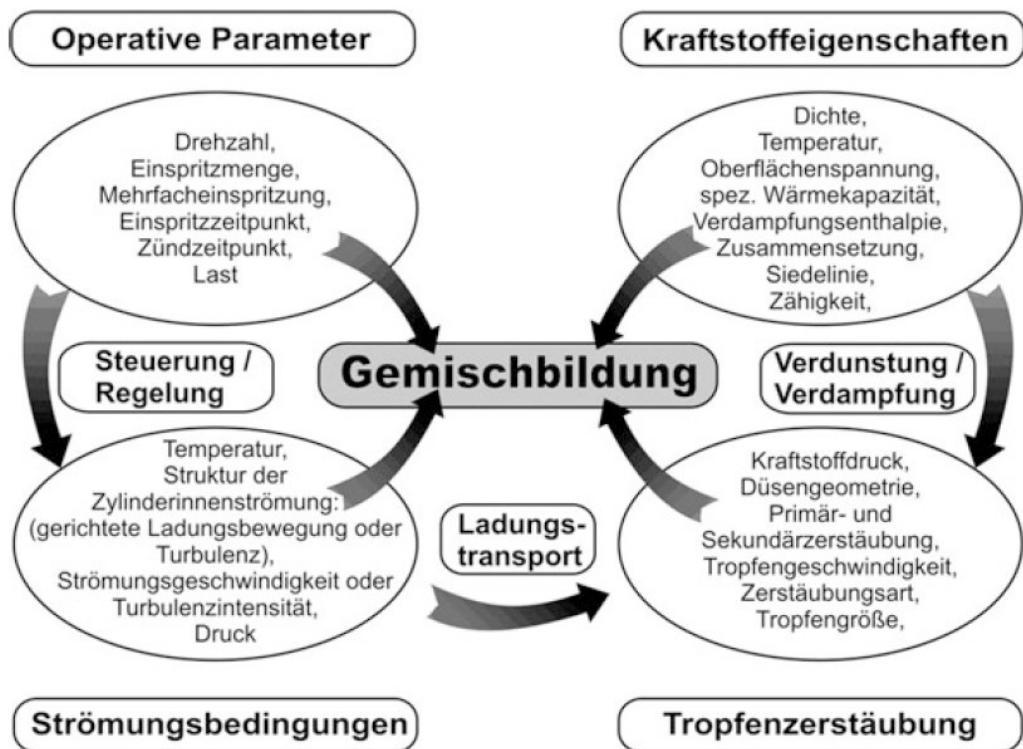


Abbildung 2-4: Einflussparameter auf den Gemischbildungsprozess nach [6].

Kraftstoffwandfilme

Im Realsystem benetzt der Kraftstoff unter Umständen jedoch die Wände des Brennraumes, sprich Kolbenboden und/oder Zylinderwand und bildet Flüssigfilme auf der getroffenen Oberfläche. In den Bereichen um diese Flüssigfilme bildet sich lokal ein fettes Gemisch, was zu erhöhter Rußbildung [7]

und Emissionen von unverbrannten Kohlenwasserstoffen führt [8]. Entzünden sich diese Flüssigfilme beispielsweise auf dem Kolbenboden, können Diffusionsflammen auf dem Flüssigfilm (engl. pool fire) die Folge sein [9]. Der Einsatz von Motoren mit geringem Hubraum aufgrund von Downsizing geht mit immer kleineren Bohrungsdurchmessern und somit erhöhter Wandfilmbildung durch geringere Abstände zwischen Injektor und Zylinderwand einher. Gleichzeitig muss jedoch zum Erhalt der Motorleistung die spezifische Leistung erhöht und somit mehr Kraftstoff eingespritzt werden. Die fortschreitende Hybridisierung von Verbrennungsmotoren zur Effizienzsteigerung verstärkt die Problematik durch häufigere Kaltstarts und den intermittierenden Betrieb des Verbrennungsmotors zusätzlich, da für die Verdampfungsgeschwindigkeit des Kraftstoffes insbesondere die Umgebungstemperatur entscheidend ist [10].

Unverdampfter, flüssiger Kraftstoff auf der Zylinderwand wird durch die Kolbenringe abgestreift und gelangt in das Ringfeld. Hier interagiert er mit Öl, was zu einer Schädigung des Öls [11] und Ölverdünnung führt [12]. Wird der Motor über lange Zeiträume vermehrt kalt betrieben, kann sich Kraftstoff im Motoröl anreichern und im Extremfall zu einer Überfüllung der Ölwanne führen. Kraftstoff-Wandbenetzung steht zusätzlich im Verdacht, sogenannte Vorentflammungen zu begünstigen [13]. Die Vorentflammung ist eine Verbrennungsanomalie, bei der sich das Kraftstoff-Luft-Gemisch vor Einsetzen der Fremdzündung durch die Zündkerze selbst entzündet. Die Folge sind hohe Druckspitzen im Zylinder, die schon nach einzelnen Vorentflammungs-Ereignissen zu einem Motorschaden führen können. Vorentflammungen treten vor allem bei aufgeladenen Motoren im niedrigen Drehzahlbereich auf und werden daher auch als Low-Speed Pre-Ignition (LSPI) bezeichnet.

2.1.3 Kolbengruppe

Der Kolben dient dazu, die bei der Verbrennung entstehenden Druckkräfte aufzunehmen und über das Pleuel an die Kurbelwelle weiterzuleiten. In Abbildung 2-5 ist schematisch ein Kolben ohne Kolbenringe dargestellt.

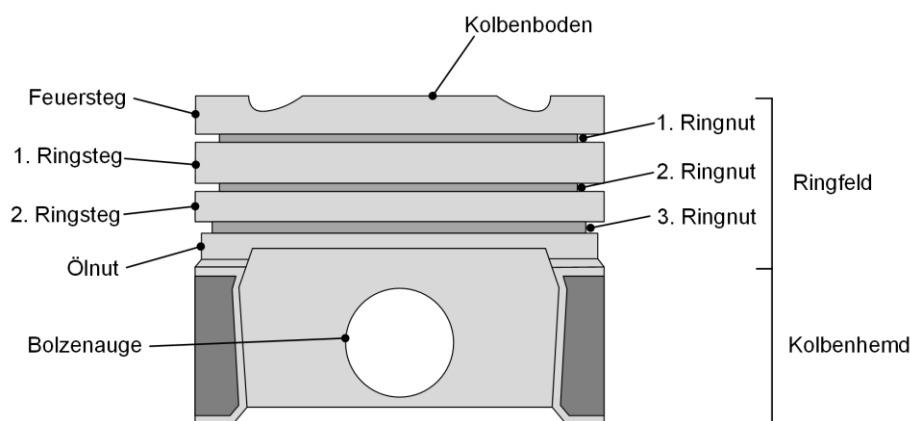


Abbildung 2-5: Nomenklatur der Kolbenbereiche (ohne Kolbenringe dargestellt).

Die dem Brennraum zugewandte Seite, der Kolbenboden, bildet zusammen mit dem Zylinderkopf und den Zylinderwänden die geometrischen Grenzen des Brennraumes. Aufgrund dessen erfährt der Kolbenboden hohe thermische Belastungen. Der Kolben weist 3 umlaufende Aussparungen auf, die 1.-3. Ringnut, um die Pleuellager aufzunehmen. Der Bereich oberhalb der 1. Ringnut wird als Feuersteg bezeichnet, die Bereiche zwischen der ersten und zweiten, bzw. der zweiten und dritten Ringnut als

erster und zweiter Ringsteg. Unterhalb der dritten Ringnut, in die der Ölabstreifring eingesetzt wird, befindet sich meist eine Aussparung im Kolben, die Ölnut. Sie dient als Auffangvolumen für abgestreiftes Öl. Moderne Kolben weisen außerdem sogenannte Drainagebohrungen in oder unterhalb der Nut auf. Diese können als Sacklochbohrung am oberen Ende der Nut ausgeführt sein, um eine direkte Verbindung zwischen der Ölnut und der 3. Ringnut herzustellen und so ein Abfließen von Schmieröl aus der Ringnut zu ermöglichen. Eine andere Variante, ein Anstauen von Öl innerhalb der Ölnut zu verhindern, sind Durchgangsbohrungen in der Ölnut zum Kolbeninneren. Oft wird eine Kombination von Sack- und Durchgangsbohrungen verwendet. Die Bohrmuster unterscheiden sich typischerweise auf DS und GDS, um unterschiedliche Beölungszustände auf den beiden Kolben- bzw. Motorseiten zu realisieren. Die Drainagebohrungen stellen dabei jedoch auch einen potentiellen Transportweg für Öl in die entgegengesetzte Richtung dar. Die Kurbelwelle führt dem tribologischen System Kolben/Zylinderwand durch Abschleudern Öl zu. Moderne Ottomotoren verfügen außerdem über Ölspritzdüsen, die unterhalb des Zylinders im Kurbelgehäuse installiert sind. Diese Düsen spritzen gezielt Schmieröl an die Unterseite des Kolbens, um eine verbesserte Kühlung und Schmierung der Kolbengruppe zu erreichen. Außerdem kann der Kolben mit einem radial umlaufenden Kanal versehen werden, in den durch die Ölspritzdüse Schmieröl eingebracht wird, um eine zusätzliche Kühlung des Kolbens zu erreichen.

Der Bereich des Kolbens vom Feuersteg bis zur Ölnut wird als Ringfeld bezeichnet. Das Kolbenhemd unterhalb des Ringfeldes dient der Führung des Kolbens innerhalb des Zylinders und verhindert ein übermäßiges Verkippen des Kolbens. Das Kolbenhemd moderner Kolben wird mit einer etwa 20 µm dicken Schicht aus mit Graphit versehenem Kunstharz beschichtet. Die Beschichtung verbessert die Gleiteigenschaften, insbesondere bei Mangelschmierung, und erhöht so die Sicherheit gegen Kolbenfresser [1].

Ringfeld

Moderne PKW-Ottomotoren sind mit drei Kolbenringen bestückt: dem ersten und zweiten Kolbenring, auch als erster und zweiter Verdichtungsring bezeichnet, und dem Ölabstreifring. Die primäre Aufgabe des ersten und zweiten Kolbenringes ist die Abdichtung des Brennraumes gegen das Kurbelgehäuse. Dennoch treten vom Brennraum in Richtung Kurbelgehäuse (Blowby), als auch in entgegengesetzte Richtung (reverse Blowby) Gasströmungen auf. Jeder Blowby-Volumenstrom aus dem Brennraum in Richtung des Kurbelgehäuses stellt dabei einen Wirkungsgradverlust dar. Gleichzeitig ist ein gewisses Maß an Blowby jedoch auch notwendig, um den Transport von Schmieröl aus dem Ringfeld in den Brennraum zu verhindern. Über die ersten beiden Verdichtungsringe wird außerdem bis zu 20 % der vom Kolben aufgenommene Wärme an die Zylinderwand abgegeben [14].

Der Ölabstreifring reguliert das Ölangebot auf der Zylinderwand, indem er überschüssiges Öl abstreift. Dabei muss jedoch sichergestellt werden, dass das noch vorhandene Öl auf der Zylinderwand für eine effektive Schmierung ausreicht. Bei einem Anlagewechsel, also der Bewegung des Kolbens von der DS auf die GDS, oder umgekehrt, können Kräfte von mehreren tausend Newton auftreten [1]. Daher ist zum Zeitpunkt des Anlagewechsels im Bereich des Kolbenhemdes ein lokal erhöhtes Ölangebot auf der Zylinderwand vorteilhaft, um den Aufprall des Kolbenhemdes zu dämpfen. Über eine geeignete Gestaltung der Ölnut kann eine Beölung durch Schmieröl aus der Nut auf die Zylinderwand begünstigt

werden [15]. Der hierbei genutzte Mechanismus wird als Bridging bezeichnet und beschreibt den gleichzeitigen Kontakt von Öl mit dem Kolben und der Zylinderwand, der mit einem Transport von Öl auf die Zylinderwand einhergeht [16, 17].

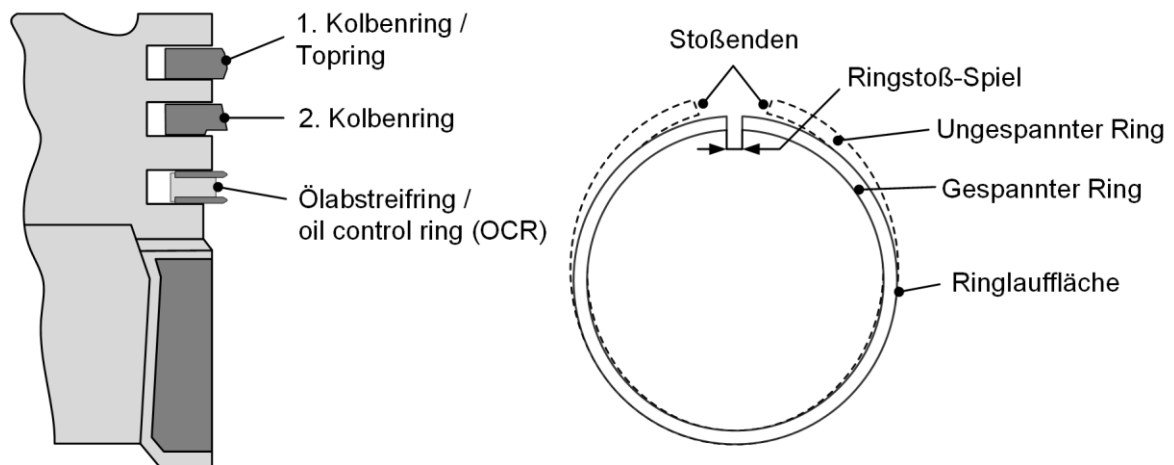


Abbildung 2-6: *Links:* Detaildarstellung des Ringfeldes (nicht maßstäblich). *Rechts:* Bezeichnungen am Verdichtungsring.

Um ein Abdichten beziehungsweise Abstreifen von Öl sicherzustellen, müssen die Kolbenringe sicher an der Zylinderwand anliegen. Zu diesem Zweck sind die ersten beiden Kolbenringe aufgetrennt und im ungespannten Zustand mit radialem Übermaß im Vergleich zur Zylinderbohrung ausgeführt (siehe Abbildung 2-6 rechts). Im gespannten Zustand im Einbau wirkt so radial eine Federkraft, auch als Vorspannung des Ringes bezeichnet, die den Ring an die Zylinderwand anpresst. Der Ölabstreifring ist mehrteilig aufgebaut, in PKW-Ottomotoren hat sich ein dreiteiliger Aufbau durchgesetzt: Der Ring besteht aus zwei Stahlbandringen, den Rails, die ähnlich zu den ersten beiden Kolbenringen in Form einer offenen Ringfeder ausgeführt sind, und einer Distanzfeder zwischen den beiden Rails. Die Feder hält die Rails auf dem notwendigen axialen Abstand, außerdem sorgt die Spannung der Feder für das radiale Anliegen der Rails an der Zylinderwand. Oft wird der zweite Ring mit einer Nase am unteren Ringende versehen (siehe Abbildung 2-6), um unterstützend zum Ölabstreifring ebenfalls Öl abzustreifen. Auf die Kolbenringe wirken verschiedene Kräfte, die die Dichtwirkung, aber auch die auftretende Verlustleistung durch Reibung und den Ölverbrauch maßgeblich beeinflussen. Abbildung 2-7 zeigt die wichtigsten auf den ersten Kolbenring wirkenden Kräfte am Beispiel der Kompression.

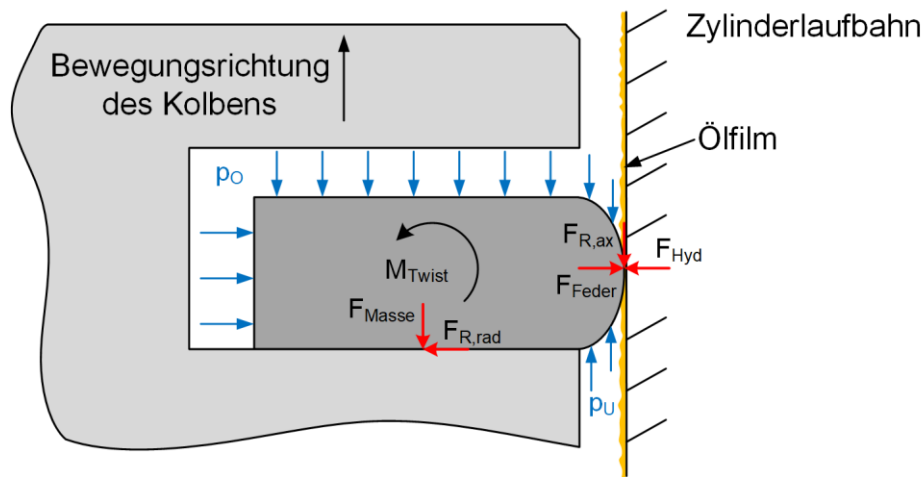


Abbildung 2-7: Kräfte am Kolbenring am Beispiel des ersten Kolbenringes während der Kompression (Spielsituation nicht maßstäblich).

Der Kolbenring hat innerhalb der Nut in axialer Richtung Spiel, wobei die Maße in Abbildung 2-7 überzeichnet dargestellt sind. Durch die reversierende Bewegung des Kolbens zwischen OT und UT wird der Kolbenring mit dem Kolben beschleunigt bzw. verzögert, wodurch die Kraft F_{Masse} infolge der Massenträgheit des Ringes wirkt. Im Kontaktpunkt mit der Zylinderlaufbahn wirkt außerdem eine Reibkraft $F_{R,ax}$ in axialer Richtung, durch die der Ring in der Nut verkippen kann. Um dem entgegenzuwirken, kann der Ring mit einem Moment M_{Twist} versehen werden. Zusätzlich zur axialen Reibkraft wirkt in radialer Richtung eine Reibkraft $F_{R,rad}$ im Kontakt mit der Ringnutflanke, an der der Ring anliegt. Der Federkraft des Ringes F_{Feder} wirkt eine Kraft F_{Hyd} durch die Bildung eines hydrodynamischen Schmierfilmes im Kontakt Kolbenring-Zylinderwand entgegen. Oft wird der erste Verdichtungsring ballig ausgeführt (Siehe Abbildung 2-7), um die Bildung des hydrodynamischen Schmierfilmes zu begünstigen. Zusätzlich wirken Gaskräfte entsprechend des Drucks oberhalb (p_o) und unterhalb (p_u) des Kolbenringes. Je nach vorherrschenden Druckniveaus wird dabei, vor allem in der Expansion, das radiale Anliegen des Ringes an der Zylinderwand und das axiale Anliegen an der Ringnutflanke maßgeblich unterstützt. Unter Umständen können die Gaskräfte jedoch auch das Gegenteil bewirken: übersteigt die auf die Ringlauffläche wirkende Kraft die Summe aus Federkraft und auf die Innenfläche des Ringes wirkende Kraft, so kann der Ring radial zusammengedrückt werden. Dieses Phänomen wird als Ringkollaps bezeichnet und kann zu stark erhöhten (Reverse-)Blowby Strömungen und Ölemissionen führen, da ein Anliegen des Ringes an der Zylinderwand nicht mehr sichergestellt ist [14, 18]. Ursache kann unter anderem eine Überfüllung der ersten Ringnut mit Schmieröl sein, wodurch die Gaskraft auf die Rückseite des Kolbenringes verringert oder vollständig unterbunden wird [18].

Der Kolbenring wechselt während eines Arbeitsspiels mehrfach die axiale Anlageseite in der Kolbenringnut. Während des Anlagewechsels ist die Dichtwirkung des Ringes unterbrochen, da Fluide durch die Spalte ober- und unterhalb des Kolbenringes durch die Ringnut fließen können. Meist geschieht der Anlagewechsel schnell, sodass die Dichtwirkung nur kurzzeitig unterbrochen wird. Bei einer axialen Kräftebilanz nahe Null kann die resultierende Kraft jedoch häufig hintereinander die Wirkrichtung ändern, was zur Folge hat, dass der Kolbenring mehrfach von einer der Ringnutflanken abhebt, was als Ringflattern bezeichnet wird. Durch diese oszillierende Bewegung kann Öl in die

Ringnut hineingepumpt, beziehungsweise aus der Nut herausgedrückt werden, was einen übermäßigen Transport von Öl in die oberen Kolbenbereiche ermöglichen kann [19-23]. Neben einem Öltransport durch die Ringnuten kann Öl auch durch die Kolbenringstöße transportiert werden. Im Motorbetrieb rotieren die Kolbenringe in ihren Nuten typischerweise. Diese Rotation geschieht, ausgelöst durch unterschiedlichen Drücke in den Ringstegen, unabhängig voneinander, wodurch sich zwei oder mehr Ringstöße zeitweise übereinander befinden können. Bei abrupten Änderungen der Motorlast und insbesondere geschlepptem Motorbetrieb können so große Mengen Öl in den Brennraum transportiert werden [18, 24, 25].

Ölabstreifring

Im Ringfeld hat der Ölabstreifring einen besonderen Stellenwert im Hinblick auf den Ölhaushalt des Motors. Abbildung 2-8 zeigt links schematisch einen dreiteiligen Ölabstreifring im Querschnitt im eingebauten Zustand, rechts ist eine Fotografie des Ringes im eingebauten Zustand in der Frontansicht gezeigt.

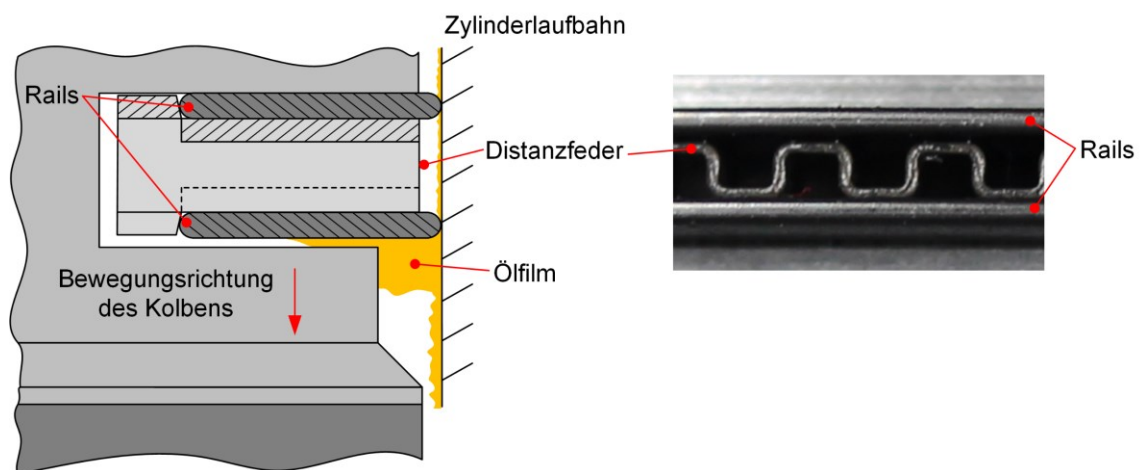


Abbildung 2-8: *Links:* Detailansicht des Ölabstreifringes im Schnitt. *Rechts:* Fotografie des Ölabstreifringes in der Frontansicht.

Während der Abwärtsbewegung des Kolbens werden durch den Ölabstreifring große Mengen Öl abgestreift, die in der Ölnut unterhalb des Ringes aufgefangen werden. Dabei muss sichergestellt werden, dass dieses abgestreifte Öl nicht durch die Ringnut des Ölabstreifringes in die Bereiche der oberen beiden Kolbenringe gelangt. Öl, das den Ölabstreifring in Richtung Brennraum passiert hat, kann aufgrund der Dichtwirkung des Ölabstreifringes nur schwer wieder nach unten transportiert werden. In den oberen Kolbenbereichen kann sich Öl ansammeln und, wie zuvor beschrieben, erhöhte Partikelemissionen, oder ein Kollabieren von Kolbenringen auslösen. Trotzdem ist eine Mindestmenge an Öl auch in den Ringnuten der oberen beiden Kolbenringe vorteilhaft, um Verschleiß und Reibung zu reduzieren [26].

Auslegung des Ringfeldes

Das Ringfeld stellt ein komplexes System dar, dessen Funktion bei unterschiedlichen Bedingungen sichergestellt werden muss. Mit steigender Motordrehzahl nehmen die Massenkräfte, die auf die Ringe wirken, drastisch zu. Der Druck im Zylinder kann im Verlauf eines Motorzyklus zwischen einem Niveau knapp über Umgebungsdruck und Drücken von mehr als 100 bar schwanken. Die Drücke innerhalb der

Ringstege schwanken dabei ebenfalls, jedoch durch die Dichtwirkung der Kolbenringe leicht zeitversetzt zum Zylinderdruck. Als Folge kann im Ringfeld stellenweise reverse Blowby trotz erhöhtem Zylinderdruck auftreten. Im Betrieb kann sich die Motorlast, beispielsweise während eines Überholvorgangs, abrupt von geschlepptem oder Niederlast-Betrieb zu Motorvolllast ändern. Insbesondere diese hochdynamischen Lastwechsel sind kritisch für die Systemstabilität [17, 18, 27, 28]. Für die Ölemission ist vor allem der geschleppte Motorbetrieb problematisch [25]. In modernen Fahrzeugen wird, wenn keine Motorlast abgefragt wird, die Verbrennung ausgesetzt (Schubabschaltung) und die Drosselklappe fast vollständig geschlossen, um eine erhöhte Motorbremswirkung zu erreichen und um ein Auskühlen der Abgasnachbehandlung zu verhindern. Der Saugrohrdruck fällt dabei drehzahlabhängig auf bis zu $p_{\text{saug}} = 150 \text{ mbar}$ ab, wodurch auch der Zylinderdruck absinkt. Im Kurbelgehäuse hingegen herrscht ein Druck leicht unter Umgebungsdruck, woraus sich ein Druckgefälle vom Kurbelgehäuse in Richtung des Brennraumes ergibt und so reverse Blowby und Ölemission begünstigt werden. Kurze Phasen von Schubetrieb sind dabei unproblematisch, da bei Wiedereinsetzen der Verbrennung kleine Mengen Öl durch Blowby zurück nach unten transportiert werden können. Bei einer Fahrt auf abschüssigem Gelände kann der Motor jedoch auch für längere Zeit geschleppt betrieben werden (>30 Sekunden). Durch eine geeignete Auslegung muss sichergestellt werden, dass die Dichtfunktion der Ringe auch bei diesen langen Schubphasen erhalten bleibt. Die Zielsetzungen bei der Auslegung des Ringfeldes stehen jedoch teilweise im Konflikt miteinander. Eine Reduktion der Ringvorspannung und der axialen Ringhöhe reduziert zwar die Reibverluste, erhöht jedoch gleichzeitig die Ölemissionen in den Brennraum [29, 30].

2.2 Optische Messtechniken

2.2.1 Überblick relevanter optische Messtechniken

In optisch zugänglichen Motoren (vgl. Kapitel 2.3.1) haben sich diverse optische Messtechniken etabliert. Je nach optischer Zugänglichkeit und eingesetzter Messtechnik können verschiedene physikalische Größen und Phänomene wie das Kraftstoff-Luft-Verhältnis, Gastemperatur, Ladungsbewegung, Flammenausbreitung, Rußbildung, etc. bestimmt werden. Tabelle 2-1 gibt einen Überblick über gängige optische Messtechniken zur Untersuchung der in dieser Arbeit behandelten Phänomene sowie Literatur-Beispiele für die Anwendung der jeweiligen Messtechnik. Eine detailliertere Diskussion der für die Arbeit relevanten Literatur findet sich in Abschnitt 3.

Tabelle 2-1: Relevante optische Messtechnik zur Untersuchung der in dieser Arbeit behandelten Phänomene.

Gegenstand der Untersuchung	Messtechnik	Funktionsprinzip	Beispiel
Flüssigschichten	Laserinduzierte Fluoreszenz (LIF)	Anregung von Molekülen zur Emission von Fluoreszenzlicht durch Absorption von Laserstrahlung.	Öl- [24] und Kraftstoffschichten [31] im Ottomotor
	Refractive index matching (RIM)	Beleuchtung einer rauen, transparenten Oberfläche. Durch Flüssigkeit benetzte Oberflächen streuen Licht schwächer und erscheinen dunkler.	Kraftstoffschichten im Ottomotor [7] und im Modellexperiment [32]
	Lichtabsorption	Abschwächung von Licht durch Absorption beim Durchstrahlen einer Flüssigschicht.	Kraftstoffschichten im Modellexperiment [33]
Flammenfront	Chemilumineszenz	Emission von Licht durch Moleküle, die in einer chemischen Reaktion (Verbrennung) gebildet werden.	Selbstzündung im Ottomotor [34]
	OH laserinduzierte Fluoreszenz	Spontane Lichtemission von OH-Radikalen, die durch Laserstrahlung elektronisch angeregt wurden.	Verbrennungsanalyse im Wasserstoffmotor [35] und Dieselmotor [36]
Rußbildung	Laserinduzierte Inkandescenz	Rußpartikel werden durch einen Laser bis knapp unterhalb ihrer Sublimationstemperatur aufgeheizt und emittieren starke thermische Strahlung.	Rußbildung im Ottomotor [37] und im Modellexperiment [38]
	Thermische Strahlung	Rußpartikel in Flammen emittieren aufgrund ihrer hohen Temperatur thermische Strahlung.	Rußbildung im Dieselmotor [39]
	Diffuse back-illumination (DBI)	Abschwächung der hintergrundseitigen, diffusen Beleuchtung durch Rußpartikel.	Rußbildung im Diesel-Spray [40]

In dieser Arbeit wird die laserinduzierte Fluoreszenz zur Visualisierung von Öl- und Kraftstoffschichten verwendet. Zur Visualisierung der Verbrennung wird das Flammeneigenleuchten, bestehend aus Chemilumineszenz der Verbrennung und thermischer Strahlung der aufgeheizten Rußpartikel, bildgebend erfasst. Die Messtechniken werden in den nachfolgenden Abschnitten näher erläutert.

2.2.2 Laserinduzierte Fluoreszenz (LIF)

Lumineszenz bezeichnet die Emission von Licht eines physikalischen Systems beim Übergang von einem energetisch angeregten Zustand zurück in den Grundzustand [41]. Wurde das System optisch, also durch die Absorption eines Photons, angeregt, wird der Prozess als Photolumineszenz bezeichnet. Photolumineszenz lässt sich in die zwei Mechanismen Fluoreszenz und Phosphoreszenz unterteilen. Fluoreszenz ist dadurch gekennzeichnet, dass die Lichtemission kurze Zeit (typischerweise wenige

Nanosekunden) nach der optischen Anregung endet [42]. Die laserinduzierte Fluoreszenz ist wiederum eine Sonderform der Fluoreszenz, bei der die Quelle der optischen Anregung ein Laser ist. Die Lichtemission bei der Phosphoreszenz erfolgt in deutlich höheren Zeiträumen (Sekunden bis hin zu mehreren Stunden) [43]. Im Folgenden werden die physikalischen Grundlagen der Prozesse basierend auf [43, 44] vorgestellt.

Die Energie eines Photons wird mit dem Planck'schem Wirkungsquantum h und der Frequenz f des Lichtes, bzw. der Wellenlänge λ des Lichtes und der Lichtgeschwindigkeit c nach Gleichung (2.5) beschrieben:

$$E_{\text{photon}} = hf = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.5)$$

Die physikalischen Vorgänge der Phosphoreszenz und Fluoreszenz können mit einem Jablonski Diagramm beschrieben werden, das in Abbildung 2-9 gezeigt ist.

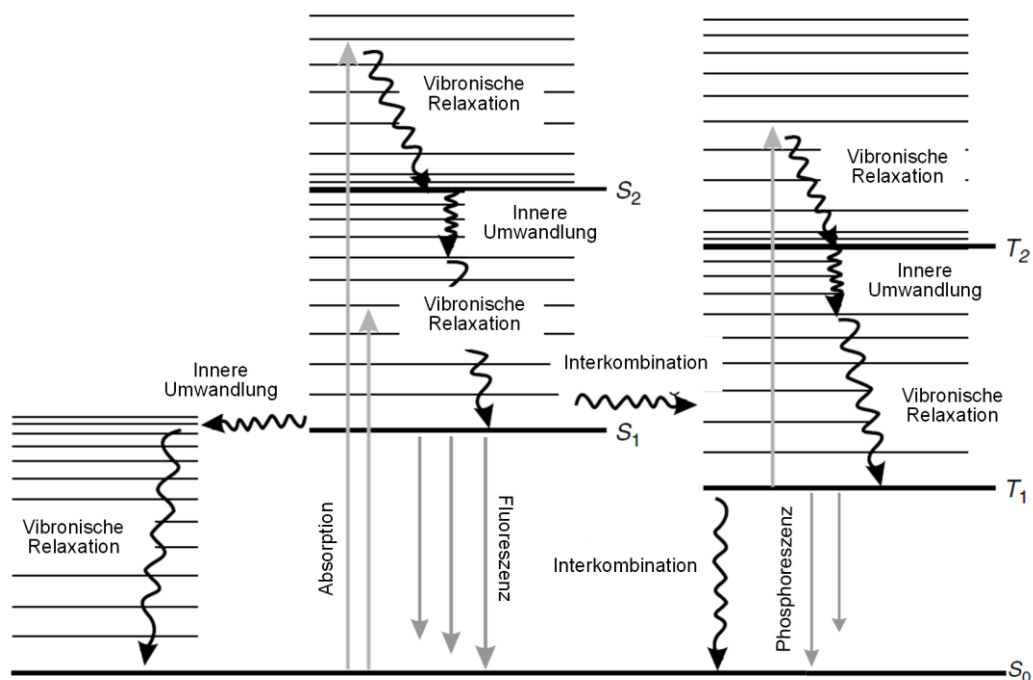


Abbildung 2-9: Jablonski Diagramm nach [43].

Die elektronischen Zustände der meisten Moleküle lassen sich in Singulett- und Triplet-Zustände unterteilen. Beim Singulett-Zustand sind die Spins aller Elektronenpaare des Moleküls jeweils entgegengesetzt gerichtet. Ist der Spin von zwei ungepaarten Elektronen gleichgerichtet, liegt ein Triplet-Zustand vor. In Abbildung 2-9 kennzeichnen dicke, horizontale Linien die unterschiedlichen energetischen Zustände des Moleküls, wobei S Singulett- und T Triplet-Zustände bezeichnen. Indizes markieren die unterschiedlichen Energieniveaus der Zustände. Durch unterschiedliche Schwingungsniveaus des Moleküls sind weitere Zustände möglich, die durch dünne, horizontale Linien dargestellt sind. Die Übergänge zwischen den Zuständen können entweder strahlend, also unter Aussendung eines Photons (Fluoreszenz, Phosphoreszenz), oder strahlungslos erfolgen. Bei der vibronischen Relaxation gibt das Molekül durch Kollision mit anderen Molekülen Energie in Form von

Wärme ab, bis es den Schwingungsgrundzustand des jeweiligen elektronischen Zustands erreicht. Das Molekül kann außerdem von einem elektronisch angeregten Zustand in den nächsttieferliegenden elektronischen, aber vibronisch hochangeregten elektronischen Zustand wechseln (Innere Umwandlung). Bei der sogenannten Interkombination ändert sich zusätzlich der Elektronen-Spin, sodass das Molekül aus einem elektronisch angeregten Singulett-Zustand in einen Triplet-Zustand übergehen kann.

Wird ein Photon von einem Molekül absorbiert, kann dieses vom Grundzustand S_0 in einen elektronisch angeregten Zustand (S_1 bzw. S_2 in Abbildung 2-9) überführt werden, wobei in der Regel ein gleichzeitig vibronisch angeregter Zustand besetzt wird. Voraussetzung für diese Anregung ist, dass die Energie des Photons der notwendigen Energiedifferenz der beiden Zustände entspricht. Durch die zahlreichen möglichen Schwingungsniveaus ergibt sich daraus jedoch keine diskrete Wellenlänge, sondern ein stoffspezifisches Absorptionsspektrum. Das Molekül kann anschließend auf verschiedene Wege zurück in den Grundzustand übergehen. Der Vorgang kann durch eine Kombination der vorgestellten strahlungsfreien Übergänge komplett strahlungslos erfolgen (linke Spalte in Abbildung 2-9). Strahlende Übergänge können aus einem vibronischen Grundniveau eines elektronisch angeregten Zustandes zurück in einen niedrigerenergetischen Zustand (in der Regel in den Grundzustand) erfolgen. Diese Übergänge finden typischerweise in einen vibronisch angeregten Zustand statt, woraus sich analog zur Absorption ein Emissionsspektrum ergibt.

Bei der Fluoreszenz erfolgt der Übergang aus einem angeregten Singulett-Zustand zurück in den Singulett-Grundzustand. Bei der Phosphoreszenz erfolgt der Übergang aus einem angeregten Triplet-Zustand zurück in den Grundzustand und ist quantenmechanisch „verboten“ und daher unwahrscheinlich, woraus sich die unterschiedlichen Zeitskalen ergeben, in denen die Vorgänge stattfinden. In beiden Fällen unterscheidet sich die Energie durch den Energieaustausch der vorangegangenen Prozesse von der des ursprünglich absorbierten Photons und ist daher zu höheren Wellenlängen verschoben (Stokes-Shift, oder auch Rotverschiebung).

Die absorbierte Lichtintensität I_A einer einfallenden Lichtintensität I_0 in einem transparenten Medium der Schichtdicke d kann durch das Lambert-Beer'sche Absorptionsgesetz mit der Stoffmengenkonzentration c der absorbierenden Moleküle (des Fluorophoren) und deren stoffspezifischem Extinktionskoeffizienten ϵ^* beschrieben werden [45]:

$$I_A = I_0(1 - e^{-\epsilon^*cd}) \quad (2.6)$$

Wie zuvor beschrieben, führt nur ein Teil des absorbierten Lichtes wiederum zu einer Emission von Fluoreszenzlicht. Die Fluoreszenz-Quanten-Ausbeute (FQA) Φ beschreibt die Wahrscheinlichkeit, dass ein absorbiertes Photon zur Emission eines Photons durch Fluoreszenz führt. Zusammen mit der Detektionseffizienz η und der Kollektionseffizienz Ω des optischen Systems folgt aus Gleichung (2.6) für die vom optischen System detektierte Fluoreszenz (in erster Näherung unter Vernachlässigung einiger nichtlinearer Prozesse wie z.B. Selbstquenching) Gleichung (2.7).

$$I_F = \eta \cdot \Omega \Phi I_0(1 - e^{-\epsilon^*cd}) \quad (2.7)$$

Während Ω und η Eigenschaften des optischen Systems sind, sind Φ und ε^* Funktionen von Umgebungstemperatur und Umgebungsdruck [42]. Für kleine Produkte ε^*cd gilt die in Gleichung (2.8) präsentierte lineare Näherung für das detektierte Fluoreszenzlicht:

$$I_F \approx \eta \cdot \Omega \Phi I_0 \varepsilon^* cd \quad (2.8)$$

2.2.3 Flammeneigenleuchten

Flammen senden Licht aus, das sich aus Chemilumineszenz der Reaktionspartner und der thermischen Strahlung von aufgeheizten Partikeln, hauptsächlich Ruß, in der Flamme zusammensetzt.

Chemilumineszenz

Chemilumineszenz beschreibt Prozesse, bei denen Licht als Folge von chemischen Reaktionen emittiert wird und lässt sich in direkte und indirekte Chemilumineszenz unterteilen [46]. Bei der direkten Chemilumineszenz wird überschüssige Reaktionsenergie während der eigentlichen Reaktion in Form von Photonen emittiert. Diese überschüssige Energie ist nicht quantisiert, daher wird Licht in einem kontinuierlichen Spektrum emittiert. Bei der indirekten Chemilumineszenz werden Atome/Moleküle in einer chemischen Reaktion (Verbrennung) in einen kurzlebigen, elektronisch angeregten Zustand versetzt. Ähnlich zum Prozess der LIF (vgl. Kapitel 2.2.2) kann die Anregungsenergie beim Übergang in einen Grundzustand nicht-strahlend durch Schwingungsrelaxation oder Quenching, oder aber strahlend in Form eines Photons abgegeben werden. Die Wellenlänge des emittierten Photons ist dabei abhängig von den möglichen Energiezuständen der angeregten Spezies. Analog zur LIF sind auch hier eine Vielzahl von energetisch leicht unterschiedlichen Zuständen um die diskreten Energieniveaus des Moleküls/Atoms möglich, woraus sich engbandige, kontinuierliche Emissionsspektren ergeben. Abbildung 2-10 zeigt das Chemilumineszenz-Spektrum einer Methan-Luft Flamme [47]. Asteriske kennzeichnen elektronisch angeregte Moleküle/Atome.

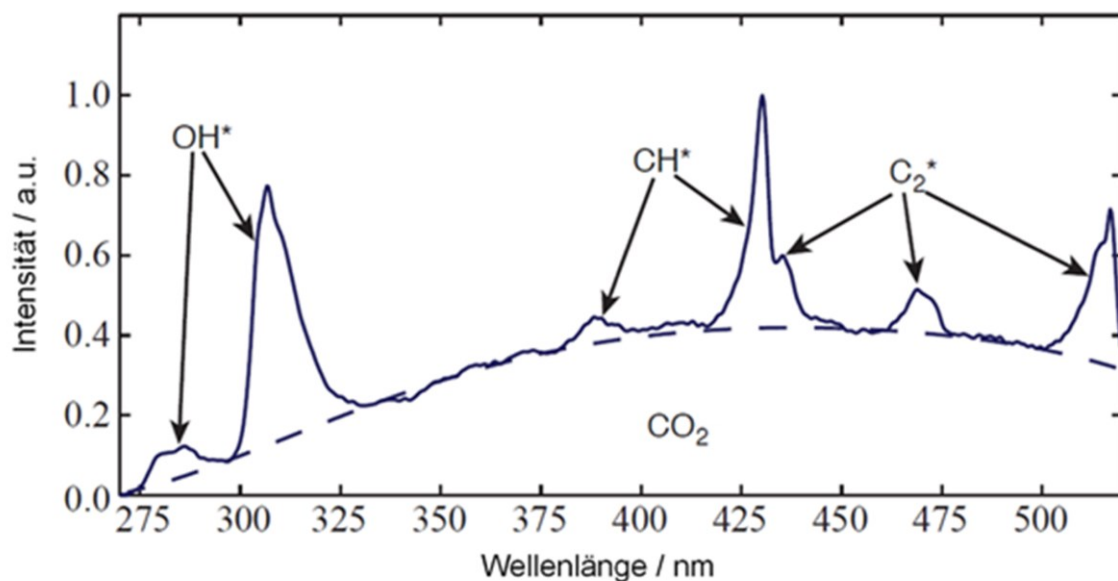


Abbildung 2-10: Chemilumineszenz-Spektrum einer Methan-Luft Flamme bei Umgebungsdruck nach [47].

Das gezeigte Spektrum ist eine Überlagerung der Einzelspektren der Spezies OH*, CH*, C₂* und CO₂. Das Spektrum von CO₂ entsteht durch direkte Chemilumineszenz und ist daher kontinuierlich. Der Wellenlängenbereich des emittierten Lichtes hängt von der Art der Verbrennung ab; in der Literatur finden sich für die oberen und unteren Grenzen des Spektrums in Verbrennungsmotoren Werte von 250 nm bis 450 nm [46], oder 250 bis 600 nm [48]. OH*, CH*, C₂* emittieren Licht durch indirekte Chemilumineszenz in engen Wellenlängenbanden unterschiedlicher Intensität. Üblicherweise werden den Spezies nach ihren charakteristischen Emissionsmaxima diskrete Emissionswellenlängen zugeordnet (OH*: 309 nm, CH*: 431 nm, C₂*: 473 nm und 516 nm). Die Detektion von Chemilumineszenz in Verbrennungsmotoren als Messtechnik ist etabliert, beispielsweise zur Untersuchung der Flammenausbreitung in Otto- [34, 49] und Dieselmotoren [50], der Entstehung von Stickoxiden [51], oder zur lokalen Bestimmung des Kraftstoff-Luft-Verhältnisses [52].

Thermische Strahlung

Jede Materie mit einer Temperatur oberhalb des absoluten Nullpunktes emittiert elektromagnetische Strahlung, die als thermische Strahlung oder Inkandeszenz bezeichnet wird. Rußteilchen können dabei näherungsweise als schwarze Körper betrachtet werden, deren abgegebene Strahlungsleistung $P_{\text{Strahlung}}$ mit der Stefan-Boltzmann-Konstante σ , der Teilchenoberfläche A und der absoluten Teilchentemperatur T durch das Stefan-Boltzmann-Gesetz beschrieben werden kann [53]:

$$P_{\text{Strahlung}} = \sigma \cdot AT^4 \quad (2.9)$$

Die abgegebene Strahlungsleistung ist also proportional zur vierten Potenz der Teilchentemperatur. Die spektrale Verteilung dieser thermischen Strahlung hängt ebenfalls von der Temperatur ab und kann durch das plank'sche Strahlungsgesetz [54] beschrieben werden:

$$M_{\lambda}^S = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \exp(hc / k \cdot \lambda T) - 1} \quad (2.10)$$

Dabei ist M_{λ}^S die spektrale flächenspezifische Ausstrahlung des Teilchens, h das Planck'sche Wirkungsquantum, c die Lichtgeschwindigkeit, λ die Wellenlänge des emittierten Lichts, k die Boltzmann-Konstante und T die absolute Temperatur des Teilchens. Abbildung 2-11 zeigt Emissionsspektren eines schwarzen Körpers bei verschiedenen Temperaturen.

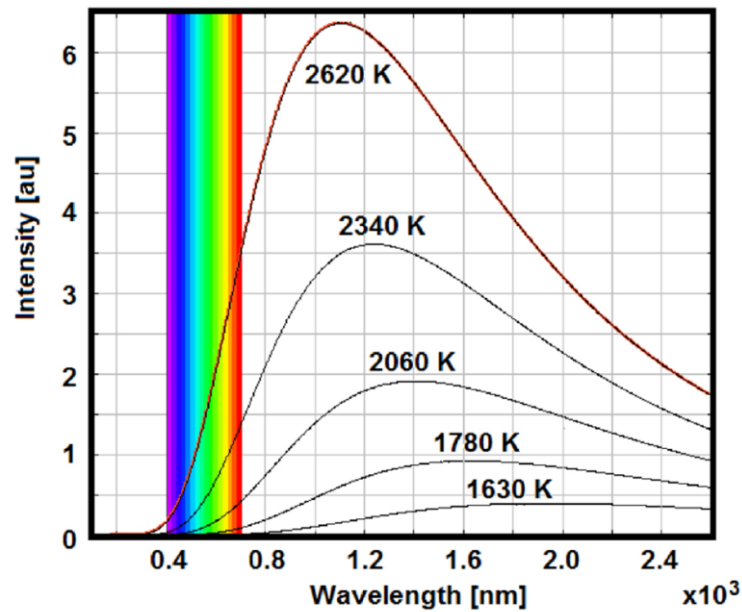


Abbildung 2-11: Emissionsspektren eines schwarzen Körpers bei verschiedenen Temperaturen nach [55]. (Der sichtbare Wellenlängenbereich ist in der jeweiligen Farbe markiert.)

Hier ist die Proportionalität der Strahlungsintensität zur vierten Potenz der Teilchentemperatur gut zu erkennen. Außerdem wird ersichtlich, dass sich das Intensitätsmaximum der thermischen Strahlung mit steigenden Temperaturen zu geringeren Wellenlängen verschiebt.

In Ottomotoren liegt die typische Rußtemperatur bei 1600 – 2600 K [56]. Bei diesen hohen Temperaturen verschiebt sich das Emissionsspektrum der thermischen Strahlung bis in den sichtbaren Wellenlängenbereich, wobei vor allem Licht im gelben bis roten Bereich des sichtbaren Spektrums emittiert wird (vgl. Kapitel 7.1.2). Durch Chemilumineszenz wird hingegen Licht im ultravioletten (UV) sowie im blauen Bereich des sichtbaren Spektrums emittiert (siehe Abbildung 2-10). Diese Unterschiede in der Wellenlängencharakteristik können mithilfe eines geeigneten optischen Systems genutzt werden, um ideal vorgemischte von rußenden Bereichen der Verbrennung zu unterscheiden.

2.3 Hardware: optisch zugängliche Motoren, Lichtquellen und Detektoren

In diesem Kapitel wird zunächst das Konzept eines optisch zugänglichen Motors und die populärsten Ansätze zur Realisierung der optischen Zugänglichkeit vorgestellt, anschließend die in dieser Arbeit eingesetzten Lichtquellen und Detektoren. Als Lichtquellen kommen Nd:YAG und Nd:YLF Laser zum Einsatz, die Detektion erfolgte über CMOS-Kameras (Complementary Metal-Oxide Semiconductor) und Bildverstärker.

2.3.1 Optisch zugängliche Motoren

Ein optisch zugänglicher Motor ist mit transparenten Fenstern ausgestattet, die es erlauben, innermotorische Vorgänge im laufenden Motor zu untersuchen. Zu diesem Zweck kann entweder ein Serienmotor modifiziert, oder ein eigenständiger optisch zugänglicher Motor entwickelt werden; letzteres ist jedoch verbreiteter, da die Auslegung des Motors so weniger eingeschränkt ist. Im Zuge dessen werden die Motoren in der Regel als Einzylinder-Adaption von mehrzylindrigen Serienmotoren ausgeführt. Während im Optimalfall kein Einfluss auf das physikalische System des Verbrennungsmotors besteht, sind optisch zugängliche Motoren im Vergleich zum Serienmotor oft stark modifiziert und können daher nicht über den gesamten Last- und Drehzahlbereich betrieben werden. Die historische Entwicklung optisch zugänglicher Motoren ist in [57] zusammengefasst.

Es gibt verschiedene Arten von optischen Zugängen, die sich vor allem in ihrer Position und ihrer räumlichen Ausdehnung unterscheiden. Die Applikation von Lichtleitfasern erlaubt punktuelle Messungen und ist minimal-invasiv, liefert aber keine räumlich aufgelösten Informationen. Kleine Fenster (einige Millimeter) können beispielsweise in den Zylinderkopf, oder die Laufbahn eingebracht werden, um bildgebende Untersuchungen mit einem Endoskop durchzuführen [58] oder einen Laserstrahl in den Brennraum einzubringen [59]. Große Fenster (einige Zentimeter) ermöglichen je nach Position und Ausführung den Zugang zur Zylinderlaufbahn, dem Kolbenboden, oder dem Brennraum. Typische Materialien für die Fenster sind Quarzglas, das auch im UV gute Transmission bietet, oder Saphir, der sich durch eine im Vergleich höhere Wärmeleitfähigkeit und Härte auszeichnet, im UV aber nur begrenzt transmissiv ist.

Abbildung 2-12 zeigt einen Einzylindermotor mit optischen Zugängen im oberen Bereich der Zylinderlaufbahn und dem Kolbenboden [60]. Der optische Zugang aus Quarzglas im Kolbenboden ist durch einen „Bowditch-Kolben“ [61] realisiert. Der Kolben ist nach unten stark verlängert und verfügt über eine vertikale Aussparung, in die ein feststehender Umlenkspiegel im 45°-Winkel installiert ist. Über den Spiegel können der Brennraum und der Kolbenboden über den gesamten Motorzyklus beobachtet werden. Im Abstandsring im oberen Bereich der Zylinderlaufbahn befinden sich weitere optische Zugänge in Form von drei gewölbten Fenstern aus Quarzglas. Das Ringpaket des Kolbens ist im Vergleich zum Serienkolben abgesenkt, damit die Kolbenringe nicht über das Fenster gleiten. Als Konsequenz ergibt sich ein deutlich größeres Feuersteg-Volumen und geringeres Verdichtungsverhältnis. Statt herkömmlicher Kolbenringe werden selbstschmierende Ringe aus Polymerwerkstoffen eingesetzt, um einen nahezu ölfreien Betrieb der Kolbengruppe zu ermöglichen.

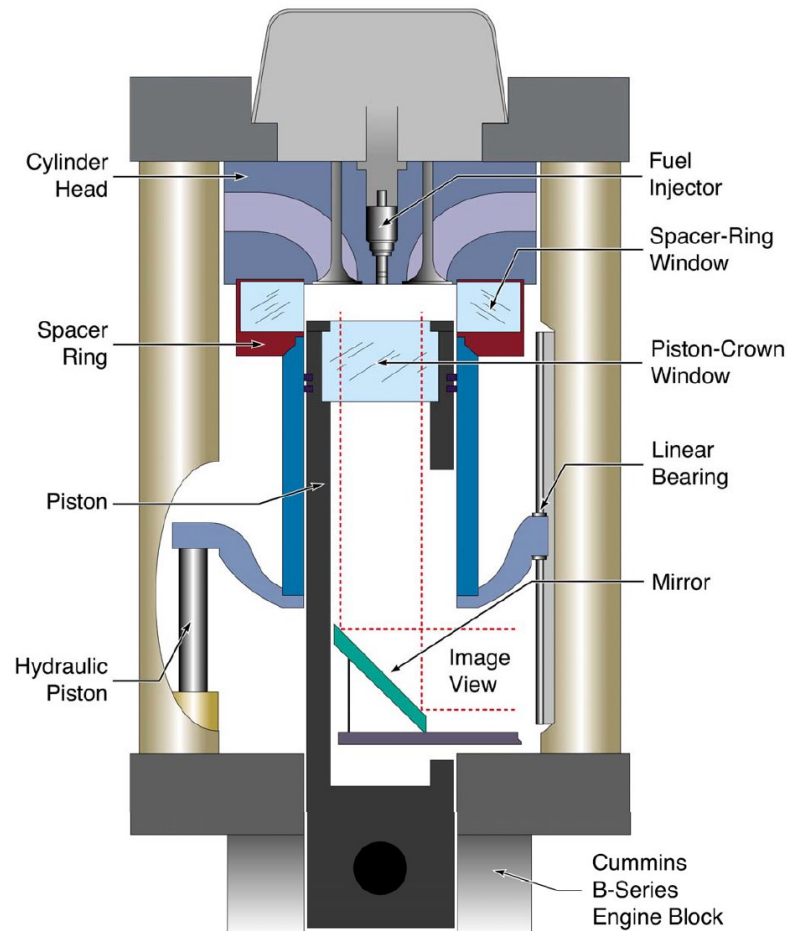


Abbildung 2-12: Schematischer Aufbau eines Motors mit optischem Zugang in der Zylinderlaufbahn und im Kolbenboden nach [60].

Der guten optischen Zugänglichkeit stehen aufgrund der Modifikationen des Motors diverse Abweichungen zum Serienmotor gegenüber. Polymer-Kolbenringe verursachen einen erhöhten Blowby-Strom und begrenzen zusammen mit der eingeschränkten Kühlung die maximale thermische Belastung des Motors, sodass diese Art optischer Motoren oft mit „Skip Firing“ betrieben werden muss. Dabei folgt auf eine begrenzte Anzahl befeuerter Zyklen eine Phase geschleppten Betriebs, um die Motorkomponenten abzukühlen zu lassen. Aufgrund des ölfreien Betriebes können Phänomene, die Öltransport oder Schmierfilmbildung betreffen, nicht untersucht werden. Eine Möglichkeit dafür stellt der Einsatz einer volltransparenten Zylinderlaufbahn dar. Diese Bauform bietet einen vollständigen optischen Zugang über den gesamten Kolbenhub, ist aber empfindlicher als andere Bauformen optisch zugänglicher Motoren und wird daher meist geschleppt betrieben.

Ein weiterer Ansatz für optische Zugänglichkeit für Motoren, die kontinuierlichen befeuerten Betrieb und Hochlast-Betriebspunkte ermöglichen, ist die Integration von langen Fenstern in die Zylinderlaufbahn. Erste Ansätze ermöglichten kontinuierlichen befeuerten Betrieb bei niedriger Teillast und 1500 min^{-1} für die Dauer von bis zu einer Stunde [62], wobei auch hier das Ringpaket abgesenkt wurde, um einen Kontakt zwischen Kolbenringen und Fenster zu verhindern. Am Massachusetts Institute of Technology (MIT) wurde in Kooperation mit der Groupe PSA (seit Januar 2021 Stellantis) ein optisch zugänglicher Motor mit einem länglichen Saphir-Fenster in der Zylinderlaufbahn entwickelt, der schematisch in Abbildung 2-13 dargestellt ist [26].

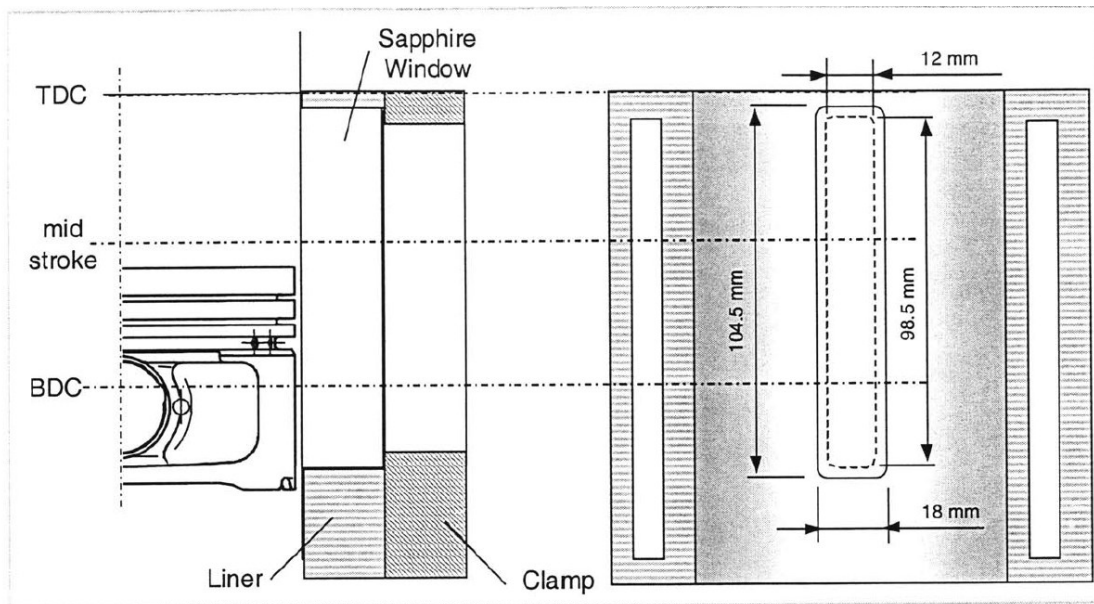


Abbildung 2-13: Abmessungen und Position eines Saphirfensters in der Zylinderlaufbahn eines optisch zugänglichen Motors nach [26]

Der Motor wurde für die Untersuchung von Öltransportphänomenen in der Kolbengruppe, insbesondere im Kolbenringpaket, entwickelt. Der Motor kann mit unmodifizierten Kolben und Kolbenringen betrieben werden und bietet so realitätsnahe Untersuchungsbedingungen. Im Zylinder ist ein umlaufender Kühlwassermantel eingebracht, durch den ein dauerhafter befeuerter Betrieb ermöglicht wird. Der große optische Zugang erlaubt die Beobachtung der Kolbengruppe über große Teile des Kolbenhubs (vgl. Abbildung 2-13 links). Da das Fenster Teil der Lauffläche ist und somit die Kolbenringe darüber gleiten, ist es im Verbund mit der Zylinderlaufbahn gehont, um bündig mit der metallischen Zylinderlaufbahn abzuschließen.

Der in dieser Arbeit verwendete optisch zugängliche Motor basiert auf den Arbeiten des MIT (vgl. Kapitel 4). Ähnliche Motoren werden unter anderem von Toyota [63], dem Imperial College London [64] und der technischen Universität München [65] eingesetzt. Neben den hier vorgestellten optisch zugänglichen Motoren existieren zahlreiche andere Konzepte, über die [46] einen ausführlichen Überblick (Stand 2014) gibt.

2.3.2 Nd:YAG und Nd:YLF Laser

Das Wort Laser ist ein Akronym, das für light amplification by stimulated emission of radiation (Lichtverstärkung durch stimulierte Emission von Strahlung) steht. Das Funktionsprinzip von Lasern basiert auf der wiederholten stimulierten Emission, die schematisch in Abbildung 2-14 dargestellt ist.

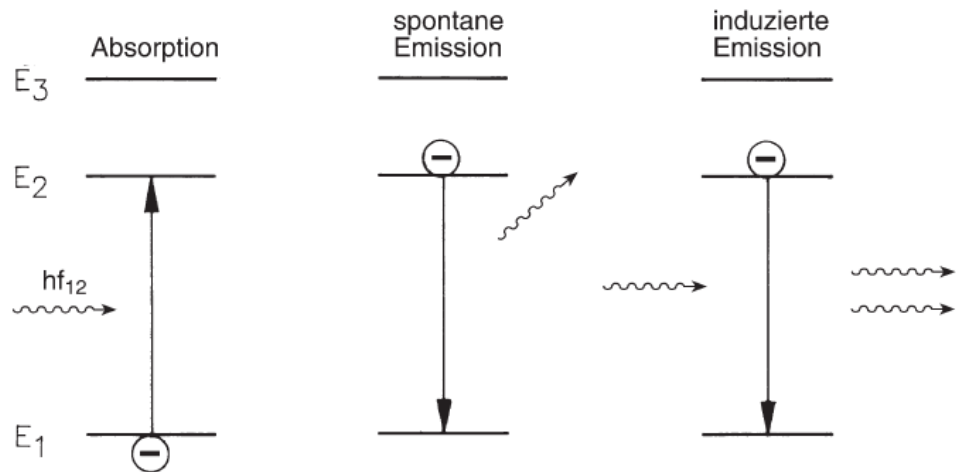


Abbildung 2-14: Schematisch Darstellung der Absorption, spontanen Emission und induzierten/stimulierten Emission von Licht nach [66].

Ein Atom oder Molekül, das sich in einem elektronisch angeregten Zustand E_2 befindet (hier durch Absorption eines Photons hf_{12}), kann durch spontane Emission ohne äußere Einwirkung ein Photon entsprechend der Energiedifferenz $E_2 - E_1$ emittieren, wobei die Richtung des emittierten Photons beliebig ist. Im Gegensatz dazu löst bei der stimulierten Emission ein einfallendes Photon den Übergang von E_2 nach E_1 und somit die Emission eines weiteren Photons aus. Dabei wird das dadurch emittierte Photon mit derselben Wellenlänge, Phase und Richtung wie das einfallende Photon emittiert. Dieser Mechanismus der „Photonenvervielfachung“ wird in einem Laser ausgenutzt. Der Grundaufbau eines Lasers ist in Abbildung 2-15 gezeigt. Er besteht aus einem aktiven Medium, einer Energiequelle (auch Pumpquelle) zur Anregung des aktiven Mediums sowie zwei Spiegeln, die den Resonator bilden. Die Pumpquelle führt dem aktiven Medium Energie zu und regt dessen Teilchen in einen energetisch höheren Zustand an. Befinden sich mehr Teilchen im angeregten als im Grundzustand, wird der Zustand als Besetzungsinversion bezeichnet. Aufgrund der Anordnung der Spiegel durchläuft Licht das aktive Medium immer wieder und wird dabei durch wiederholte stimulierte Emission verstärkt. Übersteigt die Verstärkung des Lichtes die Verluste innerhalb des Resonators, wird die sogenannte Laserschwelle überschritten und der Laser beginnt, Laserstrahlung durch den teildurchlässigen Spiegel zu emittieren.

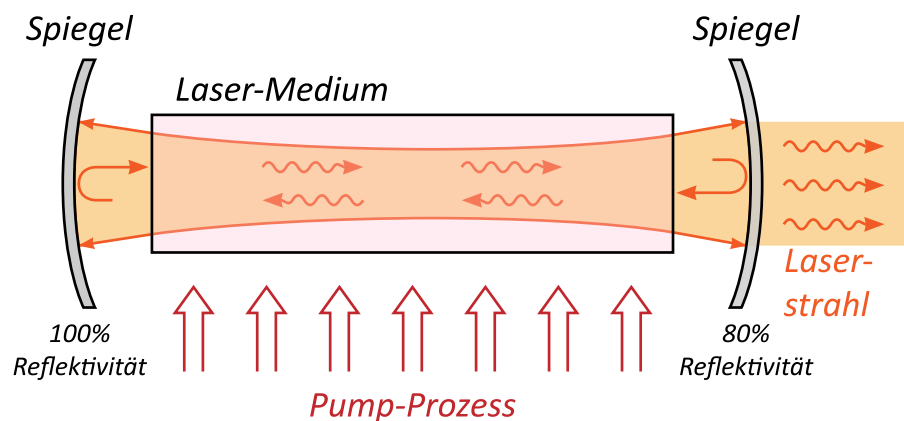


Abbildung 2-15: Schematischer Aufbau eines Lasers nach [67].

Laser zeichnen sich durch eine geringe Divergenz, eine geringe spektrale Linienbreite des emittierten Lichtes (Monochromasie), hohe erreichbare Lichtleistungen und kurze erreichbare Pulsdauern aus [66]. Laser werden typischerweise nach dem Aggregatzustand des aktiven Mediums und der Art der Pumpquelle klassifiziert.

Nd:YAG und Nd:YLF Laser gehören beide zu den Festkörperlasern. Vor allem der Nd:YAG Laser ist weit verbreitet ist und wird für die Bearbeitung von Werkstoffen und als Lichtquelle für laserbasierte Diagnostik eingesetzt. YAG und YLF stehen für das jeweilige Trägermaterial Yttrium-Aluminium-Granat ($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$) und Yttrium-Lithium-Fluorid (LiYF_4), das mit dem aktiven Medium Neodym (Nd^{3+}) dotiert wird. Nd:YAG Laser emittieren Licht bei 1064 nm [66] und Nd:YLF Laser bei 1047 oder 1054 nm [68]. Diese Ausgangswellenlängen können anschließend mithilfe von nichtlinearen optischen Kristallen durch Frequenzverdopplung oder Frequenzverdreifung in andere Wellenlängen ($1/2$ bzw. $1/3$ der ursprünglichen Wellenlänge) überführt werden. Auf diese Weise können beispielsweise für Nd:YAG Laser Emissionswellenlängen von 532 nm, 355 nm und 266 nm realisiert werden.

Oft wird ein Güteschalter (Q-Switch) im Laser eingesetzt, um kurze Laserpulse von etwa 10 ns Länge zu realisieren. Der Güteschalter ist ein optisches Bauteil, mit dem Verluste innerhalb des Resonators erhöht bzw. gesenkt werden können. Durch eine Erhöhung der Resonatorverluste kann eine hohe Besetzungsinversion im aktiven Material erreicht werden, ohne dass die Laserschwelle überschritten wird. Wird die Güte des Resonators dann durch Aktivieren des Güteschalters erhöht, baut sich die Besetzungsinversion schlagartig ab, und ein Laserpuls wird emittiert.

2.3.3 CMOS-Bildsensoren und Bildverstärker

CMOS-Bildsensoren

Ein Fotosensor ist ein optoelektronisches Bauteil mit der Funktion, auftreffendes Licht (Photonen) in ein elektrisches Signal (Elektronen) umzuwandeln. Fotosensoren nutzen halbleitende Materialien, die durch den photoelektrischen Effekt proportional zur Anzahl der auftreffenden Photonen freie Elektronen bilden. In den meisten CMOS-Kameras wird der Halbleiter Silizium verwendet, mit dem eine gute Sensitivität im sichtbaren Wellenlängenbereich realisiert werden kann. Ein CMOS-Bildsensor ist aus einer zweidimensionalen Anordnung von einzelnen Pixeln aufgebaut, die jeweils aus einem Fotosensor, einem Kondensator zum Zwischenspeichern der erzeugten Ladungen, einem Verstärkerelement und einem Schaltkreis zur Umwandlung der Ladungen in ein Spannungssignal sowie zum Zurücksetzen des Pixels bestehen [69]. Nach der Belichtung des Sensors wird für jedes Pixel abhängig von der lokalen Intensität des auftreffenden Lichts ein Signal erzeugt, das in „counts“ (engl. Zählheiten) angegeben wird. Das Signal ist aufgrund verschiedener Eigenschaften des Sensors rauschbehaftet:

- Dunkelstrom-Rauschen (dark-current noise): In den Pixeln bilden sich unabhängig von der Belichtung aufgrund von thermischen Effekten freie Elektronen. Dunkelstrom-Rauschen kann durch Kühlen des Sensors reduziert werden.
- Ausleserauschen (read-out noise): Rauschen, das bei der Umwandlung von erzeugten Ladungen zu einem Spannungssignal und dem Zurücksetzen des Pixels auftritt.

- Festmüsterrauschen (fixed pattern noise): Rauschen, das durch Unterschiede im Ansprechverhalten der einzelnen Pixel ausgelöst wird. Das Festmüsterrauschen setzt sich aus einem linearen Offset (dark signal non-uniformity; DSNU) und einem Signalabhängigen Unterschied durch Abweichungen des Verstärkungsfaktors (photo response non uniformity; PRNU) zusammen.

CMOS-Bildsensoren werden unter anderem in Hochgeschwindigkeits-Kameras eingesetzt. Das parallele Auslesen der Pixel erlaubt eine hohe Bildwiederholfrequenz, die zusätzlich gesteigert werden kann, indem nur ein Teilbereich des Sensors ausgelesen wird.

Die meisten Bildsensoren detektieren ein Signal, das proportional zu der Anzahl der auftreffenden Photonen, aber unabhängig von deren Wellenlänge ist. Zum Aufzeichnen von Farbinformationen wird daher typischerweise eine Anordnung von Farbfiltern (Farbfilterarray) auf den Sensor aufgebracht. Die gängigste Variante des Farbfilterarrays ist die Bayer-Matrix, die schematisch in Abbildung 2-16 dargestellt ist.

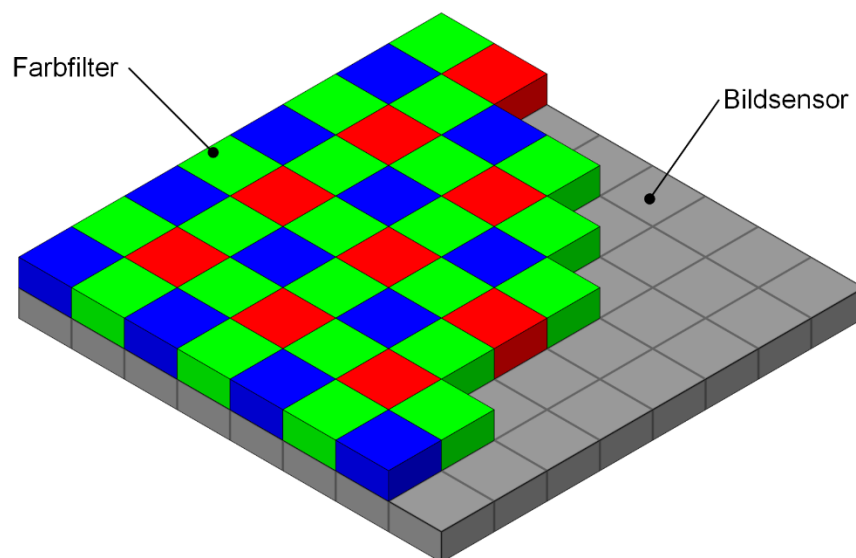


Abbildung 2-16: Aufbau der Bayer-Matrix nach [70].

Das Array besteht aus einem sich wiederholenden Muster aus Farbfiltern, die auf den einzelnen Bildpunkten des Sensors aufgebracht sind. Durch die Applikation des Farbfilterarrays unterscheiden sich die Pixel in ihrer Sensitivität (Quanteneffizienz, QE) in verschiedenen Wellenlängenbereichen. Die Kanäle des Farbfilters werden dabei nach dem Wellenlängenbereich des sichtbaren Lichtes benannt, in dem eine hohe Transmission besteht. Das Muster besteht aus vier Farbfiltern: zwei grüne, ein roter und ein blauer. Da jeder Bildpunkt nur in einem begrenzten Wellenlängenbereich sensitiv ist, werden die Farbwerte für die umliegenden Bildpunkte mithilfe eines geeigneten Algorithmus interpoliert.

Bildverstärker

Bildverstärker sind optoelektronische Geräte, dessen primäre Funktion die Verstärkung von einfallendem Licht ist. Oft wird ein Bildverstärker mit einer Relaisoptik verbunden und dann auch als intensified relay optic (IRO) bezeichnet. Abbildung 2-17 zeigt schematisch den Aufbau eines Bildverstärkers [71].

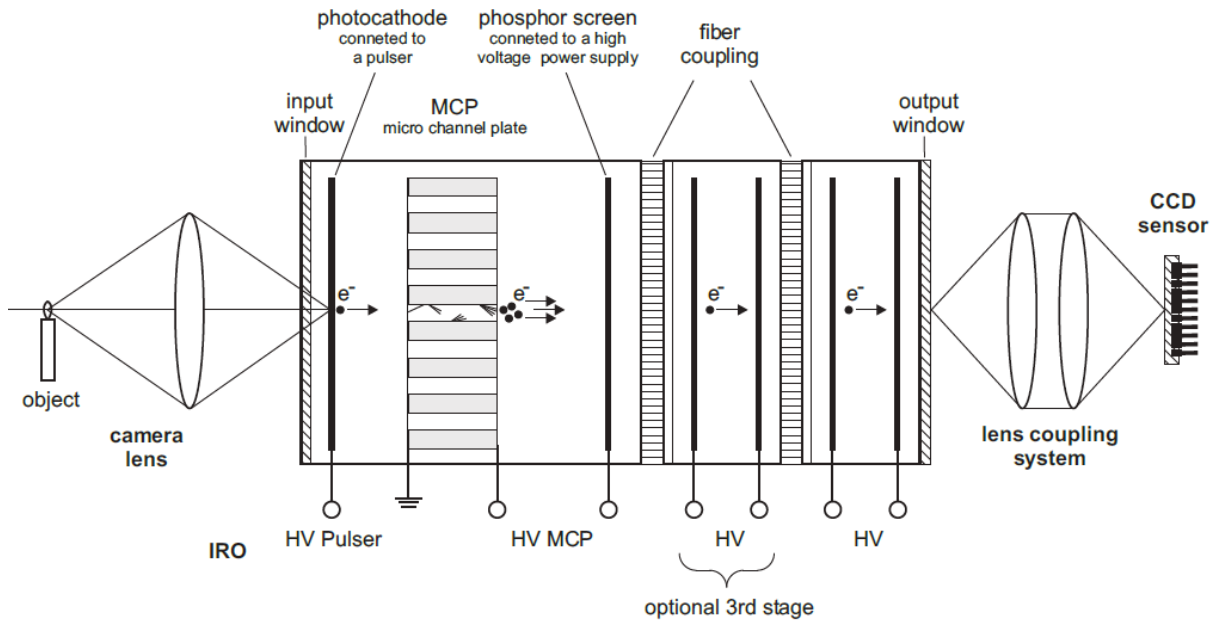


Abbildung 2-17: Schematischer Aufbau eines Bildverstärkers nach [71].

Einfallendes Licht fällt auf eine Photokathode, die das Licht mithilfe des photoelektrischen Effekts in Elektronen umwandelt. Die Elektronen durchlaufen anschließend eine Mikrokanalplatte (engl. microchannel plate; MCP), in der sie vervielfacht werden. Der Aufbau einer MCP ist schematisch in Abbildung 2-18 dargestellt. Zwischen der Eintritts- und Austrittsseite liegt eine Spannung an, durch die einfallende Elektronen beschleunigt werden. Trifft ein Elektron die Innenwand des Kanals, löst es Sekundärelektronen aus, die durch die anliegende Spannung ebenfalls beschleunigt werden und weitere Elektronen auslösen (siehe Abbildung 2-18 rechts). Die Kanäle der MCP sind leicht angestellt, um einen direkten Durchgang der Elektronen zu verhindern und wiederholte Kollisionen mit den Kanalinnenwänden zu provozieren. Nach der MCP treffen die Elektronen auf einen Phosphorschirm, durch den sie zurück in Photonen im sichtbaren Wellenlängenbereich, typischerweise bei 550 nm [71], umgewandelt werden.

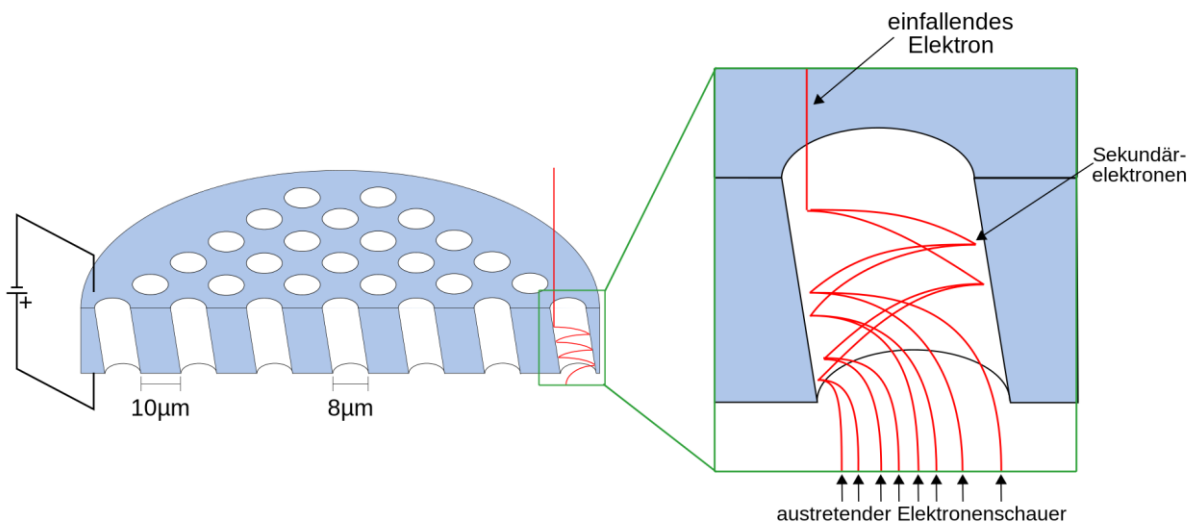


Abbildung 2-18: Links: Schematischer Aufbau einer Mikrokanalplatte. Rechts: Detailansicht eines Kanals nach [72].

Dieser Prozess kann optional durch weitere, nachgeschaltete Verstärkerstufen wiederholt werden. Am Ende des IRO ist ein Linsensystem angebracht, mit dem das verstärkte Licht auf den Bildsensor einer Kamera abgebildet wird. Die MCP-Spannung ist einstellbar, um den Verstärkungsfaktor (gain) des Bildverstärkers einstellen zu können.

Der Einsatz eines Bildverstärkers kann aus unterschiedlichen Gründen sinnvoll sein:

- Verstärkung einer schwachen Lichtquelle. Ist das erfasste Signal im Bereich des Kamera-Rauschens, kann ein Bildverstärker genutzt werden, um das Signal auf ein sinnvolles Niveau zu verstärken.
- Konvertieren von Licht aus dem UV- oder Infrarotbereich in das sichtbare Spektrum. CMOS-Kameras sind gewöhnlich in diesen Wellenlängenbereichen nicht sensitiv, die Photokathode eines Bildverstärkers hingegen schon.
- Verkürzen der Belichtungszeit. Herkömmliche CMOS-Kameras unterstützen Belichtungszeiten von einigen μs , während Bildverstärker eine Einschaltdauer (gate) von wenigen ns unterstützen.

Die Nachteile eines Bildverstärkers sind eine signifikante Verschlechterung der räumlichen Auflösung und zusätzliches Rauschen im Vergleich zu einer nicht verstärkten Kamera. Beide Nachteile sind beim Einsatz eines Hochgeschwindigkeits-IRO, der Aufnahmeraten von mehreren kHz unterstützt, noch ausgeprägter. Außerdem können sich auch baugleiche Geräte erheblich in ihrer charakteristischen Antwortfunktion unterscheiden [73].

3 Stand der Technik

Im Folgenden wird der aktuelle Stand der Forschung zur Visualisierung von innermotorischen Flüssigfilmen sowie der Flammenausbreitung in den Feuersteg des Kolbens diskutiert. Teile des Kapitels 3.1.1 wurden in [74] und Teile des Kapitels 3.1.2 in [75] veröffentlicht.

3.1 Visualisierung von innermotorischen Flüssigfilmen

3.1.1 Ölfilme

Die Kolbengruppe ist je nach Betriebspunkt für bis zu 50 % der auftretenden Reibverluste in Verbrennungsmotoren verantwortlich [76]. Gleichzeitig stammen bei niedrigen Motorlasten bis zu 90 % des Ölverbrauchs aus dem Ringfeld [77]. Die Reduktion von Ölverbrauch aus Emissionsgründen und die Reduktion von Reibverlusten stehen dabei oft im Konflikt miteinander [29, 78]. Für eine optimale Systemauslegung mit geringem Ölverbrauch bei gleichzeitig niedrigen Reibverlusten und Verschleiß ist ein detailliertes Verständnis der Öltransportvorgänge innerhalb des Ringfeldes notwendig. Erste bildgebende Untersuchungen von innermotorischen Ölfilmen wurden u.a. von Inagaki et al. [79] an einem Einzylindermotor mit seitlich eingebrachten Saphirfenstern durchgeführt. Die Autoren beleuchteten das Fenster planar mit einer Xenon-Blitzlampe, um das mit dem Tracer Coumarin-6 versetzte Motoröl zur Fluoreszenz anzuregen und diese mit einer CCD-Kamera aufzuzeichnen. Abbildung 3-1 zeigt beispielhafte Ergebnisse der Untersuchungen.

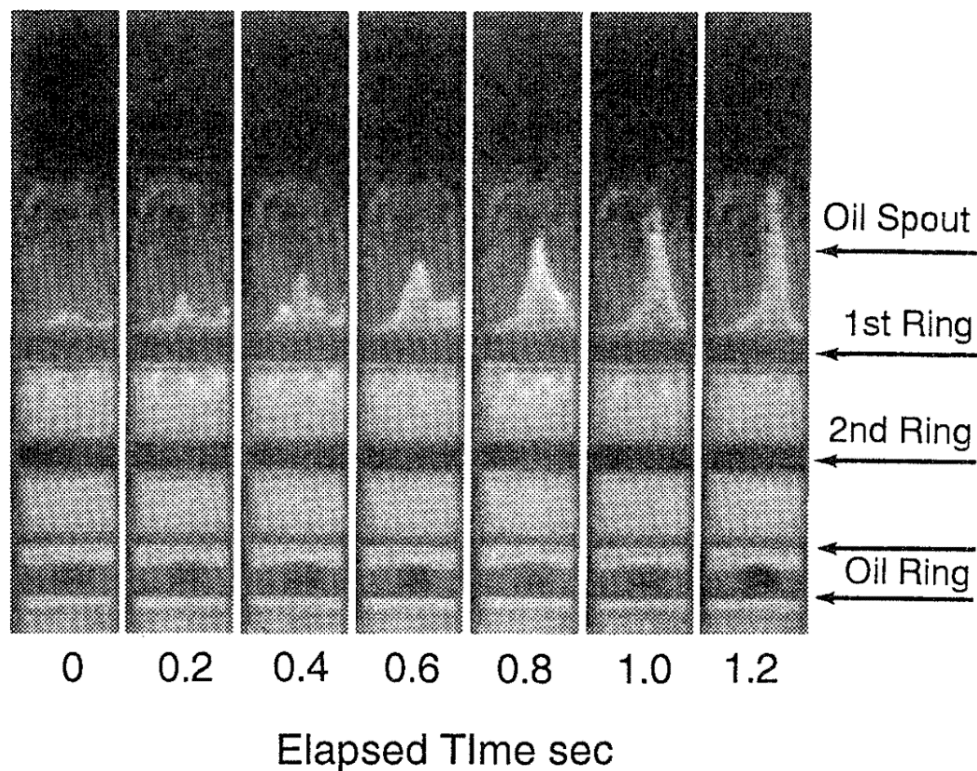


Abbildung 3-1: Zeitlicher Verlauf des Öltransports aus der ersten Ringnut anhand von Einzelaufnahmen 55 °KW nZOT nach [79].

Aufgrund der geringen Bildwiederholrate des optischen Systems wurden die Bilder bei einer festen Kurbelwinkelposition in zeitlich versetzten Motorzyklen aufgezeichnet. Die hier gezeigten Aufnahmen wurden im geschleppten Betrieb 55 °KW nZOT und einer Drehzahl von 1600 min⁻¹ aufgezeichnet. Im zeitlichen Verlauf ist anhand des Bereiches hoher LIF-Intensität („Oil Spout“) ein Transport von Schmieröl aus der ersten Ringnut auf den Feuersteg in Richtung Brennraum zu erkennen.

Thirouard et al. [22, 23, 26, 80] adaptierten das Messprinzip auf einem optisch zugänglichen Einzylindermotor ähnlicher Bauart. Sie setzten einen Nd:YAG Laser mit einer Pulsfrequenz von 20 Hz als Lichtquelle und eine CCD-Kamera zur Detektion ein. Als Fluoreszenzfarbstoff wurde eine Mischung aus Rhodamin 640 und Pyrromethen 567 eingesetzt. Die Messtechnik wurde 2016 von Zanghi et al. [81] durch die Verwendung einer Hochgeschwindigkeit-CMOS-Kamera und eines Hochgeschwindigkeits-Nd:YAG Lasers weiterentwickelt, um Aufnahmen mit einer zeitlichen Auflösung einzelner °KW zu ermöglichen. Die erhöhte zeitliche Auflösung erlaubte es, auch irreguläre, schnell ablaufende Öltransportphänomene zu visualisieren, wie beispielsweise in Abbildung 3-2 dargestellt. Hier gezeigt ist ein vergrößerter Ausschnitt um den Ölabbstreifring in zwei aufeinanderfolgenden Aufnahmen. Im rot markierten Bereich bildet sich aufgrund einer ausgeprägten Blowby-Strömung ein wellenförmiges Muster im Ölfilm aus, während er von der Gasströmung transportiert wird.

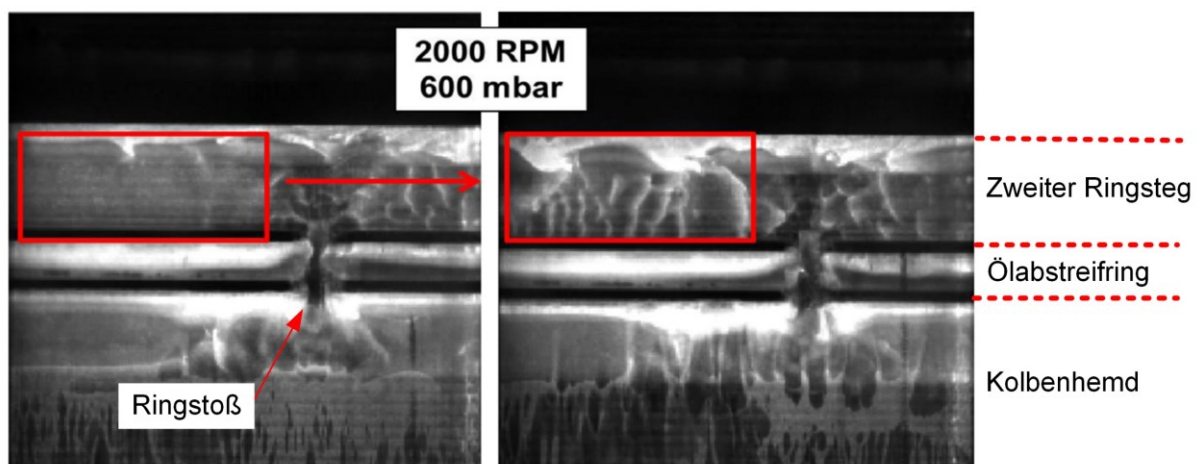


Abbildung 3-2: Ausbildung wellenförmiger Ölfilme im zweiten Ringsteg durch Blowby nach [81].

Hinsichtlich des Ölhaushalts der Kolbengruppe ist vor allem der Ölabbstreifring entscheidend [82]. Er reguliert das Ölangebot auf der Zylinderwand und streift während des Abwärtshubes überschüssiges Öl ab. Dieses abgestreifte Öl sammelt sich in einem Reservoir unterhalb des Ölabbstreifringes, das nach oben durch das untere Rail des Ölabbstreifringes und nach unten durch eine Nut im Kolben begrenzt ist. Öltransportphänomene mit dem Fokus auf den Ölabbstreifring, die dritte Ringnut, oder den zweiten Ringsteg sind mit Hilfe von LIF [21, 81, 83, 84] oder Simulationsmodellen [20, 82, 85, 86] untersucht worden.

Puthiya Veetil et. al [87] bestimmten mithilfe von CFD-Simulationen den Ölverbrauch und den Blowby-Volumenstrom im Ringfeld zwischen dem Feuersteg und der Unterkante des Ölabbstreifringes. Die Ölnut wurde zwar in einzelnen Untersuchungen als Reservoir für abgestreiftes Öl und als Ursprung von unerwünschtem Öltransport in den zweiten Ringsteg angesehen [88], ist aber bisher kaum hinsichtlich ihres Füllstandes oder der Strömung von Öl im Inneren untersucht worden.

Baelden [89] entwickelte ein Multi-Skalen-Modell [90] für die Kolbenringdynamik und den Öltransport mit Fokus auf dem Ölabbstreifring und seiner Ringnut. Sie schloss die Ölnut im Modell ein und untersuchte den Einfluss verschiedener Ölnut-Volumina auf den Ölvolumenstrom aus der Ölnut in die dritte Ringnut. Sie ordnete dem Nut-Volumen in ihren Untersuchungen einen höheren Einfluss auf den Öl-Volumenstrom zu als der Ringvorspannung und der Motordrehzahl. Mithilfe von separat durchgeführten LIF-Aufnahmen, die in Abbildung 3-3 gezeigt sind, beschrieb sie die Ölverteilung in der Nut als dynamisch und die Art der Strömungsvorgänge als komplex; im Modell selbst wurde jedoch nur der Füllstand von Öl in der Ölnut als Eingangsgröße berücksichtigt.

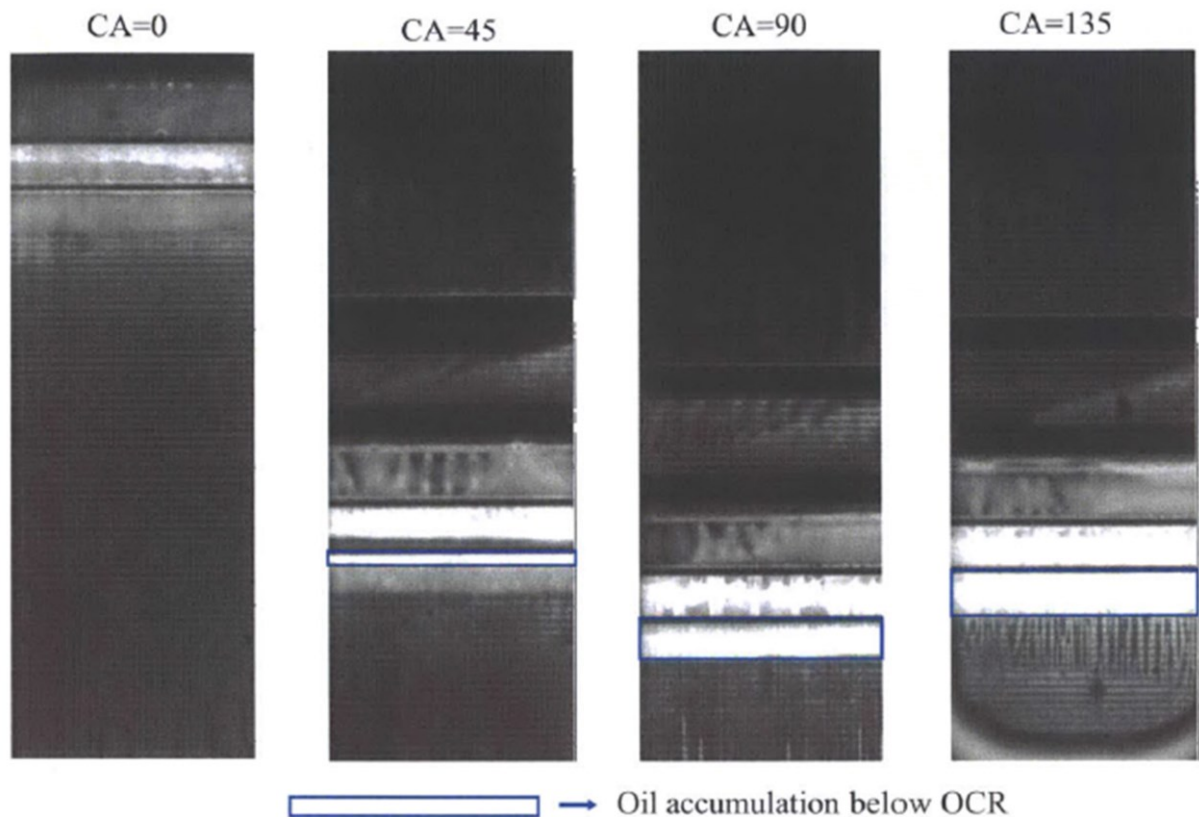


Abbildung 3-3: LIF-Aufnahmen der Ölverteilung im Ansaughub (0° KW entsprechen hier dem LWOT) nach [89].

In einer aktuellen Studie des MIT [91] wurde eine CFD-Simulation, gestützt durch Beobachtungen aus LIF-Aufnahmen, verwendet, um die Verteilung und Dynamik des Öls in der Ölringnut zu untersuchen. Diese Arbeit ist den Untersuchungen, auf denen Kapitel 5 dieser Arbeit basiert, sehr ähnlich und wurde tatsächlich zur gleichen Zeit durchgeführt, angeregt durch Projekttreffen, bei denen vorläufige Daten ausgetauscht wurden. Die Ergebnisse aus [91] werden in Kapitel 5 diskutiert.

Im Vergleich zu planaren LIF Aufnahmen, die Sichtlinien-integrierte Signalstärken und somit kaum Informationen in der Tiefenebene liefern, können geeignete Simulationsmodelle Informationen dreidimensional bereitzustellen. Besonders in größeren Mess-Volumina wie der Ölnut, in denen eine inhomogene Ölverteilung vorliegt, können Informationen zur räumlichen Verteilung des Ölfilms zum besseren Verständnis der stattfindenden Phänomene beitragen.

Während die meisten Arbeiten sich auf einen experimentelle oder simulativen Ansatz beschränken, wird in der vorliegenden Arbeit in Kapitel 5 ein kombinierter Ansatz aus LIF-Aufnahmen und einer CFD-

Simulation der Ölnut gewählt. Die experimentellen Daten werden verwendet, um die Simulation zu kalibrieren, mit der dann die Strömungsvorgänge in der Ölnut im Detail untersucht werden.

3.1.2 Kraftstofffilme

In modernen Ottomotoren wird der Kraftstoff fast ausschließlich direkt in den Brennraum eingespritzt. Auf diese Weise können der Wirkungsgrad und die Leistungsdichte des Motors erhöht werden, aber es besteht auch die Gefahr, dass der Kraftstoff auf die Brennraumwände auftrifft und diese benetzt. Kraftstofffilme auf dem Kolben und der Zylinderwand können hohe Emissionen von Partikeln und unverbrannten Kohlenwasserstoffen verursachen, wenn sie zum Zeitpunkt der Verbrennung nicht vollständig verdampft sind [7, 92-94] (vgl. Kapitel 2.1.2). Es ist zu erwarten, dass diese Problemstellungen in naher Zukunft aufgrund des weiteren Downsizings, der fortschreitenden Hybridisierung von Fahrzeugen und der sinkenden gesetzlichen Grenzwerte für die von Fahrzeugen emittierte Partikelzahl an Bedeutung gewinnen werden. Um optimale technische Lösungen zu finden, ist ein besseres Verständnis der Kraftstoffwandbenetzung und der Verdampfung von Kraftstofffilmen in Motoren erforderlich.

Die Kraftstoffwandbenetzung der Zylinderwand kann indirekt durch die Messung des Kraftstoffgehalts im Motoröl ermittelt werden. Ein geeignetes Verfahren dafür ist Massenspektrometrie, die bereits an Vollmotorprüfständen angewendet wurde [95-97]. In ähnlicher Weise wurde auch Fourier-Transformations-Infrarot-Spektrometrie (FTIR) zur Bestimmung der Ölverdünnung im Kraftstoff eingesetzt [98, 99]. Diese Methoden haben jedoch eine verzögerte Systemantwort, da der Kraftstoff zunächst die Probenentnahmestelle, z.B. die Ölwanne, erreichen muss und sich ausreichend mit dem Schmieröl vermischen muss, bevor er präzise nachgewiesen werden kann. Für bestimmte Aufgaben, wie z.B. die Optimierung von Einspritzstrategien von Verbrennungsmotoren, ist es vorteilhaft, stattdessen die eigentlichen Kraftstofffilme auf der Brennraumwand zu erfassen.

Itoh et al. [33] nutzten Infrarotabsorption in einem Modellexperiment zur Quantifizierung der Dicke von Kraftstofffilmen, die sich auf einer Saphirplatte bei unterschiedlichen Einspritzdrücken und Umgebungstemperaturen bilden. Kraftstofffilmdicken wurden auch mithilfe von „Refractive Index Matching“ (RIM) in Modellexperimenten [32, 100, 101] und in optisch zugänglichen Motoren [7, 102] bestimmt. Die Messtechnik basiert darauf, dass Licht auf einer rauen Oberfläche je nach Grad der Kraftstoffbenetzung weniger stark reflektiert wird als auf einer trockenen Oberfläche. Während mit der Methode sehr dünne Filme (im Submikrometerbereich) präzise bestimmt werden können, wird die maximal nachweisbare Filmdicke durch die Oberflächenrauigkeit begrenzt. Maligne und Bruneaux [103] verglichen RIM qualitativ mit der Visualisierung durch LIF und stellten eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse der beiden Verfahren fest. Mit LIF können dickere Kraftstofffilme visualisiert werden, jedoch ist die Messtechnik invasiver, da dem Kraftstoff in der Regel ein fluoreszierender Tracer zugegeben werden muss.

Nach ersten Arbeiten zur Visualisierung von Kraftstofffilmen durch LIF im Saugrohr von Motoren mit Kanaleinspritzung (KE) [104, 105] wurden Untersuchungen in optisch zugänglichen Motoren mit Direkteinspritzung durchgeführt, um Kraftstofffilme auf dem Kolben [9, 106, 107] und auf der Zylinderwand [108-110] zu visualisieren. Quantitative Ansätze sind im Inneren des Zylinders schwieriger

anzuwenden als im Saugrohr oder in Modellexperimenten. Dies ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass die Fluoreszenzeigenschaften des flüssigen Kraftstoffs durch die Filmtemperatur [109] und indirekt durch den Umgebungsdruck [9] aufgrund des sich im Kraftstoff lösenden Sauerstoffs beeinflusst werden können. Außerdem ist die Unterscheidung des Fluoreszenzsignals aus der Flüssig- und der Gasphase unter Umständen ein Problem [107]. Der Kraftstofffilm auf einer transparenten Oberfläche kann durch Totalreflexion zur Fluoreszenz angeregt werden, um nur das LIF-Signal aus der Flüssigphase zu detektieren [108, 111], jedoch sind die für Totalreflexion erforderlichen Strahlenwinkel und eine gute Ausleuchtung des Messvolumens angesichts des eingeschränkten optischen Zugangs in Motoren nur schwer zu realisieren.

Es gibt verschiedene Ansätze zur Quantifizierung der Kraftstofffilmdicke anhand des detektieren LIF-Signals. Schulz et al. [112] verglichen drei verschiedene Methoden zur Quantifizierung von flüssigen Kraftstofffilmen in einer Druckkammer. Die gängigste Methode ist die Messung des Signals, das von bekannten Schichtdicken mit der gleichen Kombination aus Kraftstoff und Tracer erzeugt wird, die auch im Experiment zum Einsatz kommt. Um Kraftstofffilme bekannter Schichtdicke zu erzeugen, können z.B. Präzisionsfolien zwischen zwei Platten gelegt werden, und der Spalt zwischen den Platten wird anschließend mit dem Kraftstoff/Tracer-Gemisch befüllt [31, 107, 113]. Schulz et al. stellten die unterschiedlichen Schichtdicken zwischen zwei Quarzplatten mithilfe einer Mikrometerschraube ein. Zum Einsatz kam Iso-Oktan als Kraftstoff, dem 12 Vol.-% 3-Pentanon als Tracer zugesetzt wurden. Die Anregung erfolgte durch einen Nd:YAG Laser mit einer Wiederholrate von 10 Hz bei einer Wellenlänge von 266 nm. In [114] wurde die entwickelte Messtechnik zur systematischen Untersuchung von Kraftstoffwandfilmen in einer Druckkammer eingesetzt. Abbildung 3-4 zeigt beispielhaft Ergebnisse der Arbeit. Hier dargestellt ist der Flüssigfilm, der sich auf einer in 50 mm Abstand zum Injektor befindlichen Quarzplatte durch Auftreffen eines der sechs Kraftstoffstrahlen eines Magnetventils bildet. Es wurden Kraftstofffilmdicken bis maximal 60 μm detektiert. Eine Erhöhung des Einspritzdrucks verursachte eine Abnahme der Filmdicken. In den Versuchen führte eine Erhöhung des Umgebungsdrucks von 1 auf 3 bar zu einer leichten Erhöhung der resultierenden Filmdicken, eine weitere Erhöhung auf 6 bar hingegen zu einer Abnahme der Filmdicken. Durch eine Erhöhung der Temperatur innerhalb der Druckkammer (nicht dargestellt) nahm die Kraftstofffilmdicke deutlich ab.

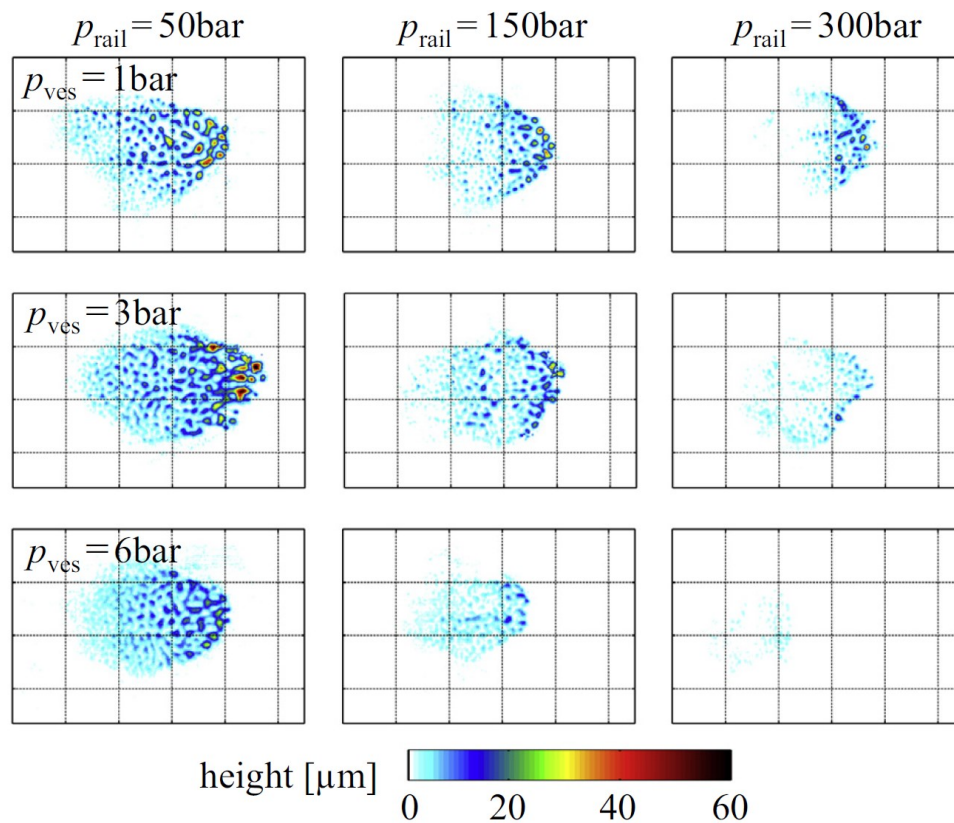


Abbildung 3-4: Kraftstofffilmdicken in einer Druckkammer 5 ms nach Einspritzbeginn für verschiedene Einspritzdrücken und Umgebungsdrücken bei 80 °C Umgebungstemperatur nach [114].

Geiler [31] quantifizierte in einem Einzylindermotor mit transparentem Kolbenboden und einem Quarzring in der Zylinderlaufbahn die Kraftstoffwandfilme auf dem Kolben. Er setzte eine Kombination aus iso-Oktan und 1 Vol.-% Toluol ein, die durch einen Nd:YAG Laser bei 266 nm mit einer Wiederholrate von 10 Hz angeregt wurde. Die Fluoreszenz wurde simultan in zwei Wellenlängenbereichen detektiert, wodurch gleichzeitig die Wandfilmtemperatur bestimmt werden konnte. Der Motor wurde bei Drehzahlen zwischen 600 und 2000 min^{-1} geschleppt betrieben. Variiert wurden unter anderem die Motortemperatur, der Einspritzdruck, die Einspritzmenge und die Drosselklappenstellung.

Jüngst et al. [113] nutzten einen optisch zugänglichen Strömungskanal aus Quarzglas, um die Benetzung der Zylinderwand mit Kraftstoff zu simulieren. Ein Mehrlochventil spritzte Kraftstoff auf eine gegenüberliegende Quarzplatte im Abstand von 55 mm und eine Zündkerze entzündete anschließend das Kraftstoff-Luft-Gemisch. Der Strömungskanal wurde dabei konstant mit temperierter Luft durchströmt. Zum Einsatz kamen verschiedene Messtechniken:

- LIF (266 nm) zur Visualisierung des gasförmigen Kraftstoffes.
- Laserinduzierte Inkandescenz (1064 nm) zur Visualisierung von Ruß in der Verbrennung.
- Schlieren-Fotografie zur Visualisierung von Kraftstoffverdampfung und Flammenausbreitung, sowie bildgebende Erfassung des Flammeneigenleuchtens.
- LIF (266 nm) zur Quantifizierung der Kraftstofffilmdicke auf der Wand.

Zur Quantifizierung der Kraftstofffilmdicke wurde eine Kombination aus Iso-Oktan und 1 Vol.-% Toluol eingesetzt. Abbildung 3-5 zeigt einen zeitlichen Verlauf eines verdampfenden Kraftstofffilms. In der oberen Reihe sind Ensemble-gemittelte Aufnahmen, in der unteren Reihe Einzelaufnahmen dargestellt. Aufgrund der zeitlich begrenzten Wiederholrate des optischen Systems konnte für jeden Einspritzvorgang nur eine Aufnahme durchgeführt werden. In den gezeigten Versuchen wurde die Verbrennung zeitgleich mit der ersten Aufnahme 3 ms nSOI eingeleitet.

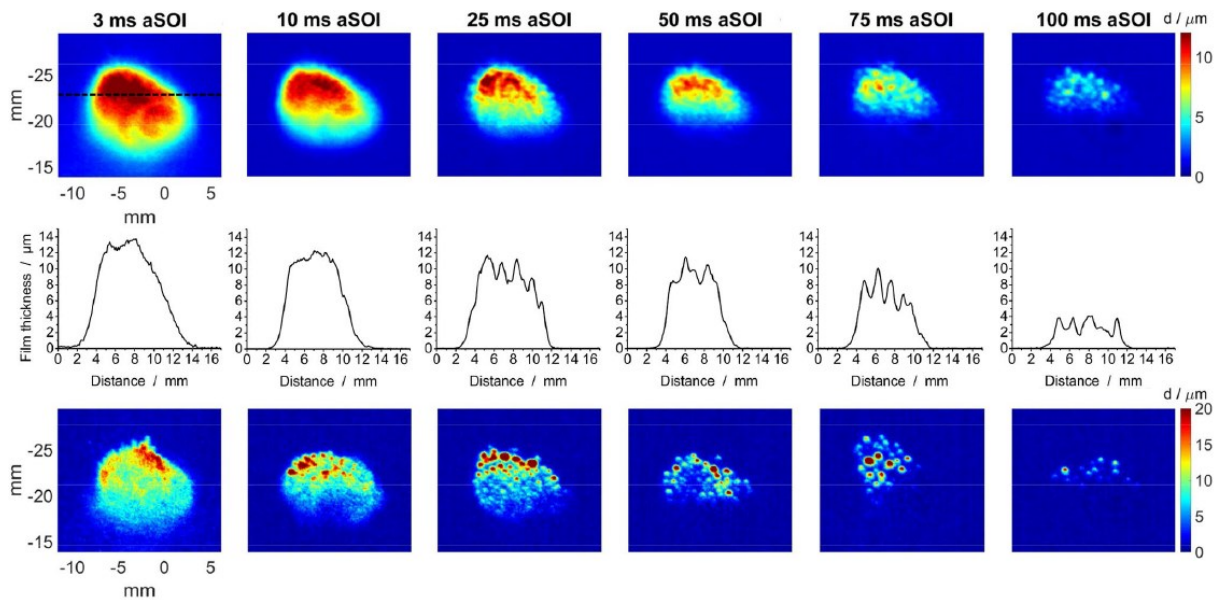


Abbildung 3-5: Zeitlicher Verlauf von Kraftstofffilmdicken im Strömungskanal: (oben) Ensemble-gemittelte Aufnahmen der Kraftstofffilmdicke. (Mitte) Kraftstofffilmdicke entlang der gestrichelten Linie. (unten) Einzelaufnahmen der Kraftstofffilmdicke nach [113].

Zum Zeitpunkt der Zündung (3 ms nSOI) werden im Einzelschuss maximale Kraftstofffilmdicken von 20 μm ermittelt. Der Kraftstofffilm verdampft über den betrachteten Zeitraum kontinuierlich, wobei sowohl die Filmdicke, als auch die räumliche Ausdehnung des Kraftstofffilms abnimmt. Die Einzelaufnahmen (unten) zeigen ein „Zusammenziehen“ des Kraftstofffilms, wodurch sich lokal kleine, dicke Tröpfchen bilden, deren Filmdicke sogar geringfügig höher ist als die anfänglich detektierte maximale Filmdicke (75 ms nSOI vs. 3 ms nSOI). Der Kraftstofffilm ist 100 ms nach Einspritzbeginn fast vollständig verdampft.

In bisherigen LIF-Untersuchungen von flüssigen Kraftstofffilmen wurden meist bildgebende Systeme mit niedrigen Wiederholraten (in der Größenordnung von 10 Hz) verwendet [106, 113, 114]. In der Arbeitsgruppe des Autors wurde kürzlich durch Müller [24, 109] ein LIF-Messsystem mit einer kHz-Wiederholrate zur simultanen Visualisierung von flüssigen Kraftstoff- und Ölfilmen im optisch zugänglichen Einzylindermotor entwickelt. Ein Nd:YAG Laser wurde verwendet, um mithilfe von Frequenzverdopplung (532 nm) und -vervierfachung (266 nm) Öl- und Kraftstofffluoreszenz durch zwei CMOS-Kameras kurbelwinkelaufgelöst bildgebend zu erfassen. Die hohe Wiederholrate ermöglichte detaillierte Untersuchungen der Kraftstoffwandbenetzung und der Interaktion von Öl und Kraftstoff. In der Vergangenheit wurden in der Arbeitsgruppe außerdem bereits Ölfilme im Bereich des Kolbenhemds bildgebend quantifiziert [24, 25]. In Kapitel 6 wird die Weiterentwicklung des kHz-LIF-Messsystem beschrieben, um Kraftstofffilmdicken auf der Zylinderwand bildgebend zu ermitteln. Zu diesem Zweck

werden Inhomogenitäten im Laserprofil durch ein geeignetes Flachfeld korrigiert und eine Kalibrierprozedur entwickelt, mit deren Hilfe das LIF-Signal in eine Schichtdicke überführt werden kann.

3.2 Flammenausbreitung im Feuersteg

In der Kompression wird unverbranntes Kraftstoff-Luft-Gemisch in den Feuersteg gedrückt. Während der Verbrennung kann die Flamme in den Feuersteg eindringen, wenn sie nicht von den Wänden des engen Spaltes zwischen Zylinderwand und Feuersteg gelöscht wird. Die Flammenlöschung hängt dabei von der Spaltgeometrie, der Art des Kraftstoffes, dem Kraftstoff-Luft-Verhältnis, der Umgebungstemperatur und dem Druck ab [115]. Wird die Flamme gelöscht, kann der Feuersteg eine der Hauptquellen für die Emission von unverbrannten Kohlenwasserstoffen (UHC, engl. unburned hydrocarbons) sein [116]. Findet keine Flammenlöschung statt und die Flamme dringt in den Feuersteg ein, interagiert sie mit dem unverbrannten Gemisch und gegebenenfalls vorhandenem Schmieröl oder flüssigem Kraftstoff. Der Einfluss von Geometrie und Volumen des Feuerstegs auf die UHC-Emissionen wurde in zahlreichen Arbeiten untersucht [117-121]. Untersuchungen der eigentlichen Flammenausbreitung im Feuersteg finden sich in der Literatur weitaus seltener.

Ishizawa [115] entwickelte aus Modellversuchen eine empirische Gleichung zur Berechnung des minimalen Abstandes zwischen zwei Grenzflächen, ab dem Flammenlöschung auftritt. Der Abstand d_q (Quenchingabstand) in mm lässt sich mit einer empirischen, Kraftstoff-abhängigen Konstante K_1 , dem maximalen Umgebungsdruck p_{\max} in MPa und der Wandtemperatur T_w in K nach Gleichung (3.1) berechnen:

$$d_q = K_1 \cdot p_{\max}^{-0,9} T_w^{-0,5} \quad (3.1)$$

Saika und Korematsu [122] wiesen eine Flammenausbreitung im Feuersteg mithilfe von Ionisationselektroden, die durch das Innere des Kolbens in den Feuersteg eingelassen sind, nach. Die Versuche wurden bei einer Drehzahl von 2000 min^{-1} und Motorlasten zwischen 1,4 und 2,8 bar p_{me} und mit einem im Vergleich zu Serienkolben erhöhtem Feuersteg-Spiel durchgeführt. Sterlepper et al. [123] untersuchten später die Flammenausbreitung im Feuersteg bei einer Drehzahl von 2000 min^{-1} und einer Last von 2 bar p_{me} mithilfe mehrerer in die Zylinderlaufbahn eingebrachter Lichtleitfasern. Sie nutzten Kolben mit vergrößertem Feuersteg-Spiel und abgeschrägten Oberkante, da ohne diese Modifikationen kein Flammenleuchten im Feuersteg nachgewiesen werden konnte. Janas et. al. [124] untersuchten das Phänomen detaillierter durch bildgebende Hochgeschwindigkeitsaufnahmen in Kombination mit Large-Eddy Simulationen (LES). Die Versuche wurden in einem optisch zugänglichen Motor mit Quarzring und daher mit einem abgesenkten Ringpaket und vergrößertem radialen Feuersteg-Spiel durchgeführt. Es erfolgt keine konkrete Angabe zur Motorlast, diese ist jedoch mit Zylinderspitzenrücken von 18 bar im Bereich der niedrigen Teillast. Flammenleuchten wurde im sichtbaren Spektrum breitbandig durch eine CMOS-Kamera detektiert. Abbildung 3-6 a) zeigt eine Einzelaufnahme bei ZOT in Falschfarben über einer CAD-Darstellung der Motorgeometrie.

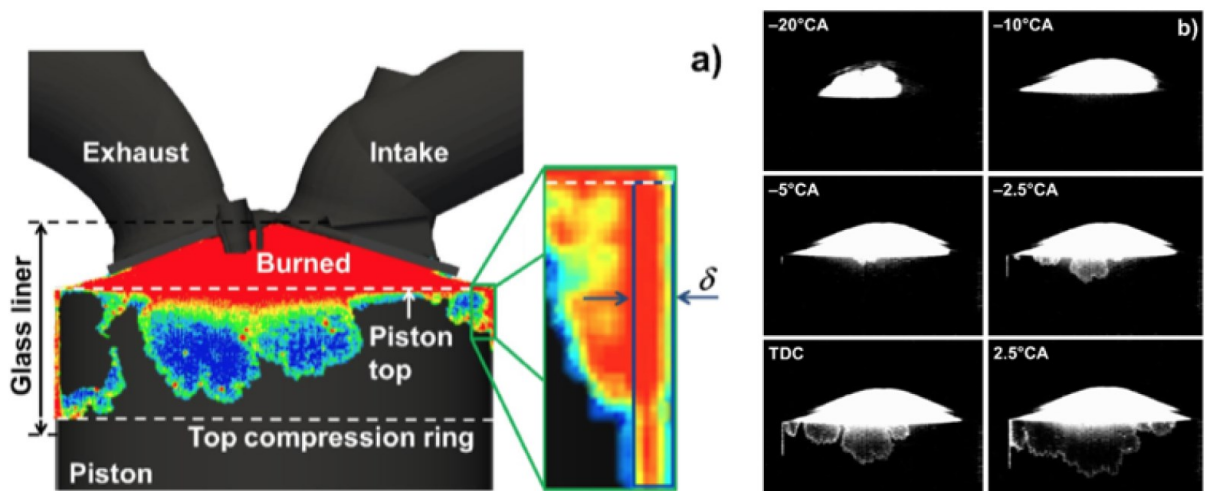


Abbildung 3-6: a): CAD-Rendering der Motorgeometrie, überlagert mit einer Einzelschussaufnahme der Flammenausbreitung in Falschfarbendarstellung am ZOT. b): Zeitlicher Verlauf der Flammenausbreitung im Feuersteg [124].

Abbildung 3-6 b) zeigt die Flammenausbreitung für ausgewählte Zeitpunkte innerhalb eines Motorzyklus. Der Übergang von der Kolbenoberkante zum hellen Brennraum ist in den Aufnahmen durch einen abrupten Signalanstieg in vertikaler Richtung zu erkennen. In der Darstellung ist der ZOT als 0° KW definiert, daher sind Kurbelwinkel während der Kompression negativ und während der Expansion positiv. Beginnend ab -5° KW wird Flammenleuchten im mittleren Bereich des sichtbaren Feuerstegs detektiert, wobei -2.5° KW und ab ZOT auch in den seitlichen Bereichen Flammenleuchten zu erkennen ist.

Aufgrund der Modifikationen am Kolben sind die Untersuchungen jedoch nicht vollständig repräsentativ für Serienmotoren. Die vorliegende Arbeit beschreibt in Kapitel 7 Untersuchungen des Phänomens in realitätsnahen Bedingungen. In einem optisch zugänglichen Motor, der die Geometrie des Serienmotors vollständig abbildet und hochlastfähig ist, wird die Flammenausbreitung im Feuersteg mit hoher zeitlicher Auflösung visualisiert.

4 Versuchsträger

Das für die Motorversuche verwendete optisch zugängliche Einzylinder-Forschungsaggregat wurde durch die Mercedes-Benz AG basierend auf der Arbeit von Thirouard et al. [22, 23, 26] entwickelt. Das Aggregat wurde bereits im Rahmen verschiedener Untersuchungen verwendet, die beispielsweise in [24, 125, 126] veröffentlicht sind. Nachfolgend werden das Einzylinderaggregat und die verwendeten optisch zugänglichen Zylinder vorgestellt.

4.1 Triebwerk und Prüfstandsperipherie

Die Kenndaten des Einzylindermotors stimmen mit denen des Mercedes 4-Zylindermotors M270/M274 DE20 überein und sind in Tabelle 4-1 aufgeführt.

Tabelle 4-1: Kenndaten des optisch zugänglichen Einzylindermotors

Merkmal	Einheit	Ausprägung
Hubraum	cm ³	498
Bohrung / Hub	mm	83 / 92
Kompressionsverhältnis	-	9,8:1
Maximale Drehzahl	min ⁻¹	6000
Maximale Last (p_{mi})	bar	10-28
Kraftstoffeinspritzung	-	Zentrale Direkteinspritzung / Saugrohreinspritzung
Schrägung (variabel)	mm	-12 bis 12

Das Forschungsaggregat wird als „LOTTE“ (**L**aser-**O**ptischer **T**ransparent **T**ribologie-**E**inzylindermotor) bezeichnet und ist in Abbildung 4-1 dargestellt.

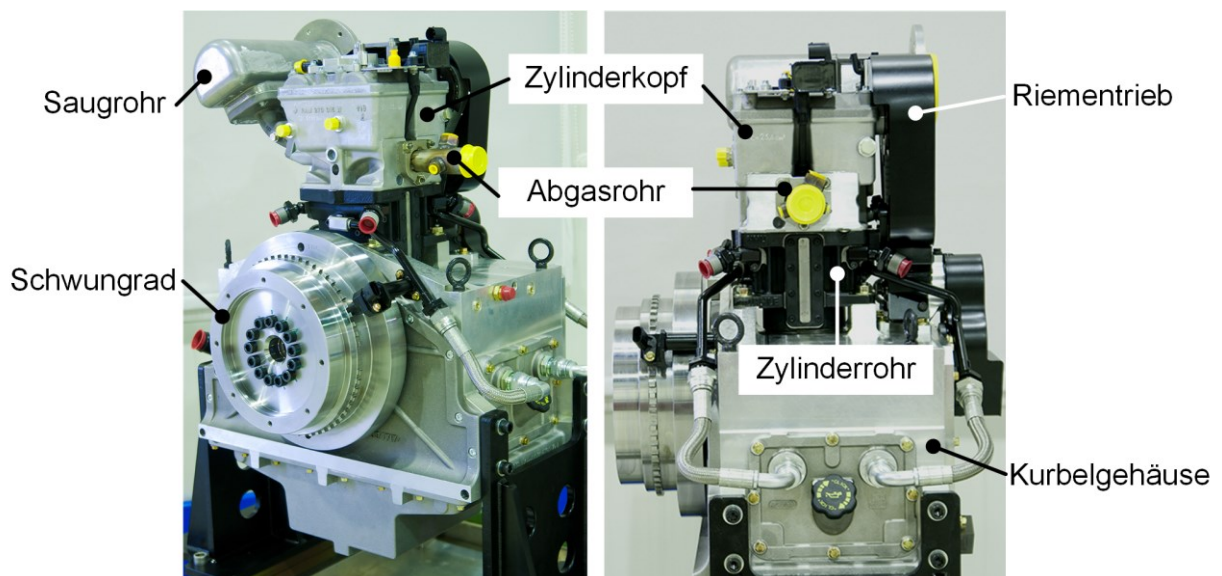


Abbildung 4-1: Einzylinder-Forschungsaggregat LOTTE: Ansicht auf die Abtriebsseite (links) und Druckseite (rechts).

Das Aggregat ist modular aufgebaut und erlaubt den Austausch des Zylinderrohrs. Durch Adapterplatten zwischen Zylinder und Kurbelgehäuse kann außerdem eine variable Schränkung in beide Richtungen der Achse Druckseite/Gegendruckseite eingestellt werden. Aufgrund des identischen Hubes und Bohrungsdurchmessers kann so neben dem M270/274 auch die 2-Liter Varianten der Nachfolge-Generationen M260/M264 und M250/M254 dargestellt werden. Die Brennraumgeometrie entspricht der des Vollmotors (Dachbrennraum, 4 Ventile). Im Gegensatz zum Vollmotor ist am Forschungsaggregat kein Nockenwellensteller verbaut; die Steuerzeiten sind also nicht variabel.

Das Aggregat ist abtriebseitig durch eine Kardanwelle mit einem drehzahlgeregelten Elektromotor verbunden, der den Verbrennungsmotor sowohl antreiben (geschleppter Betrieb), als auch abbremsen (befeuerter Betrieb) kann. Das auftretende Drehmoment wird dabei mithilfe eines Drehmomentsensors gemessen. Zum Ausgleich der bei Einzylindermotoren ausgeprägten Massenkräfte erster und zweiter Ordnung sind im Kurbelgehäuse vier Ausgleichswellen verbaut. Die optischen Zylinderrohre verfügen über Kanäle zur Wasserkühlung und Rückführung des Schmieröls aus dem Zylinderkopf. Kühlwasser und Schmieröl werden durch externe Konditionieranlagen mit einem Druck von 1 - 3,5 bar und einer Temperatur von 20 - 110 °C zugeführt, um verschiedene Betriebsbedingungen zu simulieren. Durch einen externen Verdichter können Druck und Temperatur der zugeführten Luft eingestellt werden, um auch aufgeladene Betriebspunkte darzustellen. Das Kurbelgehäuse ist mit vier schaltbaren Ölspritzdüsen an verschiedenen Positionen zur Kolbenbodenkühlung ausgestattet.

Kraftstoff wird von einer Diesel-Hochdruckpumpe, angetrieben durch einen Drehstrom-Asynchronmotor, bereitgestellt. Über einen Bypass mit Absteuerventil in der Kraftstoff-Rail kann der Kraftstoffdruck für den Direktinjektor auf 100-500 bar eingestellt werden. Rückgeführter Kraftstoff wird durch einen wassergekühlten Wärmetauscher auf einer Temperatur unter 30 °C gehalten. Der Kraftstoff kann durch einen zentral gelegenen Piezo- oder Magnetventil-Injektor direkt in den Brennraum und durch Nieder- oder Hochdruckinjektoren in das Saugrohr eingebracht werden. Die Applikation der Betriebspunkte erfolgt durch ein frei programmierbares Entwicklungssteuergerät (IAV FI2RE [127]). Das Gerät erlaubt bis zu 10 Einspritzungen pro Arbeitsspiel mit frei wählbarem Einspritzbeginn (engl. SOI: Start of Injection) und Zündzeitpunkt (ZZP). Eine Indiziermesstechnik misst kontinuierlich diverse Größen wie Zylinderdruck, evtl. auftretende Klopfeschwingungen, Verbrennungsluftverhältnis λ und Verbrennungsschwerpunkt Kurbelwinkel-aufgelöst, um die exakte Applikation von Betriebspunkten zu ermöglichen.

4.2 Optisch zugängliche Zylinder

Die optische Zugänglichkeit des Motors ist durch seitlich eingebrachte Saphirfenster im Zylinder realisiert. Durch die modulare Bauform des Forschungsaggregats können je nach Messaufgabe unterschiedliche Zylinderrohre verwendet werden, die sich in Anzahl, Größe und Position der optischen Zugänge unterscheiden. Im Rahmen dieser Arbeit wurden drei Zylinderrohre eingesetzt, die im Folgenden vorgestellt werden. Abbildung 4-2 zeigt Zylinder 1 im ausgebauten Zustand.

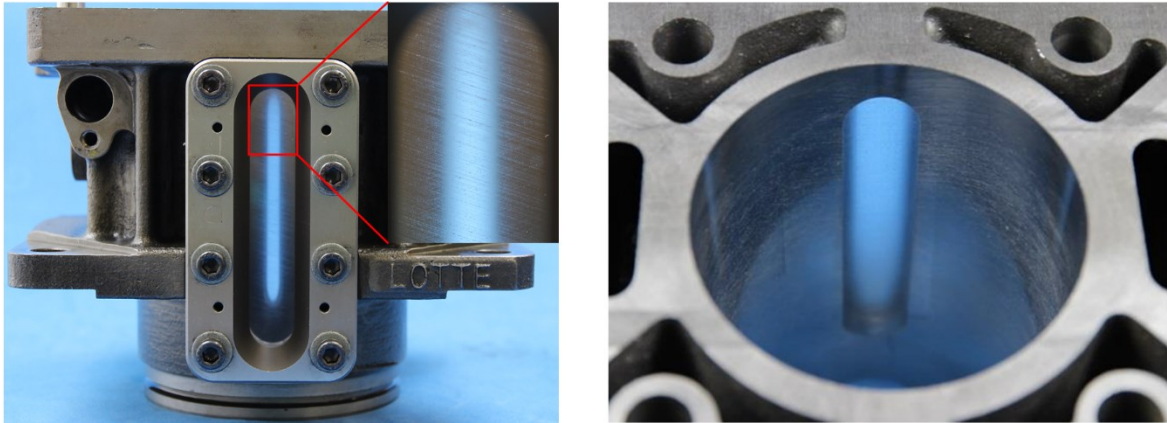


Abbildung 4-2: Zylinder 1 im ausgebauten Zustand. Links: Ansicht des optischen Zugangs auf der Druckseite mit Detailansicht des Kreuzschliff-Bildes des Fensters. Rechts: Innenansicht des optischen Zugangs.

Die Fenster werden vor Erreichen des Nenndurchmessers der Zylinderbohrung in das Zylinderrohr eingesetzt. Erst im Anschluss werden die Zylinderlauffläche und das Saphirfenster im Verbund bearbeitet und im letzten Prozessschritt gehont. Dadurch weisen sowohl die Zylinderlaufbahn als auch die Innenflächen der Fenster ein für Zylinderlaufbahnen charakteristische Kreuzschliff-Bild auf (siehe vergrößerte Ansicht in Abbildung 4-2 links). Die Zylinderrohre sind aus Grauguss gefertigt und unterscheiden sich daher im Vergleich zu den Saphir-Fenstern in der Wärmeausdehnung. Jeder Zylinder ist daher auf eine Betriebstemperatur ausgelegt, bei der ein kleinstmöglicher Übergang von den Kanten des Fensters zur Zylinderlauffläche vorherrscht. Zylinder 1 verfügt über je ein Fenster auf Druck- und Gegendruckseite des Zylinders. Die Fenster des Zylinders haben eine freie Apertur von 105 mm x 16 mm, wodurch sich der Kolben über den gesamten Hub im Sichtfeld befindet. Zylinder 1 erlaubt einen kontinuierlichen befeuerten Betrieb bei bis zu 14 bar p_{mi} .

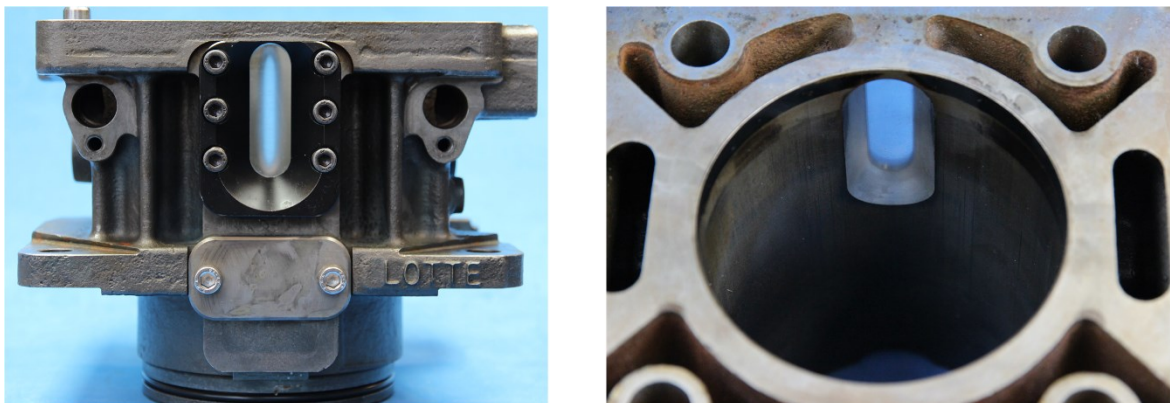


Abbildung 4-3: Zylinder 2 im ausgebauten Zustand. Links: Ansicht des optischen Zugangs auf der Druckseite. Rechts: Innenansicht des optischen Zugangs.

Der in Abbildung 4-3 gezeigte Zylinder 2 wurde für Untersuchungen bei hohen Motorlasten bis zu 27 bar p_{mi} konzipiert. Aufgrund der hohen mechanischen Belastung sind die Fenster im Vergleich zu Zylinder 1 mit einer sichtbaren Apertur von 49 mm x 16 mm kleiner ausgeführt. Die Fenster sind im oberen Bereich des Zylinders positioniert, um optischen Zugang zum oberen Kolbenbereich und dem Brennraum zum Zeitpunkt des Zylinderspitzendrucks zu ermöglichen. Durch die federbelastete Halterung wird ein Dichtring an die Außenkontur des Fensters gedrückt. Bei langen Phasen von aufgeladener Motorvollast können Kleinstmengen Öl durch den Spalt zwischen Fenster und Zylinder

gedrückt werden. Durch den Dichtring wird verhindert, dass diese in den sichtbaren Bereich des Fensters gelangen und die optische Qualität der Aufnahmen beeinträchtigen.

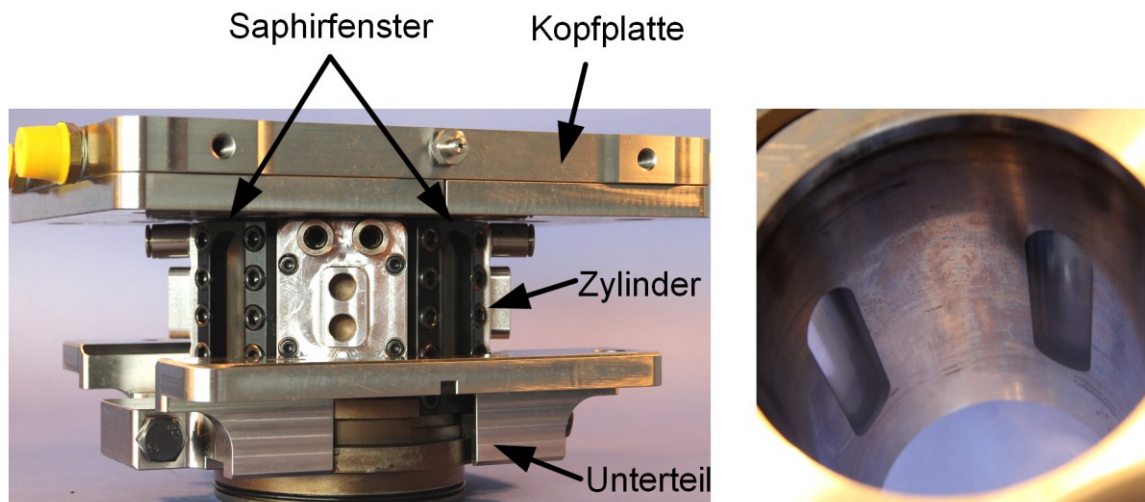


Abbildung 4-4: Zylinder 3 im ausgebauten Zustand. Links: Außenansicht mit Sicht auf zwei Saphirfenster. Rechts: Innenansicht der optischen Zugänge.

Abbildung 4-4 zeigt den Zylinder 3, dessen Design sich grundsätzlich von den zuvor gezeigten Zylinderrohren unterscheidet. Zylinder 3 verfügt über vier optische Zugänge, die jeweils im 90°-Winkel zueinander um den Umfang des Zylinderrohres verteilt eingebracht sind. Die Fenster bieten eine freie Apertur von 65 mm x 16 mm. Zylinder 3 ist im Gegensatz zu Zylinder 1 und 2 nicht als massives Bauteil ausgelegt, sondern ist aus drei separaten Teilen aufgebaut: Die Kopfplatte, die mit dem Zylinderkopf verbunden wird, das Unterteil, das die Verbindung zum Kurbelgehäuse darstellt und das eigentliche Zylinderrohr in der Mitte. Durch Klemmverschraubungen im Ober- und Unterteil wird eine kraftschlüssige Verbindung zwischen den Bauteilen hergestellt. Auf diese Weise kann das Zylinderrohr vor dem Einbau in das Einzylinder-Aggregat rotiert und die Ausrichtung der Fenster frei gewählt werden. Das Unterteil der Zylindereinheit ist an Druck und Gegendruckseite ausgespart, um den vollen optischen Zugang nutzen zu können. Auf Steuer- und Antriebsseite werden Teile des Sichtfelds verdeckt. Die komplexe, drehbare Konstruktion und die zusätzlichen Fenster schränken die Kühlleistung im Vergleich zu den anderen Zylindern ein, was die maximale Last auf 10 bar p_{mi} und die Dauer des befeuerten Betriebs auf etwa 5 Minuten bei maximaler Last begrenzt. Bei geringeren Lasten ist dementsprechend eine längere Betriebsdauer möglich. Der Zylinder wurde im Rahmen der Einführung von Mehrloch-Magnetventilen in die Mercedes-Motorgeneration M264 entwickelt, um Untersuchungen von Kraftstoff-Wandfilmen zu ermöglichen (siehe Kapitel 6).

Eine detaillierte Beschreibung der ausgewählten Werkstoffe, der Topographie und Rundheit der Zylinderlaufbahn sowie eines Festigkeitsnachweises der eingesetzten optischen Zylinder finden sich in [24] und [125].

5 Visualisierung und Simulation von Öltransportphänomenen in der Ölnot

In vorangegangenen Arbeiten von Wigger [125], Müller [24] sowie (der Masterarbeit) des Autors [25] wurde die Schmierölverteilung im Bereich des Kolbenhemdes im Detail untersucht und quantifiziert. Außerdem wurden verschiedene Öltransportvorgänge innerhalb der Kolbengruppe identifiziert. Auf Basis dieser Arbeiten werden in dem folgenden Kapitel die Öltransportvorgänge im oberen Kolbenhemdbereich, insbesondere innerhalb der Ölnot, durch einen kombinierten Ansatz aus Experiment und Simulation untersucht. Dazu wird mit einem Hochgeschwindigkeits-LIF System die Schmierölverteilung kurbelwinkelaufgelöst im optisch zugänglichen Einzylindermotor im geschleppten Motorbetrieb visualisiert. Der experimentelle Teil der Untersuchung wird mit Zylinder 1 (siehe Kapitel 4.2) durchgeführt. Zusätzlich soll eine dreidimensionale CFD-Simulation mithilfe der experimentellen Ergebnisse kalibriert werden, um zusätzliche Informationen aus den Querschnitten der Ölnot zu generieren. Die CFD-Simulationen wurden intern in der Mercedes-Benz AG durch Sebastian Schiefer durchgeführt. Die Ausführungen wurden teilweise in [74] veröffentlicht.

5.1 Versuchsaufbau

Zur Visualisierung der Schmierölverteilung in der Kolbengruppe wird dem Öl der Laserfarbstoff Pyromethen 567 (P567) in einer Konzentration von 0,01 mmol/Liter (3,2 mg/Liter) beigemischt. P567 hat sich aufgrund seiner hohen Quanteneffizienz und guten Temperaturstabilität als LIF-Farbstoff in Verbrennungsmotoren bewährt [22, 23, 26, 109, 128]. Als Schmieröl wird ein nicht-fluoreszierendes, gering-additiviertes Polyalphaolefin (PAO) verwendet. Prinzipiell kann das hier verwendete Messprinzip auch mit vollformuliertem Schmieröl angewendet werden, das Surrogat-Öl reduziert jedoch unerwünschte Fluoreszenz von Schmieröl bei Anwendung eines anderen Messaufbaus zur Visualisierung von Kraftstoff-Wandbenetzung (vgl. Kapitel 6). Um übermäßige Ausfallzeiten durch Reinigung der Ölkreisläufe zu vermeiden, wird im Motor ausschließlich PAO verwendet. Der optische Messaufbau ist in Abbildung 5-1 schematisch gezeigt.

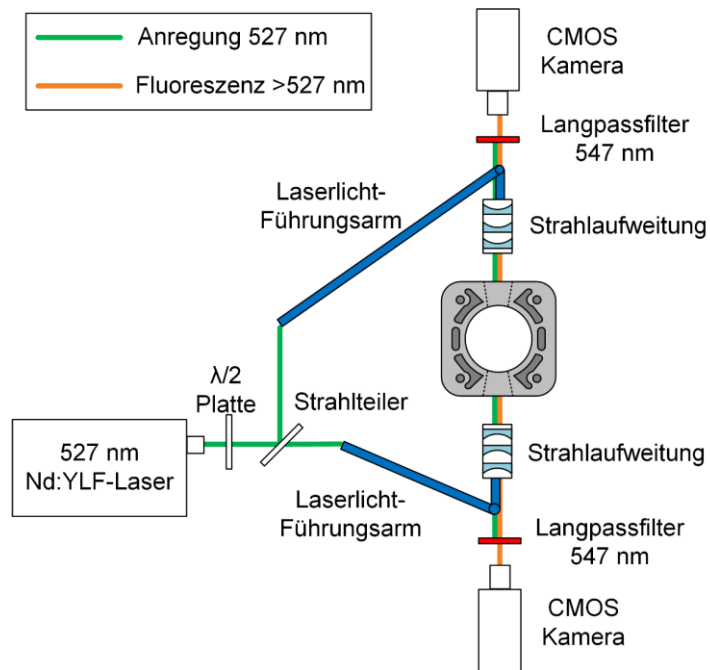


Abbildung 5-1: Optischer Aufbau des LIF-Messsystems.

Als Lichtquelle wird ein Dioden-gepumpter Nd:YLF Laser (Litron LDY 350) verwendet. Der Laser emittiert Licht bei einer Wellenlänge von 527 nm mit einer Pulslänge von 10 ns und einer maximalen Repetitionsrate von 20 kHz [129]. Eine „programmable timing unit“ (PTU, LaVision) löst den Laser und die Kameras mithilfe eines Drehwinkelgebers an der Kurbelwelle phasengekoppelt zum Motor aus. Im Experiment wird der Laser mit 5 kHz betrieben, was bei der gewählten Motordrehzahl von 1666 min^{-1} einem Bild pro 2° Kurbelwinkel (°KW) entspricht. Die Pulsenergie bei dieser Repetitionsrate beträgt 1,5 mJ. Das emittierte Licht wird mithilfe eines Strahlteilers in zwei Einzelstrahlen aufgeteilt, um DS und GDS des Motors simultan zu beleuchten. Das Verhältnis aus transmittiertem zu reflektiertem Licht des Strahlteilers hängt von der Polarisation des einfallenden Lichtes ab. Dieser Effekt wird mithilfe einer $\lambda/2$ -Platte genutzt, um durch die Variation der Licht-Polarisation eine gleichmäßige Aufteilung der Laserenergie auf die beiden Motor-Fenster zu erreichen. Die beiden Einzelstrahlen werden in jeweils einen „Laserlicht-Führungsarm“ (LaVision) eingekoppelt und zum Fenster umgeleitet. Am Ende jedes Laserlicht-Führungsarmes sind zwei zylindrische, plankonkave Linsen mit einer Brennweite von $f = -20$ mm und $f = -100$ mm sowie eine sphärische plankonkave Linse mit einer Brennweite von $f = -75$ mm angebracht, um den Laserstrahl auf die Größe des Fensters aufzuweiten. Die Fluoreszenz wird durch zwei monochromatische Hochgeschwindigkeits-CMOS-Kameras (Phantom v611) detektiert. Die Kameras bieten eine Digitalisierungstiefe von 12-bit und eine maximale Auflösung von 1280 x 800 Pixel, im Versuch werden davon 1072 x 232 Pixel ausgelesen. Die Kameras sind mit kommerziellen Objektiven mit einer festen Brennweite von 85 mm ausgerüstet (AF-Nikkor 1:1,8D), dessen Blenden auf $f/4$ eingestellt sind. Die projizierte Pixelgröße im Aufbau beträgt 106 x 106 $\mu\text{m}/\text{Pixel}$. Vor den Kameras sind Langpassfilter (Semrock BLP01-532R) mit einer Grenzwellenlänge von 547 nm angebracht, um eventuell gestreutes und reflektiertes Anregungslicht abzutrennen. Abbildung 5-2 zeigt die spektrale Auslegung des LIF-Messsystems. Die eingesetzten Filter blockieren effektiv das Anregungslicht, während das rotverschobene Fluoreszenzlicht des Farbstoffes größtenteils transmittiert wird und so von den Sensoren der CMOS-Kameras detektiert werden kann.

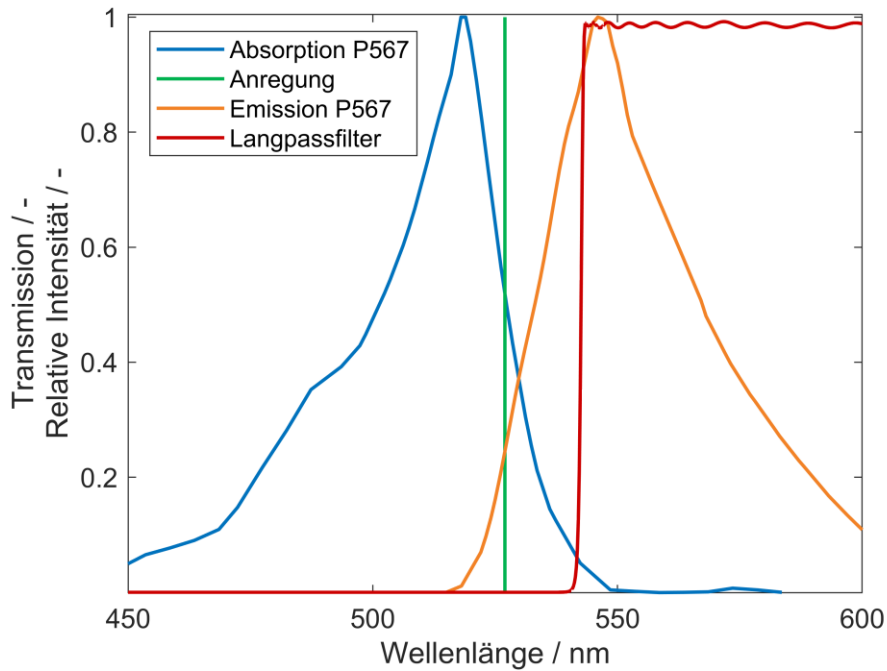


Abbildung 5-2: Spektrale Auslegung des LIF-Messsystems (Farbgebung analog zu Abbildung 5-1). Absorptions- und Emissionskurven von P567 aus [130]. Transmissionskurven des Langpassfilters aus [131].

Abbildung 5-3 zeigt eine Fotografie des Messaufbaus im Prüfstand. Neben den Kameras und den Laserlichtführungsarmen ist der optische Zugang auf der Druckseite zu sehen. Der Strahlengang von anregendem Laserlicht und detektiertem Fluoreszenzlicht ist analog zu Abbildung 5-2 in grün beziehungsweise orange angedeutet.

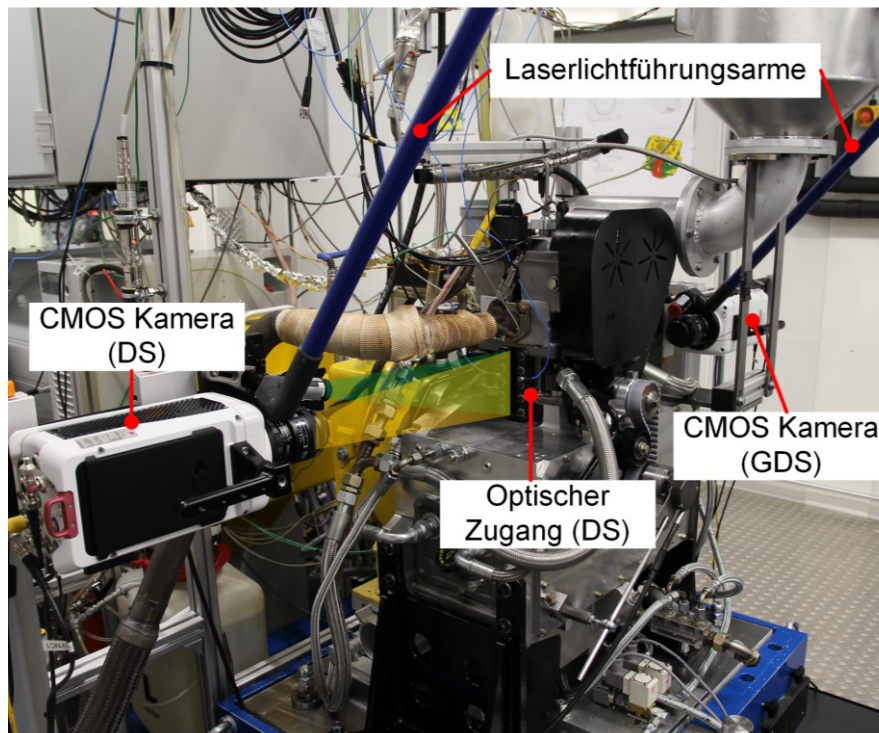


Abbildung 5-3: Messaufbau am Einzylindermotor. Farbgebung von Anregungs- und Fluoreszenzlicht analog zu Abbildung 5-1 bzw. Abbildung 5-2.

Abbildung 5-4 zeigt die sichtbaren Bereiche des Kolbens anhand einer beispielhaften LIF-Aufnahme der GDS 64 °KW nZOT. Die Aufnahme ist auf einer an das sichtbare Farbspektrum angelehnten Falschfarbenskala von Blau nach Rot gezeigt, bei der das detektierte Signal mit steigender Wellenlänge (in „Richtung rot“) ansteigt. Aufgrund der hohen Spannweite an auftretenden Ölfilmdicken im Kolbenbereich (wenige Mikrometer in Kontaktbereichen bis einige Millimeter in der Ölnot) ist die Aufnahme auf einer logarithmierten Skala gezeigt.

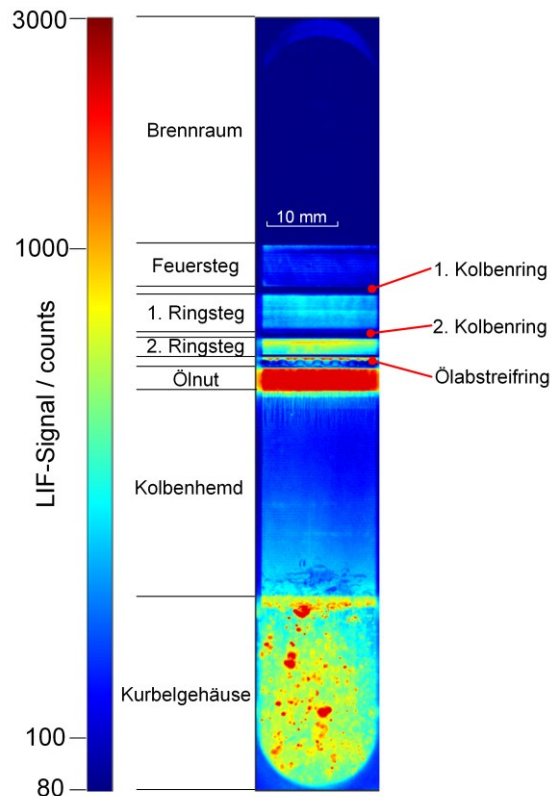


Abbildung 5-4: Sichtbare charakteristische Merkmale des Kolbens in einer LIF-Aufnahme auf der GDS.

Im Bereich des ersten und zweiten Kolbenringes wird typischerweise ein geringes LIF-Signal detektiert, da nur geringe Ölschichtdicken zwischen dem Ring und der Zylinderlaufbahn vorhanden sind. Im Bereich des Ölabstreifringes ist der Aufbau der Distanzfeder durch Ölsammlungen am oberen Ende des Ringes teilweise sichtbar. In der gezeigten Beispielaufnahme ist auch das LIF-Signal im Feuersteg niedrig und steigt sukzessive im zweiten und dritten Ringsteg sowie der Ölnot an. Das Kolbenhemd weist aufgrund eines geschlossenen Schmierfilmes flächig ein geringes LIF-Signal auf, da der Kolben zum Zeitpunkt der Aufnahme auf der hier gezeigten GDS anliegt. Gut erkennbar ist durch den Anstieg des Signals auf dem Kolbenhemd in Richtung Kurbelgehäuse außerdem, dass der Kolben leicht verkippt ist und primär am oberen Ende des Kolbenhemdes an der Zylinderlaufbahn anliegt.

5.1.1 Bildverarbeitung

Durch thermisch ausgelöste Elektronen im Sensormaterial der Kameras, dem sogenannten Dunkelstrom und einem im den Ausleseprozess aufbrachten Signalloffset wird auch bei Lichtabschluss im Sensor ein Signal detektiert (Dunkelbild, vgl. Kapitel 2.3.3). Die einzelnen Pixel reagieren unterschiedlich sensitiv auf diese Dunkelströme, außerdem steigt die Stärke des

Dunkelstromes mit der Temperatur des Sensors und der Belichtungszeit an. Alle gezeigten Aufnahmen sind durch die Subtraktion des Ensemblemittels von 100 vor dem Experiment erstellten Aufnahmen mit aufgesetztem Objektivdeckel dunkelbildkorrigiert. Üblicherweise wird das Dunkelbild als Teil eines Hintergrundbildes subtrahiert. Der Hintergrund ist eine Aufnahme des Messobjektes in Abwesenheit der zu messenden Größe, im vorliegenden Fall also der Ölfluoreszenz. So wird beispielsweise am Messobjekt reflektiertes Anregungslicht, das den Filter transmittiert, oder auch unerwünschte Fluoreszenz von Bauteilen korrigiert. Im Motorexperiment wäre jedoch aufgrund des sich bewegenden Kolbens für jede mögliche Kolbenposition eine Hintergrundaufnahme unter Abwesenheit von Motoröl notwendig, was einen erheblichen Mehraufwand darstellt. Im vorliegenden Messaufbau ist der Unterschied zwischen dem Hintergrund und dem Dunkelbild vernachlässigbar [24], daher wird auf eine „echte“ Hintergrundkorrektur verzichtet.

Laser weisen in ihrem lateralen Strahlprofil örtliche Intensitätsunterschiede auf, die durch die Aufweitung des Strahles im Experiment verstärkt werden. Hinzu kommen Unterschiede in den Detektionseffizienzen der einzelnen Pixel und optische Effekt wie Vignettierung des Kamerasystems, die zu lokal unterschiedlichen Systemantworten in der Detektion führen können. Um die Unterschiede zu kompensieren, kann eine Aufnahme von einem räumlich möglichst konstanten Signal erstellt werden, das Flachfeld. Dies kann beispielsweise durch Einstellen einer flächig konstanten Schichtdicke des fluoreszierenden Mediums [65], durch die Erzeugung einer näherungsweise unendlich dicken Schicht [24, 125], oder der Verwendung eines transparenten, fluoreszierenden Feststoffes konstanter Dicke [31, 113] erreicht werden. Aufgrund der qualitativen Natur der Untersuchungen und dem verbundenen Mehraufwand durch die Erstellung des Flachfeldes wurde in den vorliegenden Untersuchungen auf eine Flachfeldkorrektur verzichtet. Abbildung 5-5 zeigt jedoch zwei typische Ensemblemittel von Flachfeldern, die im Rahmen einer anderen Messkampagne mit dem verwendeten optischen System durch die Völlfüllung des Zylinders mit fluoreszenzmarkiertem Öl erstellt wurden.

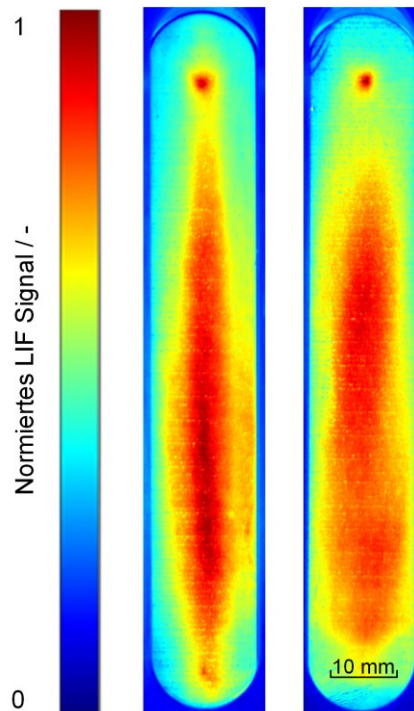


Abbildung 5-5: Ensemblemittel von Flachfeldern auf der DS (links) und GDS (rechts).

Die Flachfelder zeigen die höchsten Signal-Gradienten an den Rändern der Fenster. Innerhalb eines horizontalen „Streifens“ ist das LIF-Signal in der Mitte am höchsten und fällt zu beiden Seiten ab. Öl im Zentrum des Fensters verursacht durch die lokal höhere Fluenz also mehr Fluoreszenz als in den Randbereichen. Diese Unterschiede in der Fluoreszenz müssen bei der Bewertung der Aufnahmen berücksichtigt werden.

5.2 Versuchsdurchführung

Der verwendete Kolben besitzt zwei Drainagebohrung auf DS und GDS. In der Frontalansicht ist auf beiden Seiten die linke Drainagebohrung als Sackloch- und die rechte als Durchgangsbohrung zum Kolbeninneren ausgeführt, wie in Abbildung 5-6 zu sehen ist.

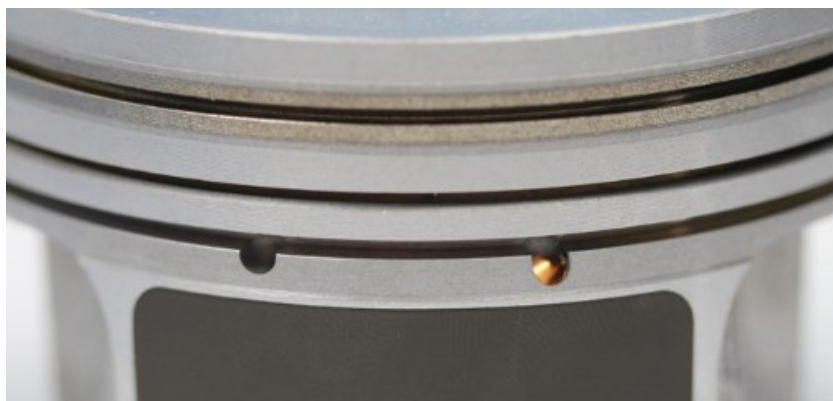


Abbildung 5-6: Drainagebohrungen des verwendeten Kolbens mit Beleuchtung im Kolbeninneren.

Dies erzeugt abhängig von der Höhe des allgemeinen Blowby-Stromes eine radiale Gasströmung von links nach rechts. Aktuell berücksichtigt die Simulation noch keine Blowby-Strömung, daher wird

geschleppter Motorbetrieb mit einer Drehzahl von $n = 1666 \text{ min}^{-1}$ und einem Saugrohrdruck von $p_{\text{saug}} = 600 \text{ mbar}$ als Versuchsbedingungen gewählt, um bei dem Vergleich von Simulation und Experiment Blowby-induzierte Phänomene zu reduzieren. Mit dem gewählten Saugrohrdruck beträgt der Zylinderspitzenruck $p_{\text{max}} = 13 \text{ bar}$. Alle Motorversuche werden mit einer Kühlwasser- und Öltemperatur von $T = 90 \text{ °C}$ durchgeführt. Der Motor wird vor den LIF-Aufnahmen 90 Sekunden lang geschleppt betrieben, um einen stationären Zustand zu erreichen.

Der Hub s des Kolbens kann abhängig vom aktuellen Kurbelwinkel α , dem Kurbelradius r sowie der Pleuellänge l durch die Hubfunktion in Gleichung (5.1) beschrieben werden:

$$s(\alpha) = r \left(1 + \frac{l}{r} - \cos \alpha - \frac{l}{r} \sqrt{1 - \left(\frac{r}{l} \right)^2 \cdot \sin^2 \alpha} \right) \quad (5.1)$$

Mithilfe der Hubfunktion des Motors und der projizierten Pixelgröße wird in jeder Aufnahme der Bereich um die Ölnut aus den LIF-Aufnahmen mithilfe von MATLAB ausgeschnitten. Die LIF-Aufnahmen zeigen daher immer denselben Bereich des Kolbens um die Ölnut, sodass es wirkt, als würde der Motor stehen.

5.3 CFD-Simulation

Die experimentellen Untersuchungen werden durch dreidimensionale CFD-Simulationen unterstützt, die in OpenFoam [132] durchgeführt wurden. Die Simulation soll in erster Linie die Schmierölverteilung im Bereich unter dem Ölabstreifring und deren Einfluss auf das Ölangebot am Kolbenhemd bestimmen, da ein unzureichender Schmierfilm erhöhte Reibung und Geräuschemissionen verursachen kann. Da dieser Bereich mit Öl und Luft gefüllt ist, wird ein Solver für zwei kompressible, nicht-isotherme und nicht-mischbare Fluide mit der Volume-of-Fluid Methode verwendet. Durch Auflösen der Navier-Stokes Gleichungen für jede Zelle werden der statische und dynamische Druck, die Geschwindigkeit und die Volumenanteile von Öl und Luft berechnet. Öl wird in der Berechnung als inkompressibel und Luft als ideales Gas angenommen. Phasenänderungen der Fluide werden nicht berücksichtigt.

Ein wichtiger Aspekt der Simulation ist die präzise Beschreibung des Spaltes zwischen dem Kolben und der Zylinderwand, da dieser das Simulationsgebiet darstellt. Daher werden in der Simulation sowohl das Nennspiel des Kolbens als auch das tatsächliche dreidimensionale Außenkontur des Kolbenhemdes und die Kolbensekundärbewegungen berücksichtigt. Die rotatorische und translatorische Sekundärbewegung wurden aus früheren, unabhängig durchgeführten Mehrkörpersimulationen des Einzylindermotors entnommen und in der Simulation als Randbedingung vordefiniert. Anders als im CFD-Modell werden Kolben und Zylinderwand in der Mehrkörpersimulation als elastische Körper behandelt. Aufgrund von elastischer Verformung kann daher die Spaltbreite zeitweise höher als das Nennspiel des Kolbens sein. Die Kolbenrotation um den Kolbenbolzen und die Spaltbreite auf der DS und GDS sind in Abbildung 5-7 dargestellt.

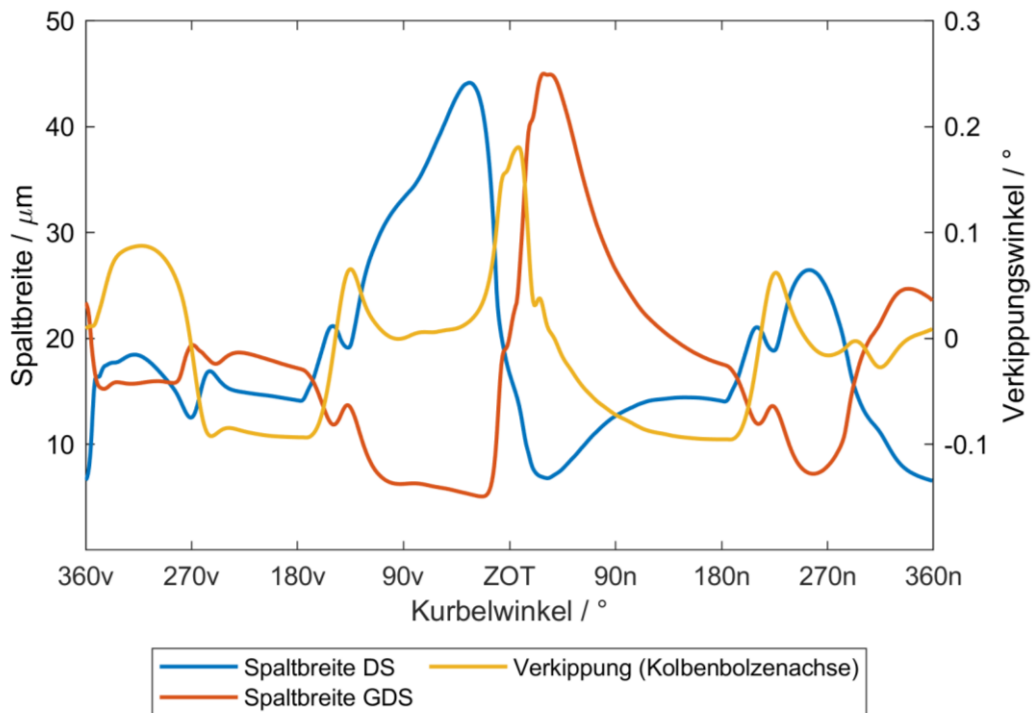


Abbildung 5-7: Berechnete translatorische und rotatorische Kolbensekundärbewegung als Funktion des Kurbelwinkels.

Die Spaltbreiten wurden am Kolbenhemd auf Höhe der Kolbenbolzenachse ermittelt. Dies ist nicht zwangsläufig die minimale Spaltbreite zwischen Kolben und Zylinder, sondern wird als Bezugspunkt verwendet, um die Kolbensekundärbewegungen auf das CFD-Modell zu übertragen. Die Rotation des Kolbens um den Kolbenbolzen (siehe Abbildung 5-7, positive Drehwinkel entsprechen einer Rotation in Richtung der GDS) und die Translation werden im Simulationsmodell überlagert. Thermische Verzüge der Zylinderlaufbahn werden vernachlässigt, da der Zylinder bei der Betriebstemperatur gehont worden ist und der Motor im Versuch nicht befeuert betrieben wird.

Um mit der dynamischen Bewegung des Simulationsnetzes umzugehen und eine gegenseitige Durchdringung der Festkörper zu verhindern, wird ein benutzerdefinierter Motion-Solver verwendet. Während die Zylinderlaufbahn als starrer Körper angesehen wird, wird dem Kolben eine geringfügige künstliche Verformung ermöglicht, um eine minimale Spaltbreite sicherzustellen. Diese ist für die Konvergenz der Simulation notwendig und reduziert die Berechnungszeit, ohne einen nennenswerten Einfluss auf die Ölverteilung zu haben. Der Versuch, die Kolbensekundärbewegungen im CFD-Modell selbst zu berechnen, war aufgrund schlechter Konvergenz nicht möglich; nichtsdestotrotz wäre dies der beste Weg, Inkonsistenzen in der Definition der Netz-Bewegung zu vermeiden.

Um eine Bewegung des Netzes in Hubrichtung zu vermeiden, wird ein nicht-inertiales Bezugssystem verwendet, das sich mit dem Kolben bewegt. In diesem System wird die Geschwindigkeit an der Zylinderlaufbahn festgelegt und Scheinkräfte durch ein zeitlich veränderliches Beschleunigungsfeld berücksichtigt. Der Simulationsbereich umfasst nur eine Hälfte des Kolbenhemdes, wobei eine horizontale Spiegelsymmetrie in der Mitte des Hemdes angenommen wird. DS und GDS werden getrennt voneinander parallel simuliert. Aufgrund des transienten Charakters der Simulation wurde ein relativ grobes Netz mit 200.000 Zellen gewählt. Insgesamt werden vier aufeinanderfolgende

Arbeitsspiele simuliert, um eine sich periodisch wiederholende Ölfilmverteilung zu erhalten. Die hier gezeigten Ergebnisse stammen aus dem vierten Arbeitsspiel.

Abbildung 5-8 zeigt rechts den Simulationsbereich mit Begrenzungen und der Symmetrieebene in Frontalansicht und links einen Querschnitt des Simulationsbereiches. Nach oben wird eine vollständige Abdichtung durch den Ölabstreifring angenommen. Das Öl kann die Domänengrenzen nur an den Seiten und dem unteren Ende des Kolbenhemdes passieren. An diesen Bereichsgrenzen wird angenommen, dass der Druck gleich dem Kurbelgehäusedruck ist (1 bar). Im restlichen Kolbenhemdbereich erreicht der Druck aufgrund von Hydrodynamik und dem Anpressen des Kolbenhemdes an die Zylinderlaufbahn deutlich höhere Werte. Wenn Öl über die untere Grenze am Kolbenhemd eintritt, was hauptsächlich beim Abwärtshub der Fall ist, wird ein konstanter Volumenanteil von Öl als Randbedingung angenommen. Für die vorliegenden Untersuchungen wird der Volumenanteil des Öls im Fluid, das durch die untere Begrenzung in das Berechnungsgebiet eintritt, auf 0,5 festgelegt. Da der untere Eintrittsbereich weit von der zu untersuchenden Region/ROI (engl. region of interest) entfernt ist, sollte dieser etwas willkürliche Wert keinen signifikanten Einfluss auf die Ergebnisse haben.

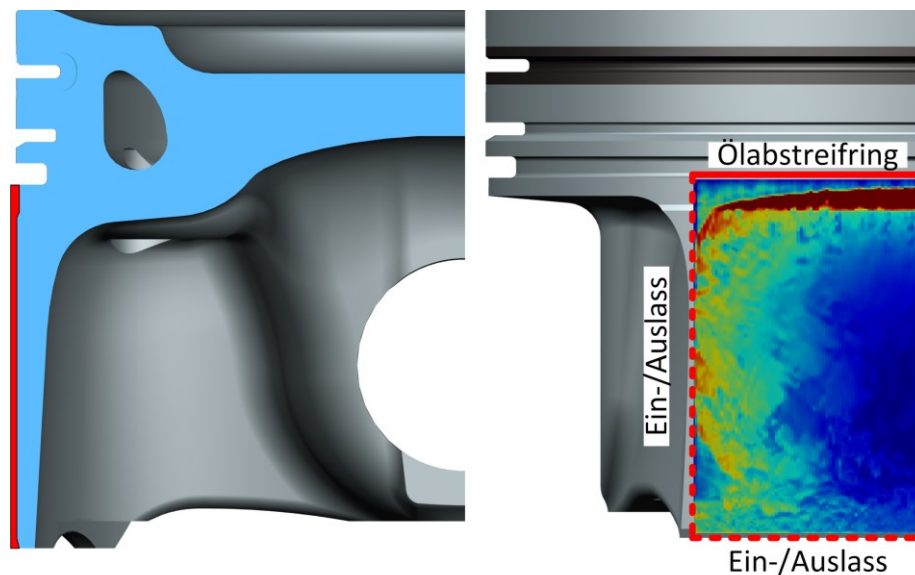


Abbildung 5-8: Simulationsbereich in Bezug auf die Kolbengeometrie. Rechts: Frontalansicht des Kolbens überlagert mit der simulierten Ölfilmstärke. Links: Querschnitt des Kolbens und des Simulationsbereiches (rot markiert).

Es stellte sich heraus, dass der Kontaktwinkel zwischen dem Öl und den Festkörpern in der Simulation ein wesentlicher Parameter zur Abstimmung ist, um eine gute Übereinstimmung mit den experimentellen Daten zu erhalten. Die ersten Simulationen wurden ohne Berücksichtigung der Benetzbarkeit der Oberflächen durchgeführt. Beim Vergleich der Simulationsergebnisse mit den Messdaten wurde deutlich, dass die auftretenden Effekte unzureichend abgebildet werden konnten. Das Öl löste sich zu leicht von Oberflächen und die Ölnut unter dem Ölabstreifring entleerte sich schon vor Erreichen des ZOT vollständig. Mit einem Kontaktwinkel von 10° konnte eine wesentlich bessere Übereinstimmung der berechneten Ölfilmverteilung mit dem Experiment erreicht werden. Dieser Kontaktwinkel wurde daher für die Oberflächenbenetzung in den gezeigten Simulationsergebnissen verwendet. Die übrigen rheologischen Parameter wie Ölviskosität und Oberflächenspannung haben ebenfalls einen Einfluss, sind aber üblicherweise im Vorfeld genauer bekannt. Im Simulationsmodell

wurde die Oberflächenspannung auf $\sigma = 25 \text{ mN/m}$, die kinematische Viskosität auf $\nu = 6,5 \text{ mm}^2/\text{s}$ und die Dichte auf $\rho = 775 \text{ kg/m}^3$ festgelegt.

5.4 Schmierölverteilung in der Ölnut

Abbildung 5-9 zeigt die Geschwindigkeit und die dazugehörige Beschleunigung des Kolbens als Funktion des Kurbelwinkels für den Motor bei einer Drehzahl von 1666 min^{-1} , die in der folgenden Diskussion als Referenz dienen soll. Alle zeitlichen Angaben beziehen sich auf den ZOT, 360°KW vor ZOT und 360°KW nach ZOT verweisen also auf den LWOT. Die Ergebnisse werden jeweils für einen Hub getrennt präsentiert und diskutiert.

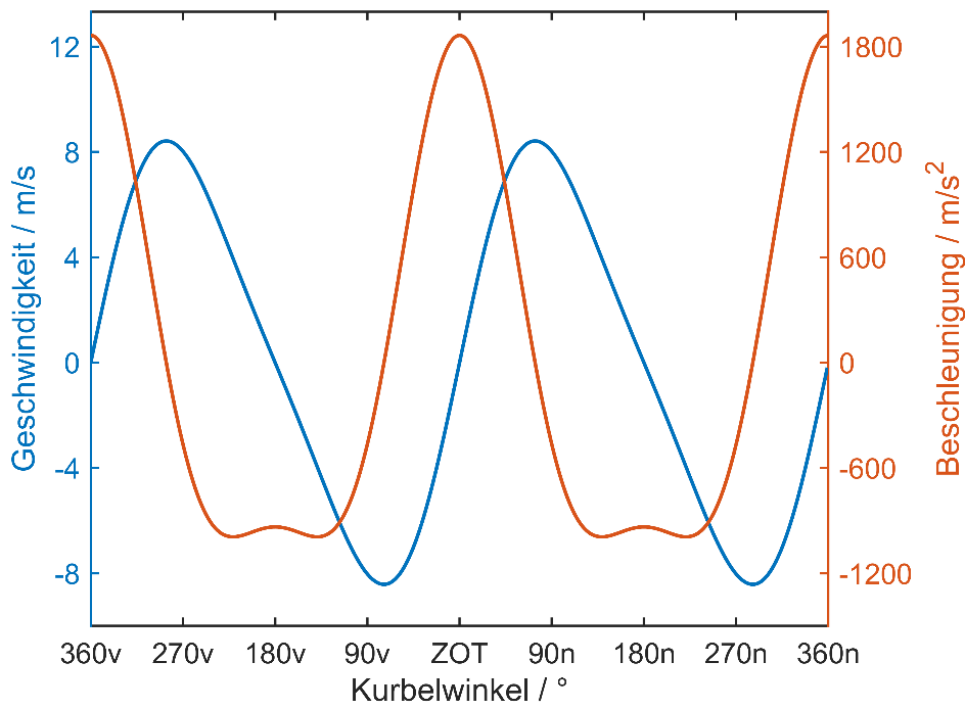


Abbildung 5-9: Geschwindigkeit und Beschleunigung des Kolbens als Funktion des Kurbelwinkels für eine Motordrehzahl von 1666 min^{-1} .

5.4.1 Ansaugen

Abbildung 5-10 zeigt die Simulationsergebnisse und LIF-Aufnahmen während des Ansaugens. Auf der linken Seite ist die DS mit den LIF-Aufnahmen in der linken und den Simulationsergebnissen in der rechten Spalte dargestellt. Analog dazu ist rechts die GDS gezeigt. Der Zeitpunkt im Arbeitsspiel in Grad Kurbelwinkel ist in der Mitte angezeigt. Die Skala der LIF-Aufnahmen ist bei 2000 counts abgeschnitten, um niedrige LIF-Signale besser sichtbar zu machen. Wie in Kapitel 5.1.1 diskutiert, ist die auftreffende Laserintensität in der Mitte des Fensters am höchsten, was die Ölfilmstärke verhältnismäßig höher erscheinen lässt als in den Randbereichen der Aufnahme. Dieser Effekt ist beispielsweise auf der GDS 326°KW vZOT sichtbar. Je mehr Öl sich jedoch in der Ölnut befindet, desto weniger fällt der Effekt ins Gewicht, da das LIF-Signal das Maximum der gewählten Skala erreicht. Generell sind die Aufnahmen in Intervallen von jeweils 30°KW gezeigt, jedoch sind einige Aufnahmen zeitlich leicht verschoben, falls gewisse Effekte oder Phänomene etwas früher oder später besser erkennbar sind.

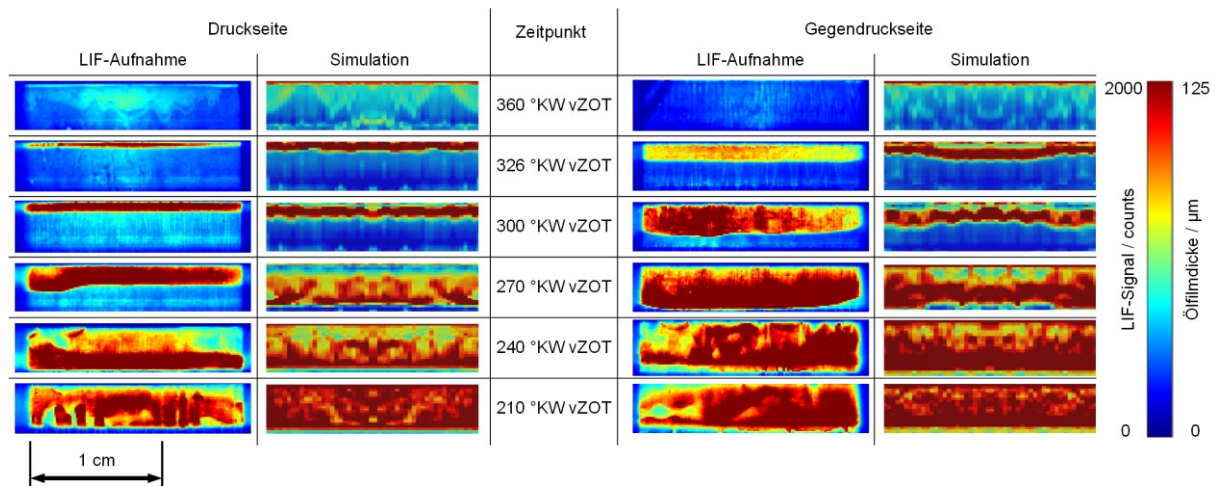


Abbildung 5-10: LIF-Aufnahmen und simulierte Ölfilmstärke während des Ansaugens (360 °KW vZOT bis 210 °KW vZOT).

360 °KW vZOT (d.h. am LWOT) zeigen die LIF-Aufnahmen sowohl auf der DS, als auch auf der GDS keine bzw. kaum Präsenz von Öl in der Nut, wohingegen die Simulation etwas Öl am oberen Rand der Nut prognostiziert. In der darauffolgenden Abwärtsbewegung jedoch beginnt der Ölabbreifer, überschüssiges Öl von der Zylinderlaufbahn abzukratzen, das sich am oberen Rand der Nut sammelt. Die Nut füllt sich schneller auf der GDS als auf der DS (326 – 300 °KW vZOT). Dieses Verhalten ist sowohl in den LIF-Aufnahmen als auch in der CFD-Simulation zu sehen. Die Unterschiede sind auf ein höheres Ölangebot durch Öltransportvorgänge zurückzuführen, was in Kapitel 5.4.4 - Ausstoßen diskutiert wird (siehe Abbildung 5-20 und Abbildung 5-21).

Beginnend ab 280 °KW vZOT wird der Kolben langsamer (siehe Abbildung 5-9), wodurch eine abwärts gerichtete Trägheitskraft auf das Öl wirkt. 270 °KW vZOT befindet sich Öl in der Nut daher schon in einer Abwärtsbewegung in Richtung der Nutunterkante. Auf der GDS hat das Öl 270 °KW nZOT bereits das untere Ende der Nut erreicht, wie in der LIF-Aufnahme und der CFD-Simulation mit geringer zeitlicher Abweichung zu sehen ist. Auf der DS ist das Öl noch größtenteils in der oberen Hälfte der Nut zu sehen.

Sobald Öl das untere Ende der Nut erreicht, interagiert es mit der Zylinderlaufbahn, die es relativ zum Kolben wieder nach oben zieht. In Abbildung 5-11 sind Querschnitte der Ölnut aus der CFD-Simulation von 270 bis 230 °KW vZOT dargestellt. In diesen Querschnitten wird eine Farbskala verwendet, auf der Öl in Rot und Luft in Blau dargestellt ist. Die blauen und orangenen Pfeile unterhalb der Querschnitte zeigen die Geschwindigkeit und Beschleunigung des Kolbens zu diesem Zeitpunkt. Der allgemeine Öltransport in der Nut wird durch weiße Pfeile in den Querschnitten angedeutet.

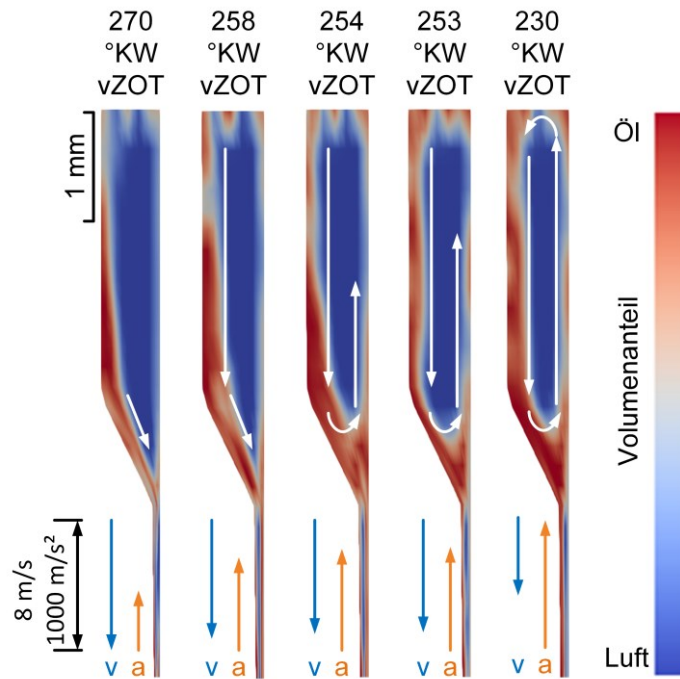


Abbildung 5-11: Entwicklung einer kreisförmigen Strömung in der Ölnut auf der GDS während des Ansaugens. Weiße Pfeile zeigen schematisch Öltransport, blaue Pfeile die Kolbengeschwindigkeit und orangene Pfeile die Kolbenbeschleunigung.

Zum Zeitpunkt, an dem das Öl die Nutunterkante erreicht (270 °KW vZOT), kann nur eine kleine Menge davon in den zu diesem Zeitpunkt schmalen Spalt zwischen Kolben und Zylinderlaufbahn eindringen. Der Großteil des Öls bleibt innerhalb der Nut und wird in Richtung der Zylinderlaufbahn umgelenkt (258 °KW vZOT). Dieser Öltransportprozess wird in der Literatur als „Bridging“ bezeichnet [16] und wird später ausführlicher behandelt. Wenn das Öl in Kontakt mit dem ruhenden Liner kommt, bewegt es sich relativ zum Kolben aufwärts (254 °KW vZOT), bis es den Ölabbstreifring erreicht und erneut abgestreift wird. Da gleichzeitig mehr Öl von der Zylinderwand abgestreift wird, sammelt es sich in der Nut an und 230 °KW vZOT hat sich eine kreisförmige Strömung gebildet. Diese kreisförmige Bewegung tritt 210 °KW vZOT auf DS und GDS zugleich auf, wie in Abbildung 5-10 zu sehen ist.

5.4.2 Kompression

Abbildung 5-12 zeigt ausgewählte LIF-Aufnahmen und die zugehörigen CFD-Simulationsergebnisse des Kompressionshubes. Sowohl auf der DS als auch auf der GDS ist das LIF-Signal 180 °KW vZOT im unteren Bereich der Nut hoch, da Öl durch Trägheitskräfte nach unten gedrückt wird, wenn der Kolben am UT zum Stehen kommt.

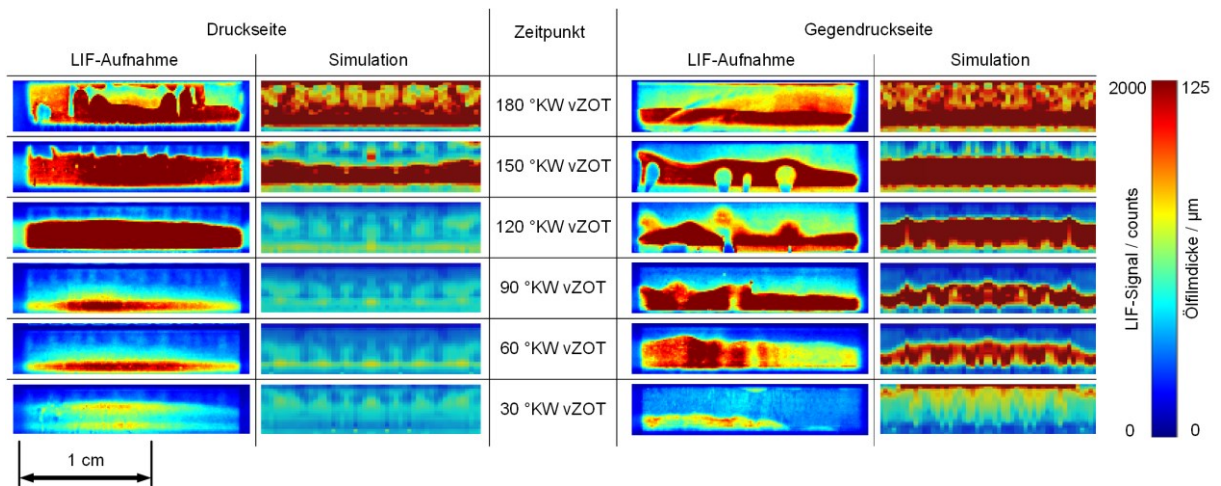


Abbildung 5-12: LIF-Aufnahmen und simulierte Ölfilmstärke während der Kompression (180 °KW vZOT bis 30 °KW vZOT).

Während der Aufwärtsbewegung beginnt sich die Ölnut zu entleeren und Öl fließt in Richtung des Kolbenhemdes. Auf der DS zeigen die LIF-Aufnahmen kein Abfließen des Öls bis 120 °KW vZOT, kurze Zeit später entleert sich die Nut jedoch schnell (90 °KW vZOT). Die Ergebnisse der CFD-Simulation decken sich mit dieser Beobachtung, auch wenn die Nut hier bereits 120 °KW vZOT fast vollständig entleert ist. Diese Abweichung vom Experiment wird möglicherweise durch Ungenauigkeiten in der Mehrkörpersimulation der Kolbendynamik verursacht. Auf der GDS bleibt das LIF-Signal bis 60 °KW vZOT nahezu konstant, was konsistent mit den Ergebnissen der Simulation ist, jedoch erscheint der Ölfilm hier gleichmäßiger über die Nut verteilt als in den LIF-Aufnahmen. In diesen sind 150 °KW vZOT Luftblasen zu sehen, die in der Nut aufsteigen, stellenweise Öl verdrängen und kurze Zeit später kollabieren. Der Umstand, dass das Öl auf der DS nach unten abfließt, auf der GDS hingegen in der Nut verbleibt, lässt sich auf die Sekundärbewegungen des Kolbens und dessen Anlagewechsel von der DS auf die GDS erklären, der in Abbildung 5-13 dargestellt ist. Hier ist ein größerer Ausschnitt der LIF-Aufnahmen einschließlich eines Teils des Kolbenhemdes gezeigt. In den ersten beiden Bildern begrenzt das untere Ende des optischen Zugangs einen Teil des Sichtfelds.

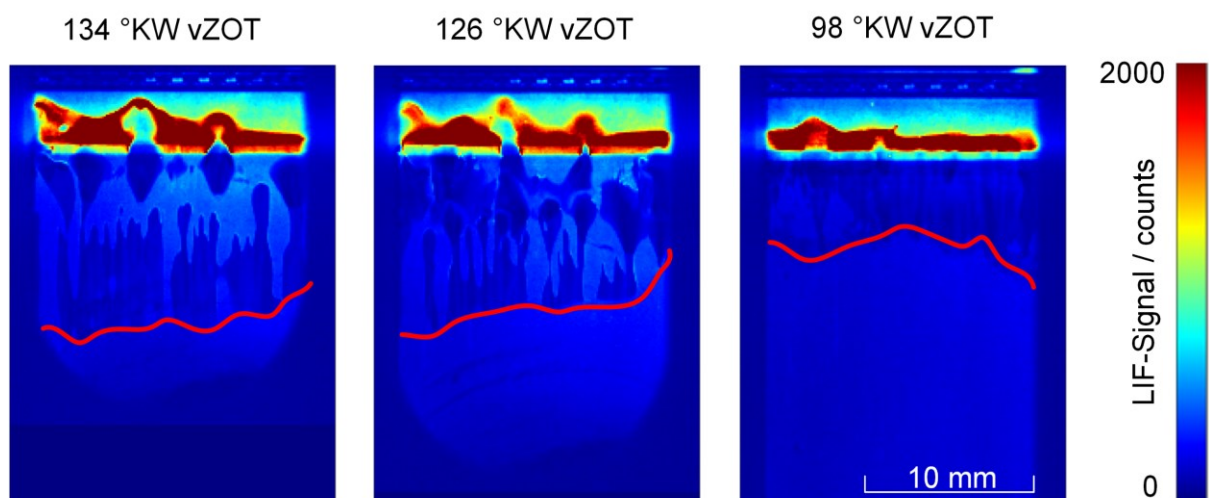


Abbildung 5-13: LIF-Aufnahmen des Anlagewechsels auf der GDS während der Kompression.

Das verzweigte Muster deutet auf einen Bereich höheren Spiels zwischen Kolben und Zylinderlaufbahn hin. In diesem Bereich füllt das Öl den Spalt nicht vollständig aus und bildet räumlich unterbrochene Ölfilme auf dem Kolben und der Zylinderwand aus. Die Grenzlinie, unterhalb derer der Ölfilm den Spalt komplett ausfüllt, ist rot markiert. Allerdings befindet sich der Kolben nahe des UT und das Kolbenhemd ist daher teilweise außerhalb des Sichtbereichs. Dennoch verdeutlicht der gefüllte Schmierspalt 134 °KW vZOT im unteren Bereich des Sichtfeldes den Anlagewechsel des Kolbens: die Ölfilm-Grenzlinie bewegt sich nach oben (126 und 98 °KW vZOT, gut erkennbar am abnehmenden Abstand zwischen Grenzlinie und Ölnut). Gleichzeitig sinkt das LIF-Signal am Kolbenhemd leicht ab, was eine Verringerung der Ölfilmstärke im Kontakt zeigt. Folglich legt sich der Kolben zunächst mit dem unteren Bereich des Kolbenhemdes an der Zylinderlaufbahn an und rollt anschließend aufgrund der rotatorischen Sekundärbewegung nach oben hin ab, wobei Teile der Luft und des Öls nach oben in die Ölnut gepresst werden, was die zuvor beschriebenen Luftblasen verursacht.

Auf der GDS sammelt sich 30 °KW vZOT Öl am unteren Ende der Nut an, obwohl das Öl zuvor bereits durch das Abbremsen des Kolbens an die Nutoberkante geflossen ist. Wenn es auf die untere Rail des Ölabbstreifringes trifft, wird es durch Bridging auf die Zylinderwand transportiert. Wenn die Nutunterkante diesen Ölfilm auf der Zylinderwand erreicht, werden jedoch Teile des Öls wieder abgestreift und verbleiben in der Nut, da durch den zuvor beschriebenen Anlagewechsel der Spalt zwischen Kolben und Zylinder gering ist.

Die CFD-Simulationsergebnisse zeigen zusätzlich zum Anlagewechsel eine zusätzliche Quelle für die Luftblasen in der Nut. In Abbildung 5-14 sind simulierte Querschnitte zu verschiedenen Zeitpunkten während der Kompression gezeigt. Öl und Luft werden nach oben gedrückt, da der Kolben während des Anlagewechsels die Fluide im Spalt zwischen Kolbenhemd und Zylinderwand verdrängt (160 bis 150 °KW vZOT). Wenn dieses nach oben verdrängte Öl die Zylinderwand erreicht (150 °KW vZOT), bewegt es sich durch die Relativbewegung des Kolbens zum Zylinder wieder nach unten. Während dieses Vorgangs wird mit dem Öl von oben Luft mit eingesaugt, welche sich im unteren Bereich der Nut ansammelt (145 bis 120 °KW vZOT), bis die Luftblase das obere Ende des Ölfilms erreicht und kollabiert (90 °KW vZOT). In der Frontansicht der Simulationsergebnisse sind diese Lufteinschlüsse nicht zu sehen, da sich die Lufteinschlüsse gleichmäßig über die Breite der Ölnut verteilen, wohingegen sich im Experiment lokale Lufteinschlüsse in Form der beobachteten Blasen ausbilden.

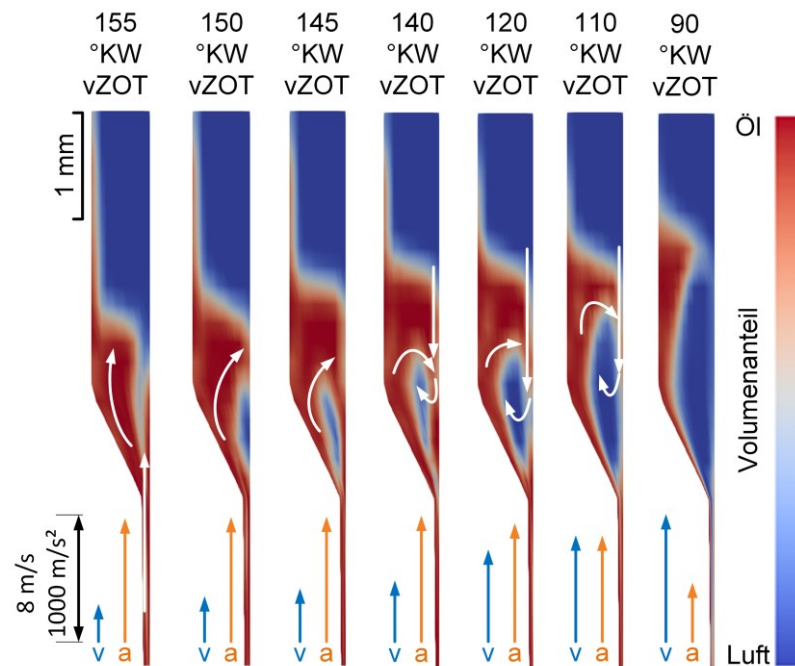


Abbildung 5-14: Ausgewählte Simulations-Querschnitte der Ölnot auf der GDS während der Kompression. Weiße Pfeile zeigen schematisch Öltransport, blaue Pfeile die Kolbengeschwindigkeit und orangene Pfeile die Kolbenbeschleunigung.

Im Gegensatz zu der vereinfachenden Annahme der Simulation, der Ölabbstreifring stelle eine perfekte Dichtung dar, kann Öl im Experiment auch hinter die Rail des Ölabbstreifrings in die Ringnut gelangen. Öl, das beide Rails passiert, verursacht potentiell Ölverbrauch, schmiert aber auch die beiden oberen Ringkontakte. Abbildung 5-15 zeigt Detailansichten des Ölabbstreifringes aus LIF-Aufnahmen auf der DS während der Kompression. Während der Beschleunigung wird Öl in der Ringnut nach unten gedrückt. Das detektierte LIF-Signal in der Schlauchfeder ist 140 °KW vZOT sehr niedrig, was darauf hindeutet, dass sich das Öl am Nutgrund hinter der Rail befindet. Die Schlauchfeder hat Öffnungen, die nach oben oder unten gerichtet sind, die in Abbildung 5-15 durch rote Linien angedeutet sind. Solange das Öl nach unten gedrückt wird, da der Kolben nach oben beschleunigt, sammelt sich das Öl in den Teilen der Schlauchfeder mit nach oben gerichteten Öffnungen (76 °KW vZOT). Wenn der Kolben anschließend abbremst, wird das Öl durch seine Trägheit gegen die obere Rail und die obere Ringnutflanke getrieben (28 °KW vZOT). Hier kann es nicht oder nur in geringem Maße hinter die obere Rail fließen und wird daher in den Bereichen mit nach unten gerichteten Öffnungen durch die Feder erkennbar. Der Übergang von Öl von der unteren zur oberen Ringnutflanke ist 42 °KW vZOT gut erkennbar, da hier gleichzeitig in beiden Arten von Öffnungen Fluoreszenz detektiert wird.

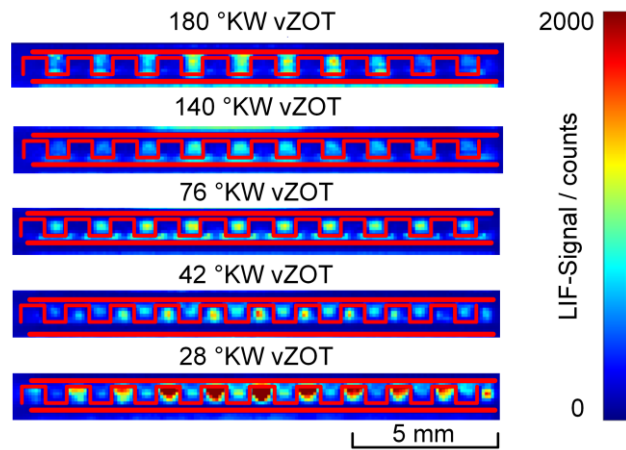


Abbildung 5-15: Öl innerhalb des Ölabstreifringes auf der DS während der Kompression. Die Kontur der Rails und der Abstandsfeder sind rot markiert.

5.4.3 Expansion

Abbildung 5-16 zeigt ausgewählte LIF-Aufnahmen und Simulationsergebnisse aus der Expansion. Im Gegensatz zum LWOT ist im ZOT wesentlich mehr Öl in der Ölnut vorhanden. Wenn sich der Kolben nach unten bewegt, wird wie im Ansaugen überschüssiges Öl vom Ölabstreifring abgestreift und sammelt sich im oberen Bereich der Nut. Auf der GDS ist ein wellenartiges Muster im Ölfilm in den LIF-Aufnahmen sichtbar (30 °KW nZOT und 60 °KW nZOT).

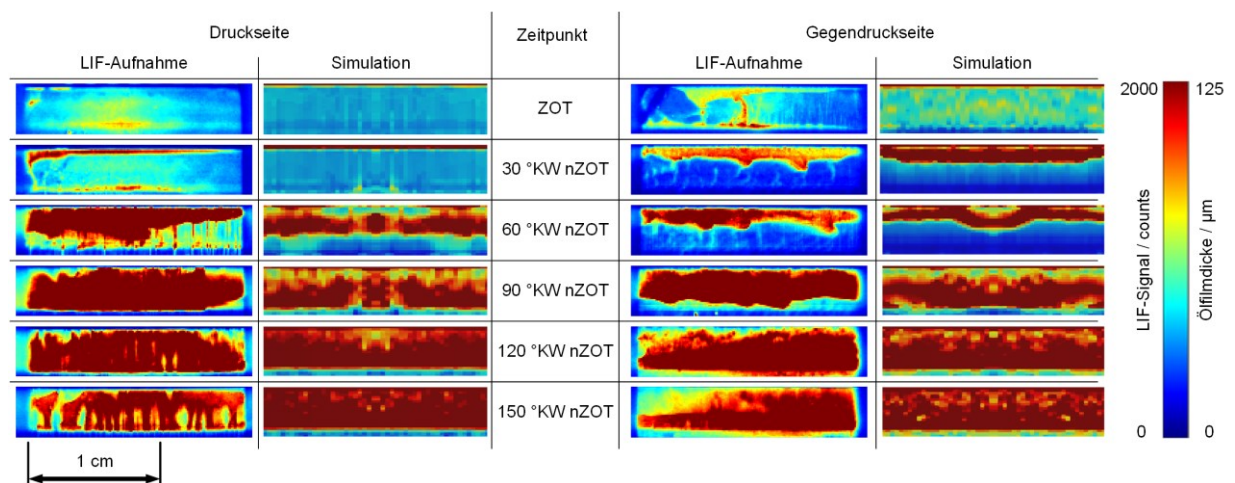


Abbildung 5-16: LIF-Aufnahmen und simulierte Ölfilmstärke während der Expansion (ZOT bis 150 °KW nZOT).

Die Simulation zeigt dieses Muster nicht, hier ist der Ölfilm gleichmäßig über die Breite des Sichtfeldes verteilt. Auf der DS sind 60 °KW nZOT im Gegensatz zur GDS große Bereiche der LIF-Aufnahmen bereits gesättigt, was zeigt, dass sich während der Expansion im Unterschied zum Ansaugen die Nut auf der DS schneller füllt als auf der GDS. Bis 150 °KW nZOT bleibt das LIF-Signal in der Nut auf beiden Seiten größtenteils in Sättigung. Der Kolben bremst ab 73 °KW nZOT ab, daher wird Öl in der Nut nach unten gedrückt. Infolgedessen bildet sich in der Nut eine kreisförmige Strömung aus (ähnlich zu Abbildung 5-11), die bis kurz vor UT auf beiden Seiten bestehen bleibt.

In Abbildung 5-17 sind LIF-Aufnahmen des oben erwähnten wellenartigen Musters auf einer feineren Zeitlichen Skala dargestellt. Hier ist eine klare Bewegung von Öl nach links und rechts zu sehen, welche durch die Pfeile angedeutet ist. Wie in Kapitel 5.2 beschrieben, ist die linke Drainagebohrung als Sacklochbohrung und die rechte als Durchgangsbohrung ausgeführt. Die Bohrungen sind in einem Abstand von 2 mm von den Rändern des Fensters positioniert und daher nicht sichtbar. Während der Expansion fließt Blowby Gas aus dem Brennraum durch die Ringstöße in die Ringnut des Ölabbstreifrings. Hier wird es durch die linke Drainagebohrung in die Ölnut geleitet und fließt durch diese zur rechten Drainagebohrung ins Kurbelgehäuse. Dieser Gasstrom zieht dabei Öl mit sich und verursacht den beobachteten lateralen Öltransport.

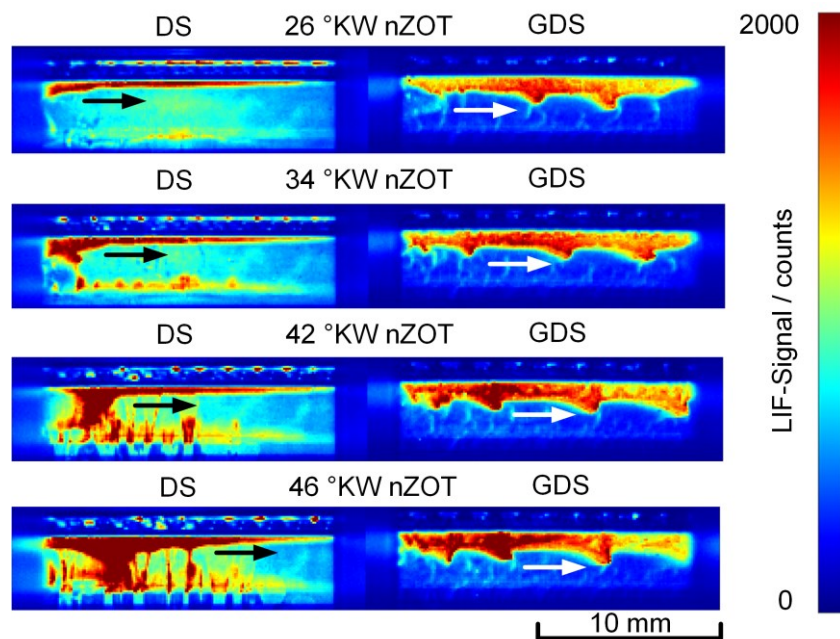


Abbildung 5-17: LIF-Aufnahmen zur Visualisierung des Öltransport ausgelöst durch Blowby-Strömung in der Ölnut während der Expansion.

Wie in Abbildung 5-16 zu sehen ist, sammelt sich auf der DS im Vergleich zur GDS zunächst nur wenig Öl am oberen Nutende (ZOT – 30 °KW nZOT), was darauf hindeutet, dass weniger Öl von der Zylinderwand abgestreift wird. Der Effekt ist sowohl in den LIF-Aufnahmen als auch in der Simulation beobachtbar. Dies entspricht den Beobachtungen aus der Kompression, in der sich die Ölnut auf der DS deutlich früher während der Aufwärtsbewegung entleert hat als auf der GDS, woraus sich auf der GDS ein höheres Ölangebot im oberen Bereich des Zylinders ergibt. Anschließend füllt sich die Ölnut jedoch auf der DS im Vergleich zur GDS schneller, vor allem in den LIF-Aufnahmen (60 °KW nZOT).

Dies kann durch zwei zusätzliche Öltransportprozesse erklärt werden: Wie in Abbildung 5-17 zu sehen ist, werden ab 34 °KW nZOT zusätzlich zum abgestreiften Öl große Mengen Öl durch die laterale Blowby Strömung in der Ölnut in das Sichtfeld gezogen. Dieser Effekt wird nur im Experiment erfasst, da Blowby Strömungen und die dadurch ausgelösten Phänomene in der Simulation nicht berücksichtigt werden. In Abbildung 5-18 sind LIF-Aufnahmen der DS mit Teilen des Kolbenhemdes gezeigt. Die Farbskala ist hier bei 1000 counts abgeschnitten, um das geringe LIF-Signal auf dem Kolbenhemd besser sichtbar zu machen. Wie in Abbildung 5-13 ist hier die Grenzlinie, unterhalb der der Ölfilm zwischen Kolben und Zylinderwand geschlossen ist, in rot markiert.

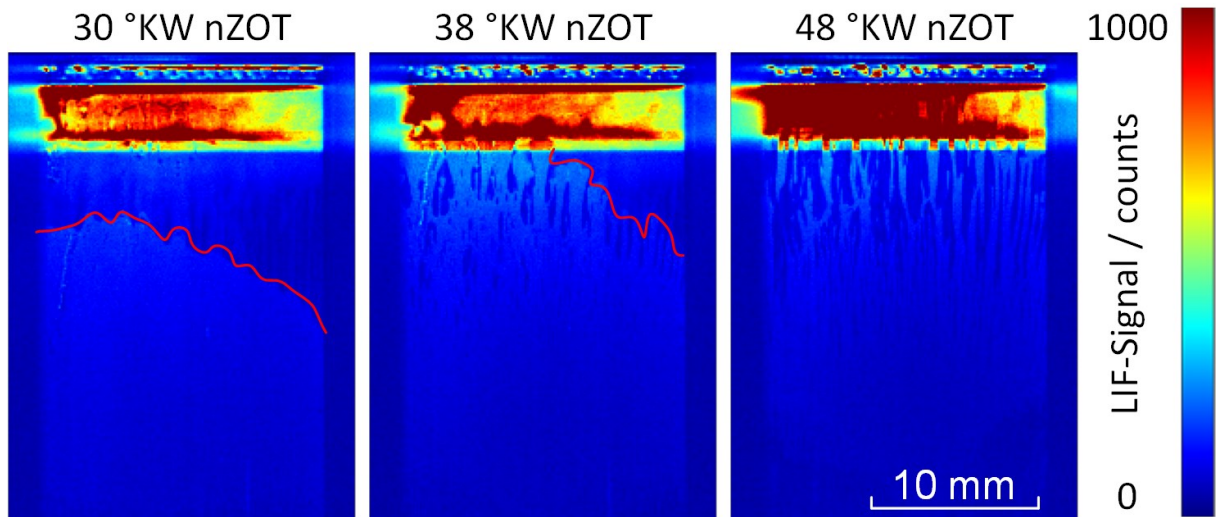


Abbildung 5-18: LIF-Aufnahmen des Anlagewechsels auf der DS während der Expansion (30 -48 °KW nZOT). Die rote Linie markiert den Umriss des geschlossenen Ölfilmes zwischen Kolben und Zylinderwand.

Der Kolben wechselt kurz nach ZOT die Anlageseite von der GDS auf die DS. Er legt sich dabei ähnlich dem Anlagewechsel während der Kompression zunächst mit der Unterseite des Kolbenhemdes an die Zylinderlaufbahn an, daher befindet sich 30 °KW nZOT die Grenzlinie noch komplett unterhalb der Ölnut. Anschließend kippt der Kolben (vgl. Abbildung 5-7) und der Spalt wird im oberen Bereich des Kolbenhemdes schmaler. Auf diese Weise werden große Mengen Öl nach oben in Richtung des Ölnut gedrückt, wie in Abbildung 5-18 zu sehen ist. Die Grenzlinie erreicht 38 °KW nZOT die Ölnut, die sich dadurch rapide mit Öl füllt (48 °KW nZOT). Die beiden beschriebenen Prozesse sorgen dafür, dass sich die Ölnut schneller auf der DS füllt, obwohl auf der GDS mehr Öl durch den Ölabbstreifring abgestreift wird.

5.4.4 Ausstoßen

Abbildung 5-19 zeigt die LIF-Aufnahmen und CFD-Simulationsergebnisse des Ausstoßens. Ähnlich zu den Simulationsergebnissen des Kompressionshubes zeigt die Simulation auch im Ausstoßen auf der DS ein schnelles Abfließen von Öl aus der Nut auf das Kolbenhemd (240 °KW nZOT und 270 °KW nZOT). Hier zeigen jedoch auch die LIF-Aufnahmen ein ähnliches Verhalten. Auf der GDS findet, wie schon im Kompressionshub, ein Anlagewechsel statt, durch den Luft und Öl in die Ölnut gepresst werden, was zu Luftblasen im Ölfilm führt (220 °KW nZOT), die wenig später an der Ölfilmoberfläche kollabieren (240 °KW nZOT). 300 °KW nZOT wird das Öl durch Trägheitskräfte nach oben transportiert, wie schon zuvor in der Kompression (vgl. Abbildung 5-12).

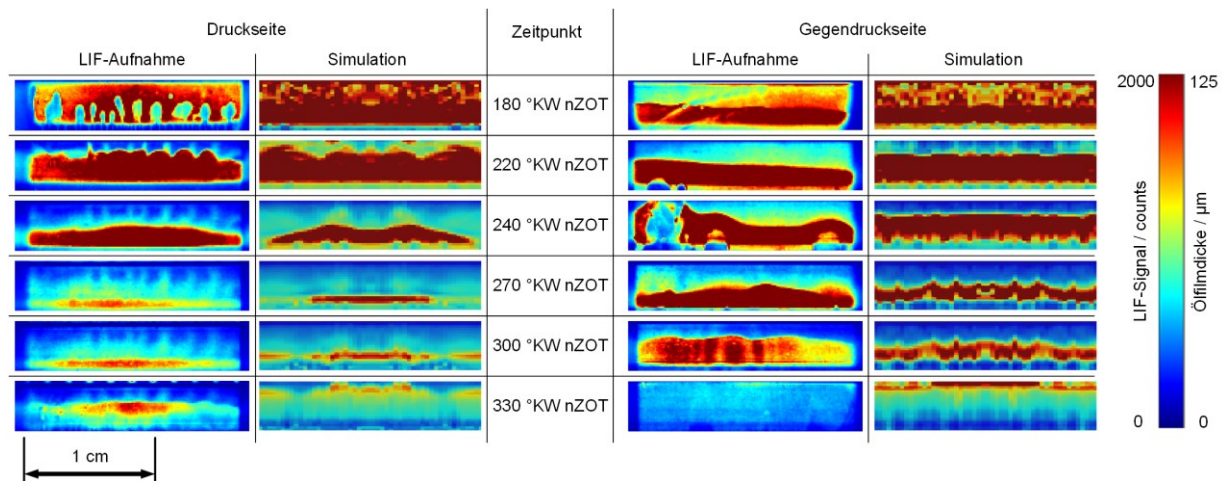


Abbildung 5-19: LIF-Aufnahmen und simulierte Ölfilmdicke während des Ausstoßens (180 °KW nZOT bis 150 °KW nZOT).

Auf der GDS sind zu diesem Zeitpunkt noch große Mengen Öl in der Nut vorhanden. Trifft dieses Öl auf die untere Rail des Ölabstreifringes, wird es durch Bridging auf die Zylinderlaufbahn transportiert und die Nut leert sich im Verlauf dessen fast vollständig (330 °KW nZOT). Bridging kann vorteilhaft sein, da der zusätzliche Ölfilm dämpfend wirkend kann, wenn der Kolben kurz nach ZOT die Anlagenseite von der GDS auf die DS wechselt. Durch die zusätzliche Dämpfung kann eine unerwünschte Geräuschentwicklung verhindert und auftretende Reibung reduziert werden [16]. Der Prozess des Bridgings erfordert jedoch verschiedene Randbedingungen. Die Ölnut muss während des Aufwärtshubes mit Öl gefüllt sein. Außerdem muss der Spalt zwischen Kolben und Zylinderwand während des Bridgings groß genug sein, damit das Öl nicht von der Unterkante der Ölnut wieder aufgefangen wird. Abbildung 5-20 zeigt ausgewählte Querschnitte der Ölnut auf der GDS von 310 °KW nZOT bis 340 °KW nZOT. Ausgelöst durch Trägheit bewegt sich der Ölfilm in der Nut nach oben und trifft 315 °KW nZOT auf die untere Rail des Ölabstreifringes. Analog zu der zuvor beschriebenen Entwicklung der kreisförmigen Strömung, wird das Öl von der Rail abgelenkt und trifft auf die Zylinderwand. Der Kolben bewegt sich anschließend am Ölfilm vorbei, ohne diesen abzustreifen (330 – 340 °KW nZOT).

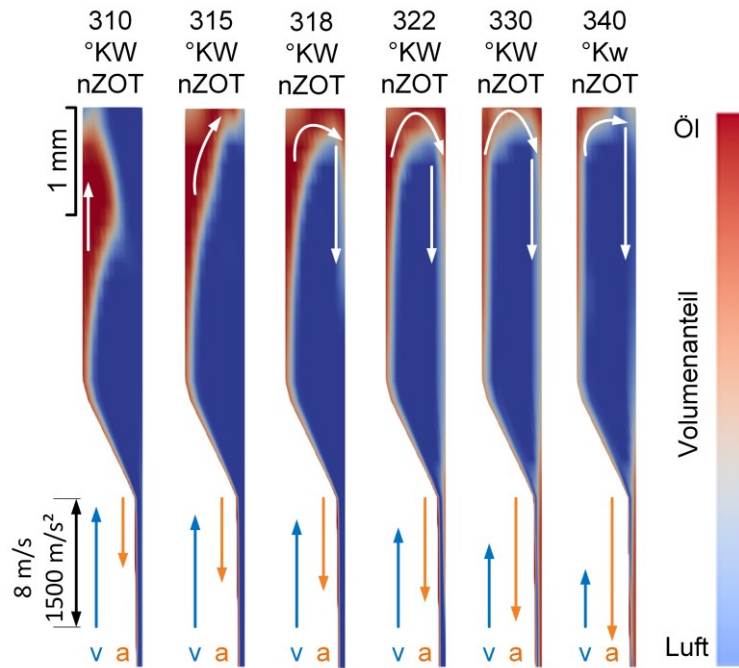


Abbildung 5-20: Bridging auf der GDS während des Ausstoßens. Weiße Pfeile zeigen schematisch Öltransport, blaue Pfeile die Kolbengeschwindigkeit und orangefarbene Pfeile die Kolbenbeschleunigung.

Abbildung 5-21 zeigt eine LIF-Aufnahme auf der GDS 360 °KW nZOT (LWOT) mit Teilen des Kolbenhemdes. Der durch Bridging auf die Zylinderwand aufgebrachte Ölfilm ist durch ein lokal etwas höheres LIF-Signal unterhalb der Ölnut erkennbar und ist rot umrandet. Wie in der Abbildung zu sehen ist, wird das Öl sehr gleichmäßig auf der Zylinderwand verteilt.

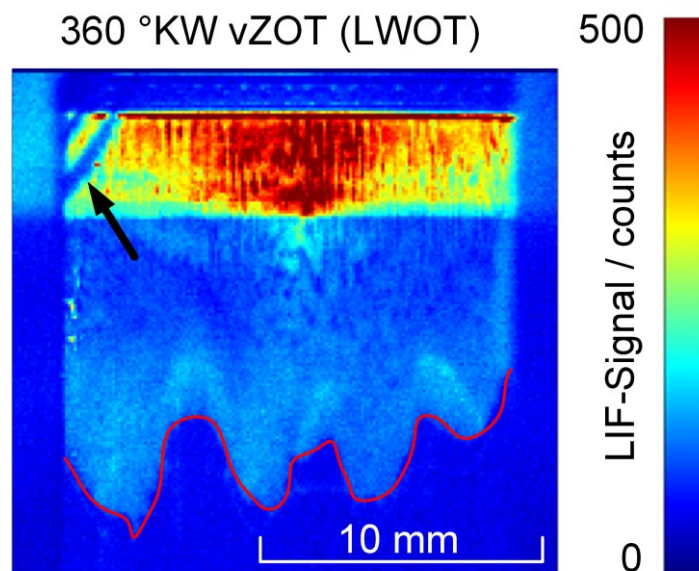


Abbildung 5-21: Durch Bridging auf die Zylinderwand transportierter Ölfilm auf der GDS im LWOT. Der durch den Pfeil markierte Bereich niedrigen LIF-Signals wird durch einen Riss im Inneren des Fensters und nicht durch eine lokale Unterbrechung des Ölfilmes verursacht.

Dieses lokal erhöhte Ölangebot auf der Zylinderwand erklärt außerdem die Beobachtung, dass sich im Ansaugen (also dem darauffolgenden Abwärtshub), die Ölnut zu Beginn des Hubes auf der GDS deutlich schneller füllt als auf der DS (vgl. Abbildung 5-10).

5.5 Literaturvergleich

Wie in Kapitel 3.1.1 erwähnt, wurden, angeregt durch den Austausch vorläufiger Ergebnisse, ähnliche Untersuchungen am MIT durch Fang et al. durchgeführt [91]. Die Ergebnisse sind zeitgleich mit der Veröffentlichung des Autors [74] erschienen.

Die CFD-Simulation in [91] wurde ebenfalls in OpenFOAM unter Anwendung der Volume-of-Fluid Methode durchgeführt. Abbildung 5-22 zeigt den gewählten Simulationsbereich, der sich auf den Querschnitt der Ölnut im mittleren Bereich des Kolbens beschränkt. Im Gegensatz zur vorliegenden Arbeit wurde jedoch noch ein Bereich zwischen der unteren Ringnutflanke des Ölabstreifringes und dessen unterer Rail berücksichtigt, der in radialer Richtung zum Kolbeninneren als Ein-/Auslass ausgeführt wurde. Öl wurde, ähnlich zu dieser Arbeit, durch den Ein-/Auslass am unteren Ende der Ölnut zugeführt.

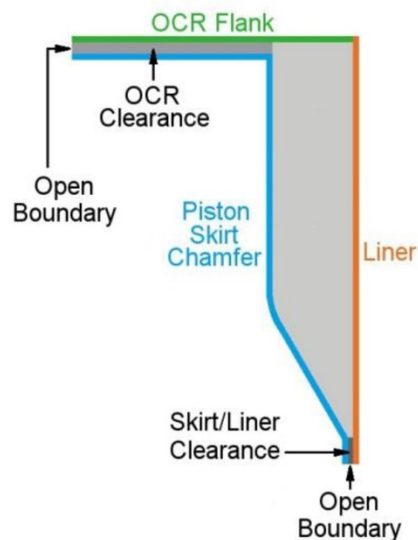


Abbildung 5-22: Simulationsbereich der CFD-Simulation nach [91].

Es wurden Simulationen mit den Drehzahlen $n = 1000 \text{ min}^{-1}$ und $n = 6000 \text{ min}^{-1}$ durchgeführt. Anhand einer Parameterstudie wurde der Einfluss verschiedener (konstanter) Spaltbreiten zwischen Kolben und Zylinderwand sowie zwischen Ringnutflanke und unterer Rail des Ölabstreifringes auf den Ölvolumenstrom durch den oberen Ein-/Auslass in Richtung der oberen Kolbenbereiche untersucht. Zusätzlich wurden verschiedene Nutgeometrien untersucht, indem die innere Fläche der Ölnut gegenüber der darüber liegenden Ringnutflanke in unterschiedlichen Winkeln angestellt wurde.

Während der Großteil der Ergebnisse numerischer Natur sind, werden auch einige Ergebnisse grafisch in Form von Querschnitten der Ölnut präsentiert. In der Simulation wird lediglich zwischen Auf- und Abwärtshub des Kolbens unterschieden. Abbildung 5-23 zeigt Querschnitte der Ölnut bei einer Drehzahl von $n = 1000 \text{ min}^{-1}$ während des Abwärtshubes. Analog zu den Ergebnissen dieser Arbeit ist auch hier Luft in blau und Öl in rot dargestellt.

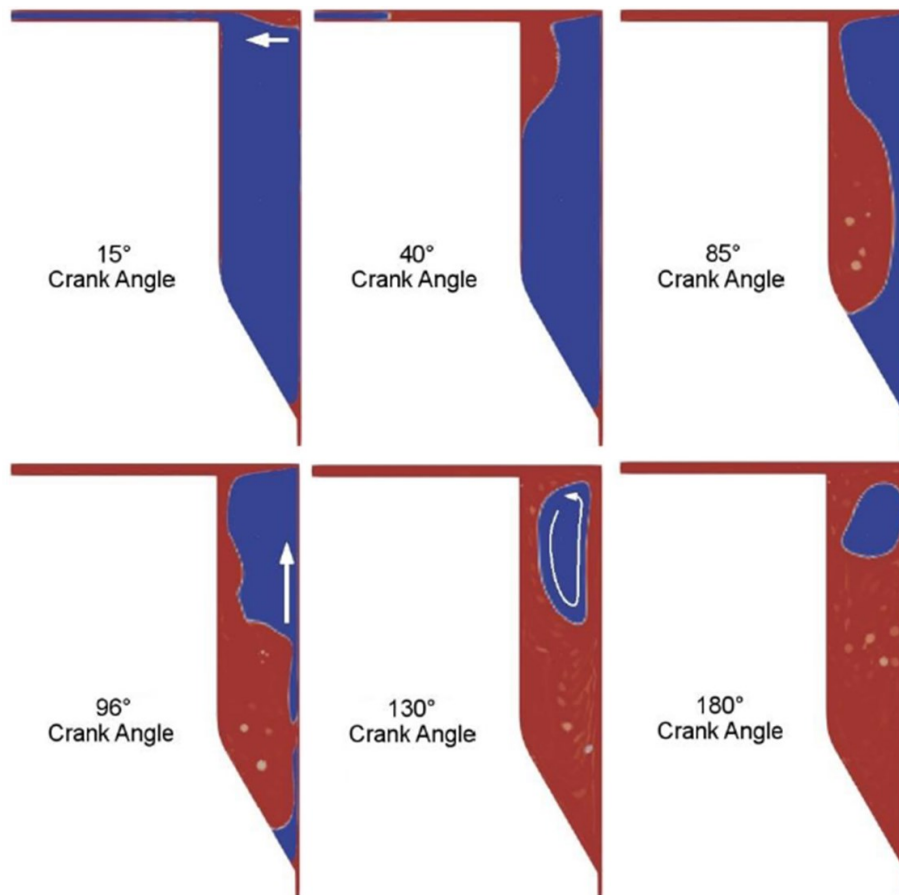


Abbildung 5-23: CFD-Simulation des Öltransports innerhalb der Ölnut während des Abwärtshubes für geschleppten Motorbetrieb bei 1000 min⁻¹ nach [91].

Die Kurbelwinkelangabe bezieht sich auf den ZOT, der als 0 °KW definiert ist. Während der Abwärtsbewegung sammelt sich Öl an der unteren Rail des Ölabstreifringes und verursacht einen Druckanstieg, durch den Öl in den schmalen Spalt zwischen Rail und unterer Ringnutflanke gedrückt wird (40 °KW nZOT). Im späteren Verlauf des Abwärtshubes (96 – 130 °KW nZOT) bildet sich außerdem eine ringförmige Strömung aus, durch die Öl in der Nut zirkuliert und so fortlaufend zu einem Druckanstieg am oberen Spalt beiträgt. Die Ergebnisse stimmen gut mit den Ergebnissen dieser Arbeit überein (siehe Abbildung 5-11), ein höheres Ölangebot auf der Zylinderwand sorgt hier aber für eine schnellere Füllung der Ölnut.

5.6 Zwischenfazit

Die Ölfilmverteilung am Kolben wurde mithilfe von LIF simultan auf DS und GDS eines optisch zugänglichen Einzylindermotors untersucht. Fluoreszenzlicht wurde von zwei CMOS-Kameras mit einer Bildwiederholrate von 5 kfps, oder einem Bild pro 2 °KW erfasst. Die Experimente wurden durch dreidimensionale CFD-Simulationen ergänzt. Die Randbedingungen der Simulation, insbesondere der Kontaktwinkel der Oberflächenbenetzung, wurden so eingestellt, dass die Ergebnisse bestmöglich mit den bildgebenden Messungen übereinstimmen. Die LIF-Aufnahmen und die Simulationsergebnisse wurden im geschleppten Motorbetrieb im Bereich unterhalb des Ölabstreifringes qualitativ miteinander verglichen. Die Ölströmung in der „kalibrierten“ Simulation korreliert gut mit den Experimenten, auch wenn die Ausprägung einzelner Ereignisse in der Simulation überschätzt werden.

Anders als das bildgebende Messsystem ist die Simulation nicht auf eine Sichtlinien-integrierte Darstellung der Kolbengruppe beschränkt. Letztere zeigt in der Tiefenebene voneinander getrennte Schichten von Öl und Luft in der Ölnut. In den Ölnut-Querschnitten der Simulation konnten verschiedene Phänomene, die in den LIF-Aufnahmen nicht sichtbar sind, im Detail untersucht werden: die Ausbildung einer kreisförmigen Bewegung von Öl in der Ölnut während des Abwärtshubes, Bridging von Öl auf die Zylinderlaufbahn und der Einschluss von Luftblasen in den Ölfilm. Die hohe Aufnahmezeit des bildgebenden Systems erlaubte die Nachverfolgung individueller Features wie eingeschlossener Luftblasen oder Strukturen innerhalb des Ölfilms. Durch die simultane Visualisierung beider Motorseiten konnten die Kolbensekundärbewegungen und die durch sie verursachten Öltransportvorgänge korreliert werden.

Der Abgleich von Simulation und Experiment erfolgt hier rein qualitativ. Während die durchgeführten qualitativen Messungen für die Beschreibung der gezeigten Phänomene und somit ein besseres Verständnis des Gesamtsystems ausreicht, ist eine genaue Bewertung des Füllstandes in der Nut schwierig. Eine quantifizierende Messtechnik würde einen genaueren Abgleich mit der Simulation ermöglichen, die ohnehin quantitative Ergebnisse in Form einer Ölfilm-Schichtdicke erzeugt.

Für eine Absolutwertkalibrierung muss die Messtechnik um eine Flachfeldkorrektur erweitert werden, um lokale Unterschiede in der Laser-Fluenz auszugleichen. Dazu bietet sich die Erstellung eines Flachfeldes durch Vollfüllung des Zylinders mit Öl an [125]. Im nächsten Schritt muss eine geeignete Kalibrieremethode entwickelt werden. In der Vergangenheit wurden bereits Filmdicken auf dem Kolbenhemd quantifiziert [24, 25], jedoch mit einem Messsystem mit geringerer Wiederholrate. Dabei wurde eine in situ Kalibrierung entwickelt, die die geometrische Form des Kolbenhemdes ausnutzt. Die Messtechnik kann zwar prinzipiell auch auf das hier verwendete LIF-System übertragen werden, ist jedoch im Bereich der Ölnut nicht anwendbar. Somit wäre eine ex situ Kalibrierung über verschiedene Ölfilmschichtdicken und anschließende Übertragung auf die Messumgebung, oder aber die Konstruktion einer passenden Kalibriervorrichtung notwendig, mit der Schichtdicken reproduzierbar direkt an der Zylinderlaufbahn appliziert werden können.

Eine sinnvolle Erweiterung der Simulation ist die Integration von Blowby-Strömungen aus dem Brennraum. Im gewählten geschleppten Betriebspunkt sind lediglich während des Expansionszyklus signifikante Unterschiede durch Blowby zwischen Experiment und Simulation sichtbar. Für befeuerten Motorbetrieb ist jedoch ein deutlich höherer Einfluss durch Blowby zu erwarten.

Öl, das den Ölabstreifring als wichtigstes Dichtelement gegen Ölemission passiert, gelangt in den Bereich des ersten und zweiten Kolbenrings. Hier kann es in geringen Mengen vorteilhaft sein, indem es die Reibkontakte zwischen den Ringen und den Ringnutflanken schmiert. Ölsammlungen in oberen beiden Ringnuten sind gleichzeitig aber auch mit dem Risiko von Ölemission in den Brennraum verbunden, beispielsweise durch das Einsetzen von reverse Blowby [133]. Dieser Effekt wird verstärkt, wenn Öl mit flüssigem Kraftstoff interagiert, und durch diesen verdünnt bzw. aus den Ringnuten ausgewaschen wird. Zur Untersuchung dieser Interaktion der Medien Öl und Kraftstoff entwickelte Müller [24, 109, 134] das SHSLIF-Messsystem (Simultaneous High-Speed-LIF), mit dem Kraftstoff und Öl in zwei spektral getrennten Detektionskanälen kurbelwinkelaufgelöst simultan visualisiert werden. Im Folgenden wird die Weiterentwicklung des Messsystems vorgestellt.

6 Quantitative Visualisierung von Kraftstoff-Wandfilmen

Die Optimierung von Einspritztimings zur Minimierung von Kraftstoffwandbenetzung erfordert ein detailliertes Verständnis des Gesamtsystems sowie der Verdampfungsprozesse von flüssigen Kraftstofffilmen. Zu diesem Zweck und zum Aufbau zuverlässiger Simulationsmodelle sind quantitative Informationen in Form von Kraftstofffilmdicken notwendig.

Im Folgenden wird die SHSLIF-Messtechnik aus [24] weiterentwickelt, um Kraftstofffilmdicken auf der Zylinderwand des optischen Motor bildgebend mit kHz-Wiederholraten zu messen. Zu diesem Zweck wird eine in-situ Kalibrieremethode sowie eine geeignete Flachfeldkorrektur vorgestellt und die ermittelten Kraftstofffilmdicken beispielhaft für zwei verschiedene Einspritzzeitpunkte verglichen.

Die Messung der Absorptionskoeffizienten im Spektralphotometer wurde an der Universität Duisburg-Essen durch Dr. Niklas Jüngst durchgeführt. Teile des Kapitels wurden in [135] veröffentlicht.

6.1 Versuchsaufbau

In den in Kapitel 5 vorgestellten Untersuchungen wurde Zylinder 1 eingesetzt, der eine optische Zugänglichkeit auf der DS und GDS des Motors bietet und so die Untersuchung von Öltransportphänomenen innerhalb der Kolbengruppe ermöglicht. In früheren Untersuchungen [24, 134] wurde ein ähnlicher Zylinder in Kombination mit einem zentralen Hohlkegel-Piezoinjektor eingesetzt. Das rotationssymmetrische Strahlbild des Piezoinjektors ermöglichte hier die Visualisierung von Kraftstoff-Wandfilmen, Ölfilmen sowie der Interaktion der beiden Medien auf DS bzw. GDS. Seit der Motorengeneration M260/M264 setzt Mercedes jedoch Mehrloch-Magnetinjektoren (auch Mehrlochventil oder MLV) statt Hohlkegel-Piezoinjektoren ein. Das MLV bringt den Kraftstoff in mehreren, räumlich voneinander getrennten Einzelstrahlen, auch als Strahlkeulen bezeichnet, in den Brennraum ein. Die bisherigen Ausführungen von Zylindern mit Fenstern in der Achse DS-GDS eignen sich aufgrund der Orientierung dieser Strahlkeulen nicht für die Untersuchung der Kraftstoff-Wandfilme. Wie in Abbildung 6-1 zu sehen ist, würde keine der sechs nummerierten Kraftstoffkeulen die Zylinderwand auf der DS oder GDS treffen und hier potentiell Kraftstoff-Wandfilme verursachen.

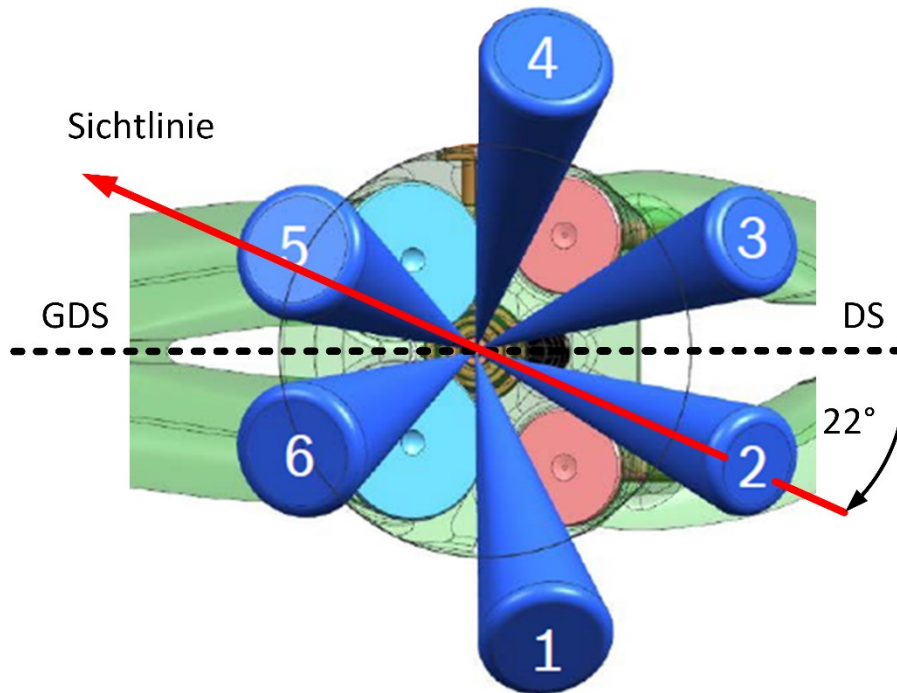


Abbildung 6-1: Strahlbild des zentralen Mehrlochventils (Sicht von unten auf den Zylinderkopf).

Zu diesem Zweck wurde der optische Zylinder 3 entwickelt (vgl. Kapitel 4.2). Der Zylinder ist aus drei Einzelteilen aufgebaut: der Kopfplatte, dem eigentlichen Zylinderrohr und dem Unterteil. Die Kopfplatte und das Unterteil fixieren im montierten Zustand das Zylinderrohr durch eine Klemmverbindung. Die Konstruktion erlaubt vor dem Einbau in den Einzylindermotor eine freie Rotation des Zylinderrohres und somit auch der nutzbaren Sichtlinie. Voruntersuchungen haben gezeigt, dass die Kraftstoffwandbenetzung in der vorliegenden Konfiguration auf der DS ausgeprägter ist als auf der GDS. Dies ist zum einen auf die Ausrichtung der Strahlkeulen, sprich den steileren Austrittswinkel der Kraftstoffkeulen 2 und 3 im Vergleich zu den übrigen Kraftstoffkeulen, zum anderen auf die Ladungsbewegung im Inneren des Brennraumes zurückzuführen. Für die vorliegenden Untersuchungen wurde das Zylinderrohr um 22° gegen den Uhrzeigersinn in Bezug auf die Achse DS-GDS verdreht, um die Kraftstoffkeule 2 und eines der Fenster aufeinander auszurichten (vgl. rote Sichtlinie in Abbildung 6-1).

6.1.1 Optischer Versuchsaufbau

Das Schmieröl und der Kraftstoff werden mit verschiedenen Farbstoffen bzw. Tracern fluoreszenzmarkiert und bei zwei verschiedenen Wellenlängen durch Laserstrahlung zur Fluoreszenz angeregt. Das Fluoreszenzlicht wird mithilfe eines dichroitischen Spiegels spektral voneinander getrennt und durch zwei identische Hochgeschwindigkeits-Kameras (Phantom v611) detektiert. Der hier verwendete optische Aufbau ist schematisch in Abbildung 6-2 gezeigt. Eine detaillierte Beschreibung des Aufbaus und der Entwicklung des optischen Systems erfolgen in [24, 109]

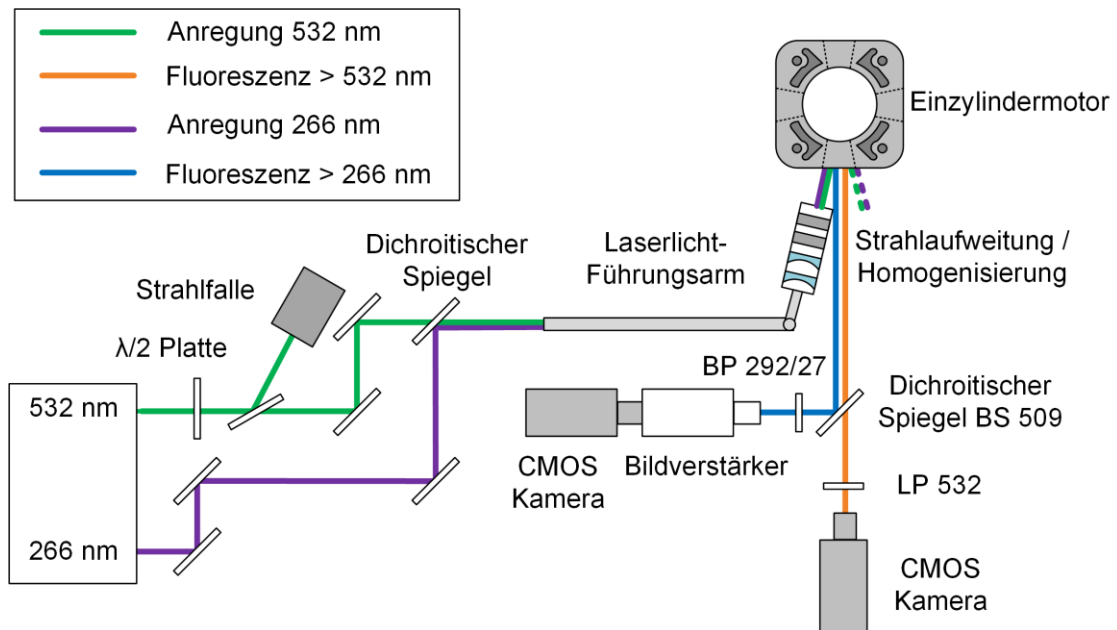


Abbildung 6-2: Optischer Aufbau des SHSLIF-Systems (Nicht beschriftete Komponenten sind Umlenkspiegel).

Ein Dioden-gepumpter Nd:YAG Laser (Edgewave InnoSlab IS 400) emittiert aus zwei separaten Ausgängen simultan Lichtpulse der Wellenlängen 532 nm und 266 nm mit einer Pulsdauer von 10 ns. Die maximale Pulsenergie beträgt bei der maximalen Repetitionsrate von 10 kHz 8 mJ bei 532 nm und 0,24 mJ bei 266 nm. Der Laser unterstützt höchsten 300 aufeinanderfolgende Laserpulse bei einem maximalen Auslastungsgrad (engl. duty cycle) von 10 %, d.h. nach 300 abgegebenen Laserpulsen muss die Lichtemission für eine Dauer, die 2700 Laserpulsen entspricht, unterbrochen werden. Das begrenzende Bauteil ist dabei der BBO-Kristall (β -Bariumborat-Kristall) des Lasers, der durch Frequenzverdopplung einen Teil der Strahlung von 532 nm in 266 nm überführt. Die separaten Strahlen werden mithilfe von Spiegeln umgelenkt, durch einen dichroitischen Spiegel zusammengeführt und kombiniert in einen Laserlichtführungsarm (LaVision) eingekoppelt. Am Ausgang des Laserlichtführungsarmes werden beide Strahlen durch zwei konkave zylindrische Linsen ($f = -20$ mm / $f = -50$ mm) in zwei Raumrichtungen aufgeweitet und homogenisiert (Kombination aus einem Mikrolinsen-Array [136] und einem diffraktiven optischen Element [137]), um das gesamte Fenster des Einzylindermotors planar zu beleuchten. Die Laser-Fluenz auf der Innenseite des Fensters beträgt $0,012$ mJ/cm². Der Laser wird im Experiment mit einer Repetitionsrate von 9 kHz betrieben, was bei der gewählten Drehzahl einem Bild pro °KW entspricht, sprich die Kamera zeichnet simultan dazu Bilder mit einer Wiederholrate von 9000 fps (9 kfps) auf.

Die Pulsenergien werden durch die Temperatur der Kristalle zur Frequenzverdopplung (532 nm), beziehungsweise Frequenzvervierfachung (266 nm) angepasst. Im vorliegenden Aufbau sind die Kristall-Temperaturen so eingestellt, dass die maximale Pulsenergie von 0,24 mJ im UV (266 nm) erreicht wird. In dieser Konfiguration ist die Pulsenergie bei 532 nm höher als benötigt. Mithilfe eines im Brewster-Winkel angeordneten Dünnpolarisators und einer vorgeschalteten Verzögerungsplatte im Strahlengang des grünen Lasers wird daher ein Teil der 532 nm Strahlung in eine Strahlfalle abgelenkt.

Zur Visualisierung des Öls wird der Laserfarbstoff Pyrromethen 567 (vgl. Kapitel 5) in einer Konzentration von 0,01 mmol/Liter (3,2 mg/Liter) in Polyalphaolefin beibehalten. Als Kraftstoff wird ein

speziell entwickelter Multi-Komponenten-Kraftstoff-Surrogat (MKKS) verwendet, der ähnliche Verdampfungseigenschaften verglichen mit kommerziellem Kraftstoff aufweist [109]. Außerdem fluoresziert der MKKS bei einer Anregungswellenlänge von 266 nm nicht. Dem MKKS wird Anisol, das als geeigneter Tracer zur Visualisierung von flüssigen Kraftstoff-Schichten in optisch zugänglichen Motoren ermittelt wurde [24, 109], in einer Konzentration von 0,5 Massen-% (33 mmol/Liter) beigemischt. In Abbildung 6-3 ist die spektrale Auslegung des SHSLIF-Messsystems dargestellt [24]. Neben Anisol ist als Referenz auch das Emissionsspektrum von Toluol dargestellt, das einen weiteren potentiellen Tracer bei der Entwicklung des Messsystems darstellte [31, 106].

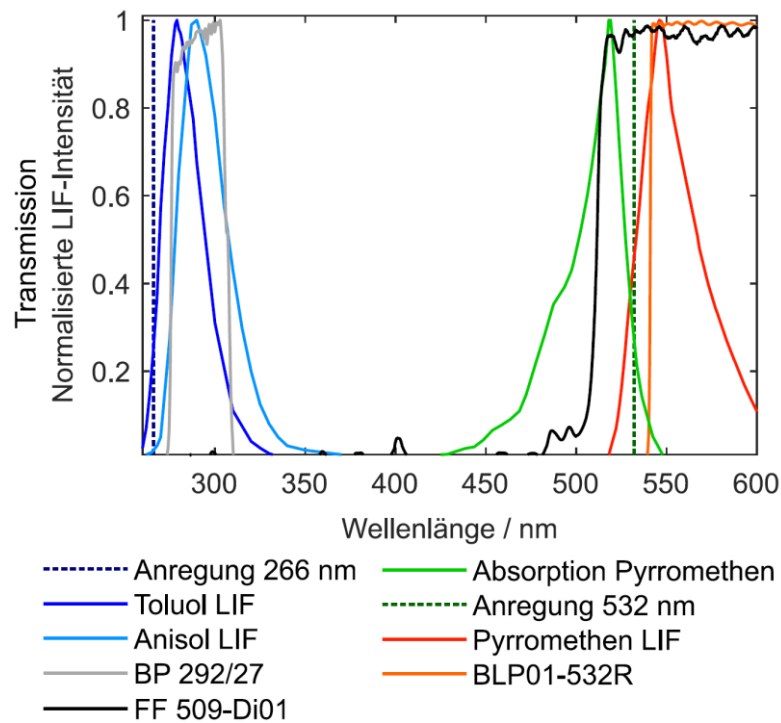


Abbildung 6-3: Spektrale Auslegung des SHSLIF-Messsystems nach [24]. Emissionsspektren von Anisol und Toluol nach Anregung bei 266 nm aus [138]. Absorptions- und Emissionsspektrum von P567 aus [130]. Transmissionsspektren der Filter aus [131, 139], des dichroitischen Spiegels aus [140].

Im Detektionspfad trennt ein dichroitischer Strahlteiler (Semrock FF509-FDi01) das Fluoreszenzlicht des Öl-Farbstoffes und des Kraftstoff-Tracers. Die Anisol-Fluoreszenz des Kraftstoffes wird vom Strahlteiler reflektiert, während das Fluoreszenzlicht des Öl-Farbstoffes den Strahlteiler transmittiert. In den Strahlengängen beider Detektionskanäle wird gestreutes oder reflektiertes Anregungslicht durch einen geeigneten Filter abgetrennt: für die Öl-Fluoreszenz durch einen Langpassfilter (Semrock BLP01-532R) und für die Kraftstoff-Fluoreszenz durch einen Bandpassfilter (Semrock FF01-292/27). Die Öl-Fluoreszenz wird durch eine Hochgeschwindigkeits-CMOS-Kamera (Vision Research Phantom v611) detektiert, die mit einem kommerziellen Objektiv ($f = 105 \text{ mm}$, $f/2.8$) ausgerüstet ist. Kraftstoff-Fluoreszenz wird durch eine identische CMOS Kamera in Kombination mit einem UV-Objektiv ($f = 100 \text{ mm}$, $f/2.8$) und einem Hochgeschwindigkeits-Bildverstärker (LaVision High-Speed IRO) detektiert.

Im Folgenden wird die Mischung des MKKS und Anisol vereinfachend als „Kraftstoff“ und die Mischung von Schmieröl und Pyrromethen 567 als „Öl“ bezeichnet. Die jeweiligen Detektionskanäle werden als „Kraftstoff-Kanal“ und „Öl-Kanal“ bezeichnet. Die projizierte Pixelgröße im Öl-Kanal beträgt 95×95

$\mu\text{m}/\text{Pixel}$ und im Kraftstoff-Kanal $90 \times 90 \mu\text{m}/\text{Pixel}$. Abbildung 6-4 zeigt eine Fotografie des optischen Aufbaus auf der DS des optischen Motors. Der Laserlichtführungsarm verdeckt teilweise den optischen Zugang, dessen Position aber durch die rote Markierung angedeutet ist.

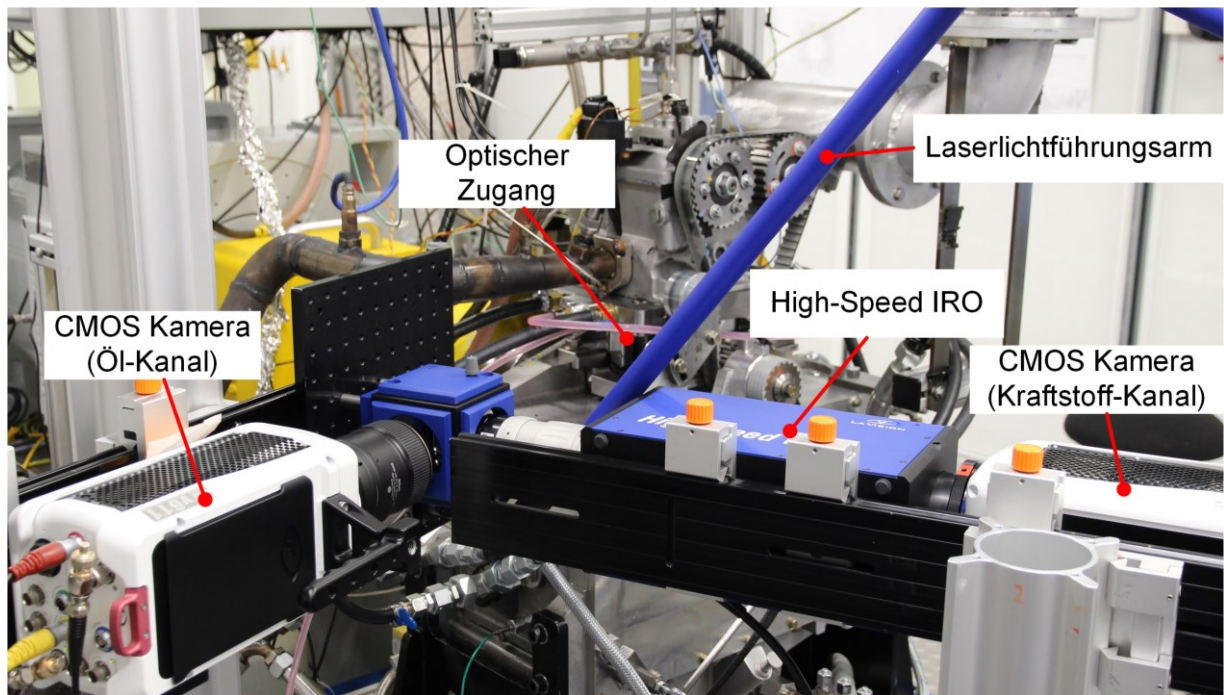


Abbildung 6-4: Aufbau der optischen Messtechnik am optisch zugänglichen Einzylindermotor.

6.1.2 Bildverarbeitung

Durch eine inhomogene Intensitätsverteilung des Anregungs-Laserlichtes und lokale Unterschiede in den Detektionseffizienzen der Kamera ergeben sich Unterschiede in der Systemantwort der optischen Messtechnik. Zur Korrektur dieser Unterschiede werden die Einzelaufnahmen durch eine Flachfeld-Aufnahme dividiert. Zur Erzeugung des Flachfeldes wird das Zylinderrohr vom Kurbelgehäuse abgedichtet und anschließend vollständig mit dem Kraftstoff gefüllt, der im Versuch eingesetzt wird. Die Flachfelderzeugung durch Totalabsorption des Anregungslichtes wurde in [24, 125] demonstriert. Bevor der Zylinder mit Kraftstoff gefüllt wird, wird das Bauteil gründlich gereinigt und eine Hintergrundaufnahme erstellt. Für die Flachfeld- (c) und Hintergrundaufnahme (b), die in Abbildung 6-5 gezeigt sind, wird jeweils ein Ensemblemittel aus 300 Bildern erstellt. Das Flachfeld (c) wird im Gegensatz zu den Motorversuchen bei Raumtemperatur aufgenommen und zur Korrektur aller Bilder des Kraftstoff-Kanals verwendet. Im Öl-Kanal wird keine Flachfeldkorrektur durchgeführt, da die Durchführung der Messungen und die anschließende Reinigung der Bauteile einen erheblichen Mehraufwand darstellen. Außerdem sind die Inhomogenitäten der Laserintensität im Öl-Kanal weniger ausgeprägt als im Kraftstoff-Kanal.

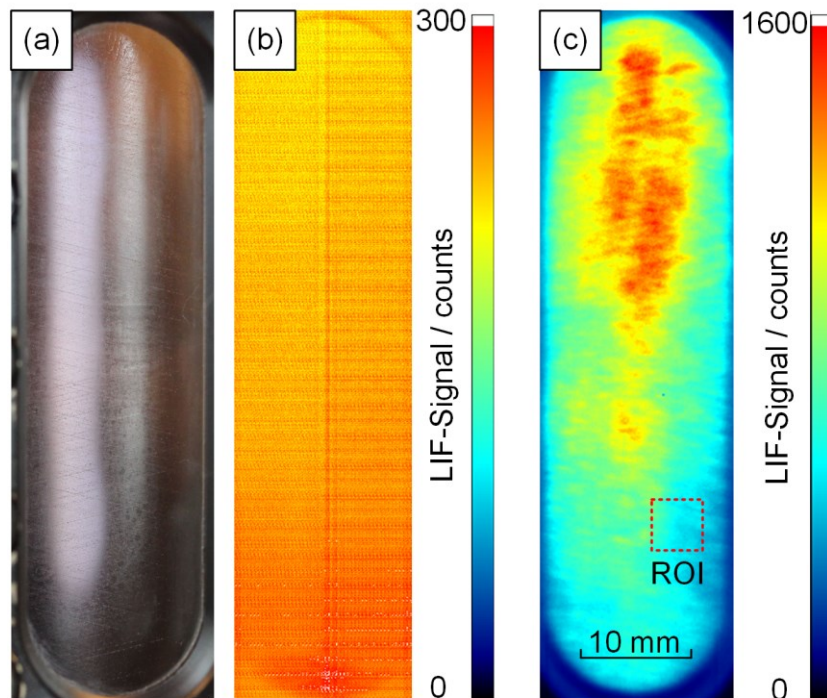


Abbildung 6-5: (a): Fotografie des Zylinderfensters. (b): Ensemblemittel der Hintergrundaufnahme. (c): Ensemblemittel der hintergrundkorrigierten Flachfeld-Aufnahme. Der markierte ROI wird im Text erläutert.

In früheren Untersuchungen am Einzylindermotor [24, 25] zeigte sich, dass der optische Zugang im Motorversuch relativ zum bei stehendem Motor erstellen Flachfeld um einige mm verschoben ist. Dadurch ergeben sich an den horizontalen Rändern des optischen Zugangs nach der Flachfeldkorrektur optische Artefakte in Form einer streifenförmigen Signalerhöhung bzw. Signalverringering. Zusätzlich induziert diese Verschiebung im mittleren Bereich des optischen Zugangs eine Unsicherheit durch eine fehlerhafte Flachfeldkorrektur. Der Einzylindermotor ist durch Federn schwimmend im Prüfstandbett gelagert und erlaubt so eine geringfügige Bewegung in alle drei Raumrichtungen. Als Ursache für die Verschiebung des Motors im Betrieb liegt daher das an der Kardanwelle anliegende Drehmoment des Elektromotors nahe. Die Motorverschiebung wurde daher vor der eigentlichen Messkampagne untersucht. Dazu wurde eine mechanische Messuhr mit einer Skalierung von 10 μm unabhängig vom Motor durch ein Stativ an einem mit dem Prüfstandbett verbundenen Halter befestigt und nacheinander in den drei Raumrichtungen nahe dem optischen Zugang am Einzylindermotor arretiert. Die Messuhr wurde dann bei stehendem Motor genullt und durch eine verfahrbare, im Prüfstand angebrachte Kamera im befeuerten Motorbetrieb abgelesen. Abbildung 6-6 zeigt den Aufbau beispielhaft anhand einer Raumrichtung.

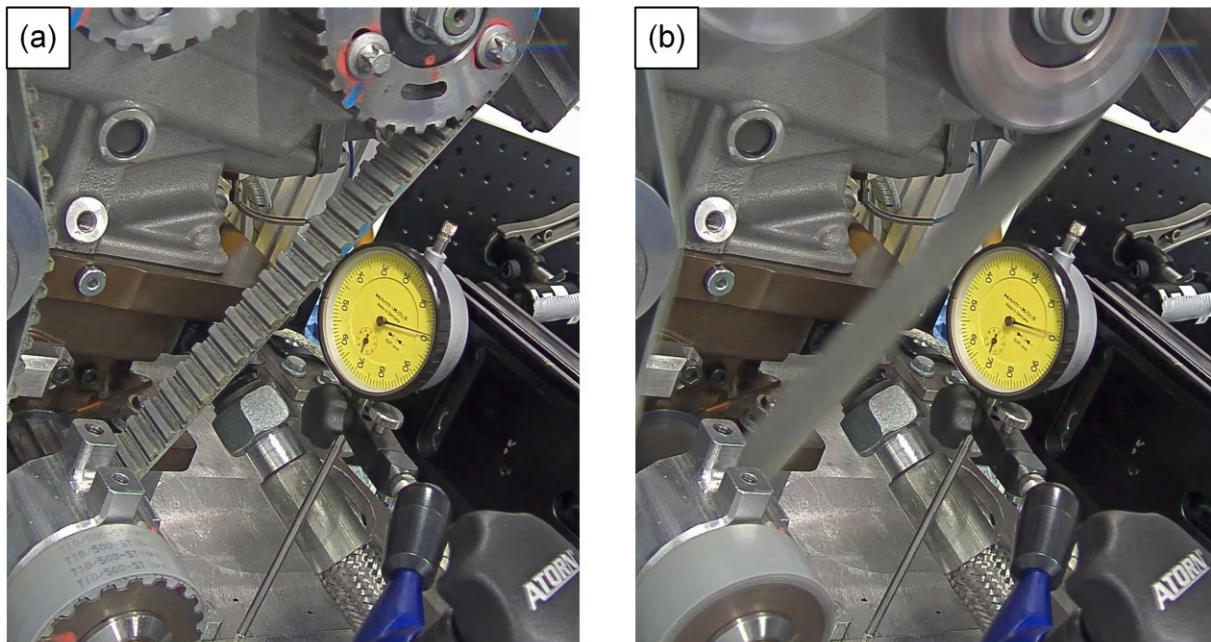


Abbildung 6-6: Bestimmung der Motorverschiebung durch eine mechanische Messuhr am (a): stehenden Motor und (b): befeuerten Motor.

Durch die geringe Aufnahmezeit der Prüfstandkamera konnte anhand der Bewegungsunschärfe des Messuhr-Zeigers auch eine Schwankungsbreite für die Motorverschiebung abgeschätzt werden. Für die drei Raumrichtungen wurden Motorverschiebungen zwischen 10 und 50 μm mit geringer Schwankung ermittelt, was deutlich geringer als die zuvor beobachtete Verschiebung von einigen Millimetern ist. Im weiteren Verlauf der Voruntersuchungen stellte sich heraus, dass die zuvor beobachtete Verschiebung des optischen Zugangs durch die Montage von Nebenaggregaten, hauptsächlich durch Anbringen des Abgasrohrs und der Kraftstoffleitung zur über dem Motor liegenden Kraftstoff-Rail, verursacht wird und somit statisch ist. Daher wurden zwei separate Flachfelder aufgezeichnet: eins mit demontiertem Zylinderkopf, das für die Absolutwertkalibrierung (siehe Kapitel 6.2) verwendet wird und ein zweites, für das nach Befüllung des Zylinders mit Kraftstoff der Zylinderkopf und alle Nebenaggregate des Motors montiert wurden, das zur Korrektur der Motorversuche verwendet wird.

Müller zeigt in seinen Untersuchungen [24, 109], dass das im Motor eingesetzte Öl bei Anregung durch 266 nm optisches Übersprechen (cross-talk) in den Kraftstoff-Kanal verursachen kann, wenn eine Durchmischung mit Kraftstoff stattfindet. Dieser cross-talk kann schon bei geringen Konzentrationen von Kraftstoff im Öl signifikant sein. Daher wird für die Aufnahmen im Kraftstoff-Kanal der Motorversuche keine gemittelte Hintergrundaufnahme verwendet, sondern eine bei geschlepptem Motorbetrieb aufgezeichnete Bilderserie. Auf diese Weise wird von jedem Bild, in dem eine Kraftstoffeinspritzung stattfindet, ein Bild an derselben Kurbelwinkelposition, jedoch ohne Kraftstoffeinspritzung subtrahiert. Die Hintergrundkorrektur ist in Abbildung 6-7 demonstriert: Abbildung 6-7 (a) zeigt eine Beispielaufnahme im Kraftstoff-Kanal 100 °KW vZOT, nachdem Kraftstoff eingespritzt wurde. Im Bereich des Brennraumes (siehe Bezeichnungen links) detektiertes LIF-Signal stammt von flüssigen Kraftstofffilmen auf dem Saphirfenster, während LIF-Signal im Bereich des Kolbens durch cross-Talk des Öls verursacht wird. Abbildung 6-7 (b) zeigt die zugehörige Hintergrundaufnahme zum selben Zeitpunkt eines geschleppten Motorzyklus. Aufgrund der fehlenden Kraftstoffeinspritzung ist das

detektierte Signal im Brennraum niedrig. Im Bereich des Kolbens hingegen wird hohes LIF-Signal aufgrund von cross-talk detektiert. Abbildung 6-7 (c) zeigt Bild (a) nach der Subtraktion des Hintergrundes (b). Das durch flüssigen Kraftstoff verursachte Signal ist nach wie vor sichtbar, wohingegen durch Öl verursachtes Signal im Bereich des Kolbens signifikant reduziert wurde. Die Ölverteilung innerhalb der Kolbengruppe ändert sich jedoch aufgrund von Blowby Strömung und Öltransportphänomenen ständig und kann sich zwischen zwei Einzelzyklen lokal unterscheiden, daher konnte cross-talk durch die gewählte Hintergrundkorrektur nicht vollständig beseitigt werden.

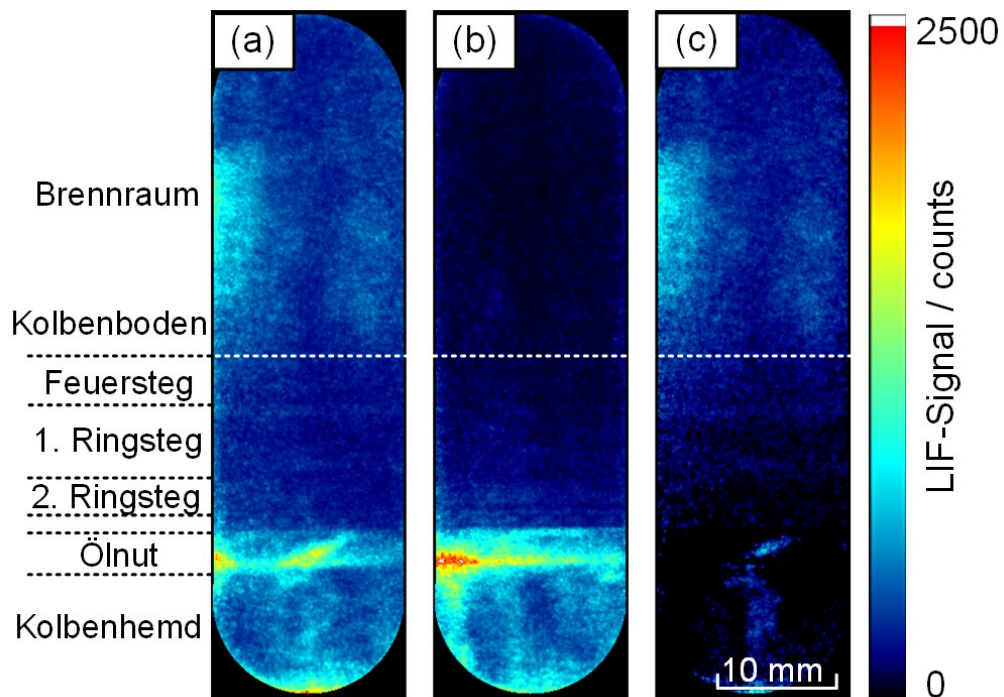


Abbildung 6-7: Hintergrundkorrektur der Bilder im Kraftstoff-Kanal anhand einer Beispielaufnahme 100 °KW vZOT. (a): Beispielaufnahme nach Kraftstoffeinspritzung (b): Hintergrundaufnahme ohne Kraftstoffeinspritzung (c): Hintergrundkorrigierte Beispielaufnahme.

Die Absolutwertkalibrierung (siehe Kapitel 6.2) und die Motorexperimente wurden mit verschiedenen Gain-Einstellungen des Bildverstärkers durchgeführt. Um die daraus resultierenden Unterschiede im detektierten LIF-Signal zu berücksichtigen, wird der Zusammenhang zwischen Bildverstärker-Gain und detektiertem LIF-Signal für den Versuchsaufbau ermittelt. Dazu werden Flachfeld-Aufnahmen bei Gain-Einstellung von 48 bis 64 aufgenommen. Um numerische Werte zu erhalten, werden die Bilderserien ensemble-gemittelt und ein 60 x 60 Pixel großer Auswertebereich (engl. ROI, region of interest) wird räumlich gemittelt (vgl. Abbildung 6-5 (c)). Abbildung 6-8 zeigt den ermittelten Zusammenhang zwischen LIF-Signal und Gain des Bildverstärkers. Für die Regressionskurve wurden lediglich die LIF-Signal Werte der Gains 46 bis 61 berücksichtigt, da für höhere Gain-Werte der Sensor im gewählten ROI teilweise gesättigt war. Die Regressionskurve approximiert die gemessenen Datenpunkte dennoch mit einem Bestimmtheitsmaß von 99,9 % gut. Die Regressionsfunktion wurde anschließend verwendet, um Werte für Bildverstärker-Gains über 61 zu bestimmen. Die Gain-Funktion deckt sich mit den Herstellerangaben [71]

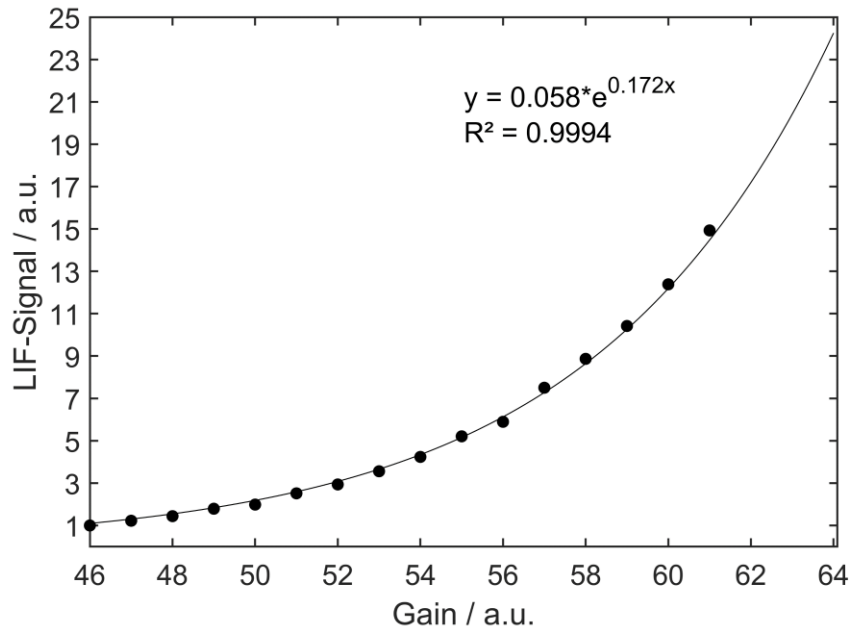


Abbildung 6-8: Detektiertes LIF-Signal als Funktion des Bildverstärker-Gains. Das LIF-Signal ist auf den Wert bei Gain 46 normiert.

6.2 Absolutwertkalibrierung der LIF-Messtechnik

Gemäß den Empfehlungen von Schulz et al. [112] erfolgt die Absolutwertkalibrierung mithilfe verschiedener Schichtdicken des Kraftstoffes. Die gebräuchlichste Methode, dünne Filme bekannter Dicke einzustellen, ist die Verwendung von Präzisionsfolien in einer geeigneten Kalibriervorrichtung [105, 106, 113, 141]. Diese ist jedoch nur schwer an einer gekrümmten Oberfläche wie der Innenfläche des Saphirfensters anwendbar. Eine ex-situ Kalibrierung außerhalb des Motors ist wiederum schwer auf den Messaufbau übertragbar; dazu müssten sowohl die Laser-Fluenz, als auch Effekte wie z.B. die Absorption des Saphir-Fensters im UV-Wellenlängenbereich genau reproduziert werden. Für eine belastbare Kalibrierung müssen außerdem verschiedene Schichtdicken vermessen werden, was einen Austausch der Präzisionsfolien voraussetzt. Im vorliegenden Versuchsaufbau muss für die Flachfeldaufnahme der Zylinderkopf demontiert werden, um den Zylinder abzudichten und mit Kraftstoff zu befüllen, was vor den eigentlichen Motorversuchen geschieht. Eine nachträgliche Änderung des optischen Aufbaus, beispielsweise durch Kontakt mit dem Laserlichtführungsarm, ändert potentiell auch die Intensitätsverteilung des Anregungslichtes und macht die Aufnahme eines neuen Flachfelds notwendig. Daher ist eine Kalibrierungsprozedur mit möglichst wenig Arbeitsschritten wünschenswert. Mori et. al [110] nutzten eine Kalibriervorrichtung mit keilförmigem Spalt, um einen definierten Schichtdickenverlauf einzustellen. Auf diese Weise war es möglich, verschiedene Schichtdicken mit einer Einzelmessung abzubilden und eine Kalibrierkurve zu ermitteln.

Um an der gekrümmten Zylinderoberfläche einen definierten Schichtdickenverlauf einzustellen wird hier eine plano-konvexe Linse als Hintergrundmaterial genutzt. Durch die Auswahl einer Linse mit einem Radius, der etwas geringer als der Zylinderinnenradius ist und die Überlagerung der beiden Radien durch das Anpressen der Linse gegen die Innenseite des Fensters kann so eine radial zunehmende Spaltbreite um den Kontaktpunkt der Linse und des Fensters erzeugt werden. Der Spalt wird

anschließend mit Kraftstoff gefüllt und dient als Kalibriervolumen. Es wird eine unbeschichtete Linse aus Quarzglas mit einem Außenradius von $r = 34,5 \text{ mm}$ verwendet (Thorlabs LA4725 [142]).

6.2.1 Kalibriervorrichtung

Um die Linse an die Fensterinnenseite anzupressen wurde eine Kalibriervorrichtung entwickelt, die in Abbildung 6-9 gezeigt ist.

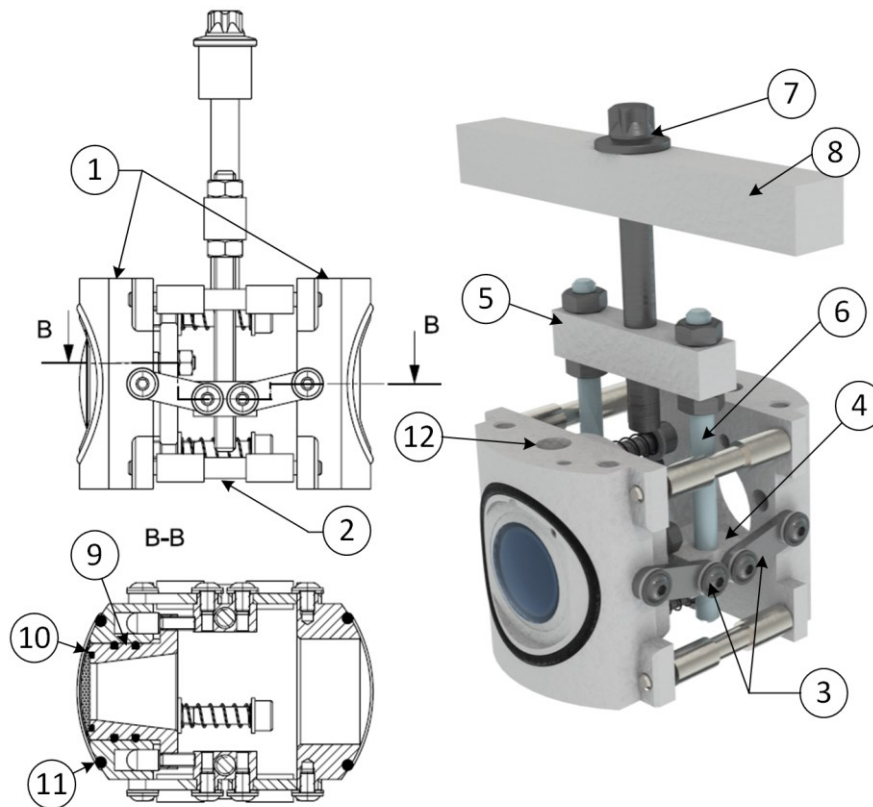


Abbildung 6-9: Technische Zeichnung (links) und Renderbild der Kalibriervorrichtung (rechts). Nummerierte Bauteile werden im Text erläutert.

Die Kalibriervorrichtung ist symmetrisch aus zwei gegenüberliegenden Rahmen (1) aufgebaut, die einen Außenradius von $41,5 \text{ mm}$ aufweisen, um mit Zylinderdurchmesser von 83 mm übereinzustimmen. Die Rahmen werden durch zwei Distanzstangen (2) in Position gehalten und sind auf jeder Seite durch zwei Scharniere (3) mit einem zwischenliegenden Verbindungsstück (4) miteinander verbunden. Die Verbindungsstücke sind wiederum starr mit dem Zwischenblock (5) durch zwei Gewindestangen (6) verbunden. Der Zwischenblock weist in der Mitte eine Gewindebohrung auf, in die eine Schraube (7) eingeschraubt ist, die durch eine Bohrung in Grundplatte (8) geführt wird. Wenn die Grundplatte arretiert ist, wird auf diese Weise durch das Anziehen der Schraube der Zwischenblock und somit auch der Zwischenblock angehoben. Dadurch richten sich wiederum die Scharniere auf und die zwei Rahmen bewegen sich, durch die Distanzstangen geführt, nach außen. In beide Rahmen kann ein Linsenhalter (9) eingesetzt werden. Die plankonkave Linse wird mit der flachen Seite auf einen O-Ring (10) platziert, der die Rückseite des Kalibrierungsvolumens abdichtet. Der Linsenhalter ist von hinten durch zwei federbelastete Schrauben fixiert, die den Linsenhalter nach außen drücken. Gleichzeitig fixieren zwei von der Oberseite der Kalibriervorrichtung zugängliche, konisch zulaufende Stiftschrauben den

Linsenhalter. Auf diese Weise ist die radiale Position der Linsen auch nach dem Einsetzen der Kalibriervorrichtung einstellbar, indem die Stiftschrauben ein- oder ausgeschraubt werden.

Die Kalibriervorrichtung wird in zwei Stufen eingesetzt. Zuerst wird die Vorrichtung in den Zylinder abgesenkt. Zu diesem Zeitpunkt ist der Linsenhalter gerade genug eingefahren, sodass die Linse die Zylinderoberfläche nicht berührt, um eine Beschädigung der Linsenoberfläche zu vermeiden. Die Position der Kalibriervorrichtung innerhalb der Zylinderbohrung wird im Vorfeld durch die Schraube (7) eingestellt. Die Schraube wird anschließend angezogen, sodass sich die Rahmen (1) der Kalibriervorrichtung nach außen bewegen, bis der äußere O-Ring (11) durch die Zylinderoberfläche ausreichend zusammengepresst wird, um das Kalibrierungsvolumen nach außen abzudichten. Anschließend werden die Madenschrauben gelöst, sodass die Federn den Linsenhalter gegen das Fenster drücken und der Mittelpunkt der Linse in Kontakt mit der Fensteroberfläche steht. Analog zum Flachfeld wird eine „trockene“ Hintergrundaufnahme der Kalibriervorrichtung aufgenommen. Das Kalibrierungsvolumen wird dann durch die Einfüllöffnung (12) mithilfe einer Spritze mit Kraftstoff befüllt.

6.2.2 Kalibrierprozess

Während der Kalibrierung wird eine Adapterplatte anstelle des Zylinderkopfes montiert, um mithilfe der externen Konditioniereinheit eine definierte Motortemperatur von 30 °C sicherzustellen, um die Bedingungen der Motorversuche abzubilden. Abbildung 6-10 (a) zeigt eine Fotografie der Kalibriervorrichtung im Zylinder vor der Befüllung des Kalibriervolumens mit Kraftstoff. Die gestrichelte Linie zeigt die Position der Linse an. In Abbildung 6-10 (b) ist das Ensemblemittel der Hintergrundaufnahmen gezeigt. Die durch Pfeile markierten Bereiche hohen LIF-Signals werden durch Kraftstoff-Rückstände verursacht, da nur der für die Kalibrierung relevante Bereich zwischen Messreihen gründlich gereinigt wurde. Im Bereich der Linse ist nach der Reinigung ein gleichmäßiges, niedriges LIF-signal zu sehen. In Abbildung 6-10 (c) ist das hintergrundkorrigierte Ensemblemittel der Kalibrier-Aufnahme gezeigt.

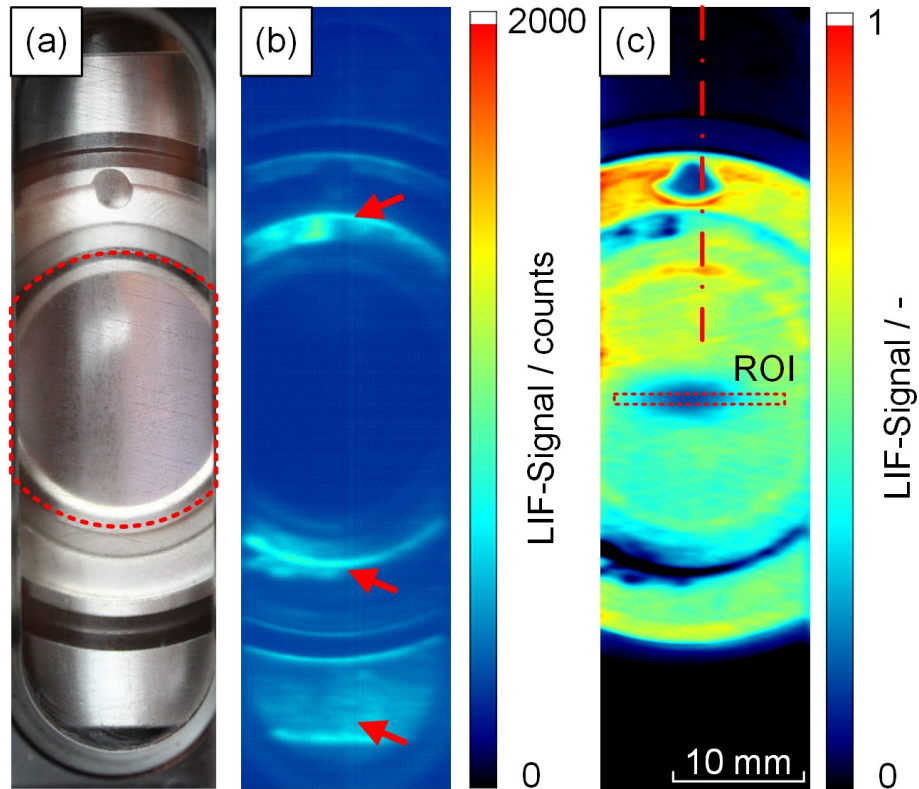


Abbildung 6-10: (a): Fotografie der Kalibriervorrichtung im Zylinder, aufgenommen durch den optischen Zugang (b): Hintergrundaufnahme der gereinigten Kalibriervorrichtung (c): Hintergrund- und flachfeldkorrigierte Aufnahme der mit Kraftstoff gefüllten Kalibriervorrichtung. Mit Linien und Pfeilen markierte Features werden im Text erläutert.

Bei einer in horizontaler Richtung perfekt zentrierten Linse wäre die maximale Kraftstoffschichtdicke an den horizontalen Rändern des optischen Zugangs $185\ \mu\text{m}$. Bei der Kalibrierung wurde lediglich der Schichtdickenverlauf in horizontaler Richtung berücksichtigt. In vertikaler Richtung ist der Gradient im Vergleich dazu steil, sodass in einer Distanz von $8\ \text{mm}$ vom Mittelpunkt der Linse Schichtdicken von mehr als $1000\ \mu\text{m}$ vorliegen. Wie die Strich-Punkt-Linie in Abbildung 6-10 deutlich macht, ist die Linse im Versuch leicht zu der Mittelachse des optischen Zugangs versetzt. Dieser Versatz ist zum einen darauf zurückzuführen, dass die Ausrichtung händisch durchgeführt wird, zum anderen auf eine Rotation der Kalibriervorrichtung beim Anziehen der Schraube. Außerdem ist das LIF-Signal in der oberen Hälfte der Kalibrierlinse höher als in der unteren Hälfte, was darauf hindeutet, dass die Linse in vertikaler Richtung leicht geneigt ist.

Für die Kalibrierung wird das LIF-Signal in dem in Abbildung 6-10 (c) angezeigten ROI räumlich über eine Höhe von drei Pixeln gemittelt. Abbildung 6-11 zeigt den Verlauf des LIF-Signals im ROI der Kalibrieraufnahme (blaue Linie) im Vergleich zur berechneten Spaltbreite zwischen Linse und Fenster (gestrichelte schwarze Linie). Auf der x-Achse ist die horizontale Distanz von der Mittelachse des optischen Zugangs gezeigt. Der gewählte ROI hat eine horizontale Ausdehnung von 140 Pixeln, was einer Distanz von $6.3\ \text{mm}$ von der Mittelachse des optischen Zugangs in jede Richtung, beziehungsweise einer Spaltbreite von $100\ \mu\text{m}$ an den Rändern des ROI entspricht. Die berechnete Spaltbreite ist jedoch für eine perfekt zentrierte Linse gezeigt. Das Minimum des LIF-Signals, sprich der Kontaktpunkt zwischen Linse und Fenster, ist aufgrund des zuvor beschriebenen Versatzes der

Kalibriervorrichtung, und somit der Linse, in negativer x-Richtung verschoben. Da die Verschiebung der Linse auf der gekrümmten Fensteroberfläche geschieht, verursacht dies auch eine Rotation der Linse relativ zur Detektionsebene. Außerdem wird im Minimum noch ein hohes LIF-Signal detektiert, das bis zu 40 % des LIF-Signals an den Rändern des ROI beträgt. Dieser Signal-Versatz wird durch optisches „Verschmieren“ ausgelöst, das auf den Hochgeschwindigkeits-Bildverstärker zurückzuführen ist. Das Phänomen wird in Kapitel 6.2.4 diskutiert. Zusätzlich zu der Photophysik der Fluoreszenz müssen daher ein seitlicher Versatz und eine Rotation der Linse sowie ein Minimalsignal ungleich Null bei der Zuordnung des geometrischen Spaltbreite zum gemessenen Fluoreszenzsignal berücksichtigt werden. Die Gleichungen dafür werden im Folgenden entwickelt.

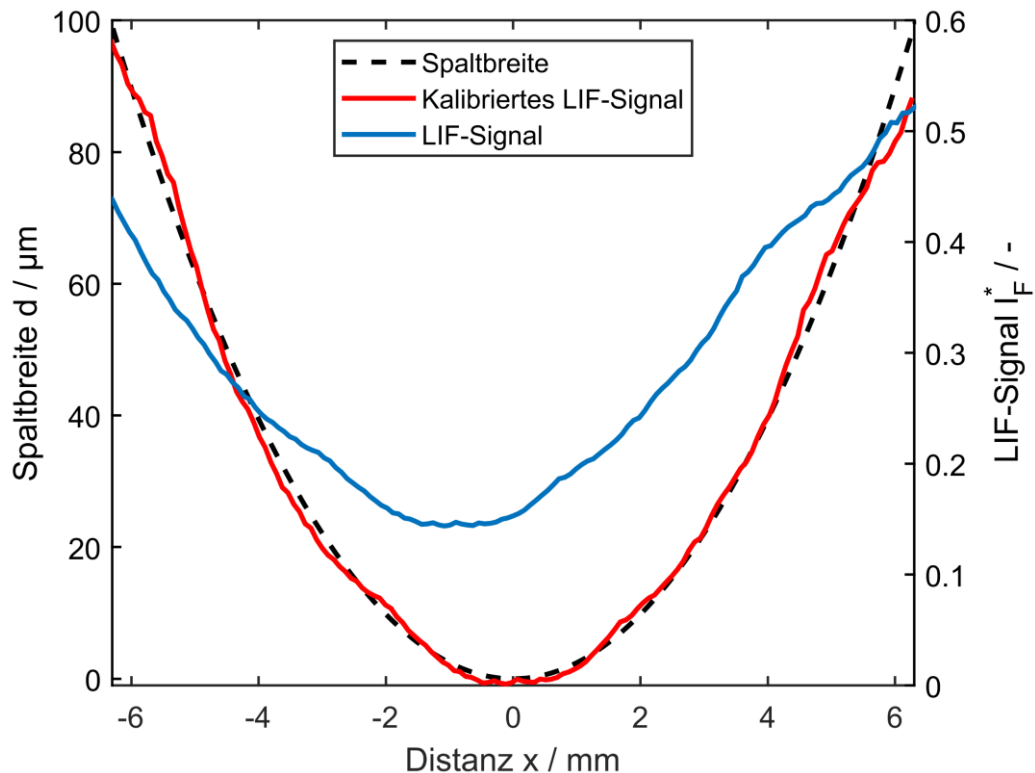


Abbildung 6-11: Berechnete Spaltbreite zwischen Fenster und Linse, räumlich gemittelt LIF-Signal im ROI der Kalibrierungsaufnahme und kalibrierte Spaltbreite als Funktion der horizontalen Distanz von der Mittelachse des Fensters.

Der in einem transparenten Medium absorbierte Anteil I_A des einfallenden Lichtes I_0 wird mit dem molaren Absorptionskoeffizient ε^* und der Schichtdicke des Mediums d durch das Lambert-Beer'sche Gesetz beschrieben (vgl. Kapitel 2.2.2):

$$I_A = I_0 \cdot 1 - \exp(-\varepsilon^* cd) \quad (6.1)$$

Ein Teil des absorbierten Lichts I_A wird mit der Fluoreszenz-Quanten-Ausbeute (FQA) Φ in Fluoreszenzlicht I_F umgewandelt. Mit der Detektionseffizienz η und der Kollektionseffizienz Ω des optischen Systems ergibt sich für das Fluoreszenzlicht I_F :

$$I_F = \Omega \Phi \cdot \eta \cdot I_0 \cdot 1 - \exp(-\varepsilon^* cd) \quad (6.2)$$

Durch Gleichung (6.2) kann das flachfeldkorrigierte LIF-Signal I_F^* durch Gleichung (6.3) beschrieben werden:

$$I_F^* = \frac{I_{F,CD}}{I_{F,FF}} = \frac{\eta \cdot \Omega \cdot \phi_{30^\circ C} \cdot r \cdot I_0 \cdot (1 - \exp(-\epsilon_{30^\circ C}^* \cdot cd_{CD}))}{\eta \cdot \Omega \cdot \phi_{RT} \cdot I_0 \cdot (1 - \exp(-\epsilon_{RT}^* \cdot cd_{FF}))} \quad (6.3)$$

Die für die Kalibrierung verwendete Linse reflektiert laut Herstellerangaben 8 % des Anregungslichtes und der Anisol-Fluoreszenz [142], d.h. jede der zwei Linsenoberflächen reflektiert ca. 4 %. Die Angabe bezieht sich auf eine Verwendung in Luft, im vorliegenden Aufbau ist die Gesamtreflexion jedoch geringer, da die gekrümmte Linsenfläche von Kraftstoff umgeben ist, der einen höheren Brechungsindex als Luft aufweist. Der in Gleichung (6.3) eingeführte Faktor r beschreibt die resultierende Erhöhung des detektierten LIF-Signals in der Kalibrierung durch an den Linsenoberflächen reflektiertes Anregungs- und Fluoreszenzlicht. Die Detektions- und Kollektionseffizienzen $\eta \cdot \Omega$ sowie die einfallende Lichtintensität I_0 bleiben während des Versuches konstant und können daher gekürzt werden. Da das Flachfeld durch die Vollfüllung des Zylinders mit Kraftstoff erzeugt wurde und somit Totalabsorption des einfallenden Laserlichtes stattfindet, kann die Schichtdicke d_{FF} als unendlich angenommen werden, woraus Gleichung (6.4) folgt:

$$I_F^* = \frac{\phi_{30^\circ C} \cdot r}{\phi_{RT}} \cdot (1 - \exp(-\epsilon_{30^\circ C}^* \cdot cd_{CD})) \quad (6.4)$$

Der Faktor a in Gleichung (6.5) fasst die Reflektivität der Linse r und die Fluoreszenzquantenausbeuten $\phi_{30^\circ C}$ für 30 °C und ϕ_{RT} für Raumtemperatur zusammen.

$$I_F^* = a(1 - \exp(-\epsilon_{30^\circ C}^* \cdot cd_{CD})) \quad (6.5)$$

Durch Auflösen von Gleichung (6.5) nach der Schichtdicke d_{CD} ergibt sich die Korrelation von Kraftstofffilmdicke und detektiertem LIF-Signal nach Gleichung (6.6):

$$d_{CD} = \frac{\ln\left(1 - \frac{I_F^*}{a}\right)}{-\epsilon_{30^\circ C}^* \cdot c} \quad (6.6)$$

Um die experimentellen Daten an die berechnete Spaltbreite zu fitten, wird eine Koordinatentransformation angewendet, dessen Grundform durch die Gleichungen (6.7) und (6.8) beschrieben wird:

$$\tilde{x} = x_0 + x_1 + \cos \varphi \cdot m_x (x - x_1) - \sin \varphi \cdot m_y (y - y_1) \quad (6.7)$$

$$y = y_0 + y_1 + \sin \varphi \cdot m_x (x - x_1) + \cos \varphi \cdot m_y (y - y_1) \quad (6.8)$$

Mit den ursprünglichen Koordinaten x (Distanz von der Fenstermittelachse) und y (LIF-Signal) und den transformierten Koordinaten \tilde{x} (Distanz von der Fenstermittelachse nach Anwendung der Koordinatentransformation) und \tilde{y} (Spaltbreite / kalibriertes LIF-Signal).

Die Koordinatentransformation wendet verschiedene Operationen an:

1. Translatorische Verschiebung um x_0 in x-Richtung und y_0 in y-Richtung.
2. Rotation um einen Winkel φ um einen Ursprung, der um x_1 in x-Richtung und y_1 in y-Richtung in Bezug auf das ursprüngliche Koordinatensystem verschoben ist.
3. Lineare Skalierung um den Faktor m_x in x-Richtung und m_y in y-Richtung.

Der räumliche Skalierungsfaktor m_x ist die projizierte Pixelgröße (vgl. Kapitel 6.1.1). Die Überführung von LIF-Signal in Spaltbreite in y-Richtung erfolgt mithilfe des Lambert-Beer'schen Gesetzes aus Gleichung (6.6) anstelle der linearen Skalierung durch m_y .

Abbildung 6-12 zeigt schematisch eine Linse für den perfekt zentrierten Fall (Punktlinie) und eine dazu um x_0 verschobene Linse (durchgezogene Linie). Die tatsächliche Verschiebung ist deutlich geringer als hier dargestellt.

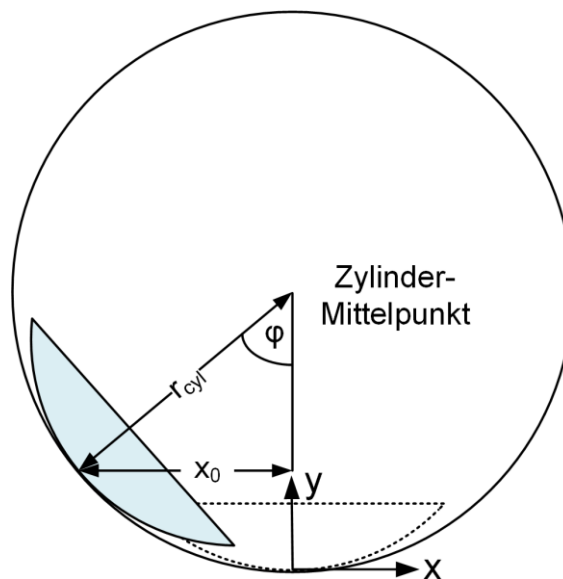


Abbildung 6-12: Rotation der Linse auf der gekrümmten Zylinderoberfläche (nicht maßstabsgetreu).

Wenn die Kalibriervorrichtung und somit die Linse um x_0 verschoben werden, rotiert sie gleichzeitig um den Zylindermittelpunkt. Diese Rotation kann durch den geometrischen Zusammenhang in Gleichung (6.9) mit der Verschiebung x_0 und dem Zylinderradius r_{cyl} beschrieben werden:

$$\varphi = \sin^{-1} \left(\frac{x_0}{r_{cyl}} \right) \quad (6.9)$$

Durch Substitution des Winkels φ in Gleichung (6.6) mithilfe von Gleichung (6.9) und Einsetzen des Zusammenhangs in die Gleichungen (6.7) und (6.8) ergibt sich die kombinierte Absolutwertkalibrierung und Koordinatentransformation zu Gleichung (6.10) und (6.11):

$$x = x_0 + \sqrt{1 - \left(\frac{x_0}{r_{\text{cyl}}}\right)^2} x - \frac{x_0}{r_{\text{cyl}}} \left[\frac{\ln\left(1 - \frac{I_F^*}{a}\right)}{-\varepsilon^* c} - r_{\text{cyl}} \right] \quad (6.10)$$

$$d = d_0 + r_{\text{cyl}} + \frac{x_0}{r_{\text{cyl}}} x + \sqrt{1 - \left(\frac{x_0}{r_{\text{cyl}}}\right)^2} \cdot \left[\frac{\ln\left(1 - \frac{I_F^*}{a}\right)}{-\varepsilon^* c} - r_{\text{cyl}} \right] \quad (6.11)$$

Hier wurde zusätzlich die Variable y durch das detektierte LIF-Signal I_F^* , \hat{y} durch die Kraftstofffilmdicke d und analog dazu y_0 durch einen Versatz der Kraftstofffilmdicke d_0 in y -Richtung ersetzt. Um zu berücksichtigen, dass die zuvor beschriebene Rotation der Kalibriervorrichtung um den Mittelpunkt des Zylinders erfolgt, wurden außerdem die Koordinaten des Zylindermittelpunkts in Bezug auf das in Abbildung 6-12 dargestellte Koordinatensystem $x_1 = 0$ und $y_1 = r_{\text{cyl}}$ eingesetzt.

In den Gleichungen sind die Variablen r_{cyl} und c bekannt und die Variablen x_0 , y_0 , a und ε^* sind unbekannt. Unter Anwendung der Methode der kleinsten Quadrate (engl. least squares method) wurden Gleichung (6.10) und (6.11) genutzt, um das detektierte LIF-Signal I_F^* auf die berechnete Spaltbreite d zu fitten. Die Berechnung erfolgte in MATLAB. Tabelle 6-1 fasst die ermittelten Parameter des Fits zusammen. Die rote Kurve in Abbildung 6-11 zeigt die kalibrierte Spaltbreite nach dem Fit. Die experimentellen Daten bilden die berechnete Spaltbreite nach der Absolutwertkalibrierung mit einem Bestimmtheitsmaß von 98,3 % gut ab.

Tabelle 6-1: Fit-Parameter der Absolutwertkalibrierung

x_0 mm	φ °	d_0 µm	a -	ε^* dm ³ / mol · cm
0,95	1,31	-26,0	0,78	2436

In der Literatur sind für den molaren Absorptionskoeffizienten ε^* bei einer Wellenlänge von 266 nm Werte für verschiedene Lösungsmittel, Temperaturen, Drücke und sowohl für die Gas- und die Flüssigphase verfügbar. Für die Gasphase geben z.B. Zabeti et. al [143] einen Wert von 2048 dm³/(cm·mol) in Argon an, Benzler [144] ermittelt einen Wert von 2288 dm³/(cm·mol) in Stickstoff. Für die Gasphase variieren die Werte stärker: mit Iso-Oktan als Lösungsmittel gibt Geiler [31] einen Wert von 5371 dm³/(cm·mol) bei Raumtemperatur an, während Berلمان [145] Werte zwischen 3339 dm³/(cm·mol) und 3570 dm³/(cm·mol) ermittelt, je nach verwendetem Lösungsmittel. Müller [24] gibt einen Wert von 6237 dm³/(cm·mol) für das gleiche Lösungsmittel an, das in der vorliegenden Arbeit verwendet wird. Aufgrund der Unterschiede in den gegebenen Werten wurde der Absorptionskoeffizient ε^* für drei verschiedene Anisol-Konzentrationen in MKKS mithilfe eines Spektralphotometer gemessen. Es wurden Werte zwischen 3118 und 3199 dm³/(cm·mol), abhängig von der gewählten Konzentration ermittelt. In der Kalibrierung wird der im Fit ermittelte Wert von 2436 dm³/(cm·mol) verwendet.

Unter Anwendung der Fit-Parameter kann die Filmdicke von flüssigem Kraftstoff auf der Zylinderwand im Motorexperiment mithilfe von Gleichung (6.6) bestimmt werden. Die im Experiment auftretenden Kraftstofffilmdicken sind jedoch geringer als in der Kalibriervorrichtung. Daher werden die Experimente mit einer höheren Gain-Einstellung des Bildverstärkers durchgeführt, um das detektierte LIF-Signal zu

erhöhen. Daher muss das LIF-Signal im Experiment zusätzlich durch die in Abbildung 6-8 gezeigte Korrelation skaliert werden, bevor Gleichung (6.6) angewendet wird.

6.2.3 Abschätzung der Präzision und Genauigkeit

Die Präzision der Messungen wird anhand der Abweichungen der Kalibrier-Einzelaufnahmen von deren Ensemblemittel ermittelt. Die relative Standardabweichung zwischen den Einzelaufnahmen der Kalibrierung beträgt 11,4 %. Die hohe Schuss-zu-Schuss Abweichung ist darauf zurückzuführen, dass zeitliche Schwankungen der Laserenergie im Versuch nicht korrigiert wurde. Die räumliche Präzision wird in zwei 3×10 Pixel großen Sub-ROIs des für die Kalibrierung genutzten ROI bestimmt: zum einen unmittelbar um den Kontaktpunkt zwischen Fenster und Linse, was geringen Kraftstoffilm-dicken von bis zu $10 \mu\text{m}$ entspricht (ROI 1) und zum anderen in einer größeren horizontalen Distanz zum Kontaktpunkt, was Filmdicken bis zu $30 \mu\text{m}$ entspricht (ROI 2). Aus den Kalibrieraufnahmen ergeben sich räumliche Standardabweichung von 9,0 % für ROI 1 und 7,1 % für ROI 2. In den Kalibrieraufnahmen macht jedoch der Signalversatz in y-Richtung einen signifikanten Anteil des detektieren LIF-Signals aus. Daher wurde der im Kalibrierungs-Fit ermittelte Signalversatz von den Kalibrieraufnahmen subtrahiert, um eine genauere Schätzung der Präzision im Experiment zu erhalten. Nach dieser Korrektur sind die räumlichen Standardabweichungen 27,3 % (ROI 1) und 11,2 % (ROI 2). Unter der Annahme, dass die Fehlerfortpflanzung durch die Quadratsummen der Einzelfehler beschrieben werden kann, ergibt sich für eine Einzelaufnahme eine Gesamt-Präzision zwischen 16,0 und 29,6 %, abhängig von der vorliegenden Kraftstoffilm-dicke.

Der Hersteller gibt eine Fertigungstoleranz von 1 % für die Krümmung der Linse an, welche sich direkt als Ungenauigkeit der Spaltbreite übertragen lässt. Obwohl der verwendete Zylinder mit einer höheren Genauigkeit im Vergleich zum Serienmotor gefertigt wird, weist die Zylinderform eine gewisse Oberflächenwelligkeit auf, die in der Fit-Kurve in Abbildung 6-11 zu sehen ist. Diese Abweichung scheint jedoch gut durch den Kurven-Fit kompensiert zu werden, sodass davon ausgegangen wird, dass dies keine zusätzliche Unsicherheit induziert. Die Oberfläche des Fensters weist eine Honstruktur auf, deren Riefen bis zu $4 \mu\text{m}$ tief sind. In diesen Honriefen kann sich Kraftstoff sammeln, der die Kraftstoffilm-dicke zusätzlich zur eingestellten Spaltbreite erhöht. Da das LIF-Signal auf die berechnete Spaltbreite gefittet wurde, die im Kontaktpunkt Null ist, wird angenommen, dass Riefen-induziertes LIF-Signal im Mittelwert subtrahiert wird. Dennoch können lokale Ungenauigkeiten in der Kalibrierung verursacht werden, da der ROI zur Kalibrierung über drei Pixel gemittelt wurde, was in derselben Größenordnung wie die Größe der Honriefen liegt.

Eine Abschätzung der Genauigkeit des Kalibrierprozesses erfolgt über einen Vergleich der durch die Kalibrierung ermittelten Kraftstoffilm-dicken mit einer zweiten Kalibrierung, die mithilfe des gemessenen Wertes $\epsilon^* = 3148 \text{ dm}^3/(\text{cm} \cdot \text{mol})$ für den molaren Absorptionskoeffizienten durchgeführt wird. Analog zu den gewählten Sub-ROIs für die Abschätzung der Präzision ergibt sich daraus eine Ungenauigkeit von 7,3 % für Kraftstoffilm-dicken von bis zu $10 \mu\text{m}$ und 5,7 % für Kraftstoffilm-dicken bis zu $30 \mu\text{m}$. Wird dies als repräsentative Genauigkeit für die Absolutwertkalibrierung angenommen, ergeben sich Quadratwurzelgenauigkeiten von 7,4 % und 5,8 % für 10 bzw. $30 \mu\text{m}$ dicke Schichten.

6.2.4 Halo-Effekte

Wie in Kapitel 6.2 erläutert wird, zeigt die Kalibrierkurve einen signifikanten positiven Versatz des LIF-Signals im Kontaktpunkt der Linse und Fensteroberfläche, in dem das Signal voraussichtlich nahe Null sein sollte. Es ist nur wenig Literatur zu quantifizierten Messungen verfügbar, in der LIF mit einer hohen Wiederholrate und einem Bildverstärker eingesetzt wird. Fordham et al. [146] berichteten erstmals von optischen „Halos“ bei Bildverstärkern. Der Begriff beschreibt die Ausbildung von optischen Halos um Bereiche hohen Signals bei der Verwendung von Hochgeschwindigkeits-Bildverstärkern, die in der Abbildung Gradienten verwaschen und niedrigfrequenten Kontrast verringern. Breda [147] beschrieb das Problem später detaillierter. Gordon und Dreizler [148] verwendeten Hochgeschwindigkeits-Tracer-LIF, um lokale Mischungsanteile von Aceton in der Gasphase sichtbar zu machen. Sie verglichen Messungen mit und ohne den Hochgeschwindigkeits-IRO, der auch in dieser Arbeit zum Einsatz kommt. Sie stellten fest, dass die Verwendung des IRO auf zwei Arten ein Verschwimmen von Gradienten verursacht. Erstens als lokaler Effekt, der die Breite eines scharfen Gradienten leicht erhöht und zweitens ein nicht-lokales, räumlich weit ausgedehntes Verschwimmen des Signals. In ihrer Arbeit wirkte sich dieser nicht-lokale Effekt bis zum Rand des Sichtfeldes aus, der etwa 3 mm von der eigentlichen Fluoreszenzlicht-Quelle entfernt war. Charogiannis und Beyrau [149] nutzten laserinduzierte Phosphoreszenz in Kombination mit einem Hochgeschwindigkeits-Bildverstärker, um die Verdunstung von Flüssigkeitstropfen zu visualisieren und stellten fest, dass Halo-Effekte bis zu 10 Tröpfchen-Durchmesser vom eigentlichen Messobjekt entfernt auftraten. Das Ausmaß dieses Halos kann grundsätzlich auch vom jeweiligen Gerät abhängen, da sich das Verhalten einzelner, baugleicher IROs erheblich unterscheiden kann [73].

Die Auswirkungen des Halos im vorliegenden Messaufbau sind in Abbildung 6-13 dargestellt. Rechts ist eine Aufnahme aus dem tatsächlichen Experiment bei 264 °KW vZOT für das frühe Einspritztiming gezeigt. Zum Zeitpunkt der Aufnahme trifft der Kraftstoff gerade auf den Kolbenboden auf und daher ist ein steiler Gradient im detektierten LIF-Signal an der Kolbenoberkante zu erkennen. Das LIF-Signal wurde in horizontaler Richtung in einer 50 Pixel breiten Spalte gemittelt, die rechts neben der Aufnahme gezeigt ist und als Funktion des vertikalen Abstands von der Oberkante des ROI aufgetragen. An der Kolbenoberkante ist ein starker Abfall des LIF-Signals zu erkennen. Zu beachten ist, dass der durch den Pfeil markierte Signalabfall teilweise auf eine Fase am Kolbenrand zurückzuführen ist. Dennoch sinkt das detektierte LIF-Signal nach dem steilen Abfall nur auf 0,5 ab, was immer noch 17 % des knapp über dem Kolbenboden detektierten Signal entspricht. Das Signal nimmt dann annähernd linear mit steigender Distanz vom Kolbenboden bis auf 0 bei einer Distanz von etwa 16 mm ab. Dieses Verhalten stimmt gut mit den Ergebnissen von Gordon et al. [148] überein.

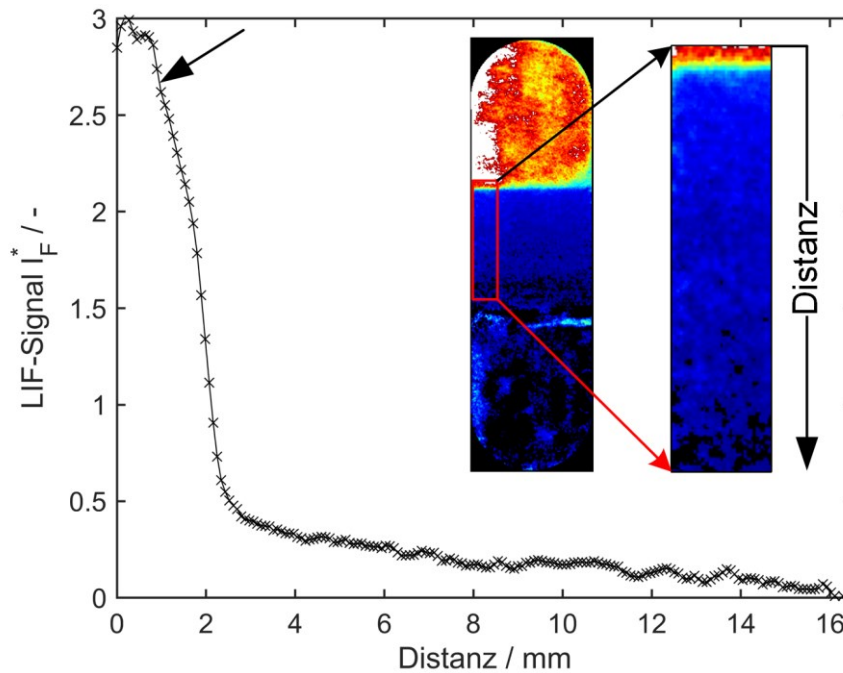


Abbildung 6-13: Visualisierung des IRO Halos in vertikaler Richtung bei 264 °KW vZOT für einen SOI von 285 °KW vZOT.

Der Halo-Effekt liefert eine plausible Erklärung für den Versatz im LIF-Signal der Kalibrierkurve. Der Kontaktpunkt ist von Bereichen hoher Kraftstoffilmstärke und somit hohen LIF-Signalen umgeben. Während der Gradient der Kraftstoffilmstärke in horizontaler Richtung für die Kalibrierung verwendet wird, ist der deutlich steilere Gradient in vertikaler Richtung nicht notwendig. Die Auswirkungen des Halos könnten wahrscheinlich verringert werden, beispielsweise durch die Verwendung einer horizontalen Schlitzblende. Der Halo könnte einen Einfluss auf die Genauigkeit der Kalibrierung und damit auch auf die quantifizierten Ergebnisse haben, da der Signalversatz in dem für die Kalibrierung verwendeten ROI als konstant angenommen wurde. Dies lässt sich jedoch ohne zusätzliche Experimente nur schwer abschätzen. Gleichzeitig wurde bei den Experimenten kein Signalversatz subtrahiert. Infolgedessen könnte die Dicke des Kraftstofffilms in der Nähe von Kraftstofffilmen hoher Intensität aufgrund von Halo überschätzt werden. Die große räumliche Ausdehnung des Halos könnte außerdem erklären, warum die Ergebnisse in Kapitel 6 nicht die typischen, klar abgegrenzten „Fingerabdrücke“ der Kraftstofffilme auf der Zylinderwand zeigen.

6.3 Motorversuche

Die Kenndaten der durchgeführten Motorversuche sind in Tabelle 6-2 zusammengefasst. Es wurde eine niedrige Motortemperatur von 30 °C gewählt, um einen Kaltstart des Motors zu simulieren, da Kraftstoffwandbenetzung bei niedrigen Motortemperaturen begünstigt wird. Insbesondere bei hybridisierten Fahrzeugen treten aufgrund des intermittierenden Betriebs des Verbrennungsmotors häufig Kaltstarts auf. Die externe Konditionieranlage wurde vor Beginn der Messung für mehrere Minuten betrieben, um eine definierte Motortemperatur sicherzustellen. Der Kraftstoff wird in einer einzelnen Einspritzung 285 oder 240 °KW vZOT in den Motor eingebracht, wobei keine Zündung erfolgte. Im Versuch erfolgt somit keine Wärmeübertragung durch Verbrennungsprozesse auf die Zylinderwand, daher wird angenommen, dass die Temperatur der Wand gleich der

Kühlwassertemperatur ist. Die Einspritzmenge entspräche bei befeuerten Motor einer Motorlast von $p_{mi} = 10 \text{ bar}$ bei $\lambda = 1$. Der eingesetzte Kolben sowie die Kolbenringe sind Serienbauteile des Mercedes-Motors M270/M274.

Tabelle 6-2: Kenndaten der Motorversuche

Merkmal	Einheit	Ausprägung
Drehzahl	min^{-1}	1500
Ansaugdruck	mbar	950
Einspritzdruck	bar	350
Injektor	-	6-Loch MLV
Kraftstoff	-	MKKS + 0,5 % Anisol
Einspritztiming	$^{\circ}\text{KW vZOT}$	285 / 240
Einspritzdauer	ms	2
Einspritzdauer	$^{\circ}\text{KW}$	18
Einspritzmenge (gesamt)	mg	38
Einspritzmenge (Strahl 2)	mg	5,1
Kraftstofftemperatur	$^{\circ}\text{C}$	30
Öltemperatur	$^{\circ}\text{C}$	30
Kühlwassertemperatur	$^{\circ}\text{C}$	30

6.4 Ergebnisse

Alle LIF-Aufnahmen im Folgenden werden auf einer modifizierten „Jet“ Farbskala gezeigt, auf der Pixel mit dem minimalen Wert in Schwarz und Pixel auf oder über dem Maximalwert in Weiß dargestellt sind. Die Bilder sind auf einer nach oben begrenzter Skala gezeigt, daher bedeutet ein weißer Pixel nicht zwangsläufig eine Sättigung des Sensors an dieser Stelle. Die Intensität der Pixel außerhalb des Fensters wurde mithilfe einer Maske gleich Null gesetzt. Abbildung 6-14 (a) zeigt eine Fotografie des Fensters mit dem gereinigten Kolben im Sichtfeld. Die Nomenklatur der beschrifteten charakteristischen Kolbenbereiche wird im Folgenden verwendet. Abbildung 6-14 (b) zeigt eine Aufnahme aus dem Öl-Kanal, in der sich der Kolben in derselben Position befindet. Hier sind teilweise Kolbenbereiche sichtbar, da Ölfluoreszenz detektiert wird. In Abbildung 6-14 (c) ist das zugehörige Bild der quantifizierten Kraftstofffilmdicken (KFD) gezeigt. Beide LIF-Aufnahmen sind zum selben Zeitpunkt während der Kompression gezeigt, nachdem Kraftstoff eingespritzt wurde. Im Kraftstoff-Kanal sind die Kolbenbereiche nur schwer auszumachen. Der Großteil des cross-talks wird durch die Hintergrundkorrektur korrigiert, daher zeigen nur Bereiche, in denen Kraftstoff vorhanden ist, eine hohe KFD. In dem vorliegenden Beispiel ist der erste Kolbenring deutlich sichtbar, was auf eine Ansammlung von flüssigem Kraftstoff auf dem Ring zurückzuführen ist.

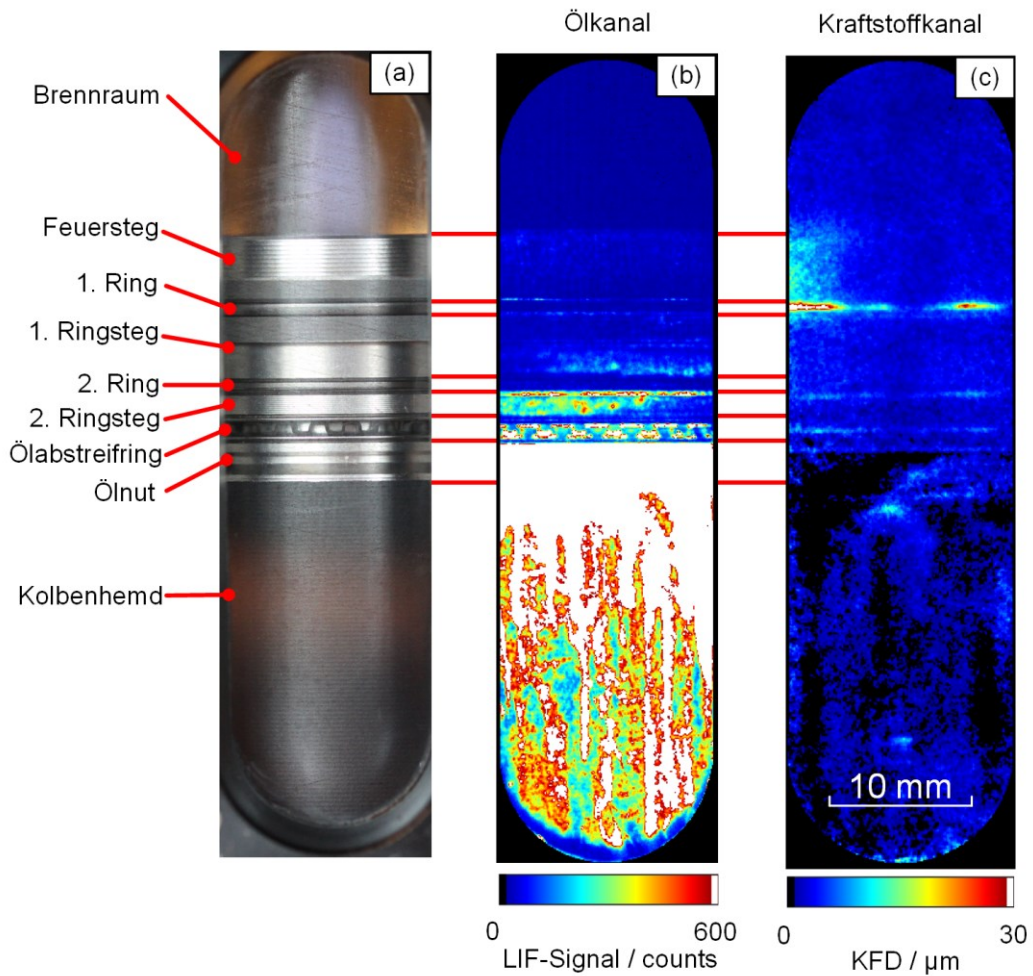


Abbildung 6-14: (a): Fotografie des (gereinigten) Kolbens im Einzylindermotor. (b): Hintergrundkorrigierte LIF-Aufnahme im Öl-Kanal. (c): Hintergrund- und flachfeldkorrigierte, kalibrierte LIF-Aufnahme im Kraftstoff-Kanal.

6.4.1 Kraftstofffilmdicken

In Abbildung 6-15 sind ausgewählte KFD-Bilder aus dem Ansaug- und Kompressionshub für einen SOI von 285 °KW vZOT gezeigt. Der Zeitpunkt der jeweiligen Aufnahme ist anhand der Kurbelwellenposition in °KW vor Zünd-oberem Totpunkt (vZOT) und Zeit nach Einspritzbeginn (nSOI) in ms unter der Aufnahme angegeben. Die charakteristischen Kolbenbereiche sind nach der Subtraktion der Hintergrundaufnahme kaum noch sichtbar. Jedoch kann hier die Position der Ölnut in vielen Aufnahmen aus einem Artefakt abgeleitet werden, das durch Ölfluoreszenz verursacht wird und 285 °KW vZOT durch (1) markiert ist.

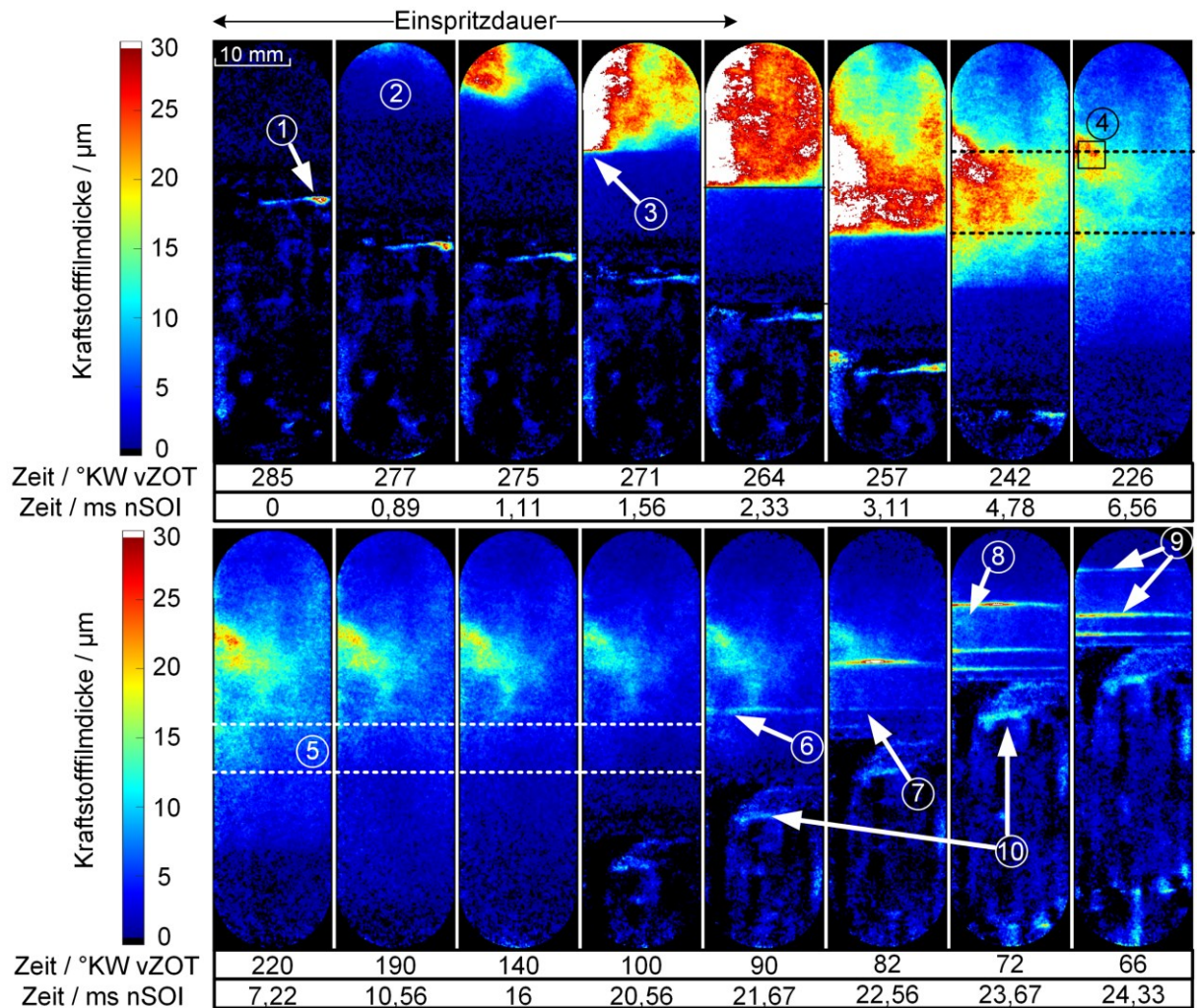


Abbildung 6-15: Kraftstofffilmdicke während des Ansaugens und der Kompression für einen SOI von 285 °KW vZOT.

Zum Zeitpunkt des Einspritzbeginns ist das allgemeine LIF-Signal niedrig, da nur Hintergrundsignal und verbleibende Ölfluoreszenz detektiert wird. 0,89 ms nSOI tritt der Kraftstoff-Strahl in das Sichtfeld ein, erkennbar an dem leicht höheren Signal am oberen Ende des Fensters (2). Kurze Zeit später, 1,11 ms nSOI, wird ein hohes LIF-Signal in einem größeren Bereich detektiert, da der Kraftstoff-Strahl tiefer in den Brennraum eintritt. 1,56 ms nSOI erreicht der Kraftstoff-Strahl den Kolbenboden, sodass die Oberkante des Kolbens als eine klare Grenzlinie zwischen hohem LIF-Signal oben, verursacht durch fluoreszierenden Kraftstoff, und einem Bereich geringer Intensität darunter, dem Feuersteg, sichtbar wird (3). Das LIF-Signal ist auf der linken Seite des Sichtfeldes höher als auf der rechten. Dies ist möglicherweise auf die starke Strömung im Zylinder während des Ansaugens zurückzuführen, oder auf einen leichten rotatorischen Ausrichtungsfehler des Injektors. Dies ermöglicht zwar die Untersuchung der seitlichen Bereiche des Kraftstoff-Strahls und dessen Auftreffen auf der Zylinderwand, führt aber gleichzeitig dazu, dass sich außerhalb des Sichtfeldes Kraftstofffilme höherer Dicke befinden könnten.

2,33 ms nSOI, also kurz nachdem sich der Injektor geschlossen hat, wird hohes LIF-Signal im gesamten Brennraum detektiert. Kurze Zeit später, 3,11 ms nSOI, verringert sich das Signal im oberen Bereich des Sichtfeldes und steigt gleichzeitig direkt oberhalb des Kolbenbodens an: aufgrund der hohen Strömungsgeschwindigkeit erreichen nun die zuvor noch in der Luft befindlichen Teile des Kraftstoff-

Strahls den Kolbenboden. Wie in den folgenden zwei Aufnahmen bei 4,78 und 6,56 ms nSOI zu sehen ist, wird der Kraftstoff-Strahl beim Auftreffen auf den Kolben in Richtung der Zylinderwand umgelenkt und infolgedessen wird ein stationärer Bereich hoher KFD sichtbar. Das 4,78 ms nSOI detektierte hohe LIF-Signal in diesem Bereich stammt jedoch nicht nur von Kraftstoff-Wandbenetzung, sondern auch von Kraftstoff-Tröpfchen, die noch in Bewegung sind. Lediglich Bereiche hohen LIF-Signals, die stationär sind, kennzeichnen tatsächliche Kraftstoff-Wandbenetzung. Dies liegt im Wesentlichen daran, dass sich das Aerosol bewegt, der Film jedoch praktisch nicht. Während die beiden Kraftstoffformen hier durch visuelle Inspektion unterschieden wurden, wurde ein ähnlicher Effekt von Shway et al. [150] ausgenutzt, um automatisch Bildsequenzen zu segmentieren, die die UV-Absorption von Kraftstoffdampf und flüssigen Kraftstoffwandfilmen zeigen.

Der erste definitive Kraftstofffilm wird 6,56 ms nSOI detektiert, da ab hier keine sich bewegenden Tröpfchen im Brennraum erkennbar sind. Die obere gestrichelte Linie markiert hier die Position der Kolbenoberkante zum Zeitpunkt, an dem der Kraftstoff-Strahl den Kolbenboden zuerst erreicht (1,56 ms nSOI) und die untere gestrichelte Linie die Kolbenbodenposition zum Zeitpunkt, an dem das rückwärtige Ende des Kraftstoff-Strahls den Kolbenboden erreicht (3,11 ms nSOI). Der Großteil der sichtbaren Kraftstoff-Wandbenetzung befindet sich innerhalb dieses Bereiches. Unterhalb des Bereiches wird nur eine geringe KFD detektiert, da der Kolben während der Einspritzung verhindert, dass der Kraftstoff-Strahl tiefer in den Brennraum eindringen kann. Die KFD hier ist auf noch verbleibende Kraftstoff-Tröpfchen in Bewegung zurückzuführen, oder auf eine Art von „Verschmierungen“ von flüssigem Kraftstoff auf dem Kolbenboden. Mit dem hier verwendeten optischen Aufbau kann Kraftstoff auf dem Kolbenboden nicht detektiert werden. Jedoch kann für den gezeigten Einspritzbeginn von 285 °KW vZOT davon ausgegangen werden, dass die Kolbenboden-Benetzung erheblich ist, da der Kraftstoff-Strahl während der gesamten Einspritzdauer auf den Kolben trifft. Die maximale KFD beträgt 6,56 ms nSOI 25 μm im Bereich (4) mit einem großen Kraftstoff-Wandfilm mit einer Filmdicke von etwa 15 μm unterhalb und seitlich davon. Um diesen Bereich hoher KFD steigt auch im restlichen Teil des Brennraumes die detektierte KFD auf 3 μm an, gegenüber dem Hintergrundsignal von 0,2 μm vor der Kraftstoff-Einspritzung (0 ms nSOI). Geiler [31] stellt in seinen Versuchen mit Toluol als Tracer und Luft als Betriebsmedium fest, dass Fluoreszenz aus der Gasphase zwar effektiv bei Anwesenheit von Sauerstoff durch Quenching unterdrückt wird, jedoch trotzdem noch ein Restsignal detektiert wird. Geiler bestimmt ein Gasphasen-Signal von Toluol äquivalent zu einer flüssigen Schichtdicke von 2 μm , was vergleichbar zu den vorliegenden Ergebnissen für Anisol ist. Es ist unwahrscheinlich, dass dieser Anstieg in der detektierten KFD durch flüssigen Kraftstoff verursacht wird, da der Signalanstieg nach der Abwärtsbewegung des Kolbens auch im unteren Bereich des optischen Zugangs zu sehen ist, in dem der Kraftstoff-Strahl nicht auf die Zylinderwand getroffen ist. Typischerweise bildet Kraftstoff, der auf eine Oberfläche auftrifft, auf dieser Flüssigfilme mit einer klaren Kontur aus, die oft als „Fingerabdruck“ (engl. „fingerprint“) der Injektion bezeichnet werden [112-114, 151, 152]. In den vorliegenden Ergebnissen zeigen die Kraftstofffilme keine klare Kontur, sondern weisen verschwommene Grenzen auf.

In dem von den weißen, gestrichelten Linien umrandeten Bereich in Abbildung 5-13 ist 16 und 20,56 ms nSOI keine KFD mehr vom Hintergrundsignal unterscheidbar. Zum Zeitpunkt, an dem der erste Kolbenring diesen Bereich gerade passiert hat (21,67 ms nSOI), wird jedoch eine hohe KFD

oberhalb des ersten Rings detektiert (6), was darauf hindeutet, dass entgegen der zuvor getroffenen Beobachtung ein dünner Kraftstofffilm auf der Zylinderwand vorhanden war. Es ist anzumerken, dass diese Kraftstoffansammlungen auf den Kolbenringen nicht quantitativ bewertet werden können, da der Kolben als Hintergrund Fluoreszenzlicht reflektiert und daher das erfasste LIF-Signal im Vergleich zu Luft als Hintergrund erhöht. Die KFD auf dem ersten Ring nimmt im Anschluss bis 22,56 ms nSOI zu. Zu diesem Zeitpunkt erreichen der zweite und dritte Kolbenring die Höhe, auf der abgestreifter Kraftstoff zum ersten Mal auf dem ersten Kolbenring sichtbar wurde. Hier erhöht sich das detektierte Signal in den folgenden °KW, was ebenfalls eine Akkumulation von Kraftstoff auf den beiden Kolbenringen anzeigt. Dies lässt entweder auf einen restlichen Kraftstofffilm auf der Zylinderwand schließen, oder einen Transport von Kraftstoff vom ersten Kolbenring in die unteren Kolbenbereiche. Obwohl letzteres voraussichtlich stattfindet, ist es aufgrund des kurzen Zeitraumes hier unwahrscheinlich, da Kraftstoff zunächst durch die engen Spalte zwischen dem Kolbenring und den Flanken der Ringnut fließen müsste. Das unvollständige Abstreifen von Kraftstoff und Zurückbleiben eines Restfilmes könnte auf ein Aufschwimmen des Kolbenringes durch die hohe Akkumulation von Kraftstoff oberhalb des Ringes zurückzuführen sein. Von 22,56 bis 23,67 ms nSOI passiert der erste Kolbenring den großen Kraftstofffilm in der linken Hälfte des optischen Zugangs. Im Verlauf dessen breitet sich die Kraftstoff-Akkumulation am oberen Rand des Kolbenringes über den Großteil des Sichtfeldes aus. Im ersten Ringsteg wird auch nach Passieren des ersten Ringes noch eine erhöhte KFD detektiert (8), was erneut auf ein unvollständiges Abstreifen durch den ersten Kolbenring hindeutet. Allerdings scheint dieses Mal auch ein Transport von Kraftstoff aus der ersten Ringnut plausibel: die KFD im Bereich des ersten Kolbenrings nimmt anschließend ab, während sie gleichzeitig am zweiten Kolbenring und dem Ölabstreifring zunimmt (9). Außerdem steigt auch das detektierte Signal im oberen Bereich des Kolbenhemdes an (10), was die Schlussfolgerung, dass Kraftstoff in Richtung des Kurbelgehäuses transportiert wird, unterstützt.

In Abbildung 6-16 sind ausgewählte KFD Bilder für einen SOI von 240 °KW vZOT gezeigt. Für eine bessere Vergleichbarkeit sind die meisten Bilder zu den gleichen Zeitpunkten nach SOI wie in Abbildung 6-15 gezeigt. Zu beachten ist, dass aufgrund des späteren SOI die Bilder auch später innerhalb des Zyklus aufgenommen werden, wie anhand der Kurbelwinkelangaben deutlich wird. Zur Vereinfachung wird der Zyklus mit einem SOI von 285 °KW vZOT nachfolgend als frühe Einspritzung bezeichnet.

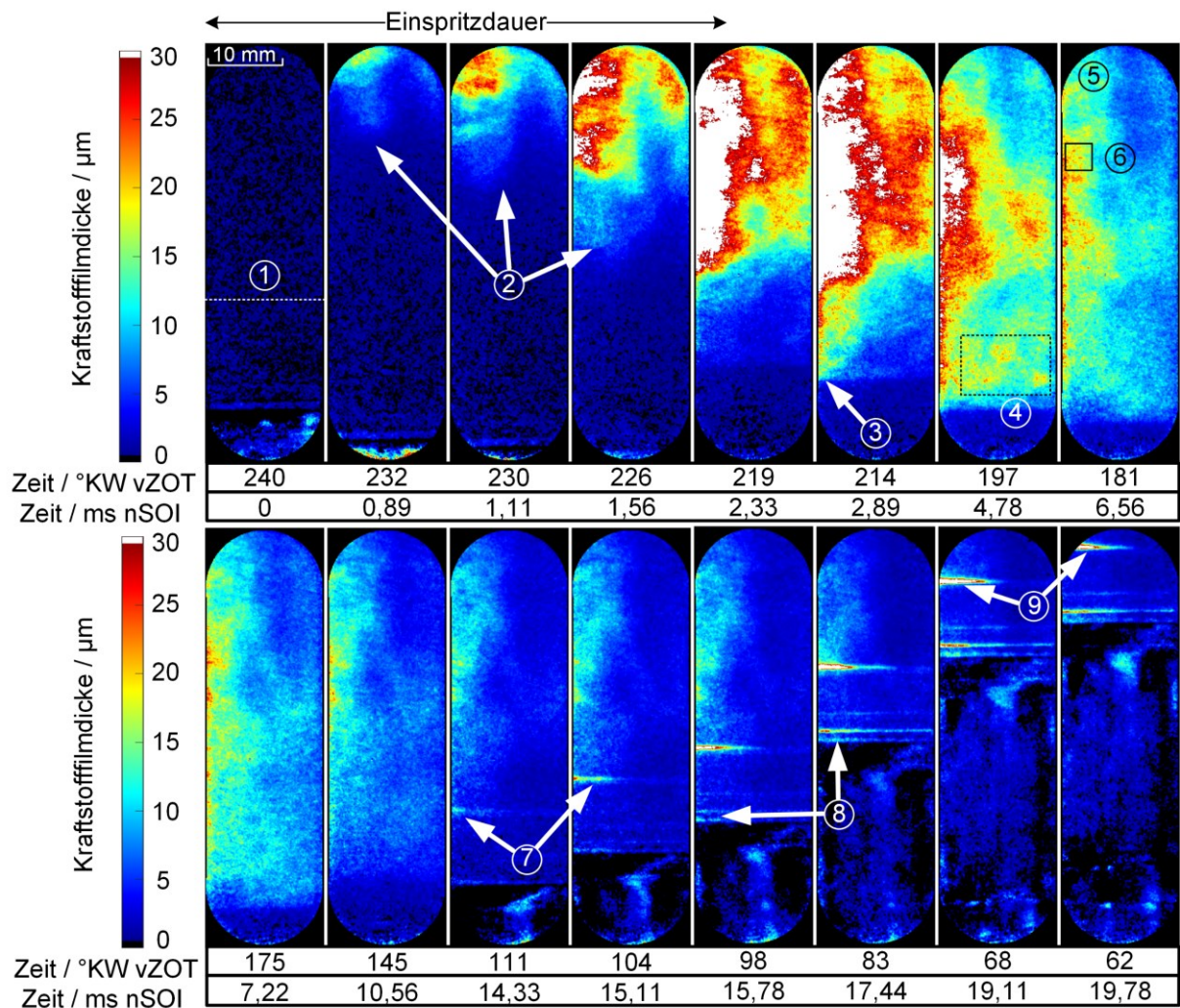


Abbildung 6-16: Kraftstofffilmdicke während des Ansaugens und der Kompression für einen SOI von 240 °KW vZOT.

Die ersten drei Bilder sind vergleichbar mit denen der frühen Einspritzungen, außer, dass sich der Kolben hier im Vergleich weiter unten befindet (die gestrichelte Linie bei (1) markiert die Kolbenoberkante). Auch hier tritt der Kraftstoff-Strahl 0,89 ms nSOI in das Sichtfeld ein und breitet sich 1,11 ms und 1,56 ms nSOI vergleichbar zur frühen Einspritzung im Brennraum aus. Kraftstoff dringt hier jedoch im Vergleich zur frühen Einspritzung tiefer in den Brennraum ein (2), da kein Kolben den Kraftstoff-Strahl blockiert. Der flüssige Kraftstoff bewegt sich anschließend weiter nach unten, sodass 2,33 ms und 2,89 ms nSOI in großen Teilen des optischen Zugangs ein hohes LIF-Signal detektiert wird. Der Kraftstoff-Strahl trifft 2,89 ms nSOI auf den Kolbenboden (3) und 4,78 ms nSOI sind kurz oberhalb des Kolbens im markierten ROI (4) Bereiche hoher KFD zu sehen. Diese stammen von Kraftstofftröpfchen in Bewegung. Die Zeit, die benötigt wird, bis sich der gesamte flüssige Kraftstoff in der Brennkammer abgesetzt hat, ist die gleiche wie bei der frühen Einspritzung, sodass auch hier der erste eindeutige Kraftstoffwandfilm um 6,56 ms nSOI zu erkennen ist. Im Vergleich der beiden Momentaufnahmen der Kraftstoffwandfilmverteilung 6,56 ms nSOI lässt sich für den SOI bei 240 °KW vZOT ein über den Großteil des Sichtfelds verteilter Kraftstoffwandfilm erkennen, im Vergleich zu dem eher kompakten Wandfilm für die frühe Einspritzung. Auch hier ist kein deutlicher Umriss des Kraftstofffilms zu erkennen. Das allgemeine Niveau der KFD ist in beiden Experimenten ähnlich. Für

einen SOI von 240 °KW vZOT ist aufgrund der größeren benetzten Fläche die Gesamtmasse an Kraftstoff, die an der Zylinderwand haftet, jedoch größer. Im Gegensatz zur frühen Einspritzung ist auch am oberen Rand des Fensters ein Kraftstoff-Wandfilm zu sehen (5). Die Unterschiede der Kraftstoff-Wandbenetzung sind möglicherweise auf das unterschiedliche Niveau der Ladungsbewegung zum Zeitpunkt der Einspritzung zurückzuführen.

Die allgemeine KFD nimmt im Folgenden ab, da der Kraftstoff teilweise verdampft, wie von 7,2 ms bis 14,33 ms nSOI erkennbar ist. Zu diesem Zeitpunkt ist auch die erste Akkumulation von Kraftstoff auf dem ersten Kolbenring sichtbar (7), die sowohl in Größe als auch Signalintensität zunimmt, während 15,11 und 15,78 ms nSOI mehr Kraftstoff von der Wand abgestreift wird. Im Gegensatz zur frühen Einspritzung ist bei der Aufwärtsbewegung des Kolbens nur ein leichter Anstieg der KFD am zweiten Ring zu beobachten, wohingegen sich am Ölabstreifring Kraftstoff ansammelt (8). Außerdem ist im Vergleich zum frühen SOI (siehe (8) in Abbildung 6-15) eine niedrigere KFD unterhalb des ersten Kolbenringes zu erkennen, nachdem dieser den Wandfilm 17,44 und 19,11 ms nSOI passiert hat. Dies deutet darauf hin, dass der zweite Kolbenring den verbleibenden, dünnen Kraftstofffilm auf der Zylinderwand, den der erste Kolbenring hinterlässt, nicht abstreift, der Ölabstreifring hingegen schon. Auch der Transport von Kraftstoff aus der Nut des ersten Rings nach unten scheint weniger ausgeprägt zu sein. Wie 19,11 und 19,78 ms nSOI zu sehen ist, nimmt die KFD am ersten Kolbenring nicht signifikant ab, wenn sich der Kolben nach oben bewegt, im Gegensatz zum frühen SOI, bei dem ein Abfließen von Kraftstoff aus der ersten Ringnut zu beobachten war. Eine mögliche Ursache ist die unterschiedliche Zeitspanne, in der Kraftstoff abgestreift wird: hier ist der Kraftstofffilm gleichmäßiger verteilt, sodass er über einen längeren Zeitraum in die erste Ringnut eindringt. Im Vergleich dazu wird beim frühen SOI der Großteil des Kraftstoff-Wandfilmes zwischen 22,56 ms und 24,67 ms abgestreift. Die große Menge an flüssigem Kraftstoff, die in kurzer Zeit in die Ringnut eindringt, könnte dazu führen, dass ein Teil der Flüssigkeit durch den Spalt an der unteren Flanke der Ringnut gepresst wird.

Um die Verdampfung des Kraftstoffwandfilms zu untersuchen, wird für beide Einspritzzeitpunkte der 50 x 50 Pixel große ROI, der in Abbildung 6-15 durch (4) und in Abbildung 6-16 durch (6) markiert ist, räumlich gemittelt. Der zeitliche Auswertebereich beginnt ab dem Zeitpunkt, an dem der erste eindeutige Kraftstoffwandfilm nachweisbar ist und endet, sobald der erste Kolbenring aufgrund der Aufwärtsbewegung des Kolbens in den ROI eintritt. Die Streudiagramme und die entsprechenden Mittelwertkurven in Abbildung 6-17 zeigen die gemittelte KFD innerhalb der ROIs. Für einen Einspritzbeginn von 240 °KW vZOT sind weniger Daten vorhanden, da der Kraftstoff später im Zyklus eingespritzt wird. Die Schwankungen in der KFD sind wahrscheinlich auf die Schuss-zu-Schuss Abweichungen der Laserenergie zurückzuführen, die hier nicht korrigiert sind.

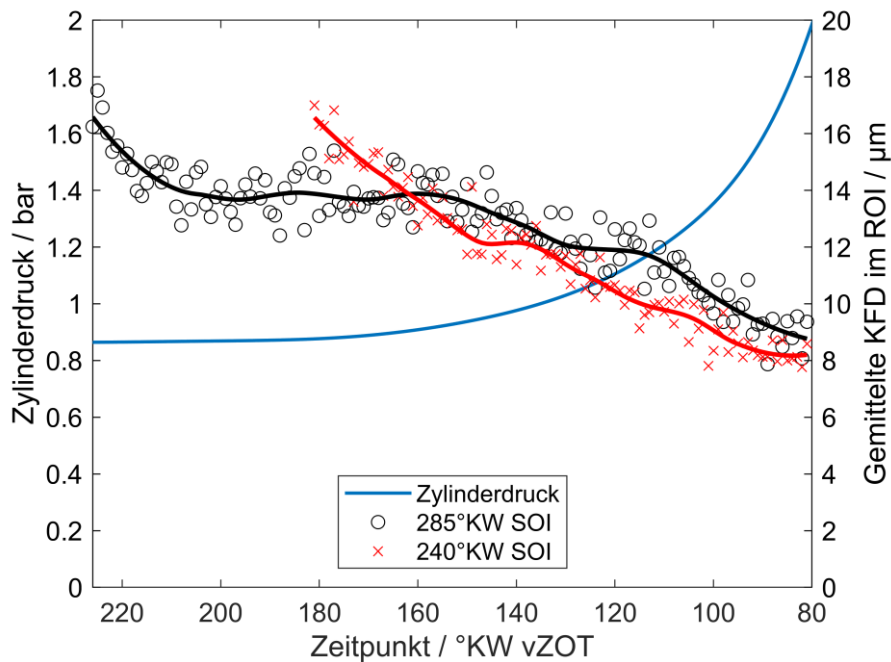


Abbildung 6-17: Zeitlicher Verlauf der räumlich gemittelten Kraftstofffilmdicke und des zugehörigen Zylinderdruck für die SOI von 285 °KW und 240 °KW vZOT.

Bei der frühen Einspritzung nimmt die Kraftstofffilmdicke zu Beginn bis 210 °KW vZOT schnell ab. Anschließend nimmt die Verdampfungsrate deutlich ab und die mittlere Kraftstofffilmdicke bleibt bis 150 °KW vZOT im Wesentlichen konstant. Danach nimmt die Dicke des Kraftstofffilms annähernd linear ab und erreicht 80 °KW vZOT, kurz bevor der erste Kolbenring in den ROI eintritt, eine Dicke von 9 µm. Bei der späten Einspritzung ist der erste eindeutige Wandfilm 180 °KW vZOT mit einer Dicke von 16 µm vergleichbar zu der frühen Einspritzung. Die KFD nimmt über den gesamten hier beobachteten Zeitraum annähernd linear ab, ohne eine zeitweise Verlangsamung zu zeigen. Überraschenderweise ist die Filmdicke 80 °KW vZOT im Vergleich zur frühen Einspritzung mit 8 µm etwas geringer, obwohl die für die Verdampfung zur Verfügung stehende Zeit hier 5 ms kürzer ist.

Während der Kompression steigt der Zylinderdruck am Ende des ausgewerteten Zeitraums auf 2 bar an, wie die durchgezogene blaue Druckkurve in Abbildung 6-17 zeigt. Während der Druck einen Einfluss auf die Fluoreszenz in der Gasphase hat, ist über dessen Einfluss auf die Anisol-Fluoreszenz in der Flüssigphase nur wenig bekannt. Es ist davon auszugehen, dass er aufgrund der Inkompressibilität der Flüssigkeit deutlich geringer ist als in der Gasphase.

Durch diesen Anstieg des Zylinderdrucks erwärmt sich das Kraftstoff-Luft-Gemisch auch auf etwa 120 °C bei 2 bar, was potenziell zu einer Abnahme der Quantenausbeute von Anisol und folglich zu einer geringeren Fluoreszenzintensität führen könnte. In einer ähnlichen Untersuchung wurde jedoch festgestellt, dass die konvektive Wärmeübertragung vom Gas auf die Flüssigkeit im Vergleich zur konduktiven Wärmeübertragung von der Zylinderwand vernachlässigbar ist [113]. Der Effekt ist daher wahrscheinlich auf unterschiedlich stark ausgeprägte Turbulenzen im Brennraum zurückzuführen. Für die frühe Einspritzung beginnt die Verdampfungsrate kurz vor UT zu stagnieren, wenn die Ladungsbewegung abnimmt, da das Einlassventil geschlossen und die Kolbengeschwindigkeit gering

ist. Bei der späten Einspritzung sind die Turbulenzen zu diesem Zeitpunkt noch hoch, da der Kraftstoffstrahl den Kolbenboden erst am UT erreicht.

6.4.2 Öltransportvorgänge

In Abbildung 6-18 sind ausgewählte KFD-Bilder mit dem entsprechenden Bild aus dem Öl-Kanal auf der rechten Seite dargestellt. KFD-Bilder sind auf der bereits zuvor verwendeten μm -Skala dargestellt. In den Bildern des Öl-Kanals ist das detektierte LIF-Signal auf einer stark geclippten Farbskala dargestellt, um auch das geringe Niveau der Ölfluoreszenz in den oberen Kolbenbereichen sichtbar zu machen.

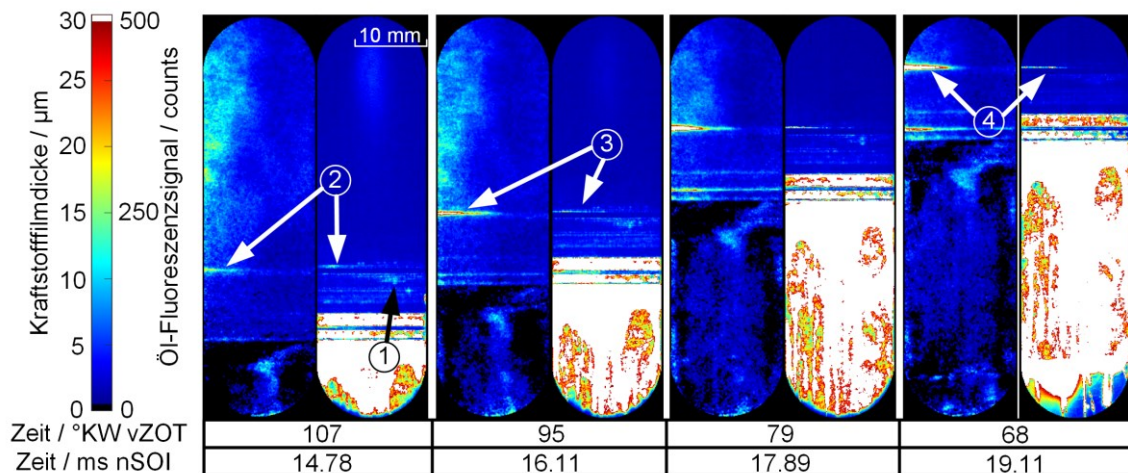


Abbildung 6-18: LIF-Bilder in der Kompression im Kraftstoff-Kanal (links) und im Öl-Kanal (rechts) für einen SOI von 240 °KW vZOT.

Aufgrund der geclippten Farbskala erscheinen der zweite Ringsteg und die Bereiche darunter im Öl-Kanal als gesättigt. Auf dem ersten Ringsteg ist eine gewisse Fluoreszenz des am Kolben haftenden Öls zu erkennen (1). Die Bilder zeigen den Kompressionshub beginnend ab 14,78 ms nSOI, da der erste Kolbenring zu diesem Zeitpunkt beginnt, flüssigen Kraftstoff von der Zylinderwand abzustreifen, daher wird im Kraftstoff-Kanal ein erhöhtes LIF-Signal über dem ersten Kolbenring detektiert (2). Gleichzeitig ist eine Zunahme des Signals im Öl-Kanal zu erkennen. Bei einer starken Kraftstoff-Wandbenetzung wird Öl aus der ersten Ringnut heraus gespült, wenn der Kraftstoff abgestreift wird, was zusätzlich durch die Abnahme der Ölviskosität aufgrund von Verdünnungseffekten unterstützt wird [109]. Der Bereich hoher LIF-Intensität ist 16,11 ms nSOI sowohl im Kraftstoff- als auch im Öl-Kanal größer (3). Auch die Form dieses Bereichs folgt im Öl-Kanal der Form im Kraftstoff-Kanal weitgehend: 19,11 ms nSOI nimmt die räumliche Ausdehnung der Kraftstoffansammlung und des Öl-Signals in horizontaler Richtung zeitlich leicht ab (4). Im Gegensatz zu den Ergebnissen in [109] ist das Phänomen jedoch auf den ersten Kolbenring beschränkt und das Öl-Kraftstoff-Gemisch wird nicht bis auf den Feuersteg transportiert. Dies ist wahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass im oberen Kolbenbereich nur wenig Öl vorhanden ist. Die vorliegenden Untersuchungen wurden mit vollständig geöffneter Drosselklappe durchgeführt, in [109] wurde der Motor hingegen vor der Aufnahme mit geschlossener Drosselklappe geschleppt betrieben. Der Öltransport in den oberen Kolbenbereich wird insbesondere durch eine geschlossene Drosselklappe und langen geschleppten Betrieb begünstigt [17, 18]. Infolgedessen zeigen die Versuche im Feuersteg und ersten Ringsteg nur geringes LIF-Signal.

6.5 Zwischenfazit

Laserinduzierte Fluoreszenz wurde eingesetzt, um die Kraftstoff-Wandbenetzung und die Ölfilmverteilung in einem optisch zugänglichen Einzylindermotor simultan zu untersuchen. Das von Müller [24] entwickelte Hochgeschwindigkeits-LIF System nutzt die zweite Harmonische eines Nd:YAG Lasers für die Visualisierung von Öl und die vierte Harmonische in Kombination mit einem Bildverstärker für die Visualisierung von Kraftstoff. Als Tracer wurde dem Öl Pyrrromethen 567 und dem Multikomponenten-Surrogat-Kraftstoff Anisol zugesetzt. Zur Untersuchung der Kraftstoff-Wandbenetzung eines Mehrloch-Magnetinjektors wurde ein neuartiger optischer Zylinder entwickelt, der über vier Saphirfenster verfügt, die durch Rotation auf einzelne Kraftstoffstrahlen ausgerichtet werden können.

In Erweiterung der früheren Arbeiten wurde hier die Kraftstofffilmdicke auf der Zylinderwand anhand des detektierten Fluoreszenzsignals quantifiziert. Zu diesem Zweck wurde eine Flachfeldkorrektur eingeführt. In der Absolutwertkalibrierung wurde ein signifikantes LIF-Signal in Bereichen detektiert, in denen es erwartungsgemäß nahe Null liegen sollte. Dies ist auf eine mangelhafte Antwort des Hochgeschwindigkeits-Bildverstärkers auf hohe Ortsfrequenzen zurückzuführen (sogenannte „Halos“). Dieser Signalversatz wurde im Kalibrierprozess abgezogen. In den Aufnahmen der Motorversuche wurden Effekte durch Halo jedoch nicht korrigiert. Die Dicke des Kraftstofffilms könnte daher im Bereich um die dicksten Kraftstoffwandfilme überschätzt worden sein. Ein Übersprechen von Ölfluoreszenz in die Kraftstoff-LIF Aufnahmen wurde korrigiert, indem die Aufnahmen eines geschleppten Zyklus ohne Kraftstoffeinspritzung als Hintergrund von den Aufnahmen mit Kraftstoffeinspritzung subtrahiert wurden. Die Kraftstoffwandbenetzung wurde für zwei verschiedene Einzeleinspritzungen (285 °KW vs. 240 °KW vZOT) verglichen.

Nach der Einspritzung war ein erhöhtes Hintergrundsignal zu beobachten, das einer Kraftstofffilmdicke von 3 µm entsprach, was hauptsächlich auf Gasphasen-Fluoreszenz des verdampften Kraftstoffes zurückzuführen war. Im vorliegenden Experiment wurden, im Gegensatz zu einigen Ergebnissen in der Literatur [114, 151, 152], keine erkennbaren „Fingerprints“ der Kraftstofffilme festgestellt. Es sind weitere Experimente erforderlich, um zu klären, ob die Umrisse der Kraftstofffilme nur aufgrund der begrenzten optischen Auflösung des Hochgeschwindigkeits-LIF-Systems unscharf erfasst wurden.

In einem Bereich in der oberen Hälfte des optischen Zugangs wurde für die beiden Einspritzzeitpunkte der zeitliche Verlauf der Kraftstofffilmdicke verglichen. Überraschenderweise nahm die Filmdicke in beiden Fällen bis zu dem Zeitpunkt, an dem der erste Kolbenring des Flüssigfilm abstreift, auf ein ähnliches Niveau von 8 bis 9 µm ab, obwohl die für die Verdampfung zur Verfügung stehende Zeit bei der späten Einspritzung 5 ms kürzer war. Wenn der Kolben die Wandfilme erreichte, wurde der verbleibende Kraftstoff abgestreift und sammelte sich auf den Kolbenringen an. In Übereinstimmung mit früheren Untersuchungen [24, 109] konnte man in den Aufnahmen der Ölfluoreszenz zu sehen, wie der abgestreifte Kraftstoff Öl aus dem Ringfeld auswusch. Abgestreifter Kraftstoff wurde schnell aus der ersten Ringnut in Richtung des Kurbelgehäuses transportiert.

Die Quantifizierung der Kraftstofffilmdicken auf der Zylinderwand konnte mit Wiederholraten im kHz-Bereich demonstriert und die Verdampfung der Wandfilme im laufenden Motor untersucht werden.

Die Gesamtmessunsicherheit der Einzelpixel-Einzelschuss Messungen wurde für 10 µm dicke Kraftstofffilme zu 29 % bestimmt. Die Schuss-zu-Schuss Schwankungen der Laserenergie waren die größte Quelle von Präzisionsfehlern, die durch die Messung der Laserpulsenergie erheblich verbessert werden könnte. Die maximale Messungenauigkeit wurde für dünne Kraftstofffilme auf 7,4 % geschätzt. Dabei wurden jedoch die schwer zu quantifizierenden, möglicherweise aber signifikanten Effekte durch Halo nicht berücksichtigt. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass das Halo-Phänomen genauer untersucht werden muss, um die Quantifizierungsprozesse in bildgebenden Systemen zu verbessern, in denen ein Hochgeschwindigkeits-Bildverstärker zum Einsatz kommt.

Die vorgestellten Ergebnisse zeigen, dass sich flüssiger Kraftstoff in den oberen Bereichen des Ringfeldes, insbesondere dem Feuersteg, akkumulieren kann. Zusätzlich kann Öl durch die Verdünnung mit Kraftstoff aus den Ringstegen ausgewaschen werden. Die Beobachtungen führen zu der Frage, inwieweit Kraftstoffansammlungen mit den Verbrennungsgasen im Feuersteg interagieren, bzw. den Verbrennungsprozess beeinflussen können.

7 Visualisierung der Flammenausbreitung in die Ringstege

Im folgenden Kapitel wird die Flammenausbreitung in den Feuersteg des Kolbens durch die bildgebende Erfassung des natürlichen Flammenleuchtens im sichtbaren Spektrum untersucht. Das Phänomen wurde bereits in einer Vorstudie des Autors [153] untersucht. In einer nachträglichen Inspektion wurde jedoch festgestellt, dass die Saphirfenster im Verlauf der Messungen leicht nach außen gedrückt wurden ($25\ \mu\text{m}$), was die Ergebnisse verfälscht haben könnte. Im folgenden Kapitel werden Untersuchungen mit einer wiederaufbereiteten Zylindereinheit zur Validierung der Ergebnisse vorgestellt. Das Phänomen wird detaillierter untersucht, insbesondere durch eine Erhöhung der zeitlichen Auflösung der Messungen.

7.1 Versuchsaufbau

7.1.1 Mechanischer Versuchsaufbau

Die Versuche werden mit Zylinder 2 (vgl. Kapitel 4.2) durchgeführt. Die im Vergleich zu Zylinder 1 und 3 reduzierte Größe der Fenster erlaubt es, den Motor mit Lasten von bis zu 27 bar p_{mi} befeuert zu betreiben. Kühlwasser und Schmieröl werden im Versuch auf eine Temperatur von $50\ \text{°C}$ konditioniert. Bei dieser Temperatur werden die Toleranzen des Serienmotors am genauesten abgebildet und es wird sichergestellt, dass die Stufe beim Übergang von der Grauguss- zur Saphiroberfläche in der Zylinderlaufbahn weniger als $5\ \mu\text{m}$ beträgt. Für die Versuche wird der Kolben der leistungsstärksten Variante der Motorengeneration M270/M274 verwendet. Der Kolben verfügt über einen internen Kühlkanal, der in Kombination mit einer Anspritzkühlung durch Motoröl für eine bessere Wärmeabfuhr sorgt und eignet sich somit gut für Untersuchungen von hohen Motorlasten. Im Versuch ist die Ölspritzdüse dauerhaft aktiviert. Als Kraftstoff kommt kommerzieller Hoch-Oktan-Kraftstoff zum Einsatz. Die genaue Oktanzahl des Kraftstoffes ist unbekannt, der Hersteller gibt jedoch eine RON (engl. research octane number) von mindestens 100 an.

7.1.2 Optischer Versuchsaufbau

Zur Detektion der Flammenlumineszenz wird eine Hochgeschwindigkeits-CMOS-Farbkamera (Phantom v1612) verwendet. Die Kamera verfügt über eine Digitalisierungstiefe von 12 bit und eine maximale Auflösung von 1280×800 Pixel bei einer Bildwiederholrate von 16600 fps (16,6 kfps). Die Bildwiederholrate kann gesteigert werden, indem nur ein Teilbereich des Sensors ausgelesen wird. Die Kamera ist mit einem kommerziellen Objektiv mit einer festen Brennweite von 85 mm (AF-Nikkor 1:1,8D) bestückt, dessen Blende im Versuch voll geöffnet ist ($f/1,8$). Aufgrund des geringen Abstandes zwischen der Bild- und Objektebene wurde zusätzlich eine achromatische Nahlinse (Canon 500D) verwendet, um die Naheinstellgrenze des optischen Systems zu verringern. Im Versuch werden Bilder entweder mit einer Bildwiederholrate von 24 kfps aufgezeichnet, was bei der gewählten Motordrehzahl von $2000\ \text{min}^{-1}$ zwei aufgenommenen Bildern je $^{\circ}\text{KW}$ entspricht, oder mit 96 kfps, bzw. acht Bildern pro $^{\circ}\text{KW}$. Die Belichtungszeit beträgt $40,6\ \mu\text{s}$ für 24 kfps und $9,4\ \mu\text{s}$ für 96 kfps. In den Versuchsreihen mit 24 kfps werden 896×336 Pixel ausgelesen, die projizierte Pixelgröße beträgt dabei $101\ \mu\text{m}/\text{Pixel}$. Für die

Messungen mit 96 kHz wird der Abstand zwischen Kamera und Fenster reduziert, um die geringere Signalintensität aufgrund der kürzeren Belichtungszeit teilweise auszugleichen. In diesen Messungen wird lediglich das obere Drittel des Fensters visualisiert, um Vorgänge in den frühen Phasen der Expansion zu untersuchen. Hier werden 356 x 256 Pixel ausgelesen, die projizierte Pixelgröße beträgt dabei 77 $\mu\text{m}/\text{Pixel}$.

Abbildung 7-1 zeigt eine Fotografie des optischen Versuchsaufbaus auf der GDS des Motorprüfstandes. Alle Untersuchungen werden auf der GDS durchgeführt. Der Spalt zwischen Kolben und Zylinderwand ist aufgrund von Kolbensekundärbewegungen während der Expansion auf der GDS höher als auf der DS und bietet somit die besseren Voraussetzungen für ein Eindringen der Flamme in den Feuersteg.

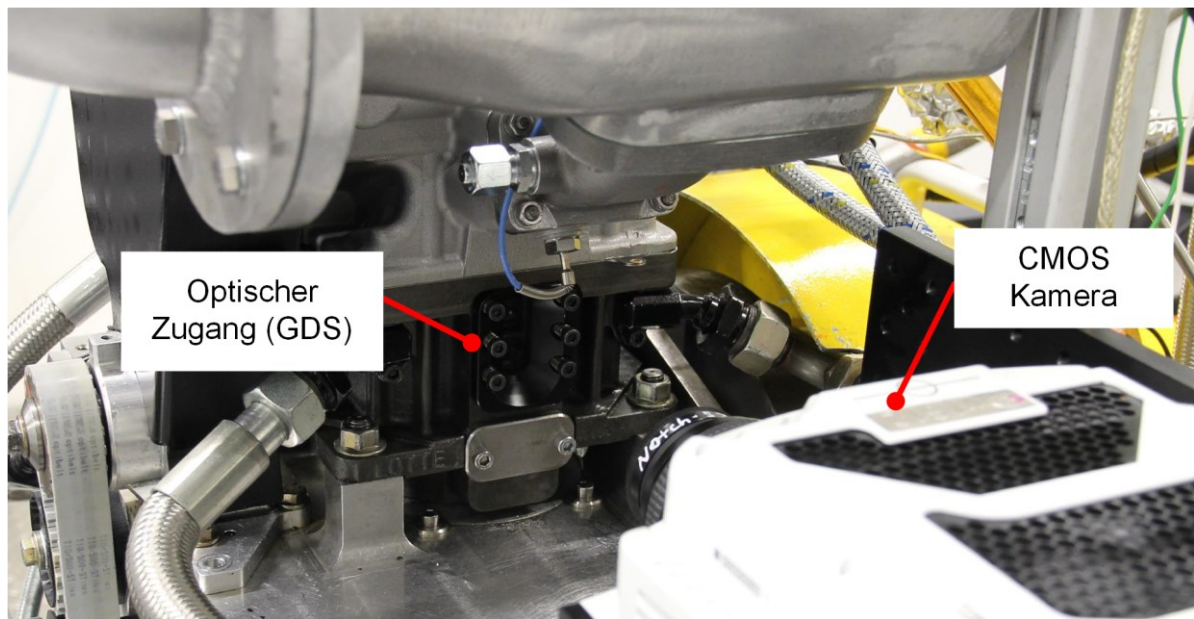


Abbildung 7-1: Versuchsaufbau am optisch zugänglichen Einzylindermotor.

In den Voruntersuchungen [153] stellte das im Vergleich zu dem zu messenden Phänomen helle Flammenleuchten im Brennraum ein Problem dar. Durch die hohen Signalintensitäten trat Überstrahlen (Lichtstreuung im Kamerasystem, engl. flare) in die dunklen Sensorbereiche auf. Dieses Signalübersprechen wurde vor allem durch Rußleuchten im Brennraum ausgelöst und im roten Kanal der Kamera detektiert. Daher wird in den nachfolgenden Untersuchungen ein Farbglasfilter verwendet (Schott BG23, 1 mm Dicke), der den roten Anteil des Flammenleuchtens abschwächt, die für eine vorgemischte Verbrennung typische blaue Chemilumineszenz jedoch größtenteils transmittiert. Die verwendete Kamera ist mit einem GRBG Bayer-Farbfilterarray bestückt. Für die Interpolation der Farbinformationen der Bilder (engl. demosaicing) wird der Algorithmus aus [154] verwendet.

Die resultierende spektrale Auslegung des optischen Systems ist in Abbildung 7-2 dargestellt. Dargestellt sind die Quanteneffizienzen der drei Farbkanäle der RGB-Kamera [155] durch gestrichelte farbige Linien (Farbgebung analog zu den „Kanalfarben“). Die schwarze Kurve zeigt die Transmission des Farbglasfilters [156] und die durchgezogenen, farbigen Linien die kombinierte Transmission des Filters und Quanteneffizienz der Farbkanäle. Als Referenz ist die Schwarzkörperstrahlung bei $T=2400\text{ K}$ durch die schwarze, gestrichelte Linie gezeigt. In optischen Messungen der Ruß-Temperatur in

Ottomotoren wurden typische Ruß-Temperaturen von 1600-2400 K [56] ermittelt. Aufgrund der hohen Motorlasten im vorliegenden Versuch wurde hier die obere Grenze gewählt.

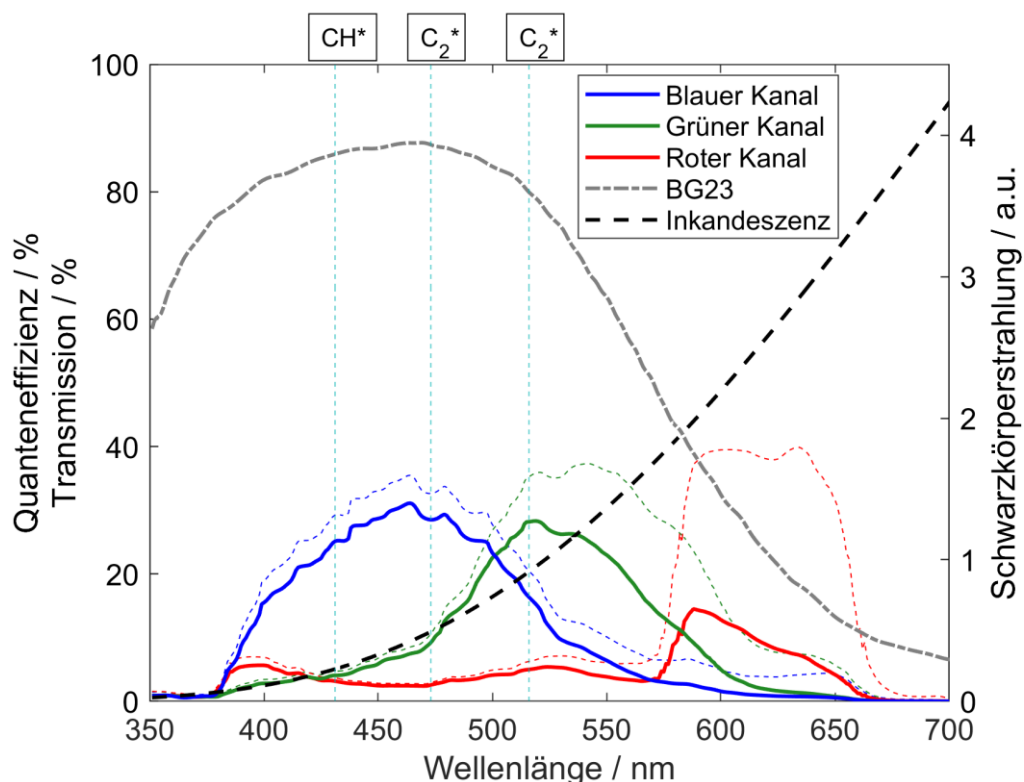


Abbildung 7-2: Spektrale Auslegung des optischen Systems. Für die Farbkanäle zeigen gestrichelte, farbige Linien die Quanteneffizienzen der Pixel an, während durchgezogene Linien die Kombination aus Quanteneffizienzen und BG23-Transmission zeigen. Quanteneffizienzen der Farbkanäle aus [155], Transmission des Filters aus [156]. Als Referenz sind die spektrale Verteilung eines schwarzen Körpers bei $T=2400$ K und die spektrale Lage der charakteristischen Emissionsmaxima der CH^* - und C_2^* -Chemilumineszenz gezeigt.

Die Intensitätsmaxima der CH^* - und C_2^* -Chemilumineszenz sind durch die vertikalen, gestrichelten Linien angezeigt. In Verbrennungsmotoren dominiert üblicherweise die Chemilumineszenz von OH^* und CH^* das detektierte Gesamtsignal [48]. Das bildgebende System ist bei Wellenlängen unterhalb von 370 nm jedoch nicht sensitiv, daher kann die Chemilumineszenz von OH^* nicht detektiert werden. Oberhalb von 670 nm wird einfallendes Licht ebenfalls nicht transmittiert, daher wird auch der Infrarot-Anteil der Inkandeszenz nicht detektiert. Zu sehen ist, dass der BG23 vorrangig im roten Kanal abschwächt, während Signal im blauen Farbkanal effektiv transmittiert wird und somit große Teile des Chemilumineszenz-Spektrums (vgl. Kapitel 2.2.3) weiterhin detektiert werden.

7.2 Bildverarbeitung

Die aufgenommenen Rohdaten werden verschiedenen Bildverarbeitungsprozessen unterzogen, die im folgenden Abschnitt vorgestellt werden. Alle gezeigten Aufnahmen wurden bereits durch Interpolation [154] in den RGB-Farbraum überführt. Die durchgeführten Bildverarbeitungsschritte sind in Abbildung 7-3 anhand einer Beispielaufnahme aus dem Experiment dargestellt.

Abbildung 7-3 (a) zeigt ein Rohbild aus den frühen Teilen der Expansion ($21,5^\circ\text{KW nZOT}$). Zur Orientierung markiert die rote Umrandung die Grenzen des optischen Zugangs. Der Kolben gibt hier

nur einen kleinen Teil des Brennraumes frei, der sich durch ein hohes Signal (1) äußert. Anhand des abrupten Signalabfalls in vertikaler Richtung ist die Oberkante des Kolbens gut zu erkennen. Signal unterhalb dieses steilen Gradienten wird im Feuersteg des Kolbens (2) detektiert. Wie hier zu erkennen ist, ist das detektierte Signal niedrig und wird durch das Hintergrundsignal des Sensors („grauer Schleier“) überlagert. Daher wird von jedem Einzelbild eine Hintergrundaufnahme, dargestellt in Abbildung 7-3 (b), subtrahiert. Die Hintergrundaufnahme ist eine Aufnahme aus dem eigentlichen Versuch bei 15 °KW nZOT, wenn der Kolben noch den gesamten optischen Zugang verdeckt, Ensemble-gemittelt über die 450 aufgezeichneten Motorzyklen (vgl. Kapitel 7.3).

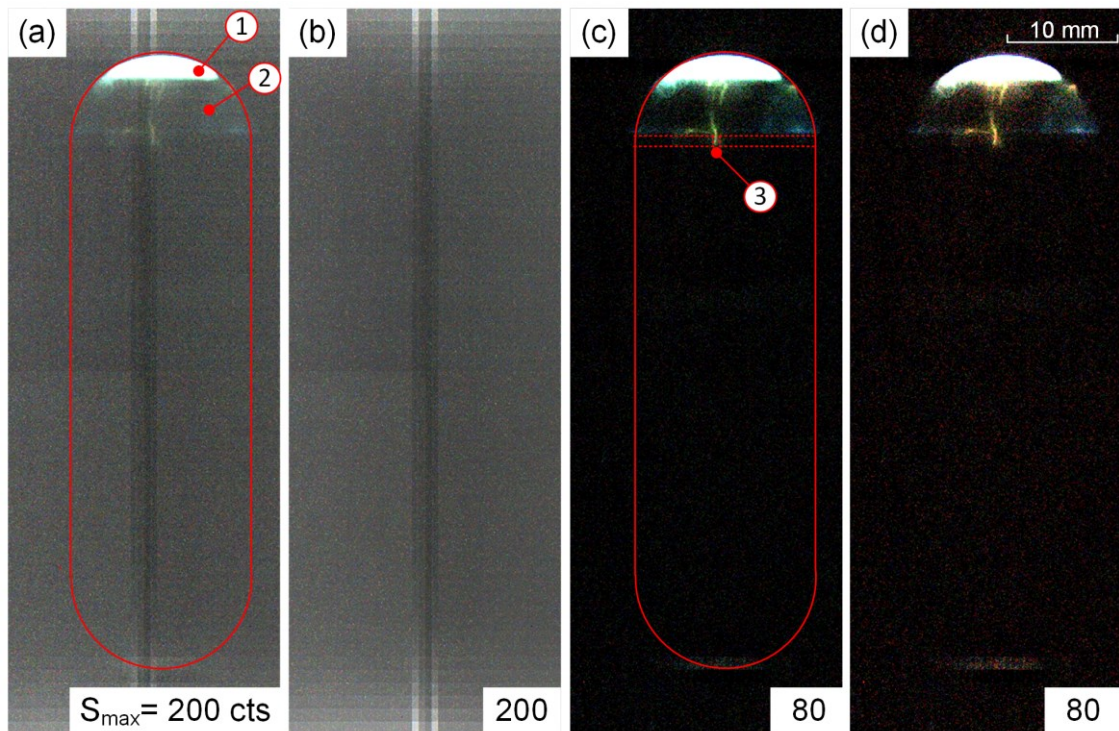


Abbildung 7-3: Durchgeführte Bildverarbeitungsschritte, dargestellt anhand einer Aufnahme 21,5 °KW nZOT. (a): Rohbild (b): Ensemblemittel des Hintergrundes (c): Hintergrundkorrigierte Aufnahme (d): Hintergrund- und farbraumkorrigierte Aufnahme. Die Zahl unten rechts zeigt jeweils das Maximum der Farbskala in counts an. Mit Zahlen gekennzeichnete Features werden im Text erläutert.

Die hintergrundkorrigierte Aufnahme ist in Abbildung 7-3 (c) dargestellt. Hier ist zusätzlich zur Umrandung des Fensters die Position des ersten Kolbenringes durch die gestrichelte Umrandung markiert. Die Unterbrechung der Umrandung kennzeichnet die Position des Kolbenringstoßes (3). Im Versuch ist der erste und zweite Kolbenring mit den Kolbenringstößen im Sichtfeld des optischen Zuganges auf der GDS gegen Rotation gesichert. Die Rotationssicherung ist durch eine Nut im Kolbenring in der Kolbenbolzenachse realisiert, in die ein Stift in der Kolbenringnut eingreift. Da der Stift innerhalb der Nut Spiel hat, ist der Kolbenringstoß nicht zwangsläufig in der Fenster-Mittelachse zentriert.

Das Einbringen des BG23 Filters verschiebt den Weißabgleich der Kamera in Richtung Blau (vgl. Abbildung 7-3 (c)). Um eine intuitive Interpretation der Aufnahmen zu ermöglichen, wird eine Farbraumkorrektur durchgeführt. Dazu wird für jeden Farbkanal ein Korrekturfaktor K nach Gleichung (7.1) bestimmt:

$$K_{R,G,B} = \frac{\int_{350nm}^{700nm} QE_{R,G,B}}{\int_{350nm}^{700nm} QE_{R,G,B} \tau_{BG23}} \quad (7.1)$$

mit der Wellenlängen-abhängigen Quanteneffizienz des jeweiligen Pixels $QE_{R,G,B}$ und der ebenfalls Wellenlängen-abhängigen Transmission des Farbglasfilters τ_{BG23} . Der Korrekturfaktor K entspricht also dem Quotienten der Flächeninhalte unterhalb der jeweiligen gestrichelten und der zugehörigen durchgezogenen Linie in Abbildung 7-2. Die auf diese Weise ermittelten Korrekturfaktoren $K_R = 2,63$, $K_G = 1,57$ und $K_B = 1,29$ werden anschließend auf die Farbkanäle des Bildes angewendet, woraus sich Abbildung 7-3 (d) ergibt. Durch die Korrektur ändert sich hauptsächlich die Farbe des Features in der Mitte des Feuerstegs ins rötliche und entspricht damit der erwarteten Farbgebung der Ruß-Inkandeszenz (vgl. Abbildung 7-2). Die Farbgebung in Abbildung 7-3 (d) entspricht in guter Übereinstimmung der einer Aufnahme ohne Farbglasfilter. In den Aufnahmen im Ergebnisteil (vgl. Kapitel 7.4) sind die Umrisse des Fensters und der Kolbenringe nicht markiert. Die verschiedenen Bereiche des Kolbens sind jedoch durch steile Gradienten im detektierten Flammenleuchten identifizierbar, gut zu erkennen in Abbildung 7-3 (d). Der Übergang vom Feuersteg zum ersten Kolbenring ist hier als horizontale Linie sichtbar, oberhalb derer Flammenleuchten detektiert wird. In dieser Beispielaufnahme wird Flammenleuchten auch im Ringstoß detektiert (3). Auf die im Folgenden gezeigten Aufnahmen wurde außerdem zur Rauschunterdrückung ein NLM-Filter [157] (engl. Non-local-means) angewendet. Die Auswahl des Filter-Algorithmus wird in Anhang A.1 beschrieben.

7.3 Versuchsdurchführung

Die Versuche wurden bei einer für Vorentflammungen typischen Drehzahl von 2000 min^{-1} durchgeführt. Kraftstoff wird durch einen Piezo-Injektor mit einem Druck von 200 bar in sieben Einspritzungen pro Zyklus eingebracht: vier während des Ansaugens und drei während der Kompression. Die Einspritztimings stammen aus unabhängig durchgeführten Untersuchungen zur Reduktion von Kraftstoff-Wandbenetzung. Es werden zwei Motorlasten untersucht: 26,5 bar und 14 bar p_{mi} . Zur Erreichung der Lasten wird dem Motor durch eine externe Luftkonditionierung Umgebungsluft mit einem Absolutdruck von 2,4 bzw. 1,4 bar zugeführt. Für die niedrigere Motorlast von 14 bar p_{mi} wird die Dauer aller Einzeleinspritzungen im Vergleich zu 26,5 bar p_{mi} anteilig reduziert. Das Kraftstoff-Luft-Verhältnis ist zu $\lambda=1$ eingestellt. Der Motor wird vor jeder Aufnahmeserie 30 Sekunden lang befeuert betrieben. Für jede Motorlast werden anschließend in 450 aufeinanderfolgenden Zyklen Bilder mit einer Wiederholrate von 24 kfps von 15 °KW nZOT bis 105 °KW nZOT aufgezeichnet, was zwei Aufnahmen pro °KW entspricht. Für 26,5 bar p_{mi} wird eine zweite Messreihe mit einer Bildwiederholrate von 96 kfps, bzw. acht Bildern pro °KW durchgeführt. Für jeden Zyklus wird außerdem der Zylinderdruck mit einer Abtastrate von 24 kHz aufgezeichnet. Der Zündzeitpunkt ist zu 4,5 °KW vZOT eingestellt, sodass einzelne Zyklen bei einer Last von 26,5 bar p_{mi} moderate Klopf-schwingungen aufweisen. Die Intensität von Klopf-Ereignissen wird häufig durch die maximale Amplitude der Druckschwingung (MAPO, engl. maximum amplitude of pressure oscillations), oder die integrierten Beträge der Druckschwingungen

(IMPO, engl. integrated mean of the modulus of pressure oscillations) charakterisiert [158]. Dazu wird das Drucksignal Hochpass-gefiltert (Grenzfrequenz 4 kHz) und IMPO und MAPO der Absolutwerte im Kurbelwinkelbereich zwischen 10 und 70 °KW nZOT bestimmt. Für 26,5 bar p_{mi} beträgt der IMPO-Mittelwert 6,7 bar·°KW und der MAPO-Mittelwert 1,1 bar. Von Zyklus zu Zyklus schwankt der IMPO-Wert zwischen 0 und 54,2 bar·°KW und der MAPO-Wert zwischen 0 und 7,5 bar. Bei einer Last von 14 bar p_{mi} tritt kein Klopfen auf, da der Zündzeitpunkt von 4,5 °KW vZOT beibehalten wurde, um eine gute Vergleichbarkeit der beiden Messreihen sicherzustellen. Der AI50-Mittelwert (der Zeitpunkt, an dem 50 % des Kraftstoffes umgesetzt sind) beträgt 14,8 °KW nZOT für 26,5 bar p_{mi} und 16,6 °KW nZOT für 14 bar p_{mi} . Abbildung 7-4 zeigt beispielhaft die aufgezeichneten Zylinderdruckverläufe der 50 aufeinanderfolgenden Zyklen 350 bis 400 für beide untersuchten Motorlasten, um einen Eindruck der Zyklusschwankungen zu vermitteln. Null °KW entspricht hier dem Zünd-OT, daher sind Kurbelwinkel im Kompressionstakt negativ.

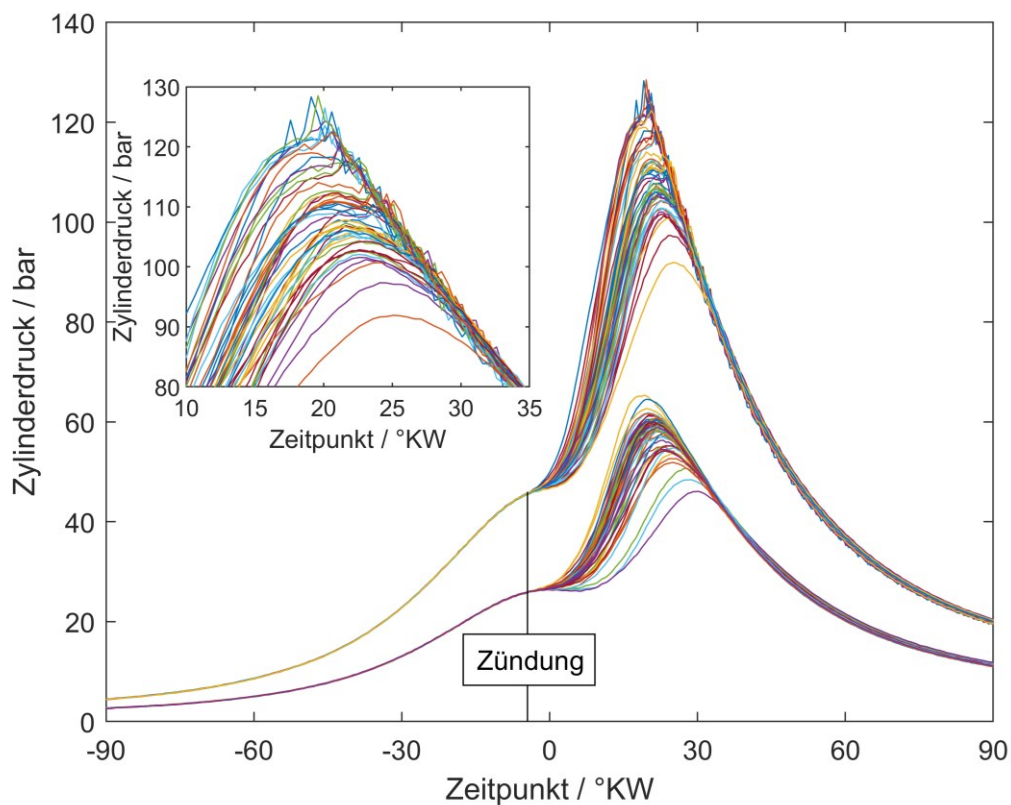


Abbildung 7-4: Zylinderdruckverläufe der Zyklen 350 bis 400 für beide Motorlasten mit einer vergrößerten Ansicht der Zylinderspitzen drücke für 26,5 bar p_{mi} oben links.

Für beide Motorlasten sind die Zylinderdruckverläufe innerhalb der jeweiligen Last bis zum ZZP bei -4,5 °KW vZOT identisch. Anschließend unterscheiden sich die Verläufe sowohl in ihrer Steigung, also der Druckanstiegsrate, als auch dem erreichten Spitzendruck. Für 26,5 bar p_{mi} werden in den meisten Zyklen Zylinderspitzen drücke von 100 bis 120 bar erreicht, in einzelnen Zyklen lediglich 90 bis 100 bar. In den Zylinderdruckverläufen von einigen Zyklen sind kurz nach Erreichen des Spitzendruckes hochfrequente Druckschwankungen zu sehen (siehe Detailansicht oben links), die charakteristisch für Klopfen sind. Zyklen mit hohen Spitzendrücken erreichen diesen außerdem früher innerhalb des Zyklus verglichen mit den Zyklen mit geringerem Spitzendruck. Die Zylinderdruckverläufe für 14 bar p_{mi} weisen

einen ähnlichen Verlauf im Vergleich zu den Zylinderdruckverläufen für 26,5 bar p_{mi} auf, wobei der Hauptunterschied in den Zylinderspitzendrücken besteht, die im Bereich von 45 bis 60 bar liegen.

7.4 Ergebnisse

Angelehnt an die Voruntersuchungen [153] wird das Phänomen von Flammeneigenleuchten im Feuersteg im Folgenden als TLFP (Top Land Flame Propagation) bezeichnet. Dabei bezeichnet TLFP zunächst jegliches Flammenleuchten im Feuersteg, ungeachtet dessen, ob es sich um eine aktive Propagation der Flammenfront handelt, oder nicht.

Im folgenden Abschnitt werden ausgewählte Zyklen beider Motorlasten präsentiert, in denen TLFP Ergebnisse gut sichtbar sind, um das Phänomen und dessen zeitlichen Verlauf im Detail zu beschreiben.

7.4.1 Hohe Motorlast (26,5 bar p_{mi})

In Abbildung 7-5 ist der zeitliche Verlauf eines TLFP Ereignisses für eine Motorlast von 26,5 bar p_{mi} im Zyklus 386 dargestellt. Die meisten Abbildungen zeigen nur den oberen Bereich des Fensters mit dem Feuersteg und dem ersten Kolbenring im Sichtfeld, da der Kolben zum Zeitpunkt, an dem TLFP auftritt, den Großteil des optischen Zuganges verdeckt. Der Zyklus wurde aufgrund der guten Sichtbarkeit des Phänomens ausgewählt, ist aber repräsentativ für den Großteil der aufgenommenen Motorzyklen.

18 °KW nZOT wird noch kein Flammenleuchten im Feuersteg detektiert. Das helle, rundliche Feature in der oberen linken Ecke (1) wird durch eine Verunreinigung verursacht, vermutlich durch einen Öltropfen auf der Außenfläche des Fensters, an dem Licht aus dem Brennraum oberhalb gestreut und von der Kamera detektiert wird. Kurze Zeit später, 18,5 °KW nZOT, tritt blaues Flammenleuchten in den Feuersteg ein und bedeckt die obere Hälfte des Feuerstegs, wobei eine „Zunge“ von Flammenleuchten bereits bis zur Oberkante des ersten Kolbenringes reicht. 19 °KW nZOT ist bereits der Großteil des Feuerstegs von blauem Flammenleuchten bedeckt. Kurz oberhalb des Kolbenringstoßes ist ein kleines, helles Feature zu sehen, das hauptsächlich im roten Kanal der Kamera detektiert wird, was auf Rußleuchten als Quelle schließen lässt. Diese rußende Verbrennung wird höchstwahrscheinlich durch eine Benetzung der Wand durch Kraftstoff während der frühen Teile der Einspritzstrategie verursacht. Bei derart hohen Motorlasten müssen große Mengen Kraftstoff in den Brennraum eingebracht werden, sodass sich selbst bei einer 7-fach Einspritzung Flüssigfilme auf der Zylinderwand bilden. Diese können, vor allem bei niedrigen Motortemperaturen, während des Ansaugens nicht vollständig von der Wand abdampfen. Der flüssige Kraftstoff wird dann während der Kompression durch den ersten Kolbenring von der Zylinderwand abgekratzt. Als Folge bilden sich Ansammlungen von flüssigem Kraftstoff auf dem ersten Kolbenring (vgl. Kapitel 6), insbesondere im Bereich um den Ringstoß, da flüssiger Kraftstoff durch das Blowby durch den Ringstoß transportiert wird.

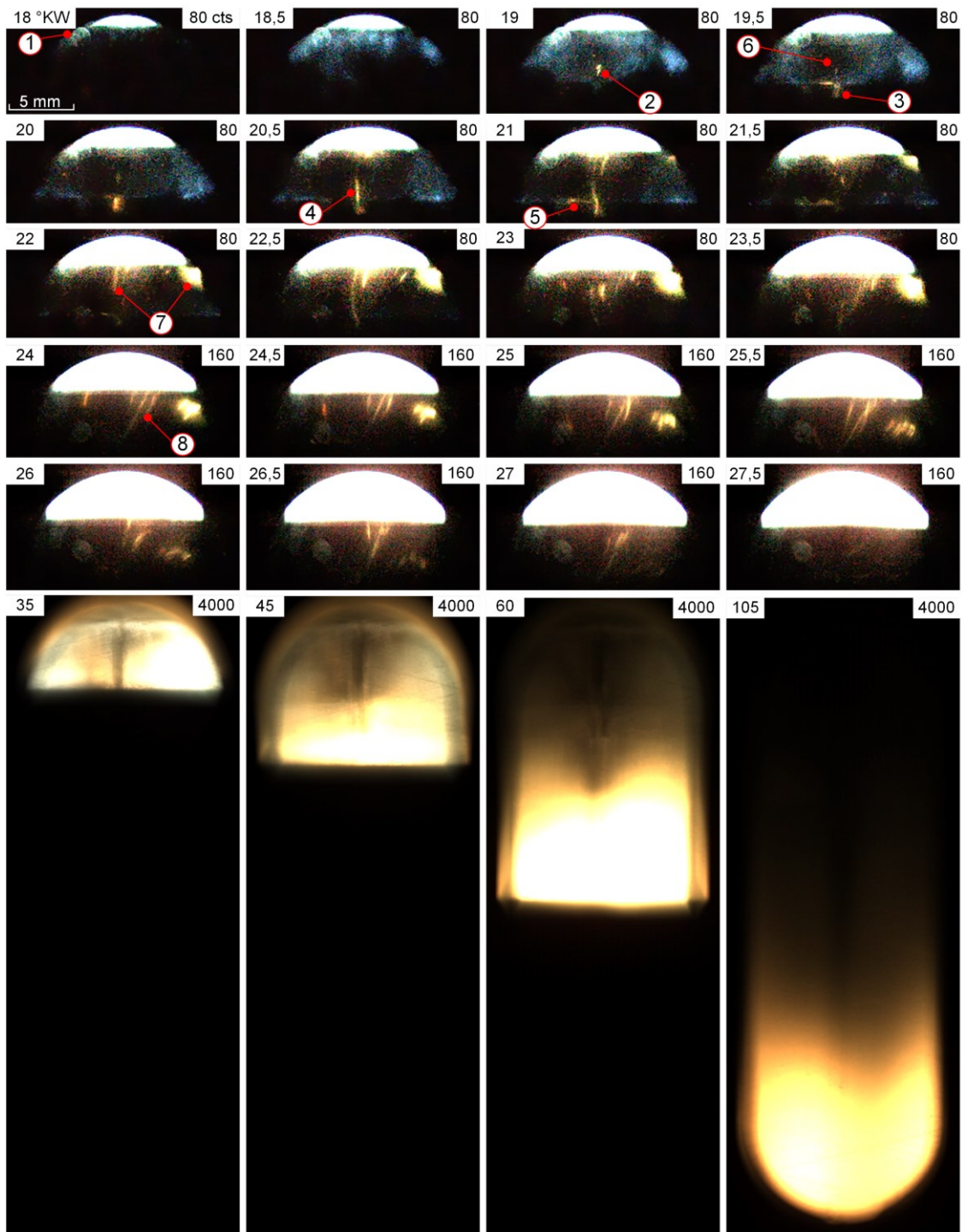


Abbildung 7-5: Zeitlicher Verlauf von TLFP bei 26,5 bar p_{mi} im Zyklus 386. Der Zeitpunkt in °KW nZOT ist in der oberen linken Ecke, das Maximum der Farbskala in counts in der oberen rechten Ecke des jeweiligen Bildes angegeben. Mit Zahlen markierte Features werden im Text erläutert.

Von 19,5 bis 21 °KW nZOT ist orangenes Flammenleuchten im Ringstoß des ersten Kolbenringes zu sehen, teilweise aber auch in Form einer länglichen, orangenen Flammenzunge oberhalb des Kolbenringes (4) und unmittelbar neben dem Ringstoß (5). Währenddessen breitet sich blaues Flammenleuchten weiter innerhalb des Feuerstegs aus. Diese laterale Ausbreitung findet im Vergleich zum initialen Eindringen der Flamme in den Feuersteg bei 18,5 °KW nZOT langsam statt. Außerdem ähnelt der Vorgang einer sich aktiv ausbreitenden Flammenfront: im rechten Bereich des sichtbaren Feuerstegs breiten sich die Ränder des leuchtenden Gases in die zuvor noch dunklen Bereiche aus

(19 - 20 °KW nZOT). Gleichzeitig nimmt die Intensität des blauen Leuchtens im mittleren Bereich des Feuerstegs (6) ab, da das Kraftstoff-Luft-Gemisch in diesen Bereichen vollständig verbrannt ist. Ab 22 °KW nZOT wird kein blaues Flammenleuchten mehr detektiert. Stattdessen dringt orangenes bzw. weißes Flammenleuchten vom Brennraum und den seitlichen Bereichen des Sichtfelds (7) in den Feuersteg ein. Unabhängig vom Eintrittspunkt bewegen sich diese Bereiche anschließend in Richtung des Ringstoßes, innerhalb dessen sie erlöschen. Dies deutet auf einen konvektiven, durch Blowby verursachten Transport des brennenden Gemisches hin. Für derart hohe Motorlasten bildet der Kolbenring eine effektive Dichtung, da der hohe Brennraumdruck auf die innere und die obere Stirnfläche des Kolbenringes wirkt und den Ring gegen die Zylinderlaufbahn und die untere Ringnutflanke presst. Infolgedessen kann Blowby nur durch den Ringstoß strömen [159]. Auch hier weisen die orangenen Features eine längliche Form auf, die ausgeprägter wird, während sie in Richtung des Ringstoßes strömen. Diese Längenausdehnung wird offensichtlich nicht durch Bewegungsunschärfe der Kamera ausgelöst, da einige Features nachverfolgbar sind (8) und über mehrere °KW eine ähnliche Form beibehalten. In der folgenden Zeit (26 – 27,5 °KW nZOT) verringert sich die Helligkeit der Features allmählich, bis kein Flammenleuchten mehr im Feuersteg detektiert wird. Das währenddessen ansteigende rötliche Signal im oberen Bereich des Feuerstegs wird durch Überstrahlen verursacht, da ein größerer Bereich des hellen Brennraumes sichtbar wird. In den späteren Teilen der Expansion (35 – 105 °KW nZOT) ist ein Bereich hellen, orange-weißen Flammenleuchtens auf dem Kolbenboden zu sehen, der wahrscheinlich durch Rußbildung aufgrund von flüssigen Kraftstofffilmen auf dem Kolben ausgelöst wird. Dieses Flammenleuchten zeigt keine deutlichen Strukturen, da es sich nicht in der Fokusebene des optischen Systems befindet.

Insgesamt kann der zeitliche Ablauf von TLFP in drei phänomenologische Phasen unterteilt werden:

1. Initiale Flammenpropagation einer größtenteils blauen Flammenfront in den Feuersteg. Dieser Vorgang passiert schnell, innerhalb einer Zeitskala von etwa 1 °KW, oder 83 μ s. Während dieser initialen Flammenpropagation sind nur kleine Features roten Flammenleuchtens zu sehen, hauptsächlich an der Oberflanke des ersten Kolbenringes oder innerhalb des Ringstoßes.
2. Flammenpropagation der blauen Flammenfront innerhalb des Feuersteges in die Bereiche, in denen zuvor noch kein Flammenleuchten detektiert wurde. Dieser Vorgang ist im Vergleich zur initialen Propagation langsam und dauert einige °KW an.
3. Längliche, rote „Flammenzungen“ treten in den Feuersteg ein und bewegen sich in Richtung des Ringstoßes, in dem sie anschließend erlöschen. Auch dieser Vorgang findet über mehrere °KW statt.

Während der ersten Phase ergibt sich aus der Dauer des Ereignisses und der Feuersteghöhe von 6,5 mm eine grobe Abschätzung von 100 – 150 m/s für die Flammenausbreitungsgeschwindigkeit. Der Spalt zwischen Feuersteg und Zylinderlaufbahn ist zu eng für das Auftreten von turbulenter Strömung, daher kann hier von laminaren Bedingungen ausgegangen werden. Die empirische Gleichung aus [160] liefert für die im Brennraum vorherrschenden Bedingungen eine laminare Brenngeschwindigkeit von 1,2 m/s. Die tatsächliche Brenngeschwindigkeit im Feuersteg könnte höher als der errechnete Wert für die laminare Brenngeschwindigkeit sein, da die Flammenfront, die in den Spalt eintritt, aufgrund von Turbulenz im Brennraum eine aufgefaltete Struktur aufweist. Jedoch erklärt auch diese Erhöhung der

Flammenoberfläche durch eine Auffaltung der Flammenfront nicht die durch die Aufnahmen implizierten Geschwindigkeitswerte. Daher ist davon auszugehen, dass die erste Phase von TLFP keine aktive Flammenausbreitung darstellt, sondern durch einen konvektiven Transport von leuchtendem Gas durch die Kompression im Brennraum und den daraus entstehenden Blowby-Strom ausgelöst wird.

Eine manuelle Nachverfolgung von Strukturen innerhalb der Flammenfront ergeben für die zweite Phase Flammenausbreitungsgeschwindigkeiten in der Größenordnung von 15 m/s. Obwohl dies noch immer deutlich höher ist als die berechnete laminare Brenngeschwindigkeit, erscheint hier eine sich aktiv ausbreitende Flammenfront, unterstützt durch die Auffaltung der Flammenfront, plausibel.

Der Ursprung der länglichen Features orangenen Flammenleuchtens während der dritten Phase ist unklar. Die Aufnahmen legen eine Verbindung mit der rußenden Verbrennung auf dem Kolbenboden nahe. Wenn sich diese Verbrennungszonen nah an der Zylinderwand befinden, ist es denkbar, dass Abgas und leuchtender Ruß durch Blowby in den Spalt des Feuerstegs transportiert wird. Allerdings liefert die hier verwendete bildgebende Messtechnik lediglich Sichtlinien-integrierte Signale, daher kann die Tiefenposition der Verbrennungszonen innerhalb des Brennraum nicht aus den Aufnahmen abgeleitet werden.

Nicht alle aufgezeichneten Zyklen folgen dieser TLFP-Sequenz. In manchen sind nur die ersten zwei Phasen sichtbar, in anderen dringt ausschließlich orangenes Flammenleuchten in den Feuersteg ein. In manchen der letzteren war zusätzlich das detektierte Flammenleuchten deutlich heller als in der „regulären Sequenz“. In vielen dieser Hochintensitäts-TLFP (HI-TLFP) Zyklen fand außerdem Motorklopfen statt, was auf eine Verbindung der beiden Phänomene hindeutet. Klopfen ist jedoch keine zwingende Voraussetzung, da einzelne Zyklen auch HI-TLFP, aber kein Klopfen aufweisen.

Für 26,5 bar p_{mi} wurde eine zusätzliche Messung mit einer erhöhten Bildwiederholrate von 96 kfps durchgeführt. In Bezug auf die detektierten Signalstärken kann die Reduktion des Arbeitsabstandes nur teilweise die kürzere Belichtungszeit ausgleichen. Infolgedessen ist in den mit 96 kfps aufgenommenen Bildern keine blaue Flammenfront zu sehen, da der blaue Anteil des Signals vom Hintergrundsignal überlagert wird. Die Aufnahmen sind jedoch gut geeignet, um die zuvor beschriebenen HI-TLFP Ereignisse detaillierter zu untersuchen. Abbildung 7-6 zeigt ein solches Ereignis bei 26,5 bar p_{mi} . Die obere Kante des Fensters (ca. 1 mm) ist in den Aufnahmen nicht sichtbar. In der ersten Aufnahme ist der sichtbare Umriss des Fensters rot markiert.

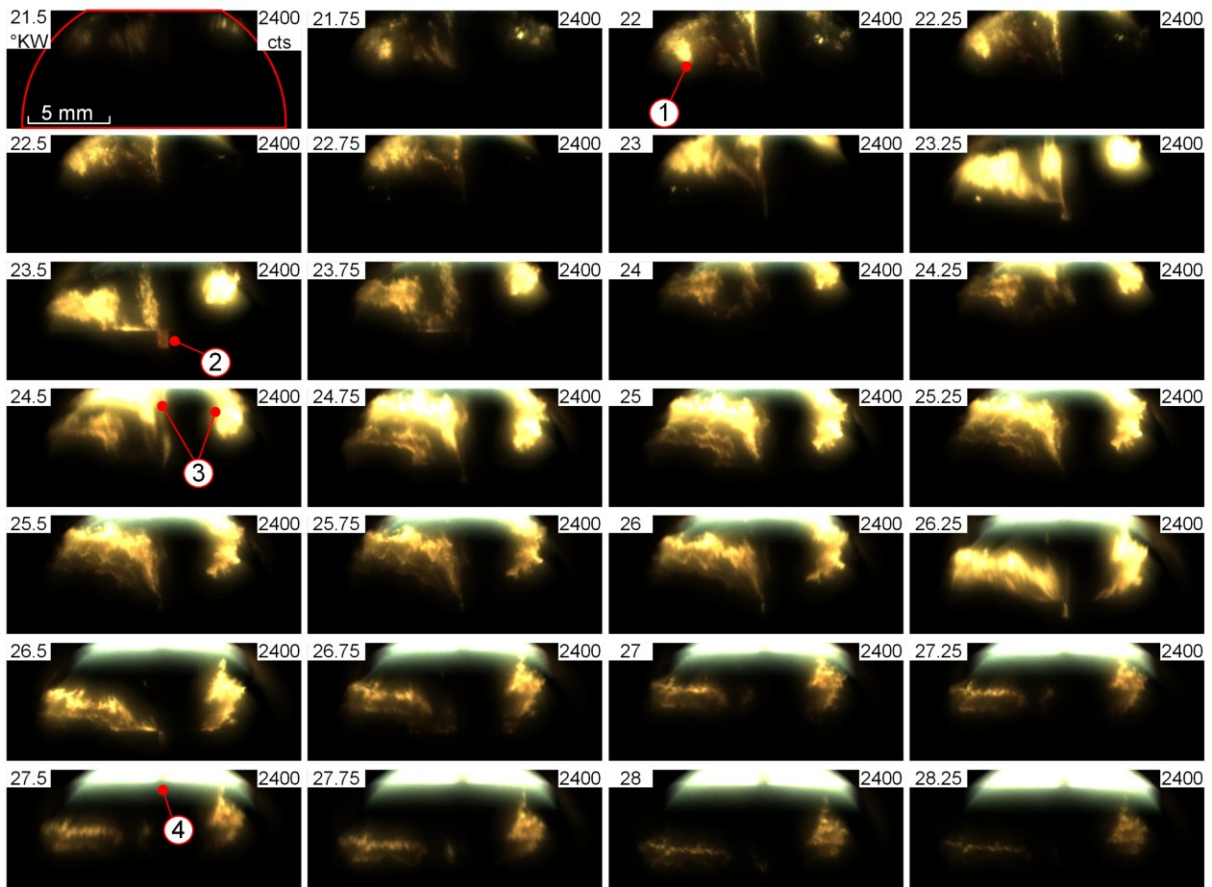


Abbildung 7-6: Zeitlicher Verlauf von TLFP aufgenommen mit 96 kfps bei 26,5 bar p_{mi} im Zyklus 341. Gezeigt ist jede zweite Aufnahme. Der Zeitpunkt in °KW nZOT ist in der oberen linken Ecke, das Maximum der Farbskala in counts in der oberen rechten Ecke des jeweiligen Bildes angegeben. Mit Zahlen markierte Features werden im Text erläutert.

Die Aufnahmen sind im Vergleich zu Abbildung 7-5 aufgrund des allgemein höheren Signalniveaus und der niedrigen Signalstärke im blauen Farbbereich auf einer Farbskala mit höherer Obergrenze dargestellt. Im Zyklus ist Flammenleuchten erstmals 21,5 °KW nZOT sichtbar, wenn die Flamme, hauptsächlich im linken Bereich des Fensters, in den Feuersteg eindringt. Während sie sich von 21,75 bis 22 °KW nZOT weiter nach unten bewegt, wird das orangene Flammenleuchten heller, gut ersichtlich anhand von Feature (1). Überraschenderweise propagiert das Flammenleuchten anschließend nicht weiter nach unten, sondern bewegt sich 22,25 bis 22,75 °KW nZOT nach oben in Richtung des Brennraums. Anschließend bewegt sich das Flammenleuchten ab 23 °KW nZOT nach unten und wird dabei erneut heller. Es erreicht den ersten Kolbenring 23,5 °KW nZOT und dringt teilweise in den Ringstoß ein (2), bevor es sich 23,75 bis 24 °KW nZOT nach oben bewegt. Während der nächsten Abwärtsbewegung, die 24,25 °KW nZOT einsetzt, tritt mehr leuchtendes Gas vom Brennraum in den Feuersteg ein (3). Im Gegensatz zu den meisten Aufnahmen sind in denen, die eine Abwärtsbewegung erfassen, keine klaren Strukturen innerhalb des Flammenleuchtens zu erkennen. Dies ist auf Bewegungsunschärfe zurückzuführen, was auf eine hohe Strömungsgeschwindigkeit des leuchtenden Gases hindeutet (z.B. 24,5 vs. 24,75 °KW nZOT). Die oszillierende Bewegung des Flammenleuchtens wiederholt sich bis 28,25 °KW nZOT noch zweimal. Im Verlauf dieses Prozesses verringert sich sowohl die Intensität als auch die räumliche Ausbreitung des Flammenleuchtens. Die oszillierende Bewegung ist in der unbewegten Abbildung schwer auszumachen, ist aber anhand des linken Bereiches der

Aufnahmen von 23,5 bis 24,25 °KW nZOT gut sichtbar: 23,5 °KW nZOT befindet sich der Großteil des Flammenleuchtens in der unteren Hälfte des Feuerstegs, wohingegen es sich 24,25 °KW nZOT in der oberen Hälfte nah am Brennraum befindet. Oberhalb des Feuerstegs ist in der Bildmitte außerdem ein schwarzes Feature zu erkennen, gut sichtbar ab 27,5 °KW nZOT (4). Aufgrund der rußenden Verbrennung kann sich Ruß auf der Zylinderwand absetzen. Diese Ablagerungen werden von den ersten beiden Kolbenringen abgekratzt, nicht aber in der Mitte des Fensters, da sich die Ringstöße beider Ringe aufgrund der Rotationssicherung dauerhaft in der Fenstermitte befinden.

Die oszillierende Bewegung des Flammenleuchtens innerhalb des Feuersteges ist wahrscheinlich auf die hochfrequenten Druckschwankungen aufgrund von Klopfen zurückzuführen, da alle Zyklen, in denen die Bewegung zu sehen ist, auch Klopfen aufweisen. Auf Basis der Empfehlungen aus [161] wurde eine Fourier-Analyse des Zylinderdruckverlaufes durchgeführt (Thomson's multitaper power spectral density [162]). Aus der Bilderfolge ergibt sich für die oszillierende Bewegung eine Frequenz von 7,6 kHz, was in guter Näherung mit der Fourier-Analyse übereinstimmt, die ein ausgeprägtes Maximum bei 7,4 kHz aufweist. Klopfen scheint außerdem HI-TLFP zu begünstigen, führt jedoch nicht zwangsläufig dazu. Viele der Zyklen mit starkem Klopfen zeigen gleichzeitig HI-TLFP, andere hingegen nicht, zum Beispiel der in Abbildung 7-5 gezeigte Zyklus.

7.4.2 Niedrige Motorlast (14,5 bar p_{mi})

Um den Einfluss der Motorlast auf TLFP zu analysieren, ist in Abbildung 7-7 der zeitliche Verlauf von TLFP in zwei Beispiel-Zyklen für 14 bar p_{mi} dargestellt. In beiden Zyklen ist TLFP wie zuvor erstmals zu dem Zeitpunkt, an dem im jeweiligen Zyklus der Zylinderspitzenruck erreicht wird, zu sehen (21 bzw. 21,5 °KW nZOT).

In Zyklus 139 dringt eine einzelne, blaue Flammenzunge 21,5 °KW nZOT in der Mitte des Fensters (1) in den Feuersteg ein und propagiert schnell nach unten, sodass sie den ersten Kolbenring 22 °KW nZOT erreicht, was gut mit den Ergebnissen bei 26,5 p_{mi} übereinstimmt. Die blaue Flammenfront breitet sich anschließend in die seitlichen Bereiche des sichtbaren Feuersteges aus, was erneut langsam im Vergleich zu der initialen Propagation stattfindet. Während die Flammenfront in die seitlichen Bereiche des Feuerstegs propagiert, verringert sich im mittleren Bereich, den die Flammenfront bereits durchlaufen hat, die detektierte Signalintensität. Dieser Vorgang ist hier im Vergleich zu 26,5 bar p_{mi} deutlicher zu erkennen. 24 °KW nZOT dringt ein kleines orangenes Feature (2) in den Feuersteg ein und bewegt sich schnell zum Ringstoß, den es bereits 0,5 °KW später erreicht. Von 25 bis 28 °KW nZOT verlangsamt sich die Propagation der blauen Flammenfront. Gleichzeitig erhöht sich das durch Überstrahlen verursachte Signal im Feuersteg, da durch die Abwärtsbewegung des Kolbens ein größerer Bereich der hellen Verbrennung oberhalb des Kolbens sichtbar wird, bis blaues Flammenleuchten in den letzten Bildern kaum noch zu erkennen ist.

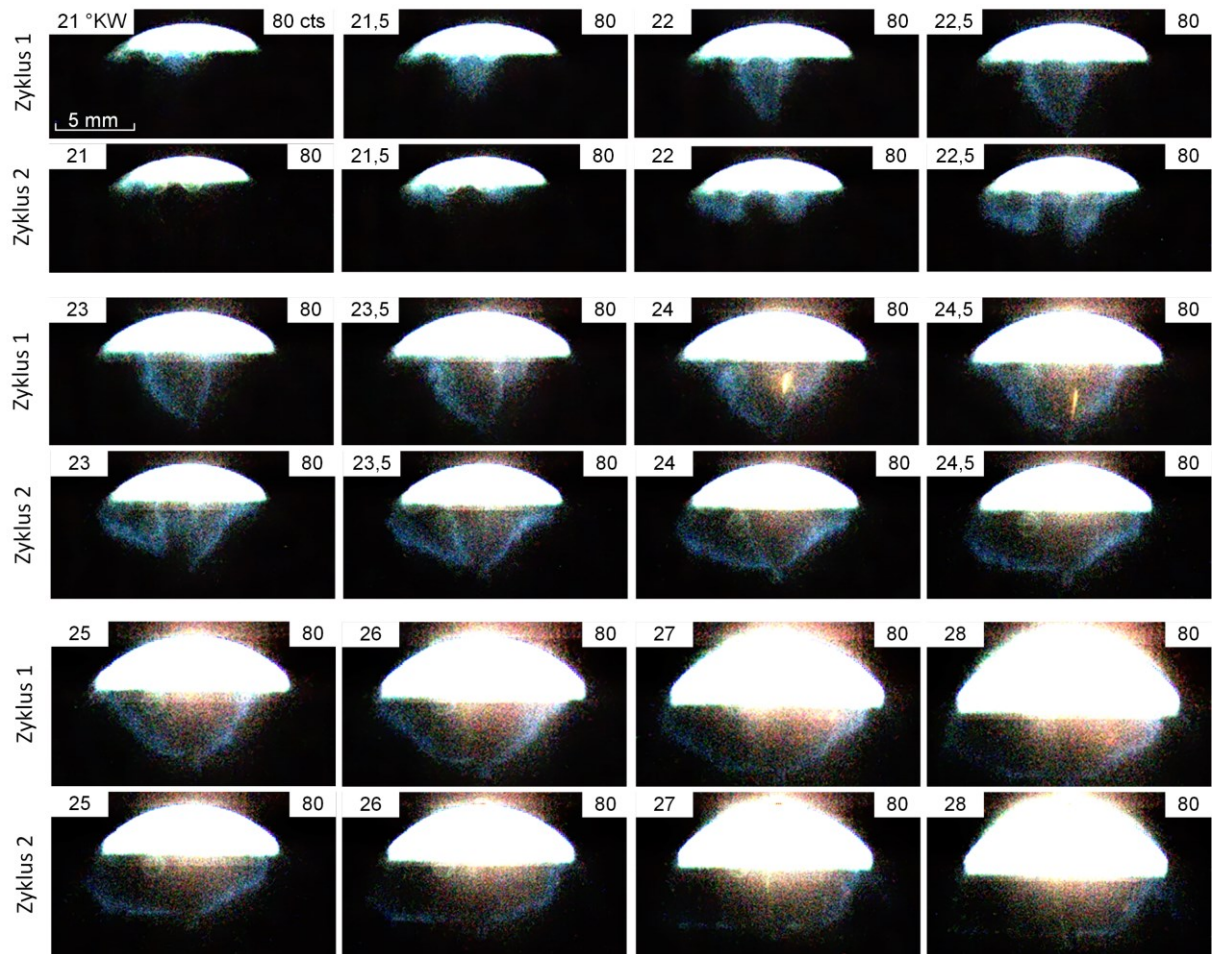


Abbildung 7-7: Zeitlicher Verlauf von TLFP bei 14 bar p_{mi} in zwei Beispiel-Zyklen. Gezeigt sind drei Gruppen mit je fünf Aufnahmen, wobei jeweils die obere Reihe Zyklus 139 und die untere Reihe Zyklus 367 zeigt. Der Zeitpunkt in $^{\circ}\text{KW nZOT}$ ist in der oberen linken Ecke, das Maximum der Farbskala in counts in der oberen rechten Ecke des jeweiligen Bildes angegeben. Mit Zahlen markierte Features werden im Text erläutert.

Das TLFP Ereignis in Zyklus 367 zeigt grundsätzlich einen ähnlichen zeitlichen Verlauf, mit dem Unterschied, dass hier $21,5^{\circ}\text{KW nZOT}$ zwei Flammenzungen (3) in den Feuersteg eindringen. Verglichen mit Zyklus 139 ist diese initiale Propagation weniger tief und langsamer, sodass die rechte Flammenzunge den ersten Kolbenring erst 23°KW nZOT erreicht. Jedoch scheinen die zwei räumlich getrennten Flammenfronten die zweite Phase von TLFP zu beschleunigen. Beide breiten sich unabhängig voneinander aus, bevor sie sich letztendlich $23,5^{\circ}\text{KW nZOT}$ treffen und zu einer geschlossenen Flammenfront vereinen. Auf diese Weise hat sich die Flamme in Zyklus 367 bereits $24,5^{\circ}\text{KW nZOT}$ in den Großteil des Feuerstegs ausgebreitet.

Die Ergebnisse für die „niedrige“ Last stimmen trotz der unterschiedlichen Spaltgeometrie gut mit den Beobachtungen in [124] überein. Für die Umgebungsbedingungen in [124] liefert Gleichung (3.1) einen Quenchingabstand von $d_q = 0,41 \text{ mm}$, also ca. 20 % geringer als die tatsächliche Spaltbreite von $0,5 \text{ mm}$. Im vorliegenden Fall beträgt der Zylinderspitzenndruck mindestens 45 bar, in den meisten Zyklen sogar 55 bar, woraus sich ein Quenchingabstand zwischen $0,18$ und $0,16 \text{ mm}$ ergibt. Im Vergleich zu der Spaltbreite von $0,2 \text{ mm}$ herrschen also vergleichbare Bedingungen für die Flammenverlöschung.

In Zyklen mit einem sichtbaren TLFP Ereignis dringen eine oder mehrere blaue Flammenzungen in den Feuersteg ein. Die Morphologie dieser Flammenzungen ist in den verschiedenen Zyklen ähnlich, unterliegt aber dennoch zufälligen Schwankungen. Die Ergebnisse suggerieren eine aktiv brennende Flamme im Feuersteg, da sich die unterschiedlichen Flammenzungen beim Zusammentreffen zu einer geschlossenen Flammenfront zusammenfügen. Außerdem zeigen die Bereiche, die die Flamme bereits durchquert hat, nach kurzer Zeit kein Flammenleuchten mehr, was auf verbranntes, nicht-leuchtendes Gas hindeutet.

In einigen Zyklen ist das detektierte Signal des Flammenleuchtens im Feuersteg nah an der unteren Detektionsgrenze des bildgebenden Systems, d.h. kaum vom Hintergrundrauschen und vom Überstrahlen durch die helle Verbrennung im Brennraum oberhalb unterscheidbar. Tatsächlich ist denkbar, dass in einigen Zyklen TLFP stattfindet, jedoch im Hintergrundsignal untergeht. Für 14 bar p_{mi} ist sowohl die Frequenz von TLFP als auch die detektierte Signalstärke im Vergleich zu 26,5 bar p_{mi} geringer.

TLFP findet zum Zeitpunkt des Zylinderspitzenruckes oder wenige $^{\circ}KW$ danach statt. In den meisten Zyklen mit einem sichtbaren TLFP-Ereignis wird Flammenleuchten im Ringstoß des ersten Kolbenringes detektiert, aber nie unterhalb im ersten Kolbensteg. Die Beobachtung legt ein Verlöschen der Flamme nah, wahrscheinlich ausgelöst durch das Abkühlen des expandierenden Gases, das durch den hohen Druckgradienten durch den engen Ringstoß getrieben wird.

7.5 Zwischenfazit

Die Ausbreitung der Flamme in den Feuersteg (TLFP) wurde im optisch zugänglichen Einzylindermotor untersucht. Eine hochlastfähige Zylindereinheit wurde zur Visualisierung des natürlichen Flammenleuchtens im Feuersteg vom oberen Totpunkt bis zur Mitte des Kolbenhubes eingesetzt. Es wurden zwei Motorlasten untersucht: 14 und 26,5 bar p_{mi} . Das Flammenleuchten auf der Gegendruckseite des Motors wurde von einer Hochgeschwindigkeits-Farbkanal-Kamera mit einer zeitlichen Auflösung von 0,5 $^{\circ}KW$ für beide Motorlasten und in einer zusätzlichen Messreihe mit 0,125 $^{\circ}KW$ für 26,5 bar p_{mi} erfasst. Der Zündzeitpunkt wurde so eingestellt, dass bei 26,5 bar p_{mi} moderate Klopfereignisse auftraten. Der erste und zweite Kolbenring wurde gegen Rotation gesichert, wobei sich die Ringstöße beider Ringe im Sichtfeld befand.

Es wurden drei verschiedene Phasen von TLFP identifiziert, die in den meisten untersuchten Motorzyklen beobachtet werden konnten. Erstens eine schnelle Ausbreitung von blauem Flammenleuchten in den Feuersteg, ausgelöst durch Chemilumineszenz, die nur 1 – 1,5 $^{\circ}KW$ andauert. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit ist höher als jede plausible Flammengeschwindigkeit und wird vermutlich durch die schnelle Kompression infolge der Verbrennung und den konvektiven Transport durch Blowby-Strömung verursacht. Zweitens eine Ausbreitung des blauen Flammenleuchtens innerhalb des Feuerstegs, die im Vergleich zur ersten Phase langsam abläuft und einer aktiven Flammenausbreitung ähnelt. Die dritte Phase ist eine Propagation von orangenem Flammenleuchten aus dem Brennraum in den Feuersteg und anschließend in den Ringstoß des ersten Kolbenringes. Zum jetzigen Zeitpunkt ist die Quelle der dritten Phase nicht eindeutig geklärt, könnte aber mit einer rußenden Verbrennung, ausgelöst durch flüssige Kraftstofffilme auf dem Kolbenboden, zusammenhängen. Bei

14 bar p_{mi} traten nur die ersten beiden Phasen auf, wohingegen in den meisten Zyklen mit 26,5 bar p_{mi} auch die dritte Phase zu beobachten war. In allen Phasen und bei beiden untersuchten Lasten drang die Flamme bis in den ersten Ringstoß ein, erlosch dort aber immer und propagierte nicht weiter in den zweiten Kolbensteg. In einzelnen Zyklen bei 26,5 bar p_{mi} trat eine weitere Art von TLFP-Ereignis auf. Bei dieser wurde das gesamte Flammenleuchten innerhalb des Feuerstegs hauptsächlich im roten Kanal der Kamera detektiert und war heller als in regulären TLFP-Ereignissen. Diese helle TLFP wurde oft, aber nicht immer, von Klopfen begleitet und umgekehrt. In den Zyklen, in denen sowohl Klopfen als auch helles TLFP auftraten, zeigte das Flammenleuchten eine oszillierende Auf- und Abwärtsbewegung, die höchstwahrscheinlich auf hochfrequente Druckschwankungen, ausgelöst durch Klopfen, zurückzuführen ist. Diese oszillierende Bewegung konnte nur mit der höheren Wiederholrate von 96 kHz bzw. einem Bild pro 0,125 °KW beobachtet werden.

TLFP wurde in den meisten Zyklen identifiziert, jedoch ist es denkbar, dass einige Ereignisse aufgrund der kurzen Belichtungszeit und des daraus resultierenden geringen Signals nicht erkannt wurden. Die hohe zeitliche Auflösung ermöglichte jedoch einen detaillierteren Einblick in das Phänomen der TLFP. Die Beobachtungen dieser Arbeit stimmen gut mit [153] überein. Allerdings könnte die statistische Auswertung in [153] durch die nach außen gedrückten Fenster beeinflusst worden sein. In zukünftigen Untersuchungen könnte es von Vorteil sein, nur den oberen Teil des Fensters zu betrachten, da die vorliegende Arbeit bestätigt, dass TLFP nur in den frühen Teilen der Expansion auftritt.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel der Arbeit war die Untersuchung von Phänomenen, die im direkteinspritzenden Ottomotor durch die Interaktion der Medien Kraftstoff, Schmieröl und (Verbrennungs-)Gas ausgelöst werden. Ein besseres Verständnis der auftretenden Phänomene und die Quantifizierung von Messgrößen zur Optimierung von Simulationsmodellen ermöglichen eine optimierte Auslegung der Kolbengruppe im Hinblick auf CO₂- und Schadstoffemissionen. Die Versuche wurden an einem optisch zugänglichen Einzylindermotor durchgeführt. Die optische Zugänglichkeit zum Brennraum und der Kolbengruppe ist durch seitlich in die Zylinderlaufbahn eingebrachte Saphirfenster realisiert. Die Zylinder des Motors sind austauschbar, um jeweils auf die Messaufgabe optimierte Fenster-Geometrien verwenden zu können. Das Forschungsaggregat ist in der Lage, das komplette Lastspektrum von Serienmotoren ($p_{mi} > 20$ bar) unter realitätsnahen Bedingungen abbilden zu können. Zur Visualisierung von flüssigen Öl- und Kraftstoffschichten in hoher zeitlicher Auflösung wurde laserinduzierte Fluoreszenz (LIF) in Kombination mit CMOS-Kameras eingesetzt. Zur Untersuchung von Verbrennungsanomalien wurde natürliches Flammenleuchten mit einer CMOS-Kamera mit Farbkanälen erfasst.

Im ersten Teil der Arbeit wurde ein optisches Messsystem, bestehend aus zwei baugleichen CMOS-Kameras, eingesetzt, um die Öltransportphänomene in der Ölnut unter dem Ölabstreifring simultan auf Druck- und Gegendruckseite des Motors mit einer Wiederholrate von 5 kHz zu visualisieren. Dazu wurde dem Öl der Laserfarbstoff Pyromethen 567 in einer Konzentration von 3,2 mg/Liter zugesetzt und die Öl/Farbstoff-Mischung durch einen frequenzverdoppelten Nd:YLF Laser bei 527 nm angeregt. Die Untersuchungen erfolgten im geschlepptem Motorbetrieb bei einer Drehzahl von 1666 min⁻¹ und einem Saugrohrdruck von 600 mbar. Ergänzend zu den experimentellen Untersuchungen wurden CFD-Simulationen durchgeführt. Diese wurden durch einen qualitativen Vergleich mit dem Experiment kalibriert und anschließend genutzt, um zusätzliche Erkenntnisse aus den Querschnitten der Ölnut zu gewinnen, die mit der Sichtlinien-integrierten LIF-Methode nicht zugänglich sind. Die Simulationsergebnisse stimmen nach der Kalibrierung gut mit dem Experiment überein, wobei einzelne Phänomene in der Simulation überschätzt werden.

Der Füllstand der Ölnut veränderte sich während eines Motorzyklus ständig und schwankte zwischen einer vollständig gefüllten und einer komplett entleerten Ölnut. Die Bewegung von Öl innerhalb der Ölnut wurde dabei maßgeblich durch die auftretenden Trägheitskräfte beim Beschleunigen und Abbremsen des Kolbens bestimmt. Gleichzeitig beeinflusste auch die Kolbensekundärbewegung den Ölhaushalt in der Ölnut. Während eines Anlagewechsels drückt der Kolben große Mengen Öl und Luft in die Ölnut, wodurch sich die Ölnut in kurzer Zeit füllte und Luftblasen in den Ölfilm eingeschlossen wurden. Abhängig vom Spalt zwischen Kolben und Zylinder floss das Öl zu unterschiedlichen Zeitpunkten während Aufwärtshubes wieder aus der Nut ab. Mit einem großen Spalt tendierte das Öl dazu, in der ersten Hälfte des Aufwärtshubes abzufließen, war der Spalt hingegen klein, wurde das Öl erst in der zweiten Hälfte des Aufwärtshubes beim Abbremsen des Kolbens auf die Zylinderwand transportiert. Im darauffolgenden Abwärtshub wurde das Öl dadurch früher oder später von der Zylinderwand abgestreift, je nachdem, wann es zuvor abgeflossen war.

War der Spalt während des Abwärtshubes klein, bildete sich in der Ölnut eine kreisförmige Strömung aus, die durch den wiederholten Transport von abgestreiftem Öl zurück auf die Zylinderwand und anschließend ein erneutes Abstreifen ausgelöst wurde. Während der Effekt im Experiment grundsätzlich auch zu beobachten war, ermöglichten vor allem die Querschnitte der Simulation eine detaillierte Beschreibung des Phänomens.

Im Simulationsmodell wurden keine durch Blowby ausgelöste Effekte berücksichtigt. Für den hier betrachteten geschleppten Betriebspunkt wurden nur in der Expansion signifikante Unterschiede zum Experiment beobachtet. Sollen zukünftig jedoch auch befeuerte Betriebspunkte simuliert werden, ist die Integration von Blowby in das Modell zwingend erforderlich. Denkbar ist außerdem ein Abgleich der Simulation mit quantitativen Messungen, um simulativ verlässliche Aussagen zur Ölschichtdicke in der Nut treffen zu können.

Im zweiten Teil dieser Arbeit wurde ein Messverfahren entwickelt, um Kraftstofffilmdicken auf der Zylinderwand quantitativ zu erfassen. Basis dafür war ein vorhandenes LIF-Messsystem zur simultanen Visualisierung von Öl- und Kraftstoffschichten mit kHz-Wiederholrate. Das System nutzt die frequenzverdoppelte Strahlung eines Nd:YAG Lasers in Kombination mit einer CMOS-Kamera zur Visualisierung von Schmieröl und die frequenzvervielfachte Strahlung in Kombination mit einem Hochgeschwindigkeits-Bildverstärker und einer CMOS-Kamera zur Visualisierung von Kraftstoffschichten. Dazu wurde dem Öl wie schon im ersten Teil der Arbeit Pyrrromethen 567 und dem nichtfluoreszierendem Multikomponenten-Kraftstoff-Surrogat (MKKS) Anisol als Fluoreszenztracer beigemischt. Die bisher am Forschungsmotor verwendeten Zylinder mit optischer Zugänglichkeit auf der Druck- und Gegendruckseite des Motors waren nicht zur Untersuchung von Kraftstoffwandbenetzung durch Mehrloch-Magnetventile geeignet, da keiner der Einzelstrahlen des Mehrloch-Injektors auf Druck- oder Gegendruckseite auf die Zylinderwand auftrifft. Daher wurde ein optisch zugänglicher Zylinder entwickelt, der über ein frei drehbares Zylinderrohr mit vier in Umfangsrichtung verteilte Saphirfenster verfügt.

Zur Quantifizierung der Kraftstofffilmdicken wurde eine Flachfeldkorrektur eingeführt, um Inhomogenitäten im Laserprofil zu korrigieren. Das Flachfeld wurde durch Totalabsorption des anregenden Laserlichts im vollständig mit MKKS/Anisol-Gemisch gefüllten Zylinderrohr erstellt. Da das Zylinderrohr im Experiment durch die Montage des Zylinderkopfes und Nebenaggregate (Auspuff, Kraftstoff-Rail, etc.) relativ zu den Kalibrieraufnahmen verschoben war, waren zwei separate Flachfelder für Kalibrierung und Experiment notwendig. Das Einstellen unterschiedlicher, definierter Schichtdicken zur Absolutwertkalibrierung ist nur schwer an der gekrümmten Fensterinnenseite realisierbar. Daher wurde eine Kalibriervorrichtung entwickelt, die von oben in das offene Zylinderrohr eingeführt wird, eine konvexe Linse gegen das Fenster drückt und so einen Spalt mit radial zunehmender Breite zwischen Linse und Fenster erzeugt. Der Spalt wurde mit dem MKKS/Anisol-Gemisch gefüllt und zur Absolutwertkalibrierung verwendet. Im Kontaktpunkt zwischen Linse und Saphirfenster, an dem die Kraftstofffilmdicke nahe Null ist, wurde ein signifikantes LIF-Signal detektiert, das auf die Ausbildung optischer Halos um Bereiche hohen Signals aufgrund des Hochgeschwindigkeits-Bildverstärkers zurückzuführen war. In der Kalibrierung wurde dieser Signalversatz zusammen mit einer rotatorischen und translatorischen Fehlstellung der Linse korrigiert. In den Motorversuchen wurde der Halo-Effekt

nicht korrigiert, da hier im Gegensatz zur Kalibrierung die untersuchten Kraftstoffwandfilme die Bereiche höchsten Signals darstellten. Dennoch könnten die Filmdicke in den Randbereiche der Kraftstofffilme aufgrund des Effektes überschätzt worden sein. Die Quantifizierung wurde anschließend anhand von Motorversuchen demonstriert. Dazu wurde der Motor bei einer Drehzahl von 1500 min^{-1} und einem Saugrohrdruck von 950 mbar geschleppt betrieben. Kraftstoff wurde in einer Einzeleinspritzung mit einem Einspritzbeginn (SOI) von 285 oder 240 °KW vZOT eingebracht. In den Motorversuchen fand ein Übersprechen von Ölfluoreszenz in den Kraftstoff-Detektionskanal statt. Der Effekt wurde berücksichtigt, indem Aufnahmen aus einem geschleppten Zyklus ohne Kraftstoffeinspritzung (anstelle eines statischen Hintergrundbildes) von den Versuchen subtrahiert wurden.

Während und nach des 2 ms langen Einspritzvorgangs wurde für beide Einspritzvorgänge ausgeprägtes Fluoreszenzsignal im gesamten Brennraum aufgrund von Kraftstoff-Aerosol detektiert. Kraftstofffilmdicken konnten daher erst 6,5 ms nach SOI ausgewertet werden. Für beide SOI wurden zu diesem Zeitpunkt ähnliche maximale Filmdicken von $16 \mu\text{m}$ ermittelt. Beim frühen SOI traf der Kraftstoffstrahl schon im oberen Bereich des optischen Zugangs auf den Kolbenboden, beim späten SOI hingegen erst im Bereich des unteren Totpunktes. Als Resultat ist die räumliche Ausdehnung des Wandfilms beim späten SOI höher als beim frühen. Die Benetzung des Kolbenbodens war für den frühen SOI voraussichtlich wesentlich höher, konnte mit dem verwendeten optischen System jedoch nicht detektiert werden. Bis zu dem Zeitpunkt, an dem der erste Kolbenring den Wandfilm erreicht und diesen abstreift, nahm die Filmdicke für beide SOI auf $8 \mu\text{m}$ ab, obwohl der betrachtete Zeitraum für den späten SOI 5 ms kürzer war. Für den frühen SOI sank die Verdampfungsrate um den unteren Totpunkt zeitweise ab, während die Filmdicke beim späten SOI über den gesamten betrachteten Zeitraum annähernd linear abnahm.

Für die Quantifizierung wurde eine hohe Präzisionsungenauigkeit von bis zu 27,3 % für dünne Kraftstofffilme ermittelt. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass in den Versuchen Schuss-zu-Schuss Abweichungen der Laserenergie nicht korrigiert wurden. Durch die Messung der Laser-Pulsenergie könnte die Unsicherheit in zukünftigen Messungen deutlich reduziert werden. Der Einfluss von Halo-Effekten auf die Messgenauigkeit ist derzeit unklar und wurde nicht quantifiziert. Das Phänomen sollte in künftigen quantitativen Messungen mit einem Hochgeschwindigkeits-Bildverstärker charakterisiert werden, um eventuelle Messfehler zu ermitteln und zu reduzieren.

Der dritte und letzte Teil der Arbeit beschäftigte sich mit der Ausbreitung der Verbrennungsgase in den Feuersteg des Kolbens, der „Top Land Flame Propagation“ (TLFP) sowie der Interaktion der Verbrennungsgase mit flüssigem Kraftstoff- bzw. Ölfilmen im Bereich des Feuerstegs. Dazu kam ein Zylinderrohr mit einem im Vergleich zu den übrigen Zylindern kleinen optischen Zugang im oberen Bereich des Zylinders zum Einsatz, das Lasten von bis zu 27 bar p_{mi} unterstützt. Es wurden die beiden Motorlasten 14 und 26,5 bar p_{mi} untersucht. Der Zündzeitpunkt wurde so eingestellt, dass bei 26,5 bar p_{mi} moderates Motorklopfen auftrat und wurde für 14 bar p_{mi} beibehalten. Die ersten beiden Kolbenringe wurden im Versuch mit dem Ringstoß im Sichtfeld gegen Rotation gesichert. Zur Visualisierung des Phänomens wurde das natürliche Flammenleuchten im Brennraum und den Ringstegen mithilfe einer Hochgeschwindigkeits-Farbkanal-Kamera mit einer Wiederholrate 24000 Bildern pro Sekunde, oder 2 Bildern pro °KW, aufgezeichnet. Für 26,5 bar p_{mi} wurde in einer Messreihe

der Abstand zwischen Kamera und Motor verringert und ein kleinerer Sensorbereich ausgelesen, um die Aufnahmerate auf 96000 Bilder pro Sekunde zu erhöhen. Die Untersuchungen wurden auf der Gegendruckseite des Motors durchgeführt, da aufgrund der Kolbensekundärbewegungen der Spalt zwischen Kolben und Zylinder hier größer ist als auf der Druckseite und daher bessere Voraussetzungen für ein Eindringen der Flamme bietet.

TLFP konnte für beide Motorlasten in den meisten Zyklen nachgewiesen werden. In einigen war das detektierte Signal aufgrund der kurzen Belichtungszeit nah an der Detektionsgrenze des optischen Systems. Daher ist denkbar, dass einzelne TLFP-Ereignisse nicht als solche erkannt worden sind. Grundsätzlich konnte das Phänomen in drei Phasen aufgeteilt werden, wobei nicht zwangsläufig alle stattfinden mussten. Zunächst eine sehr schnelle Propagation von Flammenleuchten aus dem Brennraum in den Feuersteg des Kolbens. Das Signal wurde vor allem im blauen Farbkanal der Kamera detektiert und wurde somit durch Chemilumineszenz verursacht. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit lag deutlich über der theoretischen Flammengeschwindigkeit und ist auf die Kompression im Brennraum zurückzuführen. Die zweite Phase ist eine Ausbreitung der blauen Flammenfront innerhalb des Feuerstegs, die langsamer abläuft und daher auf eine aktive Flammenausbreitung hindeutet. In der dritten Phase tritt rotes Flammenleuchten in den Feuersteg ein, was auf einen Zusammenhang mit einer rußenden Verbrennung, möglicherweise ausgelöst durch Kolbenbodenbenetzung, spricht. Für 26,5 bar p_{mi} trat in einzelnen Zyklen außerdem eine weitere, deutlich hellere Form von TLFP auf. Fand dieses Phänomen in Kombination mit Motorklopfen statt, bewegte sich das leuchtende Gas im Feuersteg oszillierend auf und ab, wobei die Frequenz dieser Bewegung in guter Näherung mit der Klopf Frequenz im Brennraum übereinstimmte.

In zukünftigen Messungen können die bildgebenden Messungen grundsätzlich auf den oberen Teil des optischen Zugangs beschränkt werden, da die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass TLFP nur in der frühen Expansion auftritt. Dadurch könnte die Wiederholrate für alle Messungen gesteigert werden. Ein generelles Problem stellt das im Vergleich zum Feuersteg sehr helle Signal aus dem Brennraum dar, da es durch Streueffekte in den Feuersteg überstrahlt. Denkbar wäre hier der Einsatz einer statischen Blende, um Teile des Brennraumes abzuschatten, oder, wenn auch deutlich aufwändiger, das Nachführen einer Blende mit der Abwärtsbewegung des Kolbens.

Literaturverzeichnis

- [1] van Basshuysen, R. und Schäfer, F., *Handbuch Verbrennungsmotor: Grundlagen, Komponenten, Systeme, Perspektiven*, Springer Vieweg, 2014.
- [2] Amirante, R., Distaso, E., Napolitano, M., Tamburrano, P., Iorio, S., Sementa, P., et al., *Effects of lubricant oil on particulate emissions from port-fuel and direct-injection spark-ignition engines*, International Journal of Engine Research 18:146808741770660, 2017, <https://doi.org/10.1177/1468087417706602>.
- [3] van Basshuysen, R., *Ottomotor mit Direkteinspritzung und Direkteinblasung: Ottokraftstoffe, Erdgas, Methan, Wasserstoff*, Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016.
- [4] Eichlseder, H., Klüting, M. und Piock, W., *Grundlagen und Technologien des Ottomotors*, Springer Vienna, 2008.
- [5] Xander, B., *Grundlegende Untersuchungen an einem Ottomotor mit Direkteinspritzung und strahlgeführtem Brennverfahren*, Dissertation, Universität Karlsruhe, 2006.
- [6] Nauwerck, A., Kettner, M., Velji, A. und Spicher, U., *Gemischbildung und Verbrennung in Ottomotoren mit strahlgeführtem Brennverfahren*, in *Direkteinspritzung im Ottomotor IV*, U. Spicher (Hrsg.), Expert-Verlag, 2003.
- [7] Drake, M.C., Fansler, T.D., Solomon, A.S. und Szekely, 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, <https://doi.org/10.4271/2003-01-0547>.
- [8] 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, <https://doi.org/10.4271/2001-01-3489>.
- [9] 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, <https://doi.org/10.4271/2001-01-1203>.
- [10] Warnatz, J., Maas, U. und Dibble, R.W., *Verbrennung : Physikalisch-Chemische Grundlagen, Modellierung und Simulation, Experimente, Schadstoffentstehung*, Springer-Verlag, 2001.
- [11] Shanta, S.M., Molina, G.J. und Soloiu, V., *Tribological Effects of Mineral-Oil Lubricant Contamination with Biofuels: A Pin-on-Disk Tribometry and Wear Study*, Advances in Tribology 2011:820795, 2011, <https://doi.org/10.1155/2011/820795>.
- [12] 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, <https://doi.org/10.4271/2000-01-1235>.
- [13] Splitter, D., Kaul, B., Szybist, J. und Jatana, G., *Engine Operating Conditions and Fuel Properties on Pre-Spark Heat Release and SPI Promotion in SI Engines*, SAE International Journal of Engines 10(3):1036-1050, 2017, <https://doi.org/10.4271/2017-01-0688>.
- [14] Mahle GmbH, *Zylinderkomponenten: Eigenschaften, Anwendungen, Werkstoffe*, 2. Auflage, Springer Vieweg, 2015, <https://doi.org/10.1007/978-3-658-09546-8>.
- [15] Takahashi, M., Isarai, R. und Hara, H., *Measurement of Piston Secondary Motion Using the New Digital Telemeter*, SAE Technical Paper 2013-01-1708, 2013, <https://doi.org/10.4271/2013-01-1708>.
- [16] Przesmitzki, S., Vokac, A. und Tian, T., *An Experimental Study of Oil Transport between the Piston Ring Pack and Cylinder Liner*, SAE Technical Paper 2005-01-3823, 2005, <https://doi.org/10.4271/2005-01-3823>.

- [17] Przesmitzki, S. und Tian, T., *Oil Transport Inside the Power Cylinder During Transient Load Changes*, SAE Technical Paper 2007-01-1054, 2007, <https://doi.org/10.4271/2007-01-1054>.
- [18] Ahling, S. und Tian, T., *Oil Transport Phenomena during extreme load transients inside the power cylinder unit as investigated by HS-2DLIF (High-Speed 2D Laser-Induced Fluorescence)*, SAE Technical Paper 2019-01-2363, 2019, <https://doi.org/10.4271/2019-01-2363>.
- [19] Tian, T., *Dynamic behaviours of piston rings and their practical impact. Part 1: Ring flutter and ring collapse and their effects on gas flow and oil transport*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology 216(4):209-228, 2002, <https://doi.org/10.1243/135065002760199961>.
- [20] Tian, T., Wong, V.W. und Heywood, J.B., *Modeling the Dynamics and Lubrication of Three Piece Oil Control Rings in Internal Combustion Engines*, SAE Technical Paper 982657, 1998, <https://doi.org/10.4271/982657>.
- [21] Senzer, E.B., *Oil transport inside the oil control ring groove and its interaction with surrounding areas in internal combustion engines*, Dissertation, Massachusetts Institute of Technology, 2012.
- [22] 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, <https://doi.org/10.4271/2003-01-1952>.
- [23] 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, <https://doi.org/10.4271/2003-01-1953>.
- [24] Müller, T., *Simultane Visualisierung von Öl- und Kraftstoffschichten in der Kolbengruppe eines direktinspritzenden Ottomotors durch laserinduzierte Fluoreszenz*, Dissertation, Universität Duisburg-Essen, 2019, <https://doi.org/10.17185/dupublico/48031>.
- [25] Schöler, J., *Untersuchung der Schmierölverteilung in der Kolbengruppe eines Ottomotors durch laserinduzierte Fluoreszenz*, Master Thesis, Universität Duisburg-Essen, 2017.
- [26] 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.
- [27] Yilmaz, E., Thirouard, B., Tian, T., Wong, V.W., Heywood, J.B. und Lee, N., *Analysis of Oil Consumption Behavior during Ramp Transients in a Production Spark Ignition Engine*, SAE Transactions 110:1828-1837, 2001, <https://doi.org/10.4271/2001-01-3544>.
- [28] Inoue, T., Maeda, Y., Takeda, M. und Nakada, M., *Study of Transient Oil Consumption of Automotive Engine*, SAE Transactions 98:1039-1045, 1989, <https://doi.org/10.4271/892110>.
- [29] 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, <https://doi.org/10.1007/s35146-015-0153-2>.
- [30] Yoshida, H., Kobayashi, H., Yamada, T., Takiguchi, M. und Kuwada, K., *Effects of narrow-width, low-tangential-tension, 3-piece oil ring on oil consumption*, JSAE Review 21(1):21-27, 2000, [https://doi.org/10.1016/S0389-4304\(99\)00062-4](https://doi.org/10.1016/S0389-4304(99)00062-4).
- [31] Geiler, J.N., *Bildgebende Messung der Kraftstoffwandfilmdicke durch laserinduzierte Fluoreszenz*, Dissertation, Universität Duisburg-Essen, 2019.

- [32] Luo, H., Uchitomi, S., Watanabe, T., Nishida, K., Ogata, Y., Zhang, W., et al., *Effects of Nozzle Hole Diameter and Injection Pressure on Fuel Adhesion of Flat-Wall Impinging Spray*, SAE Technical Paper 2019-01-2246, 2019, <https://doi.org/10.4271/2019-01-2246>.
- [33] Itoh, S., Toda, S., Ando, A., Takahashi, Y., Ogawa, N. und Okuma, M., *Analysis of fuel wetting by using infrared absorption*, SAE Technical Paper 2019-01-2245, 2019, <https://doi.org/10.4271/2019-01-2245>.
- [34] Ma, X., Wang, Z., Jiang, C., Jiang, Y., Xu, H. und Wang, J., *An optical study of in-cylinder CH₂O and OH chemiluminescence in flame-induced reaction front propagation using high speed imaging*, Fuel 134:603-610, 2014, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.06.002>.
- [35] Aleiferis, P.G. und Rosati, M.F., *Flame chemiluminescence and OH LIF imaging in a hydrogen-fuelled spark-ignition engine*, International Journal of Hydrogen Energy 37(2):1797-1812, 2012, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.10.010>.
- [36] Yu, X., Jansons, M., Li, Z., Lequien, G., Lind, T., Andersson, O., et al., *Comparison of the Lift-Off Lengths Obtained by Simultaneous OH-LIF and OH* Chemiluminescence Imaging in an Optical Heavy-Duty Diesel Engine*, SAE Technical Paper 2015, <https://doi.org/10.4271/2015-24-2418>.
- [37] Hertler, D., Stirn, R., Arndt, S., Grzeszik, R. und Dreizler, A., *Investigations of soot formation in an optically accessible gasoline direct injection engine by means of laser-induced incandescence (LII)*, Applied Physics B 104(2):399-407, 2011, <https://doi.org/10.1007/s00340-011-4392-8>.
- [38] Jüngst, N., *Optical diagnostics for soot formation from evaporating fuel films in combustion*, Dissertation, Universität Duisburg-Essen, 2021, <https://doi.org/10.17185/duerpublico/74816>.
- [39] Mueller, C.J. und Martin, G.C., *Effects of Oxygenated Compounds on Combustion and Soot Evolution in a DI Diesel Engine: Broadband Natural Luminosity Imaging (Konferenzbeitrag)*, <https://doi.org/10.4271/2002-01-1631>.
- [40] Manin, J., Pickett, L.M. und Skeen, S.A., *Two-Color Diffused Back-Illumination Imaging as a Diagnostic for Time-Resolved Soot Measurements in Reacting Sprays*, SAE Technical Paper 2013-01-2548, 2013, <https://doi.org/10.4271/2013-01-2548>.
- [41] Jüstel, T. und Schwung, S., *Leuchtstoffe, Lichtquellen, Laser, Lumineszenz*, Springer Berlin Heidelberg, 2018.
- [42] Valeur, B. und Berberan-Santos, M.N., *Molecular Fluorescence: Principles and Applications*, Wiley, 2013.
- [43] Sauer, M., Hofkens, J. und Enderlein, J., *Handbook of Fluorescence Spectroscopy and Imaging: From Ensemble to Single Molecules*, Wiley, 2010.
- [44] Lakowicz, J.R., *Principles of Fluorescence Spectroscopy*, Springer US, 2013.
- [45] Beer, A., *Bestimmung der Absorption des rothen Lichts in farbigen Flüssigkeiten*, Annalen der Physik 162(5):78-88, 1852, <https://doi.org/10.1002/andp.18521620505>.
- [46] Musculus, M.P.B., Pickett, L.M. und Kaiser, S.A., *Experimental facilities and measurements – fundamentals*, in *Encyclopedia of Automotive Engineering*, (S. 1-19), 2014, <https://doi.org/10.1002/9781118354179.auto132>.
- [47] Lauer, M.R.W., *Determination of the Heat Release Distribution in Turbulent Flames by Chemiluminescence Imaging*, Dissertation, Technische Universität München, 2011.
- [48] Fields, M., Zheng, J.-b., Qian, S.-X., Kindlmann, P.J., Swindal, J.C. und Acker, W.P., *Single-Shot Temporally and Spatially Resolved Chemiluminescence Spectra from an*

- Optically Accessible SI Engine*, SAE Technical Paper 950105, 1995, <https://doi.org/10.4271/950105>.
- [49] Smith, J.D. und Sick, V., *Crank-Angle Resolved Imaging of Fuel Distribution, Ignition and Combustion in a Direct-Injection Spark-Ignition Engine*, SAE Technical Paper 2005-01-3753, 2005, <https://doi.org/10.4271/2005-01-3753>.
- [50] Espey, C. und Dec, J.E., *Chemiluminescence Imaging of Autoignition in a DI Diesel Engine*, SAE Technical Paper 982685, 1998, <https://doi.org/10.4271/982685>.
- [51] Fissenewert, U., Sick, V. und Pucher, H., *Characterization of Combustion and NO Formation in a Spray-Guided Gasoline Direct-Injection Engine using Chemiluminescence Imaging, NO-PLIF, and Fast NO Exhaust Gas Analysis*, SAE Technical Paper 2005-01-2089, 2005, <https://doi.org/10.4271/2005-01-2089>.
- [52] Ikeda, Y., Kaneko, M. und Nakajima, T., *Local A/F Measurement by Chemiluminescence OH*, CH* and C2* in SI Engine*, SAE Technical Paper 2001, <https://doi.org/10.4271/2001-01-0919>.
- [53] Boltzmann, L., *Ableitung des Stefan'schen Gesetzes, betreffend die Abhängigkeit der Wärmestrahlung von der Temperatur aus der electromagnetischen Lichttheorie*, Annalen der Physik 258(6):291-294, 1884, <https://doi.org/10.1002/andp.18842580616>.
- [54] Planck, M., *Über das Gesetz der Energieverteilung im Normalspektrum*, in *Von Kirchhoff bis Planck: Theorie der Wärmestrahlung in historisch-kritischer Darstellung*, (S. 178-191), H.-G. Schöpf (Hrsg.), Vieweg+Teubner Verlag, 1978, https://doi.org/10.1007/978-3-663-13885-3_16.
- [55] Lequien, G., Berrocal, E., Gallo, Y., Mello, A., Andersson, O. und Johansson, B., *Effect of Jet-Jet Interactions on the Liquid Fuel Penetration in an Optical Heavy-Duty DI Diesel Engine*, SAE Technical Papers 22013, 10.4271/2013-01-1615.
- [56] Stojkovic, B.D., Fansler, T.D., Drake, M.C. und Sick, V., *High-speed imaging of OH* and soot temperature and concentration in a stratified-charge direct-injection gasoline engine*, Proceedings of the Combustion Institute 30(2):2657-2665, 2005, <https://doi.org/10.1016/j.proci.2004.08.021>.
- [57] Miles, P., *The History and Evolution of Optically Accessible Research Engines and Their Impact on Our Understanding of Engine Combustion (Konferenzbeitrag)*, ASME 2014 Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference, ICEF 2014, 19.-22. Oktober 2014, <https://doi.org/10.1115/ICEF2014-5701>.
- [58] Goschütz, M., Schulz, C. und Kaiser, S.A., *Endoscopic Imaging of Early Flame Propagation in a Near-Production Engine*, SAE International Journal of Engines 7(1):351-365, 2014, <https://doi.org/10.4271/2014-01-1178>.
- [59] Nauwerck, A., Gindele, J., Spicher, U., Roskamp, H. und Landwehr, G., *Investigation of the Transient In-Cylinder Flow Inside a Two Stroke Engine with Particle-Image-Velocimetry*, SAE Technical Paper 2000-01-0902, 2000, <https://doi.org/10.4271/2000-01-0902>.
- [60] Dec, J.E., Hwang, W. und Sjöberg, M., *An Investigation of Thermal Stratification in HCCI Engines Using Chemiluminescence Imaging*, SAE Technical Paper 2006-01-1518, 2006, <https://doi.org/10.4271/2006-01-1518>.
- [61] Bowditch, F.W., *A New Tool for Combustion Research A Quartz Piston Engine*, SAE Technical Paper 610002, 1961, <https://doi.org/10.4271/610002>.
- [62] Sasaki, T., Yoshida, K., Urata, Y. und Ishii, K., *Introduction to the optically accessible engine for investigation of in-cylinder phenomena*, Jsaer Review 21:573-575, 2000, [https://doi.org/10.1016/S0389-4304\(00\)00076-X](https://doi.org/10.1016/S0389-4304(00)00076-X).

- [63] Murakami, M., Konomi, T., Inagaki, H. und Saito, A., *Development of Two-Dimensional Oil Film Thickness Distribution Measuring System*, SAE Technical Paper 952346, 1995, <https://doi.org/10.4271/952346>.
- [64] Dellis, P.S., *Aspects of Lubrication in a Reciprocating Single-ring Test Rig and Further Implementation to Engine Applications*, tribology in industry 39(2):260-269, 2017, <https://doi.org/10.24874/ti.2017.39.02.14>.
- [65] Schäffer, J., Kirner, C., Härtl, M. und Wachtmeister, G., *Development of a Measuring System for the Visualization of the Oil Film between the Piston and Cylinder Liner of a Gasoline Engine*, SAE Technical Paper 2019-11-14, 2019, <https://doi.org/10.4271/03-13-02-0013>.
- [66] Eichler, H.J. und Eichler, J., *Laser: Bauformen, Strahlführung, Anwendungen*, Springer Berlin Heidelberg, 2015.
- [67] Walter, M. und Münzenberg, M., *Schematischer Aufbau eines Lasers*, <https://lp.uni-goettingen.de/get/text/5344>, letzter Zugriff 12.01.2022.
- [68] Pollak, T., Wing, W., Grasso, R., Chicklis, E. und Jenssen, H., *CW laser operation of Nd:YLF*, IEEE Journal of Quantum Electronics 18(2):159-163, 1982, <https://doi.org/10.1109/JQE.1982.1071512>.
- [69] Nakamura, J., *Image Sensors and Signal Processing for Digital Still Cameras*, CRC Press, 2017.
- [70] *Die Farbfilter auf dem Farbfilterarray des Bayer-Sensors*, https://de.wikipedia.org/wiki/Bayer-Sensor#/media/Datei:Bayer_pattern_on_sensor.svg, letzter Zugriff 29.06.2021.
- [71] LaVision GmbH, *Product manual: High-Speed IRO*, <https://www.lavision.de/de/downloads/manuals>, letzter Zugriff 26.01.2022.
- [72] *Funktionsweise einer Mikrokanalplatte*, <https://de.wikipedia.org/wiki/Mikrokanalplatte>, letzter Zugriff 18.01.2022.
- [73] Weber, V., Brübach, J., Gordon, R.L. und Dreizler, A., *Pixel-based characterisation of CMOS high-speed camera systems*, Applied Physics B 103(2):421-433, 2011, <https://doi.org/10.1007/s00340-011-4443-1>.
- [74] Schöler, J., Schiefer, S., Wigger, S., Füßler, H.-J., Lagemann, V. und Kaiser, S.A., *Imaging and Simulation of Oil Transport Phenomena in the Upper Piston Skirt Region*, SAE Technical Paper 2019-01-2359, 2019, <https://doi.org/10.4271/2019-01-2359>.
- [75] Schöler, J., Wigger, S. und Kaiser, S.A., *Quantitative Fluorescence-Based Imaging of in-Cylinder Fuel-film thickness at kHz Frame Rates in a Production-type Direct-Injection Spark-Ignition Engine*, International Journal of Engine Research 2022.
- [76] Schommers, J., Scheib, H., Hartweg, M. und Bosler, A., *Reibungsminimierung bei Verbrennungsmotoren*, MTZ - Motortechnische Zeitschrift 74(7):566-573, 2013, <https://doi.org/10.1007/s35146-013-0170-y>.
- [77] 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, <https://doi.org/10.4271/2004-01-2909>.
- [78] Lorenz, M. und Koch, T., *CO2 reduction by minimizing friction at the pcu in conflict of targets with increased oil aerosol formation*, in *Internationaler Motorenkongress 2020*,(S. 159-171), 2020, https://doi.org/10.1007/978-3-658-30500-0_10.
- [79] 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, <https://doi.org/10.1299/jsmeb.40.487>.

- [80] Thirouard, B., Tian, T. und Hart, D.P., *Investigation of Oil Transport Mechanisms on the Piston Second Land of a Single Cylinder Diesel Engine, Using Two-Dimensional-Laser-Induced Fluorescence*, SAE Technical Paper 982658, 1998, <https://doi.org/10.4271/982658>.
- [81] 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, <https://doi.org/10.4271/2016-01-0642>.
- [82] Zhang, W., Ahling, S. und Tian, T., *Modeling the Three Piece Oil Control Ring Dynamics and Oil Transport in Internal Combustion Engines*, SAE Technical Paper 2021-01-0345, 2021, <https://doi.org/10.4271/2021-01-0345>.
- [83] Vokac, A. und Tian, T., *An Experimental Study of Oil Transport on the Piston Third Land and the Effects of Piston and Ring Designs*, SAE Technical Paper 2004-01-1934, 2004, <https://doi.org/10.4271/2004-01-1934>.
- [84] Ichinose, S., Iwade, K. und Hata, Y., *Oil Flow in Piston Oil Ring Groove*, SAE Technical Paper 2014-01-1670, 2014, <https://doi.org/10.4271/2014-01-1670>.
- [85] Meng, Z., Ahling, S. und Tian, T., *Study of the Effects of Oil Supply and Piston Skirt Profile on Lubrication Performance in Power Cylinder Systems*, SAE Technical Paper 2019-01-2364, 2019, <https://doi.org/10.4271/2019-01-2364>.
- [86] 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, <https://doi.org/10.4271/2017-01-1047>.
- [87] Puthiya Veetil, M. und Shi, F., *CFD Analysis of Oil/Gas Flow in Piston Ring-Pack*, SAE Technical Paper 2011-01-1406, 2011, <https://doi.org/10.4271/2011-01-1406>.
- [88] Bai, D., *Modeling Piston Skirt Lubrication in Internal Combustion Engines*, Dissertation, Massachusetts Institute of Technology, 2012.
- [89] Baelden, C., *A multi-scale model for piston ring dynamics, lubrication and oil transport in internal combustion engines*, Dissertation, Massachusetts Institute of Technology, 2014.
- [90] Horstemeyer, M., *Multiscale Modeling: A Review*, in *Practical Aspects of Computational Chemistry*, (S. 87-135), J. Leszczynski and M.K. Shukla (Hrsg.), Springer Science + Business Media, 2009, https://doi.org/10.1007/978-90-481-2687-3_4.
- [91] Fang, T., Meng, Z., Ahling, S. und Tian, T., *A Computational Study of the Lubricant Transport into Oil Control Ring Groove*, SAE Technical Paper 2019-01-2362, 2019, <https://doi.org/10.4271/2019-01-2362>.
- [92] Steimle, F., Kulzer, A., Richter, H., Schwarzenhal, D. und Romberg, C., *Systematic Analysis and Particle Emission Reduction of Homogeneous Direct Injection SI Engines*, SAE Technical Paper 2013-04-0248, 2013, <https://doi.org/10.4271/2013-01-0248>.
- [93] 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, <https://doi.org/10.4271/2001-01-3587>.
- [94] Li, J., Huang, Y., Alger, T.F., Matthews, R.D., Hall, M.J., Stanglmaier, R.H., et al., *Liquid Fuel Impingement on In-Cylinder Surfaces as a Source of Hydrocarbon Emissions From Direct Injection Gasoline Engines*, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power 123(3):659-668, 2000, <https://doi.org/10.1115/1.1370398>.
- [95] Kleiner, F., Kaspar, M., Artmann, C. und Rabl, H.-P., *Online Oil Dilution Measurement at GDI Engines*, SAE Technical Paper 2014-01-2591, 2014, <https://doi.org/10.4271/2014-01-2591>.

- [96] Artmann, C., Kaspar, M., Rabl, H.-P. und Mayer, W., *A New Measurement Technique for Online Oil Dilution Measurement*, SAE Technical Paper 2013-01-2521, 2013, <https://doi.org/10.4271/2013-01-2521>.
- [97] 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, <https://doi.org/10.4271/2015-24-2535>.
- [98] Andreae, M., Fang, H. und Bhandary, K., *Biodiesel and Fuel Dilution of Engine Oil*, SAE Technical Paper 2007-01-4036, 2007, <https://doi.org/10.4271/2007-01-4036>.
- [99] Morcos, M., Parsons, G., Lauterwasser, F., Boons, M. und Hartgers, W., *Detection Methods for Accurate Measurements of the FAME Biodiesel Content in Used Crankcase Engine Oil*, SAE Technical Paper 2009-01-2661, 2009, <https://doi.org/10.4271/2009-01-2661>.
- [100] Zhao, L., Zhao, Z., Zhu, X., Ahuja, N., Naber, J. und Lee, S.-Y., *High Pressure Impinging Spray Film Formation Characteristics*, SAE Technical Paper 2018-01-0312, 2018, <https://doi.org/10.4271/2018-01-0312>.
- [101] Luo, H., Ogata, Y. und Nishida, K., *Effects of Droplet Behaviors on Fuel Adhesion of Flat Wall Impinging Spray Injected by a DISI Injector*, SAE Technical Paper 2019-24-0034, 2019, <https://doi.org/10.4271/2019-24-0034>.
- [102] Grzeszik, R., *Optische Messtechniken zur Bewertung innermotorischer Wandfilme (Konferenzbeitrag)*, 9. Tagung Diesel- und Benzindirekteinspritzung, Wiesbaden, https://doi.org/10.1007/978-3-658-07650-4_18.
- [103] Maligne, D. und Bruneaux, G., *Time-Resolved Fuel Film Thickness Measurement for Direct Injection SI Engines Using Refractive Index Matching*, SAE Technical Paper 2011-01-1215, 2011, <https://doi.org/10.4271/2011-01-1215>.
- [104] Felton, P.G., Kyritsis, D.C. und Fulcher, S.K., *LIF Visualization of Liquid Fuel in the Intake Manifold During Cold Start*, SAE Technical Paper 1995-10-01, 1995, <https://doi.org/10.4271/952464>.
- [105] Takahashi, Y., Nakase, Y. und Ichinose, H., *Analysis of the Fuel Liquid Film Thickness of a Port Fuel Injection Engine*, SAE Technical Paper 2006-01-1051, 2006, <https://doi.org/10.4271/2006-01-1051>.
- [106] 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, 2018, <https://doi.org/10.1177/1468087417733865>.
- [107] Lin, M.-T. und Sick, V., *Is Toluene a Suitable LIF Tracer for Fuel Film Measurements?*, SAE Technical Paper 2004-01-1355, 2004, <https://doi.org/10.4271/2004-01-1355>.
- [108] Cho, H. und Min, K., *Measurement of liquid fuel film distribution on the cylinder liner of a spark ignition engine using the laser-induced fluorescence technique*, Measurement Science and Technology 14:975, 2003, <https://doi.org/10.1088/0957-0233/14/7/310>.
- [109] Mueller, 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, <https://doi.org/10.4271/2018-01-0634>.
- [110] Mori, S., Sakai, H., Nogawa, S. und Nakatani, K., *Development of Quantitative Fuel Film Distribution Measurement by LIEF Technique and Application to Gasoline Spray*, SAE Technical Paper 2020-01-1159, 2020, <https://doi.org/10.4271/2020-01-1159>.
- [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, <https://doi.org/10.1007/s00348-009-0720-8>.
- [112] 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):98, 2015, <https://doi.org/10.1007/s00348-015-1971-1>.
- [113] Jüngst, N. und Kaiser, S., *Imaging of Fuel-Film Evaporation and Combustion in a Direct-Injection Model Experiment*, SAE Technical Paper 2019-01-0293, 2019, <https://doi.org/10.4271/2019-01-0293>.
- [114] Schulz, F., Samenfink, W., Schmidt, J. und Beyrau, F., *Systematic LIF fuel wall film investigation*, Fuel 172:284-292, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.01.017>.
- [115] Ishizawa, S., *An experimental study on quenching crevice widths in the combustion chamber of a spark-ignition engine*, Proceedings of the Combustion Institute 26(2):2605-2611, 1996, [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(96\)80094-4](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(96)80094-4).
- [116] Boam, D.J., Finlay, I.C., Biddulph, T.W., Ma, T.A., Lee, R., Richardson, S.H., et al., *The Sources of Unburnt Hydrocarbon Emissions from Spark Ignition Engines during Cold Starts and Warm-Up*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering 208(1):1-11, 1994, https://doi.org/10.1243/pime_proc_1994_208_152_02.
- [117] Wentworth, J.T., *The Piston Crevice Volume Effect on Exhaust Hydrocarbon Emission*, Combustion Science and Technology 4(1):97-100, 1971, <https://doi.org/10.1080/00102207108952475>.
- [118] Yoshida, M., *Einfluß der Spaltgeometrie am Feuersteg des Kolbens auf die Kohlenwasserstoffemission bei einem Ottomotor (Teil 1)*, MTZ - Motortechnische Zeitschrift 41(3):93-95, 1980.
- [119] Yoshida, M., *Einfluß der Spaltgeometrie am Feuersteg des Kolbens auf die Kohlenwasserstoffemission bei einem Ottomotor (Teil 2)*, MTZ - Motortechnische Zeitschrift 41(3):163-171, 1980.
- [120] Bignon, E. und Spicher, U., *Investigation of the Influence of Top Land Crevice Geometry on Hydrocarbon Emissions from SI Engines (Konferenzbeitrag)*, <https://doi.org/10.4271/982560>.
- [121] Angstrom, H.-E., Königsson, F., Kuyper, J. und Stalhammar, P., *The Influence of Crevices on Hydrocarbon Emissions from a Diesel-Methane Dual Fuel Engine*, SAE Technical Paper 2013-04-08, 2013, <https://doi.org/10.4271/2013-01-0848>.
- [122] Saika, T. und Korematsu, K., *Flame Propagation into the Ring Crevice of a Spark Ignition Engine*, SAE Technical Paper 861528, 1986, <https://doi.org/10.4271/861528>.
- [123] Sterlepper, J., Neußer, H.-J. und Ruhland, H., *HC-Emissions of SI Engines - Optical Investigation of Flame Propagations in Piston Top Land Crevice*, SAE Technical Paper 941994, 1994, <https://doi.org/10.4271/941994>.
- [124] Janas, P., Ribeiro, M.D., Kempf, A., Schild, M. und Kaiser, S.A., *Penetration of the Flame Into the Top-Land Crevice - Large-Eddy Simulation and Experimental High-Speed Visualization*, SAE Technical Paper 2015-01-1907, 2015, <https://doi.org/10.4271/2015-01-1907>.
- [125] Wigger, S., *Charakterisierung von Öl- und Kraftstoffschichten in der Kolbengruppe mittels laserinduzierter Fluoreszenz*, Dissertation, Universität Duisburg-Essen, 2014.
- [126] 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 Einzylindermotor*, Tribologie und Schmierungstechnik 64(6):35-42, 2017.

- [127] Kracke, T., Fengler, H.-P., Müller, P. und Barsun, N., *FI2RE — Ein Entwicklungssteuergerät für flexible Einspritzung und Zündung*, MTZ - Motortechnische Zeitschrift 62(1):36-40, 2001, <https://doi.org/10.1007/BF03227080>.
- [128] Picard, M., Hidaka, H., Tian, T., Nishino, T., Arai, E. und Ohkubo, M., *Visualization of the Rotary Engine Oil Transport Mechanisms*, SAE International Journal of Engines 7(3):1477-1488, 2014, <https://doi.org/10.4271/2014-01-1665>.
- [129] Litron Lasers Ltd, *Data Sheet LDY350*, <https://litron.co.uk/wp-content/uploads/2021/01/DS-Litron-LDY350-January-2021.pdf>, letzter Zugriff 16.11.2021.
- [130] 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, <https://doi.org/10.1364/AO.37.004914>.
- [131] Semrock, *Theoretical Spectrum for Part Number: BLP01-532R*, <https://www.semrock.com/filterdetails.aspx?id=blp01-532r-25>, letzter Zugriff 29.11.2021.
- [132] Weller, H.G., Tabor, G., Jasak, H. und Fureby, C., *A tensorial approach to computational continuum mechanics using object-oriented techniques*, Computers in Physics 12(6):620-631, 1998, <https://doi.org/10.1063/1.168744>.
- [133] Gohl, M. und Adams, D., *Analysis of Oil Emission Mechanisms by Simulation and Mass Spectrometry*, SAE International Journal of Fuels and Lubricants 3(2):489-506, 2010, <https://doi.org/10.4271/2010-01-1562>.
- [134] Wigger, S., Müller, T., Füsler, 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 (Konferenzbeitrag)*, 5th International Conference on Knocking in Gasoline Engines, Berlin, Germany, Dec. 12-13.
- [135] Schöler, J., Wigger, S. und Kaiser, S.A., *Quantitative fluorescence-based imaging of in-cylinder fuel film thickness at kHz frame rates in a production-type direct-injection spark-ignition engine*, International Journal of Engine Research 24(6):2489-2504, 2023, <https://doi.org/10.1177/14680874221136172>.
- [136] Edmund Optics GmbH, *Mikrolinsenarray*, <https://www.edmundoptics.de/p/microlens-array-10-x-10mm-300mum-pitch-2deg-divergence-c035d946/29141/>, letzter Zugriff 02.12.2021.
- [137] Holo/Or Ltd., *Homogenizer/Diffuser*, <https://www.holor.co.il/application/homogenizer-diffuser/>, letzter Zugriff 02.12.2021.
- [138] 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, <https://doi.org/10.1007/s00340-014-5818-x>.
- [139] Semrock, *Theoretical Spectrum for Part Number: FF01-292/27*, <https://www.semrock.com/filterdetails.aspx?id=ff01-292/27-25>, letzter Zugriff 30.11.2021.
- [140] Semrock, *Theoretical Spectrum for Part Number: FF509-FDi01*, <https://www.semrock.com/FilterDetails.aspx?id=FF509-FDi01-25x36>, letzter Zugriff 30.11.2021.
- [141] 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 972832, 1997, <https://doi.org/10.4271/972832>.

- [142] Thorlabs, *Product details:* LA4725, <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=LA4725>, letzter Zugriff 02.12.2021.
- [143] Zabeti, S., Aghsaee, M., Fikri, M., Welz, O. und Schulz, C., *Optical properties and pyrolysis of shock-heated gas-phase anisole*, Proceedings of the Combustion Institute 36(3):4525-4532, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.proci.2016.06.156>.
- [144] Benzler, T., *Photo-physical characterization of aromatic compounds for laser-induced fluorescence based diagnostics of fuel concentration, temperature, and equivalence ratio in practical combustion processes*, Dissertation, University of Duisburg-Essen, 2019, <https://doi.org/10.17185/dupublico/70230>.
- [145] Berlman, I.B., *Handbook of Fluorescence Spectra of Aromatic Molecules*, Academic Press, 1971.
- [146] Fordham, J.L.A., Bone, D.A., Read, P.D., Norton, T.J., Charles, P.A., Carter, D., et al., *Astronomical performance of a micro-channel plate intensified photon counting detector*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 237(3):513-521, 1989, <https://doi.org/10.1093/mnras/237.3.513>.
- [147] van Breda, I.G., *Halation in image intensifiers*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 257(3):415-418, 1992, <https://doi.org/10.1093/mnras/257.3.415>.
- [148] Gordon, R., Heeger, C. und Dreizler, A., *High-speed mixture fraction imaging*, Applied Physics B 96:745-748, 2009, <https://doi.org/10.1007/s00340-009-3637-2>.
- [149] Charogiannis, A. und Beyrau, F., *Laser induced phosphorescence imaging for the investigation of evaporating liquid flows*, Experiments in Fluids 54(5):1518, 2013, <https://doi.org/10.1007/s00348-013-1518-2>.
- [150] Shway, K., Bardi, M., Bruneaux, G. und Kaiser, S., *Quantitative UV-absorption imaging of liquid fuel films and their evaporation (Konferenzbeitrag)*, ICLASS 2021, 15th Triennial International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, Edinburgh, UK, 10.2218/iclass.2021.5947.
- [151] Liu, Y., Pei, Y., Guo, R., Wang, C. und Xu, B., *Investigation of the liquid fuel film from GDI spray impingement on a heated surface with the laser induced fluorescence technique*, Fuel 250:211-217, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.03.120>.
- [152] Xiao, D., Li, X., Hung, D.L.S. und Xu, M., *Characteristics of Impinging Spray and Corresponding Fuel Film under Different Injection and Ambient Pressure*, SAE Technical Paper 2019-01-0277, 2019, <https://doi.org/10.4271/2019-01-0277>.
- [153] Schöler, J., Wigger, S., Füller, H.-J. und Kaiser, S.A., *Optical investigation of the flame propagation into the piston lands under high load and knocking conditions (Konferenzbeitrag)*, Motorische Verbrennung und alternative Antriebskonzepte, Waischenfeld, 16.-17. Oktober 2019.
- [154] Malvar, H., He, L.-w. und Cutler, R., *High-quality linear interpolation for demosaicing of Bayer-patterned color images (Konferenzbeitrag)*, 2004 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Montreal, Canada, 17.-21. Mai 2004, <https://doi.org/10.1109/ICASSP.2004.1326587>.
- [155] Vision Research Inc., *Phantom v1612 Spectral Response Curve*, <https://www.phantomhighspeed.com/products/cameras/ultrahighspeed/v1612>, letzter Zugriff Jun. 2021.
- [156] pgo GmbH, *Schott Filter Calculator*, <https://www.pgo-online.com/intl/schott-filter-calculator.html>, letzter Zugriff 28.08.2021.
- [157] Buades, A., Coll, B. und Morel, J.-M., *A non-local algorithm for image denoising*, Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition 2:60-65, 2005, <https://doi.org/10.1109/CVPR.2005.38>.

- [158] Zhen, X., Wang, Y., Xu, S., Zhu, Y., Tao, C., Xu, T., et al., *The engine knock analysis – An overview*, Applied Energy 92:628-636, 2012, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.11.079>.
- [159] Tian, T., Noordzij, L.B., Wong, V.W. und Heywood, J.B., *Modeling Piston-Ring Dynamics, Blowby, and Ring-Twist Effects*, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power 120(4):843-854, 1998, <https://doi.org/10.1115/1.2818477>.
- [160] Heywood, J.B., *Internal combustion engine fundamentals*, McGraw-Hill, 1988, <https://doi.org/10.5860/choice.26-0943>.
- [161] Zhao, M. und Kaiser, S., *Optical Diagnostics for Knock in Compression-Ignition Engines Via High-Speed Imaging*, SAE Technical Paper 2018-01-0631, 2018, <https://doi.org/10.4271/2018-01-0631>.
- [162] Percival, D.B. und Walden, A.T., *Spectral Analysis for Physical Applications*, Cambridge University Press, 1993, <https://doi.org/10.1017/CBO9780511622762>.
- [163] Lim, J.S., *Two-dimensional Signal and Image Processing*, Prentice Hall, 1990.
- [164] Tomasi, C. und Manduchi, R., *Bilateral filtering for gray and color images*, Sixth International Conference on Computer Vision (IEEE Cat. No.98CH36271) (S. 839-846), 1998, <https://doi.org/10.1109/ICCV.1998.710815>.

Eigene Veröffentlichungen

Schöler, J., Schiefer, S., Wigger, S., Füßler, H.-J., Lagemann, V. und Kaiser, S.A., *Imaging and Simulation of Oil Transport Phenomena in the Upper Piston Skirt Region*, SAE Technical Paper 2019-01-2359, 2019, <https://doi.org/10.4271/2019-01-2359>.

Schöler, J., Wigger, S., Füßler, H.-J., Kaiser, S. A., *Optical Investigation of the Flame Propagation Into the Piston Lands Under High Load and Knocking Conditions (Konferenzbeitrag)*, präsentiert auf Motorische Verbrennung und alternative Antriebskonzepte, Waischenfeld, 16.-17. Oktober 2019.

Schöler, J., Wigger, S. und Kaiser, S.A., *Quantitative fluorescence-based imaging of in-cylinder fuel film thickness at kHz frame rates in a production-type direct-injection spark-ignition engine*, International Journal of Engine Research 24(6):2489-2504, 2023, <https://doi.org/10.1177/14680874221136172>.

Betreute Abschlussarbeiten

Hippenstiel, K., *Untersuchung der Körperschallanregung durch die Kolbenbewegung an einem optisch zugänglichen Einzylindermotor*, Bachelorarbeit, FH Dortmund, 2019.

A Anhang zu Kapitel 7

A.1 Auswahl des Filters zur Rauschunterdrückung

Das im Feuersteg detektierte Signal des Flammenleuchtens ist grundsätzlich gering. Der geringe Abstand zwischen Kolben und Zylinderwand erlaubt es nur Kleinstmengen von Gas, in den Spalt einzudringen. Anders als bei den Messungen mit LIF ist das detektierte Signal hier proportional zur Belichtungszeit des Kamerasensors, da das Flammenleuchten eine kontinuierliche Lichtquelle darstellt. Die zu untersuchenden Phänomene sind jedoch schnelllebig, was für eine hohe Aufnahmezeit spricht. Im Versuch muss also ein Kompromiss zwischen niedriger Belichtungszeit, um die ablaufenden Prozesse in einer sinnvollen zeitlichen Auflösung mit geringer Bewegungsunschärfe visualisieren zu können und einer hinreichenden Belichtungszeit und somit Signalintensität getroffen werden. Aufgrund der geringen Signalintensitäten ist außerdem das Signal-Rausch-Verhältnis (SNR, engl. signal to noise ratio) gering. Das Sensorrauschen ist unabhängig von der Transmission und QE des optischen Systems und wird daher durch die angewendete Farbraumkorrektur künstlich verstärkt. Daher wurde als letzter Bildverarbeitungsschritt ein Filter zur Rauschunterdrückung auf die Aufnahmen angewendet. Abbildung A-1 vergleicht drei verschiedene Algorithmen hinsichtlich ihrer Filterleistung.

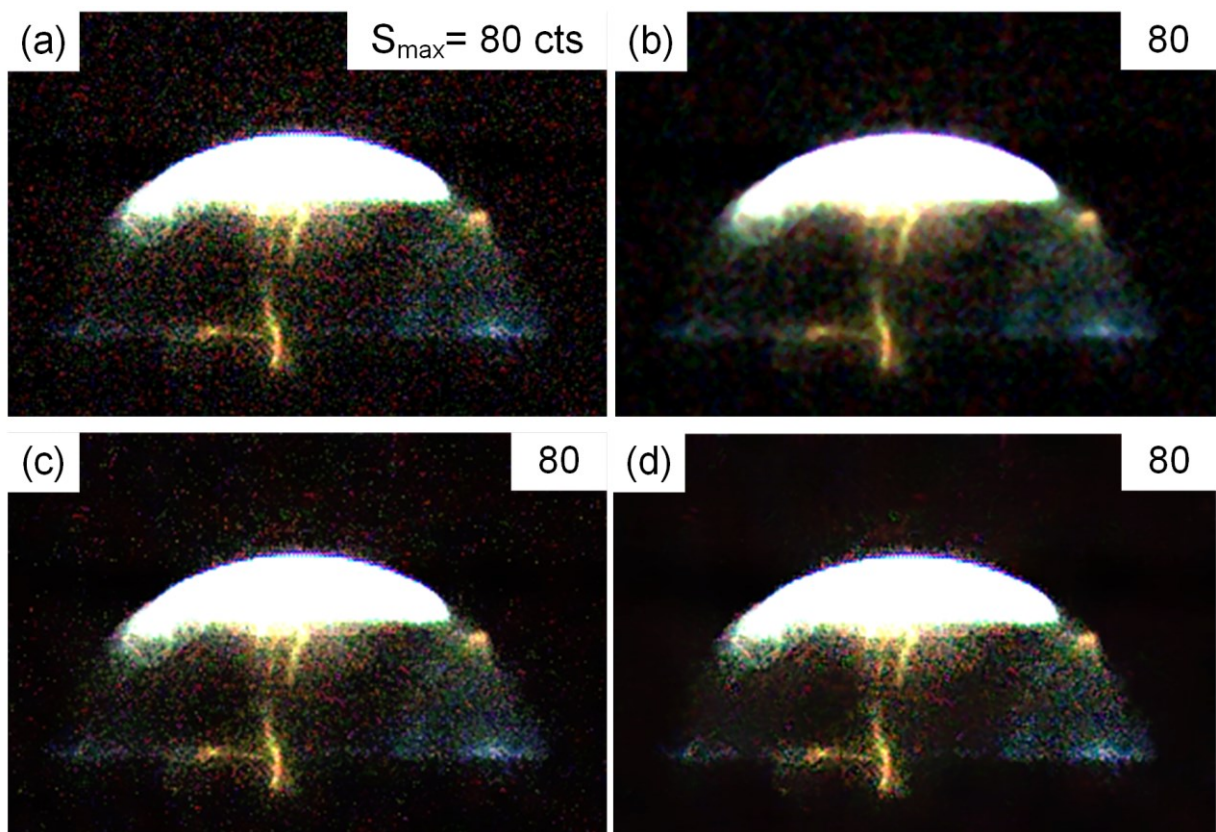


Abbildung A-1: Vergleich verschiedener Filter zur Rauschunterdrückung. (a): Ausschnitt einer hintergrund- und Farbraum-korrigierten Aufnahme vor Anwendung eines Filters (b): 3x3 Median-Filter (c): Bilateraler Filter (d): NLM-Filter.

In Abbildung A-1 (a) ist der Ausschnitt um den Feuersteg aus Abbildung 7-3 (d) vor Anwendung eines Filters vergrößert dargestellt. In dieser Darstellung fällt signifikantes Rauschen im Bildausschnitt auf, vor allem im roten Farbkanal. Der Median-Filter gehört zu den gängigsten Filter zur

Rauschunterdrückung [163]. Abbildung A-1 (b) zeigt die Aufnahme nach der Filterung durch einen 3x3 Median-Filter. Das Hintergrundrauschen wird signifikant reduziert, jedoch wird die Aufnahme auch unschärfer. In Abbildung A-1 (c) wird ein bilateraler Filter [164] verwendet. Es ist zwar keine Unschärfe zu erkennen, jedoch reduziert der Filter das Rauschen lediglich in den Bereichen um den optischen Zugang effektiv. Innerhalb des Feuersteges ist nur eine geringe Reduktion des Rauschsignals zu sehen. Abbildung A-1 (d) zeigt die Filterung durch einen NLM-Filter [157] (engl. non-local-means). Das Rauschen ist hier sowohl außerhalb des optischen Zugangs als auch im Feuersteg deutlich geringer als in der ungefilterten Aufnahme. Gleichzeitig werden keine Kanten verwaschen und die charakteristischen Merkmale des detektierten Flammenleuchtens bleiben weitestgehend erhalten. Aufgrund der genannten Vorteile wird daher im letzten Schritt der Bildverarbeitung der NLM-Filter zur Rauschunterdrückung auf die Einzelaufnahmen angewendet.

DuEPublico

Duisburg-Essen Publications online

UNIVERSITÄT
DUISBURG
ESSEN

Offen im Denken

ub

universitäts
bibliothek

Diese Dissertation wird via DuEPublico, dem Dokumenten- und Publikationsserver der Universität Duisburg-Essen, zur Verfügung gestellt und liegt auch als Print-Version vor.

DOI: 10.17185/duepublico/81497

URN: urn:nbn:de:hbz:465-20240301-102853-1

Alle Rechte vorbehalten.