

**Analyse der Ölschichten in Verbrennungsmotoren
mittels LED induzierter Fluoreszenzmesstechnik
- am Beispiel Laufbuchse und Gleitlager -**

**Vom Promotionsausschuss der
Technischen Universität Hamburg**
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation (Monografie)

von
Konstantin Pryymak

aus
Chmelnizkij, Ukraine

2024

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Friedrich Wirz
 2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Gerhard Matz
- Tag der mündlichen Prüfung: 24.09.2024

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter beim gemeinnützigen Verein „Institut für Analytische Messtechnik Hamburg - IAM-Hamburg e.V.“ unter der Leitung von Herrn Prof. Dr.-Ing. Gerhard Matz sowie bei der Arbeitsgruppe Schiffsmaschinenbau der Technischen Universität Hamburg unter der Leitung von Herrn Prof. Dr.-Ing. Friedrich Wirz.

Ganz besonders danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Gerhard Matz für seine fachliche und persönliche Unterstützung bei der Durchführung dieser Arbeit sowie für die Übernahme des Koreferats. Mein weiterer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Friedrich Wirz für die Ermöglichung der Promotion, die zahlreichen Anregungen und hilfreichen Diskussionen sowie die Übernahme des Hauptreferates. Danken möchte ich weiterhin Herrn Prof. Dr.-Ing. Stefan Krüger für seine Bereitschaft zur Übernahme des Vorsitzes im Promotionsausschuss.

Bei den Mitarbeitern der Arbeitsgruppe Schiffsmaschinenbau der Technische Universität Hamburg, den Mitarbeitern des Instituts für Fahrzeugtechnik Stuttgart der Universität Stuttgart, den Mitarbeitern des Instituts für Antriebs- und Fahrzeugtechnik der Universität Kassel sowie den Kollegen bei der Firma Lubrisense bedanke ich mich für das angenehme Arbeitsklima, die unkomplizierte Zusammenarbeit sowie die anregenden Diskussionen. Ganz besonders bedanken möchte ich mich bei meiner Kollegin Ann-Christin Preuß für den engagierten Support und die moralische Unterstützung im Laufe aller Forschungsarbeiten sowie für die fachliche Unterstützung und die gute Zusammenarbeit.

Die Forschungsvorhaben, die diese Arbeit ermöglichten (FVV-Vorhaben 1276: „Kolbenbolzenlagerung II“, FVV-Vorhaben 1327: „Schmierölkonzept Großmotor I“, FVV-Vorhaben 1382: „Schmierölkonzept Großmotor II“) wurden sowohl aus Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) als auch aus Eigenmitteln der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V. (FVV) gefördert. Ich bedanke mich für diese finanzielle Unterstützung und insbesondere für die fachkundigen Beiträge der Mitglieder der projektbegleitenden Arbeitskreise.

Abschließend möchte ich mich besonders herzlich bei meinen Eltern sowie meiner Schwester für die Unterstützung während meiner Studien-/Promotionszeit bedanken.

Abstract

Lubricating film mechanisms in internal combustion engines are crucial for the behavior of the tribological system conrod-piston-liner. The study at hand uses LED-induced fluorescence method and focuses on the oil behavior at liner and piston of a large bore engine as well as in the piston pin plain bearing of a passenger car engine. The aim of this research is to improve the understanding of the oil mechanisms through the temporal and spatial analysis of the oil layers present at tribological components of the engine. The statements obtained by these results are to contribute to the optimization of the piston assembly in terms of friction, wear and oil emission.

Zusammenfassung

Während der konventionelle Verbrennungsmotor weiterhin eine Hauptantriebsart darstellt, steigen die Ansprüche der aktuellen Entwicklungsprozesse in Bezug auf Langlebigkeit und Umweltbewusstsein immer weiter an. Vor allem das tribologische Zusammenspiel der Motorkomponenten Pleuel, Kolben und Zylinderlaufbuchse bezogen auf Laststeigerung und Effizienzerhöhung produziert weiterhin neue Herausforderungen. Dabei ist das Verständnis der Schmierung und des Verschleißes ausschlaggebend für die Gewährleistung eines sicheren Betriebs sowie für den Aufbau von Optimierungskonzepten.

Die vorliegende Arbeit setzt sich mit der Erforschung von Schmierfilmmechanismen von Zylinderlaufbuchsen und Kolbenbolzengleitlagern auseinander. Die Messung der Laufbuchsensmierung wird mithilfe eines Einzylinder-Forschungs-Großmotors durchgeführt, während die Kolbenbolzenlagerung mithilfe eines V6-Dieselerienmotors untersucht wird. Das zum Zwecke der beschriebenen Untersuchungen entwickelte Messsystem stellt einen weiteren Bestandteil der Arbeit dar. Das System basiert auf dem in der Industrie bekannten LIF-Prinzip und zeichnet sich durch eine gute Prüfstandtauglichkeit sowie Simplität aus. Die Nützlichkeit des Messprinzips mit den zugehörigen Stärken und Schwächen wird dargestellt und anhand der Ergebnisanalyse verdeutlicht.

Die Untersuchung der Schmierfilmmechanismen der Laufbuchse beinhaltet unter anderem das Verhalten des Öls bei dem Kontakt mit den Kolbenringen, den Einfluss der Ringstöße bei der Ringdrehung sowie die Ansammlung des Öls in den Kolbenringstegen und am Kolbenhemd. Im Falle der Kolbenbolzenlagerung werden Ölschichten im Lager auf die Stabilität und Einflussparameter sowie das Ölangebot außerhalb des Gleitlagers untersucht. Zusätzlich wird das Transportverhalten im Gleitlager anhand der Öl-Tracerung analysiert mit dem Ziel der Optimierung der Ölversorgung.

Die vorliegenden Untersuchungen zielen zum einem auf die Verbesserung des Verständnisses der Ölmechanismen der tribologischen Komponenten und zum anderen auf die Erstellung und Validierung von Simulationsmethoden, wobei es sich um elasto-hydrodynamische Kolbenbolzenlagersimulationen sowie um strukturdynamische Kurbeltriebsimulationen unter tribologischen Gesichtspunkten handelt.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	III
Abstract	IV
Zusammenfassung	V
Abbildungsverzeichnis	VIII
Nomenklatur	XII
1 Einleitung und Motivation	1
2 Grundlagen	5
2.1 Tribologie und Schmieröl	5
2.1.1 Ölfluoreszenz	7
2.1.2 Ölverbrauch	8
2.2 Tribologisches System: Pleuel – Kolben (– Kolbenringe) – Laufbuchse .	10
2.2.1 Kolben	11
2.2.2 Kolbenbolzengleitlager	18
2.2.3 Zylinderlauffläche	20
2.2.4 Downsizing und Downspeeding	23
2.3 LIF	24
2.3.1 Lichtleiter	27
2.3.2 Temperatureinfluss auf die Fluoreszenz	31
2.3.3 Fluoreszenzabnahme	32
3 Messsystem	34
3.1 Messsystem Optitron	34
3.2 Messstellenlichtleiter	37
3.3 Fluoreszenzmittel	40
3.4 Kalibrierung	43
3.4.1 Kalibriervorrichtungen	43
3.4.2 Kalibrierverfahren	46

4	Messaufbau	50
4.1	Laufbuchse	50
4.1.1	Motorprüfstand Laufbuchse	50
4.1.2	Applizierung Laufbuchse	52
4.1.3	Messstellen Laufbuchse	54
4.1.4	Öl Laufbuchse	59
4.2	Kolbenbolzen	61
4.2.1	Motorprüfstand Kolbenbolzen	61
4.2.2	Applizierung Kolbenbolzen	64
5	Messungen und Ergebnisse zur Laufbuchse	67
5.1	Messprogramm	67
5.2	Datendarstellung	68
5.3	Ölschicht (statische Prozesse)	71
5.3.1	Ölschichten innerhalb des Arbeitsspiels	71
5.3.2	Verbrennungsflamme	76
5.3.3	Kolbenhemd	78
5.3.4	Ölschichtkennfelder	80
5.4	Ölschicht (dynamische Prozesse)	86
5.4.1	Ringdrehung	87
5.4.2	Übergang Diesel zu CNG	95
5.4.3	Parametervariation	97
6	Messungen und Ergebnisse zum Kolbenbolzen	99
6.1	Messprogramm	99
6.2	Schichtdickenmessungen und Ölangebotsmessungen	102
6.2.1	Schichtdickenmessungen	102
6.2.2	Ölangebotsmessungen	106
6.3	Transportmessungen	110
7	Schlussbemerkung und Ausblick	114
	Literaturverzeichnis	118

Abbildungsverzeichnis

1.1	Containerschiff „Yang Ming Utmost“ – Abgasfahne mit Schwarzrauch Hamburg, Oktober 2014 [10]	2
1.2	Typische Schäden von Kolbenbolzenlagerungen	3
2.1	Stribeck-Kurve [19]	7
2.2	Zusammenhänge von Schmiermittelbilanz, Ölverbrauch und Ölemission [23] [24] [25] [26] [27]	9
2.3	Triebwerk des Hubkolbenmotors [31]	11
2.4	Kühlkanalkolben für einen Pkw-Dieselmotor	12
2.5	Kolbenkinematik eines Großkolbens bei 525 min^{-1}	12
2.6	Kolbenbolzendesaxierung (Anlagewechsel nach Zünd-OT) [18]	13
2.7	Kolbenring- und Kolbenringstoß-Variationen [33]	15
2.8	Auf einen Kolbenring einwirkende Kräfte in der Kolbenringnut [33]	16
2.9	Radialdruckverteilung der Kolbenringe beeinflusst durch Konstruktions- maßnahmen [18]	17
2.10	Kolbenbolzenlagerung (links); einfaches Kolbenbolzen-Kräftemodell (rechts) [33]	18
2.11	Kolbenbolzenbelastung für einen Ottomotor bei Nennleistung über ein Arbeitsspiel [33]	20
2.12	Honbild einer Großlaufbuchse mit der typischen Kreuzriefenstruktur (Hon- winkel $\alpha_h = 60^\circ$)	21
2.13	Honprofil mit Honbild der Plateauhonung (Honwinkel $\alpha_h = 60^\circ$) [30]	22
2.14	Jablonski-Diagramm – Fluoreszenzprinzip [41]	24
2.15	Emissions- und Absorptionsspektrum eines fluoreszierenden Elements	25
2.16	LIF-Messsystem	26
2.17	Lichtleiter – Aufbau	27
2.18	Ausbreitung des Lichts im Kern des Lichtleiters	28
2.19	Lichtleitertypen	29
2.20	Biegungsverlust in der Lichtleitfaser [45]	30
3.1	Schematischer Aufbau des Messsystems	35
3.2	Aufbau des Messsystems (1. Messbox, 2. Bündel-Y-Lichtleiter, 3. Ver- bindungsadapter, 4. Messstellenlichtleiter, 5. Messkolben)	36

3.3	Spektren des Messsystems	37
3.4	Messsystem – Signalstrecke mit Verbindungsstelle der Messstellenlichtleiter mit $\varnothing 200 \mu m$ an die Bündellichtleiter mit $\varnothing 600 \mu m$	38
3.5	SMA-zu-SMA-Verbindungsadapter	38
3.6	Signalunterschied zwischen Lichtleitern mit $\varnothing 550 \mu m$ und $\varnothing 200 \mu m$ (Öl: Shell Sirius X 40)	39
3.7	Einfluss des Biegeradius auf das Signal bei einem Lichtleiter mit $\varnothing 200 \mu m$ (Öl: Shell Sirius X 40)	40
3.8	Fluoreszenzmittel <i>Lumilux CD 345</i> mit Anregungsbereich bis 500 nm und Fluoreszenzbereich oberhalb von 480 nm [63]	41
3.9	Thioxanthene	41
3.10	Abhängigkeit der Fluoreszenzintensität von dem Mischungsverhältnis des Fluoreszenzmittels	42
3.11	Temperaturabhängigkeit der Fluoreszenz am Beispiel von Lumilux-Mittel (0,12 %) + Shell-Sirius-X-40 Öl	42
3.12	Prinzipieller Aufbau der Kalibriervorrichtung	44
3.13	Einfluss der Reflexion auf das Fluoreszenzsignal	46
3.14	Generierung der Kalibriersignale an der Laufbuchse	47
3.15	Schritte des Kalibrierverfahrens	48
4.1	Einzyylinder-Forschungsmotor mit Fluoreszenzmesstechnik	51
4.2	Großkolben des Forschungsmotors	52
4.3	Lichtleiter-Messstellen Aufbauvarianten	53
4.4	Konstruktion der Lichtleiter-Messstellen der Laufbuchse	54
4.5	Messpositionen an der Laufbuchse	55
4.6	FEM-Modelle der Laufbuchsenkonstruktion [30]	56
4.7	Konstruktion der Ausfräsungen für obere Messstellen der Laufbuchse; finale Konstruktion (rechts)	57
4.8	Leitungsverlegung an der Laufbuchse (links und oben); Messstellenbohrungen von innen (rechts unten)	58
4.9	Führungselemente der Laufbuchse für Lichtleiterführung der oberen Messstellen	59
4.10	Ölwanne des Großmotors mit fluoreszierendem Öl (links); Ölfass mit Heizung zum Tracer-Vermischen (rechts)	60
4.11	Daimler-OM642-Serie	62
4.12	Motor-Schwingsystem (links); applizierter Fluoreszenz-Kolben mit Schwinge (rechts)	63
4.13	Kabelführung an einem Schwingarm	64

4.14	Messstellenaufbau in der Kolbenbolzengleitlagerwand	65
4.15	Messpositionen am Vollmotor-Kolben	65
5.1	Messprogramm bei der Laufbuchsenmessungen (rechts); Motorkennfeld (links)	68
5.2	Ölsignalverlauf der mittleren Messstelle W6 – Durchfahren des Kolbenringpakets	69
5.3	Ölsignalverlauf der mittleren Messstelle W6 (oben); Detaildarstellung des Kolbenringabschnitts (unten) [525 min^{-1} , 1,72 kNm , 1626 AS] . .	72
5.4	Ölschichtdicke der Laufbuchse an der mittleren Messstelle W6 [525 min^{-1} , 1,72 kNm , 1626 AS]	73
5.5	Ölsignalverlauf der unteren Messstelle W8 (oben); Detaildarstellung des Kolbenringabschnitts (unten) [750 min^{-1} , 1,72 kNm , 3065 AS]	75
5.6	Ölsignalverlauf der oberen Messstelle W2 (links); Detaildarstellung der Verbrennungsflamme (rechts) [525 min^{-1} , 1,72 kNm , 1000 AS]	77
5.7	Ölsignalverlauf des Kolbenhemds an der unteren Messstelle (oben); simulierte Kolbenquerbewegung mit gekennzeichneteter Druckseite (DS) und Gegendruckseite (GDS) (unten) [750 min^{-1} , 1,72 kNm]	79
5.8	Mittlere Ölschichten der Arbeitsspielabschnitte an den oberen (E5 & W5), mittleren (W6) und unteren (W8) Messstellen [675 min^{-1} , 3,84 kNm] 82	
5.9	Mittlere Ölschichten der Arbeitsspielabschnitte an den oberen (E5 & W5), der mittleren (W6) und der unteren (W8) Messstelle – Übersicht in fünf Betriebspunkten	84
5.10	Kennfelder der mittleren Ölschichten der 1. und 2. Kolbenring-Abschnitte an der oberen (E5), mittleren (W6) und unteren (W8) Messstelle . . .	85
5.11	Korrelation der Ölschichtdicke der Laufbuchse und der Ölemission im Abgas bei einem Einspritzungsausfall	86
5.12	Detektieren des Ringstoßes des 1. Kolbenringes an der unteren Messstelle (W8) [750 min^{-1} , 1,72 kNm]	88
5.13	Map der Ölschichtsignale der unteren Messstelle (W8) – Passieren des Kolbenringpaketes am UT; Detaildarstellung mit Erkennung des 1. Ringstoßes (unten) [750 min^{-1} , 1,72 kNm]	89
5.14	Map der Ölschichtsignale der beiden unteren Messstellen (E8 & W8) mit abwechselnder Erkennung des Ringstoßes des 1. Kolbenringes [750 min^{-1} , 1,72 kNm]	90
5.15	Aufbau des Ölabstreifringes	91
5.16	Map der Ölschichtsignale mit Erkennung der Drehung des Ölabstreifringes, Messstellen W6 (oben) und W8 (unten) [525 min^{-1} , 1,72 kNm] . .	92

5.17	Korrelation der Ringstoßposition des 1. Ringes mit den Laufbuchsen- temperaturen und der Ölemission im Abgas [750 min^{-1} , 1,72 kNm] . . .	94
5.18	Map der Ölschichtsignale mit Erkennung der Betriebsartänderung (Die- sel – CNG) des Motors an den oberen Messstellen (W5 & E5) [525 min^{-1} , 1,72 kNm]	96
5.19	Korrelation der Ölschichtsignale der Betriebsartänderung (Diesel – CNG) mit den Motorparametern und der Ölemission im Abgas	96
5.20	Korrelation der Ölschichtsignale am Feuersteg/Laufbuchse mit dem SOI des Motors [675 min^{-1} , 3,85 kNm , SOI: $-26,6^\circ$ bis $> -41,8^\circ$]	98
6.1	Vorgehensweise bei den Ölschichtdickenmessungen	100
6.2	Vorgehensweise bei den Öltransportvorgangsmessungen	100
6.3	Messprogramm auf dem Vollmotorenprüfstand (* Messleitungsschaden bei Ölangebotsmessungen)	101
6.4	Ölschichtdickenmessungen am Kolbenbolzen, Messstelle: S3	103
6.5	Radiale Kolbenbolzenbewegung in Hubrichtung, Messebene nahe Siche- rungsring [1]	104
6.6	Ölschichtdickenmessungen am Kolbenbolzen, Messstelle: S1, Übersicht bei 1200 min^{-1}	105
6.7	Vergleich der Injektions- und Ölangebotspositionen am Vollmotor . . .	106
6.8	Ölangebotsmessungen am Kolbenbolzen bei 1200 min^{-1} , geschleppt (oben), Kolbenbewegung (unten)	107
6.9	Übersicht zu den Ölangebotsmessungen am Kolbenbolzen bei 1200 min^{-1} , Messstelle: L2	109
6.10	Vergleich des Druckniveaus bei Ölangebotsmessungen am Kolbenbolzen, Messstelle: L1 (HD: hoher Ölversorgungsdruck, ND: niedriger Ölversor- gungsdruck)	110
6.11	Transportmessung am Kolbenbolzen mit simulierter Belastung am GLP bei 33,3 Hz (2000 min^{-1}), 30 kN , 140 $^\circ C$ (Injektionsposition 2: oben, Injektionsposition 1: unten)	111
6.12	Übersicht zu den Transportmessungen am Vollmotor (niedriger Ölver- sorgungsdruck)	113

Nomenklatur

Abkürzungen

Abk.	Bedeutung
2K	zwei-Komponenten
AS	Arbeitsspiel
BMEP	Brake Mean Effective Pressure
CNG	Compressed Natural Gas
CrN	Chromnitrid
DAQ	Data acquisition
DIN	Deutsches Institut für Normung
DLC	Diamant like Carbon
DS	Druckseite
E	Osten
EHD	elastohydrodynamisch
EP/AW	extreme Pressure/Anti Wear
FEM	Finite-Elemente-Methode
FVV	Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen
GDS	Gegendruckseite
GLP	Gleitlagerprüfstand
HD	hohe Druckstufe
K1/K2/K3	Injektionspositionen
KW	Kurbelwelle
L1/L2/L3	Ölangebotmessstellen
LED	Light-emitting Diode
LIF	Laserinduzierte Fluoreszenz
Lkw	Lastkraftwagen
LNG	Liquefied Natural Gas
m/z	Masse-zu-Ladungsverhältniss
MAN	Maschinenfabrik Augsburg-Nürnberg
MS	Massenspektrometrie

Abk.	Bedeutung
N	Norden
NA	numerische Apertur
ND	niedrige Druckstufe
Nkw	Nutzkraftwagen
OT	oberer Totpunkt
PEEK	Polyetheretherketon
PET	Polyethylenterephthalat
pH	Potential des Wasserstoffs
Pkw	Personenkraftwagen
ppm	Parts per Million
S	Süden
S1/S2/S3/S4	Schichtdickenmessstellen
SMA	Sub Miniature A
SOI	Start of Injection
SPS	speicherprogrammierbare Steuerung
UT	unterer Totpunkt
VM	Vollmotor
W	Westen
ZOT	Zündtotpunkt

Funktionen und Formelzeichen

Symbol	Einheit	Bedeutung
α_h	°	Honwinkel
δ	°	Brechungswinkel
γ	°	Winkel des einfallenden Lichts
γ'	°	Winkel des reflektierten Lichts
γ_{acc}	°	Akzeptanzwinkel
γ_g	°	Totalreflexionwinkel
μ	–	Reibungszahl
Φ	–	Quantenausbeute
Φ_f	–	Fluoreszenz-Quantenausbeute
Φ_{norm}	–	Messsystembezogene Fluoreszenz-Quantenausbeute
σ_A	N/mm^2	Ovalisierungsspannung
σ_B	N/mm^2	Biegespannung
σ_{ges}	N/mm^2	Gesamtspannung
c	m/s	Lichtgeschwindigkeit
D	m	Bohrungsdurchmesser
d_{E_HRSS}	m	radialer Kolbenbolzenweg
d_a	m	Kolbenbolzenaußendurchmesser
d_i	m	Kolbenbolzeninnendurchmesser
f^{max}/f^{min}	V	Maximal-/Minimalwerte der Kalibrierfunktion
$F_{g,max}$	N	Kolbenbolzenkraft
f_{kall}/f_{chan}	V	Kalibrierfunktionen
F_K	N	Kolbenkraft
F_N	N	Normalkraft
F_{ST}	N	Stangenkraft
k_{nr}	s^{-1}	Geschwindigkeitskonstante nichtradiativer Prozesse
k_f	s^{-1}	Geschwindigkeitskonstante der Fluoreszenz
n	m/s	Dreh-/Gleitgeschwindigkeit
n', n'_1, n'_2	–	Brechzahlen von Medien
n'_{clad}/n'_{core}	–	Brechzahl des Fasercladding/Faserkerns
s	m	Hub
S_0/S_1	–	Energieniveaus

1 Einleitung und Motivation

Verbrennungsmotoren sind seit Anfang des 20. Jahrhunderts eine der wichtigsten Triebkräfte für das weltweite Wirtschaftswachstum. Sie werden in unterschiedlichen Größen in ganz unterschiedlichen Bereichen eingesetzt. Man findet sie in Rasenmähern, Motorrädern, Pkws und Lkws, Lokomotiven, Schiffen und im Bereich der Energieversorgung. Unter den zahlreichen und komplexen Systemen, aus denen Verbrennungsmotoren bestehen können, ist im Rahmen dieser Arbeit vor allem das Schmieresystem von Interesse. Die Aufgaben der Schmierung bestehen vor allem in der Kraftübertragung, der Verringerung von Reibung und Verschleiß, der Geräusch-, Stoß- und Schwingungsdämpfung, der Kühlung, dem Korrosionsschutz, der Reinigung sowie dem Abdichten.

Während das tribologische System eines Verbrennungsmotors keine explizite Schwachstelle besitzt, gibt es Bereiche, die von der Kenntnis des Schmierölverhaltens profitieren können. Ein Beispiel stellt die Kolbenbolzenlagerung von Downsized-Pkw-Verbrennungsmotoren dar, die aufgrund von steigenden Lasten und sinkenden/gleichbleibenden Lagergrößen immer höheren Spannungen ausgesetzt ist. Dabei bestimmen vor allem die Schmierfilme im Lager und deren Ölversorgung über die Zuverlässigkeit der Lagerung und das Auftreten von Nabenreißer bzw. -fresser [1] [2] [3] [4]. Als ein weiteres Beispiel dient die Laufbuchsensmierung, die nicht nur für die Kraftübertragung und Verschleißminimierung, sondern auch für Korrosion und Emission mitverantwortlich ist. Dabei stellen die Schiffsmotoren mit überdimensionierten Schmieresystemen und breiter Kraftstoffvariation gute Forschungsobjekte dar.

In der vorliegenden Arbeit wird das Verhalten des Schmieröls im tribologischen System Pleuel-Kolben(-Kolbenringe)-Laufbuchse untersucht sowie das zugehörige speziell dafür entwickelte Messsystem behandelt. Während es viele Ansätze bei Schmierölmessungen gibt, bietet das verwendete optische Verfahren einen optimalen Kompromiss zwischen Anwendungsfreundlichkeit und Auflösungspotential. Die Entwicklung des Messsystems wurde zielgerichtet für die Anwendung an Forschungsmotoren sowie Serienmotoren mit hoher Anpassungsfähigkeit an die gegebenen Prüfstandbedingungen durchgeführt. Die Aussagefähigkeit des Systems wird gesteigert, indem man dessen Messergebnisse mit weiteren Messsystemen kombiniert oder korreliert. Ein Beispiel dafür sind die Abgasemissionen. Weil der Schmierölverbrauch einen nicht zu vernachlässigenden Teil der Emissionen des Verbrennungsmotors generiert, werden die Abgasemis-

sionen zur Betrachtung des Schmieröls miteinbezogen. Das Verhalten des Schmieröls wird anhand von zwei Fällen untersucht:

Laufbuchenschmierung eines mittelschnelllaufenden Schiffsmotors. Auch wenn optische Untersuchungen der Ölschicht auf der Laufbuchse von Pkw-Motoren bereits durchgeführt wurden [5] [6] [7] [8] [9] und keine fundamental neuen Phänomene bei Schiffsmotoren zu erwarten sind, können spezifische Einflüsse und Zusammenhänge im Großmotorbereich sich von Pkw-Bereich unterscheiden. Aufgrund der Verwendung von neuen Kraftstoffen und Schmierstoffen im Großmotorbereich besteht hier ein erhöhter Forschungsbedarf.



Abbildung 1.1: Containerschiff „Yang Ming Utmost“ – Abgasfahne mit Schwarzauch Hamburg, Oktober 2014 [10]

Dieser Bedarf wird dadurch begünstigt, dass die Auslegung des Schmiersystems von Großmotoren im Vergleich zum Pkw- und Lkw-Bereich oft überdimensioniert ist. Dies stellt die Zuverlässigkeit und Langlebigkeit der Motoren sicher und ermöglicht oft den Betrieb mit unterschiedlichen Kraftstoffen und in voller Bandbreite, führt aber dazu, dass eine gewisse Größenordnung mehr Schmieröl pro kWh verbraucht wird. Außer für die Gewährleistung des sicheren Betriebs eines Großmotors ist das Verhalten des Schmieröls verstärkt für die Luftverschmutzung mitverantwortlich. Ein größeres Potential als bei Pkw-Motoren hat die Forschung an den Schmiersystemen von Großmotoren auch wegen großzügigeren Emissionsvorschriften und fehlender konstruktiver Größen- bzw. Volumenbeschränkungen [11] [12] [13]. Ein Einzylinder-Forschungs-Großmotor mit der Möglichkeit der Nutzung von Diesel und verflüssigtem oder gasförmigem Erdgas (LNG & CNG) als Kraftstoff ist dabei ein idealer Versuchsträger für die Untersuchung des Ölverhaltens im Zylinder.

Das Hauptaugenmerk der hier beschriebenen Untersuchungen liegt auf der Messung und Analyse der Ölschicht der Laufbuchse im gefeuerten Betrieb. Das Ziel der Arbeit ist es, die fundamentalen Vorgänge der Kolbengruppe bezogen auf die Ölschicht zu verstehen. Die Einflüsse der Parameter der Motorkomponenten auf die Schmierung des Zylinders und folglich auch auf die Emissionen, wie z. B. die Form und die Honung der Laufbuchse, die Form und die Anzahl der Kolbenringe, die Anpresskräfte der Kolbenringe oder die Primär- und Sekundärbewegung des Kolbens, müssen verstanden werden, um eine Verbesserung im Großmotorenbereich zu erzielen. Die auf diese Weise generierten Messergebnisse können ein wichtiges Tool sein nicht nur für das Verstehen eines bestimmten Motors bzw. Motortyps, sondern auch für die Erstellung oder Validierung von Simulationsprogrammen.

Dabei werden statische und dynamische Änderungen der Ölschicht untersucht. Bei den statischen Änderungen wird die Ölschicht der Laufbuchse unter konstanten Bedingungen untersucht und das Verhalten der Ölschicht wird gemittelt betrachtet. Bei den dynamischen Änderungen wird der Einfluss der ändernden Betriebsbedingungen untersucht, wie z. B. die Änderung der Kraftstoffmenge, ein Kraftstoffwechsel oder die Drehung der Kolbenringe.

Kolbenbolzenschmierung eines „Downsized- und Downspeeded“ Pkw-Motors.

Bei der Entwicklung moderner, hochbelasteter Verbrennungsmotoren gemäß den aktuellen „Downsizing- und Downspeeding“-Motorenkonzepten gilt die Kolbenbolzenlagerung als Problemstelle. Nabenreiber bzw. -fresser (Abbildung 1.2) sind bei allen Motorbauarten und Arbeitsverfahren bekannt. Im Gegensatz zu anderen Motorenlagern gilt die Simulationsberechnung von Kolbenbolzenlagern als schwierig und unzuverlässig. Dies ist zum einen auf die Größe und Wechselwirkung der thermischen und der mechanischen Deformation zurückzuführen, die den Spalt maßgeblich beeinflussen. Zum anderen ist bei Bolzenlagern die Schmierstoffversorgung im Gegensatz zu Grund- und Pleuellagern undefiniert, was auch als Begründung für kritisches Einlaufverhalten herangezogen wird [1].

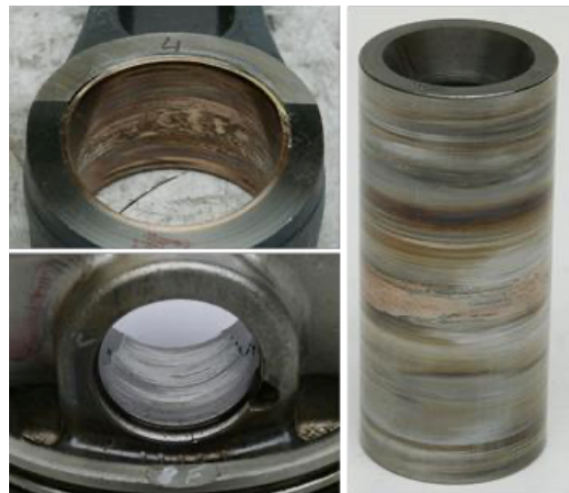


Abbildung 1.2: Typische Schäden von Kolbenbolzenlagerungen

Zudem haben vorangegangene Forschungsvorhaben [1] [14] [15] [16] gezeigt, dass Lagerfeinstrukturen bzw. Geometriesprünge im Schmierpalt dreidimensionale Strömungseffekte hervorrufen. Das Verstehen des Verhaltens des Öls im Gleitlager und der Mechanismen, die den Schmierstoff zum Bolzenlager transportieren können, helfen, ein verbessertes Verständnis der Ölversorgungsmechanismen zu erlangen und die bestehende Simulationsmethodik um die Modellbildung der Schmierstoffversorgung der Kolbenbolzenlagerung zu erweitern. Damit kann ein Beitrag zur Erhöhung der Betriebssicherheit der Kolbenbolzenlagerung geleistet werden.

Für die Untersuchung der Ölschichten an den oben beschriebenen Komponenten wird im Folgenden zunächst das Basiswissen vermittelt. Dabei werden die betroffenen Motorkomponenten und deren tribologische Beziehungen dargestellt und so die Grundlagen geschaffen, um die Problemstellen und mögliche Lösungsansätze zu erkennen. Zusätzlich wird hier das Fluoreszenz-Messprinzip (LIF) behandelt, das hilfreich für das Verständnis des im Weiteren aufgezeigten Messsystems ist. Die für die Datengenerierung notwendigen Komponenten wie Fluoreszenzstoff und Kalibrierung werden hier mit betrachtet, weil sie für die Analyse der Messergebnisse von Bedeutung sind. Anschließend werden die Messkörper beschrieben, an denen die Messtechnik zum Einsatz kommt. Dabei werden vor allem die überwundenen Schwierigkeiten der Applizierung und Optimierungsansätze deutlich. Abschließend werden die generierten Messergebnisse, die das Verständnis der Ölmechanismen verbessern, verdeutlicht und analysiert.

2 Grundlagen

Während die Systeme und Konzepte, deren Zusammenspiel den Betrieb von Verbrennungsmotoren ermöglichen, zahlreich und komplex sind, werden im Folgenden nur Grundlagen vermittelt, die für das Verstehen der durchgeführten Messungen sowie für die Beurteilung der Ergebnisse förderlich sind. Dazu gehören das Verstehen der Funktion von Schmieröl und dessen Verbrauch, die einzelnen geschmierten mechanischen Komponenten des Motors sowie die Grundlagen des Messverfahrens für die Analyse des Öls.

2.1 Tribologie und Schmieröl

Eine wichtige Rolle beim Betreiben von Verbrennungsmotoren spielt die Tribologie. Nach DIN 50323 ist „Tribologie ... die Wissenschaft und Technik von aufeinander einwirkenden Oberflächen in Relativbewegung. Sie umfasst das Gesamtgebiet von Reibung und Verschleiß, einschließlich Schmierung, und schließt entsprechende Grenzflächenwechselwirkungen sowohl zwischen Festkörpern als auch zwischen Festkörpern und Flüssigkeiten oder Gasen ein“ [17]. Hierbei ermöglicht, verbessert und sichert die Schmierung die Funktion, Wirtschaftlichkeit und Lebensdauer der Bauteile, der Funktionsgruppen des Motors und der gesamten Antriebsanlage.

Schmierung ist das Beschichten oder Benetzen von Gleitpartnern mit einem Schmiermittel, z. B. mit Gasen, fluiden Stoffen, plastischen Substanzen oder festen Körpern in Pulverform [18]. Im Rahmen der Arbeit wird Schmieröl als Schmiermittel betrachtet, und es stehen zwei Motorkomponenten im Mittelpunkt: Laubuchse und Kolbenbolzen. In Abhängigkeit von den Schmierzuständen an den jeweiligen Reibstellen des Motors treten verschiedene Reibungszustände auf. Die wichtigsten sind:

- *Festkörperreibung* – Reibung zwischen festen Reibkörpern ohne einen fluiden Zwischenstoff
- *Haftschichtenreibung* – Reibung zwischen festen Reibkörpern mit einer aufgetragenen Festschmierstoffschicht ohne einen fluiden Zwischenstoff

- *Mischreibung* – Flüssigkeitsreibung und Festkörper- bzw. Haftsichtenreibung liegen gleichzeitig nebeneinander vor. Die Schmierschicht trennt die beiden Reibkörper nicht vollständig voneinander und es treten Berührungen auf.
- *Flüssigkeitsreibung* (hydrodynamische Reibung) – Ein flüssiger (oder gasförmiger) Stoff ist zwischen den Reibkörpern und diese sind vollständig voneinander getrennt. Im Verbrennungsmotor entsteht durch die Bewegung der Reibkörper gegeneinander die hydrodynamische Tragwirkung des Zwischenstoffes [18].

In der Regel sind nur bestimmte Reibungszustände an bestimmten Komponenten gewünscht, weshalb die Detektierung der Ölschichten für die Auslegung der Motorsysteme notwendig ist. Wie in Kapitel 1 angedeutet wurde, beschränken sich die Aufgaben der Schmierung nicht nur auf die Tribologie. Die für die folgenden Untersuchungen relevanten Funktionen des Schmieröls sind:

- *Kräfte übertragen* – Am Pleuel wird über die Bauteile Kolbenbolzen- und Pleuellager der gesamte auf den Kolben ausgeübte Verbrennungsdruck nur mithilfe des in den Schmierspalten vorhandenen geringen Ölvolumens auf die Kurbelwelle übertragen. Die dabei im dünnen Schmierspalt auftretenden Drücke können bis zu 10.000 bar betragen [18].
- *Verschleißschutz* – Vor allem in der Zylinderlaufbahn, am Kolben und an den Kolbenringen, an den Lagern und an den Ventilsteuerungen, wie Nocken, Stößel und Schleppebel, muss mechanischer und korrosiver Verschleiß weitestgehend verhindert werden. Bei Dieselmotoren kommt noch die durch Rußbildung besondere Belastung in Bereichen mit Mischreibung hinzu. Hierzu zählen insbesondere die Zylinderlaufbahnen. Mechanischer Verschleiß kann durch EP/AW-Additive (Extreme Pressure/Anti Wear) wirksam vermindert werden, während korrosiver Verschleiß durch das Neutralisationsvermögen der Korrosionsinhibitoren unter Kontrolle gehalten werden kann [18].

Stribeck-Kurve Die Wirkzusammenhänge zwischen Reibung, Schmierung und Verschleiß werden in einer sogenannten Stribeck-Kurve dargestellt. Die in Abbildung 2.1 dargestellte Stribeck-Kurve stellt die Abhängigkeit der Reibungszahl μ von der relativen Geschwindigkeit der Reibpartner bzw. von der Gleitgeschwindigkeit bei konstanter Temperatur oder konstanter Viskosität dar [18].

Die Reibungszahl μ ist dabei ein Maß dafür, wie groß die Reibkräfte in einem tribologischen System sind. Die Reibungszahl μ kann durch verschiedene Einflussfaktoren, wie Temperatur, Flächenpressung, Geschwindigkeit oder auch den Schmierungszustand,

stark beeinflusst werden. Die Gesamtreibung setzt sich aus zwei Anteilen zusammen: Festkörper- bzw. Haftsichtenreibung und Flüssigkeitsreibung. Bei einem Stillstand wirkt die Haftreibung. Bei niedriger Drehzahl tritt zunächst die Festkörper- bzw. Haftsichtenreibung auf, dann beginnt der Bereich der Mischreibung, in dem mit steigender Drehzahl und dadurch zunehmendem Aufbau eines hydrodynamischen Tragfilms die Reibung abnimmt.

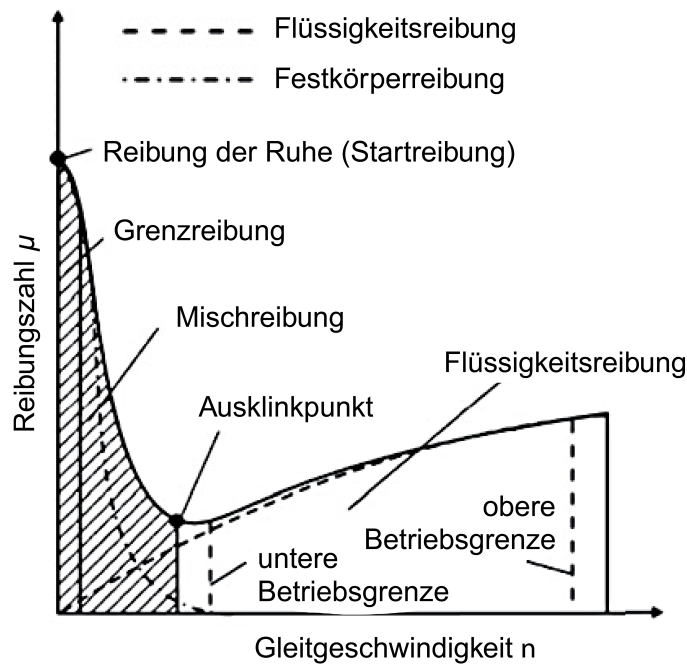


Abbildung 2.1: Stribeck-Kurve [19]

Der Ausklinkpunkt stellt in dieser Modellvorstellung den Zustand dar, in dem der hydrodynamische Tragfilm die Oberflächenrauigkeiten der beiden Gleitpartner gerade vollständig voneinander trennen kann. Die Drehzahl, bei der dieser Zustand erreicht ist, wird auch als Übergangsdrehzahl bezeichnet, in der das Reibungsminimum auftritt. Bei Drehzahlen oberhalb der Übergangsdrehzahl liegt Flüssigkeitsreibung vor und die Reibung steigt aufgrund der zunehmenden Schergeschwindigkeiten wieder an. Dynamische Belastungen der Gleitpaarung oder undefinierte Gleitgeschwindigkeit z. B. bei Kolbenbolzenlagern verschieben die Übergangsdrehzahl und machen die Zuordnung der Reibeffekte schwierig [18].

2.1.1 Ölfluoreszenz

Es ist möglich, Öle mithilfe von Fluoreszenzspektroskopie zu untersuchen. Die Elektronen der planaren Aromaten (Kohlenwasserstoffe mit mindestens einem Ringsystem)

der Öle absorbieren Lichtquanten und gehen dadurch vom Grundzustand in den ersten, zweiten oder einen höheren Anregungszustand über. Da nach der Absorption der Lichtquanten in sehr kurzer Zeit eine gewisse strahlungslose Deaktivierung und/oder Reabsorption eines Teils der Anregungsenergie erfolgt, kann die dann noch verbliebene Energie nur durch einen Sprung vom untersten Schwingungsniveau des ersten angelegten Zustandes auf die einzelnen Schwingungsterme des Grundzustandes abgegeben werden. Aus diesem Grund sind Absorptions- und Emissionsspektren nicht deckungsgleich. Es resultieren Emissionsspektren, die zum längerwelligen hin verschoben sind [20]. Näheres zur Fluoreszenz kann dem Kapitel 2.3 entnommen werden.

Dabei sind sowohl qualitative als auch quantitative Messungen von Öl möglich. Aufgrund von ungleichen Zusammensetzungen liegen die Emissionspeaks von verschiedenen Ölen bei unterschiedlichen Wellenlängen, wodurch diese auch als Komponenten einer Mischung identifiziert werden können [20] [21]. Ebenso ist es möglich, die Schichtdicke eines Ölfilms zu bestimmen, indem die Intensität der Emissionsstrahlung der Ölschichten verglichen wird. Dabei erfolgt die Bestrahlung der Ölschicht mit einer Lichtquelle, z. B. mit Laser, und gleichzeitig wird die Aufnahme der vom Öl emittierten Strahlung z. B. mit Photomultiplier vorgenommen. Bei sehr dünnen Schichten steigt die Fluoreszenzintensität nahezu linear mit der Schichtdicke [22].

2.1.2 Ölverbrauch

Unter dem Begriff „Ölverbrauch“ wird im Allgemeinen die Motorölmenge verstanden, um die sich die im Motor befindliche Ölmenge in einer vorgegebenen Zeit reduziert [23]. Ölverlust tritt auf, wenn Öl an den starren und beweglichen Trennstellen des Motors austritt. Dazu gehören die Verbindung von Kurbelgehäuse mit der Ölwanne und dem Zylinderkopf, der Zylinderkopf mit Zylinderkopfhaube, die Verbindungsstellen von Ölfilter und Ölkühler sowie undichte Ölablassschrauben und Kurbelwellenabdichtungen. Zum eigentlichen Ölverbrauch kommt es bei inneren Undichtigkeiten, durch Verbrennen, Verdampfen oder Abschleudern von Öl im Zylinder [18].

Die in der Abbildung 2.2 dargestellte Schmiermittelbilanz zeigt, dass die Untersuchung der Schmierung in der Kolbengruppe ein hohes Potential hat, zum Erkennen der Ölverbrauchsmechanismen beizutragen. In der Forschung [23] [24] [25] [26] [27] finden sich zahlreiche Untersuchungen zu den einzelnen Öltransportmechanismen im Brennraum. Eine kurze Beschreibung dieser Mechanismen, die aus dem Verhalten der Ölschicht der Laufbuchse und des Kolbens resultiert, lautet wie folgt:

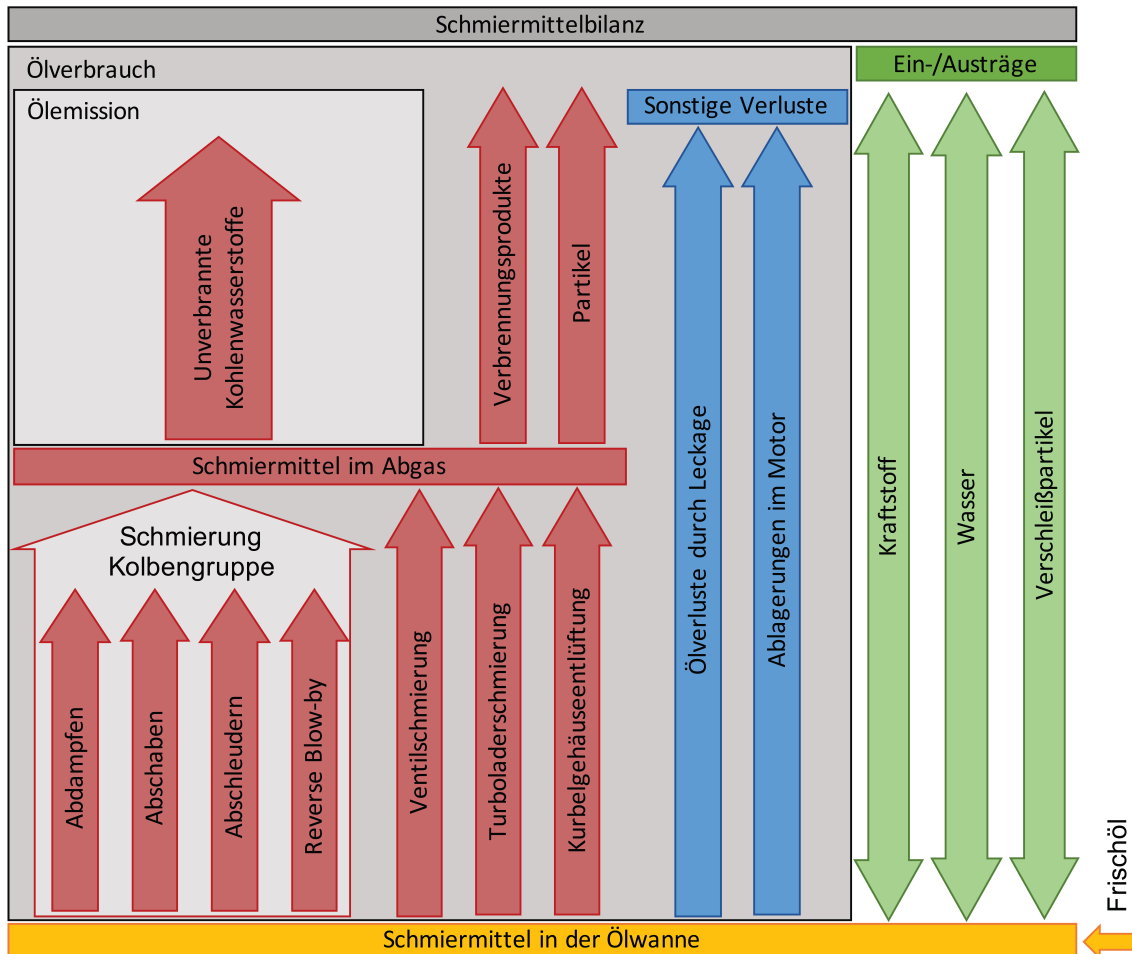


Abbildung 2.2: Zusammenhänge von Schmiermittelbilanz, Ölverbrauch und Ölemission [23] [24] [25] [26] [27]

- *Abdampfen* des Ölfilms auf der Zylinderwand infolge der Verbrennung, des Wärmetransfers, der Druckschwankungen und des Gastransfers im Zylinder [25] [26] [27]
- *Blow-by* der Brenngase in Richtung Kurbelgehäuse und das Reverse Blow-by in Richtung des Brennraums an der Laufbuchse, den Kolbenringnuten sowie den Kolbenringstößen [25] [26] [27]
- *Abschleudern* der Öltropfen in den Umkehrpunkten der Kolbenbewegung aufgrund der Massenträgheitskräfte [25] [26] [27]
- *Abschaben* der Ölschicht von dem Feuersteg des Kolbens bei der Aufwärtsbewegung infolge der Sekundärbewegung des Kolbens und des verringerten Spiels zwischen Feuersteg und Zylinderwand [25] [28]

Die Definitionen der beschriebenen Mechanismen helfen bei der Bewertung der Messergebnisse, die in dieser Arbeit behandelt werden. Während die Analyse der Eigen-

schaften der einzelnen Mechanismen mehr Detailwissen erfordert, genügt das grobe Verstehen der Vorgänge, um den Zusammenhang zwischen Ölschicht und Ölverbrauch aufzuzeigen.

Abgas-Ölemission Mit der Kombination der Untersuchungen von Ölschichten an der Laufbuchse sowie am Kolben mittels einer Emissionsuntersuchung des Öls im Brennraum und Abgas lassen sich zuverlässige Aussagen über die einzelnen Öltransportmechanismen treffen. Dazu werden im Rahmen dieser Arbeit Messergebnisse der massenspektrometrischen Analyse der Brenngase berücksichtigt. Die Massenspektrometrie (MS) stellt ein Analyseverfahren dar zur Bestimmung der Masse von Atomen und Molekülen in dem zu untersuchenden Medium. Hierzu werden die Konzentrationen der einzelnen Bestandteile eines Gemisches nach ihrer Ionisierung in Abhängigkeit von ihren unterschiedlichen Masse-zu-Ladung-Verhältnissen m/z differenziert quantifiziert [29].

In Kapitel 5 werden massenspektrometrische Ölsignale mit betrachtet, die aus der Analyse der Ölbestandteile der Brennraumabgase stammen. Zur Quantifizierung der Gesamtölemissionen wird eine Hochpassfiltermethode verwendet, die eine Unterscheidung der Ölemissionsquellen ermöglicht. Im Fall der Untersuchung der Ölschichten der Laufbuchse beschränken sich die Aussagen der massenspektrometrischen Messergebnisse auf die absolute Zu- bzw. Abnahme der Ölemissionen, während die detaillierte Analyse der Ölemissionsmechanismen der Forschungsarbeit [30] entnommen werden kann.

2.2 Tribologisches System: Pleuel – Kolben (– Kolbenringe) – Laufbuchse

Das Triebwerk eines Verbrennungsmotors besteht aus den Bauteilen des Kurbeltriebs: Kolben mit Ringen, Kolbenbolzen, Pleuel (Pleuelstange), Kurbelwelle mit Gegenmasse(n), und den Lagern (Pleuelbuchse, Pleuellager, Kurbelwellengrundlager). Es hat die Aufgabe einer wirkungsgradgünstigen Umwandlung von oszillierender Bewegung in drehende Bewegung und umgekehrt [18]. Abbildung 2.3 gibt einen Überblick über die Bauteile des Kurbeltriebs und ihre Anordnung im Verbrennungsmotor. Im Folgenden werden die für die Untersuchungen relevanten Teile des Kurbeltriebs betrachtet.

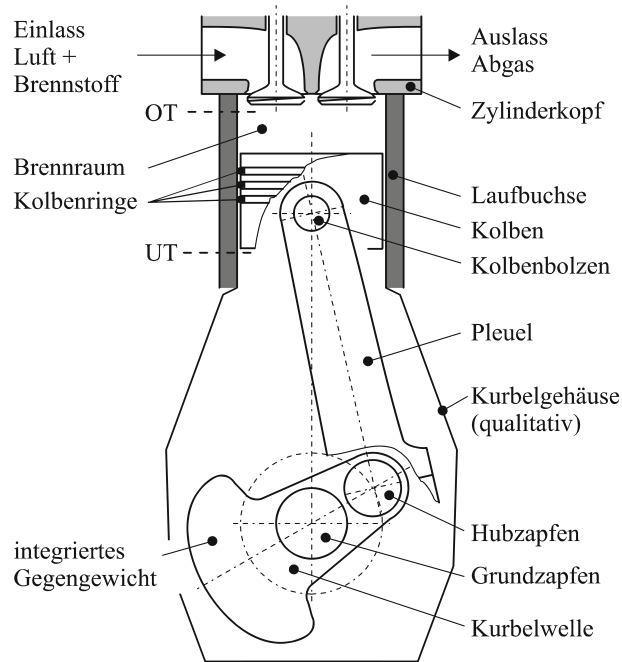


Abbildung 2.3: Triebwerk des Hubkolbenmotors [31]

2.2.1 Kolben

Die bei der Verbrennung freiwerdende Energie wird im Zylinder des Motors während des Arbeitstakts in kurzer Zeit in Wärme und Druck umgesetzt. Dem Kolben als beweglichem Teil des Brennraums fällt die Aufgabe zu, einen Teil dieser frei werdenden Energie in mechanische Arbeit umzuwandeln. Der Aufbau der wichtigsten Komponenten der Kolbengruppe ist in Abbildung 2.4 dargestellt.

Die obere Seite des Kolbens, die vor allem dem Brennraum ausgesetzt ist, wird als Kolbenboden und die Flanke des Kolbenbodens als Feuersteg bezeichnet. Sie werden von dem Ringpaket gefolgt, in dem sich die Kolbenringe befinden, die in den Ringnuten gehalten werden. Die Bereiche zwischen den Ringnuten werden als Ringstege bezeichnet. Unter dem Ringpaket befindet sich das Kolbenhemd, das für das Führen des Kolbens mitverantwortlich ist und ein seitliches Verkippen verhindert. Die von dem Kolben aufgenommenen Gaskräfte und Massenkräfte werden über den Kolbenbolzen, der in den Bolzenaugen gehalten wird, in die Pleuelstange geleitet.

Während des Betriebs muss der Kolben Drücken von bis zu ca. 120 bar (Pkw-Ottomotor) bzw. ca. 200 bar (Pkw-Dieselmotor) bei maximalen Temperaturen von bis zu 400 °C (Aluminiumkolben) bzw. 500 °C (Stahlkolben) standhalten [18] [23]. Zusätzlich wirken hohe Massenkräfte während der Bewegung des Kurbeltriebs.

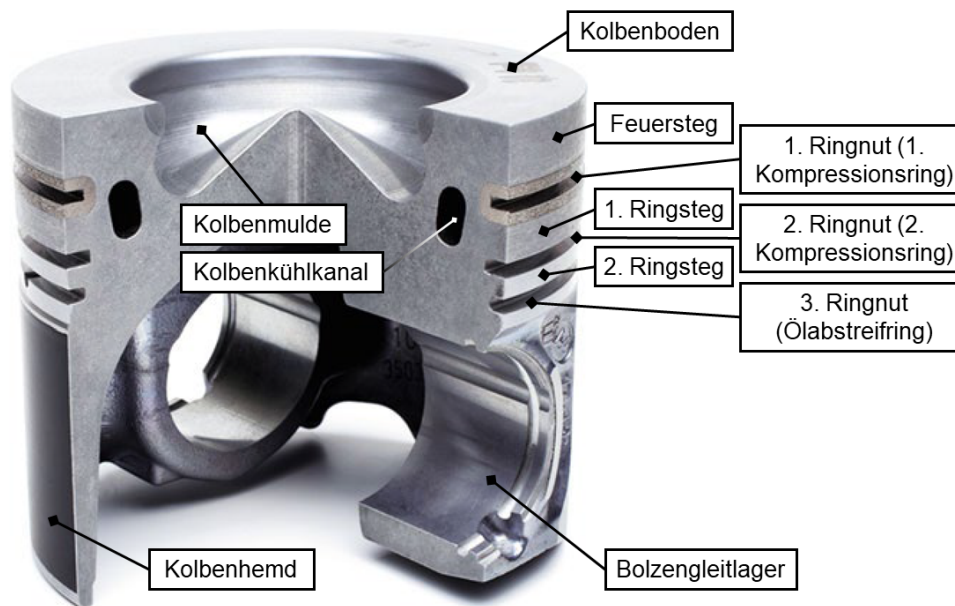


Abbildung 2.4: Kühlkanalkolben für einen Pkw-Dieselmotor

Der auf den Kolbenboden wirkende Gasdruck und die oszillierende Massenträgheitskraft von Kolben und Pleuelstange ergeben zusammen die Kolbenkraft F_K . Weil die Pleuelstange, abgesehen von den Totpunkten, eine von der Zylinderachsrichtung abweichende Stellung einnimmt, muss die Kolbenkraft F_K entsprechend umgeleitet werden. Das hat die Stangenkraft F_{ST} und die senkrecht zur Zylinderwand wirkende Normalkraft F_N (Kolbenseitenkraft) zur Folge [18].

Während einer Umdrehung der Kurbelwelle bewegt sich der Kolben vom oberen zum unteren und wieder zum oberen Totpunkt und legt dabei zweimal den Hub zurück. Bei dieser Bewegung wird er beschleunigt und verzögert. Die Bewegung des Kolbens kann dabei leicht aus der Stellung der Kurbelwelle (Kurbelwinkel) berechnet werden. Als Beispiel werden der Kolbenweg, die Kolbengeschwindigkeit und die Kolbenbeschleunigung eines Großmotorkolbens bei 525 min^{-1} in Abbildung 2.5 dargestellt.

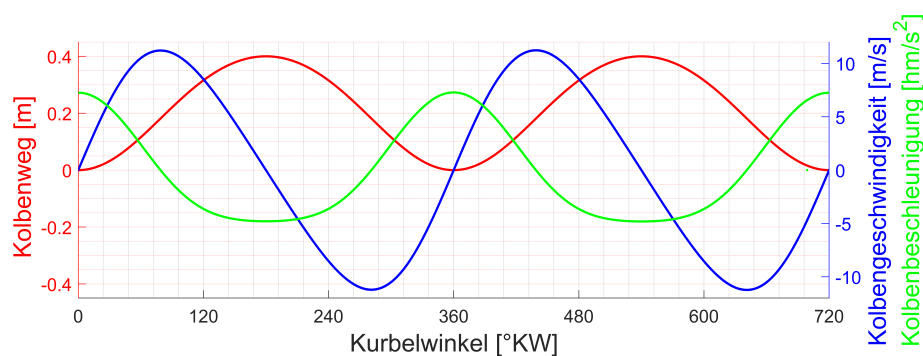


Abbildung 2.5: Kolbenkinematik eines Großkolbens bei 525 min^{-1}

Zusätzlich zu der Hubbewegung entstehen aufgrund der auf den Kolben wirkenden Kräfte noch Quer- und Kippbewegungen (Kolbensekundärbewegung). Ein Beispiel der Kolbensekundärbewegung kann Abbildung 5.7 (unten) entnommen werden. Dabei wechselt der Kolben seine Lage von der Druckseite zu Gegendruckseite (DS/GDS) und zurück acht Mal über das Arbeitsspiel. Unter der Berücksichtigung der Quer- und Kippbewegung des Kolbens kann der Bewegungsablauf des Kurbeltriebs im jeweils erwünschten Sinn verändert werden, z. B. durch Schränken oder Desaxieren des Kurbeltriebs (Abbildung 2.6) [18].

Desaxierte Kurbeltriebe sind Kraftübertragungssysteme, bei denen der Kolbenbolzen aus der Zylindermitte verschoben ist. Desaxieren in Druckrichtung bewirkt einen früheren Anlagewechsel des Kolbens, wenn die Normalkraft weniger stark auf den Kolben wirkt. Dabei legt sich der Kolben infolge seiner Kippbewegung zuerst mit dem „weichen“ Unterteil (Kolbenhemd) an den Zylinder an, was zusätzlich den Aufprall mildert. Man spricht deshalb von Geräusch-Desaxierung. Bei Fahrzeugdieselmotoren wendet man oft das thermische Desaxieren bzw. ein Desaxieren zur Gegendruckseite an. Dadurch hält sich der Kolben innerhalb des Kolbenspiels mehr in der Zylindermitte, was sich günstig auf die Dichtwirkung der Kolbenringe auswirkt und dem Ansatz von Ölkohle am Feuersteg entgegenwirkt [18].

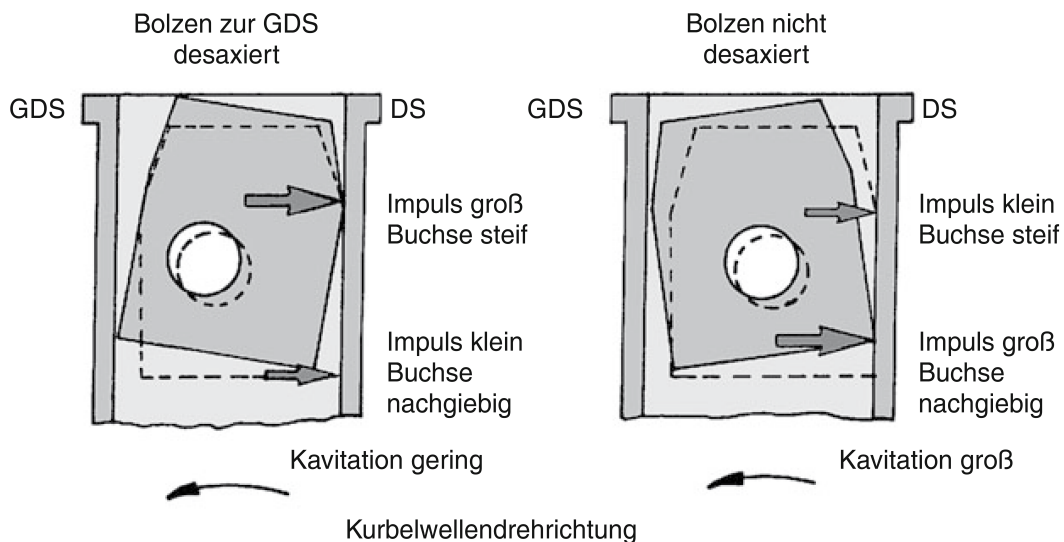


Abbildung 2.6: Kolbenbolzendesaxierung (Anlagewechsel nach Zünd-OT) [18]

Geschränkte Kurbeltriebe sind Kraftübertragungssysteme, bei denen die Pleuellagenmitte aus der Zylindermitte verschoben ist. Damit soll die Pleuelstange beim Durchgang durch den oberen Totpunkt (OT) möglichst in Zylinderachsrichtung gehalten werden, um im Bereich der Zündung die Normalkraft (Kolbenseitenkraft) und somit die Belastung und den Verschleiß zu verringern. Heute wird die Schränkung bei

VR-Motoren (V-Motoren mit V-Winkeln zwischen 10° und 20°) mit Rücksicht auf den nötigen Freigang der sich gegenüberliegenden Zylinder angewendet [18]. Möglich ist auch die Kombination von Schränkung und Desaxierung.

Kolbenringe Für das Verstehen des tribologischen Systems aus Kolben, Kolbenringen und Zylinder sind auch die Relativbewegungen von Kolben und Kolbenringen von ausschlaggebender Bedeutung. Zudem wirken noch hydrodynamische Reibungskräfte am Kolbenschaft, an den Kolbenringlaufflächen und zwischen den Kolbenring- und Nutflanken. In den Totpunkten erfolgt ein Übergang zur den Verschleiß begünstigenden Mischreibung („Zwickelverschleiß“ im „Ringumkehrbereich“ insbesondere bei Dieselmotoren) [32]. Kolbenringe des Kolbens haben folgende wichtige Aufgaben zu erfüllen:

- *Abdichten* des Brennraumes zur Aufrechterhaltung des Drucks im Brennraum und zum Abschirmen des Kurbelgehäuses von dem Verbrennungsgas (Blow-by) sowie der Brennkammer von dem Kurbelgehäusegas und Schmieröl (Reverse Blow-by).
- *Ableitung* der in den Kolben einfallenden Wärme an die Zylinderlauffläche.
- *Steuerung* des Ölhaushaltes: Einerseits wird eine Mindestölmenge zur Bildung eines hydrodynamischen Schmierfilms auf die Zylinderlauffläche benötigt, andererseits wird der Ölverbrauch so gering wie möglich gehalten [33].

Die Kolbenringe werden als Kolbenringpakete zusammengestellt und so kombiniert und abgestimmt, dass die Gesamtwirkung zu den jeweiligen Betriebsverhältnissen passt. Dies gilt für kleine Ottomotoren genauso wie für Pkw- und Nkw-Dieselmotoren sowie für mittelschnelllaufende Viertaktmotoren und langsam laufende Zweitakt Dieselmotoren.

Die Grundform des einfachsten Kolbenringes ist der Rechteckring mit zylindrischer Lauffläche, auch R-Ring genannt (Abbildung 2.7). Seine Aufgabe ist das Abdichten gegen den Gasdruck im Brennraum. In der Motorentechnik ging man früher davon aus, dass der erste Kolbenring umso besser dichtet, je genauer er der geometrischen Rechteckform entspricht. Die Praxis hat aber gezeigt, dass sich das Dichtverhalten des ersten Kolbenringes im Laufe der Zeit verbessert, wenn sich die scharfen Kanten abgelaufen haben. Entsprechend wurde begonnen, diesen Verschleißzustand vorwegzunehmen, erst durch Anfasen, dann durch eine ballige Lauffläche. Mit der Balligkeit werden bessere hydrodynamische Schmierverhältnisse und aufgrund der axial kürzeren Anlagefläche an der Zylinderlauffläche eine bessere Abdichtung erreicht. Kolbenringe dieser Bauart, auch R-Ring B genannt, werden als erster und zweiter Kolbenring verwendet [33].

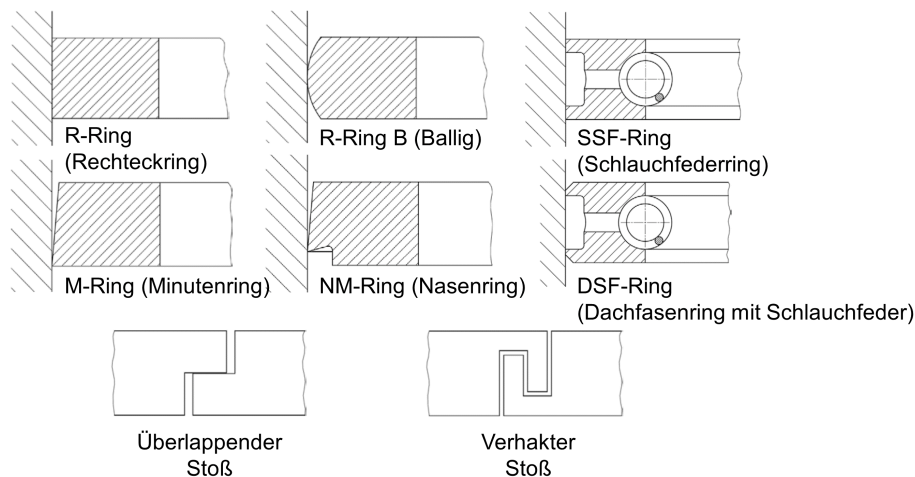


Abbildung 2.7: Kolbenring- und Kolbenringstoß-Variationen [33]

Um den Ölhaushalt des Motors zu steuern, sind neben den Kompressionsringen auch Ölabbstreifringe erforderlich. Hier haben sich bei der untersten Ringnut vor allem Ölschlitzringe mit Schlauchfeder bewährt (Abbildung 2.7 SSF-Ring). Um eine gute Abstreifwirkung des Ölrings zu erreichen, wird eine hohe Flächenpressung und ein gutes Formfüllvermögen des Ölabbstreifringes benötigt. Überschlägig betrachtet ist der Schmierölverbrauch umso niedriger, je höher die spezifische Flächenpressung ist. An die Stege der Ölabbstreifringe kann ein Konus angebracht werden, was den Kontaktbereich mit der Zylinderlauffläche reduziert und dadurch einen höheren Anpressdruck liefert (Abbildung 2.7 DSF-Ring).

Durch den montagebedingten Ringstoß kann der Pleuelring nicht vollkommen abdichten, was zu Undichtigkeiten an diesen Stellen führt. Der Stoß der Pleuelringe ist meistens gerade gestaltet, da einfache Schrägstöße sowie überlappte Stöße mit Blick auf die Dichtigkeit keine Vorteile aufweisen. Besondere Konstruktionen für Ringstöße mit erhöhter Dichtigkeit (Abbildung 2.7) können dagegen die Abdichtung gegenüber dem Geradstoß verbessern und werden vielfach in großen Zweitakt-Dieselmotoren verwendet [18]. Es kann auch durch Einarbeitung der Sicherungsstifte die Drehung der Ringe verhindert werden. Beim Boxermotor wird dadurch verhindert, dass sich alle Ringstöße an der gleichen Stelle am Umfang des Pleuels befinden und so beispielsweise ein überhöhtes Blow-by auftritt [33].

Wie in Abbildung 2.4 dargestellt, besteht ein Pleuelringpaket in der Regel aus drei Pleuelringen. Bei den Ringen handelt es sich entweder um Verdichtungsringe zur Abdichtung des Brennraums gegen das Pleuelgehäuse oder um Ölabbstreifringe zur Regulierung des Ölhaushalts. Pleuelringauslegungen unterscheiden sich je nach Funkti-

onsanforderungen, die ihrerseits jeweils von den technischen und kommerziellen Rahmenbedingungen in Pkw-Otto-, Pkw-Diesel- und Nkw-Diesel-Anwendungen abhängen. Das hier beschriebene Kolbenringpaket ist daher nur exemplarisch für eine typische Bestückung dargestellt.

- 1. *Kolbenring*: Kompression der Verbrennungsluft bzw. des Gasgemisches und Aufnahme des Gasdrucks im Arbeitsspiel, Ableitung der anfallenden Wärme an die Zylinderlauffläche und in geringem Maße Abstreifen des Restöls von der Zylinderlauffläche [33]
- 2. *Kolbenring*: Aufnahme des restlichen Gasdrucks infolge des Blow-by des 1. Kolbenringes, Steuerung der Druckverhältnisse in der Ringpartie, Abstreifen des Öls von der Lauffuchse und Ableitung der hier anfallenden Wärme an die Zylinderlauffläche [33]
- 3. *Kolbenring*: homogene Verteilung des Öls zur Schmierung des tribologischen Systems Kolben-Zylinderlaufbahn und Abstreifen von überschüssigem Öl [33]

Der Radialdruck, mit dem sich der Kolbenring an die Zylinderlaufbahn anlegt, ist klein im Vergleich zu dem Gasdruck, der von der Ringnut im Kolben auf die Innenseite des Kolbenringes wirkt (Abbildung 2.8). Die axiale Anlage an der Ringnutflanke wird im Wesentlichen durch die Gasdruckbeaufschlagung der Kolbenringflanke erzeugt. Bei Dieselmotoren mit ihren hohen Gasdrücken wird in vielen Fällen der Kolbenring an der Lauffläche so geformt, dass der Gasdruck von hier gegen den Druck von der Innenseite wirkt und so den Anlagedruck an der Zylinderlauffläche verringert [33].

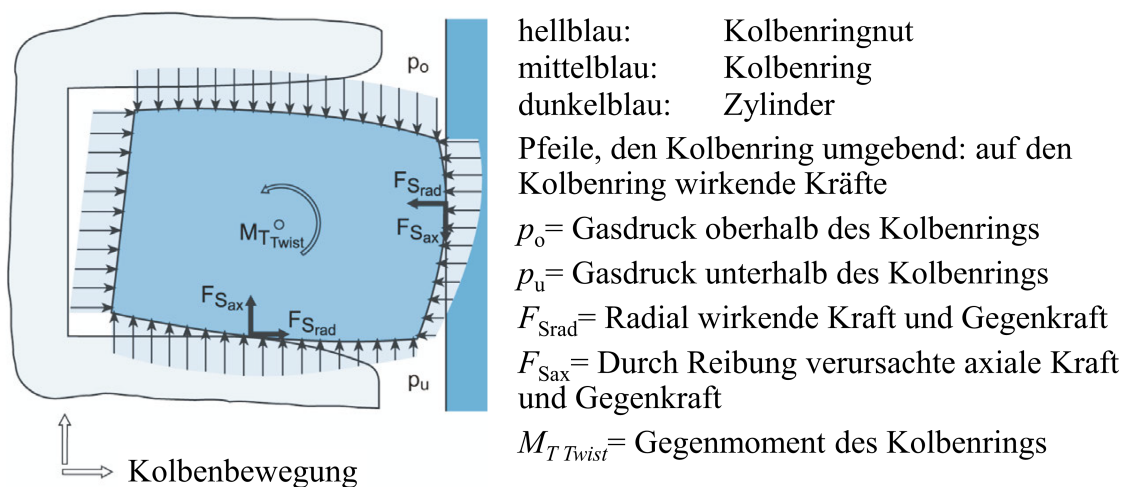


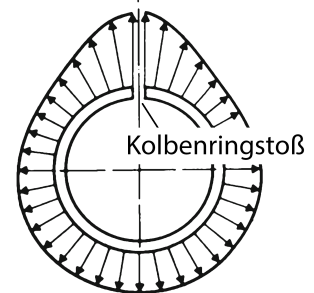
Abbildung 2.8: Auf einen Kolbenring einwirkende Kräfte in der Kolbenringnut [33]

Der Kolbenring bewegt sich infolge seiner Massenträgheit in der Kolbenringnut relativ zum Kolben. Dabei tendiert er infolge der Reibungskräfte an der Zylinderlaufläche zum Kippen (Abbildung 2.8). Beim Aufschlagen kann er Kräfte auf die Flanken der Ringnuten ausüben. Bei Dieselmotoren wird dieser Effekt durch die Wirkung des hohen Gasdrucks noch verstärkt [33].

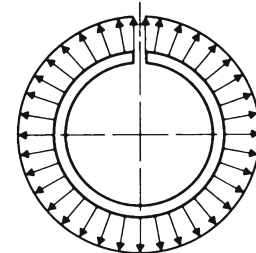
Eine weitere Eigenschaft der Kolbenringe stellt die Radialdruckverteilung dar. Dabei handelt es sich um den Anpressdruck der Ringe im eingebauten Zustand ohne Zylinderdrücke. Dieser kann über dem Umfang als konstante Druckverteilung oder entsprechend einer speziellen Charakteristik gewählt werden und beeinflusst die Dichtfunktion des Kolbenringes an der Laufläche der Zylinderwand. Die Weiterentwicklung von konstanten zu inkonstanten Radialdruckverteilungen, wie in Abbildung 2.9 gezeigt, erlaubt es, das Funktionsverhalten der Ringe im Motor gezielt zu beeinflussen. Einen Anhaltspunkt für die Radialdruckverteilung des Kolbenringes liefert die Ovalität. Als Maß für die Ovalität wird die Differenz der Ringaußendurchmesser angenommen, die in Richtung Ringstoß/Ringrücken und 90° versetzt dazu gemessen wird [18].

Großkolben Während die Durchmesser von Nkw-Dieselskolben bis ca. 160 mm reichen, werden Kolben mit größeren Durchmessern als „Großkolben“ bezeichnet (Abbildung 4.2). Auch wenn mit zunehmendem Durchmesser die Drehzahlniveaus sinken, steigen die Zünddruckbelastungen und damit auch die Gesamtbeanspruchung der Kolben. Dem wird bei Viertaktmotoren durch entsprechend gebaute Tauchkolben Rechnung getragen. Ein Kolbenoberteil wird dabei mit einem Kolbenunterteil aus geeignetem Werkstoff mittels einer hochfesten Schraubenverbindung verbunden [34]. Nicht zuletzt wegen der Förderung im Großmotorbereich nach deutlich längerer Lebensdauer und höheren Verbrennungsdrücken (oft mehr als 250 bar) gewinnt die Kolbenkühlung an Bedeutung. Ein weiterer Vorteil von gebauten Kolben ist hier die Möglichkeit, die Kühlräume groß und entsprechend günstig für eine effektive Kühlwirkung zu gestalten [23].

Viertakt-Charakteristik (positiv oval)



konstante Druckcharakteristik (kreisförmig)



Zweitakt-Charakteristik (negativ oval)

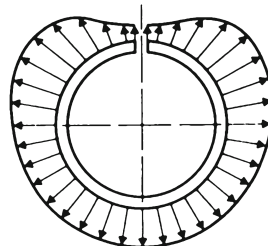


Abbildung 2.9: Radialdruckverteilung der Kolbenringe beeinflusst durch Konstruktionsmaßnahmen [18]

oszillierende Massenkraft für die Berechnung des Kolbenbolzengleitlagers entsteht aus den Massen des Kolbens, der Kolbenringe, des Kolbenbolzens und des oszillierenden Pleuelanteils. Dabei tritt ein Anlagewechsel zwischen Kolbenbolzen und Lagerbuchse auf, weil sich bei einem Viertaktmotor die Richtung der Kraft im Kolbenbolzenlager während eines Arbeitsspiels umkehrt [19].

Bei der Lagerung des Kolbenbolzens gibt es zwei Varianten. Bei den Pkw-Ottomotoren im mittleren Leistungsbereich kann der Kolbenbolzen durch Schrumpfspannungen im kleinen Pleuelauge fixiert werden (Klemmpleuel). Die andere Variante beinhaltet eine schwimmende Lagerung des Kolbenbolzens im Kolben und kleinen Pleuelauge und eignet sich besser für die Übertragung von höheren Kräften. Dabei muss der Bolzen mit Kolbenbolzensicherungen gegen seitliches Auswandern im Kolben gesichert werden [33].

Die Ölversorgung des Kolbenbolzengleitlagers kann sich als kritische Eigenschaft erweisen, da sie den Unterschied zwischen Festkörperreibung und Schmierfilmreibung bedeuten kann. Die Schmierung des Kolbenbolzengleitlagers kann durch das im Kurbelgehäuse vorhandene Spritzöl, die Spritzölauführung, speziell ausgerichtete Spritzdüsen oder eine Druckölversorgung durch die Pleuelstange erfolgen. Ölreservoirs wie Taschen und Rillen im Kolben können die Schmierung zusätzlich verbessern. Die Deformation des Kolbenbolzens sowie anderer Kurbeltriebelemente kann die Ölversorgung des Gleitlagers zusätzlich stören [33].

Abbildung 2.11 zeigt die Kolbenbolzenbelastung für einen Ottomotor bei Nennleistung. Eine analytische Berechnung der transienten Verformungen und Spannungen am Kolbenbolzen ist auch mit sehr großem Aufwand kaum exakt durchzuführen. Mit der Vereinfachung des Belastungsmodells und anhand der Erfahrungswerte ließ sich schon 1940 (Schaeffe) ein brauchbares Rechenverfahren aufstellen. Mithilfe der Definitionen aus Abbildung 2.10 lassen sich einfache Spannungsberechnungen durchführen. Die Gesamtspannung wird dabei aus der Biegespannung σ_B und aus der Spannung durch Ovalisierung σ_A berechnet [33].

$$\text{Spannung durch Ovalisierung:} \quad \sigma_A = \frac{3F_{g,max}(d_a + d_i)}{4l(d_a - d_i)^2} \quad (2.1)$$

$$\text{Spannung durch Biegung:} \quad \sigma_B = \frac{8F_{g,max}ad_a}{\pi(d_a^4 - d_i^4)} \quad (2.2)$$

$$\text{Gesamtspannung:} \quad \sigma_{ges} = \sqrt{\sigma_A^2 + \sigma_B^2} \quad (2.3)$$

Wie bei anderen Bauteilen hat sich auch bei Kolbenbolzen die Bauteilauslegung mit Finite-Elemente-Berechnungsmethoden (FEM) durchgesetzt. Erschwert werden diese Berechnungen dadurch, dass der EHD-Kontakt (elastohydrodynamischer Kontakt) unter Berücksichtigung der Deformationen und der Schmierpaltgeometrie beachtet werden muss. Im Gegensatz zu anderen Motorenlagern, in denen ebenfalls elastohydrodynamische Effekte eine Rolle spielen, gilt die EHD-Berechnung von Kolbenbolzenlagern als schwierig und unzuverlässig. Dies ist zum einen auf die Größe und Wechselwirkung der thermischen und mechanischen Deformation zurückzuführen, die den Spalt maßgeblich beeinflussen. Zum anderen ist bei Bolzenlagern die Schmierstoffversorgung im Gegensatz zu Grund- und Pleuellagern undefiniert, was auch als Begründung für ein kritisches Einlaufverhalten herangezogen wird [1] [2] [3].

Für die Erhöhung des Verschleißwiderstands können die Kolbenringoberflächen beschichtet werden. Mit der Technologie des Aufdampfens von Hartstoffen wie CrN (Chromnitrid) werden Verschleißschutzschichten erzeugt, die eine konturengenaue Abbildung der Oberflächen ermöglichen. Insbesondere DLC (Diamond-like-Carbon) Beschichtungen gewinnen hier an Bedeutung [18]. In Abbildung 2.10 ist ein Beispiel des DLC-beschichteten Kolbenbolzens dargestellt, der für die Messungen verwendet wurde.

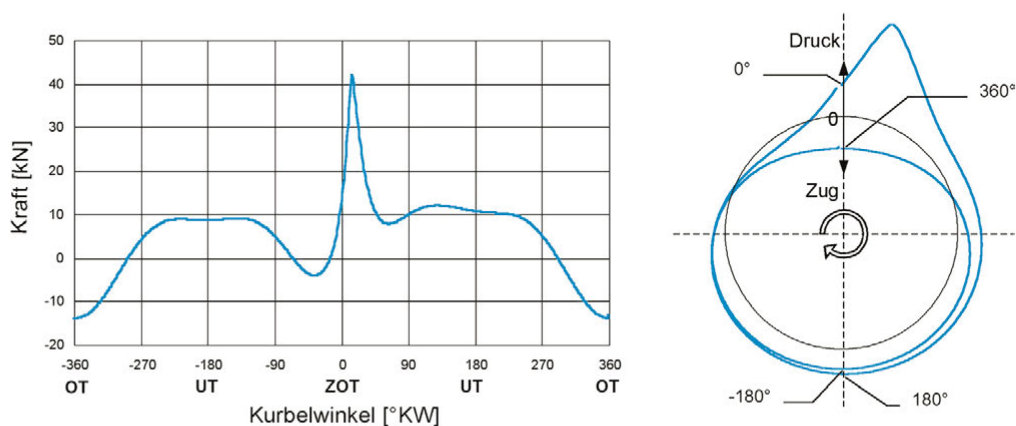


Abbildung 2.11: Kolbenbolzenbelastung für einen Ottomotor bei Nennleistung über ein Arbeitsspiel [33]

2.2.3 Zylinderlauffläche

Die Zylinderlauffläche von Verbrennungsmotoren ist tribologischer Laufpartner und Dichtfläche für Kolben und Kolbenringe. Die Oberfläche der Zylinderlaufbuchse ist maßgeblich am Aufbau und an der Verteilung eines Ölfilms zwischen den Laufpartnern beteiligt.

Neben den Grundwerkstoffen der Zylinderlaufbuchsen spielt vor allem die Oberflächenbeschaffenheit der Zylinderwand eine wichtige Rolle. Es besteht ein starker Zusammenhang zwischen der Oberflächenbeschaffenheit des Zylinders einerseits und dem Ölverbrauch und dem Verschleiß eines Motors andererseits. Das gezielte Aufrauen der Zylinderlaufbahnoberfläche kann dabei durch Honen erreicht werden. Das Honen zählt als Schleifprozess zu den spanenden Feinbearbeitungsverfahren. Durch gleichzeitige oszillierende Hub- und Drehbewegung des Honwerkzeugs werden geradlinige und sich kreuzende Schnittspuren auf der Laufbuchsenoberfläche erzeugt. Das Honen bestimmt die Schmierstoffverteilung in Längs- und Umfangsrichtung des Zylinders und sichert an allen Stellen der Lauffläche ein ausreichendes Schmierstoffangebot.

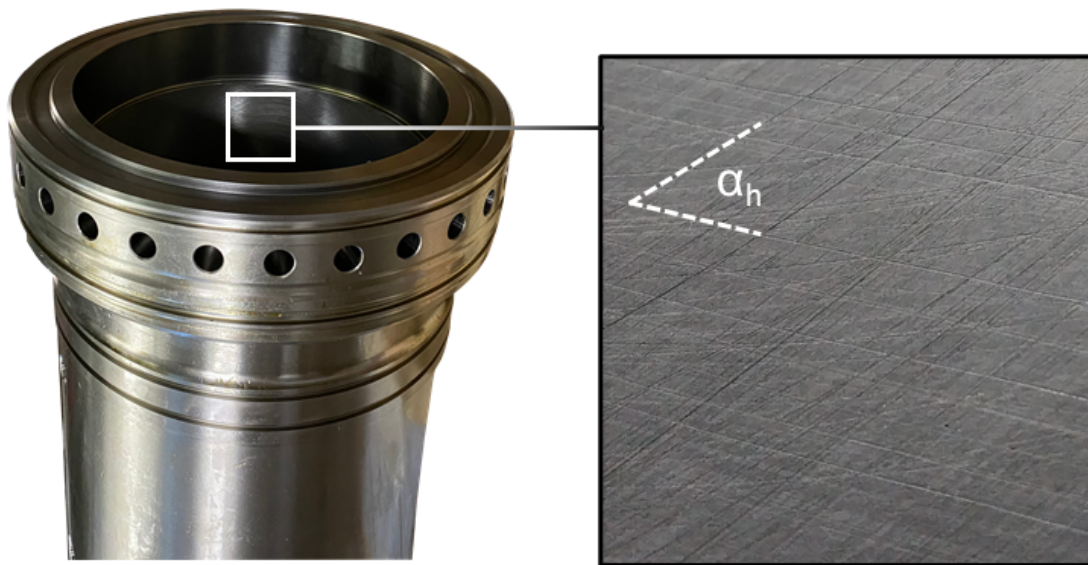


Abbildung 2.12: Honbild einer Großlaufbuchse mit der typischen Kreuzriefenstruktur (Honwinkel $\alpha_h = 60^\circ$)

In Abbildung 2.12 ist ein Honbild einer Großlaufbuchse mit der typischen Kreuzriefenstruktur dargestellt. Als Honwinkel α_h wird dabei der Winkel zwischen den Riefen bezeichnet. Ein zu flacher Honwinkel ($< 30^\circ$) bewirkt eine geringe Verteilung des Schmieröls in Längsrichtung, und es besteht die Gefahr des Fressens. Bei steigendem Honwinkel ($> 90^\circ$) dominiert die Verteilung des Schmierstoffes in axialer Richtung. Bei zu steilen Winkel kann zu viel Öl in den Verbrennungsraum gefördert sowie die Gasdichtheit reduziert werden. Der Grund dafür sind die Undichtigkeiten der axialen Riefen gegenüber den Kolbenringen [36] [37].

Bei der Normalhonung wird durch ein- oder mehrstufige Bearbeitung eine normalverteilte Oberflächenstruktur erzeugt, d. h., es existieren ebenso viele Vertiefungen wie

Spitzen im Rauheitsprofil. Die sogenannte Plateauhonung hingegen kappt durch einen zusätzlichen Bearbeitungsschritt die Rauheitsspitzen und schafft eine plateauartige Gleitfläche mit ölhaltenden tiefen Riefen. Das Spiralgleithonen ist eine Weiterentwicklung des Plateauhonens. In erster Linie unterscheidet es sich vom Plateauhonen durch die geringere Rauheit, insbesondere mit Blick auf die Spitzenrauheit, und einen sehr großen Honwinkel der tiefen Riefen von 120° bis 150° . Durch spezielle, der Bohrungsform folgende Honleisten wird eine sehr gleichmäßige Oberflächenrauheit erzielt. Das Laserstrukturieren ermöglicht eine nahezu freie Gestaltung der Oberfläche durch das gezielte Abtragen von Material mittels Laser [38]. Die Zylinderlauffläche wird zum Beispiel im Bereich des OT strukturiert und ansonsten glatt ausgeführt. Strukturen, wie spiralförmig angeordnete Schlitze und Taschen, sowie Näpfchen sind neben gleichmäßigen konventionellen Kreuzriefenstrukturen möglich [18].

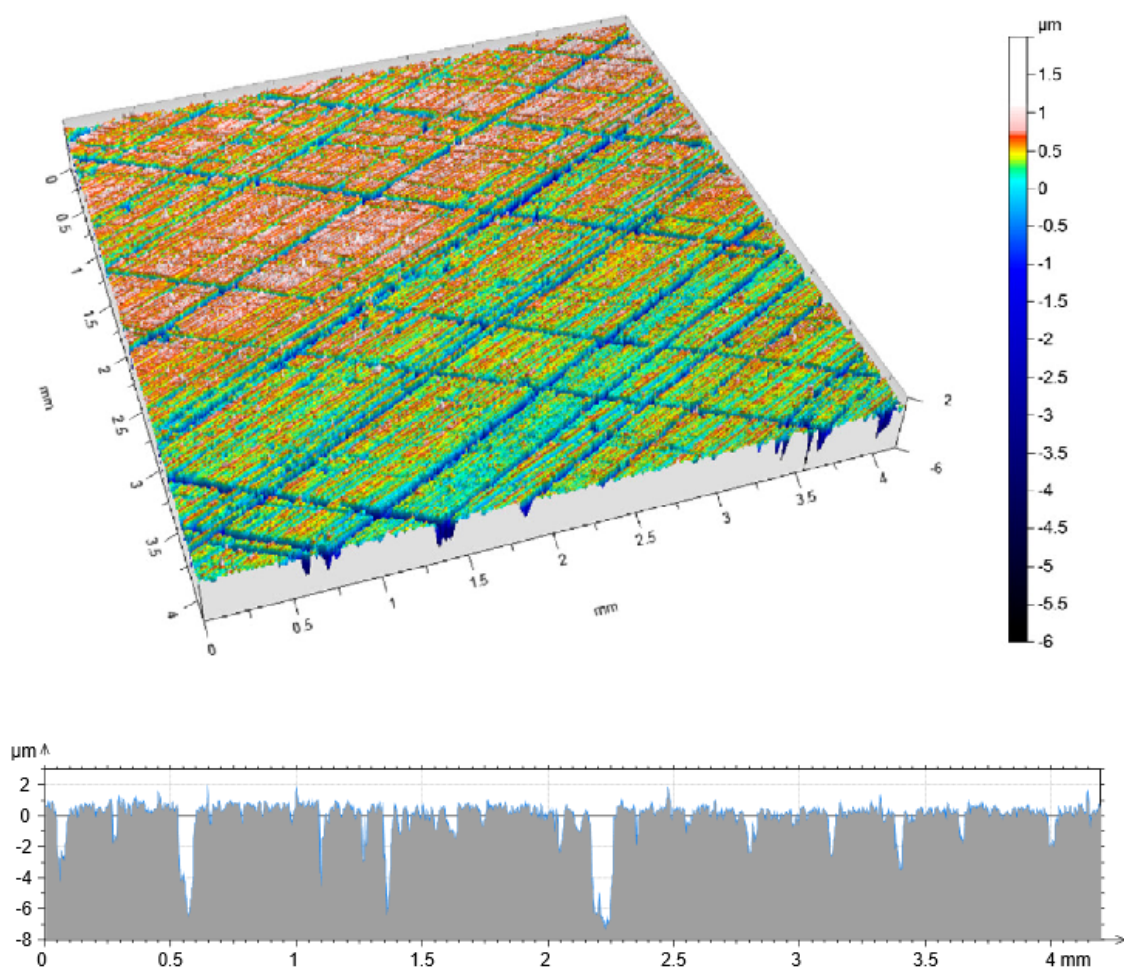


Abbildung 2.13: Honprofil mit Honbild der Plateauhonung (Honwinkel $\alpha_h = 60^\circ$) [30]

Ein Beispiel für ein Plateauhonungsprofil ist in Abbildung 2.13 dargestellt. Dieses Honverfahren kombiniert gute Gleiteigenschaften durch eine geringe Kontaktrauheit der Plateaus mit gutem Schmierölvorrat durch periodische tiefere Riefen. Dieses Honprofil hat sich bewährt und wird weltweit überwiegend bei Dieselmotoren angewendet. Der niedrige Anfangsölverbrauch durch Einlaufprozesse ist auch bei hoch beanspruchten Nutzfahrzeugmotoren ein besonderer Vorteil [39]. Das Honprofil wird vor allem durch Kernrautiefe, reduzierte Spitzenhöhe sowie reduzierte Riefentiefe beschrieben. Die Kernrautiefe definiert die Tiefe des Rauheitskernprofils, die reduzierte Spitzenhöhe ist die gemittelte Höhe der aus dem Kernbereich herausragenden Spitzen und die reduzierte Riefentiefe kennzeichnet den Anteil der aus dem Kernbereich in das Material hineinragenden Profiltiefen.

2.2.4 Downsizing und Downspeeding

Downsizing beim Verbrennungsmotor, also die Verringerung des Gesamthubvolumens bei gleicher oder ähnlicher Leistungsfähigkeit zur Energieverbrauchsreduzierung, kann auf mehreren Wegen erzielt werden. Eine Möglichkeit besteht darin, bei gleicher Zylinderzahl den Bohrungsdurchmesser D und den Hub s zu verringern. Eine weitere Möglichkeit ist die Hubraumreduktion mit verringerter Zylinderzahl z und gegebenenfalls auch gleichzeitiger Erhöhung der Einzelzylinderhubvolumen. Bei beiden Möglichkeiten wird vom statischen Downsizing gesprochen. Neben dem statischen Downsizing wird gerade in jüngster Zeit auch das sog. dynamische Downsizing bei den PKW-Motoren in Serie eingesetzt, das durch Anwendung der Zylinderabschaltung erzielt wird. Zusammenfassend bedeutet Downsizing die Verlagerung häufig durchfahrener Betriebspunkte in Bereiche geringen spezifischen Verbrauchs [18] [31].

Die Anwendung des statischen Downsizings bedingt, dass im Vergleich zum Basisaggregat Drehmoment und Leistung vergleichbar sind. Dies hat zur Folge, dass die spezifische Belastung des Aggregats entsprechend steigt. Das statische Downsizing durch konventionelles Absenken des Hubraums erfordert technische Zusatzmaßnahmen, um das transiente und stationäre Betriebsverhalten des Verbrennungsmotors einem hubraumstärkeren Aggregat anzugleichen [31]. Dafür sind kleine und möglichst belastbare Verbindungen im Bereich der Kolbengruppe, vor allem aber an den Pleuellagern zwingend notwendig. Forschungsarbeiten haben gezeigt, dass die Auslegungen der Kolbenbolzen- und Pleuellager oft nur empirisch durchgeführt werden und die Simulation der Schmierungsverhältnisse an den Lager weiterer Analyse bedarf [3] [4] [14] [15].

2.3 LIF

LIF (laserinduzierte Fluoreszenz) ist ein hochempfindliches, spektroskopisches Verfahren für den Nachweis von Atomen und Molekülen. Es basiert auf dem Prinzip der Fluoreszenz und gehört zu den optischen Verfahren. Fluoreszierende Stoffe können elektromagnetische Strahlung aufnehmen und diese verwenden, um freie Elektronen in einen höheren Energiezustand zu heben. Da dieser erhöhte Energiezustand instabil ist, kehren die Elektronen in ihren ursprünglichen Zustand zurück und geben dabei einen Teil der aufgenommenen Energie in Form von elektromagnetischer Strahlung ab. Diese Strahlung hat aufgrund von physikalischen Zusammenhängen eine längere Wellenlänge als die von den Elektronen aufgenommene Strahlung. Die Wellenlänge der aufgenommenen Strahlung nennt man Absorptionsspektrum und die Wellenlänge der emittierten Strahlung Emissionsspektrum [40].

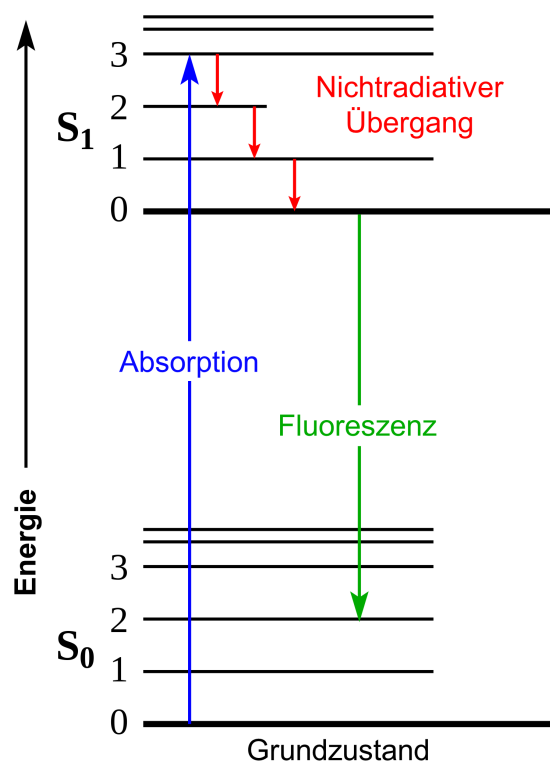


Abbildung 2.14: Jablonski-Diagramm – Fluoreszenzprinzip [41]

Das Jablonski-Diagramm in Abbildung 2.14 zeigt die Mechanismen bei der Molekülanregung, den Zustandswechsel sowie die entstehende Fluoreszenz [42]. Haben der Grundzustand und der angeregte Zustand die gleiche Schwingungsfineinstruktur, verhalten sich das Absorptions- und das Emissionsspektrum spiegelbildlich zueinander. In diesem Fall sind die Übergangswahrscheinlichkeiten der Absorption und der Emission

zu den gleichen Franck-Condon-Faktoren proportional. Das Franck-Condon-Prinzip beschreibt quantenmechanisch die Wahrscheinlichkeit von Schwingungsübergängen vom elektronischen Grundzustand in den elektronisch angeregten Zustand in einem Molekül unter Betrachtung von Energie und Aufenthaltswahrscheinlichkeiten von Elektronen. Das Absorptions- und das Emissionsspektrum überlappen, wo der Übergang von angeregtem Zustand in den Schwingungsgrundzustand stattfindet [43].

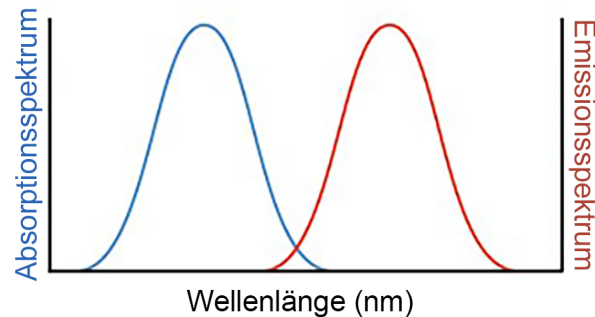


Abbildung 2.15: Emissions- und Absorptionsspektrum eines fluoreszierenden Elements

Die Differenz der Wellenlängen zwischen dem Absorptionsspektrum und dem Emissionsspektrum wird in laserinduzierter Fluoreszenz ausgenutzt. Mithilfe einer Lichtquelle, z. B. eines Lasers, wird eine fluoreszierende Substanz angeregt und das emittierte Licht wird mit einem Detektor wie Photodiode oder Photomultiplier aufgenommen. Da die Detektoren hochempfindlich auf die Stärke der Emissionsenergie reagieren, können durch die Zugabe von geringen Mengen des Fluoreszenzmittels zu den zu messenden Flüssigkeiten diese auf Konzentration und Transporteigenschaften untersucht werden. Im Vergleich zu Phosphoreszenz erlischt das Fluoreszenzphänomen sofort, wenn das anregende Licht erlischt, und lässt so eine hohe Messbandbreite zu [43].

Die Quantenausbeute gibt die Effizienz des Fluoreszenzprozesses an. Sie ist definiert als das Verhältnis zwischen der Zahl der emittierten Photonen und der Zahl der absorbierten Photonen (Gleichung 2.4). Die Fluoreszenzquantenausbeute wird auf einer Skala von 0 bis 1 gemessen, aber häufig als Prozentsatz angegeben. Eine Quantenausbeute von 1,0 (100 %) beschreibt einen Prozess, bei dem jedes absorbierte Photon zur Emission eines Photons führt. Stoffe mit der höchsten Quantenausbeute weisen die hellsten Emissionen auf, während Verbindungen mit einer Quantenausbeute von 0,10 immer noch als recht fluoreszierend gelten. Die Quantenausbeute ist definiert durch den Anteil der fluoreszierenden chemischen Verbindungen im angeregten Zustand, die durch Fluoreszenz abklingen (Gleichung 2.5) [41] [43]. Dabei ist Φ_f die Fluoreszenzquantenausbeute, k_f die Geschwindigkeitskonstante für die Strahlungsrelaxation (Fluoreszenz) und k_{nr} die Geschwindigkeitskonstante für alle nichtstrahlenden Relaxationsprozesse.

$$\Phi = \frac{\text{emittierten Photonen}}{\text{absorbierten Photonen}} \quad (2.4)$$

$$\Phi_f = \frac{k_f}{k_f + \sum k_{nr}} \quad (2.5)$$

Die Fluoreszenz ist generell stärker von der Umgebung beeinflusst als die Absorption. Dynamische Prozesse, die während der Verweilzeit der Fluoreszenzfarbstoffe im angeregten Zustand (1–10 ns) stattfinden, beeinflussen die Fluoreszenzstrahlung und sorgen für eine höhere Sensitivität im Vergleich zur Absorption. Zu diesen Prozessen gehören chemische Reaktionen, Veränderungen der Molekülorientierung und Quenching. Der Absorptionsprozess läuft dagegen um Größenordnungen schneller ab in quasi statischer Umgebung [41].

Der grundsätzliche Aufbau eines LIF-Messsystems kann Abbildung 2.16 entnommen werden. Dabei ist auf die Trennung des Fluoreszenzlichts von dem Licht der Quelle vor dem Detektor zu achten. Die optischen Verfahren, aufgebaut auf dem Prinzip der Fluoreszenz, haben entscheidende Vorteile für die Messung der Filmschichten. Diese sind zum einen der robuste Messstellenaufbau, der starken mechanischen und thermischen Belastungen standhalten kann, und zum anderen die Möglichkeit der Messung der Transportvorgänge der beweglichen Flüssigkeiten [40].

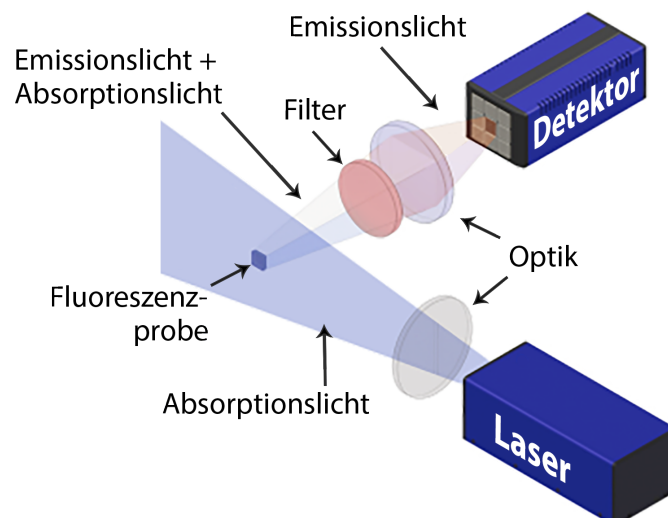


Abbildung 2.16: LIF-Messsystem

2.3.1 Lichtleiter

Grundsätzlich gibt es für den Transport von Lichtwellen zwei Möglichkeiten: die Benutzung optischer Bänke, die mithilfe von optischen Bauelementen wie Linsen, Spiegeln und Prismen das Licht von der Lichtquelle zu dem gewünschten Objekt leiten, oder die Verwendung von Lichtwellenleitern [44].

Ein Lichtwellenleiter (kurz Lichtleiter) ermöglicht die Führung der elektromagnetischen Wellen, sodass die Wellen entlang eines beliebig vorgegebenen Pfades von einem Raumpunkt zu einem anderen übertragen werden. Ein Lichtleiter besteht grundsätzlich aus einer zylindrischen Kernfaser (Core), die koaxial von einem ebenfalls zylindrischen Fasermantel umgeben ist (Cladding) und einer Beschichtung zum mechanischen Schutz (Coating). Der Kern und seine Ummantlung bestehen aus optisch hochtransparentem Material. Die Beschichtung (Coating) hat keinen Einfluss auf die Signalübertragung und dient nur zum mechanischen und chemischen Schutz [46].

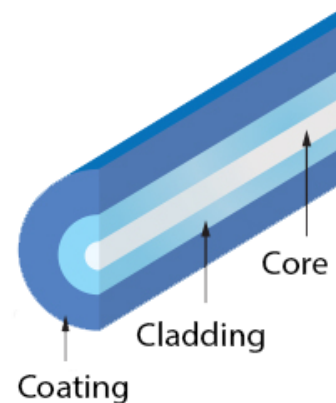


Abbildung 2.17:
Lichtleiter Aufbau [45]

Die Arbeitsweise eines Lichtleiters basiert auf dem Prinzip der Totalreflexion. Im freien Raum breitet sich Licht mit der Geschwindigkeit $c = 300.000 \text{ km/s}$ aus. In einem lichtdurchlässigen Stoff, z. B. Glas-Lichtleiterkern, ist die Lichtgeschwindigkeit kleiner um einen Faktor n' , den man die Brechzahl oder den Brechungsindex dieses Stoffes nennt. Ein im Lichtleiterkern verlaufender Lichtstrahl, der unter dem Winkel γ gegen die Grenzfläche Kern-Mantel trifft, wird im allgemeinen Fall in zwei Strahlen zerlegt: in den reflektierten Strahl und in den gebrochenen Strahl (Abbildung 2.18). Dabei gelten das Reflexionsgesetz, das Brechungsgesetz und der Energiesatz [47].

$$\text{Reflexionsgesetz:} \quad \gamma = \gamma' \quad (2.6)$$

$$\text{Brechungsgesetz:} \quad n'_1 \cdot \cos(\gamma) = n'_2 \cdot \cos(\delta) \quad (2.7)$$

$$\text{Energiesatz:} \quad W_1 = W_2 + W_3 \quad (2.8)$$

Das Reflexionsgesetz, auch Snelliussches Brechungsgesetz genannt, besagt, dass Einfallswinkel und Reflexionswinkel gleich groß sind. Das Brechungsgesetz beschreibt den Zusammenhang von Einfallswinkel und Brechungswinkel. Der Energiesatz besagt, dass

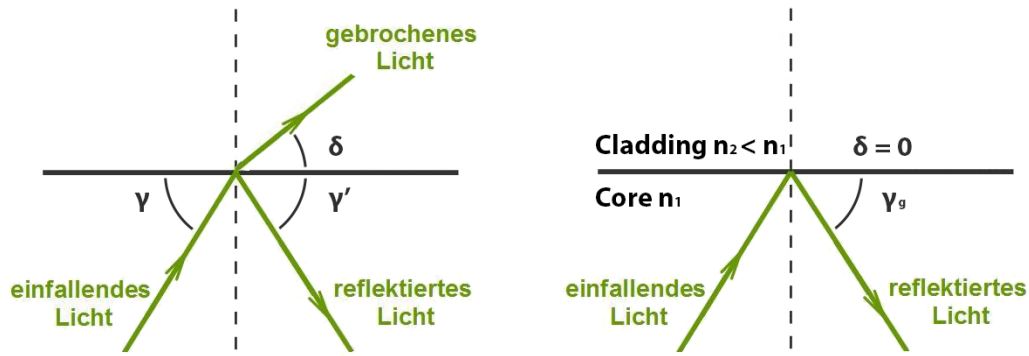


Abbildung 2.18: Ausbreitung des Lichtes im Kern des Lichtleiters
links: mit Strahlung in den Mantel für $\gamma > \gamma_g$, rechts: strahlungsfrei für $\gamma \leq \gamma_g$ [47]

die von dem einfallenden Strahl geführte Energie von den gebrochenen und reflektierten Strahlen aufgeteilt und übernommen wird. Der gebrochene Strahl ist damit die Ursache fortlaufender Energieverluste. Die Energie wird aus dem Kern durch Brechung in den Mantel abgestrahlt. Lichtstrahlen, die sich im Mantel ausbreiten, sind für die Signalübertragung ungeeignet. Wenn der Reflexionswinkel γ so klein ist, dass der Brechungswinkel δ zu null wird, so ist das Licht im Kern des Lichtleiters strahlungsfrei ohne Brechung in den Mantel. Der Lichtstrahl und die Gesamtenergie verbleiben im Kern des Lichtleiters. Die Bedingung für den vorliegenden Fall der Totalreflexion folgt aus Gleichung (2.7) mit $\cos(\delta) = 1$ zu [47]:

$$\gamma \leq \gamma_g = \arccos \frac{n_2'}{n_1'} \quad (2.9)$$

Um die Bedingungen der Reflexionsgesetze in der Faser zu erfüllen, muss der Einfallswinkel des in die Faser eingestrahlt Lichts kleiner als ein bestimmter Winkel sein, der als Akzeptanzwinkel definiert wird. Zur Berechnung dieses Winkels kann folgende Gleichung verwendet werden:

$$\gamma_{acc} = \arcsin \frac{n'_{core} \sqrt{1 - \cos^2 \gamma_g}}{n'} = \arcsin \frac{\sqrt{n'^2_{core} - n'^2_{clad}}}{n'}, \quad (2.10)$$

mit n_{core} als Brechungsindex des Faserkerns, n_{clad} als Brechungsindex des Fasermantels und n als Brechungsindex des äußeren Mediums. γ_{acc} ist dabei der Akzeptanzhalbwinkel der Faser und wird oft als dimensionslose Größe NA (numerische Apertur) angegeben. Die numerische Apertur zur Angabe des Akzeptanzwinkels einer optischen Faser wird wie folgt definiert [47]:

$$NA = n' * \sin \gamma_{acc} \quad (2.11)$$

Grundsätzlich kann man zwischen Multimode- und Monomode-Lichtleitern unterscheiden (Abbildung 2.19). Alle möglichen Lichtwellen, die den Lichtleiter ohne Interferenzen oder Auslöschung passieren können, nennt man Moden. Diese hängen vor allem von der Brechung bei der Einkopplung des Lichts, dem Grenzwinkel der Totalreflexion und dem Einfallswinkel ab. Multimode-Lichtleiter haben einen Kern mit großem Durchmesser und weisen daher mehrere Ausbreitungsmoden auf. Das heißt, dass mehrere Lichtwellenlängen den Faserkern passieren können. Die Monomode-Lichtleiter haben sehr kleine Kerndurchmesser und können nur eine Mode durchlassen [48].

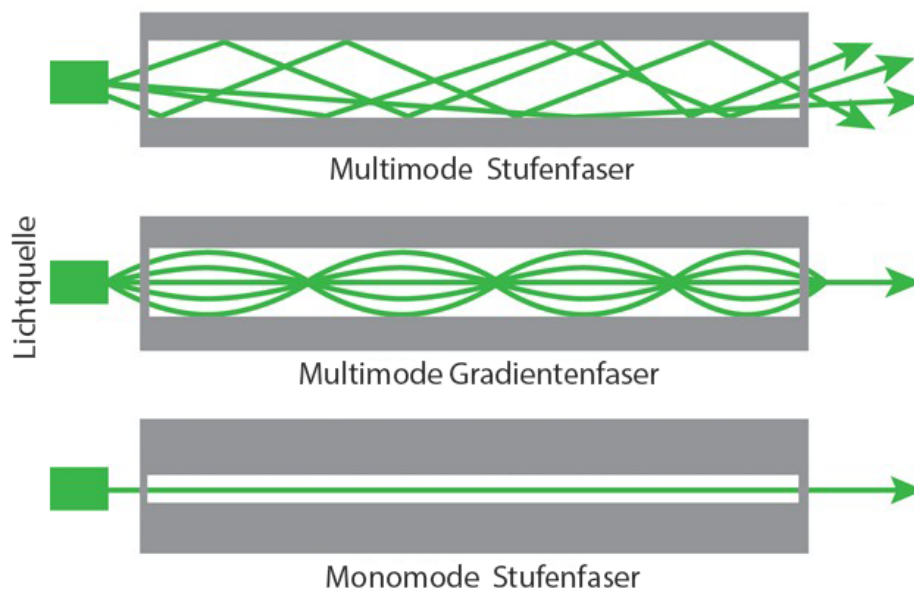


Abbildung 2.19: Lichtleitertypen [49]

Eine weitere Unterscheidung bei den Multimode-Lichtleitern ist die zwischen den Stufenfasern (stepindex fibre) und den Gradientenfasern (graded-index fibre). Die einfacheren Stufenfasern bestehen aus einem runden Glaskern mit der Brechzahl n_1 und einem Glasmantel, dessen chemische Zusammensetzung vom Glaskern ein wenig abweicht und dessen Brechzahl n_2 etwa 1% kleiner ist als n_1 . In einer solchen Faser wird alles Licht, dessen Ausbreitungswinkel γ ausreichend flach ist, durch vielfach wiederholte Totalreflexion auf Zickzackbahnen den Kern entlang geführt und folgt so dem Verlauf der Faser, auch wenn diese auf gekrümmten Wegen mit Krümmungsradien von wenigen Zentimetern verlegt ist.

Der Nachteil der Stufenfasern liegt im Zeitunterschied zwischen den Lichtwellen, die mit unterschiedlichen Reflexionswinkeln die Faser passieren. Diese legen bei gleicher Geschwindigkeit unterschiedliche Wege zurück. Die Dauer eines kurzen Lichtimpulses, der in die Faser eingekoppelt und dessen Lichtleistung auf die verschiedenen Ausbrei-

tungswinkel aufgeteilt wird, wächst daher beim Durchlaufen der Faser ständig an, und der am Faserende erscheinende Impuls ist um so länger, je länger die Faser ist [50].

Bei den Gradientenfasern ist die Brechzahl im Faserkern nicht konstant, sondern fällt von einem Maximalwert n_0 auf der Faserachse parabelförmig nach außen bis auf den Wert der Mantelbrechzahl n_2 ab. In einer solchen Gradientenfaser bewegt sich das Licht statt im Zickzackkurs auf wellenförmigen Bahnen. Im Vergleich zu den Stufenfasern wird die gröbere Weglänge der weiter ausschwingenden Bahnen dadurch kompensiert, dass außerhalb der Faserachse die Brechzahl kleiner und die Lichtgeschwindigkeit höher ist als auf der Achse, sodass die Laufzeit bis zum Faserende für alle Lichtanteile nahezu gleich wird [50].

Der Einsatz der Lichtleiter statt der fokussierten Lichtstrahlen für die Signalübertragung bringt zwar Vorteile, aber auch Nachteile mit sich. Die Signaländerungen bzw. -verluste entstehen zum einen wegen der Lichtabsorption – weil das Licht in einer optischen Faser über ein festes Material geführt wird, gibt es Verluste aufgrund von Absorption, wenn Licht sich durch die Faser ausbreitet – und zum anderen wegen der Lichtstreuung – wenn das Licht auf eine Änderung des Brechungsindex des Mediums trifft, entstehen Verluste. Diese beiden Verlustmechanismen können dank der Kalibrierung vernachlässigt werden, weil sie immer im gleichen Maße auftreten, vorausgesetzt, die empfohlenen Biegeradien werden eingehalten.

Eine weitere Ursache der Signaländerung im Lichtleiter sind die Biegungsverluste. Das sind Verluste, die aufgrund von Änderungen der äußeren und inneren Geometrie einer optischen Faser auftreten. Diese werden üblicherweise in zwei Kategorien unterteilt: Makrobiegungsverlust und Mikrobiegungsverlust. Der Makrobiegungsverlust ist typischerweise mit dem physikalischen Biegen einer optischen Faser verbunden.

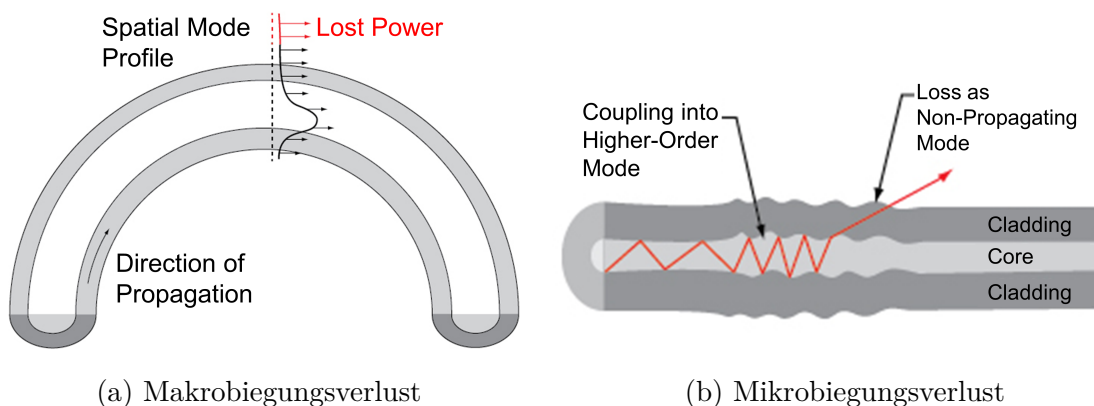


Abbildung 2.20: Biegungsverlust in der Lichtleitfaser [45]

Bei Makrobiegungsverlusten, wie in Abbildung 2.20a gezeigt, ist das geführte Licht räumlich innerhalb der Kern- und Mantelbereiche der Faser verteilt. Wenn eine Faser mit einem Radius gebogen wird, kann das Licht nahe dem äußeren Radius der Biegung nicht das gleiche räumliche Modenprofil beibehalten, ohne die Lichtgeschwindigkeit zu überschreiten. Stattdessen geht die Energie als Strahlung an die Umgebung verloren. Bei einem großen Biegeradius sind die mit dem Biegen verbundenen Verluste gering. Bei Biegeradien, die kleiner als der empfohlene Biegeradius einer Faser sind, werden Biegeverluste jedoch sehr signifikant [45].

Mikrobiegungsverluste entstehen durch Änderungen der inneren Geometrie der Faser, insbesondere der Kern- und Mantelschichten. Diese zufälligen Variationen (Unebenheiten) in der Faserstruktur stören die Bedingungen, die für die totale interne Reflexion erforderlich sind, und bewirken, dass sich ausbreitendes Licht in einen sich nicht ausbreitenden Mode koppelt (Abbildung 2.20b). Diese Unebenheiten können auftreten, falls der minimale Biegeradius der Faser über eine längere Zeit (mehrere Sekunden) unterschritten wird [45].

Abhilfe gegen Biegeverluste ist möglich durch die Einhaltung der empfohlenen Biegeradien der Lichtleiter und die Kalibrierung der Vorrichtung mit der Einhaltung derselben Biegeradien wie im Messbetrieb.

2.3.2 Temperatureinfluss auf die Fluoreszenz

Es kann bis zu 10^{-8} Sekunden dauern, bis ein angeregtes Molekül Fluoreszenzstrahlung emittiert. In dieser Zeit kann es mit anderen Molekülen in der Umgebung wechselwirken und sich im Raum frei bewegen. Faktoren wie die Temperatur, die Viskosität, die Polarität, die Ausbildung von Wasserstoffbrückenbindungen oder der pH-Wert beeinflussen die chemische Umgebung und die dynamischen Eigenschaften der Moleküle und somit auch die emittierte Strahlung [41].

Im Allgemeinen nimmt die Fluoreszenzintensität mit steigender Temperatur ab, da die strahlungslosen Prozesse, z. B. die intramolekularen Schwingungen, die eine Abschwächung der Fluoreszenz zur Folge haben, bei höherer Temperatur verstärkt auftreten. Bei solchen Betrachtungen darf nicht vergessen werden, dass sich alle Faktoren auch gegenseitig beeinflussen, sodass die Änderung der Fluoreszenzintensität auf mehrere Faktoren zurückzuführen ist. So hat z. B. im Öl eine Änderung der Temperatur auch eine Änderung der Viskosität zur Folge, die auf der anderen Seite durch Additive verändert werden kann [41].

Der beschriebene Temperatureinfluss stellt ein Hindernis bei der Verwendung des LIF-Messsystems dar. Diese Abhängigkeit bringt einen zusätzlichen Aufwand bei der Kalibrierung und den Messungen mit sich. Es gibt Verfahren, bei denen durch die Verwendung von mehreren fluoreszierenden Stoffen (mit unterschiedlichen Fluoreszenzeigenschaften) der Einfluss der Temperatur minimiert werden kann. Diese Verfahren wurden erfolgreich angewendet [51] [52], sind aber mit zusätzlichem Aufwand bei der Applizierung und beim Messsystemaufbau verbunden.

Die Ausnutzung des Effekts der Temperaturabhängigkeit wird u. a. für die berührungslose Temperaturmessung mithilfe von Fluoreszenzfarbstoffen (phosphor thermography) verwendet. Bei dem Verfahren werden die temperaturabhängigen Eigenschaften fluoreszierender Stoffe ausgenutzt. Dabei wird nicht die Quantenausbeute (Intensität) der Fluoreszenz, sondern die Anstiegs- oder Abklingzeit (Lebensdauer) betrachtet. Durch die modulierte Anregung und Messung der temperaturabhängigen Phasendifferenz der Fluoreszenzstrahlung können zuverlässig und intensitätsunabhängig Temperaturen bestimmt werden. Mithilfe solcher Thermografie lässt sich die Temperatur an unzugänglichen Orten messen (z. B. an der Oberfläche einer rotierenden Turbine oder dem Innenraum eines Verbrennungsmotors) [53] [54] [55] [56].

Der Effekt des Temperatureinflusses wird in Kapitel 3.3 bei der Betrachtung des konkreten Fluoreszenzmittels näher beschrieben.

2.3.3 Fluoreszenzabnahme

Während die oben beschriebenen Gesetze der Fluoreszenz die Fluoreszenzstrahlung definieren, ist in der Praxis oft mit reduzierter Fluoreszenzintensität zu rechnen. Die Abnahme der Fluoreszenzstärke kann man in folgende zwei Bereiche unterteilen:

Quenching: Der Effekt der Fluoreszenzlöschung (Quenching) bezeichnet Vorgänge, die eine Abnahme in der Intensität der Fluoreszenz eines Stoffes zur Folge haben. Es gibt eine Reihe von Effekten, die zur Fluoreszenzlöschung führen:

- Beim Resonanz-Energie-Transfer wird die Energie des angeregten Zustands des Donormoleküls strahlungslos durch Resonanzeffekte auf ein zweites Molekül A (Akzeptor) übertragen. Dadurch verringert sich die Fluoreszenz [41] [57].
- Beim dynamischen Quenching wird die Energie des angeregten Moleküls durch den Zusammenstoß mit einem Quencher-molekül auf dieses Quencher-molekül übertragen, wobei die Energie letztlich in Wärme übergeht [58].

- Beim statischen Quenching bilden fluoreszierende Moleküle und Quencher molekül einen Komplex, dessen Fluoreszenz verringert ist oder ganz ausbleibt. Durch die Komplexbildung wird die Konzentration fluoreszenzfähiger Moleküle verringert. Die Fluoreszenzlöschung durch einen Quencher ist reversibel: Die Fluoreszenz steigt wieder an, sobald der Quencher entfernt wird [58].

Ausbleichen: Vom Quenching zu unterscheiden ist die Abnahme der Fluoreszenz aufgrund hoher Anregungsintensitäten oder meist ungewollter chemischer Veränderungen des Farbstoffes z. B. durch Oxidation in Anwesenheit von Sauerstoff. Dies bezeichnet man als Ausbleichen des Farbstoffes oder Photobleichung. Der fluoreszierende Stoff wird dabei irreversibel zerstört [59].

3 Messsystem

Um die Analyse der tribologischen Komponenten zu ermöglichen, wurde ein Messsystem für den gezielten Einsatz an Forschungsprüfständen entwickelt. Es zeichnet sich durch eine anpassungsfreundliche und kostengünstige Bauweise aus und wurde im Laufe der Forschungsarbeiten mehrfach ergänzt und optimiert. Die für die Funktion des Systems notwendigen Bauteile sowie die Kalibrierprinzipien werden im folgenden Kapitel behandelt. Anzumerken ist, dass während das System auf dem LIF-Prinzip (laserinduzierte Fluoreszenz) aufgebaut ist, LEDs statt Laser verwendet werden und die Bezeichnung LIF unabhängig von der Strahlungsquelle verwendet wird.

3.1 Messsystem Optitron

Das Messsystem basiert auf dem LIF-Prinzip und wurde konstruiert, um die Messung der Ölschichten von Motorkomponenten zu ermöglichen. Den Mittelpunkt des Systems bilden LEDs als Lichtquelle, Photodetektoren für die Aufnahme der Fluoreszenzstrahlung und Multimode-Stufenfaser-Lichtleiter für die Lichtübertragung. Die Arbeitsweise kann Abbildung 3.1 entnommen werden. Das Licht der LEDs wird über einen Bündellichtleiter an die Messstelle im Prüfkörper geleitet. Falls sich an der Messstelle unmittelbar vor dem Lichtleiterende eine fluoreszierende Substanz befindet, wird diese angeregt und die entstehende emittierte Strahlung, zusammen mit der möglicherweise reflektierten LED-Strahlung, an die Detektoren geleitet. Die optischen Filter, die direkt vor den Detektoren montiert sind, lassen nur die Wellenlängen des fluoreszierenden Lichts durch.

Nach diesem Vorgehen kann durch eine lokale Zugabe des Fluoreszenzmittels zum Schmierfilm der tribologischen Komponente das Auftauchen dieses Schmierfilms vor der Messstelle detektiert werden. Durch die Kombination von mehreren Messstellen lässt sich so der Transport des Fluoreszenzmittels und somit auch des Schmiermittels erfassen. Eine weitere Einsatzmöglichkeit ist gegeben, wenn das komplette Schmieröl eine konstante Konzentration des Fluoreszenzmittels enthält. Das Signal des Detektors ist in diesem Fall proportional zu der Ölschichtdicke, da eine höhere Ölschicht vor der Messstelle eine höhere Fluoreszenzstrahlung zur Folge hat.

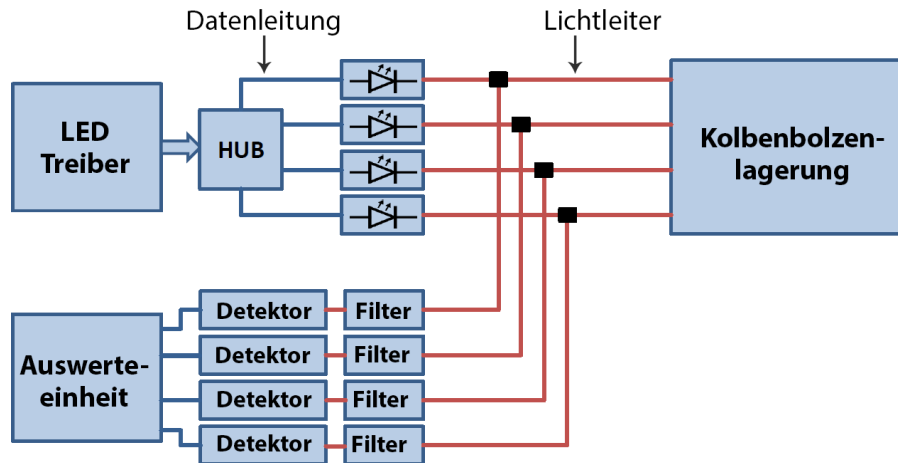


Abbildung 3.1: Schematischer Aufbau des Messsystems

Wie in Abbildung 3.2 zu sehen, wurde bei dem Aufbau des Systems auf eine kompakte Bauweise und die Einsatzmöglichkeiten unter Prüfstandsbedingungen geachtet. Die Bezeichnung des Systems „*Optitron 4.455*“ spiegelt die vier unabhängigen Messkanäle und den Einsatzbereich um 455 nm Wellenlänge wieder. Es zeichnet sich darüber hinaus durch folgende Merkmale aus:

- vier unabhängige Messkanäle (4 x LED, 4 x Detektor)
- 400 kHz Gesamtaufnahme-Bandbreite
- austauschbare LED/Detektor/Filter-Kombinationen für andere Wellenlängen
- Betrieb im Modulations- und Dauermodus
- Aufnahme von zusätzlichen Analog-, Digital- und Temperatursignalen

Der Transport der Lichtwellen über die Lichtleiter anstatt der Benutzung von optischen Bauelementen wie Linsen, Spiegel und Prismen ist ein logischer Schritt, um die kompakte Bauweise und Prüfstandtauglichkeit des Systems zu gewährleisten. Dabei wird als Typ ein Multimode-Stufenfaser-Lichtleiter ausgewählt, weil bei ihm anders als bei einem Monomode-Lichtleiter ein analoges intensitätsabhängiges Signal übertragen wird und im Vergleich zu einem Gradienten-Lichtleiter keine Anforderungen an die Phasengleichheit der Strahlung besteht. Das zur Fluoreszenzanregung benötigte Licht wird von den LEDs erzeugt und über die Bündel-Y-Lichtleiter und die Messstellenlichtleiter an das messende Lichtleiterende geleitet.

Bei der Querschnittsgröße der Lichtleiter sind drei Faktoren wichtig: die zum Durchmesser proportionale effektive Leistung, die transportiert werden kann, die zum Durchmesser proportionale zulässige Biegeradien der Lichtleiter und die fertigungsbedingten Beschränkungen der Hersteller. Letztere schreibt die Dicke der Bündellichtleiter vor, die an die Detektoren und LEDs angebunden sind. Diese sind $\varnothing 200\ \mu\text{m}$ dick, und auf-

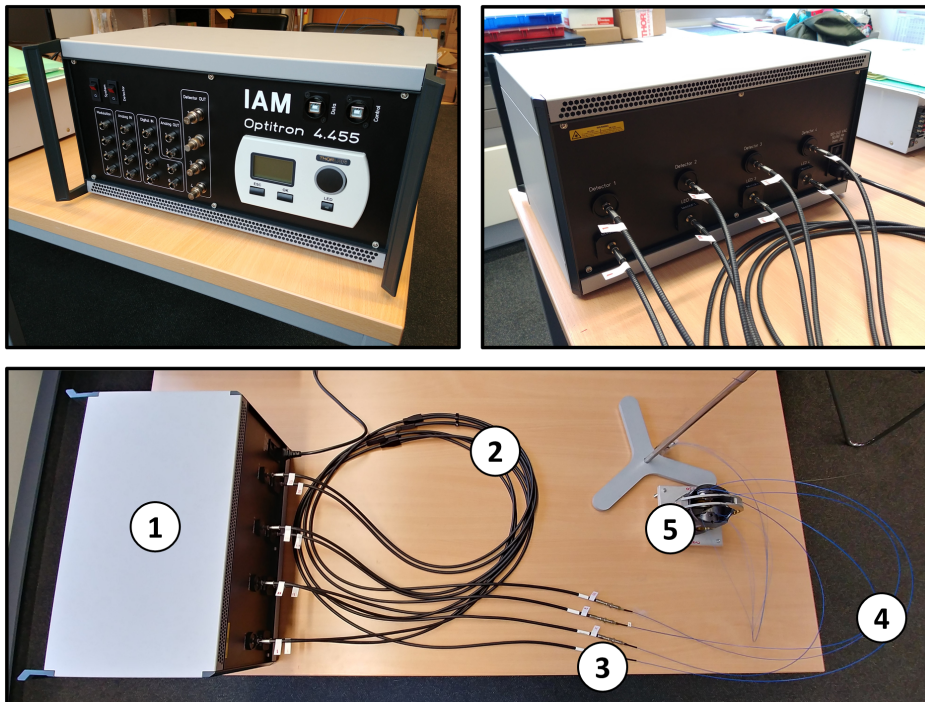


Abbildung 3.2: Aufbau des Messsystems (1. Messbox, 2. Bündel-Y-Lichtleiter, 3. Verbindungsadapter, 4. Messstellenlichtleiter, 5. Messkolben)

grund von sieben Lichtleitern in einem Bündel ergibt sich eine Dicke von ca. $\varnothing 600 \mu\text{m}$ vor der Übergangsstelle zu den Messstellenlichtleitern.

Anzumerken ist, dass das System modular aufgebaut ist. Die LEDs, Detektoren und Filter sind austauschbar und können, falls notwendig, an andere Wellenlängenbereiche oder Intensitäten angepasst werden. Des Weiteren ist das Aufnahmevermögen des Systems durch das Data-Acquisition-(DAQ-)Modul beschränkt und kann durch ein DAQ-Upgrade erhöht werden.

Die Wahl der LEDs als Lichtquellen hat Vorteile, wie die kompakte Bauweise des Systems, vier getrennt gesteuerte Messkanäle, die geringe Anschaffungskosten und keine Schädigung der Lichtleiter mit zu hoher Leistung. Die geringere maximale Strahlungsintensität der LEDs wird teilweise dadurch kompensiert, dass das erzeugte Lichtspektrum breiter ist als bei Lasern. Die Inkohärenz (d. h. eine fehlende feste Phasenbeziehung der elektromagnetischen Wellen) der LED-Strahlung sorgt dabei nicht für Nachteile bei den geplanten Messungen. Bei den verwendeten Detektoren handelt es sich um verstärkte Silizium-Photodetektoren mit umschaltbarer Verstärkung und einem breiten Aufnahmespektrum von 400 bis 1.000 nm (Abbildung 3.3). Der breite Wellenlängenbereich in Verbindung mit den passenden optischen Filtern lässt einen vielseitigen Einsatz des Systems zu.

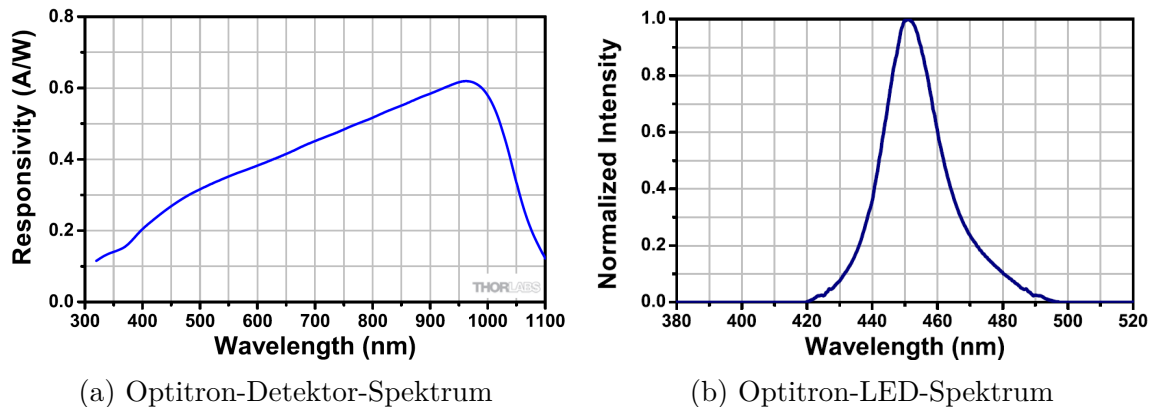


Abbildung 3.3: Spektren des Messsystems

Abzüglich der vier analogen Eingangskanäle, die für die Aufnahme der Fluoreszenz-messsignale verwendet werden, stehen zusätzliche Ein- und Ausgangskanäle zur Verfügung. Diese können über die Anschlüsse an der Messbox z. B. für die Aufnahme weiterer Prüfstands- bzw. Motordaten benutzt werden. Weil die Aufnahmebandbreite der schnellen Datenaufnahme beschränkt ist, besteht die Möglichkeit der zusätzlichen Aufzeichnung von langsamen Analogsignalen sowie von Temperatursensoren. Dies ist vor allem nützlich, um Betriebsparameter oder -temperaturen aufzuzeichnen.

Aufgrund der Verwendung des DAQ-Moduls von *National Instruments* kann für die Datenaufnahme jede Software dieses Herstellers, wie *Labview*, *Measurement Studio*, *DIAdem* oder *Matlab*, verwendet werden. Aufgrund der einfachen Benutzung und der kostenfreien Verfügbarkeit zur Zeit der Fertigstellung des Messsystems wird für die Benutzung das Tool *Labview NXG* verwendet.

3.2 Messstellenlichtleiter

Wie bereits beschrieben, arbeitet das Messsystem mit Multimode-Stufenfaser-Lichtleiterbündeln von $\varnothing 600 \mu m$. Für die Wahl der Messstellenlichtleiter und deren Anbindung an die Bündellichtleiter des Messsystems gibt es zwei Möglichkeiten:

- Verwendung von Messstellenlichtleitern mit $\varnothing 550\text{--}600 \mu m$, was eine einfache Anbindung an die Bündel-Y-Lichtleiter ohne optische Bauelemente gewährleistet, andererseits aber die Biegeradien vergrößert und den Einbau im Motor erschwert.
- Verwendung von Messstellenlichtleitern mit $\varnothing 100\text{--}200 \mu m$, was eine zusätzliche Kollimierung der Strahlen der Messstellen und Bündel-Y-Lichtleiter erfordert, aber die Biegeradien verkleinert und den Einbau im Motor erleichtert.

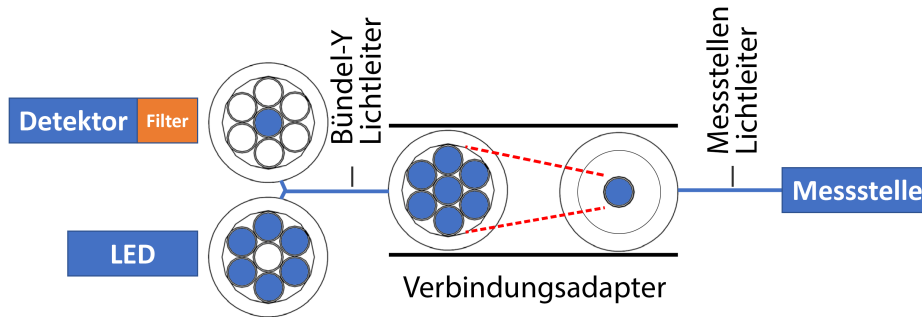


Abbildung 3.4: Messsystem – Signalstrecke mit Verbindungsstelle der Messstellenlichtleiter mit $\varnothing 200 \mu m$ an die Bündellichtleiter mit $\varnothing 600 \mu m$

Im letzteren Fall ginge wegen der zu großen Durchmesserdiffferenz der Lichtleiterkerne der Messstellen- und der Bündel-Y-Lichtleiter (Abbildung 3.4) eine direkte wechselseitige Anbindung der Lichtleiter mit hohen Verlusten einher. Um solche Verluste an dieser Stelle zu minimieren und die Verwendung optischer Bänke zu vermeiden, wurde ein Aufbau mit kompakten optischen Linsen mit unterschiedlichen Größen und Brennpunkten (Abbildung 3.5) realisiert, der die Signalverluste im Vergleich zu den Messstellenlichtleitern mit $\varnothing 550 \mu m$ je nach Einsatzbedingungen auf 30 % bis 50 % reduziert. Die durch die Verkleinerung der Lichtleiterdurchmesser resultierenden Verluste in der Signalqualität und Signalaufösung ergeben sich aus den Verlusten an den zusätzlichen optischen Bauelementen und der reduzierten Messstellenfläche.

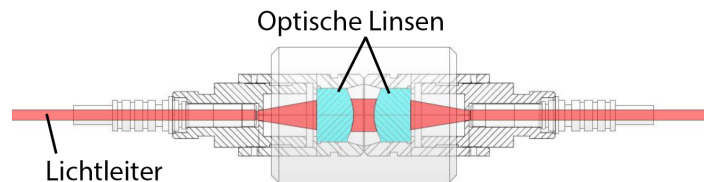


Abbildung 3.5: SMA-zu-SMA-Verbindungsadapter

In Abbildung 3.6 sind die Signalintensitäten der Lichtleiter mit $\varnothing 550 \mu m$ und $\varnothing 200 \mu m$ bei einer Schichtdickenmessung (0,12-%-Mischung) dargestellt. Während es deutliche Unterschiede in den Signalen der Lichtleiter ($\varnothing 550 \mu m$ und $\varnothing 200 \mu m$) gibt, ist vor allem die Auflösung (Steigung der Kurven) wichtig, während der Offset bei der Kalibrierung kompensiert wird. Zusätzlich zu der besseren Auflösung gibt es weitere Vorteile der größeren Lichtleiterflächen. Vor allem sind die Einflüsse der beschädigten oder schlechter bearbeiteten Lichtleiterenden sowie der falsch eingestellten Verbindungsstellen bei kleineren Lichtleiterflächen größer.

Da die Lichtleiter im Kern aus Siliziumdioxid bestehen, ist ihre Temperatur- und Druckbeständigkeit gewährleistet. Aufgrund der Coating- und Cladding-Schichten aus

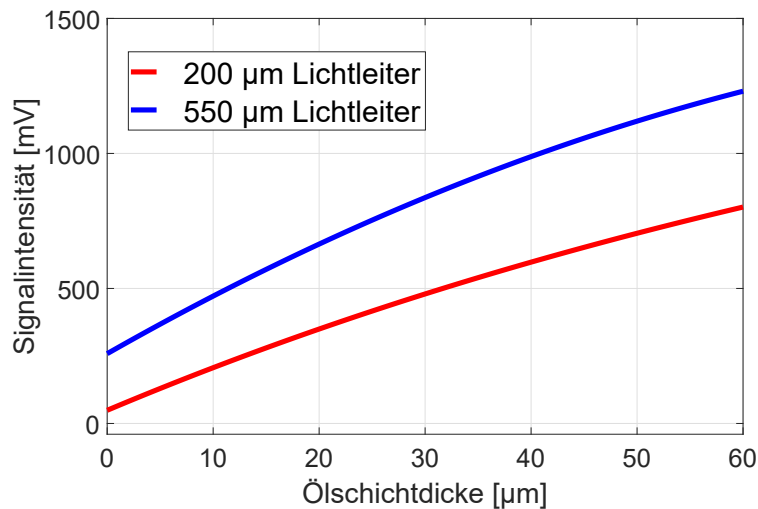


Abbildung 3.6: Signalunterschied zwischen Lichtleitern mit $\varnothing 550 \mu\text{m}$ und $\varnothing 200 \mu\text{m}$ (Öl: Shell Sirius X 40)

Hart-Fluoropolymer um den Lichtleiterkern ($30 \mu\text{m}$ bei einem $\varnothing 200 \mu\text{m}$ Lichtleiter), die nur bis zu einer Temperatur von ca. $180 \text{ }^\circ\text{C}$ mechanisch belastbar sind, können sich Absenkungen um die Lichtleiterkerne an den Messstellen ausbilden. Sie sind im Vergleich zu den Einbau- und Fertigungstoleranzen jedoch vernachlässigbar und haben keine Auswirkung auf die Signale. Alternativ können die Lichtleiter mit Coating- und Cladding-Schichten aus Polyimid benutzt werden, was aber die Signalaufösung vermindert. Die Verkohlung der Coating-Schicht der Lichtleiter wurde unter Laborbedingungen bei ca. $400 \text{ }^\circ\text{C}$ beobachtet.

Weil die Messstellen für die Fluoreszenzmessungen oft schwer zugänglich sind, müssen die Lichtleiter in engen Kanälen verlegt werden. Dies ist nur dann durchführbar, wenn sie mit einem geringen Durchmesser von $\varnothing 200 \mu\text{m}$ mit Biegeradien von $12\text{--}24 \text{ mm}$, die für das Platzangebot ausreichend klein sind, ausgewählt werden. Der Signalunterschied zwischen einem geraden Lichtleiter mit $\varnothing 200 \mu\text{m}$ und einem verlegten Lichtleiter mit $\varnothing 200 \mu\text{m}$ und 20 mm Biegeradius kann Abbildung 3.7 entnommen werden.

Während der Unterschied in der Auflösung der Signale vernachlässigbar ist, müssen die Biegeradien bei der Kalibrierung für eine genaue Offsetbestimmung mit berücksichtigt werden. Des Weiteren sind die minimalen Biegeradien der Lichtleiter einzuhalten, da sonst die Gefahr einer dauerhaften Signalabnahme infolge einer Lichtleiterabnutzung besteht [45]. Die Reduzierung der Signalqualität mit einer Durchbiegung in den Bereichen der minimalen Biegeradien ist typisch für die Multimode-Lichtleiter und wird bewusst in Kauf genommen.

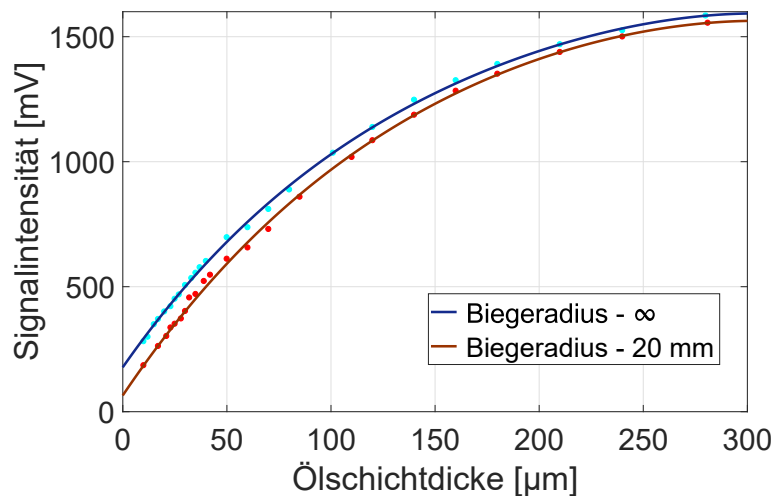


Abbildung 3.7: Einfluss des Biegeradius auf das Signal bei einem Lichtleiter mit $\varnothing 200 \mu m$ (Öl: Shell Sirius X 40)

Die verwendeten Messstellenlichtleiter besitzen eine numerische Apertur von 0,22 und haben somit Akzeptanzhalbwinkel von 9° bei Öl oder $12,7^\circ$ bei Luft als Umgebungsmedium. Das bedeutet, dass die betrachtete Fluoreszenzstrahlung in einem Winkel von $2 \times$ Akzeptanzhalbwinkel eingefangen wird und die betrachtete Fläche mit dem Abstand zum Lichtleiterende steigt. Dieses Verhalten gilt unveränderlich bei den Motormessungen und den Kalibriermessungen und hat keinen Einfluss auf die quantitativen Aussagen. Als Beispiel beträgt die betrachtete Fläche der Messstellenlichtleiter mit $\varnothing 200 \mu m$ in einem Abstand von $50 \mu m$ ca. $\varnothing 218 \mu m$. Zusätzlich beeinflussen die vorkommenden Beschädigungen bzw. Kratzer der Lichtleiteroberflächen an der Laufbuchse die messbaren Ölvolumina. Die genauere Analyse der Messsignale wird in den folgenden Kapiteln beschrieben.

3.3 Fluoreszenzmittel

Die an Verbrennungsmotoren eingesetzten Marineöle besitzen eine zu geringe Eigenfluoreszenz, um mit dem Messsystem eine ausreichende Messauflösung zu produzieren. Dieser Umstand führt dazu, dass dem Öl ein Fluoreszenzmittelzusatz zugemischt wird, um so eine konstante und intensive Ölfluoreszenz zu erzeugen. Bei diesem Messsystem wird als Fluoreszenzmittel *Lumilux CD 345* vom Hersteller *Honeywell* verwendet. Dieser Stoff hat sich in anderen messtechnischen Projekten durch seine guten Fluoreszenzeigenschaften bewährt [60] [61] [62]. In Abbildung 3.8 ist das Absorptionsspektrum und das Emissionsspektrum des Mittels dargestellt. Der Grafik kann entnommen wer-

den, dass das Absorptionsspektrum sehr gut mit dem LED-Spektrum übereinstimmt und dass das von dem 500-nm-Langpassfilter durchgelassene Signal nur das Emissionsspektrum enthält.

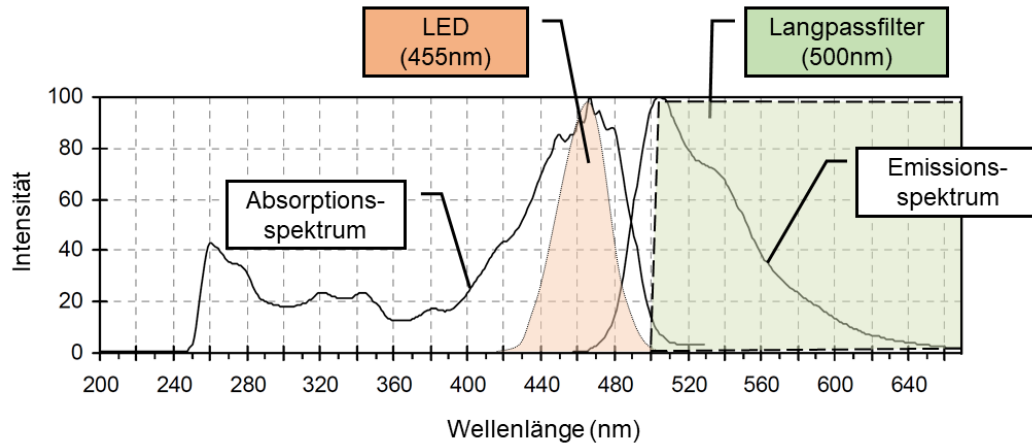


Abbildung 3.8: Fluoreszenzmittel *Lumilux CD 345* mit Anregungsbereich bis 500 nm und Fluoreszenzbereich oberhalb von 480 nm [63]

Die genaue chemische Zusammensetzung dieser Substanz ist nicht öffentlich bekannt. Laut dem Sicherheitsdatenblatt besteht es aus Thioxanthenderivaten (Abbildung 3.9). Diese chemischen Verbindungen können so konstruiert werden, dass eine verbesserte Löslichkeit unter Beibehaltung der Fluoreszenzeigenschaften erreicht wird, und sie wurden bereits z. B. bei der Herstellung von Verkehrsschildbeschichtungen verwendet [64].

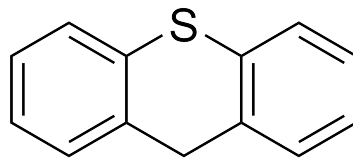


Abbildung 3.9: Thioxanthene

Bei dem Fluoreszenzmittel handelt es sich um einen pulverförmigen Stoff. Dieser wird in einem konstanten Verhältnis mit dem Motoröl vermischt, um eine fluoreszierende Lösung zu erhalten. Für das Mischungsverhältnis wird auf ein ausreichendes Fluoreszenzsignal bei gleichzeitig geringem Verbrauch des Mittels geachtet. In Abbildung 3.10 ist die Signalauflösung des zugeführten Fluoreszenzmittels im Zusammenhang dargestellt. Um den Verbrauch des Mittels und die Zeit, die zum Vermischen erforderlich ist, zu minimieren, wird ein Mischungsverhältnis von maximal 0,12 % ausgewählt. Das stimmt mit den in anderen messtechnischen Projekten verwendeten Konzentrationen dieses Fluoreszenzmittels überein. Zum Durchmischen des *Lumilux*-Pulvers mit dem Öl haben sich zum einen die kontinuierliche Flüssigkeitsbewegung und zum anderen

das Beheizen der Lösung als beste Katalysatoren herausgestellt. Die Verwendung eines Ultraschallbades bei geringen Mischungsmengen ist das optimale Vorgehen.

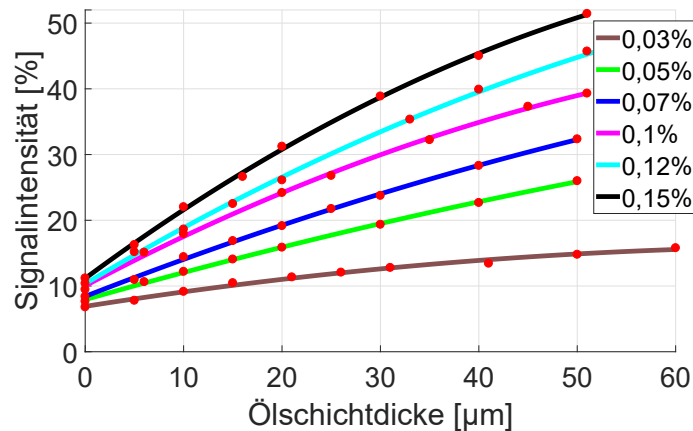


Abbildung 3.10: Abhängigkeit der Fluoreszenzintensität von dem Mischungsverhältnis des Fluoreszenzmittels

Der in Kapitel 2.3.2 beschriebene Temperatureinfluss auf die Fluoreszenz kann bei dem Fluoreszenzmittel *Lumilux* ebenfalls beobachtet werden. Abbildung 3.11 zeigt die Fluoreszenzintensität in Abhängigkeit von der Temperatur. Dieser Einfluss ist gering bei Raumtemperaturen von 10–30 °C und kann als linear abgeschätzt werden in Bereichen von 60–140 °C. Der nichtlineare Zusammenhang ab 160 °C ist eine Kombination aus dem Einfluss der strahlenlosen Prozesse, dem Quenching und dem Ausbleichen (Kapitel 2.3.3)

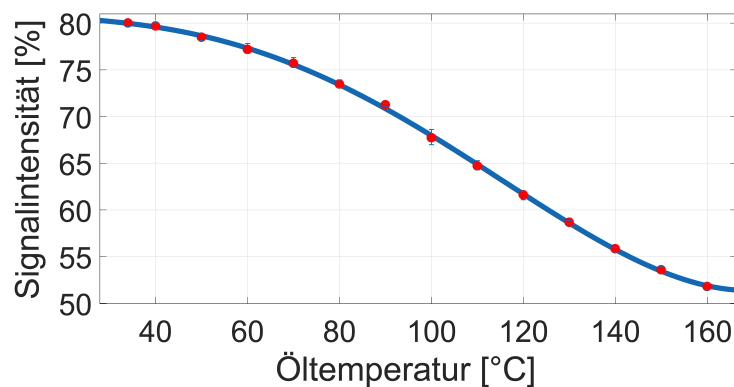


Abbildung 3.11: Temperaturabhängigkeit der Fluoreszenz am Beispiel von Lumilux-Mittel (0,12 %) + Shell-Sirius-X-40 Öl

Bei der Überschreitung einer bestimmten kritischen Temperatur konnte eine permanente Abnahme der Fluoreszenz am Beispiel des hier verwendeten Fluoreszenzmittels mit der Ölmischung beobachtet werden. Dabei hängt dieser Einfluss von der Dauer und

Höhe der überschreitenden Temperatur ab. Höchstwahrscheinlich wirkt die Temperatur als Katalysator bei den chemischen Reaktionen der Thioxanthene. Eine physikalische bzw. thermische Zersetzung des Stoffes konnte nicht beobachtet werden.

Während das Verhalten der Fluoreszenzmischung außerhalb des beschriebenen Bereichs nicht überprüft werden konnte, wird die gegebene Beziehung gut durch eine Sigmoid-Funktion (Gleichung 3.1) abgebildet mit Φ als Quantenausbeute. Bezogen auf die verwendete Messmethode, das Öl, den Lichtleiter etc. kann eine Beziehung zwischen Temperatur und Messsignal aus Gleichung 3.2 verwendet werden. Die Parameter e und $e + a$ stellen dabei die begrenzende maximale Ausbeute bei geringer Temperatur und minimale Signale bei fehlender Ausbeute dar. Die minimalen Signale sind dabei das Systemoffset und werden bei der Kalibrierung mit berücksichtigt. Die Überschreitung der kritischen Temperatur verringert die maximale Ausbeute und nicht den Offset.

$$\Phi = \frac{a}{1 + e^{-b*x+d}} + e \quad (3.1)$$

$$\Phi_{norm} = \frac{-969,9}{1 + e^{-0,03663*x+4,082}} + 2254 \quad (3.2)$$

3.4 Kalibrierung

Um qualitative und quantitative Fluoreszenzmessungen durchführen zu können, müssen die infolge der Kalibrierung gemessenen Werte auf die Messdaten angewendet werden. Dazu wurde eine Kalibriervorrichtung des Messsystems konstruiert, die mit der Berücksichtigung zahlreicher Randbedingungen Kontrollwerte erzeugen kann.

3.4.1 Kalibriervorrichtungen

Der Aufbau der Kalibriervorrichtung kann Abbildung 3.12 entnommen werden. Die Aufgabe dieser Vorrichtung ist es, eine konstante messbare Ölschicht vor der Messstelle zu schaffen. Dies wird mithilfe eines an der digitalen Mikrometerschraube befestigten, beweglichen, nicht-drehenden Aufsatzes realisiert. Er kontrolliert die Dicke des Flüssigkeitsfilms in 1- μm -Schritten vor der Messstelle und kann zusätzlich die geforderte Form oder Oberfläche haben, um die Messbedingungen vollständig nachzubilden. Falls sich im Motor an der Messstelle hinter dem Ölfilm eine reflektierende Fläche befindet, z. B. der Kolbenring im Zylinder oder der Kolbenbolzen im Gleitlager, kann dies die Signale geringfügig beeinflussen, weil das Fluoreszenzlicht, das sonst von der Messstelle herausstrahlt, jetzt durch die Kolbenringwand reflektiert wird und so das Signal verstärkt.

Dieser Einfluss wird dadurch umgangen, dass der Aufsatz der Kalibriervorrichtung aus demselben Material und mit derselben Krümmung gefertigt wird.

Im Falle der Kalibrierung der Ölschicht mit sich dahinter befindender Luft wird ein flacher Aufsatz mit nicht-reflektierender Oberfläche benutzt. In Abbildung 3.12 ist der prinzipielle Aufbau der Kalibriervorrichtung mit der Benutzung des Kolbenbolzenaufsatzes dargestellt. Ein Heizelement in unmittelbarer Nähe des Ölflusses sorgt für eine konstante Temperatur während der Kalibrierung. Als Lichtleiteranschluss wurde ein temperaturbelastbarer SMA-(Sub-Miniature-A-)Verbindungsstecker eingebaut, um eine gewisse Abdichtung sowie einen schnellen und unkomplizierten Wechsel der Lichtleiter zu gewährleisten. Nach dem Justieren der Kalibriervorrichtung ist abgesehen von der Einstellung der Spaltdicke kein Eingreifen notwendig.

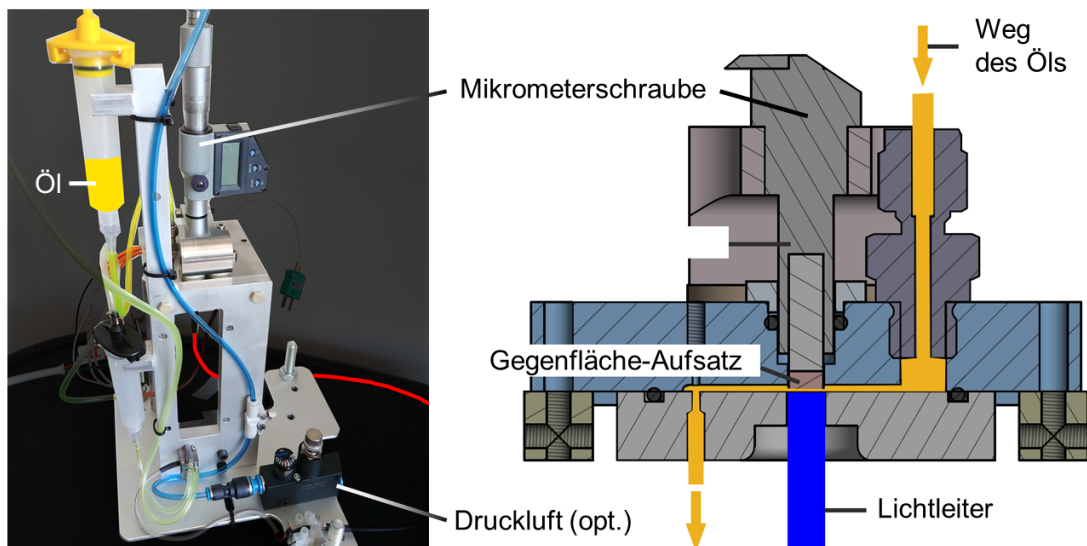


Abbildung 3.12: Prinzipieller Aufbau der Kalibriervorrichtung

Beim Betrieb der Kalibriervorrichtung wird ein kontinuierlicher Ölstrom erzeugt. Dieser ist zum einen notwendig, weil die Fluoreszenzwirkung eines Stoffes über die Zeit abnehmen kann und bei sehr dünnen Ölschichten von wenigen Mikrometern der Abfall in der Fluoreszenzstrahlung bei stehendem Film messbar wäre. Zum anderen ist er erforderlich, um Einflüsse der ungleichmäßigen Durchmischung des Öls (Temperatur, Konzentration) zu vermeiden. Des Weiteren besteht die Möglichkeit eines druckbetriebenen Ölkreislaufs mit einem Rücklaufbehälter, um im Vergleich zum pumpenbetriebenen Kreislauf den Einfluss der schwankenden Strömung zu eliminieren.

Da die Kalibrierung mit einem anderen Lichtleiter zwar vom selben Typ, aber von anderer Qualität bzw. Länge durchgeführt wird als jener, der tatsächlich im Motor als Messstellenlichtleiter verwendet wird, muss Letztere ebenfalls kalibriert werden. Aus

den Daten der Kalibriervorrichtung sowie wenigen Kalibrierpunkten des verwendeten Lichtleiters können die kompletten Kalibrierdaten approximiert werden. Dabei werden, abhängig vom Signalursprung, unterschiedliche Umrechnungsfaktoren bzw. Umrechnungsfunktionen verwendet. Für diese Transformationsrechnungen ist vorwiegend die Kenntnis der maximalen und minimalen Signale notwendig. Bei den minimalen Signalen handelt es sich um die Ergebnisse ohne Öl und bei den maximalen Signalen um die Messung von unendlichen Ölschichten. Die Stagnation der Fluoreszenzsignale tritt dabei aufgrund der Lichtabsorption in Flüssigkeiten schon ab einer Ölschicht von wenigen Millimetern auf und kann leicht mit begrenzten Ölmengen bestimmt werden.

Während die Kalibriermessungen mit den passenden Messkanälen, Messsensoren, Messtemperaturen etc. möglich sind, bringt die Variation dieser Komponenten einen hohen Aufwand mit sich. Für eine Verwendung von vier Messsensoren/Lichtleitern an jedem der vier Messkanäle des Systems bei vier unterschiedlichen Temperaturen wäre eine Erstellung von 64 Kalibrierkurven notwendig. Auch wenn die Einflüsse der genannten Komponenten auf die Messsignale nicht immer linear sind, können diese im Messbereich ausreichend genau durch lineare Transformationen beschrieben werden.

Bei einem Kollimator-Wechsel wird die Transformationsfunktion ausreichend genau durch eine Faktormultiplikation approximiert. Der Wechsel oder die Neueinstellung der Lichtleiterlinsen/Kollimatoren des Messsystems wirkt sich unmittelbar auf das Offsetsignal sowie auf das Fluoreszenzsignal aus und kann mit der Kenntnis der Kalibriersignale von Kollimator-A auf Kollimator-B berechnet werden:

$$f_{koll-B}(x) = \frac{f_{koll-B}^{max}}{f_{koll-A}^{max}} * f_{koll-A}(x), \quad (3.3)$$

mit $f_{koll-A}(x)$ als Kollimator-A Kalibrierfunktion des Messsystems über die Schichtdicken x , $f_{koll-B}(x)$ als Kollimator-B Kalibrierfunktion, f_{koll-A}^{max} als Maximalsignal der Kollimator-A Kalibrierfunktion und entsprechend bei Kollimator-B. Die Maximalsignale der Kalibrierfunktionen treten üblicherweise bei $x > 2000\mu m$ ein.

Ähnlich wird bei den übrigen Veränderungen des Messsystems oder der Messsensoren vorgegangen mit der linearen Transformationen der Form:

$$f_{chan-B}(x) = \frac{\Delta f_{chan-B}}{\Delta f_{chan-A}} * (f_{chan-A}(x) - f_{chan-A}^{min}) + f_{chan-B}^{min} \quad (3.4)$$

$$= \frac{f_{chan-B}^{max} - f_{chan-B}^{min}}{f_{chan-A}^{max} - f_{chan-A}^{min}} * (f_{chan-A}(x) - f_{chan-A}^{min}) + f_{chan-B}^{min}, \quad (3.5)$$

mit f_{chan-A} als Kalibrierfunktion mit verwendetem Channel-A (Detektor/LED-, Kollimator-, Lichtleiter/Messsensor-A) und entsprechend bei Channel-B. Die Funktion berücksichtigt die Einflüsse auf die Offsetsignale sowie auf die Fluoreszenzsignale. Zusätzlich wird die Umrechnung nach Gleichung 3.5 für die Approximation des Temperatureinflusses verwendet, wobei das Offsetsignal bei Temperaturänderungen konstant bleibt mit $f_{temp-A}^{min} = f_{temp-B}^{min}$.

Reflexion Einflüsse der Reflexion sind bei diesem optischen Messverfahren unvermeidbar und können bei sehr dünnen Schichten eine ausschlaggebende Rolle spielen. Zum einen wird das Anregungslicht von der bestrahlten Oberfläche reflektiert und steht zusätzlich für die Fluoreszenzerzeugung zur Verfügung. Zum anderen wird das erzeugte Fluoreszenzlicht auch reflektiert und verstärkt die aufgenommenen Fluoreszenzsignale. Falls sich vor der Messstelle keine reflektierende Oberfläche befindet, kann die Reflexion der Ölschichtoberfläche die Signale mit beeinflussen. Auch wenn die Reflexionskoeffizienten hier gering sind, können durch die Oberflächenform der Ölschicht lokale Fokuseffekte auftreten, die Signalspitzen verursachen. In Abbildung 3.13 sind die Reflexionseffekte dargestellt. Dabei ist zu beachten, dass die größte Fluoreszenzstrahlung im Lichtleiter bei der am stärksten reflektierenden Oberfläche entsteht und die kleinste bei der freistehenden Ölschicht.

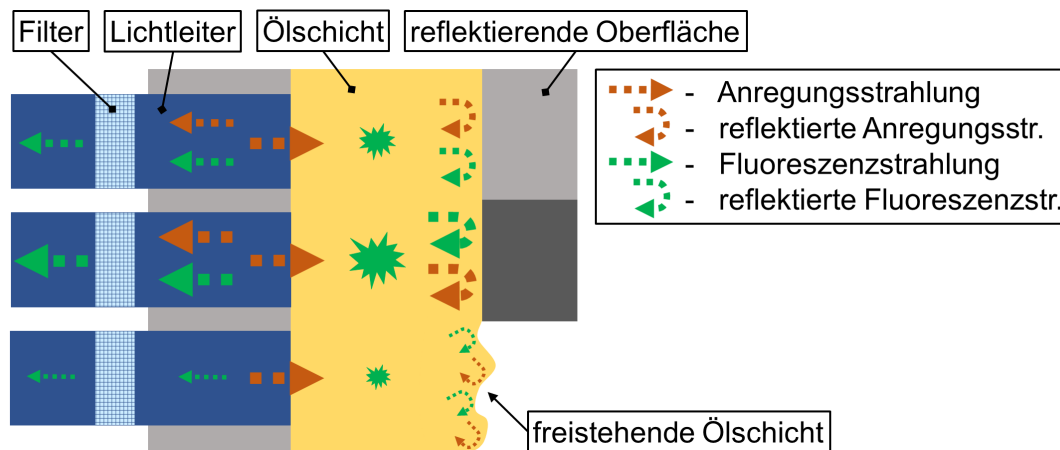


Abbildung 3.13: Einfluss der Reflexion auf das Fluoreszenzsignal

3.4.2 Kalibrierverfahren

Das Kalibrierverfahren für das Messsystem wurde anhand der Vorkenntnisse der Messtechnik und der gewonnenen Erfahrungen aus dem Betrieb des Systems zusammengestellt. Für das bessere Verständnis wird das Kalibrieren am Beispiel der Ölschicht der Laufbuchse eines Großmotors beschrieben.

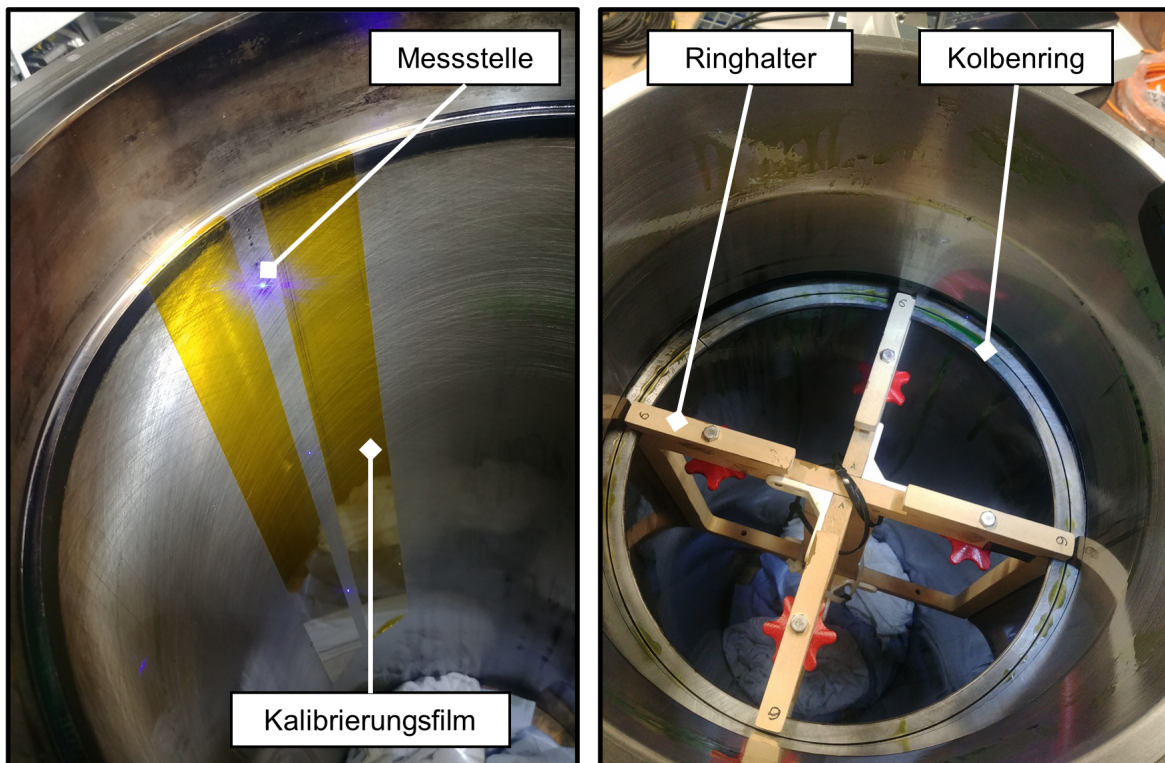


Abbildung 3.14: Generierung der Kalibriersignale an der Laufbuchse

- Zuerst müssen die Referenzsignale für jede Messstelle am Prüfkörper, in diesem Fall an der Laufbuchse, aufgezeichnet werden. Dazu reichen in der Regel die Signale der Messstellen ohne Öl und mit einer fest definierten Ölschichtdicke. In Abbildung 3.14 werden die Signale bei einer eingestellten Ölschichtdicke mithilfe der Benutzung einer Abstandsfolie gemessen. Weil die Reflexion der Gegenoberfläche einen hohen Einfluss auf die Signale haben kann, werden als Gegenoberflächen auch Kolbenringe des Kolbens verwendet. Diese Referenzsignale ohne und mit unterschiedlichen Gegenkörpern sind als erster Schritt in Abbildung 3.15 dargestellt (Kalibriersignale am Prüfkörper).
- Als zweiter Schritt werden die Fluoreszenzeinflüsse wie Temperatur, Lichtleitertyp, Öltyp und Tracerkonzentration mithilfe der Kalibriervorrichtung (Abbildung 3.12) im Labor aufgezeichnet. Um Fehler bei der anschließenden Signaltransformation zu vermeiden, sollten die Kalibrierkurven bei mehreren Temperaturen mit gleichzeitiger Verwendung des passenden Lichtleiters (Typ, Länge und Radius), Öls und der passenden Tracerkonzentration aufgezeichnet werden. Gegebenenfalls, aber nicht zwingend erforderlich kann die Kalibriervorrichtung mit unterschiedlichen Einsätzen für die Gegenoberfläche verwendet werden. In Abbildung 3.15 ist dieser Schritt in Form von Kalibriersignalen im Labor dargestellt.

- Als dritter Schritt werden Kalibrierkennfelder generiert, indem die Referenzsignale des Prüfkörpers, in der Regel eins bis drei Ölschichtzustände, mit den im Labor aufgezeichneten Signalverläufen korreliert werden. Die dabei entstehenden Kennfelder haben als Eingangsparameter die Detektorspannung, die Öltemperatur, den Öltyp, die Tracerkonzentration, den Lichtleiter und die Gegenoberfläche sowie als Ausgangsparameter die Ölschichtdicke in μm .
- Im letzten Schritt werden die Kalibrierkennfelder auf die Messdaten angewendet, wobei die Messdaten mit den fehlenden, aus den Messungen bekannten Parametern vervollständigt werden. Im Beispiel der Laufbuchsenmessung werden die aufgezeichneten Detektorspannungen und Öltemperaturen mit den Daten des Öltyps, der Tracerkonzentration, der Lichtleiter-Nummer und der Gegenoberflächennummer vervollständigt und mithilfe der Kennfelder in die Ölschichtdicke in μm überführt.

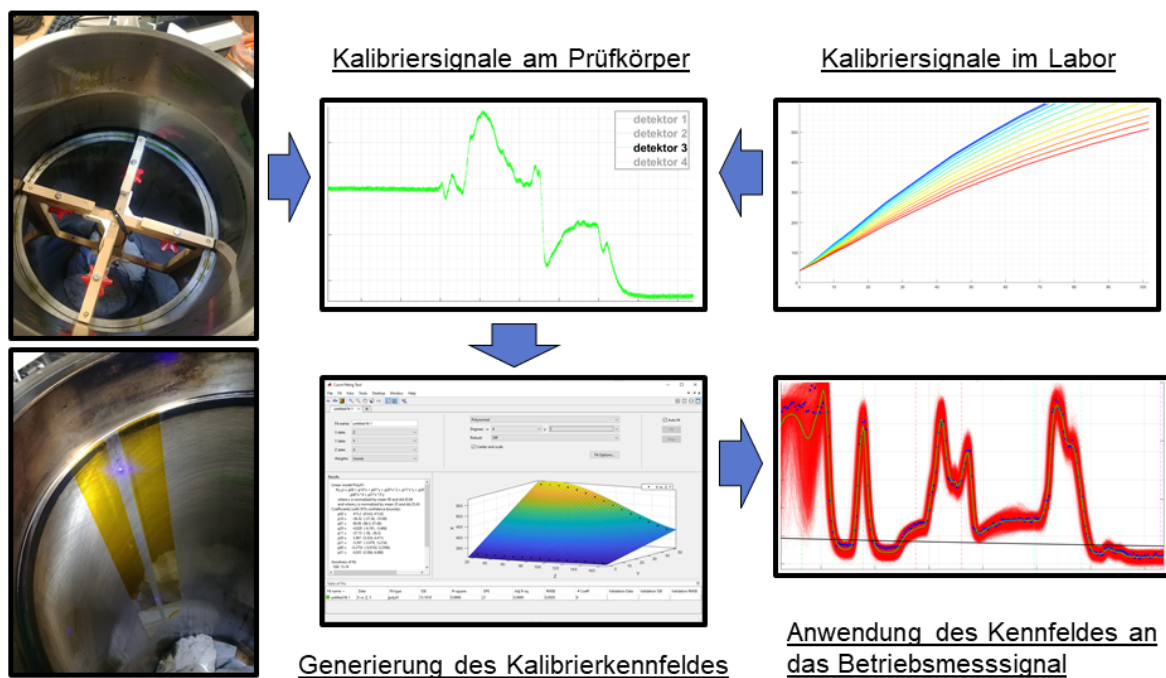


Abbildung 3.15: Schritte des Kalibrierverfahrens

Für die Erstellung der Kennfelder wurde eine Polynominterpolation aus der Gleichung 3.6 verwendet. Die Polynomgleichung stellt die Abhängigkeit der Messsignale von zwei Parametern dar: Öltemperatur und Ölschichtdicke. Dabei reicht es in der Regel aus, die Schichtdicke durch Polynome ersten bis zweiten Grades zu interpolieren, weil die Abhängigkeit der Fluoreszenz von der Ölmenge bei dünnen Schichten nahezu linear ist. Die Temperaturabhängigkeit erfordert hingegen Polynome höherer Ordnung.

$$f(x_1, x_2) = \sum_{k=n}^m p_{k0} * x_1^k + \sum_{l=n}^m p_{0l} * x_2^l + \sum_{k=n}^m \sum_{l=n}^m p_{kl} * x_1^k * x_2^l \quad (3.6)$$

$$f(x_1, x_2) = p_{00} + p_{10} * x_1 + p_{01} * x_2 + p_{20} * x_1^2 + p_{11} * x_1 * x_2 + p_{30} * x_1^3 + p_{21} * x_1^2 * x_2 + p_{40} * x_1^4 + p_{31} * x_1^3 * x_2 \quad (3.7)$$

Die im Fall der Laufbuchsenmessungen verwendete Formel kann der Gleichung 3.7 mit $f(x_1, x_2)$ als Fluoreszenzsignale, x_1 als Temperaturvariable und x_2 als Schichtdickenvariable entnommen werden. Die Interpolation wurde empirisch bestimmt und stellt eine Kombination aus ausreichender Genauigkeit und überschaubarem Rechenaufwand dar. Dabei werden bei den Berechnungen der Kalibrieralgorithmen die invertierten Kennfelder f^{-1} der zugehörigen Randbedingungen verwendet.

4 Messaufbau

Die Aufnahme und Analyse der Ölschichtdicken mithilfe des LIF-Messsystems werden an Beispielen der Laufbuchsenölschicht (Kapitel 5) sowie der Kolbenbolzengleitlager (Kapitel 6) behandelt.

Im Falle der Laufbuchse handelt es sich um einen Einzylinder-Forschungsgrößmotor, an dem im Betrieb die Schmierölschicht im Zylinder an multiplen Positionen untersucht wurde, während die Betriebsdrücke und -temperaturen sowie der Kolben mit den Kolbenringen sie beeinflusst haben. Der Motorprüfstand wird betrieben von der Arbeitsgruppe Schiffsmaschinenbau an der Technischen Universität Hamburg. Im Falle des Kolbenbolzengleitlagers handelt es sich um einen V6-Dieselerienmotor, an dem im Betrieb die Schmierölschicht im Gleitlager zwischen Kolbenbolzen und Kolben sowie das Schmieröl in der näheren Umgebung des Gleitlagers untersucht wurde. Der Motorprüfstand wird betrieben von dem Institut für Fahrzeugtechnik Stuttgart an der Universität Stuttgart. Zusätzlich wurde Zylinderdruckbeanspruchung des Messkolbens am Gleitlagerprüfstand des Instituts für Antriebs- und Fahrzeugtechnik an der Universität Kassel durchgeführt.

In diesem Kapitel werden die Merkmale der beiden Versuchsträger beschrieben und Einzelheiten der applizierten Messtechnik vermittelt.

4.1 Laufbuchse

4.1.1 Motorprüfstand Laufbuchse

Der Einzylinder-Forschungsmotor repräsentiert einen typischen mittelschnelllaufenden Schiffsmotor, der mit schiffahrtstypischen Dieselkraftstoffen sowie Erdgas betrieben werden kann. Der Hauptkraftstoff im Gasbetrieb ist entweder verflüssigtes Erdgas (LNG aus isoliertem Drucktank) oder komprimiertes Erdgas (CNG aus Gasflaschen). Es handelt sich um einen Dual-Fuel-Motor mit der Möglichkeit des Vollbereichs-Dieselsbetriebs sowie des Vollbereichs-Zündgasbetriebs. Der Prüfstand besteht aus einer Grundkonstruktion der MAN-Baureihe 32/40 (32 *cm* Bohrung und 40 *cm* Hub) mit einer direkt gekoppelten Wasserwirbelbremse und einem Zwischenlager.

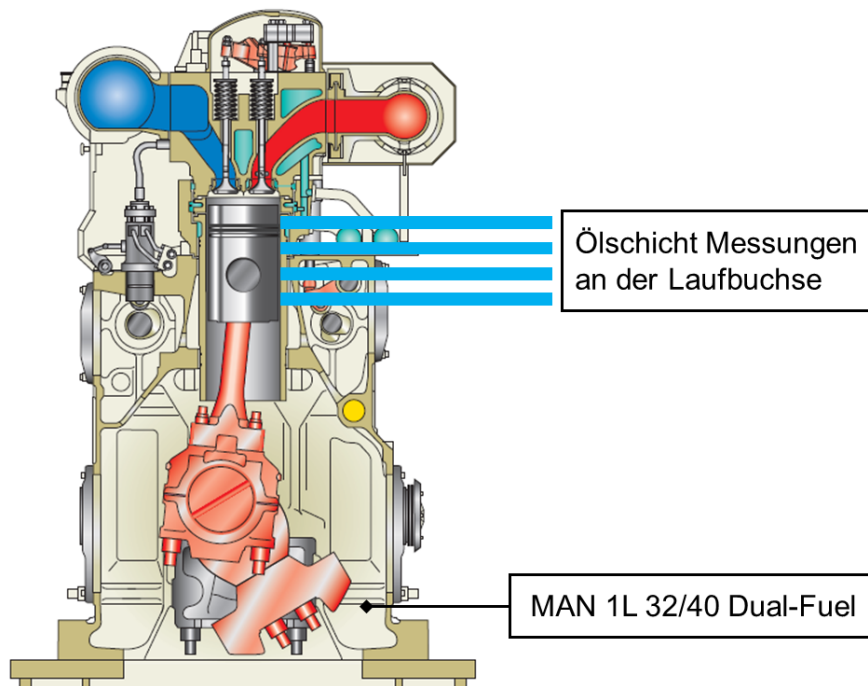


Abbildung 4.1: Einzylinder-Forschungsmotor mit Fluoreszenzmesstechnik

Im Laufe der Jahre wurde der Prüfstand mehrfach aufgerüstet, z. B. mit einer modernen SPS-Steuerung, einem Common-Rail-System und aktualisierten Messsystemen. Als Forschungsmotor ist er mit umfangreicher Messtechnik ausgestattet und verfügt über Eigenschaften wie einen unabhängig geregelten Ladeluft- und Abgasgegendruck, wodurch die Leistungsfähigkeit verschiedener Turbolader simuliert wird, und eine voll-elektronische Kontrolle über verschiedene Parameter des Motors sowie seiner simulierten Umgebung. Die wichtigsten Kenndaten des Motors sind in Tabelle 4.1 aufgeführt.

Gasbetrieb	Einheit	Wert
Hubraum	[l]	1?
Kolbenweg	[mm]	400
Drehzahl	[min ⁻¹]	750
Mittlere Kolbengeschwindigkeit	[m/s]	10
Nennleistung	[kW]	372
Effektiver Mitteldruck (BMEP)	[bar]	18,5
Drehmoment	[kNm]	4,7
Ladeluftdruck	[bar]	4,2

Tabelle 4.1: Kenndaten des Einzylinder-Forschungsmotors der MAN-Baureihe 32/40 – Betriebsparameter im Gasbetrieb

Eine besondere Erwähnung verdient der Kolben des Motors (Abbildung 4.2). Aufgrund des starken Einflusses des Kolbens auf die Ölschicht der Laibuchse ist die Form

des Ringpakets sowie der Ringe bei der Analyse der Messsignale ausschlaggebend. Dabei sind die Größe und die Abstände der Ringe und Ringstege sowie die Form und der Abstand zu der Laufbuchse von Bedeutung. Außerdem ist zu bemerken, dass der Ringpaket beim Übergang zum Kolbenhemd und zum Feuersteg eine Schulter besitzt.

Bei der Laufbuchse des Motors handelt es sich um eine einteilige nasse Laufbuchse aus Grauguss mit moderner Honung und vier Ölversorgungsstellen. Die Zylinderlauffläche weist eine Plateauhonung auf mit einem Honwinkel $\alpha_h = 60^\circ$, einer Kernrautiefe von $1,0\text{--}2,4 \mu\text{m}$, einer reduzierten Spitzenhöhe von $0,3\text{--}0,8 \mu\text{m}$ und einer reduzierten Riefentiefe von $2,4\text{--}4,2 \mu\text{m}$ (Abbildung 2.13 & 2.12).

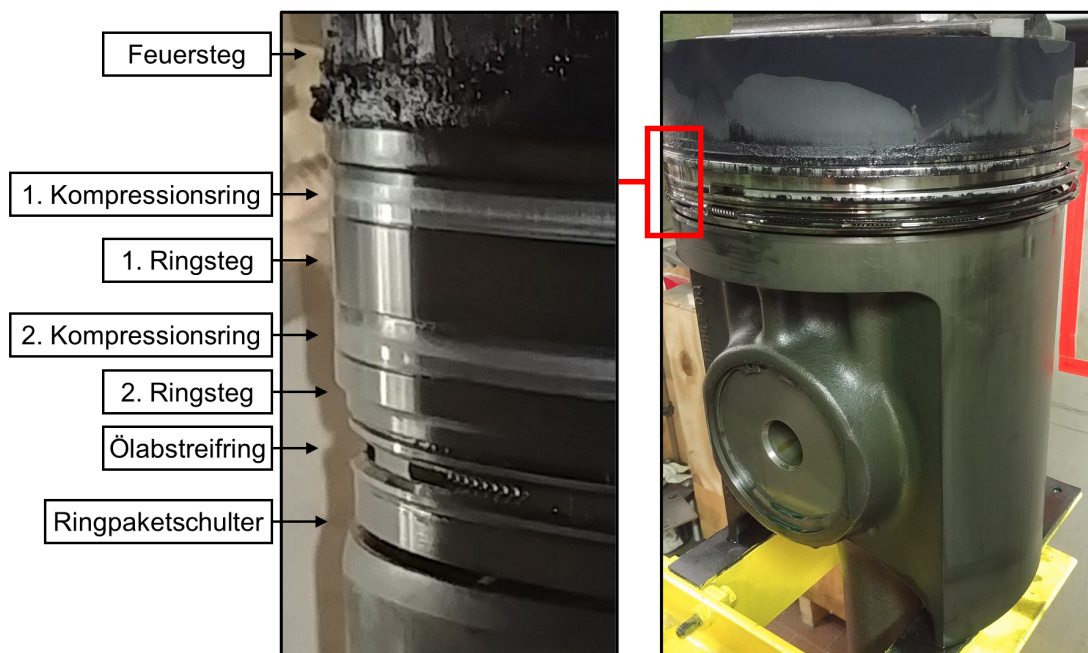


Abbildung 4.2: Großkolben des Forschungsmotors

4.1.2 Applizierung Laufbuchse

Grundsätzlich ist bei dem Aufbau der Messstellen zu gewährleisten, dass das Lichtleitende bündig mit der Wand der Laufbuchse montiert wird. Dies kann als lösbare Verbindung oder als Klebeverbindung realisiert werden. Im Falle eines Verklebens der Lichtleiter mit der Wand der Laufbuchse können die Lichtleitenden durch Nachschleifen perfekt an die Wand angepasst werden, wodurch sich kein Einfluss auf den Ölfilm ergibt (Abbildung 4.3 (A)). Der Nachteil dieses Vorgehens ist es, dass die Verbindung permanent ist und bei einer Beschädigung der Lichtleiter im Betrieb oder beim Ein- bzw. Ausbau die komplette Laufbuchse ausgetauscht oder neu appliziert werden muss.

Eine gängigere Alternative ist der Einbau der Lichtleiter in größeren Ferrulen, die ihrerseits mit einer Einbaubuchse verklebt sind (Abbildung 4.3 (C)). Dank diesem Aufbau kann die Einbaubuchse mit der benötigten Anzahl und der erforderlichen Position der Lichtleiter-Ferrulen vorgefertigt, an einer Dummy-Laufbuchse vorbereitet und dann an die Motor-Laufbuchse geschraubt werden. Die Nachteile dieses Vorgehens sind zum einen die Verwendung der Dummy-Laufbuchse zur Anpassung der Einbaubuchse und zum anderen die nicht zu vermeidenden fertigungsbedingten Spalten zwischen der Laufbuchsenbohrungen an den Messstellen und den Lichtleiter-Ferrulen sowie der Abstand zwischen den Lichtleiterenden und der Wand der Laufbuchse. Dabei kann der Signaleinfluss, der aus dem Abstand des Lichtleiterendes zur Wand der Laufbuchse resultiert, in der Regel auskalibriert werden, indem der Hohlraum zwischen diesen beiden Elementen mechanisch oder optisch und mithilfe des vorhandenen Messsystems ausgemessen wird.

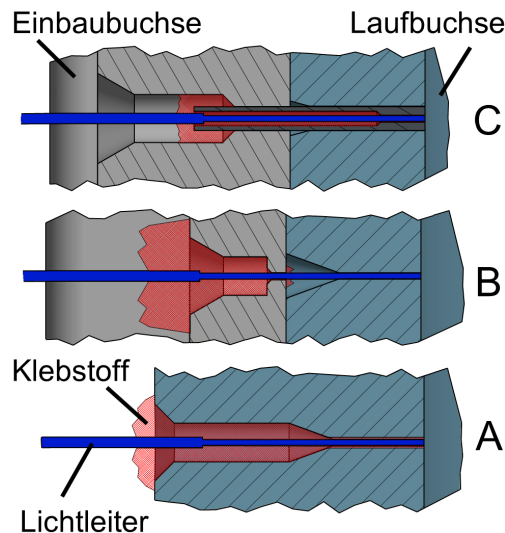


Abbildung 4.3: Lichtleiter-Messstellen Aufbauvarianten

Der Einfluss auf den Ölfilm, der sich aus den geometrischen Unebenheiten ergibt, ist nicht zu vermeiden. Bei jedem Einsetzen der Einbaubuchsen ist darauf zu achten, dass die Lichtleiter nicht in den Zylinderraum abstehen.

Eine weitere Variante ist in Abbildung 4.3 (B) dargestellt. Hier wird wie in der Variante (C) eine Einbaubuchse verwendet, wobei die Enden der Lichtleiter lose sind und in die minimalen Bohrungen der Laufbuchse eingesetzt werden. Der Vorteil dieser Einbauart ist die minimalen Veränderungen der Laufbuchse mit gleichzeitiger Möglichkeit des Austausches der Lichtleiter. Die Nachteile bestehen in einem erhöhten Aufwand bei der Fertigung der Einsätze mit den losen Lichtleiterenden. Ein weiteres Merkmal der Varianten (C) und (B) ist die Notwendigkeit zur Abdichtung bei den Einbaubuchsen. Diese

Einbauvarianten können auf andere Prüfkörper angewandt werden und beschränken sich nicht auf die Laufbuchse.

Für die Messungen an der gegebenen Laufbuchse wurde eine Kombination aus den Varianten (A) und (C) verwendet (Abbildung 4.4), wobei die Vorteile der Abdichtung (A) und der Austauschbarkeit der Einsatzbuchse (C) kombiniert wurden.

Eine weitere Besonderheit, die beachtet werden muss, ist das Material der Lichtleiter-Ferrulen. Es muss dem Laufbuchsenwerkstoff in thermischer Ausdehnung entsprechen, denn unterschiedliche Ausdehnungskoeffizienten können dazu führen, dass der Hohlraum vor der Lichtleitermessstelle sich bei einer Änderung der Laufbuchsentemperatur verändert.

4.1.3 Messstellen Laufbuchse

Die Laufbuchsenmessungen erfolgen über Lichtleiter (optische Sensoren), die die Zylinderwand in verschiedenen Winkeln und Positionen durchstoßen. Um die Spezifikationen der Anwendung zu erfüllen, wie die minimale Anpassung der Buchsen-/Motorengeometrie, die strukturelle Festigkeit der Zylinderlaufbuchse oder die Austausch-/Reparierbarkeit der Fasern, werden die optischen Fasern in sogenannte Ferrulen eingeklebt, die wiederum in die Bohrungen der Zylinderlaufbuchse mit $\varnothing 2 \text{ mm}$ eingeklebt werden. Diese Ferrulen sind wie in Abbildung 4.4 dargestellt aufgebaut und bestehen aus einem Material mit ähnlichen mechanischen und thermischen Eigenschaften wie die Zylinderbuchse selbst. Die Messfläche der Ferrulen sowie der in sie eingeklebten Lichtleiter ist konkav poliert. Die Messoberfläche der Ferrulen weisen keine Honung auf. Die Lichtleiter werden senkrecht zur Zylinderoberfläche oder in einem Winkel von etwa 75° eingebaut, um eine Kollision mit dem Dichtungsring der Laufbuchse zu vermeiden.

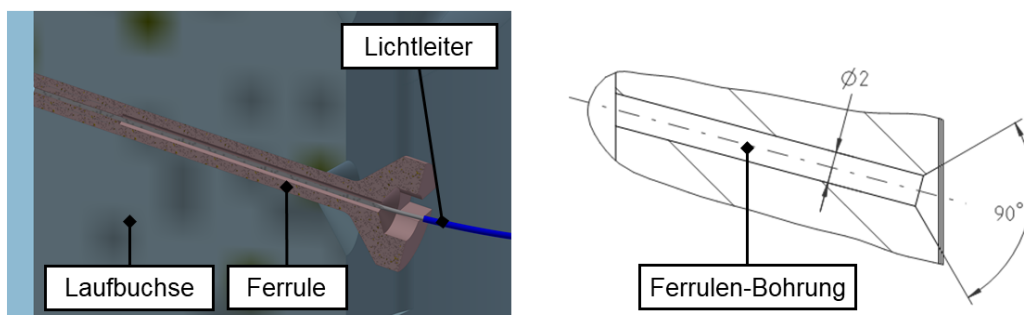


Abbildung 4.4: Konstruktion der Lichtleiter-Messstellen der Laufbuchse

Der abgeschrägte Ferrulenkopf ist mit der Laufbuchse so verklebt, dass er dem Zylinderdruck und den mechanischen Beanspruchungen und Vibrationen standhält, aber dennoch durch eine externe Torsionskraft entfernt werden kann. Nach diesem Prinzip können die Ferrulen mit den optischen Fasern entfernt und bei Bedarf durch eine Anpassung der Klebefläche repariert oder ersetzt werden. In statischen Vorversuchen wurden die erforderliche Klebekraft und die notwendige Klebefläche untersucht. Zur Maximierung der Klebkraft wurde ein thermisch aushärtendes 2K-Epoxid verwendet.

Um die Gesamtzahl der Messpositionen zu verringern, wurden sie nur auf der Abgas- und Ladeluftseite angebracht, wo die Seitenkräfte des Kolbens am größten sind. Gemäß der in Abbildung 4.5 dargestellten räumlichen Definition sind dies die Ost- (E) und die Westpositionen (W). In der Abbildung ist die Nordposition (N) zur Antriebswelle hin ausgerichtet. Für die vertikalen Positionen wurden drei Hauptabschnitte festgelegt: die Positionen im oberen Totpunkt (OT) und unteren Totpunkt (UT) sowie ein Abschnitt mit hoher Kolbengeschwindigkeit zwischen den beiden erstgenannten.

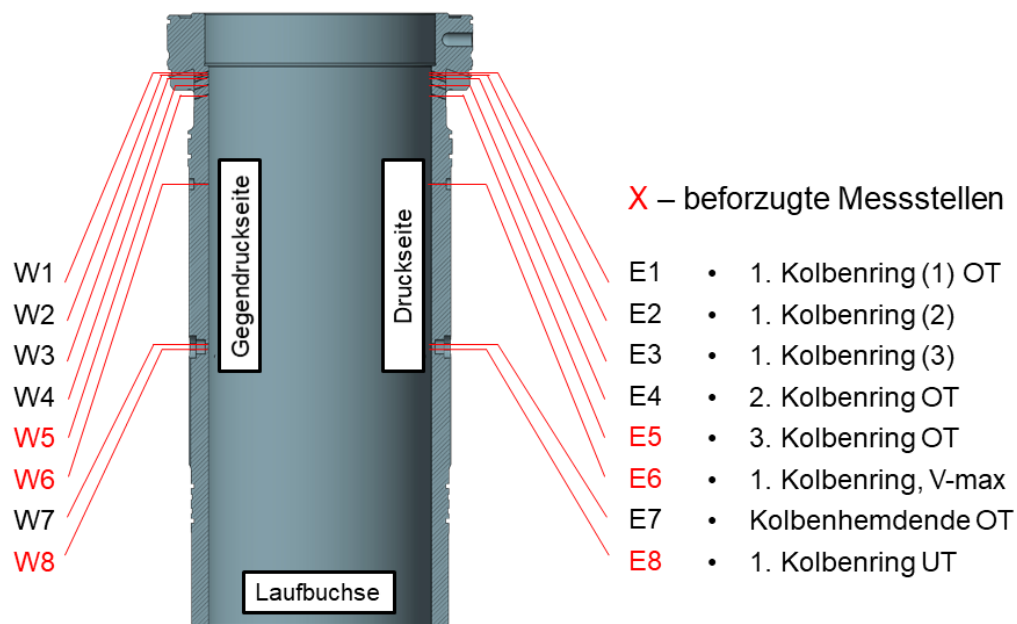


Abbildung 4.5: Messpositionen an der Laufbuchse

Die Gesamtzahl der in der Zylinderlaufbuchse installierten optischen Fasern beträgt 16 Stück, und die für die Messungen präferierten Positionen sind farblich gekennzeichnet. Die Messpositionen 1 bis 5 sind auf der Höhe der Kolbenringe, während der Kolben im OT steht, und die Messpositionen 7 bis 8 auf jener Höhe, bei der der Kolben im UT steht. Die Messposition 6 liegt auf der Höhe der größten Geschwindigkeit der Kolbenringe. Zusätzlich wurden Thermoelementmesspunkte in der Nähe der optischen Messpunkte und radial verteilt auf der Zylinderlaufbuchse installiert.

Da die Änderungen an den bestehenden Teilen des Motors auf ein Minimum reduziert werden mussten, wurden die Lichtleiter der unteren Ebene durch die bestehenden Motorgehäusekanäle geführt und die Lichtleiter der oberen und mittleren Ebenen durch den Laufbuchsenstützring geführt. Zu diesem Zweck war eine zusätzliche Bearbeitung des Laufbuchsenstützringes erforderlich, ohne dass die vorhandenen Kühlmittel- oder Ölkreisläufe beeinträchtigt wurden. Um die Druckintegrität der OT-Messpunkte zu überprüfen, wurde eine zusätzliche Drucküberwachung im Laufbuchsenstützring installiert. Zusätzlich wurde ein Konzept für die Montage und Demontage der Laufbuchse sowie für den möglichen Austausch und die Reparatur der Messstellen entwickelt.

Die OT-Ebene der Laufbuchse befindet sich oberhalb der oberen Platte des Motorgehäuses und stellte die größte Herausforderung bei der Konstruktion der Messstellen dar. Der Mangel an verfügbarem Platz in Kombination mit den minimalen Biegeradien der Lichtleiter und dem Ziel, die Motorkomponenten so wenig wie möglich zu verändern, führten zu Ausfräsungen (Aussparungen) in der rotationssymmetrischen Oberfläche der Zylinderlaufbuchse. Als Folge ergab sich eine lokal reduzierte Zylinderwandstärke.

Die Gestaltung dieser Aussparungen war entscheidend für die strukturelle Festigkeit der Zylinderlaufbuchse. Mithilfe von FEM-Analysen wurde das Design optimiert. Haupteinflussfaktoren bei der Konstruktion sind die minimale Zylinderwanddicke bzw. die Tiefe der Aussparungen, gemessen von der Außenfläche der Zylinderlaufbuchse, sowie der Öffnungswinkel und die Radien. Größere Öffnungswinkel und Radien führten zu einer reduzierten Auflagefläche beim Stützring, kleinere Öffnungswinkel und Radien zu höheren lokalen Spannungsspitzen an der Laufbuchse. In einem iterativen Prozess

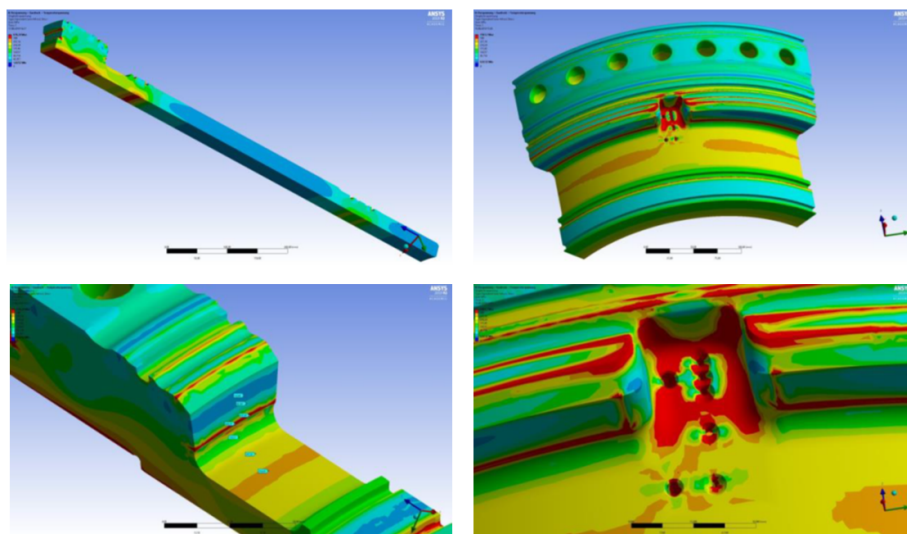


Abbildung 4.6: FEM-Modelle der Laufbuchsenkonstruktion [30]

der FEM-Analyse und des Re-Designs mussten die Ermüdung bei hoher und niedriger Lastspielzahl sowie die maximale Spannung und Dehnung berücksichtigt werden. Abbildung 4.6 zeigt zwei verschiedene Arten der verwendeten FEM-Modelle. Links im Bild ist ein Volllängenschnitt der neuen einteiligen Zylinderlaufbuchse dargestellt. Er stellt einen Winkel von $360/29^\circ$ dar. Rechts ist ein Viertelschnitt des Bereichs um die Aussparungen zu sehen. Beiden Modellen wurden vereinfachte Modelle der tragenden Struktur beigegefügt.

In Abbildung 4.7 sind die verschiedenen Phasen des Entwurfsprozesses für die Ausfräsungen dargestellt. Den finalen Entwurf zeigt Abbildung 4.7 rechts. Angepasst wurden die Form der Ausfräsungen, die Positionen der Lichtleiter-Ferrulen und Thermoelementen sowie die Ausrichtung der Lichtleiter-Ferrulen. Durch die Verwendung eines horizontalen (Messstellen 1–5) und vertikalen Winkels (Messstellen 1–3) blieben die inneren Enden der Sensoren an den gewünschten Positionen. Der gleiche Ansatz wurde bei den restlichen Messpositionen verwendet, wobei das Platzangebot sowie die mechanischen Belastungen hier viel vorteilhafter waren.

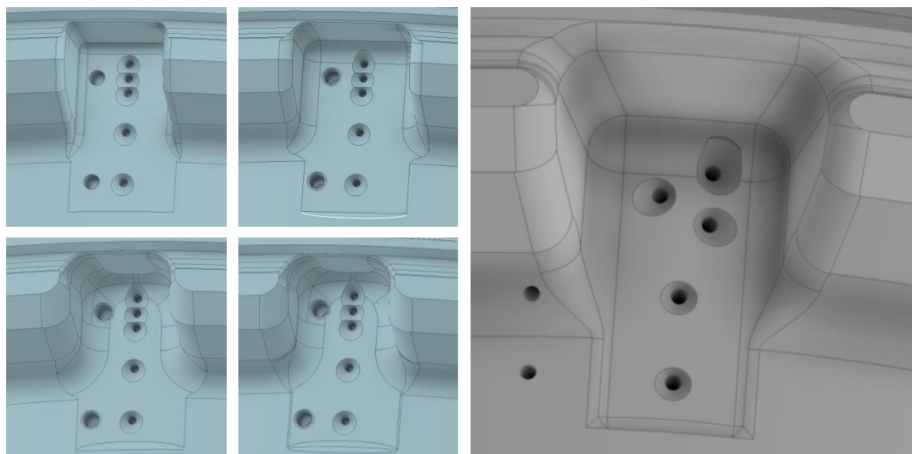


Abbildung 4.7: Konstruktion der Ausfräsungen für obere Messstellen der Laufbuchse; finale Konstruktion (rechts)

Um die Zylinderlaufbuchse mit angeschlossenen bzw. verklebten Leitungen in das Gehäuse des Motors einbauen zu können, wurde ein senkrechter Kanal in die Außenfläche der Zylinderlaufbuchse gefräst. Die Gestaltung der Ausschnitte und des Kanals ist in Abbildung 4.8 (links) zu sehen. Da die Spannungen in diesem Bereich wesentlich geringer sind als in dem oberen Bereich der Laufbuchse, ergab die FEM-Analyse, dass die ursprüngliche Konstruktion bereits ausreichend war. In Abbildung 4.8 (rechts oben) sind die Thermoelement- und die Lichtleiterführung mit den Führungselementen und in Abbildung 4.8 (rechts unten) die Messpositionen 1 bis 5 von innen dargestellt, wobei die Position 5 bereits mit der Ferrule belegt ist.



Abbildung 4.8: Leitungsverlegung an der Laufbuchse (links und oben); Messstellenbohrungen von innen (rechts unten)

Führungselemente Um die Montage und den Einbau der Zylinderlaufbuchse zu gewährleisten, wurden zusätzliche Führungselemente konstruiert. Diese Elemente haben zum einen die Aufgabe, die Lichtleiter von den oberen Messpositionen entlang der Laufbuchse zu führen und zum anderen die Laufbuchse bei der Montage mit dem Stützring zu positionieren. Der obere Teil der Führungselemente passt in eine Aussparung in der Zylinderlaufbuchse in der OT-Ebene, der untere Teil in eine Aussparung im Stützring.

Aufgrund der komplizierten Geometrie dieser Führungselemente und der Forderung nach Temperaturbeständigkeit im Motorbetrieb fiel die Wahl des Herstellungsverfahrens auf den 3D-Druck. Das verwendete Filamentmaterial ist ein amorphes Polyethylenterephthalat (PET) mit zugesetztem Kristallisationsbeschleuniger. Nach dem Druck wurden die Bauteile getempert, um den temperaturbeständigen teilkristallinen Zustand zu erreichen.

In Abbildung 4.9 sind die Führungselemente dargestellt, die für die Leitung der ersten fünf Lichtleiter unmittelbar vor den Messstellen verantwortlich sind. Eine zusätzliche Funktion dieser Führungselemente ist die Sicherung der Messstellen-Ferrulen bei einer Zerstörung der Klebeverbindung im Betrieb, z. B. durch Überdrücke, und sie hat sich im Betrieb als nützlich erwiesen.

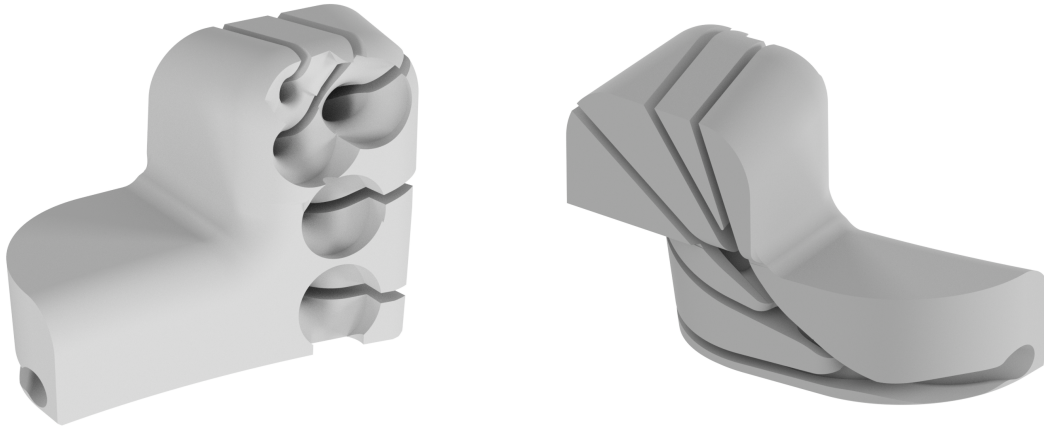


Abbildung 4.9: Führungselemente der Laufbuchse für Lichtleiterführung der oberen Messstellen

4.1.4 Öl Laufbuchse

Das Schmieröl des Motors hat eine geringe Eigenfluoreszenz und wurde für erfolgreiche Messungen mit einem Fluoreszenzmittel vermischt. Dieser Stoff muss die geforderten Fluoreszenzeigenschaften erfüllen, ohne die Eigenschaften des Öls zu verändern oder den Motorprüfstand in irgendeiner Weise zu beeinträchtigen. Das Mittel muss stets in Lösung bleiben und darf weder während des Motorbetriebs noch bei längeren Stillstandszeiten ohne Erwärmung agglomerieren, ablagern oder Schaum bilden. Als Fluoreszenzmittel wurde *Lumilux CD 345* der Firma *Honeywell International Inc.* eingesetzt (siehe Kapitel 3.3).

Diese pulverförmige Substanz wurde in einem konstanten Verhältnis mit dem Motoröl vermischt, um eine fluoreszierende Lösung zu erhalten (Abbildung 4.10). Für die ersten Motormessungen wurde ein reduziertes Mischungsverhältnis von 0,05 % gewählt, um die Entmischung oder das Verstopfen des Filters zu untersuchen, wobei es das Ziel war, die Konzentration auf 0,1 % zu erhöhen. Des Weiteren wurden Ausflockungstests und massenspektrometrische Untersuchungen von gemischtem Schmieröl erfolgreich durchgeführt.

Im Falle des Versuchsmotors mit einem Öllangebot im Schmierölkreislauf von bis zu 1000 Litern können die Menge des Fluoreszenzmittels und seine Durchmischung ein Problem darstellen. Darüber hinaus ist die Dauer der Durchmischung nicht zu vernachlässigen. Unter Laborbedingungen kann die komplette Durchmischung einer geringen Menge (< 100 ml) Öl mit 0,12 % Fluoreszenzmittelkonzentration bis zu 90 Minuten dauern. Eine mögliche Abhilfe des Problems bei einer 1000-Liter-Mischung ist die Verkleinerung des Motorschmierölkreislaufs und des Ölvorratsbehälters. Dies würde gleich-

zeitig die benötigte Fluoreszenzmittelmenge und die Durchmischungszeit minimieren. Des Weiteren ist bei der Durchmischung darauf zu achten, dass keine strömungsfreien Räume im Ölkreislauf und vor allem am Boden des Ölvorratsbehälters entstehen, in denen sich das Fluoreszenzpulver absetzen könnte.

In Abbildung 4.10 ist das Mischverfahren dargestellt. Das betriebswarme Öl wird in ein Fass gepumpt und mit einem Heizmantel auf Temperatur gehalten. Nachfolgend wird eine Überkonzentration des Fluoreszenzfarbstoffs in das Fass zugegeben und mehrere Stunden lang mithilfe einer Ölpumpe umgewälzt. Schließlich wird das Gemisch zurück in den Öltank gepumpt und mit dem darin befindlichen Restöl vermischt. Dies gewährleistet es, dass das nicht in die Lösung gebrachte Fluoreszenzmittel sich am Boden des Fasses absetzt und nicht am Boden der Motorölwanne. Die Fassmischmethode wird so lange wiederholt, bis die finale Konzentration in der Ölwanne erreicht ist. Die Hauptölpumpe des Motors wird zur Umwälzung des Öls und zur gleichmäßigen Verteilung des Fluoreszenzfarbstoffs verwendet. Abbildung 4.10 (links) zeigt das Öl in der Motorölwanne nach dem Mischen.

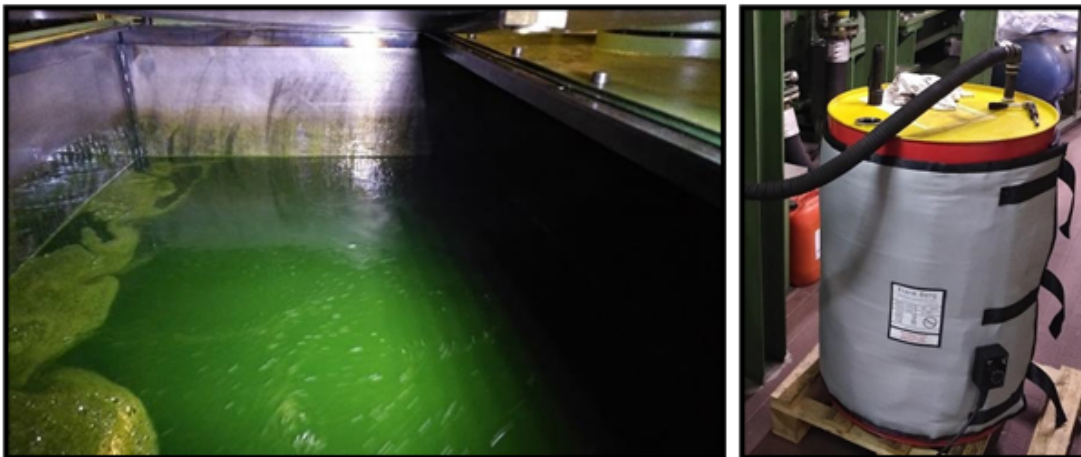


Abbildung 4.10: Ölwanne des Großmotors mit fluoreszierendem Öl (links); Ölfass mit Heizung zum Tracer-Vermischen (rechts)

Es ist zu beachten, dass bei stillstehendem Öl und geringen Temperaturen eine Entmischung des Fluoreszenzmittels stattfindet und bei längerem Stillstehen des Öls dieses wieder in kontinuierliche Bewegung versetzt und beheizt werden muss, bis eine vollständige Durchmischung eintritt. Abgesehen von der mechanischen Entmischung des Fluoreszenzmittels kann es infolge von Ausbleichen (Kapitel 2.3.3) zu einer Abnahme der Fluoreszenzstrahlung und folglich auch des Fluoreszenzsignals kommen. Aufgrund des großen zeitlichen Aufwands bei den Langzeitversuchen wurden die einzelnen Ein-

flüsse beim Ausbleichen der Ölmischungen nicht untersucht. Anhand der verfügbaren Ölproben während der Motormessungen und der Laboruntersuchungen kann davon ausgegangen werden, dass eine Zugabe von zusätzlichem Fluoreszenzmittel bei längeren Standzeiten des Motoröls (Monate/Jahre) erforderlich ist.

Aus den zur Verfügung stehenden Proben lässt sich folgern, dass eine Abnahme in der Fluoreszenzintensität von 0,63 % pro Monat bei externen Fluoreszenzmitteln, d. h. als Pulver und nicht in Lösung, und von 0,98 % pro Monat bei einer internen Motorölmischung im Motorkreislauf stattfindet. Die Anzahl der Proben für diese Untersuchungen ist begrenzt und sie wurden nicht unter konstanten externen Bedingungen wie Sauerstoffzufuhr oder Lichtbestrahlung gehalten, weshalb die angegebenen Werte als grobe Richtwerte zu deuten sind. Bei einer Standzeit der Versuchsträger von mehreren Monaten entsteht eine deutliche Abnahme in der Signalausbeute der Fluoreszenzmessungen.

4.2 Kolbenbolzen

4.2.1 Motorprüfstand Kolbenbolzen

Beim Versuchsträger handelt es sich um einen 3,0-Liter-V6-Dieselmotor des Typs OM642 LS der Firma *Daimler AG* mit einer Nennleistung von 195 kW. Das Nenndrehmoment des Aggregats beträgt 620 Nm in einem Drehzahlbereich zwischen 1.600 min^{-1} und 2.400 min^{-1} . Weitere Motor肯ndaten können Tabelle 4.2 entnommen werden. Im Folgenden soll näher auf die Komponenten der Kolbenbolzenlagerung des zu untersuchenden Versuchsmotors eingegangen werden, die in Abbildung 2.10 dargestellt sind.

	Einheit	Wert
Zylinderanordnung/-zahl	[-]	V6
Bankwinkel	[°Grad]	72
Hubraum	[cm^3]	2.987
Hub	[mm]	92
Bohrung	[mm]	83
Pleuellänge	[mm]	168
Nennleistung bei Drehzahl	[kW] [min^{-1}]	195 3.800
Nenndrehmoment bei Drehzahl	[Nm] [min^{-1}]	620 1.600–2.400

Tabelle 4.2: Kenndaten des V6-Dieselmotors OM642 LS der Firma Daimler AG [1]



Abbildung 4.11: Daimler-OM642-Serie

Kolbenbolzen Die Belastung des aus Einsatzstahl gefertigten Kolbenbolzens setzt sich aus den Gas- und Massenkräften und den zwischen Pleuel bzw. Bolzennabe und Kolbenbolzen wirkenden Reibmomenten zusammen und resultiert in einer eher geringen Drehbewegung des Kolbenbolzens. Dieser Zustand in Kombination mit keiner aktiven Ölversorgung der Kolbenbolzenlagerung sorgt für undefinierte bzw. ungünstige Schmierverhältnisse. Aufgrund der höheren mechanischen Belastungen ist zur Verbesserung der Verschleiß- und Gleiteigenschaften an der Außenseite des Kolbenbolzens eine Kohlenstoffschicht bzw. DLC-Beschichtung (Diamond like Carbon) angebracht.

Die Bauform des Kolbenbolzens ist außen durchgängig zylindrisch gestaltet und die Innenbohrung weitet sich konisch zu beiden Enden hin auf. Die geometrische Vermessung des verwendeten Kolbenbolzens ergab, dass die Kontur an der Außenfläche einen konstanten zylindrischen Durchmesser von 30 mm besitzt und dass dieser ein sehr geringes bis gar kein Untermaß aufweist (zwischen 0 ‰ und $-0,06\text{ ‰}$). Der Kolbenbolzen ist in der Kolbennabe schwimmend gelagert und wird durch zwei Runddrahtsprengringe seitlich gesichert. Die Schmierung des Kolbenbolzengleitlagers erfolgt durch das im Kurbelgehäuse vorhandene Spritzöl sowie eine speziell ausgerichtete Spritzdüse mit fester Position.

Messwertübertragungssystem Zur Übertragung der Messwerte aus drehenden bzw. oszillierenden Bauteilen stehen im Allgemeinen sowohl berührungslose als auch leitungsgebundene Lösungen zur Auswahl, wobei im Falle der Lichtleiter nur die leitungsgebundene Variante in Frage kommt. Im Rahmen der Motormesskampagnen wurden außer Lichtleiterleitungen noch Signale der Wirbelstromsensoren, der kapazitiven Sensoren sowie der Temperatursensoren über ein Messwertübertragungssystem übertragen.

Da zusätzlich zu Fluoreszenzmessungen (Lichtleiter) eine Vielzahl von weiteren Sensoren am Kolben verbaut wurde, war der parallele Einsatz von insgesamt zwei Messschwingensystemen notwendig. Die praktische Umsetzung ist in Abbildung 4.12 (links) dargestellt. Für die Aufnahme der Fluoreszenzmessungen ist nur das Messschwingensystem 1 erforderlich. Es wird im unteren Bereich der Kolbennabe angebunden und überträgt alle Messleitungen, die räumlich im Bereich des Kolbens appliziert sind. Analog dazu werden alle Messleitungen im Pleuel über das Messschwingensystem 2 geführt, das im unteren Bereich des Pleuellagerdeckels angebunden ist. Die größte Herausforderung bei der konstruktiven Auslegung war das Unterbringen der Leitungen in dem zur Verfügung stehenden Bauraum, da aufgrund der Motorbauweise und des Vorhandenseins einer Split-Pin-Kurbelwelle der Abstand zwischen zwei Pleueln sehr gering ist.

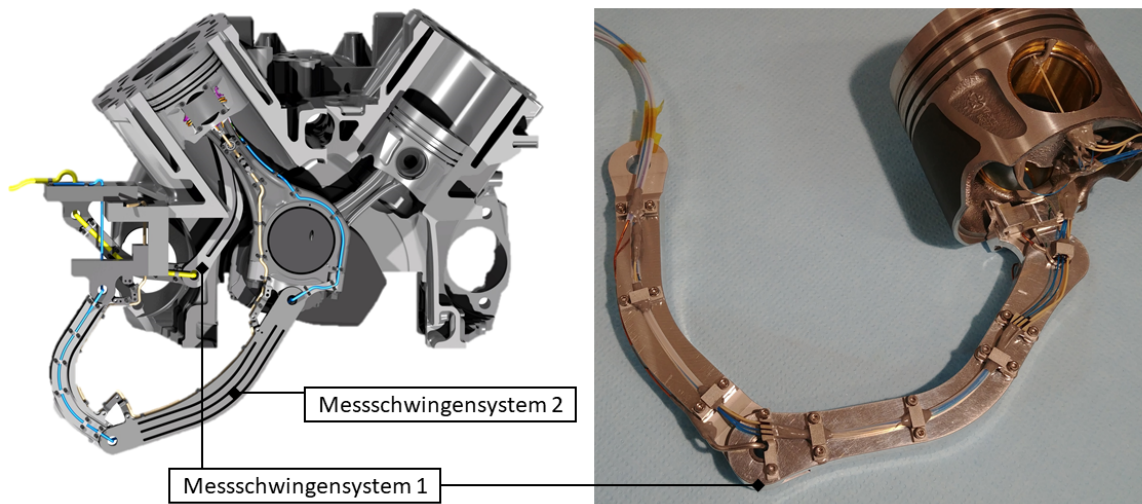


Abbildung 4.12: Motor-Schwingensystem (links); applizierter Fluoreszenz-Kolben mit Schwinge (rechts)

Für die Führung der Lichtleiter- und der Kapillarleitungen wurde auf der Basis der vorhandenen Konzepte ein modifiziertes Führungssystem entwickelt. Ein übliches Vorgehen mit der Ausnutzung der Torsionsbelastung der Leitungen war in diesem Fall nicht möglich, da die daraus resultierende Verbreiterung des Messschwingensystems zur Einhaltung der minimalen Biegeradien der Leitungen und die zusätzlichen Veränderungen am Motor nicht realisierbar waren. Aus diesem Grund wurde eine auf Biegung belastete Führung der Leitungen untersucht.

Die nach den erfolgreichen Laboruntersuchungen, z. B. dem Lichtleiter-Langzeit-Biegeversuch, entstandene Messschwingenkonstruktion ist in Abbildung 4.12 (rechts) dargestellt. Dabei können sich die Leitungen nur an den Gelenken frei bewegen, sind aber vor und nach den Gelenken in Position und Richtung fixiert. Dieses Konzept kann-

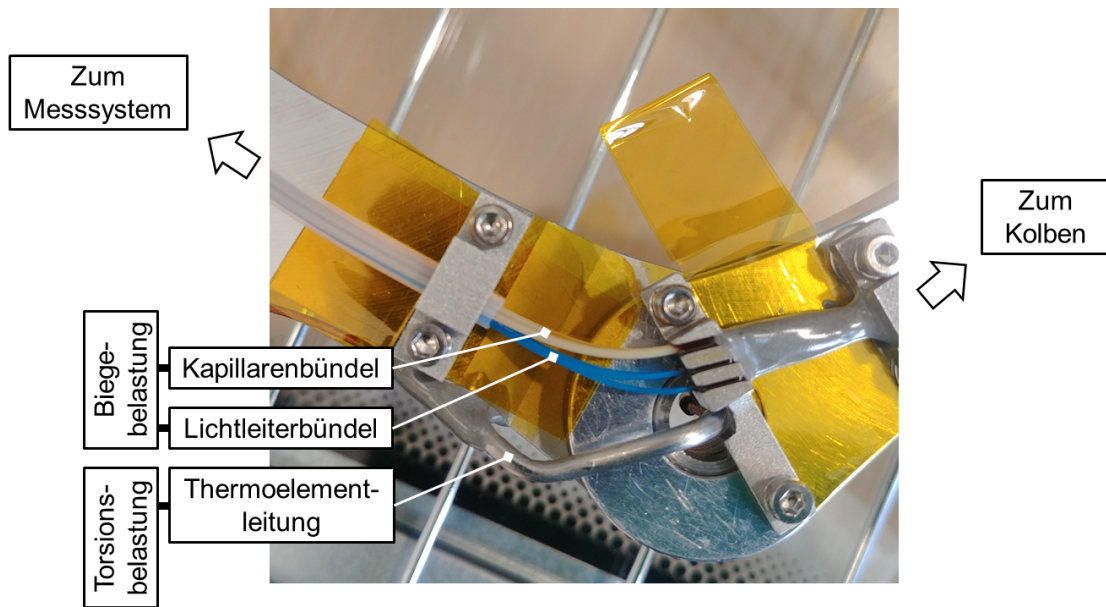


Abbildung 4.13: Kabelführung an einem Schwingarm

te nur realisiert werden, indem die Lichtleiterfaser im Durchmesser reduziert wurde und ein doppeltes, mechanisch belastbares Lichtleiter-Cladding (Mantel) sowie Kapillaren aus PEEK Verwendung fanden. Eine zusätzliche Thermoelementleitung wurde dabei auf Torsion belastet. In Abbildung 4.13 ist die Konstruktion einer der Schwinggelenke dargestellt. Die blauen Lichtleiter und die gelben PEEK-Kapillaren wurden so fixiert, dass die Biegebelastungen minimiert werden. Diese Auslegung der Schwinggelenke hat im Motorbetrieb funktioniert.

4.2.2 Applizierung Kolbenbolzen

Für die Durchführung der Messungen müssen die Messstellenlichtleiter bündig mit der Oberfläche des Lagers montiert werden. Wegen des Platzmangels am Kolben und um die Änderungen an der Kolbenkonstruktion zu minimieren, wurden die Messstellenlichtleiter, wie in Abbildung 4.14 dargestellt, mit dem Kolben verklebt. Dies entspricht der Einbauvariante A (Abbildung 4.3), während andere Einbauarten aufgrund von Kolbenabmaßen sowie deutlich höheren Lagerdrücken nicht realisierbar waren. Dabei sind die Lichtleiter auf das Coating abisoliert und in die Messstellenbohrung mit der minimal möglichen Toleranz eingeklebt. Die aufgrund der Einklebeungenauigkeit sowie des flachen Lichtleiterfaserquerschnitts im Vergleich zu der runden Gleitlagerwand sich ergebende Unbündigkeit wurde bei der Kalibrierung mit berücksichtigt.

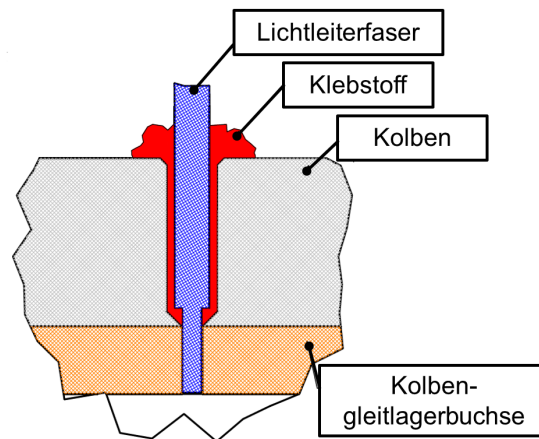


Abbildung 4.14: Messstellenaufbau in der Kolbenbolzengleitlagerwand

Messstellen Kolbenbolzen Der bei den Fluoreszenzmessungen verwendete Kolben mit den Messpositionen kann Abbildung 4.15 entnommen werden. Es wurden vier Messpositionen im Lager mit Lichtleitern und zusätzlich drei Messpositionen am Rand des Lagers mit Lichtleitern und Kapillaren appliziert. Zwei der vier Messpositionen im Lager sind auf der Mittelebene des Kolbens und die weiteren zwei Messpositionen um $\pm 45^\circ$ radial versetzt. Die drei Messpositionen am Rand des Gleitlagers liegen nahe der Mittelebene des Kolbens. An der Pleuelseite des Kolbens sind alle Lichtleiter/Kapillaren bündig mit den Kolbenwänden verklebt. An der gegenüberliegenden Feuerstegseite ist das Lichtleiter/Kapillar-Bündel $0,5\text{ mm}$ vor der Wand fixiert (Abbildung 6.7).

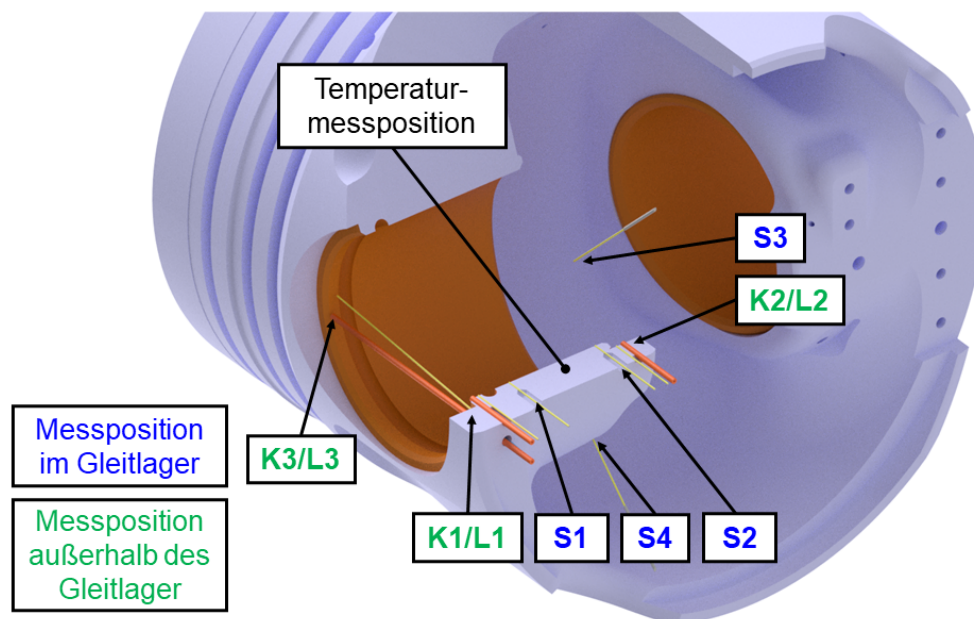


Abbildung 4.15: Messpositionen am Vollmotor-Kolben

Dabei werden die Messstellenlichtleiter im Lager für die Schichtdicken- und die Transportmessungen genutzt. Die Lichtleiter an den Rändern des Lagers werden für die Ölangebotsmessungen verwendet. Die Kapillaren an den Rändern des Lagers sind für die Transportmessungsinjektionen erforderlich. Wegen des geringen Platzangebots sowie der schwierigen Leiterführung wurden bei den Vollmotormessungen Multimode-Stufenfaser-Lichtleiter mit $\varnothing 200 \mu m$ sowie PEEK-Kapillaren mit $\varnothing 250 \mu m$ verwendet.

5 Messungen und Ergebnisse zur Laufbuchse

Die mithilfe des beschriebenen Messsystems sowie der Prüfkörper aufgenommenen Daten werden im folgenden Kapitel analysiert. Im Fall der Laufbuchsenmessungen handelt es sich um die Betrachtung der Ölschicht an der Laufbuchse bzw. zwischen der Laufbuchse und dem Kolben. Dabei werden zuerst die Messungen und die verwendeten Messdarstellungen aufgezeigt, um anschließend die Messergebnisse, die in statische und dynamische Prozesse unterteilt sind, darzulegen.

5.1 Messprogramm

Zur Erstellung der Messergebnisse wurden Motorkennfelder und einzelne Betriebspunkte unter Einhaltung der Betriebsgrenzen des Motors eingefahren. Das Motorkennfeld des Prüfstandes ist in Abbildung 5.1 zu sehen. Die Leistungsabgabe wird oben durch die maximal definierte Last bei den aktuellen Motoreinstellungen begrenzt (rote Linie). Eine charakteristische Kurve mit einer Korrelation von Leistung und Geschwindigkeit $P \sim n^3$ ist ebenfalls dargestellt (gestrichelte graue Kurve). Diese Kurve entspricht einer typischen Betriebskurve eines Schiffs mit einem Festpropeller. Alle markierten Betriebspunkte liegen auf gepunkteten Linien mit gleichem Drehmoment. Aus Gründen der Kosten- und Zeitersparnis wurden jedoch nicht alle diese Punkte untersucht.

Die ersten Ölfilmickenmessungen wurden nach dem Umbau des Motors durchgeführt und dienten der Erprobung des Messsystems und der Messmethoden. Die gleichzeitige Aufzeichnung aller Messpositionen (16 Messstellen) auf dem vollen Betriebskennfeld war aufgrund der Begrenzung des Messsystems auf vier Kanäle, anfänglicher Schwierigkeiten mit hochgelegenen Messpositionen und der begrenzten Laufzeit des Motors nicht möglich.

Ein Referenzkennfeld wurde definiert und eingefahren mit dem Ziel, es für weitere zukünftigen Studien zu verwenden. Es ist in Abbildung 5.1 dargestellt und besteht aus folgenden Betriebspunkten:

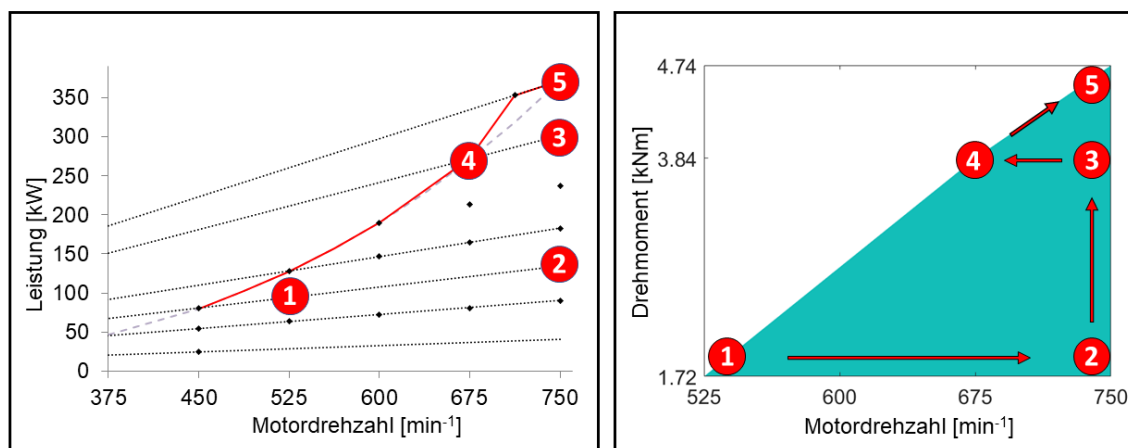


Abbildung 5.1: Messprogramm bei der Laufbuchsenmessungen (rechts); Motorkennfeld (links)

- (1) 525 min^{-1} – 1,72 kNm
- (2) 750 min^{-1} – 1,72 kNm
- (3) 750 min^{-1} – 3,84 kNm
- (4) 675 min^{-1} – 3,84 kNm
- (5) 750 min^{-1} – 4,74 kNm

Auch wenn die Messergebnisse sich vorwiegend auf dieses Kennfeld beziehen, wurden weitere Betriebspunkte sowie transiente Vorgänge beim Einstellen der Betriebspunkte mit untersucht. Die Fluoreszenzmessungen wurden am Motor gleichzeitig mit anderen Messuntersuchungen durchgeführt, z. B. mit Ölemissionsuntersuchungen. Es wurde festgestellt, dass auch bei Einhaltung aller Betriebsparameter die Messgrößen immer noch von der Dauer der Messungen und der genauen Abfolge der gefahrenen Betriebspunkte abhängen können. Aus diesem Grund wurden auch die Reihenfolge der gefahrenen Punkte im Kennfeld und der zeitliche Rahmen definiert. Das komplette Kennfeld bestand aus der 1-2-3-4-5-1-Abfolge und konnte wegen der reduzierten Betriebspunktezahlan an einem Tag durchfahren werden.

5.2 Datendarstellung

Bevor die Messdaten analysiert werden, ist ihre Darstellung zu erklären. In Abbildung 5.2 ist eine Beispielmessung unkalibrierter Signale an einer bestimmten Messstelle dargestellt. In dieser Darstellung sieht die Messstelle das vorbeifahrende Kolbenringpaket, das sich an der in der Laufbuchse fest verbauten Messstelle vorbeibewegt. In Rot

sind alle Arbeitsspiele (1626 Zyklen) der Messung übereinander dargestellt. In Grün ist das arithmetische Mittel dieser Arbeitsspiele und in Blau das stochastische Mittel wiedergegeben. Die Erstellung des stochastischen Mittels basiert auf der Untersuchung der Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Schichtdickenverläufe, d. h. auf dem Modus der Wahrscheinlichkeitsmassenfunktion, und kann nicht als stetiges Arbeitsspiel dargestellt werden, sondern als diskrete Verteilung der Signale.

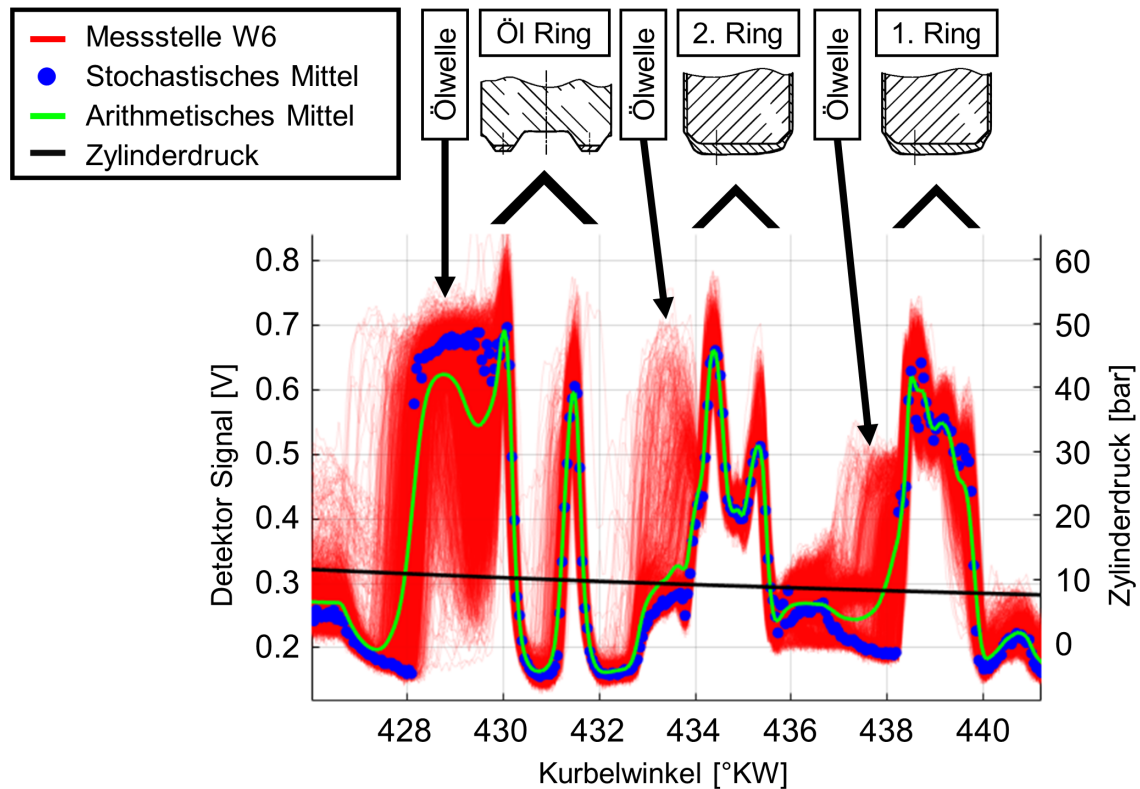


Abbildung 5.2: Ölsignalverlauf der mittleren Messstelle W6 – Durchfahren des Kolbenringpakets

Die Notwendigkeit des stochastischen Mittels ist vor allem in den Bereichen der starken Schwankung der Signale (rot) gut erkennbar und hier bei 429 °KW und 438 °KW gut zu sehen. Ohne das Wissen des stochastischen Mittels könnte die Ölschicht hier falsch interpretiert werden. Für das genaue Verstehen des Ölmechanismus eignet sich die Kombination aus allen drei Darstellungen am besten.

Die im folgenden Kapitel beschriebenen Ölfilm dickennmessungen werden teilweise als kalibrierte und teilweise als unkalibrierte Daten dargestellt. Aufgrund der Schwierigkeiten bei der Kalibrierung (Reflexion der Gegenoberflächen, siehe Kapitel 3.4) kann die Ölfilm dicke in μm nicht in Form von Daten über die Zeit oder den Kurbelwinkel dargestellt werden, sondern muss in Abschnitte unterteilt und über mehrere Arbeits-

zyklen berechnet werden. Für eine qualitative Betrachtung der Daten sollte vereinfacht angenommen werden, dass die Signale in einzelnen Abschnitten des Arbeitsspiels, z. B. Ring 1, Steg 1 oder Kolbenhemd, mit unterschiedlichen Faktoren zu multiplizieren sind.

In dem Beispiel in Abbildung 5.2 ist die Bewegung des Kolbens nach unten mit den Bereichen Ölabstreifring, 2. Ringsteg, 2. Kolbenring, 1. Ringsteg, 1. Kolbenring dargestellt. In diesem Beispiel sind auch die Ölwellen unterhalb der Kolbenringe gut zu identifizieren, im Bild immer links vom Kolbenring wegen der Bewegungsrichtung des Kolbens nach unten. Auch gut zu sehen sind in diesem Beispiel die Einflüsse der Form der Kolbenringe auf die Ölschichten. Wegen der Form des Ölabstreifringes (DSF-Ring in Abbildung 2.7) ist das Öl gut an beiden Laufflächen des Ringes in den Messdaten zu sehen. Entsprechend ist die abgenutzte B-Ring-Form des 1. und des 2. Kolbenringes mit den Ölsammlungen am Anfang und am Ende der Ringe in den Daten erkennbar.

Die hier beobachteten Schwankungen im Messstellensignal (rot) kann unterschiedliche Ursachen haben. Der Hauptgrund für die Schwankung der Fluoreszenzsignale ist die Schwankung der Ölschichtdicke von Arbeitsspiel zu Arbeitsspiel. Während die einstellbaren Motorbetriebsparameter hier über den Verlauf der Messung konstant sind, gibt es auch variable Einflüsse auf die Ölschicht, z. B. die Ringdrehung und Ölbewegung im Kurbelraum. Die Streuung der Signale ist vor allem bei den großen Ölschichten, wie Ölwellen, zu beobachten, weil hier eine größere absolute Schwankung in der Ölmenge möglich ist. Die Streuung der Ölsignale an den Kolbenringen ist deutlich geringer, zum einem wegen geringerer Ölmengen und zum anderen wegen des räumlichen Eingrenzens der Ölschicht zwischen zwei Oberflächen. Es ist weiterhin zu beachten, dass nur lokale Signale an der Zylinderlaufbuchse dargestellt sind und eine Mittelung über weitere radiale Messpositionen die Signalstreuung reduzieren würde.

Zusätzlich zu der aus den Ölschichten resultierenden Signalstreuung gibt es auch messtechnikbezogene Einflussfaktoren. Die Drehzahlschwankungen innerhalb der Umdrehung werden hier nicht berücksichtigt, und es kann zu geringen Fehlern in der Kurbelwinkelzuordnung zwischen einzelnen Arbeitsspielen kommen, die sich als Signalstreuung auf der Kurbelwinkelachse zeigen. Des Weiteren kann das Vorkommen der reflektierenden oder absorbierenden Partikel wie Metallabrieb oder Ruß an den Messstellen die Signale beeinflussen. Vor allem Ruß und das Zusetzen der oberen Laufbuchsenpositionen sind ein Problem.

Ergänzend ist zu beachten, dass das messbare Ölvolumen aufgrund von runden Lichtleitern als Messsensoren nicht einen Zylinder darstellt, sondern einen Kegelstumpf. Die Akzeptanzwinkel der Lichtleiter (Gleichung 2.11) sind größer als 0° , und es wird mehr

Fluoreszenzstrahlung eingefangen, als der Durchmesser der Lichtleiterfaser es vermag. Allerdings betragen die Akzeptanzhalbwinkel der verwendeten Lichtleiterfasern 9–12° und haben somit keinen wesentlichen qualitativen Einfluss auf die Ölsignale. Die genauere Analyse der Messsignale wird in weiteren Kapiteln beschrieben.

5.3 Ölschicht (statische Prozesse)

Im Folgenden werden Ölschichtmessungen an der Laufbuchse analysiert, die sich auf das statische Verhalten des Öls beziehen. Mit statischem Verhalten werden hier die Phänomene bezeichnet, die innerhalb eines Arbeitsspiels stattfinden und sich im nächsten Arbeitsspiel nicht ändern, d. h., die Ableitung nach Arbeitsspiel bleibt konstant. Dazu gehören z. B. das Verhalten des Öls während des Kontakts mit den Kolbenringen, der Umstand, inwiefern das Öl der Verbrennung ausgesetzt ist, oder das Verhalten des Öls am Kolbenhemd.

5.3.1 Ölschichten innerhalb des Arbeitsspiels

Ein Beispiel für die Messungen der Ölschicht an der mittleren Messposition der Laufbuchse (W6) ist in Abbildung 5.3 dargestellt. Die roten Daten zeigen die Ölschichten von über 1600 Arbeitszyklen, wobei die dargestellten Daten unkalibriert sind. In diesem Beispiel (Abbildung 5.3 unten) ist das Passieren des 1. und des 2. Kolbenringes zu sehen. Weiterhin können die Ölwellen detektiert werden, die direkt unter den Kolbenringen vorhanden sind. Die Filmdicke des Öls darf nicht direkt aus der Höhe der Signale geschlossen werden, etwa bei den Kolbenringen im Vergleich zum Kolbenmantel, da die Kalibrierungsfaktoren recht unterschiedlich sind. Außerdem bestehen die Signale aus dem gesamten Öl in unmittelbarer Nähe vor der Messstelle, d. h. aus dem Öl an der Laufbuchse und ggf. dem Öl am Kolben.

Im Verlauf der Signale lassen sich vier Abschnitte mit dem Kolbenringpaket vor der Messstelle erkennen (2-mal pro Umdrehung). Ansonsten befindet sich der Kolben mit dem Ringpaket entweder unterhalb der Messstelle und es sind nahezu konstante Ölschichten zu sehen, oder das Kolbenringpaket befindet sich oberhalb der Messstelle und es ist das Öl auf dem Kolbenhemd, überlappend mit der Laufbuchsenölschicht, zu sehen. Es ist gut zu erkennen, dass die Ölschicht auf der Höhe des Kolbenhemdes (300–420 °KW & 660–60 °KW) deutlich mehr Schwankungen aufweist, vor allem weil sie hier den Massenkräften des bewegten Kolbens und der stochastischen Ölver-

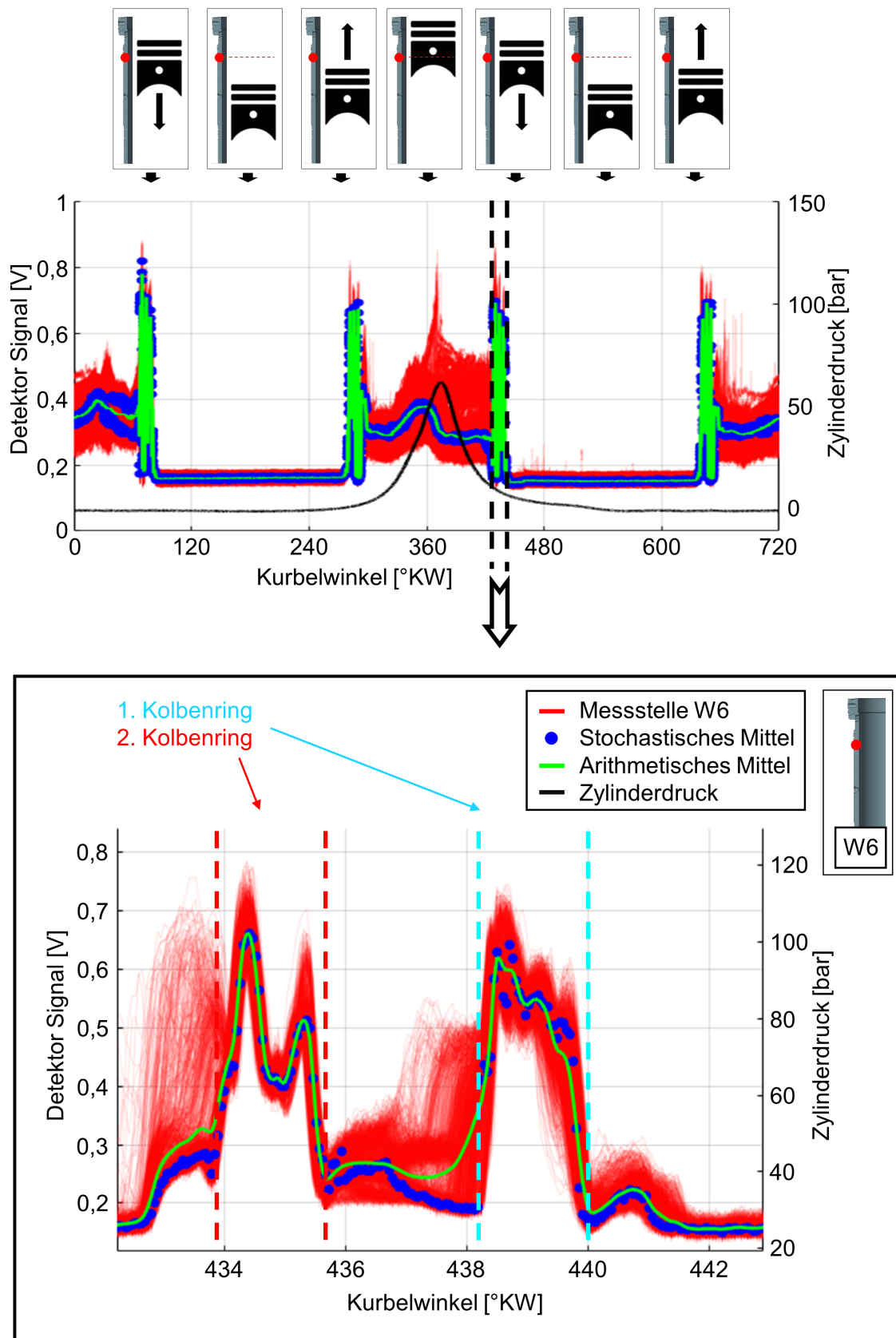


Abbildung 5.3: Ölsignalverlauf der mittleren Messstelle W6 (oben); Detaildarstellung des Kolbenringabschnitts (unten) [525 min^{-1} , $1,72 \text{ kNm}$, 1626 AS]

sorgung ausgesetzt ist. Grundsätzlich unterliegen die Schichtdicken beim Durchlaufen der Kolbengeometrien mit Ölsammlungen, also etwa an Kolbenringen, Kolbenringpaketschultern oder Kolbenhemd, größeren Schwankungen bzw. Streuungen, weshalb die Berücksichtigung unterschiedlicher Mittelwerte sinnvoll ist. Während die Ölschicht mit dem Kolben unterhalb der Messstelle gut mit dem Mittelwert beschrieben wird, ist für die Betrachtung der restlichen Abschnitte die Kombination aus stochastischem Mittel (blau) und allen Arbeitsspielen (rot) sinnvoll.

Bei der Auswertung der Daten werden diese in Abschnitte der konstanten Bedingungen vor der Messstelle unterteilt. Im Beispiel der Messung in Abbildung 5.3 befindet sich die Messstelle im Bereich der hohen Kolbengeschwindigkeit und wird vom Kolben mit den drei Kolbenringen mit nachfolgender Zeitspanne ohne den davor befindlichen Kolben passiert. Die am einfachsten zu verstehenden und auszuwertenden Ölschichten finden sich zu den Zeiten, in denen sich der Kolben nicht vor der Messstelle befindet und die Verbrennungsflammen bereits erloschen sind.

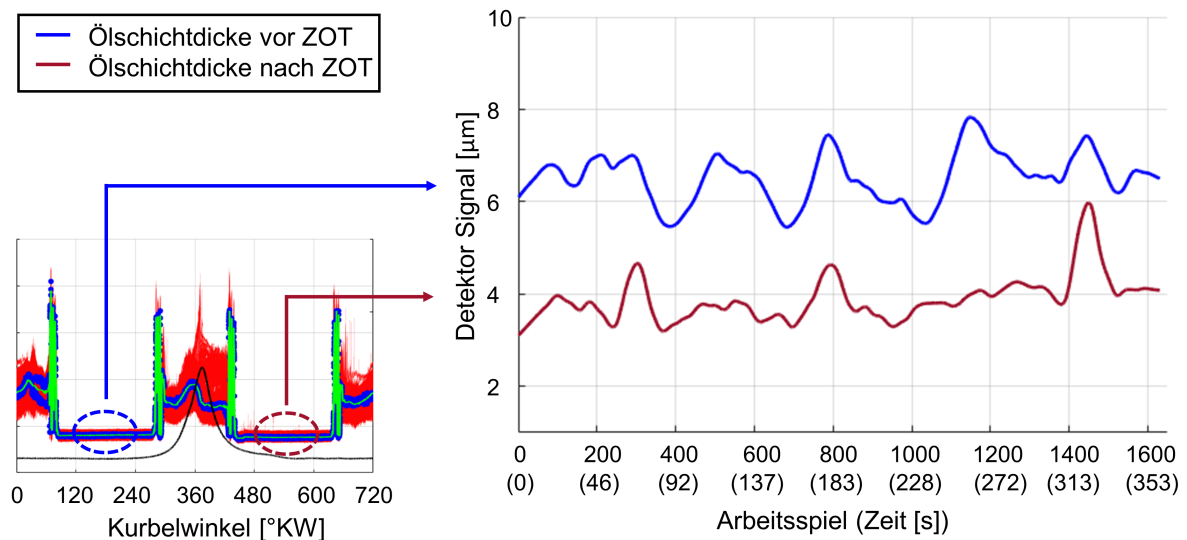


Abbildung 5.4: Ölschichtdicke der Laufbuchse an der mittleren Messstelle W6
[525 min^{-1} , $1,72 \text{ kNm}$, 1626 AS]

In Abbildung 5.4 sind zwei Abschnitte der 1600 Arbeitszyklen gruppiert und über die Motorlaufzeit dargestellt. Der Abschnitt 120–240 °KW zeigt den Kolben unterhalb des Messpunktes vor dem Zünd-OT (ZOT) und der Abschnitt 480–600 °KW nach dem ZOT. Unter Berücksichtigung der Kalibrierparameter (Ölfaktor, Temperaturfaktor, Lichtleitfaktor) können daraus Schichtdicken in Mikrometern berechnet werden. Diese Daten sind in Abbildung 5.4 (rechts) dargestellt, wobei die Schichtdicke vor dem

ZOT erwartungsgemäß etwas höher ist als nach dem ZOT. Die hier gemittelten Ölschichtdaten vor und nach dem ZOT sind periodischen Schwankungen unterworfen. Die niedrigeren Schichtdicken nach dem ZOT resultieren vor allem aus den höheren Zylinderdrücken und dementsprechend aus der höheren Abstreifwirkung der Ringe. Die Ölschichten an der Laufbuchse innerhalb der halben Umdrehung nach dem ZOT sind in diesem Beispiel nahezu konstant.

Ähnliche Phänomene lassen sich bei der Betrachtung der Ölschicht an anderen Positionen der Laufbuchse finden. In Abbildung 5.5 sind die Ölschichten an der unteren Messposition (W8) dargestellt. In diesem Beispiel lassen sich auch die vier Abschnitte mit dem Kolbenringpaket vor der Messstelle erkennen. Der Kolben befindet sich dabei nie unterhalb der Messposition und ist stattdessen kurz (0°KW & 360°KW) oberhalb der Messposition. Das charakteristische Verhalten des Öls ist auch an dieser tiefer gelegenen Messstelle zu sehen. Wie sich das Öl am Kolbenhemd verhält, ist hier noch besser zu erkennen und wird in Kapitel 5.3.3 beschrieben. Auch ohne eine Kalibrierung ist deutlich, dass die Ölmenge an dieser Position ohne den Kolben vor der Messstelle ($710\text{--}10^\circ\text{KW}$ & $350\text{--}370^\circ\text{KW}$) größer ist als bei der höher gelegenen Messstelle (W6, Abbildung 5.3). Dies liegt an der geringeren Abstreifwirkung der Ringe unten an der Laufbuchse und an der Ölversorgung der Laufbuchse an dieser Position.

In Abbildung 5.5 (unten) wird ein Abschnitt des Arbeitsspiels betrachtet in dem sich der Kolben zum UT hin und zurück bewegt und das Kolbenringpaket vor der Messstelle ist. Während der grundsätzliche Aufbau der Kolbenring- und der Ölwellensignale ähnlich jenem der Signale an anderen Messstellen ist, kann hier zusätzlich eine Symmetrie erkannt werden. Der Kolben wechselt seine Bewegungsrichtung bei 540°KW und bleibt mit dem 1. Kolbenring in der Höhe der Messstelle stehen. Die Signale in der Höhe der Kolbenringe bestehen dabei aus dem Öl zwischen der Laufbuchsenwand und dem Kolbenring, während die Signale in der Höhe der anderen Kolbengeometrien sich aus dem Öl an der Laufbuchse sowie dem Öl am Kolben zusammensetzen. Je weiter der Kolben (und somit auch das Öl am Kolben) von der Messstelle entfernt ist, desto ungenauer ist die Quantifizierung des Gesamtsignals.

Eine weitere Besonderheit, die bei den Umkehrpunkten der Kolbenbewegung ausgenutzt werden kann, ist die Möglichkeit, die symmetrischen Signale quantitativ zu vergleichen. Das liegt daran, dass die Kalibrierparameter (z. B. Temperatur, Lichtreflexion) sich hier nicht ändern. Das bedeutet, dass man das Öl z. B. am 2. Kolbenring vor 540°KW mit dem nach 540°KW vergleichen kann, aber nicht das Öl am 2. Ring mit dem Öl am 1. Ring.

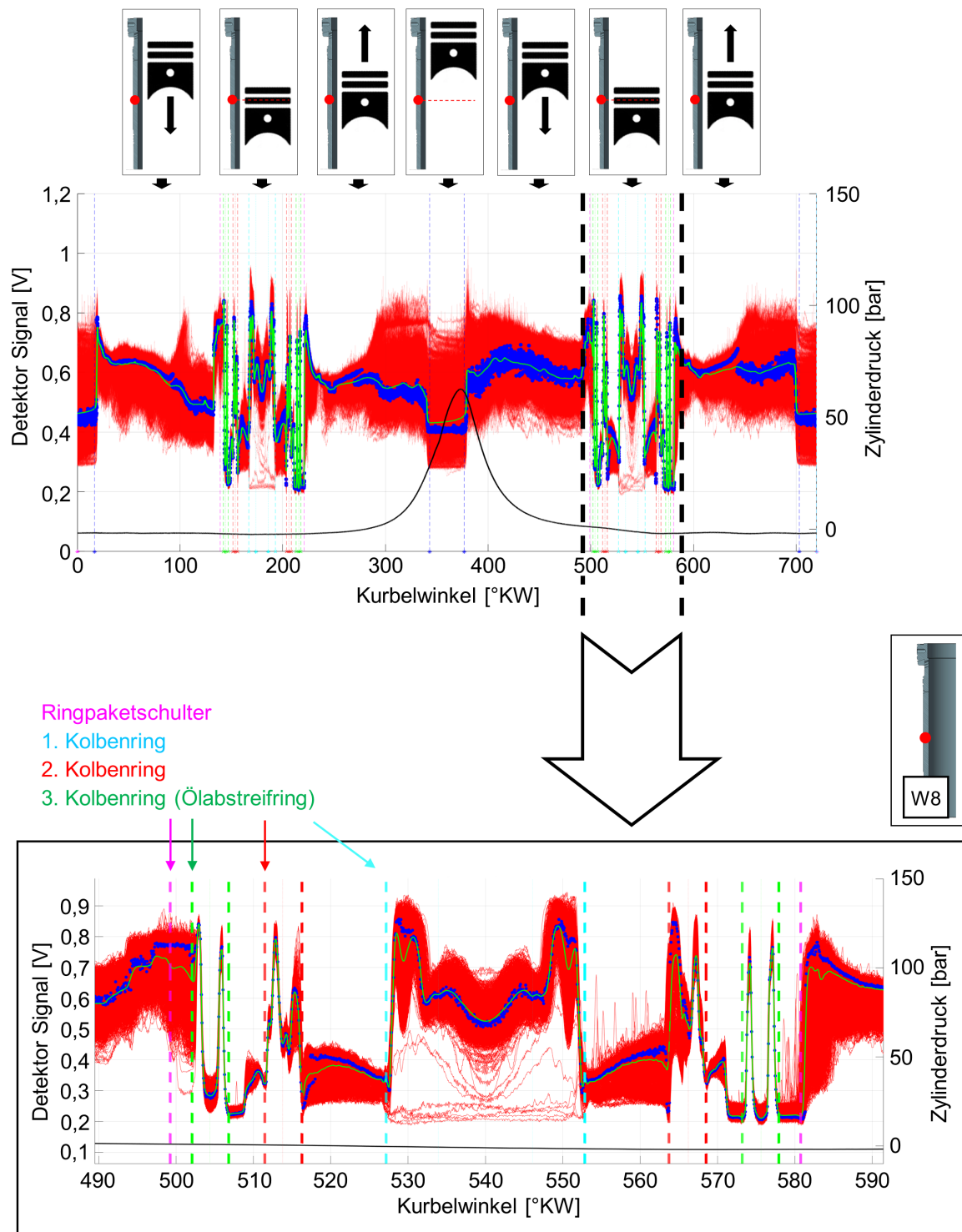


Abbildung 5.5: Ölsignalverlauf der unteren Messstelle W8 (oben); Detaildarstellung des Kolbenringabschnitts (unten) [750 min^{-1} , $1,72 \text{ kNm}$, 3065 AS]

Einige neue Phänomene der Ölschicht lassen sich hier identifizieren. Zum einem ist die Ölwellen unter dem Ölabstreifring bei der Bewegung des Kolbens nach unten gut erkennbar, während sie bei der Bewegung des Kolbens nach oben zwischen Ringpaketschulter und Ölabstreifring größtenteils fehlt (500 °KW & 580 °KW). Dies entspricht dem erwarteten Abstreifverhalten des Ölrings. Zum anderen fehlen hier im Vergleich zu der Messung (Abbildung 5.3) die Ölwellen unter dem 1. und dem 2. Kolbenring bei der Bewegung des Kolbens nach unten. Eine Ursache dafür könnte die Kombination aus geringerer Kolbengeschwindigkeit, geringerer Ölabstreifkraft und veränderter Lage der Kolbenringe im Ringspalt sein. Während die Ölwellen hier ausbleiben, sind die Verläufe der Ölschichten auf der Höhe der Ringstege aussagekräftig.

Der Verlauf der Ölschicht im 2. Kolbenringsteg (510 °KW & 570 °KW) kann auf die Form des Stegs zurückgeführt werden (Abbildung 4.2), wobei mehr Öl an der mittleren Kante des Stegs auf dem Weg des Kolbens nach oben hängen bleibt. Der Verlauf der Signale bei 520 °KW und 560 °KW repräsentiert die Form der Ölschicht in dem flachen 1. Kolbenringsteg im UT. Und schließlich lassen sich Signale beim 1. Kolbenring erkennen, die von dem mittleren Verlauf abweichen (530–550 °KW). Dies ist ein Anzeichen für eine Ringdrehung und wird in Kapitel 5.4.1 beschrieben.

Im Allgemeinen zeigt sich, dass die minimalen Ölschichten an den Laufbuchsen nach dem Abstreifen des Öls durch die Kolbenringe in der Abwärtsbewegung des Kolbens zu finden sind und die maximalen Ölschichten zwischen der Laufbuchse und dem Kolben an den Kolbenstegen oder dem Kolbenhemd vorkommen. Des Weiteren sind die Ölschichten an der Laufbuchse unterhalb des Kolbens deutlich höher als oberhalb des Kolbens, was auf die noch nicht stattgefundenen Abstreifbewegung und die Ölversorgungsdüsen im unteren Abschnitt der Laufbuchse zurückzuführen ist. Zusammen mit den Ölwellen, vor allem unterhalb des Ölabstreifringes in der Bewegung nach unten, bilden die Messdaten das erwartete Verhalten der Öltransportmechanismen ab, deren Aufgaben die Verschleiß- und die Ölverbrauchsminimierung bei den tribologischen Komponenten Kolben und Laufbuchse sind.

5.3.2 Verbrennungsflamme

Ein wichtiger Aspekt der Messergebnisse ist der Einfluss der Verbrennungsflamme auf die Signale und der Verschleiß der Messstellen im oberen Bereich (OT-Bereich). Diese Messstellen sind schräg verbaut und der Verbrennungsflamme sowie deutlich höheren Temperaturen und Drücken ausgesetzt. Dadurch verringert sich zum einen die Auflösung dieser Messstellen, zum anderen wird die Auswertung der Daten durch

die wechselnde Qualität der Messstellen erschwert. Nicht zuletzt ist das Flammenlicht sehr intensiv und strahlt in einem breiten Spektrum, wodurch das Fluoreszenzsignal überdeckt wird. Die Verwendung dieser Messstellen zur Öldetektion ist nicht immer möglich und erfordert zusätzliche Optimierungen.

Während es Messstellen im oberen Bereich an der Laufbuchse gab, die nach einer Einlaufphase konstant funktionierten, gab es auch Messstellen, die komplett verstopft wurden oder ihre Qualität über die Zeit änderten. An dieser Stelle ist noch einmal zu erwähnen, dass beim Applizieren der Messstellen auf die Bündigkeit der Messstellenoberfläche zu achten ist, weil die Gefahr einer Verstopfung oder des Verkohlens im Betrieb bei einer zurückstehenden Ferrule zu groß ist. Außer für die Detektierung des Öls können verschmutzte Messstellen als Flammendetektoren für die zeitliche und örtliche Flammenverteilung genutzt werden.

Abbildung 5.6 zeigt eine solche Messung an der zweiten Messposition von oben im OT-Bereich. Die Flammensignale verdecken die Ölschichtsignale und sind hier ab 406 °KW zu sehen. Interessant ist hier die Streuung der Signale in der Intensität und über den Kurbelwinkel. Das Detektieren der Verbrennungsflamme ist einer der Gründe dafür, dass die Kalibrierung der Ölschichtsignale zurzeit und nach der Verbrennung im oberen Laufbuchsenbereich nicht möglich ist. Der Beitrag des Öls in diesem Bereich zur Ölemission durch Verdampfung ist entscheidend und quantifizierbare Ölschichtsignale wären hier daher wünschenswert.

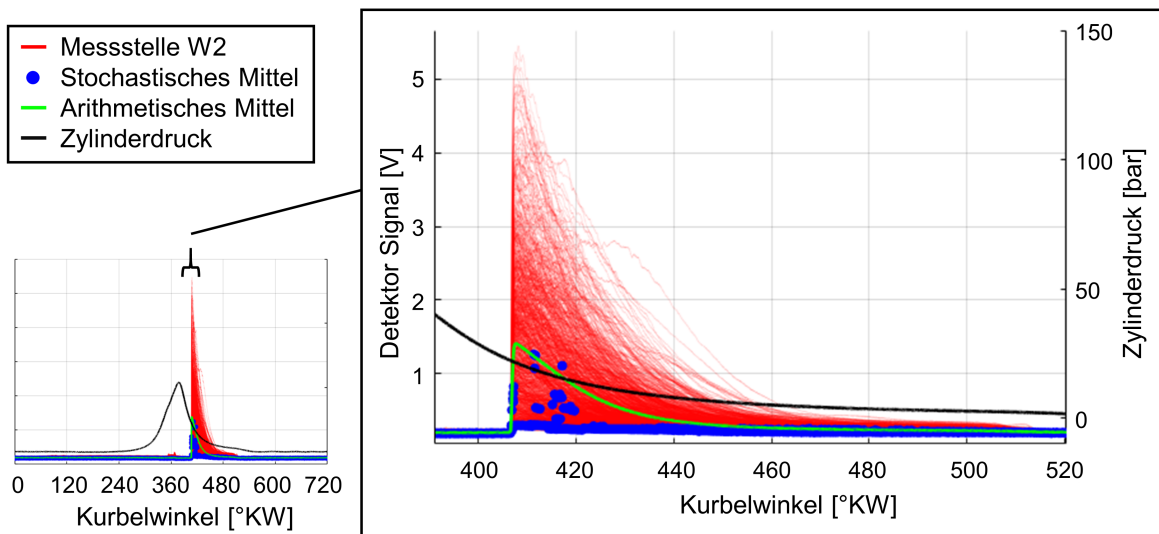


Abbildung 5.6: Ölsignalverlauf der oberen Messstelle W2 (links); Detaildarstellung der Verbrennungsflamme (rechts) [525 min^{-1} , $1,72 \text{ kNm}$, 1000 AS]

Ein weiterer Grund für die erschwerte Kalibrierung im Bereich der Verbrennung ist die Temperaturabschätzung. Weil die Öltemperatur bei der Quantifizierung der Ölschichten eine Rolle spielt und mit Thermoelementen gemessen wird, kann deren Änderung innerhalb einer halben Umdrehung nicht detektiert werden. Auch wenn eine geringe Änderung der Temperatur einen geringen Einfluss auf die Fluoreszenz hat, ist deren Einfluss auf die erwartete Ölschichtänderung durch Verdampfung von wenigen μm relativ hoch.

Die starke Streuung der Signale der Verbrennungsflammen ist vorwiegend auf das lokal-stochastische Verhalten der Verbrennung zurückzuführen. Während es sich bei dem Motor um eine CNG-Verbrennung mit Diesel-Pilot-Zündung handelt, waren Zylinderdruckschwankungen vorhanden und vereinzelte Nagen- bzw. Klopfen-Ereignisse konnten beobachtet werden. Dies ist ein zusätzliches Anzeichen dafür, dass die Flammenausbreitung räumlichen und zeitlichen Schwankungen unterliegt. Ausgehend von den Signalen der Flammenausbreitung kann gefolgert werden, dass die Verbrennungsenergie auch lokale Schwankungen aufweist. Diese können einen Einfluss auf die Verdampfung der Ölschicht der Laufbuchse im Arbeitstakt haben. Bei den vorhandenen Messergebnissen wurden keine wiederkehrenden eindeutigen Verbrennungsausreißer identifiziert, und es ist davon auszugehen, dass der Einfluss der Flamme auf die Ölschicht an weiteren nicht-applizierten Messpositionen im Mittel konstant ist.

5.3.3 Kolbenhemd

Während die Signale des Öls an den Messstellen bei der Kolbendurchfahrt aus einer Kombination der Ölschicht an der Laufbuchse und derjenigen am Kolben bestehen, kann die Laufbuchschicht oft vernachlässigt und als konstanter Offset gesehen werden. Ein gutes Beispiel dafür sind die Signale auf der Höhe des Kolbenhemdes. Die unteren Messpositionen zeichnen das gesamte Kolbenhemd viermal innerhalb eines Arbeitsspiels auf und diese Verläufe sind an den West- und Ostseiten in Abbildung 5.7 dargestellt.

In dieser Messung wurden die nicht vom Kolbenhemd betroffenen Abschnitte ausgelassen, und die Sprünge in den Signalen an den Anfängen und Enden der Abschnitte deuten auf das Ende oder den Anfang des Kolbenhemdes hin. Die Signale sind unkalibriert dargestellt, können aber für qualitative Betrachtungen des Kolbenhemdöls herangezogen werden, weil die Laufbuchsenölschicht sowie die Kalibrierparameter wie Temperatur und Reflexion nahezu konstant sind. Bei den einzelnen Abschnitten wird das Kolbenhemdöl während der Bewegung des Kolbens abgetastet. Zusätzlich ist ei-

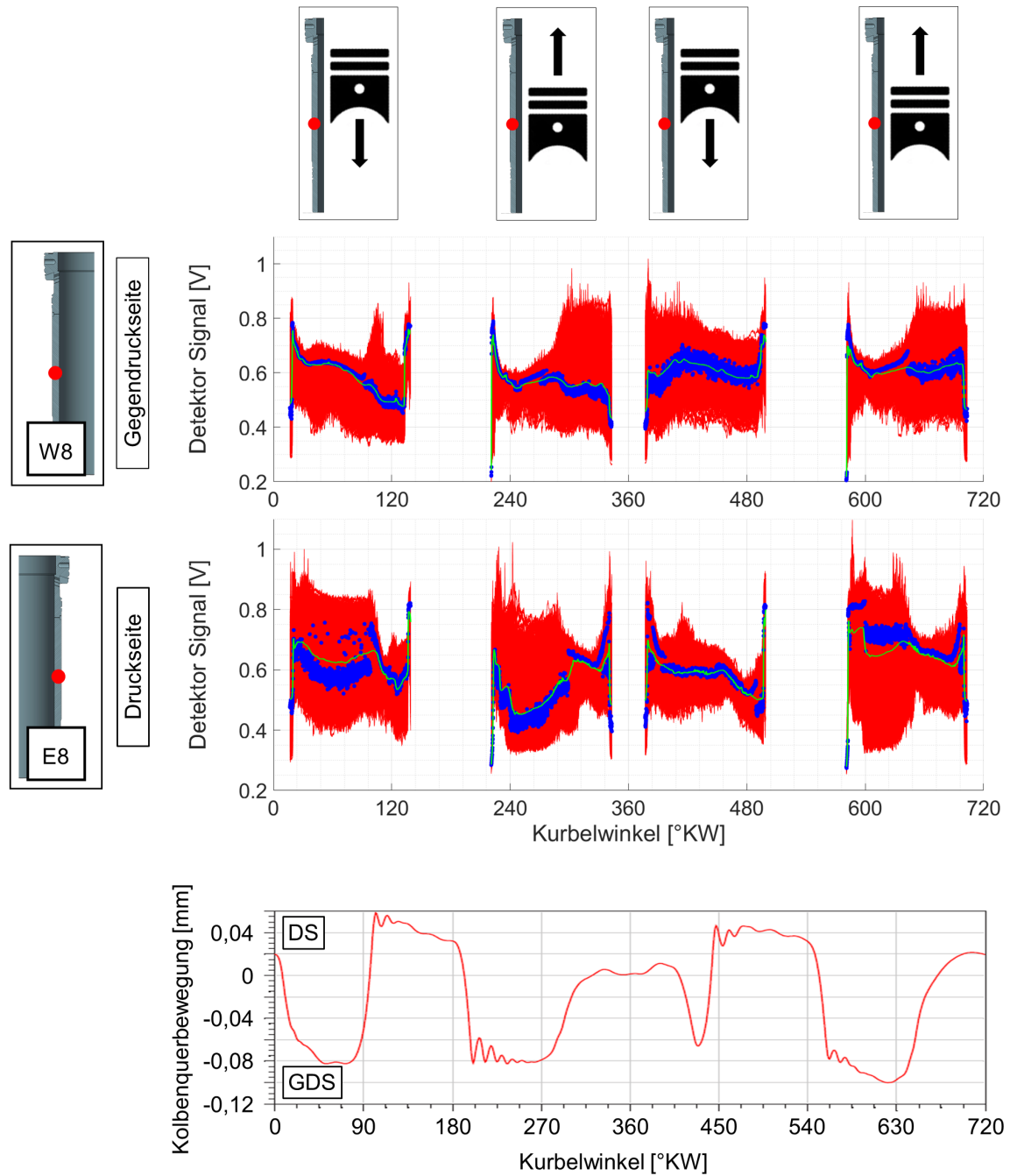


Abbildung 5.7: Ölsignalverlauf des Kolbenhemds an der unteren Messstelle (oben); simulierte Kolbenquerbewegung mit gekennzeichneteter Druckseite (DS) und Gegendruckseite (GDS) (unten) [750 min^{-1} , $1,72 \text{ kNm}$]

ne simulierte Kolbenquerbewegung in Abbildung 5.7 (unten) dargestellt, die durch die Mitarbeiter der Arbeitsgruppe Schiffsmaschinenbau erzeugt wurde.

Zum einem kann in den Daten eine gewisse Symmetrie gesehen werden, weil das Kolbenhemd abwechselnd von unten nach oben und von oben nach unten abgetastet wird. An mehreren Stellen ist erkennbar, dass die Unterseite des Kolbenhemds mit mehr Öl benetzt ist als die obere. Dieses Verhalten wird von dem Einfluss der Kolbensekundärbewegung überdeckt. Es lassen sich Sprünge im Ölsignal finden, die mit dem Anlagenwechsel des Kolbens übereinstimmen. Es überrascht nicht, dass bei einem Aufsetzen des Kolbenhemdes an der Laufbuchse eine sprunghafte Änderung in der Ölschicht entstehen kann.

Zum anderen lässt sich ein interessantes Verhalten in der Zeit beobachten, wenn das Kolbenhemd von der Messstelle weggezogen wird. Dies ist z. B. bei 30 °KW an der Druckseite oder bei 300 °KW an der Gegendruckseite der Fall. Hier ist eine deutlich erhöhte Schwankung im Ölsignal zu sehen. Eine mögliche Erklärung liegt in dem Kontakt des Kolbenhemdes mit der Ölschicht. Es wurde bereits in anderen Forschungsarbeiten [9] gezeigt, dass sich bestimmte Muster zwischen Kolbenhemd und Laufbuchse bilden können, wenn diese Flächen voneinander gezogen werden. Der Verlauf dieser Muster ist wellenförmig und der Form der Zellfortsätze ähnlich. Eine optische Abtastung solcher Muster würde stochastisch schwankende Signale erzeugen und im Fall der Messungen in Abbildung 5.7 an der Druckseite bei der Bewegung des Kolbens zur Gegendruckseite und umgekehrt auf der Gegendruckseite vorkommen. Genau dieses Verhalten lässt sich hier bei der Korrelation der Messdaten mit der simulierten Kolbenquerbewegung beobachten.

Die Erkenntnisse aus den Kolbenhemdmessungen zusammen mit den Daten der Kolbenkippbewegung, die zurzeit nicht zur Verfügung stehen, können zu einer Optimierung der Sekundärbewegung des Kolbens führen sowie für die Verbesserung der tribologischen Simulationsmodelle genutzt werden.

5.3.4 Ölschichtkennfelder

Während die Verläufe der Ölschichtsignale innerhalb eines Arbeitsspiels wichtige Erkenntnisse ans Licht bringen, ist die Quantifizierung der Ölschicht ein wesentlicher Schritt auf dem Weg zur Optimierung des tribologischen Systems. Aus diesem Grund werden die Messsignale in repräsentative und kalibrierbare Abschnitte unterteilt und als Mittelwerte bezogen auf eine Messposition und einen Betriebspunkt dargestellt.

In Abbildung 5.8 sind die Daten der sechs Abschnitte im Arbeitsspiel in einem Betriebspunkt und bei vier Messpositionen dargestellt. Dabei finden sich die ersten zwei Messstellen E5 und W5 im oberen Bereich der Laubuchse (OT), die Messposition W6 in der Mitte der Laubuchse bei der maximalen Geschwindigkeit des Ringpakets und die Messposition W8 unten an der Laubuchse (UT). Es ist zu bemerken, dass die Ost-(E)-Messstellen auf der Druckseite des Zylinders sind und die West-(W)-Messstellen auf der Gegendruckseite. Die Bereiche sind so dargestellt, wie sie im Arbeitsspielverlauf von links nach rechts aufgezeichnet wurden. Bei den sechs ausgewählten Bereichen handelt es sich um:

- **Feuersteg nach dem OT:** Bei den Werten handelt es sich um die mittlere Ölschichtdicke zwischen der Laubuchse und dem Feuersteg des Kolbens in der Abwärtsbewegung des Kolbens nach dem OT.
- **Feuersteg vor dem ZOT:** Bei den Werten handelt es sich um die mittlere Ölschichtdicke zwischen der Laubuchse und dem Feuersteg des Kolbens in der Aufwärtsbewegung des Kolbens vor dem ZOT.
- **Ring 2 nach dem ZOT:** Bei den Werten handelt es sich um die mittlere Ölschichtdicke zwischen der Mitte des 2. Kolbenringes und der Laubuchse in der Abwärtsbewegung des Kolbens nach dem ZOT.
- **Zwischen Ring 1 & 2 nach dem ZOT:** Bei den Werten handelt es sich um die mittlere Ölschichtdicke an der Laubuchse und am 1. Ringsteg in der Abwärtsbewegung des Kolbens nach dem ZOT.
- **Ring 1 nach dem ZOT:** Bei den Werten handelt es sich um die mittlere Ölschichtdicke zwischen der Mitte des 1. Kolbenringes und der Laubuchse in der Abwärtsbewegung des Kolbens nach dem ZOT.
- **Feuersteg nach dem ZOT:** Bei den Werten handelt es sich um die mittlere Ölschichtdicke zwischen der Laubuchse und dem Feuersteg des Kolbens in der Abwärtsbewegung des Kolbens nach dem ZOT.

Zu beachten ist, dass es bei den oberen Messpositionen nur einen kurzen Bereich gibt, in dem die Kolbenringe bereits die Messstellen passiert haben und die Verbrennungsflammen noch nicht auftreten.

Während die Übersicht in Abbildung 5.8 einen Betriebspunkt widerspiegelt, sind in Abbildung 5.9 die Ölschichtdicken bei allen fünf Betriebspunkten dargestellt. Bei den Ölschichtsignalen am Feuersteg ist davon auszugehen, dass sie hauptsächlich aus der Ölschicht an der Laubuchse und nicht am Feuersteg bestehen und es zu keiner Voll- oder Teilfüllung des Spalts kommt. Diese Aussage resultiert aus den Vergleichen der Signale von Nur-Laubuchsenölschicht und Laubuchse + Feuersteg.

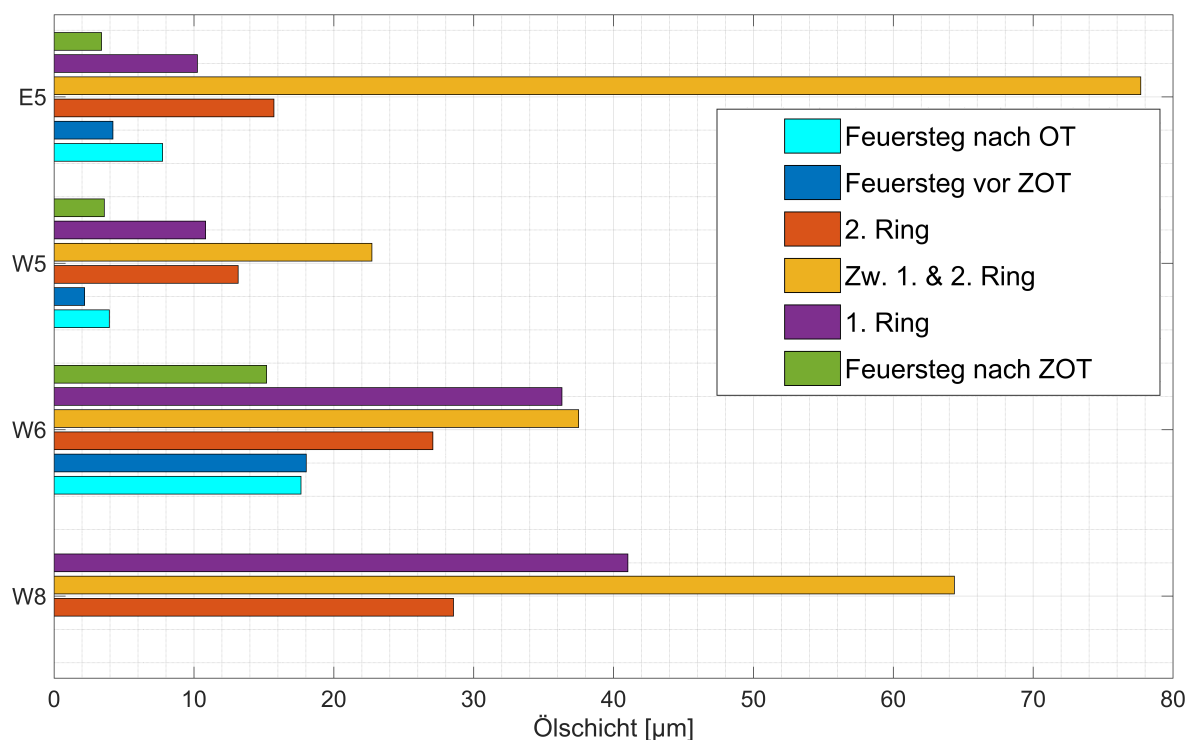


Abbildung 5.8: Mittlere Ölschichten der Arbeitsspielabschnitte an den oberen (E5 & W5), mittleren (W6) und unteren (W8) Messstellen [675 min^{-1} , $3,84 \text{ kNm}$]

Die Ölschichtsignale zwischen Laufbuchse und Feuersteg sowie an den Ringen folgen dem typischen Ölverhalten mit mehr Öl, je tiefer an der Laufbuchse gemessen wird. Bei den unteren Messstellen (W8 & E8) gibt es keine Feuerstegsignale, weil bei den unteren Messpositionen der 1. Kolbenring nie unterhalb der Messstelle ist.

Ein interessantes Phänomen lässt sich bei den Feuersteg-Ölschichten beim Vergleich der oberen W5- und O5-Messstelle beobachten. Eine Abnahme der Ölschicht zwischen der Abwärtsbewegung des Kolbens vom OT und der Aufwärtsbewegung des Kolbens zum ZOT ist zu erkennen. Weil die Ölschichtsignale hier hauptsächlich aus dem Laufbuchsenöl bestehen, keine wesentliche Temperaturänderung der Laufbuchse beim Ansaugen und Verdichten stattfindet und das Öl auf Höhe der Messposition nicht vom Kolben beeinflusst wird, lässt sich folgern, dass das Laufbuchsenöl in dieser Zeit abdampft. In Abbildung 5.8 ist das in der Abnahme des Signals von Cyan zu Blau an den oberen Messstellen zu erkennen. Es ist davon auszugehen, dass dieses Abdampfen noch stärker nach dem ZOT stattfindet, was aber, wie bereits beschrieben, wegen des Flammeinflusses auf das Signal und der hohen Temperaturänderung bei der Verbrennung nicht mit der Messtechnik kalibriert werden kann.

Zusätzlich ist zu beobachten, dass die Ölschichten auf der Höhe des Feuerstegs an der Druckseite des Zylinders nach dem ZOT höher sind als vor dem ZOT, auf der Gegendruckseite sind sie aber vor dem ZOT höher (Abbildung 5.8, blau und grün). Die hier nicht dargestellten Vergleiche der Signale an den Kolbenringen vor und nach dem ZOT haben gezeigt, dass an der Ost-Seite (E) mehr Öl abgestreift als hintransportiert wird und an der West-Seite (W) mehr Öl hintransportiert als abgestreift wird. Eine Erklärung dafür könnte in der unterschiedlichen Kolbenquerposition und Kippstellung bei der Kolbensekundärbewegung am ZOT liegen. Es ist möglich, dass die unterschiedlichen Lagen der Kolbenringe und Anpresskräfte an der West- und der Ostseite die Ölabstreif- und -transportwirkungen unsymmetrisch beeinflussen.

Ein weiterer Unterschied zwischen der West- und der Ostseite an den oberen Messstellen kann zwischen dem 1. und dem 2. Ring beobachtet werden. In Abbildung 5.8 ist dies in Gelb dargestellt, und während die Ölschichten von oben nach unten auf der Laufbuchse zunehmen, gibt es einen deutlichen Überschuss an Öl auf der Ostseite im Vergleich zu Westseite. Wenn man die Ölmenge beim Passieren des ZOT als Bilanz betrachtet und andere Einflüsse außer Acht lässt, kann behauptet werden, dass der Ölüberschuss aus der positiven Differenz der Signale des Feuerstegs an der Ostseite in der großen Ölmenge zwischen dem 1. und dem 2. Ring zu finden ist, während der Ölverlust aus der negativen Differenz der Signale des Feuerstegs an der Westseite hingegen in der geringen Ölmenge zwischen dem 1. und dem 2. Ring sichtbar ist.

Außerdem sind in Abbildung 5.8 die Signale zwischen Laufbuchse und Kolbenringen an unterschiedlichen Messpositionen bei der Abwärtsbewegung des Kolbens dargestellt. Während an den oberen Messpositionen die Ölschichtdicke am 1. Kolbenring geringer ist als am 2. Ring, ist dieses Verhalten an den unteren Messpositionen umgekehrt. Eine mögliche Ursache dafür ist die Abnahme des Zylinderdrucks und eine deutliche Reduzierung der Ölabstreifkräfte des 1. Kompressionsringes, während das Ölangebot zwischen den Ringen zunimmt und so mehr Öl für den 1. Ring zur Verfügung steht als für den 2. Ring, je tiefer an der Laufbuchse man sich befindet.

Mit wenigen Ausnahmen können die oben beschriebenen Phänomene auch bei anderen Betriebspunkten in Abbildung 5.9 gefunden werden. Hier sind die Ölschichtsignale zwischen dem 1. und dem 2. Kolbenring nicht dargestellt, weil sie aufgrund der größeren Menge an Öl die Skalierung der anderen Signale stören würden. Beim Vergleich der unterschiedlichen Betriebspunkte lässt sich in vielen Abschnitten eine Zunahme der Ölschichten mit der Zunahme der Leistung oder der Drehzahl beobachten. Ein wichtiger Faktor ist hier die Temperaturzunahme des Öls und die daraus resultierende Abnahme der Ölviskosität. Dies begünstigt die Ölversorgung des Kolbens und der Laufbuchse.

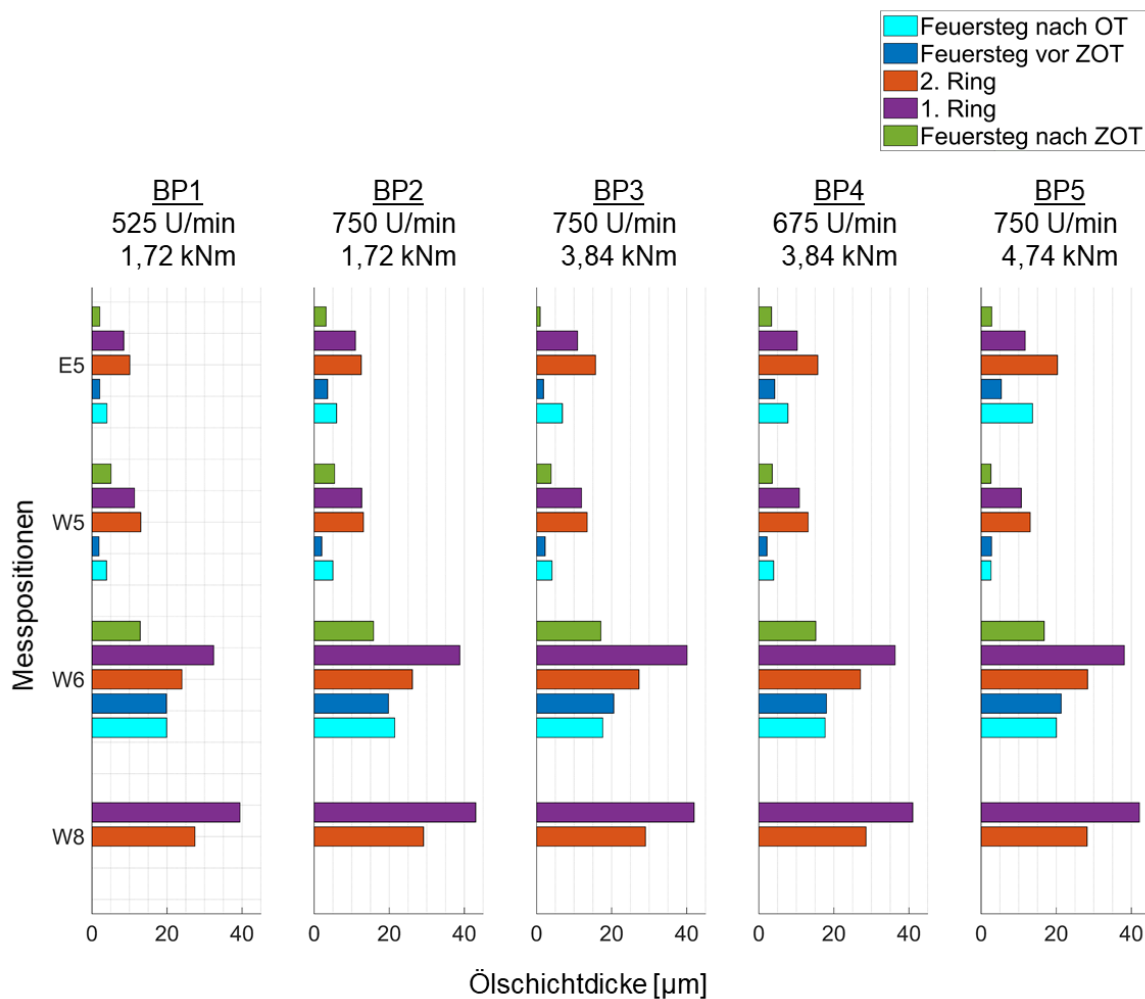


Abbildung 5.9: Mittlere Ölschichten der Arbeitsspielabschnitte an den oberen (E5 & W5), der mittleren (W6) und der unteren (W8) Messstelle – Übersicht in fünf Betriebspunkten

Eine weitere Möglichkeit, die Ölschichten darzustellen, ist die Erstellung von Kennfeldern mit der Approximation über die fünf Betriebspunkte. Weil die Anzahl der Messpositionen und der auswertbaren Abschnitte im Arbeitsspiel sehr hoch ist, werden hier als Beispiel nur die Kennfelder der Ölschichten am 1. und 2. Ring in drei unterschiedlichen Höhen (an der Laufbuchse) dargestellt. In Abbildung 5.10 sind oben die oberen Ölschichten dargestellt, die mittleren in der Mitte und die unteren unten. Damit lässt sich noch einfacher erkennen, dass die Ölmengen mit steigenden Lasten und/oder Drehzahlen zunehmen. Dabei ist diese Zunahme oben an der Laufbuchse eher lastengesteuert und unten drehzahlgesteuert. Weil die Einflüsse der Last auf die Temperaturen oben an der Laufbuchse deutlich höher sind als unten, ist dies das erwartete Verhalten der Ölkenfelder.

Mithilfe der zur Verfügung stehenden Kennfeldern lassen sich Korrelationen mit weiteren Messgrößen sowie Simulationsmodelle aufbauen. Zugleich können Aussagen zu einer Optimierung der Öltransportmechanismen getroffen werden, so z. B. bei den radialen Unterschieden am Ölangebot, die mutmaßlich durch die Ring- und Kolbensekundärbewegung beeinflussbar sind, sowie zu der Abhängigkeit der Ölschichten von den Drehzahlen und Lasten.

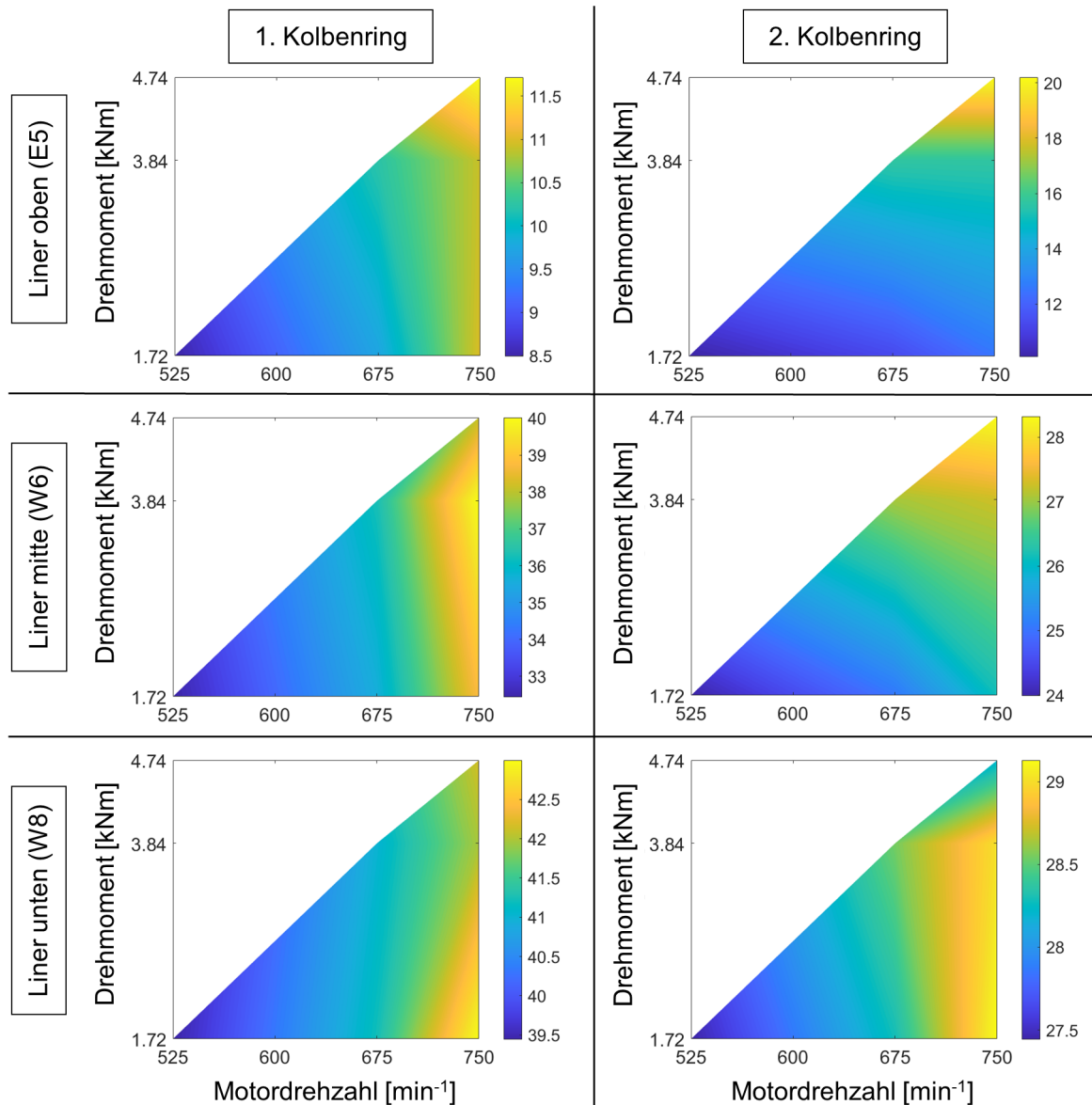


Abbildung 5.10: Kennfelder der mittleren Ölschichten der 1. und 2. Kolbenring-Abschnitte an der oberen (E5), mittleren (W6) und unteren (W8) Messstelle

5.4 Ölschicht (dynamische Prozesse)

Während es sich bei den statischen Ölschichtdicken um die Vorgänge innerhalb eines Arbeitsspiels handelt, werden bei den dynamischen Ölschichtsignalen die Phänomene beschrieben, die über die Laufzeit der Messung auftreten und von den äußeren Parametern oder einer Veränderung im tribologischen System beeinflusst werden. Dazu gehören z. B. die Drehung der Kolbenringe, eine Änderung der Betriebsart des Motors oder die Verstellung der Betriebsparameter. Diese Änderungen werden üblicherweise gemittelt über die Zeit dargestellt, es ist aber auch eine gleichzeitige Darstellung über die Zeit und den Arbeitsspielverlauf möglich. Ein weiterer Aspekt dieser Messungen ist die Korrelation der Ölschichten mit anderen Messergebnissen oder Betriebsparametern des Motors.

Als Beispiel wird hier eine Messung herangezogen, bei der die mittlere Ölschicht an der oberen Messposition der Laufbuchse, der Maximaldruckverlauf im Zylinder und die Ölemission im Abgas des Motor, gemessen nach Ventilaustritt, gleichzeitig betrachtet werden. Abbildung 5.11 (unten) zeigt die Ölfilmstärke an einer OT-Messposition zu den Zeitpunkten, an denen der Feuersteg des Kolbens vorüberläuft, während in Ab-

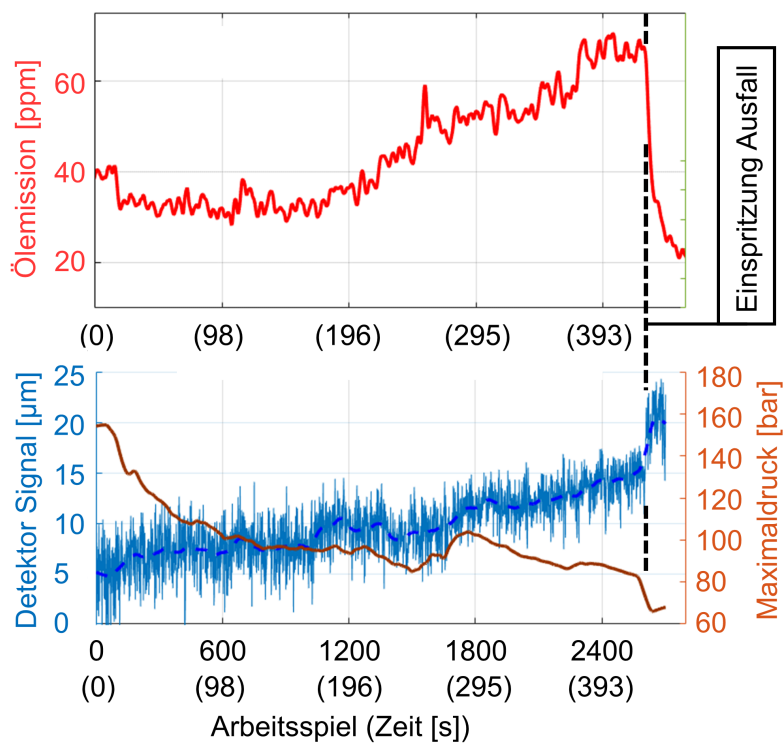


Abbildung 5.11: Korrelation der Ölschichtdicke der Laufbuchse und der Ölemission im Abgas bei einem Einspritzungsausfall

bildung 5.11 (oben) die Abgasemission in *ppm* dargestellt ist. Die Besonderheit dieses Betriebspunkts besteht darin, dass der Motor hier einen starken Leistungsabfall mit einem endgültigen Abbruch der Verbrennung bei hoher Drehzahl aufweist. Ungeachtet der Streuung der Ölfilmthickenwerte ist ein deutlicher Anstieg des Ölsignals mit einer abrupten Zunahme zum Zeitpunkt des Verbrennungsstopps zu beobachten. Gleichzeitig zeigt sich eine Zunahme der Ölemission im Abgas mit einer abrupten Abnahme zum Zeitpunkt des Verbrennungsstopps.

Dieses Verhalten lässt sich dadurch erklären, dass die Verringerung des Verbrennungsdrucks zu einer Abnahme der Abstreifwirkung der Ringe führt, während bei einer nur geringen Veränderung der Öltemperatur und -viskosität mehr Öl an die Laufbuchse gefördert wird. Dieser Effekt ist noch einmal verstärkt beim Ausbleiben der Verbrennung kurz am Ende der Messung zu sehen. Im Gegensatz dazu ist das im Zylinder hochgeschleppte Öl im Abgas nur bis zum Ende der Verbrennung sichtbar, weil die Ölemissionsmechanismen, wie das Abdampfen des Öls, danach fehlen. Im Falle einer Wiederaufnahme der Verbrennung, die in diesem Betriebspunkt nicht stattgefunden hat, wäre eine rückläufige Abnahme der Ölfilmthicke der Zylinderlaufbahn mit einem starken Anstieg der Ölemission im Abgas zu erwarten. Dieses Verhalten wurde bereits in anderen Forschungsarbeiten detektiert [9] [65].

5.4.1 Ringdrehung

Drehung des 1. Kolbenringes Wie bereits in Abbildung 5.5 beobachtet wurde, ist das Passieren des Ringstoßes an den Messstellen deutlich sichtbar. In Abbildung 5.12 wird der Bereich der gleichen Messung wie in Abbildung 5.5, während der 1. Kolbenring sich vor der Messstelle im UT befindet, über die Zeit dargestellt. Es ist zu erkennen, dass in wiederholbaren Zeitabschnitten eine Abweichung im Signal entsteht. Diese Abweichung ist auf den freigeblasenen Stoß des 1. Ringes zurückzuführen. Der 1. Kolbenring macht innerhalb der ca. 245 Sekunden eine volle Umdrehung und ist wieder mit dem Stoß an der Messposition zu sehen. Die Abnahme der unkalibrierten Signale zur Zeit des Ringstoßes ist eine Kombination aus weniger Öl und geringerem Kalibrierungsfaktor zu diesen Zeitpunkten.

Für eine bessere Erkennung der Ringdrehbewegung und um das Verhalten des Schmieröls auf der Laufbuchse zu veranschaulichen, ist es sinnvoll, die Darstellung der Daten auf der Zeitachse zu erweitern. Im Folgenden wird eine Messung an der Messposition im UT-Bereich auf der Ansaugseite (W8) beschrieben. Die Art der dargestellten Daten in Abbildung 5.13 ist im Wesentlichen die gleiche wie in Abbildung 5.12, mit dem

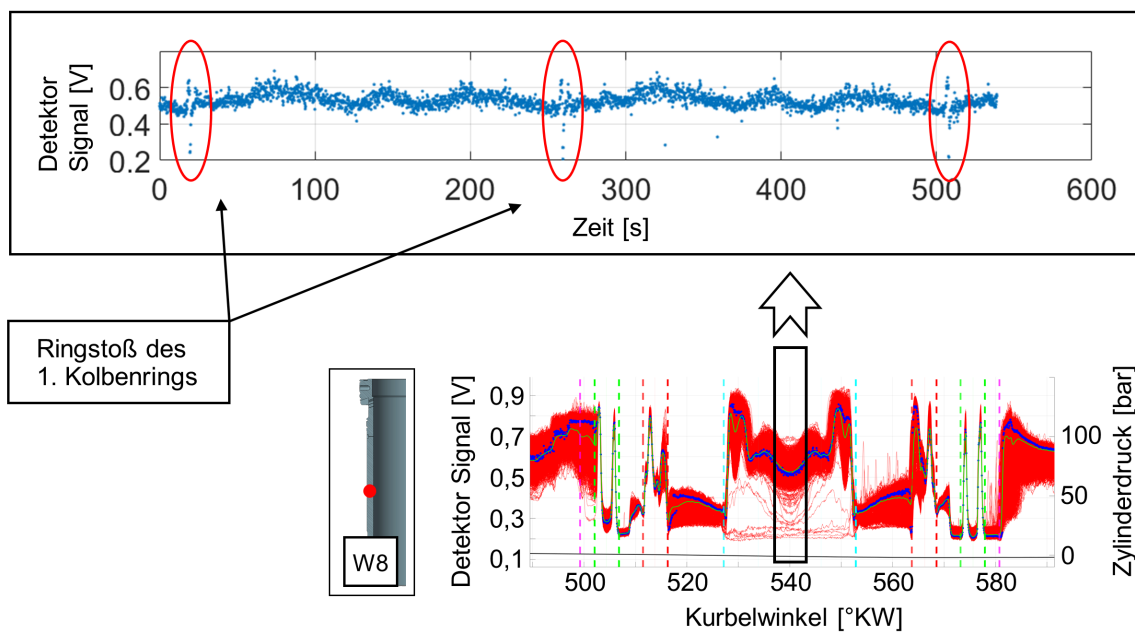


Abbildung 5.12: Detektieren des Ringstoßes des 1. Kolbenringes an der unteren Messstelle (W8) [750 min^{-1} , $1,72 \text{ kNm}$]

Unterschied, dass die einzelnen Arbeitszyklen über die Zeit dargestellt werden, so dass ein Abbild des Ölverhaltens erkennbar ist. In dieser Abbildung ist ein Abschnitt der Daten zwischen 480 °KW und 600 °KW dargestellt, während der Kolben den unteren Totpunkt passiert.

Zusätzlich sind im Bild die Abschnitte markiert, während die Kolbenringe die Messposition passieren. Es ist zu beachten, dass die Geschwindigkeit des Kolbens bei der Annäherung an den unteren Totpunkt (540 °KW) abnimmt, was sich in der Breite der einzelnen Ringabschnitte widerspiegelt. Wie bereits erläutert, können die Ölsignale auf der Kurbelwellenachse (°KW) nicht direkt miteinander verglichen werden, da die einzelnen Abschnitte eigene Kalibrierparameter benötigen. Dennoch lassen sich einzelne Bereiche wie die Ringe und Ringstege jeweils vor und nach dem UT miteinander vergleichen, ebenso wie die Verläufe der Signale über die Zeit (Zeitachse). Auf diese Weise lassen sich zahlreiche Aspekte des Ölverhaltens erkennen.

Die Ölwellen sind unter dem 1. Kompressionsring zu sehen, während er sich nach unten bewegt, an der Messposition anhält und sich dann wieder nach oben bewegt (530 °KW & 550 °KW). Solche Ölwellen sind auch am 2. Ring, unterhalb und oberhalb des Ringes, sichtbar, während er sich nach oben bewegt (565 °KW). Diese Ölwellen sind jedoch beim 2. Ring nur unterhalb des Ringes zu sehen, wenn er sich vor dem oberen Wendepunkt nach unten bewegt (515 °KW). Weiterhin ist auch die große Ölwellen unterhalb des

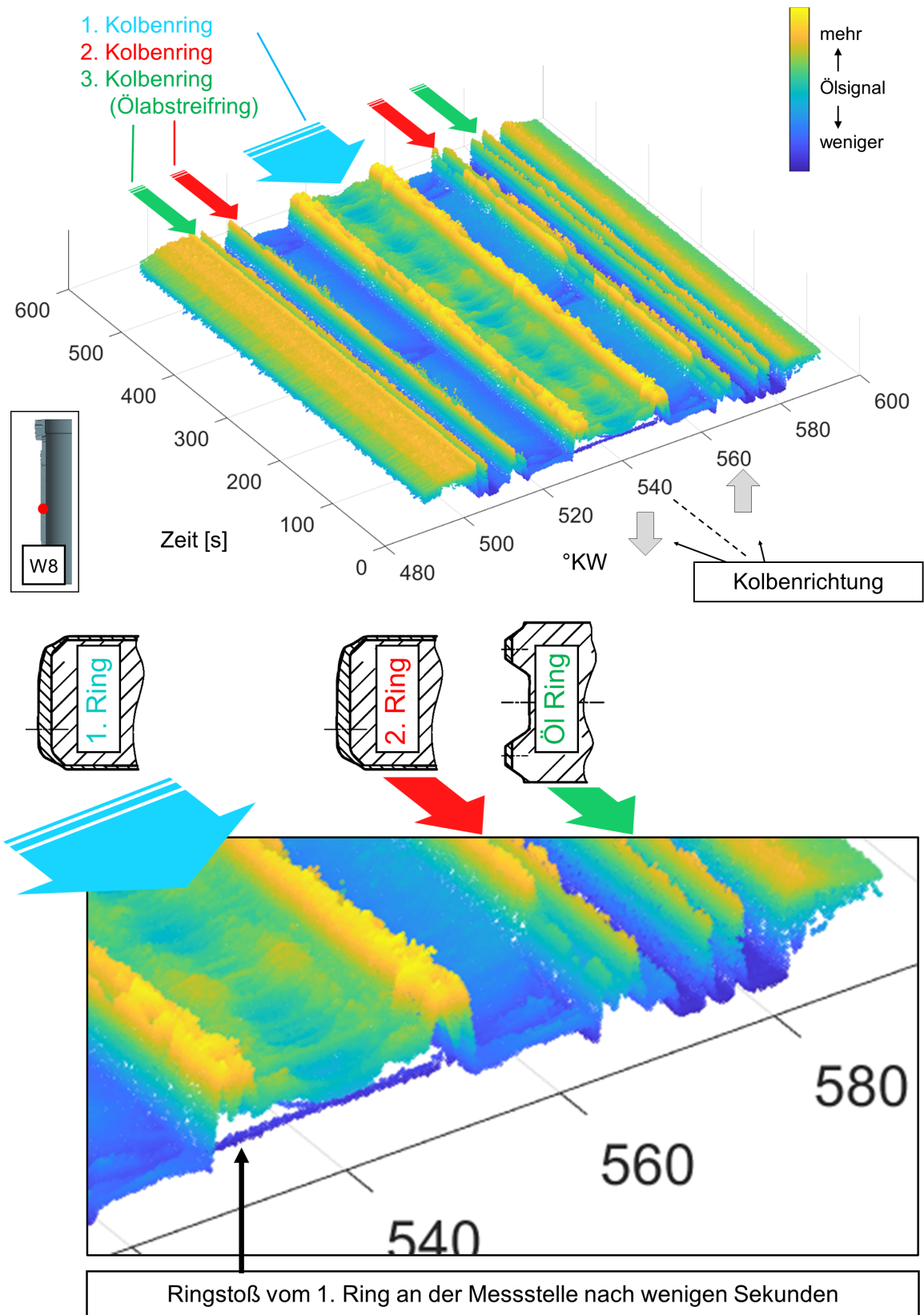


Abbildung 5.13: Map der Ölschichtsignale der unteren Messstelle (W8) – Passieren des Kolbenringpaketes am UT; Detaildarstellung mit Erkennung des 1. Ringstoßes (unten) [750 min^{-1} , $1,72 \text{ kNm}$]

Ölabstreifringes auf dem Weg des Kolbens nach unten (500 °KW) und nicht auf dem Weg des Kolbens nach oben (580 °KW) zu sehen. Dieses Verhalten wurde bereits in den Darstellungen über das Arbeitsspiel gezeigt und ist hier auch auf der Zeitskala sichtbar.

Abbildung 5.13 (unten) ist eine vergrößerte Darstellung der Messungen aus Abbildung 5.13 (oben), in der der 1. Ring besser zu erkennen ist, wenn sich der Kolben nach oben bewegt (nach 540 °KW). Der Ringstoß des 1. Ringes ist einige Sekunden nach dem Beginn der Messung im ersten Ringabschnitt sichtbar. Außerdem sind die Einflüsse des Ringstoßes auf den Bereich zwischen dem 1. und dem 2. Ring und auf das Öl am 2. Ring zu erkennen. Die Einflüsse des 1. Ringstoßes breiten sich bis zum 2. Ring aus und sind als verringerte Ölschicht im 1. Ringsteg und an beiden Ölwellen um den 2. Ring zu sehen. Diese Einflüsse breiten sich nicht bis zum Ölabstreifring oder dem Öl an der Laufbuchse nach dem Ölabstreifring an dieser UT-Messposition aus. Dabei dauert der Einfluss des 1. Ringstoßes am 1. Ring nur wenige Arbeitsspiele, d. h., nur solange der Ringstoß vor der Messstelle ist, während er am 2. Ring mehrere Sekunden zu sehen ist. Dies ist ein Anzeichen dafür, dass die Blow-by-Gase durch den Ringstoß die Ölschichtbildung mit beeinflussen.

Zum besseren Verständnis der Ringstöße und der Drehung der Ringe können die Daten während des Vorbeifahrens des Kolbens auf beiden Seiten der Laufbuchse (Ost

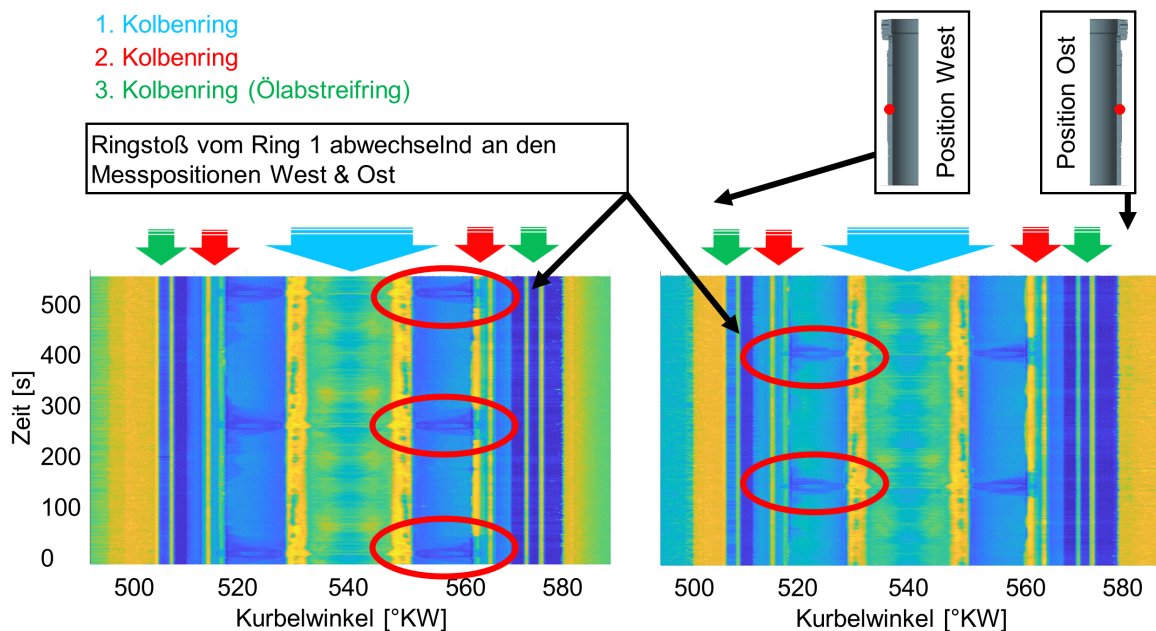


Abbildung 5.14: Map der Ölschichtsignale der beiden unteren Messstellen (E8 & W8) mit abwechselnder Erkennung des Ringstoßes des 1. Kolbenringes [750 min^{-1} , 1,72 kNm]

& West) über einen längeren Zeitraum angezeigt werden. Diese Daten sind in Abbildung 5.14 in der Draufsicht im UT-Bereich dargestellt. Hier sind die Bereiche beim Auftreten des 1. Ringstoßes an der Messstelle markiert. Aus diesen Daten kann geschlossen werden, dass der 1. Ring an diesem Betriebspunkt eine kontinuierliche Rotation aufweist, weil der Stoß abwechselnd auf der Ost- und Westseite der Laufbuchse zu sehen ist. Die Drehgeschwindigkeit des 1. Ringes in dieser Messung beträgt 1,47 Grad/Sekunde oder 245 Sekunden/Umdrehung und kann variieren Abhängig von Motorbetriebsbedingungen.

Für die Identifizierung der Ringstöße des 2. Ringes und des Ölabbstreifringes muss die Auflösung der dargestellten Daten geändert werden und die einzelne Bereiche müssen untersucht werden. Eine detaillierte Betrachtung der Daten gibt keine signifikante Rotation des 2. Kolbenringes und des Ölabbstreifringes in diesem Betriebspunkt zu erkennen. Das Verhalten des Öl- und Kompressionsringes ändert sich in Abhängigkeit von der Kombination aus Motordrehzahl und Last. Dabei ist die Rotation des 1. Kolbenringes bei den geringeren Lasten und über den nahezu gesamten Drehzahlbereich zu beobachten, während die Rotation des 2. Ringes in keinem Betriebspunkt detektiert wurde. Die Drehung des Ölabbstreifringes ist in mehreren Betriebspunkten sichtbar, kann aber nicht von einem Betriebsparameter abhängig gemacht werden.

Drehung des Ölabbstreifringes Beispiele der Drehung des Ölabbstreifringes sind Abbildung 5.16 zu entnehmen. Hier sind zwei unterschiedliche Messungen bei gleichen Betriebsbedingungen auf der Höhe der unteren UT-Messposition (W8) und der mittleren Messposition (W6) dargestellt. Es wurden Arbeitsspielbereiche ausgewählt, in denen das Passieren des Kolbenringpakets zu sehen ist. In Abbildung 5.16 (oben) ist das Passieren der drei Kolbenringe bei der Bewegung des Kolbens nach unten zu sehen. Es sind weiterhin die Ölwanne unter dem Ölabbstreifring (428 °KW) sowie die Ölwanne des 1. und des 2. Ringes sichtbar. Auch in dieser Messung ist der 1. Ringstoß (einmal) im 1. Ringsteg kurz nach dem Messstart sichtbar.

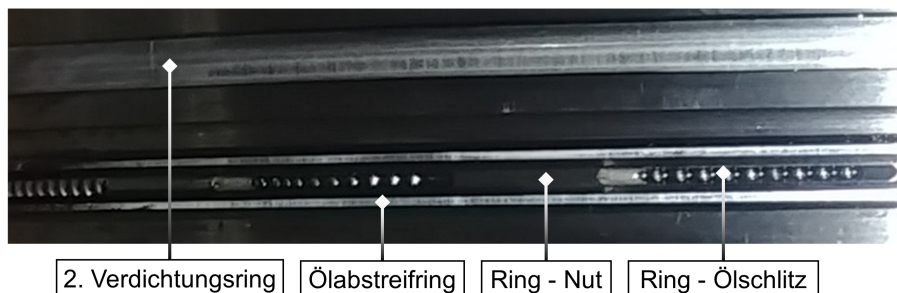


Abbildung 5.15: Aufbau des Ölabbstreifringes

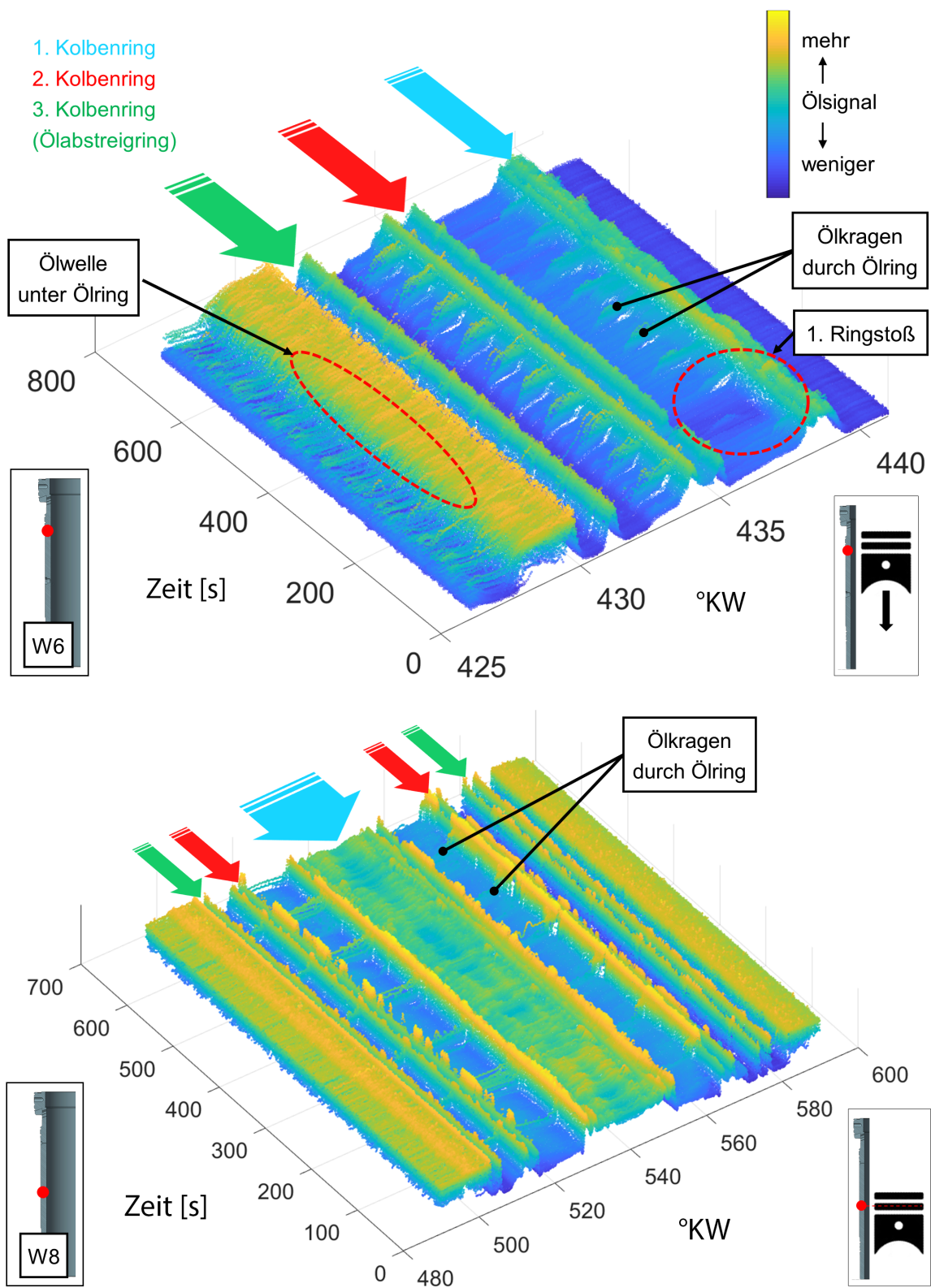


Abbildung 5.16: Map der Ölschichtsignale mit Erkennung der Drehung des Ölabstreifringes, Messstellen W6 (oben) und W8 (unten) [525 min^{-1} , $1,72 \text{ kNm}$]

Im Vergleich zu den anderen Messungen sind hier Ölkragen in beiden Ringstegen und beim 2. Ring sowie beim Ölabstreifring identifizierbar. Sie resultieren aus der Drehung des Ölabstreifringes. Aufgrund des Aufbaus des Ölabstreifringes (Abbildung 5.15) sammelt sich mehr oder weniger Öl an einer festen radialen Position. Während der Drehung des Ölabstreifringes sind entweder die Ölschlitze (weniger Öl) vor der Messstelle positioniert oder die Ringzwischennuten des Ölabstreifringes (mehr Öl). Die Ölschichtsignale an den Ringen bestehen aus dem Öl zwischen Laufbuchse und den Ringoberflächen und die Signale an den Ringstegen aus Laufbuchsenölschicht und Ölschicht am Ringsteg des Kolbens. Es ist zu beachten, dass diese Einflüsse des Ölabstreifringes den 1. Kolbenring nicht überdauern und in der nächsten Umdrehung erst da sind, wenn der Ölabstreifring an der Messposition ankommt. In dem Beispiel der Messung in Abbildung 5.16 (oben) kann auch die Drehgeschwindigkeit des Ölabstreifringes ausgerechnet werden. Sie liegt hier bei 21 Minuten/Umdrehung und variiert abhängig vom Betriebspunkt und Messzeitpunkt.

In Abbildung 5.16 (unten) ist eine weitere Messung mit einer detektierbaren Drehung des Ölabstreifringes dargestellt. Die Messung wurde im unteren UT-Bereich der Laufbuchse aufgenommen und die Verläufe der Signale sind ähnlich denen in Abbildung 5.16 (oben). Auch hier lassen sich die Ölkragen erkennen, die durch den Ölabstreifring verursacht werden. Während es sich bei dieser Messung um den gleichen Betriebspunkt handelt, kann festgestellt werden, dass die Drehgeschwindigkeit des Ölabstreifringes langsamer ist als in Abbildung 5.16 (oben), was die Bestimmung der Abhängigkeiten der Ölabstreifringdrehung erschwert.

Aus den Messungen der Drehung der Kolbenringe lässt sich folgern, dass die Ringbewegung von den Betriebsparametern abhängen kann, wie im Beispiel des 1. Kompressionsringes, oder stochastisch vorkommen kann, wie im Beispiel des Ölabstreifringes. Mit der zusätzlichen Variation der Kolbenringe könnten weitere Abhängigkeiten untersucht werden mit dem Ziel einer bewussten Beeinflussung der Ringdrehbewegungen. Diese sind vor allem im Hinblick auf den Laufbuchsenverschleiß sowie die Blow-by-Mechanismen wichtig. Die Zusammenhänge der hier gezeigten Ringdrehungen mit dem Blow-by und der Ölemission werden im folgenden Abschnitt beschrieben.

Ölemission durch Ringdrehung Ein wesentlicher Schritt in der Analyse der Ölschichten der Laufbuchse ist die Korrelation der Ergebnisse unter Einbeziehung aller verfügbaren Motor- und Messdaten. Im Folgenden wird der beobachtete Zusammenhang zwischen der Ringdrehung, der Temperatur der Laufbuchse und der Ölemission im Abgas beschrieben. Der Einfluss der Kolbenringrotation auf die Laufbuchsentemperatur und die Ölemission im Abgas ist in Abbildung 5.17 dargestellt.

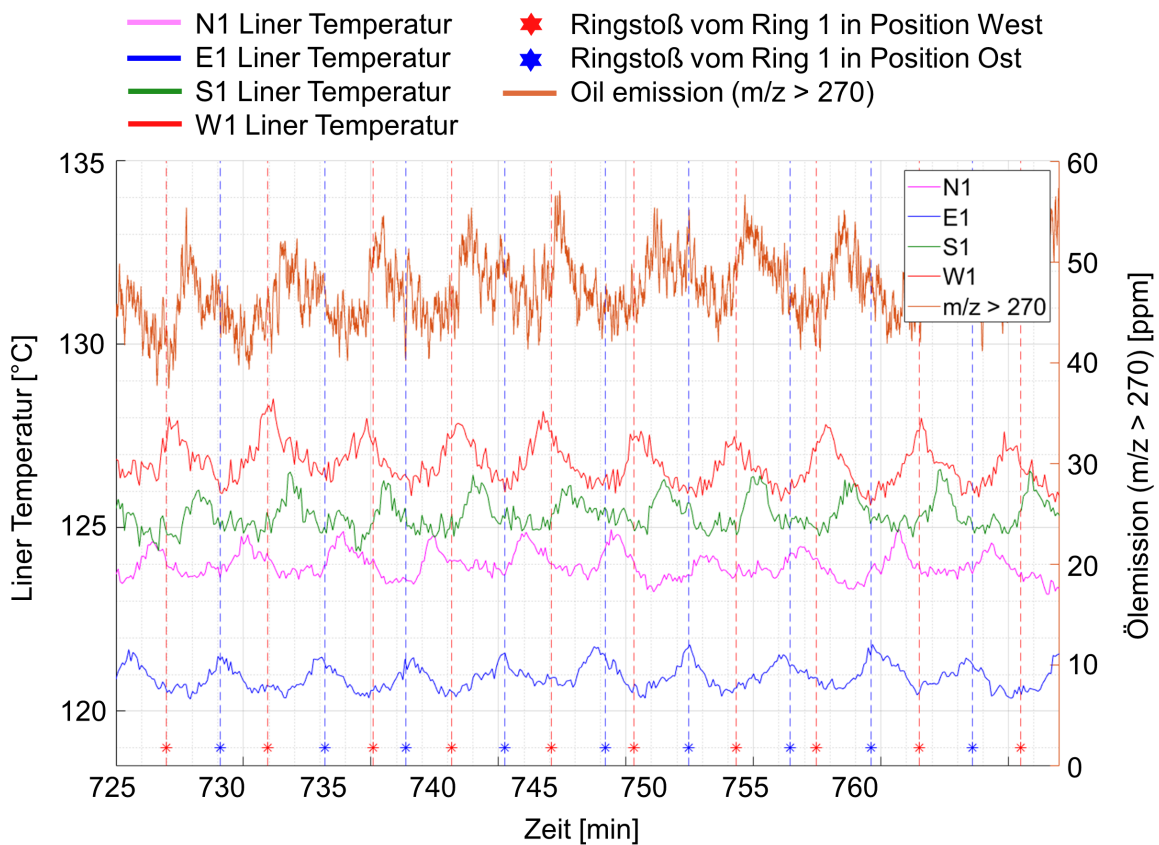


Abbildung 5.17: Korrelation der Ringstoßposition des 1. Ringes mit den Laufbuchsentemperaturen und der Ölemission im Abgas [750 min^{-1} , $1,72 \text{ kNm}$]

In bestimmten Betriebszuständen, insbesondere bei niedriger Last, sind signifikante Schwankungen der Ölemission im Abgas zu beobachten. Unter Berücksichtigung der simultan erfassten Messdaten, insbesondere der Zylinderbuchsentemperaturen sowie der Ölschicht auf der Buchse, konnte ein eindeutiger Zusammenhang festgestellt werden. Abbildung 5.17 zeigt alle wesentlichen Daten für diese Beobachtung. Die Daten im oberen Teil der Grafik lassen die schwankende Ölemission im Abgas erkennen. Die vier farbigen Profile geben die Temperaturdaten im oberen Bereich der Laufbuchse (rot, grün, rosa, blau) wieder, und die Punkte im unteren Teil des Diagramms zeigen das Auftreten des 1. Ringstoßes an den Messpunkten auf der Ost- (blau) und Westseite (rot) der Laufbuchse.

Es ist gut zu erkennen, dass die Frequenzen der jeweiligen Schwankungen übereinstimmen. Die erhöhten Ölemissionen werden einerseits direkt durch die Überlappung der Ringstöße des 1. und 2. Ringes wegen des erhöhten Gasflusses durch die Kolbenringgruppe (Blow-by) verursacht. Andererseits kann die Ölemission auch durch eine mögliche Verformung der Laufbuchse beeinflusst werden, die durch Temperaturschwankun-

gen der Laufbuchse als Folge des Blow-bys verursacht wird. In einem weiteren Motorlauf wurde auch eine zyklische Schwankung der Aerosolpartikelkonzentration im Abgas synchron zu den Ölemissionsschwankungen beobachtet. Öltröpfchen, die entweder durch Trägheitskräfte im OT oder durch ein verstärktes Blow-by abgeschleudert werden, sind nicht nur im Massenspektrum, sondern auch im Aerosolspektrum zu sehen.

Darüber hinaus lassen sich aus dieser Beobachtung die Drehrichtung des 1. Ringes und die Position des Ringstoßes des 2. Ringes näherungsweise bestimmen. Gemäß dem Trend der vier Temperatursensordaten ist die Drehrichtung des 1. Kolbenringes gegen den Uhrzeigersinn. Angesichts der bekannten Position des 1. Ringes und der Erhöhung der Blow-by-Strömung bei übereinanderstehenden Stößen muss die Position des 2. Ringstoßes im südlichen Bereich der Laufbuchse liegen.

5.4.2 Übergang Diesel zu CNG

Ein weiteres Beispiel der dynamischen Prozesse bei den Ölschichtmessungen kann während der Änderung der Betriebsart des Motors beobachtet werden. In Abbildung 5.18 sind die Ölschichtsignale im oberen OT-Bereich der Laufbuchse dargestellt. Hier ist das Passieren des Ringpaketes am ZOT mit den drei Kolbenringen zu sehen. Der Ölabstreifring bleibt dabei am ZOT (360 °KW) knapp oberhalb der Messpositionen stehen. Es sind zwei simultan aufgenommene Messstellen an der West- (W5) und der Ostseite (E5) der Laufbuchse dargestellt.

Bei der Betriebsart des Motors wird ein Wechsel vom Diesel- zum CNG-Betrieb durchgeführt, während eine Diesel-Pilotflamme im CNG-Betrieb erhalten bleibt. Der Wechsel geschieht bei ca. 300 Sekunden, und es kann eine deutliche Abnahme im Öl-signal des Kolbenringpakets beobachtet werden. Diese Abnahme ist sowohl an der West- als auch an der Ostseite feststellbar. Die Signale in den Feuersteg-/Laufbuchsenbereichen des Ringpakets (vor 330 °KW & nach 390 °KW) sind auch von der Betriebsartänderung betroffen, wobei die Ölschichtunterschiede zwischen Diesel- und CNG-Bereichen nahezu gleich sind. Eine deutlich größere Änderung lässt sich an den Ringen und Ringstegen feststellen. Hier ist an beiden Seiten (W & E) deutlich mehr Öl nach dem Wechsel zum CNG vorhanden. Dabei scheinen die Ölschichten am Ölabstreifring (350–370 °KW) auch von der Drehung des Ringes beeinflusst zu sein.

In Abbildung 5.19 sind noch einmal die Signale auf der Westseite in Korrelation mit den Motorparametern und der Ölemission im Abgas dargestellt. Hieraus ist erkennbar, dass die Druckschwankungen des maximalen Zylinderdruckes, zusammen mit der SOI-

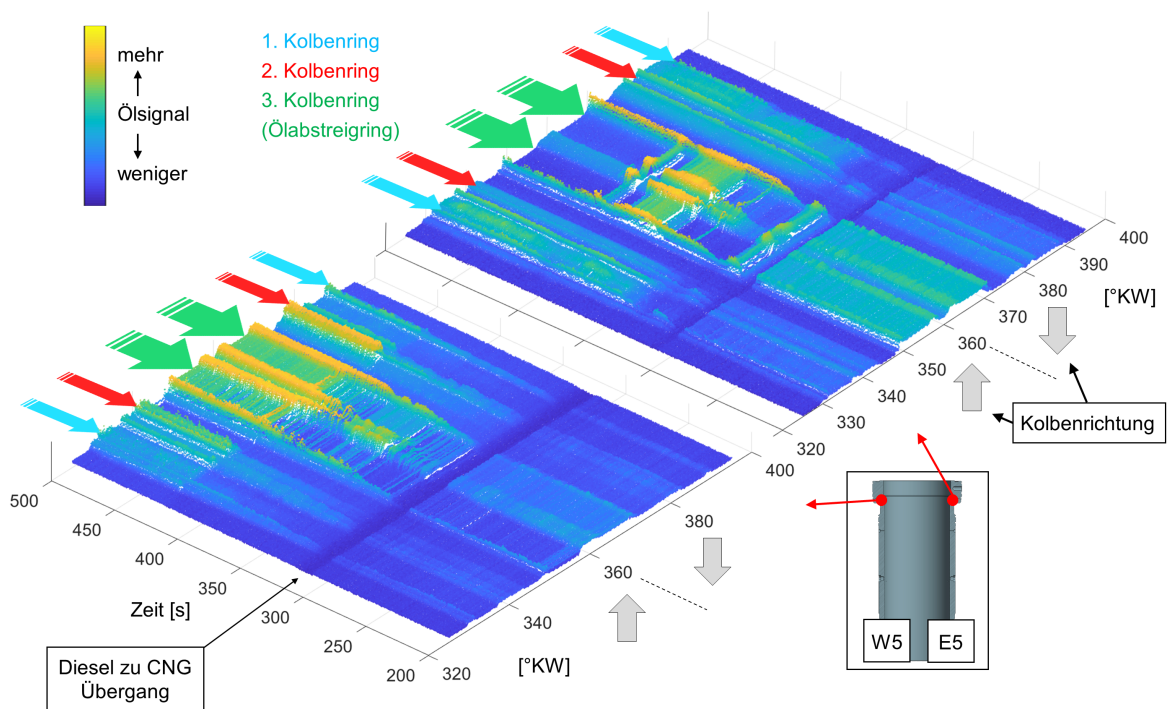


Abbildung 5.18: Map der Ölschichtsignale mit Erkennung der Betriebsartänderung (Diesel – CNG) des Motors an den oberen Messstellen (W5 & E5) [525 min^{-1} , $1,72 \text{ kNm}$]

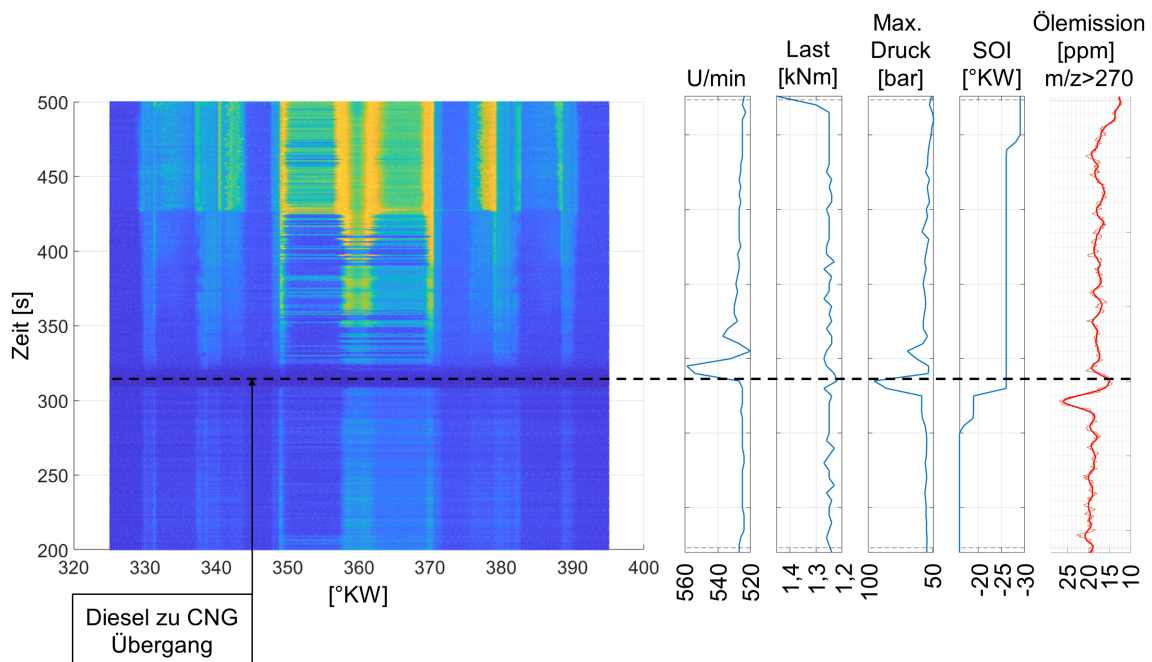


Abbildung 5.19: Korrelation der Ölschichtsignale der Betriebsartänderung (Diesel – CNG) mit den Motorparametern und der Ölemission im Abgas

Verstellung (Start of Injection) und dem Drehzahlsprung, zu der Ölschichtabnahme führen können. Eine deutliche Erhöhung der Abstreifwirkung der Kolbenringe aufgrund des Druckanstieges mit unveränderten Mechanismen des Öl-Hintransportes kann zu einer deutlichen Abnahme des Öls an der Laufbuchse und am Kolben führen.

Bei der Betrachtung der Ölemissionssignale kann man feststellen, dass auch hier eine leichte Abnahme der Emission zu der Zeit des Übergangs (Diesel zu CNG) stattfindet. Das kann eine direkte Folge des abnehmenden Abdampfens und Abschleuderns des Öls sein. Interessant ist hier die Zunahme der Ölemission kurz vor der Ölschichtabnahme. Eine mögliche Erklärung dafür ist das erhöhte Abschleuder- und Abschabeverhalten (Kapitel 2.1.2) des Kolbens mit den Kolbenringen bei sprunghaften Laständerungen.

Die Untersuchungen des Betriebsartenwechsels haben gezeigt, dass Zustände mit stark reduzierter Ölversorgung an der Laufbuchse sowie im Kolbenringpaket auftreten können. Die Dauer dieser Zustände ist vor allem mit Blick auf den Verschleiß der tribologischen Komponenten sowie die Ölemission zu minimieren. Der Betriebsartenwechsel sollte daher nicht bei erhöhten Lasten oder unzureichenden Öltemperaturen durchgeführt werden.

5.4.3 Parametervariation

Neben ungewollten oder unvermeidlichen Betriebseinflüssen wurden auch geplante Parametervariationen durchgeführt. Dazu gehören z. B. die Temperaturvariationen des Öls und Kühlwassers sowie die Verstellung des SOI und der Pilotstrahlmenge. Viele dieser Variationen hatten keinen oder nur einen sehr geringen Einfluss auf das Öl der Laufbuchse oder des Kolbens. Im Falle der Temperaturvariationen der Kreisläufe konnten keine wesentlichen Änderungen des Öls an der Laufbuchse festgestellt werden, weder in Schichtdicke noch in der Temperatur. Im Weiteren wird ein Beispiel mit dem detektierbaren Einfluss auf das Laufbuchsenöl beschrieben.

In Abbildung 5.20 sind die Ölschichten an einem Bereich im Arbeitsspiel an drei unterschiedlichen Positionen dargestellt. Es handelt sich um den zeitlichen Verlauf der Ölschicht an Feuersteg und Laufbuchse in der Abwärtsbewegung des Kolbens nach dem ZOT. Dabei ist in Abbildung 5.20 (oben) die SOI-Verstellung dargestellt, die ungefähr in der Mitte der Messung stattfindet. Die quantitativen Änderungen im mittleren Signal an der oberen Messstellen (W5 & E5) erlauben es nicht, eine genaue Abhängigkeit von dem SOI-Zeitpunkt festzustellen. Diese mittleren Signale sind eher von der Drehung der Kolbenringe beeinflusst.

Dennoch lässt sich eine Abnahme der Streuung im Signal der oberen Messstellen (W5 & E5) erkennen, die mit dem Zeitpunkt der SOI-Verstellung beginnt. Die Arbeitsspiele (blaue Punkte) weichen im ersten Abschnitt der Messung deutlich mehr von dem mittleren Signal ab als im zweiten Abschnitt. Dies ist vor allem an der Messstelle E5 und in geringerem Maße an der Messstelle W5 zu erkennen. Möglicherweise hat die Veränderung der Verbrennungs- und der Druckausbreitung bei der SOI-Verstellung einen positiven Einfluss auf die Stabilität der Kolbenringe. In dem Beispiel wären die SOI-Zeitpunkte im zweiten Abschnitt der Messung zu bevorzugen, weil sie zu konstanteren Kolbenringkräften führen und stabilere Ölschichten erzeugen.

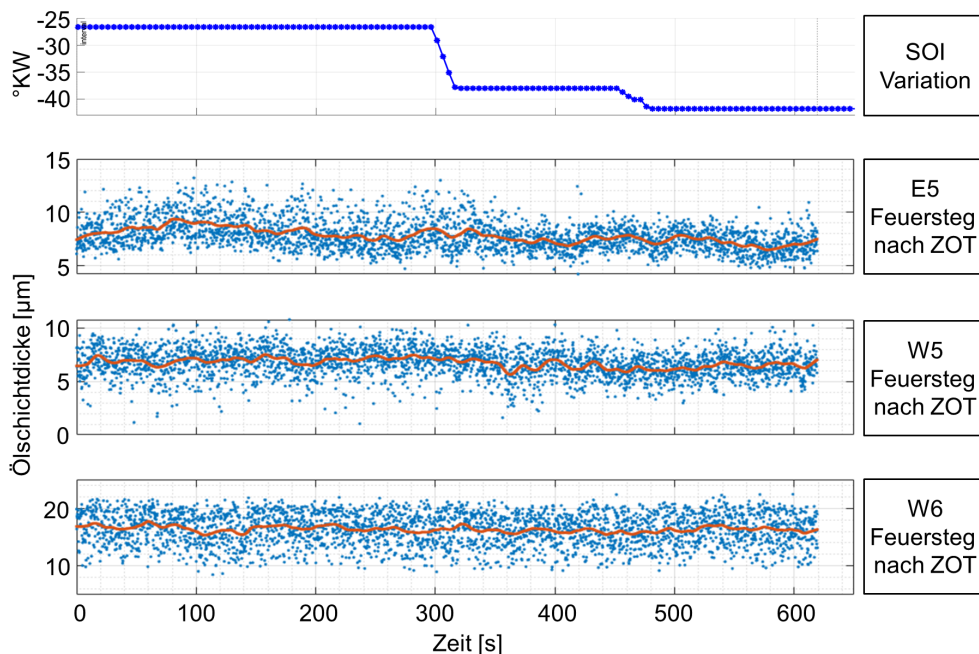


Abbildung 5.20: Korrelation der Ölschichtsignale am Feuersteg/Laufbuchse mit dem SOI des Motors [675 min^{-1} , $3,85 \text{ kNm}$, SOI: $-26,6^\circ$ bis $> -41,8^\circ$]

Die Änderungen an den Ölschichten in den mittleren und unteren Bereichen der Laufbuchse durch die SOI-Verstellung waren nicht zu erwarten und können in Abbildung 5.20 (W6) nicht beobachtet werden. Weil die Temperaturen und Öltransportmechanismen hier weniger von der Verbrennung abhängen, sind die Ölschichten nicht durch die SOI-Verstellung beeinflussbar.

Das Verständnis der Parameter, die einen Einfluss auf die Ölschichten der Laufbuchse und des Kolbens haben, ist ausschlaggebend für die Optimierung des tribologischen Systems. Während ein positiver Einfluss am Beispiel der SOI-Variation gezeigt wurde, sind weitere Untersuchungen z. B. hinsichtlich der Temperatur des Laufbuchsenöls oder der Federkraft des Ölabstreifringes wünschenswert.

6 Messungen und Ergebnisse zum Kolbenbolzen

Ähnlich wie die Laufbuchsenmessungen werden im Folgendem die Kolbenbolzenmessungen analysiert. Dabei handelt es sich um die Betrachtung der Ölschicht im Spalt der Lagerbuchse zwischen der Kolbennabe und dem Kolbenbolzen sowie des Ölangebots in der Lagernähe. Die durchgeführten Messungen sind in drei Bereiche unterteilt: Schichtdickenmessungen im Lager, Ölangebotsmessungen um das Lager und Transportmessungen im Lager.

6.1 Messprogramm

Schichtdickenmessungen Für die Untersuchung der Ölschicht im Kolbenbolzenlager im Hinblick auf die Schichtdicke wird das komplette Öl homogen mit dem Fluoreszenzmittel vermischt und die Fluoreszenzsignale werden an den gewählten Messpositionen untersucht. Da die Messsignalintensität mit der Menge des Fluoreszenzmittels vor den Messstellen zusammenhängt, konnten so die Ölschichtdicken qualitativ aufgenommen und mithilfe des Kalibrierverfahrens quantifiziert werden. Die dabei entstehenden Daten beschreiben nur die Menge des Öls und nicht die Spaltdicke oder das Öl-Luft-Verhältnis.

Das Vorgehen während der Ölschichtdickenmessungen ist schematisch in Abbildung 6.1 dargestellt. Dabei wurde das komplette Prüfstandöl mit dem Fluoreszenzmittel *Lumilux* vermischt, um eine konstante 0,12-%-Mischung zu erhalten. Alle Messungen wurden bei konstanter *Lumilux*-Konzentration bei wechselnden Last-, Drehzahl- und Temperaturbereichen durchgeführt.

Ölangebotsmessungen Als Ölangebotsmessungen werden hier die Messungen der Ölmenge am Rand des Gleitlagers bezeichnet. Dabei entspricht die Methode den Schichtdickenmessungen mit dem Unterschied, dass die Daten nur qualitativ betrachtet werden. Zu bemerken ist, dass die Messstellenkonstruktion das Ölverhalten mit beeinflussen kann. Des Weiteren sind nur geringe Ölschichtdicken auf diese Weise detektierbar, und bei einem zu hohen Ölangebot findet an der Messstelle eine Sättigung des Signals

statt. Die Ölsignale bei den Ölangebotmessungen sind vor allem im Hinblick auf ihren zeitlichen Verlauf zu interpretieren.

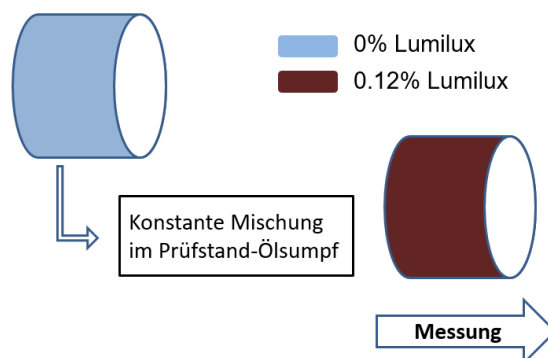


Abbildung 6.1: Vorgehensweise bei den Ölschichtdickenmessungen

Transportmessungen Um die Transportvorgänge in der Ölschicht zu detektieren, wird durch die Zugabe von mit Fluoreszenzmittel versetztem Öl an definierten Positionen dessen Verteilung im Spalt untersucht (Abbildung 6.2). Dabei wird in die Ölschicht lokal eine geringe Menge von der mit dem Fluoreszenzmittel versetzten Mischung injiziert und der zeitliche Verlauf der Fluoreszenzsignale an den definierten Messpositionen aufgezeichnet. Das Zuführen der Injektionsmischung geschieht mithilfe der in der Nähe des Gleitlagers verbauten Kapillaren mit einem Innendurchmesser von $250\text{--}320\ \mu\text{m}$. Nach dem ersten Detektieren der Injektionsmischung an den Messstellen kommt es wegen des Verteilens der Injektion in der Ölschicht sowie der Vermischung mit dem nicht fluoreszierenden Öl zu einer Verringerung der Fluoreszenzsignale über die Zeit. Die Ergebnisse der Transportmessungen sind somit nur im Hinblick auf den zeitlichen Verlauf und nicht hinsichtlich der Intensität zu bewerten und benötigen keine Kalibrierung.

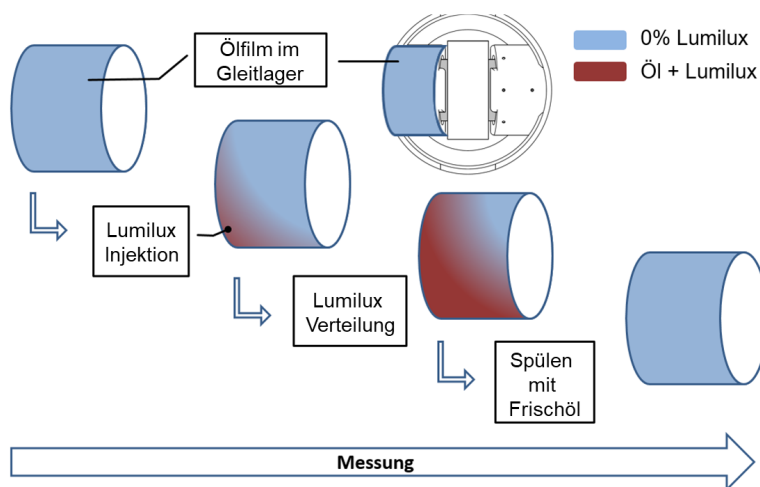


Abbildung 6.2: Vorgehensweise bei den Öltransportvorgangsmessungen

Messprogramm Vollmotor Die Betriebspunkte des Messprogramms, die auf dem Vollmotorenprüfstand gefahren wurden, sind in Abbildung 6.3 dargestellt. Der Drehzahlbereich geht dabei von 1200 min^{-1} bis 3500 min^{-1} und der Drehmomentbereich vom Schleppbetrieb bis zu einem maximalen Drehmoment von ca. 420 Nm , wobei die Drehmomentschritte 70 Nm betragen. Pro Betriebspunkt beträgt die Messdauer drehzahlabhängig im Durchschnitt zwischen 30 s und 60 s. Zur Validierung der Messergebnisse mit der Simulation wurden vier Betriebspunkte ausgewählt, die sowohl mit der niedrigen als auch mit der hohen Öldruckstufe gefahren wurden. Für die Trendaussage der ermittelten Messergebnisse werden zusätzliche Betriebspunkte verwendet. Zu bemerken ist, dass nach wiederholtem Durchfahren des Kennfeldes während der Ölangebotsmessungen (280 Nm , 3500 min^{-1}) ein Schaden an den Messleitungen auftrat, wodurch weitere Messungen nicht mehr möglich waren. Die Untersuchungen der Schäden ergaben, dass eine Klebeverbindung am Kolben ungünstig positioniert worden war und der Belastung der Ölspritzdüse nicht standgehalten hatte.

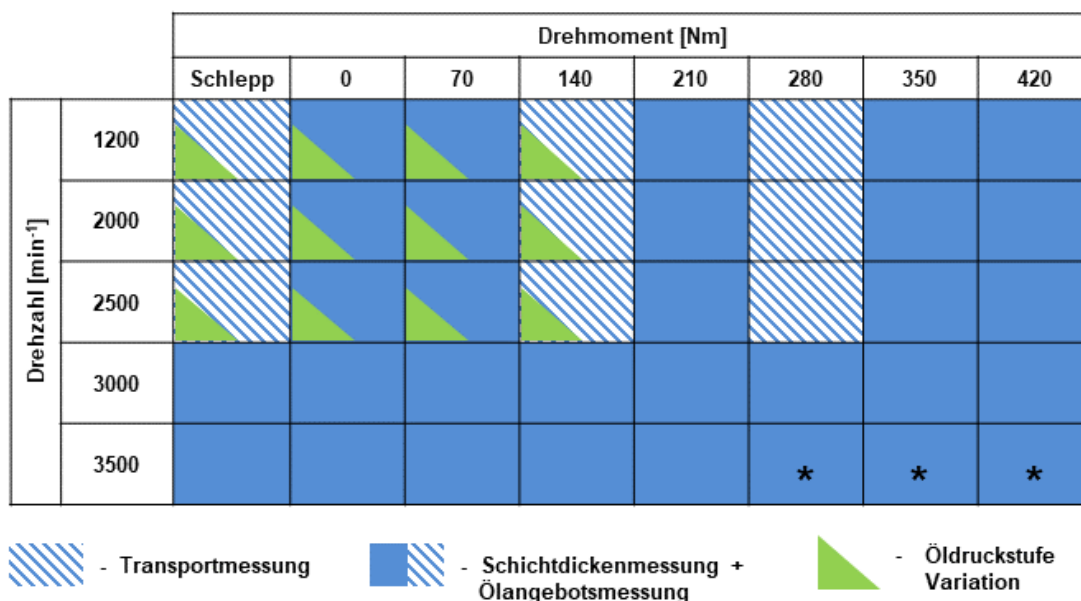


Abbildung 6.3: Messprogramm auf dem Vollmotorenprüfstand (* Messleitungsschaden bei Ölangebotsmessungen)

6.2 Schichtdickenmessungen und Ölangebotsmessungen

6.2.1 Schichtdickenmessungen

Das Prinzip der Fluoreszenzmessungen am Kolbenbolzengleitlager des Vollmotors unterscheidet sich von dem an der Laufbuchse des Forschungsmotors nur in der Anzahl und Position der Messstellen. Die vier zur Verfügung stehenden Messpositionen befinden sich an der Unterseite (Pleulseite) des Kolbens.

In Abbildung 6.4 (oben und Mitte) sind zwei Schleppmessungen bei unterschiedlichen Drehzahlen dargestellt. Die Datendarstellung entspricht jener zu den Laufbuchsenmessungen und kann Kapitel 5.2 entnommen werden. Dabei lässt sich bei 1200 min^{-1} ein repräsentativer Schichtdickenverlauf gut erkennen (blau), auch wenn manche Arbeitsspiele davon abweichen (rot). Bei 3500 min^{-1} ist die Streuung im Verlauf sehr groß. Während eine phänomenologische Analyse der Ölschicht bei 3500 min^{-1} immer noch möglich ist, ist die quantitative Auswertung dieser Daten schwierig, auch wenn die Signale das reelle Verhalten des Öls an der Messposition widerspiegeln.

Die Signale der Schichtdicken unter $0 \text{ } \mu\text{m}$ repräsentieren das Fehlen des Öls im Hohlraum ($\varnothing 270 \text{ } \mu\text{m}$) zwischen der Lichtleiteroberfläche und der Buchsenwand, während die Schichtdicken $> 0 \text{ } \mu\text{m}$ das Öl zwischen Buchsenwand und Kolbenbolzen abbilden.

Bei der Auswertung der Messsignalverläufe entstehen bei den Vollmotormessungen ähnliche Effekte in der Streuung der Signalverläufe wie an der Laufbuchse. Es ist un schwer zu erkennen, dass das Verhalten der Schichtdicken bei 3500 min^{-1} stark von einem zum nächsten Arbeitsspiel schwankt und das gemittelte Arbeitsspiel nicht repräsentativ für die Schichtdicke des Öls wäre. Aus diesem Grund wurden die Messergebnisse, ähnlich wie bei den Messungen an der Laufbuchse, anhand einer Häufigkeitsverteilung untersucht, um ein repräsentatives Arbeitsspiel zu berechnen. Dieses Arbeitsspiel ist als blaue Kurve in den Messdaten als eine Menge der am häufigsten vorkommenden Schichtdicken zum gegebenen Zeitpunkt dargestellt. Der Verlauf kann nicht als eine stetige Kurve wiedergegeben werden, repräsentiert aber am besten das mittlere Arbeitsspiel.

Einer der Gründe für die Streuung der Messverläufe, vor allem im Vergleich zu anderen Schichtdicken-Messmethoden, ist eine sehr geringe Messstellenfläche verbunden mit der hohen Messstellenunebenheit, die durch die Einbautoleranzen verursacht ist. Dies

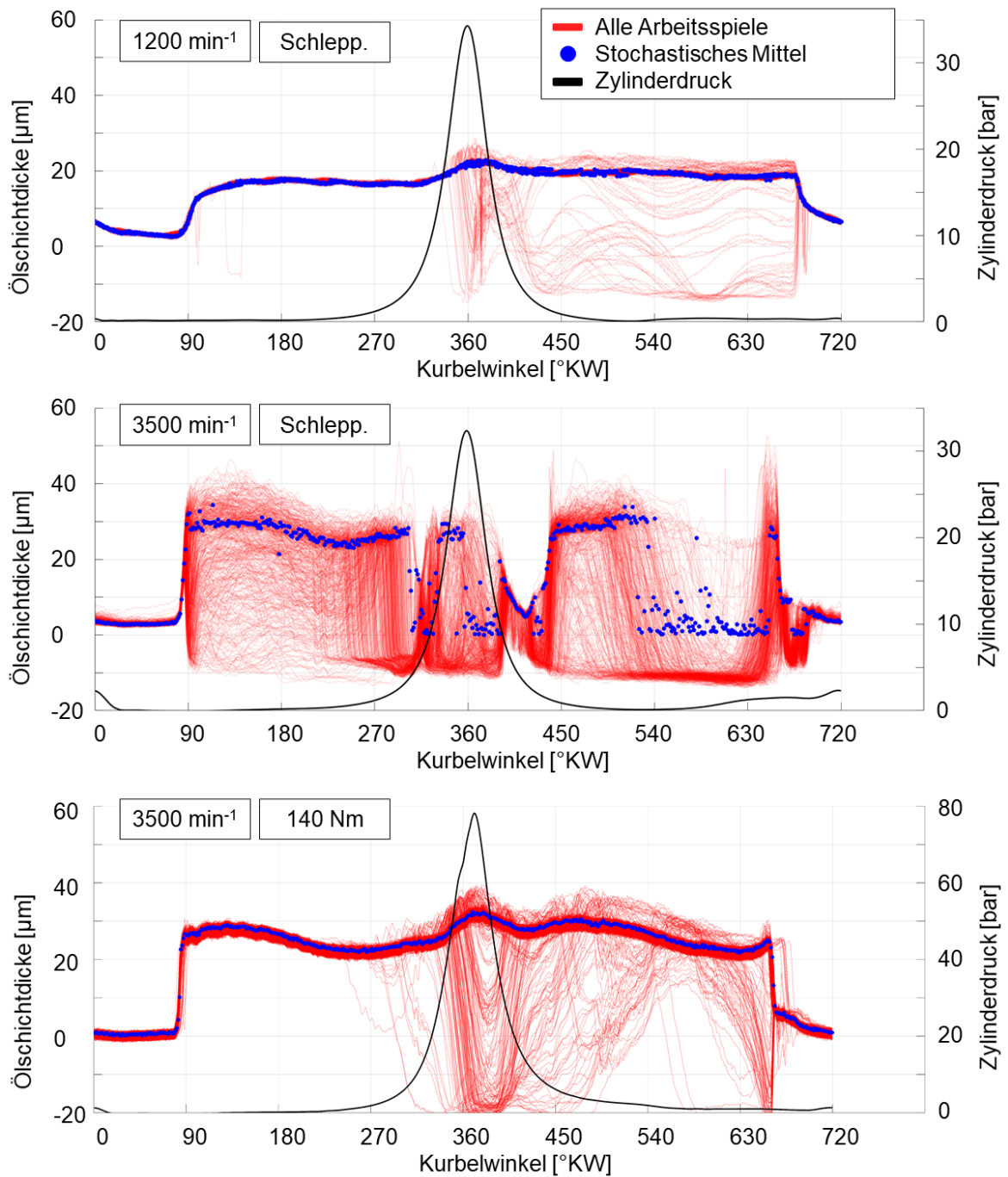


Abbildung 6.4: Ölschichtdickenmessungen am Kolbenbolzen, Messstelle: S3

führt dazu, dass insbesondere bei einer Teilfüllung des Lagers, also bei der Messung eines Öl-Luft-Gemischs, die Messdaten stärker von den einzelnen Phasen beeinflusst werden und keine Mittelung des Signals über die Messfläche stattfindet. Einerseits ist dies von Vorteil für das Verstehen des tatsächlichen Ölverhaltens an einer lokalen Position im Gleitlager. Andererseits erschwert es die Approximation einer mittleren Schichtdicke. Mögliche Gründe für das lokale Fehlen der Ölschicht an den Messstellen

sind das Fehlen der Ölversorgung am Kolbenbolzengleitlager, ungünstige Transportvorgänge während der Kolbenbolzenbewegung und das Eintreten der Kavitation wegen der Unterschreitung des Verdampfungsdruckes infolge der Bolzenbewegung.

Die Schichtdicken in Abbildung 6.4 (unten) bei hoher Last und Drehzahl zeigen die stochastisch vorkommende Teilfüllung des Lagers in Verbindung mit dem deutlich erkennbaren mittleren Schichtverlauf. Anhand der drei Verläufe der Messposition S3 in dieser Abbildung ist erkennbar, dass die Ölschicht im Lager bei geringeren Drehzahlen einer stabilen Vollfüllung entspricht und sich mit steigender Drehzahl immer mehr in Richtung einer Teilfüllung bewegt. Die Bereiche im Signalverlauf mit minimalen Signalen sind ein Anzeichen für das Leerlaufen des Lagers. Dabei lassen sich die Zusammenbrüche der Ölschichten aus der Kolbenbolzenbelastung (Beispiel in Abbildung 2.11) und folglich auch aus der Kolbenbolzenbewegung (Abbildung 6.5) erklären.

Die Messungen in Abbildung 6.5 entstanden am gleichen Motor durch die Applizierung von weiteren Kolben mit Wirbelstromsensoren durch Mitarbeiter des Instituts für Fahrzeugtechnik Stuttgart. Dabei ist zu erkennen, dass die Ölschichten stark dem Anlagenwechsel des Kolbenbolzens folgen, der aus der Kolbenbolzenbewegung abgeschätzt werden kann. Der Unterschied in der Kolbenbolzenbewegung zwischen Schleppbetrieb und 140 Nm lässt sich auch sehr gut in den Ölschichten finden (Abbildung 6.4 Mitte). Die Verschiebung der Kolbenbolzenkraft in den Druckbereich, d. h. kein Wechsel zum Zugbereich beim ZOT, bei höheren Lasten sorgt dafür, dass die Belastung des Kolbenbolzens stabiler wird und die Ölschichten nicht mehr zusammenbrechen.

Außerdem lässt sich in Anbetracht aller Messungen ein Trend dahingehend erkennen, dass die Messpositionen auf der Symmetrieebene (S1, S2) stabilere Schichtdickenverläufe liefern als die um 45° versetzten Positionen (S3, S4). Bei der Drehzahlenvariation

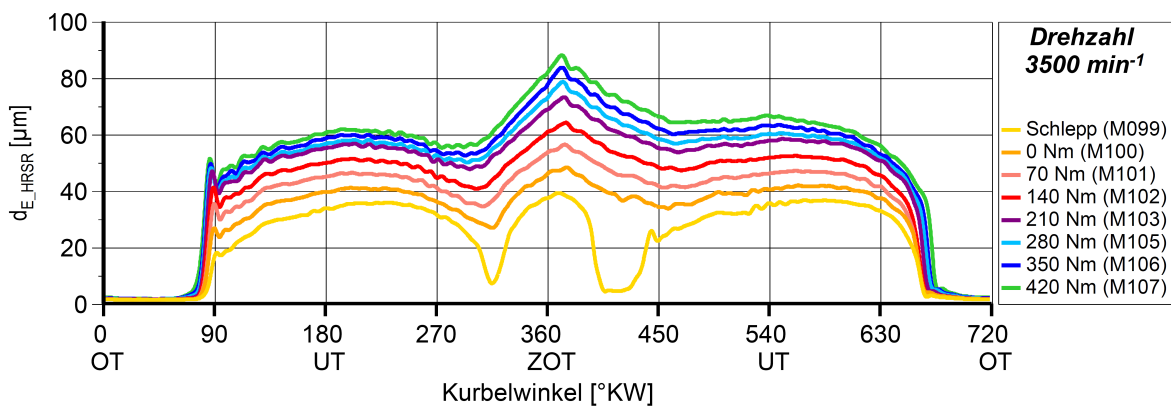


Abbildung 6.5: Radiale Kolbenbolzenbewegung in Hubrichtung, Messebene nahe Sicherungsring [1]

sind es die höheren Drehzahlen, die eine starke Streuung im Verlauf verursachen. Bei der Drehmomentvariation lässt sich ein schwacher Trend erkennen, dem zufolge die geringeren Lasten für mehr Streuung verantwortlich sind.

Neben der Betriebspunktvariation haben weitere Faktoren einen Einfluss auf die Ölschichtdicke im Lager. Vor allem der Effekt der Temperaturänderung und der daraus resultierenden Viskositätsänderung des Öls kann leicht in den Messdaten identifiziert werden. In Abbildung 6.6 sind die maximalen und minimalen Ölschichtdicken während des Arbeitsspiels an der Position S1 dargestellt. Dabei werden die maximalen Schichtdicken während des maximalen Gleitlagerspalts beim Kolben-ZOT und die minimalen Schichtdicken zwischen 0 °KW und 90 °KW beobachtet. Es lässt sich erkennen, dass die Schichtdicken im Durchschnitt mit steigender Last zunehmen. Eine Ausnahme in diesem Beispiel bildet der Betriebspunkt bei 70 Nm, der aufgrund des in der Zwischenzeit erfolgten Abkühlens des Motors (zwischen 0 Nm und 70 Nm) eine kältere Betriebstemperatur besitzt und folglich auch geringere Ölschichtdicken aufweist.

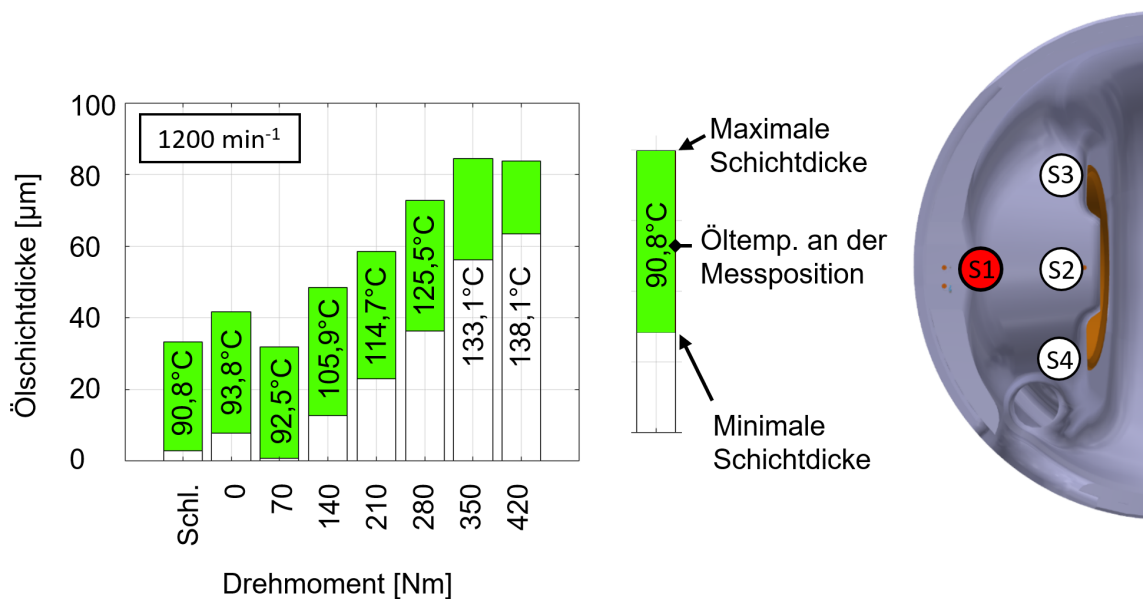


Abbildung 6.6: Ölschichtdickenmessungen am Kolbenbolzen, Messstelle: S1, Übersicht bei 1200 min^{-1}

Im Allgemeinen lässt sich sagen, dass die Schichtdicken der Kolbenbolzenlagerung der Bolzenkraft und der Bolzenbewegung folgen. Dabei nimmt die Stabilität der Ölschichten mit zunehmenden Drehzahlen ab. Es wurden Bereiche mit einer lokalen Leerfüllung des Lagerspalts identifiziert, z. B. um den ZOT bei geringen Lasten. Des Weiteren konnte eine Zunahme der Ölmenge im Gleitlager bei einer Erhöhung der Last beobachtet werden, wobei höhere maximale Schichtdicken sowie Schwankungen im Ölsignal in der Umdrehung nach dem ZOT (360–720 °KW) auftraten.

6.2.2 Ölangebotsmessungen

Die Ölangebotsmessungen am Vollmotor wurden an drei Positionen am Rand des Gleitlagers durchgeführt. Eines der Merkmale dieser Messungen ist, dass das Ölangebot nur qualitativ und unter der Sättigungsgrenze des Signals ($< \sim 0,5 \text{ mm}$ Ölschichtdicke) aufgenommen werden kann. Zusätzlich unterscheiden sich die geometrischen Bedingungen an jeder der drei Messpositionen voneinander. In Abbildung 6.7 sind diese Messpositionen am Kolben dargestellt. Dabei wird an der Position L1 das Ölvolume hinter dem Sprengring an der Gleitlagerbuchse, an der Position L2 das Ölvolume in einer Nische zwischen Kolbenwand und Kolbenbolzen und an der Position L3 das Ölvolume zwischen dem Ende des freistehenden Lichtleiters und der Gleitlagerbuchse gemessen.

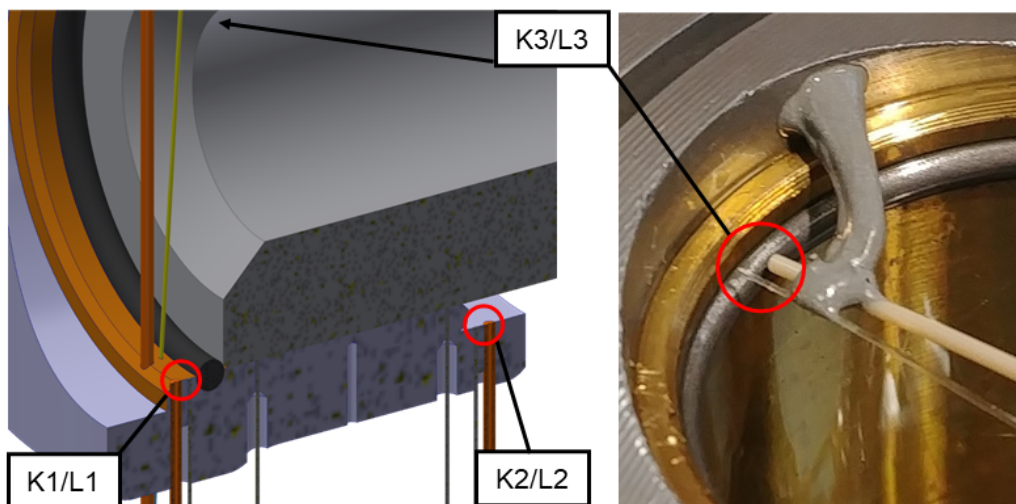


Abbildung 6.7: Vergleich der Injektions- und Ölangebotspositionen am Vollmotor

An der Position L1 ist das Öl am wenigsten von der Kolbenform und den Messleitungen beeinflusst. Das im Kurbelraum vorhandene Öl bzw. der dort vorhandene Ölnebel kann sich ungehindert an der Messposition bewegen. An der Position L2 ist das Öl vor der Messstelle zum einem von dem Ölnebel geschützt, zum anderen durch die unmittelbare Nähe des Kolbenbolzens in seiner Bewegung begrenzt. An der Position L3 ist ein Einfluss auf die Messleitungen (1 x Lichtleiter + 1 x Kapillare) durch die entstehenden Kapillareffekte zwischen der Lagerbuchse und den Leitungsenden gegeben.

Diese Bedingungen spiegeln sich gut in den Messdaten wider. In Abbildung 6.8 sind die Ölschichtverläufe qualitativ an den drei beschriebenen Positionen dargestellt. In Rot sind weiterhin alle Arbeitsspiele (200 AS) und in Blau das repräsentative Arbeitsspiel dargestellt. Als Erstes fällt auf, dass die Streuung der Verläufe an der Position L2 am

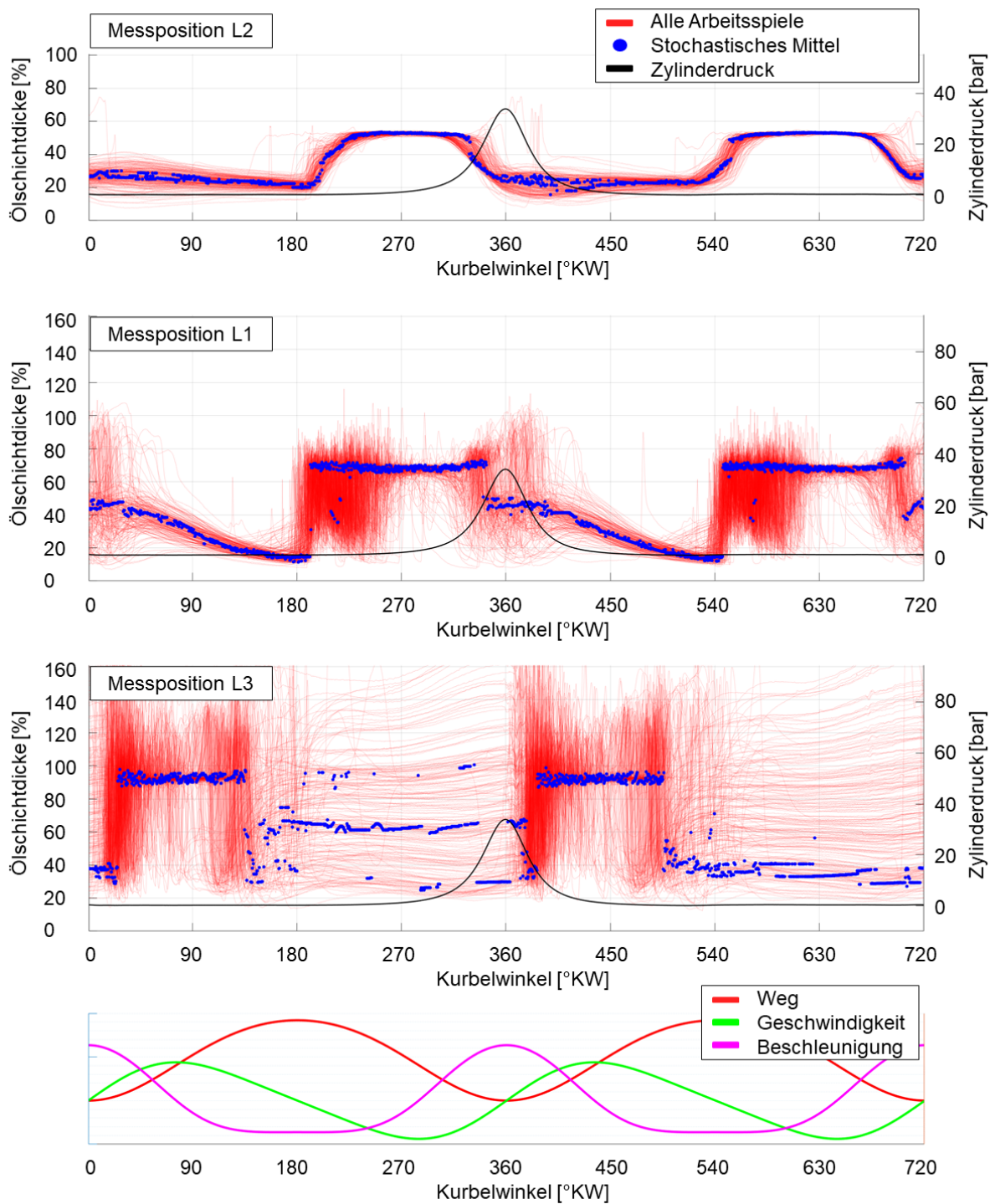


Abbildung 6.8: Ölangebotsmessungen am Kolbenbolzen bei 1200 min^{-1} , geschleppt (oben), Kolbenbewegung (unten)

niedrigsten ist, was sich auf die geschützte Geometrie der Messposition zurückführen lässt. Die Streuung an den Messstellen L1 und L3 ist deutlich höher und die Ausbildung des repräsentativen Arbeitsspiels schwieriger, vor allem an der Position L3. Das Vorhandensein von temporären Signalen mit Intensitäten von über 100 % kann mit der Fokussierung des Lichts erklärt werden. Dabei bilden sich kurzzeitig stark konvexe Öl-Luft-Schichten unmittelbar vor den Messstellen, die das Fluoreszenzsignal verstärken.

Anhand des Beispiels in Abbildung 6.8 lassen sich charakteristische Merkmale des Ölangebots erkennen. Im Allgemeinen folgt das Signal den aus der Bewegung des Kolbens resultierenden Massenkräften des Öls. Während der Bewegung des Kolbens nach oben (180–360 °KW & 540–720 °KW) bilden sich Plateaus mit hohen Ölschichtdicken an den unteren Messpositionen L1 und L2. Demgegenüber bilden sich Plateaus an der oberen Messposition L3 bei der Bewegung des Kolbens nach unten. Die Plateau-Form der Signale ist dabei auf die Sättigung der Lichtsignale zurückzuführen. An den ungeschützten Positionen L1 und L3 lassen sich starke Schwankungen im Signal am Anfang und am Ende des Plateaus beobachten, was auf die konkave bzw. konvexe Form der Ölschicht (Öltropfen) zu diesen Zeitpunkten hinweist. Die Änderung der Bewegungsrichtung des Öls relativ zu den Messpositionen kann dies begründen. Vor allem an der Position L3 sind diese Schwankungen stark vertreten, vor allem wegen des erhöhten Einflusses der Kapillareffekte an der Messstellengeometrie.

In Abbildung 6.9 sind die Ölangebotsverläufe an der Position L2 bei unterschiedlichen Lasten dargestellt. Dabei verändern sich die Verläufe in ihrer Intensität und im zeitlichen Verhalten mit der Veränderung der Motorlast. Die Zunahme der maximalen Ölschichtdicke mit der Last sowie die Verschiebung der Signale auf frühere Zeitpunkte kann mit der erhöhten Temperatur und dem besseren Fließverhalten des Öls erklärt werden. Die auf das Öl wirkenden Massenkräfte verändern sich bei gleicher Drehzahl nicht.

Zusätzlich lässt sich die Ausbildung einer Zwischenstufe vor dem ersten Plateau bei ca. 180 °KW mit der Erhöhung der Last beobachten. Aufgrund des Fehlens dieser Stufe auf dem zweiten Plateau und der geschützten Position der Messstelle kann der Effekt mit der Pumpwirkung des Kolbenbolzens in Verbindung gebracht werden. Weil diese Messstelle sich direkt am Rand des Gleitlagers befindet, ohne dass der Sicherungsring im Weg ist (wie bei L1), sind die Einflüsse des in den Lagerspalt hineingezogenen Öls erkennbar. Der Anlagenwechsel und die daraus resultierende Vergrößerung des Spalts findet bei ca. 100 °KW statt und beeinflusst die Ölmenge an der benachbarten Ölangebotsposition bei höheren Lasten und entsprechend größeren Spaltweiten stärker. Bei niedrigen Lasten kann dieser Effekt nicht bzw. kaum beobachtet werden.

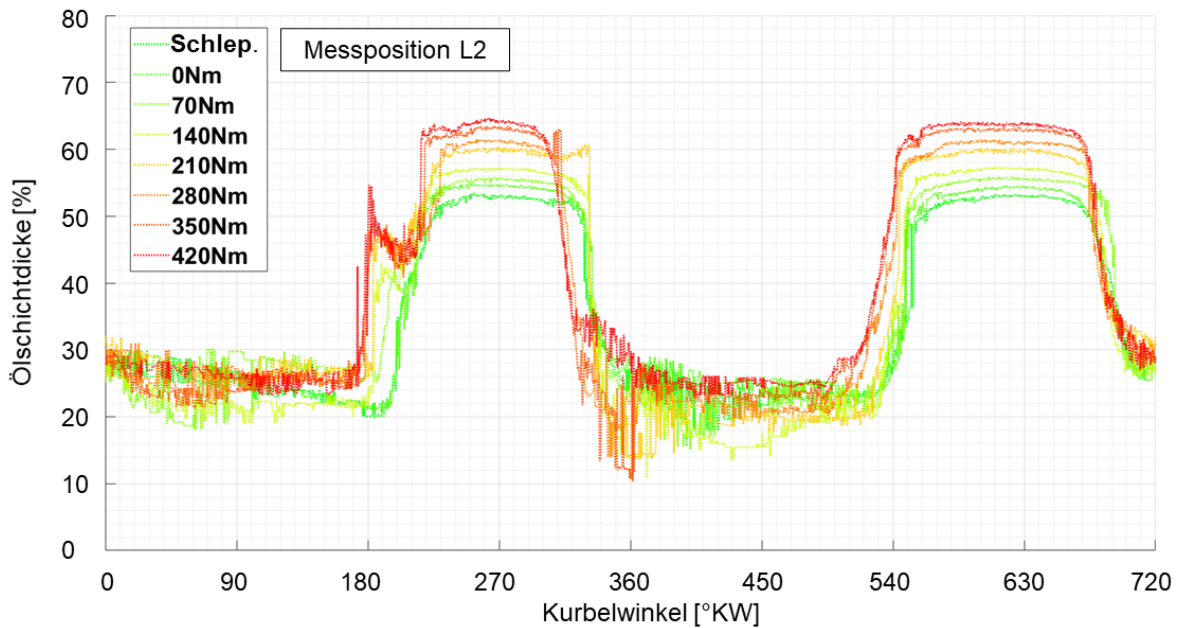


Abbildung 6.9: Übersicht zu den Ölangebotsmessungen am Kolbenbolzen bei 1200 min^{-1} , Messstelle: L2

Neben der Variation der Betriebspunkte am Vollmotorprüfstand wurde der Einfluss der Ölversorgungsdruckstufen untersucht. Insbesondere bei den Ölangebotsmessungen an den freistehenden Positionen L1 und L3 haben diese einen großen Einfluss auf die Signalverläufe. In Abbildung 6.10 sind Vergleiche der Ölangebote an der Position L1 bei hoher und niedriger Druckstufe der Ölversorgung dargestellt. Dabei beeinflusst die Druckstufe des Öls vor allem die Ölmenge, die über eine fest verbaute und auf den Kolben gerichtete Öldüse gefördert wird.

In den Bereichen während der Bewegung des Kolbens nach unten ($0\text{--}180 \text{ °KW}$ & $360\text{--}540 \text{ °KW}$) kann nur ein geringer Einfluss des Versorgungsöls auf das Ölangebot detektiert werden. Demgegenüber ist der Abfall des Ölangebots während der Bewegung des Kolbens nach oben ($180\text{--}360 \text{ °KW}$ & $540\text{--}720 \text{ °KW}$) deutlich erkennbar. Wie in den Messdaten zu sehen ist, sind die Einflüsse vor allem bei höheren Drehzahlen und Lasten vorhanden. Bei der Messposition L3 auf der gegenüberliegenden Seite ist dieser Einfluss aufgrund der gespiegelten Bewegungsrichtung der Messstelle relativ zum Öl um 180 °KW versetzt.

Hinsichtlich der Unterschiede der Messstellen im Aufbau und in der Zugänglichkeit wurden bei den Angebotsmessungen keine Ölmängel oder Schwankungen mit nicht-stochastischem Verhalten beobachtet. Dabei ist zu beachten, dass die drei Messpositionen ein begrenztes Ölangebotsbild aufzeigen und vor allem bei der Validierung der Simulationsmethoden von Nutzen sind.

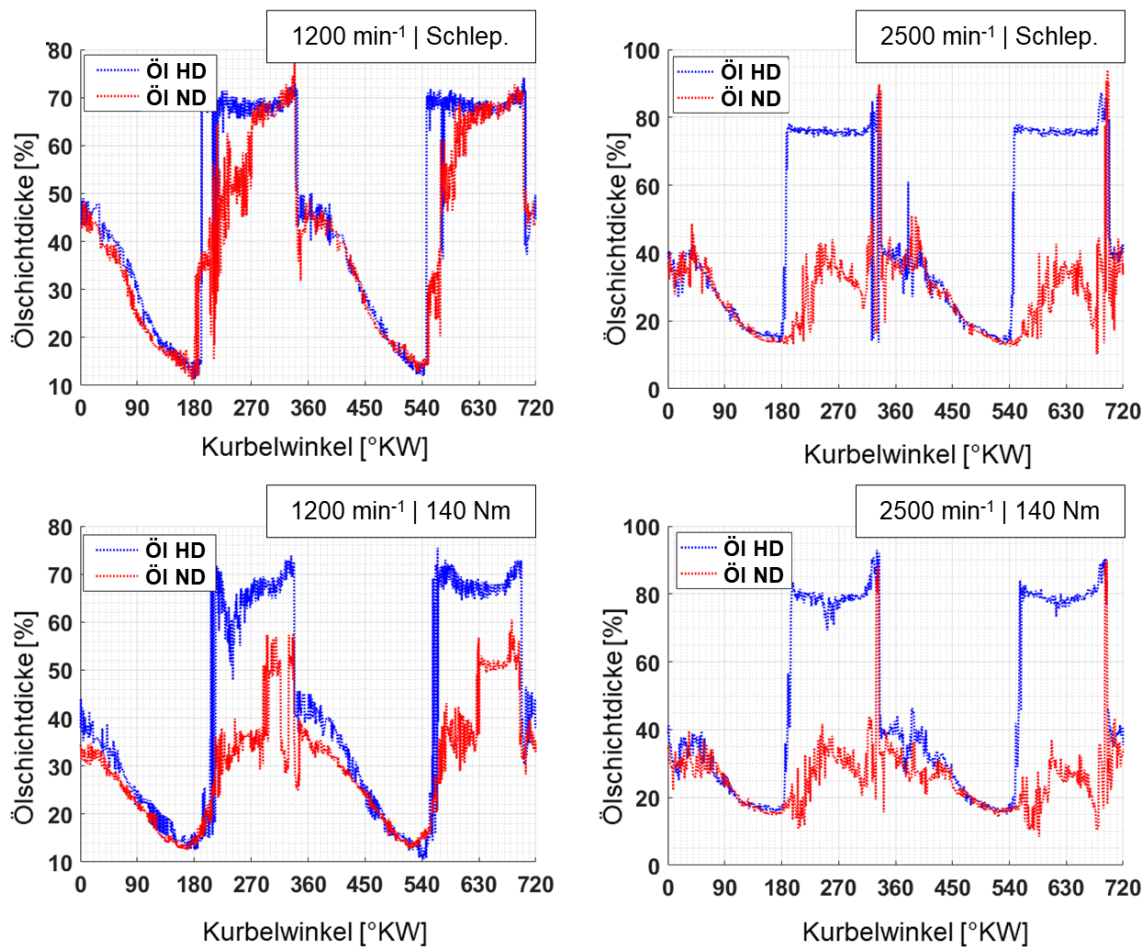


Abbildung 6.10: Vergleich des Druckniveaus bei Ölangebotsmessungen am Kolbenbolzen, Messstelle: L1 (HD: hoher Ölversorgungsdruck, ND: niedriger Ölversorgungsdruck)

6.3 Transportmessungen

Um das Öltransportverhalten im Lager zu verstehen, wurden am Vollmotorprüfstand Ölinjektionen des detektierbaren Tracer-Gemisches durchgeführt und dessen Verhalten an den Messpositionen (Abbildung 4.15: S1-S4) erfasst. Für die Tracer-Injektionen fanden dabei die Kapillaren K1–K3 mit den entsprechenden Positionen Verwendung. Für das Verständnis der Transportmessungen eignen sich zwei Beispiel-Injektionen am gleichen Kolbenaufbau außerhalb des Motors mit simulierter Zylinderdruckbeanspruchung, durchgeführt am Gleitlagerprüfstand.

Die Ergebnisse der Transportmessungen am Gleitlagerprüfstand bei 2000 min^{-1} , 30 kN und $140 \text{ }^\circ\text{C}$ (Öl- und Kolbentemperatur) können der Abbildung 6.11 entnommen werden. Die dargestellten zeitlichen Verläufe sind dabei gemittelt, um die Signal-

schwankungen innerhalb eines Arbeitsspiels zu eliminieren. Die Zuordnung der Signale ist farblich in der Skizze der Messpositionen gekennzeichnet. Anhand des Beispiels lässt sich erkennen, dass eine Injektion von rechts (Abbildung 6.11 oben) nur an der Messposition S2 (blau) detektiert wird, während die Injektion von links (Abbildung 6.11 unten) an allen Messpositionen ankommt. Anzumerken ist, dass aufgrund der Verdünnung der Injektionslösung über die Zeit nur der zeitnahe Öltransport identifiziert werden kann.

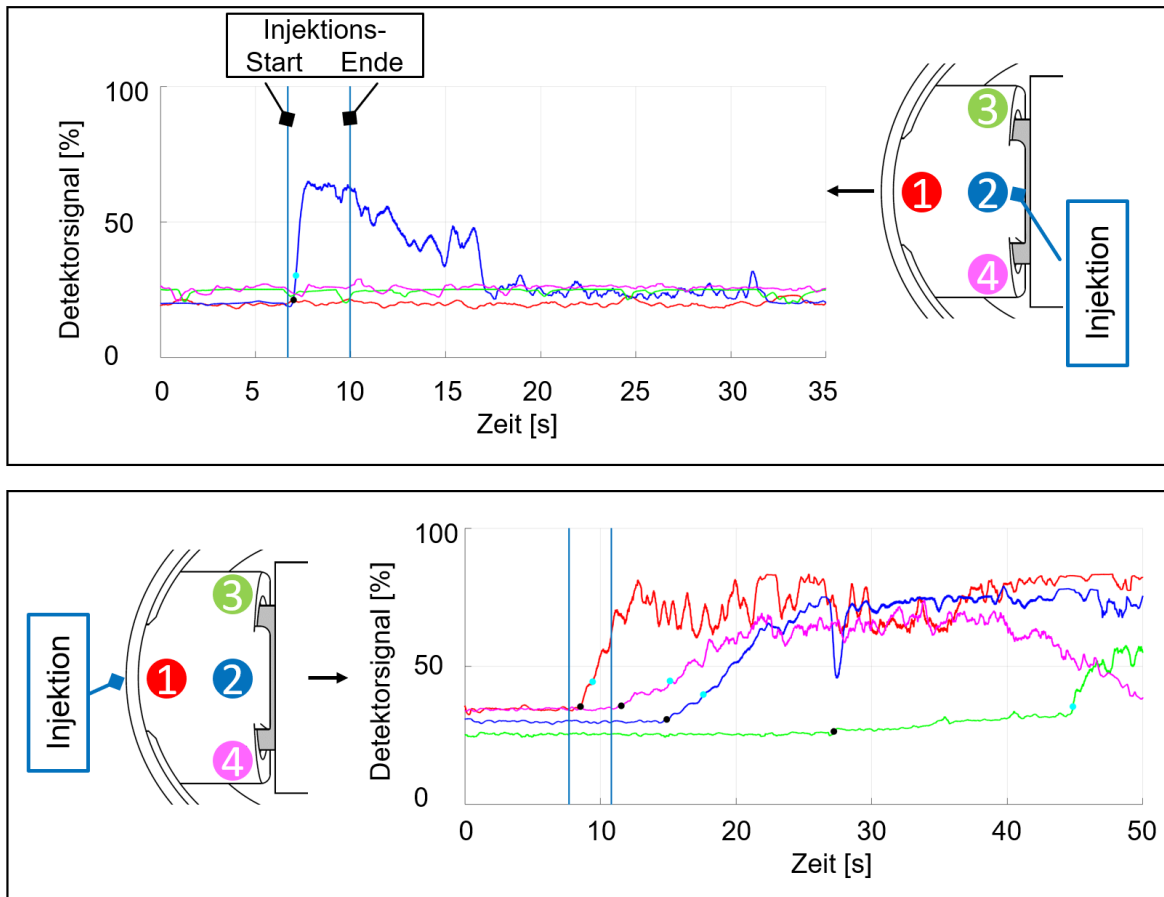


Abbildung 6.11: Transportmessung am Kolbenbolzen mit simulierter Belastung am GLP bei $33,3 \text{ Hz}$ (2000 min^{-1}), 30 kN , 140 °C (Injektionsposition 2: oben, Injektionsposition 1: unten)

Nachdem die Ölvorgänge im Gleitlager mit simulierter Beanspruchung verstanden waren, wurden die Öltransportmessungen am Vollmotor nach demselben Prinzip durchgeführt, allerdings mit Unterschieden bei den Injektionspositionen und Randbedingungen. Dabei waren vor allem der Weg und der Abstand von den Injektionspositionen K1 und K3 zum Gleitlager am Vollmotor größer. Während diese Positionen am Kolben mit simulierter Beanspruchung von außen zugänglich waren und somit Injektionen zwischen den Sprengring und Kolbenbolzen ermöglichten, sind sie am Vollmotor vor dem Sprengring fest verbaut (Abbildung 6.7). So konnten an der Position K2 die In-

jektionen einen ähnlichen Weg zum Lager nehmen wie am freien Kolben, ohne dass ein größerer Einfluss des im Zylinder vorhandenen Öls ersichtlich war, während bei den Positionen K1 und K3 der Weg sowie die Verdünnung der Injektion auf dem Weg zum Gleitlager deutlich größer waren. Der fehlende Einfluss der Injektionsdauer auf die Signalintensitäten ist ein weiteres Indiz für die starke Verdünnung der Injektionen zwischen den Injektionspositionen und dem Gleitlager. Aus diesem Grund reichen die Signalintensitäten aus den Injektionen K1 und K3 bei vielen Betriebspunkten für eine definitive Aussage über das Transportverhalten des Öls nicht aus.

Abbildung 6.12 gibt eine Übersicht zu den Transportmessungen am Vollmotor. Dabei kennzeichnen die farbigen Quadrate das Detektieren der Injektion. Zum Beispiel wurde die Injektion in der Messung bei 1200 min^{-1} /Schlepp von der Injektionsstelle links (roter Punkt) ausgeführt und an den Messpositionen S1 und S2 nach 8 und 39 Umdrehungen detektiert. Allgemein kann anhand aller gemessenen Daten die Aussage getroffen werden, dass der Öltransport in beide Richtungen, d. h. von Sprengring zu Pleuel und von Pleuel zu Sprengring, stattfindet. Der Transport von der Injektionsposition zur gegenüberliegenden Seite im Gleitlager kann in fünf verschiedenen Betriebspunkten beobachtet werden. Ein direkter Vergleich zwischen den zwei Ausbreitungsrichtungen des Öls war ohne die Optimierung der Injektionspositionen nicht möglich.

Eine weitere Erkenntnis der Transportmessungen am Vollmotor ist der schnellere und stärkere Öltransport von der Injektionsposition K2 zu der radial versetzten Position S3 im Gegensatz zu Position S4. Diese Richtung der Ölausbreitung wird vermutlich durch die Drehrichtung des Kolbenbolzens relativ zum Kolben begünstigt.

Zusätzlich ist in Abbildung 6.12 die Anzahl der Umdrehungen zwischen dem Injektionszeitpunkt und dem Detektieren des Signals an der gegebenen Messposition angegeben. Die Vergleiche zwischen unterschiedlichen Drehzahlen und Lasten ergeben keine eindeutige Abhängigkeit der Transportgeschwindigkeiten von den Betriebspunkten. Angesichts des beobachteten stochastischen Verhaltens der Injektionsausbreitung, vor allem in Bereichen zwischen den Injektionspositionen und dem Gleitlager, sind eine Verkürzung des Abstandes der Injektion zum Lager sowie mehrfache Wiederholungen der Messläufe zukünftig zu empfehlen.

Das Ziel der Transportmessungen war neben der Generierung der Simulationsparameter eine Optimierung der Ölversorgung des Kolbenbolzens, z. B. durch die Veränderungen der Kolbenöldüse oder Kolbenform. Während bei der Untersuchung der Öltransportmechanismen am Gleitprüfstand eindeutige Phänomene beobachtet wur-

den, wie z. B. ein Öltransport nur in Richtung des Pleuels, konnte dieser Effekt beim Vollmotor nicht bestätigt werden und es gab abhängig vom Betriebszustand einen Öltransport in beide Richtungen. Die gewonnenen Ergebnisse haben gleichwohl gezeigt, dass die Transportvorgänge im Kolbenbolzengleitlager detektierbar sind und vor allem durch die Optimierung der Injektions- und Messpositionen zu der Optimierung des Gleitlagers beitragen können.

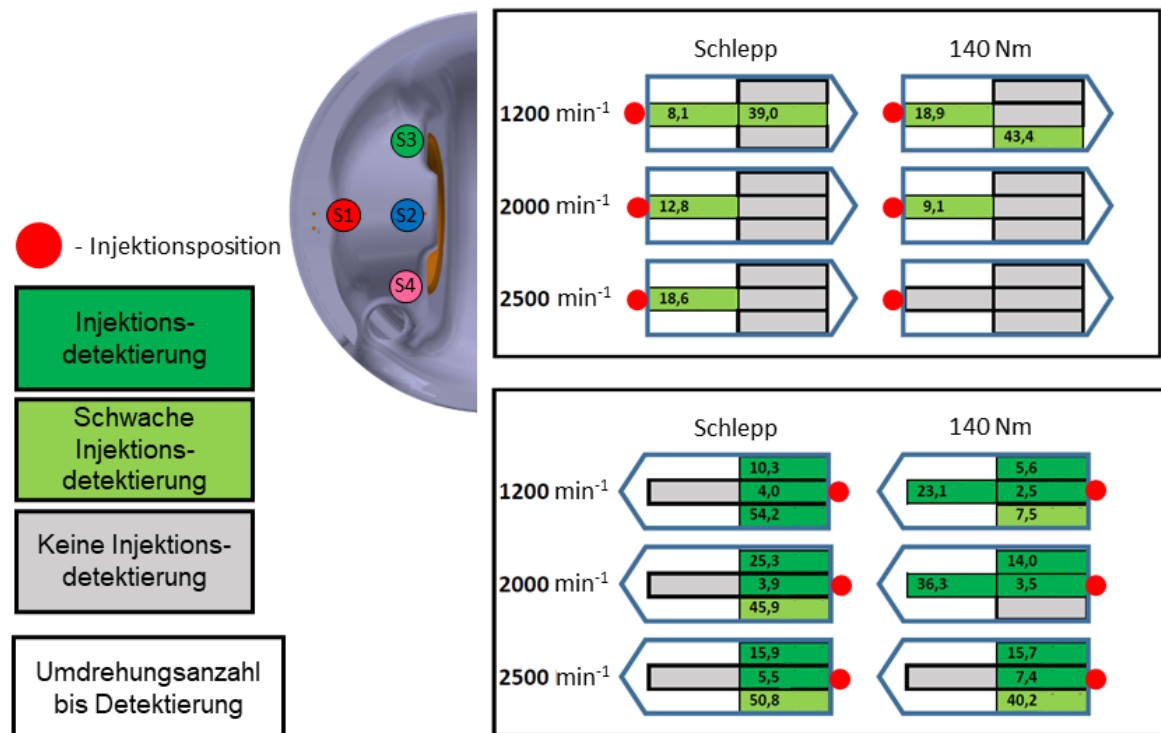


Abbildung 6.12: Übersicht zu den Transportmessungen am Vollmotor (niedriger Ölversorgungsdruck)

7 Schlussbemerkung und Ausblick

Das Zusammenspiel der tribologischen Motorkomponenten Pleuel, Kolben, Zylinder und Laubuchse ist entscheidend für die Gewährleistung eines zuverlässigen Betriebs von Verbrennungsmotoren. Dabei spielt das Schmiersystem eine ausschlaggebende Rolle – nicht nur für die mechanische Funktion des Systems, sondern auch für die Motor-emissionen. Einerseits hat das Schmieröl die Funktion, entstehende Druck- und Massenkräfte aufzufangen, vor allem in den Gleitlagern des Kolbens und des Kurbeltriebes. Andererseits muss das Schmieröl die Abnutzung der Zylinderlaufbuchse minimieren und gleichzeitig die Abdichtung des Brennraumes sichern. Das Verständnis der beteiligten Ölmechanismen ist ein wichtiges Instrument bei der Optimierung des Verbrennungsmotors.

Die hier behandelte Messmethode zur Messung des Ölfilms mit dem zugehörigen Messsystem hat die Möglichkeit geschaffen, die Ölschichten der Komponenten Laufbuchse, Kolben und Kolbenbolzen zu detektieren und zu analysieren. Bei den Vorteilen der verwendeten LIF-Messmethode handelt es sich vor allem um die Simplizität bei der Erzeugung der Anregungsstrahlung, die in diesem Fall mit LEDs erzeugt wird, sowie die Aufzeichnung der Fluoreszenzstrahlung mithilfe der Lichtleiter, die an die Prüfkörper bzw. Prüfstände angepasst werden können. Des Weiteren kann eine hohe zeitliche und räumliche Auflösung ohne die Verwendung komplexer Komponenten erreicht werden. Zu den Beschränkungen des Messsystems gehören vor allem die Temperaturabhängigkeit der Signale sowie der Reflexionseinfluss der Motorkomponenten auf die Fluoreszenz. Während die Temperatur mit ausreichender Genauigkeit auskalibriert werden konnte, muss der Reflexionseinfluss der gemessenen Oberflächen mitberücksichtigt werden, vor allem bei der Betrachtung der unkalibrierten Daten.

Die Applizierung der Motorkomponenten Laufbuchse und Kolbenbolzenlager hat noch einmal die Anpassungsfähigkeit des Systems gezeigt. Während die Verwendung von Lichtleitern Vorteile wie eine kostengünstige Bauweise und eine präzise Messfläche mitbringt, wurden auch Problembereiche aufgezeigt, etwa bei der Zugänglichkeit der Messpositionen sowie der Verschmutzung der Sensoroberflächen. Eine besondere Erwähnung verdient die Verwendung der auf Biegung belasteten Siliziumdioxid-Lichtleiter in Verbindung mit dem Schwingarmsystem bei den Messungen der Ölschichten am Kolbenbolzen.

Bei der Untersuchung des Schmieröls lassen sich hohe Schwankungen der Signale beobachten. Der Hauptgrund für dieses Verhalten stellt die tatsächliche Schwankung der Ölmengen an den Messpositionen dar. Im Falle der Laufbuchsenmessungen hängt das Verhalten des Öls in hohem Maße von der Stabilität der Betriebsparameter, der Drehung der Kolbenringe oder der Ölbewegung im Kurbelraum ab. Die Streuung der Ölsignale ist bei großen Ölschichten, wie etwa Ölwellen, deutlich zu sehen. Zusätzlich können die Schmierfilme aus einem Luft-Öl-Gemisch bestehen, wie beim Kolbenbolzenlager, und unter lokaler Betrachtung zu starken Signalschwankungen führen. Während die Erfassung der Ölschichten mit großflächigen Sensoren die Mittelung der Signale bereits auf der Messprinzipienebene durchführt, können bei den Lichtletermessungen ($\varnothing 200\text{--}550\ \mu\text{m}$) die Signale roh betrachtet und bei der Ergebnisanalyse gemittelt werden.

Im Fall der Messungen der Laufbuchsenölschicht konnte zusätzlich das Öl zwischen Laufbuchse und Kolben, an den Ringstegen und am Kolbenhemd identifiziert werden. Die Ölwellen unter den Kompressionsringen und vor allem unter dem Ölabstreifring haben die Abstreifwirkung des Ringpakets verdeutlicht. Ein deutlich erhöhtes Ölangebot zeigte sich an dem ersten Ringsteg auf der Druckseite des Zylinders und ist vermutlich die Folge der Kolbensekundärbewegung sowie der Ringstoßpositionen. Die Ansammlung des Öls an dem Kolbenhemd konnte abgetastet werden und hat Bereiche gezeigt, in denen der Kolben an der Laufbuchsenwand aufsetzt oder abhebt.

Die Quantifizierung der Laufbuchsendaten im Betriebskennfeld des Motors war für die Erkennung der Zusammenhänge bei den Ölmechanismen von Nutzen. Es zeigten sich eine hohe Abhängigkeit der Abstreifwirkung der Kolbenringe von der Motorlast im oberen Abschnitt der Zylinderlaufbuchse aufgrund der höheren Zylinderdrücke sowie eine hohe Abhängigkeit der Abstreifwirkung der Ringe von den Drehzahlen im unteren Abschnitt der Laufbuchse aufgrund der Temperaturänderung des Öls. Zusätzlich erweisen sich diese Ergebnisse nützlich bei der Validierung der strukturdynamischen Zylindersimulationen.

Des Weiteren konnte der Einfluss der Ringdrehungen, die mithilfe der Ölschichtanalyse eindeutig erkennbar sind, identifiziert werden. Die Blow-by-Strömung bei den übereinander stehenden Ringstößen führte zu einer erhöhten Ölemission des Motors sowie einer ungleichmäßigen radialen Temperaturverteilung der Zylinderlaufbuchse. Während die Drehung des 1. Kompressionsringes durch geringe Lasten und höhere Drehzahlen begünstigt ist, zeigt die Ölabstreifring-Drehung ein stochastisches Verhalten. Darüber hinaus konnte beobachtet werden, dass die Ringstöße nicht zur Ölsammlung neigen, sondern von der Blow-by-Strömung freigeblasen werden.

Weitere Erkenntnisse konnten im Rahmen der Laufbuchsenmessungen bei der Betrachtung der dynamischen Motorvorgänge, wie Parametervorstellung oder Betriebsartenwechsel, gewonnen werden. Ein positiver Einfluss der angepassten SOI-Einstellung war nicht nur in der Verbrennung bzw. im Druckverlauf zu sehen, sondern auch in der erhöhten Stabilität der Ölschichten im oberen Teil der Laufbuchse. Im Gegensatz dazu gab es Anzeichen für eine fehlende Laufbuchsensmierung während des Betriebsartenwechsel des Motors mit Schwankungen in vielen Betriebsparametern wie Last, Drehzahl und Druck, aber auch bei der Ölemission.

Die Messungen der Ölschichten der Kolbenbolzenlagerung haben die Abhängigkeit der Ölmengen und der Stabilität der Ölschichten von den Betriebsparametern verdeutlicht. Vor allem die höheren Drehzahlen verursachten hier eine starke Streuung der lokalen Ölschichten mit zwischenzeitlicher Leerfüllung des Lagers. In Anbetracht der Messungen lässt sich ein Trend erkennen, nach dem die auf der Symmetrieebene liegenden Ölschichten stabilere Schichtdickenverläufe im Lager liefern. Wie bei der Laufbuchsensmierung wirken sich die Temperaturerhöhung und die Viskositätsabnahme des Öls positiv auf die Lagersmierung aus.

Zusätzlich zu den Messungen im Kolbenbolzengleitlager wurde das Öl in unmittelbarer Nähe des Lagers untersucht. Dabei wurden Zusammenhänge identifiziert, wie die starke Abhängigkeit des Ölangebots von der Richtung der auf das Öl wirkende Massenkräfte sowie eine bessere Ölversorgung der zum Zylinderraum offenen Ölangebotspositionen. Darüber hinaus wurden Bereiche im Arbeitsspiel lokalisiert, die von der Erhöhung der Zylinderölversorgung profitieren bzw. davon unbeeinflusst sind.

Ergänzend konnten mithilfe der Öltracerung die Transportwege und -zeiten im Kolbenbolzenlager beobachtet werden. Die Untersuchung der Transportrichtung des Öls an einem Gleitlagerprüfstand mit dem gleichen Motorkolben zeigte eine deutliche dominierende Transportrichtung vom Sprengring zur Pleuelseite. Im Gegensatz dazu waren am Vollmotorprüfstand Transportvorgänge in beide Richtungen am Kolbenbolzengleitlager vorhanden. Eine Wiederholung der Transportmessungen am Vollmotor mit verbesserten Mess- und Injektionspositionen kann zusätzliche Erkenntnisse für eine Optimierung der Ölversorgung des Gleitlagers liefern.

Abschließend ist festzuhalten, dass die generierten Daten und Erkenntnisse essentiell für die richtige Parametrierung und Optimierung von Simulationsprogrammen sind, die als Ziel haben, in Zukunft die Entwicklung von Motoren deutlich zu vereinfachen. Die vorliegenden Messergebnisse zusammen mit dem entwickelten Messsystem sowie den durchgeführten Simulationen zeigen die Möglichkeiten der Analyse der Ölmechanismen

unter Berücksichtigung des benötigten Messaufwands. Dabei lässt sich anhand der Betrachtung zahlreicher Problemstellen ein verbessertes Verständnis des Zusammenspiels der Motorkomponenten erreichen. Auf diesen Erkenntnissen basierende Optimierungen des tribologischen Systems können nicht nur die Sicherheit und Zuverlässigkeit von Verbrennungsmotoren erhöhen, sondern auch den Ölverbrauch und die Ölemission reduzieren.

Literaturverzeichnis

- [1] A. Rabanizada; D. Branciforti; M. Schmidt; P. Reinke; K. Pryymak und A.-C. Preuß. *Kolbenbolzenlagerung II: Erhöhung der Betriebssicherheit der Kolbenbolzenlagerung*. BMWi/IGF-Nr. 19429N, FVV-Vorhaben Nr. 1276, Abschlussbericht. 2020.
- [2] J. Lang; K. Backhaus und M. Lazzara. *Kolbenbolzenlagerung: Elastohydrodynamisches Simulationsverfahren für die Kolbenbolzenlagerung bei Mischreibungskontakt*. BMWi/IGF-Nr. 14246N, FVV-Vorhaben Nr. 868, Abschlussbericht. 2008.
- [3] G. Knoll; M. Bargende; J. Lang; K. Backhaus und M. Lazzara. *EHD Simulationsverfahren für die Kolbenbolzenlagerung bei Mischreibungskontakt*. BMWi/AiF-Nr. 14246 N/2, FVV-Vorhaben Nr. 868, Abschlussbericht. 2009.
- [4] P. Reinke und M. Schmidt. *Lokale, hochauflösende 3D-CFD-Simulation der Schmier-spaltströmung in einem instationär belasteten Radialgleitlager*. FVV-Vorhaben Nr. 1154, Abschlussbericht. 2014.
- [5] H.-J. Weimar. “Entwicklung eines laser-optischen Messsystems zur kurbelwinkelauflösten Bestimmung der Ölfilmstärke zwischen Kolbenring und Zylinderwand in einem Ottomotor”. Dissertation. Universität Karlsruhe, 2002.
- [6] S. Park und J. Ghandhi. “Fuel film temperature and thickness measurements on the piston crown of a direct-injection spark-ignition engine”. In: *SAE transactions* (2005).
- [7] B. Uhlig; C. Kirner; A.-C. Preuß; J. Graf; M. Neben und F. Zaussinger. *Piston Ring Oil Transport II*. FVV-Vorhaben Nr. 1197, Abschlussbericht. 2017.
- [8] G. Wachtmeister und J. Schäffer. *Piston Ring Oil Transport - Glasliner II*. FVV-Vorhaben Nr. 1302, Abschlussbericht. 2019.
- [9] M. Stark; A.-C. Preuß; K. Pryymak; A. Azetsu und Y. Mihara. *Fuel Oil Flow Measurement*. FVV-Vorhaben Nr. 1396, Abschlussbericht. 2022.
- [10] J. Meyer-Wellmann. *Schiffsabgase sind noch giftiger als angenommen*. Juli 2015. URL: <https://www.abendblatt.de/hamburg/article205461069/Schiffsabgase-sind-noch-giftiger-als-angenommen.html> (besucht am 01.01.2023).

-
- [11] H. Harndorf und M. Reißig. “Emissionsstrategien für Großmotoren in der Schifffahrt-Herausforderung und Lösungsansätze”. In: *Deutscher Mobilitätskongress, Frankfurt* (2016).
- [12] P. Berger. “Erstellung eines NOx Emissionsmodells für Diesel Großmotoren mit Common Rail Einspritzsystem”. Dissertation. Technischen Universität Wien, 2012.
- [13] H. Keil. *100 Jahre Schiffbautechnische Gesellschaft: Festveranstaltung vom 25. bis 29. Mai 1999 in Berlin*. Springer-Verlag, 2013.
- [14] N. Herzog; A. Christl; P. Gorenz; M. Schmidt und C. Wolf. *3D-CFD Simulation der Schmierspaltströmung in einem hydrodynamisch geschmierten, instationär belasteten Radialgleitlager*. FVV-Vorhaben Nr. 1056, AiF-Nr. 16805BG, Abschlussbericht. 2014.
- [15] M. Schmidt. *Untersuchung der dreidimensionalen Strömung in Radialgleitlagern*. Cuvillier Verlag, 2016.
- [16] M. Schmidt u. a. “Numerical Study of the Three-Dimensional Oil Flow Inside a Wrist Pin Journal”. In: *Tribology Transactions* 63 (2020).
- [17] Gesellschaft für Tribologie e.V. “GfT-Arbeitsblatt 7”. 2002.
- [18] R. van Basshuysen und F. Schäfer. *Handbuch Verbrennungsmotor: Grundlagen, Komponenten, Systeme, Perspektiven*. Springer Vieweg, 2014.
- [19] J. Affenzeller und H. Gläser. *Lagerung und Schmierung von Verbrennungsmotoren*. Bd. 8. Springer Verlag, 2013.
- [20] H. Hellmann. *Umweltanalytik von Kohlenwasserstoffen*. John Wiley & Sons, 2009.
- [21] A. Stelmaszewski. “Fluorescence method for the determination of oil identity”. In: *Optica Applicata* 34 (2004).
- [22] P. Burlamacchi; G. Cecchi; P. Mazzinghi und L. Pantani. “Performance evaluation of UV sources for lidar fluorosensing of oil films”. In: *Applied Optics* 22 (1983).
- [23] MAHLE GmbH. *Kolben und motorische Erprobung*. 2. Auflage. ATZ/MTZ - Fachbuch. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015.
- [24] M. Gohl. “Massenspektrometrisches Verfahren zur dynamischen Online-Messung der Ölemission von Verbrennungsmotoren”. Dissertation. Technische Universität Hamburg-Harburg, 2004.

- [25] A.-C. Preuß. “Ölemissionsmechanismen und ihr Beitrag zur Partikelemission von Verbrennungsmotoren - Simultane Analyse mittels Massenspektrometer- und Streulichtmessung”. Dissertation. Technische Universität Hamburg, 2022.
- [26] A. Frommer. “Massenspektrometrische Untersuchung des Ölemissionsverhaltens von Verbrennungsmotoren bei stationärem und transientem Betrieb”. Dissertation. Technische Universität Hamburg-Harburg, 2016.
- [27] S. Krause. “Massenspektrometrisches Verfahren zur Charakterisierung der Ölverdampfung im Brennraum von Ottomotoren”. Dissertation. Technische Universität Hamburg-Harburg, 2009.
- [28] H. H. Pribsch und H. M. Herbst. “Simulation des Einflusses von Kolbenringparametern”. In: *MTZ-Motortechnische Zeitschrift* 60 (1999).
- [29] J. H. Gross. *Massenspektrometrie: Spektroskopiekurs kompakt*. Springer Vieweg, 2019.
- [30] B. Hochfellner; A.-C. Preuß und K. Prymak. *Lubrication Large Bore Engines*. FVV-Vorhaben Nr. 1327, Abschlussbericht. 2021.
- [31] G. P. Merker und R. Teichmann. *Grundlagen Verbrennungsmotoren*. Springer Vieweg, 2019.
- [32] E. Köhler und R. Flierl. *Verbrennungsmotoren: Motormechanik, Berechnung und Auslegung des Hubkolbenmotors*. Springer Verlag, 2011.
- [33] MAHLE GmbH. *Zylinderkomponenten. Eigenschaften, Anwendungen, Werkstoffe*. 2. Auflage. ATZ/MTZ - Fachbuch. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015.
- [34] J. Kortas. “Vom Aluminium zum Stahlgroßkolben bei Nkw und Schiffen”. In: *MTZ-Motortechnische Zeitschrift* 66 (2005).
- [35] H. Bauer. *Kraftfahrtechnisches Taschenbuch (BOSCH)*. Bd. 25. Springer Verlag, 2003.
- [36] A. Robota und F. Zwein. “Einfluss der Zylinderlaufflächentopografie auf den Ölverbrauch und die Partikelemissionen eines DI-Dieselmotors”. In: *MTZ-Motortechnische Zeitschrift* 60 (1999).
- [37] G. Haasis und U.-P. Weigmann. “Neues Honverfahren für Umweltfreundliche Verbrennungsmotoren”. In: *Werkstatt und Betrieb* 132 (1999).
- [38] T. Abeln. “Laserstrukturierung-Verbesserung der tribologischen Eigenschaften von Oberflächen”. In: *VDI BERICHTE* Nr. 1810 (2003).
- [39] G. Flores; T. Abeln und U. Klink. “Funktionsgerechte Endbearbeitung von Zylinderbohrungen aus Gusseisen”. In: *MTZ-Motortechnische Zeitschrift* 68 (2007).

-
- [40] W. Schmutz. *Fluoreszenzmeßverfahren zur Schmierfilmdickenmessung in Wälzlagern*. Bd. 79. Springer Verlag, 2013.
- [41] J. R. Lakowicz. *Principles of fluorescence spectroscopy*. Springer Verlag, 2006.
- [42] A. Mehta. “Animation for the principle of fluorescence and uv-visible absorbance”. In: *Analytical Chemistry, Animations, Notes* (2013).
- [43] B. Valeur und M. N. Berberan-Santos. *Molecular fluorescence: principles and applications*. John Wiley & Sons, 2012.
- [44] R. Ulric. “Fiber-optic sensors for industrial applications”. In: *Technisches Messen* 53 (1986).
- [45] Thorlabs, Inc. *Optical Fiber & Patch Cables*. URL: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=6838 (besucht am 01.01.2023).
- [46] S. Geckeler. *Lichtwellenleiter für die optische Nachrichtenübertragung: Grundlagen und Eigenschaften eines modernen Übertragungsmediums*. Bd. 16. Springer Verlag, 2013.
- [47] F. Lühe. *Optische Signalübertragung mit Lichtwellenleitern*. Vieweg-Verlag, 1993.
- [48] R. Thiele. *Lichtquanten und Lichtwellenleiter*. Springer Vieweg, 2020.
- [49] Lichtleiterfaser-Typen (fiberopticshare). URL: <http://www.fiberopticshare.com/wp-content/uploads/2016/09/single-mode-fiber-multimode-fiber-1.jpg> (besucht am 01.01.2018).
- [50] W. Bludau. *Lichtwellenleiter in Sensorik und optischer Nachrichtentechnik*. Springer Verlag, 2013.
- [51] B. Thirouard. “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.
- [52] S. Wigger. “Charakterisierung von Öl- und Kraftstoffschichten in der Kolbengruppe mittels laserinduzierter Fluoreszenz”. Dissertation. Universität Duisburg-Essen, 2015.
- [53] K. T. Grattan und Z. Zhang. *Fiber optic fluorescence thermometry*. Springer Vieweg, 1994.
- [54] S. Allison und G. Gillies. “Remote thermometry with thermographic phosphors: Instrumentation and applications”. In: *Review of scientific instruments* 68 (1997).
- [55] A. H. Khalid und K. Kontis. “Thermographic phosphors for high temperature measurements: principles, current state of the art and recent applications”. In: *Sensors* 8 (2008).

- [56] M. Chambers und D. Clarke. “Doped oxides for high-temperature luminescence and lifetime thermometry”. In: *Annual Review of Materials Research* 39 (2009).
- [57] P.-C. Cheng. “The contrast formation in optical microscopy”. In: *Handbook of biological confocal microscopy* (2006).
- [58] J. R. Lakowicz. “Quenching of fluorescence”. In: *Principles of fluorescence spectroscopy* (1983).
- [59] A. Diaspro; G. Chirico; C. Usai; P. Ramoino und J. Dobrucki. “Photobleaching”. In: *Handbook of biological confocal microscopy* (2006).
- [60] B. Uhlig; C. Kirner; A. Behn und M. Feindt. *Kolbenring-Öltransport I*. FVV-Vorhaben Nr. 1124, Abschlussbericht. 2015.
- [61] B. Uhlig; C. Kirner; A.-C. Preuß; J. Graf; M. Neben und F. Zaussinger. *Kolbenring-Öltransport II*. FVV-Vorhaben Nr. 1197, Abschlussbericht. 2017.
- [62] T. Schweizer; H. Kubach und T. Koch. “Investigations to characterize the interactions of light radiation, engine operating media and fluorescence tracers for the use of qualitative light-induced fluorescence in engine systems”. In: *Automotive and Engine Technology* 6 (2021).
- [63] Honeywell International Inc. *Datenblatt Honeywell Lumilux® Yellow CD 345*. 2008.
- [64] D. B. Olson. “THIOXANTHONE DYES WITH IMPROVED SOLUBILITY”. Patent Number: US 6,531,613 Bl. 2003.
- [65] T. Ebert und A.-C. Preuß. *Fuel in Oil II - Ölquellen im Brennraum bei Ottomotoren*. FVV-Vorhaben Nr. 1225, Abschlussbericht. 2019.