

**Laserinduzierte Fluoreszenz und
Flammenemissionsspektroskopie
zur Charakterisierung des
Gemischbildungsprozesses bei wand- und
luftgeführten Brennverfahren mit
Benzindirekteinspritzung**

Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Fakultät für Physik
der Universität Bielefeld

von
Roman Grzeszik
aus Göttingen

Bielefeld 2002

Inhaltsverzeichnis

Verwendete Abkürzungen und Symbole	v
1 Einleitung	1
1.1 Lasermeßtechnik am Verbrennungsmotor	1
1.2 Konzepte zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs	3
1.3 Entwicklung der Benzin-Direkteinspritzung	4
1.4 Betriebsarten bei der Direkteinspritzung	5
1.5 Vergleich zu konventionellen Benzinmotoren	6
1.6 Aufgabenstellung	8
2 Optische Methoden	9
2.1 Ramanstreuung	9
2.2 Laserinduzierte Fluoreszenz	11
2.2.1 Fluoreszenzspektren	12
2.2.2 Optischer Aufbau	19
2.2.3 Auswertemethoden	20
2.2.4 LIEF-Untersuchungen	24
2.2.5 Nachweisgrenze für Tropfen	27
2.3 Flammenemissionsspektroskopie	28
2.3.1 Optischer Aufbau	28
2.3.2 Charakterisierung der Verbrennung	29
2.3.3 Auswertemethoden	33
3 Brennverfahren für die Benzindirekteinspritzung	36
3.1 Wandgeführtes Brennverfahren	36
3.2 Luftgeführtes Brennverfahren	37
3.3 Strahlgeführtes Brennverfahren	39
3.4 Vergleich der Brennverfahren	40
4 Benzinhochdrucksprays in stationärer Umgebung	41
4.1 Druckkammer	41
4.2 Drallventilsprays	42

4.2.1	Einfluß des Gegendrucks	42	6.3	Optische Untersuchung der Verbrennung	110
4.2.2	Einfluß des Einspritzdrucks	43	6.3.1	Einfluß des Einspritzdrucks	110
4.2.3	Einfluß des Strahlwinkels	44	6.3.2	Ansteuerbeginn	113
4.3	Zehnlochventil	46	6.3.3	Zusammenfassung	116
4.4	Tropfendurchmesser	47	7	Zusammenfassung	119
5	Wandgeführtes Brennverfahren	49	8	Ausblick	122
5.1	Thermodynamische Ergebnisse	49		Literaturverzeichnis	123
5.1.1	Einspritzdruck	53			
5.1.2	Ansteuerbeginn	55			
5.1.3	Strahlwinkel	56			
5.2	LI(E)F-Untersuchungen der Gemischbildung	58			
5.2.1	Einführende LIEF-Untersuchungen	59			
5.2.2	Einspritzdruck	60			
5.2.3	Ansteuerbeginn	61			
5.2.4	Strahlwinkel	63			
5.2.5	Vergleich Mehrloch-/Drallventil	65			
5.3	Kolbenwandfilm	68			
5.3.1	Optischer Versuchsaufbau	68			
5.3.2	Verifikation der Wandfilmmesstechnik	69			
5.3.3	Versuchsdurchführung	71			
5.3.4	Einflüsse auf die Wandfilmbildung	73			
5.3.4.1	Einspritzdruck	73			
5.3.4.2	Strahlwinkel	75			
5.3.4.3	Vergleich Drallventil mit Mehrlochventil	76			
5.3.5	Zusammenfassung	78			
5.4	Flammenemissionsspektroskopie	79			
5.4.1	Auswirkung des Einspritzdrucks	79			
5.4.2	Ansteuerbeginn	82			
5.4.3	Strahlwinkel	85			
5.4.4	Zusammenfassung	86			
6	Luftgeführtes Brennverfahren	89			
6.1	Thermodynamik	89			
6.1.1	Stabilitätsdiagramme	90			
6.1.2	Einspritzdruck	91			
6.2	Fluoreszenzuntersuchungen der Gemischbildung	94			
6.2.1	Einführende Untersuchungen zur Gemischbildung	94			
6.2.2	LIEF-Untersuchungen	97			
6.2.2.1	Einspritzdruck	98			
6.2.2.2	Ansteuerbeginn	102			
6.2.3	Zusammenfassung	108			

Verwendete Abkürzungen und Symbole

Bezeichnung	Einheit	Bedeutung
ASB	°KW	elektrischer <u>A</u> nsteuer <u>b</u> eginn des <u>E</u> inspritzventils
b_i	g/kWh	indizierter spezifischer Verbrauch
BSZ	-	<u>B</u> osch- <u>S</u> chwärzungszahl
d_{10}	μm	mittlerer Durchmesser
d_{32}	μm	mittlerer Sauterdurchmesser
HC		unverbrannter Kohlenwasserstoff
HDEV		<u>H</u> och <u>d</u> ruck <u>e</u> inspritz <u>v</u> entil
HR		<u>h</u> och <u>r</u> eflektierend
$k_{\text{H}_2\text{O}}$		Gleichgewichtskonstante für Zerfall von Wasser
I_L	W/cm ²	Intensität des Laserstreulichts
I_R	W/cm ²	Intensität des Ramanstreulichts
LI(E)F		<u>l</u> aser <u>i</u> nduzierte (<u>E</u> xciplex-) <u>F</u> luoreszenz
LwOT		oberer Totpunkt bei Ladungswechsel
m%	-	Massenprozent eines Stoffes
n	min ⁻¹	Drehzahl
N_i	m ⁻³	Dichte der Teilchensorte i
$O_{\text{K, frei}}$	m ²	freie Oberfläche der Kraftstofftropfen
p_i	kPa	Partialdruck der Teilchensorte i
PIV		<u>P</u> article- <u>I</u> mage- <u>V</u> elocimetry
p_{max}	bar	maximaler Verbrennungsdruck
p_{mi}	bar	indizierter Mitteldruck
p_{Rail}	MPa	Druck im Benzinverteilerrohr
p_{SR}	kPa	Luftdruck im Saugrohr
SMD	μm	mittlerer Sauterdurchmesser
t_i	ms	Einspritzdauer
TEA		Triethylanilin
V_K	mm ³	Kraftstoffvolumen
WOT		entdrosselter Motorbetrieb (<u>w</u> ide <u>o</u> pen <u>t</u> hrottle)
ZOT		oberer Totpunkt kurz nach Zündung
ZZP	°KW	<u>Z</u> ünd <u>z</u> eit <u>p</u> unkt
°KW		Grad Kurbelwelle
[]	-	Volumenkonzentration eines Gases
α_{TK}	°	Anstellwinkel der Tumbleklappe
ϵ		Kompressionsverhältnis
η_{therm}	-	thermischer Wirkungsgrad
κ	-	Polytropenexponent
σ_{Pmi}	bar	Standardabweichung des indizierten Mitteldrucks
σ_i	cm ² /sr	Streuquerschnitt der Teilchensorte i

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Lasermeßtechnik am Verbrennungsmotor

Um die Vorgänge im Ottomotor besser verstehen zu lernen, ist es unumgänglich geworden, die aus Vollmotoruntersuchungen gewonnenen Modelle durch optische Untersuchungen zu bestätigen und zu erweitern. Eine Herausforderung an die Meßtechnik stellt die motorische Verbrennung in vielfältiger Weise. Die auftretenden Prozesse erstrecken sich über unterschiedlich große Zeitbereiche. So lassen sich z.B. Aussagen zu Ablagerungen im Brennraum und auf den Einlaß- und Auslaßventilen erst nach wochen- oder monatelangem Motorbetrieb treffen. Für den normalen Fahrbetrieb hingegen ist die zeitgerechte Bereitstellung des optimalen Luftkraftstoffgemisches wichtig, wenn aufgrund der Verkehrssituation innerhalb von einigen Sekunden verzögert oder beschleunigt werden muß. Das Einströmen der Luft in den Brennraum, die Zündung und schließlich die Verbrennung des Kraftstoffes dauert nur wenige Millisekunden. Mit der Bereitstellung von energiereichen gepulsten Lasersystemen ist es möglich geworden, diese nur kurzzeitig andauernden, hochinstationären Prozesse mit einer sehr hohen zeitlichen Auflösung zu untersuchen und den Anforderungen des Motors an die Meßtechnik gerecht zu werden.

Eine der ersten etablierten flächigen Lasermeßtechniken am Motor ist die PIV-Meßtechnik (**p**article **i**mage **v**elocimetry) [Ort98] [Ree95] [RLL91], mit der innerhalb eines Laserlichtschnitts im Motor das Geschwindigkeitsfeld bestimmt werden kann. Dabei werden der Luft bei dem Einströmen in den Motor feine Partikel zugegeben, die der Strömung trägheitsarm folgen. Von den Partikeln im Laserlichtschnitt werden in kurzem zeitlichen Abstand von einigen Mikrosekunden zwei Bilder aufgenommen. Durch die Kreuzkorrelation dieser Bilder wird der Weg ermittelt, den die Partikel innerhalb dieser

Zeit zurückgelegt haben, und somit die Geschwindigkeit bestimmt. Diese Meßtechnik ist in idealer Weise dazu geeignet, Auswirkungen der Saugrohrgeometrie und der Steuerzeiten der Ladungswechselventile auf die Motorinnenströmung sichtbar zu machen.

Aussagen über die Zusammensetzung des Brennraumgases lassen sich mit der Ramanstreuung gewinnen. Durch den inelastischen Stoß des Lichts mit den Gasmolekülen verschiebt sich die Wellenlänge des Streulichts um einen bestimmten Betrag, der charakteristisch für das am Stoß beteiligte Molekül ist. Die Intensität des wellenlängenverschobenen Streulichts ist ein direktes Maß für die Konzentration des jeweiligen Moleküls im Brennraum. Durch die spektrale Zerlegung des Streulichts kann aus diesen Intensitäten auf die Gesamtzusammensetzung der Brennraumgase geschlossen werden. Eine einfache Bestimmung der internen Abgasrückführungsrate wird somit möglich [Grü94]. Aufgrund der niedrigen Querschnitte der Ramanstreuung ist man auf sehr hohe Laserenergien angewiesen, die z.Z. nur über eine Fokussierung des Laserstrahls erreicht werden. Damit schränkt sich die Ortsauflösung dieser Meßtechnik auf die nahezu eindimensionale Fokuslinie des Lasers ein. Durch ein Übereinanderreihen mehrerer Fokuslinien ist eine Bestimmung der Gaszusammensetzung quasi zweidimensional möglich [SGA00].

Zum Nachweis von dampfförmigem Kraftstoff innerhalb eines Lichtschnitts im Brennraum bietet sich die **laserinduzierte Fluoreszenz (LIF)** an. Durch den Einsatz von gepulsten Lasern, die im Ultravioletten emittieren, werden geeignete Benzinersatzkraftstoffe zur Fluoreszenz angeregt. Der Vorteil dieser Meßtechnik besteht in der flächenhaften Bestimmung der Kraftstoffkonzentration. Der Nachteil im Vergleich zur Ramanstreuung ist, daß bei Einsatz nur eines Lasersystems stets nur eine Molekülart im Brennraumgas nachweisbar ist. Damit ist die Bestimmung des lokalen Luft-/Kraftstoffverhältnisses nur unter gewissen Annahmen möglich. So muß z.B. bei bestimmten Ersatzkraftstoffen die lokale Sauerstoffkonzentration bekannt sein [Wol95]. Eine Erweiterung dieser Meßtechnik findet sich in der **laserinduzierten Exciplex-Fluoreszenz (LIEF)**. Mit ihrer Hilfe ist es möglich, zwischen flüssigem und dampfförmigem Kraftstoff zu unterscheiden [Chr96] [Krä99].

Eine weitere Möglichkeit zur flächigen Geschwindigkeitbestimmung in gasförmigen Medien bietet die Verfolgung von fluoreszierenden Strukturen im Brennraum, die sogenannte **Gaseous Image Velocimetry (GIV)** [GKB+98]. Grundlage dieser Meßtechnik ist die Einbringung eines fluoreszierenden Gases, beispielsweise Stickstoffmonoxid (NO), das sich in dem Beobachtungsvolumen heterogen verteilt und die zu verfolgenden Strukturen ausbildet. Der Vorteil der GIV-Meßtechnik gegenüber PIV ist, daß das Gas im Gegensatz zu den zugegebenen Partikeln vollkommen trägheitsfrei der Brennraumströmung folgt. Nachteilig ist, daß sich bei hochturbulenten Strömungen das fluoreszierende Gas sehr schnell mit der umgebenden Luft durchmischen

kann, so daß keine Fluoreszenzstrukturen mehr erkennbar sind.

Dieser Nachteil kann leicht umgangen werden, wenn anstelle des Stickstoffmonoxids ein Gas zugegeben wird, das durch Photodissoziation NO abspaltet. Durch fächerförmige UV-Laserstrahlen hoher Intensität werden räumlich eng begrenzt NO-Moleküle erzeugt, die als Quasipartikel zur Geschwindigkeitsbestimmung herangezogen werden. Die Vorteile dieser Meßtechnik sind, daß die für die Geschwindigkeitsbestimmung unerläßlichen Strukturen zu jedem gewünschten Zeitpunkt in dem Meßvolumen erzeugt werden können und daß diese Meßmethode durch den Einsatz phosphoreszierender Stoffe auf Flüssigkeiten übertragbar ist [GKB+99] [KGAH00].

1.2 Konzepte zur Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs

Im Rahmen der Diskussion über die Entstehung und Vermeidung von Treibhausgasen, insbesondere dem Kohlendioxid, ist in den letzten Jahren die Forschung nach verbrauchsärmeren Motoren und alternativen Motorkonzepten neu angestoßen worden. Als Konkurrent zu den neuen Konzepten für die Verbrennungsmotoren ist die Brennstoffzelle in Erscheinung getreten.

In dem jetzigen Stadium kann die Brennstoffzelle mit einer dem Ottomotor ähnlichen Effizienz von 30% die im Treibstoff gebundene chemische Energie in mechanische Arbeit umwandeln. Ein weiterer Vorteil dieser Technologie ist, daß neben reinem Wasser keine weiteren Abgase entstehen.

Bei den PKW-Dieselmotoren hat die Direkteinspritzung in Kombination mit der Turboaufladung zu verbrauchsarmen Fahrzeugen geführt, wobei hier mit der Commonrail-Einspritzung ein System zur Verfügung steht, das durch Mehrfacheinspritzung die Abgasemission erheblich verringert.

Auch bei Ottomotoren wird das Ziel verfolgt, durch neuartige Lösungsansätze eine deutliche Verringerung von Kraftstoffverbrauch und Emission zu erreichen. Lösungsansätze sind z.B. turboaufgeladene Motoren mit kleinem Hubvolumen, der vollvariable Ventiltrieb zur Vermeidung der Drosselverluste in unterer Teillast oder auch die intelligente Entkopplung des Motors vom Antrieb in den sogenannten Hybridfahrzeugen.

Die Benzindirekteinspritzung weist im Vergleich zu eben genannten Ansätzen das größte Einsparpotential auf. Durch den entdrosselten Motorbetrieb, den damit einhergehenden Entfall der Drosselverluste und durch das bei diesen Motoren höhere Kompressionsverhältnis wird der Verbrennungsprozeß erheblich verbessert und der Verbrauch des Motors um bis zu 20% reduziert.

1.3 Entwicklung der Benzin-Direkteinspritzung

Die Benzindirekteinspritzung ist keineswegs eine Erfindung der jüngeren Zeit. Schon in der Mitte des 20. Jahrhunderts suchte man nach Alternativen zu Vergasermotoren für die Luftfahrt, weil in großer Höhe bei den vorherrschenden tiefen Temperaturen die Vergaser zu einer starken Vereisung neigten. Durch die direkte Einspritzung des Kraftstoffes in den Brennraum konnte dieses Problem bei gleichzeitiger Leistungssteigerung der Motoren gelöst werden [N.44].

Aufgrund der deutlich geringeren Kosten wurden bei den Personenkraftwagen weiterhin Ottomotoren mit Vergasern eingesetzt. Mitte der sechziger Jahre hielt die Benzindirekteinspritzung Einzug in den Automobilrennsport wegen der deutlich höheren Motorleistung [Sch61] [N.55] [Pet59]. Daimler-Benz brachte einen Sportwagen in Serie heraus, doch der Verbrauch war zu hoch und durch die Direkteinspritzung fand eine zu starke Ölverdünnung im Motor statt, so daß dieser Wagen in den folgenden Jahren wieder vom Markt genommen wurde [cp56] [cp58].

In der Folgezeit beschäftigten sich auch andere Motorenhersteller mit der Benzindirekteinspritzung. Texaco entwickelte das sogenannte TCCS-Brennverfahren (**T**exaco **c**ontrolled **c**ombustion **s**ystem), um neben Benzin auch schwerverdampfende Kraftstoffe verwenden zu können [DBM61] [MCF68]. Mit Hilfe eines geeigneten Einlaßkanals wurde in dem Motor eine starke Drallströmung erzeugt, der Brennraum durch einen ebenen Zylinderkopf begrenzt und in den Kolben eine Mulde eingelassen. In Richtung der Drallströmung wurde der Kraftstoff tangential in die Kolbenmulde in Richtung Zündkerze eingespritzt. Ähnlich wie bei Dieselmotoren wurde gerade nur eine der benötigten Last entsprechenden Menge Kraftstoff in den entdrosselt betriebenen Motor eingebracht. Dieses Motorenkonzept zeigte erstmals das Potential der BDE zur Verbrauchssenkung auf. Nach einem umfangreichen Test dieser Motoren in der Flotte eines amerikanischen Postdienstes [Lew86] wurden weitere Untersuchungen eingestellt, da mit den Dieselmotoren bereits preiswertere und technisch ausgereifere Antriebsaggregate zur Verfügung standen.

Auch Ford entwickelte einen Ottomotor mit Direkteinspritzung unter dem Namen PROCO (**p**rogrammed **c**ombustion). Das Einspritzventil saß mittig im Brennraum, flankiert von zwei Zündkerzen, die gerade in den Mantel des kegelförmigen Kraftstoffstrahls hineinragten. Das Brennraumdach war eben. Mittig unter dem Einspritzventil befand sich eine zylinderförmige Kolbenmulde. Auch dieses Verfahren wurde in zahlreichen Prüfstandsmotoren und Fahrzeugen untersucht [HW78] [SCR72] [CHSS81].

Letztendlich führte bei den meisten Autoherstellern eine strengere Abgasgesetzgebung zu der Aufgabe der Weiterentwicklung dieser Motoren, weil

gerade in dem verbrauchsgünstig geschichteten Betrieb konventionelle Katalysatoren zur Abgasnachbehandlung nicht einsetzbar waren.

Erst mit der Markteinführung des Mitsubishi Charisma in Japan wurde die Forschung an Motoren mit BDE in großem Umfang wiederbelebt. Bei dem sogenannten Reverse-Tumble-Brennverfahren wird der Kraftstoffstrahl mit Hilfe einer Kolbenmulde in Richtung Zündkerze transportiert. Diese Art der Gemischbildung erweist sich in dem unteren Drehzahlbereich und bis zur Teillast als stabil. Das Abgasproblem konnte mit einem NO_x-Speicherkatalysator so weit gelöst werden, daß das Fahrzeug die Emissionswerte nach den EURO3-Richtlinien erfüllte [Eur00].

Kurze Zeit später stellte Toyota seinen weiterentwickelten direkteinspritzenden Benzinmotor vor, der in dem Modell Avensis verwendet wird. Das Brennverfahren beruht auf einer starken Drallströmung und einer speziellen Kolbenkontur, über die die Ladungsschichtung erreicht wird.

In Lizenz setzt Volvo den 1,8l-BDE-Motor von Mitsubishi in seinem Fahrzeugmodell V40 ein. Beide Motoren verfügen über eine Nennleistung von 90 kW, der Verbrauch des BDE-Motors ist aber um 2,2 l/100 km geringer und liegt bei 6,7 l/100 km.

Seit Herbst des Jahres 2000 verkauft Volkswagen im Lupo FSI den ersten eigenentwickelten europäischen Motor mit Direkteinspritzung. Auch hier wird mit Hilfe einer flachen Kolbenmulde der Strahl in Richtung Zündkerze umgelenkt. Zusätzlich wird die Gemischbildung und Verdampfung durch eine verstärkte Tumbleströmung unterstützt. Der Lupo kann mit einem konventionellen 1,4l-Ottomotor mit 74 kW oder mit einem 1,4l-BDE-Motor mit 77 kW Nennleistung ausgerüstet werden. Der Hersteller gibt eine Verbrauchsreduzierung von 1,5 l/100 km an. Der Verbrauch des Lupo FSI liegt bei 4,9 l/100 km.

1.4 Betriebsarten bei der Direkteinspritzung

Bei konventionellen Benzinmotoren wird der Kraftstoff außerhalb des Brennraums verdampft und mit der Luft homogen durchmischt. Für die Gemischaufbereitung werden entweder Vergaser oder elektromagnetische Ventile verwendet, die den Kraftstoff in das Saugrohr einspritzen. Dieser Vorgang wird als externe Gemischbildung bezeichnet. Zur Steuerung der Leistungsabgabe wird eine Drosselklappe eingesetzt, die die in den Brennraum eintretende Luft-/Kraftstoffmenge reduziert. Im Unterschied dazu strömt die Luft bei direkteinspritzenden Motoren und kleinen Lasten ungedrosselt in den Motor, nur der Kraftstoff wird mit Hilfe eines Hochdruckventils in der erforderlichen Menge direkt in den Brennraum eingebracht. Weil die Kompressionsendtemperatur für eine Selbstzündung des Kraftstoff-/Luftgemisches nicht ausreicht, muß die Entflammung mit Hilfe einer Zündkerze eingelei-

tet werden. Damit werden zwei Probleme bei der internen Gemischbildung offenbart. Einerseits muß die Zeit zwischen Einspritzung und Zündung ausreichend lang sein, damit der Großteil des Kraftstoffes verdampft und sich in der Kraftstoffwolke durch Wechselwirkung mit der umgebenden Luft ein zündfähiges Gemisch bildet. Andererseits dürfen die Randbereiche der Kraftstoffwolke nicht so stark ausmagern, so daß sie von der Flamme nicht mehr verbrannt werden können.

Prinzipiell lassen sich bei einem Benzinmotor mit Direkteinspritzung zwei Betriebsarten unterscheiden. In dem Lastbereich zwischen Leerlauf und Teillast wird der Motor geschichtet betrieben. Die Drosselklappe ist vollständig geöffnet und die Luft strömt ungedrosselt in den Brennraum. Die Kraftstoffeinspritzung erfolgt während der Kolbenaufwärtsbewegung in dem Kompressionstakt. Für den oberen und den Vollastbereich wird bereits während des Ansaugtakts eingespritzt, um eine möglichst gleichmäßige homogene Kraftstoffverteilung zu erreichen.

1.5 Vergleich zu konventionellen Benzinmotoren

Ein großer Nachteil von Benzinmotoren mit Vergaser oder Saugrohreinspritzung ist, daß bei der externen Gemischbildung der Motor mit Hilfe der Drosselklappe angedrosselt werden muß, um die Leistungsabgabe des Motors zu steuern. Dies hat jedoch eine Verschlechterung des thermischen Wirkungsgrads η_{therm} zur Folge. Idealisiert man den motorischen Kompressions- und Arbeitstakt durch einen Carnotschen Kreisprozeß, so steht der Wirkungsgrad η_{therm} in direktem Zusammenhang mit dem Verhältnis aus der Differenz der Spitztemperatur der Verbrennung T_2 und der Temperatur des angesaugten Luft-/Kraftstoffgemisches T_1 zu T_2

$$\eta_{therm} = \frac{T_2 - T_1}{T_2}. \quad (1.1)$$

Die Temperaturen lassen sich für den Motor unter der Annahme einer polytropen Kompression aus der Gleichung

$$pV^\kappa = const \quad (1.2)$$

ableiten, wobei κ der Polytropenexponent ist. Damit läßt sich ϵ_{therm} einzig als Funktion des Verdichtungsverhältnisses ϵ des Motors berechnen.

$$\eta_{therm} = 1 - \frac{1}{\epsilon^{\kappa-1}} \quad (1.3)$$

Für einen konventionellen Ottomotor liegt ϵ bei 9,5. Für Luft-/Kraftstoffgemische kann $\kappa=1,32$ eingesetzt werden. Damit ergibt sich unter Vollast

ein idealer Wirkungsgrad des Motors von $\eta_{therm}=0,51$. Bei Benzinmotoren mit Direkteinspritzung kann das Kompressionsverhältnis auf bis zu 11,5 erhöht werden. Dies hat eine Steigerung des Wirkungsgrads um 6% auf $\eta_{therm}=0,54$ zur Folge. Dementsprechend verringert sich der Kraftstoffverbrauch um 6%. Neben der Verbesserung durch das steigende Kompressionsverhältnis trägt auch die Entdrosselung des Motors während des Ansaugtakts zur Verbrauchsreduzierung bei. Im Leerlauf sind die Verluste am größten. Sie können hier bis zu 10% betragen [BHKR00], [VHS01], [SKvdSE01], [Win01].

Ein weiterer Vorteil der BDE ist die durch den verdampfenden Kraftstoff hervorgerufene Absenkung der Lufttemperatur bei homogenem Betrieb. Dieses führt unmittelbar zu einer Absenkung der Kompressionsenddrucks und der Kompressionsarbeit. Außerdem kann der Motor durch die Abkühlung mehr Luft einsaugen, so daß er eine 5-10% höhere Nennleistung aufweist.

In der unteren Teillast verhält sich der BDE-Motor ähnlich wie ein Dieselmotor. Durch die Entdrosselung wird stets die maximale Luftmenge angesaugt und nur soviel Kraftstoff eingespritzt, wie für den augenblicklichen Motorbetrieb erforderlich ist. Dieses bezeichnet man auch als qualitative Lastregelung. Die höchste Last, die ein Dieselmotor darstellen kann, ist durch die Rußgrenze bestimmt. Aufgrund der stark inhomogenen Verteilung des Kraftstoffs im Brennraum kann nie die gesamte im Brennraum zur Verfügung stehende Luftmenge zur Verbrennung genutzt werden. Der Überschuß an Luft wird für die Oxidation des bei der Verbrennung entstehenden Rußes benötigt. Die auf das Hubvolumen bezogene Maximalleistung bleibt deshalb unter der Leistung eines konventionellen Benzinmotors mit gleichem Hubvolumen. Der Motor mit Benzindirekteinspritzung vereinigt damit die Vorteile dieser beiden Motorenkonzepte. Für kleine und mittlere Lasten kann im geschichteten Betrieb durch Einspritzung in den Kompressionstakt und die Entdrosselung des Motors der Verbrauch gesenkt werden, durch die Einspritzung in den Ansaugtakt kann aber auch eine hohe Motorleistung erreicht werden, die mit der Leistung eines konventionellen Benzinmotors vergleichbar ist.

Direkteinspritzende Ottomotoren können prinzipiell größere spezifische Leistungen bieten als Motoren mit Saugrohreinspritzung. Die Leistung eines Benzinmotors ist insbesondere bei niedrigen Drehzahlen von der Klopfgrenze abhängig. Die Zündeinleitung im Kompressionstakt darf nicht beliebig früh erfolgen, weil sonst während der Verbrennung das expandierende Abgas hinter der Flammenfront das Frischgas bis zur Selbstzündung komprimiert und Schockwellen im Brennraum entstehen, die bei längerem Betrieb zu einer Zerstörung des Motors führen. Nach außen macht sich diese Art der Verbrennung durch ein klopfendes Geräusch bemerkbar. Durch ein zweistufiges Einspritzen des Kraftstoffs wird das Klopfen des Motors wirksam vermieden [BRT50], [CHSS81]. Bei der ersten Einspritzung in den Ansaugtakt wird ein homogenes mageres nur schwer entflammables Grundgemisch erzeugt. Die

restliche Kraftstoffmenge wird wie im geschichteten Betrieb im Kompressionsstakt eingebracht und führt wegen der Benzinverdampfung zu einer Erniedrigung der Brennraumtemperatur und damit zu einer Klopfreduzierung. Außer einem früheren Zündwinkel kann auch das Kompressionsverhältnis höher gewählt werden, wodurch ebenfalls eine Verbrauchsreduzierung erreicht wird.

1.6 Aufgabenstellung

Im Rahmen dieser Arbeit sollen verschiedene Meßtechniken an einem optisch zugänglichen Einzylindermotor eingesetzt werden, um die Parameter, die für eine erfolgreiche Gemischbildung wichtig sind, erfassen und bewerten zu können. Dabei richtet sich der Einsatz der jeweiligen Meßmethode nach dem zu untersuchenden Zeitbereich in dem Arbeitsspiel. Zur Charakterisierung des Einspritzvorgangs des Kraftstoffes, der Verdampfung und dem Transport zur Zündkerze wird die laserinduzierte Fluoreszenz verwendet. Die Beurteilung der Art der Verbrennung sowie der Qualität der Ladungsschichtung ermöglicht die Flammenemissionspektroskopie (FES). Anhand der mit diesen Techniken gewonnenen Ergebnisse soll überprüft werden, inwieweit sich optische Meßtechniken einsetzen lassen, um thermodynamische und abgasanalytische Untersuchungen zu ergänzen oder im Idealfall zu ersetzen. Zur Stützung der Aussagekraft der möglichen Korrelationen werden zwei Brennverfahren untersucht, die sich in der Art des Ladungstransportes zur Zündkerze grundlegend unterscheiden. Das erste Brennverfahren ist ein wandgeführtes, bei dem der Ladungstransport zur Zündkerze mit Hilfe einer Kolbenmulde und einer Reverse-Tumbleströmung erreicht wird. Dabei soll der hier unvermeidbar auf dem Kolben gebildete Wandfilm gesondert untersucht werden. Das zweite ist ein luftgeführtes Brennverfahren, bei dem der Ladungstransport zur Zündkerze mit Hilfe einer verstärkten Vorwärts-Tumbleströmung erreicht wird.

Kapitel 2

Optische Methoden

In diesem Kapitel sollen die optischen Meßtechniken und ihre Anwendung am Motor vorgestellt werden.

2.1 Ramanstreuung

Neben qualitativen Aussagen über die Gemischbildung und die Ladungsschichtung, wie man sie beispielsweise über endoskopische Motoruntersuchungen erhalten kann, ist eine Meßtechnik wünschenswert, mit der lokal im Brennraum zu einem definierten Zeitpunkt die Gaszusammensetzung bestimmt werden kann. Eine Meßtechnik, die diese Bedingungen erfüllt, ist die Ramanstreuung.

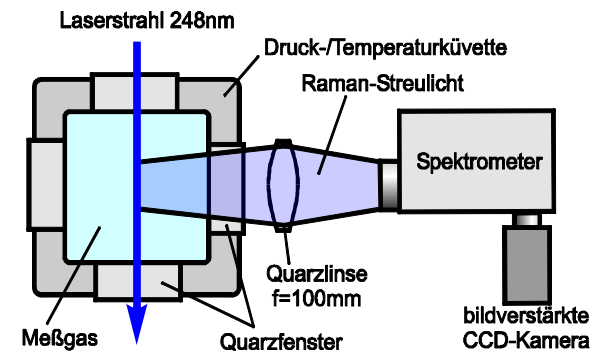


Abbildung 2.1: Optischer Aufbau für die Ramanuntersuchungen an der Druck-/Temperaturküvette.

Der Lichtstrahl eines Lasers kann als Strom von Photonen aufgefaßt wer-

den. Aufgrund ihres Teilchencharakters können diese mit den Gasmolekülen zusammenstoßen und werden dadurch aus ihrer Bahn abgelenkt. Es gibt verschiedene Arten von Stoßprozessen. Bei dem elastischen Stoß ändert sich die Flugrichtung des Photons, seine Energie aber damit auch seine Wellenlänge bleiben gleich. Dieser Vorgang wird als Mie- oder Rayleigh-Streuung bezeichnet. Bei einem inelastischen Stoß hingegen nimmt das Photon entweder Energie auf oder gibt sie an das Gasmolekül ab. Die Besonderheit dieser sogenannten Ramanstreuung ist, daß der Energiebetrag, der zwischen Molekül und Photon ausgetauscht wird, keinen beliebigen Wert annehmen kann, sondern diskret und für das an dem Stoßvorgang beteiligte Molekül charakteristisch ist. Das Maß, mit dem ein Molekül in der Lage ist, das Licht inelastisch zu streuen, wird als Streuquerschnitt bezeichnet. Es ist stark von der Art der Moleküle abhängig. Das bedeutet, daß das inelastisch gestreute Licht die vollständige Information über die Gaszusammensetzung in dem Beobachtungsvolumen besitzt. Aus der spektralen Zerlegung des Streulichts kann damit z.B. auf die Luftzahl oder den Restgasgehalt geschlossen werden.

Die Intensität I_R des Raman-Streulichts ist im wesentlichen von der Teilchenzahldichte N_i der Teilchensorte i , des Streuquerschnittes σ_i und der Laserleistung I_L abhängig. Die Teilchenzahldichte N_i hängt für ein ideales Gas von den zwei Größen Temperatur T und Partialdruck p_i ab.

$$I_R \sim \sigma_i p_i I_L \sim \sigma_i \frac{N_i}{T} I_L \quad (2.1)$$

Um den Einfluß dieser Größen auf das Signal zu überprüfen, wurden Untersuchungen an einer Druck-/Temperaturkuvette und an einem Luft-/Methanbrenner durchgeführt. Der optische Aufbau ist in Abb. 2.1 dargestellt. Pro Meßpunkt wurde über 100 Messungen gemittelt. In Abb. 2.2 a) und b) sind die Streulichtintensitäten von Sauerstoff und Stickstoff gegen den Kehrwert der Temperatur und in Abhängigkeit des Zellendrucks aufgetragen. In Abb. 2.2 c) wird die aus den Intensitäten von Sauerstoff und Methan gewonnene Luftzahl mit der tatsächlich eingestellten Luftzahl verglichen. Zusätzlich sind in den Diagrammen Ausgleichsgeraden eingezeichnet. Gut zu erkennen ist die Linearität des Meßsignals. Ein wesentlicher Nachteil der Raman-Streuung ist der im Vergleich zur Fluoreszenz geringe Streuquerschnitt der Gasmoleküle. Um ein vergleichbares Signal-zu-Rausch-Verhältnis zu erhalten, muß eine größere Anzahl von Einzelmessungen durchgeführt werden. Aus diesem Grund werden in dieser Arbeit für die Gemischbildungsuntersuchungen nur LIF-Meßtechniken eingesetzt.

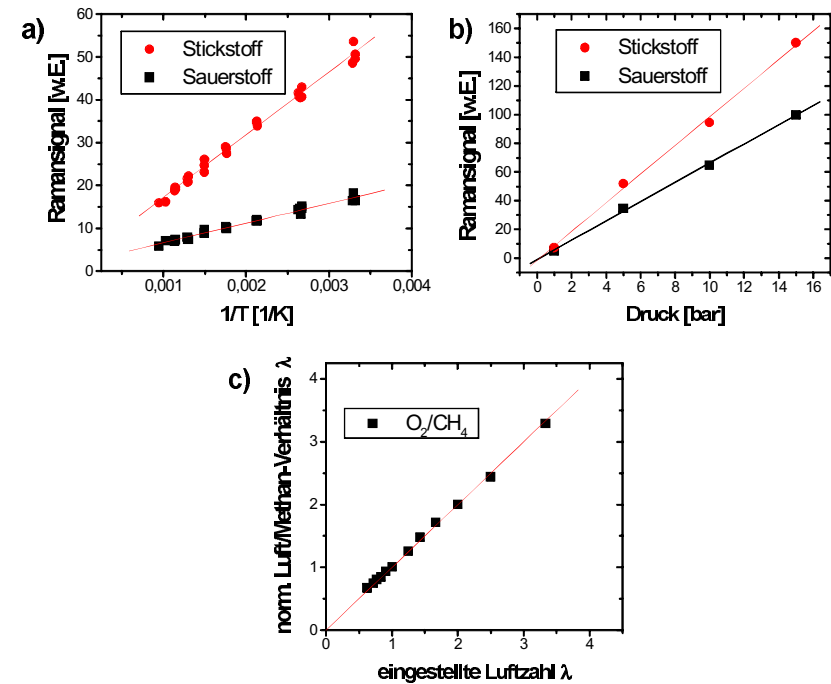


Abbildung 2.2: Ramanspektroskopie. Signalabhängigkeit bei technischer Luft von a) der Temperatur und b) Druck. c) Stöchiometrie eines Luft-Methangemisches bei 23°C und 950 mbar. Pro Datenpunkt wurden 100 Messungen durchgeführt.

2.2 Laserinduzierte Fluoreszenz

Eine einfache optische Methode ist die Streulichttechnik. Mit Hilfe eines Stroboskops und einer Kamera kann die Ausbreitung des feinerstäubten Kraftstoffes im Brennraum untersucht werden. Der transparente Kraftstoffdampf kann im Gegensatz dazu nicht nachgewiesen werden. Eine dafür geeignete Technik ist die laserinduzierte Fluoreszenz (LIF). Durch kurzwelliges Licht, daß im allgemeinen von UV-Lasern erzeugt wird, werden die Kraftstoffmoleküle gezielt angeregt, d.h. Elektronen treten aus dem Grundzustand unter Absorption eines UV-Lichtquants in einen angeregten Energiezustand über. Bei einem anschließenden Übergang in einen tieferliegenden Zustand senden sie ein Lichtquant aus, das eine größere Wellenlänge als das anregende Lichtquant hat. Befinden sich Elektronen bereits vor der Absorption in

einem angeregten Zustand, tritt in den Emissionsspektren neben der langwelligeren Fluoreszenz auch Fluoreszenz auf, die kürzere Wellenlängen als das anregende Laserlicht besitzt.

Die hier verwendeten Kraftstoffe werden aus dem Grundzustand heraus angeregt, so daß die Fluoreszenz stets zu längeren Wellenlängen verschoben ist. Ein Nachteil von Normalbenzin ist, daß es kein chemischer Reinstoff ist, sondern aus einer Vielzahl von Einzelkomponenten besteht, die in einem ähnlichen Spektralbereich fluoreszieren, aber unterschiedlich zur Gesamtfluoreszenz beitragen. Um einen engen Zusammenhang zwischen der Konzentration von Kraftstoff und der Fluoreszenz zu bekommen, muß ein Ersatzkraftstoff mit definierten Einzelkomponenten eingesetzt werden. Dieser hat gegenüber Benzin den Nachteil, daß er die physikalischen Eigenschaften von Benzin, wie Siedeverlauf, Verdampfungsenthalpie und Dampfdruck, nur unzureichend nachbildet. Typischerweise setzen sich solche Ersatzkraftstoffe aus zwei Komponenten mit ähnlichem Dampfdruck zusammen. Als Hauptkomponente wird bei Benzinmotoren Isooktan und bei Dieselmotoren Dodekan verwendet. Beide Stoffe zeichnen sich dadurch aus, daß sie durch UV-Licht nicht zur Fluoreszenz angeregt werden. Die zweite Komponente wird als Tracer bezeichnet und besteht aus einer fluoreszenzaktiven Substanz z.B. aus der Gruppe der Aldehyde oder der Ketone.

Durch den gezielten Einsatz zweier Tracer ist eine Erweiterung dieser Meßtechnik zur Unterscheidung von flüssigem und gasförmigem Kraftstoff möglich. Jeder der beiden Tracer zeigt in einer Alkanlösung ein ähnliches aber verbreitertes Fluoreszenzspektrum aus der Gasphase. Das Fluoreszenzspektrum einer Lösung mit beiden Tracern hingegen ist deutlich zu längeren Wellenlängen hin verschoben. Ursächlich hierfür ist, daß sich ein durch das UV-Licht angeregtes Tracermolekül mit einem Molekül des anderen Tracers, das sich im Grundzustand befindet, zusammenlagert und einen **excited state complex** (Exciplex) bildet. Der Grundzustand des Exciplexes liegt energetisch höher als bei den einzelnen Tracern, so daß die Wellenlänge des Fluoreszenzphotons deutlich langwelliger ist. Bei oder nach Aussendung des Photons zerfällt der Exciplex wieder. Bei der **laserinduzierten Exciplex-Fluoreszenz** (LIEF) fallen bei geeigneter Wahl der Tracerkombination und -konzentration die Fluoreszenzemissionen in verschiedene Spektralbereiche, so daß mit Hilfe von Bandkantenfiltern Dampf und Flüssigkeit unabhängig voneinander nachweisbar sind.

2.2.1 Fluoreszenzspektren

Zur Aufnahme der Fluoreszenzspektren wurde der Aufbau zur Ramanstreuung aus Abschnitt 2.1 verwendet. Anstelle der Druckküvette wurde eine kleine Quarzküvette in den Strahlengang gestellt, die mit einem Teflonstopfen

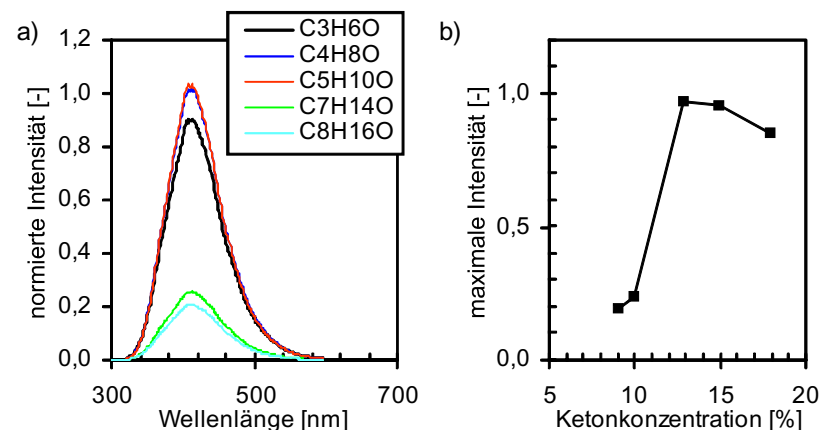


Abbildung 2.3: Fluoreszenzspektren von 10m%-Keton-Isooktanlösungen. $\lambda_{\text{Anregung}}=248$ nm. a) normierte Spektren der Ketone, b) maximale Fluoreszenzintensität in Abhängigkeit der Ketonkonzentration.

verschlossen werden konnte und die untersuchten Ersatzkraftstoffe aufnahm. Aufgrund der hohen Absorption in der Flüssigkeit wurde der Laserstrahl bereits nach wenigen Millimetern Wegstrecke innerhalb der Küvette absorbiert. Um den Einfluß der Absorption auf die Intensität des Fluoreszenzspektrums gering zu halten, wurde nur die Einkoppelfläche auf den Spektrometerspalt scharf abgebildet.

Für die Untersuchung der Gemischbildung bei Benzinmotoren mit Saugrohreinspritzung haben sich Ketone als Tracer bewährt [Wol95]. Die fluoreszenzaktive Bindung ist die Doppelbindung des Sauerstoffatoms an das Kohlenstoffatom. In verschiedenen Veröffentlichungen wurden als Tracer Aldehyde verwendet [SDH⁺95], die gegenüber den Ketonen den Nachteil besitzen, daß die schwereren Aldehyde bei erhöhter Temperatur zerfallen. Die physikalischen Eigenschaften der untersuchten Ketone sind in Tab. 2.1 aufgeführt. In Abb. 2.3 a) sind die Spektren der Homologe von Keton in Isooktan dargestellt. Die Massenkonzentration der Ketone betrug 10 m%. Wegen der fluoreszenzaktiven Doppelbindung C=O zeigen die Ketone sehr ähnliche Fluoreszenzspektren mit einem Maximum bei 410 nm. Aufgrund der Konzentrationsabnahme dieser Bindung nimmt die Intensität für die schwereren Ketone ab. Die Auftragung der maximalen Intensität gegen die molare Konzentration der Ketone in Abb. 2.3 b) sollte einen linearen Zusammenhang ergeben. Zu erkennen ist aber ein steiler Anstieg der Fluoreszenz ab einer Molkonzentration von 10% auf ein Maximum. Für noch höhere molare Konzentrationen fällt sie leicht ab. Die Fluoreszenz der untersuchten Tracer ist

Name	Summenformel	Dichte [kg/l]	Molare Masse [g/mol]	Siedetemperatur [°C]
Aceton	C ₃ H ₆ O	0,791	58,08	56,0
2-Butanon	C ₄ H ₈ O	0,805	72,11	80,0
Diethylketon	C ₅ H ₁₀ O	0,853	86,13	102,0
3-Heptanon	C ₇ H ₁₄ O	0,820	114,19	150
2-Oktanon	C ₈ H ₁₆ O	0,819	128,22	173,0

Tabelle 2.1: Physikalische Größen der Ketone.

damit nicht nur von der Konzentration der C=O-Bindung abhängig, sondern auch von der Kohlenstoffkettenlänge.

Für die LIF-Untersuchungen am Motor wurde eine 10 m%-Lösung von Diethylketon in Isooktan eingesetzt, weil der Siedepunkt dieser Stoffe bei 100°C und damit in der Mitte des Siedeverlaufs von Benzin liegt. In Abb. 2.4 a) sind die Spektren von Lösungen mit verschiedenen Tracerkonzentrationen aufgetragen. Die Form des Spektrums ist unabhängig von der Konzentration. In Abb. 2.4 b) ist die Gesamtfluoreszenz dargestellt. Die Intensität steigt monoton an. Für geringe Konzentrationen um die 5% -10% ist ein steiler Anstieg und für die höchste Konzentration eine Abflachung zu erkennen. Wie bei den Untersuchungen der verschiedenen Ketone besteht auch hier kein streng linearer Zusammenhang zwischen der Fluoreszenz und der Tracerkonzentration.

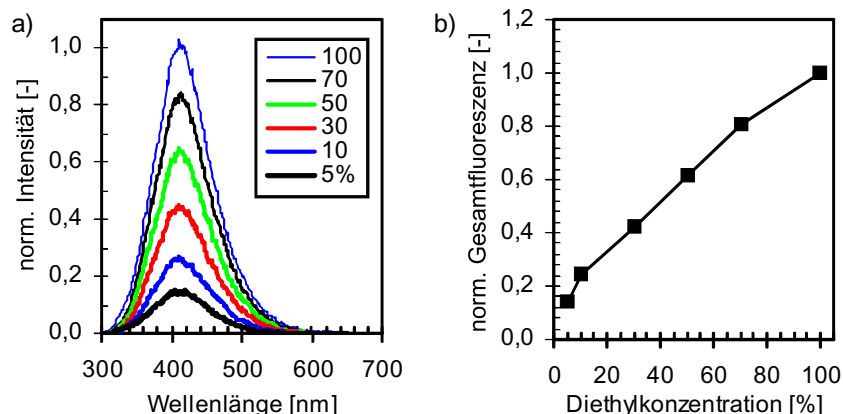


Abbildung 2.4: LIF-Untersuchungen an Diethylketon-Isooktanlösungen. Emissionsspektren a), Gesamtmission b) für verschiedene Konzentrationen.

Als nächstes wurde die Fluoreszenz des dampfförmigen Tracers im Motor untersucht. Um das Diethylketon sehr gleichmäßig im Brennraum zu

verteilen, wurde der Tracer in den Ausgleichsbehälter des Saugrohrs eingespritzt. Durch die Zugabe von Stickstoff konnte der Sauerstoffgehalt der zugeführten Luft zwischen 0% und 21% definiert eingestellt werden. In vorhergehenden Untersuchungen hat sich gezeigt, daß die Fluoreszenz von Diethylketon nicht proportional zu der Dichte der Brennraumgase ist, sondern aufgrund der Fluoreszenzlöschung durch den Sauerstoff ein druckproportionales Signal zeigt [Wol95]. Für die Fluoreszenzuntersuchungen wurde ein UV-Laserstrahl mit einem Durchmesser von ca. 5 mm durch die Giebefenster in den Brennraum geführt und die Fluoreszenz mit Hilfe der intensivierten CCD-Kamera aufgenommen. Streulicht und langwellige Fluoreszenz wurden mit einem Butylacetat- und einem UG11-Filter unterdrückt. In Abb. 2.5 sind über den Kurbelwinkel die Fluoreszenz, der Brennraumdruck und die Dichte der Luft im Kompressionstakt dargestellt. Die Dichte und der Druck zeigen bis 70°vZOT einen sehr flachen Verlauf, um anschließend stark anzusteigen. Im Gegensatz dazu zeigt die Fluoreszenz einen sehr konstanten Anstieg von 140° bis 40°vOT und einen leichten Abfall gegen OT. Die starke Abwei-

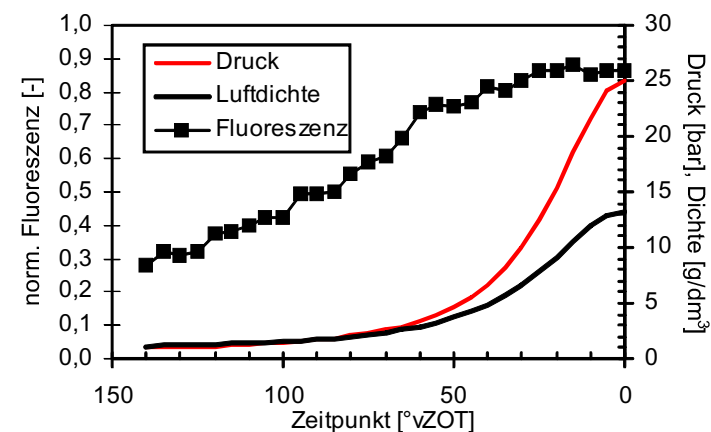


Abbildung 2.5: Gasdichte, Brennraumdruck und kurbelwinkelaufgelöste Fluoreszenz von 10m%-Diethylketon in Isooktan. Umgebungsmedium Luft.

chung der Ergebnisse von [Wol95] ist auf die Wellenlänge des anregenden Laserlichts zurückzuführen. Dort wurde bei 308 nm und nicht wie in dieser Arbeit bei 248 nm angeregt. Der von der Dichte stark abweichende Verlauf der Fluoreszenz ist auf das Quenching der Tracermoleküle durch den Sauerstoff zurückzuführen. Dabei kehren durch einen inelastischen Stoß die Moleküle aus dem angeregten elektronischen Zustand strahlungslos in den Grundzustand zurück.

Quenching durch Sauerstoff

Um den Einfluß des Sauerstoffs auf die Tracerfluoreszenz genauer zu untersuchen, wurde die Sauerstoffkonzentration $[O_2]$ durch die Zugabe von Stickstoff zwischen 0% und 19,3% variiert. Den zeitlichen Verlauf der Fluoreszenz gibt Abb. 2.6 a) wieder. In einer vollständig sauerstofffreien Umgebung traten die größten Intensitäten auf. Bereits eine geringe Zugabe von unter 1% führte zu einem starken Intensitätsabfall. Eine anschließende weitere Erhöhung von $[O_2]$ führte nur zu einer geringen Fluoreszenzänderung. Auffällig ist, daß auch bei einer vollständig inerten Umgebung die Fluoreszenz nicht proportional zur Gasdichte ist. Dieses deutet darauf hin, daß neben dem Sauerstoff auch der Stickstoff zum Quenching des Tracers beiträgt. Ein weiterer stets auftretender Effekt ist das Eigenquenching, das bei sehr hohen Tracerdichten dazu führen kann, daß bei einer Konzentrationserhöhung des Tracers die Gesamtfluoreszenz sogar verringert wird [IKH⁺95].

In Abb. 2.6 b) sind die Intensitäten normiert auf die Fluoreszenz von $[O_2]=19,3\%$ dargestellt. Die Verhältnisse für die verschiedenen Konzentrationen des Sauerstoffs zeigen einen konstanten Verlauf, eine Änderung zu frühen oder späten Aufnahmezeitpunkten ist nicht zu erkennen. Das bedeutet, daß in dem von der Kompression aufgespannten Druck- und Temperaturbereich der Stoßquerschnitt des Sauerstoffs unabhängig von der Konzentration ist. In Abb. 2.6 c) sind die zeitlich und damit druck- und temperaturgemittelten Fluoreszenzverhältnisse dargestellt. Für $[O_2] > 3,3\%$ stellt sich ein konstantes Verhältnis ein, erst bei sehr geringen Konzentrationen steigt die Fluoreszenz steil an. Für die Untersuchungen der Gemischbildung mit diesem Tracer ist dieses von Vorteil, bedeutet es doch, daß schon ein geringer Lufteintrag in die Kraftstoffwolke ausreicht, um die Fluoreszenz auf ein konstantes Niveau zu quench.

Tracerkonzentration

Als nächstes wurde das Eigenquenching des Diethylketons untersucht. In Abb. 2.7 a) ist der zeitliche Verlauf der Fluoreszenz dargestellt. Mit steigender Einspritzdauer t_i nimmt die Intensität monoton zu. In Abb. 2.7 b) ist zu erkennen, daß zu jedem Zeitpunkt ein vergleichbares Fluoreszenzverhalten auftritt. Die Verläufe sind auf die Intensitäten bei $t_i=1,0$ ms normiert. In Abb. 2.7 c) sind die gemittelten Fluoreszenzintensitäten gegen die Einspritzmenge aufgetragen. Es zeigt sich ein mengenproportionales Signal. Insbesondere zu hohen Einspritzdauern und damit zu hohen Konzentrationen hin zeigt sich kein Abfall in der Fluoreszenz. Das Eigenquenching von Diethylketon ist also bei den hier untersuchten Konzentrationen zu vernachlässigen.

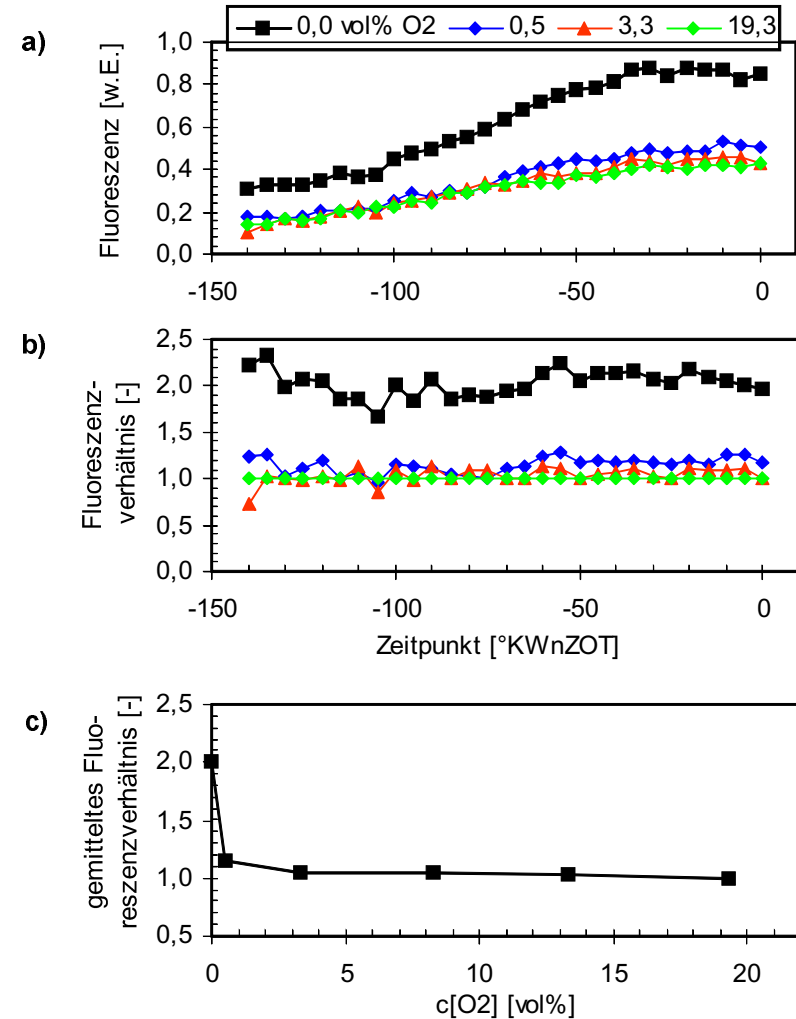


Abbildung 2.6: Einfluß der Sauerstoffkonzentration $[O_2]$ auf die Fluoreszenzemission. a) unnormierte, b) auf die Fluoreszenz von $[O_2]=19,3\%$ normierte Emission, c) zeitlich gemitteltes Verhältnis der Fluoreszenz.

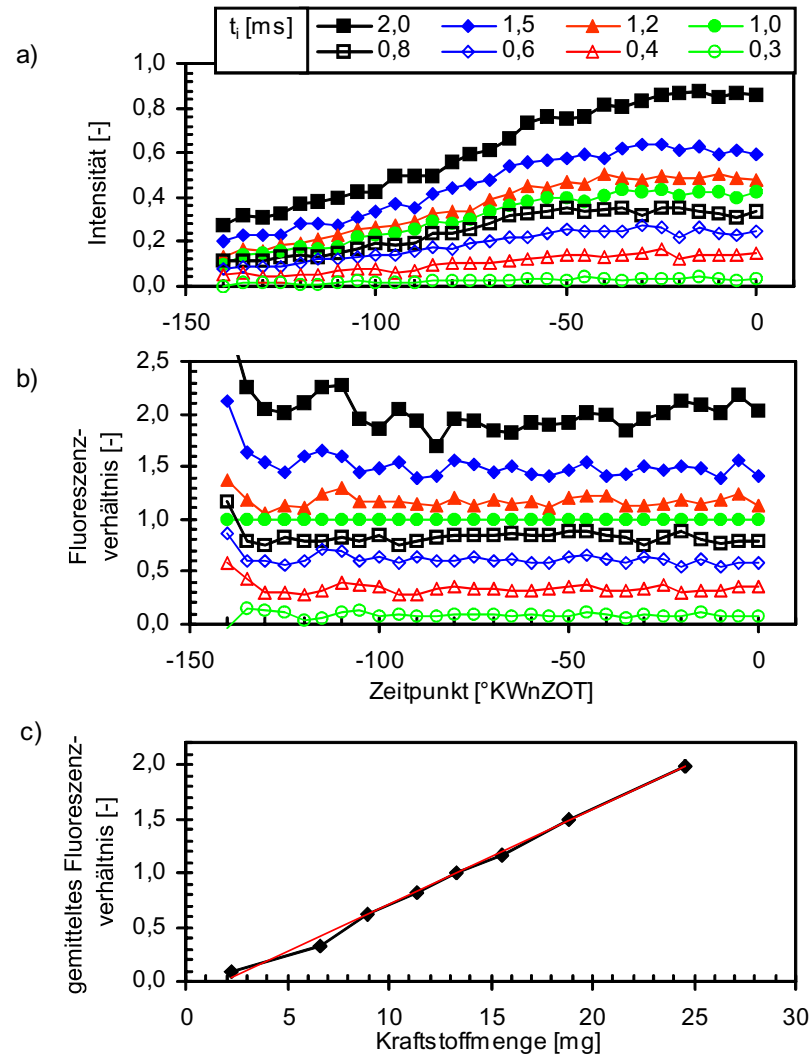


Abbildung 2.7: Einfluß der Tracerkonzentration auf die Fluoreszenzemission. a) unnormierte, b) auf die Fluoreszenz von $t_i=2,0$ ms normierte Emission, c) zeitlich gemittelttes Fluoreszenzverhältnis in Abhängigkeit von der Kraftstoffmenge.

Ergebnis

Diethylketon ist als Tracer für Gemischbildungsuntersuchungen einsetzbar. Die Fluoreszenz ist in dem untersuchten Druck- und Temperaturbereich proportional zur eingebrachten Kraftstoffmenge und -konzentration. Vorteilhaft bei diesem Tracer ist, daß schon geringe Mengen Sauerstoff ausreichen, um die Fluoreszenz auf ein gleichbleibendes Niveau zu quenchen.

2.2.2 Optischer Aufbau

Aufgrund des sehr engen Zuganges über die Giebel Fenster zum Dachbrennraum wurde auf die Einkopplung eines Laserlichtschnittes verzichtet und stattdessen ein aufgeweiteter Laserstrahl verwendet, wie in Abb. 2.8 zu erkennen ist. Mittels dieses Laserstrahls findet eine integrale Anregung des

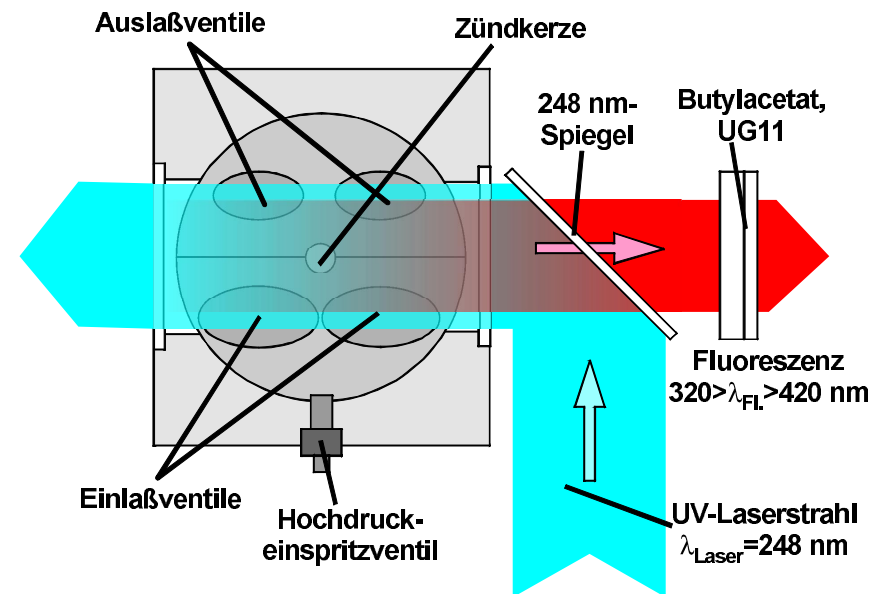


Abbildung 2.8: LIF-Aufbau zur integralen Anregung des Kraftstoffes durch die Dachfenster des Brennraums.

Kraftstoffes statt. Die emittierte Fluoreszenz wird durch einen Interferenzspiegel, der für die Fluoreszenz hochdurchlässig ist, den Laserstrahl aber fast zu 100% reflektiert, von einer bildverstärkten CCD-Kamera aufgenommen. In den Strahlengang sind zusätzliche Filter eingefügt. Der Butylacetatfilter dient zur Unterdrückung des Laserstreulichts bei 248 nm, der UG11-Filter zur Unterdrückung der langwelligen Fluoreszenz. Die aufgenommenen Bil-

der wurden in 12bit-Bilder digitalisiert und auf einem Rechner gespeichert. Obwohl mit diesem optischen Aufbau die Erstellung einer flächigen Lambdaverteilung nicht möglich ist, bietet er durch die integrale Anregung und das große bestrahlte Volumen eine hohe Kraftstoffempfindlichkeit.

Zur Untersuchung der Gemischbildung wurde von 60°KW bis $21^\circ\text{KW}_\text{vOT}$ jeweils in 1° -Schritten ein Bild aufgenommen. Für die statistische Auswertung wurden zusätzlich bei 36°KW , 30°KW und $24^\circ\text{KW}_\text{vOT}$ noch fünf weitere Bilder aufgenommen. Nach Durchführung der ersten Messung zeigte sich, daß die Giebelfenster über die Laufzeit einer Meßreihe nicht vernachlässigbar verschmutzten. So wurde für jedes aufgenommene Bild zusätzlich ein Untergrundbild bei $120^\circ\text{KW}_\text{vOT}$ aufgenommen. Zu diesem Zeitpunkt befindet noch kein Kraftstoff im Brennraum, so daß auf diesem Bild allein die Verschmutzung der Giebelfenster zu sehen ist.

2.2.3 Auswertemethoden

Ein wichtiger Aspekt bei bildgebenden Untersuchungsmethoden wie der laserinduzierten Fluoreszenz und der Flammenemissionspektroskopie ist die Frage nach skalaren Kenngrößen, die aus dem aufgenommenen Bild abgeleitet werden können und dieses in gewisser Weise charakterisieren. Denkt man z.B. an Sprayuntersuchungen in der Druck-/Temperaturkammer, so kann hier aus den Aufnahmen mit Hilfe der Bildverarbeitung automatisch die Eindringtiefe und der Strahlwinkel bestimmt werden. Bevor ein ähnlicher Schritt bei den LIF-Messungen durchgeführt werden kann, muß das Rohbild geeignet korrigiert werden.

In Abb. 2.9 a) ist ein unbearbeitetes Bild dargestellt. Im ersten Nachbearbeitungsschritt wird die Laserintensität anhand einer Mittelwertbildung in dem eingezeichneten Rechteck bestimmt. Dieser rechteckige Bildbereich zeichnet sich dadurch aus, daß hier zu keinem der untersuchten Zeitpunkte gasförmiger Kraftstoff auftritt und daß die Fluoreszenz, die von den Fensterablagerungen herrühren, proportional zur Laserintensität ist. Das Rohbild und das dazugehörige Untergrundbild werden auf die jeweilige Intensität normiert, anschließend wird das Untergrundbild abgezogen, siehe Abb. 2.9 b). Leider lagerte sich während des Motorbetriebes auf der Kolbenoberfläche unverbrannter Kraftstoff und Ruß ab, so daß in den Fluoreszenzbildern der Kolben deutlich sichtbar wird. Im nächsten Schritt werden deshalb das Kolbendreieck und die außerhalb des Giebelfensters fluoreszierenden Bereiche mit Bildmasken abgedeckt. Das vom Bildverstärker herrührende Rauschen wird durch eine Schwellenwertbildung unterdrückt, d.h., daß Pixelintensitäten unterhalb eines gewissen Schwellenwertes zu null gesetzt werden, siehe Abb. 2.9 c). Aus diesem Bild lassen sich zwei interessante Größen ableiten. Das sind die Gesamtfluoreszenz, die bei bekanntem Quenchingverhalten des Tracers

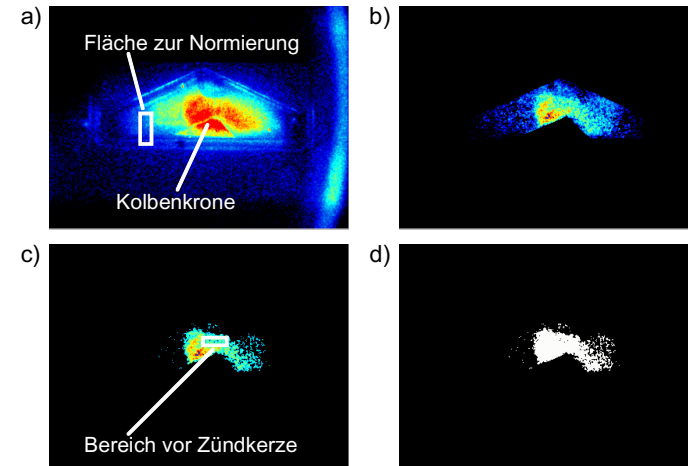


Abbildung 2.9: Auswertung der LIF-Bilder. a) LIF-Rohbild, b) normiertes, untergrundkorrigiertes Bild mit ausgeblendeter Kolbenkontur, c) zusätzliche Unterdrückung des Rauschens, d) binarisiertes Bild.

ein Maß für die Kraftstoffmasse im Dachbrennraum ist, und die Fluoreszenz vor der Zündkerze, die in dem in der Abbildung eingezeichneten Bereich ermittelt wird. In einem weiteren Schritt werden die Pixelintensitäten oberhalb der Schwelle auf eins gesetzt, wie in Abb 2.9 zu sehen ist. Man erhält ein sogenanntes *binarisiertes* Bild. Damit ist es möglich, über die Aufsummation der einzelnen Pixelintensitäten auf die projizierte Fläche der Ladungswolke zu schließen.

In Abb. 2.10 sind diese Größen kurbelwinkelaufgelöst für einen Einspritzvorgang dargestellt. Zur Glättung des Kurvenverlaufs wurden die Kurven über 3°KW gemittelt. Zu erkennen ist, daß die Gesamtfluoreszenz und die projizierte Fläche ein ähnliches Verhalten zeigen. Ab 40°vOT tritt der Kraftstoff in den Dachbrennraum ein, beide Größen erreichen um 33°KW ihre maximalen Werte, danach verdeckt der eindringende Kolben mehr und mehr die Kraftstoffwolke, so daß die Gesamtintensität und die projizierte Fläche wieder abnehmen. Wesentlich interessanter ist eine Fluoreszenzuntersuchung in der Nähe der Zündkerze, da aus dem Kurvenverlauf auf einen frühestmöglichen Zündzeitpunkt geschlossen werden kann. Anders als bei den eben diskutierten Größen gelangt erst gegen 37°vOT Kraftstoff in die Nähe der Zündkerze, das maximale Niveau wird bei 31° erreicht und fällt ab 24°KW wegen des vordringenden Kolbens ab. Außerdem kann man sich eine Vorstellung von der räumlichen Ausdehnung der Gemischwolke entlang des Sehstrahls zum Zündzeitpunkt machen, da die hier untersuchten Betriebspunkte au-

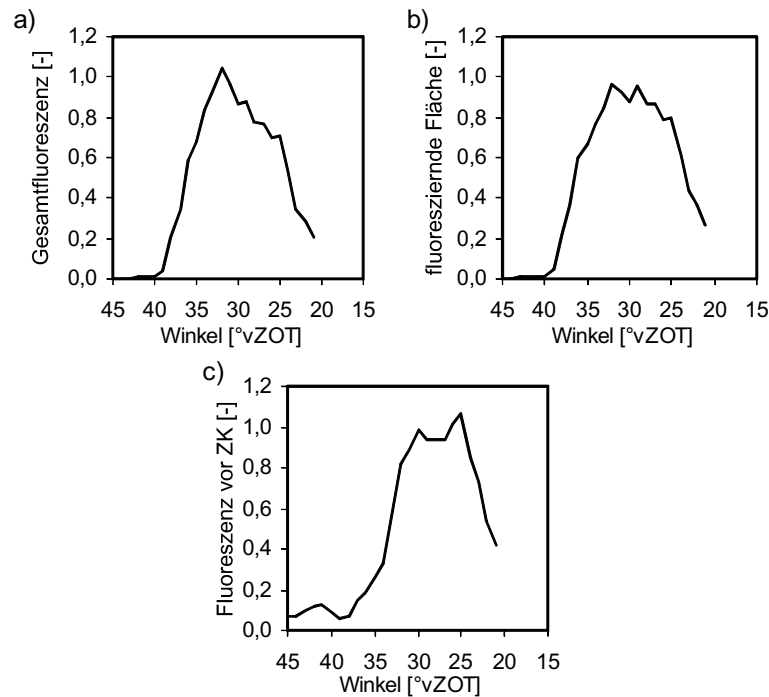


Abbildung 2.10: Aus einer LIF-Bildsequenz bestimmte normierte Größen. a) Gesamtfluoreszenz, b) Fläche der Kraftstoffwolke und c) Kraftstofffluoreszenz vor der Zündkerze.

ßer bei der Variation des Ansteuerbeginns stets zu einem aussetzerfreien Motorlauf geführt haben. Deshalb muß also die Luftzahl λ an der Zündkerze innerhalb der Zündgrenzen von $0,6 < \lambda < 1,6$ gelegen haben [Len90]. Da diese drei Größen bei den folgenden Parametervariationen stets ähnliche Kurvenverläufe gezeigt haben, wird im weiteren nur die Fluoreszenz vor der Zündkerze als skalare Information aus den LIF-Bildern zeitlich aufgetragen.

Ein Problem bei den luft- und wandgeführten Brennverfahren ist die turbulente Luftströmung, die sich im Brennraum ausbildet und die je nach Brennverfahren einen unterschiedlich starken Einfluß auf den Ladungstransport hat. Trotz der gezielten Ausbildung der Strömung über eine spezielle Saugrohrgeometrie und eine eventuell vorhandene Swirl- oder Tumbleklappe kann sie sich von Arbeitsspiel zu Arbeitsspiel stark unterschiedlich ausbilden [HMS00]. Daß diese Schwankungen keineswegs neue Effekte nur bei den BDE-Brennverfahren sind, konnte an einem konventionellen Ottomotor gezeigt werden [Reu00].

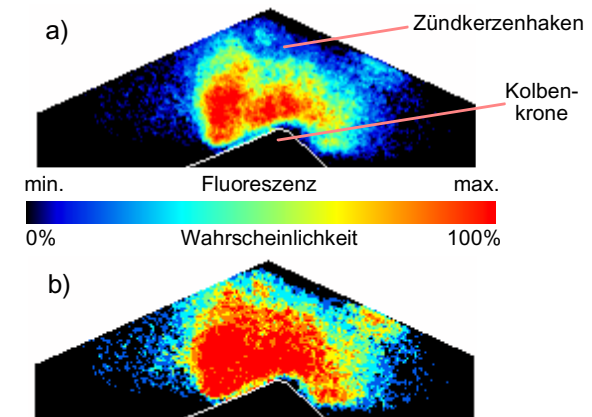


Abbildung 2.11: Bildauswertung. a) LIF-Mittelwertbild und b) Häufigkeitsverteilung des Kraftstoffes, berechnet aus sechs Einzelbildern.

Um diese Transportschwankungen genauer zu untersuchen, ist es unumgänglich, zu dem gewünschten Zeitpunkt eine möglichst große Anzahl Einzelbilder aufzunehmen. Aufgrund der raschen Verschmutzung mußte die Anzahl auf sechs Bilder begrenzt werden. Die Abb. 2.11 zeigt zwei Auswertemethoden. Eine Möglichkeit ist, aus den Bildern den Mittelwert zu bilden, um die Lage der Gemischwolke im Brennraum zu beurteilen. Um einen Überblick über die Schwankungen im Brennraum zu erlangen, ist diese allerdings ungeeignet wie auch die flächige Darstellung des relativen oder auch absoluten Fehlers der einzelnen Pixelintensitäten. Als eine sehr gute Methode hat sich die Berechnung der Häufigkeitsverteilung der lokalen Kraftstoffanwesenheit erwiesen, wie sie in Abb. 2.11 b) zu sehen ist. Soll beispielsweise in diesem Betriebszustand und zu diesem Aufnahmezeitpunkt die Ladung gezündet werden, liegt zwar im Mittelwertbild Kraftstoff in der Nähe der Zündkerze vor, aber die Wahrscheinlichkeit, ihn dort anzutreffen, beträgt nur bei 60%. Eine sichere Entflammung ist zu diesem Zeitpunkt also nicht möglich.

2.2.4 LIEF-Untersuchungen

Der Vorteil der LIEF-Meßtechnik besteht in dem getrennten, gleichzeitigen Nachweis von Flüssigkeit und Kraftstoffdampf. Die verwendeten Tracer sind in Tab. 2.2 aufgeführt. Der erste Ersatzkraftstoff, bestehend aus TEA, Benzol und Isooktan, eignet sich besonders für Untersuchungen an Benzinmotoren, weil die einzelnen Komponenten einen Siedepunkt um 100°C besitzen. Von dem Einsatz von Hexan, das für die Zweiphasentrennung und diese Tracer wesentlich besser geeignet ist als Isooktan [Mel88], wird aufgrund des geringen Siedepunkts von 69°C abgesehen. Für dieselmotorische Untersuchungen wird häufig eine TMPD/Naphtalin-Lösung in Dodekan verwendet. Hier liegen die Siedepunkte in einem Bereich um 220°C. Um ei-

Name	Konzentration	Summenformel	Dichte [kg/l]	Molare Masse [g/mol]	Siedetemperatur [°C]
Benzol	1 m%	C ₆ H ₆ O	0,88	78,12	80,1
Triethylanilin (TEA)	1 m%	(C ₂ H ₅) ₃ N	0,73	101,19	90
Naphtalin	10 m%	C ₁₀ H ₈	1,15	128,16	218
TMPD	1 m%	C ₆ H ₄ -1,4-[N(CH ₃) ₂] ₂	-	164,25	260

Tabelle 2.2: Physikalisch-chemische Eigenschaften der Exciplex-Tracer [SA01].

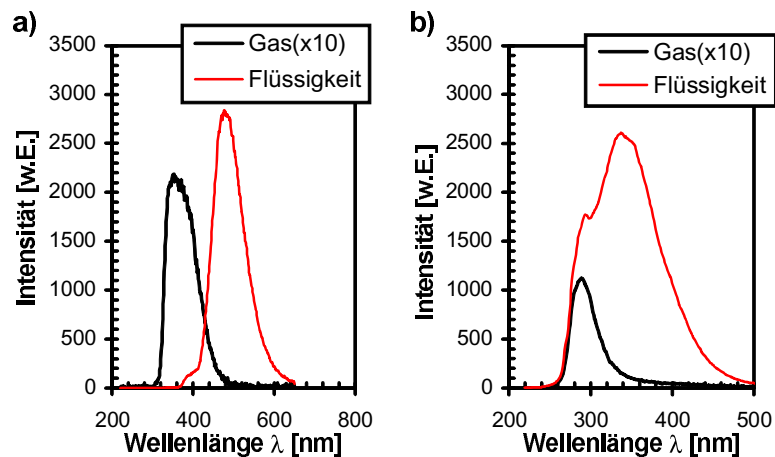


Abbildung 2.12: Fluoreszenzspektren der Exciplex-Tracer bei Anregung mit 248 nm. a) TMPD-Naphtalin und b) TEA-Benzol.

ne möglichst optimale Auswahl der Filter zu treffen, wurden mit Hilfe einer 10 mm dicken Quarzküvette Fluoreszenzspektren der beiden Exciplex-Tracerkombinationen aufgenommen. Um unter atmosphärischem Druck ausreichend Signal von dem Kraftstoffdampf zu bekommen, wurde mit einem Heißgebläse der Kraftstoff kurzfristig zum Kochen gebracht, bevor die Fluoreszenzspektren aufgenommen wurden. Das Erhitzen der Lösungen zeigte keinen Einfluß auf die Intensität und Form des Flüssigkeitsspektrums. Zur Unterdrückung des Laserstreulichts bei 248 nm wurde ein Butylacetatfilter eingesetzt. Die Konzentrationen der Exciplexkomponenten in der Isooktanlösung sind in der Tab. 2.2 aufgeführt. In Abb. 2.12 a) sind das Dampf- und das Flüssigkeitsspektrum von dem TMPD/Naphtalin-Exciplex dargestellt. Die Gasphase fluoresziert in dem Wellenlängenbereich von 300 bis 500 nm, die Flüssigkeit in einem Bereich von 370 bis 650 nm. Für eine vollständige Phasentrennung muß für den Dampf der Filter eine möglichst hohe Transmission von 300 bis 360 nm besitzen. Der Filter für die Flüssig-

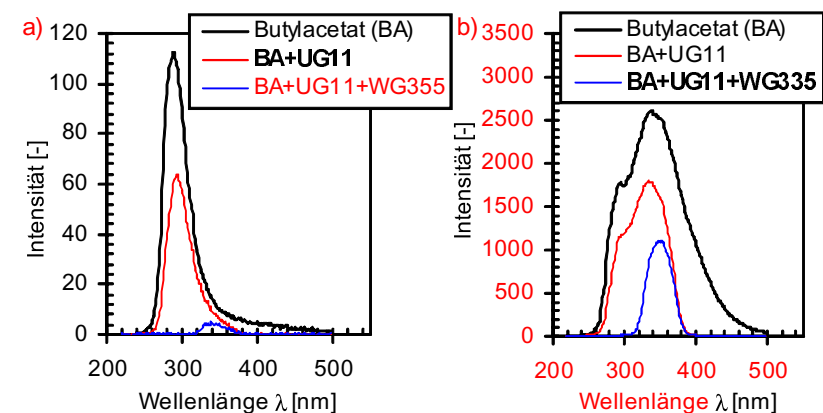


Abbildung 2.13: Einfluß der Filterung auf die Fluoreszenzspektren der TEA/Benzol-Isooktanlösung. a) Gasphase und b) Flüssigphase.

phase muß Wellenlängen unterhalb von 500 nm unterdrücken. Der Nachteil dieser Tracerkombination ist der hohe Siedepunkt der beiden Komponenten. Es ist davon auszugehen, daß aus den Kraftstofftropfen das leichtflüchtigere Isooktan wesentlich schneller verdampft als der Tracer. Die Abb. 2.12 b) zeigt die Emissionsspektren der TEA/Benzol-Lösung. Die Flüssigkeit fluoresziert von 250 bis 500 nm und schließt den Bereich der Dampfphase, der sich von 250 bis 420 nm erstreckt, vollständig ein. Zur Unterdrückung der Gasphasenfluoreszenz muß die Absorption des Flüssigkeitsfilters für Wellenlängen kleiner 350 nm möglichst groß sein. Der ausschließliche Nachweis

des Dampfes und damit die vollständige Phasentrennung ist wegen der überlagerten Flüssigkeitsfluoreszenz nicht möglich. Der wesentliche Vorteil dieses Tracergemisches ist, daß Einzelkomponenten ähnliche Siedepunkte haben.

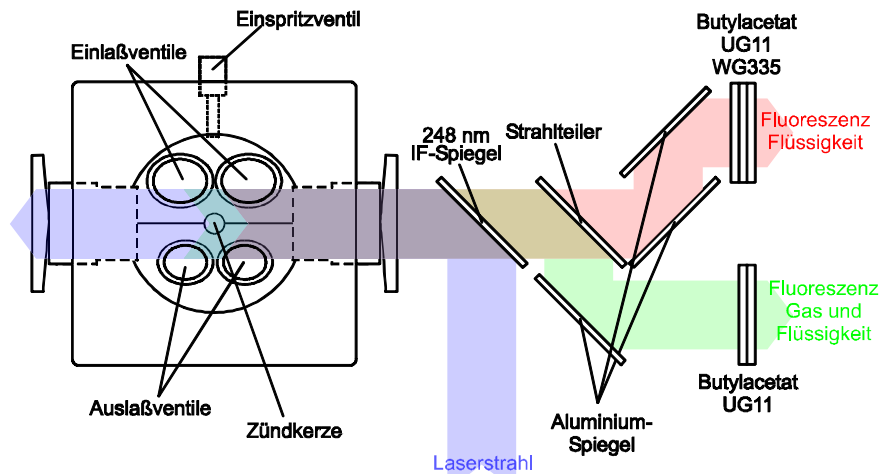


Abbildung 2.14: LIEF-Aufbau am Transparentmotor.

Daß mit einer sorgfältig gewählten Filterkombination trotzdem Aussagen über den Ursprung der Fluoreszenz gewonnen werden können, soll im folgenden gezeigt werden. In Abb. 2.13 a) sind die Spektren von Dampf und in b) die der Flüssigkeit für die Filterkombinationen gezeigt, die im Versuch eingesetzt wurden. Die höchsten Intensitäten erhält man bei der ausschließlichen Verwendung des Butylacetat-Filters, der notwendig ist, um das starke Streulicht des Lasers bei 248 nm zu unterdrücken. Durch Einfügen des UG11-Bandpaßfilters verringert sich für beide Phasen die Intensität. Der entscheidende Effekt bei dem Einbringen des WG355-Filters ist, daß die Fluoreszenz des Dampfes im Gegensatz zu der der Flüssigphase fast vollständig unterdrückt wird. Die integrierte Gesamtemission reduziert sich bei dem Dampf um 93% und bei der Flüssigkeit um 64%. Damit kann aus der Stärke der Abnahme bei Einfügen des WG335-Filters auf den Aggregatzustand des Ersatzkraftstoffes geschlossen werden.

Die Gemischbildung im Motor ist aufgrund der turbulenten Brennraumströmung starken Schwankungen unterworfen. Um aus der Fluoreszenz eindeutige Aussagen ableiten zu können, müssen die Messungen mit den unterschiedlichen Filterkombinationen gleichzeitig durchgeführt werden. Ein möglicher optischer Aufbau ist in Abb. 2.14 dargestellt. Der eingesetzte UV-Laserstrahl mit der Wellenlänge von 248 nm regt den Ersatzkraftstoff im Brennraum zur Fluoreszenz an. Über einen Strahlteiler wird die Fluoreszenz in zwei annähernd gleiche Teile aufgespalten. Im oberen Teil wird über die

Filter Butylacetat, WG335 und UG11 nur die Emission der Flüssigphase durchgelassen, im unteren Teil aufgrund des fehlenden WG335-Filters die Fluoreszenz des Dampfes und der Flüssigkeit. Zur gleichzeitigen Detektion wurden die Emissionen mit einer bildverstärkten CCD-Kamera aufgenommen.

2.2.5 Nachweisgrenze für Tropfen

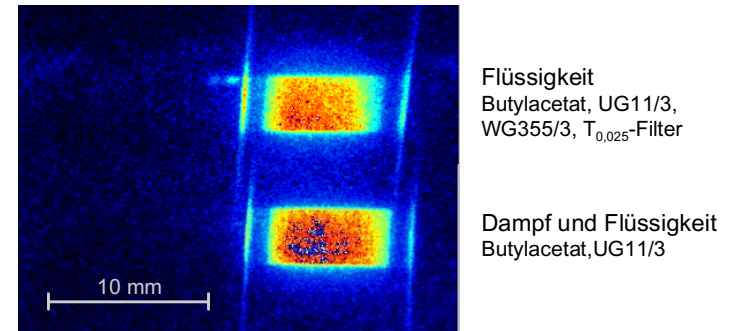


Abbildung 2.15: LIEF-Bild der Quarzküvette, Dicke 10 μm , Breite 10 mm. Lösung von 1m% Benzol und 1m% TEA in Isooktan.

Um die Nachweisgrenze dieser Meßtechnik bezüglich flüssigem Kraftstoff zu ermitteln, wurde in den Strahlengang vor das Einkoppelfenster eine dünnwandige Quarzküvette gestellt. Diese wurde mit dem Tracer gefüllt. Die Dicke der Küvette betrug 10 μm . In Abb. 2.15 ist eine Aufnahme mit der befüllten Küvette gezeigt. Im oberen und unteren Bildbereich wurden mit den entsprechenden Filtern die unerwünschten Fluoreszenzanteile ausgeblendet. Durch einen zusätzlichen Graufilter mit der Transmission von 0,025 wurde die Fluoreszenz im unteren Bildbereich der Fluoreszenz im oberen Bildbereich angepaßt. Dies hat den Vorteil, daß bei der Betrachtung der Gemischbildung leicht entschieden werden kann, ob neben der Flüssigkeit auch Kraftstoffdampf merklich zur Fluoreszenz beiträgt. Es ist genau dann möglich, wenn die Emission im oberen Bildbereich kleiner wird als die im unteren. Zur Ermittlung der minimalen noch nachweisbaren Flüssigkeitsmenge wurde mit einer 5 mm-Gitterstruktur die einem Bildpixel entsprechende Fläche zu 6800 μm^2 bestimmt. Das Signal zu Rausch Verhältnis lag bei 17:1. Damit ergibt sich als kleinste nachweisbare Menge $3 \cdot 10^{-6}$ mg pro Pixel. Das entspricht einem Tropfendurchmesser von nur 20 μm . Wie in Kap. 6.2 gezeigt wird, verdampft der Ersatzkraftstoff außer bei dem sehr niedrigen Einspritzdruck $p_{\text{rail}}=3,5$ MPa bis zur Zündeinleitung vollständig.

2.3 Flammenemissionsspektroskopie

Neben der direkten Beobachtung der Gemischbildung mit Hilfe der laserinduzierten Fluoreszenz kann die spektrale Analyse des Flammenleuchtens zur Beurteilung der Qualität der Ladungsschichtung und der Entflammung herangezogen werden. Einerseits treten in den Emissionsspektren diskrete Linien auf, die durch die bei der Verbrennung entstandenen Moleküle hervorgerufen werden. Andererseits weisen breite spektrale Verteilungen auf entstehenden Ruß hin. Diese Meßtechnik wird im folgenden als **Flammenemissionsspektroskopie** (FES) bezeichnet.

2.3.1 Optischer Aufbau

Für einführende Untersuchungen der Verbrennung wurde ein Spektrometer zur Aufnahme der Emissionsspektren verwendet. Um flächenhafte Informationen aus dem Brennraum zu erhalten, wurde anschließend ein der LIEF-Technik ähnlicher Aufbau gewählt, der eine Unterscheidung und eine gleichzeitige Aufnahme von vorgemischter und diffusionsgesteuerter Verbrennung ermöglichte.

Spektrometer

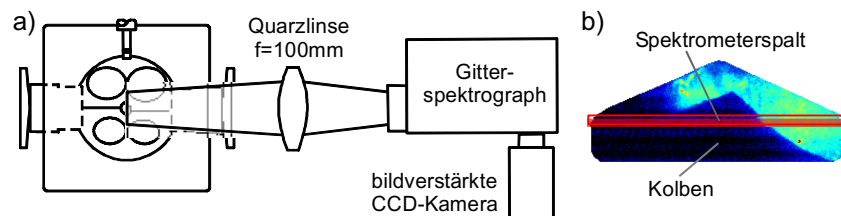


Abbildung 2.16: Flammenemissionsspektroskopie. a) Optischer Aufbau, b) auf den Spektrometerspalt abgebildeter Bereich.

In Abb. 2.16 a) ist schematisch der Aufbau für die spektroskopischen Messungen dargestellt. Der Einblick in den Brennraum erfolgt über das Giebelfenster. Das Eigenleuchten der Flamme wird mit Hilfe des Gitterspektrographen spektral zerlegt und mit einer bildverstärkten CCD-Kamera aufgenommen. Die Quarzbikonvexlinse mit einer Brennweite von 100 mm bildet den in Abb. 2.16 b) eingezeichneten roten Bereich auf den Eingangs-

spalt des Spektrometers scharf ab. Diese Anordnung ermöglicht die räumlich eindimensionale spektroskopische Untersuchung des Brennraums. Der Zündfunke befindet sich außerhalb des Aufnahmebereichs. Da die bereits bei den LIF-Untersuchungen verwendete Kamera nur drei Bilder pro Sekunde aufnehmen kann, wird nur in jedem dritten Arbeitsspiel ein Bild aufgezeichnet. Aufgrund der stark turbulenten Verbrennung wurden zu jedem Aufnahmezeitpunkt 10 Bilder aufgenommen und gemittelt. Der Aufnahmebereich lag zwischen 24°vOT und 102°nOT , der Winkelabstand betrug 6°KW .

2.3.2 Charakterisierung der Verbrennung

Im Gegensatz zu konventionellen weisen direkteinspritzende Benzinmotoren als zusätzliche Betriebsart den Schichtbetrieb auf. Dem Dieselmotor vergleichbar wird der Kraftstoff in den Kompressionshub eingespritzt. Aus Untersuchungen an diesen Verbrennungsmotoren geht hervor, daß durch diese Art der Gemischbildung fette, unterstöchiometrische Kraftstoffbereiche entstehen, die zu einer starken Rußbildung führen [Mös95], [Ant99].

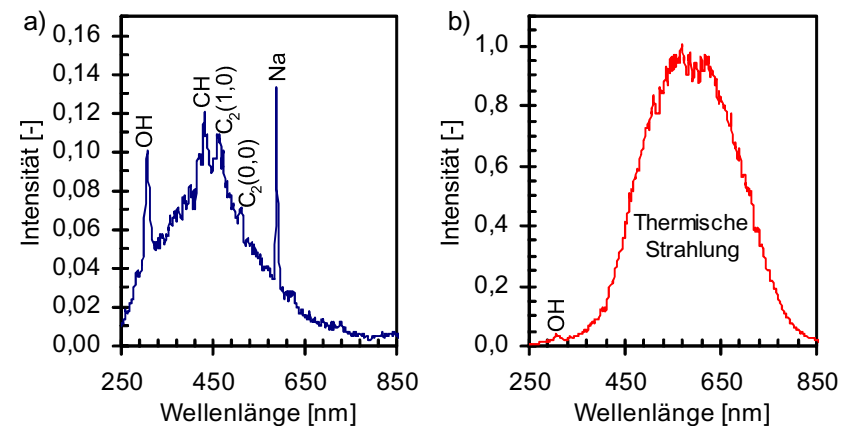


Abbildung 2.17: Flammenemissionsspektren für a) den Homogen- und b) Schichtbetrieb. Aufnahmezeitpunkt 20°KWnOT , Normalbenzin.

In Abb. 2.17 sind zwei typische Emissionsspektren eines BDE-Motors gezeigt. Im Homogenbetrieb des Motors, wie er z.B. bei Vollast auftritt, findet eine sogenannte vorgemischte Verbrennung statt, die sich durch eine blau leuchtende Flamme bemerkbar macht. Zeichnet man mit Hilfe eines Gitterspektrographen das Flammenspektrum auf, so setzt es sich aus den Emissionsspektren der in der Flammenfront auftretenden Radikale zusammen. Typische Vertreter sind OH-, CH- und C_2 -Radikale, wie es in dem linken Teil

von Abb. 2.17 zu sehen ist. Neben diesen während der Verbrennung gebildeten Molekülen läßt sich auch Natrium nachweisen, welches stets als Verunreinigung in Benzinkraftstoffen enthalten ist. Der breite Untergrund von 250 bis 650 nm rührt von der C_2 -Kontinuumsstrahlung her. Die Strahlungsverteilung des Spektrums ist nicht klassisch, d.h. es handelt sich nicht um eine Schwarzkörperstrahlung. Die charakteristischen Emissionswellenlängen finden sich in Tab. 2.3.

Molekül/Atom	Wellenlänge [nm]
OH	281, 306,4 342
CH	314,4 387,1 388,6 431
CN	359 388,3
O ₂	384
C ₂	473 517
Na	589 (D-Linie)

Tabelle 2.3: In der Verbrennung auftretende Emissionslinien.

Im Schichtbetrieb des Motors stellt sich ein anderes Bild des Spektrums dar. Aufgrund der sehr späten Einspritzung in den Kompressionshub hat der Kraftstoff nicht mehr genügend Zeit, sich mit der umgebenden Luft ausreichend zu durchmischen oder vollständig zu verdampfen. In den hieraus hervorgehenden zu fetten unterstöchiometrischen Gemischbereichen wird der Kraftstoff nicht vollständig verbrannt. Rußbildung ist die Folge. Erst die Diffusion von Sauerstoff aus der Brennraumumgebung ermöglicht eine weitere Oxidation von Ruß und unverbranntem Kraftstoff. In dieser Betriebsart herrscht die diffusionsgesteuerte Verbrennung vor. Ein charakteristisches Emissionsspektrum ist in der Abb. 2.17 b) dargestellt. Es ist durch eine thermische Strahlungsverteilung gekennzeichnet, die durch die Rußteilchen in der Flamme hervorgerufen wird. Die Emissionslinien einzelner Radikale werden bis auf das OH-Radikal vollständig verdeckt. Der Intensitätsabfall im langwelligen Bereich wird durch die abnehmende Empfindlichkeit des Bildverstärkers verursacht. Die Flamme erscheint dem Betrachter gelbleuchtend.

Ursprung der OH-Emission

Die langkettigen Moleküle des Kraftstoffs werden in mehreren Schritten oxidiert. Dabei führen die beiden folgenden Reaktionen zur Bildung von angeregten Molekülen, deren Chemolumineszenz sich durch die aufgeführten Emissionslinien bemerkbar macht.



Numerische und experimentelle Untersuchungen an stationären Flammen zeigen, daß die Moleküle OH, CH und C_2 im wesentlichen im Bereich der Flammenfront auftreten und Zwischenprodukte bei der Oxidation des Kraftstoffs sind. Dementsprechend sollte das Auftreten dieser Moleküle sehr eng mit der momentan verbrennenden Kraftstoffmenge verknüpft sein. Die Analyse des Druckverlaufs von wand- und luftgeführten Brennverfahren zeigt, daß der Hauptteil des Kraftstoffs bereits vor ZOT umgesetzt ist, die Chemolumineszenz dieser Moleküle müßte also einen ähnlichen Verlauf zeigen.

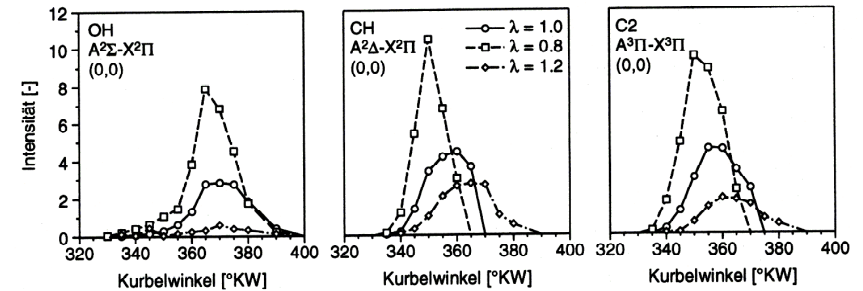


Abbildung 2.18: Zeitlicher Verlauf der Strahlungsintensitäten für OH, CH, C_2 bei homogenem Motorbetrieb und Variation von λ . $n = 1500 \text{ min}^{-1}$, $p_{mi} = 2 \text{ bar}$ [Rei99].

In Abb. 2.18 sind die Emissionsverläufe dieser Moleküle für unterschiedliche Luftzahlen bei einer homogenen Verbrennung dargestellt. Die Emissionen nehmen mit fallender Luftzahl für alle Moleküle zu. Im zeitlichen Verlauf allerdings zeigen sich große Unterschiede. Für die Moleküle C_2 und CH verschiebt sich das Emissionsende mit steigender Luftzahl zu späteren Zeiten, die Verläufe enden für C_2 bei 370, 375 und 390°KWnLwOT, für CH bei 365, 370 und 390°KWnLwOT. Für das OH-Molekül hingegen endet die Emission unabhängig von der Luftzahl bei ca. 400°KWnLwOT. Nach der Gleichung 2.2 sollten die Emissionen von CH und OH eng miteinander verknüpft sein. Es muß also neben der Chemolumineszenz noch eine weitere Quelle für die Emission bei 306 nm geben.

Eine Erklärung für das langanhaltende Auftreten von OH kann über hochaufgelöste OH-Emissionsspektren gefunden werden, die in Abb. 2.19 gezeigt sind [Mös95]. Bei der stöchiometrischen Verbrennung im Benzinmotor lassen sich zwei Zeitbereiche unterscheiden [RW32]:

Im Zeitbereich 1 findet der eigentliche Kraftstoffumsatz statt. Das während der Verbrennung gebildete OH befindet sich nicht im thermischen Gleichgewicht mit seiner Umgebung. Die Intensitäten der Schwingungsbanden (1,0), (2,1) und (3,2) nehmen zu längeren Wellenlängen hin leicht zu.

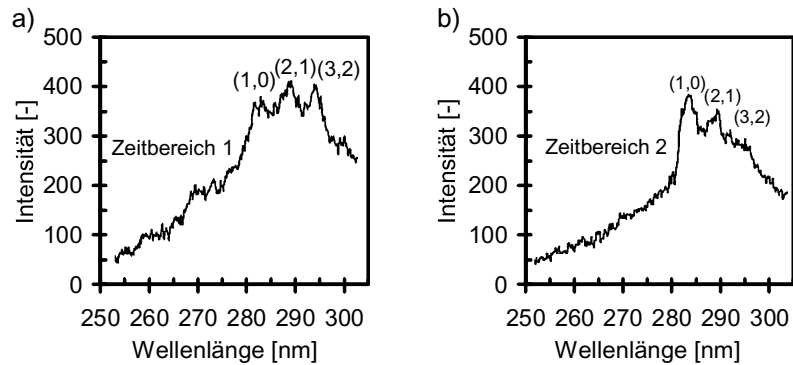


Abbildung 2.19: OH-Emissionsspektren der homogenen stöchiometrischen Verbrennung während der Zeitphase 1 (Flammenfront) bei OT a) und während der Zeitphase 2 (Nachbrennen) bei ca. 20°KWnOT b). $n=1500 \text{ min}^{-1}$, $p_{me}=1,5 \text{ bar}$ [Mös95].

Im Zeitbereich 2 nehmen die Intensitäten in Richtung IR ab. Dieses ist unter der Annahme gleicher Übergangswahrscheinlichkeiten typisch für eine thermische Besetzung der Molekülzustände. Das bedeutet, daß es neben der Verbrennung einen weiteren Prozeß gibt, der zu einer Bildung von OH führt, nämlich die thermische Zersetzung des gebildeten Wassers in Wasserstoff und Hydroxyl:



mit der temperaturabhängigen Gleichgewichtskonstanten $k_{\text{H}_2\text{O}}$. Im Gleichgewicht gilt für $k_{\text{H}_2\text{O}}$ und den Volumenkonzentrationen $[\text{H}_2\text{O}]$, $[\text{H}_2]$ und $[\text{OH}]$ der Zusammenhang:

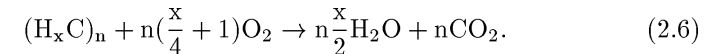
$$k_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{[\text{H}_2\text{O}]^2}{[\text{OH}]^2 \cdot [\text{H}_2]} \quad (2.5)$$

Bei Klopfuntersuchungen verschiedener Kraftstoffe wurde thermisch gebildetes OH bereits 1932 nachgewiesen und als Erklärung der Zerfall von Wasser vorgeschlagen [RW32]. Grundlagenuntersuchungen zur Bestimmung von $k_{\text{H}_2\text{O}}$ finden sich in [BR28][DO44]. Für die Berechnung in Tab. 2.4 wurden die Werte aus [Bar93] herangezogen.

Temperatur [K]	400	1000	1500	2000	2500
$\log(k_{\text{H}_2\text{O}})$	67,02	22,58	12,59	7,57	4,56

Tabelle 2.4: Gleichgewichtskonstanten für den thermischen Zerfall von Wasser.

Um eine ungefähre Vorstellung über die OH-Konzentration nach der Verbrennung zu erhalten, wird zunächst die Abgaszusammensetzung einer stöchiometrischen Verbrennung bestimmt. Ein Problem hierbei ist, daß es sich bei Benzin um ein vielkomponentiges Gemisch aus organischen Verbindungen handelt, so daß entsprechend viele Reaktionen bei der Oxidation stattfinden. Um einfache Reaktionsgleichungen zu erhalten, finden sich in der Literatur Ersatzsummenformeln der Art $(\text{H}_x\text{C})_n$ für Benzin- und Dieseldieselkraftstoff [Pis00]. Für Benzin liegt das Verhältnis von Wasserstoff zu Kohlenstoff bei $x = n_{\text{H}}/n_{\text{C}} = 2,12$. Bei einer mittleren Molmasse von $M_{\text{Benzin}}=98 \text{ g/mol}$ ergibt sich eine mittlere Kettenlänge von $n=6,94$. Die Oxidation des Kraftstoffs erfolgt dann über



Das Abgas setzt sich nach dieser Reaktion aus 72,9 % N_2 , 13,1 % CO_2 und 13,9 % H_2O zusammen. Bei einer Brennraumtemperatur von 2000 K liegt die Gleichgewichtskonzentration von OH bei 0,1 %, für 2500 K bei 1,0 %. Im Zeitbereich II wird also aufgrund der hohen Brennraumtemperaturen aus dem thermischen Zerfall des Wassers das Hydroxyl gebildet. Wieviel OH in dem zur Verfügung stehenden Zeitintervall wirklich gebildet wird, kann nur mit optischen Methoden bestimmt werden. Eine Möglichkeit besteht in der selektiven Anregung von OH bei 248 nm mit einem UV-Laser, wie es an einer atmosphärischen Brennerflamme in [Chr96] gezeigt wurde.

Trennung von Ruß- und OH-Leuchten

Im nächsten Schritt wurde dazu ein dem LIEF ähnlicher optischer Aufbau gewählt, der in Abb. 2.20 zu sehen ist. Ein dielektrischer Spiegel für 308 nm mit einer Bandbreite von 10 nm teilt das einfallende Licht. Der reflektierte Teil passiert einen schmalbandigen Interferenzfilter für 306 nm und läßt ausschließlich das von dem OH-Radikal ausgesandte Licht durch. Der transmittierte Teil wird durch den Tiefpaßfilter WG595/3 und den Neutralglasfilter NG2 abgeschwächt und läßt nur den langwelligen Anteil der thermischen Strahlung passieren. Beide Bilder werden gleichzeitig von einer bildverstärkten CCD-Kamera aufgenommen. Zur jedem Zeitpunkt wurden zehn Bilder aufgenommen und ihre Mittelwerte berechnet.

2.3.3 Auswertemethoden

Die Abb. 2.21 zeigt das Ergebnis der spektroskopischen Untersuchung des Schichtladebetriebes. Im linken Teil der Abbildung ist das räumlich gemittelte kurbelwinkelaufgelöste Spektrum als Intensitätsflächendiagramm dargestellt. Zum Zündzeitpunkt sind die durch das Zündplasma erzeugten Emis-

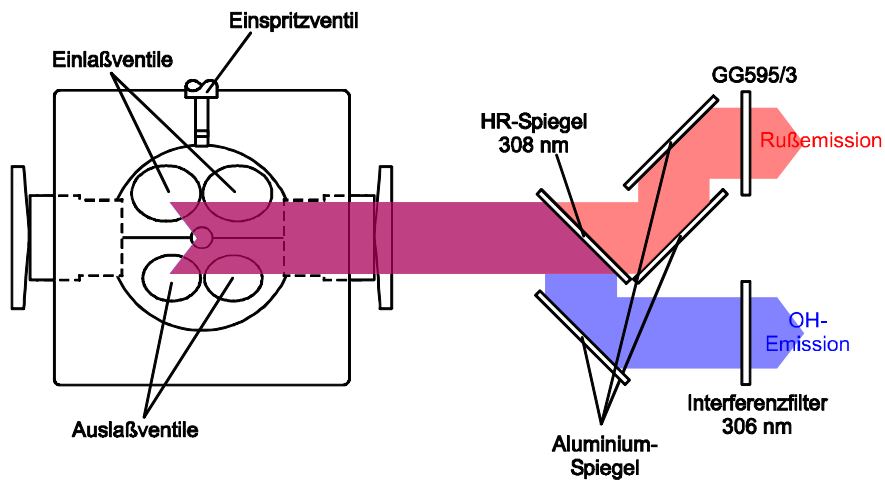


Abbildung 2.20: Optischer Aufbau zum getrennten Nachweis von OH- und Rußemission

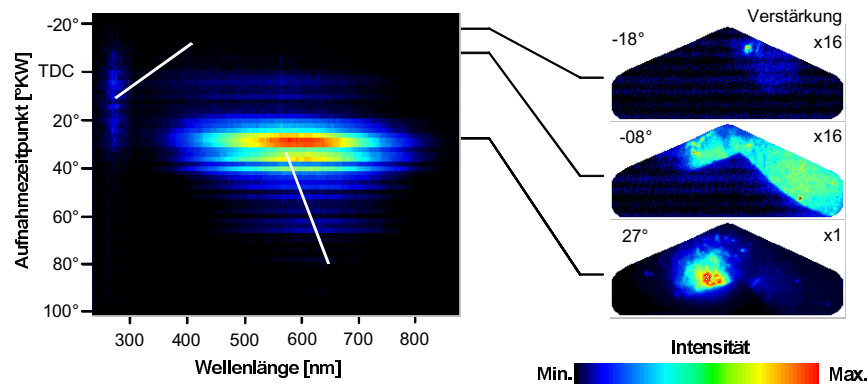


Abbildung 2.21: Zeitlich aufgelöstes Spektrum der Verbrennung im Schichtladebetrieb und entsprechende Flammenaufnahmen.

sionen von Stickstoff, Sauerstoff und Kraftstoff zu sehen. Im weiteren Verlauf setzt eine vorgemischte Verbrennung ein, die an dem intensiven Auftreten von OH erkennbar ist. Diese geht anschließend in eine diffusionsgesteuerte Verbrennung über. Das Spektrum wird durch thermische Rußemission dominiert. Die farbkodierte Darstellung der Spektren in Abb. 2.21 eignet sich ebenfalls zum Nachweis von klopfenden Verbrennungen. Hier wird der Kraftstoff in einem wesentlich kürzeren Zeitbereich umgesetzt. Eine außerordentlich hohe OH-Emission ist die Folge [SSA92].

Im rechten Teil der Abb. 2.21 sind zu ausgewählten Zeitpunkten un-

gefilterte Einzelbilder dargestellt. Bei 18°KWvOT ist der noch im Brennraum stehende Zündfunke deutlich zu erkennen. Bei 8°KWvOT hat sich die Flamme weit über den Kolbenmuldenbereich ausgedehnt, die Verbrennung erfolgt noch vorgemischt. Bei 27°KWnOT schließlich tritt eine stark leuchtende kompakte Rußwolke aus der Kolbenmulde hervor, die durch ihre starke thermische Strahlung charakterisiert ist. Ursache hierfür ist der in Kapitel 5.3.5 nachgewiesene Wandfilm auf dem Kolben. Das heiße Brennraumgas treibt den abgedampften Kraftstoff aus der Kolbenmulde heraus, der dabei in der immer noch sauerstoffhaltigen Umgebung stark diffusionsgesteuert verbrennt.

gen für eine walzenförmige Luftbewegung im Brennraum, die der konventionellen Brennraumströmung gerade entgegengesetzt ist. Diese in der Abbildung rechtsdrehende Strömung wird als Reverse-Tumble-Strömung bezeichnet und unterstützt den Strahltransport in Richtung Zündkerze. Der

Kapitel 3

Brennverfahren für die Benzindirekteinspritzung

Die möglichen Einbaulagen von Zündkerze und Einspritzventil sind bei den heutzutage anzutreffenden Benzinmotoren stark eingeschränkt. Soll der direkteinspritzende Motor zu einem konventionellen Motor in Konkurrenz treten, muß die Leistung beider Motoren vergleichbar sein. Das bedingt für eine hohe Nennleistung den Einsatz von zwei Einlaß- und zwei Auslaßventilen. Für eine gute Luftfüllung des Brennraums darf die Geometrie des Saugrohrs nicht durch die Einbaulage des Injektors wesentlich verändert werden. Die Zündkerze selbst muß sich in die Mitte des Brennraums befinden, um einen schnellen Durchbrand des Luft-/Kraftstoffgemisches zu gewährleisten. Der Injektor sollte aufgrund der hohen Wandtemperatur nicht in der Nähe der Auslaßventile eingebaut werden. Unter Berücksichtigung dieser Aspekte lassen sich die Brennverfahren für die Direkteinspritzung in drei Kategorien einteilen, die im folgenden vorgestellt werden. Eine vollständigere Beschreibung der möglichen Brennverfahren findet sich in [WG97], [PK97] und [FPW96].

3.1 Wandgeführtes Brennverfahren

Bei den sogenannten wandgeführten Brennverfahren wird die Kolbenwand zum Transport des Luft-/Kraftstoffgemisches zur Zündkerze verwendet. Unterstützt wird dieser Prozeß durch eine gerichtete Brennraumströmung. Das in dieser Arbeit untersuchte Brennverfahren ist schematisch in Abb. 3.1 skizziert. Der Injektor befindet sich unterhalb der Einlaßkanäle und spritzt unter einem Winkel von ca. 40° in Richtung Kolbenmulde. Der auftreffende Strahl wird zur Zündkerze umgelenkt. Die vertikal ausgeführten Einlaßkanäle sor-

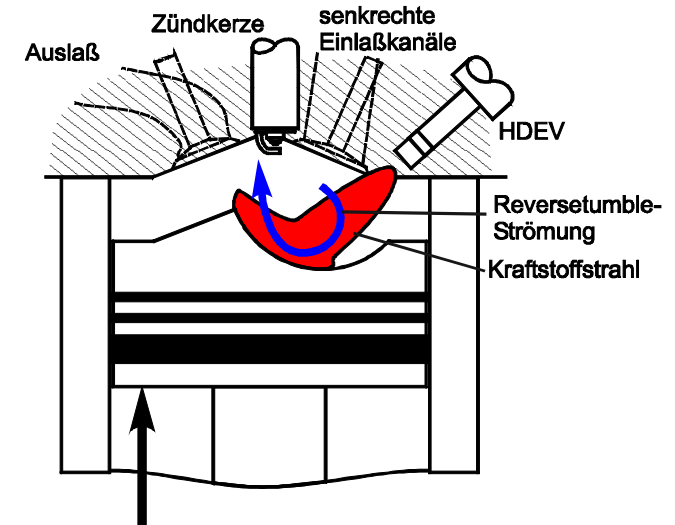


Abbildung 3.1: Wandgeführtes Brennverfahren mit einer Reverse-Tumble-Luftströmung.

Vorteil dieses Brennverfahrens ist die starre Ladungsführung. Unabhängig von Druck und Temperatur leitet die Pleuelstange den Kraftstoff, der Gemischbildungsweg wird dadurch verlängert. Hierdurch wird die Zeit für die Verdampfung und Aufbereitung des Kraftstoffes verbessert. Außerdem brauchen im Saugrohr keine Schaltklappen eingesetzt zu werden, um die Innenströmung des Motors betriebsartabhängig beeinflussen zu können. Nachteilig ist, daß die Muldengröße und -lage nicht für alle Drehzahlen optimal gewählt werden kann. Außerdem kann eine Pleuelstangenbenetzung bei der Einspritzung in den Kompressionstakt nicht vermieden werden, so daß ein Pleulfilm entsteht, der unter ungünstigen Umständen bis zum Ausschubtakt bestehen bleibt und zur Emission unverbrannter Kohlenwasserstoffe beiträgt.

3.2 Luftgeführtes Brennverfahren

Charakteristisch für dieses Brennverfahren ist die ausgeprägte Luftströmung, durch die das Spray in Richtung Zündkerze umgelenkt wird. Die ungewünschte Pleuelstangenbenetzung kann dadurch vermieden werden. Das Brennverfahren,

wie es in dieser Arbeit untersucht wurde, ist in Abb. 3.2 skizziert. Die Ausbildung der Vorwärts-Tumbleströmung wird durch ein Leitblech im Saugrohr und durch eine verstellbare Ladungsbewegungsklappe gesteuert, die oft auch als Tumble-Klappe bezeichnet wird. Im geschichteten Betrieb ver-

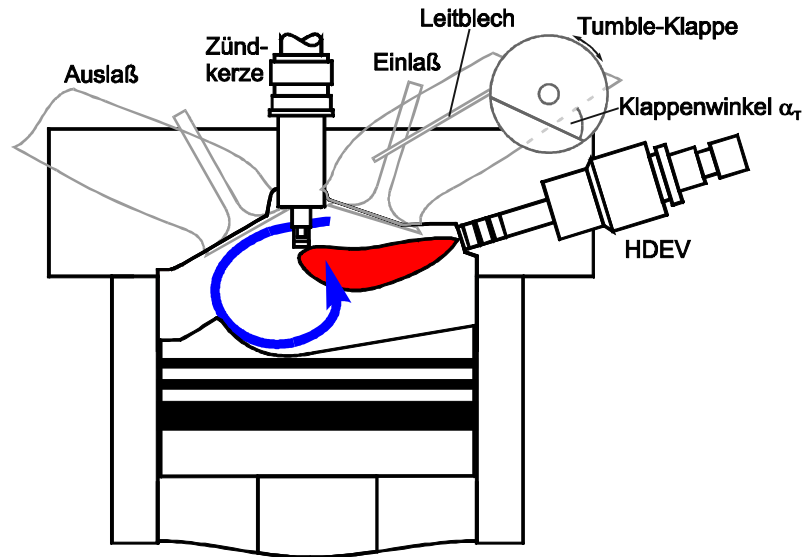


Abbildung 3.2: Luftgeführtes Brennverfahren mit einer Tumble-Strömung variabler Intensität.

schließt die Ladungsbewegungsklappe den unteren Teil des Saugrohrs, so daß die Luft, oberhalb des Leitblechs geführt, in den Motor eintritt. Es bildet sich eine starke Tumble-Strömung aus, die in dem Kompressionstakt den von dem Einspritzventil abgegebenen Kraftstoffstrahl in Richtung Zündkerze umlenkt. Durch die Wechselwirkung zwischen Luft und Strahl wird außerdem die Verdampfung des Kraftstoffs erheblich verbessert. Als Nachteil bei diesem Brennverfahren ist das drehzahlabhängige Umlenkvermögen der Luftströmung anzusehen. So bildet sich bei der Leerlaufdrehzahl die Tumble-Strömung nur sehr gering aus und der Einspritzdruck muß erheblich reduziert werden, um die Kraftstoffwolke zur Zündkerze zu führen. Optische Untersuchungen zur Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit an konventionellen wie auch an direkt einspritzenden Motoren haben gezeigt [HMS00][Reu00], daß sich die Brennraumströmung trotz einer sehr sorgfältigen Auslegung der Saugrohrgeometrie von Arbeitsspiel zu Arbeitsspiel sehr unterschiedlich ausbildet und daß sie im ungünstigsten Fall sogar zum Erliegen kommen kann. Bei dem luftgeführten Brennverfahren hätte dieses Verhalten unmittelbar einen Aussetzer zur Folge. Statistische Schwankungen in Lage und Stärke

der Brennraumströmung können also zu einem unruhigen Motorlauf führen.

3.3 Strahlgeführtes Brennverfahren

Bei der Entwicklung des luft- und wandgeführten Brennvorgangs wird das Ziel verfolgt, den Zeitraum zwischen Einspritzung und Zündung so weit zu vergrößern, daß der Kraftstoff ausreichend verdampfen kann. Erreicht wird das durch den indirekten Transport des Gemisches zur Zündkerze. Im Gegensatz dazu steht die enge räumliche Anordnung von Zündkerze und Einspritzventil bei dem strahlgeführten Brennverfahren, wie es in Abb. 3.3 zu erkennen ist. Die Gemischaufbereitung erfolgt auf einem wesentlich kürze-

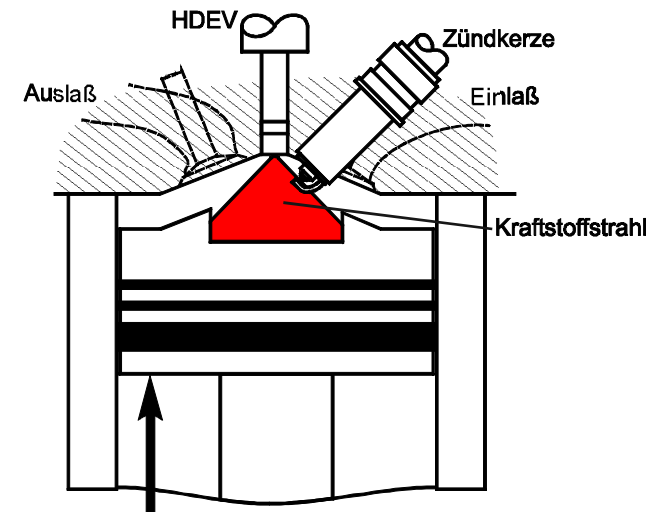


Abbildung 3.3: Strahlgeführtes Brennverfahren.

ren Weg. Der Abstand zwischen Ansteuerende des Ventils und der Zündung beträgt nur wenige Grad Kurbelwinkel. Als Folge wird die Gemischaufbereitung nur wenig von der Brennraumströmung beeinflusst, allerdings kann nicht ausgeschlossen werden, daß bei Zündeinleitung noch flüssiger Kraftstoff im Brennraum vorhanden ist. Nachteilig bei diesem Brennverfahren ist die Nähe der Zündkerze zur Ventilmündung. Bei dem Einspritzvorgang wird die Kerze mit Kraftstoff benetzt. Bei längerem Motorbetrieb kann das zu Rußablagerungen auf den Elektroden und damit zu einem Kurzschluß führen oder aufgrund des thermischen Schocks zu einem erhöhten Verschleiß. Diese Probleme treten bei Mehrlochventilen mit einem geeigneten Strahlbild nicht mehr auf. Durch das Platzieren der Kerze zwischen zwei Einzelstrahlen kann eine direkte Benetzung der Kerzenelektroden verhindert werden [OAG⁺01].

3.4 Vergleich der Brennverfahren

Die Brennverfahren für die Benzindirekteinspritzung zeichnen sich durch eine Gemeinsamkeit gegenüber den Ottomotoren mit Saugrohreinspritzung aus. Die Schwerpunktlage der Verbrennung liegt deutlich vor dem oberen Totpunkt und ist damit thermodynamisch sehr ungünstig. Konventionelle Benzinmotoren haben den Schwerpunkt bei etwa 20°nOT . Die frühe Schwerpunktlage führt zu hohen Drücken und hohen lokalen Gastemperaturen im Brennraum, so daß die Stickoxidemissionen deutlich zunehmen. Die Vor- und Nachteile der einzelnen Brennverfahren sind in Tab. 3.1 zusammengefaßt.

Brennverfahren	wandgeführt	luftgeführt	strahlgeführt
Ladungs- führung	Kolben	Luftstrom	keine
Abstand Ventil-Kerze	groß	groß	klein
Vorteile	Kolben legt Gemischbildungs- weg fest, Saugrohrklappen nicht notwendig	keine Wand- benetzung Durchmischung mit Luft verbessert Verdampfung	Einfluß der Brennraum- strömung gering
Nachteile	Kolben- benetzung, Muldenform und -lage abhängig von Drehzahl	Anpassung Strahlimpuls an Luftströmung, erhöhte Empfindlichkeit bzgl. Strömungs- schwankungen	kurze Gemisch- aufbereitungszeit, hohe Lage- empfindlichkeit von Kerze und Ventil

Tabelle 3.1: Vergleich der Brennverfahren für die Benzindirekteinspritzung.

Kapitel 4

Benzinhochdrucksprays in stationärer Umgebung

In Benzinmotoren mit Direkteinspritzung ist der Kraftstoffstrahl einer stark instationären Umgebung ausgesetzt. Während der Einspritzung und des Kraftstofftransportes verändern sich Druck und Temperatur erheblich. Die Luftströmung unterstützt gezielt den Ladungstransport zur Zündkerze. Um ein Bild von der Strahldynamik ohne instationäre äußere Einflüsse zu erhalten, ist es deshalb notwendig, die Strahldynamik, wie z. B. die Eindringtiefe und die Strahlform, unter konstanten Randbedingungen zu untersuchen. Ein geeigneter Versuchsträger hierfür ist die Druck-/Temperaturkammer, in der sich der gleiche Gegenruck und die gleiche Temperatur einstellen lassen, wie sie das Kraftstoffspray bei der Einspritzung in den Brennraum vorfindet. Im folgenden werden die an der Kammer eingesetzten Meßtechniken kurz vorgestellt. Anschließend wird die Auswirkung von Einspritzdruck, Sprayöffnungswinkel und der Kammerdruck auf die aus den Strahlbildern abgeleiteten Eindringtiefen und den Tropfendurchmesser untersucht.

4.1 Druckkammer

An der Druckkammer können für die Strahluntersuchungen neben der Gegenlichttechnik auch andere Meßtechniken, wie Mie-Streuung im Laserlichtschnitt oder Phasendoppleranemometrie eingesetzt werden, die allerdings aufwendig in ihrem Aufbau und ihrer Justage sind. Für einfache Strahluntersuchungen ist eine Meßtechnik sinnvoll, die in kurzer Zeit aufgebaut werden kann, und die stets über einen längeren Zeitraum vergleichbare Bilder liefert. So hat z.B. im Vergleich zur Gegenlichttechnik die Auflichtbeleuchtung den

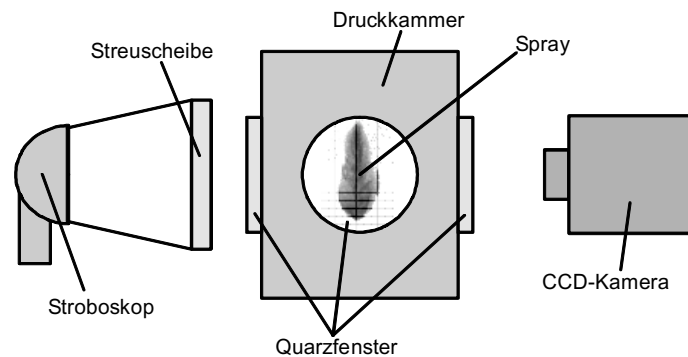


Abbildung 4.1: Optischer Aufbau für Durchlichtaufnahmen von Hochdrucksprays in der Druckkammer

Bosch Nr.	Typ	Öffnungswinkel α	statischer Durchfluß $Q_{\text{stat}} [\frac{\text{cm}^3}{\text{s}}]$
212/17	Drall	60°	15
261/9	Drall	75°	15
206/15	Drall	90°	15
534/8	Zehnloch	50°	24

Tabelle 4.1: In den Kammeruntersuchungen eingesetzte Einspritzventile.

Nachteil, daß eine leichte Änderung der Lichtquellenposition das optische Erscheinungsbild des Strahls stark beeinflussen kann.

Die Auswertung der Sprayaufnahmen beschränkt sich auf die Eindringtiefe, weil hierfür die Diskussion der motorischen Ergebnisse einer der wichtigsten Parameter ist. Die Spezifikationen der eingesetzten Injektoren finden sich in Tabelle 4.1. Bei den durchgeführten Parametervariationen wurde die abgegebene Kraftstoffmenge nicht konstant gehalten.

4.2 Drallventilsprays

4.2.1 Einfluß des Gegendrucks

Obwohl in dieser Arbeit ausschließlich der Schichtbetrieb untersucht wird und der Brennraumdruck zwischen 400 und 700 kPa liegt, soll hier kurz auf das Strahlverhalten bei Gegendruckänderung eingegangen werden. Zahlreiche Untersuchungen haben gezeigt, daß ein durch Drallzerstäubung erzeugtes Spray sehr unterschiedliche Erscheinungsformen annehmen kann. Bei

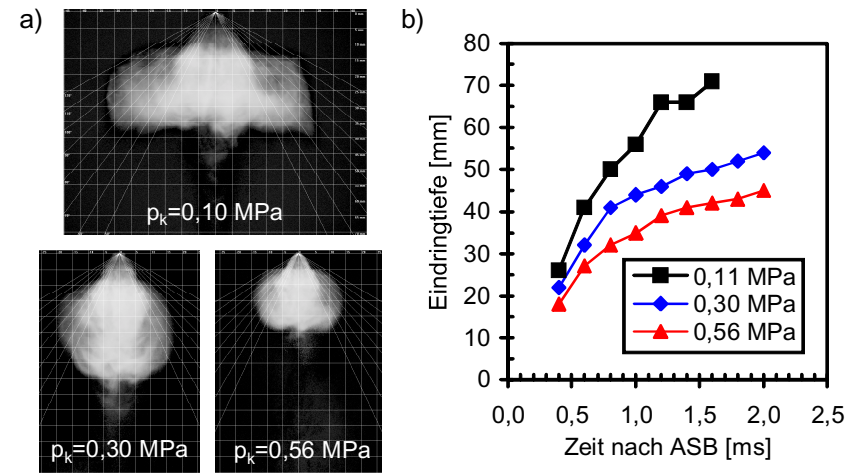


Abbildung 4.2: Gegendruckverhalten des Kraftstoffstrahls für ein 90°-Drallventil. a) Strahlbilder 2 ms nach ASB, b) zeitlicher Verlauf der Eindringtiefe. $t_i=1,5$ ms, $p_{\text{Rail}}=10$ MPa.

Einspritzung unter atmosphärischen Umgebungsbedingungen bildet sich ein großvolumiges Hohlkegelspray aus. Wird der Umgebungsdruck auf 400 kPa erhöht, erhält man ein Vollkegelspray. Dieses Strahlverhalten kommt der Direkteinspritzung entgegen. Im homogenen Motorbetrieb durchmischt sich das Spray mit einem großen Luftvolumen, eine schnelle Verdampfung wird erreicht. Im Schichtbetrieb gelangt die Gemischwolke kompakt zur Zündkerze, ohne in ihren Randbereichen zu stark auszumagern. In Abbildung 4.2 b) findet sich dieser Sachverhalt sehr gut wieder. Gleichzeitig nimmt die Eindringtiefe mit steigendem Gegendruck stark ab (siehe Abbildung 4.2 a)), so daß die Wandbenetzung bei Einspritzung in den Kompressionstakt zusätzlich reduziert wird, was sich ebenfalls positiv auf den Motorbetrieb auswirkt.

4.2.2 Einfluß des Einspritzdrucks

Für den Ladungstransport und die Gemischaufbereitung ist der Einspritzdruck p_{Rail} eine wichtige Größe, weil von diesem sowohl die Sprayeindringtiefe als auch die Tröpfchengröße und damit die gesamte Kraftstoffoberfläche abhängig ist. In Abb. 4.3 a) sind die Spraybilder für Einspritzdrücke von 6,5 MPa bis 11 MPa dargestellt. Zu erkennen ist, daß der Druck keine Auswirkungen auf den Spraywinkel und die Spraybreite hat. Mit steigendem Druck nimmt die Länge des Sprays und seine Eindringtiefe zu. In Abb. 4.3 b) sind die zeitlichen Verläufe der Eindringtiefen aufgetragen. Die Kurven

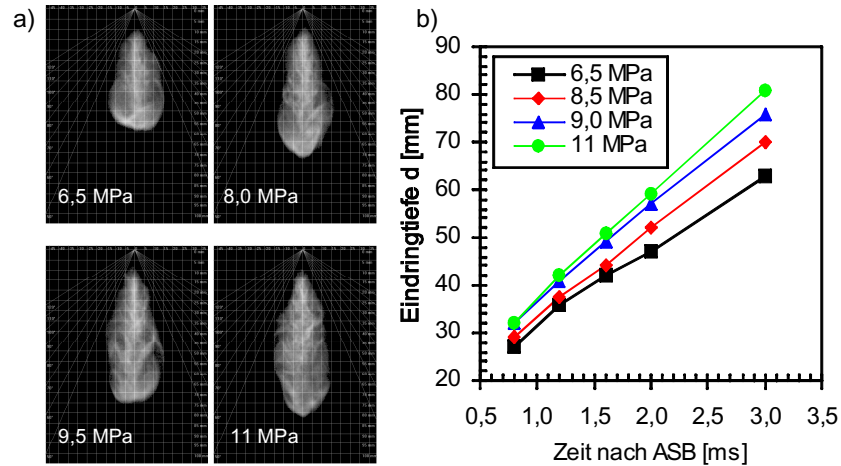


Abbildung 4.3: Strahlbilder des 75°-Drallventils für verschiedene Einspritzdrücke. a) Strahlbilder 3 ms nach ASB, b) zeitlicher Verlauf der Eindringtiefe. $t_i=1$ ms, $p_{\text{Kammer}}=400$ kPa.

sind monoton steigend. Die Eindringtiefe wird im Mittel bei einer Drucksteigerung von 6,5 MPa auf 11 MPa um 22 % erhöht.

4.2.3 Einfluß des Strahlwinkels

Die Ergebnisse aus den Kammeruntersuchungen zeigt Abb. 4.4. Mit der Vergrößerung des Strahlwinkels verringert sich die Eindringtiefe, das Spray dehnt sich horizontal stärker aus und es wird kompakter. Erklärbar wird dieses Verhalten durch den für alle Kraftstoffstrahlen gleichen Einspritzdruck, der zu dem gleichen Strahlimpuls führt. Dieser Impuls verteilt sich bei einem größer werdenden Öffnungswinkel auf einen größeren Raumbereich, so daß die vom Spray angeschobene Luftmenge zunimmt und die Eindringtiefe abnimmt. Im Gegensatz zum Einspritzdruck, der über einen weiten Bereich variiert werden kann, ohne daß BDE-Motoren Aussetzer zeigen, ist der Strahlwinkel eine stark vom Brennverfahren abhängige Größe. Insbesondere durch die kleinen Brennraumabmessungen kann der Strahlwinkel nicht beliebig vergrößert werden.

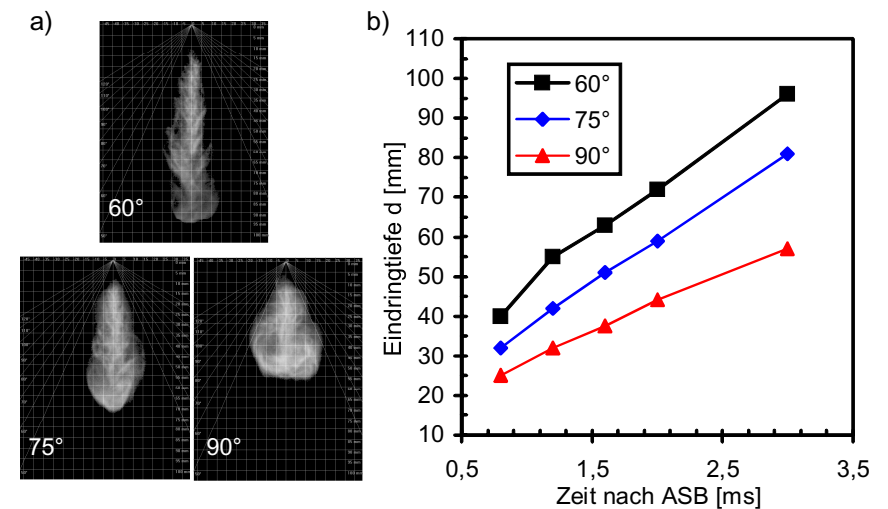


Abbildung 4.4: Druckkammeruntersuchungen von Drallventilen mit den Öffnungswinkeln 60°/75°/90°. a) Strahlbilder 3 ms nach ASB, b) zeitlicher Verlauf der Eindringtiefe. $t_i=1$ ms, $p_{\text{Kammer}}=400$ kPa, $p_{\text{rail}}=11$ MPa.

4.3 Zehnlochventil

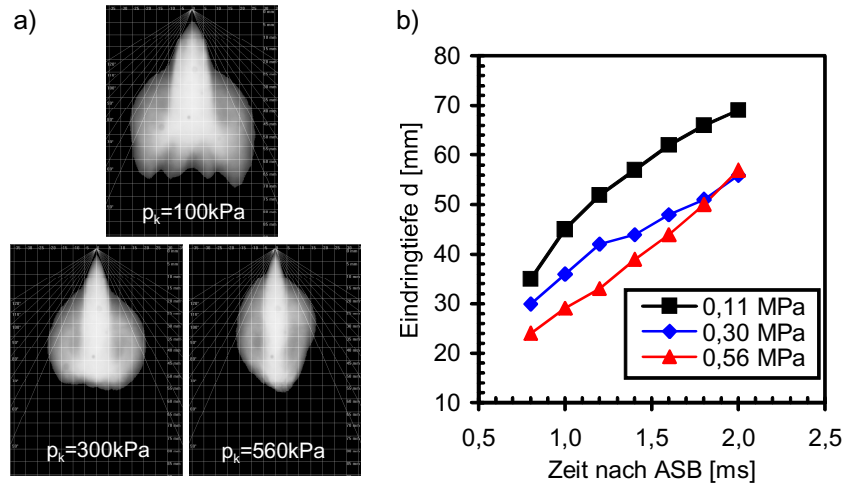


Abbildung 4.5: Druckkammeruntersuchungen des 50°-Zehnlochventils. a) Strahlbilder 3 ms nach ASB, b) zeitlicher Verlauf der Eindringtiefen. $t_i=1$ ms, $p_{\text{rail}}=11$ MPa.

Neben Drallventilen eignen sich auch Mehrlochventile für eine feine Kraftstoffzerstäubung.

Das Spray des untersuchten Zehnlochventils zeigt ähnliche Abhängigkeiten vom Gegendruck wie das Drallventil. In Abb. 4.5 a) sind die Strahlbilder für verschiedene Kammerdrücke dargestellt. Für die Einspritzung bei atmosphärischen Bedingungen nimmt das Spray ein großes Volumen ein. Das wirkt sich wie bei dem Drallventil vorteilhaft auf die Gemischbildung im Homogenbetrieb aus. Bei erhöhtem Gegendruck hingegen ist das Spray kompakt. Dadurch kann im Schichtbetrieb die Kraftstoffwolke ohne ein zu starkes Ausmagern zur Zündkerze transportiert werden. Im Gegensatz zum Drallventil nimmt die Breite des Kraftstoffsprays ab. In Abb. 4.5 b) ist der zeitliche Verlauf der Eindringtiefen aufgetragen. Auffallend ist, daß ab etwa 2 ms nach ASB die Sprayeindringtiefen für 300 hPa und 560 hPa Gegendruck vergleichbar sind. Eine Ursache hierfür ist die geringere Breite des Sprays bei höherem Gegendruck, durch die eine stärkere axiale Luftströmung im Spray ausgebildet wird.

4.4 Tropfendurchmesser

Neben der Eindringtiefe ist die Größe der Spraytropfen eine für die Gemischbildung wichtige Größe. Je feiner der Kraftstoff vom Einspritzventil zerstäubt wird, desto kleiner sind die entstehenden Tropfen und desto größer ist die gesamte Tropfenoberfläche.

Für eine schnelle Verdampfung ist eine große Oberfläche eine notwendige Voraussetzung. Die Zerstäubungsgüte eines Einspritzventils ist, wie im folgenden gezeigt werden wird, eine Funktion des Zerstäubungsprinzips, des Strahlwinkels und des Einspritzdrucks.

Die Durchmesser- wie auch die Geschwindigkeitsverteilung in den hier auftretenden Kraftstoffsprays kann mit Hilfe der **Phasen-Doppler-Anemometrie (PDA)** bestimmt werden. Eine mit dieser Meßtechnik aufgenommene Größenverteilung zeigt Abb. 4.6. Die gemessenen Durchmesser werden einer bestimmten Größenklasse d_i zugeordnet. Nach Abschluß der Messung befindet sich in jeder Größenklasse eine entsprechende Anzahl N_i von Einzeltropfen. Zur Charakterisierung dieser Verteilung bieten sich der mittlere Tropfendurchmesser d_m

$$d_m = \frac{\sum_i N_i d_i}{\sum_i N_i} = d_{10} \quad (4.1)$$

und der Sauterdurchmesser SMD

$$\text{SMD} = \frac{\sum_i N_i d_i^3}{\sum_i N_i d_i^2} = d_{32} = \frac{V_K}{O_{K,\text{frei}}} \quad (4.2)$$

an. Bei den motorischen Sprays wird ausschließlich der Sauterdurchmesser genannt, weil er charakteristisch für den Verdampfungsprozeß und die Verbrennung ist. Durch Division des eingebrachten Kraftstoffvolumens V_K durch den SMD wird die freie Oberfläche $O_{K,\text{frei}}$ des flüssigen Kraftstoffes erhalten.

In Abb. 4.7 sind die zeitlich gemittelten Sauterdurchmesser dargestellt, die aus Strahluntersuchungen gewonnen wurden. Das Meßvolumen befindet sich 30 mm unterhalb des Einspritzventils auf der Sprayachse. Eine Erhöhung des Einspritzdrucks und des Strahlöffnungswinkels führt bei den Drallventilen zu einer SMD-Reduzierung von 43 auf 13 μm , wie in Abb. 4.7 a) zu

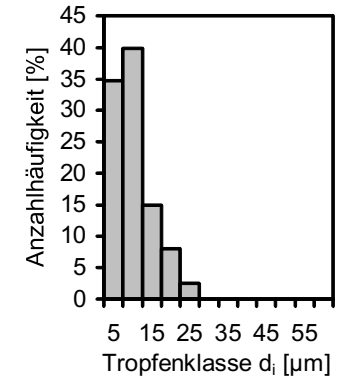


Abbildung 4.6: Tropfengrößenverteilung im Kraftstoffstrahl eines Hochdruckventils.

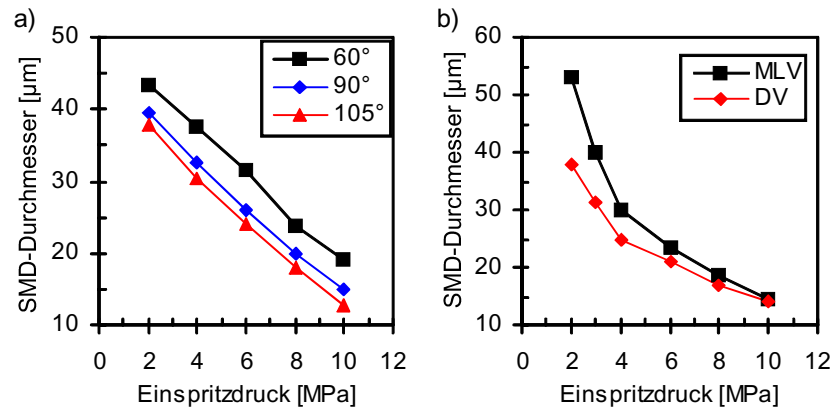


Abbildung 4.7: Einfluß des Einspritzdrucks auf den Sauterdurchmesser. a) Abhängigkeit vom Öffnungswinkel, b) Vergleich von Drall- und Mehrlochventil.

sehen ist. Die Auswirkung vom Einspritzdruck auf den SMD ist im Vergleich zum Öffnungswinkel groß. Neben Drallventilen eignen sich ebenfalls Mehrlochventile zur feinen Zerstäubung des Kraftstoffes. In Abb. 4.7 b) ist zu erkennen, daß die mit dem Mehrlochventil erreichte Zerstäubung für geringes p_{rail} deutlich schlechter ist als die mit dem Drallventil erreichte. Dieser Unterschied wird mit steigendem p_{rail} geringer, bis die Zerstäubung für einen Einspritzdruck von 10 MPa vergleichbar wird.

Kapitel 5

Wandgeführtes Brennverfahren

Das wandgeführte Brennverfahren hat als erstes Einzug in die Serienproduktion gefunden. Ein großer Vorteil der wandgeführten Brennverfahren besteht in der großen Stabilität in dem Sinne, daß Ansteuerbeginn des Einspritzventils und Zündung über einen großen Bereich variiert werden können, ohne daß der Motor sofort Aussetzer zeigt.

Vor Durchführung der optischen Untersuchungen war es sinnvoll, den Motor auf seine thermodynamischen Eigenschaften zu charakterisieren. Dieses sind die vom Motor geleistete Arbeit bzw. der indizierte Mitteldruck p_{mi} , die Standardabweichung oder auch die Variation des Mitteldrucks $\sigma_{p_{\text{mi}}}$ und die Abgasemissionen des Motors wie die Rauchzahl und die Konzentration der unverbrannten Kohlenwasserstoffe HC und des Stickoxids NO_x . Notwendig ist diese Charakterisierung zur Auswahl geeigneter stabiler Betriebspunkte. Anschließend wird die Gemischbildung mit Hilfe der laserinduzierten Fluoreszenz (LIF) und die Entflammung mittels der Flammemissionspektroskopie (FES) untersucht, um zu überprüfen, ob diese Methoden geeignet sind, das Motorverhalten zu verstehen und zu charakterisieren. Dieses würde im nächsten Schritt dazu führen, daß mit Hilfe der optischen Meßtechniken die Thermodynamik des Motors vorhergesagt werden kann, und so der Grundstein für die optische Motorapplizierung gelegt ist.

5.1 Thermodynamische Ergebnisse

Das Konzept des hier untersuchten wandgeführten Brennverfahrens wurde bereits in Kapitel 3 vorgestellt. Ein Vorteil dieses speziellen Brennverfahrens

ist, daß für die Erzeugung der Reverse-Tumble-Brennraumströmung keine zusätzliche Klappe im Ansaugkanal erforderlich ist und somit ein weiterer Parameter zur Gemischbildungsoptimierung entfällt. Sowohl bei den thermodynamischen als auch optischen Messungen wurde keine Abgasrückführung eingesetzt, da sie zum grundlegenden Verständnis der Gemischbildung nicht beiträgt. Die untersuchten Ventile finden sich in Tab. 5.1.

HDEV	α [°]	Q_{stat} [$\frac{\text{cm}^3}{\text{s}}$]	p_{rail} [MPa]	ASB [°vOT]
DV	60	15	11	60
DV	75	15	6,5 8,0 9,5 11	72... 39
DV	90	15	11	60
Zehnloch	50	24	6,5 8,0 9,5 11	72... 39

Tabelle 5.1: Eingesetzte Einspritzventile und die durchgeführten Parametervariationen.

In dieser Arbeit wird nur ein Betriebspunkt in der unteren Teillast untersucht, der charakteristisch für den Schichtbetrieb ist und außerdem den Vorteil bietet, daß ein Großteil der in der Literatur zu findenden Ergebnisse bei dem gleichen oder einem ähnlichen Betriebspunkt erzielt wurde. Prinzipiell muß für die Optimierung eines Betriebspunktes eine Vielzahl von Parametern variiert werden wie Ventilansteuerbeginn, Zündzeitpunkt, Drosselklappenstellung, Einspritzdruck, Abgasrückführrate, und natürlich der Ventiltyp mit seinem Strahlwinkel. Wird nun jeder Parameter in nur drei Abstufungen untersucht, müssen insgesamt $3^6 = 729$ Messungen durchgeführt werden. Das entspräche bei einer Meßdauer von 3 min einem Zeitaufwand von etwa 36,5 Stunden pro Betriebspunkt. Für die ersten Untersuchungen ist es dennoch ausreichend, sich allein auf den Ventilansteuerbeginn, den Einspritzdruck und den Strahlwinkel zu beschränken. Hat man eine ausreichend genaue Vorstellung über die Prozesse erhalten, die für eine erfolgreiche Ladungsschichtung erforderlich sind, kann im nächsten Schritt der Einfluß weiterer Parameter untersucht und bewertet werden. Bei diesem Brennverfahren und einem ähnlichen Lastpunkt hat sich gezeigt [INN⁺97], daß ein Zündzeitpunkt von 24°KWvOT optimal ist. Dieser wird deshalb bei den folgenden Untersuchungen auch beibehalten. Der Betriebspunkt liegt bei einer Drehzahl von $n=2000 \text{ min}^{-1}$ und einem indizierten Mitteldruck von $p_{\text{mi}}=2,8 \text{ bar}$. Somit wurden nur der Ansteuerbeginn des Hochdruckventils und der Kraftstoffeinspritzdruck verändert. In Abb. 5.1 sind die thermodynamischen Ergebnisse einer solchen Parametervariation aufgetragen. Der indizierte Mitteldruck, also die vom Motor geleistete Arbeit, nimmt sowohl bei zu früher als auch bei zu später Ansteuerung des Einspritzventils ab und hat bei 63°vZOT für die untersuchten Einspritzdrücke ihr Maximum. Hier findet sich der Sachver-

halt wieder, daß bei einer zu frühen Einspritzung die Gemischwolke sich zu stark ausgemagert hat oder daß sie bereits an der Zündkerze vorbeigewandert ist. Bei zu später Einspritzung hingegen wird die Ladung die Zündkerze noch nicht erreicht haben, oder die Ladung selbst ist so fett, daß sie durch das Zündplasma nicht entflammt werden kann. Werden die Ansteuerbeginne zu stark ausgeweitet, zeigt der Motor Aussetzer. Für die motorischen Messungen wurde der indizierte Mitteldruck p_{mi} von 250 Motorarbeitsspielen aufgezeichnet. Trägt man die Standardabweichung

$$\sigma p_{\text{mi}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{j=1}^{n=250} (p_{\text{mi},j} - \bar{p}_{\text{mi}})^2} \quad (5.1)$$

gegen den Ansteuerbeginn auf, erhält man ein Maß für die Gleichlaufschwankungen des Motors. Hohe Werte bedeuten einen sehr unruhigen Lauf, welcher z.B. durch Fehlzündungen oder Aussetzer hervorgerufen werden kann. Die HC- und NO_x-Konzentrationen zeigen ein gegenläufiges Verhalten. Ein guter Motorenlauf, hervorgerufen durch einen stabilen Ladungstransport zur Zündkerze, ist gekennzeichnet durch niedrige HC-Emissionen und bei einem guten Durchbrand der Ladung durch hohe Brennraumtemperaturen und damit einhergehend einer hohen NO_x-Emission. Die Schwarzauchzahl zeigt ein breites Maximum um 60°vOT. Aus dem Diagramm wird ersichtlich, daß bei diesem Brennverfahren ein guter Motorenlauf eng mit einer erhöhten Rußbildung verknüpft ist. Zu späten Ansteuerbeginnen fällt die Schwarzauchzahl wieder ab.

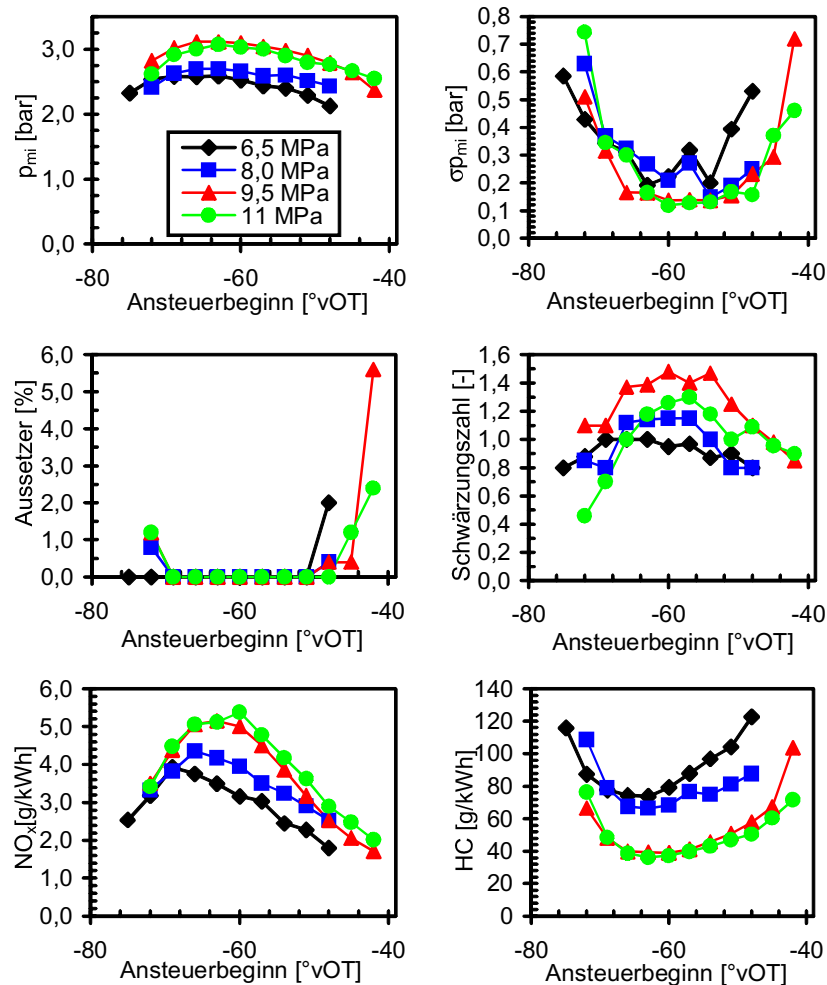


Abbildung 5.1: Thermodynamische Ergebnisse und Abgasemissionen bei dem wandgeführten Brennverfahren für das 75°-Drallventil. $n=2000 \text{ min}^{-1}$, Kraftstoffmenge 10 mg.

5.1.1 Einspritzdruck

Um den Einfluß des Einspritzdrucks auf die Gemischbildung genauer zu untersuchen, bietet sich der Ansteuerbeginn von 60°vOT an, da der Motor in dem untersuchten Druckbereich aussetzerfrei betrieben werden kann. In Abb. 5.2 sind die thermodynamischen Größen für diesen Betriebspunkt als Balkendiagramme aufgetragen. Der Gleichlauf des Motors nimmt mit steigendem

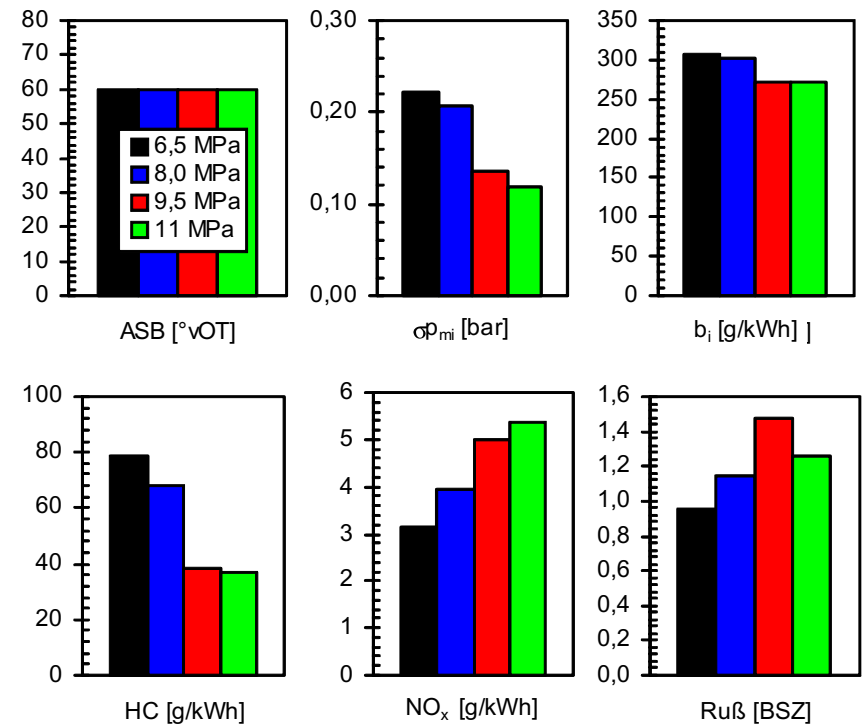


Abbildung 5.2: Variation des Einspritzdrucks. Abgasemissionen, Gleichlaufschwankungen, Spitzendruck und spezifischer Verbrauch für das 75°-Drallventil. ASB/ZZP=60°/24°vOT, $n=2000 \text{ min}^{-1}$, $p_{mi}=2,8 \text{ bar}$.

Druck zu, der spezifische Kraftstoffverbrauch und die HC-Emissionen gleichzeitig ab. Gegenläufig dazu steigen die NO_x - und Ruß-Emissionen an. Ein Grund für die steigende Schwarzrauchzahl ist der sich stärker ausbildende Wandfilm, auf den in Kapitel 5.3.5 genauer eingegangen wird. Zu den recht hoch erscheinenden Absolutwerten für die HC-Emissionen und den spezifischen Verbrauch ist anzumerken, daß der Motor für einen aussetzerfreien Betrieb auf einen Druck im Saugrohr von $p_{SR} = 80 \text{ kPa}$ angedrosselt wer-

den mußte und für die Untersuchungen der optische Zylinderkopf verwendet wurde, der aufgrund seiner zerklüfteten Oberfläche den Abbrand des Kraftstoffes stark behindert hat.

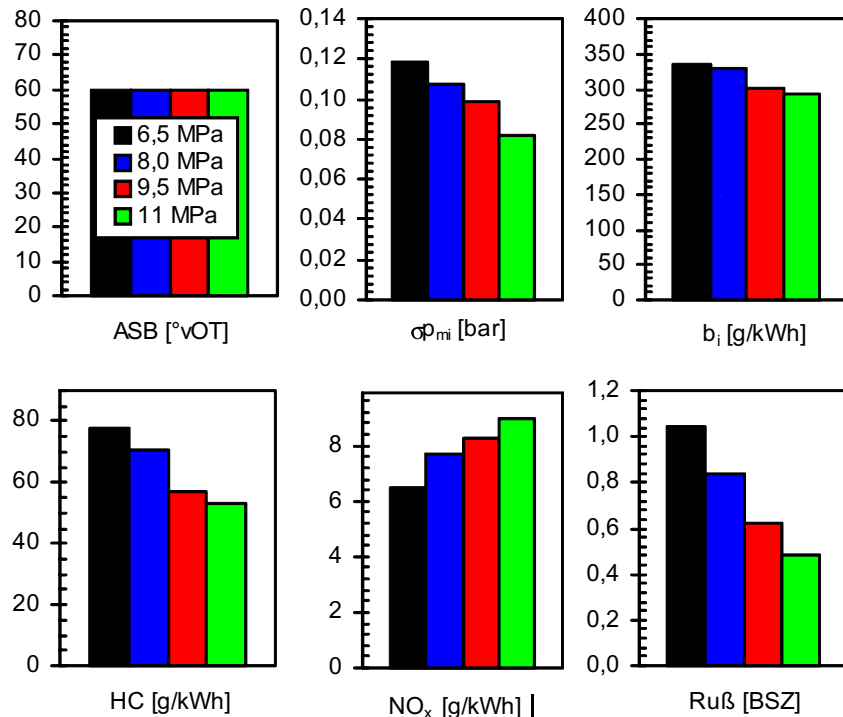


Abbildung 5.3: Variation des Einspritzdrucks. Abgasemissionen, Gleichlaufschwankungen, Spitzendruck und spezifischer Verbrauch für das 50°-Zehnlochventil. ASB/ZZP=60°/24°vOT, $n=2000 \text{ min}^{-1}$, $p_{mi}=2,8 \text{ bar}$.

Neben dem Drallventil wurde auch ein Mehrlochventil eingesetzt. Wie auch das Drallventil zeigt das Mehrlochventil ein ähnliches Verhalten bei Erhöhung des Einspritzdrucks. Wie in Abb. 5.3 dargestellt ist, verbessern sich der Gleichlauf, die HC-Emissionen und der spezifische Verbrauch, die NO_x -Emissionen nehmen ebenfalls zu. Anders als bei dem Drallventil zeigt sich eine starke Abnahme in der Schwarzrauchzahl. Zu den Ergebnissen für das Mehrlochventil ist zu sagen, daß es sich bei diesem nicht um ein optimiertes Exemplar für dieses Brennverfahren gehandelt hat, sondern vielmehr die Frage beantwortet werden sollte, ob dieser Ventiltyp überhaupt für dieses Brennverfahren eingesetzt werden kann.

5.1.2 Ansteuerbeginn

Bei der Benzindirekteinspritzung ist der Einspritzzeitpunkt für die Gemischbildung eine sehr wichtige Größe, gerade weil der Ladungstransport über die Kolbenmulde und die besonders ausgeprägte Brennraumströmung erfolgt. In Abb. 5.4 sind die Ergebnisse für den höchsten Einspritzdruck und die Ansteuerbeginne 69°, 60° und 51°vOT gezeigt, wobei der erste und der letzte Ansteuerbeginn die Grenzen für den aussetzerfreien Motorbetrieb markieren. Anhand der Gleichlaufschwankungen und den HC-Emissionen ist zu erken-

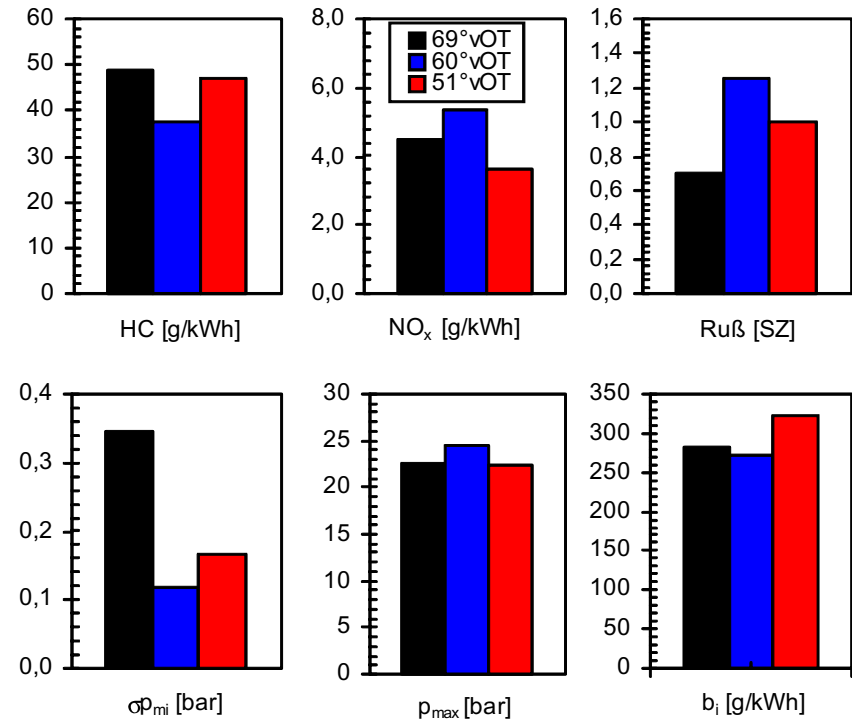


Abbildung 5.4: Variation des Ansteuerbeginns. Abgasemissionen und Gleichlaufschwankungen für das 75°-Drallventil. ASB/ZZP=60°/24°vOT, $p_{mi}=2,8 \text{ bar}$, $p_{rail}=11 \text{ MPa}$.

nen, daß die Gemischbildung in diesen Punkten nicht optimal verläuft. Die zu frühe Einspritzung führt wegen der turbulenten Brennraumströmung zu einem zu starken Ausmagern der Ladung und zu einer Abtrennung kleinerer Teile von der Kraftstoffwolke, so daß der Durchbrand nicht mehr vollständig gewährleistet ist und so der unverbrannte Treibstoff zu den HC-Emissionen

beiträgt. Wird der Kraftstoff hingegen zu spät eingespritzt, hat er bis zur Zündung die Zündkerze noch nicht erreicht. Außerdem ist das Zeitfenster zwischen Einspritzung und Zündung deutlich verkürzt, so daß aufgrund der ungenügenden Gemischaufbereitung die Entflammung des Kraftstoffes erschwert wird.

5.1.3 Strahlwinkel

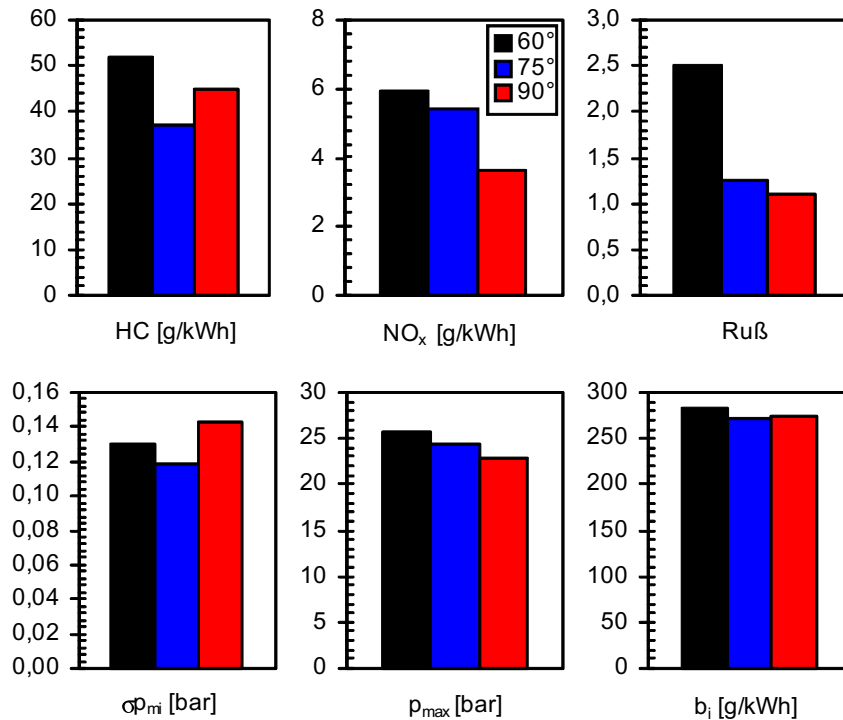


Abbildung 5.5: Abgasemissionen und Gleichlaufschwankungen für die 60°/75°/90°-Drallventile. ASB/ZZP=60°/24°vOT, p_{mi} =2,8 bar, p_{rail} = 11 MPa.

Eine weitere brennverfahrenspezifische Größe ist der Strahlwinkel des eingesetzten Injektors. Sprays mit kleinen Strahlwinkeln führen aufgrund ihrer hohen Eindringtiefen zur unerwünschten Benetzung des Kolbens im Schichtbetrieb oder der Zylinderwand. Ein zu großer Strahlwinkel hingegen kann zur Benetzung des Brennraumdachs führen oder auch zu einem zu weitverteilten Spray, das bei dem Transport zur Zündkerze durch die Luftströmung zu stark

zerrissen wird. In Abb. 5.5 sind die Ergebnisse von Ventilen mit den Strahlwinkeln 60°, 75° und 90° aufgetragen. Hinsichtlich Verbrauch, Gleichlauf und HC-Emissionen ist das 75°-Ventil für dieses Brennverfahren in diesem Betriebspunkt am besten geeignet, nur in der Rauchzahl und in der NO_x-Emission schneidet das 90°-Ventil besser ab. Die hohe Rußzahl bei dem 60°-Ventil rührt, wie in Kapitel 5.3.5 gezeigt wird, von dem ausgebildeten Wandfilm her.

5.2 LI(E)F-Untersuchungen der Gemischbildung

In diesem Abschnitt sollen die Meßtechnik, die Auswertemethoden der aufgenommenen Fluoreszenzbilder und die Ergebnisse aus den Parameterstudien vorgestellt werden. Zu Anfang wird auf die Besonderheiten des wandgeführten Brennverfahrens und auf den optischen Zugang zum Brennraum eingegangen. Nach einer kurzen Beschreibung des optischen Versuchsaufbaus werden anschließend verschiedene Auswerteverfahren der aufgenommenen Fluoreszenzbilder miteinander verglichen. Schließlich werden die Einflüsse auf die Gemischbildung mittels LIF untersucht und die Ergebnisse präsentiert.

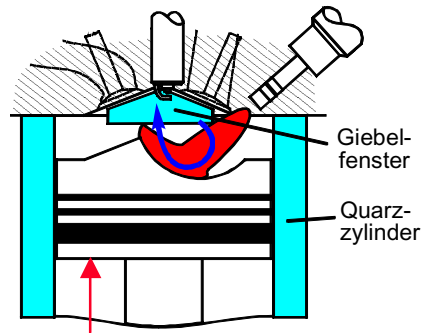


Abbildung 5.6: Schematische Darstellung des wandgeführten Reverse-Tumble-Brennverfahrens. Die Brennraumgeometrie ist für 50° vOT dargestellt.

und Zylinderkopf zum Einspritzzeitpunkt sehr dicht beieinander, so daß davon ausgegangen werden muß, daß der Kolbenboden durch das Spray benetzt wird.

Farbig hinterlegt sind die Komponenten, die durch Quarzglas ersetzt werden können. Die Zylinderlaufbüchse des Motors kann gegen einen Quarzzylinder ausgetauscht werden. Um den Quarz nicht zu beschädigen, sind die Kompressions- und die Führungsringe des Kolbens aus Graphit gefertigt. Für die Untersuchung der Gemischbildung im Schichtbetrieb kann der Zylinderkopf außerdem mit fünfeckigen Quarzfenstern bestückt werden. Der Quarzzylinder wurde für die Untersuchung der Gemischbildung im Schichtbetrieb nicht eingesetzt, weil der Kolben den Bereich um die Zündkerze schon zu sehr frühen Zeiten verdeckt. Dieser Bereich konnte hingegen mit Hilfe der

In Abb. 5.6 ist das untersuchte wandgeführte Reverse-Tumble-Brennverfahren dargestellt. Die Luftströmung bildet sich durch die senkrecht ausgelegten Einlaßkanäle in umgekehrter Drehrichtung zu den konventionellen Ottomotoren aus. Ziel dieser Maßnahme ist, den Ladungstransport über die speziell geformte Kolbenmulde zur Zündkerze zu unterstützen. Kammeruntersuchungen haben gezeigt, daß das Kraftstoffspray bereits unter stationären Bedingungen sehr gut mit Hilfe eines starren Kolbens zur Zündkerze geführt werden kann [Bla00]. Wie in dem maßstäblichen Schaubild zu sehen ist, stehen Kolben

fünfeckigen Giebelnfenster bis etwa 18° vOT ausgezeichnet beobachtet werden.

5.2.1 Einführende LIEF-Untersuchungen

Eine wichtige Fragestellung bei der Benzindirekteinspritzung ist, ob der Zeitraum zwischen der Einspritzung und der Zündung lang genug ist, um den Kraftstoff ausreichend zu verdampfen. Aussagen hierzu sind mit der LIEF-Meßtechnik möglich.

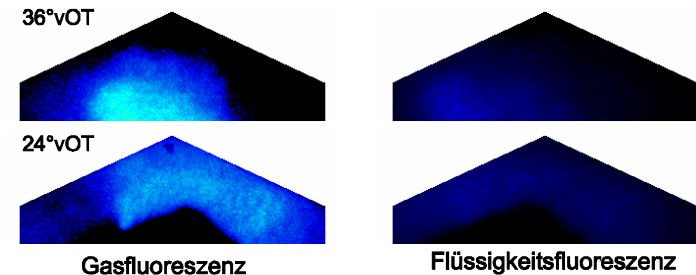


Abbildung 5.7: LIEF-Bilder der Gemischbildung mit TMPD/Naphtalin in Isooktan. Einzelbilder für das 75° -Drallventil, $p_{\text{rail}}=11$ MPa.

Der Meßaufbau wurde bereits in Abb. 2.14 auf S. 26 vorgestellt. Da für diese Untersuchungen als Tracer TMPD und Naphtalin verwendet wurden, besteht die Filterung für die Flüssigphase aus den Filtern WG360 und GG455 und für die Gasphase aus WG335 und UG11.

Beispielhafte Bilder aus den LIEF-Untersuchungen der zeitlichen Entwicklung der Gemischbildung zeigt Abb. 5.7. Zu erkennen ist, daß ausschließlich auf der Gasphasenseite Fluoreszenz nachgewiesen wird und daß zu keiner Zeit flüssiger Kraftstoff im Dachbrennraum vorhanden ist. Diese Aussage wurde bei umfangreichen Parameteruntersuchungen an den bereits vorgestellten Einspritzventilen bestätigt. Von einem weiteren Einsatz dieser Meßtechnik wurde abgesehen, da das TMPD-Naphtalin-Gemisch bei einer zu hohen Gasphasenkonzentration ein sehr hohes Eigenquenching aufweist. In [IKH⁺95] wurde gezeigt, daß bei dieser Tracerkombination ab einer bestimmten Konzentration die Fluoreszenz in der Gasphase nicht mehr ansteigt und bei einer weiteren Erhöhung sogar abfällt.

Weil im oberen Bereich des Brennraums keine nachweisbaren Mengen flüssigen Kraftstoffs auftreten, wird im folgenden deshalb für die Gemischbildungsuntersuchungen als einkomponentiger Ersatzkraftstoff ein 10m% Diethylketon-Isooktangenisch verwendet.

5.2.2 Einspritzdruck

Wie in den Druckkammeruntersuchungen in Kapitel 4 gezeigt wurde, hängt die Eindringtiefe des Sprays stark vom Einspritzdruck ab. Der Einfluß dieser Größe auf den Gemischbildungsprozeß wird nun an dem Transparentmotor untersucht. In Abb. 5.8 a) ist der Ladungstransport für den kleinsten Druck

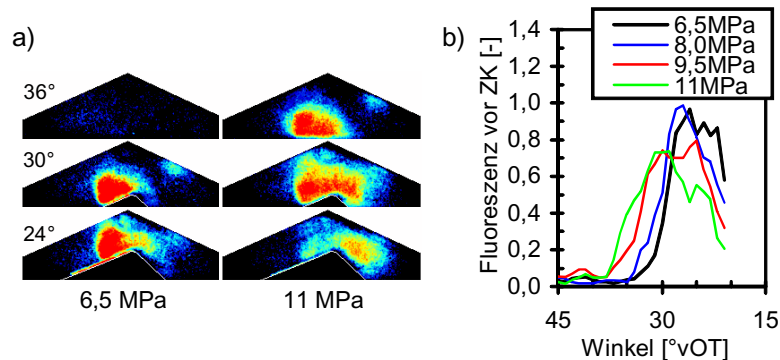


Abbildung 5.8: Zeitlicher Verlauf der Gemischbildung. Variation des Einspritzdrucks. a) Mittel aus sechs LIF-Einzelbildern, b) Fluoreszenz vor der Zündkerze.

von $p_{\text{rail}}=6,5$ MPa und den größten $p_{\text{rail}}=11$ MPa gezeigt. Bei 6,5 MPa dringt der Kraftstoff am spätesten in den Dachbrennraum ein, es entsteht eine sehr fette Wolke in Zündkerzennähe. Bei 11 MPa kommt der Kraftstoff früh in den Bereich der Zündkerze und zeigt zum Zündzeitpunkt eine breite Verteilung. In Abb. 5.8 b) ist der zeitliche Verlauf der Fluoreszenz an der Zündkerze aufgetragen. An den ansteigenden Flanken ist sehr gut zu erkennen, daß ein höherer Einspritzdruck zu einem früheren Eintritt der Gemischwolke in den Dachbrennraum führt. Gleichzeitig nimmt die Kraftstofffluoreszenz zum Zündzeitpunkt ab. Unter der Annahme, daß die Konzentration des Kraftstoffdampfes einerseits an der Zündkerze in der Nähe von $\lambda = 1$ liegen muß und sie andererseits nicht zu stark innerhalb der Ladungswolke variiert, kann hier aus der Abnahme der Fluoreszenz geschlossen werden, daß die Ausdehnung der Gemischwolke mit steigendem Einspritzdruck geringer wird.

In Abb. 5.9 a) ist die Entwicklung der Kraftstoffhäufigkeitsverteilung zu sehen. Zu erkennen ist, daß sich der Kraftstoff bei 6,5 MPa unterhalb der Zündkerze befindet und sehr mittig im Brennraum orientiert ist. Bei dem höchsten Einspritzdruck von 11 MPa befindet sich die Ladung über der Kolbenmulde, der Zündfunken an der Flanke des 100%-Bereichs. Vergleicht man die Kraftstoffhäufigkeitsverteilungen mit dem Gleichlauf des Motors, der in Abb. 5.9 b) dargestellt ist, ist kein enger Zusammenhang zwischen den opti-

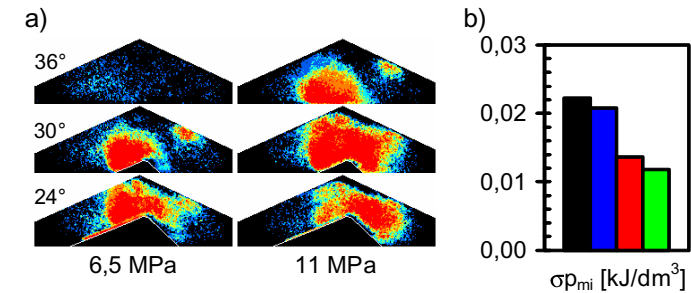


Abbildung 5.9: Zeitlicher Verlauf der Gemischbildung. Variation des Einspritzdrucks. a) Kraftstoffhäufigkeitsverteilung, b) Gleichlaufverhalten.

schen und den thermodynamischen Größen erkennbar. Ein enger Zusammenhang kann möglicherweise mit der Stabilität des Brennverfahrens bei den beiden Einspritzdrücken hergestellt werden.

5.2.3 Ansteuerbeginn

Wie in den thermodynamischen Untersuchungen deutlich geworden ist, hat eine Veränderung des Ansteuerbeginns einen großen Einfluß auf das Laufverhalten des Motors. So ist zu erwarten, daß sich dieser Einfluß ebenfalls in der optischen Untersuchung der Gemischbildung wiederfindet.

In Abb. 5.10 ist der zeitliche Verlauf von 36° bis 24°vOT der Gemischbildung und der Häufigkeitsverteilung für die Ansteuerbeginne 69°, 60° und 51°vOT aufgetragen. Zu erkennen ist, daß der Eintritt des Kraftstoffes in den Dachbrennraum sehr empfindlich von dem Ansteuerbeginn abhängt. Je früher eingespritzt wird, desto früher erreicht der Kraftstoff die Zündkerze und desto stärker magert er aus. Die Gesamtfluoreszenz nimmt zum Zündzeitpunkt ZZP=24°vOT ab und der Schwerpunkt der Gemischwolke verlagert sich in den rechten Teil des Brennraums. Die Ladung hat sich also bei der zu frühen Einspritzung bereits an der Zündkerze vorbeibewegt und befindet sich bereits über der Kolbenmulde. Bei später Einspritzung hingegen hat die Wolke die Zündkerze noch nicht erreicht. Außerdem erscheint die Wolke sehr kompakt, so daß von sehr fetten Gemischbereichen innerhalb der Wolke ausgegangen werden kann, die nicht oder nur schwer entflammbar sind.

In den Häufigkeitsverteilungen finden sich die Aussagen der Mittelwertbilder bezüglich der Schwerpunktlage wieder. Auch hier hängt das Erscheinen des Kraftstoffes stark vom Ansteuerbeginn des Einspritzventils ab. Die Ausdehnung des 100%-Bereichs der Häufigkeitsverteilung nimmt mit früher Einspritzung ab. Sein Schwerpunkt bewegt sich in Richtung Kolbenmulde. Bei einem ASB von 69°KW hat sich dieser Bereich bereits soweit von der

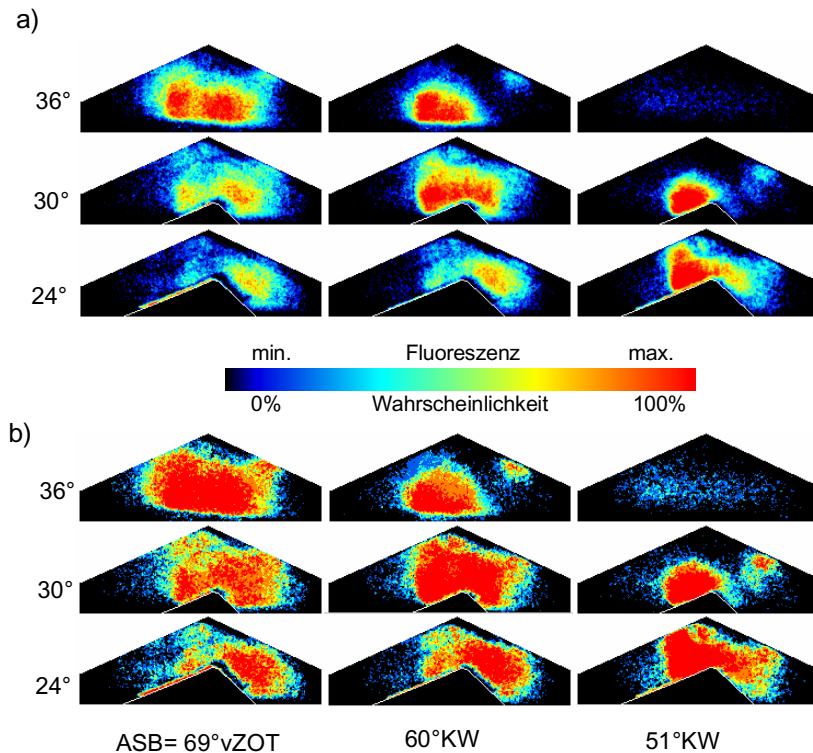


Abbildung 5.10: Zeitlicher Verlauf der Gemischbildung. ASB-Variation. a) Mittel aus sechs LIF-Einzelbildern, b) Verteilung der Aufenthaltswahrscheinlichkeiten.

Zündkerze entfernt, daß eine sichere Entflammung nicht mehr gewährleistet ist.

Die Aussagen der zwei Auswertemethoden ergänzen einander. In den Mittelwertbildern findet sich der über mehrere Zyklen gemittelte Gemischbildungstransport wieder. Es lassen sich Aussagen über Ausdehnung und Kraftstoffeintritt in den Dachbrennraum machen. Zur Beurteilung der Stabilität des Ladungstransportes verhelfen die Kraftstoffwahrscheinlichkeitsbilder. Befindet sich die Zündkerze außerhalb des 100% Bereichs, wird eine erfolgreiche Entflammung zunehmend unwahrscheinlicher. Ein enger Zusammenhang zwischen der Kraftstoffverteilung zum Zündzeitpunkt und einem vollkommenen Durchbrand besteht nicht, wie Auflichtuntersuchungen an einem strahlgeführten Zweitaktbrennverfahren gezeigt haben [GB95]. Bei der Klassifizierung von 100 Spraybildern zum Zündzeitpunkt zeigte sich, daß

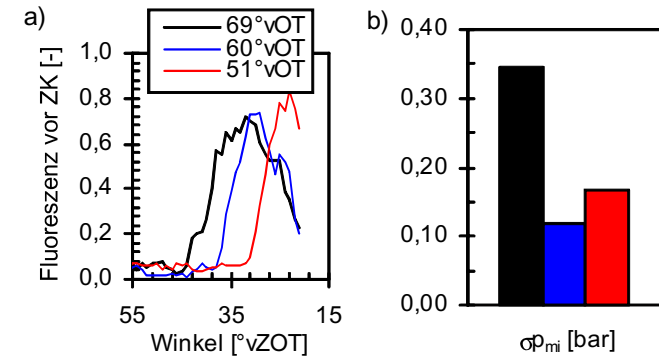


Abbildung 5.11: ASB-Variation. a) Zeitlicher Verlauf der Gesamtfluoreszenz, b) Gleichlaufverhalten.

auch ein stark deformiertes Spray u.U. vollständig durchgebrannt ist, wohingegen Sprays, die sich in optimaler Lage zur Zündkerze befanden, Aussetzer und mangelnden Durchbrand zeigten.

In 5.11 a) finden sich die Aussagen aus den LIF-Mittelwertbildern wieder. Der Kraftstoff gelangt mit späterem Ansteuerbeginn zu späteren Zeiten an die Zündkerze und die Fluoreszenz ist bei der Zündeinleitung für ASB=51°vOT am größten, für die beiden anderen ASB vergleichbar groß.

Damit kann das Gleichlaufverhalten des Motors mit Hilfe der aus den optischen Untersuchungen gewonnenen Ergebnisse leicht erklärt werden. Die hohen Gleichlaufschwankungen σ_{pmi} bei ASB=69°vOT sind auf eine zu starke Ausmagerung und auf die nicht 100%ige Häufigkeitsverteilung des Kraftstoffes in Zündkerzennähe zurückzuführen. Bei der zu späten Einspritzung ist der Kraftstoff prinzipiell noch in der Lage, den Zündfunken zu erreichen, jedoch wird die Entflammung durch die zu fetten Gemischbereiche behindert.

5.2.4 Strahlwinkel

Wie der Einspritzdruck hat auch der Strahlwinkel des verwendeten Einspritzventils eine große Auswirkung auf die Gemischbildung. In Abb. 5.12 a) ist der zeitliche Verlauf für die Strahlwinkel von 60°, 75° und 90° bei einem Einspritzdruck von 11 MPa dargestellt. Obwohl der Impuls für die drei Kraftstoffstrahlen gleich groß ist, erreicht die Ladung bei dem 60°-Ventil als erste die Zündkerze, siehe Abb. 5.12 c). Bei dem 90°-Ventil erfolgt der Ladungstransport am langsamsten. Aus der Fluoreszenz an der Zündkerze kann, wie im vorigen Abschnitt bereits erläutert, auf die Ausdehnung der Ladungswolke geschlossen werden, die für das zuletzt genannte Ventil am größten ist. Wie auch bei den Untersuchungen über den Einspritzdruck

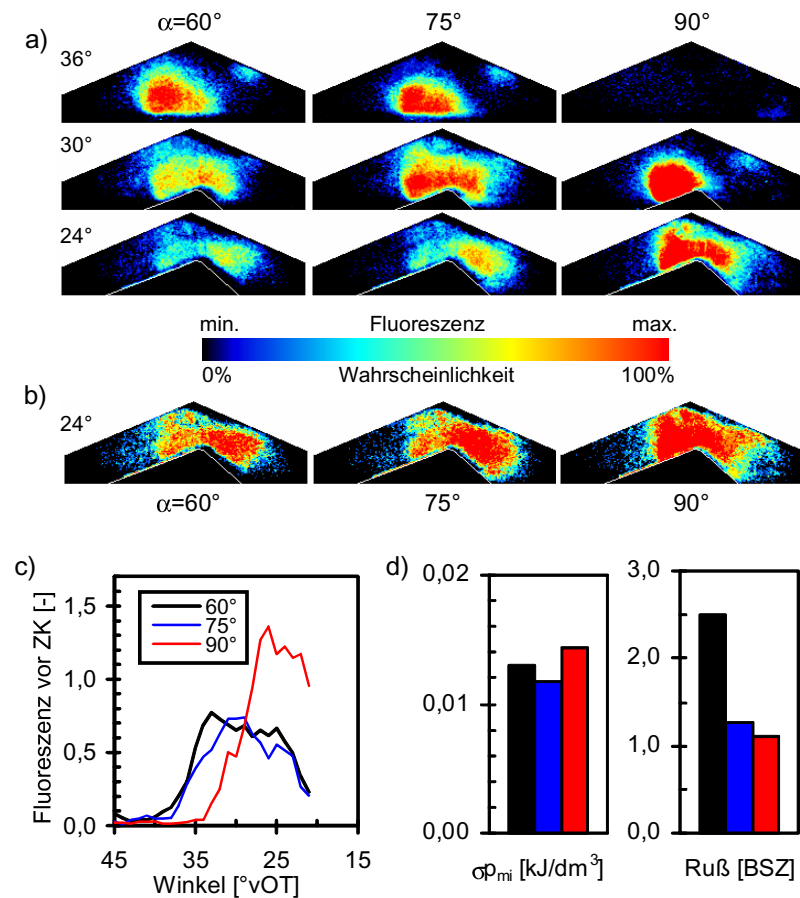


Abbildung 5.12: Einfluß des Strahlwinkels auf die Gemischbildung. a) Zeitlicher Verlauf, über sechs Einzelbilder gemittelt, b) Kraftstoffhäufigkeitsverteilung zum ZZZP, c) Fluoreszenzintensität vor der Zündkerze, d) Gleichlaufschwankungen und Rußemissionen.

ist das Penetrationsvermögen der Sprays die wesentliche Größe für die Zeit des Ladungstransports zur Zündkerze. Sprays mit großem Öffnungswinkel werden wesentlich stärker verzögert als solche mit kleinem Winkel, weil das Luftvolumen, das von dem Strahl angeschoßen wird, wesentlich größer ist und die Kraftstofftröpfchen dementsprechend stärker verzögert werden.

Vergleicht man die Kraftstoffhäufigkeitsverteilung mit den Gleichlaufschwankungen, siehe Abb. 5.12 b) und d), so ist für das 75° -Ventil der beste Gleichlauf festzustellen. Die Häufigkeitsverteilung für dieses Ventil stellt das Optimum der untersuchten Strahlwinkel dar. Hier wird außerdem deutlich, daß aus der Ausdehnung und Lage des 100%-Bereichs nicht unmittelbar auf den Gleichlauf geschlossen werden kann. Das Vorhandensein von Kraftstoff zum Zündzeitpunkt an der Kerze ist eine notwendige Voraussetzung für die Entflammung. Für einen gleichmäßigen Durchbrand der Ladung ist aber der räumliche Zusammenhang der Kraftstoffwolke entscheidend. Aufgrund der LIF-Bilder und den Kammeruntersuchungen kann hier festgestellt werden, daß das Spray des 60° -Ventils zu stark in die Länge gezogen ist, wohingegen das Spray des 90° -Ventils sehr breit ist. Die zu große Ausdehnung dieser Sprays in eine Richtung führt zu Bereichen in der Gemischwolke, die sich von dem Hauptteil abtrennen und dadurch nur schwer oder verspätet von der Flamme erreicht werden. Die Folge sind erhöhte HC-Emissionen, siehe Abschnitt 5.1.3.

5.2.5 Vergleich Mehrloch-/Drallventil

Zuletzt sollen in diesem Abschnitt die Gemischbildung bei Verwendung des 50° -Mehrlöcherventils untersucht und mit dem 75° -Drallventil verglichen werden. Wie in den Druckkammeruntersuchungen in Kapitel 4 gezeigt wurde, besitzt das Zehnlocherventil dem Drallventil ähnliche Eigenschaften. Es zeigt bei einer Gegendruckerhöhung eine starke Abnahme der Eindringtiefe und ein kompakteres Spray, wie es für den Schichtladebetrieb erforderlich ist. In Abb. 5.13 a) sind die LIF-Mittelwertbilder zu zwei Zeitpunkten für die Einspritzdrücke von 6,5 und 11 MPa dar- und dem Drallventil gegenübergestellt. Im Vergleich zu dem Drallventil zeigt das Mehrlocherventil keine so große Abhängigkeit des Ladungseintrittszeitpunkts in den Dachbrennraum vom Einspritzdruck. Die Kraftstoffwolke ist wesentlich kompakter. Bei dem Drallventil schießt sie bei 32°vOT sehr ungleichmäßig geformt aus der Kolbenmulde hervor. Zum Zündzeitpunkt bei 24°vOT schließlich ist die Gemischverteilung für 11 MPa bei beiden Ventilen vergleichbar. In Abb. 5.13 c) ist der zeitliche Verlauf der Fluoreszenz vor der Zündkerze aufgetragen. Zu erkennen ist, daß für die niedrigen Einspritzdrücke von 6,5 und 8 MPa der Kraftstoff am spätesten zur Zündkerze gelangt. Für die beiden höheren Einspritzdrücke hingegen zeigt der zeitliche Fluoreszenzverlauf ein dem

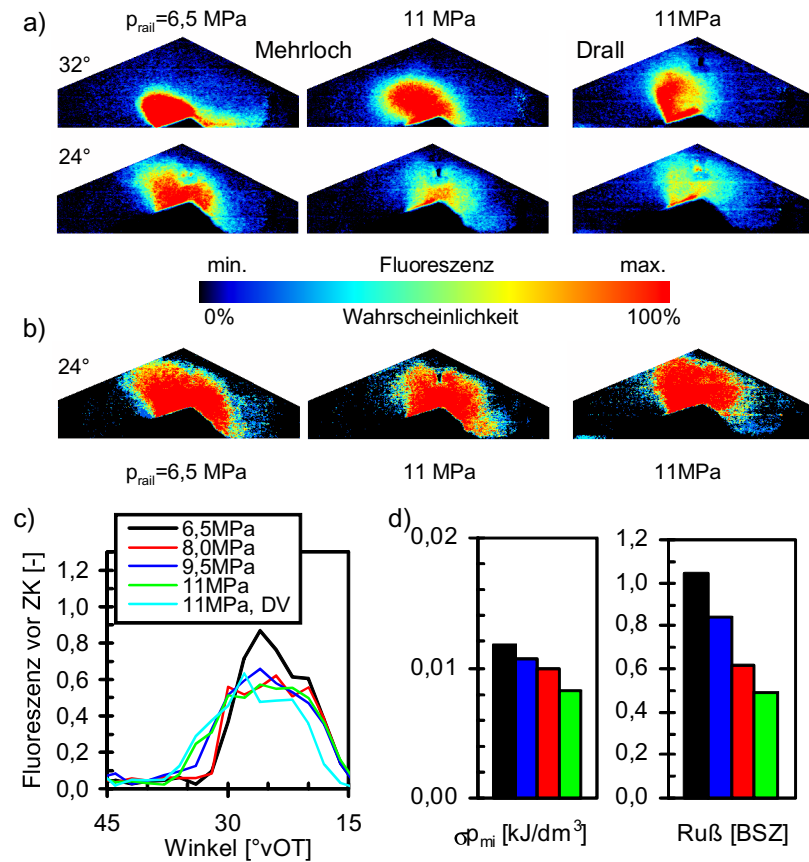


Abbildung 5.13: Zehnlochventil. Einfluß des Einspritzdrucks auf die Gemischbildung. a) Zeitlicher Verlauf, über sechs Einzelbilder gemittelt, b) Kraftstoffhäufigkeitsverteilung zum ZZP, c) Fluoreszenzintensität vor der Zündkerze, d) Gleichlaufschwankungen und Rußemissionen.

Drallventil vergleichbares Verhalten.

Betrachtet man die Kraftstoffhäufigkeitsverteilungen in Abb. 5.13 c), so ist die Ausdehnung des 100%-Bereichs in den drei Bildern vergleichbar groß, und sie schließt die Zündkerze ein. Die Gleichlaufschwankungen wie auch die Schwarzrauchzahl nehmen im Vergleich zum Drallventil mit steigendem Einspritzdruck ab, wie in Abb. 5.13 d) zu sehen ist.

5.3 Kolbenwandfilm

Als ein Vorteil der wandgeführten Brennverfahren kann die starre Brennraumgeometrie bei Einspritzung in den Kompressionstakt angesehen werden. Der Gemischbildungsweg zur Zündkerze ist über die Kolbenkontur weitestgehend vorgegeben. Die durch die Einlaßkanäle gezielt ausgebildete Luftströmung hat für den Ladungstransport nur eine unterstützende Funktion.

Damit entsteht das Problem, daß aufgrund der geringen Ausdehnung des Brennraums eine Benetzung des Kolbens nicht ausgeschlossen werden kann. Sinnvoll wäre eine Meßtechnik, mit der der Einfluß äußerer Parameter auf die Wandfilmbildung und die Auswirkung dieser Benetzung auf die Abgasemissionen untersucht werden könnte. In diesem Abschnitt soll gezeigt werden, daß die laserinduzierte Fluoreszenz eine hierfür geeignete Nachweistechnik ist, die es ermöglicht, den Wandfilm sichtbar zu machen und einen Zusammenhang zwischen Abgas und auf dem Kolben abgeschiedener Kraftstoffmenge herzustellen.

5.3.1 Optischer Versuchsaufbau

Bevor auf die Untersuchungsergebnisse eingegangen wird, soll der optische Aufbau vorgestellt werden.

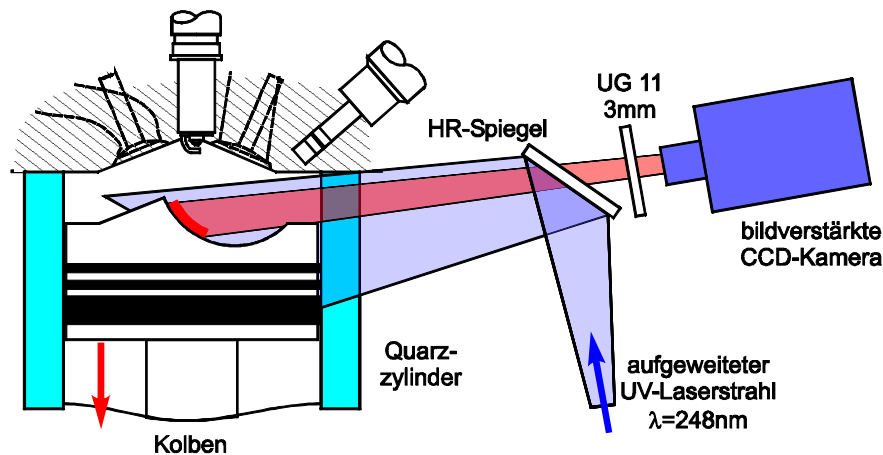


Abbildung 5.14: LIF-Versuchsaufbau zum Wandfilmbildungsnachweis in der Kolbenmulde.

Wie in Abb. 5.14 gezeigt ist, dient ein aufgeweiteter UV-Laserstrahl mit der Wellenlänge $\lambda = 248 \text{ nm}$, der über einen dielektrischen hochreflektierenden Spiegel in den Motor gelenkt wird, zur Anregung des Kraftstoff-

wandfilms. Mit Hilfe einer bildverstärkten CCD-Kamera wird die aus dem Brennraum kommende Fluoreszenz aufgenommen. Der dielektrische Spiegel direkt vor der Kamera sorgt für eine gleichmäßige und abschattungsfreie Ausleuchtung der Kolbenmulde. Der verwendete Absorptionsfilter UG11/3mm dient zur Unterdrückung des Streulichts bei 248 nm und der Fluoreszenz, die von dem auf den Kolben abgelagerten Ruß hervorgerufen wird. Die thermische Strahlung heißer Rußpartikel wird ebenfalls unterdrückt. Aufgrund der Brennraumgeometrie kann erst ab etwa 40°nOT durch den Quarzzyylinder die Brennraummulde eingesehen werden. Ein gute Einsicht in den Brennraum ergibt sich bei 65°nOT .

Wenn zu diesen späten Zeiten in der Expansion noch ein Wandfilm nachweisbar ist, bedeutet das, daß der auf dem Kolben abgeschiedene Kraftstoff nicht mehr zur geleisteten Arbeit des Motors beiträgt sondern ausschließlich zu einem Anstieg der Abgasemissionen führt.

5.3.2 Verifikation der Wandfilmmessungstechnik

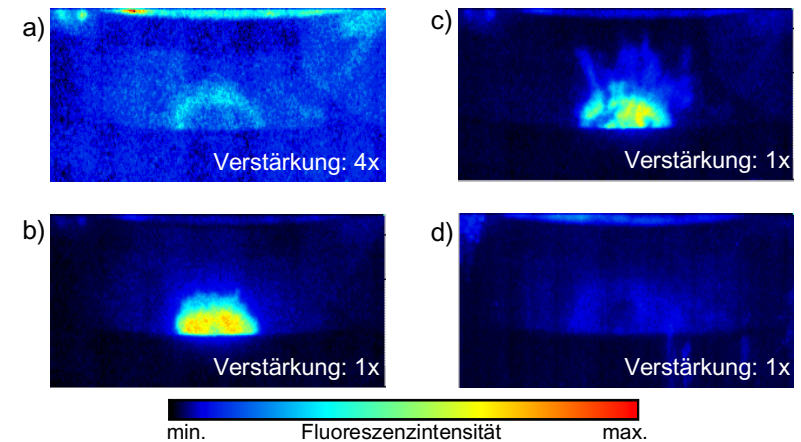


Abbildung 5.15: LIF-Aufnahmen bei 65°nZOT zum Nachweis des Wandfilms. a) Rußfluoreszenz, keine Einspritzung, b) Wandfilmfluoreszenz mit Einspritzung und c) mit Feuerung. d) Einspritzung in den Ansaugtakt.

Bei dem Betrieb des Motors für Abgasuntersuchungen hat sich herausgestellt, das der Kolben je nach Betriebspunkt bis zu 180°C heiß werden kann. Damit scheiden die vorgestellten Ersatzkraftstoffe aus, die bei den Gemischbildungsuntersuchungen verwendet worden sind, da angenommen werden darf, daß sich aufgrund der hohen Wandtemperaturen und den niedrigen

Siedetemperaturen ein Dampfpolster zwischen Tropfen und Kolben ausbildet und so eine Wandbenetzung vermieden wird [RSH96]. Für das dem Isooktan ähnlichen n-Heptan liegt die Leidenfrosttemperatur bei Umgebungsdrücken bis 0,6 MPa unter 200°C [EAE01]. Bleifreies Normalbenzin besitzt hingegen schwerflüchtige Komponenten mit Siedetemperaturen oberhalb von 180°C, die sich auf dem Kolben niederschlagen können.

Ein Nachteil von Benzin gegenüber LIEF-Ersatzkraftstoffen ist, daß Gas und Flüssigkeit im gleichen Spektralbereich fluoreszieren. Somit ist die Unterscheidung der beiden Phasen mit Hilfe von geeigneten Filtern nicht möglich. Zwei Sachverhalte sprechen trotzdem für den ausschließlichen Nachweis von flüssigem Benzin auf der Kolbenwand. Erstens ist die Dichte von gasförmigem Benzin um einen Faktor von ca. 190 geringer als die von flüssigem, d.h. selbst kleinste Tropfen und dünnste Wandfilme führen zu einer starken Fluoreszenz. Zweitens wird die Fluoreszenz des verdampften Kraftstoffes durch Stöße mit den Luftmolekülen stark gelöscht, so daß nur ein geringer Beitrag zur Gesamtfluoreszenz zu erwarten ist, wie durch die folgenden Untersuchungen bestätigt wird.

Erste Aufnahmen aus dem Brennraum sind in Abb. 5.15 zu sehen. Bereits nach einer kurzen Betriebsdauer des Motors hat sich Ruß in der Kolbenmulde abgelagert. Wie in Abb. 5.15 a) zu erkennen ist, lagert er sich kreisförmig auf der Kolbenoberfläche ab. Die Kolbenvorderkante verdeckt den unteren Teil des Kreises. Die Rußfluoreszenz ist im Vergleich zu der des Wandfilms, der sich bei geschlepptem Motor ausbildet, sehr gering, wie in Abb. 5.15 b) zu sehen ist. Der Kraftstoff konzentriert sich auf eine ovale Fläche in der Kolbenmulde. Bei eingeschalteter Zündung schließlich wird der Kraftstoff aus dem zentralen Bereich der Kolbenmulde herausgetragen, wie in Abb. 5.15 c) zu erkennen ist. Grund hierfür sind die starken Gasströmungen im Brennraum, die durch die Verbrennung hervorgerufen werden. Um den Fluoreszenzbeitrag von gasförmigem Benzin zu überprüfen und gleichzeitig eine Wandbenetzung zu vermeiden, wurde in den Ansaugtakt eingespritzt. Wie in der Abb. 5.15 d) zu erkennen ist, trägt der Kraftstoffdampf nur unmerklich zur Gesamtfluoreszenz bei. Diese Ergebnisse zeigen, daß diese Meßtechnik ein geeignetes Mittel zum Wandfilmnachweis ist.

Nach Abschluß der Wandfilmuntersuchungen wurde der Kolben zur Reinigung ausgebaut. Obwohl die gesamte Betriebszeit des Motors nur bei etwa einer Stunde lag, hat sich eine ausgedehnte Rußfläche in der Kolbenmulde gebildet, siehe Abb. 5.16 a). Wie in der Vergrößerung in Abb. 5.16 b) zu erkennen ist, wurde der aufgetragene Kraftstoff in großen Tropfen aus der Mulde herausgetragen, wobei jeder Tropfen eine Rußspur hinterlassen hat.

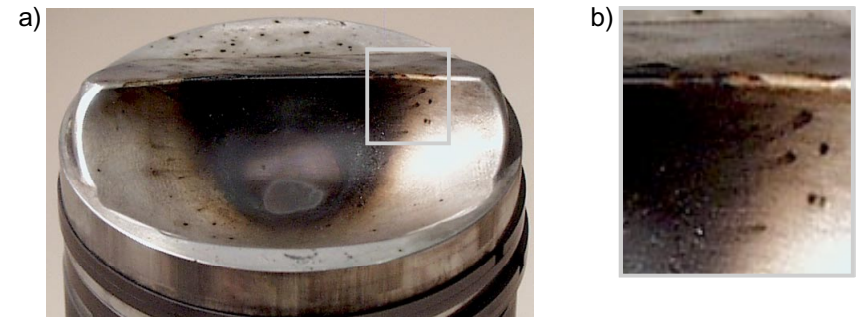


Abbildung 5.16: Kolbenoberfläche nach Abschluß der Wandfilmuntersuchungen. a) Gesamtansicht, b) Detailaufnahme.

5.3.3 Versuchsdurchführung

Für Untersuchungen wurde der Motor bei einer Drehzahl von $n=2000 \text{ min}^{-1}$ und einem indizierten Mitteldruck von $p_{mi}=2,8 \text{ bar}$ betrieben. Die Zündung bzw. der Ansteuerbeginn lagen bei $ZZP=24^\circ \text{vZOT}$ bzw. bei 60°vZOT . Aufgrund der langsamen Auslesegeschwindigkeit der eingesetzten CCD-Kamera und um die Standzeiten des Motors zu verlängern, wurde der Kraftstoff nur in jedem dritten Arbeitsspiel eingespritzt und verbrannt. Der dadurch geringere Wärmeeintrag in die Brennraumwände hatte nur einen geringen Einfluß auf die Kolbentemperatur. Vor der eigentlichen Messung wurde zur Stabilisierung des Lasers dieser zwanzig Mal gepulst. Anschließend wurden von 50° bis 310°nZOT im Abstand von 5°KW je ein Untergrundbild ohne Einspritzung und zwei Bilder mit Einspritzung aufgenommen. Neben der Variation des Einspritzdrucks wurden Injektoren mit verschiedenen Strahlwinkeln und Zerstäubungsarten entsprechend Tab. 5.1 eingesetzt.

Auswertemethoden

Die Nachbearbeitung der Bildserien erfolgte in mehreren Schritten. Als erstes wurden die Bilder auf die Laserenergie normiert und die Untergrundbilder zur Unterdrückung der Rußfluoreszenz abgezogen. Als nächstes wurde ein rechteckiger Bildbereich festgelegt, der die Kolbenmulde umfaßte. Die Intensitäten aller Pixel innerhalb dieses Rechtecks, die einen vorher festgelegten Schwellwert unterschritten, wurden, wie auch die Bereiche außerhalb des Rechtecks, auf Null gesetzt.

Um aus den aufbereiteten Bildern möglichst objektiv die Auswirkungen von Parametervariationen auf die Wandfilmbildung festzustellen, gilt es, integrale Größen zu finden, die die aufgenommenen Bilder geeignet charakterisieren. Drei Größen werden im folgenden vorgestellt.

Die erste ist die Gesamtfluoreszenz, die als ein Maß für die gesamte, auf dem Kolben befindliche Kraftstoffmenge angesehen werden kann. Für die Berechnung wurde die Intensität der einzelnen Pixel aufsummiert.

Die zweite ist die Ausdehnung des Wandfilms. Durch Setzen der verbleibenden Pixelintensitäten auf eins wurde durch eine Aufsummation die Fläche des Films ermittelt. Von einer Flächenkalibrierung wurde abgesehen, da die benetzte Oberfläche teilweise von der Muldenvorderkante verdeckt wird und die Fläche selbst stark gekrümmt ist.

Die dritte Größe ist die flächenspezifische Fluoreszenz, die aus dem Quotienten von Gesamtfluoreszenz und Wandfilmfläche gebildet wurde. Sie ist ein Maß für die mittlere Dicke des Wandfilms. Auch hier wurde keine Kalibrierung der Dicke vorgenommen, weil nicht sichergestellt werden kann, daß alle Komponenten des verwendeten Benzins das gleiche Fluoreszenzverhalten aufweisen.

Die Berechnung dieser Größen zeigt eine große Abhängigkeit von dem gewählten Schwellwert. Um diesen Einfluß genauer zu untersuchen, sind in Abb. 5.17 die Ergebnisse einer Bildsequenz kurbelwinkel aufgelöst dargestellt. Zur Kurvenglättung wurde über 25°KW gemittelt. Für einen Schwellwert von null sind die Intensitäten für die Gesamtfluoreszenz und die Wandfilmfläche am größten, der Quotient aus beiden am kleinsten. Wird der Schwellwert schrittweise erhöht, werden Fluoreszenz und Fläche geringer, der Quotient größer. Eine weitere Erhöhung der Schwelle führt zu einer immer geringeren Veränderung der einzelnen Kurvenverläufe. Für die folgenden Untersuchungen wurde daher der Schwellwert auf 3000 festgesetzt. Die Aussagekraft der Ergebnisse wurde hierdurch nicht beeinflusst. Dieser Schwellwert ermöglichte es außerdem, den ausgebildeten

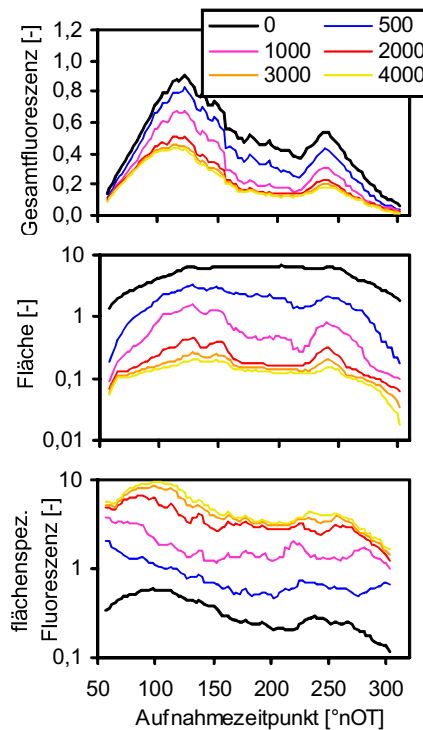


Abbildung 5.17: Einfluß des Schwellwertes auf a) die Gesamtfluoreszenz des Wandfilms, b) die Wandfilmfläche und c) die flächenspezifische Fluoreszenz.

Wandfilm zuverlässig zu detektieren.

5.3.4 Einflüsse auf die Wandfilmbildung

Im folgenden werden die Auswirkungen von den Parametern Einspritzdruck, Strahlwinkel und Zerstäubungskonzept auf die Wandfilmbildung untersucht und die Zusammenhänge zwischen Wandfilm und Abgas hergestellt.

5.3.4.1 Einspritzdruck

Der Einspritzdruck p_{rail} zeigt einen großen Einfluß auf die Strahlausbreitung. Wie in Kapitel 4 gezeigt wurde, führt ein erhöhter Einspritzdruck sowohl zu einer größeren Eindringtiefe als auch zu einer geringeren Breite des Kraftstoffstrahls.

Bei den wandgeführten Brennverfahren ist besonders die Eindringtiefe des Sprays eine wichtige Größe, denn sie bestimmt die Stärke der Spray-/Wandwechselwirkung.

In Abb. 5.18 ist die zeitliche Entwicklung der Eindringtiefen für das 75° -Drallventil dargestellt. Außerdem sind der Abstand von der Ventilmündung zur Kolbenoberfläche und der Auftreffwinkel aufgetragen, wobei den Berechnungen dieser Kurven der o.g. Ansteuerbeginn von 60°vZOT zugrunde lag. Die vertikalen Linien in dem Diagramm markieren den Zeitbereich von $220\ \mu\text{s}$, in dem die einzelnen Sprays für die unterschiedlichen Drücke den Kolbenboden erreichen. Es zeigt sich, daß sich der Kolben innerhalb dieser Zeit nur um eine Strecke von 2,3 mm bewegt und sich der Auftreffwinkel um 2° ändert. Damit bleibt die Brennraumgeometrie bei der ersten Wandberührung des Sprays nahezu unverändert. Die Ausbildung unterschiedlicher Wandfilme ist dann auf eine veränderte Wechselwirkung der Strahlfront mit der Kolbenmulde zurückzuführen.

Auf den Fluoreszenzbildern in Abb. 5.19 ist zu erkennen, daß sich der Wandfilm mit steigendem Druck in den oberen Teil der Kolbenmulde ver-

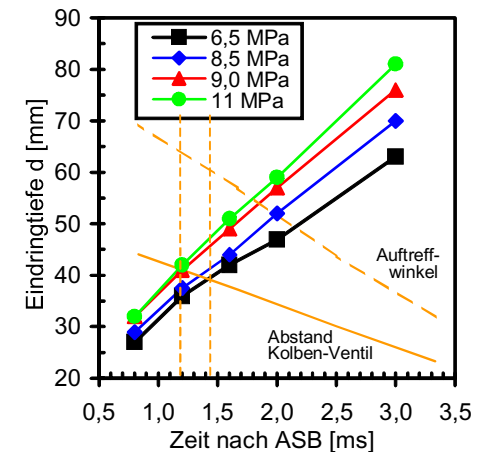


Abbildung 5.18: Sprayeindringtiefen des 75° -Drallventils bei 400 kPa Gegendruck. Abstand der Ventilmündung zur Kolbenoberfläche und Auftreffwinkel.

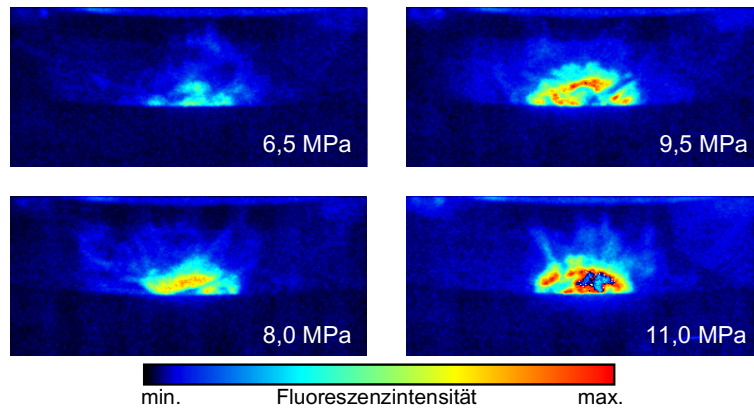


Abbildung 5.19: Einfluß des Einspritzdrucks auf die Wandfilmbildung

lagert. Der Grund hierfür ist, daß anders als bei der Einspritzung in eine ruhende Druckkammeratmosphäre die verstärkte Reverse-Tumble-Strömung die impulschwächeren Sprays vorzeitig auf den Kolben auftreffen läßt. Die aus den Bildern abgeleiteten optischen Größen in Abb. 5.20 steigen bis zu einem Einspritzdruck von 9,5 MPa monoton an. Für den höchsten Druck fallen die Gesamtfluoreszenz und die Wandfilmfläche leicht ab. Die Zunahme der flächenspezifischen Fluoreszenz und damit der Wandfilmdicke bei der Druckerhöhung ist sowohl auf die verstärkte Wechselwirkung zwischen Kolbenoberfläche und Spray als auch auf die schlankere Strahlform zurückzuführen.

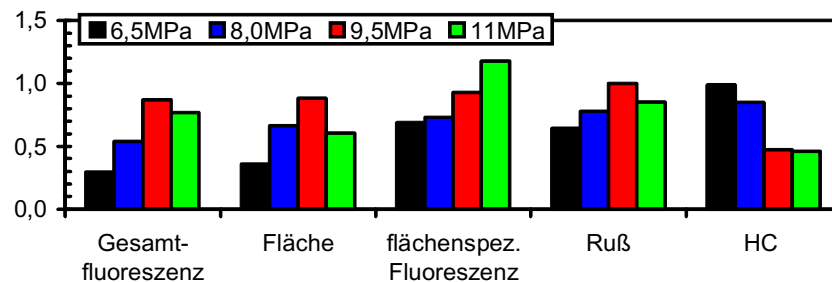


Abbildung 5.20: Einfluß des Einspritzdrucks auf die optischen Größen sowie Schwarzauch und HC-Emission. Normierte Größen.

Vergleicht man das Verhalten der Wandfilmgrößen mit den zu diesen Betriebspunkten gehörenden Ruß- und HC-Emissionen, so fällt das gleichartige Verhalten von Ruß, Gesamtfluoreszenz und Fläche auf. Dieses deutet darauf

hin, daß durch den Abbrand des Wandfilms im Expansionstakt erhebliche Rußmengen entstehen, die einen großen Beitrag zu der gesamten, während der Verbrennung entstandenen Rußmenge leisten.

Zwischen den HC-Emissionen und dem Wandfilm läßt sich kein Zusammenhang finden. Es zeigt sich ein unerwartet gegenläufiges Verhalten zur Wandfilmfluoreszenz. Obwohl der Wandfilm sich für höhere Einspritzdrücke stärker ausbildet und sich damit die Emissionen unverbrannter Kohlenwasserstoffe ebenfalls erhöhen sollte, tritt das Gegenteil ein. Damit muß es wie auch bei der Rußbildung weitere Prozesse geben, die für einen ungenügenden Durchbrand der Ladung sorgen und die den Beitrag des Wandfilms zu den HC-Emissionen überdecken, wie z.B. ein zu starkes Ausmagern in den Randbereichen der Gemischwolke, so daß dort der Kraftstoff nicht mehr verbrannt werden kann.

5.3.4.2 Strahlwinkel

Nachdem der Einspritzdruck und damit der Strahlimpuls variiert wurde, soll nun bei gleichem Impuls der Einfluß des Strahlwinkels auf den Wandfilm untersucht werden.

In Abb. 5.21 ist der zeitliche Verlauf der Sprayeindringtiefen für Drallventile mit den Öffnungswinkeln von 60° , 75° und 90° bei einem Einspritzdruck von 11 MPa und einem Gegendruck von 400 kPa dargestellt. Zusätzlich sind auch hier der Auftreffwinkel und der Abstand zwischen Ventilmündung und Kolben aufgetragen. Es zeigt sich, daß der erste Kontakt der Sprays in einem Zeitbereich von $700 \mu\text{s}$ erfolgt. Der Abstand zwischen Kolben und Ventilmündung verringert sich in dieser Zeit um 6 mm und der Auftreffwinkel des Sprays um 10° auf $58,5^\circ$. Die Brennumgeometrie ist bei dem ersten Wandkontakt der verschiedenen Sprays nicht mehr gleich.

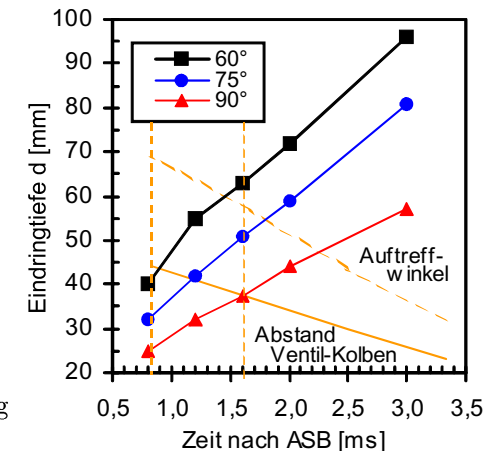


Abbildung 5.21: Sprayeindringtiefe in Abhängigkeit des Öffnungswinkels, Abstand der Ventilmündung zum Kolben und Auftreffwinkel.

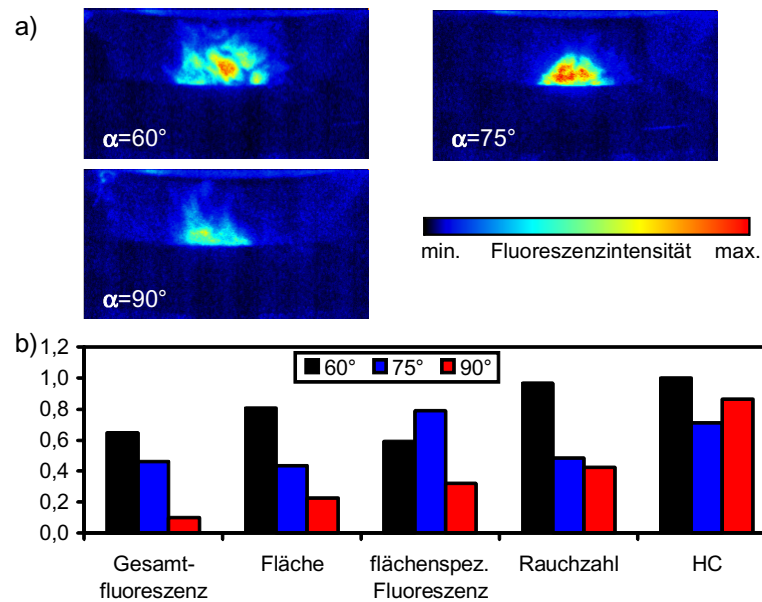


Abbildung 5.22: Variation des Öffnungswinkels. a) LIF-Wandfilmbilder, b) Wandfilmgrößen und Abgasemissionen.

In den Fluoreszenzbildern in Abb. 5.22 a) ist zu erkennen, daß sich die Lage des Wandfilms in der Kolbenmulde für größere Strahlwinkel nach unten verschiebt. Ein breiteres Spray bietet der Luftströmung eine größere Angriffsfläche und läßt sich leichter in Richtung Brennraummulde ablenken.

Vergleicht man die Ergebnisse aus den optischen Untersuchungen mit den Abgasemissionen in Abb. 5.22 b), so stellt sich ein gleichartiger Verlauf von Ruß, Gesamtfluoreszenz und Fläche dar. Die flächenspezifische Fluoreszenz ist für das 75° -Ventil am größten, die HC-Emission am geringsten. Auch hier ist die HC-Emission nicht allein von der Wandfilmstärke abhängig, es zeigt sich vielmehr, daß das 75° -Ventil für dieses Brennverfahren bezüglich Rauchzahl und HC-Emission optimal ist.

5.3.4.3 Vergleich Drallventil mit Mehrlochventil

Die motorischen Untersuchungen haben gezeigt, daß neben den Drallventilen auch Mehrlochventile für den Einsatz in diesem Brennverfahren geeignet sind. Bei angepaßtem Strahlwinkel zeigen beide Konzepte eine vergleichbare Zerstäubungsqualität und Eindringtiefe. Für den Vergleich mit dem 75° -Drallventil wurde das 50° -Mehrlochventil herangezogen. Wie in dem Kapitel

4 gezeigt wurde, sind die Sprays der beiden Ventile für einen Gegendruck von 400 kPa sehr gut miteinander vergleichbar. Es kann daher angenommen werden, daß die Kraftstoffstrahlen beider Ventile zu fast gleichen Zeiten den Kolbenboden erreichen. Trotzdem zeigen sich bei der Gegenüberstellung

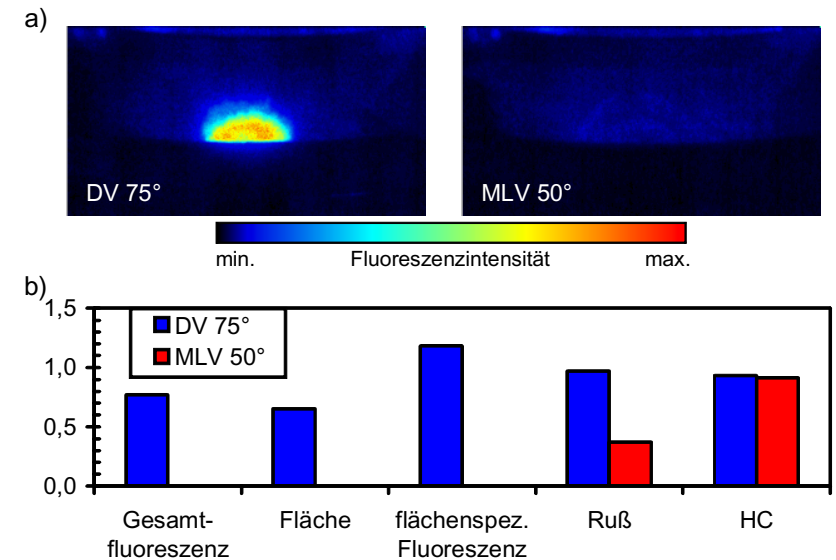


Abbildung 5.23: Einfluß verschiedener Zerstäubungsarten auf die Wandfilmbildung. a) Wandfilmbilder für das 75° -Drallventil und das 50° -Mehrlochventil, b) Wandfilmgrößen und Abgasemissionen.

große Unterschiede. Wie in Abb. 5.23 a) zu erkennen ist, bildet sich für einen Einspritzdruck von 11 MPa bei dem Drallventil ein deutlich sichtbarer Wandfilm aus. Im Gegensatz dazu läßt sich bei dem Mehrlochventil zu dem Aufnahmezeitpunkt von 65° nOT keine Benetzung mehr nachweisen. Ein Grund hierfür kann die Innenströmung des Sprays sein, die, obwohl sie Erscheinungsform des Sprays nur gering beeinflusst, eine große Auswirkung auf die Spray-Wand-Wechselwirkung hat. Der vom Mehrlochventil aufgebrauchte Wandfilm ist bis zu dem Aufnahmezeitpunkt bereits verdampft.

In Abb. 5.23 b) sind den Wandfilmgrößen die Abgasemissionen gegenübergestellt. Die Wandfilmgrößen und die Schwarzauchzahl zeigen einen ähnlichen Verlauf. Die HC-Emissionen bleiben von der Zerstäubungsart unberührt.

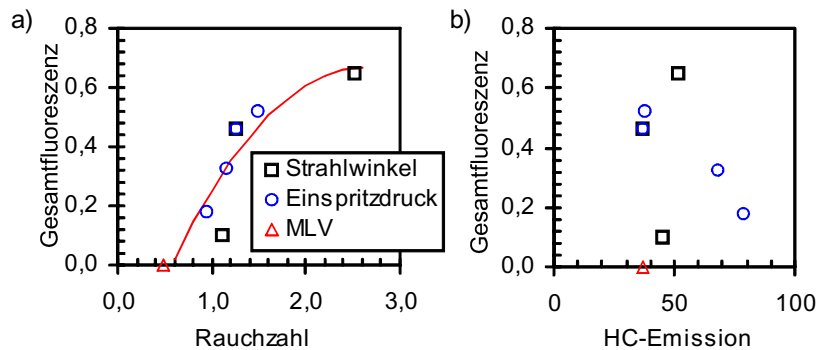


Abbildung 5.24: Auftragung der Wandfilmfluoreszenz gegen die Abgasemissionen Ruß und HC für die durchgeführten Parametervariationen.

5.3.5 Zusammenfassung

In diesem Abschnitt wurde gezeigt, daß sich mit der laserinduzierten Fluoreszenz der flüssige Kraftstoff auf der Kolbenoberfläche während der Verbrennung nachweisen läßt. Der Einfluß des dampfförmigen Kraftstoffes und des auf der Kolbenoberfläche abgelagerten Rußes auf die Auswertung der Fluoreszenzbilder ist vernachlässigbar gering.

Um den Einfluß des Wandfilms auf das Abgas genauer zu untersuchen, ist für die durchgeführten Parametervariationen in Abb. 5.24 die Gesamtfloreszenz des Wandfilms gegen die Schwarzrauchzahl und gegen die HC-Emission aufgetragen. Für die Schwarzrauchzahl ergibt sich ein enger Zusammenhang zwischen beiden Größen. Eine erhöhte Masse des Wandfilms führt zu einer größeren Schwarzrauchzahl im Abgas. Der Wandfilm ist damit eine wesentliche Quelle für Ruß. Daß es neben dem Wandfilm noch weitere Rußquellen geben muß, wird an dem Mehrlochventil deutlich, bei dem kein Wandfilm nachgewiesen wurde. Durch den Abbrand zu fetter Kraftstoffbereiche im Brennraum bildet sich Ruß, der in der zur Verfügung stehenden Zeit nicht mehr oxidiert wird. Wie groß der Anteil der einzelnen Prozesse an der gebildeten Rußmenge ist, kann nur mit weiterführenden optischen Meßtechniken erschlossen werden. Für zeitlich hochaufgelöste Messungen eignen sich die Laserextinktion und die laserinduzierte Inkandeszenz. Ein Zusammenhang zwischen dem gebildeten Wandfilm und der HC-Emission ist nicht feststellbar.

5.4 Flammenemissionsspektroskopie

Nach den UV-spektroskopischen Untersuchungen der Gemischbildung zur Sichtbarmachung des Ladungstransportes soll in diesem Kapitel eine Meßtechnik angewendet werden, mit deren Hilfe die der Zündung folgende Verbrennung charakterisiert werden kann: die Flammenemissionsspektroskopie (FES). Der große Vorteil dieser Methode besteht in der Einfachheit des optischen Aufbaus.

In diesem Kapitel werden die für die Betriebsart des Motors typischen Spektren vorgestellt und es wird auf die Besonderheiten der Verbrennung bei der Benzindirekteinspritzung eingegangen. Mit Hilfe eines vereinfachten optischen Aufbaus wird anschließend die Verbrennung untersucht und ein Bezug zu der Qualität der Gemischbildung und zu den thermodynamischen Ergebnissen gesucht. Verschiedene Auswertemöglichkeiten der Flammenbilder werden miteinander verglichen.

5.4.1 Auswirkung des Einspritzdrucks

Wie in den ersten Untersuchungen gezeigt wurde, kann mit Hilfe eines Spektrographen die Art der Kraftstoffverbrennung leicht festgestellt werden. Im nächsten Schritt wäre eine Aufnahmetechnik wünschenswert, die anstelle einer eindimensionalen Ortsauflösung eine flächenhafte Information über die Verbrennung liefert. Hierfür hat sich der bereits vorgestellte Versuchsaufbau als geeignet erwiesen.

In Abb. 5.25 a) ist eine aus dem Brennraum aufgenommene Bildserie zu sehen. Anhand dieser Darstellung wird deutlich, daß durch eine geeignete Filtertechnik einander ergänzende Aussagen aus dem Flammeneigenleuchten gewonnen werden können. Deutlich sichtbar ist die starke Abhängigkeit des Rußleuchtens vom Einspritzdruck. Zu erkennen ist außerdem, wie zu frühen Zeiten die Rußwolke, hervorgerufen durch den Wandfilmabbrand, aus der Kolbenmulde herausgetragen wird. Im Gegensatz zum stark strukturierten Rußeigenleuchten zeigt die OH-Emission eine gleichmäßigere Verteilung um die Kolbenkrone. Der Einspritzdruck hat keine Auswirkung auf die Lage und die Intensität des OH-Leuchtens.

Der Unterschied zwischen dem Ruß- und OH-Leuchten wird auch bei der Betrachtung der zeitlichen Emissionsverläufe in Abb. 5.25 b) deutlich. Während für das OH die Emission in dem betrachteten Brennraumbereich für die untersuchten Einspritzdrücke nur leicht abnimmt, wird die Rußemission stark reduziert. Auffällig ist das bis weit in die Expansionsphase nachgewiesene OH. In Abb. 5.26 a) sind Ergebnisse für das 50°-Zehnlochventil dargestellt. Die räumliche Lage der Ruß- und OH-Emission ist vergleichbar mit dem 75°-Drallventil. Der Schwerpunkt der Rußemission befindet sich leicht

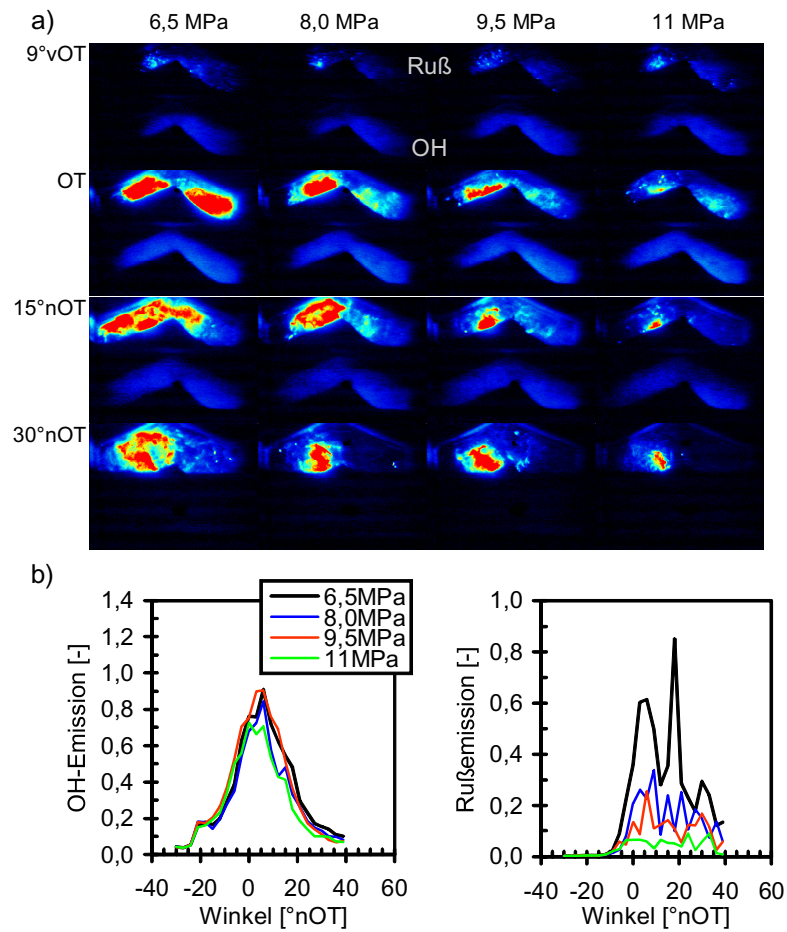


Abbildung 5.25: Einfluss des Einspritzdrucks auf die Flammenemission. 75°-Drallventil. a) Thermische Rußstrahlung und OH-Emission, b) zeitaufgelöste Gesamtemission von OH und Ruß.

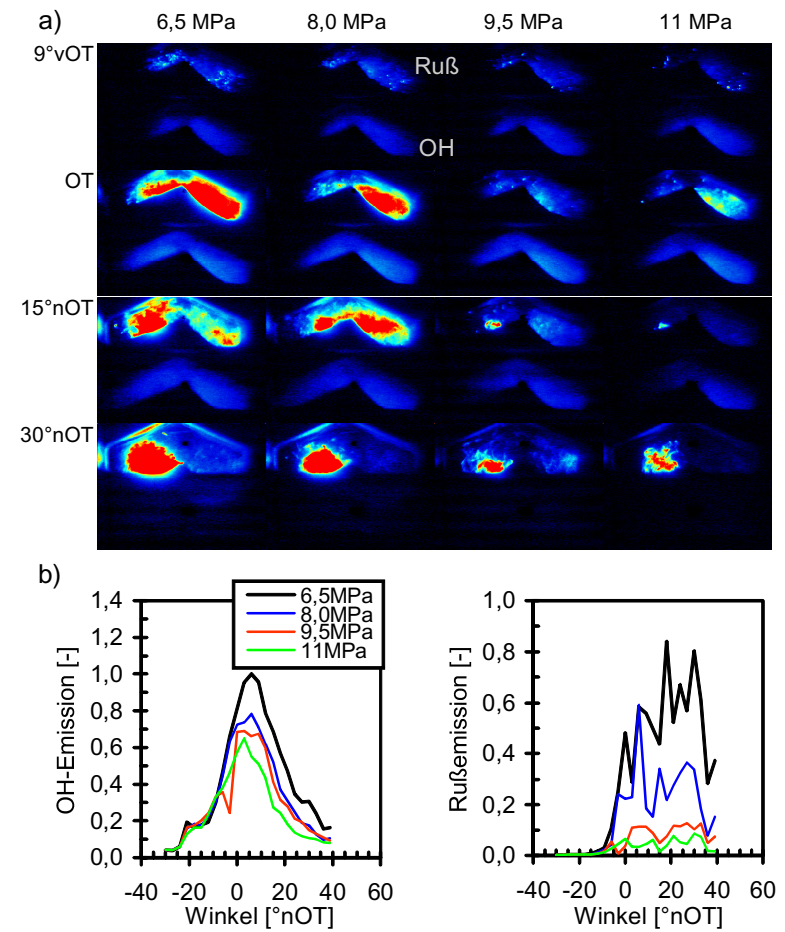


Abbildung 5.26: Einfluss des Einspritzdrucks auf die Flammenemission. 50°-Mehrlochventil. a) Thermische Rußstrahlung und OH-Emission, b) zeitaufgelöste Gesamtemission von OH und Ruß.

im rechten Teil des Brennraums über der Kolbenmulde. Die OH-Emission verlagert sich leicht mit steigendem Einspritzdruck in den rechten Teil des Brennraums. Die integralen Emissionen nehmen für OH leicht und für den Ruß stark ab.

Das Verbrennungsleuchten zeigt bei den beiden verwendeten Ventilen gleiches Verhalten bei der Veränderung des Einspritzdrucks. Die Intensitäten von OH nehmen leicht ab, wohingegen eine sehr starke Intensitätsabnahme des Rußes zu beobachten ist. Das intensive Rußleuchten bei niedrigen Drücken deutet auf einen ungenügenden Lufteintrag in die Ladungswolke hin, so daß bei der Verbrennung in den lokal zu fetten Ladungsbereichen verstärkt Ruß gebildet wird.

5.4.2 Ansteuerbeginn

Als nächster Schritt soll die Auswirkung des Ansteuerbeginns auf die Verbrennung untersucht werden. Wie im vorherigen Kapitel gezeigt wurde, nimmt die Rußemission bei einer Absenkung des Einspritzdrucks stark zu. Verantwortlich dafür ist der geringere Strahlimpuls, der zu einem geringeren Lufteintrag in das Spray führt. Eine Ausmagerung der Gemischwolke durch das Hineindiffundieren von Umgebungssauerstoff kann dadurch erreicht werden, daß der Kraftstoff früher in den Brennraum eingespritzt wird.

In Abb. 5.27 sind die Emissionsbilder und die integralen Emissionsverläufe für das 75°-Drallventil bei verschiedenen Ansteuerbeginnen und Einspritzdrücken dargestellt. Bei beiden Einspritzdrücken ist zu erkennen, daß die Gesamtintensitäten vergleichbar groß sind, was aufgrund der gleichbleibenden Kraftstoffmenge zu erwarten ist, und daß die OH-Gesamtintensität mit späterer Einspritzung leicht zunimmt, weil die Ladungswolke kompakter ist und damit die Verbrennung auf einen kleineren Bereich konzentriert ist. Bei früher Einspritzung ist die Verbrennungszone ausgedehnter. Damit kann OH im optisch unzugänglichen Bereich nicht erfaßt werden, so daß scheinbar geringere Emissionen auftreten. Bei der Rußstrahlung zeigt sich ein ähnliches Verhalten, nur sind hier die Unterschiede wesentlich größer. Bei der sehr späten Einspritzung bei 51°vOT ist das Rußleuchten am größten. Wird die Zeit für die Gemischaufbereitung um 9°KW / 0,75 ms erhöht, erniedrigen sich die Emissionen erheblich. Eine Verlegung des Einspritzzeitpunkts zu noch früheren Zeiten führt nur bei 3,5 MPa zu einer weiteren Reduzierung, wobei man sich dem instabilen Motorbetriebsbereich stark annähert. Sieht man das Eigenleuchten der Verbrennung als ein Maß für die Qualität der Schichtung an, so führt eine Erhöhung des Einspritzdrucks aufgrund des verbesserten Impulsaustausches zwischen Luft und Kraftstofftropfen zu einem größeren Lufteintrag in das Spray und damit zu geringeren lokalen Lambda-werten. Eine Reduzierung des Eigenleuchtens bei 3,5 MPa kann durch eine

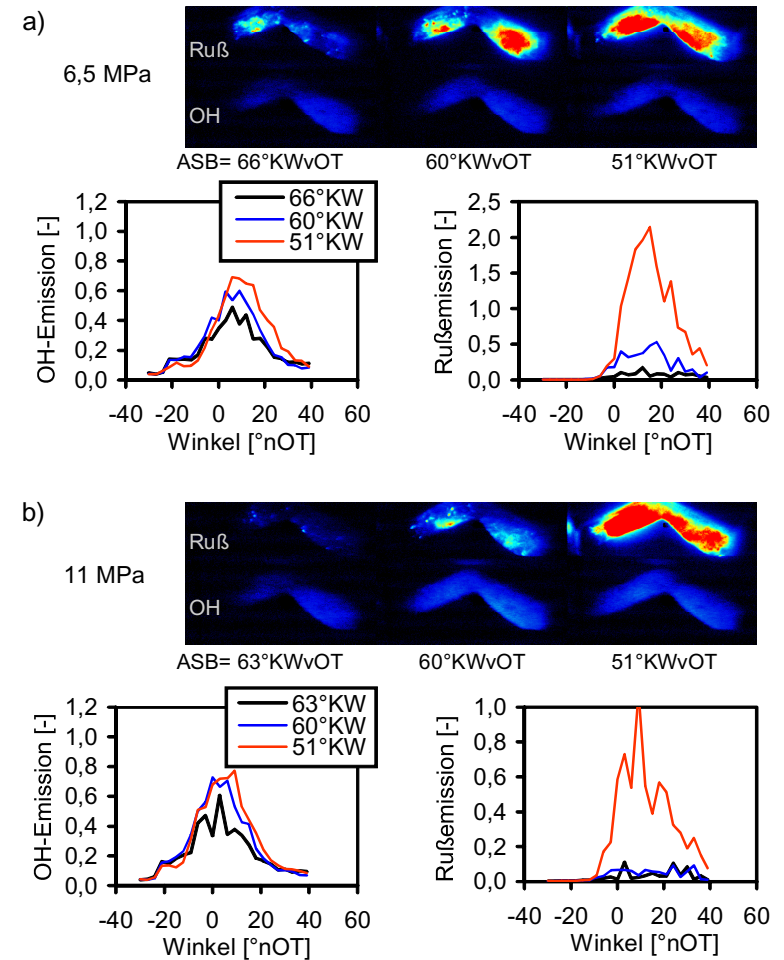


Abbildung 5.27: Einfluß des Ansteuerbeginns auf die Flammenemission. 75°-Drallventil. a) Ergebnisse bei 6,5 MPa und bei b) 11 MPa.

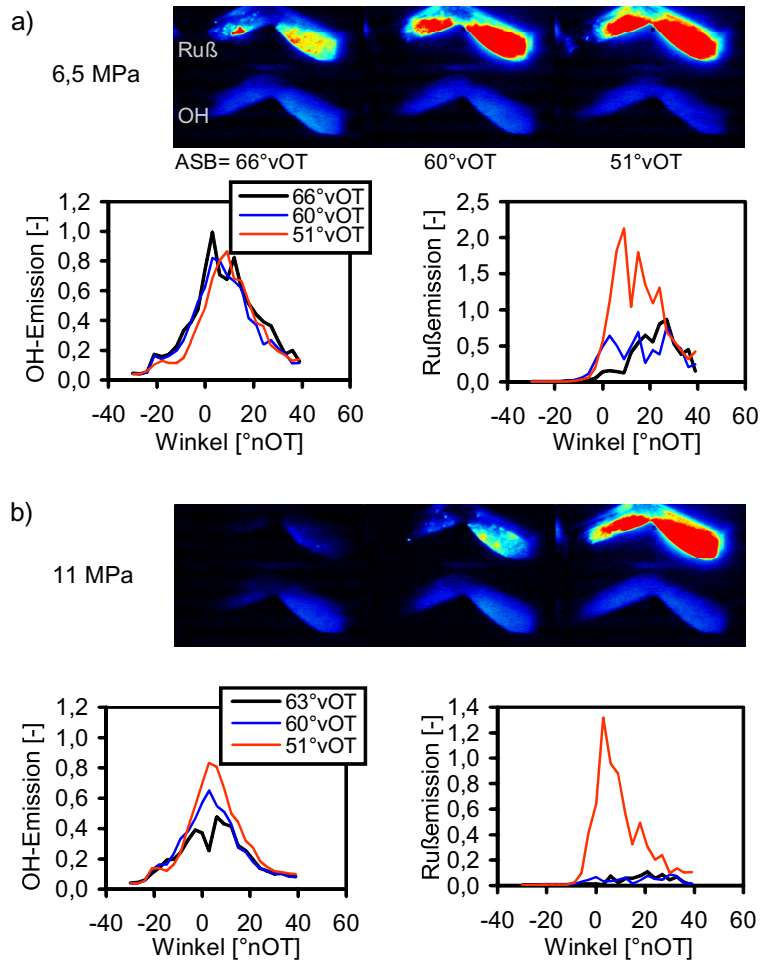


Abbildung 5.28: Einfluss des Ansteuerbeginns auf die Flammenemission. 50°-Mehrlochventil. a) Ergebnisse bei 6,5 MPa und bei b) 11 MPa.

frühe Einspritzung kompensiert werden. Diese Maßnahme führt allerdings zu einem verschlechterten Gleichlauf. Untersuchungen des 50°-Mehrlochventils zeigen ein ähnliches Verhalten, siehe Abb. 5.28.

5.4.3 Strahlwinkel

In dem letzten Abschnitt dieses Kapitels soll auf den Einfluß des Strahlwinkels bei Drallventilen auf das Rußleuchten eingegangen werden. Die Ergebnisse finden sich in Abb. 5.29.

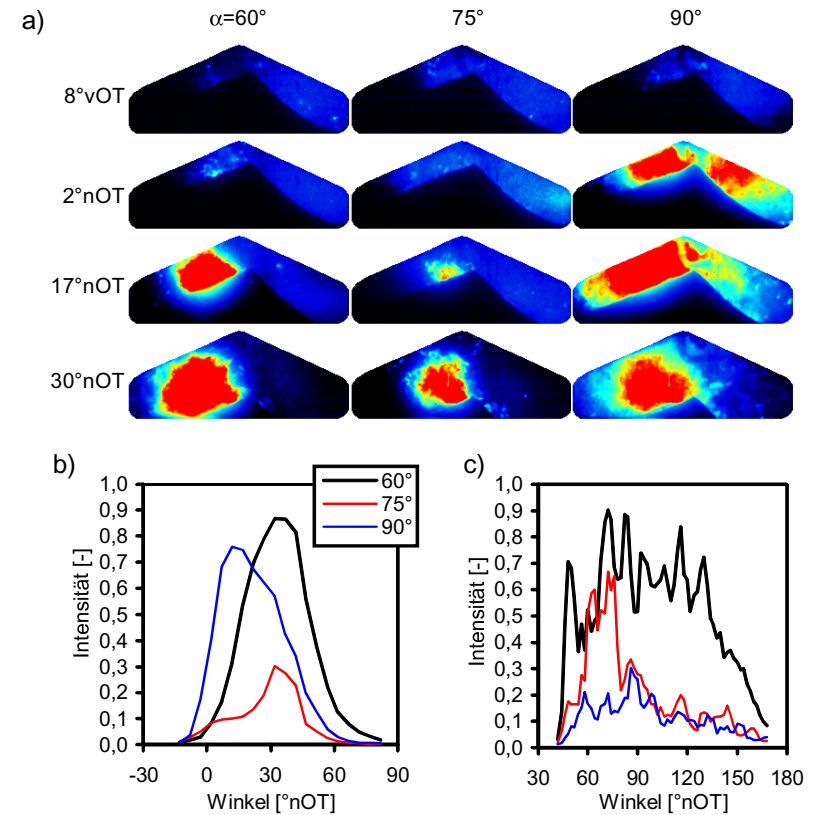


Abbildung 5.29: Einfluss des Strahlwinkels auf die Flammenemission. Drallventil. a) Bilder der Verbrennung. b) Zeitaufgelöste Gesamtemission durch das Giebfelfenster und c) den Quarzzylinder.

Wie in Kapitel 5.3.5 gezeigt wurde, bildet das 60°-Ventil den stärksten Wandfilm aus. Dementsprechend ist hier das Austreten des vom Kolben

abdampfenden und stark rußend verbrennenden Kraftstoffes zu sehen. Bei 2°nOT erscheint eine stark leuchtende Rußwolke oberhalb der Kolbenmulde, nimmt für 37°nOT ihre maximale Ausdehnung an und verläßt bei 72°nOT das Beobachtungsvolumen. Die Rußwolke zeigt ein stabiles Verhalten, denn sie verteilt sich nicht gleichmäßig über den gesamten Brennraum. Ein völlig anderes Verhalten zeigt das Eigenleuchten bei Verwendung des 90° -Ventils. Hier sind Strahlpenetration und Kolbenbenetzung am geringsten. Ein Ausreten einer Rußwolke aus der Kolbenmulde ist nicht zu erkennen, vielmehr bildet sich der Ruß in dem Brennraumbereich links neben der Zündkerze unterhalb der Auslaßventile. Die Rußemission hat bei 12°nOT ihr Maximum. Die Rußwolke selbst hat eine große Ausdehnung im Brennraum, sie verschwindet bei 62°nOT aus dem Beobachtungsvolumen. Das 75° -Ventil nimmt bezüglich der Emission eine Mittelstellung zwischen den beiden bereits besprochenen Ventilen ein. Ein Rußaustritt aus der Kolbenmulde ist ab 12°nOT festzustellen und die Rußwolke orientiert sich links unterhalb von der Zündkerze. Die Gesamtemission ist im Vergleich zum 60° - und 90° -Drallventil am geringsten, wird bei 37°nOT maximal und verschwindet bei 52°nOT .

Betrachtet man den zeitlichen Verlauf der Rußemission, so läßt sich erkennen, daß anhand der Rußemission in der Expansionsphase Rückschlüsse auf die Rauchzahl im Abgas gezogen werden können. Weil sich die Rußwolke in den unteren Teil des Brennraums bewegt, wurde das Eigenleuchten über den Quarzzylinder aufgenommen. In Abb. 5.29 c) ist der zeitliche Verlauf aufgetragen. Es läßt sich die gleiche Abhängigkeit wie in den Abgasuntersuchungen wiederfinden. Mit kleiner werdenden Strahlwinkeln erhöht sich die Rußstrahlung und, wie bereits gezeigt, die Schwarzauchzahl.

5.4.4 Zusammenfassung

In diesem Abschnitt wurden verschiedene Einflüsse auf die Verbrennung untersucht. Dabei zeigte sich, daß sich die Emissionen des OH-Radikals bei 306 nm nur gering veränderten. Die thermische Rußstrahlung hingegen reagierte sehr empfindlich auf die Parametervariationen.

In Abb. 5.30 ist die Gesamtintensität der Rußstrahlung im OT für das 75° -Drallventil und das 50° -Mehrlochventil für den höchsten und niedrigsten Einspritzdruck gegen den Ansteuerbeginn aufgetragen. Eine frühe Einspritzung führt zu einem besseren Luftertrag in das Spray und die Gemischwolke magert stärker aus. Die Rußemission ist für beide Ventile gering. Bei einem zu späten Ansteuerbeginn ist die Gemischaufbereitung nicht genügend weit fortgeschritten, so daß während der Verbrennung noch fette Gemischzonen vorhanden sind. Eine verstärkte thermische Rußstrahlung ist die Folge.

Um die Abhängigkeit der optisch aufgenommenen Rußstrahlung von den

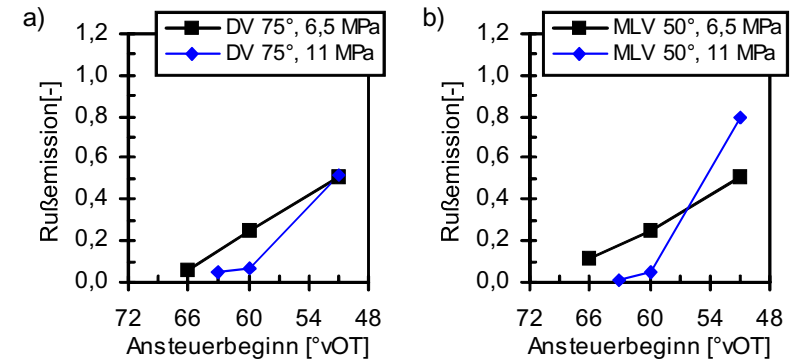


Abbildung 5.30: Einfluß von Einspritzdruck und Ansteuerbeginn auf die Flammenemission bei OT. a) 75° -Drallventil, b) 50° -Mehrlochventil.

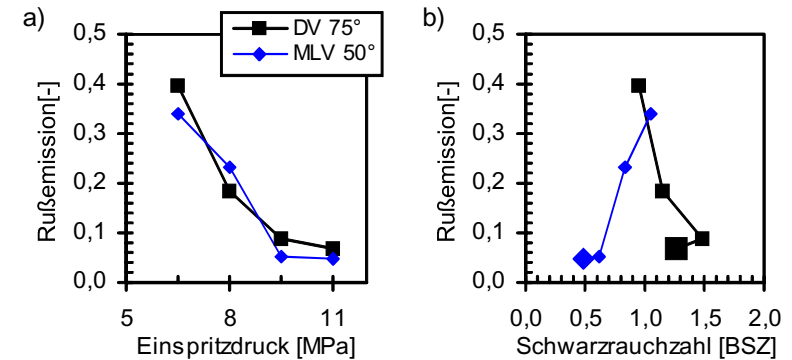


Abbildung 5.31: Einfluß des Einspritzdrucks auf die Flammenemission bei OT a), Vergleich der gesamten Rußemission mit der Schwarzauchzahl b).

motorischen Größen genauer zu untersuchen, ist in Abb. 5.31 die Rußstrahlung gegen den Einspritzdruck und gegen die Schwarzauchzahl aufgetragen. Bei beiden Ventilen zeigt sich eine starke Abnahme der Strahlung mit steigendem Einspritzdruck, und die Emissionen sind vergleichbar. Ein höherer Einspritzdruck erzeugt somit einen stärkeren Luftertrag in das Spray und führt zu einer besseren Gemischaufbereitung, so daß fette Gemischzonen vermindert auftreten.

Die Auftragung der Rußemission gegen die Schwarzauchzahl hingegen zeigt für die beiden Ventile einen gegenläufigen Zusammenhang. Bei dem höchsten Einspritzdruck ist die Rauchzahl für das 50° -Mehrlochventil am kleinsten und für das 75° -Drallventil am größten. Eine Erklärung für die-

ses unterschiedliche Verhalten liegt sicher in der Wandfilmbildung. Wie im vorherigen Kapitel erläutert wurde, konnte bei dem Mehrlochventil im Gegensatz zum Drallventil im Expansionstakt kein Wandfilm mehr nachgewiesen werden. Um die dort aufgeführten Rußbildungsprozesse genauer zu verstehen, muß bei zukünftigen Untersuchungen eine optische Meßtechnik zur Bestimmung der Rußkonzentration eingesetzt werden.

Kapitel 6

Luftgeführtes Brennverfahren

In diesem Kapitel soll das luftgeführte Brennverfahren mit einstellbarer Vorwärts-Tumble-Intensität untersucht werden. Im Gegensatz zu den wandgeführten Brennverfahren wird hier die Ladung über eine ausgeprägte Luftströmung in Richtung Zündkerze geleitet.

Zu Anfang sollen die Ergebnisse der thermodynamischen Untersuchungen von zwei Einspritzventilen, einem 60°-Drallventil und einem 50°-Mehrlochventil, vorgestellt werden. Mit Hilfe der LIF-Meßtechnik werden grundlegende Einblicke in den Gemischbildungsprozeß gewonnen, bevor mit Hilfe des LIEF-Aufbaus der Ladungstransport bei motorrelevanten Ansteuerbeginnen analysiert wird. Anschließend wird die Entflammung und Verbrennung mittels der FES-Meßtechnik untersucht.

6.1 Thermodynamik

Vor dem Einsatz der optischen Meßtechniken wurde der Motorenlauf für das eingesetzte 60°-Drallventil und das 50°-Zehnlochventil charakterisiert. Wie auch bei dem wandgeführten Brennverfahren wurde für diese Ventile und für verschiedene Einspritzdrücke ein Ansteuerbeginn/Zündzeitpunkt-Kennfeld erstellt, bei dem der Motor keine oder nur geringe Aussetzer zeigte. Die für die motorischen und optischen Untersuchungen eingesetzten Ventile und die gewählten Einspritzdrücke sind in Tab. 6.1 aufgeführt. Das 75°- und 90°-Ventil wurden nur für die optischen Grundsatzuntersuchungen eingesetzt. Wie auch bei dem wandgeführten Brennverfahren wurde hier der Motor bei einem indizierten Mitteldruck von $p_{mi}=2,8$ bar und einer Drehzahl von

HDEV-Typ	α	$Q_{\text{stat}} [\frac{\text{cm}^3}{\text{s}}]$	$p_{\text{rail}} [\text{MPa}]$
Drall	60°	15	3,5 5,0 8,0 10
Zehnloch	50°	24	3,5 5,0 8,0 10
Drall	75°	15	10
Drall	90°	15	10

Tabelle 6.1: In den Untersuchungen eingesetzte Einspritzventile und die durchgeführten Druckvariationen.

$n=2000 \text{ min}^{-1}$ betrieben.

6.1.1 Stabilitätsdiagramme

Für die Beurteilung des Motorlaufs bei Verwendung eines bestimmten Ventiles eignet sich das Stabilitätsdiagramm. Hier werden die Bereiche im ZZP/ASB-Kennfeld farblich markiert, bei denen der Motor Aussetzerraten kleiner 1,0% betreibbar ist. Gerade in Hinblick auf die Serienfertigung von BDE-Motoren und die damit einhergehenden Toleranzen müssen diese Bereiche möglichst ausgedehnt sein. In Abb. 6.1 a) sind die Stabilitätsbereiche für das 60°-

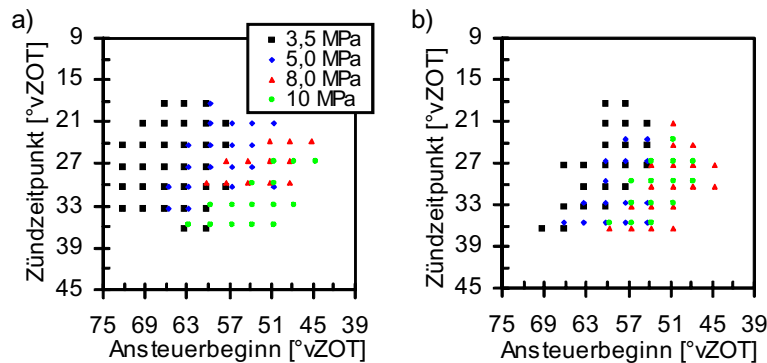


Abbildung 6.1: Stabilitätsdiagramme für a) das 60°-Drallventil und b) das 50°-Mehrlochventil.

Drallventil und in Abb. 6.1 b) für das 50°-Zehnlochventil eingezeichnet. Bei beiden Ventilen ist zu erkennen, daß sich mit steigendem Druck die Betriebsbereiche stark verkleinern und sich die Ansteuerbeginne der HDEV zu späten Zeiten verschieben. In diesen Auftragungen wird der wesentliche Unterschied zwischen dem wandgeführten und dem luftgeführten Brennverfahren deut-

lich. Die Kolbenwand kann auch bei hohen Einspritzdrücken den Kraftstoff zur Zündkerze leiten, die Luftströmung hingegen kann dieses aufgrund ihres begrenzten Impulses nicht. D.h., obwohl die Gemischbildung durch eine Erhöhung des Einspritzdrucks deutlich verbessert werden kann, wie in Kapitel 5 gezeigt werden konnte, muß bei diesem Brennverfahren der Einspritzdruck der Luftströmung angepaßt werden. Im Gegensatz zum Drallventil sind die Betriebsbereiche bei dem Zehnlochventil größer, insbesondere bei einem erhöhten Einspritzdruck p_{rail} .

HDEV	$p_{\text{rail}} [\text{MPa}]$	ASB [°KWvOT]
60°-Drall	3,5	72, 66, 57
	5,0	66, 57, 54
	8,0	57, 51, 45
	10	60, 48, 45
50°-Zehnloch	3,5	66, 57, 54
	5,0	60, 54, 51
	8,0	57, 51, 48
	10	57, 51, 48

Tabelle 6.2: In den Kammeruntersuchungen eingesetzte Einspritzventile und die durchgeführten Parametervariationen.

Anhand der Diagramme in Abb. 6.1 wurden die in Tab. 6.2 aufgeführten Punkte für die optischen Untersuchungen ausgewählt. Der erste und der letzte Ansteuerbeginn liegen an den Grenzen des stabilen Motorlaufs, bei dem mittleren lief der Motor am gleichmäßigsten.

6.1.2 Einspritzdruck

In Abb. 6.2 sind die zu den Bestpunkten gehörenden motorischen Ergebnisse für das 60°-Drallventil aufgetragen. Auffallend ist, daß mit steigendem Einspritzdruck später in den Brennraum eingespritzt werden kann. Nimmt man in dem Motor eine Luftströmung an, die während der Einspritzung konstant bleibt, wäre zu erwarten, daß aufgrund des größeren Strahlimpulses der Ansteuerbeginn nach früh zu verlegen ist, um den Transport zur Zündkerze sicherzustellen. Das hier festgestellte Verhalten deutet aber darauf hin, daß sich die Tumble-Strömung im Brennraum in der Kompression verstärkt. Obwohl sich die Gemischbildungszeit um 18°KW bzw. um 1,5 ms verringert, nehmen die Gleichlaufschwankungen ab. Der spezifische Verbrauch wird geringer. Die NO_x -Emissionen zeigen bis auf den niedrigsten Einspritzdruck ein konstantes Niveau. Die Rauchzahlen sind für alle Drücke sehr gering, sie liegen im Bereich der Nachweisgrenze des verwendeten Meßgerätes. Die HC-

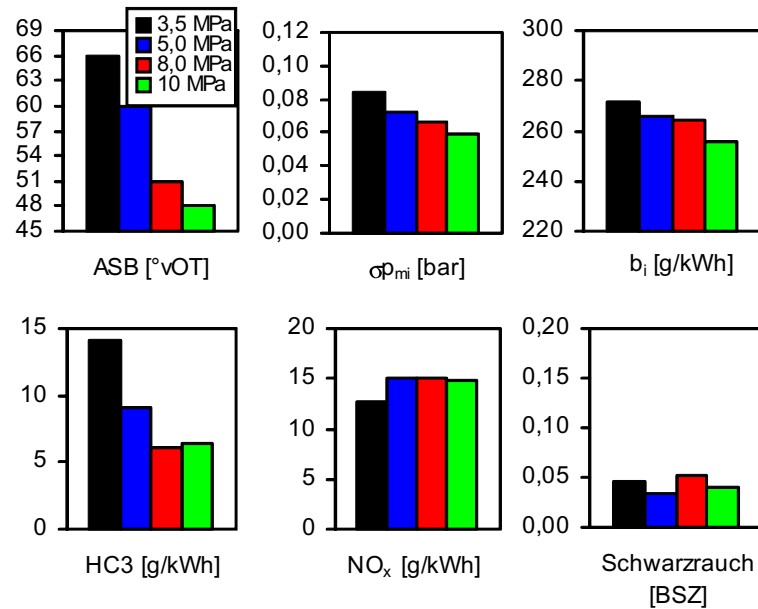


Abbildung 6.2: Variation des Einspritzdrucks. Abgasemissionen und Gleichlaufschwankungen für das 60°-Drallventil. ZZZP=27°vOT.

Emissionen nehmen bis 8 MPa stark ab und erreichen hier und bei 10 MPa ihr Minimum.

Ein dem Drallventil ähnliches Verhalten zeigt das 50°-Zehnlochventil. Die Ergebnisse der thermodynamischen Untersuchungen sind in Abb. 6.3 dargestellt. Der Ansteuerbeginn nimmt mit steigendem Einspritzdruck von 57°KW auf 51°KW ab. Der spezifische Kraftstoffverbrauch ist konstant. Auch die NO_x-Emissionen zeigen bis auf den niedrigsten Einspritzdruck konstantes Verhalten. Die HC-Emissionen und die Gleichlaufschwankungen nehmen bis 8 MPa deutlich ab und steigen für 10 MPa wieder leicht an. Die Schwarzauchzahlen sind bis auf den niedrigsten Druck sehr gering. Offenbar ist für 3,5 MPa die Zeitdauer von 30°KW bzw. 2,5 ms zu kurz, um den Kraftstoff ausreichend aufzubereiten. Ein weiterer Grund ist die starke Zunahme des Sauterdurchmessers der Kraftstofftropfen bei diesem Zerstäubungskonzept, wie in Abb. 4.7 auf S. 48 zu erkennen ist, und der die zeitgerechte Verdampfung der Tropfen behindert.

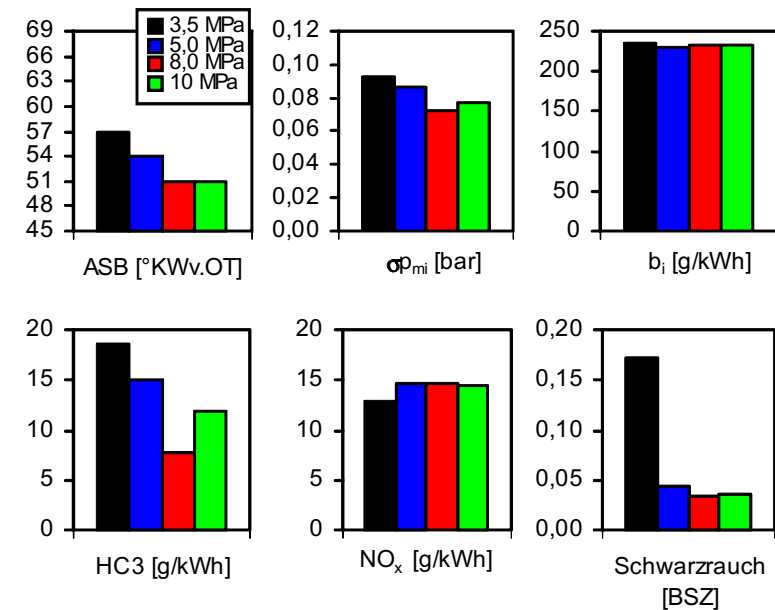


Abbildung 6.3: Variation des Einspritzdrucks. Abgasemissionen und Gleichlaufschwankungen für das 50°-Zehnlochventil. ZZZP=27°vOT.

6.2 Fluoreszenzuntersuchungen der Gemischbildung

In Abb. 6.4 ist die Brennraumgeometrie zu dem Zeitpunkt 50°vOT zusammen mit dem Kraftstoffstrahl des 60° -Drallventils dargestellt. Der blau markierte Bereich ist optisch über zwei Quarzfenster einsehbar. Wie auch bei dem wandgeführten Brennverfahren wurde hier auf Untersuchungen durch den Quarzzylinder verzichtet, weil der für die Gemischbildung interessante Bereich durch den Kolben verdeckt wird. In dieser Ansicht wird deutlich, daß ohne eine definierte Strömung im Brennraum der Kraftstoff nicht zur Zündkerze gelangen kann. Die Tumbleklappe, mit der der untere Teil des Ansaugrohrs verschlossen werden kann, ist nicht eingezeichnet.

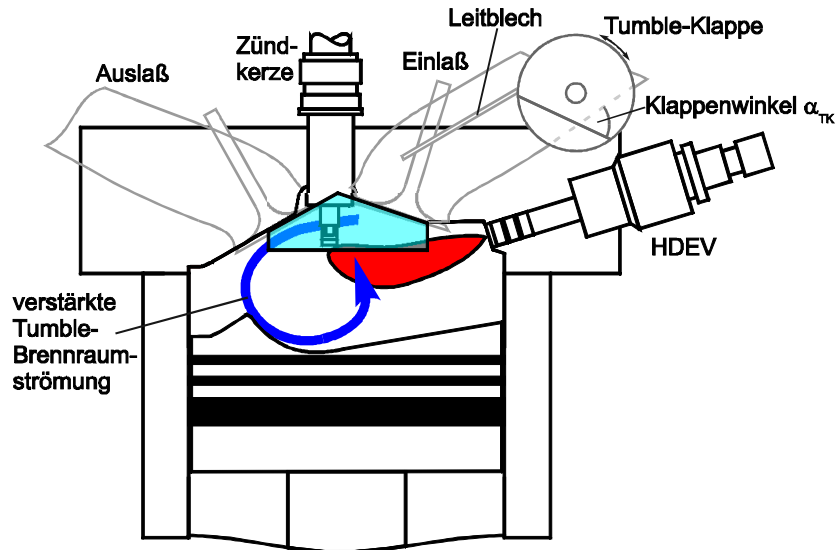


Abbildung 6.4: Luftgeführtes Brennverfahren. Brennraumgeometrie bei 50°vOT .

6.2.1 Einführende Untersuchungen zur Gemischbildung

Zu Anfang sollen grundlegende LIF-Untersuchungen zur Gemischbildung bei dem luftgeführten Brennverfahren vorgestellt werden, um den Einfluß von jedem einzelnen Parameter auf den Ladungstransport sichtbar zu machen. Hierfür war es ausreichend, Normalbenzin zu verwenden. Die im folgenden vorgestellten Bilder sind über fünf Aufnahmen gemittelt.

Einfluß der Tumbleströmung

In Abb. 6.5 ist die Gemischbildung für drei verschiedene Tumbleklappenstellungen gezeigt. Für den Klappenwinkel von $\alpha_{TK}=0^\circ$ ist die Tumbleklappe vollständig geöffnet, die Tumbleströmung bildet sich nur minimal aus, für $\alpha_{TK}=55^\circ$ ist sie vollständig geschlossen, der Tumble ist maximal. In den Aufnahmen ist bereits 48°vOT deutlich Fluoreszenz mit hoher Intensität zu erkennen. Da seit der Einspritzung bei 60°vOT erst 1 ms vergangen ist, handelt es sich hier um flüssigen Kraftstoff. Bei offener Klappe fin-

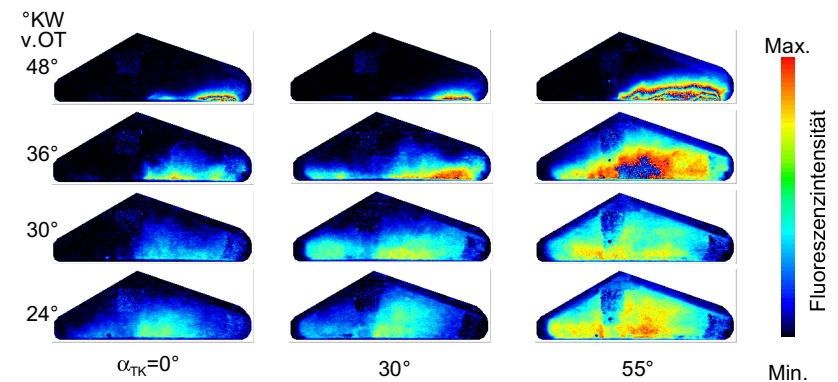


Abbildung 6.5: Einfluß des Klappenwinkels α_{TK} auf den Ladungstransport. 60° -Drallventil, $ASB=60^\circ\text{vOT}$, $p_{\text{rail}}=11\text{ MPa}$.

det kein nennenswerter Kraftstofftransport in Richtung Zündkerze statt, der Strahl durchquert unterhalb der Zündkerze den Brennraum. Ein Winkel von $\alpha_{TK}=30^\circ$ führt zu einem leicht verbesserten Transport. Erst bei einer völlig geschlossenen Tumbleklappe ist die Luftströmung in der Lage, den Strahl in Richtung Zündkerze abzulenken. Damit zeigt sich, daß bei diesem Brennverfahren eine Anstellung der Tumbleklappe für den geschichteten Betrieb zwingend notwendig ist. Die folgenden Untersuchungen wurden deswegen mit einer vollständig geschlossenen Tumbleklappe und der damit stärksten einstellbaren Tumbleströmung durchgeführt.

Einfluß des Einspritzdrucks

Im nächsten Schritt wurde der Einfluß des Einspritzdrucks untersucht. Die Ergebnisse sind in Abb. 6.6 dargestellt. Bei dem kleinsten Druck von $p_{\text{rail}}=6,5\text{ MPa}$ hat die Strömung einen starken Durchgriff auf den Ladungstransport. Bei 48°vOT wird bereits ein kleiner Teil und bei 42°vOT der obere Teil der Kraftstoffwolke sichtbar. Bei 30°vOT befindet sich der Schwerpunkt der Kraftstoffwolke bereits stromabwärts hinter der Zündkerze. Von einer opti-

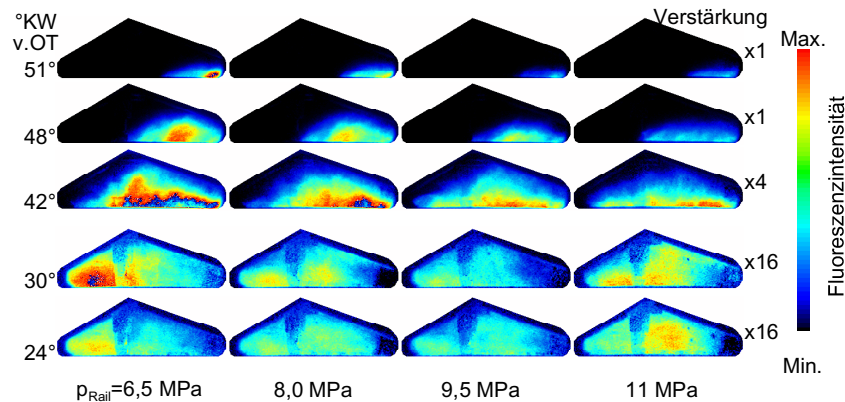


Abbildung 6.6: Einfluß des Einspritzdrucks auf den Ladungstransport. 60°-Drallventil, $\alpha_{TK}=55^\circ$.

malen Entflammung der Ladung zu einem Zündzeitpunkt von 27°vOT kann nicht ausgegangen werden, da die Flamme der Kraftstoffwolke hinterhereilen muß. Ein höherer Einspritzdruck führt zu einem verzögerten Ladungstransport. Die Ablenkung des Strahls wird geringer und der Kraftstoff tritt später in den Dachbrennraum ein. Bei dem höchsten Einspritzdruck von 11 MPa befindet sich schließlich der Ladungsschwerpunkt vor der Zündkerze. Bei allen Drücken ist Kraftstoff im Dachbrennraum nachweisbar.

Soll eine zündkerzennahe Lage des Ladungsschwerpunkts erreicht werden, so muß für $p_{rail}=6,5$ MPa der Ansteuerbeginn nach 60°vOT erfolgen und für $p_{rail}=11$ MPa vor 60°vOT. Obwohl die in Kap. 6 gezeigten Ergebnisse mit einem größeren Druckbereich erzielt wurden, zeigt sich dort ein genau gegenläufiges Verhalten: Durch den ansteigenden Druck muß später eingespritzt werden. Die Strömung in Richtung Zündkerze bleibt also nicht konstant, sondern nimmt zu späteren Zeiten deutlich zu.

Einfluß des Strahlwinkels

Eine Änderung des Strahlwinkels hat eine große Änderung der Eindringtiefe zur Folge, wie in Kap. 4 gezeigt wurde. Mit größerem Strahlwinkel nimmt die Eindringtiefe bei einer gleichzeitigen Zunahme der Strahlbreite ab. Daß diese Änderungen des Strahls eine große Auswirkung auf die Gemischbildung hat, zeigt Abb. 6.7. Für das 90°-Drallventil tritt der Kraftstoffstrahl bereits bei 51°vOT in den Dachbrennraum ein. Es zeigt von den verwendeten Drallventilen bei 42°vOT die höchsten Fluoreszenzintensitäten. Aufgrund der Breite wird die Ladung am stärksten von der Luftströmung beeinflusst und erreicht als erste die Zündkerze. Zu relevanten Zündzeitpunkten von

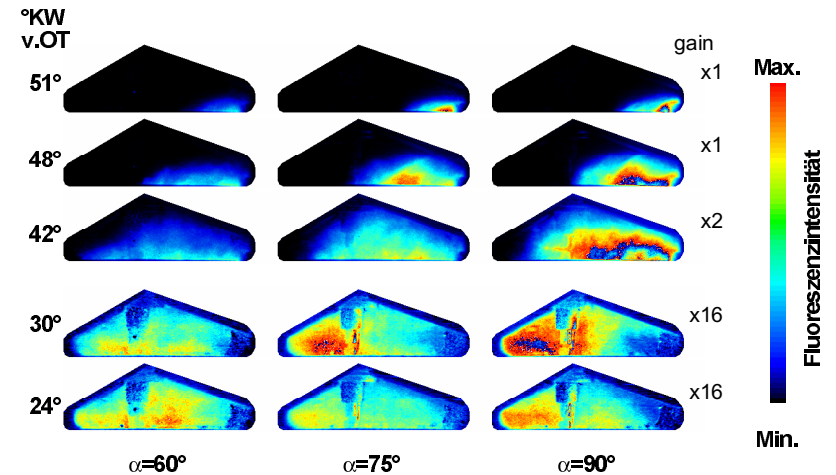


Abbildung 6.7: Einfluß des Strahlwinkels auf den Ladungstransport. 60°, 75°- und 90°-Drallventile.

30°-24°vOT hat sich der Ladungsschwerpunkt bereits an der Zündkerze vorbeibewegt, so daß für eine bessere Schichtung ein früherer Einspritzbeginn gewählt werden muß. Vergleicht man diese Ergebnisse mit denen der beiden anderen Drallventile, so ist festzustellen, daß eine Verringerung des Strahlwinkels zu einem späteren Eintritt der Ladung in den Dachbrennraum führt und der Ladungstransport verzögert wird.

6.2.2 LIEF-Untersuchungen

Nachdem die grundlegenden Einflüsse auf die Gemischbildung durch die Verwendung von Normalbenzin sichtbar gemacht und damit verständlich wurden, stellt sich die Frage, ob weitere Untersuchungen mit einem Ersatzkraftstoff das Verständnis der Gemischbildung fördern. Eine wichtige Frage bei der Benzindirekteinspritzung ist, ob in dem kurzen Zeitintervall zwischen Einspritzung und Zündung der Hauptteil des Kraftstoffes bereits verdampft ist oder noch immer größere Mengen von Kraftstofftropfen im Brennraum vorhanden sind. Die Antwort auf diese Frage kann die LIEF-Meßtechnik liefern. Sie ist eine geeignete Methode, die Konzentration von flüssigem Kraftstoff im Brennraum zu bestimmen, wie in Abschnitt 2.2.5 gezeigt wurde. Für die folgenden Untersuchungen wurde als Ersatzkraftstoff eine Isooktanlösung, bestehend aus 1m% Benzol, 1m% TEA und 20m% Dodekan, verwendet. Dodekan wurde aufgrund seines hohen Siedepunkts von 215°C zugesetzt, um die bei Benzin schwerflüchtigen Komponenten nachzu-

bilden. Die dargestellten Bilder sind ein Mittelwert aus sechs Aufnahmen. In dem oberen Teil der Bilder ist ausschließlich die Fluoreszenz der Flüssigphase zu sehen, im unteren Teil die Fluoreszenz der Flüssig- und Gasphase. Für die optischen Untersuchungen wurden nach Tab. 6.2 die zu den Drücken gehörenden Ansteuerbeginne gewählt.

6.2.2.1 Einspritzdruck

Zunächst wurde der Einfluß des Einspritzdrucks untersucht. Die zeitliche Entwicklung der Gemischbildung ist für das 60°-Drallventil in Abb. 6.8 a) gezeigt. In den einzelnen Bildern ist im oberen Teil die Fluoreszenzverteilung des flüssigen Kraftstoffes und im unteren die des gasförmigen dargestellt.

Wie in Abschnitt 2.2 dargestellt wurde, zeigt die Fluoreszenz der Flüssigkeit ein starkes Übersprechen auf die Dampf-Fluoreszenz. Damit eine einfache Entscheidung möglich ist, ob auch Dampf merklich zur Fluoreszenz beiträgt, wurde die Filterung für beide Phasen mit Hilfe der dünnwandigen Quarzküvette soweit angepaßt, daß die Fluoreszenz von reiner Flüssigkeit in dem oberen und unteren Teilbild gleich hell erscheint, wie in Abb. 2.15 auf S.27 zu erkennen ist. Das bedeutet für die hier dargestellten LIEF-Bilder, daß nur zu frühen Zeiten flüssiger Kraftstoff im einsehbaren Teil des Brennraums auftritt und daß bei Zündeinleitung 27°vOT der Kraftstoff bereits verdampft ist.

Der Ladungstransport wird bei der Veränderung des Einspritzdrucks erheblich beeinflußt. Der Durchgriff der Vorwärtstumble-Strömung nimmt mit steigendem Einspritzdruck ab. Es gelangt weniger Kraftstoff in den einsehbaren Brennraumbereich. Für den höchsten Einspritzdruck durchquert der Hauptteil des Kraftstoffsprays den Brennraum unterhalb der Zündkerze.

Für einen objektiven Vergleich der Fluoreszenzbilder wurden aus den Bildern zwei skalare Größen abgeleitet. Die eine ist die Fluoreszenz der Gasphase unmittelbar vor der Zündkerze. Die zweite ist die Gesamtfluoreszenz der Flüssigkeit, die ein Maß für die gesamte flüssige Kraftstoffmenge ist. Der zeitliche Verlauf dieser zwei Größen ist in Abb. 6.8 c) dargestellt.

In diesen Diagrammen finden sich die Aussagen aus den LIEF-Bildern wieder. Die vor der Zündkerze aufgenommene Gasfluoreszenz zeigt mit fallendem Einspritzdruck ein stark anwachsendes Maximum und einen früheren Anstieg. Der Kraftstoff erreicht also zu früheren Zeiten die Zündkerze, und die Ladung läßt sich leichter durch die Brennraumströmung in Richtung Zündkerze ablenken.

Einen vergleichbaren Verlauf zeigt die Gesamtfluoreszenz der Flüssigkeit, nur daß hier im Rahmen der Meßgenauigkeit kein flüssiger Kraftstoff zum Zündzeitpunkt mehr nachweisbar war. Die nicht verschwindende Intensität zu frühen und späten Zeiten sind auf das Rauschen des Bildverstärkers

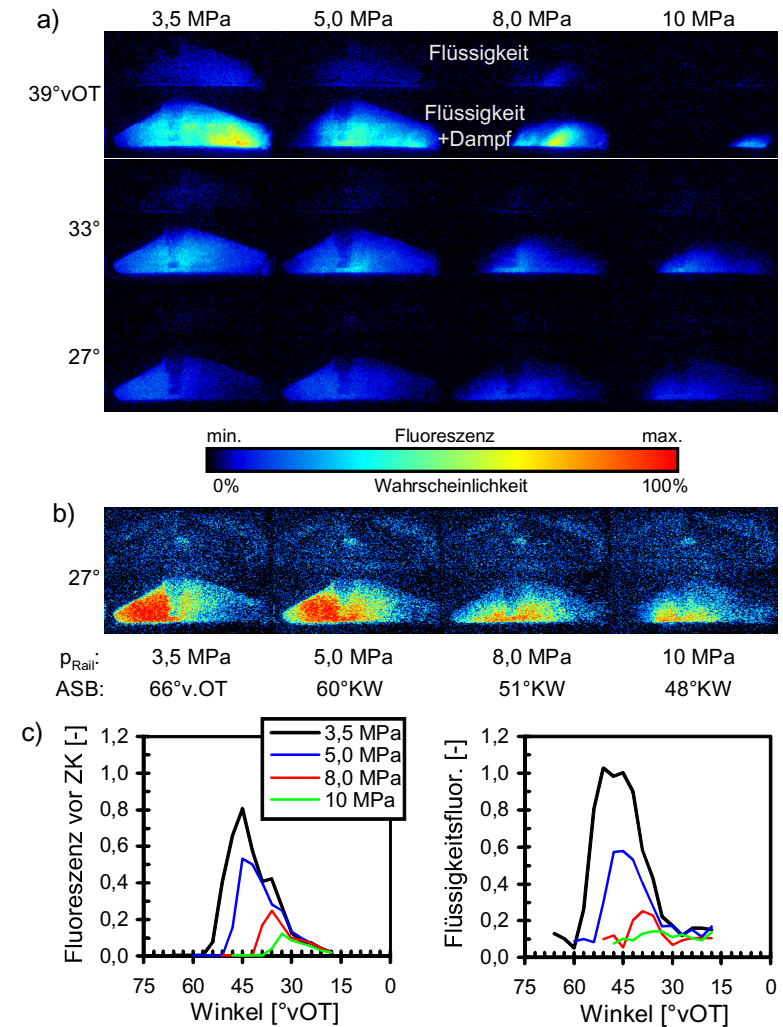


Abbildung 6.8: Einfluß des Einspritzdrucks. 60°-Drallventil. a) LIEF-Bilder, b) Häufigkeitsverteilung des Kraftstoffes zum Zündzeitpunkt, c) Gasfluoreszenz vor der Zündkerze und Gesamtfluoreszenz der Flüssigkeit.

zurückzuführen, die aufgrund des Auswerteverfahrens einen konstanten Beitrag zum Meßsignal lieferten.

Die Häufigkeitsverteilung des Kraftstoffes zum Zündzeitpunkt ist in der Abb. 6.8 b) gezeigt. Der Bereich, in dem zu jedem Arbeitsspiel Kraftstoff anzutreffen ist, ist bei einem Einspritzdruck von $p_{\text{rail}}=3,5$ MPa am größten und nimmt mit steigendem Druck ab. Gleichzeitig verlagert er sich aus dem Bereich hinter der Zündkerze in den Bereich unterhalb der Zündkerze. Die Kerze ragt gerade noch in diesen Bereich hinein. Es läßt sich zu dem Stabilitätsdiagramm in Abb. 6.1 a) ein enger Zusammenhang herstellen. Die ASB/ZZP-Ausdehnung für aussetzerfreien Motorbetrieb zeigt das gleiche Verhalten wie die Ausdehnung des roten 100%-Bereichs: beide nehmen mit fallendem Einspritzdruck zu.

In Abb. 6.9 a) ist die Gemischbildung für das 50°-Mehrlochventil dargestellt. Wie aus den Druckkammeruntersuchungen bekannt ist, ähnelt das Spray dieses Ventils dem des 75°-Drallventils. Im Vergleich zum 60°-Drallventil ist bei diesem Ventil die Eindringtiefe geringer und die Spraybreite größer.

In den LIEF-Bildern ist zu erkennen, daß die Luftströmung einen wesentlich besseren Durchgriff auf den Ladungstransport als bei dem 60°-Drallventil hat. Große Mengen von flüssigem und dampfförmigem Kraftstoff sind in den Dachbrennraum bereits 39°vOT eingetreten. Zum Zündzeitpunkt 27°vOT verteilt sich die Ladung über den gesamten einsehbaren Bereich. Die Zündkerze befindet sich für alle Einspritzdrücke in der Mitte des Ladungsschwerpunkts. Auffällig ist bei diesem Ventil die Anwesenheit von flüssigem Kraftstoff bei der Zündeinleitung und geringem Einspritzdruck. Wie die Abgasuntersuchungen gezeigt haben, wirkt sich dies negativ auf die Schwarzrauchzahl aus, die hier am größten ist. Dieses unerwartet starke Auftreten von Flüssigkeit ist auf die deutlich schlechtere Zerstäubung des Mehrlochventils bei niedrigen Einspritzdrücken zurückzuführen. Die gebildeten Tropfen sind zu groß, als daß sie bis zur Zündung verdampfen können. PDA-Messungen zeigen, daß erst ab Drücken um 10 MPa Mehrloch- und Drallventile gleich gut den Kraftstoff zerstäuben [OAG⁺01].

In Abb. 6.9 c) sind die zeitlichen Verläufe der Gasphasenfluoreszenz vor der Zündkerze und der Gesamtemission der Flüssigkeit dargestellt. Mit steigendem Einspritzdruck gelangt der Kraftstoff zu späteren Zeiten an die Zündkerze. Für die beiden höchsten Drücke zeigen sich vergleichbare Emissionsverläufe. Die Verdampfung wird durch die Erhöhung des Einspritzdrucks stark verbessert, wie aus der Abnahme der maximalen Flüssigkeitsfluoreszenz zu erkennen ist. Nur für die beiden kleinsten Drücke ist flüssiger Kraftstoff 27°vOT noch nachweisbar. Die unterschiedlichen Niveaus zu sehr frühen und späten Zeiten deuten auf eine Benetzung der Zündkerze durch das Kraftstoffspray hin. Dieser Niederschlag verdampft bis zur nächsten Aufnahme, so daß das Ausgangsniveau der Kurven niedriger als ihr Endniveau ist.

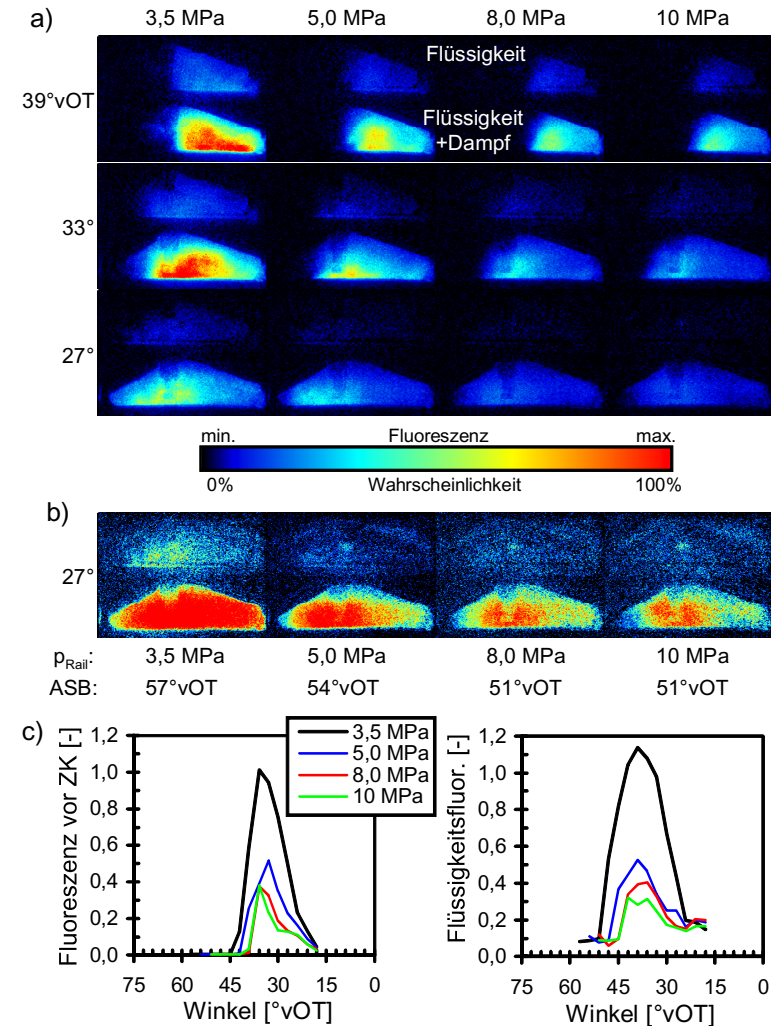


Abbildung 6.9: Einfluß des Einspritzdrucks. 50°-Mehrlochventil. a) LIEF-Bilder, b) Häufigkeitsverteilung des Kraftstoffes zum Zündzeitpunkt, c) Gasfluoreszenz vor der Zündkerze und Gesamtfluoreszenz der Flüssigkeit.

In Abb. 6.9 b) ist die aus den Einzelbildern errechnete Häufigkeitsverteilung bei 27°vOT dargestellt. Anders als bei dem 60°-Drallventil sind die 100%-Bereiche wesentlich ausgedehnter und der Kerzenhaken befindet sich stets mittig in diesem Bereich. Ein Vergleich mit dem zugehörigen Stabilitätsdiagramm in Abb. 6.1 b) zeigt auch hier den sehr engen Zusammenhang zwischen der Ausdehnung des 100%-Bereichs und dem ASB/ZZP-Bereich für den stabilen Motorlauf.

6.2.2.2 Ansteuerbeginn

In diesem Abschnitt wird der Einfluß des Injektoransteuerbeginns auf die Gemischbildung untersucht. Es ist zu erwarten, daß hier eine größere Abhängigkeit auftritt als bei dem wandgeführten Brennverfahren, weil im Gegensatz zu der starren Kolbengeometrie die Luftströmung nur zeitlich und räumlich begrenzt auftritt. In Abb. 6.10 a) ist der Ladungstransport für das 60°-Drallventil bei einem Einspritzdruck von 3,5 MPa dargestellt. Bei der frühesten Ansteuerung von 72°vOT befindet sich die Ladung 39°vOT an der Zündkerze und hat sich zum gewünschten Zündzeitpunkt von 27°vOT bereits entfernt. Die späteste Ansteuerung bei 57°vOT hingegen führt zu einem späten Eintritt des Kraftstoffes in den Dachbrennraum. Bis zur Zündeinleitung liegt der Schwerpunkt der Ladung noch vor der Zündkerze. Für den Ansteuerbeginn von 66°vOT verteilt sich der Kraftstoff bereits 33°vOT sehr gleichmäßig um die Kerze. Der Motor kann zu diesem Zeitpunkt zwar aussetzerfrei betrieben werden, aber für einen sicheren Motorbetrieb empfiehlt sich die spätere Zündung bei 27°vOT, wie in Abb. 6.1 zu erkennen ist. In Abb. 6.10 b) sind die zu den Ansteuerbeginnen gehörigen Häufigkeitsverteilungen dargestellt. Der Zündkerzenhaken befindet sich für den frühesten Ansteuerbeginn vor dem Bereich, in dem stets Kraftstoff aufgefunden wird. Für die beiden anderen Ansteuerbeginne befindet er sich in der Nähe des Randes. Die zeitlichen Fluoreszenzverläufe finden sich in Abb. 6.10 c). Das Auftreten des Kraftstoffdampfes in Kerzennähe hängt stark von dem Ansteuerbeginn ab. Die Fluoreszenzmaxima der beiden ersten Ansteuerbeginne von 72°vOT und 66°vOT sind vergleichbar, für den spätesten ist das Maximum wesentlich kleiner. Das Eintreten der Flüssigkeit in den Dachbrennraum hängt wie bei dem Kraftstoffdampf von dem Ansteuerbeginn ab. Das Fluoreszenzmaximum ist für den mittleren Ansteuerbeginn am größten. In diesem Fall ist der Durchgriff der Brennraumströmung auf den Ladungstransport am größten.

In Abb. 6.11 a) ist der Ladungstransport für das 60°-Drallventil bei dem höchsten verwendeten Einspritzdruck von 10 MPa dargestellt. Es ist zu erkennen, daß im Vergleich zu der Einspritzung mit 3,5 MPa kein flüssiger Kraftstoff mehr meßbar vorhanden ist und daß die in den Dachbrennraum eintretende Kraftstoffmenge wesentlich geringer wird. Der Kraftstoffstrahl

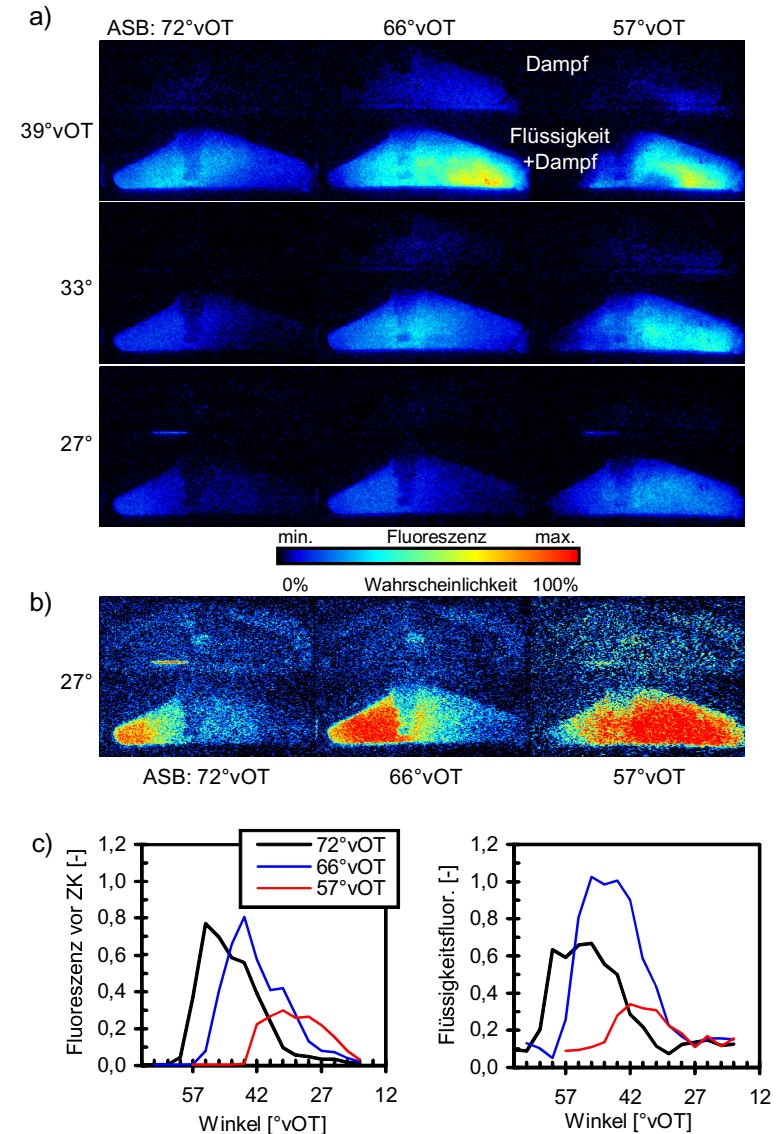


Abbildung 6.10: Einfluß des Ansteuerbeginns. 60°-Drallventil, $p_{\text{rail}}=3,5$ MPa. a) LIEF-Bilder, b) Häufigkeitsverteilungen, c) Gasfluoreszenz vor der Zündkerze und Gesamtfluoreszenz der Flüssigkeit.

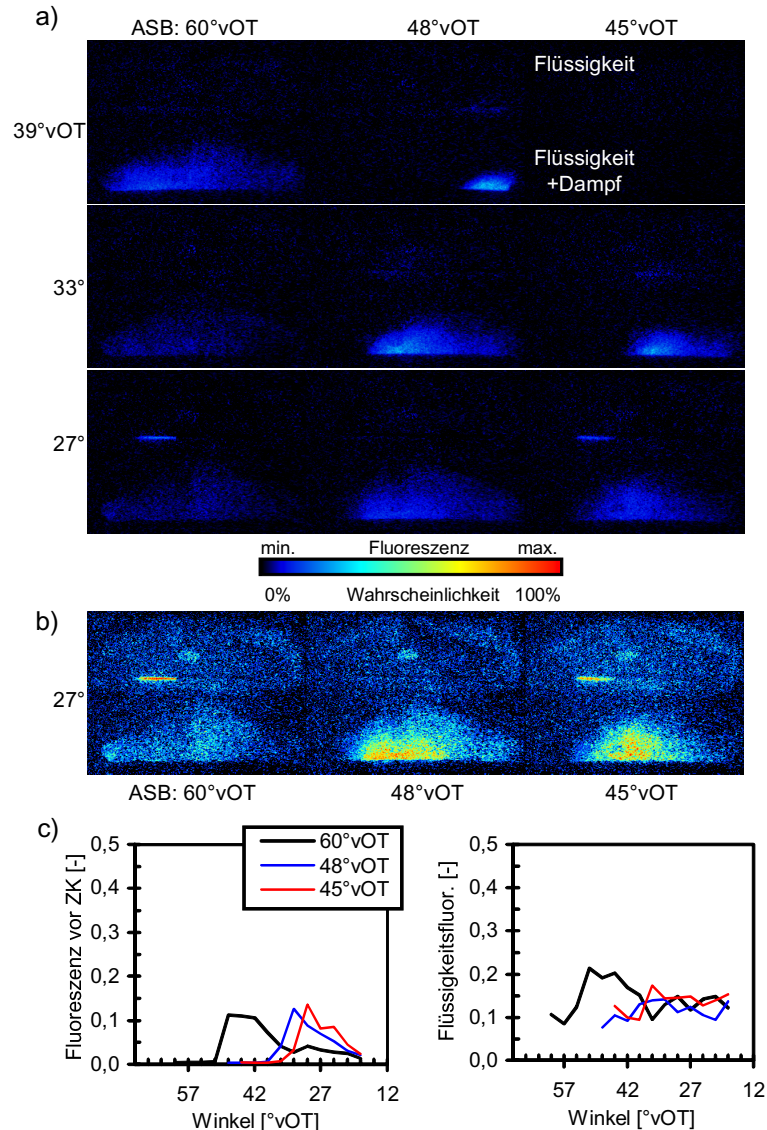


Abbildung 6.11: Einfluß des Ansteuerbeginns. 60°-Drallventil, $p_{\text{rail}}=10$ MPa. a) LIEF-Bilder, b) Häufigkeitsverteilungen, c) Gasfluoreszenz vor der Zündkerze und Gesamtfluoreszenz der Flüssigkeit.

läßt sich kaum von der Brennraumströmung ablenken. Die Bereiche, in denen Kraftstoff im Brennraum zu jeder Zeit anzutreffen ist, sind wenig ausgedehnt, wie in Abb. 6.11 b) zu erkennen ist. Für die beiden späteren Ansteuerbeginne ragt die Kerze gerade in diesen Bereich hinein. Die Fluoreszenzverläufe sind in Abb. 6.11 c) dargestellt. Flüssigkeit tritt in geringer Menge nur für den frühesten Ansteuerbeginn in den Dachbrennraum ein, bei späterer Einspritzung ist keine Flüssigkeit nachweisbar. Die Gasfluoreszenz zeigt unabhängig vom gewählten Ansteuerbeginn eine ähnliche Kurvenform. Das erste Auftreten von Kraftstoff in Kerzennähe ist auch hier eng mit dem Einspritzzeitpunkt verknüpft.

Ähnliche Ergebnisse liefern die Untersuchungen mit dem 50°-Mehrlochventil. In Abb. 6.12 a) sind die LIEF-Bilder zu verschiedenen Zeitpunkten bei der Einspritzung mit 3,5 MPa dargestellt. Aufgrund der größeren Sprayausdehnung tritt im Vergleich zum 60°-Drallventil wesentlich mehr Kraftstoff in den Dachbrennraum ein. Das Erscheinen des Kraftstoffes an der Zündkerze ist auch hier von dem gewählten Ansteuerbeginn stark abhängig. Aufgrund der wesentlich schlechteren Zerstäubung bei dem geringen Einspritzdruck ist wesentlich mehr flüssiger Kraftstoff im Brennraum zu finden als bei dem Drallventil. Die bessere Ablenkbarkeit des Sprays durch die Strömung führt auch zu wesentlich ausgedehnteren Bereichen im Brennraum, in denen in jedem Arbeitsspiel Kraftstoff angetroffen werden kann, wie in Abb. 6.12 b) zu erkennen ist. Nur für den frühesten Ansteuerbeginn befindet sich die Zündkerze in einem Bereich, in dem der Kraftstoff seltener anzutreffen ist. Die Fluoreszenzkurven sind in Abb. 6.12 c) dargestellt. Der Kraftstoff erreicht mit späterer Einspritzung später die Zündkerze. Die Fluoreszenzmaxima sind für die beiden ersten Ansteuerbeginne vergleichbar groß, für den spätesten fällt das Maximum auf die Hälfte ab. Flüssiger Kraftstoff tritt bei dem 50°-Ventil bei jedem Ansteuerbeginn auf. In Kerzennähe ist für die beiden späten Ansteuerbeginne der flüssige Kraftstoff noch bis zum Zündzeitpunkt nachweisbar.

Durch die Erhöhung des Einspritzdrucks auf 10 MPa wird der Strömungseinfluß auf den Ladungstransport stark verringert. Nur wenig Kraftstoff tritt in den Dachbrennraumbereich ein, wie in Abb. 6.13 a) zu sehen ist. Flüssiger Kraftstoff ist nur zu sehr frühen Zeiten nachweisbar. Bei 27°vOT sind die letzten Tropfen verdampft. In Abb. 6.13 b) ist die Häufigkeitsverteilung dargestellt. Der Bereich, in dem sich in jedem Arbeitsspiel Kraftstoff befindet, hat sich durch den hohen Einspritzdruck stark verkleinert. Bei den späten Ansteuerbeginnen befindet sich die Zündkerze noch innerhalb dieses Bereichs. Für die früheste Einspritzung hingegen ist der Ladungstransport so turbulent, daß es zu dem betrachteten Zeitpunkt keinen Bereich gibt, in dem der Kraftstoff stets auftritt.

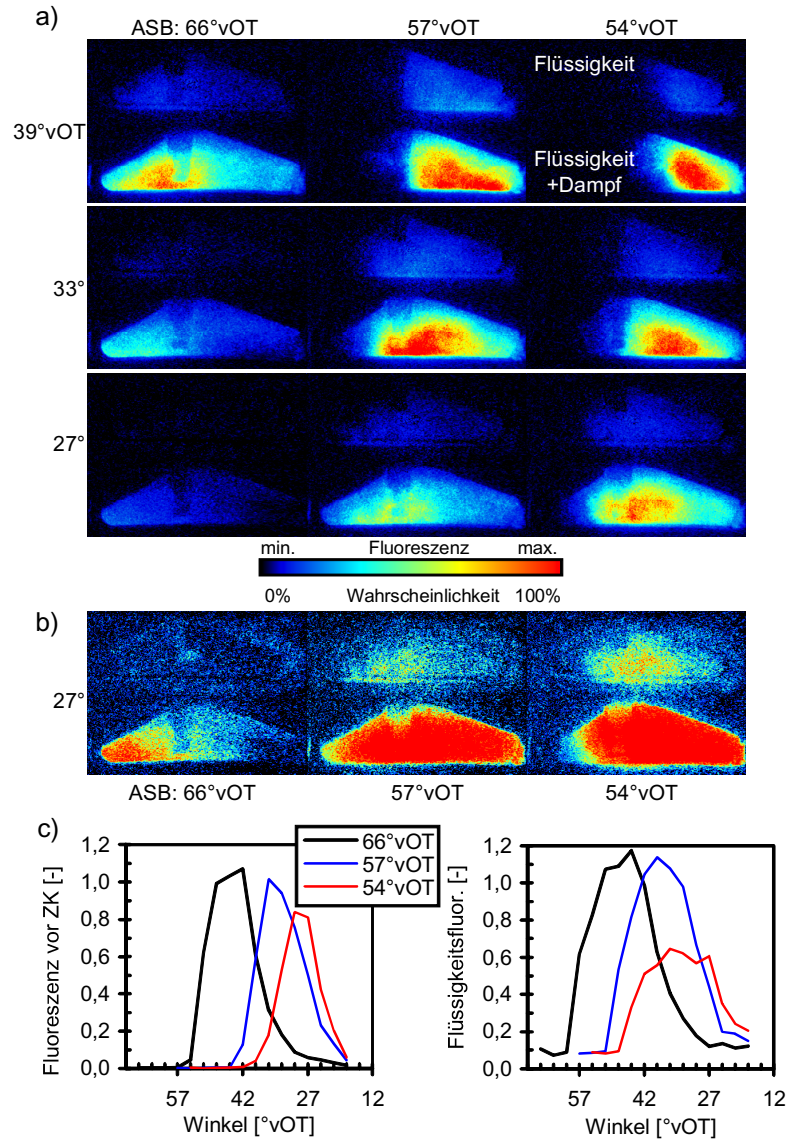


Abbildung 6.12: Einfluß des Ansteuerbeginns. 50°-Mehrlochventil, $p_{\text{rail}} = 3,5 \text{ MPa}$. a) LIEF-Bilder, b) Häufigkeitsverteilungen, c) Gasfluoreszenz vor der Zündkerze und Gesamtfluoreszenz der Flüssigkeit.

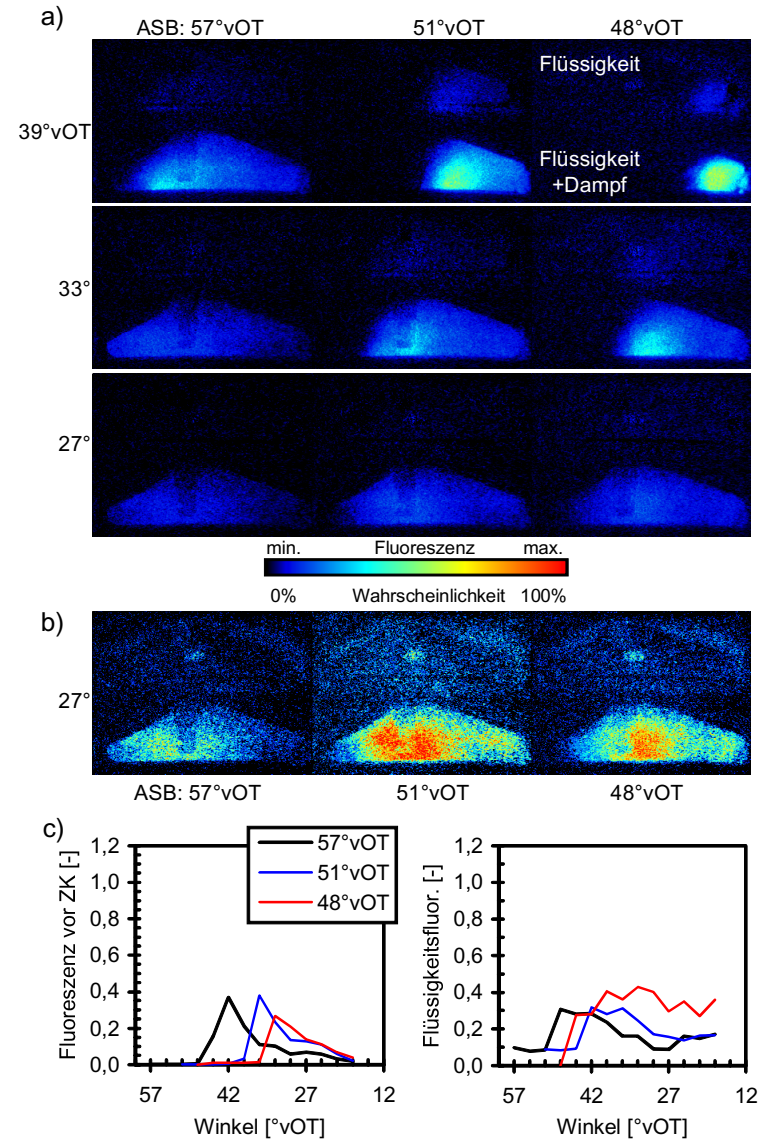


Abbildung 6.13: Einfluß des Ansteuerbeginns. 50°-Mehrlochventil, $p_{\text{rail}} = 10 \text{ MPa}$. a) LIEF-Bilder, b) Häufigkeitsverteilungen, c) Gasfluoreszenz vor der Zündkerze und Gesamtfluoreszenz der Flüssigkeit.

6.2.3 Zusammenfassung

In den vorhergehenden Abschnitten wurde die Ladungsschichtung mit Hilfe der laserinduzierten Fluoreszenz untersucht. Für die einführenden Untersuchungen wurde Normalbenzin eingesetzt. Dabei konnten drei wichtige Ergebnisse aus den Parameterstudien abgeleitet werden. Das erste ist, daß die verstärkte Tumbleströmung eine notwendige Voraussetzung für den Schichtbetrieb ist. Bei normaler Brennraumströmung findet nur ein ungenügender Ladungstransport zur Zündkerze statt. Das zweite Ergebnis ist, daß der Einspritzdruck nicht beliebig hoch gewählt werden kann, weil sonst der Kraftstoff aufgrund des hohen Sprayimpulses nicht mehr in Richtung Zündkerze abgelenkt wird. Das dritte ist, daß die Ablenkbarkeit des Sprays durch den Luftstrom mit größerem Sprayöffnungswinkel zunimmt, weil sich bei gleichem Impuls der Kraftstoff auf ein größeres Volumen verteilt, dieser stärker abgebremst wird und dadurch das Spray weniger in den Brennraum eindringt.

Zur genaueren Analyse der Gemischbildung wurde für das 60°-Drallventil und das 50°-Mehrlochventil die LIEF-Meßtechnik eingesetzt. Neben den Tracern TEA und Benzol wurde der Isooktanlösung 20m% Dodekan zugegeben, um festzustellen, ob bei Zündeinleitung noch flüssiger Kraftstoff vorhanden ist. Dabei wurde bei maximaler Tumbleintensität der Einfluß des Einspritzdrucks und des Ansteuerbeginns auf die Ladungsschichtung untersucht.

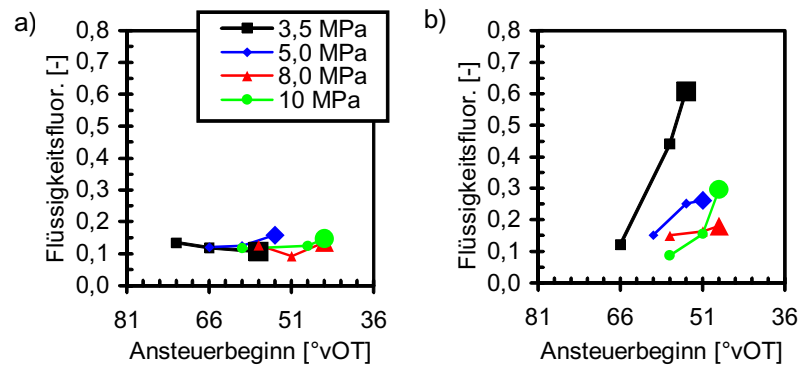


Abbildung 6.14: Einfluß von Ansteuerbeginn und Einspritzdruck auf die Flüssigkeitsfluoreszenz 27°vOT. a) 60°-Drallventil, b) 50°-Mehrlochventil.

Es zeigte sich, daß für einen aussetzerfreien Motorbetrieb mit steigendem Einspritzdruck der Ansteuerbeginn nach spät gelegt werden konnte. Ein späteres Eintreffen des Kraftstoffes in den Dachbrennraum war die Folge. Obwohl sich der Zeitraum zwischen Einspritzung und Zündung verkleinerte, konnte bei dem 60°-Drallventil zum Zündzeitpunkt kein flüssiger Kraft-

stoff mehr nachgewiesen werden, wie in Abb. 6.14 a) zu sehen ist. Das 50°-Mehrlochventil zeigte hingegen ein leicht anderes Verhalten. Weil bei niedrigen Einspritzdrücken die Kraftstoffzerstäubung deutlich schlechter als bei Drallventilen ist, war hier bei Zündeinleitung noch Flüssigkeit nachweisbar. Durch frühes bzw. spätes Einspritzen konnte die unverdampfte Kraftstoffmenge erniedrigt bzw. erhöht werden, wie in Abb. 6.14 b) zu erkennen ist. Eine Erhöhung des Einspritzdrucks führte zu einer deutlich verbesserten Verdampfung.

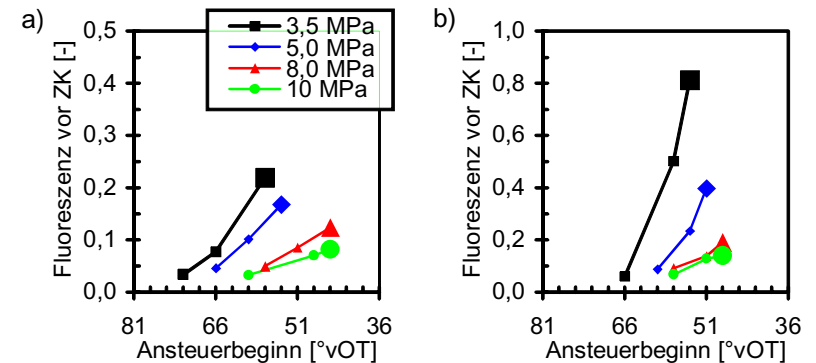


Abbildung 6.15: Einfluß von Ansteuerbeginn und Einspritzdruck auf die Gasfluoreszenz vor der Zündkerze 27°vOT. a) 60°-Drallventil, b) 50°-Mehrlochventil.

In Abb. 6.15 a) und b) sind die Gasfluoreszenzen vor der Zündkerze zur Zündeinleitung 27°vOT dargestellt. Zu erkennen ist ein sehr enger Zusammenhang zwischen den beiden Größen. Unabhängig vom Druck hat sich bei beiden Ventilen der Kraftstoff aufgrund der frühen Einspritzung an der Zündkerze vorbeibewegt. Die späteren Ansteuerbeginne führen zu einer Erhöhung der Gasfluoreszenz. Für die Gemischbildung bedeutet das, daß sich durch eine zu späte Einspritzung und durch einen verringerten Kraftstoffdruck die Gaskonzentration in Zündkerzennähe erhöhen läßt und daß dieses unter Umständen zu fetten Gemischbereichen führen kann. Ob dieses eine direkte Auswirkung auf die Rußbildung hat, soll im nächsten Abschnitt untersucht werden.

6.3 Optische Untersuchung der Verbrennung

In diesem Abschnitt sollen die Ergebnisse der Flammenemissionsspektroskopie vorgestellt werden. Ausgegangen wird von den Parametervariationen des vorhergehenden Abschnitts, um Verbindungen zwischen der Gemischbildung und der Verbrennung aufzuzeigen, andererseits aber auch einen möglichen Zusammenhang zu der Schwarzrauchzahl herzustellen.

6.3.1 Einfluß des Einspritzdrucks

In Abb. 6.16 a) sind für die verschiedenen Einspritzdrücke die Ruß- und OH-Emissionen zu verschiedenen Zeitpunkten dargestellt. Bei 24°vOT ist der Zündfunke und die beginnende Entflammung zu erkennen. Auf dem darauffolgenden Bild hat sich die Flamme bereits auf den gesamten Brennraum ausgedehnt. Die Rußwolken beschränken sich nicht auf einen Bereich vor oder hinter der Zündkerze, sondern sind im gesamten einsehbaren Bereich zu finden. Eine eindeutige Lageabhängigkeit der Rußemission vom Einspritzdruck läßt sich nicht feststellen, außer zu späten Zeiten bei 30°nOT. Hier befinden sich für die beiden höchsten Drücke die Rußwolken im rechten Teil des Dachbrennraums. Die OH-Emissionen sind räumlich ausgedehnt. Der horizontale Schwerpunkt der Strahlung liegt rechts neben der Zündkerze und verlagert sich im weiteren Verlauf der Verbrennung nicht. Bei 30°nOT sind die OH-Emissionen weitestgehend abgeklungen.

Der zeitliche Verlauf der Gesamtemission von Ruß und OH ist in Abb. 6.16 b) dargestellt. Die OH-Kurven haben bei OT ihr Maximum, und ihre Maximalwerte sind für die beiden geringsten Einspritzdrücke vergleichbar groß. Die Maxima nehmen bei steigendem Einspritzdruck jedoch deutlich ab. Der Kurvenverlauf der Rußemissionen zeigt nicht den Zusammenhang, den man aufgrund der Untersuchungen am wandgeführten Brennverfahren erwartet hätte. Die Rußemission ist für einen Einspritzdruck von 8,0 MPa am größten, wird für 10 MPa kleiner und nimmt schließlich für 3,5 und 5,0 MPa die kleinsten Werte an. Ein Grund für diesen nicht monotonen Zusammenhang zwischen Druck und Rußemission ist, daß sich mit steigendem Einspritzdruck die Gemischwolke in den unteren, nicht einsehbaren Teil des Brennraums verlagert. Ein weiterer Grund ist die hohe Empfindlichkeit der Rußemission auf den Ansteuerbeginn, wie im nächsten Abschnitt gezeigt werden wird.

In Abb. 6.17 a) ist die Flammenentwicklung bei dem Einsatz des 50°-Mehrlochventils dargestellt. Bei 24°vOT ist der Zündfunke zu sehen, aber auch die beginnende frühzeitige Rußbildung bei den beiden niedrigsten Einspritzdrücken. In dem folgenden Bild erfüllt für 3,5 und 5,0 MPa das Rußleuchten den gesamten Brennraum, für die beiden höheren Drücke nur den linken Teil. Bei OT befindet sich der Ruß für jeden Druck vorwiegend im lin-

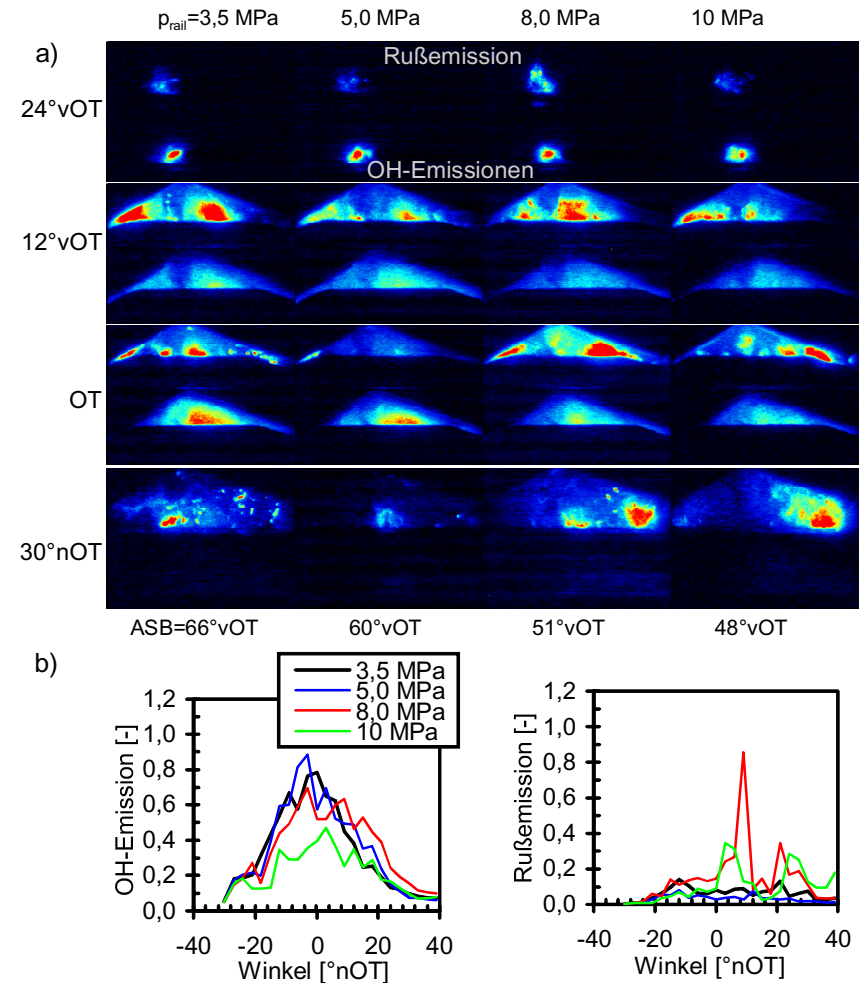


Abbildung 6.16: Einfluß des Einspritzdrucks auf die Flammenemission. 60°-Drallventil. a) Thermische Rußstrahlung und OH-Emission, b) zeitaufgelöste Gesamtemission von OH und Ruß.

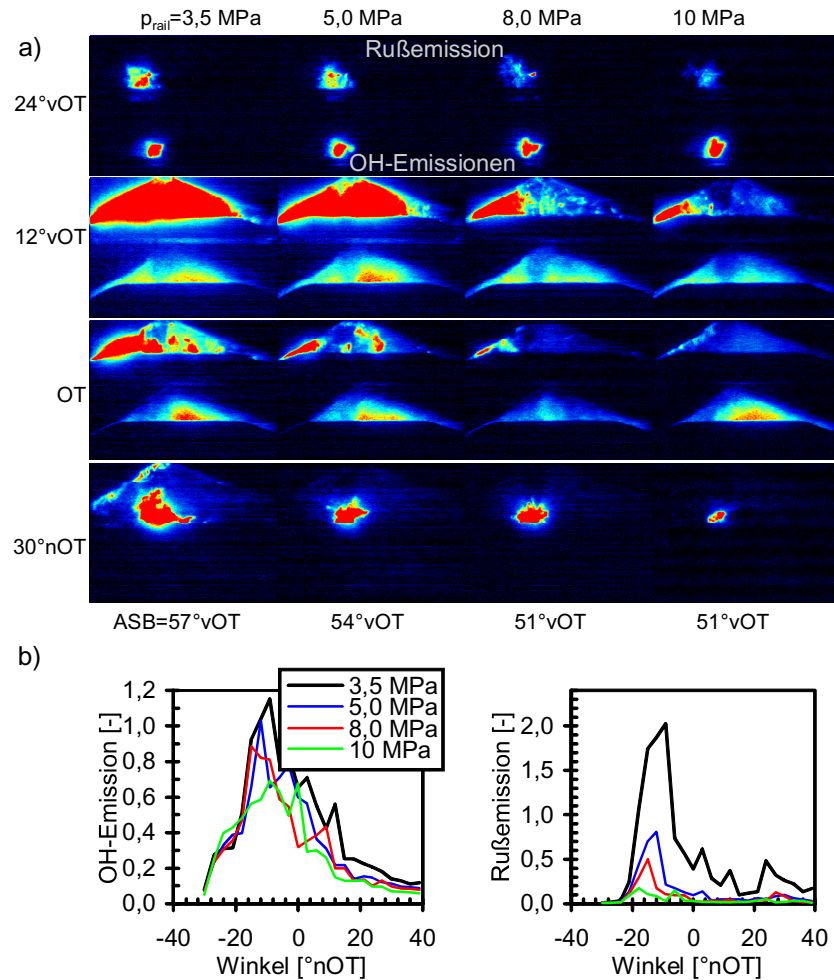


Abbildung 6.17: Einfluss des Einspritzdrucks auf die Flammenemission. 50° -Zehnlochventil. a) Thermische Rußstrahlung und OH-Emission, b) zeitaufgelöste Gesamtemission von OH und Ruß.

ken Brennraumbereich, wobei die Emission mit steigendem Druck deutlich abnimmt. Bei 30°nOT ist schließlich ein sehr intensives Leuchten aus dem Zündkerzenbereich zu erkennen. Wie in den LIEF-Untersuchungen gezeigt wurde, hat sich bei dem Einspritzvorgang auf der Zündkerze ein Wandfilm gebildet, der zu diesem Zeitpunkt stark verzögert abbrennt. Hier ist wie bei dem wandgeführten Brennverfahren davon auszugehen, daß der so gebildete Ruß deutlich zu den Abgasemissionen beitragen wird. Die OH-Emissionen sind in ihrer Ausdehnung und Lage mit denen aus den Drallventiluntersuchungen erhaltenen vergleichbar.

Deutliche Unterschiede treten erst bei der zeitlichen Darstellung der OH-Gesamtemission hervor. In Abb. 6.17 b) ist zu erkennen, daß die Maxima der OH-Emissionen deutlich vor OT bei 15°vOT liegen. Bei Steigerung des Einspritzdrucks nehmen die Emissionsmaxima ab. Im rechten Teil der Abbildung ist der zeitliche Verlauf der Rußemissionen dargestellt. Sie zeigen im Gegensatz zum Drallventil eine eindeutige Abhängigkeit vom Einspritzdruck. Ihre Maxima nehmen mit steigendem Druck monoton ab.

6.3.2 Ansteuerbeginn

In diesem Abschnitt wird der Einfluß des Einspritzbeginns auf die Flammenemission bei den Kraftstoffdrücken von 3,5, 5, 8 und 10 MPa untersucht. Aufgrund der ähnlichen Abhängigkeiten der ausgewerteten Größen werden nur die Ergebnisse für den niedrigsten und den höchsten Einspritzdruck dargestellt. Es werden die bereits bei den LIEF-Messungen vorgestellten Ansteuerbeginne verwendet.

In Abb. 6.18 a) bzw b) sind die Flammenemissionsbilder und die Emissionsverläufe von OH und Ruß für die Einspritzdrücke 3,5 MPa bzw 10 MPa dargestellt. Es zeigen sich für beide Drücke in den Emissionen die gleichen Abhängigkeiten, nur die Intensitäten sind für den kleinsten Einspritzdruck deutlich größer. Für den jeweils frühesten Ansteuerbeginn sind die Emissionen von Ruß und OH am geringsten. Für die beiden späteren Ansteuerbeginne sind sie für OH vergleichbar groß, für Ruß nehmen sie stetig zu.

Ähnliche Ergebnisse zeigen auch die Untersuchungen mit dem 50° -Mehrllochventil. Wie in Abb. 6.19 a) und b) dargestellt, nehmen für die Drücke von 3,5 MPa und 10 MPa mit späterem Ansteuerbeginn die Rußemissionen stark zu. Ein ähnlicher Anstieg tritt bei den OH-Emissionen auf. Im Gegensatz zum 60° -Drallventil sind die Intensitäten bei dem Druck von 3,5 MPa wesentlich größer als bei 10 MPa. Die hohen Rußemissionen treten als Folge der ungenügenden Gemischaufbereitung auf.

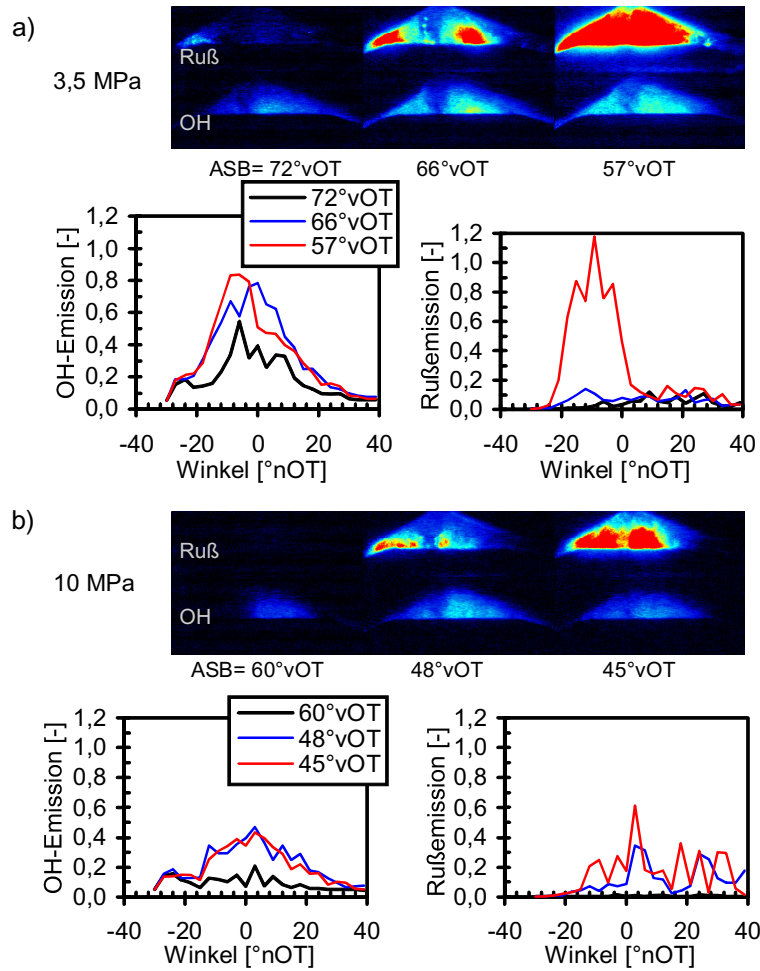


Abbildung 6.18: Einfluß des Ansteuerbeginns auf die Flammenemission für das 60°-Drallventil. Aufnahmezeitpunkt 12°vOT. a) Ergebnisse bei 3,5 MPa und bei b) 10 MPa Einspritzdruck.

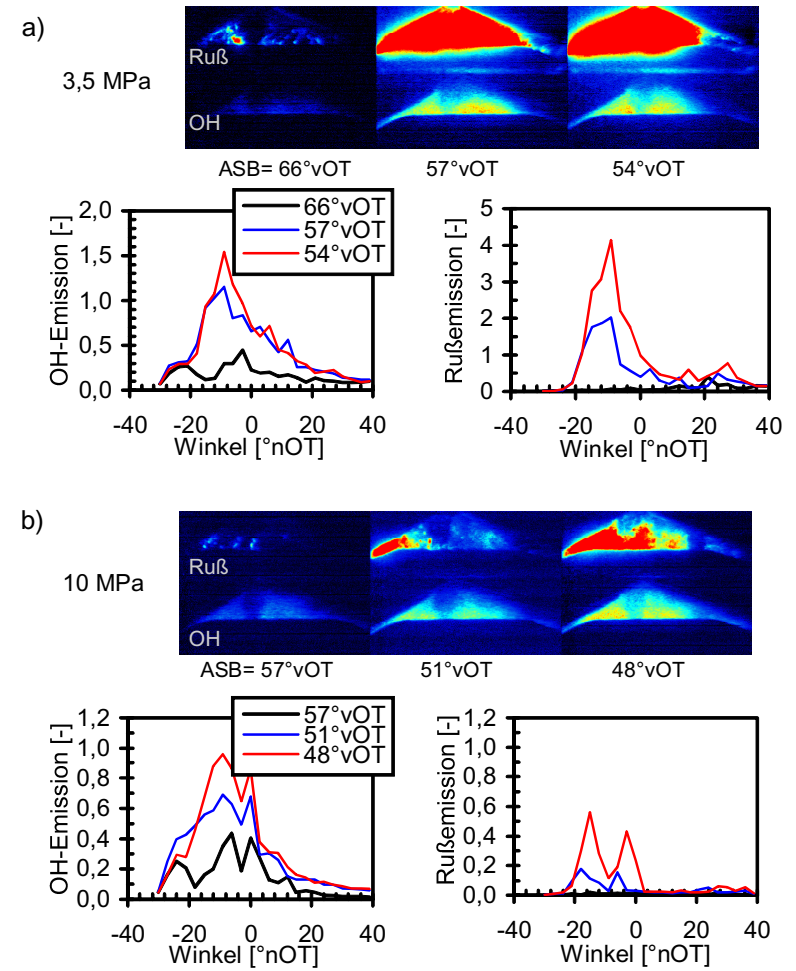


Abbildung 6.19: Einfluß des Ansteuerbeginns auf die Flammenemission für das 50°-Mehrlochventil. Aufnahmezeitpunkt 12°vOT. a) Ergebnisse bei 3,5 MPa und bei b) 10 MPa Einspritzdruck.

6.3.3 Zusammenfassung

Wie in den vorherigen Abschnitten gezeigt wurde, hat der Ansteuerbeginn einen großen Einfluß auf die Rußemission. In Abb. 6.20 a) und b) sind die wesentlichen Ergebnisse für das 60°-Drallventil und das 50°-Mehrlochventil wiedergegeben. Aufgetragen sind für die verschiedenen Einspritzdrücke die Rußemissionen bei 12°vOT gegen den Ansteuerbeginn des Ventils. Die

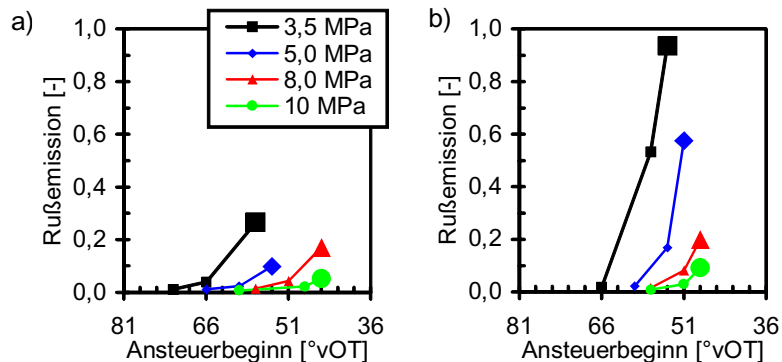


Abbildung 6.20: Einfluß von Ansteuerbeginn und Einspritzdruck auf die Rußemission 12°vOT. a) 60°-Drallventil, b) 50°-Mehrlochventil.

großen Symbole kennzeichnen wie auch in den folgenden Abbildungen den spätesten Ansteuerbeginn. Deutlich ist zu erkennen, daß mit späterem Ansteuerbeginn bei jedem Einspritzdruck die Rußemissionen stark zunehmen. Das bedeutet, daß es für jeden Einspritzdruck einen charakteristischen zeitlichen Abstand zwischen Einspritzung und Zündung gibt. Bei der Wahl eines zu kleinen Abstands durchmischt sich der Kraftstoff mit der Luft nur ungenügend, so daß in den entstandenen fetten Bereichen in der Verbrennung verstärkt Ruß gebildet wird. Außerdem kann aus diesen Diagrammen abgeleitet werden, daß dieser zeitliche Minimalabstand mit steigendem Einspritzdruck stetig kleiner wird. Offensichtlich strömt durch den vergrößerten Strahlimpuls vermehrt Luft in das Kraftstoffspray, wodurch die Gemischaufbereitung erheblich verbessert wird. Die Rußemissionen können bei dem Mehrlochventil durch eine Einspritzdrucksteigerung in einem wesentlich stärkeren Maße reduziert werden als bei dem Drallventil. Ein Grund für diesen Unterschied kann sein, daß die Verbrennung aufgrund der tieferen Lage der Gemischwolke bei dem Drallventil nicht in dem Maße beobachtet werden kann wie bei dem Mehrlochventil. Wesentlich wahrscheinlicher ist, daß bei dem Mehrlochventil aufgrund der wesentlich geringeren Zerstäubung für geringere Einspritzdrücke eine deutlich schlechtere Gemischaufbereitung stattfindet. Aus den Ergebnissen wird ebenfalls sichtbar, daß für die hohen

Einspritzdrücke die Gemischaufbereitung für beide Zerstäubungskonzepte vergleichbar ist.

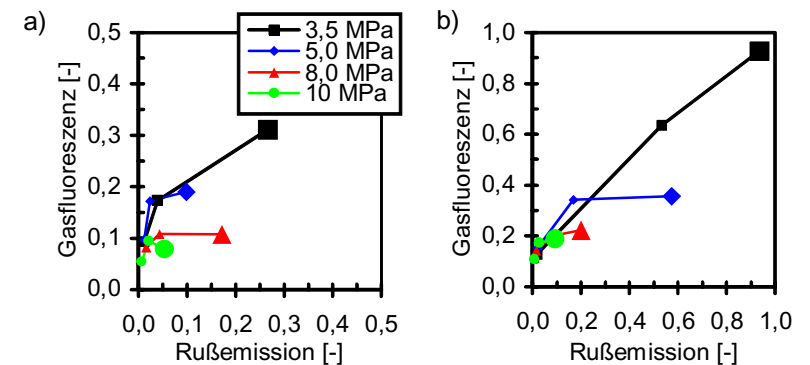


Abbildung 6.21: Auftragung der Gasfluoreszenz 27°vOT gegen die Schwarzrauchzahl 12°vOT. a) 60°-Drallventil, b) 50°-Mehrlochventil.

Aufbauend auf diese Resultate bietet sich in dem nächsten Schritt an, einen direkten Zusammenhang zwischen der Gemischbildung und der Verbrennung herzustellen. In Abb. 6.21 a) und b) ist dafür die bei 27°vOT aufgenommene Gesamtgasfluoreszenz gegen die Rußemission bei 12°vOT aufgetragen. Die großen Symbole kennzeichnen die Ergebnisse für die spätesten Ansteuerbeginne. Es ist deutlich zu erkennen, daß zu jedem Einspritzdruck und zu jedem Ventiltyp eine bestimmte Schwellenintensität der Gasfluoreszenz gehört, bei deren Überschreitung die Rußemission sprunghaft ansteigt. Offenbar sorgt ein wenig mehr an Kraftstoff zu einem schlagartigen Unterschreiten der Luftzahl, bei der noch kein Ruß gebildet wird. Aus den Kurvenverläufen kann außerdem gefolgert werden, daß durch die Erhöhung des Einspritzdrucks die mittlere Luftzahl im einsehbaren Brennraumbereich kleiner wird, da sowohl die Gesamtfluoreszenz als auch die Rußemission als indirekter Luftzahlindikator abnimmt. Durch diese Darstellung wird erneut der Sachverhalt bestätigt, daß durch eine Steigerung des Einspritzdrucks sowohl die Gemischbildung als auch die Verbrennung verbessert wird. Allerdings steht bei diesem Brennverfahren der Verwendung noch höherer Drücke der Sachverhalt entgegen, daß die Gemischwolke durch die Luftströmung in Richtung Zündkerze ablenkbar bleiben muß.

Zuletzt soll der mögliche Zusammenhang zwischen der Rußemission und der im Abgas gemessenen Schwarzrauchzahl überprüft werden. In Abb. 6.22 a) und b) sind für die beiden Ventiltypen die Rußemissionen bei 12°vOT gegen die Schwarzrauchzahl aufgetragen. Es ist zu erkennen, daß der Ansteuerbeginn nur einen untergeordneten Einfluß auf die Schwarzrauchzahl

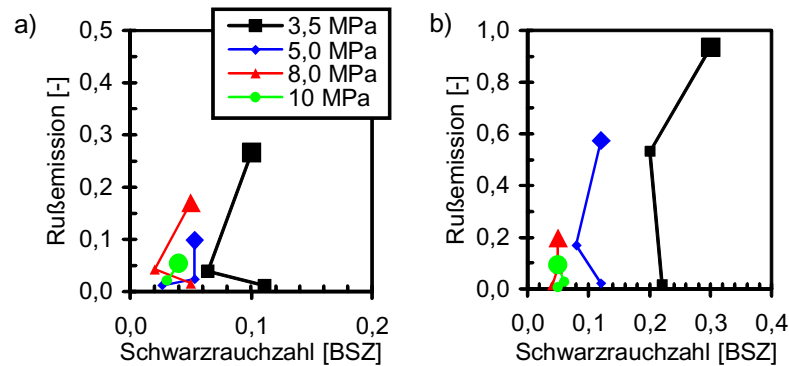


Abbildung 6.22: Vergleich der Rußemission mit der Schwarzauchzahl bei unterschiedlichen Ansteuerbeginnen und Einspritzdrücken. a) 60°-Drallventil, b) 50°-Mehrlochventil.

hat. Dagegen zeigt sich ein deutlicher Anstieg der Schwarzauchzahl bei der Absenkung des Einspritzdrucks. Ein direkter Zusammenhang zwischen dem einzelnen Rußemissionsmeßwert und der dazugehörigen Schwarzauchzahl besteht offenkundig nicht. Die gemittelte Rußemission für jeden Einspritzdruck hingegen steigt streng monoton mit größer werdender Schwarzauchzahl an.

Kapitel 7

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde gezeigt, daß die laserinduzierte Fluoreszenz und die Flammenemissionspektroskopie geeignete Meßtechniken sind, um die Gemischbildung und die Verbrennung bei Benzinmotoren mit Direkteinspritzung detailliert zu untersuchen und Parametereinflüsse zu quantifizieren. Diese Meßtechniken konnten in idealer Weise dazu eingesetzt werden, den Einblick in die Wirkkette von der Einspritzung und Gemischbildung, dem Ladungstransport zur Zündkerze und der daran anschließenden Entflammung und Verbrennung zu vertiefen. Die daraus abgeleiteten Erkenntnisse führten zu eindeutigen Erklärungen für das Stabilitäts- und Emissionsverhalten des Motors.

In den einführenden Untersuchungen am Motor stellte sich heraus, daß Isooktan mit Diethylketon als Tracer ein geeigneter Ersatzkraftstoff für die Gemischbildungsuntersuchungen in Benzinmotoren mit Direkteinspritzung ist. Bei Veränderung der Sauerstoffkonzentration im Brennraum konnte als bedeutender Vorteil dieses Tracers ausgemacht werden, daß bereits geringste Mengen an Sauerstoff den Tracer auf ein konstantes Niveau quenchen. Das ermöglichte den unmittelbaren Vergleich von LIF-Bildern, die unter gleichem Druck und gleicher Temperatur aufgenommen wurden. Außerdem zeigte die Fluoreszenz über den untersuchten Druck-/Temperaturbereich im Brennraum einen linearen Zusammenhang mit der Tracerkonzentration. Bei geschlepptem Motor wurde allerdings offenbar, daß sich kein linearer Zusammenhang zwischen der Teilchendichte im Brennraum und der Fluoreszenz herstellen ließ, vielmehr blieb der Anstieg der Fluoreszenz hinter dem der Gasdichte zurück.

Durch den Einsatz der LIF-Meßtechnik ist es zum ersten Mal gelungen, in einem Benzinmotor während der Verbrennung flüssigen Kraftstoff auf der Kolbenoberfläche nachzuweisen. Darüberhinaus konnte ein enger

Zusammenhang zwischen Filmauftrag und dem während der Verbrennung gebildeten Ruß hergestellt werden.

In dieser Arbeit wurde die laserinduzierte Exciplexfluoreszenz erstmals für den Nachweis von flüssigem Kraftstoff bei Motoren mit BDE eingesetzt. Aufgrund der Verwendung eines Ersatzkraftstoffes, der wegen der Zugabe von Dodekan wesentlich schlechter verdampfte als Benzin, konnte gezeigt werden, daß bei erhöhten Einspritzdrücken zu zündungsrelevanten Zeitpunkten kein flüssiger Kraftstoff mehr in Zündkerzennähe vorhanden ist.

Zur Beurteilung der an die Gemischbildung anschließenden Verbrennung wurde die Flammenemissionsspektroskopie eingesetzt. Durch die Verwendung geeigneter Filter konnte gezeigt werden, daß es mit dieser Meßtechnik möglich ist, die vorgemischte Verbrennung, wie sie für Benzinmotoren typisch ist, von der diffusionsgesteuerten dieselähnlichen zu unterscheiden. Als Kennzeichen für die vorgemischte Verbrennung waren die Emissionen von OH bei 306nm nur bedingt geeignet, weil das in der Verbrennung gebildete Wasser aufgrund der hohen Brennraumtemperaturen thermisch zu OH zerfiel, das damit noch weit nach Verbrennungsende in der Expansion nachweisbar war. Ein weiteres Ergebnis der spektroskopischen Untersuchungen war, daß der Hauptteil des Kraftstoffes diffusionsgesteuert verbrennt.

Beide Meßtechniken wurden zur Analyse des wand- und des luftgeführten Brennverfahrens eingesetzt. Die für beide Brennverfahren geltenden aufgefundenen Aussagen werden im folgenden aufgeführt. Die LIEF-Untersuchungen zeigten den starken Einfluß des Einspritzdrucks auf die Kraftstoffverdampfung auf. Erstens konnte durch eine Drucksteigerung der Luftpfeileintrag in das Spray und damit die Verdampfung deutlich verbessert werden, zweitens führte der erhöhte Strahlimpuls zu einem schnelleren Vordringen des verdampfenden Kraftstoffes zur Zündkerze. Als unmittelbare Folge konnte, wie an dem luftgeführten Brennverfahren gezeigt, der Einspritzbeginn später erfolgen. Verbrauchsvorteile stellten sich dadurch bei beiden Brennverfahren ein. Die Gemischbildungsprozesse von Drall- und Mehrlochventil waren bei dem wandgeführten Brennverfahren vergleichbar, bei dem luftgeführten Brennverfahren zeigte sich bei dem Drallventil eine geringere Ablenkbarkeit des Sprays durch die Brennraumströmung. Des Weiteren wurde aus den Untersuchungen deutlich, daß beide Ventiltypen mit ihren unterschiedlichen Zerstäubungsprinzipien für die Gemischbildung bei der Benzindirekteinspritzung gleich gut geeignet sind.

Als eine neue Auswertemöglichkeit der LIF-Einzelbilder wurde die flächige Berechnung der Wahrscheinlichkeit, Kraftstoff in bestimmten Brennraumbereichen anzutreffen, vorgestellt. Es wurde ein enger Zusammenhang zu dem Ansteuerbeginn-/Zündzeitpunktbereich für den stabilen Motorlauf gefunden.

Ein wichtiger Schritt zur weiteren Beurteilung der Qualität der Gemisch-

bildung war der Einsatz der Flammenemissionsspektroskopie. Hier traten die Unterschiede in der Gemischbildung bei Parametervariationen ebenfalls deutlich hervor. Es zeigte sich, daß mit geringerem Einspritzdruck und späterem Ansteuerbeginn die thermische Strahlung, die mit dem in der Verbrennung gebildeten Ruß in direktem Zusammenhang steht, sehr stark zunimmt. Aus den Untersuchungen konnte abgeleitet werden, daß es für jeden Einspritzdruck einen minimalen Zeitbereich zwischen Einspritzung und Zündung gibt, der für eine gute Luft-/Kraftstoffdurchmischung eingehalten werden muß und bei dessen Unterschreitung Ruß verstärkt gebildet wird.

Deutliche Unterschiede zwischen den beiden Brennverfahren traten bei dem Vergleich der zeitlichen Entwicklung der Rußstrahlung zutage. Das Maximum der Emissionen lag für das wandgeführte Brennverfahren bei etwa 10°nOT , für das luftgeführte deutlich vor OT. Dieses konnte auf die Art des Ladungstransports zurückgeführt werden. Bei dem wandgeführten Brennverfahren gewährleistet die besonders geformte Kolbenmulde den sicheren Kraftstofftransport zur Zündkerze. Dabei zeigte sich, daß sich ein Wandfilm auf der Oberfläche ausbildet, der stark verzögert in der Expansionsphase abbrennt, und daß dieser außerdem einen unmittelbaren Einfluß auf die gebildete Rußmenge hat. Der Wandfilm bildete sich für das Drallventil mit gesteigertem Einspritzdruck stärker aus. Im Gegensatz hierzu war für das Mehrlochventil bei dem höchsten Einspritzdruck kein Film mehr nachweisbar.

Die Wandbenetzung wird durch die Brennraumströmung bei dem luftgeführten Brennverfahren vermieden. Bei gesteigertem Einspritzdruck wurden durch die optischen und thermodynamischen Untersuchungen wie bei dem wandgeführten Brennverfahren Vorteile im Kraftstoffverbrauch und für die Gemischaufbereitung aufgezeigt. Als Nachteil stellte sich allerdings heraus, daß dann der höhere Strahlimpuls die Ablenkbarkeit der Ladung in Richtung Zündkerze erschwert und sich der Ansteuerbeginn-/Zündzeitpunktbereich für den sicheren Motorlauf stark einengt.

Kapitel 8

Ausblick

Die vorliegende Arbeit bietet eine breite Grundlage für weiterführende Untersuchungen an Brennverfahren mit Benzindirekteinspritzung. Eine verbesserte Aussagefähigkeit der LIF-Meßtechnik ließe sich durch Ersatzkraftstoffe erreichen, die dem Benzin bezüglich Verdampfungsverhalten, Heizwert und Klopfneigung vergleichbar sind. Durch die Entwicklung eines geeigneten Tracergemisches könnte anschließend aus der Fluoreszenz auf die lokale Kraftstoffkonzentration geschlossen werden. Durch Einsatz von weniger komplexen Kolbengeometrien könnten weiterführende Laserlichtschnitttechniken eingesetzt werden, wie z.B. PIV zur flächigen Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeiten oder planares LIF zur flächigen Luftzahlbestimmung. Neben der LIF-Meßtechnik würde sich im nächsten Schritt der Einsatz der Ramanmeßtechnik anbieten. Damit wäre nicht nur die Quantifizierung der motorinternen Abgasrückführrate möglich sondern es ließe sich auch der Einfluß der Abgaskonzentration auf die Ladungsschichtung detailliert untersuchen. Ein weiterer Schritt wäre der Einsatz der UV-LIF-Meßtechnik zur genaueren Untersuchung der Flammenfront. Mittels eines UV-Doppelpulslasers könnten Unterschiede in den Flammenfrontgeschwindigkeiten aufgedeckt werden.

Die in dieser Arbeit verwendeten Meßtechniken ermöglichten auch einen vertieften Einblick in die Rußentstehung bei ungenügendem Luftertrag in das Kraftstoffspray. Ein besseres Verständnis der Rußbildung und -oxidation könnte hier durch die laserinduzierte Inkandeszenzmeßtechnik erreicht werden.

In Hinblick auf die strengere Abgasgesetzgebung wird es in Zukunft erforderlich sein, die Abgasrohmissionen möglichst zu minimieren. Für die Quantifizierung der Bildungsmechanismen von Stickstoffmonoxid und Kohlenmonoxid wird hier ebenfalls der Einsatz der LIF-Meßtechnik unumgänglich sein.

Literaturverzeichnis

- [Ant99] Christian Antoni. *Untersuchung der Verbrennung im direkteinspritzenden Dieselmotor mit zyklusaufgelöster Emissionsspektroskopie*. Dissertation Technische Hochschule Aachen (1999).
- [Bar93] I. Barin. *Thermochemical data of pure substances*. Weinheim, Basel, Cambridge, New York: VCH 2. Auflage (1993).
- [BHKR00] M. Beer, W. Held, M. Kerkau und A. Rehr. Der neue Motor des Porsche 911 Turbo. *MTZ - Motortechnische Zeitschrift* **61** [11], 730–743 (2000).
- [Bla00] T. Blank. Schlieren- und laseroptische Analyse der Spray-/Wandwechselwirkung von Hochdrucksprays bei der Benzindirekteinspritzung. Diplomarbeit Fachhochschule für Technik, Esslingen (2000).
- [BR28] K.F. Bonhoeffer und H. Reichardt. Zerfall von erhitztem Wasserdampf in Wasserstoff und freies Hydroxyl. *Z. physik. Chem. A* **139**, 75–97 (1928).
- [BRT50] E. Barber, B. Reynolds und W. Tierney. Elimination of combustion knock - Texaco combustion process. *SAE quaterly transactions* **5** [1], Seiten 26–42 (1950).
- [Chr96] Antigoni Chryssostomou. *Ortsaufgelöste Temperaturmessung mit laserinduzierter Prädissoziationsfluoreszenz in turbulenter Verbrennung*. Dissertation Universität Bielefeld (1996).
- [CHSS81] M. Choma, P. Havstad, A. Simko und W. Stockhausen. Fuel tolerance test with Ford PROCO engine. *SAE technical paper series no. 810439* (1981).
- [cp56] current patents. Petrol-injection engine. *Automobile Engineer*, Seite 332 **8** (1956).

- [cp58] current patents. Petrol-injection engine. *Automobile Engineer* Seite 42 **1** 1958.
- [DBM61] C. Davies, E. Barber und E. Mitchell. Fuel injection and positive ignition - a basis for improved efficiency and economy. *SAE transactions*, Seiten 120–134 (1961).
- [DO44] R.J. Dwyer und O. Oldenberg. The dissociation of H₂O into H+OH*. *J. Chem. Phys.* **12** [9], Seiten 351–361 (1944).
- [EAE01] G. Elsässer, A. Abdelfattah und H. Eichlseder. Kraftstoffspray bei der Benzindirekteinspritzung: Neue Modelle der Wandinteraktion. In *Direkteinspritzung im Ottomotor 3*. Seiten 47–63 Renningen-Malmsheim (2001). Haus der Technik Essen, Expert Verlag.
- [Eur00] Abgasgesetzestext, Direktive 98/69/EU (2000).
- [FPW96] G.K. Fraidl, W.F. Piock und M. Wirth. Actual trends and future strategies for injection and combustion systems. *SAE Technical Paper*, No. 960456 (1996).
- [GB95] J.B. Ghandi und F.V. Bracco. Fuel distribution effects on the combustion of a direct-injection stratified-charge engine. *SAE Technical Papers*, No. 950460 Seiten 221–237 (1995).
- [GKB⁺98] G. Grünefeld, S. Krüger, J. Bartelheimer, H. Finke und T. Hovestadt. Velocity Field Measurements in Sprays, Unsteady Flames, and IC Engines Using GIV. In *27. Int. Symp. Combustion* Boulder (CO) (1998).
- [GKB⁺99] G. Grünefeld, S. Krüger, J. Bartelheimer, T. Hovestadt, W. Hentschel, M. Willmann und H. Meyer. Strömungsfeldmeßverfahren ohne Partikel-Seeding für Anwendungen in Verbrennungsmotoren. In *IV. Tagung „Motorische Verbrennung“* Essen (1999).
- [Grü94] Gerd Grünefeld. *Laser diagnostics applied to practical combustion and flow systems*. Dissertation Universität Bielefeld (1994).
- [HMS00] W. Hentschel, H. Meyer und B. Stiebels. Einsatz laseroptischer Meßverfahren zur Unterstützung der Entwicklung von Brennvorgängen mit Benzin-Direkteinspritzung. In *4. Int. Symp. für Verbrennungsdiagnostik* Seiten 181–196 Baden-Baden 18.-19. Mai 2000.

- [HW78] B. Hiller und W. Wade. Single-cylinder PROCO engine studies - fuel and engine calibration effects on emissions, fuel economy and octane number requirements. *SAE technical paper series*, No. 780593 (1978).
- [IKH⁺95] T. Itoh, A. Kakuho, H. Hishinuma, T. Urushihara, Y. Takagi, K. Horle, M. Asano, E. Ogata und T. Yamasita. Development of a new compound fuel and fluorescent tracer combination for use with laser induced fluorescence. *SAE Technical Papers*, No. 952465 (1995).
- [INN⁺97] Y. Iwamoto, K. Noma, O. Nakayama, T. Yamauchi und H. Ando. Development of gasoline direct injection. *SAE Technical Papers*, No. 970541 (1997).
- [KGAH00] S. Krüger, G. Grünefeld, S. Arndt und W. Hentschel. Planar velocity measurements of the gas and liquid phase in dense sprays by flow tagging. In *10. Int. Symp of Application of Laser Techniques to Fluid Mechanics*, Lissabon 10.-13. Juli 2000.
- [Krä99] H. Krämer. *Untersuchung motorischer Gemischaufbereitungs- und Verbrennungsvorgänge mit zweidimensionaler laserinduzierter Exciplexfluoreszenz (LIEF)*. Dissertation Universität Erlangen-Nürnberg (1999).
- [Len90] H.P. Lenz. *Gemischbildung bei Ottomotoren*. Bd. 6 von *Die Verbrennungskraftmaschine*. Springer Wien, New York (1990).
- [Lew86] J. Lewis. UPS multifuel stratified charge engine development program - field test. *SAE technical paper series no. 860067* (1986).
- [MCF68] E. Mitchell, J. Cobb und R. Frost. Design and evaluation of a stratified charge multifuel military engine. *SAE technical paper series*, No. 680042 (1968).
- [Mel88] L.A. Melton. Quantitative use of exciplex-based vapor/liquid visualization systems (a user manual) (1988). Final Report.
- [Mös95] Petra Möser. *Zeitlich hochaufgelöste emissionspektroskopische Untersuchung des Verbrennungsvorgangs im Otto-Motor*. Dissertation Technische Hochschule Aachen (1995).
- [N.44] N. N. Die Einspritzung von Leichtkraftstoffen in Flugmotoren. *ATZ* **47** 3/4 1944.

- [N.55] N. N. Über den Borgward-1,5l-Rennsport-Motor mit Benzineinspritzung. *MTZ* **16**, 254–255 9 1955.
- [OAG⁺01] R. Ortmann, S. Arndt, R. Grzeszik, J. Raimann und G. Würfel. Methods and analysis of the fuel injection, mixture preparation and charge stratification in different direct injected SI engines. *SAE Technical Papers, No. 2001-01-0970* (2001).
- [Ort98] Rainer Ortmann. *Untersuchung der Strömung im Zylinder eines Viertaktermotors mit der Particle-Image-Velocimetry*. Dissertation Technische Hochschule Aachen (1998).
- [Pet59] K. Peter. Benzindirekteinspritzung beim Hochleistungs-Ottomotor. *MTZ* **17**, 313–316 9 1959.
- [Pis00] S. Pischinger. *Verbrennungsmotoren, Band 1 und 2*. Trans Aix Press Aachen (2000).
- [PK97] C. Preussner und S. Kampmann. Gasoline direct injection, a new challenge for future gasoline control systems - part 2: injector and mixture formation. *MTZ* **58** (1997).
- [Ree95] M. Reeves. *Particle image velocimetry applied to internal combustion engine in-cylinder flows*. Dissertation Loughborough University of Technology (1995).
- [Rei99] Jörg Reissing. *Spektroskopische Untersuchungen an einem Ottomotor mit Benzin-Direkteinspritzung*. Dissertation Universität Karlsruhe (1999).
- [Reu00] D.L. Reuss. Cyclic variability of large-scale turbulent structures in directed and undirected IC engine flows. *SAE Technical Papers, No. 2000-01-0246* Seiten 111–128 (2000).
- [RLL91] M. Roennbaeck, W.X. Lee und J.R. Linna. Study of induction tumble by particle image velocimetry. *SAE Technical Papers, No. 912376* (1991).
- [RSH96] U. Renz, A. Schneemann und S. Hohmann. Mechanik und Wärmeübertragung beim Aufprall von Tropfen und Sprays auf heiße Brennraumwände. In *Motorische Verbrennung, Kolloquium d. Sonderforschungsbereichs 224*. Seiten 184–202. RWTH Aachen, 19.-20.März. 1996.
- [RW32] M.G. Rassweiler und L. Withrow. Emission spectra of engine flames. *Industr. and Engin. Chemistry* **24** [5], 528–538 (1932).

- [SA01] Sigma-Aldrich. Produktdatenblätter. Internet (2001). <http://www.sigma-aldrich.com>.
- [Sch61] H. Scherenberg. Der Erfolg der Benzin-Direkteinspritzung bei Daimler-Benz. *MTZ* **22**, Seiten 247–245 (1961).
- [SCR72] A. Simko, M. Choma und L. Repko. Exhaust emission control by the Ford programmed combustion process - PROCOCO. *SAE technical paper series, No. 72052* (1972).
- [SDH⁺95] J.C. Swindal, D.P. Dragonetti, R.T. Hahn, P.A. Furman und W.P. Acker. In-cylinder charge homogeneity during cold-start studied with fluorescent tracers simulating different fuel distillation temperatures. *SAE Technical Papers, No. 950106*, Seiten 61–69 (1995).
- [SGA00] M. Schütte, G. Grünefeld und P. Andresen. Mehrdimensionale Multiparameter-Lasermess-technik für innermotorische Prozesse bei direkteinspritzenden Brennverfahren. In *Laserdiagnostische und plasmatechnologische Grundlagen zur Verminderung von Emissionen und Kraftstoffverbrauch von DI-Verbrennungsmotoren*. VDI-Technologiezentrum Physikalische Technologien, Düsseldorf (2000).
- [SKvdSE01] W. Salber, H. Kemper, F. van der Staay und T. Esch. Der elektromechanische Ventiltrieb - Systembaustein für zukünftige Antriebskonzepte, Teil 2. *MTZ - Motortechnische Zeitschrift* **62** [1], Seiten 44–55 (2001).
- [SSA92] H. Shoji, A. Saima und J. Arai. Clarification of the combustion reaction mechanism in a spark ignition engine by spectroscopic analysis. *JSAE Review* **13** [2], Seiten 4–9 (1992).
- [VHS01] H. Vögele, H. Himmel und R. Scherer. Der neue Hochleistungsmotor für den BMW M3. *MTZ - Motortechnische Zeitschrift* **62** [1], Seiten 10–18 (2001).
- [WG97] P. Wolters und M. Grigo. Entwicklung von Ottomotoren mit Direkteinspritzung: Motorkonzepte und Entwicklungswerkzeuge. Tagung Direkteinspritzung am Ottomotor Seiten 33–38 Essen (1997). Haus der Technik e.V.
- [Win01] J. Winterhagen. BMW-Ottomotoren künftig ohne Drosselklappe. Internet: www.all4engineers.com 3 2001. Suchwort: Valvetronic.

- [Wol95] D. Wolff. *Quantitative laserdiagnostische Untersuchung der Gemischaufbereitung in technischen Verbrennungssystemen*. Dissertation Universität Bielefeld (1995).

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand in der Forschungsabteilung FV/SLE2 der Robert Bosch GmbH in Gerlingen. Für die Anleitung und seine Unterstützung möchte ich besonders Herrn Prof. Dr. Andresen an der Universität Bielefeld danken, der mir die Anfertigung dieser Dissertation ermöglichte.

Herrn Prof. Dr. Grünefeld an dem LTFD-Aachen möchte ich für die Betreuung meiner Arbeit in der „heißen Phase“ herzlich danken, und für die Ratschläge bei dem Zusammenschreiben.

Besonders danken möchte ich Herrn Dr. Simon und Herrn Dr. Arndt, die mir diese Arbeit in der Firma Bosch in Gerlingen ermöglichten und die mir bei der Zielsetzung, Planung und Durchführung hilfreich zur Seite standen.

Danken möchte ich außerdem meinen Kollegen in der Abteilung FV/SLE für ihre Unterstützung. Herrn Götz, Herrn Hüttl und Herrn Zrenner danke ich für die wertvollen Ratschläge und den Beistand, wenn unerwartet Probleme bei den zahlreichen Versuchen auftraten. Danken möchte ich auch Herrn Haubold und Herrn Herzig für die vielen Tipps im Umgang mit dem PC und den technischen Geräten. Dank gilt auch Herrn Holzgrebe und Herrn Ziegler für die anregenden Unterhaltungen.

Herrn Gartung danke ich für sein offenes Gehör bei der Diskussion der Versuchsergebnisse und für die gute Zeit, die wir als Büronachbarn erlebt haben.

Einen besonderen Dank richte ich an meine Eltern und an meine Schwestern, die mich stark unterstützten und mich, wenn es mit der Arbeit nicht recht voran ging, wieder aufrichteten.

Und zuletzt danke ich Ralf und meiner Schwester Sandra für das Korrekturlesen dieser Arbeit.