

Programm Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung (BWPLUS)

**Experimentelle Untersuchung zyklischer Schwankungen der
Verbrennung im Hinblick auf Reduzierung der Motor-
Rohemissionen bei Ottomotoren mit Benzin-Direkteinspritzung**

von

Institut für Kolbenmaschinen, Universität Karlsruhe (TH)

J. Fischer, U. Spicher

Förderkennzeichen: BWD 21012

Die Arbeiten des Programms Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung wurden mit Mitteln des Landes
Baden-Württemberg und der Fa. DaimlerChrysler AG gefördert.

Juli 2004

Experimentelle Untersuchungen zyklischer Schwankungen der Verbrennung im Hinblick auf Reduzierung der Motor-Rohemissionen bei Ottomotoren mit Benzin-Direkteinspritzung (BWD 21012)

(Abschlussbericht)

J. Fischer, U. Spicher, Institut für Kolbenmaschinen, Universität Karlsruhe (TH)

Kurzfassung

Die Umsetzung des Einsparpotenzials bei Benzin-Direkteinspritzung wird durch die Komplexität der miteinander zusammenhängenden, innermotorischen Prozessabläufe erschwert. In diesem Zusammenhang wurden Ansatzpunkte zur Beeinflussung und Hinweise zur möglichen Reduzierung der zyklischen Schwankungen ermittelt. Mit einem hierfür eigens entwickelten variablen Leitsystem wurden unterschiedliche Einlass- bzw. Zylinderinnenströmungen generiert und deren Auswirkung auf motorische Parameter untersucht. Als wesentliches Resultat der Untersuchungen kann festgehalten werden, dass eine nach innen - auf die Mittelebene zwischen die beiden Einlassventile - gerichtete Einlassströmung bei einem Vier-Ventil-Motor zu einer Reduzierung der zyklischen Schwankungen führt. Aufbauend auf den reproduzierbaren Einströmbedingungen resultiert eine intensive Zylinderinnenströmung mit geringen zyklischen Schwankungen während der Gemischbildung in der Kompression. Als Folge daraus ergeben sich reproduzierbarere Entflammungsbedingungen, was zu geringen Fluktuationen bei der Flammenausbreitung führt. Das motorisch relevante Resultat dieser Prozesskette spiegelt sich in einer geringeren Standardabweichung des indizierten Mitteldrucks und den niedrigen Kohlenwasserstoff-Rohemissionen wider. Bezüglich der zyklischen Schwankungen konnte belegt werden, dass die ausschlaggebende Wirkkette bereits bei der Einströmung in den Brennraum ihren Anfang hat und sich bis hin zur Verbrennungsstabilität und den Rohemissionen auswirkt.

Summary

The main problem in developing gasoline direct injection engines are the complexity of the interlocked in-cylinder processes. Due to this the investigations gave hints to reduce the cycle-to-cycle variability of these processes. Therefore a variable air guiding system which is able to generate different intake air flows has been developed and investigated. The investigations showed that by varying the inlet flow condition, it is possible to improve flow stability in the combustion chamber during the important compression phase. Moreover, it is possible to increase the kinetic energy by changing the design of the inlet manifold. The investigations showed that with an intake flow concentrated to the midsection of the cylinder between the two intake valves this stability can be increased significantly. Additionally the influence of the intake air flow on the cycle-to-cycle variability of in-cylinder air motion, on inflammation and combustion as well as on hydrocarbon emissions has been analysed. Using different optical and numerical techniques, it could be proved that with stable flow configurations, the fluctuation range of HC-emission decreases. The positive impact of this stabilisation on both combustion and HC-emissions could be shown. These conditions are the prerequisite for a high degree of stratification and stable engine operation with low hydrocarbon emission.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	3
1. Einleitung	4
2. Versuchsträger	4
3. Messtechniken.....	6
3.1. Particle-Image-Velocimetry (PIV).....	6
3.2 Einspritzstrahl-Visualisierung	7
3.3 Flammvisualisierung	7
3.4 Zündfunken-Emissionsspektroskopie	7
3.5 Numerische Simulation.....	9
3.6 Sonstige Messtechniken.....	9
3.7 Versuchsaufbau für die Simultanmessungen	9
4. Ergebnisse	10
4.1 Einströmbedingungen	10
4.2 Zylinderinnenströmung.....	12
4.3 Entflammung.....	14
4.4 Verbrennung	16
4.5 Simultanmessungen	19
5. Schlussfolgerung.....	24
6. Zusammenfassung.....	24
7. Literatur.....	26

1. Einleitung

Das Konzept des Ottomotors mit Direkteinspritzung (BDE) ist eine der Erfolg versprechendsten Einzelmaßnahmen zur Kraftstoffeinsparung und somit zur Reduktion der CO₂-Emissionen. Ein zentrales Problem der Benzin-Direkteinspritzung stellen die Abgasemissionen dar. Die zukünftigen Abgasemissionsgrenzwerte (EU IV, EU 5, ULEV, SULEV) können allein durch den Einsatz aufwendiger Abgasnachbehandlungsmethoden bei den verbrauchsarmen Konzepten mit Direkteinspritzung nicht erfüllt werden. Zur Einhaltung dieser Grenzwerte müssen zusätzlich die Rohemissionen deutlich reduziert werden. Nur durch die Kombination von extrem niedrigen Rohemissionen und effizienten Nachbehandlungsmethoden wird es möglich, die zukünftigen Abgasgrenzwerte mit niedrigsten Emissionen einzuhalten. Das Hauptproblem stellen hierbei die zyklischen Schwankungen im Verbrennungsablauf dar, welche zu hohen momentanen Abgasemissionen führen. Ursache dafür ist das Zusammenwirken mehrerer instationärer Vorgänge, wie z.B. die Kraftstoffeinspritzung, die turbulente Gasbewegung und die Zündung von inhomogenem Gemisch. Vor allem bei Teillast steht ein kleines Zeitfenster für die Gemischaufbereitung zur Verfügung, wodurch eine hohe Sensitivität bezüglich zyklischer Schwankungen gegeben ist. In diesem Vorhaben sollen die Zusammenhänge und die Entstehungsquellen dieser Schwankungen mit Hilfe laseroptischer Messmethoden sowie der thermodynamischen Analyse untersucht werden. Ausgehend von diesen Untersuchungen sollen die gewonnenen Erkenntnisse direkt in die Entwicklung des BDE-Brennverfahrens mit niedrigsten Schadstoffemissionen bei gleichzeitig geringstem Verbrauch einfließen.

2. Versuchsträger

Als Versuchsträger für die Untersuchungen wurde ein Rotax-Einzylinder-Viertaktaggregat verwendet (siehe Abbildung 2.1), welches am Institut bereits als Ottomotor mit Direkteinspritzung sowohl mit wandgeführtem als auch luftgeführtem Verfahren betrieben wurde [1, 2, 3]. Innerhalb des Vorhabens wurde der Motor als Ottomotor mit Direkteinspritzung nach dem luftgeführten Verfahren betrieben.

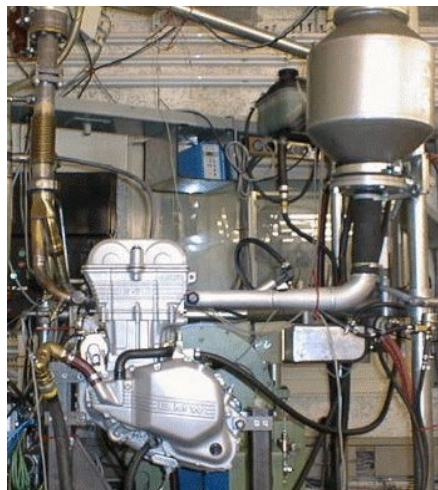


Abbildung 2.1: Versuchsaggregat

Das luftgeführte Konzept besitzt ein variables Leitsystem zur Generierung von Tumbleströmungen [2]. Das in Abbildung 2.2 schematisch dargestellte Leitsystem besteht aus einer Stellklappe, welche es ermöglicht, einen Teil des Kanalquerschnittes kontinuierlich zu verschließen sowie daran anschließende bis zu den Ventilen reichende Leitbleche.

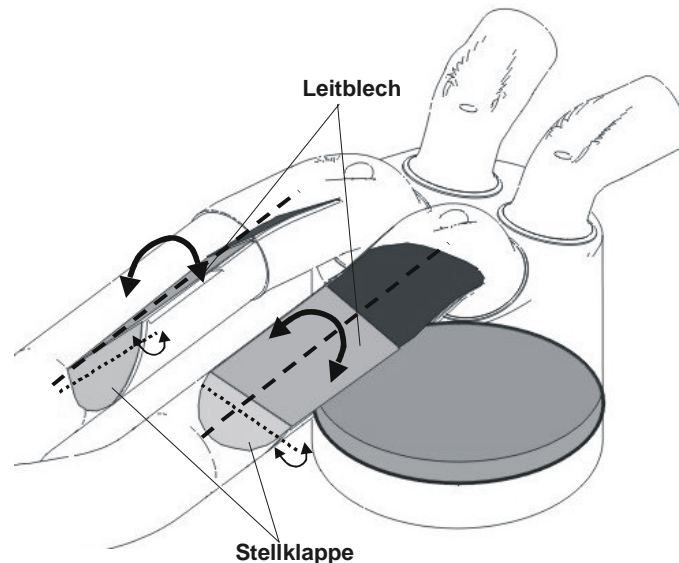


Abbildung 2.2: Prinzip des variablen Leitsystems

Das verwendete Einzylinder-Aggregat verfügt über jeweils zwei Einlass- und Auslass-Ventile. Am Motor wurde das oben erwähnte, verstellbare Tumble-System adaptiert, mit dem es möglich ist, die Ansaugströmung durch Verschließen eines Teils des Ansaugkanalquerschnittes zu beschleunigen und eine Zylinderinnenströmung mit erhöhter kinetischer Energie zu generieren [4]. Für jedes Einlassventil existiert ein eigenes unabhängiges Leitsystem mit einer Verdrehmöglichkeit um die Hauptströmungsachse. Durch dieses System und die Kanalführung wird im Brennraum ein Forward-Tumble generiert, der in Abhängigkeit der Leitblech-Verdrehung verändert werden kann, so dass die Einlassströmung in den Zylinder – wie in Abb. 2.3 dargestellt – variiert werden kann. Untersucht wurden vier verschiedene Konfigurationen. Konfiguration 1 entspricht einer Einströmung über die obere Ventilhälfte mit einer relativ breiten Einströmfläche. Konfiguration 2 dagegen konzentriert die Einlassströmung auf den Bereich zwischen den Ventilen, die Konfigurationen 3 und 4 leiten die einströmende Luft über die Ventilaußenseiten in den Brennraum. Bei allen präsentierten Ergebnissen wurde der Kanalquerschnitt auf ein Minimum – ca. 1/3 des ursprünglichen Querschnitts - reduziert.

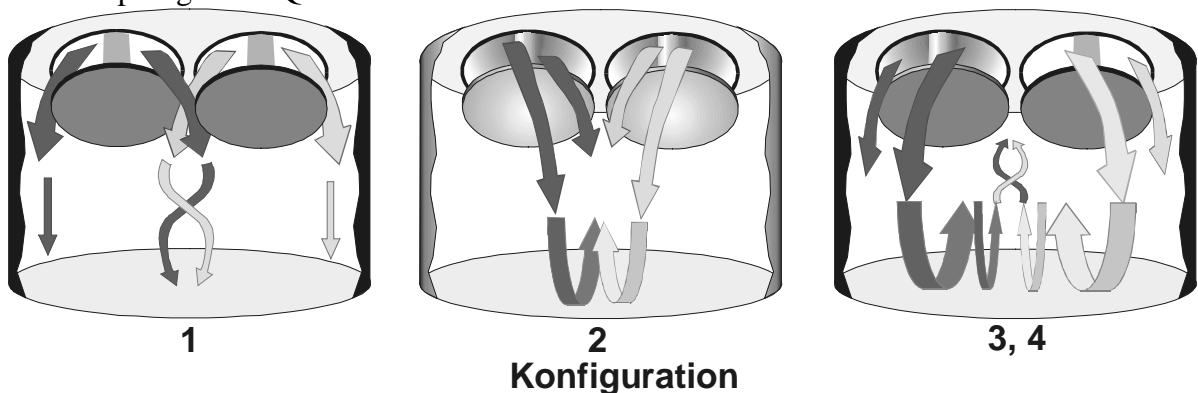


Abbildung 2.3: Einströmcharakteristik für die unterschiedlichen Tumble-System-Konfigurationen

Für die Untersuchungen wurde das Kühlmittel des Motors auf 60° C konditioniert. Als Kraftstoff wurde Iso-Oktan verwendet, was sich aufgrund des geringen Niederschlags auf den optischen Zugängen als vorteilhaft erwies. Die Untersuchungen wurden bei den in Tab. 2.1 dargestellten Parametern durchgeführt.

Drehzahl [1/min]:	2000
mittlerer Saugrohrdruck [mbar]:	980
Einspritzdruck [bar]:	100
Einspritzdauer [ms]:	1,0
Ansteuerbeginn Einspritzung [°KW v. OT]:	60
p_{mi} [bar]:	3,1

Tabelle 2.1: Betriebspunktparameter

Die Visualisierung der innermotorischen Vorgänge erfordert eine sehr gute optische Zugänglichkeit des Versuchsaggregates. Für diese Untersuchungen wurde ein Einzylinder-Aggregat eingesetzt, welches mit einem Quarzglasring zwischen Zylinderkopf und Zylinder ausgerüstet ist. Zur Unterdrückung des Streulichtes wurde eine Hälfte des Ringes mit lichtabsorbierender Farbe lackiert, so dass die Beobachtung nur von einer Seite möglich war.

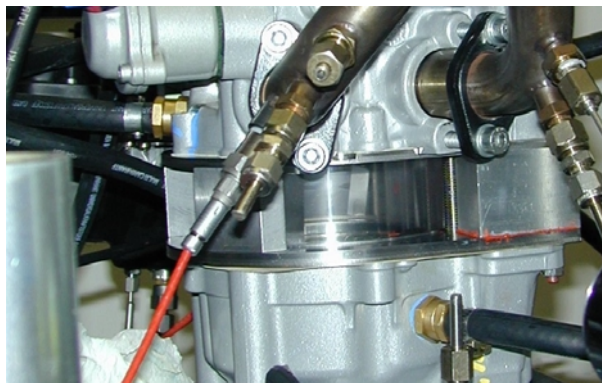


Abbildung 2.4: Optischer Zugang am Versuchsaggregat

3. Messtechniken

3.1. Particle-Image-Velocimetry (PIV)

Zur Untersuchung der Zylinderinnenströmung wurde das optische Messverfahren Particle-Image-Velocimetry (PIV) zur zweidimensionalen Strömungsanalyse eingesetzt [5, 6].

Bei der Particle-Image-Velocimetry werden zur Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit im Messbereich Tracerpartikel, die dem Fluid beigemischt werden, mittels eines gepulsten Laserlichtschnitts beleuchtet. Das an den Teilchen gestreute Licht wird daraufhin mit einer senkrecht zur Messebene angeordneten Kamera detektiert. Auf diese Weise wird ein zweidimensionales Feld beleuchteter Partikel aufgenommen. Durch zwei Belichtungen in kurzem zeitlichem Abstand lässt sich die Positionsänderung der Teilchen zwischen den beiden Belichtungen unter Berücksichtigung des dazwischen liegenden Zeitintervalls ermitteln. Hieraus kann ein örtlich hoch aufgelöstes Feld lokaler, zweidimensionaler Geschwindigkeitsvektoren bestimmt werden.

Als Lichtquelle wurde ein Nd-YAG-Doppelpulslaser-System mit einer maximalen Taktfrequenz von 15 Hz und einer maximalen Pulsenergie von 50 mJ bei einer Wellenlänge von 532 nm verwendet. Die Erzeugung des Lichtschnitts zur Beleuchtung der Messebene erfolgte über eine Lichtschnittoptik, bestehend aus einer Zylinder- und einer sphärischen Linse. Für die Detektion des Streulichtes wurde eine Double-Frame-CCD-Kamera (12-bit; 1280x1024 Bildpixel) verwendet, die es ermöglicht, zwei Aufnahmen mit einem minimalen zeitlichen Bildabstand von 200 ns aufzunehmen.

3.2 Einspritzstrahl-Visualisierung

Zur Visualisierung des Einspritzstrahls wurde die Streulichttechnik verwendet. Hierzu wurde eine Stroboskop-Lampe der Fa. Polytec mit einer maximalen Wiederholfrequenz von 20 Hz und einer Pulsenergie von max. 2,16 J zur integralen Beleuchtung des Sprays verwendet. Mit dieser Technik lässt sich der Flüssigphasen-Anteil des Kraftstoffstrahls visualisieren. Das an den Tropfen gestreute Licht wurde mit einer, zu den PIV-Messungen baugleichen, CCD-Kamera aufgenommen.

3.3 Flammenvisualisierung

Zur optischen Untersuchung des Verbrennungsablaufs wurde die natürliche Emission der bei der Verbrennung auftretenden Radikale ausgenutzt. Die bei einer motorischen Verbrennung auftretenden Emissionsspektren beschränken sich auf den ultravioletten Wellenlängenbereich und auf das sichtbare Spektrum. Bei diesen Untersuchungen wurde die Chemilumineszenz der die Flammenfront charakterisierenden OH-Radikale detektiert. Dabei wurden zwei unterschiedliche Kamerasysteme verwendet. Beide Systeme unterscheiden sich dabei in ihrer zeitlichen und räumlichen Auflösung. Zur detaillierten Visualisierung der Chemilumineszenz der OH-Moleküle wurde eine intensivierete CCD-Kamera mit einem Nikon 105mm-UV-Objektiv und einem CCD-Chip mit 640x480 Bildpunkten verwendet. Zur Filterung der Verbrennungsstrahlung wurde eine spezielle Spiegelkombination eingesetzt, welche als effizienter, schmalbandiger Filter wirkt. Die Belichtungszeit betrug bei allen Messungen 10 μ s. Mit diesem Kamerasystem konnte eine Aufnahme pro Verbrennungsvorgang mit einer hohen räumlichen Auflösung detektiert werden. Zur zeitlich hochaufgelösten Erfassung der Flammenausbreitung wurde des Weiteren eine Photomultiplier-Kamera eingesetzt [7]. Die Photomultiplier haben den Vorteil, bereits geringste Lichtmengen im Wellenlängenbereich von 270 nm bis 600 nm zu detektieren und diese mit einer hohen zeitlichen Auflösung von 200 kHz in elektrische Impulse umzuwandeln [8]. Die Erfassung der Verbrennungsstrahlung wird bereits seit längerem zur Analyse des Entflammungsverhaltens und des Klopfens, z.B. durch Lichtleiterzündkerzen und einzelne optische Sonden im Brennraum, eingesetzt [9, 10].

3.4 Zündfunken-Emissionsspektroskopie

Zur Bestimmung des lokalen Luft-Kraftstoff-Verhältnisses an oder zumindest in der Nähe der Zündkerze wurden aufgrund des großen Einflusses dieser Größe auf die weitere Flammenausbreitung diverse Analysemethoden entwickelt und eingesetzt [11, 12, 13]. Innerhalb dieses Pro-

jekt es wurde hierfür die so genannte Zündfunken-Emissionsspektroskopie als einfach zu adaptierende Analysemethode zur Bestimmung der Gemischzusammensetzung und deren Schwankung im Zündfunken in Kombination mit der Lichtleiter-Messtechnik eingesetzt [14]. In Kombination mit einem Photomultiplier-Detektor können nach einer Kalibrierung des Messaufbaus bei homogenen Betriebspunkten die Luftverhältnisse an der Zündkerze zyklusaufgelöst im Schichtladebetrieb bestimmt werden [15, 16]. Zum Verständnis der Funktionsweise dieser Analysemethode wird im Folgenden auf die notwendigen Details der elektrischen Funkenzündung eingegangen. Zu Beginn des Zündvorganges steigt im sich ausbildenden Plasmakanal die Temperatur auf ca. 60.000 K bei einem Druck von mehreren hundert bar an, wodurch alle Moleküle im Kanal dissoziiert und ionisiert vorliegen. Während der anschließenden Bogenphase rekombinieren die in der Durchbruchphase gebildeten atomaren Ionen und bilden zweiatomige Moleküle. Hierbei sind die Stickstoff-Verbindungen, wie z.B. NO, NH und CN, spektroskopisch dominant. Nach 10 - 20 μ s kühlt der Plasmakern auf Flammentemperatur ab und es können chemische Reaktionen zur Flammenkernbildung erfolgen. Die CN-Emission unmittelbar nach dem Durchbruch kann dabei zur quantitativen Bestimmung der Kraftstoff-Konzentration im Zündfunken herangezogen werden. Aufgrund der im Brennraum vorhandenen Luft steht ausreichend Stickstoff zur Verfügung, so dass für die Bildung des CN-Moleküls die Anzahl der Kohlenstoffatome der begrenzende Faktor darstellt. Diese stammen maßgeblich aus der Dissoziation der Kraftstoffmoleküle, so dass die Anzahl der CN-Moleküle und damit die Emissionsintensität abhängig ist von der Kraftstoff-Konzentration, d.h. der Anzahl der Kraftstoffmoleküle je Volumeneinheit. Daraus lässt sich ableiten, dass die CN-Intensität direkt mit der Kohlenstoffatomdichte n_C in Zusammenhang steht. Basierend auf diesen Überlegungen lassen sich mit einer Kalibrierung bei unterschiedlichen homogenen Luft-Kraftstoff-Verhältnissen bzw. Kohlenstoffatom-Dichten die zyklusaufgelösten lokalen Luftverhältnisse bei heterogener Gemischverteilung im Brennraum bestimmen. Zur Quantifizierung der CN-Emission wurde die Intensität der Strahlung bei einer Wellenlänge von 388 nm herangezogen.

Für die spektroskopische Analyse der aus dem Brennraum ausgekoppelten Zündfunken-Emission wurde das Licht des Zündfunkens mittels Lichtleiter in einen mit einem Interferenzfilter versehenen Photomultiplier eingekoppelt. Die Zentralwellenlänge des Filters lag bei 390 nm mit einer Halbwertsbreite von ± 5 nm. Mit dem Photomultiplier kann die Funkenemission kontinuierlich aufgezeichnet werden, wodurch 300 aufeinanderfolgende Arbeitsspiele vermessen werden konnten. Zur Eliminierung des Einflusses der während der Messphase eingekoppelten Zündenergie auf die Funkenintensität wurde diese zeitlich aufgelöst an der Zündkerze gemessen und mit den Photomultiplier-Daten zusammen aufgezeichnet. Anschließend wurde die ermittelte Zündenergie zur Normierung des Emissionssignals des jeweiligen Zyklus herangezogen. Die Kalibrierung der Signalintensitäten und des Versuchsaufbaus erfolgt im Homogenbetrieb bei bekanntem Luft-Kraftstoff-Verhältnis und bekannter eingespritzter Kraftstoffmasse.

Umfassende Untersuchungen von Fansler et al. [15] zeigen, dass die Beeinflussung des CN-Signals durch Restgas mit moderaten Restgasanteilen von ca. 10 %, wie sie auch bei diesen Untersuchungen vorlagen, innerhalb der Messunsicherheit liegt. Für höhere Restgasanteile ist jedoch mit einer stärkeren Beeinflussung durch die im Restgas vorhandenen Komponenten CO und CO₂ zu rechnen, so dass die Anwendbarkeit dieser Analysemethode für hohe Restgasanteile fraglich ist. Des Weiteren wurde der Einfluss der Gastemperatur zum Zündzeitpunkt untersucht und keinerlei Abhängigkeit des CN-Signals detektiert. Dies kann mit der im Verhältnis zur Plasmatemperatur geringen mittleren Gastemperatur im Brennraum erklärt werden.

3.5 Numerische Simulation

Ergänzend zu den laseroptischen Messverfahren wurde die dreidimensionale Strömungssimulation eingesetzt. Hierzu wurde das mit dem Leitsystem versehene Einzylinderaggregat mit dem CFD-Code *Star-CD* bezüglich der Ausbildung einer gezielten Strömung und Tumblebildung untersucht. Basierend auf den geometrischen Daten der CAD-Konstruktion von Motor und Ansaugtrakt wurde ein Rechengitter mit 430.000 Zellen (295.000 Zellen im OT) entworfen (siehe Abb. 3.1). Die Ansaugrohre mit den Klappen wurden modular als separate Volumengitter mit dem Zylindergitter über Arbitrary-Couples angefügt und konnten daher für Variantenrechnungen mit geringem Aufwand gedreht werden.

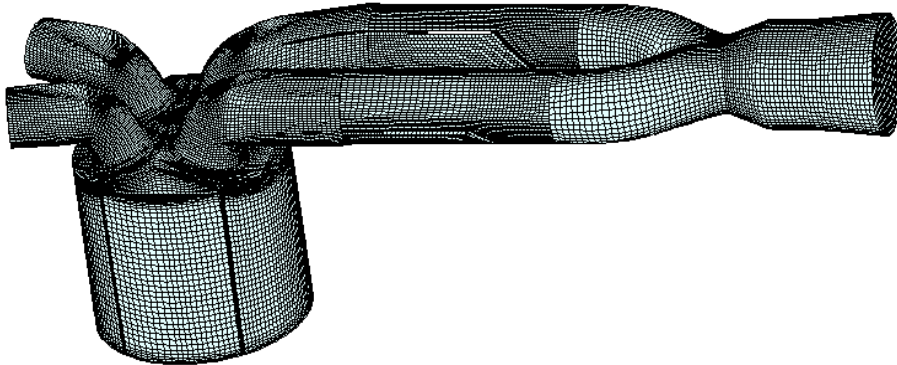


Abbildung 3.1: Rechengitter für die dreidimensionale Strömungssimulation

3.6 Sonstige Messtechniken

Während der Untersuchungen kamen neben den optischen Messtechniken die Zylinderdruckindizierung, Saugrohr- und Abgasdruckindizierung sowie die schnelle Abgasmesstechnik zum Einsatz. Die Druckindizierung diente zur thermodynamischen Analyse des Verbrennungsvorgangs und des Ladungswechsels. Mit einem Fast-Response-Flammen-Ionisationsdetektors (FRFID) der Firma Cambustion wurde der zeitliche Verlauf der Kohlenwasserstoffkonzentration im Auslass bestimmt. Mit der Druckindizierung und dem schnellen Abgasanalysegerät ist es möglich, die durch die PIV-Messtechnik gewonnenen Ergebnisse mit integralen Verbrennungsparametern und den Emissionen unverbrannter Kohlenwasserstoffe (HC) zu korrelieren.

3.7 Versuchsaufbau für die Simultanmessungen

Für die simultane Visualisierung wurde der in Abbildung 3.2 schematisch dargestellte Messaufbau verwendet. Zur Generierung einer Tumble-Strömung im Brennraum wurde in den Einlasskanälen das oben erläuterte Einlasssystem verwendet. Für die Untersuchungen wurde das Kühlmittel des Motors auf 60° C konditioniert. Als Kraftstoff wurde Iso-Oktan verwendet, was sich aufgrund des geringen Niederschlags auf den optischen Zugängen als vorteilhaft erwies. Die Untersuchungen wurden mit den in Tabelle 2.1 dargestellten Parametern durchgeführt.

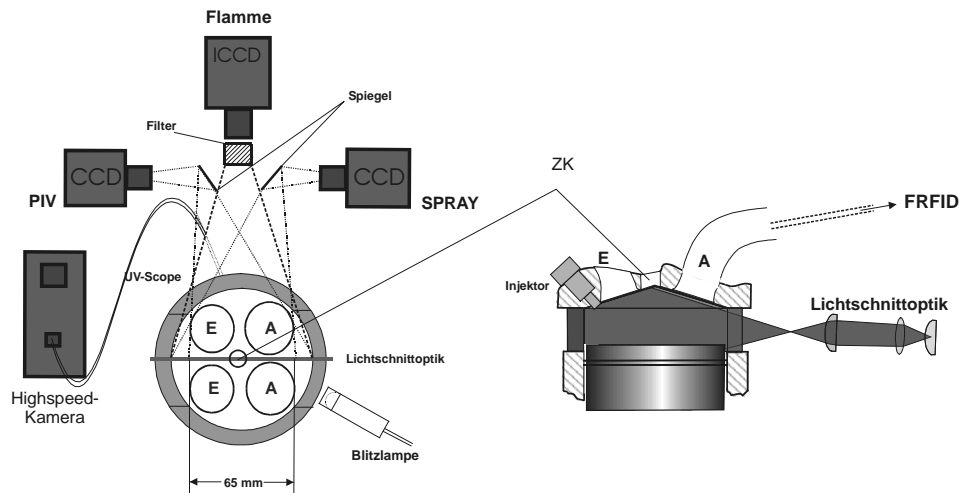


Abbildung 3.2: Messaufbau zur simultanen Visualisierung der innermotorischen Vorgänge

4. Ergebnisse

4.1 Einströmbedingungen

Zur Beurteilung der Strömungsbedingungen während der Ansaugphase werden im Folgenden aufgrund der freien Wahl der Betrachtungsebene ausschließlich Berechnungsergebnisse herangezogen. Die berechneten Strömungsfelder wurden von Fischer et al. [2] PIV-Messungen gegenübergestellt, wobei eine gute Übereinstimmung beider Strömungen ermittelt werden konnte.

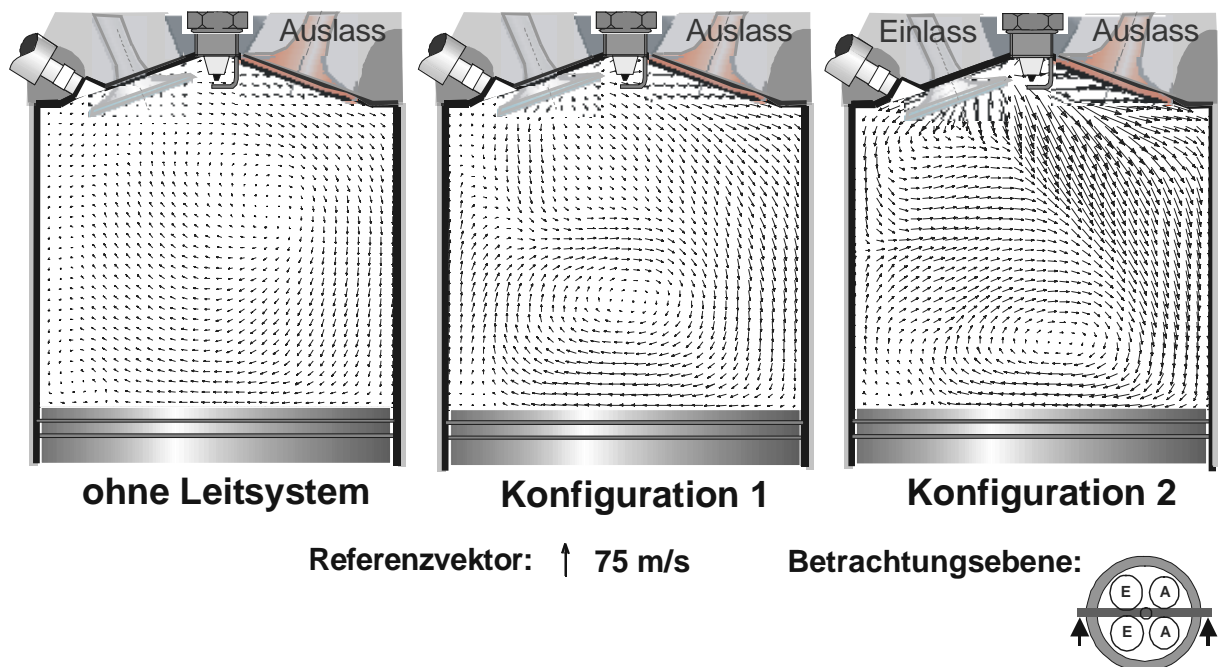


Abbildung 4.1: Berechnete Einlassströmung in Abhängigkeit der Leitsystem-Konfiguration

In Abbildung 4.1 sind die Strömungsfelder verschiedener Leitsystem-Konfigurationen im unteren Totpunkt (UT) dargestellt. Die Verlagerung der einströmenden Frischluft auf die obere Ventilhälfte ist bei beiden Konfigurationen mit geschlossener Stellklappe gegenüber der Konfiguration ohne Leitsystem deutlich erkennbar. Während ohne Leitsystem eine homogen verteilte Einströmung über den gesamten Ventilbereich vorliegt, strömt bei Konfigurationen mit geschlossenen Stellklappen nahezu kein Frischgas über die untere Ventilseite in den Brennraum ein. Beide Konfigurationen weisen bereits zu dieser frühen Kurbelwellenstellung eine ausgeprägte Tumblestruktur mit vergleichbarer Lage des Tumblezentrums auf. Durch die Leitsystem-Verdrehung bei Konfiguration 2 wird dieser Einlassmassenstrom in der Meridianebene wesentlich größer und tritt steiler, d.h. mehr zur Vertikalen geneigt, in den Brennraum ein.

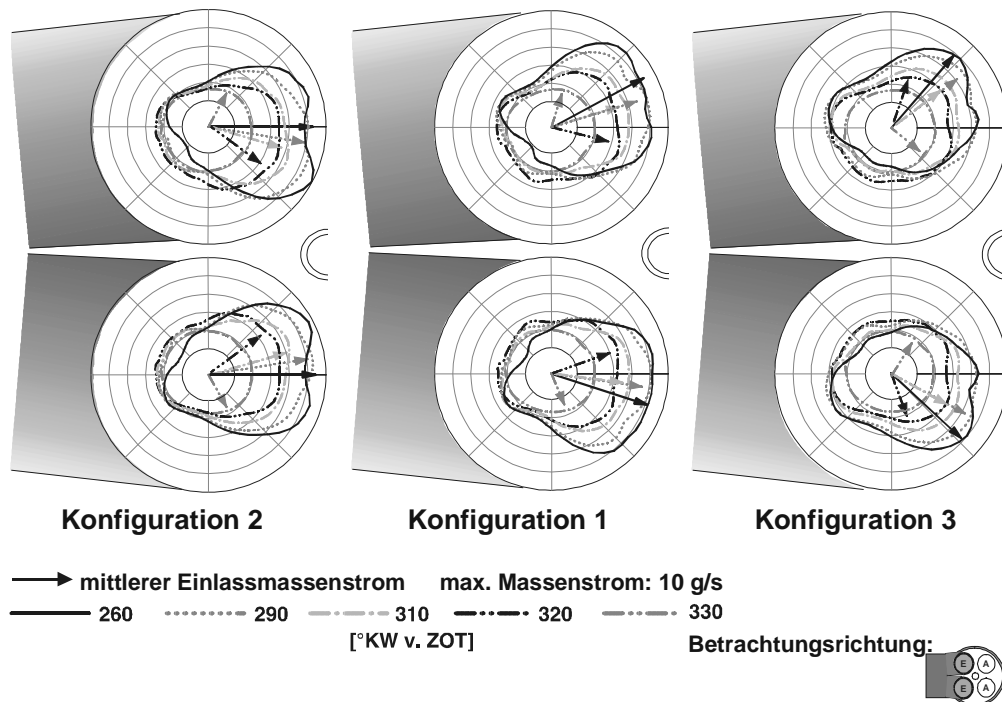


Abbildung 4.2: Einlassmassenströme in Abhängigkeit der Leitsystem-Konfiguration

Die in Abbildung 4.2 dargestellte Verteilung der berechneten Einlassmassenströme in den Brennraum bestätigt dies. Dazu wurde die Verteilung der einströmenden Luftmasse über den Ventilspalt aus der numerischen Simulation zu verschiedenen Kurbelwinkelstellungen bzw. Ventilhuben ermittelt. Die eingezeichneten Pfeile repräsentieren die Richtung des mittleren Einlassmassenstroms der jeweiligen Kurbelwinkelstellung in den Brennraum. Wie erwartet, strömt der Hauptanteil der Luftmasse bei Konfiguration 3 über die Außenseite der Ventile in den Brennraum ein. Erkennbar ist dies durch die divergierenden Vektoren der mittleren Einlassmassenströme beider Ventile. Lediglich zu dem frühen Kurbelwinkel 330° KW v. ZOT mit einem geringen Ventilhub von 2 mm ist die Einlassströmung in Richtung Brennraummitte orientiert. Bei maximalem Ventilhub strömt die mittlere Luftmasse mit nahezu 45° zur Meridianebene in den Außenbereich des Brennraums. Für die Konfiguration 1 ergibt sich ebenfalls eine divergierende Einlassströmung, jedoch mit wesentlich kleinerem Winkel. Die Ursache hierfür liegt in der nach außen geneigten Mittelachse der getrennten Kanäle. Die Leitsystem-Verdrehung bei Konfiguration 2 resultiert in einer zur Mittelebene des Brennraums konvergierenden Einlassströmung. Dies wird in Abbildung 4.2 durch die Orientierung der Vektoren deutlich. Lediglich zu Beginn der Einlassphase mit geringem Massenstrom und kleinem Ventilhub ergibt sich eine nahezu gleichmäßige Einströmung über den gesamten Ventilspaltbereich. Zu späteren Kurbel-

winkelstellungen verstärkt sich die Unsymmetrie der Massenverteilung, und es liegt eine konvergierende Einströmung in den Brennraum vor. Bei maximalem Ventilhub ist die Richtung des mittleren Massenstroms nahezu parallel zur Brennraummittelebene. Der maximale Massenstrom zu diesem Kurbelwinkel ist jedoch deutlich, mit einem Winkel von ca. 30°, nach innen zur Brennraummitte orientiert.

Wie die obigen Ausführungen zeigen, können aus der numerischen Simulation wichtige Erkenntnisse bezüglich des Einströmverhaltens des Frischgases in den Brennraum bei einer Variation der Leitsystem-Konfiguration gewonnen bzw. Gedankenmodelle über das Einströmverhalten verifiziert werden.

4.2 Zylinderinnenströmung

Wie oben bereits erwähnt, besitzen die Zylinderinnenströmung und deren Stabilität einen enormen Einfluss auf die anschließende Verbrennung. Aus diesem Grund ist es äußerst wichtig, detaillierte Kenntnisse über die Strömungsstruktur und deren Stabilität von Zyklus-zu-Zyklus zu erlangen. Hierzu wurden die oben beschriebenen Strömungskonfigurationen bezüglich Struktur und Stabilität während der Kompression bei 70° KW v. ZOT untersucht.

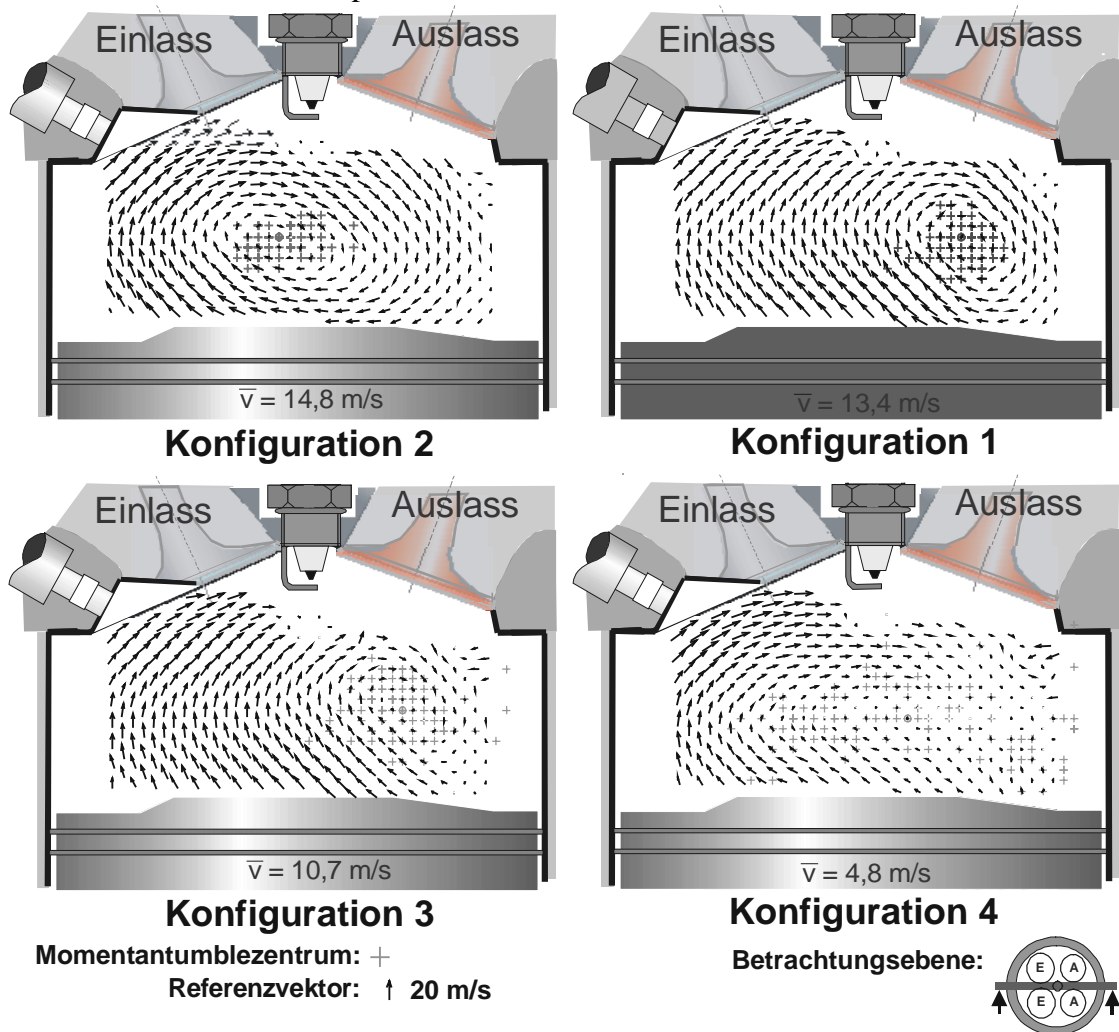


Abbildung 4.3: Strömungsstrukturen bei unterschiedlichen Konfigurationen

Der Forward-Tumble der Konfiguration 1 ist stark ausgeprägt und weist ein auf die Auslassseite verschobenes Tumble-Zentrum auf (siehe Abbildung 4.3). Die kinetische Energie im Strömungsfeld ist hoch. Diese ist bei der Konfiguration 2 weiter erhöht, wohingegen die Konfigurationen 3 und 4 eine geringe Strömungsdynamik aufweisen. Erkennbar wird die unterschiedliche Kinetik der Strömung auch mit Hilfe der über das Messfeld gemittelten Strömungsgeschwindigkeit. Die höchste mittlere Geschwindigkeit weist Konfiguration 2 mit 14,8 m/s auf, während Konfiguration 1 lediglich 13,4 m/s aufweist. Die beiden anderen zeigen deutlich geringere Strömungsgeschwindigkeiten mit 10,7 und 4,8 m/s. Bei der Betrachtung des Tumble-Zentrums fällt auf, dass im Gegensatz zu den anderen Strömungsfeldern lediglich das Tumble-Zentrum bei Konfiguration 2 nahezu brennraummittig positioniert ist. Alle anderen Einstellungen zeigen ein auf die Auslassseite verschobenes Wirbelzentrum.

Nicht nur die Strömungsstruktur und -dynamik werden mit der Einströmcharakteristik verändert, sondern auch die Stabilität des Strömungsfeldes wird beeinflusst. Die Analyse der Einzelmessungen und der daraus bestimmten Standardabweichungen zeigt, dass durch die richtige Wahl der Einlassströmung eine signifikante Verbesserung der Strömungsstabilität erzielt werden kann (siehe Abbildung 4.4). Bei der Konfiguration 2 ist dabei die Richtungsstandardabweichung der Vektoren mit $29,3^\circ$ am kleinsten. Konfiguration 1 weist eine ca. 20% größere Abweichung auf - die anderen Strömungen zeigen wesentlich höhere Standardabweichungen. Somit ist bei einer zur Brennraummitte gerichteten Einlassströmung die Streubreite der zyklischen Strömungsschwankungen am geringsten, d. h. die Strömungsstruktur und das Geschwindigkeitsniveau sind bei der Konfiguration 2 am Stabilsten ausgebildet.

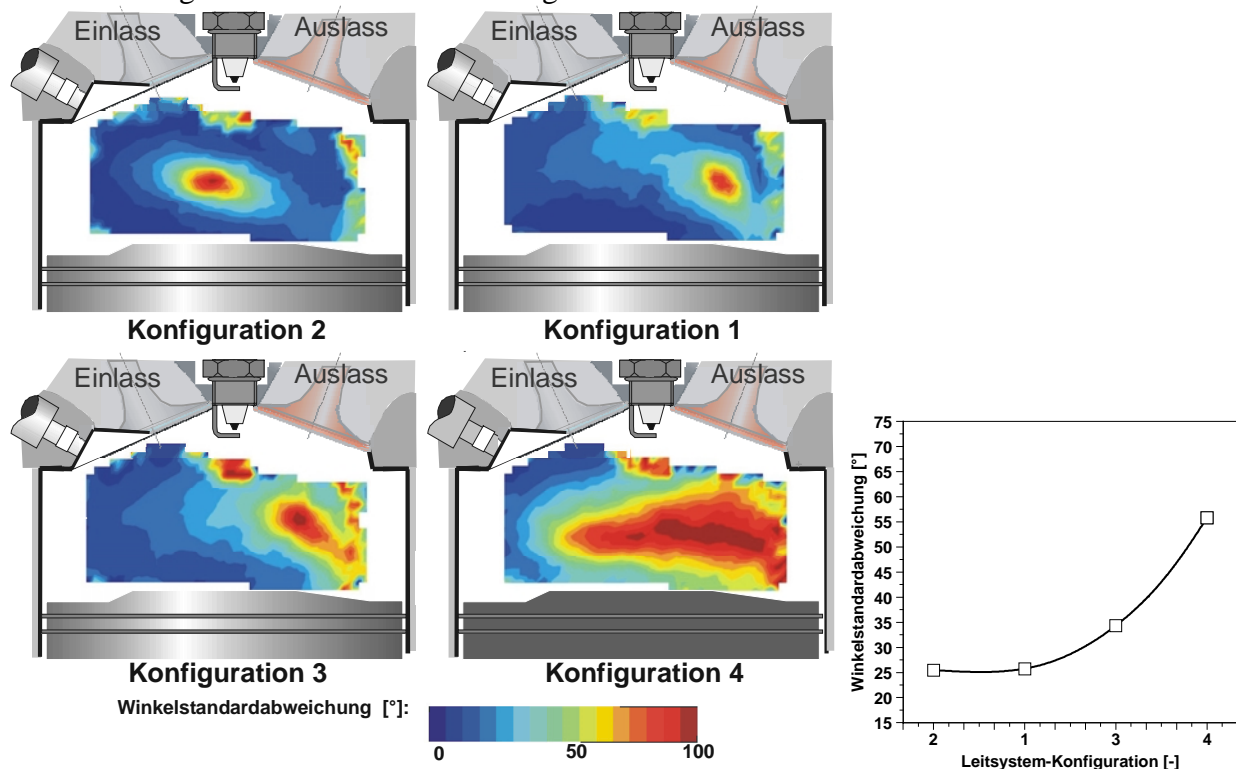


Abbildung 4.4: Strömungsstabilität bei unterschiedlichen Konfigurationen

4.3 Entflammung

Die oben diskutierte Zylinderinnenströmung bildet die Grundlage des für den Motorbetrieb relevanten Prozesses der Verbrennung und Energieumsetzung. Für den Ablauf der Verbrennung sowie der Schadstoffemission sind die innermotorischen Randbedingungen zum Zündzeitpunkt ausschlaggebend. Im Folgenden werden die Auswirkungen der Ansaugsystem-Konfiguration auf die Entflammung, die Verbrennung und Kohlenwasserstoff-Rohemissionen und deren zyklische Schwankungen vorgestellt.

Eine in vielen Veröffentlichungen [17,18, 19] ausführlich beschriebene Einflussgröße auf den Ablauf der Verbrennung ist das zum Zündzeitpunkt an der Zündkerze vorliegende Luft-Kraftstoff-Verhältnis. Durch dieses wird die laminare Brenn- und damit die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Verbrennung in der Entflammungsphase bestimmt. Dies wiederum wirkt sich auf den Verlauf des Kraftstoffmassenumsatzes aus. Mit der oben beschriebenen Zündfunken-Emissionsspektroskopie wurden für verschiedene Leitsystem-Konfigurationen die zyklus aufgelösten, lokalen Luftverhältnisse am Zündort bestimmt. Zur Zündfunken-Emissionsspektroskopie muss angemerkt werden, dass die Bestimmung des Luftverhältnisses in der ersten, sehr kurzen Phase des Zündfunkens stattfindet. Aufgrund der anschließenden langen Glimmphase (ca. 1-2 ms) des Zündfunkens kann auch bei einem ermittelten, sehr mageren Luftverhältnis zündfähiges Gemisch die Zündkerze erreichen und dort entflammt werden. Folglich liegt bei Detektion eines mageren Luftverhältnisses nicht zwingend ein Verbrennungsaussetzer vor.

In Abbildung 4.5 sind für die Leitsystem-Konfigurationen 1, 2 und 3 bei geschlossener Stellklappe die Wahrscheinlichkeitsdichte-Verteilungen der Luftverhältnisse für verschiedene Zündzeitpunkte dargestellt. Zur Bestimmung dieser Verteilungsfunktionen wurde der Einspritzdruck auf 100 bar, die Einspritzdauer auf 1,0 ms und der Ansteuerbeginn auf 60° KW v. ZOT belassen. Dabei zeigt die Messung, dass für die Leitsystem-Konfiguration 3 zum frühen Zündzeitpunkt 42° KW v. ZOT kein Kraftstoff an die Zündkerze transportiert wird, da nahezu in keinem Arbeitsspiel zündfähiges Gemisch zu diesem Kurbelwinkel an der Zündkerze vorliegt. Das mittlere Luftverhältnis beträgt $\lambda_m = 8,3$. Für die späteren Zündzeitpunkte ergibt sich eine stetige Abnahme des Luftverhältnisses, jedoch weiterhin mit sehr vielen äußerst mageren Arbeitsspielen. Die Verteilungsfunktion für die unterschiedlichen Zündzeitpunkte verschiebt sich mit späterem Zündzeitpunkt zunehmend in den Bereich zündfähiger Gemische, jedoch liegt für alle untersuchten Zündzeitpunkte eine sehr breite Verteilung vor.

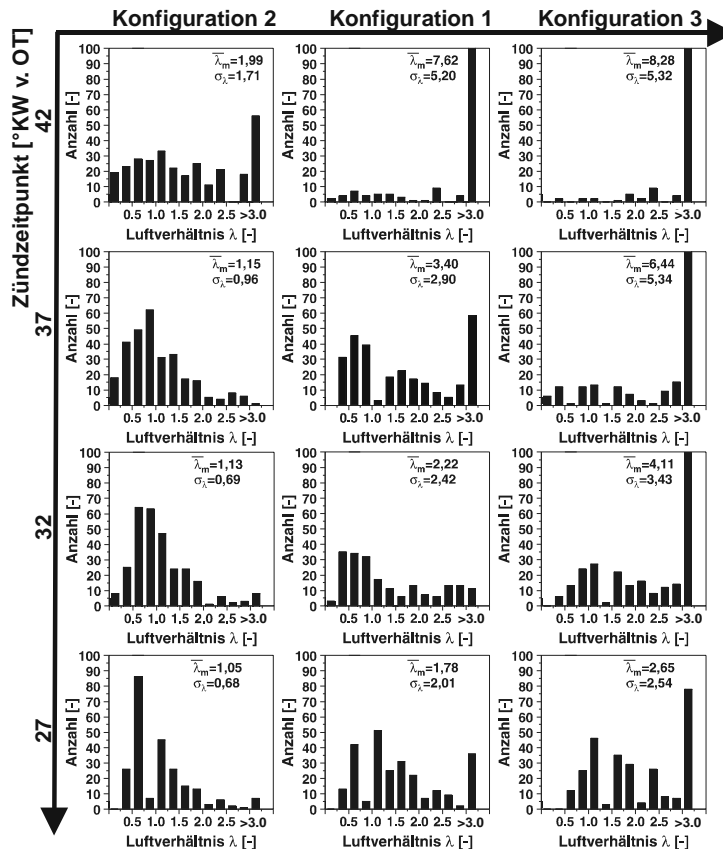


Abbildung 4.5: Wahrscheinlichkeitsdichte-Verteilungen des lokalen Luftverhältnisses an der Zündkerze zum Zündzeitpunkt in Abhängigkeit vom Zündwinkel und der Leitsystem-Konfiguration

Für die Basisvariante mit einer Leitsystem-Konfiguration 1 wird zum Zündzeitpunkt 42° KW v. ZOT ebenfalls ein sehr mageres mittleres Luftverhältnis von $\lambda_m=7,6$ detektiert. Bereits 5° KW später befindet sich in vielen Zyklen zündfähiges Gemisch an der Zündkerze, das mittlere Luftverhältnis beträgt aufgrund der breiten Verteilungsfunktion jedoch immer noch $\lambda_m=3,4$. Bei weiterer Verschiebung der Zündung hin zu späteren Zeitpunkten kann tendenziell ein zunehmend kraftstoffreichereres Gemisch, jedoch mit immer noch überstöchiometrischer Zusammensetzung, detektiert werden. So konnte für den Zündzeitpunkt 27° KW v. ZOT ein mittleres Luftverhältnis von ca. $\lambda_m=1,8$ ermittelt werden. Im Vergleich zur Leitsystem-Verdrehung LV 30° kann somit ein kraftstoffreichereres Gemisch an der Zündkerze beobachtet werden, was bereits durch die vorangegangenen Untersuchungen zu erwarten war.

Bei der Leitsystem-Konfiguration 2 mit konvergierender Einlassströmung und hoher kinetischer Energie der Ladungsbewegung liegt bereits zum frühen Zündzeitpunkt (42° KW v. ZOT) in einigen Zyklen zündfähiges Gemisch an der Zündkerze vor. Für diese Kurbelwinkelstellung ist die Verteilungsfunktion jedoch noch sehr breit, und es werden viele Zyklen mit einem Luftverhältnis von $\lambda > 3,0$ detektiert. Mit späteren Zündzeitpunkten wird die Verteilungsfunktion schmäler, und das mittlere Luftverhältnis verlagert sich zu $\lambda_m=1,0$ mit sehr wenigen mageren Zyklen.

Durch die Gegenüberstellung der unterschiedlichen Leitsystem-Konfigurationen wird nochmals deutlich, dass für den Gemischtransport bei großer Distanz zwischen Injektor und Zündkerze eine intensive Ladungsbewegung, wie sie mit Konfiguration 1 und 2 generiert wird, unabdingbar ist. Die Zylinderinnenströmung der Leitsystem-Konfiguration 3 (und 4) ist nicht ausreichend, den Kraftstoff in Richtung Zündkerze umzulenken und dorthin zu transportieren. Durch die

Verteilungsfunktionen der Luftverhältnisse für die unterschiedlichen Leitsystem-Konfigurationen werden die bei den Untersuchungen der Zylinderinnenströmung ermittelten Ergebnisse bezüglich zyklischer Schwankungen ebenfalls bestätigt. Während die Leitsystem-Konfiguration 3 eine sehr breite Verteilung der Gemischzusammensetzung an der Zündkerze - und damit hohe zyklische Schwankungen - aufweist, ergibt sich durch die Leitsystem-Konfiguration 2 eine deutliche Reduzierung der Streubreite. Diese geringen zyklischen Schwankungen liegen für alle untersuchten Zündzeitpunkte vor, so dass für diese Leitsystem-Konfiguration ein wesentlich größeres Zündfenster zur Verfügung steht als bei den beiden anderen Konfigurationen. Als Folge dieser reduzierten zyklischen Schwankungen der Entflammungsrandbedingungen spiegelt sich dieses Verhalten auch in der Standardabweichung des indizierten Mitteldrucks wider, welche im weiteren Verlauf dieses Kapitels diskutiert werden wird.

4.4 Verbrennung

Zur Beurteilung der Flammenausbreitung und deren Fluktuationen wurden mit der Hochgeschwindigkeits-Photomultiplier-Kamera 100 aufeinanderfolgende Zyklen für die oben untersuchten Konfigurationen bei einem Zündzeitpunkt von jeweils 30° KW v. ZOT aufgenommen. Zur Charakterisierung der ersten Phase der Verbrennung wurde die Dauer zwischen Zündzeitpunkt und dem Erreichen von 10 % der maximalen Flammengröße berechnet und in Abbildung 4.6 aufgetragen. Mit Kenntnis der Zylinderinnenströmung und der mittleren Luftverhältnisse der jeweiligen Konfigurationen und den oben erläuterten Zusammenhängen erklären sich die unten dargestellten Brennverzüge. Die Konfiguration LV -30° mit geschlossener Stellklappe weist bei diesem Zündzeitpunkt Luftverhältnisse im stöchiometrischen Bereich auf, was in dem mit Abstand geringsten Brennverzug resultiert. Mit zunehmend mageren Zündbedingungen bei den Konfigurationen 1 und 3 nimmt der Brennverzug entsprechend zu.

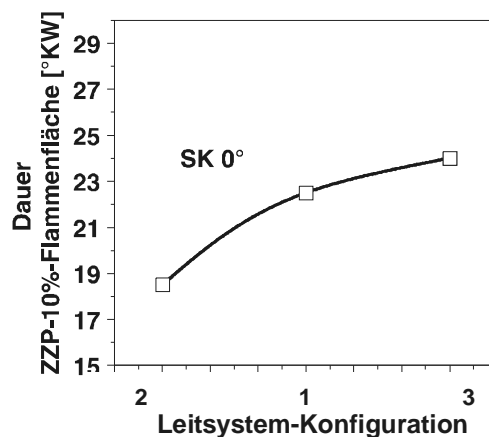


Abbildung 4.6: Brennverzüge in Abhängigkeit der Leitsystem-Konfiguration

Aus den detektierten Flammenausbreitungen wurden Aufenthaltswahrscheinlichkeiten im Messvolumen für einen diskreten Zeitpunkt ermittelt. Diese sind im oberen Teil von Abbildung 4.7 für die Kurbelwinkelstellung 10° KW n. ZOT für die drei Leitsystem-Konfiguration 1, 2 und 3 mit jeweils geschlossener Stellklappe dargestellt. Helle Bereiche kennzeichnen hierbei hohe Aufenthaltswahrscheinlichkeiten der Flamme im Messvolumen. Hierbei ist eine wesentlich größere räumliche Verteilung der Flamme bei der Leitsystem-Konfiguration 3 mit nach außen gerichteter Einlassströmung erkennbar. Dagegen zeigen die Basisvariante 1 sowie die Leitsystem-Konfiguration 2 deutlich stabilere Flammenpositionen.

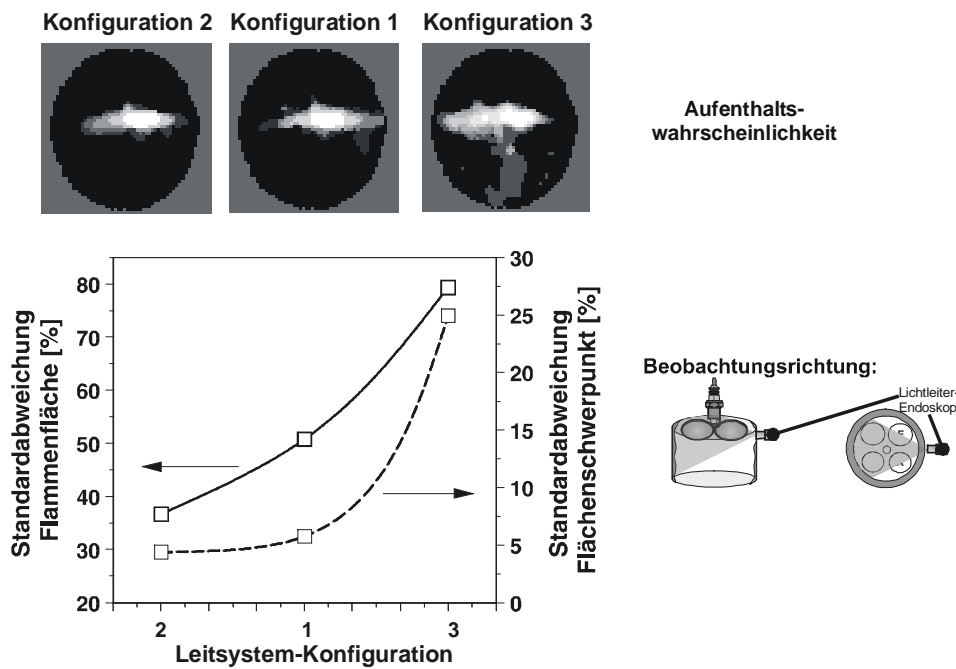


Abbildung 4.7: Aufenthaltswahrscheinlichkeit und Standardabweichung der Flammenfläche sowie des Flammenschwerpunktes in Abhängigkeit der Leitsystem-Konfiguration

Anhand der Analyse der Flammenbilder wurde die räumliche Stabilität der Flammenposition quantifiziert. Hierzu wurde für jeden Zyklus die Fläche und der Schwerpunkt des von der Flamme erfassten Bereichs im Beobachtungsfenster berechnet. Die Fläche ist ein Maß für die Ausbreitung der Flamme, der Schwerpunkt ein Maß für die Lage der Verbrennung im Brennraum. Diese Werte ermöglichen die Berechnung von Mittelwerten und Standardabweichungen und damit eine quantitative Erfassung der Fluktuationen. Eine hohe Standardabweichung der Fläche weist auf eine ungleichmäßige Flammenausbreitung, eine hohe Abweichung des Schwerpunktes auf ein starkes Wandern der Flamme im Brennraum hin. Somit ist durch die Betrachtung dieser Werte eine quantitative Aussage über die räumliche Stabilität der Verbrennung möglich. Die Analyse des unteren Diagramms in Abbildung 4.7 bestätigt den visuellen Eindruck der Flammenaufenthaltswahrscheinlichkeiten im oberen Teil der Abbildung. Für den gewählten Beobachtungszeitpunkt während der Phase des größten Kraftstoffmassenumsatzes zeigt sich, dass die Standardabweichungen von Fläche und Flächenschwerpunkt bei Leitsystem-Konfiguration 3 deutlich höher sind als bei den Konfigurationen 1 bzw. 2. Folglich bewirken die stabileren Strömungs- und Entflammungsverhältnisse der Leitsystem-Konfiguration 2 in der Hauptphase der Verbrennung eine merkliche Abnahme der zyklischen Schwankung der Flammenausbreitung. Zusammen mit den Ergebnissen aus der Bestimmung des Luft-Kraftstoff-Verhältnisses zum Zündzeitpunkt lässt dies den Schluss zu, dass die Reduzierung der zyklischen Schwankung der Entflammungsbedingungen in einer stabileren Flammenausbreitung resultiert.

Die Konsequenz aus allen bisher dargestellten Ausführungen auf das Betriebsverhalten des Motors ist in Abbildung 4.8 dargestellt. Die Standardabweichung des indizierten Mitteldrucks σ_{pmi} in Abhängigkeit der Leitsystem-Konfiguration bestätigt die bisherigen Ausführungen. Dabei ergeben sich die geringsten Schwankungen bei einer nach innen gerichteten, konvergierenden Einlassströmung. Für die Basisvariante 1 ergeben sich deutlich höhere Standardabweichungen. Dies kann anhand der vorangegangenen Auswertungen bestätigt werden.

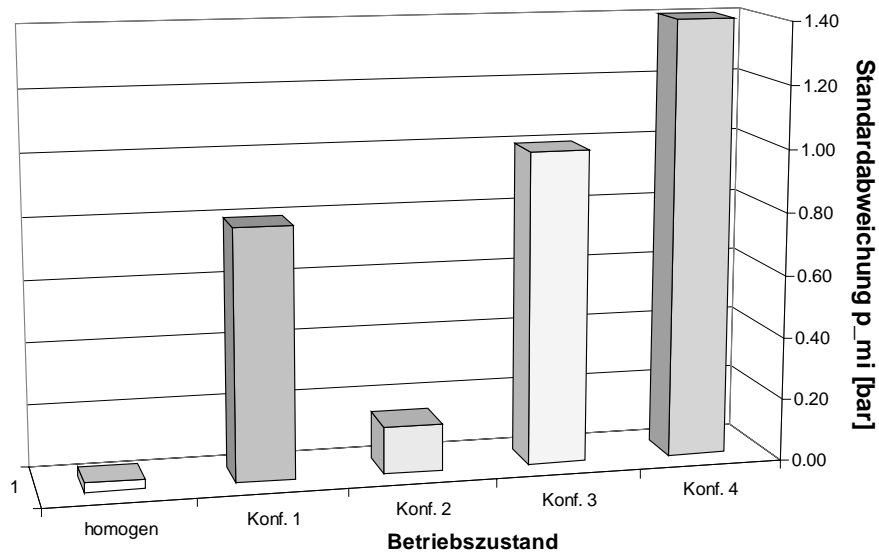


Abbildung 4.8: Standardabweichung des indizierten Mitteldrucks der untersch. Konfigurationen

Die veränderte und stabilisierte Zylinderinnenströmung wirkt sich auch auf die Rohemissionen aus. Die mit dem FRFID ermittelten Kohlenwasserstoff-Rohemissionen (siehe Abb. 4.9) zeigen dieselbe Tendenz wie die bisher betrachteten Größen. So ist bei Konfiguration 2 die HC-Rohemission mit 793 ppm am geringsten. Konfiguration 1 und 3 weisen vergleichbar hohe Werte um 1000 ppm auf. Konfiguration 4 besitzt mit 4730 ppm die höchste Emission von Kohlenwasserstoffen, was aus den vorhandenen Verbrennungsaussetzern resultiert. Die zyklische Schwankung der HC-Rohemission reduziert sich analog zu den oben beschriebenen Größen. So weist Konfiguration 2 die kleinste Schwankungsbreite der untersuchten Konfigurationen auf.

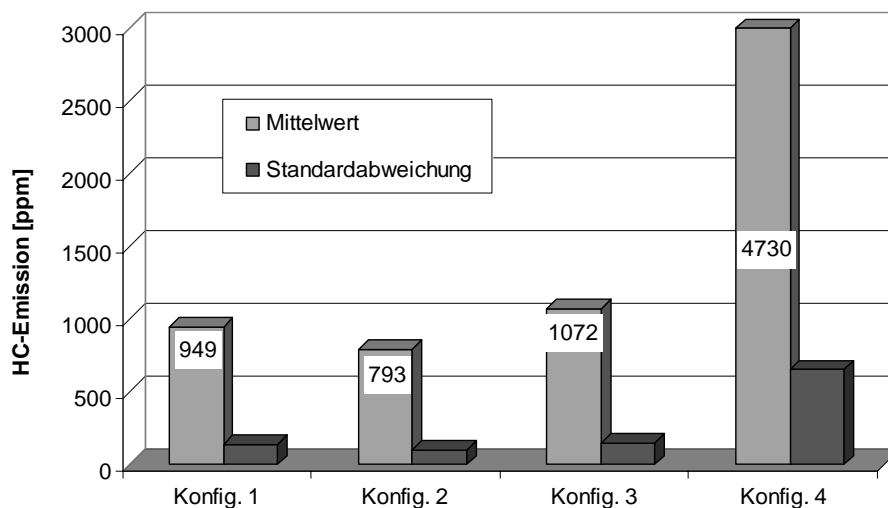


Abbildung 4.9: HC-Emissionen der unterschiedlichen Konfigurationen (bezogen auf Propan C_3H_8)

4.5 Simultanmessungen

Um aus den gewonnenen Strömungsfeldern bzw. Spray- und Flammenbildern Rückschlüsse auf die innermotorischen Zusammenhänge ziehen zu können, wurden die Messdaten der einzelnen Messsysteme mit Hilfe verschiedenster Analysetools (z.B. Optimas und Matlab) ausgewertet. Dabei wurden die Spray- und die Flammenbilder der ICCD-Kamera invertiert, so dass die Spray- bzw. Flammenbereiche dunkel erscheinen. Dadurch konnten die z. T. bestehenden Auswertalgorithmen angewendet werden. Die daraus gewonnen Kennzahlen wurden den Kennzahlen anderer Messdaten gegenübergestellt. In der folgenden Tab. 4.1 sind einige charakteristische Auswertegrößen der jeweiligen Messtechniken aufgelistet.

Strömung	Kraftstoff-spray	Flammen-visualisierung	Highspeed-PM-Kamera	Druck-indizierung
mittlere Geschwindigkeit + KE	Fläche des Sprays (auch in Teilbereichen)	Flammengröße	Verbrennungsbeginn / -ende	indizierter Mitteldruck
Tumblezahl	Lage des Flächenschwerpunktes	maximale Flammengröße	maximale Flammengröße	max. Spitzendruck
Lage des Tumble-zentrums	Zerklüftung der Sprayfläche	div. charakteristische Längenmaße	mittlere Helligkeit pro Zyklus	Brennverzug
mittl. Geschw. Einlass- / Auslassseite	Kolbenbenetzung	Flammenfläche in einzelnen Bildbereichen	Helligkeits- und Flächengradienten	Lage der 5-, 10-, 50%-Umsatzpunkte

Tabelle 4.1: Beispielfhafte Auswahl der ermittelten Kennzahlen

Mit diesen Daten wurde darüber hinaus die mit dem FRFID erhaltenen Kohlenwasserstoffrohmissionen korreliert. Für die FRFID-Daten wurde eine mittlere HC-Emission pro Zyklus ermittelt. Dabei wurde dieser Wert von „Auslass öffnet“ des jeweiligen Arbeitsspiels bis „Auslass öffnet“ des darauf folgenden Zyklus ermittelt. Insgesamt wurden 144 Kennzahlen ermittelt und miteinander korreliert.

Im oberen Teil der Abb. 4.10 sind das mittlere Strömungsfeld, die mittlere Sprayausbreitung sowie die mittlere Flammenstruktur des untersuchten Betriebspunktes abgebildet. Hierbei wurde für eine bessere Übersichtlichkeit des Strömungsfeldes nur jeder zweite Vektor dargestellt. Die Strömung zeigt zum Beobachtungszeitpunkt 70° KW v. OT einen ausgeprägten Forward-Tumble mit nahezu mittigem Wirbelzentrum [20]. Die Form der Rotationsbewegung ist durch den nach oben gewanderten Kolben etwas gestreckt. Die höchsten Strömungsgeschwindigkeiten (etwa 22 m/s) treten unterhalb des Einlassventils auf. In diesen Bereich wird wenige °KW später der Kraftstoff eingespritzt und von der Zylinderinnenströmung in Richtung Zündkerze transportiert. Dies ist auch im Mittelwert der Sprayaufnahmen zum Zeitpunkt 38° KW v. OT (16° KW n. Einspritzbeginn) zu sehen. Durch die ausgeprägte Strömungsstruktur ergibt sich eine in Richtung Zündkerze gekrümmte Strahlachse. Die Kolbenbenetzung ist durch den Einfluss der Zylinderinnenströmung mit hoher kinetischer Energie äußerst gering. Die mit der intensivierten Kamera aufgenommene Flammenstruktur zum Zeitpunkt 15° KW v. OT zeigt eine deutliche Verlagerung auf die Auslassseite hin. Dies ist vor allem durch die großskalige Ladungsbewegung des Gemisches zu erklären. Zu diesem Zeitpunkt ist bereits ein Großteil des verbleibenden Brennraumvolumens durch die Flamme erfasst. Im oberen Bereich des Spraybildes ist die Reflexion des Blitzlichtes an dem UV-Endoskop der PMT-Kamera erkennbar. Dies ist ebenfalls in den Flammenvisualisierungen zu sehen. Da in allen Bildern das Endoskop vorhanden ist, besitzt dies keinen Einfluss auf die Auswertung und Analyse der Aufnahmen.

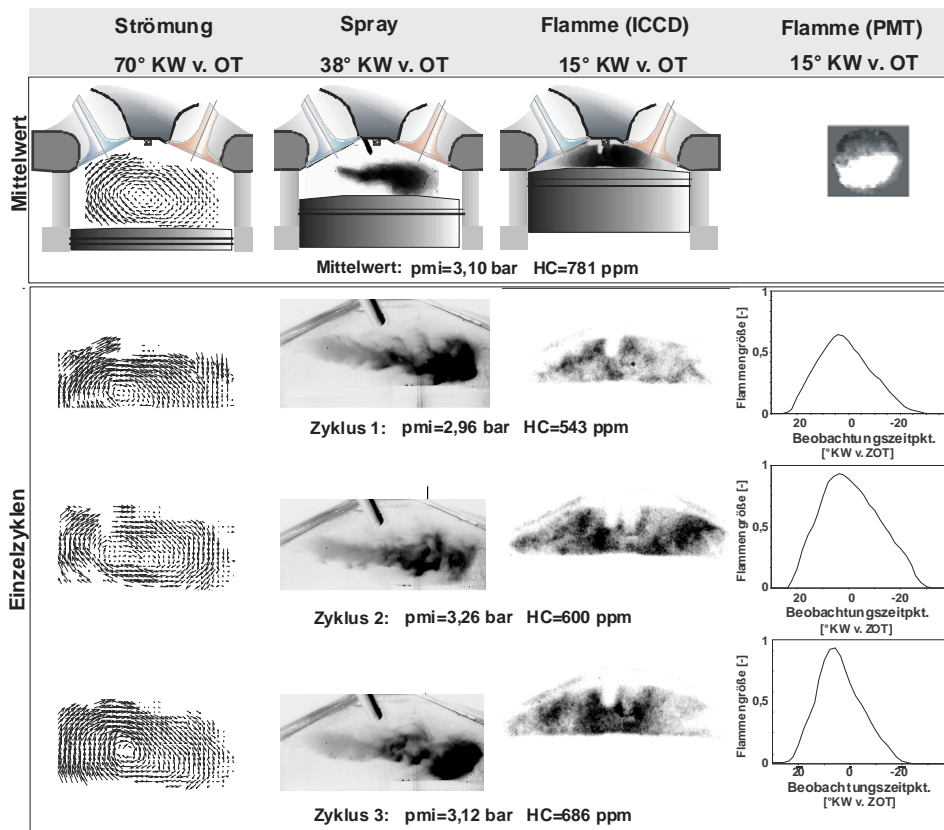


Abbildung 4.10: Mittelwerte und Einzelzyklen des untersuchten Betriebspunktes

Im unteren Teil von Abb. 4.10 sind beispielhaft 3 Einzelzyklen mit den dazugehörigen indizierten Mitteldrücken sowie den entsprechenden HC-Emissionen dargestellt. Diese Zyklen wurden nacheinander aufgenommen, d.h. zwischen diesen Zyklen lagen jeweils drei weitere Arbeitsspiele. Die Darstellungsgröße ist zur besseren Übersichtlichkeit im Vergleich zu den Mittelwerten etwas größer gewählt. Des Weiteren wurde auf eine Maskierung verzichtet. Beim Vergleich der Strömungsstrukturen zeigt sich ein deutlicher Unterschied zwischen Zyklus 2 und den beiden anderen Zyklen. Hier ist das Tumble-Zentrum weniger scharf ausgeprägt. Auch ist die mittlere Strömungsgeschwindigkeit mit 13,0 m/s gegenüber den anderen mit über 16 m/s deutlich geringer. Jedoch ist die Position des Tumble-Zentrums in allen dargestellten Zyklen sehr ähnlich. Die Streubreite der Strahlbreite wird bei der Betrachtung der Spray-Visualisierung deutlich. Das kompakte Vorspray sowie die Strahlkontur im mittleren Bereich des Sprays variieren sehr stark in ihrer Ausdehnung und Form. Die Größe und Struktur der Flamme zum Beobachtungszeitpunkt der intensivierten Kamera (15° KW v. OT) zeigen ebenfalls große Unterschiede. Wie die Betrachtung dieses Beispiels zeigt, ist für eine detaillierte Auswertung eine visuelle Einteilung in unterschiedliche Kategorien (z.B. Strömungs-, Spray- oder Flammenstruktur) sehr subjektiv und ungenau, so dass hierfür die bereits oben erwähnten Kennzahlen aus den Messdaten herangezogen wurden. Im Folgenden werden diese Korrelationen näher erläutert.

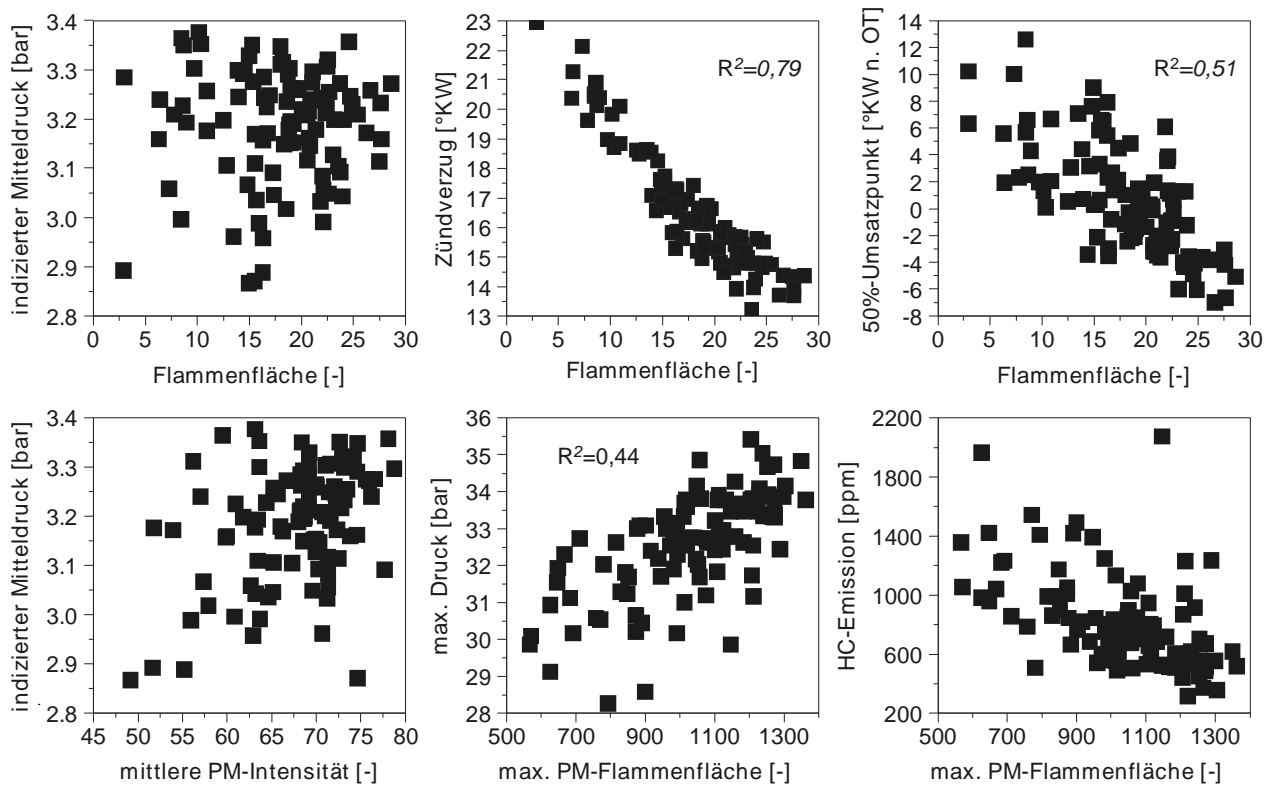


Abbildung 4.11: Zusammenhang zwischen Flammen-Kenngrößen und thermodynamischen Daten

Die zu erwartenden Zusammenhänge zwischen den extrahierten Kennzahlen der Flammvisualisierungen mit den thermodynamischen Kenngrößen konnten durch diese Messungen belegt werden. Abbildung 4.11 zeigt hierfür einige Beispiele. Die Größe der beobachteten Flammenfläche mit der intensivierten Kamera zeigt zwar keinen Zusammenhang zum indizierten Mitteldruck des entsprechenden Arbeitsspiels, jedoch mit der Geschwindigkeit der Verbrennung. Je größer die Flammenfläche ist, desto geringer ist der berechnete Zündverzug. Derselbe Zusammenhang zeigt sich, wenn auch etwas weniger deutlich, bei der Korrelation mit der Lage des 50%-Umsatzpunktes. Diese Beziehung wurde für den Homogenbetrieb eines Ottomotors mit Direkteinspritzung bereits von Reckers et al. [21] festgestellt, konnte aber für den Schichtladebetrieb dort nicht nachgewiesen werden. Bestätigt werden die mit der ICCD-Kamera gewonnenen Resultate durch die Daten der Hochgeschwindigkeits-Photomultiplier-Kamera, welche im unteren Teil der Abbildung 4.11 dargestellt sind. Mit dem maximalen Brennraumdruck des jeweiligen Arbeitsspiels korrelieren der maximale mittlere Helligkeitswert sowie die maximale Flammenfläche der PM-Kamera. Die maximale Flammenfläche weist darüber hinaus auch einen Trend von größerer maximaler Flammenfläche mit steigendem indiziertem Mitteldruck auf. Diese maximale Flammenfläche eines Zyklus zeigt ebenfalls einen Einfluss auf die HC-Emissionen. Je größer die detektierte Flamme im untersuchten Arbeitsspiel ist, desto geringer sind die HC-Emissionen.

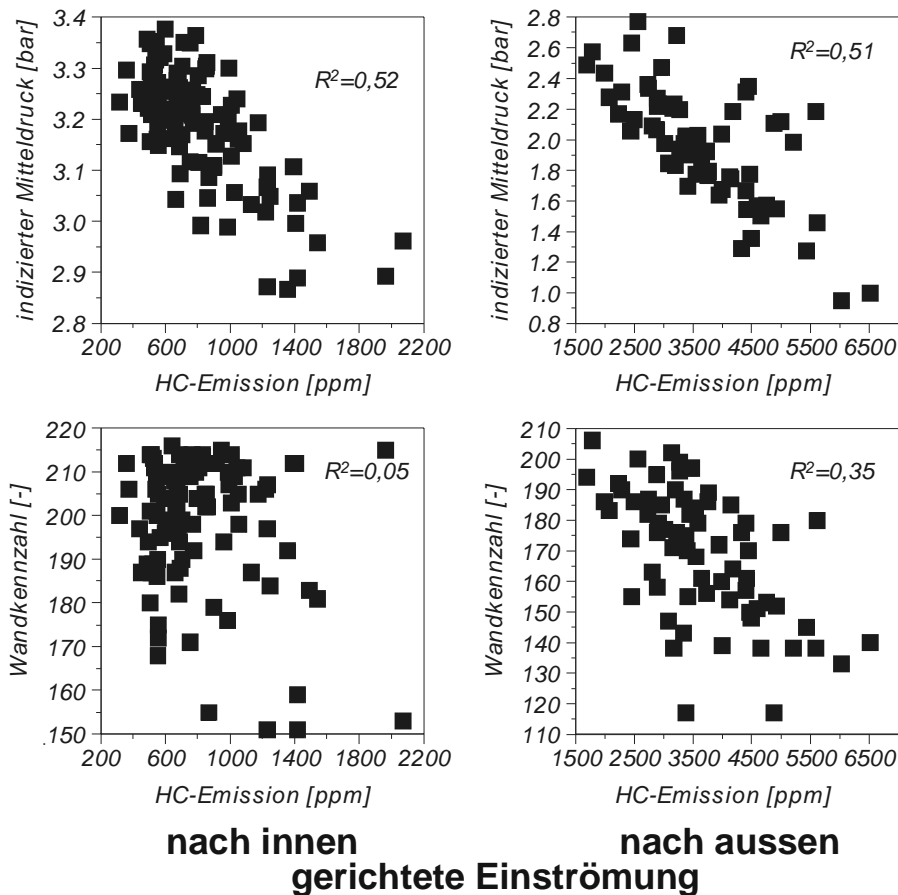


Abbildung 4.12: Korrelationen der Kohlenwasserstoff-Rohemission für verschiedene Leitsystem-Konfigurationen

Wie die in Abbildung 4.12 dargestellten Messergebnisse der Leitsystem-Konfigurationen mit nach innen gerichteter sowie nach aussen gerichteter Einlassströmung zeigen, ergeben sich bezüglich der Kohlenwasserstoff-Emission unterschiedliche Abhängigkeiten. Während sowohl für die nach innen als auch für die nach aussen gerichtete Einströmbedingungen Zyklen mit geringem p_{mi} und niedrigem Spitzendruck tendenziell eine erhöhte Kohlenwasserstoff-Rohemission aufweisen, zeigt die HC-Emission der nach innen gerichteten Konfiguration keinen Zusammenhang mit der die Kolbenbenetzung quantifizierenden Wandkennzahl. Mit zunehmendem Wandkontakt des Sprays nimmt die HC-Emission von Zyklen der nach aussen gerichteten Einströmung dagegen tendenziell zu. Dies lässt den Schluss zu, dass die erhöhten HC-Emissionen einzelner Zyklen bei nach innen gerichteter Einströmung aus unvollständiger Verbrennung in den Randbereichen des Brennraums stammen, und der Wandauftrag auf den Kolben bei diesem Betriebszustand für die HC-Emissionen nicht als signifikante Quelle angesehen werden kann. Dagegen stammt ein Teil der HC-Emission bei nach aussen gerichteter Einströmung aus einer größeren Wandfilmanlagerung. Diese Schlussfolgerung einer unterschiedlichen Bedeutung des Kraftstoffauftrags auf den Kolben für beide Konfigurationen wird durch die ensemble-gemittelten Sprayverteilungen, wie sie in [4] diskutiert werden, bestätigt.

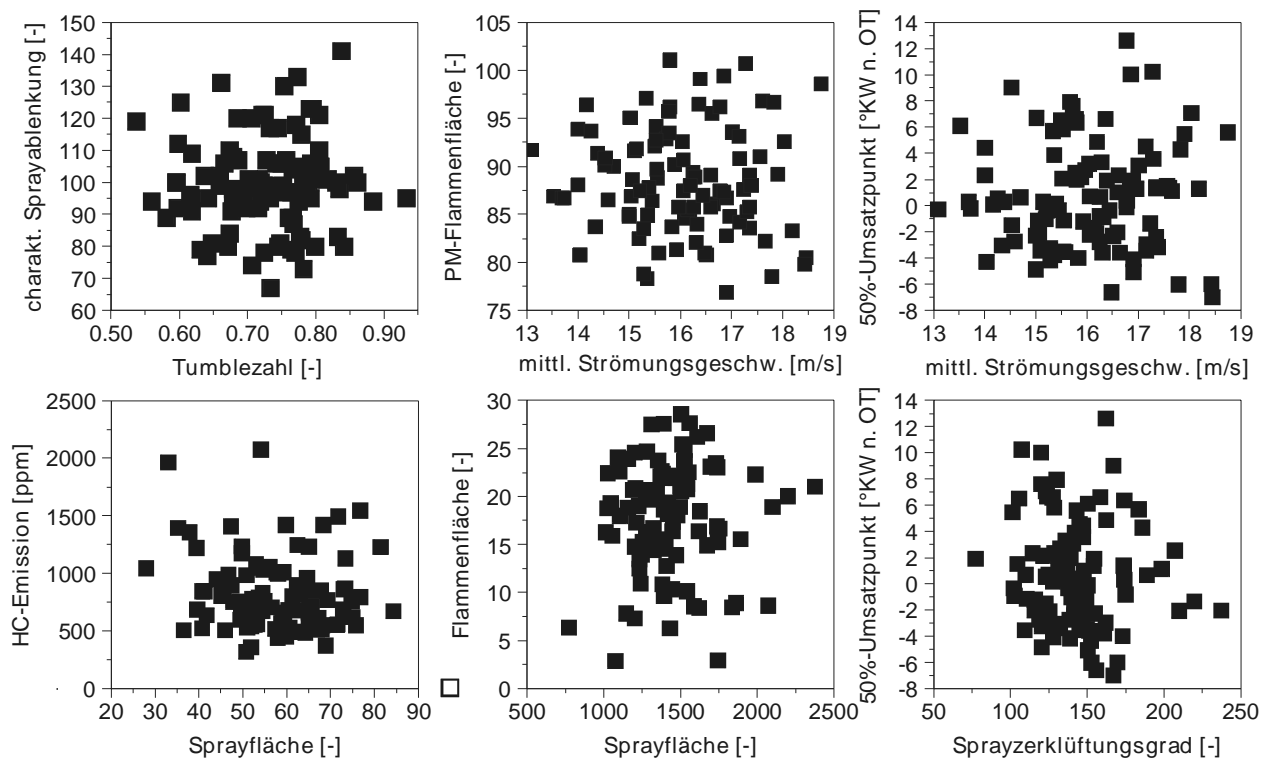


Abbildung 4.13: Zusammenhang zwischen Strömungs- und Spraygrößen mit Größen aus anderen Teilprozessen

Wie die Analyse der Flammendaten im Zusammenhang mit den thermodynamischen Kenngrößen anhand der Verschlechterung des Korrelationskoeffizienten zwischen Flammengröße und Zündverzögerung bzw. 50%-Umsatzpunkt zeigt, sind die Einflüsse auf die turbulenten Prozessabläufe vielfältig. Dadurch wird die direkte, zyklus aufgelöste Korrelation der Messdaten erschwert. Anhand von Korrelationen der Strömungs- und Spraydaten wird dies in Abbildung 4.13 beispielhaft gezeigt. So ergibt sich z.B. kein Zusammenhang zwischen dem indizierten Mitteldruck und der aus den Strömungsmessungen extrahierten Tumblezahl.

Ebenso wenig zeigt die Tumblezahl und damit auch die kinetische Energie der Strömung einen Einfluss auf die Ablenkung des Sprays von der Strahlachse. Eine Gegenüberstellung der Flammenfläche, ermittelt aus den Aufnahmen der intensivierten Kamera, mit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit weist vergleichbar niedrige Korrelationskoeffizienten wie z.B. mit dem 50%-Umsatzpunkt auf. Weitere Größen der Strömung, wie die Turbulenz des gemessenen Strömungsfeldes, wurden ebenfalls ausgewertet und zeigten keine Zusammenhänge. Aus den umfangreichen Daten konnte für alle Leitsystem-Konfigurationen keine Korrelation bzw. keine tendenzielle Beziehung zwischen einzelnen Kenngrößen mit den Messdaten der anderen Messsysteme hergestellt werden. Auch weitere Strömungsmessungen zu einer späteren Kurbelwinkelstellung (60° KW v. OT) ergaben keine eindeutigen Zusammenhänge, dasselbe gilt für die aus den Sprayaufnahmen gewonnenen Daten. Exemplarisch hierfür ist in Abbildung 4.13 die Größe der Sprayfläche als Maß für den Flüssigphasenanteil über den Kohlenwasserstoff-Rohemissionen des jeweiligen Zyklus aufgetragen.

Die im vorangegangenen Abschnitt vorgestellten Messergebnisse zeigen den unumstrittenen Einfluss des Strömungszustandes im Zylinder auf die nachfolgenden Prozesse Gemischbildung und Verbrennung sowie die Bildung der unverbrannten Kohlenwasserstoffe. Innerhalb eines Arbeitsspiels konnte dies mit den simultanen Messungen allerdings nicht nachgewiesen werden.

Die Ursache ist hauptsächlich in den Unzulänglichkeiten der Messtechnik begründet, welche auf eine Ebene sowie einen Beobachtungszeitpunkt je Messsystem beschränkt ist. Die im Brennraum herrschenden dreidimensionalen Abläufe und Austauschprozesse sind aufgrund der hohen Turbulenz beschleunigt. Sie beeinflussen den Zustand in der Messebene zwischen den Beobachtungszeitpunkten der einzelnen Messtechniken aufgrund der dazwischen liegenden Zeit dergestalt, dass der Zustand innerhalb der Messebene nicht mit dem Zustand einige °KW später in Zusammenhang gebracht werden kann. Unterstrichen wird diese Problematik beispielsweise durch die deutliche Verschlechterung des Korrelationskoeffizienten zwischen der Flammenfläche mit der Lage des 50%-Umsatzpunktes ($R^2=0.51$) gegenüber der Korrelation Flammenfläche mit dem jeweiligen Zündverzug ($R^2=0.79$).

Aufgrund der Einschränkungen durch die Messtechnik konnten keine kausalen Zusammenhänge zwischen dem gemessenen Momentanströmungsfeld, der Strahlcharakteristik und der anschließenden Flammenausbreitung sowie den thermodynamischen Daten gefunden werden. Für die detailliertere Charakterisierung des Strömungszustandes des jeweiligen Arbeitsspiels sind verbesserte Messsysteme mit einer höheren zeitlichen bzw. räumlichen Auflösung zur genaueren Charakterisierung der globalen Brennraumströmung notwendig. Hierzu werden in naher Zukunft zeitlich auflösende PIV-Systeme mit entsprechenden Kamera- und Lasersystemen verfügbar sein, welche die Anforderungen bezüglich Laserenergie und Wiederholrate für motorische Anwendungen erfüllen werden.

5. Schlussfolgerung

Die Untersuchungen zeigen den signifikanten Einfluss der Strömungsbedingungen während des Ansaugvorgangs auf die zyklischen Schwankungen der Verbrennung sowie deren Einfluss auf die Kohlenwasserstoff-Rohemissionen bei Ottomotoren mit Direkteinspritzung. Durch eine Stabilisierung der Einströmbedingungen können die HC-Rohemissionen deutlich reduziert und eine Erhöhung des Motorgleichlaufs erzielt werden (siehe auch Abb. 4.8 und 4.9). Dies wird bei Motoren mit zwei Einlassventilen dadurch erreicht, dass eine gezielte Führung der einströmenden Luftmasse in die Mittelebene des Brennraums erfolgt. Für eine effiziente Ladungsschichtung bei gleichzeitig verbesserten Rohemissionen bilden diese Bedingungen die Basis. Die positive Auswirkung dieser Strömungsstabilisierung auf die Verbrennung mit den daraus resultierenden geringen Kohlenwasserstoffemissionen konnte durch die Anwendung diverser Analysemethoden nachgewiesen werden. Darüber hinaus zeigen die Untersuchungen, dass bei stabilen Strömungskonfigurationen die Schwankungsbreite der Rohemission abnimmt.

Für die Entwicklung von Motoren mit Benzindirekteinspritzung kann hieraus abgeleitet werden, dass der Einströmvorgang einen wesentlichen Einflussfaktor bei der Optimierung des Brennverfahrens darstellt und im Entwicklungsprozess entsprechend berücksichtigt werden muss.

6. Zusammenfassung

Die dargestellten Ergebnisse zeigen die Streubreite der zyklischen Schwankungen von Strömung, Gemischbildung und Verbrennung sowie deren Einfluss auf die Kohlenwasserstoff-Rohemissionen. Darüber hinaus wurde durch den simultanen Einsatz verschiedenster optischer Messtechniken in Kombination mit einem schnellen, kurbelwinkelaufgelöstem Abgasanalysegerät (FRFID) eine Darstellung der komplexen, innermotorischen Zusammenhänge ermöglicht. Durch Variation der Einlassströmbedingungen kann die Strömungsstabilität während der für die Gemischbildung wichtigen Kompressionsphase positiv beeinflusst werden. Darüber hinaus er-

möglicht die Änderung der Einlasskanalgeometrie eine Erhöhung der kinetischen Energie. Diese Bedingungen bilden die Basis für eine hohe Ladungsschichtung und einen stabilen Motorbetrieb. Der Einfluss der Stellklappen-Position auf die Zylinderinnenströmung und deren kinetische Energie, insbesondere während der Kompressionsphase, ist sehr groß und bereits von den konventionellen Leit- bzw. Tumblesystemen bekannt. Während bei geöffneter Stellklappe nahezu keine Ladungsbewegung im Brennraum generiert wird, bildet sich bei geschlossener Stellklappe eine intensive Zylinderinnenströmung aus. Dies lässt sich auf die Beschleunigung der Einlassströmung aufgrund des reduzierten Kanalquerschnittes und die Führung des Luftmassenstroms durch die Leitbleche zurückführen. Hierdurch wird eine bevorzugte Einströmung über einen schmalen Ventilspaltpbereich generiert. Eine nach innen gerichtete, in die Mittelebene zwischen die beiden Einlassventile orientierte Einlassströmung, generiert die intensivste Ladungsbewegung. Nach außen gerichtete Einströmungen lassen dagegen eine sehr schwach ausgebildete Zylinderinnenströmung erkennen. Bei nach innen gerichteter Einlassströmung wird nicht nur die Intensität der Ladungsbewegung positiv beeinflusst, sondern auch deren zyklische Schwankungen. Als Bewertungsgrößen wurde hierzu die Standardabweichung der Vektorrichtung der PIV-Einzelmessungen herangezogen. Wie die Auswertungen zeigen, ist die Reduzierung der zyklischen Schwankungen hauptsächlich auf die nach innen gerichtete Einströmung des Frischgases zurückzuführen. Dies reduziert die Freiheitsgrade des Einströmvorgangs, zugleich vereinigen sich beide Luftströme der Einlassventile direkt nach dem Eintritt in den Brennraum zu einer intensiven, großskaligen Tumblebewegung. Bei nach außen gerichteter Einlassströmung treffen die beiden Luftmassenströme erst aufeinander, nachdem sie im Brennraum bereits eine größere Wegstrecke zurückgelegt haben. Dabei ist diese Bewegung länger dem Einfluss der Turbulenz im Brennraum ausgesetzt, so dass das Aufeinandertreffen der beiden Luftströme nicht derart determiniert und mit wesentlich weniger kinetischer Energie stattfindet, wie bei nach innen gerichteter Einlassströmung. Unterstrichen wird diese These durch die Analyse der Leitsystem-Konfigurationen mit etwas geöffneten Stellklappen. Dies zeigt, dass auch mit reduzierter kinetischer Energie der Einströmung äußerst geringe zyklische Schwankungen mit nach innen orientierter Einströmung vorliegen. Die positive Auswirkung dieser Stabilisierung auf die Verbrennung mit den daraus resultierenden Kohlenwasserstoffemissionen konnte durch die Verwendung einer kurbelwinkelaufgelösten HC-Messung nachgewiesen werden. Es konnte belegt werden, dass bei stabilen Strömungskonfigurationen die Schwankungsbreite der Rohemission abnimmt. Der simultane Einsatz optischer Messtechnik zur Visualisierung der innermotorischen Teilprozesse (Strömung, Gemischbildung, Flammenausbreitung) innerhalb eines Arbeitsspiels erbrachte signifikante neue Erkenntnisse. Es wurden Zusammenhänge zwischen den thermodynamischen Daten und der Flammenausbreitung, sowie zwischen der HC-Emission und der aus der Sprayvisualisierung extrahierten Kolbenbenetzung gefunden. Dabei zeigte sich für die Konfiguration mit nach innen gerichteter Einlassströmung und hoher kinetischer Energie der Ladungsbewegung, dass ein Zusammenhang zwischen dem indizierten Mitteldruck und den jeweiligen HC-Emissionen besteht. Eine Verknüpfung des Spray-Wandkontaktes mit den HC-Emissionen konnte nicht ermittelt werden. Für die Leitsystem-Konfiguration mit nach außen gerichteter Einlassströmung dagegen wurde ein Zusammenhang zwischen der Größe des Kraftstoff-Wandkontaktes mit den jeweiligen HC-Emissionen sowie zwischen den HC-Emissionen und dem indizierten Mitteldruck festgestellt. Das bedeutet, dass für eine hohe Ladungsbewegung der Einfluss des Kraftstoffwandaufrags für die Kohlenwasserstoff-Emission eine untergeordnete Rolle spielt. Die erhöhten Emissionen einzelner Arbeitsspiele resultieren aus der so genannten *Flame Quenching* in Randbereichen der Verbrennung. Für Konfigurationen mit geringer Ladungsbewegung besitzt die Kolbenbenetzung dagegen einen merklichen Einfluss auf die Kohlenwasserstoff-Emissionen.

Demgegenüber konnten keine Zusammenhänge zwischen den aufgenommenen thermodynamischen Werten, der Flammenausbreitung sowie der Strahlausbreitung mit den jeweiligen Strömungscharakteristika herausgearbeitet werden. Dies ist hauptsächlich auf die Unzulänglichkeiten der Messtechnik zur Erfassung der dreidimensionalen, turbulenten Prozessabläufe zurückzuführen. Die Reduzierung der Strömungsstruktur auf eine Messebene und einen Zeitpunkt reicht demnach nicht aus, die Zylinderinnenströmung des Arbeitsspiels hinreichend zu charakterisieren. In absehbarer Zukunft sind PIV-Systeme mit hoher Zeitauflösung verfügbar, wodurch die Beschreibung der Zylinderinnenströmung eines Arbeitsspiels wesentlich detaillierter erfolgen kann und dadurch mehr Informationen liefern wird.

7. Literatur

- [1] Töpfer G., Fischer J., Gindele J., Nauwerck A., Spicher U.; *Untersuchungen zum Einsatz keramischer Werkstoffe für Ottomotoren mit Direkteinspritzung*, Tagungsband „Direkteinspritzung im Ottomotor III“, Expert Verlag, Renningen-Malmsheim, 2001
- [2] Fischer J., Kettner M., Nauwerck A., Gindele J., Spicher U.; *Auswirkungen einlassseitig generierter Ladungsbewegung auf Strömungsverhältnisse und Schichtladefähigkeit im Otto-DE*, Tagungsband „Direkteinspritzung im Ottomotor III“, Expert Verlag, Renningen-Malmsheim, 2001
- [3] Fischer J., Kubach H., Tribulowski J., Spicher U.; *Analyse der Zylinderinnenströmung und des Verbrennungsverhaltens bei Ottomotoren mit Direkteinspritzung*, 5. Internationales Symposium für Verbrennungsdiagnostik, Baden-Baden, 2002
- [4] Fischer, J., Kettner, M., Nauwerck, A., Pfeil, J., Spicher, U., *Influence of an Adjustable Tumble-System on In-Cylinder Air Motion and Stratification in a Gasoline Direct Injection Engine*, SAE Paper 2002-01-1645
- [5] Fischer, J., Gindele, J., Spicher, U., *PIV-Meßtechnik - Vielseitiges Werkzeug zur Strömungsanalyse im gesamten Entwicklungsprozeß von Verbrennungsmotoren*, Tagung "Optisches Indizieren - Verbrennungsentwicklung für Otto- und Dieselmotoren", Haus der Technik, 2000
- [6] Baby, X., Dupont, A., Ahmed, A., Deslandes, W., Charnay, G., Michard, M., *A New Methodology to Analyze Cycle-to-Cycle Aerodynamic Variations*, SAE Paper 2002-01-2837
- [7] Fischer J., Sauter W., Velji A., Spicher U., *Zyklus aufgelöste Visualisierung der Verbrennung im Ottobrennung mit Direkteinspritzung*, Tagungsband „Direkteinspritzung im Ottomotor IV“, Expert Verlag, Renningen-Malmsheim, 2003
- [8] Wytrykus, F.; Duesterwald, R.; *Improving Combustion Process by Using a High Speed UV-Sensitive Camera*, SAE Technical Paper, 2001-01-0917, 2001
- [9] Bach, M.; Reissing, J.; Spicher, U.: *Temperature Measurement and NO-Determination in Spark Ignition Engines Using Optical Fiber Sensors*, SAE Paper 961922, 1996
- [10] Spicher, U.; Kröger, H.; Ganser, J.: *Detection of Knocking Combustion using Simultaneously High-Speed Schlieren Cinematography and Multi Optical Fiber Technique*, SAE Paper 912312, 1991
- [11] König M., Hall M., *Cycle-Resolved Measurements of Precombustion Fuel Concentration Near the Spark Plug in a Gasoline SI Engine*, SAE Technical Paper 981053, 1998
- [12] Sacadura J., Robin L., Dionnet F., Gervais D., Gastaldi P., Ahamed A., *Experimental Investigation of an Optical Direct Injection S.I. Engine Using Fuel-Air Ratio Laser Induced Fluorescence*, SAE Technical Paper 2000-01-1794, 2000
- [13] Lai M., Rotton K., Balles E., Vandyne E., Wahl A., Darin B., Hirschlieb G., *In-Cylinder Air/Fuel Ratio Approximation Using Spark Gap Ionization Sensing*, SAE Technical Paper 980166, 1998

- [14] Fischer J., Xander B., Velji A., Spicher U., *Zyklus aufgelöste Bestimmung des lokalen Luftverhältnisses an der Zündkerze bei Ottomotoren mit Direkteinspritzung*, 6. Int. Symposium für Verbrennungsdiagnostik, Baden-Baden, 2004
- [15] Fansler T., Drake M., Stoikovic B., Rosalik M., *Local fuel concentration measurements in internal combustion engines using spark-emission spectroscopy*, Applied Physics B, 2002
- [16] Merer R., Wallace J., *Spark Spectroscopy for Spark Ignition Engine Diagnostics*, SAE Technical Paper 950164, 1995
- [17] Müller H.; *Der Verbrennungsablauf beim Magermotor, Grenzen und Möglichkeiten der Beeinflussung*, in Magerbetrieb beim Ottomotor – Lean Burn engine, VDI-bericht, 1985
- [18] Grünefeld, G.; *Laser Diagnostics Applied to Practical Combustion and Flow Systems*, Dissertation, Bielefeld, 1995
- [19] Herden, W.; *Zündung und Entflammung bei Benzindirekteinspritzung*, in *Diesel- und Benzindirekteinspritzung*, Expert Verlag, 2000
- [20] Graftieaux, L., Michard, M., Grosjean, N., *Combining PIV, POD and vortex identification algorithms for the study of unsteady turbulent swirling flows*, Measurement Science and Technology 12, p. 1422-1429, 2001
- [21] Reckers, W., Schwab, H., Weiten, C., Befrui, B., Kneer, R., *Untersuchungen der Flammenausbreitung und der zyklischen Verbrennungsschwankungen in einem direkt einspritzenden Ottomotor mittels Zylinderdruckmessung und zeitsynchroner Hochgeschwindigkeits-Visualisierung*, 5. Int. Symp. für Verbrennungsdiagnostik, Baden-Baden, 2002