

# **Experimentelle Vorrichtung zur Visualisierung und Charakterisierung des Einspritzungsprozesses moderner Direkteinspritzermotoren**

**Prof.Dr. Ing. Miroslaw Weclas**  
**Dipl.-Ing. (FH) Rolf Zimmermann**

Institut für Fahrzeugtechnik (IFZN)  
der Georg-Simon-Ohm Fachhochschule Nürnberg

Keßlerplatz 12  
90489 Nürnberg

## **Abstract**

In diesem Paper wird eine Versuchsvorrichtung für sehr detaillierte qualitative und quantitative Untersuchungen des Einspritzvorganges im Ölbad, wie auch unter Luftatmosphäre, dargestellt. Eine Erhöhung der Dichte des Umgebungsmediums führte zu tendenziell größeren Jetkegelwinkeln und zu erheblich kürzeren Jetlängen. Das Zusammenspiel zwischen Jet und poröser Struktur (PM) ist in der vorliegenden Arbeit näher untersucht worden.

Die Entwicklung des Free Jet im Ölbad und unter Luftatmosphäre wurde auch unter dem Aspekt der „Zyklus-zu-Zyklus“ Schwankungen untersucht. Die Versuche zum Wandaufprall des Dieseljets brachten neue Versuchsergebnisse hervor. Es konnte beobachtet werden, wie sich beim Wandaufprall des Jets im Ölbad aus einer zunächst runden Aufprallzone ein dreieckiger Wandjet bildete. Bei näherer Untersuchung wurden als Einflussgrößen für die Bildung des Dreiecks die Wandaufprall-geschwindigkeit und die Zeit nach Wandaufprall identifiziert. Die Versuche des Jet-Aufpralls auf eine poröse Struktur wurde in verschiedenen Konfigurationen durchgeführt. Es konnte hierbei gezeigt werden, dass die Prozesse mit zunehmendem Abstand des PM vom Düsenausgang und mit steigender Dichte des umgebenden Mediums z.T. erheblich verzögert und in ihrer Ausdehnung gehemmt werden. Eine erhebliche Bremswirkung der porösen Struktur auf den Jet konnte festgestellt werden.



## 1. Aktuelle Probleme der Gemischbildung und Verbrennung in Motoren

In einem modernen Verbrennungsmotor (Benzin und Diesel) ist das innere Gemischbildungsverfahren (Direkteinspritzung) als Basisverfahren für weitere Motorentwicklung gegeben. Insbesondere für die Reduktion des Kraftstoffverbrauchs sind die direkten Einspritzverfahren in beiden Arten des Verbrennungsmotors von großer Bedeutung. Die hohen Einspritzdrücke, schnellen Injektoren und Mehrfacheinspritzungsstrategien werden aktuell als die wichtigsten Entwicklungsaspekte betrachtet (Abb. 1).

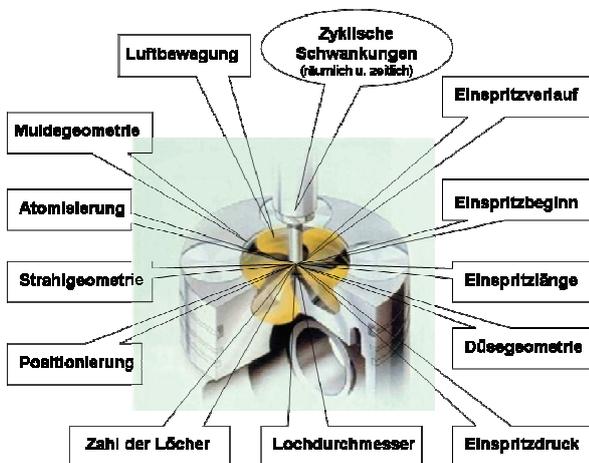


Abb.1. Die wichtigsten Parameter für Optimierung von dieselmotorischen Prozessen

Die Erhöhung des Einspritzdrucks hat primär eine feinere Zerstäubung des Kraftstoffes zur Folge. Die Kontaktfläche zwischen Kraftstoff und Luft wird somit vergrößert. Dies reduziert sowohl die Zonen, in denen fett verbrannt wird und Partikel entstehen, als auch die Zonen der thermischen  $\text{NO}_x$ -Bildung. Des Weiteren kann aufgrund der kleineren Kraftstofftropfen, welche schneller verdampfen, der gesamte Gemischbildungs- und somit Brennvorgang beschleunigt werden. Dies bedeutet, dass zum einen später mit dem Einspritzvorgang begonnen werden kann. Zum anderen kann der Motor wegen des verringerten Zeitbedarfs der Gemischbildung und Verbrennung mit höherer Drehzahl betrieben werden. Die Erhöhung des Einspritzdruckes erhöht jedoch die Eindringtiefe in den Brennraum, was zur Benetzung der Wandflächen mit resultierender HC- und Rußbildung führt. Durch die Verbrennung einer kleinen Kraftstoffmenge, die dem Brennraum durch eine Vor-Einspritzung zugeführt wird, kann dieser

thermisch vorkonditioniert und dadurch der Zündverzug der vorgemischten Phase der Haupteinspritzung verringert werden. Dies führt zu einer erheblichen Reduzierung des sog. Dieselnagelns, sowie der  $\text{NO}_x$ - und HC-Emissionen.

## 2. Grundlagen und Anforderungen an die Versuchsanordnung

Die hier beschriebene Vorrichtung bietet die Möglichkeit, Kraftstoff mit hohem Druck entweder in eine gasförmige Umgebung oder in ein Ölbad einzuspritzen. In beiden Modi wird die Anlage unter Atmosphärendruck betrieben. Dabei bleibt die Versuchsvorrichtung bis auf das Medium in der Kammer weitgehend unverändert. Zur Befüllung der Kammer mit Öl wird idealerweise der Versuchskraftstoff selbst verwendet. Dabei sind die Düsenbohrungen stets unterhalb des Flüssigkeitsspiegels.

Durch die höhere Dichte des Öls kann die Dichte der komprimierten Luft im Brennraum unter atmosphärischem Druck simuliert werden. Die aufwändige und sicherheitstechnisch schwer zu handelnde Konstruktion einer Druckkammer wird somit überflüssig.

Dadurch dass im Ölbadmodi Flüssigkeit in Flüssigkeit eingespritzt wird, ist das Auftreten von Atomisation und Verdampfung nicht möglich. D.h. hier kann die Zerstäubungseigenschaft einer Düse aufgrund des Fehlens eines Sprühnebel nicht beurteilt werden.

Zur Untersuchung der Strahlentwicklung und der Prozesse z.B. beim Wandaufprall wird die Einspritzung synchron durch ein Stroboskop beleuchtet. Durch Verschiebung der Phasenlage des Blitzes zu Einspritzung kann ein gewünschter Prozesszeitpunkt durch eine Kamera aufgenommen und untersucht werden. Das System bietet auch die Möglichkeit mit hoher Frequenz einzuspritzen und so für das menschliche Auge ein nahezu stehendes Bild zu erzeugen. Die Notwendigkeit einer Hochgeschwindigkeitsdarstellung entfällt hier somit.

Die Eindringtiefe des Kraftstoffjets in ein umgebendes Medium lässt sich nach [10] allgemein mit der halbempirischen Formel nach Sitkei berechnen:

$$S = C \cdot d_n \cdot Ho^{0,46} \cdot Re^{0,3} \cdot \rho^{-0,35}$$

S stellt dabei die Eindringtiefe des Einspritzstrahls in das umgebende Medium, C eine dimensionslose Konstante mit einem Wert um 0,2 und  $d_n$  den Bohrungsdurchmesser der Düse dar.  $Ho$  ist die Hodgsonzahl,  $Re$  ist die Reynoldszahl.  $\rho^*$  steht für den Quotienten aus dem Dichtewert des eingespritzten Fluids zu dem des Umgebungsfluids. Die Gleichung ist gültig für einen Reynoldszahlenbereich zwischen 4000 und 20000.

Wird die Düse mit den gleichen Parametern im gasförmigen Medium und im Ölbad betrieben, wird schnell deutlich, dass die unterschiedlichen Eindringtiefen durch das unterschiedliche Dichteverhältnis  $\rho^*$  in  $-0,35$ ter Potenz zustande kommt (siehe Abb.2 und Abb.3).

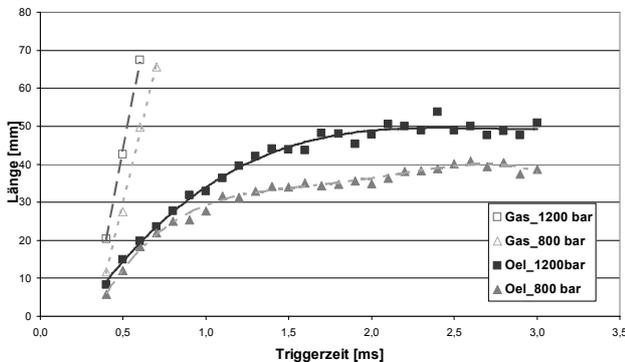


Abb.2. Jettlänge in Luft und Öl als Funktion der Zeit nach den Triggersignal für zwei Einspritzdrücke und  $\tau=1500\mu s$

### 3. Physikalischer Hintergrund des Verfahrens in Öl-Kammer

Beim Eintreten des Kraftstoffes in die Düsenbohrung wird das Fluid stark beschleunigt und es entsteht aufgrund der scharfen Bohrungseinlasskanten eine hochturbulente Strömung. Diese Vorgänge führen dazu, dass der Dampfdruck des Kraftstoffes lokal unterschritten wird und sich Dampf ausbildet. Dieser legt sich nach [8] zunächst in Form eines Filmes an die Innenseite der Bohrung, löst sich jedoch bei höheren Drücken und Strömungsgeschwindigkeiten von der Wand ab und tritt in Form von kleinen Dampfbläschen aus der Düse aus (Abb.4).

Diese lösen sich von der Kante ab und bewegen sich in Wandungsnähe Richtung Düsenaustritt, wobei sie auf diesem Weg in sich zusammenfallen und Wirbel hinterlassen (Abb.4).

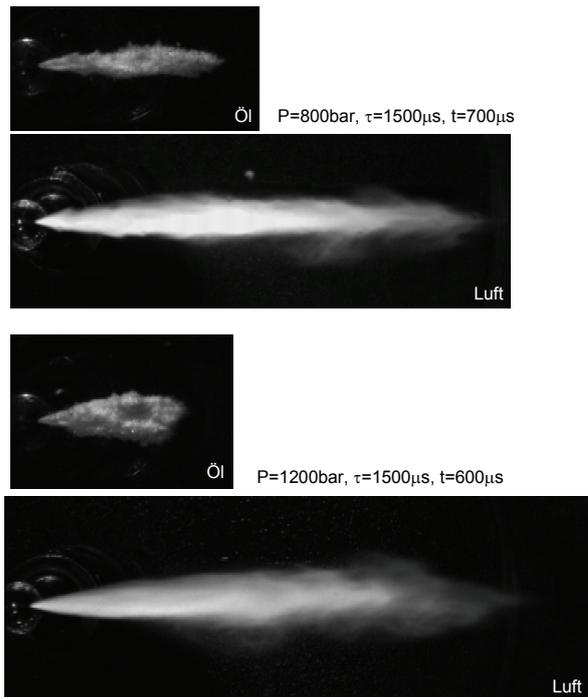


Abb.3. Freistrah in Luft und Öl für zwei Einspritzdrücke: 800bar und 1200 bar ( $\tau=1500\mu s$ )

Diese sind dann aufgrund ihrer Reflexions- und Brechungseigenschaften mit bloßem Auge zu erkennen.

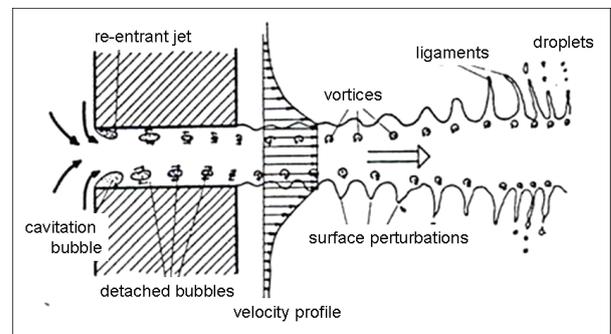


Abb.4 Kavitationsmodell [8]

### 4. Testkammer und Versuchseinrichtung

Das Kernstück der Kammer besteht aus einem 170mm langen Plexiglaszylinder mit 150 mm Außendurchmesser und 5 mm Wandstärke. In diesen wurde als Überlauf ein Plexiglasröhrchen radial eingeklebt, so dass der eingespritzte Kraftstoff wieder in den Vorratstank zurückgeführt werden kann. Um den optischen Zugang zur Einspritzung auch von der Unterseite des

Zylinders zu gewährleisten wurde der Boden der Kammer ebenfalls aus Plexiglas hergestellt (Abb.5 und 6).

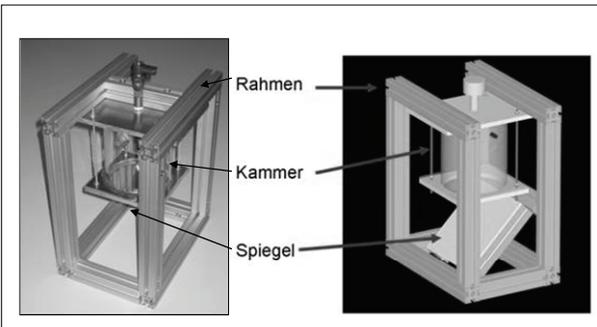


Abb.5 Grundkonstruktion der Testkammer und Versuchstandes

Dieses Plexiglasmodul ist zur statischen Stabilisierung zwischen zwei Metallplatten gespannt, die mit geeigneter Öffnung für den optischen Zugang (unten) bzw. für die Aufnahme des Injektors versehen sind. Diese Einheit wiederum ist an einem Rahmengestell aus Aluminiumprofilen befestigt, welches u.a. auch Teile des Hochdrucksystems, die Kamera und die Stroboskoplampen aufnimmt.

Der Deckel der Anordnung ist ebenfalls ein Aluminium-Frästeil. Er verfügt über eine Nut, in die der Plexiglaszylinder eingreift. Weiterhin besitzt der Deckel eine mittige Bohrung, durch welche der Injektor in die Kammer hereinragt. Wegen der Drucklosigkeit der Kammer ist einer gesonderten Abdichtung nach oben hin sowohl an der Injektordurchführung als auch an der Kontaktfläche Deckel/Zylinder nicht notwendig.

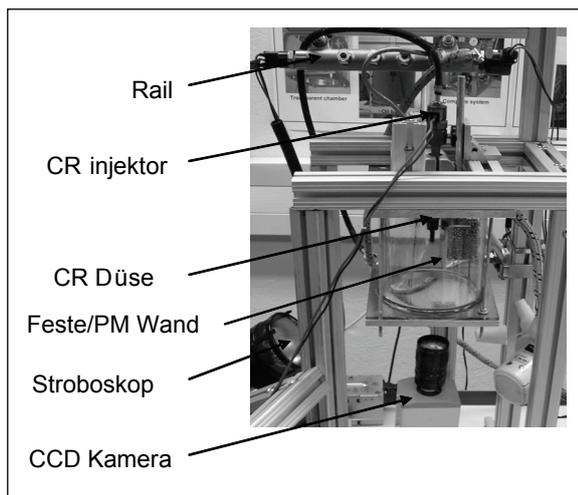


Abb.6 Testkammer

Das Injektorsteuerungssystem (Abb. 7 und 8) ermöglicht über einen definierten Ausgangs-

signalverlauf die Ansteuerung des Injektors. Die Parameter der Ansteuerung, also Flankensteigung, Bestromungszeit und Spannung sind dabei vollkommen frei wählbar. Das erlaubt die Programmierung einer Einspritzsequenz durch eine Hüllkurve mit maximal 16 Stützstellen. Dies bedeutet, dass insgesamt acht Einspritzungen innerhalb einer Einspritzsequenz dargestellt werden können. Die Auslösung der Einspritzsequenz erfolgt entweder über eine am Gerät angebrachte Taste, oder, wie im beschriebenen Aufbau ausgeführt, über einen Triggereingang in Form einer BNC-Buchse.



Abb.7. Elektronische Injektorsteuerung von Genotec (CR-Piezoinjektoren)

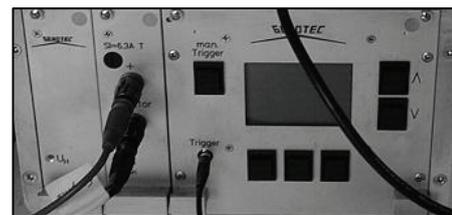


Abb.8. Elektronische Injektorsteuerung von Genotec (CR-Magnetinjektoren)

Der hier beschriebene Versuchsaufbau bietet neben den bereits dargestellten Vorzügen (einfacher und kostengünstiger Aufbau, Wegfall der Notwendigkeit einer Hochgeschwindigkeitsvisualisierung) zudem ein sehr hohes Maß an Flexibilität und Anpassungsfähigkeit (z.B. Betrieb von Magnet- und Piezo-Injektoren). Einzelne Module der Versuchseinrichtung sind mit geringem Kosten- und Arbeitsaufwand an individuelle Versuchsanforderungen anzupassen. Viele Systemkomponenten können einfach ausgetauscht werden. Daraus ergibt sich ein sehr hohes Nutzpotal.

Ein zusätzliches Leistungsmerkmal des Systems ist eine Raildruckregelung. Geregelt wird durch einen Eurotherm 2048 PID-Regler. In ihm ist die Kennlinie des Raildrucksensors hinterlegt. Aufgrund der Gefahr von Überschwüngen und weiteren regelungstechnischen Problemen wird

hier auf den Einsatz des Reglers verzichtet, da der Versuchsaufbau über keinen Schutz vor Überdruck verfügt. Beim Bersten von Systemteilen besteht Gefahr für den Anwender. Der Regler wird lediglich zur Anzeige des aktuellen Raildrucks verwendet. Für den Betrieb der Versuchseinrichtung und um die Versuchsergebnisse festhalten und auswerten zu können ist eine Reihe an zusätzlichen Apparaten notwendig. Dabei lassen sich diese Geräte durch ihre Funktion in die Kategorien Steuer- und Messgeräte unterteilen. Die wichtigsten Geräte sollen im Folgenden kurz beschrieben werden (Abb.9).

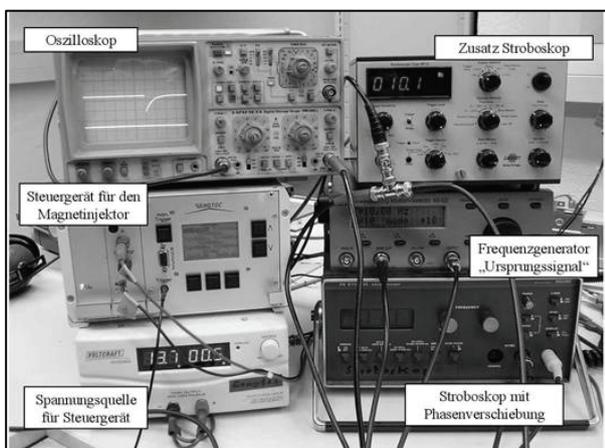


Abb.9. Ansicht der elektronischer Steuerung und Signalanalyse

**Vorförderdruck**

Der Vorförderdruck ist der Druck, der saugseitig an der Hochdruckpumpe herrscht. Erzeugt wird er durch die Kraftstoffpumpe EKP1 (siehe Abb.10). Angezeigt wird er von dem an der Testkammer angebrachten Manometer.

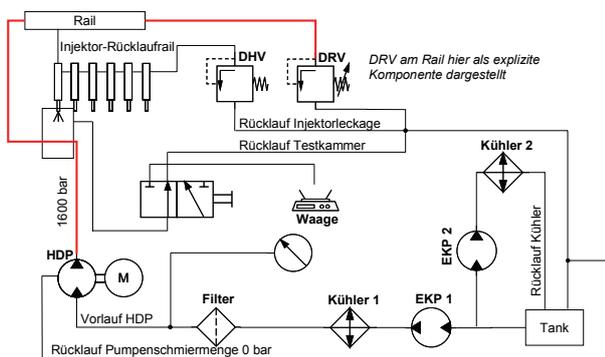


Abb.10. Schematische Darstellung des Hydraulik-Funktionsplans

**Vorwahl des Raildrucks**

Der Raildruck wird über die Bestromung des Druckregelventils (DRV) vorgewählt.

**Systemkühlung**

Vor Einschalten der Hochdruckpumpe muss der Umwälzkühlkreislauf „Kühler 2“ aktiviert werden. Der Vorlaufkühler „Kühler 1“ wird mit Einschalten der Hochdruckpumpe automatisch durchströmt.

**Hochdrucksystem**

Für die Versuche wurde ein herkömmliches Common-rail System verwendet. Elektromotor, Hochdruckpumpe, Vorförderdruck von min. 0,5 bar durch konventionelle Kraftstoffpumpe, die das Öl erst durch einen Kraftstofffilter und anschließend durch den Kühler pumpt. Am Rail wird nur ein Injektor angeschlossen, wobei die anderen Anschlüsse verschlossen sind. Am Rail befindet sich das Druckregelventil (DRV), über welches der Druck im Rail durch Steuerung der Ventilspannung eingestellt wird. Auch der Raildrucksensor (RDS) befindet sich am Rail. Er gibt eine Spannung aus, die einem bestimmten Druck zugeordnet ist.

**Injektoransteuerung**

Der Magnetinjektor wurde mit Hilfe der Injektoransteuerung V2.1 der Firma Genotec betrieben (Abb.8). Es handelt sich bei der Injektoransteuerung um eine komplette Steuereinheit für Dieselinjektoren, die sich in die Hauptkomponenten gliedert: Überspannungserzeugung, Injektoren-endstufe und Steuer- und Kontrolleinheit. Die Steuer- und Kontrolleinheit ermöglicht über ein Bedienteil an der Front der Ansteuerung die Eingabe einer gewünschten Pulsfolge, die nach erfolgter Triggerung ausgegeben werden soll. Dabei können die Parameter: Anzugsdauer des jeweiligen Pulses, Haltedauer, Pausendauer zwischen zwei Pulsen variiert und vorgewählt werden.

**Frequenzgenerator**

Das Versuchssystem nutzt ein M&R Systems arbitrary morphing wave form Generator WG – 820. Hierbei handelt es sich um einen Frequenzgenerator, der über BNC Buchsen u. a. ein TTL Signal erzeugt. Dieses Signal diente bei den hier gezeigten Versuchen als Ursprungssignal. Der erzeugbare Frequenzbereich liegt zwischen 1Hz und 10 MHz.

## 5. Messtechnik

### Stroboskope zur Visualisierung

Zur Darstellung des Einspritzvorganges werden zwei Stroboskope verwendet: Philips PR9112 Hochleistungsstroboskop. Hierbei handelt es sich um ein extern triggerbares Stroboskop mit einer Xenon-Quarz Blitzröhre. Die mittlere Beleuchtungsstärke beträgt min. 1800 Lux (bei 0,5m Entfernung). Das Gerät verfügt über eine 5 – polige Diodenbuchse (180°) für den Eingang des Triggersignals und über eine ebenfalls 5-polige Diodenbuchse (240°) für den Ausgang eines Triggersignales zur Steuerung weiterer Geräte. Als zweites Stroboskop wird verwendet ein Brüel & Kjær Stroboskop Type 4913. Dieses Gerät ist über einen BNC Anschluss extern triggerbar. Der Lichtwerfer ist mit einer Xenon Entladungsröhre ausgestattet. Die Blitzdauer bei halber Scheitellichtstärke beträgt etwa 3 ms, die Beleuchtungsstärke bei 0,5 m Abstand etwa 7000 Lux.

### Oszilloskop zur Zeitmessung

Zum Messen der Phasenverschiebung zwischen dem Ausgangssignal des Frequenzgenerators und dem des Ausgangssignals des Stroboskop (Philips) wurde ein Oszilloskop vom Typ Hemag HM 205-2 verwendet.

### CCD Kamera

Die PCO FlashCam Schwarz/Weiß CCD – Videokamera kann durch ein externes Triggersignal gesteuert werden und bietet dabei die Möglichkeit, zusätzlich zur Belichtungszeit (1 $\mu$ s-1ms) eine Verzögerung einzustellen. Zudem sind Mehrfachbelichtungen möglich. Bei der vorgeschalteten Optik handelt es sich um eine Cosmicar TV zoom Linse 12,5mm-75mm, 1:18 mit C- Mount Anschluss. Das abzubildende Objekt wird über die Optik auf den CCD Chip projiziert. Belichten und Auslesen erfolgen zeitversetzt durch ein Triggersignal. Kameraintern werden die Bilddaten zunächst durch einen 8 Bit A/D Wandler digitalisiert und in den Bildspeicher geschrieben. Für den Analogausgang der Kamera wird das Signal anschließend wieder durch einen 8 Bit D/A Wandler zurückgewandelt.

Das Auslesen des CCD Chips benötigt 19,9ms. Für diese Zeit ist der Triggereingang gesperrt und eingehende Signale werden ignoriert. Daraus ergibt sich eine max. mögliche Aufnahme Frequenz von 50 Hz. Die Kamera gibt ein Analogsignal über eine BNC Buchse (nach RS170-Norm) aus, das über eine Bildverarbeitungskarte (Frame Grabber)

eingelezen und digitalisiert wird.

### Zeitdarstellung

Um für alle Versuchereignisse eine gemeinsame zeitliche Referenz zu schaffen, wurden alle zeitrelevanten Signale in Abhängigkeit zu dem vom Frequenzgenerator erzeugten „Ursprungssignal“ gesetzt. Dieses TTL- Signal wurde direkt an das Injektorsteuergerät der Fa. Genotec weitergeleitet und dadurch getriggert. Dieses wiederum steuert dadurch den Injektor entsprechend des zuvor in der Kontroll- und Steuereinheit des Gerätes eingestellten Stromprofils an, so dass sich die Injektornadel durch den Elektromagneten hebt und die Düse freigibt. Es kommt zur Einspritzung.

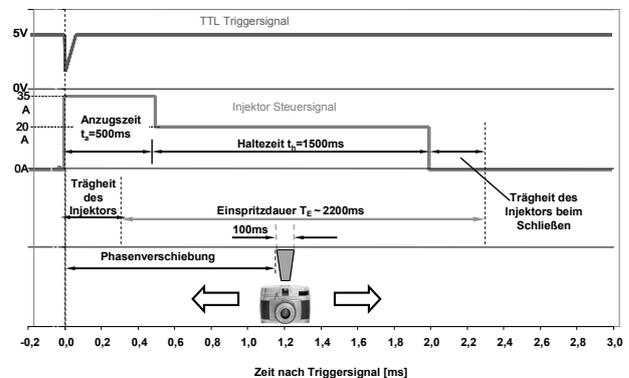


Abb.11. Definition der Zeitmessung

Vom Frequenzgenerator wird neben diesem „Injektorsignal“ durch einen weiteren, parallelen Zweig das Ursprungssignal abgegriffen und in das erste Stroboskop geleitet. Dieses Stroboskop kann extern getriggert werden, aber es kann auch an andere Geräte ein Triggersignal ausgeben und dieses Signal durch Phasenverschiebung gegenüber dem Eingangssignal verzögern (Abb.11). D.h. dass alle Geräte die durch das Stroboskop getriggert werden, diese Phasenverschiebung mit erleiden. Mit diesem verzögerten Signal aus dem ersten Stroboskop werden parallel das zweite Stroboskop, die Kamera und der Frame Grabber des Computers angesteuert. Durch diesen Aufbau lässt sich jeder relevante Zeitpunkt nach dem Einspritzbeginn des Injektors mit den Stroboskopen beleuchten und durch die Kamera aufnehmen (Abb.12).

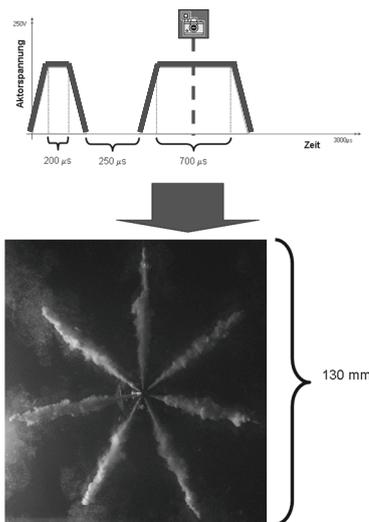


Abb.12. Einspritzungscharakterisierung in Öl für eine Piezo-7-Loch CR Düse (p=900bar)

## 6. Potential der Testkammer in Untersuchung des Einspritzprozess

Verschiedene Einspritzparameter und Prozesse, wie zum Beispiel Strahlbildung oder Wandaufprall, können in dieser Kammer detailliert untersucht werden. In diesem Kapitel werden verschiedene Beispiele der unterschiedlichen Nutzungsmöglichkeiten der Kammer dargestellt und kurz beschrieben.

### 6.1. Allgemeine Charakteristik des Einspritzvorganges (Strahlbildung)

Die folgenden Parameter des Freistrahls können vermessen bzw. rekonstruiert werden (siehe Abb.13): Jetlänge, Geschwindigkeit, Flächeninhalt, Geschwindigkeit des Schwerpunktes, Länge der Konturlinie, Jetbreite, Jetwinkel (Kegelwinkel), vertikaler und horizontaler Durchmesser.

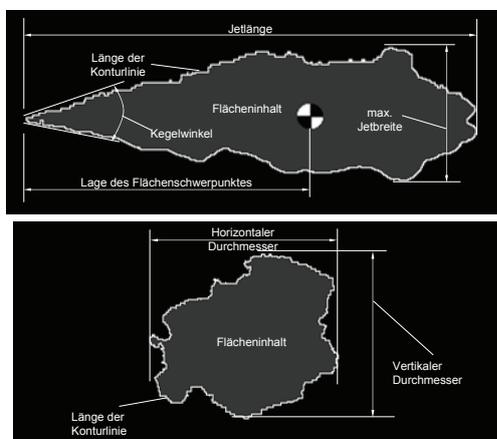


Abb.13. Grundparameter des Freistrahls

Ein Beispiel der Dieselstrahlausbreitung in Luft unter atmosphärischen Druck ist in Abb.14 dargestellt.

Der Entwicklungsverlauf des Jets im Ölbad gleicht prinzipiell dem, der unter Luftatmosphäre entsteht. Dabei bleibt aber der Jet im Ölbad erwartungsgemäß erheblich kleiner bzw. erreicht die gleiche räumliche Ausdehnung erst deutlich später, da er sich gegen die drastisch höhere Dichte des Öles ausbreiten muss. Der Jetkegelwinkel ist im Ölbad größer, entsprechend der Theorie nach [8].

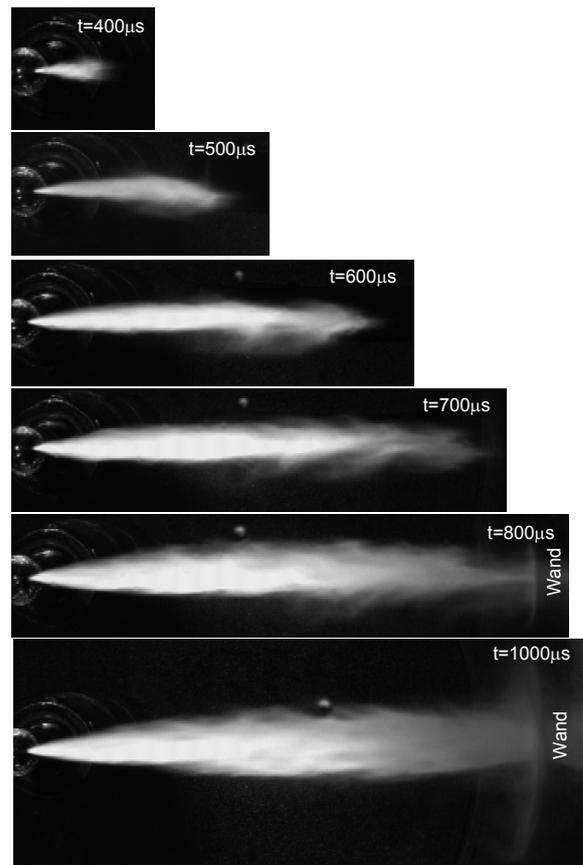


Abb.14. Freistrahlausbreitung in Luft unter atmosphärischen Bedingungen; p=800bar,  $\tau=1500\mu s$  (2-Loch Düse)

Da die Parameter nicht nur für einen oder wenige Zeitpunkte zur Verfügung stehen, sondern deren Verlauf über ein weites Zeitfenster mit einer ausreichend hohen zeitlichen Auflösung ( $100\mu s$ ) aufgenommen wurden, konnten durch zeitliche Ableitung der Parameterverläufe die Geschwindigkeitsverhältnisse ermittelt werden. Sinnvollerweise erfolgte hierbei eine Beschränkung auf die Geschwindigkeit der Jet Spitze und der des Flächenschwerpunktes.

Bei axialer Betrachtung des Jets (so dass er sich auf den Betrachter hin ausbreitet) können weitere Parameter ermittelt werden. Neben dem

Flächeninhalt und der Länge der Konturlinie der Frontansicht kann aus der horizontalen und der vertikalen Ausdehnung ein gemittelter Durchmesser errechnet werden (Abb.15). Durch zeitliche Ableitung der Parameterverläufe ist es möglich, die Geschwindigkeit der Durchmesserzunahme ( $\Delta D/\Delta t$ ) zu ermitteln (Abb.16).

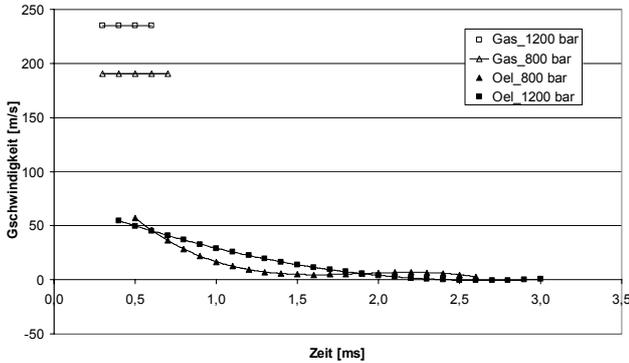


Abb.15. Freistrahlggeschwindigkeit in Luft und in Öl für zwei Einspritzdrücke (für Gas Zeit bis Wandaufprall)

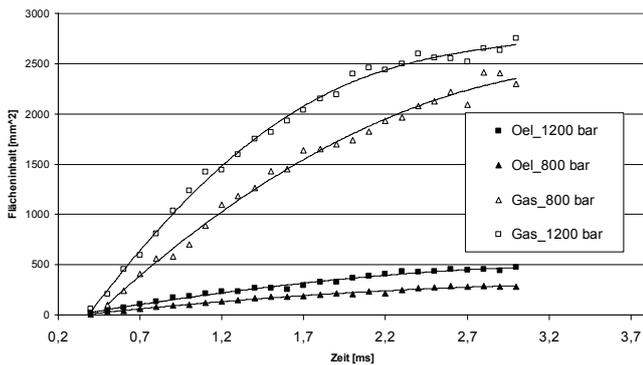


Abb.16. Freistrahlfäche gemessen in Luft und in Öl für zwei Einspritzdrücke (Zeit bis Wandaufprall)

**6.2. Wandaufprall: feste Wand**

Der Jetaufprall auf eine feste Wand wird nach [9] definiert (siehe Abb.17).

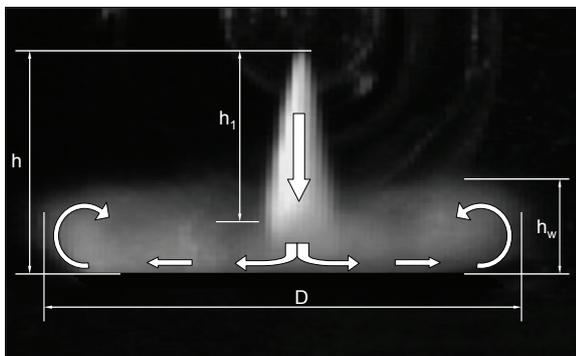


Abb.17. Model des Jetaufpralls auf eine feste Wand

Demnach lässt sich der Ablauf in drei Regionen oder Phasen einteilen. Der erste Bereich wird von der Anwesenheit der Wand nicht beeinflusst und entspricht in seinem Verhalten und Erscheinungsbild dem Free Jet.

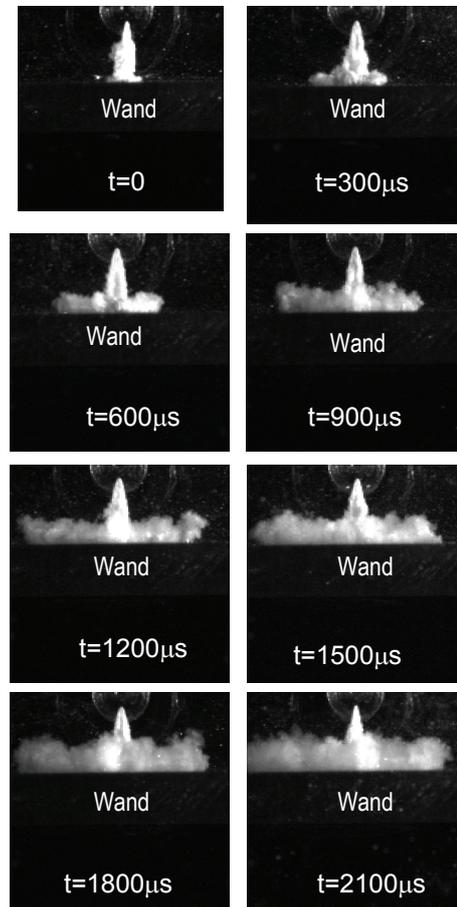


Abb.18. Wandaufprall auf einer festen Wand für  $p=800\text{bar}$  in Öl (Zeit nach Wandberührung)

Die zweite Phase ist der Bereich, in welchem sich der eigentliche Wandaufprall ereignet. Dieser Bereich beginnt definitionsgemäß an der Stelle, an der die Geschwindigkeit in der Hauptachse von der des Free Jet abweicht. Im Anschluss an die Verzögerung der axialen Geschwindigkeit des Jets wird dieser umgelenkt und anschließend radial beschleunigt (Abb.18).

Eine quantitative Charakterisierung der Aufprallzone wird in Abb.19 gezeigt. Hier wird ein gemittelter Durchmesser der Aufprallzone gemessen.

Der Vergleich zwischen dem Wandaufprall des Jets im Ölbad und dem unter Luftatmosphäre bringt zunächst ein ähnliches Ergebnis wie die

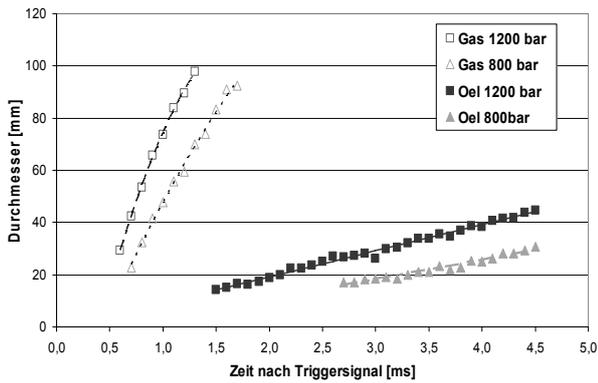


Abb.19. Gemittelter Durchmesser in der Aufprallebene in Luft und Öl für x=30mm, p=800bar und p=1200bar (siehe Abb.13)

Gegenüberstellung der Entwicklung des Free Jets unter dem Einfluss von Öl und Luft. Die Gestalt des Wandaufpralls und die des Radialjets ist im Ölbad kleiner als die unter Gasatmosphäre.

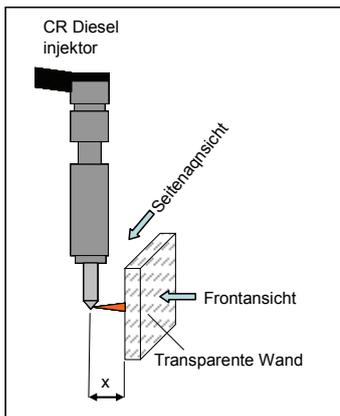


Abb.20. Einrichtung für Visualisierung des Wandaufpralls

Ein Beispiel der Visualisierung des Dieseljetaufpralls wird in Abb.21 dargestellt. Dieses Bild zeigt die Ergebnisse für zwei Einspritzdrücke (800bar und 1200bar) im Ölbad für zwei Wandabstände X=7mm und X=30mm – siehe Abb.20.

Für einen geringen Abstand des Düsenausganges zur Wand konnte für Zeiten nach dem Wandaufprall größer als etwa 1200 μs eine Aufprallzone beobachtet werden, die eine Dreieck-Geometrie aufweist [16]. Durch die Nutzung bestehender Theorien kann diese Phänomen noch nicht erklärt werden.

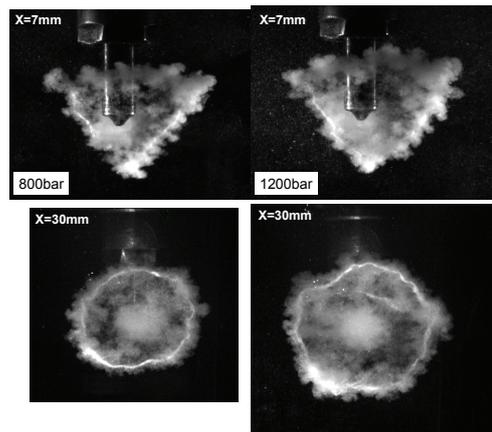


Abb.21. Frontansicht des Wandaufpralls für zwei Einspritzdrücke und zwei Wandabstände (X) gemessen in Ölbad

### 6.3. Wandaufprall: poröse Struktur

Unter dem Wandaufprall eines Kraftstoffstrahls verstand man bisher vor allem das Zusammenwirken eines Jets mit einer festen, d.h. undurchlässigen Wand, wie es bereits in Kapitel 6.2 beschrieben wurde.

Nahezu unerforscht hingegen ist das Zusammenspiel zwischen einem Kraftstoffstrahl und einem hochporösem Material (Abb.22).

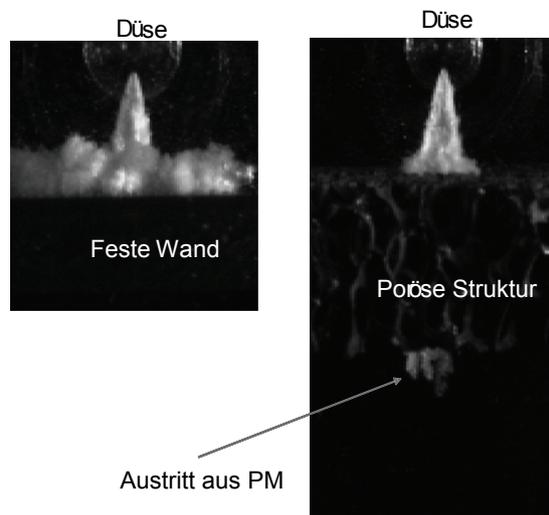


Abb.22. Vergleich eines Wandaufpralls auf einer festen Wand (links) und poröse Struktur (rechts)

Bekannt sind bisher lediglich die in [11,14,15] veröffentlichten Untersuchungen. Hier wurde ein erstes Modell gegeben, welches den Prozessablauf des Aufpralls beschreibt. Demnach

kann dieser in vier Phasen gegliedert werden (siehe Abb. 23).

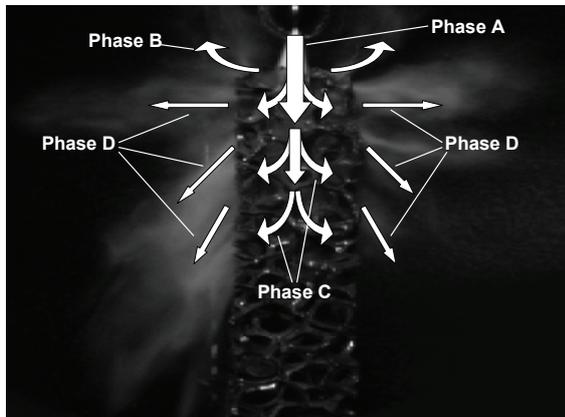


Abb.23. Modell des Jet-Wandaufpralls auf ein Poröses Medium nach

Wie beim Wandaufprall auf einer festen Wand entspricht die erste Phase (Phase A) dem Free Jet. Phase B beschreibt den Wandrückprall, d.h. der Teil des Jets, der nach Auftreffen auf die Struktur wieder reflektiert wird. Nachdem der Anteil des Jets, der nicht zurückgeworfen wurde in das PM eingedrungen ist, erfolgt eine räumliche Verteilung des Kraftstoffes im Gefüge.

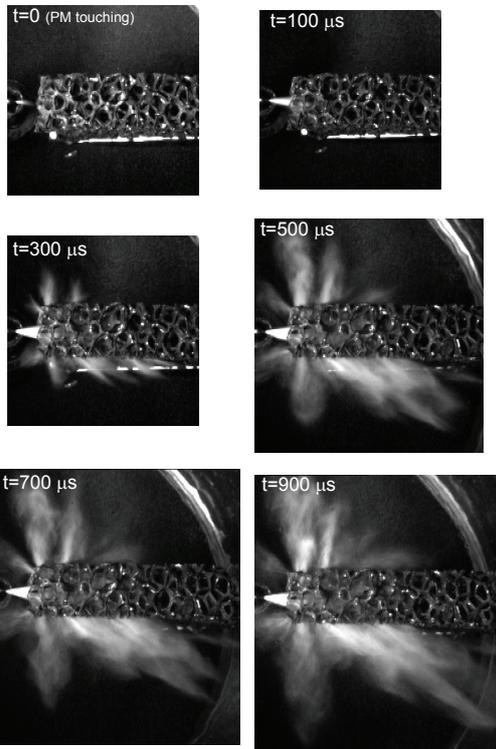


Abb.24. Diesel Jet-Aufprall auf ein Poröse Struktur (10ppi Poren dichte) für  $p_{inj}=1200\text{bar}$  in Luft ( $p=1\text{bar}$ )

Dies geschieht als Folge des in [11,14] als Multi-Jet-Splitting bezeichneten Prozesses. Hierbei wird durch den Aufprall des Primärjets auf die Stege der Struktur dieser in mehrere Sekundärjets zerteilt und abgelenkt (Phase C mit Multi-Jet-Splitting). In der letzten Phase (Phase D) kommt es wieder zum Austritt des Kraftstoffes aus dem PM. Dies geschieht in Form von vielen Sekundärjets, die sich entsprechend des verbleibenden Impulses und ihrer jeweilig aufgeprägten Richtungskomponente entwickeln (siehe Abb.24).

Das Multi-Jet-Splitting kann in Abb.25 noch genauer angesehen werden.

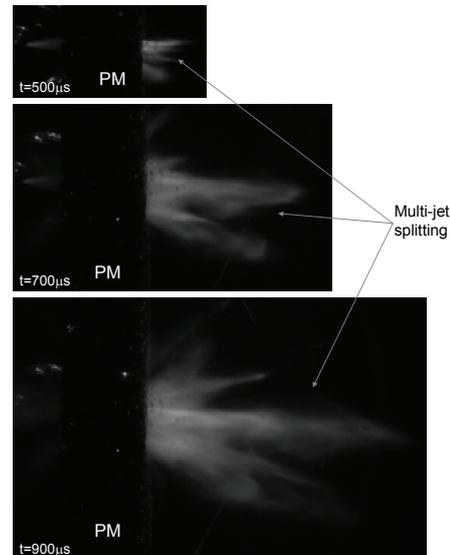


Abb.25. Jetaufprall auf eine poröse Struktur in Luft und Multi-jet Splitting Effekt; 2-Loch Düse,  $p=1200\text{bar}$

#### 6.4. Zyklus-zu-Zyklus Schwankungen des Einspritzvorganges

Der Einspritzprozess in Verbrennungsmotoren unterliegt gewissen Schwankungen, den sog. Zyklus-zu-Zyklus Schwankungen. Diese äußern sich darin, dass trotz konstanter Einspritzparameter (wie z.B. Einspritzdruck, -dauer, etc.) kein Parameterwert (z.B. Jetlänge) exakt eingestellt werden kann, sondern nur eine Aussage über dessen Auftretenswahrscheinlichkeit möglich ist (Abb.26).

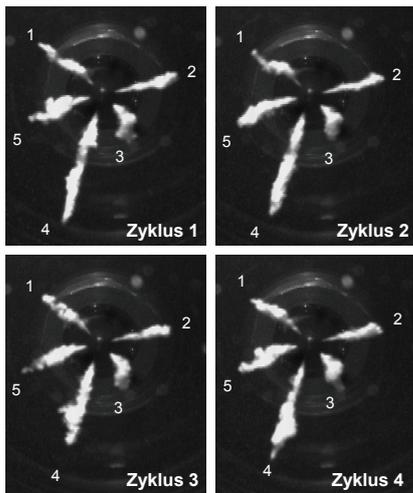


Abb.26. Vier Einspritzzyklen der CR 5-Loch Düse in Öl (p=700bar, τ=1500μs)

Abbildung 27 zeigt eine extreme Abweichung der Eindringtiefe vom Durchschnitt bei Darstellung im Gegenlicht.

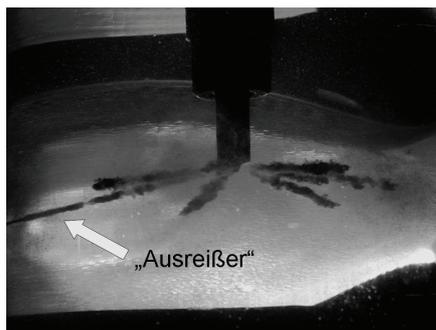


Abb.27. „Ausreißer“ bei Dieseleinspritzung (7-Loch CR Piezo-Injektor)

Auch wenn hier nicht auf die Ursachen dieses Phänomens eingegangen werden kann, so muss doch festgestellt werden, dass derartige Unregelmäßigkeiten zwangsläufig auch im Verbrennungsmotor auftreten und der Einspritzprozess somit nicht sauber reproduzierbar ist. Dies wirkt sich in jedem Fall negativ auf den Gemischbildungs- und somit auch auf den Verbrennungsprozess aus.

Die Standardabweichung für die Messungen der Jetlänge für eine 2-Loch CR Dieseldüse ist in Abb.28 dargestellt.

Markante Unterschiede zwischen den Abweichungen im Ölbad und unter Luftatmosphäre sind aufgrund des sehr schnellen Prozessablaufes unter Luftatmosphäre und der daraus resultierenden geringen Anzahl an Messpunkten (bei der gegebenen Zeitauflösung) nicht ermittelbar.

Die gewonnenen Werte liegen jedoch für beide Umgebungsmedien

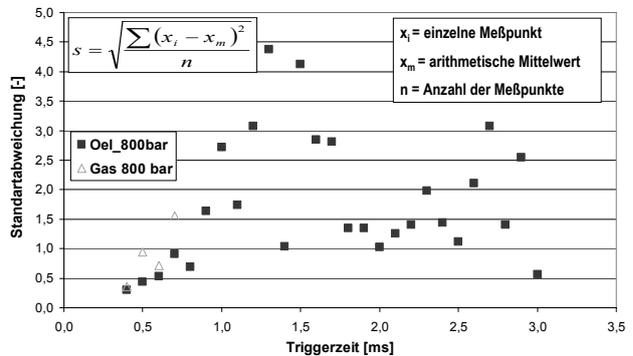


Abb.28. Standardabweichung der Jetlänge für 2-Loch CR Dieseldüse in der gleichen Größenordnung.

## 6. Zusammenfassung

In diesem Paper wurde eine Versuchsanordnung für sehr detaillierte qualitative und quantitative Untersuchungen des Einspritzvorganges im Ölbad wie auch unter Luftatmosphäre dargestellt. Die hierbei gewonnenen Ergebnisse aus den Versuchen zum Free Jet unter Luftatmosphäre zeigen eine gute Übereinstimmung mit den gegebenen Modellen der Strahlentwicklung. Eine Steigerung des Einspritzdruckes führte zu größeren Raumeindringtiefen und zu höheren Geschwindigkeiten des Jets. Eine Erhöhung der Dichte des Umgebungsmediums führte zu tendenziell größeren Jetkegelwinkeln und zu erheblich kürzeren Jetlängen. Das Zusammenspiel zwischen Jet und poröse Struktur (PM) ist in der vorliegenden Arbeit näher untersucht worden. Hierzu wurden als Vergleichs- und Referenzprozesse des Free Jets, sowie der Jet-Aufprall auf eine feste Wand herangezogen. Die Entwicklung des Free Jet im Ölbad und unter Luftatmosphäre wurde auch unter dem Aspekt der „Zyklus-zu-Zyklus“ Schwankungen untersucht. Dabei konnte zu deren Darstellung die Standardabweichung und die Spannweite genutzt werden. Die Versuche zum Wandaufprall des Dieseljets brachten teilweise völlig unerwartete Versuchsergebnisse hervor. Es konnte beobachtet werden, wie sich beim Wandaufprall des Jets im Ölbad aus einer zunächst runden Aufprallzone ein dreieckiger Wandjet bildete. Bei näherer Untersuchung dieser Ergebnisse wurde als eine Einflussgröße für die Bildung des Dreiecks der Wandabstand vom Düsenausgang identifiziert. Ein geringer Abstand der Aufprallebene vom Düsenausgang ermöglicht die Bildung besagter Dreiecke. Eine zunehmende Vergrößerung des

Abstandes führte zu immer weniger deutlich ausgeprägten Dreiecken, bis schließlich der Wandjet wieder die gewohnt runde Form besitzt. Es konnte gezeigt werden, dass der charakteristische Einfluss der Versuchsparameter Einspritzdruck und Dichte des umgebenden Mediums bei den Prozessen des Jet-Wandaufpralls zunächst ähnliche Auswirkungen hat, wie sie bei den Untersuchungen zum Free Jet festgestellt wurden. Mit steigendem Einspritzdruck wachsen die Werte der Charakterisierungsgrößen, mit zunehmender Dichte des umgebenden Mediums verkleinern sie sich. Die Versuche des Jet-Aufpralls auf eine poröse Struktur wurden in verschiedenen Konfigurationen durchgeführt. Es konnte hierbei gezeigt werden, dass die Prozesse mit zunehmendem Abstand des PM vom Düsenausgang und mit steigender Dichte des umgebenden Mediums z.T. erheblich verzögert und in ihrer Ausdehnung gehemmt werden. Eine erhebliche Bremswirkung der porösen Struktur auf den Jet konnte festgestellt werden. Jedoch zeigte sich auch, dass eine Vergrößerung der Anzahl der zu durchlaufenden Poren kaum eine zusätzliche verzögernde Wirkung auf den Jet hat.

Alle Versuchstypen konnten, z.T. sehr eindrucksvoll, das Potential des PM durch das sog. „Multi-Jet-Splitting“ zur Homogenisierung des Dieseljets zeigen.

## Literatur

- [1] Bai, C., Gosman, A.D. 1995, Development of Methodology for Spray Impingement Simulation, SAE Paper 950283.
- [2] Berg, E. 2003, DIME Validation of Spray-Wallinteraction Models, September 22th, 2003 Valencia, Spain
- [3] Cossali, G.E., Brunello, G., Coghe, A., Marengo, M. 1999, Impact of a single drop on a liquid film: experimental analysis and comparison with empirical models, Italian Congress of Thermofluid Dynamics UIT, Ferrera, 30June-02 July, 1999.
- [4] Durst, F., Weclas, M. 2001, A new type of internal combustion engine based on the porous-medium combustion technique, Proc. I. Mech.Engnrs, Part D: Journal of Automobile Engineering, Vol. 215, 2001.
- [5] Durst, F., Weclas, M. 1999, Porous Medium (PM) Combustion Technology and its Application to Internal Combustion Engines: A new concept for a near-zero emission engine, [in:] Applied Optical Measurements, Ed. M. Lehner & D. Mewes, Springer, 1999.
- [6] Grover, R.O., Assanis, D.N. Jr. 2001, A spray wall impingement model based upon conservation principles, The 5<sup>th</sup> Int. Symposium on Diagnostics and Modeling of Combustion in Internal Combustion Engines, COMODIA 2001, Nagoya July 1-4, 2001.
- [7] Pano, M.R., Moreira, A.L. 2002, Visualization and analysis of spray impingement under cross-flow conditions, SAE Technical Paper No. 2002-01-2664.
- [8] Ruiz, F., Chigier, N. 1985, The mechanics of high speed atomization, Int. Conference on Liquid and Spray Systems ICLASS, 1985.
- [9] Senda, J., Fujimoto, H., Kobayashi, M., Yamamoto, K., Enomoto, Y. 1995, Heat Transfer Characteristics of a Diesel Spray Impinging on a Wall, Transl. from Journal of MESJ, Vo1.29, No.10.
- [10] Sitkei, G.: Kraftstoffaufbereitung und Verbrennung bei Dieselmotoren, Berlin/Göttingen/Heidelberg: Ingenieurwissenschaftliche Bibliothek, Springer Verlag 1964.
- [11] Weclas, M., Ates, B., Vlachovic, V. 2003, Basic aspects of interaction between a high velocity Diesel jet and a highly porous medium (PM), 9<sup>th</sup> Int. Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, ICLASS 2003.
- [12] Weclas, M., 2004, Strategy for intelligent Internal Combustion engine with homogeneous combustion in cylinder, Sonderdruck Schriftenreihe Fachhochschule Nürnberg, Nr. 26.
- [13] Weclas, M., 2005, Potential of porous medium combustion technology as applied to internal combustion engines, Academic Press, Univ. of Applied Sciences, Nr. 32.
- [14] Weclas, M., 2005, Porous media in internal combustion engines, [in:] Cellular Ceramics-Structure, Manufacturing, Properties and Applications, Scheffler, M., Colombo, P. (eds), Wiley-VCH-Publ. (May, 2005)
- [15] Weclas, M. 2006, High velocity CR Diesel jet impingement on to porous structure and its utilization for mixture homogenization in I.C. engines, DITICE Workshop: Drop/wall interaction: Industrial applications, Experiments and Modeling, Bergamo (Italy).
- [16] Weclas, M., Zimmermann, R., Can circular Diesel jet have a triangular splashing region by impingement on the flat wall?, Submitted for publication in Journal of Fluids Engineering (in review).