



Doctoral Thesis

Entwicklung und Erprobung eines neuartigen laseroptischen Detektionssystems zur in situ Messung von Einspritzstrahltröpfchen am laufenden DI-Dieselmotor

Author(s):

Stöckli, Martin

Publication Date:

1997

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-001904187> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

**Entwicklung und Erprobung eines neuartigen
laseroptischen Detektionssystems zur in situ
Messung von Einspritzstrahltröpfchen
am laufenden DI-Dieselmotor**

ABHANDLUNG
zur Erlangung des Titels

DOKTOR DER TECHNISCHEN WISSENSCHAFTEN

der
EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE
ZÜRICH

vorgelegt von

MARTIN STÖCKLI

Dipl. Maschineningenieur ETH
geboren am 1. August 1964
von Guggisberg (BE) und Zürich (ZH)



Angenommen auf Antrag von

Prof. Dr. M. K. Eberle, Referent
Prof. Dr. P. Niederer, Korreferent

Zusammenfassung

Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelten Messmethoden sollen zu einer schnelleren Optimierung von Dieselmotoren bezüglich Treibstoffverbrauch und Schadstoffemissionen führen, sowie Vergleichsdaten für die Simulation der dieselmotorischen Einspritzung liefern und damit einen Beitrag zu sparsameren und emissionsärmeren Dieselmotoren leisten.

Moderne elektronisch gesteuerte Einspritzsysteme bei Dieselmotoren bieten eine grosse Flexibilität in der Systemsteuerung, die gesteigerte Anzahl von Steuerparametern führt jedoch gleichzeitig zu einer aufwendigeren Parameteroptimierung für den stationären und den dynamischen Motorbetrieb. Common-Rail-Einspritzsysteme für direkteinspritzende (DI) Dieselmotoren, bei denen die Düsen elektrisch betätigt werden, können über sechs voneinander unabhängige Parameter aufweisen. Diese grosse Parameteranzahl zieht sehr zeitintensive Optimierungsmessserien nach sich, da Parameteroptimierungen derzeit noch ohne genaue Kenntnis der innermotorischen Prozesse durchgeführt werden müssen. Der Motor muss deshalb bei der Optimierung in jedem Kennfeldpunkt bei allen sinnvollen Parameterkombinationen vermessen werden. Mit den heutzutage verfügbaren Motorprozess- und Emissionsberechnungsmodellen können zwar die Leistung und der Treibstoffverbrauch, nicht aber die Schadstoffemissionen hinreichend genau bestimmt werden. Es sind daher mit Simulationsrechnungen noch keine zuverlässigen Prognosen der Emissionswerte möglich. Parameteroptimierungen können dementsprechend durch Simulationen derzeit weder ersetzt noch im Messaufwand eingeschränkt werden.

Beim Dieselmotor stellen die Ausbreitung des Einspritzstahls, dessen Aufbruch sowie die nachfolgende Vermischung und Verdampfung der Dieselöltröpfchen wichtige physikalische Prozesse dar, welche die Bildung aller auftretenden Schadstoffemissionen (NO_x , Partikel, CO, HC) direkt oder indirekt beeinflussen. Dabei stellen die Tröpfchengrößenverteilung und die volumetrische Tröpfchendichte (Flüssigkeitsvolumen / Kontrollvolumen) eigentliche Primärgrößen dar, die zusammen mit der Tröpfchenverdampfungsrate einen grossen Einfluss auf die NO_x -Emissionen haben. Eine Bestimmung der Tröpfchengrößen in Einspritzstrahlen am laufenden Motor ist für eine Parameteroptimierung sehr interessant, da dadurch die Werte und Verläufe konventionell gemessener Daten (Treibstoffverbrauch, Emissionen) besser verstanden werden können. Über Korrelationen mit den Emissionen kann insbesondere der Einfluss der Einspritzparameter (Einspritzdruck, Einspritzzeiten, AGR-Rate) auf die Tröpfchengrösse sowie deren räumlichen Verteilung und somit der Einfluss der Tröpfchengrösse auf die Emissionen bestimmt werden. Damit kann besser beurteilt werden, welche Einspritzparameter variiert werden müssen - und wie stark diese verändert wer-

den müssen -, um beispielsweise bei gleichbleibendem Verbrauch eine maximale Emissionsreduktion zu erreichen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein optischer Zugang zu einem Brennraum eines vierzylindrigen Prototyp-Dieselmotors realisiert und eine neuartige Methode zur Detektion von Einspritzstrahltröpfchen entwickelt. Damit dieses Detektionssystem künftig als unterstützendes Hilfsmittel bei einer Parameteroptimierung dienen kann, durfte der Motor nur minimal modifiziert werden und musste mit montiertem und einsatzbarem Detektionssystem noch im ganzen Motorkennfeld betrieben werden können. Der optische Brennraumzugang wurde daher als Sonde ausgeführt, die in die Glühkerzenbohrung eingesetzt werden konnte. Die einzige dazu notwendige Modifikation am Zylinderkopf war die Vergrößerung dieser Bohrung auf den Gewindekerndurchmesser.

Im Motorbetrieb entsteht infolge der Partikelbildung im Brennraum eine Russablagerung auf den Brennraumwänden und damit auch auf Brennraumfenstern. Mit einer eigens entwickelten Messtechnik kann die Reduktion der optischen Fenstertransmission, welche von einer solchen Russschicht verursacht wird, während des Motorbetriebs bestimmt werden. Damit kann die maximale Messdauer bis zur nächsten Sondenreinigung ermittelt werden, und ausserdem können damit Aufnahmen oder Messungen von optischen Signalen aus dem Brennraum intensitätsmässig korrigiert werden. Bei einem brennraumbündig eingebauten, flachen Sondenfenster (Sondenvariante 1) kann die Russablagerung in Betriebspunkten mit hoher Partikelbildung (> 1.5 SZ) zu einer schnellen Transmissionsreduktion führen. Es bleibt jedoch mit über 900 Einspritzungen auch bei diesen Betriebspunkten genügend Zeit für Messungen mit optischen Messtechniken, da diese - einschliesslich einiger Stabilisierungszyklen zur Erreichung eines thermischen Gleichgewichts - nur ein paar Dutzend Einspritzungen benötigen. Mit einer besonderen Ausgestaltung der Sondenspitze (Sondenvarianten 2 und 3) tritt unter gewissen Motorbetriebsbedingungen ein vollständiger Russschichtabbrand ein. In diesen Betriebspunkten kann eine Russschichtbildung dauerhaft vermieden werden, wodurch die Messdauer nicht mehr eingeschränkt wird.

Für die Detektion der Tröpfchen eines Einspritzstrahls wurde eine neuartige laseroptische Messmethode entwickelt und eingesetzt. Dabei wurde der Beleuchtungspfad und der Detektionspfad erstmals bei einem zweidimensionalen Abbildungsverfahren parallel zueinander angeordnet. Dieser kolineare Aufbau erlaubt die Zusammenfassung der beiden Pfade in einer Sonde. Die Beleuchtung des Einspritzstrahls erfolgte mit einem Laserspecklesfeld, welches beim Austritt von Laserlicht aus einem Lichtwellenleiter entsteht. Dieses Laserspeckles-gestützte Detektionssystem zur Tröpfchengrössenbestimmung (LSDTB) wurde an verschiedenen Testobjekten und schliesslich am Motor erfolgreich eingesetzt.

Der Durchmesserbereich der erfassbaren Tröpfchen liegt bei einer Gesamtvergrößerung von 39.8 x zwischen 4 µm und 650 µm. Die Diagonale des Bildausschnitts der Aufnahmen beträgt 406 µm (Vergrößerung 39.8 x) beziehungsweise 784 µm (20.9 x). Die in den Zylinderkopf eingebaute optische Brennraumsonde bedingte keinerlei Einschränkungen des Motorbetriebs, denn die robust konstruierte Sonde und die verwendeten Lichtwellenleiter hielten den thermischen und mechanischen Belastungen bei allen Betriebsbedingungen problemlos stand.

Die Versuche am Einspritzstrahl im Motor zeigten, dass das entwickelte Detektionssystem funktioniert, und dass die aus diesen Messungen berechneten Tröpfchengrößen im Vergleich mit einem anderen Messverfahren (Phasendoppleranemometrie) plausibel sind. Im Betriebspunkt bei $n = 2000/\text{min}$, $p_{me} = 2 \text{ bar}$ und $p_R = 600 \text{ bar}$ ergab sich ein mittlerer Tröpfchendurchmesser von 6.2 µm und ein gemittelter Durchmesser nach Sauter (SMD) von 6.5 µm. In einer ersten qualitativen Gegenüberstellung der Tröpfchendurchmesser mit den NO_x -Emissionen konnte der direkte Einfluss der Tröpfchengröße auf die Stickoxidemissionen tendenziell nachgewiesen werden. Es wurde damit ein Messverfahren dargestellt, mit welchem erstmals - in der jetzigen Ausführung infolge einer ungenügenden Kameraauflösung zwar noch mit unbefriedigender Genauigkeit - die Tröpfchengrößenverteilung im Einspritzstrahl an einem praktisch unmodifizierten Vollmotor bestimmt werden konnte. Damit konnte eine wichtige Primärgröße für die Gemischaufbereitung und die Verbrennung in einem Dieselmotor während dem normalen Motorbetrieb gemessen werden.

Unter Verwendung einer neuen Kamera liesse sich die untere Tröpfchendetektionsgrenze von 4.0 µm auf $\approx 2.0 \text{ µm}$ absenken und mit einem neuartigen Lichtwellenleitertyp könnte der Einspritzstrahl mit 50-fach lichtstärkeren Laserpulsen beleuchtet werden. Mit diesen beiden Massnahmen würde die Aufnahmequalität und damit die Genauigkeit der Resultate markant gesteigert, so dass das LSDTB-Detektionssystem als ein quantitatives Tröpfchenmessverfahren eingesetzt werden könnte.

Diese Resultate könnten dann zur Validierung von Einspritzstrahl-Simulationsmodellen verwendet werden. Das so weiterentwickelte LSDTB-Detektionssystem könnte ausserdem zu kürzeren Parameteroptimierungen führen, da durch das verbesserte Verständnis des Strahlaufbruchs und der lokalen Tröpfchengrößenverteilung die Anzahl der möglichen Parameterkombinationen eingeschränkt werden könnten.

Abstract

The novel measurement techniques described in this work were developed for a faster parameter optimization of diesel engines as well as for the provision of validation data for simulations of the diesel engine injection spray and thereby are intended to contribute to a more efficient diesel engine with reduced emissions.

Modern electronically controlled diesel injection systems feature a high system control flexibility. However, the increased number of control parameters leads to longer parameter optimizations in stationary and dynamic engine operation. Common-Rail injection systems for direct injection (DI) diesel engines that allow for controlling the injector needle electrically can have more than six control parameters. Such numerous parameters cause very time-consuming and thus costly parameter optimizations since they still have to be carried out without exact knowledge of the mixing and combustion processes within the combustion chambers. Therefore all practical parameter combinations in every engine operation point have to be tested in order to find the best overall engine performance in terms of lowest emission values at acceptable fuel consumption. With the simulation models for the engine process and the emission formation currently available, the engine performance and fuel consumption can be computed with sufficient accuracy, but the computations of emissions are still rather inexact. Therefore, parameter optimization nowadays can neither be replaced nor shortened by simulations.

In diesel engines the injection spray propagation, the spray break-up, and the mixing and eventual evaporation of the fuel droplets are all important physical processes that directly or indirectly influence the formation of pollutant emissions (NO_x , particulates, CO, HC). The droplet size distribution and the volumetric droplet density (liquid fuel volume/control volume) can be considered as primary parameters that, together with the droplet evaporation rate, have a strong influence on the generation of NO_x -emissions. The determination of droplet size distributions in injection sprays within operating diesel engines is therefore very intriguing, since it could provide a more thorough understanding of conventionally measured data values and curves (fuel consumption and emissions). Correlations of droplet sizes with emission values allow for determining the influence of injection parameters (injection pressure, start and end of injection, EGR rate) on droplet sizes, their spatial distribution, and therefore the influence of droplet sizes on resulting emissions. Due to the better understanding of these processes, it can be better determined for example, to which values the main engine operation parameters have to be changed in order to achieve a maximum emissions reduction at unchanged fuel consumption.

In this work an optical access to the combustion chamber of a 4-cyl. prototype diesel engine was realized and a novel measurement system for the detection of droplets of an injection spray was developed. In order that this detection system could be used as a supporting tool with parameter optimizations, the cylinder head had to be modified only slightly and still be operational in the whole engine operation map. The optical access was designed as a probe for the glow plug bore. The only necessary modification was the enlargement of the glow plug bore to the thread core diameter.

Under normal engine operating conditions, the particle generation within the combustion chamber leads to a soot layer deposit on the chamber walls and therefore on the probe windows. With a unique and especially developed measurement technique, the resulting reduction of the optical transmission caused by such a soot layer can be determined during the engine operation. Due to that, the maximum measurement time can be determined until the probe window must be cleaned again. In addition, light measurement signals or images from the inside of combustion chamber can be corrected regarding their intensity values. With probes that have flat windows at their top (probe version 1), soot deposit formation can lead to a fast reduction of window transmission at operating points with high particulates generation (>1.5 BSN). However, for optical measuring techniques enough time remains even in such engine operating points (more than 900 injections), since the measurement time including a stabilization phase to reach a thermal equilibrium requires only a few dozen injections.

Owing to a special design of the probe tip (probe versions 2 and 3) a complete burn-off of the soot layer can take place at certain engine operation conditions. At these operation conditions soot deposit formation on the probe window is fully avoided and thus measurement time is unlimited.

For detection of the injection spray droplets a novel laseroptical measurement technique was developed, which incorporated for the first time the parallel alignment of the illumination and the detection path with a two-dimensional imaging technique. The co-linear setup allows the combination of these two paths within one probe. The illumination of the injection spray was made with a speckles field generated by laser light after its exit from a lightwave guide. The laser speckles-based imaging system for droplet sizing (LSIDS) was tested successfully with several test objects and eventually in a DI diesel engine. At a total magnification of 39.8 the diameter range of detectable droplets lies between $4\ \mu\text{m}$ and $650\ \mu\text{m}$. The image diameter is $406\ \mu\text{m}$ (magnification 39.8 x) and $784\ \mu\text{m}$ (20.9 x) respectively. The optical probe that was screwed into the glow plug bore of the corresponding cylinder posed no restrictions on engine operation whatsoever, since this robust probe and the lightwave guides that were used withstood the thermal and mechanical stresses at all operation conditions.

Experiments on injection sprays in a diesel engine proved the functionality of the developed detection system and showed that the determined droplet diameters are plausible in comparison with another measurement technique (Phase Doppler Anemometry). At the engine operating point of $n = 2000$ rpm, $bme_p = 1$ bar and $p_R = 600$ bar, the measurement and analysis yield a mean droplet diameter of $6.2 \mu\text{m}$ and a Sauter mean diameter (SMD) of $6.5 \mu\text{m}$. In a first qualitative comparison of droplet diameters with the corresponding NO_x -emissions, the direct qualitative influence of droplet size on the NO_x -emissions could be demonstrated. With that, a measurement technique was realized that, for the first time, allows for measuring the droplet size distribution of an injection spray and thus of an important primary parameter for mixture preparation and combustion in a practically unmodified prototype diesel engine under normal engine operation. In this first version, however, the measurement accuracy is not yet satisfactory due to the insufficient ICCD camera resolution.

Using an ICCD camera of the newest generation, the lower droplet detection limit could be reduced from $4.0 \mu\text{m}$ to $\approx 2.0 \mu\text{m}$, and a new type of lightwave guide would give the opportunity to illuminate the injection spray with up to 50 times more intense laser pulses. With these two measures the image quality, and therefore the accuracy of the results, would be raised significantly so that the LSIDS detection system could be used for quantitative droplet measurements.

The data could then be used for the validation of spray simulations. The LSIDS detection system could also become a useful additional tool in future parameter optimizations, since it helps to understand the spray break-up and the local droplet size distributions more thoroughly. Consequently the number of possible parameter combinations could be reduced.