



Experimentelle, numerische und motorische Charakterisierung
der 3000 bar Dieseleinspritzung

Johann A. Wloka



Johann A. Wloka

Experimentelle, numerische und motorische
Charakterisierung der 3000 bar Dieseleinspritzung

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen

**Experimentelle, numerische und motorische
Charakterisierung der 3000 bar
Diseleinspritzung**

Johann Anton Wloka

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen
Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr. -Ing.)
genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ. -Prof. Dr. -Ing. Karsten Stahl

Prüfer der Dissertation: 1. Univ. -Prof. Dr. -Ing. Georg Wachtmeister
2. Univ. -Prof. Dr. -Ing. Reinhold Kneer,
Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen

Die Dissertation wurde am 1.10.2015 bei der Technischen Universität München eingereicht
und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 11.04.2016 angenommen.

Kurzfassung

Das Einspritzsystem am Dieselmotor stellt bis heute die mit Abstand wichtigste Komponente dar, mit der man die Gemischbildung und somit das Emissionsverhalten des Motors beeinflussen kann. Die Entwicklung der Einspritzung ist über Jahrzehnte geprägt durch die ständige Steigerung der Einspritzdrücke. In Kombination mit Maßnahmen wie AGR und Hochaufladung bietet die Hochdruck-Einspritzung die Möglichkeit für den Dieselmotor niedrigste Emissionen zu erreichen. Um die zunehmend ambitionierten Verbrauchsziele erreichen zu können, werden beim Dieselmotor die Einspritzdrücke weiter gesteigert.

Momentane Einspritzsysteme für Dieselmotoren im PKW- und LKW-Bereich erreichen bereits Raildrücke von über 2000 bar. Eine weitere Steigerung auf 3000 bar Systemdruck wird intensiv diskutiert. In vielen Studien und Veröffentlichungen konnten positive Einflüsse auf die Gemischbildung, Verbrennung und Emissionsbildung hoher Einspritzdrücke nachgewiesen werden. Um weiterführende Zusammenhänge und Sensitivitäten hinsichtlich der Emissionsbildung, vor allem aber bezüglich der Partikelemissionen, bei so großen Einspritzdrücken durchführen zu können, kam ein modifiziertes Serien Einspritzsystem aus dem On-Road LKW Bereich zum Einsatz.

Die Untersuchung des Einflusses von 3000 bar Systemdruck auf die Spray- und somit Gemischbildung, als auch auf die Hydraulik und letztendlich auf das Motorverhalten wurde bei verschiedenen Düsengeometrien durchgeführt. Die Untersuchungen gliedern sich hierbei in theoretische und experimentelle auf.

In der numerischen CFD-Berechnung der Düseninnenströmung konnte der Einfluss von hohen Drücken auf die Strömungsführung und das Kavitationsverhalten in der Düse untersucht werden. Die experimentellen Untersuchungen teilen sich hierbei in drei wesentliche Einzeluntersuchungen der Injektorhydraulik, des Sprayverhaltens und des Einflusses auf den Motorbetrieb auf.

Die hydraulische Charakterisierung der einzelnen Düsen mit Hilfe eines Einspritzverlaufsindikators bietet im Zusammenspiel mit der optischen Analyse das Grundverständnis für das motorische Verhalten. Als Referenz wurde hierbei die Serien-Düse des Motors verwendet, um ausgehend davon das Potential der neu erstellten Düsengeometrien zu identifizieren. Die motorische Analyse schließt die Untersuchungen ab und zeigt das Potential zur Ruß- und NO_x -Senkung durch 3000 bar Einspritzdruck in Abhängigkeit der Düsengeometrie. Insbesondere auf die Anzahl der emittierten Partikel wurde hierbei der Fokus gelegt, da mit Einführung der EURO VI-Emissionsgesetzgebung, eine in Zukunft neu zu erfüllende Emissionsrestriktion hinzugefügt wurde.

Abstract

The injection system of a direct injecting Diesel engine is until today one of the most valuable components on an engine. With the injection system it gets possible to influence the mixture formation and subsequently the emissions of an engine. The development of fuel injection equipment is coined with the desire to increase the injection pressure. In combination with measures like EGR or high boost pressures it is possible to achieve lowest emission levels. To achieve the ambitious fuel consumption goals, the injection pressure is increased steadily.

Available injection systems for private and commercial vehicles reach to injection pressures up to approx. 2000 bar. An increase up to 3000 bar is heavily under discussion right now. Numerous studies and published investigations show a positive influence on mixture formation, combustion and emission behaviour in combination with high injection pressures. In order to identify further correlations and sensitivities regarding the emission formation, especially the particle emissions, at such high injection pressures a modified on-road serial injection system was used in this particular study.

The investigations on the influence of 3000 bar injection pressure on the spray- and mixture-formation, as well as on the hydraulics and in the end on the engine behaviour was carried out with several injection nozzle geometries. The investigations are divided in a numerical and an experimental part.

In CFD-Calculations of the nozzle-flow, the influence of such high rail pressures on the cavitation and the fluid-flow inside the nozzle was studied. The experimental investigations break down to basically three tests, the hydraulical characterization of the injector, the optical investigations of the spray pattern and the engine behaviour.

The hydraulical investigations were carried out at an injection rate analyzer and deliver in combination with the optical investigations a basic understanding for the engine behaviour. As a reference, the serial nozzle design was used, to identify the potential of adapted nozzles for 3000 bar injection pressure. The study finishes with investigations of the potential to reduce NO_x- and soot-emissions for high rail pressures and adapted nozzle-design. The focus here was the reduction of PN-emissions, due to the fact that with the new EURO VI-Emission legislative a new restriction was established which needs to be fulfilled from all engines in future.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	i
Kurzfassung	iii
Abstract	v
Schlagwörter/Keywords	vii
Nomenklatur	xiii
1. Einleitung	1
2. Aufgabenstellung	5
3. Stand der Technik	7
3.1. Gemischbildung, Zündung und Verbrennung beim direkteinspritzenden Dieselmotor	7
3.1.1. Zerstäubung und Gemischbildung	8
3.1.2. Zündung	20
3.1.3. Verbrennung	22
3.1.4. Emissionsbildung	24
3.2. Einspritzseitige Parameter und deren Einfluss auf Verbrennung und Emissionen	30
3.2.1. Düsenparameter	30
3.2.2. Einspritzdruck	36
4. Experimenteller Aufbau	39
4.1. Aufbau des Einspritzverlaufsindikators	39
4.2. Aufbau des optischen Strahlprüfstandes	41
4.3. Einzylinder Forschungsmotor	44
4.3.1. Kraftstoffsystem am Einzylinder-Forschungsmotor	47
4.4. Versuchsdüsen	47
4.5. Optische Messtechnik	50
4.5.1. Automatische Auswertung der optischen Vermessung	53
5. Ergebnisse der numerischen Simulation der Düseninnenströmung	57
5.1. Grundlagen der Düseninnenströmungssimulation	57
5.2. Randbedingungen der durchgeführten Düseninnenströmungssimulationen	59
5.2.1. Vernetzung	59

5.2.2. Randbedingungen	60
5.3. Ergebnisse der Düseninnenströmung	61
5.3.1. Kavitationsentstehung beim Nadelöffnen und -schließen	61
5.3.2. Einfluss des Raildruckes auf das Kavitationsverhalten	68
5.3.3. Düsenspezifischer Einfluss auf die Turbulenz der Düseninnenströmung	72
5.3.4. Einfluss des Einspritzdruckes auf die Turbulenz der Düseninnenströmung	76
5.4. Fazit und Zusammenfassung des Einflusses von 3000 bar auf die Düseninnenströmung	77
6. Diskussion der experimentellen Ergebnisse	81
6.1. Kennwerte bei der experimentellen hydraulischen Analyse	81
6.1.1. Ergebnisse der hydraulischen Analyse	83
6.1.2. Einspritzverlaufsmessungen	94
6.1.3. Zwischenfazit und Einfluss von 3000 bar Systemdruck auf das hydraulische Verhalten	104
6.2. Diskussion der optischen Analyse	107
6.2.1. Ergebnisse der makroskopischen Untersuchungen	107
6.2.2. Zwischenfazit und Einfluss von 3000 bar Systemdruck auf makroskopische Strahleigenschaften	123
6.2.3. Ergebnisse der mikroskopischen Untersuchungen	124
6.2.4. Zwischenfazit und Einfluss von 3000 bar Systemdruck auf das mikroskopische Strahlverhalten	136
6.3. Zusammenhang mit Motorprüfstandsergebnissen	138
6.3.1. Zusammenfassung der früherer Untersuchungen	138
6.3.2. Randbedingungen der Motoruntersuchungen	138
6.3.3. Untersuchungen am Niedriglastpunkt	139
6.3.4. Untersuchungen am mittleren Teillastpunkt	142
6.3.5. Untersuchungen an der motorischen Vollast	146
6.3.6. Abschließende Bewertung von 3000 bar Systemdruck auf das motorische Verhalten	150
7. Zusammenfassung und Ausblick	153
7.1. Zusammenfassung	153
7.2. Ausblick	155
Literaturverzeichnis	157
Abbildungsverzeichnis	169
Tabellenverzeichnis	177
Anhang	178
Anhang A. Erklärung überhöhter Durchflusskoeffizienten	179

Anhang B. Abschätzung der Temperaturerhöhung der Absteuermenge	181
Anhang C. Bildsequenzen der Nahaufnahmen von Düse 5 und Düse 8	183
Anhang D. Eigene Veröffentlichungen	191
Anhang E. Betreute studentische Arbeiten	193
E.1. Diplom- bzw. Masterarbeiten	193
E.2. Semester- bzw. Bachelorarbeiten	194
Anhang F. Lebenslauf	197

Herausgegeben von:
Prof. Dr.-Ing. Georg Wachtmeister
LVK - Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen
Technische Universität München

Zugleich:
Dissertation, München, Technische Universität München, 2016

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben - auch bei nur auszugsweiser Verwendung - vorbehalten.

Die Informationen in diesem Buch wurden mit großer Sorgfalt erarbeitet. Dennoch können Fehler nicht völlig ausgeschlossen werden. Verlag und Autor übernehmen keine juristische Verantwortung oder irgendeine Haftung für eventuell verbliebene fehlerhafte Angaben und deren Folgen.

Layout und Satz: Johann A. Wloka
Copyright © Johann A. Wloka 2016
ISBN: 978-3-943813-17-3
1. Auflage