



Phänomenologisch, empirisches Modell zur Vorausberechnung  
der charakteristischen Kenngrößen eines Dieselsprays

Florian Schwarzmüller



Florian Schwarzmüller

## Phänomenologisch, empirisches Modell zur Vorausberechnung der charakteristischen Kenngrößen eines Dieselsprays

# **Technische Universität München**

Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen

## **Phänomenologisch, empirisches Modell zur Vorausberechnung der charakteristischen Kenngrößen eines Dieselsprays**

Dipl.-Ing. Univ.

Florian Schwarzmüller

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: Prof. Dr.-Ing. Veit Senner

Prüfer der Dissertation: 1. Prof. Dr.-Ing. Georg Wachtmeister

2. Prof. Dr. Friedrich Dinkelacker

Die Dissertation wurde am 08.05.2018 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 24.10.2018 angenommen.

## Kurzfassung

Der Dieselmotor hat eine bedeutende Rolle in der Gesellschaft. Neben dem breiten Einsatz in Nutzfahrzeugen und Stationärmotoren hat in den letzten Jahrzehnten seine Bedeutung für den Individualverkehr zugenommen. Dazu trug eine kontinuierliche Entwicklung der Motoren bei. Die Einspritzung ist dabei als ein wesentliches Element zur Optimierung der Verbrennung und Reduzierung der Emissionen der dieselmotorischen Verbrennung anzusehen. Zusätzlich führen hohe Anforderungen, durch Steigerung der spezifischen Leistung bei gleichzeitiger Senkung der Kohlenstoffdioxid- und Schadstoffemissionen, zu einer Erhöhung der Komplexität des Entwicklungsprozesses. Unter anderem sind dynamische Vorgänge während der Einspritzung bereits in frühen Entwicklungsphasen genauer zu beleuchten, da ihr Einfluss auf Spray und Gemischbildung nicht mehr zu vernachlässigen ist. Dem Einsatz virtueller Werkzeuge kommt mehr Bedeutung zur Beherrschung dieser Komplexität zu. Vorteile bieten prädikative Werkzeuge, die bereits in der frühen Phase einer Entwicklung anwendbar sind.

Die Erstellung eines solchen Modells erfordert zunächst gutes Systemverständnis. Im Falle der Einspritzung, des Sprays und der Gemischbildung beinhaltet dies Kenntnis über die Einflüsse auf die Strömung in der Düse sowie die Wechselwirkungen zwischen Kraftstoff und umgebender Gasphase. Entscheidend ist demnach eine ganzheitliche Betrachtung der Einspritzung. Die vorliegende Arbeit beinhaltet die Beleuchtung der Einspritzung mittels Simulation und Versuch. Beide Aspekte unterstützen sich und vertiefen dadurch das Verständnis. Dabei dienen die Versuche einerseits zur Generierung einer umfangreichen Datenbasis, andererseits zur Erzeugung von Randbedingungen und zur Validierung der Simulationsmethoden.

Die Versuche beinhalten Messungen der Einspritzrate an einem Einspritzverlaufsindikator sowie des Nadelhubs zur Charakterisierung des Injektorverhaltens und zum Abgleich eines Injektormodells, zudem optische Messungen des Sprays zur Bestimmung der Eindringtiefe und der Spraykegelwinkel im Nah- und Fernbereich der Düse. Verschiedene Simulationen bilden die gemessenen Größen und Abläufe numerisch ab. Dazu bildet ein Hydraulikmodell des Injektors die Basis zur Erstellung der Randbedingungen für die CFD-Simulationen der Düseninnenströmung und des Sprays. Aus den Simulationen resultieren Erkenntnisse zur Strömung im Inneren der Düse. Aus diesen ist ein phänomenologischer Ansatz zur Beschreibung der Einströmung ins Spritzloch abgeleitet.

Die Umsetzung und Integration dieses phänomenologischen Ansatzes ermöglicht bereits in der frühen Entwicklungsphase, in Kombination mit angepassten und erweiterten Modellen zur Berechnung der Düsendurchströmung und Ausbildung des Sprays, die Berechnung charakteristischer Spraygrößen unter Berücksichtigung dynamischer Vorgänge mittels eines einfachen Berechnungswerkzeuges. Als großen Vorteil erfordert das erarbeitete Modell dazu ausschließlich die in dieser Entwicklungsphase bereits bekannte geometrische Beschreibung der Düse, dazu in zeitlich aufgelöster Form den Druck vor dem Nadelsitz, den Nadelhub sowie Druck und Dichte des Mediums in das der Kraftstoff eindringt.

## Summary

Diesel engines play a significant role in society. In addition to the use for commercial vehicles and stationary engines, its significance for individual traffic increased in recent decades. A continuous development of the engines contributes this trend. One significant point of this continuous development is the injection as an essential element which allows optimizing the combustion process and reducing the emissions of diesel engines. In addition, high requirements through increasing specific load while, in parallel, lowering the allowed amount of carbon dioxide and pollutant emissions, comes along with an extended complexity of the development process. Amongst other things, one have to look detailed at dynamic effects during injection, because their influence to spray and mixture generation is no longer negligible in the early design phase. So the use of virtual instruments gets more important to control the complexity. Predictive tools offer huge advantages, if they are used in the early period of development process.

The development of such a tool depends on a good understanding of the system. In case of injection, spray and mixture formation, this includes knowledge of the influence on the nozzle flow, as well as the interactions between fuel and the surrounding gas phase. A holistic approach is therefore essential to the injection modelling. This thesis includes the study of the injection process with experiments and simulations. Aspects of both support and deepen the understanding of the injection process. On the one hand experiments generate a comprehensive data base, on the other hand they support the production of boundary conditions, and lead to the validation data needed for the simulations.

The tests include measurements of injection rate, as well as the needle lift in order to describe the hydraulic characteristic of the injector. This information is used to validate an injector model for the simulations which has been built up in a 1D work frame. Further tests contain optical measurements of the spray to determine the penetration behaviour and the spray angles next and faraway to the nozzle. Different kinds of simulation reconstruct the measured quantities and processes. A prerequisite for such simulation is a one dimensional hydraulic model of the injector which sets up the basis for the boundary conditions of the three dimensional CFD simulations of nozzle flow and the spray process. Findings on the flow inside the nozzle resulted from these simulations. Together with the experiments a phenomenological approach is derived to describe the flow from sack hole to nozzle hole, which is not available in other simulation tools so far.

In an early design phase this phenomenological approach enables the calculation of the characteristic spray sizes. It is taking into account dynamic operations using a simple calculation tool in combination with customized and advanced models to calculate the nozzle flow and the spray formation. As great advantage the model requires as user input parameter only in this design phase known geometric description of the nozzle, as well as the time resolved pressure before needle seat, needle lift and pressure and density of the gas atmosphere.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Stand der Technik .....</b>	<b>3</b>
2.1	Common-Rail Systeme undnockengesteuerte Einspritzsysteme .....	4
2.2	Theoretische Grundlagen der dieselmotorischen Einspritzung .....	12
2.3	Berechnungsansätze für die dieselmotorische Einspritzung .....	20
<b>3</b>	<b>Aufgabenstellung und Vorgehen .....</b>	<b>38</b>
3.1	Numerisches Screening zur Auswahl der Versuchsdüsen .....	40
<b>4</b>	<b>Experimentelle Charakterisierung der Düseneigenschaften .....</b>	<b>51</b>
4.1	Aufbau des Prüffeldes .....	51
4.2	Hydraulische Charakterisierung .....	58
4.3	Optische Charakterisierung .....	64
<b>5</b>	<b>Simulation der Strömung in der Düse und des Sprays .....</b>	<b>70</b>
5.1	Simulation der Hydraulik .....	70
5.2	CFD Simulation der Düseninnenströmung .....	76
5.3	CFD Simulation des Sprays .....	94
5.4	Phänomenologie zur Einströmung ins Spritzloch .....	95
<b>6</b>	<b>Modellerstellung und Validierung .....</b>	<b>97</b>
6.1	Modellierung und Validierung der Düseninnenströmung .....	97
6.2	Modellierung und Validierung des Sprays .....	113
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>124</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>128</b>
	<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>130</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>131</b>
	<b>Eigene Veröffentlichungen .....</b>	<b>140</b>
	<b>Betreute studentische Arbeiten .....</b>	<b>142</b>
	<b>Lebenslauf .....</b>	<b>143</b>

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

Zugleich:  
Dissertation, München, Technische Universität München, 2018

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: Florian Schwarzmüller  
Copyright © Florian Schwarzmüller 2018  
ISBN: 978-3-943813-26-5  
1. Auflage