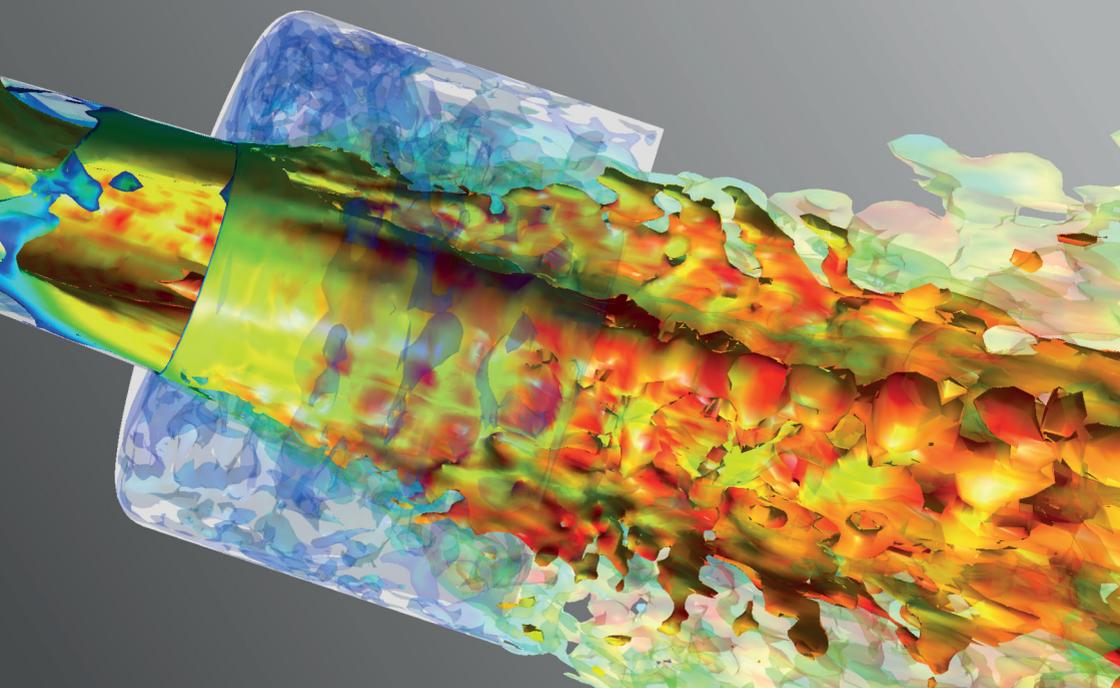


Geometrieoptimierung von Benzin- Hochdruck-Einspritzventilen mit Hilfe numerischer Strömungsmechanik und genetischer Algorithmen

Robin Hellmann



Geometrieoptimierung von
Benzin-Hochdruck-Einspritzventilen mit Hilfe numerischer
Strömungsmechanik und genetischer Algorithmen

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktoringenieur
(Dr.-Ing.)**

von M. Sc. Robin Hellmann
geb. am 08. April 1990 in Bietigheim-Bissingen

genehmigt durch die Fakultät für Verfahrens- und Systemtechnik
der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Promotionskommission: Prof. Dr.-Ing. Frank Beyrau
Prof. Dr.-Ing. Dominique Thévenin
Prof. Dr.-Ing. Hermann Rottengruber
Dr.-Ing. Wolfgang Samenfink

eingereicht am: 05. Mai 2020

Promotionskolloquium am: 09. November 2020

Berichte aus der Strömungstechnik

Robin Hellmann

**Geometrieoptimierung von Benzin-Hochdruck-
Einspritzventilen mit Hilfe numerischer Strömungs-
mechanik und genetischer Algorithmen**

Shaker Verlag
Düren 2021

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Magdeburg, Univ., Diss., 2020

Copyright Shaker Verlag 2021

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7816-9

ISSN 0945-2230

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Danksagung

Die vorliegende Arbeit ist im Rahmen meiner Anstellung bei der Robert Bosch GmbH im Geschäftsbereich Powertrain Solutions (PS) in Schwieberdingen, in Kooperation mit dem Institut für Strömungstechnik und Thermodynamik (ISUT) der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg entstanden.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Dominique Thévenin, für seine ausgezeichnete fachliche Unterstützung inklusive wertvoller Diskussionen. Neben der wissenschaftlichen Betreuung will ich insbesondere seine persönliche Wertschätzung und das mir entgegengebrachte Vertrauen hervorheben. Herrn Prof. Dr.-Ing. Hermann Rottengruber und Herrn Dr.-Ing. Wolfgang Samenfink danke ich für ihr Interesse an meiner Arbeit und die freundliche Übernahme der Korreferate, mit der damit verbundenen Durchsicht dieser Promotionsschrift. Ebenso danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Frank Beyrau für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Mein herzlicher Dank gilt Herrn Dr.-Ing. Paul Jochmann für die industrielle Betreuung der Arbeit, unzählige fachliche Diskussionen und Anregungen. Ausdrücklich will ich für die von ihm erhaltene Inspiration, moralische Unterstützung und seine Fähigkeit auf nahezu jede Situation vorbereitet zu sein sehr danken. Des Weiteren gilt mein Dank Herrn Dr.-Ing. Philippe Leick für die Bereitstellung der experimentellen Untersuchungen an der Spraykammer und Herrn Matthias Lausch für die Einführung in die Simulationseinstellungen des Ventilsitzes. Herrn Dr.-Ing. Karl Georg Stapf und Herrn Dr.-Ing. Erik Schünemann danke ich neben der fachlichen Unterstützung ganz herzlich, dass Sie mir stets den Rücken freigehalten haben. Gleichermäßen danke ich allen Kollegen der Abteilung PS/EPG für ihre Unterstützung und die hervorragende Arbeitsatmosphäre.

Ein weiterer Dank gilt den Kollegen des Lehrstuhls für Strömungsmechanik und Strömungstechnik, die mich bei meinen Aufenthalten in Magdeburg herzlich aufgenommen und mir bei allen Arten an Problemen geholfen haben. Hierbei will ich Herrn Priv.-Doz. Dr.-Ing. Gabor Janiga und Herrn Dr.-Ing. László Daróczy für ihre fachliche Unterstützung im Bereich Numerik und Optimierung hervorheben.

Zuletzt gilt mein ganz besonderer Dank meiner Frau Charis und meiner Familie für ihr Verständnis und die stetige Unterstützung während meiner Promotion.

Kurzfassung

Um eine hohe Effizienz und Leistung zu erzielen, verwendet der überwiegende Teil der aktuell entwickelten Otto-Motoren die Benzin-Direkteinspritzung. Dabei stellen die Hochdruck-Einspritzventile eine Schlüsselkomponente des Brennverfahrens dar, wobei die Ventilsitzgeometrie maßgeblich das Kraftstoffspray bestimmt. Für ein optimales Brennverfahren ist deshalb ein motorspezifisch gestalteter Ventilsitz notwendig, d.h. für jeden Motor muss entsprechend der Vorgaben eine optimale Ventilsitzgeometrie gefunden werden. Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, einen numerischen und automatisierten Ansatz zur Optimierung der Ventilsitzgeometrie zu entwickeln, zu bewerten und einzusetzen.

Zuerst werden die Optimierungsziele beschrieben und ein Optimierungsproblem mathematisch formuliert. Dieses definiert sich aus den konkurrierenden Zielgrößen einer minimalen Penetration und einem minimalen Strahlkegelwinkel bei gleichbleibendem Massenstrom und Strahlrichtung des Kraftstoffes.

Ein vollständig automatisierter CFD-Simulationslauf einschließlich einer effizienten Evaluierung ist eine wesentliche Voraussetzung für die genetische Optimierung und wird im Rahmen der Arbeit entwickelt. Hierbei stellt sich die Kopplung der Innenströmung mit einer Simulation des Kraftstoffsprays als bedeutend und zielführend heraus. Die Validierung des entwickelten Ansatzes erfolgt mittels skalenaufgelösten Berechnungsverfahren und Hochgeschwindigkeits-Sprayvisualisierungen und zeigt für die untersuchten Spraycharakteristika eine gute Übereinstimmung.

Im Rahmen einer statistischen Versuchsplanung werden Wirkzusammenhänge zwischen Geometrie- und Strömungsgrößen aufgezeigt und darauf aufbauend Metamodelle erstellt. Des Weiteren erlaubt die hohe Güte der Modelle deren Einsatz innerhalb einer Optimierung, wodurch sich eine ausgeprägte Pareto-Front mit verbesserten Ventilsitzgeometrien ergibt. Die genetische Optimierung unter direktem Einsatz des gekoppelten Simulationsablaufes identifiziert noch weiter verbesserte Ventilsitze.

Abschließend werden vier Hochdruckinjektoren mit Hilfe der in der Arbeit entwickelten Metamodelle in den fertigen Raum überführt und hergestellt. Sowohl die CFD-Berechnung als auch die Sprayvisualisierung der gefertigten Muster zeigen, dass die in der Optimierung gefundenen Unterschiede des Strahlkegelwinkels und der Penetration erhalten bleiben, sich aber aufgrund von Fertigungsvorgaben und Fertigungstoleranzen abschwächen.

Abstract

In order to achieve high efficiency and performance, the majority of the currently developed Otto engines use gasoline direct injection. The high-pressure injectors are a key component of the combustion process, as the valve seat geometry determines the fuel spray significantly. An optimal combustion process requires an engine-specific valve seat, i.e. an optimal valve seat geometry must be found, according to the specifications, for each engine. The aim of this work is to develop, evaluate and use a numerical and automated workflow to optimize the valve seat geometry.

First, the optimization goals are described and an optimization problem is formulated mathematically. This is defined by the competing objectives of a minimum penetration and a minimum spray plume cone angle for a constant fuel mass flow and spray plume direction.

A fully automated CFD simulation process including an efficient evaluation is an essential prerequisite for a genetic optimization and is developed as part of the work. Coupling the internal nozzle flow with a spray simulation turns out to be important and effective. The developed approach is validated using scale-resolved calculation methods and high-speed spray visualizations and shows a good agreement for the investigated spray characteristics.

Interdependencies between design and flow variables are shown by means of design of experiments and approximation models are built. Furthermore, the high quality of the models allows them to be used within an optimization, which results in a distinctive Pareto front containing improved valve seat geometries. Genetic optimization using the coupled simulation process identifies even better valve seats.

Finally, four high-pressure injectors are transferred to the fabricable space using the metamodels developed in the present work. Both the CFD calculation and the spray visualization of the manufactured samples show that the differences found in the optimization of the spray plume cone angle and the penetration are retained, but weakened due to manufacturing specifications and manufacturing tolerances.

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen, Abkürzungen und Indizes	v
1 Einleitung	1
1.1 Benzin-Direkt-Einspritzung	2
1.2 Zielsetzung der Arbeit	4
2 Grundlagen	7
2.1 Numerische Strömungsmechanik	7
2.1.1 Grundgleichungen	8
2.1.2 Statistische Ansätze zur Turbulenzmodellierung	9
2.1.3 Grobstruktur-Simulation	12
2.1.4 Hybride Ansätze zur Turbulenzmodellierung	14
2.1.5 Numerische Integration	15
2.2 Zweiphasenströmungen	16
2.2.1 Klassifizierung von Zweiphasenströmungen	17
2.2.2 Flüssigkeitszerstäubung	18
2.2.3 Modellierung der Innenströmung	21
2.2.4 Modellierung des Kraftstoffsprays	22
2.3 Statistische Versuchsplanung	25
2.3.1 Auswahl und Analyse der Testfelder	26
2.3.2 Ersatzmodelle	27
2.3.3 Ersatzmodelle für Geometrieoptimierungen	30
2.4 Optimierung im Zusammenhang technischer Fragestellungen	30
2.4.1 Definition eines Optimierungsproblems	31
2.4.2 Genetische Algorithmen	33
2.4.3 CFD-Optimierung mit OPAL++	35
3 Ausarbeitung des Optimierungsproblems	41
3.1 Funktionalität des Ventilsitzes	41
3.2 Formulierung des Optimierungsproblems	42
3.2.1 Zielfunktionen	43

3.2.2	Einschränkungen	43
3.2.3	Suchraum	45
3.3	Theoretische Betrachtung des Optimierungsproblems	47
4	Entwicklung und Validierung der Simulationsmethode	49
4.1	Untersuchte Kenngrößen des Ventilsitzes	49
4.1.1	Untersuchte Zweiloch-Injektoren	51
4.1.2	Spraykammermessungen	51
4.2	Simulation der Innenströmung	54
4.2.1	Diskretisierung	54
4.2.2	Simulationseinstellungen	56
4.2.3	Überprüfung der hybriden Stress-Blended Eddy Simulation (SBES)-Turbulenzmodellierung	60
4.2.4	Ergebnisse der Turbulenzstudie	62
4.2.5	Abgleich mit Messdaten	67
4.3	Simulation des Sprays	69
4.3.1	Rechengebiet und Diskretisierung	70
4.3.2	Simulationseinstellungen	70
4.3.3	Abgleich zwischen Spray und Schattenlicht-Aufnahmen ...	71
4.4	Zwischenfazit	73
5	Entwicklung des Simulationsprozesses zur Optimierung	75
5.1	Innenströmung	75
5.1.1	Rechengebiet	76
5.1.2	Diskretisierung	77
5.1.3	Ablauf der Simulation	79
5.1.4	Zusammenfassung des Ablaufs der Innenströmungssimulation	85
5.2	Kraftstoffspray	87
5.2.1	Simulationsgebiet und Diskretisierung	88
5.2.2	Zusammenfassung des Ablaufs der Spraysimulation	89
5.3	Überblick des gesamten Simulationsprozesses	91
5.3.1	Eignung des Simulationsablaufes für genetische Algorithmen	91
6	Statistische Versuchsplanung, Ersatzmodelle und deren Anwendungen	95
6.1	Statistische Versuchsplanung	95
6.1.1	Verteilung der Geometrievektoren	95
6.1.2	Simulation des Testfeldes	96
6.1.3	Korrelationen und Wirkzusammenhänge	99
6.2	Metamodelle / Ersatzmodelle	101
6.2.1	Arten und Konditionierung der Modelle	102
6.2.2	Überprüfung der Vorhersagegüte	104
6.2.3	Auswahl der Ersatzmodelle	106
6.3	Anwendung und Bewertung	108

6.3.1	Erforschung des Parameterraums	109
6.3.2	Zusammenfassende Bewertung	112
7	Optimierung	115
7.1	Initialisierung	115
7.1.1	Initiale Population für die Metamodell-Optimierung	116
7.1.2	Initiale Population für die CFD-Optimierung	117
7.2	Durchführung der Optimierung	119
7.2.1	Meta-Optimierung	120
7.2.2	CFD-Optimierung	124
7.3	Vergleich Metamodell-Optimierung mit CFD-Optimierung	128
7.3.1	Pareto-Fronten und deren Geometrievektoren	128
7.3.2	Auslegungskriterien	130
7.3.3	Strömung ausgewählter, optimierter Geometrien	132
8	Anwendung	139
8.1	Ableitung fertiger Geometrien	139
8.1.1	Überführung in einen diskreten, fertigen Parameterraum	139
8.1.2	Realisierung	143
8.2	Verifizierung mit Spraykammermessungen	143
8.2.1	Massenstrom und Targeting Radius	146
8.2.2	Strahlkegelwinkel und Penetration	147
8.3	Abschließende Bewertung	149
9	Fazit und Ausblick	153
	Literaturverzeichnis	155
	Liste der Veröffentlichungen über Teilgebiete der Dissertation	165