

Wissenschaftliche Reihe Fahrzeugtechnik
Universität Stuttgart

RESEARCH

Fabian Köpple

Untersuchung der Potentiale der numerischen Strömungs- berechnung zur Prognose der Partikelemissionen in Ottomotoren mit Direkteinspritzung



 Springer Vieweg

The Springer Vieweg logo features a stylized chess knight (horse) facing left, positioned above the text 'Springer Vieweg'.

Wissenschaftliche Reihe Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart

Herausgegeben von

M. Bargende, Stuttgart, Deutschland

H.-C. Reuss, Stuttgart, Deutschland

J. Wiedemann, Stuttgart, Deutschland

Das Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen (IVK) an der Universität Stuttgart erforscht, entwickelt, appliziert und erprobt, in enger Zusammenarbeit mit der Industrie, Elemente bzw. Technologien aus dem Bereich moderner Fahrzeugkonzepte. Das Institut gliedert sich in die drei Bereiche Kraftfahrwesen, Fahrzeugantriebe und Kraftfahrzeug-Mechatronik. Aufgabe dieser Bereiche ist die Ausarbeitung des Themengebietes im Prüfstandsbetrieb, in Theorie und Simulation. Schwerpunkte des Kraftfahrwesens sind hierbei die Aerodynamik, Akustik (NVH), Fahrodynamik und Fahrermodellierung, Leichtbau, Sicherheit, Kraftübertragung sowie Energie und Thermomanagement – auch in Verbindung mit hybriden und batterieelektrischen Fahrzeugkonzepten.

Der Bereich Fahrzeugantriebe widmet sich den Themen Brennverfahrensentwicklung einschließlich Regelungs- und Steuerungskonzeptionen bei zugleich minimierten Emissionen, komplexe Abgasnachbehandlung, Aufladesysteme und -strategien, Hybridsysteme und Betriebsstrategien sowie mechanisch-akustischen Fragestellungen.

Themen der Kraftfahrzeug-Mechatronik sind die Antriebsstrangregelung/Hybride, Elektromobilität, Bordnetz und Energiemanagement, Funktions- und Softwareentwicklung sowie Test und Diagnose.

Die Erfüllung dieser Aufgaben wird prüfstandsseitig neben vielem anderen unterstützt durch 19 Motorenprüfstände, zwei Rollenprüfstände, einen 1:1-Fahrsimulator, einen Antriebsstrangprüfstand, einen Thermowindkanal sowie einen 1:1-Aeroakustikwindkanal.

Die wissenschaftliche Reihe „Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart“ präsentiert über die am Institut entstandenen Promotionen die hervorragenden Arbeitsergebnisse der Forschungstätigkeiten am IVK.

Herausgegeben von

Prof. Dr.-Ing. Michael Bargende
Lehrstuhl Fahrzeugantriebe,
Institut für Verbrennungsmotoren und
Kraftfahrwesen, Universität Stuttgart
Stuttgart, Deutschland

Prof. Dr.-Ing. Jochen Wiedemann
Lehrstuhl Kraftfahrwesen,
Institut für Verbrennungsmotoren und
Kraftfahrwesen, Universität Stuttgart
Stuttgart, Deutschland

Prof. Dr.-Ing. Hans-Christian Reuss
Lehrstuhl Kraftfahrzeugmechatronik,
Institut für Verbrennungsmotoren und
Kraftfahrwesen, Universität Stuttgart
Stuttgart, Deutschland

Fabian Köpple

Untersuchung
der Potentiale
der numerischen
Strömungsberechnung
zur Prognose der
Partikelemissionen
in Ottomotoren mit
Direkteinspritzung

Fabian Köpple
Stuttgart, Deutschland

Dissertation Universität Stuttgart, 2015

D93

Wissenschaftliche Reihe Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart
ISBN 978-3-658-11137-3 ISBN 978-3-658-11138-0 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-658-11138-0

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

Springer Vieweg

© Springer Fachmedien Wiesbaden 2015

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Fachmedien Wiesbaden ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media (www.springer.com)

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Mitarbeiter der Robert Bosch GmbH im Geschäftsbereich Gasoline Systems in Schwieberdingen in der Abteilung „Ottomotorische Brennverfahrensentwicklung (GS/ECS)“, in Zusammenarbeit mit dem Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen (IVK) der Universität Stuttgart.

Mein besonders herzlicher Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Bargende für die Betreuung der Arbeit, für sein reges Interesse, für die vielen wertvollen Anregungen und Ratschläge sowie für das entgegengebrachte Vertrauen.

Ebenso bedanke ich mich herzlich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Zoran Filipi für sein großes Interesse an dieser Arbeit und die bereitwillige Übernahme des Korreferats.

Ferner danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Arnold Kistner für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

In besonderem Maße möchte ich mich bei Herrn Dr.-Ing. Paul Jochmann für die Betreuung der Arbeit, für die vielen fachlichen Diskussionen und die ab und an notwendige moralische Unterstützung bedanken. Des Weiteren gilt mein Dank allen Kollegen der Abteilung GS/ECS für die fachliche Unterstützung, die wertvollen Anregungen und die angenehme Zusammenarbeit, insbesondere Herrn Dr.-Ing. Andreas Kufferath für die Möglichkeit zur Durchführung der Arbeit. Ebenso danke ich Herrn Dr.-Ing. André Kulzer und Herrn Dr.-Ing. Alexander Hettinger für die vielfältige Unterstützung. Ein besonderer Dank gilt Herrn Dipl.-Ing. Claus Wundling für seine sehr wertvolle Unterstützung in allen messtechnischen Fragen.

Darüber hinaus gilt ein besonderer Dank meinen Eltern sowie meiner Freundin für ihr Verständnis, die Geduld und die intensive Unterstützung, die für das Gelingen dieser Arbeit entscheidend war.

Fabian Köpple

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen, Abkürzungen und Indizes	XI
1 Einleitung und Zielsetzung	1
2 Grundlagen zur Berechnung turbulenter, reaktiver Mehrphasenströmungen	5
2.1 Ansätze zur Modellierung der vorliegenden Strömungsphänomene	5
2.2 Gasphase	6
2.2.1 Grundgleichungen der Strömungsmechanik	6
2.2.2 Turbulenzmodellierung	8
2.2.3 Numerisches Lösungsverfahren	10
2.3 Flüssigphase	11
2.3.1 Modellierung der Zweiphasenströmungen	11
2.3.2 Kavitationsmodellierung	13
2.4 Modellierung der Einspritzung und Gemischbildung	14
2.4.1 Modellierung der Strahl- und Tropfenzerfallsprozesse	15
2.4.2 Modellierung der Tropfenbewegung	19
2.4.3 Modellierung der Tropfenverdunstung	20
2.4.4 Kopplung von Injektorinnenströmung und Gemischbildung	23
2.5 Modellierung der Spray-Wand-Interaktion	26
2.5.1 Spray-Wand-Interaktionsmodell nach Kuhnke	28
2.5.2 Modellierung des Wärmeübergangs beim Tropfen-Wand-Kontakt	31
2.5.3 Modellierung des Wandfilms	35

2.5.4	Modellierung der thermischen Wandeigenschaften	39
2.6	Beschreibung der ottomotorischen Verbrennung	40
2.6.1	Einteilung der motorischen Verbrennungsregime	41
2.6.2	Theorie der Flammenflächenmodelle	43
2.6.3	Extended Coherent Flame Model (ECFM)	44
2.6.4	Alternative Ansätze zur Modellierung der Verbrennung	46
2.7	Modellierung der Rußemissionen	49
2.7.1	Modellierung der Rußentstehung und Rußoxidation	51
3	Experimentelle Untersuchungen	53
3.1	Spraykammermessungen	53
3.2	Grundsatzuntersuchungen zur Spray-Wand-Interaktion	55
3.2.1	Fluoreszenz-basierte Untersuchungen	55
3.2.2	Infrarotthermographische Untersuchungen	56
3.3	Motorische Untersuchungen	59
3.3.1	Versuchsträger	59
3.3.2	Oberflächentemperaturmesstechnik	60
3.3.3	Oberflächentemperaturmethode	63
3.3.4	Ergebnisse der Oberflächentemperaturmessungen	67
4	Untersuchungen zur Spraymodellierung	89
4.1	Vorgehensweise und Randbedingungen	89
4.2	Einfluss der Injektorinnenströmung	92
4.3	Ergebnisse des Sprayabgleichs	95
5	Untersuchungen zur Spray-Wand-Interaktionsmodellierung	99
5.1	Methodische Vorgehensweise	99
5.2	Validierung der Wandfilmdynamik	101
5.3	Validierung der Wandtemperaturabsenkung	105
5.4	Einflussparameter auf die Spray-Wand-Interaktion	108

5.4.1	Kraftstoffzusammensetzung	108
5.4.2	Injektorinnenströmung	112
5.4.3	Wandtemperatur	113
6	Validierung der gesamten Modellkette unter motorischen Randbedingungen	115
6.1	Methodische Vorgehensweise und Randbedingungen	115
6.2	Druck- und Brennverläufe	118
6.3	Oberflächentemperaturverläufe	123
6.4	Korrelation zwischen Gemischbildung und Rußemissionen	129
6.5	Rußmodellierung	134
7	Ausblick	137
	Literaturverzeichnis	139

Formelzeichen, Abkürzungen und Indizes

Formelzeichen

Zeichen	Bedeutung	Einheit
A	Fläche	[m ²]
a	Temperaturleitfähigkeit	[m ² /s]
α	Spraykegelwinkel	[°]
α	Wärmeübergangskoeffizient	[W/(m ² K)]
α, β	Modellkonstanten des ECFM-Modells	[-]
b	Reaktionsregressvariable des Flammenfaltungsmodells	[-]
b	Wärmeeindringkoeffizient	[Ws ^{0.5} /(m ² K)]
B_T	Wärmetransferzahl	[-]
B_Y	Massentransferzahl	[-]
C_1, C_2	Konstanten des $k - \zeta - f$ -Turbulenzmodells	[-]
c	Massenanteil	[-]
c	Reaktionsfortschrittsvariable des ECFM-Modells	[-]
$C_{\epsilon 1}, C_{\epsilon 2}, C_{\epsilon 3}, C_{\mu}$	Konstanten des $k - \epsilon$ -Turbulenzmodells	[-]
c_p	spez. Wärmekapazität	[J/(kgK)]
c_w	Widerstandsbeiwert	[-]
Da	Damköhler-Zahl	[-]
D	Diffusionskoeffizient	[m ² /s]
d	Durchmesser	[m]
δ	dimensionslose Filmdicke	[-]
δ	Dicke	[m]
δ	Flammendicke	[m]
∂_{ij}	Kronecker-Delta	[-]
e	innere Energie	[J]
ϵ	turbulente Dissipation	[m ² /s ³]
f	Frequenz	[Hz]

f	Funktion	[div.]
$F_{vap}, F_{con}, \alpha_{nuc}$	Konstanten des Rayleigh-Plesset-Kavitationsmodells	[-]
G	Feldgröße G-Gleichungsmodell	[-]
g	Erdbeschleunigung	[m/s ²]
h	spezifische Enthalpie	[J/kg]
Ka	Karlovitz-Zahl	[-]
κ	Karman-Konstante	[-]
K	K-Zahl im Spray-Wand-Interaktionsmodell	[-]
K	Kolmogorov'sche Größenskala	[-]
k	turbulente kinetische Energie	[m ² /s ²]
K_t	Streckungsrate der Flammenfront	[1/s]
λ	Luft-Kraftstoff-Verhältnis	[-]
λ	Wärmeleitfähigkeit	[W/(mK)]
Λ	Wellenlänge im WAVE-Modell	[m]
μ	dynamische Viskosität	[kg/(ms)]
n_{Mot}	Motordrehzahl	[min ⁻¹]
ν	kinematische Viskosität	[m ² /s]
Nu	Nusseltzahl	[-]
Oh	Ohnesorge-Zahl	[-]
$\dot{\omega}$	Reaktionsgeschwindigkeit	[1/s]
ω	Winkelgeschwindigkeit	[1/s]
Ω	Wachstumsrate im WAVE-Modell	[1/s]
p	Druck	[N/m ²]
Pr_k, Pr_ϵ	Prandtl-Zahlen für die turbulente kinetische Energie k und die Dissipation ϵ	[-]
\dot{Q}^c	chemischer Quellterm in der Energieerhaltung	[N/(m ² s)]
\dot{q}	Wärmestromdichte	[W/m ²]
\dot{Q}	Wärmestrom	[W]
Q	Wärme	[J]
\dot{Q}^s	Sprayquellterm in der Energieerhaltung	[N/(m ² s)]
Re	Reynolds-Zahl	[-]
ρ	Dichte	[kg/m ³]
r	Radius	[m]
Sc	Schmidt-Zahl	[-]
Sh	Sherwoodzahl	[-]
Σ	Flammenfrontoberflächendichte der Flammeflächenmodelle	[1/m]
σ	Viskoser Spannungstensor in der Impulserhaltungsgleichung	[N/m ²]

σ	Oberflächenspannung	[N/m ²]
σ	Varianz der turbulenten Schwankungen	[-]
SMD	Sauterdurchmesser	[m]
S	Flammengeschwindigkeit	[m/s]
St	Stanton-Zahl	[-]
τ	Reynolds-Spannungstensor	[N/m ²]
T^*	dimensionslose Temperatur	[-]
T	Temperatur	[K]
t	Zeit	[s]
u	Geschwindigkeit	[m/s]
V	Volumen	[m ³]
v	Volumenanteil	[-]
We	Weber-Zahl	[-]
W	Wahrscheinlichkeitsfaktor	[-]
\vec{x}	Ortsvektor in kartesischen Koordinaten	[m]
Ξ	Flammenfaltungsfaktor	[-]
$Y_{fu,fr}$	Kraftstoffmassenanteil der unverbrannten Zone	[-]
$Y_{fu,T}$	Totaler Kraftstoffmassenanteil	[-]
Y	Massenbruch	[-]
Y	Volumenanteil	[-]
ζ	Geschwindigkeitsverhältnis	[-]

Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
CFD	numerische Strömungsmechanik
CO	Kohlenmonoxid
CO ₂	Kohlendioxid
DDM	diskretes Tropfenmodell
DGL	Differentialgleichung
DNS	Direkte Numerische Simulation
EU	Europäische Union
EVO	Auslassventil öffnet
H ₂	Wasserstoff
H ₂ O	Wasser
HC	unverbrannte Kohlenwasserstoffe

HDEV	Hochdruckeinspritzventil
IVO	Einlassventil öffnet
KW	Kurbelwinkel
LES	Grobstruktursimulation
LIF	Laser-Induzierte Fluoreszenz
MgO	Magnesiumoxid
N_2	Stickstoff
Nd:YAG	Neodym-dotierter Yttrium-Aluminium-Granat
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
NiCr	Nickel-Chrom
Ni	Nickel
NO	Stickstoffmonoxid
O_2	Sauerstoff
OH	Hydroxyl-Radikal
PAK	polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
PCM	Puls-Code-Modulation
PDA	Phasen-Doppler-Anemometrie
PN	Partikelanzahl
RANS	Reynolds-gemittelte Navier-Stokes
SiO_2	Siliziumdioxid
SOI	Einspritzbeginn
ZZP	Zündzeitpunkt

Indizes

Index	Bedeutung
0	Referenzpunkt
32	Sauter-gemittelt
B	Blase
c	chemisch
cell	Zelle des Berechnungsgebietes
DK	Direktkontakt
c	Wandfilm
f	Flüssigphase
Film	Wandfilm
Fl	Flamme

fr	Frischgas
fu	Kraftstoff
G	Gasphase
ign	Zündung
I	Interface
i,j,k	Zählindex in Koordinatenrichtung
imp	Impingement
K	Kammer
Kont	Kontakt
Kra	Kraftstoff
l	laminar
max	maximal
MSP	Massenschwerpunkt
n	normal
rel	relativ
R	Restgas
S	Tropfenoberfläche
sat	Siedepunkt
st	stabil
tan	tangential
t	turbulent
vap	Verdunstung
v	Dampfphase
w	Wand

Zusammenfassung

Die 2014 in Kraft tretende Emissionsgesetzgebung EU6 begrenzt zusätzlich zur Partikelmasse auch die Partikelanzahlemission für Ottomotoren. Insbesondere in Kombination mit den ambitionierten CO_2 -Emissionszielen stellt dies eine zusätzliche Herausforderung für Ottomotoren mit Direkteinspritzung dar. Zentraler Punkt der Brennverfahrensentwicklung von Ottomotoren mit Direkteinspritzung ist daher die Senkung des Kraftstoffverbrauchs bei gleichzeitiger Minimierung der Partikelemissionen. Das hierfür notwendige Verständnis der innermotorischen Vorgänge kann nur durch den gemeinsamen Einsatz einander ergänzender Analysewerkzeuge an optisch zugänglichen Einzylinderaggregaten und der numerischen 3D-CFD-Strömungssimulation gewonnen werden. Dadurch werden jedoch hohe Anforderungen an die 3D-Strömungssimulation insbesondere im Hinblick auf die Prognose der Partikelemissionen gestellt, welche nur mit Hilfe einer entsprechend detaillierten Modellierung erfüllt werden können. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein durchgängiger Ansatz zur 3D-Berechnung der innermotorischen Vorgänge, beginnend bei der Injektorinnenströmung über die Einspritzung und Gemischbildung, unter besonderer Berücksichtigung der Spray-Wand-Interaktion, bis hin zur Modellierung der Verbrennung einschließlich der Rußbildung vorgestellt.

Entstehungspunkt der Partikelemissionen im Brennraum sind, ausreichend hohe Temperaturen vorausgesetzt, Zonen mit einem entsprechend niedrigen Luft-Kraftstoff-Verhältnis λ . Prinzipiell sollte bei den hier betrachteten homogen betriebenen Ottomotoren mit Direkteinspritzung die zur Homogenisierung des Gemischs zur Verfügung stehende Zeit ausreichen, um diese kraftstoffreichen Zonen zu vermeiden. Allerdings kann nicht in allen Betriebspunkten eine Benetzung der Brennraumwände mit flüssigem Kraftstoff vermieden werden. Die verzögerte Verdunstung dieses an der Wand abgelagerten Kraftstoffs ist damit jedoch eine wesentliche Quelle für Rußpartikel in Ottomotoren mit Direkteinspritzung. Voraussetzung für die Prognose der Rußemissionen mittels der numerischen Simulation ist somit eine detaillierte Beschreibung der gesamten zugrundeliegenden Modellkette, insbesondere im Hinblick auf die Modellierung der Spray-Wand-Interaktion sowie der Wandfilmdynamik.

Die Validierung der hier vorgestellten Modellierung erfolgte zunächst separat für die einzelnen während der Gemischbildung ablaufenden und im Folgenden beschriebenen Prozesse. Da neben der Spray-Wand-Interaktion die Gemischbildung und damit letztlich auch die Rußbildung in Ottomotoren mit Direkteinspritzung stark vom Ausbreitungsverhalten der Einspritzstrahlen abhängig ist, wurde zunächst die verwendete Modellierung der Einspritzung anhand entsprechender Spraykammermessungen validiert. Dabei konnte gezeigt werden, dass die Injektorinnenströmung einen wichtigen Einfluss auf die anschließende Sprayausbreitung hat. So konnten in der Sprayberechnung durch Initialisierung der Informationen aus der Injektorinnenströmung die strahlindividuellen Unterschiede in der Eindringtiefe sowie die Strukturen der einzelnen Spraystrahlen deutlich besser entsprechend der Messung abgebildet werden. Zudem entfällt der im Fall der konventionellen Initialisierung aufwändige Sprayabgleich größtenteils, wobei jedoch eine zusätzliche Berechnung der Injektorinnenströmung nötig wird.

Die Validierung der Modellierung der Spray-Wand-Interaktion und der Wandfilmdynamik erfolgte mit Hilfe der an der Universität Magdeburg durchgeführten experimentellen Grundsatzuntersuchungen. Dabei stand anhand der mittels Infrarotthermographie gemessenen Wandtemperaturen und einer entsprechend umfangreichen Parametervariation eine breite Basis zur Kalibrierung und Validierung der verwendeten Modellierung zur Verfügung. Hierbei konnte unter Verwendung der im Rahmen dieser Arbeit eingeführten gekoppelten Vorgehensweise zur Ermittlung der instationären Temperaturverteilung auf der Unterseite der Wand gezeigt werden, dass die erweiterte Modellierung der Spray-Wand Interaktion in der Lage ist, die jeweiligen Regime der Spray-Wand Interaktion und die aus der Messung ersichtliche Temperaturabsenkung der Wand gut wiederzugeben. Des Weiteren konnte anhand der ebenfalls an der Universität Magdeburg mittels laserinduzierter Fluoreszenz gemessenen Verteilungen der Wandfilmhöhe dargestellt werden, dass mit Hilfe der gewählten Modellierung unter Berücksichtigung des Einflusses des wandtangentialen Impulses der ankommenden Tropfen auch die Wandfilmdynamik in der Berechnung gut wiedergegeben werden kann. Weiterhin stellte sich im Rahmen dieser Arbeit neben der Injektorinnenströmung die Kraftstoffzusammensetzung als wichtiger Einflussparameter auf die Spray-Wand Interaktion heraus. Um die thermo-physikalischen Stoffeigenschaften und hier insbesondere den großen Siedetemperaturbereich von Benzin bei nur geringfügig höherem Rechenaufwand besser abbilden zu können, wurde ein dreikomponentiger Ersatzkraftstoff definiert. Damit ist im Hinblick auf die im Weiteren betrachtete motorische Anwendung eine deutlich realistischere Abbildung der Spray-Wand-Interaktion möglich.

Im Rahmen der diskutierten Validierung der Modellierung der Spray-Wand-Interaktion und der Wandfilmdynamik konnte gezeigt werden, dass die Oberflächentemperatur der Wand und hier insbesondere die Temperaturabsenkung aufgrund der Spraykühlung einen wichtigen Einfluss auf die bei der Spray-Wand-Interaktion ablaufenden Vorgänge hat.

Um diese Temperaturabsenkung auf der Brennraumoberfläche experimentell bestimmen zu können, wurden Oberflächentemperaturmessungen auf dem Kolben eines gefeuert betriebenen Einzylinderaggregats durchgeführt. Dazu wurden acht schnell ansprechende Oberflächenthermoelemente 300 nm unter der Kolbenoberfläche angebracht und die Signale mittels eines Telemetriesystems vom bewegten Kolben zu einem Datenerfassungssystem übertragen. Um unter anderem den Einfluss des Raildrucks, des Einspritzzeitpunktes und des verwendeten Kraftstoffs auf die Oberflächentemperatur des Kolbens untersuchen zu können, wurde eine umfangreiche Parametervariation durchgeführt. Dabei stellte sich insbesondere der im Vergleich zum schnellen Lastwechsel des Motors sehr langsame Anstieg der Oberflächentemperatur des Kolbens als wesentliche Ursache des im dynamischen Motorbetrieb gemessenen starken Anstiegs der Partikelemissionen heraus.

Die Validierung der gesamten dargestellten Modellkette unter motorischen Bedingungen wurde an vier Teillastbetriebspunkten mit unterschiedlichen Einspritzzeitpunkten und Raildrücken an dem angesprochenen Einzylinderaggregat durchgeführt. Dabei konnte gezeigt werden, dass die verwendete Modellierung in der Lage ist, die Druck- und Brennverläufe der vier Betriebspunkte gut entsprechend der Messung wiederzugeben. Zudem konnten durch Übertragung des im Rahmen der Grundsatzuntersuchungen angewandten Ansatzes zur Modellierung der Wärmeleitung in dünnen Wänden auf motorische Bedingungen die experimentell ermittelten Oberflächentemperaturänderungen durch die Einspritzung und Verbrennung zufriedenstellend reproduziert werden. Somit stand aus dem Zusammenspiel von Simulation und Experiment die Möglichkeit zur Verfügung, die z.B. bei Erhöhung des Raildrucks ablaufenden Phänomene detaillierter zu analysieren. Anhand der abschließend dargestellten Korrelationen zwischen Gemischbildung und Rußemissionen konnte gezeigt werden, dass mit Hilfe der im Rahmen dieser Arbeit erarbeiteten detaillierten Modellierung der Einspritzung und Spray-Wand-Interaktion auch in der heute standardmäßig durchgeführten Analyse der nicht reaktiven Strömung bis zum Zündzeitpunkt erste Aussagen zu potentiell entstehenden Rußemissionen getroffen werden können. Wird weiterhin noch die Verbrennung sowie die Rußbildung und -oxidation über die entsprechende Modellierung berücksichtigt, können detailliertere Aussagen zu den emittierten Rußemissionen, insbesondere bei sehr geringem Emissionsniveau, getroffen werden.

Insgesamt bleibt festzuhalten, dass unter Verwendung des hier vorgestellten Modellierungskonzeptes die Auswirkungen verschiedener die Gemischbildung und Verbrennung beeinflussender Parameter, wie z.B. Einspritzzeitpunkt, Einspritzdruck oder Spraylayout, auf die Partikelemissionen bewertet werden können. Damit kann die Prognose der Partikelemissionen mittels der numerischen Simulation deutlich verbessert werden und somit die ottomotorische Brennverfahrensentwicklung zielführend unterstützt werden.