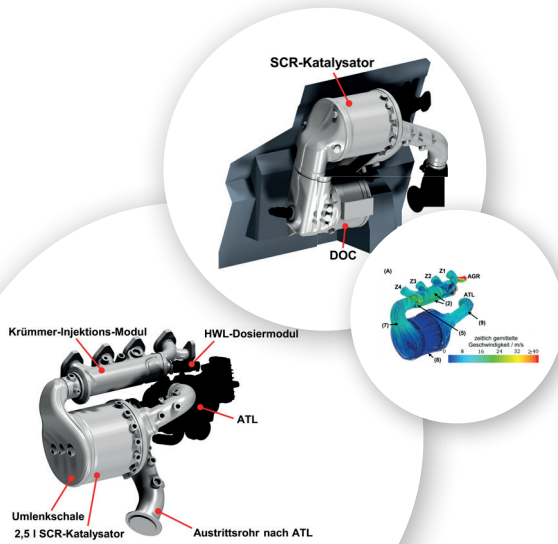


Simulationsbasierte Potenzialanalyse von innovativen Vorturbolader-Abgasnachbehandlungskonzepten



Simulationsbasierte Potenzialanalyse von innovativen Vorturbolader-Abgasnachbehandlungskonzepten

Am Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

Dissertation

vorgelegt von
Daniel Tobias Knaf, M.Sc.
aus Gießen

Berichterstatter: Prof. Dr. techn. Christian Beidl
Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Christian Hasse
Tag der Einreichung: 15.04.2021
Tag der mündlichen Prüfung: 23.06.2021

Darmstadt 2021

D17

Schriftenreihe des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen und
Fahrzeugantriebe

Band 22

Daniel Tobias Knaf

**Simulationsbasierte Potenzialanalyse von innovativen
Vorturbolader-Abgasnachbehandlungskonzepten**

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

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.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2021

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 978-3-8440-8223-4

ISSN 2365-3795

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

„Für mich bestand die Konstruktion eines selbstfahrenden Motorwagens aber in der Lösung einer Reihe von Einzelfragen, deren jede für sich allein wieder eine ganze Anzahl weitgehender Überlegungen umschloß.“

Carl Benz, *Lebensfahrt eines deutschen Erfinders. Die Erfindung des Automobils. Erinnerungen eines Achtzigjährigen*, Leipzig, 1936, S. 53.



Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Berechnungsingenieur und Doktorand bei BIN Boysen Innovationszentrum Nagold GmbH & Co. KG im Fachbereich Thermodynamik.

Herrn Prof. Dr. techn. Christian Beidl möchte ich für die Betreuung meiner Arbeit, das dadurch mir entgegengebrachte Vertrauen und die fachlichen Diskussionen bedanken. Herrn Prof. Dr.-Ing. Christian Hasse danke ich für sein Interesse an meiner Arbeit und für die Übernahme des Korreferats.

Mein Dank gilt meinen Kolleginnen und Kollegen bei Boysen in Nagold und Altensteig für ihre Hilfs- und Diskussionsbereitschaft. Insbesondere bedanke ich mich bei Matthias Riepshoff, Stefan Sauer, Dennis Sailer, Matthias Kunz und Manuel Faiß für die persönliche und fachliche Unterstützung. Unsere zahlreichen Diskussionen zur SCR-Thematik, Numerik und Messtechnik haben maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Roland Gauß, Felix Roller und Tamara Keefer möchte ich für die fertigungstechnische Unterstützung und den Prototypenbau danken. Dan Hartmann danke ich für die Unterstützung bei den Heißgaserzeugermessungen. Mathias Keck, Robert Anselm, Dr. Philipp Egeler, Dr. Dominik Lechler und Dr. Henry Bosch danke ich für die Möglichkeit und Unterstützung meinen Forschungstätigkeiten nachgehen zu können.

Bei Dr.-Ing. Johannes Hipp möchte ich mich für die gemeinsam fokussierte Zusammenarbeit und seine stete Hilfsbereitschaft bedanken. Mein Dank gilt weiter allen Projektpartnern des durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten „DESIRE“-Verbundprojekts für den freundlichen und zielgerichteten Austausch.

Mein besonderer Dank gilt meiner Lebensgefährtin Sandra für ihr Verständnis, ihre Geduld und ihren persönlichen Beistand sowie meinen Eltern für die langjährige Unterstützung.

Rottenburg am Neckar, im April 2021

Daniel Tobias Knaf



Abstract

The selective catalytic reduction (SCR) finds frequent use in emission reduction for Diesel engines. Thereby nitrogen oxides react with the reducing agent ammonia, which is generated from a urea-water solution (UWS). In the current work, two SCR exhaust gas aftertreatment concepts are integrated between the combustion chamber outlets of a four-cylinder Diesel engine and the exhaust turbocharger inlet. This approach uses the overall temperature level which is increased compared to conventional concepts. The potential analysis of the pre-turbo SCR-systems is done with three-dimensional computational fluid dynamics methods. The methods and the systems are derived for these new boundary conditions. The validation is done by prototype testing on an engine and a hot gas test bed.

Two pre-turbo-concepts are investigated. The first one contains an oxidation and an SCR-catalyst with an interposed UWS preparation (SCR-module). One special feature is the directed UWS-injection on an interior wall with exhaust gas flowing around it on both sides and the twin-swirl supported mixture. The second concept based on this approach contains an exhaust manifold, which has the specifics of a UWS dosing point and a modular changeable inner mixing pipe (manifold-injection-module). In contrast to conventional systems the pulsating inflow rather than the constant inflow of the exhaust gas is guided in such a way that no droplets reach the engine's interfaces. The mixing pipe designed with a single flow gap reduces the undesired reducing agent flow rate to the exhaust gas recirculation so that the reducing agent primarily reaches the following SCR-catalyst.

One requirement is to model the dynamic turbulent flow behaviour and the UWS preparation process near the combustion chamber outlets in a combined way. The represented engine-stationary operation points are based on urban conditions of transient driving cycles. The turbulent flow is modelled with RANS. The mass flow and temperature boundary conditions are modelled as constant in the first concept. In the second one, these are time-resolved modelled on the interfaces to the exhaust manifold inlet and the exhaust gas recirculation. The transient input data is taken from an engine model. The outlet pressure level in front of the turbine is constant depending on the operation point. Pressure, gas temperature and component temperature are compared with experimental data of the prototypes which are integrated in the overall engine powertrain. In addition to the flow condition, the analysis methodology detects the sub-processes of the UWS preparation process. The UWS is intermittently injected as a Lagrangian phase. The dosing module specific droplet size distribution is measured in advance as a function of pressure via a generic pressure chamber for deriving the simulation boundary condition. The dense UWS spray mass distribution is calibrated on measurement data. The droplet-gas-interaction models the droplet motion, the water

evaporation and simplified urea thermolysis. The location and amount of the droplets and the reducing agent are investigated. The droplet-wall-interaction is statistically modelled with a thermal transition region between UWS wall film wetting and non-wetting effects. The uncertainty of the limit parameter is known from the literature. To prevent a change of the interaction phenomena at droplet-wall-contact and to assign the system behaviour more reliably, part load operation points are specifically used which have temperature levels above and below the thermal wetting limits. The focus of the analysis is set on a hot operation condition with rebounding droplets. The impingement is simulatively forecasted and experimentally validated via the location and intensity of the wall cooling in stationary engine operation points. Additional experiments show that an increased sheet-metal heat conductivity reduces the cooling of the exhaust manifold mixing pipe. A purposeful approach for UWS decomposition is the fluidic increase of the path length to the catalyst. This is reached in both systems via twin-swirl structures and in the manifold via specific flow recirculation. The reducing agent distribution is numerically evaluated and compared to the testing. The necessity to resolve the pulsating boundary conditions is discussed from the perspective of the UWS preparation.

The compact manifold-injection-module of the second concept achieves a good preparation and mixing behaviour in stationary conditions. This system has the potentials to be analysed combined with conventional components of the exhaust line. The simulation method, which is validated in the engine part-load range, allows to virtually adapt pre-turbo systems for further powertrains and to analyse the sub-processes of the UWS-preparation.

Kurzfassung

Bei der dieselmotorischen Emissionsminderung findet die selektive katalytische Reduktion (SCR) häufige Anwendung. Dabei reagieren Stickoxide mit dem aus einer Harnstoff-Wasser-Lösung (HWL) erzeugten Reduktionsmittel Ammoniak. In der vorliegenden Arbeit werden zwei SCR-Abgasnachbehandlungskonzepte zwischen den Brennraumauslässen eines Vierzylinder-Dieselmotors und dem Abgasturboladereinlass integriert. Dieser Ansatz nutzt das im Vergleich zu konventionellen Ansätzen erhöhte Gesamttemperaturniveau. Die Potenzialanalyse der Vorturbolader-SCR-Systeme wird mithilfe dreidimensionaler Strömungssimulationen durchgeführt. Die Methoden und die Systeme werden für diese neuen Randbedingungen abgeleitet. Die Validierung erfolgt durch Prototypenmessung am Motor- und Heißgaserzeugerprüfstand.

Es werden zwei Vorturbolader-Konzepte untersucht. Das erste enthält einen Oxidations- und SCR-Katalysator mit dazwischenliegendem HWL-Aufbereitungskonzept (SCR-Modul). Eine Besonderheit ist die gerichtete HWL-Dosierung auf eine innenliegende beidseitig mit Abgas umströmte Wand und die doppelwirbelunterstützte Vermischung. Das zweite auf diesem Ansatz basierende Konzept umfasst einen Abgaskrümmer, der die Spezifik einer HWL-Dosierstelle und eines modular wechselbaren inneren Mischrohrs aufweist (Krümmer-Injektions-Modul). Das im Unterschied zu konventionellen Systemen nicht konstant, sondern pulsierend einströmende Motorabgas wird so geführt, dass keine Tropfen die Motorschnittstellen erreichen. Das mit einem einzelnen Einströmspalt gestaltete Mischrohr reduziert den unerwünschten Reduktionsmittelstrom zur Abgasrückführung, sodass das Reduktionsmittel primär zum nachfolgenden SCR-Katalysator gelangt.

Eine Anforderung besteht darin, das dynamisch turbulente Strömungsverhalten und den HWL-Aufbereitungsprozess nahe der Brennraumauslässe kombiniert zu modellieren. Die abgebildeten motorstationären Betriebspunkte sind an innerstädtische Zustände transienter Fahrzyklen angelehnt. Die turbulente Strömung wird mit RANS modelliert. Die Massenstrom- und Temperaturrandbedingungen werden im ersten Konzept konstant beschrieben. Im zweiten werden diese an den Schnittstellen zum Abgaskrümmer einlass und zur Abgasrückführung zeitlich aufgelöst. Die transienten Eingangsdaten werden einem Motormodell entnommen. Das Austrittsdruckniveau vor der Turbine ist Betriebspunktabhängig konstant. Druck, Gas- und Bauteiltemperatur werden mit experimentellen Daten der im Motorgesamtantriebsstrang verbauten Prototypen abgeglichen. Die Analysemethodik sieht vor, neben dem Strömungszustand die Teilprozesse des HWL-Aufbereitungsprozesses zu erfassen. Die HWL wird periodisch als Lagrange-Phase dosiert. Die dosiermodulspezifische Tropfengrößenverteilung wird vorab druckabhängig über Messungen mit einer generischen Druckkammer zur Ableitung der Simulationsrandbedingung erfasst. Die dichte HWL-Spraymassenverteilung

wird auf Messdaten kalibriert. Die Tropfen-Gas-Interaktion bildet die Tropfenbewegung, die Wasserverdunstung und vereinfachte Harnstoffthermolysen ab. Der Ort und die Menge der Tropfen und des Reduktionsmittels werden untersucht. Der Tropfen-Wand-Kontakt wird statistisch mit einem thermischen Übergangsbereich zwischen HWL-Wandfilm benetzenden und nicht-benetzenden Effekten modelliert. Die Unsicherheit des Grenzparameters ist aus der Literatur bekannt. Um einen Wechsel der Interaktionsphänomene beim Tropfen-Wand-Kontakt zu vermeiden und das Systemverhalten sicherer zuzuordnen, werden gezielt Teillastbetriebspunkte mit Temperaturniveaus ober- und unterhalb der thermischen Benetzungsgrenze verwendet. Der Fokus der Analyse liegt auf einem heißen Betriebszustand mit abprallenden Tropfen. Die Beaufschlagung wird simulativ prognostiziert und experimentell über den Ort und die Intensität der Wandabkühlung in stationären Motorbetriebspunkten validiert. Ergänzende Versuche zeigen, dass eine erhöhte Blechwärmeleitfähigkeit die Abkühlung des Abgaskrümmermischrohrs reduziert. Ein zielführender Ansatz zur HWL-Zersetzung ist die strömungsmechanische Erhöhung der Weglänge zum Katalysator. Dies wird in beiden Systemen durch Doppelwirbelstrukturen und im Krümmer durch gezielte Strömungsrezirkulation erreicht. Die Reduktionsmittelverteilung wird numerisch ausgewertet und dem Versuch gegenübergestellt. Die Notwendigkeit, die pulsierenden Randbedingungen abzubilden, wird aus Sicht der HWL-Aufbereitung diskutiert.

Mit dem kompakten Krümmer-Injektions-Modul des zweiten Konzepts ist ein gutes Aufbereitungs- und Vermischungsverhalten in stationären Zuständen erreichbar. Dieses System bietet das Potenzial mit konventionellen Komponenten des Abgasstrangs kombiniert betrachtet zu werden. Die im motorischen Teillastbereich validierte Simulationemethode ermöglicht es, Vorturbolader-Systeme virtuell auf weitere Antriebsstränge anzupassen und die Teilprozesse der HWL-Aufbereitung zu analysieren.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	xvii
Tabellenverzeichnis	xxix
Formelverzeichnis	xxxii
Abkürzungsverzeichnis.....	xxxiii
Verzeichnis der Formelzeichen und Indizes	xxxv
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Zielsetzung und Vorgehen	2
2 Abgasnachbehandlungssysteme.....	4
2.1 Dieselmotorische Schadstoffentstehung.....	4
2.2 Emissionsgesetzgebung.....	5
2.3 Systemkomponenten	6
2.3.1 Abgaskrümmen	6
2.3.2 Abgasturbolader	8
2.3.3 Katalysator- und Partikelfilterkomponenten	9
2.3.4 Anordnung der Abgasnachbehandlungskomponenten	13
2.4 Anhebung des Temperaturniveaus im Abgasstrang.....	15
2.4.1 Aktive Maßnahmen.....	16
2.4.2 Übersicht passiver Maßnahmen	16
2.4.3 Abgasnachbehandlung in Vorturbolader-Anordnung	17
3 Grundlagen für die Simulation von Abgasnachbehandlungssystemen	22
3.1 Turbulente Abgasströmung.....	22
3.2 Aufbereitung von Harnstoff-Wasser-Lösung im SCR-Modul	24
3.2.1 Dosierung von Harnstoff-Wasser-Lösung	25
3.2.2 Tropfen-Gas-Interaktion	25
3.2.3 Tropfen-Wand-Interaktion	27
3.2.4 Wandfilm und feste Folgeprodukte	32

4	Modellansätze und Validierungsmethoden	35
4.1	Methodisches Vorgehen	35
4.2	Randbedingungen	37
4.2.1	Beschreibung des dieselmotorischen Basisantriebsstrangs	37
4.2.2	Ableitung der Vorturbolader-Randbedingungen	38
4.2.3	Messung der HWL-Tropfengrößenverteilung	41
4.3	CFD-Modellierung der Vorturbolader-Abgasnachbehandlung	45
4.3.1	Definition und Behandlung der numerischen Systemgrenzen	45
4.3.2	Allgemeine Parameter und Einstellungen	48
4.3.3	Beschreibung der HWL-Dosierung	50
4.3.4	Tropfenbehandlung und Tropfen-Gas-Interaktion	53
4.3.5	Tropfen-Wand-Behandlung	54
4.3.6	Modellierung der Katalysatoren	57
4.3.7	Auswertungs- und Visualisierungsmethoden	58
4.4	Experimentelle Versuchsmethoden	59
4.4.1	Versuchsaufbau am Motorenprüfstand	59
4.4.2	Versuchsaufbau am Heißgaserzeuger-Prüfstand	60
5	Entwurf eines SCR-Moduls vor dem Abgasturbolader	62
5.1	Vorturbolader-Abgasnachbehandlung	62
5.1.1	Definition der Systemvarianten und Anforderungen	62
5.1.2	Bauraumintegration	65
5.1.3	HWL-Aufbereitungskonzept	67
5.2	CFD-Analyse des SCR-Moduls unter konstanten Randbedingungen	70
5.2.1	Simulationsmodell	70
5.2.2	Stationäres Geschwindigkeitsfeld	72
5.2.3	Temperaturverteilung im SCR-Modul	76
5.2.4	HWL-Aufbereitung und Reduktionsmittelvermischung	77
5.3	Systemanalyse und Validierung durch experimentelle Methoden	85
5.3.1	Prototypen und Messstellen	85
5.3.2	Thermisches Systemverhalten	87

5.3.3	Wandabkühlung bei HWL-Beaufschlagung	92
5.3.4	Reduktionsmittelgleichverteilung am SCR-Katalysator	97
5.4	Zwischenfazit und Ableitung von Maßnahmen	100
6	Potenzialanalyse eines Krümmer-Injektions-Moduls	103
6.1	Integration eines SCR-Moduls in den Abgaskrümmer	103
6.1.1	Erweitertes Simulationsmodell	103
6.1.2	Analyse und Bewertung der transienten Modelleingangsdaten	106
6.1.3	Krümmer-spezifische Anforderungen	110
6.1.4	Evolution des Krümmer-Injektions-Moduls	111
6.1.5	Parameter der optimierten Konzeptgeometrie	118
6.2	Stationäre Systemanalyse und -bewertung mit CFD-Methoden.....	121
6.2.1	Gasströmung und Bauteile.....	121
6.2.2	HWL-Aufbereitung.....	129
6.2.3	Reduktionsmittel	133
6.2.4	Vergrößerung des Mischrohrspalts.....	136
6.2.5	Einfluss der Strömungspulsation auf die HWL-Aufbereitung.....	138
6.2.6	Einfluss der numerischen Zeitschrittweite.....	143
6.3	Systemanalyse und Validierung durch experimentelle Methoden	148
6.3.1	Prototypen und Messstellen	148
6.3.2	Kalt durchströmter Prototyp	149
6.3.3	Thermische Untersuchung	152
6.3.4	Reduktionsmittelverteilung über den SCR-Katalysatorquerschnitt	161
6.3.5	Transiente thermische Analyse des SCR-Moduls	165
6.4	Methodenbewertung und Konzeptpotenziale.....	169
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	171
	Literaturverzeichnis.....	175
	Anhang	195
	Veröffentlichungen und Konferenzbeiträge im Rahmen dieser Arbeit	197