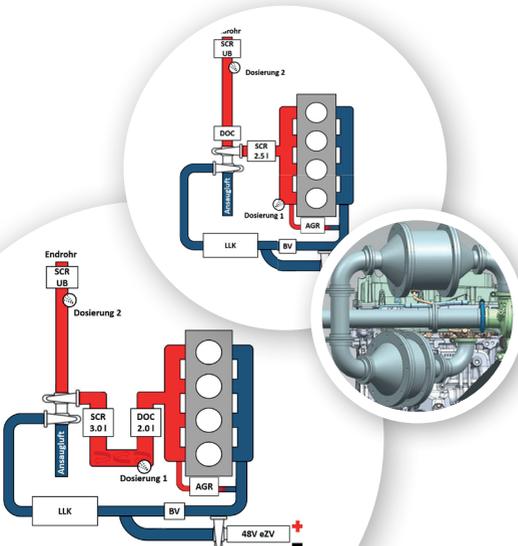


# Potenzialanalyse eines Pre-Turbo-DeNOx-Systems in einer 48V Dieselhybridanwendung



---

## **Potenzialanalyse eines Pre-Turbo-DeNO<sub>x</sub>-Systems in einer 48 V Dieselhybridanwendung**

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

### **Dissertation**

vorgelegt von  
**Johannes Hipp, M.Sc.**  
aus Oberhausen

Berichterstatter: Prof. Dr. techn. Christian Beidl  
Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Michael Bargende  
Tag der Einreichung: 11.05.2020  
Tag der mündlichen Prüfung: 30.06.2020

Darmstadt 2020

D17

---



Schriftenreihe des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen und  
Fahrzeugantriebe

Band 18

**Johannes Hipp**

**Potenzialanalyse eines Pre-Turbo-DeNOx-Systems  
in einer 48V Dieselhybridanwendung**

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag  
Düren 2020

### **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., 2020

Copyright Shaker Verlag 2020

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7645-5

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](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

---

*“It doesn't matter how beautiful your theory is, it doesn't matter how smart you are.  
If it doesn't agree with experiment, it's wrong.”*

Richard P. Feynman (1918-1988)

---



---

---

## **Vorwort**

---

Diese Arbeit entstand während meiner Anstellung als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Fahrzeugantriebe an der Technischen Universität Darmstadt.

Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr. techn. Christian Beidl, Prof. Dr.-Ing. Günter Hohenberg und Dr.-Ing. Bernd Lenzen, die mir im Laufe meiner Tätigkeit sehr viel Vertrauen und spannende Fragestellungen entgegen gebracht haben.

Das Institut wird von einer grenzenlosen, uneingeschränkten Kollegialität getragen, die mir das Überwinden jeder Hürde ermöglicht hat. Ich danke allen, mit denen ich in dieser Zeit zusammenarbeiten durfte.

Darüber hinaus danke ich den Studierenden (Hiwis, Bacheloranden und Masteranden), die mich in meiner Arbeit fachlich und menschlich am Prüfstand begleitet haben. Der Zusammenhalt, die Ergebnisorientierung, die Qualität und nicht zuletzt die gute Stimmung sind der Grundpfeiler, auf dem die Ergebnisse und Erkenntnisse basieren.

Mein Dank gilt auch dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) für die Förderung des „DESIRE“ Projekts im Auftrag des Deutschen Bundestages, die diese Arbeit ermöglicht hat.

Weiterhin möchte ich den Partnern aus dem Konsortium des „DESIRE“ Projekts danken. Die zahlreichen telefonischen Konferenzen und Projektmeetings, die durch die zielorientierte Diskussion und den gegenseitigen Respekt geprägt waren, haben mir viel Freude bereitet und mich vieles gelehrt.

---



---

---

## Abstract

---

Since decades, due to its high efficiency, the Diesel combustion engine has a high popularity in the individual mobility sector. Higher engine efficiency leads to lower exhaust gas temperature and therefore a more complex and challenging handling of the exhaust gas aftertreatment activity especially at cold-start.

This study addresses the conflict of low emissions in a highly efficient powertrain by using the optimized interaction of several components in a mildhybrid Diesel powertrain. Future near zero emission in optimized Diesel hybrid powertrains is targeted under consideration of cold-start and urban driving.

One possibility to enable a fast activity of the NO<sub>x</sub>-reduction after cold-start is shown by shifting the exhaust gas aftertreatment systems upstream the turbocharger. In these studies, the catalytic system for NO<sub>x</sub>-reduction is placed upstream the turbocharger to use the significant higher temperature level of exhaust gas for a higher catalytic conversion of pollutants. Additionally, 48 V hybridization with an electric booster is inserted to compensate dynamic losses caused by catalyst substrates. The optimization of the NO<sub>x</sub>-conversion is meant to address future emission standards and especially low temperature scenarios and urban driving. The whole testbed studies are based on dynamics, emissions and efficiency in WLTC and on real driving scenarios in the context of the investigated Hardware-in-the-Loop powertrains.

Promising results show the great potential of the pre-turbo DeNO<sub>x</sub> system for passenger car applications. Implementing two different catalyst combinations including AdBlue® dosing upstream the turbocharger increases coldstart performance significantly. Furthermore, the testbed platform is improved for simulating a real-world dynamic and thermal environment by optimizing the intercooler system at the Engine-in-the-Loop testbed. Finally, the results show the potential of the tested powertrain in the optimized Engine-in-the-Loop testbed for future vehicle applications.

---



---

---

## Kurzfassung

---

Die Attraktivität des Dieselmotors als Antriebsquelle der individuellen Mobilität ist in seinem hohen Wirkungsgrad begründet. Vor diesem Hintergrund und den damit einhergehenden niedrigen Abgastemperaturen steigen die Herausforderungen an die Abgasnachbehandlungskonzepte.

Die vorliegende Arbeit adressiert den Zielkonflikt von Emissionen und einem energieeffizienten Antrieb durch das optimierte Zusammenspiel von den Einzelkomponenten in einem hybridisierten Dieselantriebsstrang. Der Kaltstart und der urbane Betrieb stellen den Forschungsschwerpunkt dar.

Die experimentellen Untersuchungen zielen auf eine Optimierung des Dieselmotorantriebsstrangs im Kontext einer zukünftigen „Near-Zero-Emission“ Anwendung ab. Dabei liegt der Fokus der Untersuchungen auf einem Abgasnachbehandlungssystem vor dem Abgasturbolader. Durch die Verlagerung von Katalysatoren zur NO<sub>x</sub>-Minderung vor die Turbine des Abgasturboladers wird das deutlich höhere Temperaturniveau des Abgases für eine höhere katalytische Schadstoffumsetzung genutzt. Zusätzlich wird der Dieselmotor in den Kontext einer 48 V Hybridisierung mit einer elektrischen Zusatzaufladung gesetzt, die Dynamikeinbußen durch das Abgassystem kompensiert. Die Optimierung des Stickoxidumsatzes wird vor dem Hintergrund der Einhaltung zukünftiger Emissionsgrenzwerte im realen, insbesondere urbanen Fahrbetrieb untersucht. Das Gesamtsystem wird unter den Kriterien der Dynamik, der Energie und dem Schadstoffumsatzverhalten im WLTC und auf realen Routen im teilvirtuellen Antriebsstrang untersucht und bewertet.

Vielversprechende Ergebnisse zeigen das große Potenzial des Pre-Turbo-DeNO<sub>x</sub>-Systems für PKW-Anwendungen auf. Die Abgasanlagen, bestehend aus zwei untersuchten Katalysatorkonfigurationen mit AdBlue®-Dosierung vor dem Abgasturbolader, bestätigen gesteigerte Kaltstarteigenschaften mit einer zeitlich deutlich früheren Schadstoffkonvertierung nach dem Kaltstart. Im Rahmen der Arbeit wird auch die Versuchsmethodik mit dem Fokus auf einer dynamischen, thermisch repräsentativen Versuchsumgebung weiterentwickelt. Dazu wird am Engine-in-the-Loop Prüfstand die Abbildung der Fahrzeugladeluftkühlung unter thermischen und dynamischen Gesichtspunkten optimiert. Die daraus resultierende experimentelle Darstellung des teilvirtuellen Antriebsstrangs unter realen Randbedingungen lässt erste Schlüsse über das Systemverhalten in einer zukünftigen Fahrzeuganwendung zu.

---



---

---

## Inhaltsverzeichnis

---

Inhaltsverzeichnis.....	i
Abbildungsverzeichnis.....	v
Tabellenverzeichnis.....	viii
Formelverzeichnis .....	x
Abkürzungsverzeichnis.....	xiii
Verzeichnis der Formelzeichen und Indizes .....	xvi
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Abgasnachbehandlung bei Dieselfahrzeugen .....	2
1.2 Einordnung der Arbeit .....	3
1.3 Technologierückblick zu Katalysatoren vor dem Abgasturbolader .....	4
1.3.1 Mercedes Benz OM603 Diesel trap oxidizer .....	5
1.3.2 Subaru Otto pre catalytic converter .....	8
<b>2 Emissionsentstehung, Abgasnachbehandlung und Gesetzgebung .....</b>	<b>9</b>
2.1 Entstehung von Stickoxiden.....	13
2.1.1 Thermisches NO (Zeldovich und Lavoie) .....	14
2.1.2 Prompt-NO (Fenimore).....	14
2.1.3 Brennstoff-NO.....	15
2.1.4 N <sub>2</sub> O-Mechanismus .....	15
2.1.5 NO <sub>2</sub> Bildung.....	15
2.2 Entstehung von Sekundäremissionen.....	16
2.2.1 N <sub>2</sub> O-Emissionen.....	16
2.2.2 NH <sub>3</sub> -Emissionen.....	17
2.3 Externe Abgasrückführung .....	18
2.3.1 Niederdruck-Abgasrückführung .....	19
2.3.2 Hochdruck-Abgasrückführung .....	19
2.4 Abgasnachbehandlung.....	20

---

---

2.4.1	Dieseloxydationskatalysator .....	20
2.4.2	Stickoxid-Speicherkatalysator .....	22
2.4.3	Dieselpartikelfilter .....	24
2.4.4	SCR-Katalysator .....	24
2.4.5	Ammoniakschlupfkatalysator .....	31
2.5	Euro Abgasgesetzgebung .....	32
2.5.1	Euro 6 .....	32
2.5.2	Prognose nach Euro 6d .....	34
2.6	CO <sub>2</sub> Gesetzgebung .....	35
<b>3</b>	<b>Forschung und Entwicklung an PKW-Dieselmotorantriebssträngen .....</b>	<b>38</b>
3.1	Entwicklungsschwerpunkte bei PKW-Dieselantriebssträngen .....	38
3.1.1	SCR-Doppeldosierung von Harnstoffwasserlösung .....	38
3.1.2	Elektrifizierung – 48 V Mildhybridsystem .....	39
3.1.3	Elektrischer Zusatzverdichter .....	41
3.1.4	Forschung an Katalysatoren vor dem Abgasturbolader .....	43
3.1.5	Heizkatalysator .....	54
3.2	Umfang und Ziel der Arbeit .....	55
<b>4</b>	<b>Versuchsmethodik und untersuchte Antriebsstränge .....</b>	<b>57</b>
4.1	Engine-in-the-Loop (EiL) Motorenprüfstand .....	57
4.2	Thermodynamische Optimierung der Ladeluftkühlung am EiL .....	59
4.2.1	Thermische Umgebungsbedingungen .....	59
4.2.2	Einfluss der Ladeluftkühlung auf das Rohemissionsverhalten .....	61
4.2.3	Dynamisches Engine-in-the-Loop Ladeluftkühlermodul .....	64
4.2.4	Modellbasierte Lüftersteuerung am Ladeluftkühler .....	65
4.3	Versuchsplanung .....	68
4.3.1	Beschreibung der methodischen Vorgehensweise .....	68
4.3.2	Testzyklen und Routen .....	71
4.3.3	Bewertung der Testszenarien .....	76
4.4	Untersuchte Antriebsstränge und Peripherie .....	79

4.4.1	Versuchsmotor .....	79
4.4.2	Konventionelle Abgasanlage - Serienantriebsstrang .....	80
4.4.3	Wechselcanningsystem für Voruntersuchungen .....	81
4.4.4	Pre-Turbo-Hybridantriebsstrang 1 (PTH-1).....	83
4.4.5	Pre-Turbo-Hybridantriebsstrang 2 (PTH-2).....	84
4.4.6	Luftpfad mit elektrischem Zusatzverdichter .....	85
4.4.7	HWL Dosiersystem.....	87
4.4.8	Vergleichsantriebsstrang mit Heizkatalysator.....	91
4.5	Messsystematik.....	92
4.6	Simulationen .....	93
4.6.1	Auslegung und CFD-Berechnungen der HWL-Dosierstrecke.....	94
4.6.2	Fahrzeug- und Antriebsstrangsimulation .....	97
<b>5</b>	<b>Versuchsdurchführung und Potenzialbewertung .....</b>	<b>98</b>
5.1	Betrachtung der Einzelsysteme und Systemreaktionen .....	98
5.1.1	Einflüsse von Katalysatoren vor dem ATL auf das ECU-Verhalten .....	98
5.1.2	Thermodynamische Untersuchungen vor dem Abgasturbolader .....	103
5.1.3	Dynamikverhalten und eZV-Regelungskonzeptentwicklung.....	111
5.1.4	Umsatzverhalten der SCR-Katalysatoren.....	117
5.2	Systembetrachtung am simulierten Fahrzeug .....	124
5.2.1	Thermodynamische Bedingungen für die Abgaskatalyse.....	125
5.2.2	SCR-Umsatzverhalten der PTH-Systeme am EiL-Prüfstand .....	131
5.2.3	SCR-Volumenvariation vor dem ATL in Simulation und Versuch .....	139
5.2.4	Übergabebereich der SCR-Systeme und NH <sub>3</sub> -Verhalten .....	141
5.2.5	Energetische Betrachtung der Systeme .....	146
5.3	Systemische Bewertung der Ergebnisse .....	155
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>157</b>
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>159</b>

---

---

<b>Anhang.....</b>	<b>170</b>
A    Höhenprofile der Routen.....	170
B    BMWi Förderung.....	171
<b>Veröffentlichungen und Konferenzbeiträge im Rahmen dieser Arbeit.....</b>	<b>172</b>
<b>Verzeichnis studentischer Arbeiten im thematischen Rahmen dieser Arbeit ....</b>	<b>173</b>