
**Ansatz zur dynamischen Modellierung und kontinuierlichen Diagnose der
Stickoxidemission am Dieselmotor**

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

Dissertation

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Michael Fischer

aus Weiterstadt

Berichterstatter: Prof. Dr. techn. Christian Beidl
Mitberichterstatter: Prof. Dr. sc. techn. Thomas Koch
Tag der Einreichung: 27. Juni 2016
Tag der mündlichen Prüfung: 19. Oktober 2016

Darmstadt 2016

D17

Schriftenreihe des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen und
Fahrzeugantriebe

Band 5

Michael Fischer

**Ansatz zur dynamischen Modellierung
und kontinuierlichen Diagnose der
Stickoxidemission am Dieselmotor**

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag
Aachen 2016

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., 2016

Copyright Shaker Verlag 2016

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4923-7

ISSN 2365-3795

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

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

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit bei Honda R&D Europe (Deutschland) GmbH in Offenbach in Zusammenarbeit mit dem Institut für Verbrennungsmotoren und Fahrzeugantriebe der Technischen Universität Darmstadt.

Prof. Dr. techn. Christian Beidl, Leiter des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen und Fahrzeugantriebe an der Technischen Universität Darmstadt danke ich für die Betreuung dieser Dissertation. Vor allem die Gespräche zur Fokussierung der Arbeit waren sehr hilfreich und haben wesentlich zum Gelingen der Arbeit beigetragen. Bei Prof. Dr. sc. techn. Thomas Koch, Leiter des Instituts für Kolbenmaschinen am Karlsruher Institut für Technology bedanke ich mich herzlich für die Übernahme der Mitberichterstattung.

Auch möchte ich mich an dieser Stelle bei allen meinen Kolleginnen und Kollegen der Honda R&D Europe (Deutschland) GmbH für die hervorragende Arbeitsatmosphäre und die vielen wertvollen Fachgespräche bedanken. Mein besonderer Dank gilt Jörg Böttcher und Ulf Reinschmidt, die mir die Erstellung dieser Dissertation überhaupt erst ermöglicht und mich jederzeit unterstützt haben.

Mein besonderer Dank gilt meiner Familie, die die Grundlage für meine Ausbildung gelegt und mir das Studium ermöglicht hat. Nicht genug danken kann ich meiner Frau Angelika, die mich jederzeit unterstützt und mir den Rücken freigehalten hat, auch wenn viele Abende, Wochenenden und Urlaubstage für die Fertigstellung der Dissertation notwendig waren.

Darmstadt im Juni 2016

Michael Fischer

Für Dominik



Kurzfassung

Dieselmotoren haben einen signifikanten Beitrag zur Reduktion der Treibhausgasemissionen des Straßenverkehrs geleistet. Gleichzeitig konnten die Abgasemissionen seit Einführung von gesetzlichen Grenzwerten drastisch reduziert werden. Vor allem die Emissionen von unverbrannten Kohlenwasserstoffen, Kohlenmonoxid und Rußpartikeln spielen heute durch moderne Abgasnachbehandlungssysteme und optimierte Brennverfahren praktisch keine Rolle mehr. Die Emission von Stickoxiden ist trotz großer Fortschritte der Brennverfahren allerdings immer noch ein großes Problem des Dieselmotors. Die von der EU festgelegten Grenzwerte für die Luftqualität in Städten (Immission) werden europaweit an vielen Messstationen deutlich überschritten, was zu einem Großteil dem Dieselmotor zugeschrieben werden kann.

Ein wesentlicher Grund hierfür ist die deutlich höhere Stickoxidemission von Dieselmotoren unter realen Fahrbedingungen im Vergleich zum Labortest, der für die Zertifizierung vorgeschrieben ist. Im Realbetrieb liegt diese meist um ein Vielfaches über dem gesetzlichen Grenzwert. Zusätzlich hat der *Dieselgate-Skandal* um Volkswagen deutlich gemacht, dass eine Überprüfung der Fahrzeugemissionen im realen Betrieb notwendig ist, um die Luftqualität in den Städten zu verbessern. Daher wird in Zukunft die Einhaltung der Emissionsgrenzwerte im normalen Straßenverkehr mit mobiler Messtechnik überprüft. Diese Testprozedur stellt eine große Herausforderung für die Fahrzeugentwicklung dar, weil die Einhaltung der Emissionen unter allen Fahrbedingungen garantiert werden muss.

Um dieses anspruchsvolle Ziel zu erreichen, muss sowohl die Rohemission durch Optimierung innermotorischer Maßnahmen reduziert werden, als auch eine leistungsfähige Abgasnachbehandlung der Stickoxide erfolgen. Hierbei spielt die Regelung von Verbrennung und Abgasnachbehandlung eine entscheidende Rolle. Für diese immer komplexeren Regelungen werden in Zukunft vermehrt Modelle verwendet, die hohen Ansprüchen an Genauigkeit, Robustheit und Echtzeitfähigkeit genügen müssen. Vor allem die Regelung und Überwachung der Abgasrückführung nimmt eine Schlüsselrolle für die Motorrohmission an Stickoxiden ein, deren Kenntnis ist wiederum essenziell für die effiziente Regelung der Abgasnachbehandlung.

Um einen Beitrag zur Lösung der beschriebenen Herausforderungen zu leisten, wird in vorliegender Arbeit eine Methodik vorgestellt, mit der sowohl die Stickoxidemission als auch die Abgasrückführrate im dynamischen Motorbetrieb modelliert wird. Die erstellten Modelle können in der Motor-ECU als echtzeitfähiger, virtueller Sensor für die Regelung von Verbrennung und Abgasnachbehandlung verwendet werden. Als Modellierungsansatz werden selbstorganisierende Merkmalskarten (Kohonen Maps) mit lokal linearen Modellen kombiniert, um die Vorteile von nicht-überwachter Mustererkennung und überwachtem Lernen zu vereinen. Weiterhin wird ein alternativer Ansatz zur Modellierung des dynamischen Motorbetriebs vorgestellt, der rein auf gemessenen Fahrprofilen basiert und keine zusätzlichen Modelleingänge zur Repräsentation der Dynamik benötigt. In den erzeugten Trainingsdaten ist die Dynamik implizit enthalten und wird über Parameterkombinationen repräsentiert, die stationär nicht auftreten. Es wird gezeigt, dass mit der entwickelten Methodik Modelle erzeugt werden, deren Genauigkeit anderen dynamischen Modellen überlegen ist, sofern die Auswahl der Eingangsparameter und die Zusammenstellung der Trainingsdaten der vorgestellten Methodik folgt. Die Verwendung der dynamischen Modelle erlaubt es, entweder reale Sensoren zu ersetzen und damit Kosten zu senken, oder neue Regelungskonzepte zu realisieren, die bisher aus Mangel an genügend genauen Modellen oder realen Sensoren nicht umsetzbar waren.

Ziel dieser Arbeit ist die Bereitstellung der Modelle für Abgasrückführrate und Stickoxidemission für die Motor- und Abgasnachbehandlungsregelung, sowie die Beschreibung der zu verwendenden Methodik. Neue Regelungskonzepte unter Verwendung der Modelle als virtuelle Sensoren werden ebenfalls angesprochen, sind jedoch nicht Gegenstand vorliegender Arbeit.

Im zweiten Teil der Arbeit werden Kohonen Maps mit statistischen Verfahren kombiniert, um die immer höheren Anforderungen der On-Board-Diagnose (OBD) zu erfüllen. Am Beispiel der Fehlererkennung und -diagnose des Abgasrückführsystems wird gezeigt, dass mit der entwickelten Methodik Fehler detektiert werden können, bevor die Emission über die OBD-Grenzwerte ansteigt. Das Verfahren benötigt keine speziellen Motorbetriebspunkte zur Systemüberprüfung, sondern läuft während des normalen Motorbetriebs, sodass ein kontinuierliches Diagnosesignal zur Verfügung steht. Durch die

Erweiterung der Fehlererkennung mit weiteren Kohonen Maps, die auf spezifische Fehler trainiert wurden, kann außerdem eine Fehlerdiagnose erfolgen und somit die Ursache einer Fehlfunktion identifiziert werden.

Abschließend wird die Übertragbarkeit der entwickelten Methodik auf Dieselhybridfahrzeuge untersucht, da in Zukunft mit einer steigenden Elektrifizierung des Antriebsstrangs zu rechnen ist. Je nach Auslegung der Betriebsstrategie haben die einzelnen Hybridfunktionen sowohl positive, als auch negative Auswirkungen auf die Modellierbarkeit der Stickoxide und der Abgasrückführung. Es wird jedoch gezeigt, dass bei geeigneter Auslegung der Betriebsstrategie sogar eine verbesserte Genauigkeit der Modellierung erreicht werden kann. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass die Hybridisierung eine geringere Dynamik des Verbrennungsmotors erlaubt, die sich positiv auf die Stickoxidemission und die Regelung der Abgasrückführung auswirkt. Auch für die Fehlererkennung und -diagnose von Dieselhybridfahrzeugen hat die vorgestellte Methode einige Vorteile gegenüber konventionellen Methoden, da eine kontinuierliche Überwachung erfolgt und somit keine Abhängigkeit von speziellen Motorbetriebspunkten vorliegt.



Abstract

Diesel engines are an essential contributor for the reduction of greenhouse gas emissions in transport. Also the tailpipe emissions of toxic components have been greatly reduced due to the introduction of emission limits and corresponding test procedures. Especially the emission of unburned hydrocarbons, carbon monoxide and soot particles no longer play a significant role. Advanced combustion and exhaust aftertreatment technologies have reduced these emission components to virtually zero. Nevertheless, the emission of nitrogen oxides is still an unsolved problem for the diesel engine. Air quality limits of the EU are still violated at many measurement sites where the influence of diesel engine emissions is significant.

The main reason for violation of air quality limits is the fact that real driving conditions produce higher NO_x emissions compared to laboratory tests required for certification. Especially Volkswagen's "Dieselgate-Scandal" has made it clear that tailpipe emissions have to be tested on the road with mobile measurement systems to improve the air quality in the cities. This new test procedure will be a major challenge for the engine and vehicle development because a very low emission level will be required at a wide range of operating conditions.

To achieve this ambitious target an optimization of the engine out emission as well as a reduction of nitrogen oxides by aftertreatment technologies is necessary. The control of combustion and exhaust aftertreatment plays a crucial role for low emissions and accurate real time models are required for these controls. One of the most important items is the control and diagnosis of the *exhaust gas recirculation system* (EGR), because the impact on NO_x -emissions is very high. Additionally the NO_x -concentration must be determined online in order to guarantee an efficient aftertreatment.

The methodology described in this thesis should contribute to realise low real driving emissions by modeling the NO_x -emission and EGR-rate at transient conditions. The developed models can be used by the engine ECU as virtual sensor to control combustion and exhaust aftertreatment. Self-Organizing Maps (Kohonen Maps) are combined with local linear models to make use of the individual advantages of non-supervised pattern recognition and supervised

learning. A new approach for the modeling of dynamic engine effects is presented which only uses data from real test drives. Unlike other approaches for dynamic modeling, no additional model inputs are required to represent dynamic behavior. The dynamic behavior is represented by specific parameter combinations which are not possible at steady state conditions. It will be shown that the developed models are superior to other dynamic models if the input parameters are selected correctly and if the training data is prepared as described in this method. Real sensors can be replaced by the dynamic models which would result in a cost-saving. Additionally it becomes possible to realise advanced control functions which rely on accurate real-time models.

The target of this thesis is creation of dynamic real-time models for EGR and NO_x for the engine and aftertreatment control as well as a description of the methodology. Although not explored in detail for this thesis, new control concepts using these models as virtual sensors are described briefly.

The second part combines Kohonen Maps with statistical measures to realise an *On-Board-Diagnosis* (OBD) of the EGR-System. It could be demonstrated that the developed methodology is able to detect system faults even before the OBD-limit for NO_x is violated. No specific operation points of the engine are required to perform these OBD-checks. The diagnosis runs during normal vehicle operation, so a continuous diagnosis signal is available. By extension of the fault detection it is possible to pinpoint the malfunction if additional Kohonen Maps are trained on specific malfunctions.

Finally the applicability of the developed methodology to diesel hybrid powertrains is investigated since powertrain electrification is expected to become very important to achieve future CO_2 emission targets. The different hybrid functions can have either positive or negative effects on the modeling of NO_x and EGR, depending on the operation strategy. An even higher model accuracy is expected assuming a reasonable operation strategy. This is mainly due to the fact that reduced transient operation of the engine is beneficial for NO_x and EGR control. The developed methodology has also significant advantages for fault detection and diagnosis of diesel hybrid powertrains, because a continuously diagnosis could be realised without input of further specific engine operation points.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	I
Kurzfassung	III
Abstract	VII
Inhaltsverzeichnis	IX
Abbildungsverzeichnis	XIII
Tabellenverzeichnis	XIX
Abkürzungsverzeichnis	XXI
Verzeichnis der Formelzeichen	XXV
1. Einleitung	1
1.1. Bedeutung des Dieselmotors	1
1.2. Stickoxide und ihre Wirkung	2
1.3. Luftqualität und Luftreinhaltung	4
1.4. Abgasgesetzgebung in Europa und USA	12
1.4.1. Testzyklen und -prozeduren.....	15
1.4.2. Grenzwerte	20
1.4.3. On-Board-Diagnose	23
2. Stand der Technik	27
2.1. Schadstoffbildung	27
2.1.1. Thermisches NO.....	30
2.1.2. Promptes NO.....	33
2.1.3. Brennstoff NO.....	33
2.1.4. N ₂ O-Mechanismus	34
2.2. Schadstoffreduktion	34
2.2.1. Innermotorische Maßnahmen	34
2.2.2. Abgasnachbehandlung.....	42
2.3. Modellierung motorischer Vorgänge	54
2.3.1. Physikalisch basierte Modelle	59
2.3.2. Semi-physikalische Modelle	61
2.3.3. Empirische Modelle.....	62
2.3.4. Anwendbarkeit der Modelle im Entwicklungsprozess und zur Motorregelung	78

3. Abgrenzung und Aufgabenstellung	79
4. Versuchsaufbau	81
5. Neue Methodik zur dynamischen Modellierung von NO_x und AGR	85
5.1. Das Selector-Estimator Konzept	86
5.1.1. Selbstorganisierende Merkmalskarten	86
5.1.2. Erweiterung von SOM durch lokal lineare Modelle	90
5.2. Methodisches Vorgehen zur Modellierung	93
5.2.1. Neuer Ansatz zur Modellierung dynamischer Effekte	93
5.2.2. Optimierung der Parameterauswahl	95
5.2.3. Regeln zur Erzeugung geeigneter Trainingsdaten	99
5.2.4. Vorbehandlung der erzeugten Trainingsdaten	103
5.2.5. Beschreibung und Eigenschaften des Trainingsprozesses	105
5.2.6. Validierung der Modellqualität	106
5.3. Eigenschaften und Vorteile der entwickelten Methodik	108
6. Anwendung der Methodik zur Modellierung des dynamischen Motorbetriebs	109
6.1. Dynamische Modellierung der Stickoxidemission	109
6.1.1. Bedeutung von NO _x -Modellen für die Regelung von Motor und Abgasnachbehandlung	109
6.1.2. NO _x -Modelle aus der Literatur	112
6.1.3. Bestimmung der relevanten Einflussparameter für die NO _x -Modellierung	118
6.1.4. Ergebnisse und Genauigkeit der NO _x -Modellierung	123
6.2. Dynamische Modellierung der Abgasrückführung	131
6.2.1. AGR-Regelungskonzepte	132
6.2.2. AGR-Modelle aus der Literatur	137
6.2.3. Wechselwirkungen zwischen Luftverhältnis und AGR	139
6.2.4. Bestimmung der relevanten Einflussparameter für die AGR-Modellierung	141
6.2.5. Ergebnisse und Genauigkeit der AGR-Modellierung	143
6.3. Integration der entwickelten Modelle in die Regelung von Verbrennung und Abgasnachbehandlung	150
7. Anwendung der Methodik zur On-Board-Diagnose des AGR-Systems ...	153
7.1. Konventionelle Methoden zur Fehlererkennung und -diagnose	153
7.1.1. Fehlererkennung	156
7.1.2. Fehlerdiagnose	159
7.2. Erweiterung der SOM-Methodik durch statistische Verfahren	161
7.3. Fehlfunktionen im AGR-System	165

7.4.	Ergebnisse und Genauigkeit der Fehlererkennung.....	168
7.5.	Erweiterte Methodik zur Fehlerdiagnose	174
8.	Übertragbarkeit auf Dieselhybridantriebe	177
8.1.	Bedeutung der Elektrifizierung	177
8.2.	Besonderheiten des verbrennungsmotorischen Betriebs von Hybridantrieben .	179
8.2.1.	Start-Stopp-Funktion.....	180
8.2.2.	Rekuperation	182
8.2.3.	Lastpunktverschiebung	182
8.2.4.	Elektrischer Boost	184
8.2.5.	Elektrisches Fahren	184
8.2.6.	Betriebsstrategien für Dieselhybridantriebe	185
8.3.	Auswirkungen der Hybridfunktionen auf die Modellierbarkeit	188
8.3.1.	Potentiale der Hybridisierung zur Optimierung der NO _x -Modellierung	188
8.3.2.	Potentiale der Hybridisierung zur Optimierung der AGR-Modellierung.....	189
8.3.3.	Auswirkungen der Hybridisierung auf Fehlererkennung und -diagnose	191
9.	Zusammenfassung	193
	Literatur.....	197