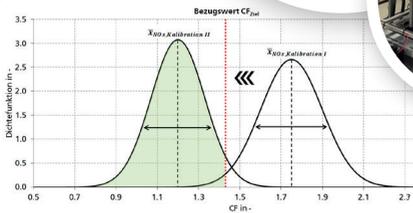
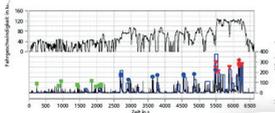


Beitrag zur methodenbasierten Bewertung und Absicherung der Realfahremissionen in der Entwicklung von Fahrzeugantrieben



Beitrag zur methodenbasierten Bewertung und Absicherung der Realfahremissionen in der Entwicklung von Fahrzeugantrieben

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

Dissertation

vorgelegt von

Henning Nies, M.Sc.

aus Braunschweig

Berichterstatter: Prof. Dr. techn. Christian Beidl
Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Michael Günthner
Tag der Einreichung: 25.01.2022
Tag der mündlichen Prüfung: 20.04.2022

Darmstadt 2022

D17



Schriftenreihe des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen und
Fahrzeugantriebe

Band 24

Henning Nies

**Beitrag zur methodenbasierten Bewertung
und Absicherung der Realfahremissionen
in der Entwicklung von Fahrzeugantrieben**

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag
Düren 2022

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., 2022

Copyright Shaker Verlag 2022

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8623-2

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 meine Familie





Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Anstellung als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Fahrzeugantriebe (VKM) der Technischen Universität Darmstadt.

Für die Möglichkeit der Promotion und das mir entgegengebrachte Vertrauen danke ich meinem Doktorvater und Fachgebietsleiter Herrn Prof. Dr. techn. Christian Beidl sehr herzlich. Die fachliche Betreuung und Unterstützung mit wertvollen Ratschlägen und kritischen Nachschärfungen in zahlreichen Diskussionen haben maßgeblich zu dieser Arbeit beigetragen.

Ebenso danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Günthner ausdrücklich für die interessierte und offene Übernahme des Korreferats meiner Arbeit.

Meinen Kolleginnen und Kollegen am Fachgebiet gilt überdies ein besonderer Dank. Ob im Büro, in der Werkstatt, im Elektronikbüro oder am Prüfstand: es waren stets die kollegiale Zusammenarbeit und der persönliche Zusammenhalt, geprägt von Vertrauen, gegenseitiger Unterstützung, fachlicher Diskussion und auch Spaß, die zu einem sehr angenehmen Arbeitsumfeld beitrugen. Dies werde ich stets in bester Erinnerung behalten. Mein besonderer Dank gilt den Herren Tim Steinhaus, Sascha Bauer sowie Alexander Mokros für die gegenseitige Motivation und Unterstützung in der Entstehungsphase dieser Arbeit sowie unserem Oberingenieur Herrn Dr. Bernd Lenzen für den zielführenden Austausch und die Unterstützung in der Projektarbeit. Herrn Christoph Halscheidt danke ich für sein unermüdliches Engagement im Prüffeld und Frau Renate Schreiber ist für ihre administrative Unterstützung jeglicher Art zu danken.

Einen ganz wesentlichen Beitrag zur Entstehung der vorliegenden Arbeit haben alle Studierenden geleistet, die ich in Abschlussarbeiten oder als studentische Hilfskräfte betreuen durfte. In einer sehr fruchtbaren und intensiven Zusammenarbeit ist die Grundlage für diese Arbeit entstanden. Ihnen allen gilt mein ausdrücklicher Dank. Besonders bedanken möchte ich mich bei den Herren Norman Dietz und Maximilian Liebler.

Herzlich danke ich zudem Herrn Deniz Serifsoy für seine Unterstützung und die stets angenehme Zusammenarbeit.

Mein abschließender Dank gilt meiner Lebensgefährtin Astrid, meiner Mutter Margot und meiner ganzen Familie. Ohne eure bedingungslose Unterstützung, euer Vertrauen und euer großes Verständnis wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.

Darmstadt, im Januar 2022
Henning Nies



Kurzfassung

Die Rolle verbrennungsmotorischer Fahrzeugantriebe in privaten sowie kommerziellen, zukünftigen Mobilitätsanwendungen ist Inhalt intensiv geführter Diskussionen auf politischer und gesellschaftlicher Ebene, im europäischen sowie im internationalen Kontext. Die Forderung nach CO_2 -Neutralität, die zukünftigen Niedrigstleistungsstandards sowie die regulatorischen Anpassungen von Homologationsprozeduren stellen hierbei maßgebliche Aspekte dar. In der industriellen Antriebsentwicklung erfordern diese Anforderungen eine methodische Neuausrichtung von etablierten Entwicklungs- und Validierungsverfahren in einem Spannungsfeld aus regulatorischen Vorgaben, Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit. Dies gilt insbesondere hinsichtlich des Emissionsverhaltens für Fahrzeugantriebe mit Verbrennungsmotor.

Der Wechsel auf die öffentliche Straße zur Bewertung der Realfahrmissionen von Fahrzeugen (engl.: Real Driving Emissions, RDE) stellt diesbezüglich aufgrund von stochastischen Einflussgrößen sowie durch die gesteigerte Anzahl emissionskonform zu applizierender Betriebszustände und den Wegfall einer definierten Optimierungsgrundlage eine große Unsicherheit im Entwicklungsprozess dar. Eine individuelle Systembetrachtung und eine Kritikalitätsbewertung des Emissionsverhaltens von Fahrzeugantrieben bereits in frühen Entwicklungsphasen sind daher unumgänglich.

In der vorliegenden Arbeit wird ein methodischer Entwicklungsansatz vorgestellt, der dieses ermöglicht. Dazu werden, gegliedert in drei Hauptprozessen, Ansätze zur konzeptspezifischen Bereitstellung, zur variablen Anwendung sowie zur RDE-fokussierten Bewertung synthetischer Testszenarien definiert. Diese Testszenarien adressieren in verschiedenartigen Ausprägungen von sogenannten „Most-Relevant-Tests“ das methodisch als kritisch identifizierte, RDE-relevante Emissionsverhalten des Antriebssystems. Sie unterstützen so in ihrer Anwendung an Entwicklungsprüfständen die Prozesse der Motorkalibration und die Absicherung der Emissionskonformität. Es wird dazu ein neuartiger Ansatz zur statistischen Bewertung des Vertrauensbereichs des Emissionsverhaltens hinsichtlich entwickelter RDE-Zielerreichungskriterien vorgestellt.

Die Validierung der entwickelten Prozesse erfolgt für zwei Versuchsträger aus dieselmotorischen Nutzfahrzeuganwendungen in den Entwicklungsumgebungen eines Fahrzeug-Rollenprüfstands sowie eines Motorenprüfstands. Die Vorteile der entwickelten Methodik im Vergleich zu konventionellen Entwicklungsansätzen werden aufgezeigt und auch im Übertrag auf eine ottomotorische Fahrzeuganwendung bestätigt. Die Adressierung antriebsindividueller, emissionskritischer Schwachstellen sowie die Quantifizierung der Sicherheit der emissionsseitigen Einhaltung vorgeschriebener Grenzwerte ermöglichen somit eine Bewertung des Fortschritts im Entwicklungsprozess und können Kosten- und Effizienzpotentiale generieren.



Abstract

The role of powertrain systems with internal combustion engines in the future of private and commercial mobility applications is the subject of intensive discussions on the political and social level in the European and international context. The key aspects are the demand for CO_2 neutrality, future ultra-low emission standards and regulatory adjustments to homologation procedures. For the industrial powertrain development, these requirements necessitate a methodical realignment of established development and validation processes in an area of tension between regulatory requirements, economic efficiency and sustainability. This particularly applies to the emission behaviour of powertrain systems with internal combustion engines.

Using the public road for evaluating the real driving emissions (RDE) compliance of vehicles, represents a great uncertainty in the development process due to stochastic influences, the increased number of operating conditions to be applied in an emission-compliant manner, as well as the elimination of a defined basis for optimization. An individual system assessment and a criticality evaluation of the emission behaviour of vehicle powertrains systems in early development phases is therefore essential.

In the thesis at hand, a methodical development approach is presented that makes this possible. For this purpose, methodical approaches, that are divided into three main processes, are defined for the powertrain-specific generation, the variable application and the RDE-focused evaluation of synthetic test scenarios. In various forms of so-called "Most-Relevant-Tests", these test scenarios address the methodically identified critical, RDE-relevant emission behaviour of the system under investigation and thus support the engine calibration processes and the validation of emission compliance in their application on development test benches. Therefore a novel approach for the statistical evaluation of the confidence level of the systems emission behaviour with regard to defined RDE engineering target criteria is presented.

The validation of the developed processes is carried out for two use-cases of commercial diesel engine vehicle applications in the development environments of a vehicle chassis dynamometer and an engine test bench. The advantages of the developed methodology compared to conventional generic development approaches are demonstrated and also confirmed in transfer to a gasoline engine vehicle application. The targeted addressing of powertrain-specific and emission-critical weak points, as well as the quantification of the confidence level of the emission compliance with prescribed legislative limits, enable an evaluation of the progress of development and can thus generate cost- and efficiency potentials.



Inhaltsverzeichnis

Vorwort	i
Kurzfassung	iii
Abstract	v
Inhaltsverzeichnis	vii
Abbildungsverzeichnis	xi
Tabellenverzeichnis	xv
Formelverzeichnis	xvii
Abkürzungsverzeichnis	xix
Verzeichnis der Formelzeichen und Indizes	xxiii
1 Einleitung und Motivation.....	1
2 Grundlagen und Stand der Technik	3
2.1 Abgasemissionen verbrennungsmotorischer Fahrzeugantriebe.....	3
2.1.1 Abgaskomponenten und ihre Entstehung.....	3
2.1.2 Maßnahmen zur Schadstoffreduktion	11
2.2 Europäische Gesetzgebung zur Emissionsreglementierung.....	22
2.2.1 Reglementierung der Schadstoff- und CO ₂ -Emissionen	22
2.2.2 Zertifizierung und Fahrzeughomologation	24
2.2.3 Real Driving Emissions-Gesetzgebung.....	27
2.2.4 Stand der Diskussion zu zukünftigen Vorgaben	37
2.3 Entwicklungsprozesse und Methoden in der Antriebsentwicklung	43
2.3.1 Entwicklungsziele und Strategien	44
2.3.2 Test- und Entwicklungsumgebungen	48
2.3.3 Methodische Entwicklungsansätze für RDE	51
3 Zielsetzung der Arbeit und Methodik des Vorgehens	59

3.1	Konkretisierung der Problemstellung.....	59
3.2	Zielsetzung der Arbeit.....	61
3.3	Methodik des Vorgehens.....	62
4	Methodik zur Emissionsbewertung und -absicherung in der Antriebsentwicklung.....	63
4.1	Einordnung und Übersicht der RDE-Entwicklungsmethodik	63
4.2	Module und Prozesse der RDE-Entwicklungsmethodik	69
4.2.1	Datenaufbereitung.....	69
4.2.2	Identifikation des emissionskritischen Antriebsstrangverhaltens	72
4.2.3	Generierung konzeptspezifischer Most-Relevant-Tests	96
4.2.4	Anwendung von Most-Relevant-Tests in Entwicklungsprozessen....	107
4.2.5	Bewertung des Entwicklungsfortschritts	111
4.3	Implementierung der RDE-Entwicklungsmethodik	118
4.3.1	Softwareumgebungen	119
4.3.2	Versuchsträger.....	120
4.3.3	Prüfstandumgebungen und Abgasmesstechnik	121
5	Anwendung und Validierung der RDE-Entwicklungsmethodik.....	127
5.1	Anwendungsszenarien und Datengrundlage	127
5.2	Prozessanwendung zur Testbereitstellung	129
5.2.1	Erstellung der Eventdatenbanken.....	130
5.2.2	Generierung konzeptspezifischer Most-Relevant-Tests	135
5.3	Prozessvalidierung der Testanwendung	141
5.3.1	Testanwendung zur Emissionskalibration.....	141
5.3.2	Bewertung der Testergebnisse.....	145
5.4	Prozessvalidierung der Fortschrittsbewertung	151
5.4.1	Bewertung der Sicherheit der Emissionskonformität	152
5.4.2	Fazit und Anwendungspotentiale im Entwicklungskontext.....	158
5.5	Übertragbarkeit der methodischen Ansätze	160
6	Zusammenfassung und Ausblick	163

Anhang	167
A Überprüfung der Untersuchungsmerkmale auf Normalverteilung	167
A.1 Überprüfung der synthetisch generierten MRT _{Validierung} (Roh-Signal)	167
A.2 Überprüfung der vermessenen MRT _{Validierung} (Kalibration I)	167
A.3 Überprüfung der vermessenen MRT _{Validierung} (Kalibration II)	167
B Eigenschaften der synthetisch generierten MRT _{Validierung}	168
B.1 Fahr-dynamikbewertung	168
B.2 Topologische Eigenschaften	169
C Versuchsträger Ottomotor	170
Literaturverzeichnis	171