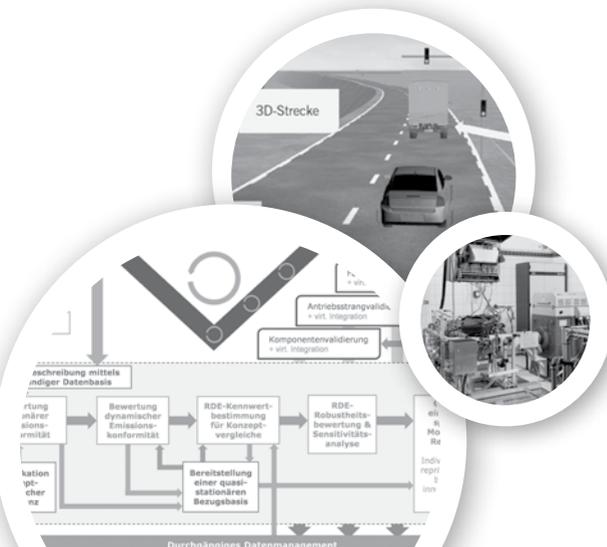


Systematische Bewertung verbrennungsmotorischer Antriebssysteme hinsichtlich ihrer Realfahrtemissionen am Motorenprüfstand



Systematische Bewertung verbrennungsmotorischer Antriebssysteme hinsichtlich ihrer Realfahrtemissionen am Motorenprüfstand

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

Dissertation

von

Hauke Maschmeyer, M.Sc.

aus Darmstadt

Berichterstatter: Prof. Dr. techn. Christian Beidl
Mitberichterstatter: Prof. Dr. techn. Helmut Eichlseder
Tag der Einreichung: 24.10.2017
Tag der mündlichen Prüfung: 19.12.2017

Darmstadt 2017

D17



Schriftenreihe des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen und
Fahrzeugantriebe

Band 9

Hauke Maschmeyer

**Systematische Bewertung verbrennungsmotorischer
Antriebssysteme hinsichtlich ihrer
Realfahrtemissionen am Motorenprüfstand**

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag
Aachen 2018

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., 2017

Copyright Shaker Verlag 2018

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5803-1

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 des Autors

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Fahrzeuantriebe der Technischen Universität Darmstadt. Ich danke besonders meinem Doktorvater und Institutsleiter Herrn Prof. Dr.techn. Christian Beidl für die Möglichkeit zu promovieren und in einem äußerst spannenden, vielschichtigen Umfeld an Zukunftsfragen mitarbeiten zu können. Den Freiraum sowohl im Projekt als auch am eigenen Prüfstand sich selbstständig verwirklichen zu können, wusste ich stets als eine Besonderheit der Promotion zu schätzen. Die fachlichen Diskussionen und insbesondere das Nachschärfen der Kernaussagen haben wesentlich zum Gelingen der Arbeit beigetragen.

Herrn Prof. Dr.techn. Helmut Eichlseder danke ich für die schnelle und offene Übernahme des Korreferats, seinem Interesse an der Arbeit, sowie für die wertvollen inhaltlichen Vorschläge.

Einen essenziellen Anteil an der Erstellung dieser Dissertation haben die fantastischen Kollegen am Institut und der durch sie entstehende tolle Arbeitsalltag. Die Arbeitsatmosphäre war stets geprägt von Offenheit, der Bemühung sich gegenseitig zu unterstützen, gemeinsam Probleme zu diskutieren und Lösungen zu finden. Viel Humor und einige gut platzierte lustige Sprüche haben so manch problembehafteten Tag immer wieder in ein positives Licht gerückt, sodass in Summe viel gelacht wurde. Besonders bedanken möchte ich mich bei Christoph Halscheidt für seine unermüdliche Unterstützung in allen elektrischen und elektronischen Fragestellungen sowie bei Renate Schreiber, die stets ein offenes Ohr für mich hatte und mir bei administrativen Angelegenheiten und der Organisation diverser Veranstaltungen zur Seite stand.

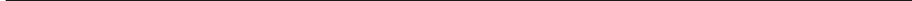
Neben den Kollegen waren die vielen Studenten ein wichtiger Teil der schönen Zeit am Institut. Allen von mir betreuten Studenten, die durch ihre wissenschaftlichen Arbeiten wesentliche Teile dieser Arbeit und das „Team Box3 Links“ geprägt haben, möchte ich explizit danken! Besondere Erwähnung gebührt dabei meinen beiden langjährigen Hiwis Alexander Meier und Marvin Stoeckel, die stets halfen, die wiederkehrenden Herausforderungen des Prüfstandalltags zu meistern, verschiedenste Veranstaltungen zu organisieren und lange Messserien zu ermöglichen.

Für das unermüdliche Korrekturlesen dieser Arbeit und die vielen inhaltlichen Ratschläge und Diskussionen danke ich herzlich Denise Homann und David Buch.

Zu guter Letzt gebührt mein Dank meiner Familie! Ihr habt mich stets auf meinem Weg unterstützt, mir das Studium ermöglicht und mit eurer Geduld, einem stets offenem Ohr und viel Verständnis in intensiven fünf Jahren diese Arbeit überhaupt erst möglich gemacht!

Darmstadt, im Oktober 2017

Hauke Maschmeyer



Abstract

As of September 2017, the Real Driving Emission Legislation (RDE) is in force and defines the shift of homologation from a cycle to a deliberately unspecified certification during a real-world test on the road. Until now, powertrain development has been focused on those cycles. The road as a new emission homologation environment had only a limited development share so far.

Per se, a real-world trip is influenced e.g. by weather, traffic and driver effects. This creates new challenges for the development. Firstly, extended operating ranges of the powertrain arise. Secondly, the unknown RDE-test is unpredictable. Thirdly, because of this arbitrariness, a clear reference test is lost as a prerequisite for comparisons and optimizations. The aim of this work is to find solutions for the challenges above. Approaches are mainly a systematic system stimulation and a concept-specifically prioritized emission assessment. Therefore, 5 new RDE main methods including associated RDE-KPIs are developed and structured in an RDE-sub process. This is applied to an engine testbed at VKM and the RDE-suitability of an example Otto-engine is evaluated. The sub process enables a holistic RDE-suitability assessment on two levels: firstly, at the component level, meaning the combustion engine assessment with load profiles in the operating point map, and secondly at the driving scenario level, meaning a powertrain assessment in interaction with a virtual real-world trip.

For the first level, the stationary emission behavior is compared with the RDE-limit. Without a RDE-typical vehicle and route representation, a statistical approach is used to convert the stationary behavior concept-specifically into g/km. Besides the operating point itself, emissions depend on the dynamics of the operating point change and the present engine state. In order to assess a dynamic emission conformity, DoE is used to analyze holistically and in a goal oriented way transient operating point ramps in different states throughout the entire operating point map.

For the second level of emission assessment, the engine is integrated into a virtual driving scenario using the engine-in-the-loop approach. The stationary and also dynamic emission characteristics previously evaluated in the operating point map are summarized in a further method by three new RDE-KPIs, which are determined by driving an RDE-compliant, digitized comparison cycle. By means of DoE parameterization of virtual real-world trips, the subsequent method measures holistically different drivers, routes etc. for a robustness analysis on the testbed and quantifies the emission variance. Finally for a development efficiency increase, in the last method, the extensive DoE trips are combined to form a Most-Relevant-Reference-Test, which can be used on productive testbeds for subsequent optimization steps.



Kurzfassung

Ab September 2017 gilt die Real Driving Emissions Gesetzgebung (RDE) und definiert den Homologationswechsel von einem Zyklus hin zu einer bewusst nicht näher definierten Zertifizierung während einer realen Straßennutzung. Die Antriebsstrangentwicklung ist bisher auf jene Zyklen fokussiert. Die Straße als neue Emissions-Homologationsumgebung hat also bisher nur begrenzten Anteil an der Entwicklung.

Eine Realfahrt unterliegt per se Strecken-, Wetter-, Verkehrs- und Fahrereinflüssen. So entstehen neue Herausforderungen für die Entwicklung. Erstens entstehen erweiterte Betriebsbereiche des Antriebsstrangs. Zweitens ist die unbekannte RDE-Prüfung nicht vorhersagbar. Drittens geht aufgrund dieser Willkür ein eindeutiger Referenztest als nötige Voraussetzung für Vergleiche und Optimierungen verloren. Ziel dieser Arbeit ist es Lösungen für obige Herausforderungen zu finden. Ansätze sind v.a. eine systematische Anregung und eine konzeptspezifisch priorisierte Emissionsbewertung. Daher werden u.a. 5 neue RDE-Hauptmethoden inklusiver dazugehöriger RDE-Kennwerte entwickelt und in einem RDE-Subprozess strukturiert. Dieser ist an einem Motorenprüfstand am VKM angewendet und so die RDE-Eignung eines Beispiel-Ottomotors bewertet. Der Prozess erlaubt eine ganzheitliche RDE-Eignungsbewertung auf zwei Ebenen: Erstens auf Komponentenebene und damit die Prüfung des Verbrennungsmotors mit Lastprofilen im Kennfeld und zweitens auf Fahrzenarioebene und somit eines Antriebsstranges in Wechselwirkung mit einer virtuellen Realfahrt.

Für die erste Ebene wird das stationäre Emissionsverhalten mit dem RDE-Limit verglichen. Ohne RDE-typischen Fahrzeug- und Streckenbezug wird durch einen statistischen Ansatz das stationäre Verhalten konzeptspezifisch in g/km umgerechnet. Die Emissionen hängen neben dem Betriebspunkt von der Dynamik des Durchfahrens und dabei anliegenden Motorzustand ab. Zur Bewertung einer dynamischen Emissionskonformität werden mittels DoE gezielt und vollständig transiente Betriebspunktrampen bei verschiedenen Zuständen im gesamten Kennfeld gefahren.

Für die zweite Ebene der Emissionsbewertung wird der Motor über den Engine-in-the-Loop-Ansatz in ein virtuelles Fahrzenario integriert. Das zuvor im Kennfeld bewertete stationäre aber auch dynamische Emissionsverhalten wird in einer weiteren Methode durch drei neue RDE-Kennwerte zusammengefasst, die durch das Fahren eines RDE-konformen, digitalisierten Vergleichszyklus bestimmt werden. Die Anschlussmethode vermisst dann durch DoE-Parametrierung virtueller Realfahrten holistisch verschiedene Fahrer, Strecken etc. für eine Robustheitsanalyse automatisiert am Prüfstand und quantifiziert die Emissionssteuerung. Zuletzt werden in der letzten Methode zur Effizienzsteigerung die umfangreichen DoE-Fahrten zu einen Most-Relevant-Referenztest zusammengefasst, der auf Produktivprüfständen für anschließende Optimierungsschritte verwendbar ist.



Inhaltsverzeichnis

Vorwort des Autors.....	i
Abstract	iii
Kurzfassung.....	v
Inhaltsverzeichnis.....	vii
Abbildungsverzeichnis.....	xi
Tabellenverzeichnis	xvii
Formelverzeichnis	xix
Abkürzungsverzeichnis.....	xxi
Verzeichnis der Formelzeichen und Indizes	xxiii
1 Einleitung und Motivation	1
2 Grundlagen und Stand der Technik.....	3
2.1 Ziele für die Entwicklung eines Antriebsstrangs.....	3
2.2 (Engine-in-the-Loop) Motorenprüfstand	4
2.3 Statistische Versuchsplanung.....	6
2.4 Emissionsentstehung im Ottomotor	11
2.5 Gesetzgebung und Homologation.....	16
2.6 Real-Driving-Emissions-Gesetzgebung	18
2.6.1 Zusammenfassung der RDE-Prozedur	18
2.6.2 RDE Post-processing	20
2.7 Stand der Technik zur Entwicklungsmethodik für RDE.....	22
2.7.1 Fahrzeugmessungen mit PEMS	23
2.7.2 RDE-Methodik für frühe Entwicklungsphasen.....	23
2.7.3 Reproduktion von Realfahrten.....	25
2.7.4 Zyklusgeführter Prüfstand	26
2.7.1 X-in-the-Loop-Prüfstände	28

2.7.2	RDE-Simulation.....	29
2.7.3	Zusammenfassung.....	32
3	Zielsetzung der Arbeit und Methodik des Vorgehens	33
3.1	Konkretisierung der Problemstellung	33
3.2	Ziele der Arbeit	35
3.3	Methodik des Vorgehens	36
4	RDE in der Entwicklung: Herausforderungen und Schlussfolgerungen	38
4.1	Neue Herausforderungen durch RDE	38
4.2	Generische, technische Anforderungen an Antriebsstränge für RDE.....	47
4.3	Schlussfolgerungen zur Entwicklungsmethodik für RDE	48
5	Entwicklungsumgebungsauswahl und Definition neuer Methodik	51
5.1	Prozess zur Hybridantriebsstrang- und Betriebsstrategieentwicklung.....	51
5.2	Gegenüberstellung und Auswahl der Entwicklungsumgebung	55
5.2.1	Simulative Ansätze	56
5.2.2	Sollwertgeführter Motorenprüfstand.....	57
5.2.3	Engine-in-the-Loop-Motorenprüfstand	58
5.2.4	Antriebsstrang- und Rollenprüfstand.....	60
5.2.5	Fahrzeugtests auf der Straße.....	62
5.2.6	Bewertung der Entwicklungsumgebungen und -ansätze.....	63
5.3	Aufbau der Versuchsumgebung zur Methodikentwicklung	66
5.4	Neue RDE-Methodik für den Motorenprüfstand	68
6	Systematische Realfahrtemissionsbewertung im Kennfeld	74
6.1	Hilfsmodul Systembeschreibung mittels vollständiger Datenbasis	74
6.1.1	Konzept und Abgrenzung der Methode	74
6.1.2	Ableitung der Systembeschreibung.....	75
6.1.3	Modulzusammenfassung und -bewertung	77
6.2	Hilfsmodul Identifikation konzeptspezifischer Relevanz.....	77
6.2.1	Konzept und Abgrenzung der Methode	78
6.2.2	Realfahrtstatistik der Stationärpunkte.....	79

6.2.3	Realfahrtstatistik dynamischer Manöver	82
6.2.4	Modulzusammenfassung und -bewertung.....	83
6.3	Hauptmodul Bewertung stationärer Emissionskonformität	84
6.3.1	Konzept und Abgrenzung der Methode.....	85
6.3.2	Definition RDE-Kennwerte des Stationärverhaltens	86
6.3.3	Bewertung des Beispielmotors	88
6.3.4	Modulzusammenfassung und -bewertung.....	90
6.4	Hilfsmodul Bereitstellung einer quasi-stationären Bezugsbasis	91
6.4.1	Konzept und Abgrenzung der Methode.....	91
6.4.1	Modellintegration in Simulation und Post-processing	93
6.4.2	Validierung der stationären Emissionsmodelle.....	94
6.4.3	Modulzusammenfassung und -bewertung.....	100
6.5	Hauptmodul Bewertung dynamischer Emissionskonformität	100
6.5.1	Konzept und Abgrenzung der Methode.....	100
6.5.2	Notwendigkeit der Zustandsbewertung	102
6.5.3	Gezielte Anregung von Zustand und Dynamik.....	106
6.5.4	Sicherstellen einer synchronisierten Auswertung	113
6.5.5	Identifikation kritischer Rampen.....	117
6.5.6	Priorisierung für eine Optimierung	123
6.5.7	Modellbasierte Auswertung und Sensitivitätsanalyse	126
6.5.8	Modulzusammenfassung und -bewertung.....	129
7	Systematische Realfahrtemissionsbewertung im virtuellen Fahrzenario .	131
7.1	Hauptmodul RDE-Kennwertbestimmung für Konzeptvergleiche	131
7.1.1	Konzept und Abgrenzung der Methode.....	131
7.1.2	Ableitung der RDE-Kennwerte	132
7.1.3	Modulzusammenfassung und -bewertung.....	136
7.2	Hauptmodul RDE-Robustheitsbewertung & Sensitivitätsanalyse.....	137
7.2.1	Konzept und Abgrenzung der Methode.....	138
7.2.2	Versuchsplanung.....	141
7.2.3	Identifikation fahrzeugspezifischer Herausforderungen	147



7.2.4	Modellbasierte Auswertung und Sensitivitätsanalyse	153
7.2.5	Modulzusammenfassung und -bewertung	155
7.3	Hauptmodul Generierung eines Most-Relevant-Referenztests	156
7.3.1	Konzept und Abgrenzung der Methode	157
7.3.2	Prozess zur Generierung des Most-Relevant-Referenztests	158
7.3.3	Modulzusammenfassung und -bewertung	166
7.4	Fazit der neuen RDE-Methodik	167
8	Zusammenfassung und Ausblick	170
Anhang	176
A.	Emissionskennfelder.....	176
B.	Laufzeitkorrektur bei dynamischer Emissionsmessung	180
C.	Übersicht der Abgasdichten.....	181
D.	Rampengewichte im Kennfeld.....	181
E.	Modellbasierte Rampenauswertung	183
F.	Einflussgrößen einer Realfahrt	185
G.	Soll- vs. Istwerte der Variationsgrößen der Robustheitsanalyse.....	186
H.	Variation-Variation-Plot der Robustheitsanalyse.....	187
I.	Plausibilisierung Fahrtergebnis der Robustheitsanalyse.....	188
J.	Modellbasierte Sensitivitätsanalyse der virtuellen Realfahrten	190
Literaturverzeichnis	191
Werdegang	206