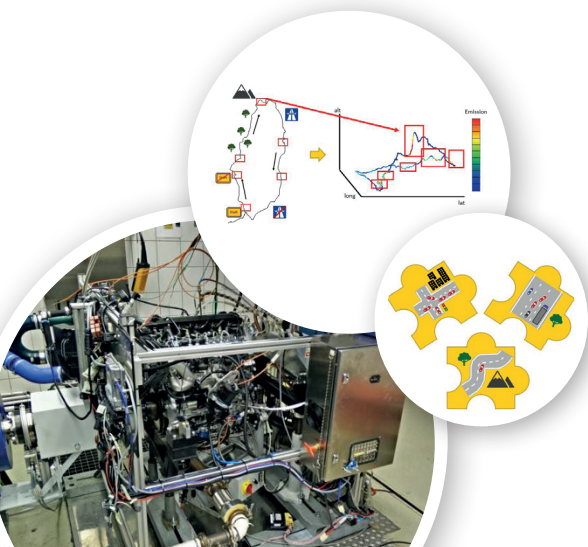


Methodischer Ansatz zur anwendungsspezifischen Realfahrtemissionsbewertung am Motorenprüfstand



Schriftenreihe des Instituts für
Verbrennungskraftmaschinen und Fahrzeugantriebe
Prof. Dr. techn. Christian Beidl (Hrsg.)

Band 16

SHAKER
VERLAG

Methodischer Ansatz zur anwendungsspezifischen Realfahrtemissionsbewertung am Motorenprüfstand

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

Dissertation

vorgelegt von
Deborah Schmidt, M.Sc.
aus Lohr am Main

Berichterstatter:	Prof. Dr. techn. Christian Beidl
Mitberichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Frank Atzler
Tag der Einreichung:	14.04.2020
Tag der mündlichen Prüfung:	10.06.2020

Darmstadt 2020

D17



Schriftenreihe des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen und
Fahrzeugantriebe

Band 16

Deborah Schmidt

**Methodischer Ansatz zur anwendungsspezifischen
Realfahrtemissionsbewertung am Motorenprüfstand**

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 978-3-8440-7560-1

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



Meinen lieben Eltern gewidmet





Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Fachgebiet für Verbrennungskraftmaschinen und Fahrzeugantriebe der Technischen Universität Darmstadt.

Ich danke meinem Doktorvater und Fachgebietsleiter Herrn Prof. Dr. techn. C. Beidl für die Möglichkeit zur Promotion unter Nutzung der Fachgebietsinfrastruktur und das mir entgegengebrachte Vertrauen aktuelle Forschungsthemen mit viel Freiraum bearbeiten zu dürfen. Vor allem die persönliche Unterstützung bei fachlichen Fragestellungen durch zahlreiche Diskussionen und wertvolle Ratschläge haben wesentlich zum Gelingen der Dissertation beigetragen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. F. Atzler danke ich herzlich für die offene und interessierte Übernahme des Koreferats.

Besonders wertvoll für die Entstehung der Arbeit war außerdem das kollegiale Arbeitsumfeld, das durch gegenseitige Unterstützung, vielseitige Diskussionen und Freude an der Arbeit geprägt ist. Mein herzlichster Dank gilt vor allem Herrn Christoph Halscheidt für seine unermüdliches Engagement rund um Prüfstandsfragen auch zu späten Stunden, Renate Schreiber für das stets offene Ohr und die Unterstützung bei jeglichen administrativen Angelegenheiten und den Herren Johannes Hipp, Markus Münz und Mikula Thiem für die vielen fachlichen Diskussionen und die persönliche Unterstützung, die einen wertvollen Beitrag zur erfolgreichen Anfertigung der Dissertation geleistet haben.

Neben den Kollegen bedanke ich mich weiterhin ganz besonders bei den Studenten, die im Rahmen ihrer wissenschaftlichen Abschlussarbeiten einen ganz wesentlichen Beitrag zur Entstehung der vorliegenden Arbeit geleistet haben. Besonders erwähnen möchte ich dabei die Herren Tobias Trappen und Timo Hartl sowie Harun Zlojo, der in seiner nachfolgenden Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter fortlaufend für hilfreiche fachliche Diskussionen zur Verfügung stand.

Zu guter Letzt gebührt mein herzlichster Dank meiner Familie, die mir das Studium ermöglicht hat und damit die Grundlage für meinen beruflichen Werdegang gelegt hat. Darüber hinaus verdient die bedingungslose und uneingeschränkte Unterstützung in allen Lebenslagen und in Fragen der Kinderbetreuung besondere Erwähnung, ohne die die Durchführung der Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Darmstadt, im April 2020

Deborah Schmidt

Abstract

Future ultra-low emission standards, the reform of the homologation procedure to examine compliance with emission standards as well as objectives to reduce greenhouse gas emissions require new development and validation methods in powertrain development. In particular model-based development environments for test bed applications offer potential to control the increasing complexity of interacting integrated systems in early development stages. Ideally, the system behavior is validated based on its real-life operating environment using virtual driving scenarios.

As the use of the real-life operating environment in the homologation procedure is accompanied by an expansion of the variation space of possible test profiles and their surrounding testing conditions, the design of the driving scenario for efficient optimization and validation of emission relevant functions in powertrain development is of essential importance. The analysis of various cycle-based testing methods in the present work shows that the interpretation of emission results depends on the chosen test description and differs according to the investigated powertrain system and the pollutant in focus. Consequently, flexible application-oriented development strategies can contribute to clarifying emission targets by taking the individual challenges of diversified powertrain systems and the specific mechanisms of pollutant formation into account when creating the test description.

Therefore, a methodical approach is presented in the form of a development process, which results in the concrete use-case-specific parametric description of a test scenario used in all scales of model-based development environments. In addition to the requirement of addressing powertrain and pollutant specific emission sources, the representativeness for real-driving is also included in the assessment of the test properties. The formulated objectives are achieved by the use of multi-criterial optimization methods, which specifically string together virtualized, real world road segments to an overall test scenario based on their characteristics.

The validation of the methodology is given conclusively by two representative use cases, which demonstrate the advantages of individual evaluation bases compared to generic testing methods. The results presented clearly indicate that the clarification of emission targets by specifically detecting potential emission sources ensures functional safety under all operating conditions while at the same time resource requirements can be significantly reduced.

Kurzfassung

Zukünftige Niedrigstmissionsstandards, die Reform des Homologationsverfahrens zur Einhaltung der Schadstoffemissionen, sowie Zielsetzungen zur Reduktion der Treibhausgasemissionen bedingen neue Entwicklungs- und Validierungsmethoden in der Antriebsentwicklung. Insbesondere modellgestützte Entwicklungsumgebungen für Prüfstandsanwendungen bieten Potenzial den gesteigerten Komplexitätsgrad durch die frühzeitige Absicherung im interagierenden Systemverbund zu beherrschen. Idealerweise erfolgt dabei die Prüfung des Systemverhaltens auf Basis des realen Betriebsumfelds unter Zuhilfenahme eines virtuellen Fahr Szenarios.

Da mit dem realen Betriebsumfeld als Homologationsbasis eine Expansion des Variationsraumes möglicher Prüfprofile und seiner umgebenden Prüfbedingungen einhergeht, kommt der Ausgestaltung eines Fahr Szenarios zur effizienten Optimierung und Validierung emissionsrelevanter Funktionen in der Antriebsentwicklung essentielle Bedeutung zu. Die Analyse verschiedener zyklusbasierter Testverfahren der vorliegenden Arbeit zeigt, dass die Interpretation des Emissionsergebnisses von der gewählten Versuchsbeschreibung abhängt und je nach untersuchtem Antriebsstrangsystem und betrachtetem Schadstoff verschiedenartig ausfallen kann. Aus den Ergebnissen der Untersuchungen folgt, dass flexible, anwendungsorientierte Entwicklungsstrategien zur Präzisierung des Entwicklungsziels beitragen können, indem individuelle Herausforderungen diversifizierter Antriebssysteme und spezifische Mechanismen der Schadstoffentstehung bei der Versuchsbeschreibung berücksichtigt werden.

Dazu wird ein methodischer Ansatz in Form eines Entwicklungsprozesses vorgestellt, der die konkrete anwendungsspezifische parametrische Beschreibung eines Versuchsszenarios für den durchgängigen Einsatz in sämtlichen Skalierungen modellgestützter Entwicklungsumgebungen zum Ergebnis hat. Neben der Anforderung antriebs- und emissionspezifische Emissionsquellen zu adressieren, wird weiterhin die Repräsentativität für den realen Einsatz zur Bewertung herangezogen. Die formulierten Zielsetzungen werden mithilfe eines multikriteriellen Optimierungsverfahrens gelöst, welches virtualisierte real existierende Streckenabschnitte eigenschaftsbasiert gezielt zu einem Gesamtszenario zusammensetzt.

Die Validierung der Methodik erfolgt durch zwei praxisrelevante Anwendungsbeispiele, mittels derer die Vorteile individueller Bewertungsgrundlagen gegenüber generischen Testverfahren demonstriert werden. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass die Präzisierung des Entwicklungsziels durch gezielte Detektion potentieller Emissionsquellen die Sicherstellung funktionaler Sicherheit unter realen Einsatzbedingungen bei gleichzeitiger Reduktion des Ressourcenbedarfs bewirkt.



Inhaltsverzeichnis

Vorwort	
Abstract	
Kurzfassung	
Inhaltsverzeichnis	i
Abbildungsverzeichnis	v
Tabellenverzeichnis	viii
Formelverzeichnis	ix
Abkürzungsverzeichnis	x
Verzeichnis der Formelzeichen und Indizes	xiii
1 Einleitung	1
1.1 Bedeutung verbrennungsmotorischer Antriebe im Mobilitätssektor	1
1.2 Maßnahmen zur Luftreinhaltung	1
1.3 Motivation zur Entwicklung einer anwendungsspezifischen Methode zur Emissionsbewertung	3
2 Grundlagen und Stand der Technik	5
2.1 Verbrennungsmotorische Fahrzeugantriebe	5
2.1.1 Schadstoffbildung und Reduktion	5
2.1.2 Abgasgesetzgebung und Homologation	15
2.2 Etablierte Entwicklungsprozesse und Methoden in der Antriebs- entwicklung	33
2.2.1 Modellbasierter Entwicklungsprozess	34
2.2.2 Modellbasierte Entwicklungsumgebung X-in-the-Loop	36
2.2.3 Optimierung in der Antriebsstrangentwicklung	37
2.2.4 Modellbasierte Quantifizierung der Fahrzeugemissionen unter realen Betriebsbedingungen	43

2.3	Entwicklungsprozesse und Methoden für RDE	45
2.3.1	Validierung im Straßenumfeld/Fahrversuch	45
2.3.2	Modellbasierte Methoden zur Emissionsabsicherung in frühen Phasen.....	47
3	Zielsetzung der Arbeit und Methodik des Vorgehens	55
3.1	Ausgangslage	55
3.2	Ziele der Arbeit	56
3.3	Methodik des Vorgehens	58
4	Einflussanalyse des Versuchsszenarios auf die Bewertung des Emissionsverhaltens.....	59
4.1	Untersuchung der Schadstoffemissionen eines Antriebs in verschiedenen Szenarien	59
4.2	Untersuchungen verschiedener Antriebe in verschiedenen Szenarien	60
4.3	Betrachtung verschiedener Schadstoffkomponenten in verschiedenen Szenarien	61
5	Methodischer Ansatz zur anwendungsspezifischen Realfahrtemissions- bewertung	70
5.1	Entwicklungsprozess zur belastbaren Bewertung von Antriebssystemen unter RDE-Bedingungen.....	70
5.2	Datenbanken	75
5.2.1	Antriebsstrangdatenbank.....	75
5.2.2	Segmentdatenbank.....	88
5.3	Prozessmodule	94
5.3.1	Antriebsstrangcharakterisierung.....	94
5.3.2	Testszenariogenerierung	101
5.3.3	Simulative Voruntersuchung	115
5.3.4	Datenanalyse und Bewertung des repräsentativen Szenarios	117
5.3.5	Worst-Case-Szenariogenerierung.....	118
5.3.6	Datenanalyse und Bewertung des Worst-Case Szenarios	119

6	Implementierung und exemplarische Umsetzung der Methodik	120
6.1	Engine-in-the-Loop-Entwicklungsumgebung	120
6.1.1	Simulationsplattform	120
6.1.2	Engine-in-the-Loop-Prüfstand	126
6.1.3	Versuchsmotoren	127
6.1.4	Messausrüstung	128
6.2	Exemplarische Umsetzung der Methodik	130
7	Validierung	132
7.1	Funktionsvalidierung	132
7.1.1	Quantifizierung der CO ₂ -Emissionen mittels VSP-Klassifizierung	132
7.1.2	Sensitivitätsanalyse der VSP-Klassifizierung	134
7.1.3	Validierung der Funktion zur Ableitung eines Zielwertes für die Zielfunktion zur Höhendifferenz	137
7.1.4	Konvergenzverhalten der Optimierung	139
7.1.5	Fahrermodellerweiterung	140
7.2	Prozessvalidierung	142
7.2.1	Stickoxidkritisches Szenario für einen dieselmotorischen Antrieb	143
7.2.2	Partikelanzahlkritisches Szenario für einen Antrieb mit direkteinspritzendem ottomotorischem Brennverfahren	150
8	Zusammenfassung und Ausblick	161
Anhang		166
A	Sensitivitätsanylse des Versuchsszenarios auf die Bewertung des Emissionsverhaltens	166
A.1	Anteil der CO-Emissionen an der CO-Gesamtmasse in Abhängigkeit des Perzentils von $v * apos$	166
A.2	Höhenverlauf zweier unterschiedlicher Szenarien	167
B	Echtzeitplattform	167
B.1	Modellparameter der verwendeten Fahrzeugmodelle	167
C	Prozessvalidierung	168

C.1	Eigenschaften des per Road-to-Rig-Verfahren abgeleiteten Realfahrzyklus	168
C.2	RPA-Werte in den Geschwindigkeitsbereichen in allen Testverfahren im Vergleich zum Grenzwert	169
C.3	($v \cdot a_{\text{pos}}$) [95]-Werte in den Geschwindigkeitsbereichen in allen Testverfahren im Vergleich zum Grenzwert	170
C.4	Anwendungsspezifische Ordinalskala stickoxidkritisches Szenario des dieselmotorischen Antriebs	170
C.5	Anwendungsspezifische Ordinalskala partikelanzahlkritisches Szenario des ottomotorischen Antriebs	171
C.6	Zeitverlauf einer Anfahrsituation nach längerer Auskühlphase im Stadtbereich	172
C.7	Hochlastphase im Autobahnbereich	173
Literaturverzeichnis		174

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1:	Abgaszusammensetzung eines PKW-Dieselmotors in Gewichtsprozent	6
Abbildung 2-2:	Abgaszusammensetzung eines PKW-Ottomotors bei Betrieb mit $\lambda = 1$ in Gewichtsprozent nach [22] S. 171	6
Abbildung 2-3:	Vergleich NEFZ vs. WLTC [74].....	17
Abbildung 2-4:	Durchschnittliche NO _x -Emissionen auf PEMS Test Routen und während Rollenprüfstandtests [75]	18
Abbildung 2-5:	Zeitpunkte des Inkrafttretens der Euro-Normen und der Zertifizierungsverfahren nach [19, 49, 81]	19
Abbildung 2-6:	Ablauf der RDE-Prüfprozedur	21
Abbildung 2-7:	Verfahrensvorschrift zur Bewertung der Gültigkeit einer RDE-Prüfung	26
Abbildung 2-8:	Prinzip der Fensterbildung der EMROAD-Methode	29
Abbildung 2-9:	EMROAD Referenzkurve und Toleranzband	30
Abbildung 2-10:	Funktion zur Berechnung des Ergebnisbewertungsfaktors	32
Abbildung 2-11:	Prozess der modellbasierten Antriebsstrangentwicklung [87]	35
Abbildung 2-12:	schematischer Ablauf des genetischen Algorithmus nach [114]	40
Abbildung 2-13:	Schema zur Verbrauchsbestimmung mittels VSP-Methodik.....	44
Abbildung 2-14:	Bewertung der legislativen Relevanz der Betriebspunkt-abstimmung [148]	48
Abbildung 2-15:	Gegenüberstellung zyklusbasierte und manöverbasierte Entwicklung [173, 174]	53
Abbildung 4-1:	Emissionsergebnisse nach Katalysator von 358 virtuellen Realfahrten [149]	60
Abbildung 4-2:	Vergleich verschiedener Zyklen verschiedener Hersteller [157]	61
Abbildung 4-3:	Vergleich der Emissionsergebnisse eines Antriebs in verschiedenen Szenarien	63
Abbildung 4-4:	kumulierte CO-Emissionen der beiden Szenarien über dem zurückgelegten Weg.....	64
Abbildung 4-5:	positiver Lastwechsel nach Schaltvorgang.....	65
Abbildung 4-6:	Vergleich Verteilung der $v * apos$ -Werte in den beiden Szenarien	66
Abbildung 4-7:	kumulierte NO _x -Emissionen der beiden Szenarien über dem zurückgelegten Weg.....	67
Abbildung 4-8:	Beschleunigungsvorgang auf positivem Höhengewinn	68
Abbildung 5-1:	Abhängigkeit des Entwicklungsziels von der Testcharakteristik	71
Abbildung 5-2:	Entwicklungsprozess zur systematischen Bewertung von Antriebssystemen unter RDE-Bedingungen	73

Abbildung 5-3:	Verlauf der Temperatur und der fahrzeugspezifischen Leistung infolge verschiedener Steigungen	79
Abbildung 5-4:	Partikelanzahlemissionen in Abhängigkeit der Leistungs- anforderung vor dem Beschleunigungsmanöver	80
Abbildung 5-5:	Korrelation zwischen NO _x -Emission und RPA bei selektiver Anregung.....	82
Abbildung 5-6:	Ermittlung der Emissionsüberhöhungen an diskreten Punkten der Regressfunktionen eines jeden Kennwertes	84
Abbildung 5-7:	Struktur der Antriebsstrangdatenbank.....	87
Abbildung 5-8:	Prinzip der Segmentierung und objektorientierter Aufbau der Segmentdatenbank.....	89
Abbildung 5-9:	Prinzip zur Klassierung der Segmenteigenschaften.....	90
Abbildung 5-10:	Verteilung des Kennwertes innerhalb des Datenpools bei verschiedenen Segmentlängen.....	92
Abbildung 5-11:	Verteilung der RPA-Werte in den Geschwindigkeitsbereichen	93
Abbildung 5-12:	Häufigkeitsverteilung angeforderter spezifischer Leistungen während verschiedener Realfahrten	97
Abbildung 5-13:	durchschnittliche CO ₂ -Massenströme je VSP-Klasse	99
Abbildung 5-14:	Betriebspunkte eines VSP-Bins in unterschiedlichen Geschwindigkeitsbereichen.....	100
Abbildung 5-15:	CO ₂ -Massenstrom in Abhängigkeit der VSP-Klasse für jeden Geschwindigkeitsbereich	101
Abbildung 5-16:	Programmablaufplan der Methode zur anwendungsbezogenen Testgenerierung.....	104
Abbildung 5-17:	Methode zur anwendungsspezifischen Quantifizierung des Potenzials zur Emissionsentstehung eines Segments	107
Abbildung 5-18:	Methode zur Bestimmung der anwendungsspezifischen EMROAD-Normalität eines Segments	112
Abbildung 5-19:	Prinzip der Worst-Case-Szenariogenerierung.....	119
Abbildung 6-1:	Vergleich der Ausrollkurven des realen Fahrzeugs und des Fahrzeugmodells	122
Abbildung 6-2:	vorparametrierte Fahrer kennlinien für die maximal zulässige Beschleunigung über der Geschwindigkeit	123
Abbildung 6-3:	Programmablaufplan der Fahrermodellerweiterung	124
Abbildung 6-4:	beispielhafte Fahrsituation der verwendeten 3D- Umgebungssimulation	125
Abbildung 6-5:	verwendete Entwicklungs- und Versuchsumgebung	126
Abbildung 6-6:	exemplarische Umsetzung der Methode	130
Abbildung 7-1:	Vergleich des Verlaufs der prognostizierten und gemessenen kumulierten CO ₂ -Emissionen	133

Abbildung 7-2:	Ergebnisse der prognostizierten und gemessenen CO ₂ -Emissionen in verschiedenen Szenarien	134
Abbildung 7-3:	Genauigkeit der Vorhersage bei verschiedenen Fahrermodellen .	135
Abbildung 7-4:	Genauigkeit der Vorhersage bei verschiedenen Fahrzeugmodellen	137
Abbildung 7-5:	resultierende Verläufe der Höhenmeter für zwei verschiedene Szenarien	139
Abbildung 7-6:	Konvergenzverlauf der Optimierung am Beispiel des dieselmotorischen Anwendungsfalls.....	140
Abbildung 7-7:	erfasste positive Beschleunigungen im Vergleich zur maximal zulässigen Beschleunigung	141
Abbildung 7-8:	Rahmendbedingungen zur Generierung des stickoxidkritischen Szenarios eines dieselmotorischen Antriebsstrangs	146
Abbildung 7-9:	Ergebnis der EMROAD-Bewertung für das stickoxidkritische Szenario eines dieselmotorisch angetriebenen Fahrzeugs	148
Abbildung 7-10:	Vergleich der anwendungsspezifischen Methode mit generischen Testverfahren anhand der NO _x -Emissionsergebnisse des dieselmotorischen Antriebsstrangs	149
Abbildung 7-11:	Rahmendbedingungen zur Generierung des partikelanzahlkritischen Szenarios eines ottomotorischen Antriebsstrangs.....	152
Abbildung 7-12:	Ergebnis der EMROAD-Bewertung für das stickoxidkritische Szenario eines dieselmotorisch angetriebenen Fahrzeugs	155
Abbildung 7-13:	kumulierte PN- und CO-Emissionen im partikelanzahlkritischen Szenario.....	156
Abbildung 7-14:	Vergleich der anwendungsspezifischen Methode mit generischen Testverfahren anhand der PN-Emissionsergebnisse des ottomotorischen Antriebsstrangs.....	157
Abbildung 7-15:	Vergleich der anwendungsspezifischen Methode mit generischen Testverfahren anhand der CO-Emissionsergebnisse des ottomotorischen Antriebsstrangs.....	159

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Emissionsstandards der Euro 6 Norm für Selbst- und Fremdzündungsmotoren nach [68]	15
Tabelle 2-2:	Anforderungen und Testrandbedingungen	22
Tabelle 2-3:	Tabelle zur Ermittlung von RF	32
Tabelle 4-1:	Kennwerte der Szenarien	62
Tabelle 5-1:	Charakteristische Kennwerte zur Beschreibung der Fahr- und Streckeneigenschaften	77
Tabelle 5-2:	projektspezifische Skala zur Quantifizierung der Schwere	85
Tabelle 5-3:	Skala zur Quantifizierung der Häufigkeit	86
Tabelle 5-4:	Kategorien und Ausführungen der Fahrzeugkonfiguration	95
Tabelle 5-5:	Zielkriterien der Optimierung und zugehörige Berechnungsvorschriften der Zielfunktionen	113
Tabelle 5-6:	Ausgabeinformationen des Moduls Simulative Voruntersuchung	116
Tabelle 6-1:	Übersicht über die in der Validierung verwendeten Fahrzeugmodelle und deren Antriebssysteme	121
Tabelle 6-2:	Charakteristika der verwendeten Versuchsmotoren	128
Tabelle 6-3:	Kenndaten der AMA i60 zur Messung gasförmiger Abgaskomponenten	129
Tabelle 7-1:	dominierende Ausprägungen des Kennwertes $\alpha_{\text{pos,w}}$	138
Tabelle 7-2:	Quantifizierung des Einflusses der wesentlichen Kennwerte auf die Stickoxidentstehung eines dieselmotorischen Antriebsstrangs	144
Tabelle 7-3:	Eigenschaften des stickoxidkritischen Szenarios für einen dieselmotorischen Antriebsstrang	147
Tabelle 7-4:	Quantifizierung des Einflusses der wesentlichen Kennwerte auf die Partikelentstehung eines ottomotorischen Antriebsstrangs	151
Tabelle 7-5:	Eigenschaften des partikelanzahlkritischen Szenarios für einen ottomotorischen Antriebsstrang	154

Formelverzeichnis

(2-1)	27
(2-2)	27
(2-3)	27
(2-4)	27
(2-5)	27
(2-6)	28
(2-7)	28
(2-8)	31
(2-9)	31
(2-10)	43
(5-1)	80
(5-2)	80
(5-3)	83
(5-4)	84
(5-5)	84
(5-6)	85
(5-7)	91
(5-8)	97
(5-9)	103
(5-10)	108
(5-11)	109
(5-12)	109
(5-13)	110
(5-14)	110
(5-15)	110
(5-16)	110
(5-17)	110
(5-18)	110
(5-19)	114
(5-20)	114
(5-21)	114

Abkürzungsverzeichnis

ADAC	Allgemeiner Deutscher Automobil Club
AGR	Abgasrückführung
Allg.	allgemein
AMA	Abgasmessanlage
AVL	Anstalt für Verbrennungskraftmaschinen List
AWD	All-Wheel Drive
bzgl.	bezüglich
bzw.	beziehungsweise
CADC	Common Artemis Driving Cycle
CF	Conformity Factor
CLD	Chemiluminiszenz-Detektor
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
DI	Direct Injection (Direkteinspritzung)
DOC	Diesel Oxidation Catalyst (Dieseloxidationskatalysator)
DPF	Diesel Particulate Filter (Dieselruß-Partikelfilter)
ECU	Electronic Control Unit
EIL	Engine-in-the-Loop
EPA	Environment Protection Agency
etc.	et cetera
EU	Europäische Union
FEV	Forschungsgesellschaft für Energietechnik und Verbrennungsmotoren
FID	Flammenionisationsdetektor
FMEA	Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse
FTP	Federal Test Procedure
FWD	Front-Wheel Drive

GPF	Gasoline Particulate Filter (Partikelfilter für Ottomotoren)
GUI	Graphic User Interface (Grafische Benutzeroberfläche)
HACA	Hydrogen Abstraction Acetylene Addition
HIL	Hardware-in-the-Loop
ICCT	International Council on Clean Transportation
IRD	Infrarot Detektor
JRC	Joint Research Centre
LNT	Lean NO _x Trap (NO _x -Speicherkatalysator)
MAW	Moving Averaging Window
MIL	Model-in-the-Loop
(M)NEFZ	(Modernisierter) Neuer Europäischer Fahrzyklus
MOVES	Motor Vehicle Emission Simulation
MPFI	Multi-Point Fuel Injection (Mehrpunkteinspritzung)
NEDC	New European Driving Cycle
NTE	Not-To-Exceed Limit
OBD	On-board Diagnose
PAK	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
PEMS	Portable Emission Measurement System
PKW	Personenkraftwagen
PMD	Paramagnetischer Detektor
RDE	Real Driving Emissions
RDE-LDV	Real Driving Emissions – Light Duty Vehicles
RealSiMM	Real World Simulation and Measurement Methodology
RF	Result evaluation Factor
RPA	Relative Positive Acceleration
RTS	abgeleitet von Standardized Random Test

RWD	Rear-Wheel Drive
RWTH	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule
SCR	Selective Catalytic Reduction (Selektive katalytische Reduktion)
SIL	Software-in-the-Loop
SUS	Stochastic Universal Sampling
SUV	Sport Utility Vehicle (Stadtgeländewagen)
TfL	Transport for London
TH	Schwellwert (engl. Threshold)
TU	Technische Universität
TWC	Three-Way-Catalyst (3-Wege-Katalysator)
UNECE	United Nations Economic Commission for Europe
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VIL	Vehicle in the Loop
VKA	Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen Aachen
VSP	Vehicle Specific Power
WLTC	Worldwide Harmonized Light Duty Test Cycle
WLTP	Worldwide harmonized Light vehicle Test Procedure
XIL	X-in-the-Loop
3D	dreidimensional

Verzeichnis der Formelzeichen und Indizes

Lateinische Buchstaben

Zeichen	Einheit	Bezeichnung
A	m ²	Fläche
AS	-	Antriebsstrang
EE	-	Emissionsüberhöhung, engl. Emission exceedance
EK	-	Emissionskritikalität
EN	-	EMROAD-Normalität
H	-	Häufigkeit
KS	-	Kennwertsignifikanz
L	m	Gesamtlänge
M	g/km	gewichtete streckenbezogene Emissionsmasse
S	-	Schwere
SL	m	Streckenlänge
T	s	Gesamtzeit
TH	W/kg	Schwellwert Detektion spez. Lastanforderung
V	-	Variationen
a	m/s ²	Beschleunigung
h	m	Höhe
l	-	Lösung des Optimierungsproblems
m	g/km	ungewichtete streckenbezogene Emissionsmasse
ṁ	g/s	Massenstrom
r	-	Energieverhältnis
s	m	Weg
sf	-	Streckenlängenfaktor
sr	-	Steigungsrichtungsindikator
t	s	Zeit

v	km/h	Geschwindigkeit
w	-	Wichtungsfaktor
x	-	Hilfsgröße zur Berechnung der Skaleneinteilung
z	-	Zielwert

Griechische Buchstaben

Zeichen	Einheit	Bezeichnung
Δ	-	Differenz
α	-	Steigung
λ	-	Luft-Kraftstoff-Verhältnis (Lambda)

Indizes

Zeichenfolge	Bezeichnung
K	Kennwert
RDE	Real Driving Emissions
$S-E$	Start- und Endpunkt
SV	Systemverbund
T, S	technologie-, schadstoffspezifisch
VSP	Vehicle Specific Power
$WLTP$	Worldwide harmonized Light vehicle Test Procedure
h	Höhe
$high$	hohe Werte
hP	hohe Leistungsanforderung (high Power)
k	Kritikalität
l	Länge

<i>low</i>	niedrige Werte
<i>lP</i>	niedrige Leistungsanforderung (low Power)
<i>middle</i>	mittlere Werte
<i>mw</i>	motorway
<i>pos</i>	positive
<i>r</i>	rural
<i>s</i>	Segment
<i>spez</i>	spezifisch
<i>u</i>	urban
<i>w</i>	gewichtet