
Methodenbasierte Emissionierung im Kontext von RDE

Method-Based Emissions Calibration in the Context of RDE

Zur Erlangung des akademischen Grades Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

Genehmigte Dissertation von Maximilian Dietrich aus Minden

Tag der Einreichung: 21.10.2021, Tag der Prüfung: 16.02.2022

1. Gutachten: Prof. Dr. techn. Christian Beidl
2. Gutachten: Prof. Dr.-Ing. Hermann Rottengruber
Darmstadt – D 17



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



Methodenbasierte Emissionierung im Kontext von RDE
Method-Based Emissions Calibration in the Context of RDE

Genehmigte Dissertation von Maximilian Dietrich

1. Gutachten: Prof. Dr. techn. Christian Beidl
2. Gutachten: Prof. Dr.-Ing. Hermann Rottengruber

Tag der Einreichung: 21.10.2021

Tag der Prüfung: 16.02.2022

Darmstadt – D 17

Schriftenreihe des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen und
Fahrzeugantriebe

Band 23

Maximilian Dietrich

**Methodenbasierte Emissionierung
im Kontext von RDE**

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 978-3-8440-8549-5

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 • E-Mail: info@shaker.de

Kurzfassung

Mit der Einführung der Real Driving Emissions (RDE) Gesetzgebung in der Europäischen Union haben sich zusätzlich zum fortlaufenden Anwachsen der Entwicklungsumfänge durch die Vergrößerung der Fahrzeugportfolios neue Herausforderungen für die Emissionierung von modernen Verbrennungsmotoren und Fahrzeugantrieben ergeben: Die Messung der Emissionen von Stickoxiden und Partikeln findet während einer bewusst nur grob spezifizierten Straßenfahrt ergänzend zum zyklusbasierten Rollentest statt. Die während der Emissionierung abzusichernden Betriebszustände des Antriebs gehen dabei weit über den bisherigen Rahmen des Zyklustests hinaus. Zudem steht mit dem Straßenversuch keine kontrollierbare und reproduzierbare Entwicklungsumgebung zur Verfügung, was die Applikationsarbeit weiter erschwert. Die Verlagerung von Testumfängen an Motoren- und Antriebsprüfstände bietet Möglichkeiten effektiverer und effizienterer Entwicklung, indem sich dort wesentliche der genannten Problematiken der RDE-Emissionierung beheben lassen. Dabei müssen bestehende Methoden weiter- und zusätzliche Ansätze neu entwickelt werden, um neuartige Tests unter fahrzeugnahen Randbedingungen an den Prüfständen durchführen zu können.

Diese Arbeit leistet Beiträge zu mehreren die RDE-Emissionierung betreffenden Aspekten: Durch gezieltes Auslegen dynamischer Fahrzyklen hinsichtlich möglichst hoher Emissionsbeiträge unter Berücksichtigung der antriebsspezifischen Eigenschaften wird ein Werkzeug zur Erhöhung der Belastbarkeit der Emissionierungsabsicherung geschaffen. Die Methodik beruht auf am Antriebsprüfstand gewonnenen Messergebnissen, auf deren Basis mittels eines Reinforcementlearningansatzes und einer Markov-Kette Fahrzyklen erzeugt werden. Diese können einerseits als Sollwertevorlagen für Prüfstandsmessungen verwendet werden, andererseits geben Simulationsergebnisse der Emissionen mehrerer Zyklen auch eine Indikation der Robustheit des Antriebs gegenüber der dem RDE-Test inhärenten Variabilität.

Weiterhin wird eine Methode vorgestellt, mit der am Beispiel des Antriebsprüffelds der BMW Group eine Bewertung der aktuell verwendeten Systeme und Methoden auf ihre Eignung für die RDE-Emissionierung durchgeführt wird. Dies betrifft speziell Belastungs-

und Konditionieranlagen sowie für bestimmte Regelarten nötige Zusatzinformationen. Ausgehend von diesen Ergebnissen werden die Themen fahrzeugrealistische Ladeluftkonditionierung, Datengewinnung für realistische Streckensimulation und simulative Abbildung eines Plug-In-Hybridantriebs am konventionellen Motorprüfstand zur detaillierten Bearbeitung ausgewählt. Sie tragen zur Schaffung realistischer Betriebsbedingungen und damit der Basis für die (Vor-)Verlagerung von Testumfängen vom Fahrzeug an den Prüfstand bei.

Abstract

In addition to the ongoing increase of development efforts due to growing vehicle portfolios, the introduction of Real Driving Emission (RDE) measurements as part of the type-approval legislation in the European Union has created new challenges for emissions calibration of modern engines and powertrains: Measurements of nitrogen oxides and particle emissions are to be conducted during an on-road test with intentionally unspecified boundary conditions as a supplement to the existing cycle-based chassis dynamometer tests. The powertrain states that need to be considered during emissions calibration for those tests vastly exceed those occurring in conventional cycle tests. Furthermore, on-road testing lacks a controllable and reproducible development framework, making reliable calibration even more difficult. Transferring tests from vehicles to engine and powertrain test beds offers means for more efficient and more effective development work by solving several of the aforementioned problems associated with RDE emissions calibration. As a requirement for this shift, existing methodologies need to be developed further and new approaches have to be found which enable advanced tests under test bed conditions closely resembling vehicle operation.

This work contributes to several aspects related to RDE emissions calibration:

By tailoring dynamic driving cycles towards particularly high emissions for a specific powertrain, a tool for increasing emissions validation robustness is created. The methodology is based on measurement results recorded at a powertrain test bed, which serve as input for a reinforcement learning and Markov-chain based driving cycle generation framework. These can either be used as reference values for test-bed measurements, or analyses of simulated emissions results of a multitude of cycles can serve as an indication of the powertrain robustness towards the RDE-inherent variability.

Furthermore, a method for evaluating test facility suitability regarding typical RDE emissions calibration tasks is introduced and applied to the systems and methodologies currently in use at BMW Group. Particular attention is given to load units, conditioning systems and required data for advanced test bed control types.

Based on the obtained evaluation results, selected topics such as realistically dynamic

charge air conditioning, input data collection for realistic route simulation as well as a simulative representation of plug-in hybrid electric vehicle operation at conventional engine test beds are covered in detail. They contribute to the creation of realistic testing boundary conditions, which are the basis for transferring development tasks from vehicles to test benches.

Vorwort

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand im Bereich „Entwicklung Antrieb“ der BMW Group in München in Kooperation mit dem Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Fahrzeugantriebe der Technischen Universität Darmstadt.

Ich bedanke mich herzlich bei meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. techn. Christian Beidl für die Betreuung der Arbeit, wertvolle Diskussionen sowie die Übernahme des Hauptreferats.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Hermann Rottengruber möchte ich mich für das Interesse an der Arbeit und die Übernahme des Korreferats, bei Herrn Prof. Dr. rer. nat. Michael Schäfer für den Vorsitz der mündlichen Prüfung bedanken.

Besonderer Dank gilt meinen Betreuern seitens der BMW Group, Herrn Dr.-Ing. Benedikt Raidt und Herrn Markus Nell, deren wertvolle Anregungen, stetes Interesse, starker Rückhalt und fortwährender Ansporn einen wesentlichen Beitrag zu dieser Arbeit geleistet haben.

Weiterhin danke ich allen Kollegen im Bereich der Versuchs- und Simulationsmethoden, im Prüfstandsbetrieb und allen beteiligten Fachabteilungen, ohne deren Unterstützung und Hilfeleistungen die Arbeit nicht möglich gewesen wäre und die stets für eine angenehme Arbeitsatmosphäre gesorgt haben.

Hervorzuheben ist zudem der Einsatz aller Studenten, die im Rahmen von Praktika und Studienabschlussarbeiten mit ihren Ideen maßgeblich zum Erfolg meiner dreijährigen Doktorandenzeit beigetragen haben.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	I
Abstract	III
Vorwort	V
Abbildungsverzeichnis	XI
Tabellenverzeichnis	XVII
Symbolverzeichnis	XVIII
Abkürzungsverzeichnis	XXII
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Gliederung der Arbeit	3
2 Grundlagen und Stand der Technik	5
2.1 Grundlagen der Antriebsstrangentwicklung	5
2.1.1 Entwicklungsprozess und -methodik	6
2.1.2 Entwicklungsumgebungen	7
2.2 Systemtopologie von Motor- und Antriebsprüfständen	9
2.2.1 An- und Abtriebskonfiguration	9
2.2.2 Automatisierungssystem und Regelung	10
2.2.3 Medienversorgung und -konditionierung	12
2.2.4 Messtechnik und Datenübertragung	13
2.2.5 Restbussimulation	18
2.2.6 Sonstige Systeme	19
2.3 Schadstoffemissionen von Ottomotoren	21
2.3.1 Gasförmige Emissionen	22
2.3.2 Partikelemissionen	33
2.4 Emissionsgesetzgebung	39

2.4.1	Historische Entwicklung	39
2.4.2	Aktueller Stand	40
2.5	Entwicklungsmethodiken und -plattformen für die RDE-Emissionierung	46
2.5.1	Auswirkungen von RDE auf die Emissionierung	46
2.5.2	Entwicklungsmethodiken für die RDE-Emissionierung	49
3	Ziele und Inhalte dieser Arbeit	57
4	Erhöhung der RDE-Absicherungskonfidenz durch schadstoff- und antriebs- spezifische Fahrzyklen	63
4.1	Einsatz von Fahrzyklen in der Emissionierung	63
4.2	Ableitung von Zielen und Maßnahmen für die Erzeugung spezifischer Fahrzyklen	64
4.3	Untersuchungen zur Schadstoffbildung und Identifikation kritischer Fahr- manöver und Antriebszustände	68
4.3.1	Versuchsträger und Prüfstandstopologie	70
4.3.2	Manöver für hohe Emissionen von Stickoxiden	73
4.3.3	Manöver für hohe Partikelrohmissionen	94
4.4	Methodik zur Erzeugung von Fahrzyklen aus den identifizierten Ma- növern	104
4.4.1	Methoden der Zyklengenerierung	105
4.4.2	Mathematische Grundlagen	106
4.4.3	Modellierung von Fahrzeug, Antrieb und Fahrer	113
4.4.4	Aufbau einer durchgängigen Werkzeugkette durch Kombination von Manöverdaten, Zyklengeneration und Modellumgebung . . .	115
4.5	Ergebnisse	130
4.5.1	Zyklen für Stickoxidemissionen	130
4.5.2	Zyklen für Partikelemissionen	148
4.6	Fazit	153
5	Bewertung von Prüfstandssystemen hinsichtlich ihrer Eignung für die RDE- Emissionierung	155
5.1	Bewertungskriterien	155

5.1.1	Versuchsaufgabe und Regelart	156
5.1.2	Medienkonditionierung	159
5.1.3	Dynamik der Belastungseinheiten	160
5.2	Ist-Stand des Prüffeldes und Toolentwicklung	161
5.3	Ergebnisse	165
5.3.1	Quantitative Analyse	165
5.3.2	Qualitative Analyse	169
6	Ableitung und Implementierung von Maßnahmen zur Erhöhung der Eignung ausgewählter Prüfstandssysteme für die RDE-Emissionierung	181
6.1	Fahrzeugrealistische Ladeluftkühlung am Prüfstand	182
6.1.1	Anforderungen	182
6.1.2	Lösungskonzept	184
6.1.3	Validierung	187
6.2	Datenquellen für realistische Streckeninformationen	193
6.2.1	Betrachtete Datenquellen	194
6.2.2	Möglichkeiten der Datennachbearbeitung	196
6.2.3	Bewertung	200
6.3	Simulative Abbildung der PHEV-Betriebsstrategie am konventionellen Motorprüfstand	202
6.3.1	PHEV Grundlagen	202
6.3.2	Elemente der Simulationsumgebung	205
6.3.3	Versuchsumgebung und Referenzmessung	209
6.3.4	Reproduktion der Referenzmessung	213
6.3.5	Fahrzeugunabhängige Parametervariation	216
6.3.6	Fazit	218
7	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	221
	Literaturverzeichnis	225
A	Modellierung mit künstlichen neuronalen Netzen	249
A.1	Übersicht von Modellierungsansätzen	249
A.2	Aufbau künstlicher neuronaler Netze	250



A.3	Feature selection und Architekturbestimmung	252
A.3.1	Datenaufbereitung und Preprocessing	252
A.3.2	Fehler- und Bestimmtheitsmaße	254
A.3.3	Feature selection	255
A.3.4	Architekturbestimmung	256
A.4	Festlegung des finalen KNNs	257

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	V-Modell des Entwicklungszyklus	6
Abbildung 2:	An- und Abtriebskonfigurationen von Motor- und Inline Antriebsprüfständen	10
Abbildung 3:	Einfluss des Restgasanteils auf den Isentropenexponent	25
Abbildung 4:	Mechanischer Aufbau des Dreibegekatalsators	29
Abbildung 5:	Einfluss der Sauerstoffspeicherfähigkeit des Dreibegekatalsators auf die Schadstoffkonvertierung	32
Abbildung 6:	Mechanismen der Rußbildung	34
Abbildung 7:	Mechanismen der Rußfilterung im OPF	38
Abbildung 8:	Geschwindigkeitsverläufe von NEFZ und WLTC	42
Abbildung 9:	Ziele und daraus abgeleitete Maßnahmen im Rahmen dieser Arbeit	61
Abbildung 10:	Schema der exogenen und endogenen Emissionsursachenanalyse	69
Abbildung 11:	Aufbau des Prüflings auf dem Inline Antriebsprüfstand	71
Abbildung 12:	Übersicht der Topologie der Antriebsprüfstandsysteme	72
Abbildung 13:	Kennfeld für den Massenstrom der Stickoxidrohmissionen des vermessenen Motors	74
Abbildung 14:	Abgleich zwischen gemessenem und aus Kennfeld interpoliertem NO _x -Rohmissionsmassenstrom in einem dynamischen Fahrzyklus	75
Abbildung 15:	NO _x -Konvertierungsrate des Katalysators im Kennfeld des untersuchten Motors	77
Abbildung 16:	Verläufe der Katalysatortemperatur während des Kaltstarts, im Leerlauf und während der Schubabschaltung	78
Abbildung 17:	Verlauf der kumulierten NO _x -Emissionen während eines dynamischen Fahrzyklus	80
Abbildung 18:	Verläufe der Lambdasignale vor und nach Katalysator zur Bestimmung der maximalen bzw. vereinfachten nutzbaren O ₂ -Speicherkapazität des Katalysators	82
Abbildung 19:	O ₂ -Speicherkapazität des Katalysators im Kennfeld des untersuchten Motors	83

Abbildung 20: Verlauf und Höhenprofil der Referenzteststrecke	89
Abbildung 21: Schematischer Überblick der DoE-Kernbegriffe	90
Abbildung 22: Im Rahmen der exogenen Emissionsursachenanalyse gemessene NO _x -Massenströme	93
Abbildung 23: Auszug aus den gemessenen NO _x -Massenströmen mit markierten Emissionsevents	93
Abbildung 24: Detailansicht eines identifizierten NO _x -Events	94
Abbildung 25: Abgleich zwischen gemessener und aus Kennfeld interpolierter kumulierter Partikelanzahl in einem dynamischen Fahrzyklus . . .	96
Abbildung 26: Schema mit Kenngrößen einer Gaspedalrampe	98
Abbildung 27: Schema eines zentral zusammengesetzten Versuchsplans (CCD) .	99
Abbildung 28: Ergebnisse der DoE-Einflussanalyse der Gaspedalrampen	101
Abbildung 29: Schematischer Ablauf der Zyklererstellung	104
Abbildung 30: Basisschema von Reinforcementlearning	108
Abbildung 31: Modellkette zur Abbildung von Fahrer-, Antriebs- und Fahrzeug- verhalten bei der Zyklererstellung	115
Abbildung 32: Aufbau der TPM	117
Abbildung 33: Ausschnitte von Beispieltrajektorien zweier Iterationen des TPM Anlernens	118
Abbildung 34: Schema des Programmablaufs bei der Zyklererstellung und dem Training	122
Abbildung 35: Kennfelder für den Sauerstoffeintrag in den Katalysator durch Schalteingriffe	125
Abbildung 36: Schema des Modellierungsablaufs für Partikelrohmissionen in der Zyklererstellung	127
Abbildung 37: Vergleich zwischen gemessener und modellierter Kühlmitteltempe- ratur im Validierungsfahrzyklus	128
Abbildung 38: Vergleich zwischen gemessenen und modellierten Partikelrohemis- sionen im Validierungsfahrzyklus	129
Abbildung 39: Geschwindigkeitsprofil eines mit dem Zyklengenerator erzeugten Beispielzyklus	131

Abbildung 40:	Histogramme von Geschwindigkeit und Beschleunigung für NEFZ, WLTC, eine RDE-konforme Straßenfahrt und den generierten Beispielzyklus	133
Abbildung 41:	Motordrehzahl, -last und Gang beim Nachfahren des erzeugten Beispielzyklus bei automatischer und manueller Gangwahl	135
Abbildung 42:	Differenzen zwischen Motordrehmoment, Anzeige aktiver Schubabschaltung und Gang beim Nachfahren des erzeugten Beispielzyklus in der Simulation und am Prüfstand	137
Abbildung 43:	Vergleich der Stickoxidemissionen unterschiedlicher Fahrzyklen im Verhältnis zum Bezugswert	139
Abbildung 44:	Statistische Verteilung der NO _x -Emissionsergebnisse von insgesamt 1594 erzeugten Zyklen	141
Abbildung 45:	Vergleich simulierter und am Prüfstand gemessener Stickoxidemissionen im erzeugten Beispielzyklus	143
Abbildung 46:	Motordrehzahl, -last und Gang beim Nachfahren des erzeugten Beispielzyklus für den Validierungsantrieb bei automatischer und manueller Gangwahl	144
Abbildung 47:	Differenzen zwischen Motordrehmoment, Anzeige aktiver Schubabschaltung und Gang beim Nachfahren des erzeugten Beispielzyklus für den Validierungsantrieb in der Simulation und am Prüfstand .	145
Abbildung 48:	Vergleich simulierter und am Prüfstand gemessener Stickoxidemissionen im erzeugten Beispielzyklus für den Validierungsantrieb .	146
Abbildung 49:	Vergleich der Stickoxidemissionen unterschiedlicher Fahrzyklen mit dem Validierungsantrieb im Verhältnis zum Bezugswert	147
Abbildung 50:	Verläufe von Geschwindigkeit, Motordrehzahl und -last sowie Gang während eines mit dem Zyklengenerator erzeugten Beispielzyklus für hohe Partikelemissionen	149
Abbildung 51:	Vergleich der Partikelrohmissionen unterschiedlicher Fahrzyklen im Verhältnis zum Referenzwert	150
Abbildung 52:	Statistische Verteilung der PN-Emissionsergebnisse von insgesamt 1000 erzeugten Zyklen	150

Abbildung 53: Vergleich simulierter und am Prüfstand gemessener Partikelroh- emissionen im erzeugten PN-kritischen Beispielzyklus	152
Abbildung 54: Eingangsdaten des Tools für die Prüfstandsbewertung	162
Abbildung 55: Ergebnisdarstellung des Tools für die Prüfstandsbewertung . . .	163
Abbildung 56: Detailansicht eines Bewertungsergebnisses des Tools für die Prüf- standsbewertung	164
Abbildung 57: Vergleich der Drehzahlgradienten während des Schaltvorgangs in Fahrzeug- und Motorprüfstandsmessung	166
Abbildung 58: Motordrehzahl- und Drehzahlgradientenverlauf während des An- fahrvorgangs in einer Fahrzeug- und Motorprüfstandsmessung .	167
Abbildung 59: Vergleich von aus dem Antriebsmoment und der gefahrenen Ge- schwindigkeit berechneten Längsbeschleunigungswerten während einer Realfahrt mit Steigung und Gefälle	171
Abbildung 60: Vergleich von aus dem Antriebsmoment und der gefahrenen Ge- schwindigkeit berechneten Längsbeschleunigungswerten während einer Realfahrt mit Querschleunigung	172
Abbildung 61: Regelverhalten unterschiedlicher Fahrerregler im Vergleich zum Menschen	173
Abbildung 62: Gaspedalbetätigungsverhalten verschiedener Fahrerregler im Ver- gleich zum Menschen	175
Abbildung 63: Reproduktionsgüte eines Fahrerreglers	176
Abbildung 64: Verhalten des Fahrerreglers bei Überschreiten der erlaubten Ge- schwindigkeitstoleranz	177
Abbildung 65: Prozentuale Abweichungen der gemittelten NO _x -Rohemissionen im Kennfeld bei verschiedenen Ansauglufttemperaturen gegenüber dem Referenzwert von 25 °C	179
Abbildung 66: Abweichungen der Ansauglufttemperaturen gegenüber dem Start- wert bei Fahrzeug- und Prüfstandsmessung	180
Abbildung 67: Schema des modularen Gebläseaufbaus zur Anströmung des Fahr- zeugladeluftkühlers	185
Abbildung 68: Schema der Regelung zur Anströmung des Fahrzeugladeluftküh- lers	186

Abbildung 69: Geschwindigkeitsrampen mit resultierenden Soll- und Istkühlluftmassenströmen	188
Abbildung 70: Dynamikverhalten des Kühlluftmassenstroms bei Schubladen- und Drehzahlregelung	189
Abbildung 71: Abgleich von Kühlluftmassenströmen, spezifischen Kühlleistungen und Ladelufttemperaturen zwischen Fahrzeug- und Prüfstandsmessung bei Konstantfahrten	190
Abbildung 72: Abgleich von Kühlluftmassenströmen, spezifischen Kühlleistungen und Ladelufttemperaturen zwischen Fahrzeug- und Prüfstandsmessung bei einer Realfahrt	192
Abbildung 73: Unbearbeitete Höhendaten unterschiedlicher Datenquellen	197
Abbildung 74: Nachbearbeitung von Höhendaten des DGM	199
Abbildung 75: Nachbearbeitung von aus Druckmessungen abgeleiteten Höhendaten	200
Abbildung 76: Kennlinien zur Bestimmung der Stromaufnahme des simulierten Elektromotors	206
Abbildung 77: Vergleich zwischen gemessener und simulierter Stromaufnahme des Elektromotors während eines dynamischen Fahrzyklus	207
Abbildung 78: Ersatzschaltbild für das HVS-Modell	207
Abbildung 79: Vergleich zwischen gemessenem und simuliertem SOC mit dem gemessenen Batteriestrom als Eingangsgröße	208
Abbildung 80: Verläufe von Pedalwert, Geschwindigkeit und SOC der Referenzmessung für die Validierung der PHEV-Simulationsumgebung	210
Abbildung 81: Schematischer Überblick der PHEV-Simulationsumgebung	212
Abbildung 82: Vergleich zwischen Kurbelwellendrehmomenten von Fahrzeug- und Prüfstandsmessung	214
Abbildung 83: Vergleich zwischen Elektromotordrehmomenten von Fahrzeug- und Prüfstandsmessung	214
Abbildung 84: Vergleich zwischen HVS-Ladezustand von Fahrzeug- und Prüfstandsmessung	215
Abbildung 85: Vergleich zwischen HVS-Ladezustand von Fahrzeug- und Prüfstandsmessung mit modifizierter Betriebsstrategie	217

Abbildung 86: Verschiebung der Verbrennungsmotorzustarts zwischen Fahrzeug- und Prüfstandsmessung mit modifizierter Betriebsstrategie aufgrund von SOC-Unterschieden	218
Abbildung 87: Schematische Darstellung eines einfachen Perzeptrons	251
Abbildung 88: Schematische Darstellung eines zeitverzögerten neuronalen Netzes	252
Abbildung 89: Auswirkung der Logarithmierung auf die für die Modellierung verwendeten PN-Messungen	253

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Übliche Messprinzipien für die Konzentration von Gasen	15
Tabelle 2:	Gegenüberstellung der Kenngrößen von NEFZ und WLTC	41
Tabelle 3:	Grenzwerte für regulierte Schadstoffemissionen von Ottomotoren nach Euro 6c	43
Tabelle 4:	Vorgaben für eine gültige RDE-Testfahrt	44
Tabelle 5:	Eckdaten der für die Emissionsanalyse und die Zyklengenerierung eingesetzten Versuchsträger	70
Tabelle 6:	Eckdaten der für die Emissionsanalyse und die Zyklengenerierung eingesetzten Prüfstands-ausrüstung	71
Tabelle 7:	Ausgewählte Realfahrtparameter mit Wertebereichen und deren Berücksichtigung im Versuch	88
Tabelle 8:	Ausgewählte Realfahrtparameter und ihre Stufenwerte im DoE Versuchsplan	91
Tabelle 9:	Auszug aus dem erstellten D-optimalen Versuchsplan	92
Tabelle 10:	Parameter der Gaspedalrampe und ausgewählte Grenzwerte	98
Tabelle 11:	Versuchsplan für Gaspedalrampen	100
Tabelle 12:	Berücksichtigung der RDE-Geschwindigkeitsvorgaben in der Belohnungsfunktion	120
Tabelle 13:	Vergleich zwischen RDE-Vorgaben und erreichten Werten von Eckdaten des generierten Beispielzyklus	131
Tabelle 14:	Bewertung von Datenquellen für die Erzeugung eines Höhenprofils	201

Symbolverzeichnis

Griechische Formelzeichen

α	Lernrate	-
α	Schräglaufwinkel	°
β	Steigungswinkel	°
Δs_i	Während Event i zurückgelegte Wegstrecke	m
ϵ	Geringe Wahrscheinlichkeit zur Auswahl neuer Aktionen	-
γ	Diskontierungsfaktor	-
κ	Isentropenexponent	-
λ	Luftzahl	-
ϕ	Spezifische Wärme	W/K
π	Policy beim Reinforcementlearning	-
ρ	Dichte	kg/m ³
τ	Parameter Temperatur der soft-max Policy	-
θ_{rampe}	Steigung der Gaspedalrampe	%/s

Lateinische Formelzeichen

A	Aktionsraum eines Markov-Prozesses	-
A	Fläche	m ²
a	Beschleunigung	m/s ²
a_t	Aktion zum Zeitschritt t eines Markov-Prozesses	-
b	Bias eines KNNs	-
c	Konstante	-
c	Konzentration	m ³ /m ³
c	Wärmekapazität	J/(kg K)
c_W	Widerstandsbeiwert	-

E	Kumulative Belohnung beim Reinforcementlearning	-
F	Kraft, Fahrwiderstand	N
f	Aktivierungsfunktion eines KNNs	-
F_{Beschl}	Beschleunigungskraft	N
F_{Kurve}	Vereinfachter Kurvenwiderstand	N
F_{Luft}	Luftwiderstand	N
F_{Roll}	Rollwiderstand	N
f_{Roll}	Rollwiderstandskoeffizient	-
F_{Steig}	Steigungswiderstand	N
F_0, F_1, F_2	Koeffizienten zur Fahrwiderstandsmodellierung	N, kg/s, kg/m
g	Erdbeschleunigung	m/s ²
h	Anzahl der Zeitschritte	-
h	Höhe	m
I	Stromstärke	A
i	Zählindex	-
j	Zählindex	-
K	Anzahl der Aktionen im Aktionsraum eines Markov-Prozesses	-
k	Anzahl	-
M	Drehmoment	Nm
m	Masse	kg
\dot{m}	Massenstrom	kg/s
$\dot{m}_{\text{NO}_x j}$	NO _x -Massenstrom des Testlaufs j	g/s
$m_{\text{NO}_x i, j}$	Streckenbezogene NO _x -Masse bei Event i und Testlauf j	g/km
md	Drehmoment	Nm
N	Anzahl der Zustände im Zustandsraum eines Markov-Prozesses	-
n	Anzahl	-
n	Drehzahl	1/s
n_F	Anzahl der Faktoren eines Versuchsplans	-
n_K	Anzahl der Kombinationen eines Versuchsplans	-

n_S	Anzahl der Stufen eines Versuchsplans	-
P	Leistung	W
P	Wahrscheinlichkeit	-
p	Luftdruck	mbar
p	Übertrittswahrscheinlichkeit von s_i nach s_j in einer Markov-Kette	-
\mathbf{P}	Transition probability matrix (TPM)	-
PWG_{final}	Gaspedalendwert der Gaspedalrampe	%
Q	Zustandwertefunktion beim Reinforcementlearning	-
\dot{Q}	Wärmestrom	J/s
R	Belohnungsfunktion beim Reinforcementlearning	-
r	Kurvenradius	m
R^2	Bestimmtheitsmaß	-
R^2_{adj}	Adjustiertes Bestimmtheitsmaß	-
r_t	Belohnung zum Zeitschritt t	-
S	Zustandsraum eines Markov-Prozesses	-
s_t	Zustand zum Zeitschritt t eines Markov-Prozesses	-
T	Übergangsfunktion eines Markov-Prozesses	-
t	Index für den Zeitschritt	-
t	Zeit	s
t_{LL}	Leerlaufzeit	s
U_0	Ruhespannung	V
U_{Batt}	Batteriespannung	V
V	Wertefunktion beim Reinforcementlearning	-
v	Geschwindigkeit	m/s od. km/h
w	Gewichtungsfaktor eines KNNs	-
X	Einflussgröße	-
x	Eingangsgröße eines KNNs	-
x_{RG}	Restgasanteil	-
Y	Ausgangsgröße	-

y

Ausgangsgröße eines KNNs

-

Abkürzungsverzeichnis

ADMA	Automotive Dynamic Motion Analyzer
AGR	Abgasrückführung
ALS	Airborne Laserscanning
AMA	Abgasmessanlage
ASAM	Association for Standardisation of Automation and Measuring Systems
ATL	Abgasturbolader
BC	Battery control
BMW	Bayerische Motoren Werke
CAN	Controller Area Network
CCD	Central composite design
CD	Charge depleting
CFD	Computational Fluid Dynamics
CLD	Chemilumineszenz-Detektor
CPC	Condensation Particle Counter
CS	Charge sustaining
CVS	Constant volume sampling
DME	Digitale Motorelektronik
DoE	Design of Experiments
DSC	Dynamic Stability Control
EGS	Elektronische Getriebesteuerung
EiL	Engine in the Loop
EU	Europäische Union
EZA	Einzelzylinderausblendung
FES	Fahrerlebnisschalter
FID	Flammenionisationsdetektor
FTIR	Fourier-Transformation-Infrarotspektrometer
GPS	Global Positioning System
GWS	Gangwahlschalter
HEV	Hybrid electric vehicle
HFM	Heißfilm-Luftmassenmesser

HVS	Hochvoltspeicher
HiL	Hardware in the Loop
ISC	In-service conformity
JRC	Joint Research Centre
KNN	Künstliches neuronales Netz
LDS	Laserdioden Spektroskopie
LLK	Ladeluftkühler
MDP	Markov decision process
MLP	Multilayer perceptron
MSE	Mean squared error
NDIR	Nichtdispersiver Infrarotsensor
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
NVH	Noise, vibration and harshness
OPF	Ottopartikelfilter
OSC	Oxygen storage capacity
PAH	Poly aromatic hydrocarbons
PEMS	Portable emissions measurement system
PHEV	Plug-in hybrid electric vehicle
PMD	Paramagnetischer Detektor
PN	Partikelanzahlemissionen
PWG	Pedalwertgeber
RBS	Restbussimulation
RDE	Real driving emissions
RMSE	Root mean squared error
RPA	Relative positive acceleration
SiL	Software in the Loop
SLP	Singlelayer perceptron
SOC	State of charge
SOI	Start of injection
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
TDNN	Time delay neural network
TPM	Transition probability matrix
UHC	Unburned hydrocarbons
UNECE	United Nations Economic Commission for Europe

VM	Verbrennungsmotor
WLTC	Worldwide harmonized Light-duty Test Cycle
WLTP	Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure
WP	Wiederholpunkt