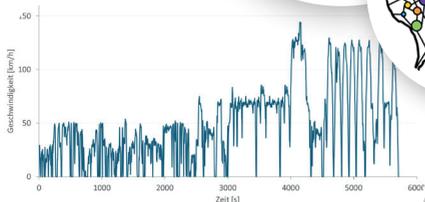
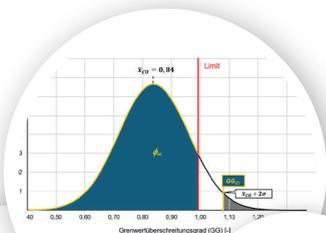


Beitrag zur durchgängigen und methodenbasierten Entwicklung von Antriebssträngen mittels Bewertung ihrer RDE-Kritikalität



Beitrag zur durchgängigen und methodenbasierten Entwicklung von Antriebssträngen mittels Bewertung ihrer RDE-Kritikalität

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

Dissertation

vorgelegt von

M.Sc. Tim Steinhaus

aus Wuppertal

Berichterstatter: Prof. Dr. techn. Christian Beidl
Mitberichterstatter: Prof. Dr. techn. Helmut Eichseder
Tag der Einreichung: 25.01.2022
Tag der mündlichen Prüfung: 17.05.2022

Darmstadt 2022

D17



Schriftenreihe
des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen und Fahrzeugantriebe

Band 25

Tim Steinhaus

**Beitrag zur durchgängigen und methodenbasierten Entwicklung von
Antriebssträngen mittels Bewertung ihrer RDE-Kritikalität**

D17 (Dissertation 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.

Zagl.: 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 978-3-8440-8668-3

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

Fantasie ist wichtiger als Wissen, denn Wissen ist begrenzt.

Albert Einstein



Vorwort

Diese Arbeit entstand in meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Verbrennungskraftmaschinen und Fahrzeugantriebe der Technischen Universität Darmstadt.

An erster Stelle gilt mein Dank meinem Doktorvater und Fachgebietsleiter Herrn Prof. Dr. techn. Christian Beidl. Ihm danke ich für die dargebotene Möglichkeit der Promotion im Rahmen des Beschäftigungsverhältnisses. Neben dem lehrreichen fachlichen Austausch danke ich besonders für die persönliche Unterstützung, welche mir dabei half, meine Arbeiten zu strukturieren, mich fortwährend zu fokussieren und Ergebnisse kritisch zu hinterfragen, um daraus Erkenntnisse abzuleiten. Das stets entgegengebrachte Vertrauen wird mir immer in Erinnerung bleiben. Herrn Prof. Dr. techn. Helmut Eichlseder danke ich für die Übernahme des Korreferats, die wertvollen Anregungen sowie sein Interesse an meiner Arbeit.

Ein ganz wesentlicher Faktor für die Arbeitsergebnisse während meiner Zeit am Institut war das vorherrschende Arbeitsklima und die kollegiale Atmosphäre. In diesem Sinne ein herzliches Dankeschön an alle Mitarbeitenden des Instituts! Neben der Werkstatt und dem Sekretariat seien an dieser Stelle besonders die wissenschaftlichen Hilfskräfte erwähnt, deren unermüdlicher Einsatz sehr zum Erreichen der verfolgten Ziele beiträgt. Darüber hinaus gilt mein expliziter Dank den direkten Kollegen. Herrn Sascha Bauer danke ich für die vielen intensiven Diskussionen und die gegenseitige Unterstützung in schwierigen Projektphasen. Dem Hybrid-Team mit den Herren Alexander Kuznik, Maximilian Stumpp und Harun Zlojo danke ich für deren kritisches Feedback, profunde Diskussionen sowie sämtliche Anregungen. Besonders danke ich auch allen Studierenden, die mir durch ihre wissenschaftlichen Arbeiten oder ihre Tätigkeit als Hilfwissenschaftler stets eine große Hilfe waren und zum Gelingen dieser Arbeit beitragen haben.

Weiterhin danke ich allen Industrie- und Projektpartnern wie der AVL, BMW, IPG sowie ETAS und dort besonders den involvierten Personen für ihre Unterstützung in verschiedenster Form.

Mein herzlichster Dank gebührt, zu guter Letzt, meiner Frau und meiner Familie. Ohne euer aller Zutun, gleich welcher Art, wäre das Vorhaben Dissertation grundsätzlich unmöglich und nicht durchführbar gewesen. Für eure Unterstützung auf diesem Wege: Vielen, lieben Dank!

Darmstadt, im Januar 2022

Tim Steinhaus

Vorwort



Abstract

The thesis at hand describes a methodological approach for assessing the RDE criticality of motor vehicle drivetrains comprising of an internal combustion engine, which is composed of different modules. In addition to a detailed process concept and validation based on exemplary use cases, this work includes an example for the integrated derivation of an emission-minimising operating strategy for hybrid vehicles.

The consideration of real driving emissions (RDE) is part of the type approval procedure in an increasing number of regions worldwide. Various cross-influences that occur under these conditions and the loss of a clearly defined reference test are leading to a paradigm shift in powertrain development. Trends such as electrification as well as the generally increasing complexity of the drivetrain system against the backdrop of required efficiency increases lead to a need for novel development methods to effectively meet these challenges. This is especially true in view of the expected tightening of legal requirements with regard to tolerated limit values and test boundary conditions.

The development methodology presented uses five main modules for this purpose, within which measurement and evaluation routines are defined for deriving concept-specific prioritised RDE evaluation key performance indicators (KPI). All measurement data of the procedure are furthermore used within a test generator to derive concept-specific, emission-critical RDE test scenarios, so-called most-relevant tests, considering its likeliness of occurrence. Approaches from the fields of design of experiments (DoE), genetic algorithms and machine learning are used. Vehicles with petrol and diesel engines as well as a virtual hybrid electric vehicle in the test environments of engine and chassis dynamometer serve as use cases for this novel method.

The results achieved illustrate the potentials of the presented approach for an accelerated, more structured identification of concept-specific weak points as a result of the targeted excitation of such states and, based on this, the derivation of emission critical Most-Relevant-Tests. Furthermore, by linking the method with a hybrid strategy approach that was developed separately by estimating the emission costs on the basis of deep learning models, it is possible to develop an integrated operating strategy without explicitly implementing emission-reducing functions.



Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit beschreibt einen methodischen Ansatz zur Bewertung der RDE-Kritikalität von verbrennungsmotorischen Antrieben in Kraftfahrzeugen, der sich aus verschiedenen Modulen zusammensetzt. Neben einer detaillierten Prozessbeschreibung und -validierung anhand von beispielhaften Anwendungsfällen umfasst diese Arbeit ein daran anknüpfendes Beispiel für die integrierte Ableitung einer emissionsminimierenden Betriebsstrategie für Hybridfahrzeuge.

Die Berücksichtigung der Emissionen im realen Fahrbetrieb (engl. Real Driving Emissions - RDE) ist Bestandteil des Zulassungsverfahrens in immer mehr Regionen der Welt. Die Vielzahl der auftretenden Quereinflüsse und der Verlust eines klar definierten Bezugstests führen zu einem Paradigmenwechsel in der Antriebsentwicklung. Aufgrund von Trends wie der Elektrifizierung sowie der allgemein zunehmenden Komplexität des Antriebssystems vor dem Hintergrund von geforderten Effizienzsteigerungen bedarf es neuartiger Entwicklungsmethoden, um diesen Herausforderungen effektiv zu begegnen. Dies gilt insbesondere in Anbetracht der zu erwartenden Verschärfung gesetzlicher Grenzwerte und Testrandbedingungen.

Die vorgestellte Entwicklungsmethodik nutzt dazu fünf Hauptmodule, innerhalb derer Mess- und Auswerteroutinen zur Ableitung konzeptspezifisch priorisierter RDE-Bewertungsgrößen definiert sind. Sämtliche Messdaten der Prozedur werden innerhalb eines entwickelten Testgenerators genutzt, um unter Berücksichtigung der Realitätsnähe konzeptspezifisch emissionskritischste RDE-Testsznarien, sogenannte Most-Relevant-Tests, abzuleiten. Genutzt werden dabei Ansätze aus den Bereichen statistische Versuchsplanung (DoE), genetische Algorithmen und maschinelles Lernen. Als Anwendungsbeispiele für die neuartige Methode dienen Fahrzeuge mit Otto- und Dieselmotor sowie ein virtuelles Hybridfahrzeug in den Prüfumgebungen Motoren- und Fahrzeugrollenprüfstand.

Die erzielten Ergebnisse verdeutlichen die Potenziale des Ansatzes zur schnellen, strukturierten Identifikation konzeptspezifischer Schwachstellen infolge der gezielten Anregung derartiger Zustände und davon ausgehend die Ableitung emissionskritischer Most-Relevant-Tests. Darüber hinaus gelingt durch Verknüpfung der Methode mit einem ebenfalls entwickelten Ansatz einer Hybridstrategie, welche hohe Schadstoffemissionen als Kostenfunktion auf Basis von Deep Learning Modellen abschätzt, eine integrierte Betriebsstrategieentwicklung ohne explizite Implementierung emissionsmindernder Funktionen.



Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	i
Abbildungsverzeichnis.....	v
Tabellenverzeichnis.....	ix
Abkürzungsverzeichnis.....	x
Formelzeichen- und Indizeverzeichnis.....	xii
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Gliederung der Arbeit	2
2 Rahmenbedingungen.....	5
2.1 Gesetzgebung	5
2.1.1 Klimaschutz	6
2.1.2 Luftreinhaltung.....	9
2.2 Marktentwicklung.....	18
2.3 Diskussion	21
2.4 Zusammenfassung	25
3 Stand der Technik.....	27
3.1 Ottomotoren	27
3.1.1 Entwicklung und Trends.....	28
3.1.2 Emissionen und Abgasnachbehandlung	32
3.1.3 Hybridisierung	37
3.2 Hybride Fahrzeugantriebe	38
3.2.1 Terminologie und Klassifikationen.....	38
3.2.2 Topologien.....	39
3.2.3 Betriebsarten und Betriebszustände.....	41
3.2.4 Betriebsstrategien	43
3.3 Strategien und Werkzeuge in der Antriebsentwicklung	49

3.3.1	V-Modell	50
3.3.2	Entwicklungsumgebungen	51
3.3.3	RDE Entwicklungsmethoden	57
3.3.4	Optimierung in der Antriebsentwicklung.....	65
4	Zielsetzung der Arbeit und Methodik des Vorgehens	79
4.1	Konkretisierung der Problemstellung	79
4.2	Wissenschaftliche Fragestellung	80
4.3	Methodik des Vorgehens	82
5	RDE-Entwicklungsmethodik: Most-Relevant-Test-Prozedur	85
5.1	Anforderungen	85
5.2	Funktionsbeschreibung	86
5.2.1	Hilfsmodule.....	88
5.2.2	Hauptmodule	91
6	Implementierung der Methodik.....	101
6.1	Toolkette.....	101
6.2	Testgenerator.....	102
6.2.1	Hauptprogramm.....	103
6.2.2	Segmentanzahlbestimmung	104
6.2.3	Streckengenerierung	104
6.2.4	Segmentanordnung und Verstetigung	108
6.2.5	Bewertung der Realitätsnähe eines synthetischen Test.....	109
6.2.6	Quantifizierung des Entwicklungsstatus und -fortschritts.....	118
7	Anwendung und Validierung der Methodik	121
7.1	Use-Case 1: Fahrzeug mit Ottomotor	121
7.1.1	Fahrzeug und Antrieb.....	122
7.1.2	Anwendung MRTTP	123
7.1.3	Diskussion	134
7.2	Use-Case 2: Fahrzeug mit Dieselmotor	136
7.2.1	Fahrzeug und Antrieb.....	136

7.2.2	Anwendung MRTP	137
7.2.3	Diskussion	140
7.3	Use-Case 3: Hybridfahrzeug.....	141
7.3.1	Fahrzeug und Antrieb	141
7.3.2	Anwendung MRTP	147
7.3.3	Diskussion	155
8	Integrierte, emissionsoptimale Betriebsstrategie für Hybridfahrzeuge	157
8.1	Emissionsmodellierung	157
8.1.1	Vorgehen	158
8.1.2	Datenbasis	159
8.1.3	Netzwerkaufbau	161
8.1.4	Modellvalidierung.....	164
8.2	Integration in die Betriebsstrategie	166
8.3	Validierung.....	170
8.4	Diskussion	173
9	Zusammenfassung und Ausblick.....	175
Anhang.....	179
A	Versuchsparameter	179
A.1	Versuchsfahrzeuge.....	179
A.2	Versuchsmotoren	179
B	Messtechnik	180
B.1	Temperatur und Druck	180
B.2	Motorbetriebspunkt	180
B.3	Abgas.....	180
C	Most-Relevant-Test-Prozedur.....	181
C.1	Signifikanzniveaus	181
C.2	Systemzustandsstruktur	181
C.3	Datenbanksegment	182
C.4	Dynamische Validierung	183

C.5	Sensitivitäts- und Robustheitsanalyse.....	183
C.6	Most-Relevant-Test-Generator.....	184
C.6.1	GUI.....	184
C.6.2	Ablaufschema der genetischen Algorithmen.....	185
C.6.3	RDE-Randbedingungen.....	186
D	Messergebnisse.....	187
D.1	RDP-Bewertung innerhalb des MRTG.....	187
D.2	Use-Case 1.....	188
D.3	Use-Case 2.....	191
D.4	Integrierte Hybridstrategie.....	192
E	LSTM-Netzwerkeinstellungen.....	192
	Literaturverzeichnis.....	193
	Curriculum Vitae.....	217

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Entwicklung der europäischen Grenzwerte für Schadstoffemissionen im Rahmen der Zertifizierung von benzinbetriebenen Pkw seit dem Jahr 2000 [20], [21].....	9
Abbildung 2-2: Geschwindigkeitsprofile von NEFZ und WLTC (Klasse 3b)	11
Abbildung 2-3: Entwicklung der zertifizierungsrelevanten Regelwerke in Anlehnung an [24]	13
Abbildung 2-4: Schematische Darstellung der Betriebsbereiche eines Motors in unterschiedlichen Zertifizierungstests nach [33]	14
Abbildung 2-5: Historie der globalen Pkw-Produktion nach [43]	18
Abbildung 2-6: Mittelfristige Prognose produzierter Pkw weltweit (links) und in Europa (rechts) unterteilt nach Antriebssystemen im Jahre 2031 [48]	19
Abbildung 2-7: Vergleich spezifischer CO ₂ -Emissionen im Lebenszyklus von unterschiedlichen Antriebsarten [62]	22
Abbildung 2-8: Gegenüberstellung der Entwicklung von anthropogenen Emissionen zum Immissionsgeschehen [75], [76]	24
Abbildung 3-1: Schlüsseltechnologien moderner Ottomotoren nach [90]	29
Abbildung 3-2: Qualitative Darstellung von Schadstoffkonzentrationen im Rohabgas in Abhängigkeit des Luftverhältnisses nach [107]	34
Abbildung 3-3: Qualitative Darstellung von Schadstoffkonzentrationen im Abgas nach Dreibegekkatalysator in Abhängigkeit des Luftverhältnisses nach [107]	35
Abbildung 3-4: Schematische Darstellung des Hybridisierungsgrades und zugehöriger Funktionalitäten in Abhängigkeit der Leistung in Anlehnung an [126], [128]	39
Abbildung 3-5: Antriebsarchitekturen der unterschiedlichen Hybridantriebe [129] ..	40
Abbildung 3-6: Schema der Anordnung von parallelen Hybridtopologien mit den Positionen der E-Maschine(n) <i>P</i> sowie der Kupplung(en) <i>C</i> [131]..	40
Abbildung 3-7: Exemplarische Darstellung von Charge-Sustaining- und Charge-Depleting-Betrieb [130]	43
Abbildung 3-8: Klassifikation von Betriebsstrategiearten für Hybridfahrzeuge	44
Abbildung 3-9: Schema einer heuristischen Betriebsstrategie eines Parallelhybrids nach [137]	47
Abbildung 3-10: V-Modell der Antriebsentwicklung nach [145] in Anlehnung an VDI 2206 [146]	50
Abbildung 3-11: Auftretswahrscheinlichkeit einer normalverteilten Stichprobe als Vielfache der Standardabweichung.....	68

Abbildung 3-12: Vereinfachte Darstellung eines neuronalen Netzwerks mit zwei <i>Hidden Layern</i> ($L=2$) [244]	72
Abbildung 3-13: Ablaufschema eines genetischen Algorithmus nach [258]	76
Abbildung 5-1: Schematische Zusammensetzung der RDE-Kritikalität aus mikroskopischen makroskopischen Einflussgrößen	86
Abbildung 5-2: Prozessübersicht der Most-Relevant-Test-Prozedur RDE- Entwicklungsmethode in Anlehnung an Maschmeyer [183]	87
Abbildung 5-3: Schematische Darstellung der Ableitung von Histogrammen für Zeit und Distanz auf Grundlage der verwendeten Datenbasis von RDE-Fahrten	89
Abbildung 5-4: Schematische Darstellung der Ableitung von Histogrammen von Betriebspunkten und Gradienten auf Grundlage der verwendeten Datenbasis von RDE-Fahrten.....	90
Abbildung 5-5: Stationärer Emissionsprognosewert $GG_{stat,prog,i}$	92
Abbildung 5-6: Prinzip der Rampenmessung um einen Sternpunkt am Beispiel des Betriebspunktes 2500 1/min, 35 % Gaspedalstellung [183]	93
Abbildung 5-7: Prozess zur Erstellung von Most-Relevant-Tests (MRT).....	97
Abbildung 6-1: Einsatz unterschiedlicher Tools innerhalb der MRTP.....	102
Abbildung 6-2: Berechnungsschema des Fitnesswertes eines Individuums innerhalb des genetischen Algorithmus zur Erstellung eines MRT ..	105
Abbildung 6-3: Fitnesswerte im Laufe einer vollständigen Generierung: Ausgangspopulation (links), Verlauf der besten Fitnesswerte über Iterationen (Mitte), finale Population (rechts)	106
Abbildung 6-4: Beispielhafte Verteilung inkl. Normalverteilungsfunktion der Testergebnisse des Most-Relevant-Test-Generators (MRTG) bei Variation der Startpopulation	107
Abbildung 6-5: Berücksichtigung des Aufwärmverhaltens in der Testgenerierung ...	109
Abbildung 6-6: Beispiel für MRT mit (oben) und ohne (unten) empirische Bewertung der Realitätsnähe (RDP)	112
Abbildung 6-7: Aufbau der Datenstruktur von Eingangswerten zur Verwendung innerhalb der Machine Learning Algorithmen.....	113
Abbildung 6-8: Vergleich der ermittelten Realitätsnähe unterschiedlicher Ansätze des maschinellen Lernens anhand von realen und synthetischen Testdaten	116
Abbildung 6-9: Angepasstes Berechnungsschema des Fitnesswertes eines Individuums mit Berücksichtigung der Realitätsnähe.....	117
Abbildung 6-10: Realitätsnähe der kombinierten Bewertung (empirisch und numerisch) innerhalb der MRT-Generierung.....	117
Abbildung 7-1: Übertrag einer Realfahrt ($RDE_{Commuter}$) an den eIL- Motorenprüfstand	123

Abbildung 7-2: Prognostizierte Grenzwertüberschreitungsgrade (GG) im stationären Motorkennfeld des Use-Case 1	124
Abbildung 7-3: Rampengewichte als Ergebnis der überlagerten Variation von Gaspedal- und Drehzahlgradienten unter Berücksichtigung ihrer Auftrittswahrscheinlichkeit.....	126
Abbildung 7-4: Analyseausschnitt emissionsbestimmender Einflussgrößen aus einer Fahrzyklusmessung ($RDE_{Moderate}$).....	129
Abbildung 7-5: Beispielhafte Darstellung von extrahierten Segmentausschnitten, welche sich aus dem eigentlichen Emissionsevent (blau) und der zugehörigen Historie (grau) zusammensetzen.....	130
Abbildung 7-6: Abhängigkeiten ausgewählter Einfluss- und Reaktionsgrößen in den RDE-Kurztrips.....	131
Abbildung 7-7: Einfluss ausgewählter Variationsparameter auf die PN-Rohemission in Kurztrips.....	132
Abbildung 7-8: Vergleich konformer RDE-Tests und einem MRT gleicher Datenbasis anhand des CO-Emissionsergebnisses.....	133
Abbildung 7-9: Vergleich von generiertem MRT zu generischen Tests anhand des CO-Emissionsergebnisses am EiL-Motorenprüfstand.....	134
Abbildung 7-10: Beispiel für Ursachenallokation erhöhter NO_x -Emissionen nach [271]	137
Abbildung 7-11: Testergebnisvergleich der Grenzwertüberschreitung für NO_x von Most-Relevant-Tests zu RDE Fahrten im Use-Case 2 nach [271] ...	138
Abbildung 7-12: Vergleich zwischen konformem MRT und gerafftem Pendant nach [271]	139
Abbildung 7-13: Einfluss einer optimierten Applikation auf die Wahrscheinlichkeit der Emissionskonfirmität bei gleichem MRT (Rollenprüfstandsmessung) in Anlehnung an [271].....	140
Abbildung 7-14: Funktionale Struktur des Hybridfahrzeugmodells	143
Abbildung 7-15: Auswahl des übergeordneten Betriebsmodus auf Basis von SoC-Schwellwerten	145
Abbildung 7-16: Vergleich des VKM-Betriebs von simuliertem und am EiL-Prüfstand gemessenem WLTC für den Use-Case 3, Hybridfahrzeug	146
Abbildung 7-17: Prognostizierte Grenzwertüberschreitungsgrade (GG) im stationären Motorkennfeld des Use-Case 3.....	149
Abbildung 7-18: Vergleich von Last- und Drehzahlgradienten der VKM im konventionellen (links) und hybriden Fahrzeug (rechts).	151
Abbildung 7-19: Vergleich charakteristischer Betriebsgrößen von generiertem und gemessenem MRT des Use-Case 3.....	155

Abbildung 8-1: Umgesetzte Schichten (Layer) der künstlichen neuronalen Netzwerke (KNN) zur Emissionsmodellierung	162
Abbildung 8-2: Vergleich der kumulierten Emissionsverläufe von Simulation und Messung.....	164
Abbildung 8-3: Vergleich der Emissionsmassenströme von CO von Messung und Simulation anhand des Testdatensatzes	166
Abbildung 8-4: Schematische Gegenüberstellung einer eindeutigen (links) und einer un stetigen (rechts) Kostenfunktion und Auswirkung einer Kostenerhöhung für vorherige Betriebspunkte (strichlierte Linie, rechts)	169
Abbildung 8-5: Vergleich der CO-Emissionen für eine A-ECMS und eine MO-ECMS _{KF}	171
Abbildung 8-6: Vergleich der CO-Emissionen für eine A-ECMS und eine MO-ECMS _{LSTM}	172
Abbildung 8-7: Kumulierte CO-Emissionen unter Variation des hinterlegten Skalierungsfaktors für den Schadstoffkostenterm [277]	173

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Euro 6d Grenzwerte für Schadstoffemissionen von Pkw (Fahrzeugklassen M, N1) [21].....	10
Tabelle 2-2: Charakteristische Testparameter von NEFZ und WLTC (Klasse 3b)	10
Tabelle 2-3: Vorgeschlagene Pkw-Grenzwerte des CLOVE-Konsortiums, Stand 27.04.2021 [38]	16
Tabelle 2-4: Vergleich der aktuellen RDE-Randbedingungen zum Diskussionsstand des CLOVE-Konsortiums zum 27.04.2021 [38]	17
Tabelle 3-1: Darstellbare Funktionalitäten unterschiedlicher Hybridisierungsgrade ..	41
Tabelle 5-1: Variationsraum des verkürzten eIL-Realfahrtszenarios	95
Tabelle 6-1: Im Rahmen der Untersuchungen eingesetzte Toolkette	101
Tabelle 6-2: Ergebnisse der Prüfung auf Normalverteilung der synthetischen Testresultate.....	107
Tabelle 6-3: Empirische Kriterien zur Bewertung der Realitätsnähe innerhalb des MRTG.....	110
Tabelle 7-1: Durchschnittlich prognostizierte Grenzwertüberschreitungsgrade des Use-Case 1	125
Tabelle 7-2: Auflistung der kritischsten Rampenergebnisse je Abgasspezies.....	126
Tabelle 7-3: Emissionsergebnisse durchgeführter Messungen in der eIL-Umgebung	127
Tabelle 7-4: Charakteristische Eigenschaften des Hybridantriebsstrangs.....	142
Tabelle 7-5: Vergleich des Kraftstoffverbrauchs im WLTC für das gleiche Fahrzeug mit konventionellem Antrieb und als P2-Hybrid	146
Tabelle 7-6: Wirkungsgradvergleich des Verbrennungsmotors im WLTC für das gleiche Fahrzeug mit konventionellem Antrieb und als P2-Hybrid.....	147
Tabelle 7-7: Durchschnittlich prognostizierte Grenzwertüberschreitungsgrade des Use-Case 3.....	149
Tabelle 7-8: Kumulierte Emissionsergebnisse des Use-Case 3 für ausgewählte Fahrzyklen.....	151
Tabelle 8-1: Ausgewählte Features der unterschiedlichen Emissionsmodelle	160
Tabelle 8-2: Modellabweichungen der modellierten Emissionsspezies im Rahmen des ML-Trainings.....	165

Abkürzungsverzeichnis

AGN	Abgasnachbehandlung
AGR	Abgasrückführung
BEV	Battery Electric Vehicle (dt.: Batterieelektrisches Fahrzeug)
CD	Charge Depleting (dt.: <i>ladungsverbrauchend</i>)
CF	Conformity Factor (dt.: <i>Konformitätsfaktor</i>)
CNN	Convolutional Neural Network (dt.: <i>faltendes neuronales Netzwerk</i>)
CS	Charge Sustaining (dt.: <i>ladungserhalten</i>)
DL	Deep Learning
DoE	Design-of-Experiments (dt.: <i>statistische Versuchsplanung</i>)
ECMS	Equivalent Consumption Minimization Strategy
ECU	Engine-Control-Unit (dt.: <i>Motorsteuergerät</i>)
EiL	Engine-in-the-Loop
EM	Elektromotor
EU	Europäische Union
FHEV	Full-HEV
GUI	Graphical User Interface (dt.: <i>Grafische Benutzeroberfläche</i>)
HCU	Hybrid-Control-Unit (dt.: <i>Hybridsteuergerät</i>)
HEV	Hybrid Electric Vehicle (dt.: <i>Hybridfahrzeug</i>)
HiL	Hardware-in-the-Loop
ISC	In-Service Conformity (dt.: <i>Konformität im Betrieb</i>)
MAE	Moving Average Error (dt.: <i>Mittlere gleitende Abweichung</i>)
MHEV	Mild-HEV
MiL	Model-in-the-Loop
ML	Machine Learning, (dt.: <i>Maschinelles Lernen</i>)
MRT	Most Relevant Test
MRTG	Most Relevant Test Generator

M RTP	Most Relevant Test Procedure
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
NTE	Not-to-Exceed-Limit (dt.: <i>Motorsteuergerät</i>)
PEMS	Portable Emission Measurement System (dt.: <i>mobiles Emissionsmesssystem</i>)
PHEV	Plug-in-HEV
PMR	Power-Mass-Ratio
PN	Particulate number (dt.: <i>Partikelanzahl</i>)
RDE	Real Driving Emissions
RDP	Real Driving Probability
RMSE	Root Mean Square Error (dt.: <i>Mittlere quadratische Abweichung</i>)
RNN	Rekurrent Neuronal Network (dt.: <i>rekurrentes neuronales Netzwerk</i>)
SCR	Selective Catalytic Reduction (dt.: <i>Selektive katalytische Reduktion</i>)
SiL	Software-in-the-Loop
SoC	State of charge (dt.: <i>Ladezustand</i>)
TCU	Transmission-Control-Unit (dt.: <i>Getriebesteuergerät</i>)
TfL	Transport for London
TSC	Time Series Classification (dt.: <i>Zeitreihenklassifizierer</i>)
VKM	Verbrennungskraftmaschine
WLTC	World Harmonized Light-Duty Test Cycle
WLTP	World Harmonized Light-Duty Test Procedure
XiL	X-in-the-Loop

Formelzeichen- und Indizeverzeichnis

Lateinische Buchstaben

Zeichen	Einheit	Bezeichnung
I	A	Elektrischer Strom
J	-	Kraftstoffkosten
M	Nm	Drehmoment
N	1/min	Drehzahl
P	W	Leistung
Q	-	Ladungsinhalt
T	K	Temperatur
U	V	Elektrische Spannung
GG		Grenzwertüberschreitungsgrad
H	-	Hamiltonfunktion
a	m/s ²	Beschleunigung
h	-	Hybridmodus
i	-	Übersetzungsverhältnis
m	kg	Masse
\dot{m}	kg/h	Massenstrom
n	-	Anzahl
p	Pa	Druck
t	s	Zeit
u	-	Steuergröße
v	m/s	Geschwindigkeit
x	m	Weg

Griechische Buchstaben

Zeichen	Einheit	Bezeichnung
Δ	-	Differenz
α	-	Lastanforderung
ϕ	-	Wahrscheinlichkeit
η	-	Wirkungsgrad
λ	-	Luft-Kraftstoff-Verhältnis
μ	-	Mittelwert
σ	-	Standardabweichung

Indizes

Zeichenfolge	Bezeichnung
95	95 %-Vertrauensintervall
<i>B</i>	Betriebspunkt
<i>Bat</i>	Batterie
<i>CO</i>	Kohlenmonoxid
<i>dist</i>	Distanz
<i>dyn</i>	Dynamisch
<i>EM</i>	Elektromotor
<i>emp</i>	Empirisch
<i>fuel</i>	Fuel, dt. Kraftstoff
<i>HC</i>	Kohlenwasserstoffe
<i>i</i>	Zählindex
<i>KF</i>	Kennfeld
<i>KK</i>	Konformitätskonfidenz
<i>KS</i>	Kraftstoff
<i>lim</i>	Limit

<i>LSTM</i>	LSTM-Modell
<i>max</i>	Maximum
<i>mean</i>	mean, <i>dt. durchschnittlich</i>
<i>NO_x</i>	Stickoxide
<i>num</i>	Numerisch
<i>PN</i>	Partikelanzahl
<i>pos</i>	Positiv
<i>prog</i>	Prognostiziert
<i>RDE</i>	Real Driving Emissions
<i>rel</i>	Relativ
<i>req</i>	Required, <i>dt. benötigt</i>
<i>stat</i>	Stationär
<i>VKM</i>	Verbrennungskraftmaschine
<i>Weg</i>	Weg
<i>Zeit</i>	Zeit