

Schriftenreihe  
des Instituts für  
Fahrzeugtechnik  
TU Braunschweig



**Nr: 77**

M.Sc.  
**Arno Ringleb**  
**2022**

# Repräsentative Testzyklen zur Überprüfung der Real Driving Emissions

---

Herausgegeben von:  
Prof. Dr.-Ing. Ferit Küçükay

# Repräsentative Testzyklen zur Überprüfung der Real Driving Emissions

Von der Fakultät für Maschinenbau  
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig  
zur Erlangung der Würde  
eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte Dissertation

von  
**Arno Ringleb**  
geboren in Stendal

eingereicht am: 10.03.2022  
mündliche Prüfung am: 19.05.2022

Vorsitz: Prof. Dr. L. Frerichs  
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. F. Küçükay  
Prof. Dr.-Ing. P. Eilts

2022



Schriftenreihe des Instituts für Fahrzeugtechnik  
TU Braunschweig

Band 77

**Arno Ringleb**

**Repräsentative Testzyklen zur Überprüfung  
der Real Driving Emissions**

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.: Braunschweig, 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 978-3-8440-8665-2

ISSN 1619-6325

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](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

Diese Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Braunschweig. Auf diesem Weg möchte ich allen danken, die direkten oder indirekten Einfluss auf das Gelingen dieser Arbeit hatten.

Zuallererst danke ich besonders meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Ferit Küçükay, der mir als Leiter des Instituts für Fahrzeugtechnik die Möglichkeit zu Promotion eröffnete. Durch die vielfältigen Aufgaben, das entgegengebrachte Vertrauen und die Förderung konnte ich mich sowohl fachlich als auch überfachlich weiterentwickeln.

Darüber hinaus gilt mein Dank Prof. Dr.-Ing. Peter Eilts, Leiter des Instituts für Verbrennungskraftmaschinen, für die Übernahme der Mitberichtserstattung sowie Prof. Dr. Ludger Frerichs, Leiter des Instituts für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge, für das Übernehmen der Rolle des Vorsitzenden im Prüfungskomitee.

Im Besonderen bedanke ich mich bei Matthias Werra für die außergewöhnlich gute Zusammenarbeit in diversen Projekten, das gute Miteinander im Büro, den konstruktiven fachlichen Austausch während des Erstellens dieser Dissertation sowie das intensive Korrekturlesen.

Weiterhin möchte ich allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts und des Niedersächsischen Forschungszentrums Fahrzeugtechnik meinen Dank für die abwechslungsreichen Jahre, die intensive und gute Zusammenarbeit und das gute Arbeitsklima aussprechen. Dies schließt insbesondere Sylvie Rohde-Schulte und Kathrin Durner des Sekretariats sowie alle Kollegen der institutsinternen Werkstatt mit ein.

Gesondert danke ich Maic Rennebach, Leiter des Technikums, für die gute, offene, ehrliche und freundschaftliche Zusammenarbeit, auch in intensiven und angespannten Phasen.

Beim 3F-Team bedanke ich mich für das angenehme und freundschaftliche Arbeitsklima über alle Jahre hinweg. Christian Sieg und Marcel Sander danke ich zudem für die Korrektur dieser Arbeit.

Dr.-Ing. Lin Li gilt mein Dank für die erheiternden und freundschaftlichen gemeinsamen Jahre am Institut.

Abschließend bedanke ich mich bei meinen Freunden, allen voran Pascale Lenz und Florian Koch, sowie bei meiner Familie für die außerfachliche und moralische Unterstützung während der Erstellung dieser Arbeit. Insbesondere danke ich meiner Schwester Annemarie sowie meinen Brüdern Joachim und Martin für den Rückhalt und den Zuspruch, vor allem in schwierigeren Zeiten und meiner Schwester Annemarie darüber hinaus für ihren Anteil an der Korrektur.



# Repräsentative Testzyklen zur Überprüfung der Real Driving Emissions

von Arno Ringleb

## Kurzfassung

Der Automobilsektor steht mit Blick auf die Emissionsreduzierung im besonderen Fokus der Gesetzgebung sowie der Öffentlichkeit. Zum Erreichen der Ziele zur Klimaneutralität werden Emissionen und Schadstoffe gesetzlich limitiert und kontrolliert. Ergänzend zu Rollenprüfstandsmessungen mit gesetzlichen Fahrzyklen erfolgt seit 2017 zusätzlich die Überprüfung der sogenannten Real Driving Emissions (RDE) im tatsächlichen Fahrbetrieb. Dazu werden Fahrzeuge mit portablen Emissionsmessgeräten ausgestattet und im öffentlichen Verkehr bewegt. Dieses erweiterte Verfahren im Rahmen der Homologation unterliegt strengen Vorgaben sowohl in Bezug auf die Grenzwerte als auch hinsichtlich der Randbedingungen und Durchführung der Messfahrten.

Die Eingrenzungen der RDE-Messfahrten betreffen unter anderem Dauer, Strecke, Streckenverteilung sowie Fahrdynamik und Steigung. Infolge der teureren Messtechnik und der hohen Wahrscheinlichkeit einer ungültigen Messfahrt, ist die notwendige Absicherung der Fahrzeugantriebe auf der Straße sehr zeit- und kostenintensiv.

In dieser Arbeit wird ein Werkzeug entwickelt, welches das Erzeugen RDE-konformer Geschwindigkeitsprofile sowie repräsentativer Steigungsprofile ermöglicht. Diese Fahrzyklen halten alle fahrzeugunabhängigen RDE-Kriterien ein und können in Simulationen oder an Prüfständen im Rahmen der Antriebsstrangentwicklung zum Einsatz kommen. Dadurch können Zeit und Kosten für Tests im realen Straßenverkehr eingespart werden.

Die Generierung RDE-konformer Geschwindigkeitsprofile nutzt die Methode der Wegabschnitte (Micro-Trips), bei der Fahrzeugmessungen an den Stillstandsphasen aufgetrennt werden. Die so erzeugten Segmente werden anschließend gezielt zusammengesetzt, um einen Fahrzyklus aufzubauen. Dabei erfolgt das systematische Einbeziehen der gesetzlichen RDE-Kriterien. Unter Zuhilfenahme von künstlichen neuronalen Netzen wird bei der Zyklerstellung die Fahrdynamik der einzelnen Wegabschnitte bewertet, was das Erstellen von RDE-konformen Zyklen mit gewünschter Zieldynamik ermöglicht.

Auf Basis der Fahrzeugmessungen erfolgt der Aufbau von Steigungsstatistiken. Mit ihnen werden repräsentative Steigungsverläufe für die RDE-Zyklen erzeugt, wobei die entsprechenden RDE-Kriterien in Form von Gewichtungsfunktionen eingehen. Dies erlaubt das Erstellen von Steigungsprofilen, welche die reale Fahrumgebung repräsentativ abbilden und gleichzeitig die gesetzlichen Vorgaben für RDE-Fahrten erfüllen.

An exemplarischen RDE-konformen Zyklen werden simulativ Verbrauchsuntersuchungen durchgeführt. Dabei stehen der Einfluss der dynamischen Kritikalität und der Steigung, die Unterschiede zu gesetzlichen Zyklen und zum Kundenbetrieb sowie das Potential durch Elektrifizierung im Fokus der Betrachtungen.

Mit Blick auf den Kundenbetrieb wird abschließend auf Basis der Ergebnisse eine Handlungsempfehlung zum Umgang mit den derzeitigen RDE-Kriterien abgeleitet.



# Representative Test Cycles for Verifying Real Driving Emissions

by Arno Ringleb

## Abstract

With regard to emissions reduction the automotive sector is particularly focused on by legislation and public attention. To achieve the climate neutrality targets, emissions and pollutants are limited and controlled by law. In addition to chassis dynamometer measurements with legal driving cycles, Real Driving Emissions (RDE) have been monitored since 2017. For this purpose, vehicles are equipped with portable emission measurement systems and driven in public traffic. The boundary conditions of procedure and execution of the test drives are strictly constrained.

The restrictions of the RDE test drives refer to several factors such as duration, distance, distance distribution, driving dynamics and slope. Due to the more expensive measurement technology and the high probability of invalid test drives, the necessary validation of powertrains on the road leads to high costs and time efforts.

In this thesis a tool is developed, which allows the generation of RDE-compliant speed profiles as well as representative slope profiles. This can reduce time effort and costs of real-world road testing.

The cycle generator uses so called micro-trips, which result from splitting vehicle measurements at standstill phases. These segments are reassembled to RDE-compliant speed profiles. The legal RDE criteria are systematically taken into account during the process. By using artificial neural networks, the driving dynamics of the individual micro-trips are evaluated during cycle generation. This allows the generator to create RDE-compliant cycles with desired target driving dynamics.

Slope statistics are developed on the basis of vehicle measurements. These are used to generate representative slope profiles for the RDE cycles. The relevant RDE criteria are taken into account by using weighting functions. As a result, it is possible to generate slope profiles that are representative of the real driving environment and at the same time meet the legal requirements of RDE testing.

On exemplary RDE-compliant cycles fuel consumption simulations are applied and subsequently evaluated. In this process the focus is set on the impact of dynamic criticality and slope, the differences to legal cycles and customer operation and the savings potential due to powertrain electrification.

Finally, with regard to customer operations, a recommendation for further dealing with current RDE criteria is presented based on the results.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Formelzeichen und Abkürzungen</b>	<b>iii</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation und Ziel der Arbeit	1
1.2 Aufbau und Inhalt der Arbeit	2
<b>2 Stand der Forschung</b>	<b>5</b>
2.1 Antriebe und Fahrwiderstände	5
2.1.1 Antriebskonzepte und -topologien	5
2.1.2 Fahrwiderstände	7
2.2 Fahrzyklen und ihre Kennparameter	10
2.2.1 Allgemeines	10
2.2.2 Gesetzliche Fahrzyklen	11
2.2.3 Kennparameter von Fahrzyklen	15
2.3 3F-Methodik zur Charakterisierung des Kundenbetriebs	20
2.4 Gesetzliche Vorgaben für Testfahrten zur Überprüfung der RDE	23
2.4.1 Randbedingungen für RDE-Fahrten	26
2.4.2 Fahrzeugunabhängige Kriterien für RDE-Fahrten	26
2.4.3 Fahrzeugabhängige Kriterien für RDE-Fahrten	32
2.5 Künstliche neuronale Netze	35
2.5.1 Maschinelles Lernen	35
2.5.2 Aufbau und Funktionsweise eines künstlichen Neurons	36
2.5.3 Aufbau künstlicher neuronaler Netze	39
2.6 Verwendetes Simulationsmodell	41
2.7 Bewertung vorhandener Methoden und Werkzeuge für RDE-Zyklen	44
2.8 Zusammenfassung Stand der Forschung	47
<b>3 Methodik zur Generierung RDE-konformer Geschwindigkeitsprofile</b>	<b>49</b>
3.1 Ablauf der Methodik	50
3.2 Verwendete Datenbasis	51
3.3 Kritikalität RDE-konformer Geschwindigkeitsprofile	53
3.4 Generieren von Wegabschnitten durch Messdatensegmentierung	54
3.4.1 Identifizierung der Wegabschnitte	55
3.4.2 Fahrumgebungskategorisierung der Wegabschnitte	55
3.4.3 Aufbau der Datenbank für Wegabschnitte	59

3.5	Aufbau der künstlichen neuronalen Netze . . . . .	60
3.5.1	Einsatzzweck der künstlichen neuronalen Netze . . . . .	61
3.5.2	Konfiguration der künstlichen neuronalen Netze . . . . .	64
3.6	Generierung des RDE-konformen Geschwindigkeitsprofils . . . . .	71
3.6.1	Beginn einer Zyklusgenerierung . . . . .	71
3.6.2	Zyklusreserve und Abbruchkriterien . . . . .	71
3.6.3	Bewertung und Auswahl neuer Wegabschnitte . . . . .	73
3.6.4	Ende einer Zyklusgenerierung . . . . .	83
3.7	Zusammenfassung der Methodik . . . . .	84
<b>4</b>	<b>Repräsentative Steigungsprofile für RDE-konforme Fahrzyklen</b>	<b>85</b>
4.1	Ablauf der Methodik . . . . .	86
4.2	Verwendete Datenbasis . . . . .	87
4.2.1	Fahrzeugmessdaten . . . . .	87
4.2.2	OpenStreetMap (OSM) . . . . .	88
4.3	Rekonstruktion des Tempolimits . . . . .	88
4.3.1	Map-Matching und Geoinformationen . . . . .	89
4.3.2	Erstellen, Plausibilisieren und Finalisieren des Tempolimitprofils	90
4.4	Aufbau der Statistiken . . . . .	91
4.5	Generieren statistischer Steigungsprofile . . . . .	94
4.5.1	Initialisierung der Steigungsprofilgenerierung . . . . .	94
4.5.2	Erzeugen eines idealen Höhenverlaufs . . . . .	94
4.5.3	Ende der Steigungsprofilgenerierung . . . . .	100
4.6	Zusammenfassung der Methodik . . . . .	102
<b>5</b>	<b>RDE-konforme Fahrzyklen in der Anwendung</b>	<b>103</b>
5.1	Betrachtete Fahrzeuge . . . . .	103
5.2	Betrachtete RDE-konforme Zyklen . . . . .	104
5.3	Einfluss der dynamischen Kritikalität . . . . .	110
5.4	RDE-Zyklen im Vergleich zu gesetzlichen Zyklen und dem Kundenbetrieb	112
5.5	Einfluss der repräsentativen Steigungsprofile . . . . .	115
5.6	Potentiale der Elektrifizierung . . . . .	118
5.7	Anpassung der RDE-Kriterien als Handlungsempfehlung . . . . .	121
5.8	Fazit . . . . .	123
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>125</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>127</b>
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>141</b>
A.1	Fahrzeug- und zyklusbezogene Kennparameter . . . . .	141
A.2	Zyklusbezogene Kennparameter der RDE-konformen Zyklen . . . . .	145

# Formelzeichen und Abkürzungen

## Lateinische Buchstaben

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
$A$	$\text{m}^2$	Querspanntfläche
$a$	$\text{m}/\text{s}^2$	Fahrzeuglängsbeschleunigung
$\bar{a}$	$\text{m}/\text{s}^2$	mittlere Fahrzeuglängsbeschleunigung
$A$	–	Formvariable der Steigungsgewichtung
$A_1$	–	Formvariable der Wegabschnittsbewertung
$A_2$	–	Formvariable der Wegabschnittsbewertung
$A_5, FU$	–	Formvariable der WA-Bewertung einer FU
$A_6$	–	Formvariable der Wegabschnittsbewertung
$\bar{a}_{Beschl}$	$\text{m}/\text{s}^2$	mittlere Beschleunigung
$a_i$	$\text{m}/\text{s}^2$	Beschleunigung in einem Zeitschritt
$a_{max}$	$\text{m}/\text{s}^2$	maximale Beschleunigung
$a_{max, Zug}$	$\text{m}/\text{s}^2$	maximale Beschleunigung Zugphasen
$a_{min}$	$\text{m}/\text{s}^2$	maximale Verzögerung
$a_{min, Schub}$	$\text{m}/\text{s}^2$	maximale Verzögerung Schubphasen
$\bar{a}_{pos}$	$\text{m}/\text{s}^2$	Mittelwert der positiven Beschleunigungen
$\bar{a}_{pos, A}$	$\text{m}/\text{s}^2$	Mittelwert der positiven Beschl. eines WA
$\bar{a}_{pos, B}$	$\text{m}/\text{s}^2$	Mittelwert der positiven Beschl. eines WA
$\bar{a}_{pos, komb}$	$\text{m}/\text{s}^2$	kombinierte mittlere positive Beschleunigung
$a_{ref}$	$\text{m}/\text{s}^2$	Referenzbeschleunigung
$\bar{a}_{Schub}$	$\text{m}/\text{s}^2$	mittlere Beschleunigung Schubphasen
$\bar{a}_{Verz}$	$\text{m}/\text{s}^2$	mittlere Verzögerung
$\bar{a}_{Zug}$	$\text{m}/\text{s}^2$	mittlere Beschleunigung Zugphasen
$b$	div.	Bias eines Neurons
$B$	–	Formvariable der Steigungsgewichtung
$\Delta B$	L	Kraftstoffdifferenz
$B_1$	–	Formvariable der Wegabschnittsbewertung
$B_2$	–	Formvariable der Wegabschnittsbewertung
$B_5, FU$	–	Formvariable der WA-Bewertung einer FU
$B_6$	–	Formvariable der Wegabschnittsbewertung

$C_1$	–	Formvariable der Wegabschnittsbewertung
$C_2$	–	Formvariable der Wegabschnittsbewertung
$C_{Bat}$	kWh	Batteriekapazität
$C_{dyn}$	–	dynamische Kritikalität
$\overline{C}_{dyn}$	–	mittlere dynamische Kritikalität
$C_{dyn,Autobahn}$	–	dynamische Kritikalität auf der Autobahn
$C_{dyn,FU}$	–	dynamische Kritikalität einer Fahrumgebung
$C_{dyn,Landstraße}$	–	dynamische Kritikalität auf der Landstraße
$\overline{C}_{dyn,neu}$	–	mittlere Kritikalität mit neuer Grenzkurve
$\overline{C}_{dyn,original}$	–	mittlere Kritikalität mit originaler Grenzkurve
$C_{dyn,Stadt}$	–	dynamische Kritikalität in der Stadt
$C_{RPA}$	–	RPA-Abstand
$\overline{C}_{RPA}$	–	mittlerer RPA-Abstand
$C_{RPA,Autobahn}$	–	RPA-Abstand auf der Autobahn
$C_{RPA,Landstraße}$	–	RPA-Abstand auf der Landstraße
$C_{RPA,Stadt}$	–	RPA-Abstand in der Stadt
$c_w$	–	Luftwiderstandsbeiwert
$D$	$m^2/s^3$	Dynamikfaktor
$D_{50}$	$m^2/s^3$	50%-Perzentil der Dynamikfaktoren
$\Delta D_{50,75}$	$m^2/s^3$	Differenz zwischen Dynamikfaktor-Perzentilen
$\Delta D_{50,95}$	$m^2/s^3$	Differenz zwischen Dynamikfaktor-Perzentilen
$D_{50,A}$	$m^2/s^3$	50%-Perzentil der Dynamikfaktoren eines WA
$D_{50,B}$	$m^2/s^3$	50%-Perzentil der Dynamikfaktoren eines WA
$D_{50,ratio}$	–	Verhältnis 50%-Perzentile der Dynamikfaktoren
$D_{75}$	$m^2/s^3$	75%-Perzentil der Dynamikfaktoren
$\Delta D_{75,95}$	$m^2/s^3$	Differenz zwischen Dynamikfaktor-Perzentilen
$D_{75,A}$	$m^2/s^3$	75%-Perzentil der Dynamikfaktoren eines WA
$D_{75,B}$	$m^2/s^3$	75%-Perzentil der Dynamikfaktoren eines WA
$D_{75,ratio}$	–	Verhältnis 75%-Perzentile der Dynamikfaktoren
$D_{95}$	$m^2/s^3$	Dynamikperzentil
$D_{95,A}$	$m^2/s^3$	Dynamikperzentil eines Wegabschnitts
$D_{95,A+B}$	$m^2/s^3$	Dynamikperzentil nach WA-Kombination
$D_{95,A+C}$	$m^2/s^3$	Dynamikperzentil nach WA-Kombination
$D_{95,Appr}$	$m^2/s^3$	approximiertes Dynamikperzentil
$D_{95,Appr,A+B}$	$m^2/s^3$	approximiertes $D_{95}$ für WA-Kombination
$D_{95,Appr,A+C}$	$m^2/s^3$	approximiertes $D_{95}$ für WA-Kombination
$D_{95,Appr,arith}$	$m^2/s^3$	$D_{95}$ , approximiert mit arithmetischem Mittelwert
$D_{95,Appr,B+C}$	$m^2/s^3$	approximiertes $D_{95}$ für WA-Kombination
$D_{95,Appr,FU}$	$m^2/s^3$	approximiertes $D_{95}$ einer Fahrumgebung
$D_{95,Appr,gew}$	$m^2/s^3$	$D_{95}$ , approximiert mit gewichtetem Mittelwert
$D_{95,B}$	$m^2/s^3$	Dynamikperzentil eines Wegabschnitts

$D_{95,B+C}$	$m^2/s^3$	Dynamikperzentil nach WA-Kombination
$D_{95,C}$	$m^2/s^3$	Dynamikperzentil eines Wegabschnitts
$D_{95,kritisch}$	$m^2/s^3$	$D_{95}$ -Grenzwert
$D_{95,kritisch,Autobahn}$	$m^2/s^3$	$D_{95}$ -Grenzwert für die Autobahn
$D_{95,kritisch,Land}$	$m^2/s^3$	$D_{95}$ -Grenzwert für die Landstraße
$D_{95,kritisch,Stadt}$	$m^2/s^3$	$D_{95}$ -Grenzwert für die Stadt
$D_{95,ratio}$	–	Verhältnis von zwei Dynamikperzentilen
$D_{100}$	$m^2/s^3$	100%-Perzentil der Dynamikfaktoren
$D_{100,A}$	$m^2/s^3$	100%-Perzentil der Dynamikfaktoren eines WA
$D_{100,B}$	$m^2/s^3$	100%-Perzentil der Dynamikfaktoren eines WA
$d_i$	m	zurückgelegte Strecke in einem Zeitschritt
$D_j$	$m^2/s^3$	Dynamikfaktor eines Samples
$d_j,FU$	m	Strecke im Zeitschritt einer Fahrumgebung
$d_k$	m   km	zurückgelegte Strecke in einem Fenster
$D_s,FU$	km	fehlende Strecke einer Fahrumgebung
$D_s,ges$	km	Gesamtstreckenreserve
$D_s,max,FU$	–	Reserve zum maximalen Streckenanteil einer FU
$D_s,min,FU$	–	fehlender Streckenanteil einer FU
$D_t,100$	s	fehlende Zykluszeit oberhalb 100 km/h
$D_t,max$	s	Zeitreserve des Zyklus zur maximalen Fahrdauer
$D_t,min$	s	fehlende Zykluszeit zur Mindestfahrdauer
$\bar{E}_B,Schub$	Ws/m	mittl. Beschleunigungswiderstandsenergie Schub
$\bar{E}_B,Zug$	Ws/m	mittl. Beschleunigungswiderstandsenergie Zug
$\bar{E}_L,Schub$	Ws/m	mittl. Luftwiderstandsenergie Schubphasen
$\bar{E}_L,Zug$	Ws/m	mittl. Luftwiderstandsenergie Zugphasen
$\bar{E}_{Reib,Schub}$	Ws/m	mittl. Reibwiderstandsenergie Schubphasen
$\bar{E}_{Reib,Zug}$	Ws/m	mittl. Reibwiderstandsenergie Zugphasen
$\bar{E}_{Roll,Schub}$	Ws/m	mittl. Rollwiderstandsenergie Schubphasen
$\bar{E}_{Roll,Zug}$	Ws/m	mittl. Rollwiderstandsenergie Zugphasen
$\bar{E}_{St,Schub}$	Ws/m	mittl. Steigungswiderstandsenergie Schubphasen
$\bar{E}_{St,Zug}$	Ws/m	mittl. Steigungswiderstandsenergie Zugphasen
$f_0$	N	Fahrwiderstandskoeffizient
$f_1$	N/(km/h)	Fahrwiderstandskoeffizient
$f_2$	N/(km/h) <sup>2</sup>	Fahrwiderstandskoeffizient
$F_B$	N	Beschleunigungswiderstandskraft
$F_{FW}$	N	Fahrwiderstandskraft
$F_K$	N	Vorspur- und Kurvenwiderstandskraft
$F_L$	N	Luftwiderstandskraft
$F_{Reib}$	N	Reibwiderstandskraft
$F_{Roll}$	N	Rollwiderstandskraft
$f_{Roll}$	–	Rollwiderstandsbeiwert

$F_{St}$	N	Steigungswiderstandskraft
$G$	N	Gewichtskraft
$g$	m/s <sup>2</sup>	Erdbeschleunigung
$g_1$	–	Gewichtungsfaktor zur Wegabschnittsbewertung
$g_2$	–	Gewichtungsfaktor zur Wegabschnittsbewertung
$g_3$	–	Gewichtungsfaktor zur Wegabschnittsbewertung
$g_4$	–	Gewichtungsfaktor zur Wegabschnittsbewertung
$g_5$	–	Gewichtungsfaktor zur Wegabschnittsbewertung
$g_6$	–	Gewichtungsfaktor zur Wegabschnittsbewertung
$g_j$	–	Gewichtungsfaktor zur Wegabschnittsbewertung
$g_{p,k}$	–	Gewichtungsfaktor Steigungsklasse
$GPS$	%	Gaspedalstellung
$H$	–	absolute Häufigkeit
$h$	–	relative Häufigkeit
$h_0$	m	Ausgangshöhe
$h_{aktuell}$	m	aktuelle Höhe des erzeugten Höhenprofils
$h_{aktuell,1}$	m	aktuelle Höhe des erzeugten Höhenprofils
$h_{aktuell,2}$	m	aktuelle Höhe des erzeugten Höhenprofils
$h_{d,FU}$	–	Streckenanteil einer Fahrumgebung
$\Delta h_{kum,rel}$	m/100 km	streckenbez. kumulierte positive Höhendifferenz
$h_{st}$	m	vertikale Höhenänderung
$H_u$	-	unterer Heizwert Benzin
$i$	–	Zählvariable
$j$	–	Zählvariable
$k$	–	Index Fenster mit CO <sub>2</sub> -Bezugsmasse des WLTP
$k$	–	Index einer Stillstandsphase
$L_{dyn,max}$	–	oberer Grenzwert der Kritikalität
$L_{dyn,min}$	–	unterer Grenzwert der Kritikalität
$L_s$	km	Mindeststrecke einer Fahrumgebung
$L_{s,max}$	–	maximaler Streckenanteil
$L_{s,min}$	–	minimaler Streckenanteil
$L_{s,min,FU}$	–	minimaler Streckenanteil einer Fahrumgebung
$L_{Stand,max}$	–	maximaler Stillstandsanteil
$L_{Stand,min}$	–	minimaler Stillstandsanteil
$L_{t,100}$	s	Mindestzeit oberhalb 100 km/h
$L_{t,max}$	s	Maximaldauer einer RDE-Fahrt
$L_{t,min}$	s	Mindestdauer einer RDE-Fahrt
$L_{v,max}$	km/h	maximale Durchschnittsgeschwindigkeit Stadt
$L_{v,min}$	km/h	minimale Durchschnittsgeschwindigkeit Stadt
$m$	kg	Fahrzeugleermasse
$M$	div.	Maximum: Formvariable von Transferfunktionen

$m$	div.	Minimum: Formvariable von Transferfunktionen
$m_{50,75}$	$(\text{m}^2/\text{s}^3)/\%$	Steigung zwischen Dynamikfaktor-Perzentilen
$m_{50,75,A}$	$(\text{m}^2/\text{s}^3)/\%$	Steigung zwischen Dynamikfaktor-Perz. eines WA
$m_{50,75,B}$	$(\text{m}^2/\text{s}^3)/\%$	Steigung zwischen Dynamikfaktor-Perz. eines WA
$m_{50,95}$	$(\text{m}^2/\text{s}^3)/\%$	Steigung zwischen Dynamikfaktor-Perzentilen
$m_{50,95,A}$	$(\text{m}^2/\text{s}^3)/\%$	Steigung zwischen Dynamikfaktor-Perz. eines WA
$m_{50,95,B}$	$(\text{m}^2/\text{s}^3)/\%$	Steigung zwischen Dynamikfaktor-Perz. eines WA
$m_{75,95}$	$(\text{m}^2/\text{s}^3)/\%$	Steigung zwischen Dynamikfaktor-Perzentilen
$m_{75,95,A}$	$(\text{m}^2/\text{s}^3)/\%$	Steigung zwischen Dynamikfaktor-Perz. eines WA
$m_{75,95,B}$	$(\text{m}^2/\text{s}^3)/\%$	Steigung zwischen Dynamikfaktor-Perz. eines WA
$M_{CO_2,d,k}$	g/km	streckenbezogene CO <sub>2</sub> -Emissionen eines Fensters
$M_{CO_2,k}$	g	CO <sub>2</sub> -Masse eines Fensters
$M_{CO_2,ref}$	g	CO <sub>2</sub> -Bezugsmasse des WLTP
$m_{ges}$	kg	Fahrzeuggesamtmasse
$M_{ges}$	–	Gesamtanzahl der Samples eines Datensatzes
$M_{Ind}$	–	Sampleposition im sortierten Datensatz
$m_{zu}$	kg	Masse der Zuladung
$N$	–	Anzahl der Samples einer Fahrumgebung
$N$	–	Anzahl der Samples in einem Fenster
$n$	–	Anzahl Eingangsgrößen eines Neurons
$N$	–	Anzahl Wegabschnittskombinationen
$N_{FU}$	–	Anzahl der Zeitschritte einer Fahrumgebung
$p$	–	Steigung
$\Delta P_{50,75}$	%	Differenz zwischen zwei Perzentilen
$\Delta P_{50,95}$	%	Differenz zwischen zwei Perzentilen
$\Delta P_{75,95}$	%	Differenz zwischen zwei Perzentilen
$P_B$	W	Beschleunigungsleistung
$p_{ideal}$	–	ideale Steigung
$p_{ideal,1}$	–	ideale Steigung
$p_{ideal,2}$	–	ideale Steigung
$P_j$	–	Bewertungspunkte FU-Kategorisierung
$P_{j,i}$	–	Bewertungspunkte FU-Kategorisierung eines WA
$p_k$	–	Steigungsklasse
$p_{k,max}$	–	höchste Steigungsklasse
$p_{k,min}$	–	kleinste Steigungsklasse
$p_{k,Start}$	–	Startsteigungsklasse
$p_{k,Ziel}$	–	Zielsteigungsklasse
$P_{Norm}$	–	Normierungsfaktor FU-Kategorisierung
$P_{max}$	W	maximale Radleistung Zugphasen
$P_{min}$	W	minimale Radleistung Schubphasen
$\bar{P}_{Rad,Schub}$	W	mittlere Radleistung Schubphasen

$\bar{P}_{Rad,Zug}$	W	mittlere Radleistung Zugphasen
$P_{ref}$	kW	Referenzradleistung
$p_{Start}$	–	Startsteigung
$p_{Ziel}$	–	Zielsteigung
$P1$	g/km	Bezugspunkt einer Phase des WLTP
$P2$	g/km	Bezugspunkt einer Phase des WLTP
$P3$	g/km	Bezugspunkt einer Phase des WLTP
$Perzentil_{Ind}$	%	Perzentil eines Samples im sortierten Datensatz
$R^2$	–	Bestimmtheitsmaß
$R_{1,i}$	–	Teilbewertung eines Wegabschnitts
$R_{2,i}$	–	Teilbewertung eines Wegabschnitts
$R_{3,i}$	–	Teilbewertung eines Wegabschnitts
$R_{4,i}$	–	Teilbewertung eines Wegabschnitts
$R_{5,i}$	–	Teilbewertung eines Wegabschnitts
$R_{6,i}$	–	Teilbewertung eines Wegabschnitts
$R_{Autobahn,i}$	–	Teilbewertung Wegabschnitt auf der Autobahn
$R_{dyn,Autobahn,i}$	–	Teilbewertung $C_{dyn}$ eines WA auf der Autobahn
$R_{dyn,FU,i}$	–	Teilbewertung $C_{dyn}$ eines WA in einer FU
$R_{dyn,Landstraße,i}$	–	Teilbewertung $C_{dyn}$ eines WA auf der Landstraße
$R_{dyn,Stadt,i}$	–	Teilbewertung $C_{dyn}$ eines WA in der Stadt
$R_{FU,i}$	–	Teilbewertung eines Wegabschnitts in einer FU
$R_{ges,i}$	–	Gesamtbewertung eines Wegabschnitts
$R_{j,i}$	–	Teilbewertung eines Wegabschnitts
$R_{Landstraße,i}$	–	Teilbewertung Wegabschnitt auf der Landstraße
$R_{max}$	–	maximale Gesamtbewertung aller Wegabschnitte
$R_{Stadt,i}$	–	Teilbewertung Wegabschnitt in der Stadt
$R_{th}$	–	theoretisches Rekuperationspotential
$RMSE_{Autobahn,i}$	$m^2/s^3$	RMSE einer KNN-Konfiguration der Autobahn
$RMSE_{D95}$	$m^2/s^3$	RMSE der $D_{95}$ -Approximation
$RMSE_{komb,i}$	$m^2/s^3$	Summe der RMSE aller Fahrumgebungen
$RMSE_{komb,min}$	$m^2/s^3$	Minimum aller RMSE-Summen
$RMSE_{Land,i}$	$m^2/s^3$	RMSE einer KNN-Konfiguration der Landstraße
$RMSE_{Stadt,i}$	$m^2/s^3$	RMSE einer KNN-Konfiguration der Stadt
$RPA$	$m/s^2$	relative positive Beschleunigung
$RPA_{kritisch}$	$m/s^2$	RPA-Grenzwert
$s$	m	Strecke
$s_{aktuell}$	m	aktuelle Strecke des erzeugten Höhenprofils
$s_{Beschl}$	m	Gesamtstrecke Beschleunigung
$s_{ges}$	m	Gesamtstrecke
$s_{ges,TZ}$	m	Gesamtstrecke eines Teilzyklus
$s_{ges,WA}$	m	Gesamtstrecke eines Wegabschnitts

$s_k$	—	Distanzklasse
$s_{Phase}$	m	Streckenlänge Tempolimitphase
$s_{rel}$	—	relativer Streckenanteil
$s_{rel,Beschl}$	—	Streckenanteil Beschleunigung
$s_{rel,komb,FU}$	—	kombinierter Streckenanteil einer Fahrumgebung
$s_{rel,Schub}$	—	Streckenanteil Schubphasen
$s_{rel,TZ,FU}$	—	Streckenanteil Fahrumgebung im Teilzyklus
$s_{rel,Verz}$	—	Streckenanteil Verzögerung
$s_{rel,Ziel,FU}$	—	Zielstreckenanteile einer Fahrumgebung
$s_{rel,Zug}$	—	Streckenanteil Zugphasen
$s_{Rest}$	m	Restdistanz des Fahrzyklus
$s_{Schub}$	m	Gesamtstrecke Schubphasen
$s_{st}$	m	horizontale Längenänderung
$s_{TZ,FU}$	km	Strecke eines Teilzyklus in einer Fahrumgebung
$s_{Verz}$	m	Gesamtstrecke Verzögerung
$s_{WA,FU}$	m	Strecke Wegabschnitt in Fahrumgebung
$s_{Zug}$	m	Gesamtstrecke Zugphasen
$\Delta SOC$	-	SOC-Differenz nach Zyklusende
$SOC_{Ende}$	-	End-SOC der Batterie bei Zyklusende
$SOC_{Start}$	-	Start-SOC der Batterie bei Zyklusbeginn
$\Delta t$	s	Dauer eines Zeitschritts
$t$	s	Zeit
$t_{100}$	s	Zeit des Zyklus oberhalb 100 km/h
$t_{apos,A}$	s	Zeit der positiven Beschleunigung eines WA
$t_{apos,B}$	s	Zeit der positiven Beschleunigung eines WA
$t_{Beschl}$	s	Beschleunigungsdauer
$t_{Beschl,A}$	s	Beschleunigungsdauer eines Wegabschnitts
$t_{Beschl,B}$	s	Beschleunigungsdauer eines Wegabschnitts
$t_{Beschl,komb}$	s	Gesamtdauer von zwei Wegabschnitten
$t_{ges}$	s	Zyklusdauer
$t_{ges,TZ}$	s	Gesamtdauer eines Teilzyklus
$t_{ges,WA}$	s	Gesamtdauer eines Wegabschnitts
$T_{R,max}$	—	Toleranz für die Auswahl der besten WA
$t_{rel}$	—	relativer Zeitanteil
$t_{rel,Beschl}$	—	zeitbezogener Beschleunigungsanteil
$t_{rel,Schub}$	—	Zeitanteil Schubphasen
$t_{rel,Verz}$	—	zeitbezogener Verzögerungsanteil
$t_{rel,Zug}$	—	Zeitanteil Zugphasen
$t_{S,B,k}$	s	Startzeitpunkt einer Stillstandsphase
$t_{S,E,k}$	s	Endzeitpunkt einer Stillstandsphase
$t_{S,M,k}$	s	Mittelpunkt einer Stillstandsphase

$t_{Schub}$	s	Dauer Schubphasen
$t_{Stadt}$	s	Gesamtzeit in der Stadt
$t_{Stadt,TZ}$	s	Gesamtzeit eines Teilzyklus in der Stadt
$t_{Stadt,WA,i}$	s	Gesamtzeit eines Wegabschnitts in der Stadt
$t_{Stand}$	s	Stillstandszeit
$t_{Stand,rel}$	—	Stillstandsanteil
$t_{Stand,rel,komb,i}$	—	kombinierter Stillstandsanteil
$t_{Verz}$	s	Verzögerungsdauer
$t_{Zug}$	s	Dauer Zugphasen
$TM_{NEDC}$	kg	Fahrzeug-Trägheitsklasse bei Typengenehmigung
$v$	m/s   km/h	Fahrzeuggeschwindigkeit
$\bar{v}$	m/s   km/h	mittlere Geschwindigkeit
$\bar{v}_A$	m/s   km/h	mittlere Geschwindigkeit eines Wegabschnitts
$\bar{v}_B$	m/s   km/h	mittlere Geschwindigkeit eines Wegabschnitts
$\bar{v}_{Beschl}$	m/s   km/h	mittlere Geschwindigkeit Beschleunigungsphasen
$\bar{v}_{Beschl,A}$	m/s   km/h	mittlere Geschw. Beschl.-Phasen eines WA
$\bar{v}_{Beschl,B}$	m/s   km/h	mittlere Geschw. Beschl.-Phasen eines WA
$v_{eff}$	m/s   km/h	Effektivgeschwindigkeit
$v_{eff,Beschl}$	m/s   km/h	Effektivgeschwindigkeit Beschleunigungsphasen
$v_{eff,Schub}$	m/s   km/h	Effektivgeschwindigkeit Schubphasen
$v_{eff,Verz}$	m/s   km/h	Effektivgeschwindigkeit Verzögerungsphasen
$v_{eff,Zug}$	m/s   km/h	Effektivgeschwindigkeit Zugphasen
$\bar{v}_{FU}$	m/s   km/h	mittlere Geschwindigkeit einer Fahrumgebung
$\bar{v}_{ges}$	m/s   km/h	mittlere Geschwindigkeit eines Zyklus
$v_i$	km/h	Geschwindigkeit in einem Zeitschritt
$\bar{v}_{komb}$	m/s	kombinierte mittlere Geschwindigkeit
$v_{max}$	m/s   km/h	maximale Geschwindigkeit
$v_{ref}$	km/h	Referenzgeschwindigkeit
$\bar{v}_{Stadt}$	km/h	Durchschnittsgeschwindigkeit in der Stadt
$v_{Stadt,komb,i}$	km/h	kombinierter mittlere Geschwindigkeit Stadt
$\bar{v}_{Schub}$	m/s   km/h	mittlere Geschwindigkeit Schubphasen
$\bar{v}_{Stadt,TZ}$	km/h	Durchschnittsgeschwindigkeit Stadt im TZ
$\bar{v}_{Stadt,WA,i}$	km/h	Durchschnittsgeschwindigkeit Stadt im WA
$\bar{v}_{Verz}$	m/s   km/h	mittlere Geschwindigkeit Verzögerungsphasen
$\bar{v}_{Zug}$	m/s   km/h	mittlere Geschwindigkeit Zugphasen
$w_j$	div.	Gewichtungsfaktor Neuronen-Eingangsgröße
$x_j$	div.	Eingangsgröße eines Neurons
$y$	div.	Ausgang eines Neurons
$Z$	N	Zugkraft

## Griechische Buchstaben

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
$\alpha$	rad	Steigungswinkel
$\varepsilon$	div.	effektiver Eingang
$\eta_{Bat}$	-	Batteriewirkungsgrad
$\eta_{EM}$	-	EM-Wirkungsgrad
$\eta_{Riemen}$	-	Wirkungsgrad des Riementriebs
$\eta_{VKM}$	-	VKM-Wirkungsgrad
$\vartheta$	div.	Schwellenwert: Formvariable Transferfunktionen
$\lambda$	-	Drehmassenzuschlagsfaktor
$\rho_K$	kg/L	Kraftstoffdichte
$\rho_L$	kg/m <sup>3</sup>	Luftdichte
$\sigma$	div.	Steigung: Formvariable Transferfunktionen

## Abkürzungen

### Abkürzung Bedeutung

3F	Fahrer-Fahrzeug-Fahrumgebung
A	Autobahn
a	Autobahn
Autob.	Autobahn
CAN	Controller Area Network
CO	Kohlenstoffmonoxid
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
CVS	Constant-Volume-Sampling
DCT	Doppelkupplungsgetriebe (Dual Clutch Transmission)
DHT	dediziertes Hybrid-Getriebe (Dedicated Hybrid Transmission)
div.	diverse
durchschn.	durchschnittlich
EM	elektrische Maschine
FTP-72	US Fahrzyklus der Federal Test Procedure - entspricht UDDS
FTP-75	US Fahrzyklus der Federal Test Procedure
FU	Fahrumgebung
G	Gleichverteilung
gen.	generatorisch
Geschw.	Geschwindigkeit

---

GPS	Global Positioning System
HC	Kohlenwasserstoffe
HFET	Highway Fuel Economy Test
ICV	Internal Combustion engine Vehicle (konventionelles Fahrzeug)
ID	Identifikator
JC08	Japanese Cycle
KNN	künstliches neuronales Netz
L	Landstraße
l	Landstraße
Lat	laterale Position
LE	Leistungselektronik
Long	longitudinale Position
MAW	Moving-Average-Window-Verfahren
mot.	motorisch
MOVE3F	Modulare Variantenbasierte Entwicklungsplattform für 3F-Simulationen
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
NO <sub>x</sub>	Stickstoffoxide
OEM	Original Equipment Manufacturer
OG	Orientierungsgeschwindigkeit
OGP	Orientierungsgeschwindigkeitsprofil
OSM	OpenStreetMap
P	Parallel (parallele Anordnung VKM und EM)
P0+P4	Antriebsstrang mit Riemenstartergenerator und elektr. Hinterachse
PEMS	Portable Emission Measurement System
PI	proportional-integral
PID	proportional-integral-derivative
Pkw	Personenkraftwagen
PN	Partikelanzahl
RDE	Real Driving Emissions
rel.	relativ
RMSE	Root Mean Square Error
S	Stadt
s	Stadt
SC03	US-Fahrzyklus zur Überprüfung des Einflusses der Klimaanlage
SFTP	Supplemental Federal Test Procedure
SOC	State of Charge
TZ	Teilzyklus
UDDS	Urban Dynamometer Driving Schedule
US	United States
US06	US-Fahrzyklus für aggressives Fahren und hohe Geschwindigkeiten
USA	United States of America
VKM	Verbrennungskraftmaschine
WA	Wegabschnitt
WLTC	Worldwide Light-duty Test Cycle
WLTP	Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure