

Lucas Mathusall

# Potenzziale des variablen Ventiltriebes in Bezug auf das Abgasthermo- management bei Pkw-Dieselmotoren

---

# **AutoUni – Schriftenreihe**

**Band 137**

**Reihe herausgegeben von/Edited by**

Volkswagen Aktiengesellschaft  
AutoUni

Die Volkswagen AutoUni bietet Wissenschaftlern und Promovierenden des Volkswagen Konzerns die Möglichkeit, ihre Forschungsergebnisse in Form von Monographien und Dissertationen im Rahmen der „AutoUni Schriftenreihe“ kostenfrei zu veröffentlichen. Die AutoUni ist eine international tätige wissenschaftliche Einrichtung des Konzerns, die durch Forschung und Lehre aktuelles mobilitätsbezogenes Wissen auf Hochschulniveau erzeugt und vermittelt.

Die neun Institute der AutoUni decken das Fachwissen der unterschiedlichen Geschäftsbereiche ab, welches für den Erfolg des Volkswagen Konzerns unabdingbar ist. Im Fokus steht dabei die Schaffung und Verankerung von neuem Wissen und die Förderung des Wissensaustausches. Zusätzlich zu der fachlichen Weiterbildung und Vertiefung von Kompetenzen der Konzernangehörigen fördert und unterstützt die AutoUni als Partner die Doktorandinnen und Doktoranden von Volkswagen auf ihrem Weg zu einer erfolgreichen Promotion durch vielfältige Angebote – die Veröffentlichung der Dissertationen ist eines davon. Über die Veröffentlichung in der AutoUni Schriftenreihe werden die Resultate nicht nur für alle Konzernangehörigen, sondern auch für die Öffentlichkeit zugänglich.

The Volkswagen AutoUni offers scientists and PhD students of the Volkswagen Group the opportunity to publish their scientific results as monographs or doctor's theses within the "AutoUni Schriftenreihe" free of cost. The AutoUni is an international scientific educational institution of the Volkswagen Group Academy, which produces and disseminates current mobility-related knowledge through its research and tailor-made further education courses. The AutoUni's nine institutes cover the expertise of the different business units, which is indispensable for the success of the Volkswagen Group. The focus lies on the creation, anchorage and transfer of new knowledge.

In addition to the professional expert training and the development of specialized skills and knowledge of the Volkswagen Group members, the AutoUni supports and accompanies the PhD students on their way to successful graduation through a variety of offerings. The publication of the doctor's theses is one of such offers. The publication within the AutoUni Schriftenreihe makes the results accessible to all Volkswagen Group members as well as to the public.

#### **Reihe herausgegeben von/Edited by**

Volkswagen Aktiengesellschaft

AutoUni

Brieffach 1231

D-38436 Wolfsburg

<http://www.autouni.de>

Weitere Bände in der Reihe <http://www.springer.com/series/15136>

---

Lucas Mathusall

# Potenzziale des variablen Ventiltriebes in Bezug auf das Abgasthermo- management bei Pkw-Dieselmotoren



Springer

Lucas Mathusall  
AutoUni  
Wolfsburg, Deutschland

Zugl.: Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 2019

Die Ergebnisse, Meinungen und Schlüsse der im Rahmen der AutoUni – Schriftenreihe veröffentlichten Doktorarbeiten sind allein die der Doktorandinnen und Doktoranden.

AutoUni – Schriftenreihe  
ISBN 978-3-658-25900-6                    ISBN 978-3-658-25901-3 (eBook)  
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-25901-3>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnetet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2019  
Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.  
Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.  
Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind.  
Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Springer ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist ein Teil von Springer Nature

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

# Potenziale des variablen Ventiltriebes in Bezug auf das Abgasthermomanagement bei Pkw-Dieselmotoren

Bei der Fakultät für Maschinenbau  
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde

eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von: Lucas Mathusall  
geboren in (Geburtsort): Rostock

eingereicht am: 26.04.1018  
mündliche Prüfung am: 10.01.2019

Vorsitz: Prof. Dr.-Ing. Ferit Küçükay

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Peter Eilts  
Prof. Dr.-Ing. Georg Wachtmeister

2019

## **Vorwort**

Diese Arbeit entstand im Zuge des dreijährigen Doktorandenprogramms der Volkswagen AG. Während dieser Zeit war ich am Standort Wolfsburg in der Dieselmotorenentwicklung tätig.

An erster Stelle gilt mein Dank meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Eilts vom Institut für Verbrennungskraftmaschinen an der TU Braunschweig für seine wissenschaftliche Unterstützung sowie für die offenen Diskussionen und Anregungen. Des Weiteren möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Wachtmeister vom Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen an der TU München für die Betreuung meiner Arbeit als Zweitkorrektor bedanken.

Ein besonder Dank gilt Herrn Dr.-Ing. Blei und Herrn Dr.-Ing. Groenendijk für die zahlreichen fachlichen Diskussionen, die mich immer wieder in neue Richtungen gebracht und neue Aspekte in die Arbeit einfließen lassen haben.

Danken möchte ich auch Herrn Dr.-Ing. Pott für die Unterstützung und das Vertrauen in mein Vorhaben. Ganz besonders möchte ich Herrn Dipl.-Ing Heimermann und Herrn Dipl.-Ing. Wiegel für die großartige Unterstützung am Versuchsträger, in der Datenaufbereitung und für den fachlichen Austausch danken, was diese Arbeit erst möglich machten.

Mein Dank gilt auch Herrn Welk für seine unermüdliche Arbeit bei der Durchführung der Versuche.

Ebenso danke ich Herrn Dr.-Ing. Hofer für die aufschlussreiche rechnerische Unterstützung der Arbeit.

Bedanken möchte ich mich bei allen Kollegen der EADV und für die umfangreiche Unterstützung in allen Belangen und Fragen sowie für das tolle und konstruktive Arbeitsumfeld.

Zum Schluss möchte ich mich bei meiner Familie für die ausdauernde Unterstützung, Stärkung und Motivation bedanken und dafür, dass sie immer an mich geglaubt haben.

Lucas Mathusall

# Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis . . . . .	XI
Tabellenverzeichnis . . . . .	XVII
Abkürzungsverzeichnis . . . . .	XIX
Formelzeichenverzeichnis . . . . .	XXI
<b>1 Einleitung, Motivation und Aufbau . . . . .</b>	<b>1</b>
<b>2 Grundlagen . . . . .</b>	<b>3</b>
2.1 Variabler Ventiltrieb am Dieselmotor . . . . .	3
2.1.1 Einfluss der Ventilhubkurvenparameter auf den Ladungswechsel . . . . .	3
2.1.2 Einteilung und Verfahren der Ventiltriebsvariabilität . . . . .	6
2.2 Motorische Einflussgrößen zur Umsetzung der Schadstoffe in der ANB	11
<b>3 Abgasthermomanagement . . . . .</b>	<b>17</b>
3.1 Definition des Abgasthermomanagements . . . . .	17
3.2 Überblick des Abgasthermomanagements . . . . .	18
3.3 Stand der Technik und Zieldefinition der Arbeit . . . . .	21
3.4 Untersuchung der Einflussparameter des Abgasthermomanagements . . . . .	24
<b>4 Beschreibung des Versuchsträgers und der Versuchsmethodik . . . . .</b>	<b>29</b>
4.1 Versuchsträger . . . . .	29
4.2 Randbedingungen der stationären Untersuchungen . . . . .	32
4.3 Versuchsmethode der dynamischen Untersuchungen . . . . .	33
<b>5 Methode zur Berechnung der Temperatureinflüsse . . . . .</b>	<b>37</b>
5.1 Theoretische Herleitung der Temperatureinflüsse . . . . .	37
5.2 Quantifizierung der Temperaturanteile . . . . .	40
<b>6 Untersuchungen der Maßnahmen zur Abgastemperaturanhebung mittels variablem Ventiltrieb . . . . .</b>	<b>45</b>
6.1 Analyse der Verbrauchs- und Emissionseinflüsse . . . . .	46
6.1.1 Temperaturmaßnahmen infolge der Wirkungsgradverschlechterung . . . . .	46
6.1.2 Temperaturmaßnahmen infolge der Füllungsreduzierung . . . . .	52
6.1.3 Temperaturmaßnahmen infolge der Füllungstemperaturanhebung . . . . .	57
6.2 Analyse der Temperatureinflüsse . . . . .	62
6.3 Zusammenfassung und Bewertung der Temperaturmaßnahmen . . . . .	66
<b>7 Weiterführende Analyse der ausgewählten Maßnahmen zur Abgastemperaturanhebung . . . . .</b>	<b>71</b>
7.1 Untersuchung der internen Abgasrückführung (iAGR) . . . . .	71
7.2 Untersuchung frühes Auslass-Öffnen (FAÖ) . . . . .	83

7.3	Untersuchung Zylinderabschaltung (ZAS) . . . . .	89
7.4	Untersuchung der Füllungsreduzierung . . . . .	97
<b>8</b>	<b>Dynamische Untersuchungen zum Abgasthermomanagement . . . . .</b>	<b>103</b>
8.1	Methode zur Bewertung des Abgasthermomanagements . . . . .	104
8.2	Warmhalten . . . . .	107
8.2.1	Auswertung der Einflüsse auf den Verbrauch und auf die Abgastemperatur . . . . .	107
8.2.2	Auswertung der Einflüsse auf die Emissionen . . . . .	114
8.3	Aufheizen . . . . .	121
8.3.1	Auswertung der Einflüsse auf den Verbrauch und auf die Abgastemperatur . . . . .	122
8.3.2	Auswertung des Einflusses auf die Emissionen . . . . .	127
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick . . . . .</b>	<b>131</b>
9.1	Zusammenfassung . . . . .	131
9.2	Ausblick . . . . .	133
<b>Literaturverzeichnis . . . . .</b>		<b>135</b>
<b>Anhang . . . . .</b>		<b>143</b>
A.1	Bestimmung der externen AGR (eAGR) . . . . .	143
A.2	Bestimmung der internen AGR (iAGR) . . . . .	144
A.3	Untersuchung des Parameterraums einer doppelten Nacheinspritzung zur Abgastemperaturanhebung . . . . .	146
A.4	Temperaturverlauf Warmhalten . . . . .	150
A.5	Temperaturverlauf Aufheizen . . . . .	151
A.6	Vertrauensbereich der dynamischen Emissionsmessungen . . . . .	152

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Parameter einer Ventilhubkurve . . . . .	3
2.2	Einfluss Auslass-Öffnen im p-V-Diagramm . . . . .	4
2.3	Einfluss Auslass-Schließen im p-V-Diagramm . . . . .	5
2.4	Einfluss Einlass-Öffnen im p-V-Diagramm . . . . .	5
2.5	Einfluss Einlass-Schließen im p-V-Diagramm . . . . .	6
2.6	Einteilung der Ventiltriebsvariabilitäten nach Bauart und Wirkprinzip . . . . .	7
2.7	Möglichkeiten zur Umsetzung der iAGR (a) vorlagern, b) rücksaugen, c) rücksaugen, d) rückhalten) und zur Umsetzung von Restgasspülen (a), b), c)) . . . . .	9
2.8	Konvertierungsrate des DOC von HC und CO in Abhängigkeit von Raumgeschwindigkeit und Temperatur . . . . .	12
2.9	Konvertierungsrate (U) des SCR-Katalysators und NO <sub>2</sub> -Konzentration (c) nach dem SCR-Katalysator in Abhängigkeit von Temperatur und in Abhängigkeit vom Verhältnis NO <sub>2</sub> zu NO <sub>x</sub> . . . . .	14
2.10	Konvertierungsrate des NO <sub>x</sub> -Speicherkatalysators in Abhängigkeit der Temperatur . . . . .	14
3.1	Unterscheidung der Betriebsarten des Abgasthermomanagements nach Gaseintritts- und Bauteiltemperatur . . . . .	17
3.2	Maßnahmen des Abgasthermomanagements . . . . .	19
3.3	Zeit bis zur Unterschreitung der Zieltemperatur 200°C (links) und Zeit bis zur Überschreitung der Zieltemperatur 200°C (rechts) in Abhängigkeit vom Abgasmassenstrom und von der Motoraustrittstemperatur . . . . .	25
3.4	Aufheizzeit in Abhängigkeit der thermischen Abgasenthalpie bei verschiedenen Motoraustrittstemperaturen . . . . .	26
3.5	Zeitlicher und räumlicher Temperaturverlauf im Abgasstrang, in einem NEFZ-Stadtteil mit vorkonditionierter Abgasnachbehandlungsanlage . . . . .	27
4.1	Aufbau des Aktuators zur Betätigung der Ventile . . . . .	30
4.2	Variabilitäten des verwendeten Ventiltriebs V3T . . . . .	30
4.3	Abgastemperaturmessstellenplan der Versuchsträger 288MDB und 288BiT	31
4.4	Temperaturkennfeld 288BiT im SDPF . . . . .	33
4.5	Temperaturverlauf im SDPF für den NEFZ-Stadtteil (links) und Artemis Urban (rechts) . . . . .	34
5.1	Wichtige Einflussgrößen der Abgastemperatur (Motoraustritt) . . . . .	40
5.2	Vermessener Zusammenhang aus Abgastemperatur und Kraftstoff-Füllungs-Verhältnis . . . . .	42
5.3	Methodik zur Bestimmung der Temperaturanteile . . . . .	42

6.1	Variation der Temperaturmaßnahmen infolge der Wirkungsgradverschlechterung . . . . .	46
6.2	Verbrauchs- und Wirkungsgradänderung der Temperaturmaßnahmen infolge der Wirkungsgradverschlechterung . . . . .	47
6.3	Verlustteilung der Temperaturmaßnahmen infolge der Wirkungsgradverschlechterung für die jeweilige maximal erreichte Abgastemperaturanhebung $T_{v,Trb}$ . . . . .	48
6.4	p-V-Diagramm mit Fokus auf die Ladungswechselschleife (links) und auf die Hochdruckschleife (rechts) . . . . .	49
6.5	Emissionsänderung der Temperaturmaßnahmen infolge der Wirkungsgradverschlechterung . . . . .	50
6.6	p-V-Diagramm der Ladungswechselschleife von der Temperaturmaßnahme FAÖ . . . . .	51
6.7	Variation der Temperaturmaßnahmen infolge der Füllungsreduzierung . . . . .	52
6.8	Verbrauchs- und Wirkungsgradänderung der Temperaturmaßnahmen infolge der Füllungsreduzierung . . . . .	53
6.9	Verlustteilung der Temperaturmaßnahmen infolge der Füllungsreduzierung für die jeweilige maximal erreichte Abgastemperaturanhebung $T_{v,Trb}$ . . . . .	54
6.10	p-V-Diagramm mit Fokus auf die Ladungswechselschleife (links) und auf die Hochdruckschleife (rechts) . . . . .	55
6.11	Differentieller Brennverlauf (links) und mechanischer Wirkungsgrad (rechts) der Temperaturmaßnahme SES . . . . .	55
6.12	Emissionsänderung der Temperaturmaßnahmen infolge der Füllungsreduzierung . . . . .	56
6.13	Variation der Temperaturmaßnahmen infolge der Füllungstemperaturanhebung . . . . .	57
6.14	Verbrauchs- und Wirkungsgradänderung der Temperaturmaßnahmen infolge der Füllungstemperaturanhebung . . . . .	58
6.15	Verlustteilung der Temperaturmaßnahmen infolge der Füllungstemperaturanhebung für die jeweilige maximal erreichte Abgastemperaturanhebung . . . . .	59
6.16	Emissionsänderung der Temperaturmaßnahmen infolge der Füllungstemperaturanhebung . . . . .	60
6.17	Drallzahl in Abhängigkeit des Einlasshubes und des Auslasszweithubes	61
6.18	Zusammensetzung der Abgastemperatur aller untersuchten Temperaturmaßnahmen . . . . .	63
6.19	Relativer Wärmeverlust (links) und mittlere Zylindertemperatur (rechts) für NE und FAÖ . . . . .	64
6.20	Spezifischer Temperaturanteil der iAGR-RS und HDAGR in Abhängigkeit der iAGR- bzw. HDAGR-Rate . . . . .	66
6.21	Verbrauchsänderung aller untersuchten Temperaturmaßnahmen . . . . .	68
7.1	Ruß-NO <sub>x</sub> -Trade-Off für die HDAGR und die iAGR-RS (links), Drallzahl bei Variation der iAGR-RS mittels Höhe des Zweithubes (rechts) . . . . .	72

---

7.2	Einfluss auf den Ruß-NO <sub>x</sub> -Trade-Off (links) und Parametervariation des Zweithubes (Hub, Öffnungsduauer, Position) (rechts) . . . . .	73
7.3	Entwicklung der Drallströmung über den Ansaug- und Verdichtungstakt ohne Zweithub (links: Drallzahl; mittig: Drehimpuls; rechts: Änderung des Drehimpulses) . . . . .	74
7.4	Einfluss der Position des Zweithubes für das Auslassventil 1 auf den Ruß-NO <sub>x</sub> -Trade-Off (links) und auf die Drallzahl (rechts) . . . . .	75
7.5	Lage des Zweithubes bezüglich des Abgasdruckverlaufs . . . . .	76
7.6	Geschwindigkeitsverteilung der Gasströmung im Brennraum (150°KW bzw. 10°KW nach LWOT) bei Nutzung eines späten Auslasszweithubes (Auslassventil 1) . . . . .	76
7.7	Schein-HDAGR-Rate für die drei vermessenen Positionen des Zweithubes (Auslassventil 1) . . . . .	77
7.8	Einfluss der Position eines Zweithubes auf den Ruß-NO <sub>x</sub> -Trade-Off (links), den Drallzahlverlauf über dem Kurbelwinkel (mittig) und auf das Überströmverhalten für das Auslassventil 2 (rechts) . . . . .	78
7.9	Einfluss der Hubvariation des Zweithubes (links) und der Längenvariation des Zweithubes (rechts) auf den Drall (Auslassventil 1) . . . . .	79
7.10	Verteilung der zurückgeführten Abgasmenge bei einem Zweithub mit hohem Ventilhub (links) und bei einem Zweithub mit langer Öffnungsduauer (rechts) zum Zeitpunkt LWUT . . . . .	80
7.11	Verteilung der zurückgeführten Abgasmenge bei einem Zweithub mit hohem Ventilhub (links) und bei einem Zweithub mit langer Öffnungsduauer (rechts) zum Zeitpunkt 330°KW n. LWOT . . . . .	81
7.12	Lastschnitt für drei verschiedene Zweithübe (Hub: 1,5 mm; Öffnungsduauer: 50°KW/100°KW/160°KW) . . . . .	82
7.13	p-V-Diagramm mit zwei verschiedenen Zeitpunkten des Auslass-Öffnens	83
7.14	Einflussbereiche des Auslass-Öffnens: Verbrauchsoptimierung (grün), Low-End-Torque-Optimierung (blau), Abgastemperaturanhebung (rot) .	84
7.15	Variation frühes Auslass-Öffnen . . . . .	85
7.16	Varianten zur Realisierung des frühen Auslass-Öffnens . . . . .	86
7.17	Variation frühes Auslass-Öffnen für Varianten 1 und 2 . . . . .	86
7.18	p-V-Diagramm für Variante 1 und 2 bei AÖ = 100°KW v. UT . . . . .	87
7.19	Variation frühes Auslass-Öffnen für Varianten 1 und 2 . . . . .	88
7.20	Differenzkennfelder für Varianten 1 bei AÖ = 110°KW v. UT bezüglich der Seriensteuerzeit AÖ = 35°KW v. UT . . . . .	89
7.21	Reduzierung der Schleppmomente durch die Zylinderabschaltung, Drehzahlschnitt (links), p-V-Diagramm (rechts) inklusive Ausschnitt des Durckbereichs für den Ladungswechsel (rechts, unten) . . . . .	90
7.22	Einfluss der Betriebspunktverschiebung durch die Zylinderabschaltung auf den Hochdruckwirkungsgrad . . . . .	91
7.23	Vergleich zwischen Abschaltung der inneren gegenüber den äußeren Zylindern . . . . .	92

7.24	Varianten der Zylinderabschaltung (ZAS Modes) bezüglich der Beeinflussung des Gasmassenstroms über die deaktivierten Zylinder . . . . .	93
7.25	Vergleich der Temperaturverläufe verschiedener ZAS Modes sowie Vergleich des Verbrauchs bezüglich Abgastemperatur im Krümmer, nach Turbine und nach DOC . . . . .	94
7.26	Emissionsvergleich der ZAS Modes . . . . .	96
7.27	Abhängigkeit der Lastgrenze bei aktiver Zylinderabschaltung bezüglich der Emissionsgrenzen . . . . .	97
7.28	Einfluss der Füllungsreduzierung auf die Abgastemperatur . . . . .	98
7.29	Änderung der Abgastemperatur in Abhängigkeit des Kraftstoff-Füllungs-Verhältnisses . . . . .	99
7.30	Einfluss des VTG-Öffnens auf die Abgastemperatur $\Delta T_{Kr}$ , $\Delta T_{n.Trb}$ sowie auf die Abgastemperaturdifferenz $\Delta\Delta T_{Trb}$ . . . . .	100
8.1	Temperaturverlauf eines NEFZ (Warmhalten) . . . . .	104
8.2	Kumulierte relative Häufigkeitsverteilung der Abgastemperatur im DOC zur Bewertung des Warmhaltens . . . . .	105
8.3	Temperaturverlauf eines NEFZ (Aufheizen) . . . . .	105
8.4	Kumulierte Häufigkeitsverteilung der Abgastemperatur im DOC zur Bewertung des Aufheizens . . . . .	106
8.5	Vereinfachtes Modell zur Ermittlung des Aktivierungszeitpunktes des Katalysators . . . . .	106
8.6	Zusammenhang zwischen Aktivierungszeitpunkt, mittlerer erforderlichen Konvertierungsrate und mittlerer technisch möglichen Konvertierungsrate für eine betrachtete Zyklusdauer von 800 s . . . . .	107
8.7	Änderung des Zyklusverbrauchs bei Reduzierung des Temperaturzeitanteils im DOC unterhalb der Zieltemperatur 200°C, für alle untersuchten Strategien . . . . .	108
8.8	Temperaturverlauf und aktive Phase der Strategien im NEFZ-Stadtteil (Ausschnitt 160 s bis 260 s) . . . . .	112
8.9	Kumulierte relative Häufigkeitsverteilung der Abgastemperaturen für den DOC (links) und SDPF (rechts) für alle untersuchten Strategien . . . . .	114
8.10	Änderung der kumulierten Emissionen bei Reduzierung des Temperaturzeitanteils im DOC unterhalb der Zieltemperatur 200°C für alle untersuchten Strategien . . . . .	115
8.11	Änderung der kumulierten Emissionen bei maximaler Temperaturstufe . . . . .	116
8.12	Exemplarischer Emissionsverlauf für ZAS im Vergleich zur Referenzmessung . . . . .	117
8.13	Exemplarischer Emissionsverlauf für iAGR im Vergleich zur Füllungsreduzierung der Temperaturstufe 1 und im Vergleich zur Referenzmessung . . . . .	119
8.14	Änderung der kumulierten Emissionen bei maximaler Temperaturstufe . . . . .	120
8.15	Exemplarischer Emissionsverlauf für FAÖ im Vergleich zur Referenzmessung . . . . .	121

---

8.16	Temperaturverlauf und aktive Phasen der Strategien im NEFZ-Stadtteil (Ausschnitt bis 250 s) . . . . .	123
8.17	Enthalpieverlauf der Strategien im NEFZ-Stadtteil (Ausschnitt bis 250 s) vor dem DOC . . . . .	124
8.18	Zyklusverbrauchsänderung . . . . .	125
8.19	Kumulierte Häufigkeitsverteilung der Abgastemperatur für den DOC (links) und SDPF (rechts) . . . . .	126
8.20	Summierte Zeit unterhalb von 160°C für den DOC (links) und für den SDPF (rechts) . . . . .	127
8.21	Änderung der kumulierten Emissionen für das FAÖ . . . . .	127
8.22	Emissionsverlauf in der ersten Phase des NEFZ-Stadtteils . . . . .	129
8.23	Emissionsverlauf in der zweiten Phase des NEFZ-Stadtteils . . . . .	130
A.1	Ablauf zur Bestimmung der externen AGR-Rate . . . . .	144
A.2	Modell mit den vier Gasbereichen zur Ladungswechselanalyse . . . . .	145
A.3	Ablauf zur Bestimmung der internen AGR . . . . .	146
A.4	Zusammenhang Ruß- und HC-Emissionen sowie Ruß- und CO-Emissionen für die Variation der Einspritzzeitpunkte der Nacheinspritzung bei verschiedenen Mengenaufteilungen . . . . .	147
A.5	Einfluss durch die Mengenvariation der Nacheinspritzung . . . . .	148
A.6	Korrelation zwischen Verbrauch und Abgastemperatur bei der Parametervariation einer doppelten Nacheinspritzung . . . . .	149
A.7	Temperaturverlauf und aktive Phasen der Strategien im NEFZ-Stadtteil .	150
A.8	Temperaturverlauf und aktive Phasen der Strategien im NEFZ-Stadtteil .	151
A.9	Streuungen der Emissionsmessung für einen Messtag . . . . .	152

## Tabellenverzeichnis

4.1	Kennwerte der Versuchsträger . . . . .	29
4.2	Randbedingungen der Temperaturmaßnahmen bezüglich Füllung und Aufteilung der NDAGR/HDAGR . . . . .	35
4.3	Temperaturrandbedingungen des Aufheizens und Warmhaltens . . . . .	35
6.1	Zusammenfassung und Übersicht der untersuchten Temperaturmaßnahmen	67
8.1	Definition der Temperaturstufen . . . . .	109
A.1	Durchgeführte Variationen für die Untersuchungen zur Nacheinspritzung	147
A.2	Vertrauensbereich der Emissionsmessungen . . . . .	153

## Abkürzungsverzeichnis

AGR	Abgasrückführung
ANB	Abgasnachbehandlung
AÖ	Auslass-Öffnen
AS	Auslass-Schließen
ATL	Abgasturbolader
AV	Auslassventil
BiT	BiTurbo
CO	Kohlenmonoxid
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
Dkl	Drosselklappe
DOC	Dieseloxidationskatalysator
DPF	Dieselpartikelfilter mit SCR-Beschichtung
eAGR	externe Abgasrückführung
EÖ	Einlass-Öffnen
ES	Einlass-Schließen
EV	Einlassventil
FAÖ	frühes Auslass-Öffnen
FRC	Aufteilungsfaktor HDAGR/NDAGR
FSN	Filter Smoke Number
Ful	Füllungsreduzierung
HC	unverbrannte Kohlenwasserstoffe
HDAGR	Hochdruckabgasrückführung (als Temperaturmaßnahme)
iAGR	interne Abgasrückführung
iAGR-RS	interne Abgasrückführung mittels Rücksaugen
iAGR-VL	interne Abgasrückführung mittels Vorlagern
LWOT	obere Totpunkt im Ladungswechsel
MDB	modularer Dieselbaukasten
NDAGR	Niederdruckabgasrückführung
NE	Nacheinspritzung
NEFZ	neuer europäischer Fahrzyklus
NO <sub>2</sub>	Stickstoffdioxid
NO <sub>x</sub>	Stickstoffoxid
OT	oberer Totpunkt
SCR	selektive katalytische Reduktion
SDPF	Dieselpartikelfilter mit SCR-Beschichtung
SEÖ	spätes Einlass-Öffnen
SES	spätes Einlass-Schließen
TM	Temperaturmaßnahme
UT	unterer Totpunkt

VTG	variable Turbinengeometrie
VVT	variabler Ventiltrieb
ZAS	Zylinderabschaltung
ZOT	Zünd-OT