

AutoUni – Schriftenreihe

AutoUni 

Daniel Schwarz

# Regelung des Dieselmotors

Sauerstoffbasierte Konzepte  
für Motoren mit variabler  
Ladungswechselsteuerung

---

# **AutoUni – Schriftenreihe**

Band 118

**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>

---

Daniel Schwarz

# Regelung des Dieselmotors

Sauerstoffbasierte Konzepte  
für Motoren mit variabler  
Ladungswechselsteuerung

 Springer

Daniel Schwarz  
Wolfsburg, Deutschland

Zugl.: Dissertation, Universität Rostock, 2017

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

AutoUni – Schriftenreihe  
ISBN 978-3-658-21840-9                      ISBN 978-3-658-21841-6 (eBook)  
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-21841-6>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet 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 2018

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 Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

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.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

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

# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit in der Vorentwicklung für Dieselmotoren in der Aggregateentwicklung der Volkswagen AG am Standort Wolfsburg. Ich möchte mich bei allen bedanken, die mich bei der Anfertigung meiner Arbeit unterstützt haben.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Harald Aschemann vom Lehrstuhl für Mechatronik der Universität Rostock für die hervorragende wissenschaftliche Betreuung und Förderung meiner Ideen. Herrn Prof. Dr.-Ing. Christian Bohn vom Lehrstuhl für Regelungstechnik und Mechatronik der Technischen Universität Clausthal möchte ich für die Übernahme der Aufgabe des Zweitprüfers sehr herzlich bedanken. Außerdem möchte ich Herrn Dr.-Ing. Jens Hilbig für die Möglichkeit danken, diese Arbeit in seiner Abteilung anfertigen zu können. Mein Dank gilt auch Herrn Dipl.-Ing. Thomas Herbst für die überfachliche Betreuung und Unterstützung bei Fragen zu Abläufen und Prozessen.

Weiterhin bedanke ich mich bei meinen Arbeitskollegen. Das gute Arbeitsklima hat es mir leicht gemacht, mich in das bestehende Team zu integrieren, mich weiter zu entwickeln und meine Ideen erfolgreich einzubringen. Über den Arbeitsalltag hinaus habe ich Ihnen eine angenehme Zeit und zahlreiche gute Erinnerungen zu verdanken. Ganz besonders gilt dieser Dank Herrn Dr.-Ing. Thorsten Schmidt für die Betreuung der Arbeit, der Übernahme des Drittgutachters und dessen Beistand bei jeglicher Art von Problemen und Fragen. Herrn Dr.-Ing. Robert Prabel und Herrn Dipl.-Ing. Peter Rockmann danke ich für die zahlreichen, fachlich anregenden Diskussionen, die diese Arbeit maßgeblich beeinflusst haben. Ebenso bedanke ich mich bei meinen Bürokollegen Herrn Dipl.-Ing. Nebelin und Herrn Dipl.-Ing. Mathusall, die mir mit zahlreichen Tipps und Antworten auf Fragen zur Seite standen. Herrn M.Sc. Daniel Langstrof sowie Herrn M.Sc. Serhat Günal möchte ich für ihre außerordentliche Hilfe im Rahmen einer studentischen Arbeit danken. Ihre Arbeit stellt einen wesentlichen Beitrag zur erfolgreichen Bearbeitung des Themas dar. Ich bedanke mich ebenfalls bei allen Prüfstandsfahrern, die mir bei meinen Messungen und Versuchen tatkräftig und über das normale Maß hinaus zur Seite standen.

Meinen Eltern Marlis und Norbert Schwarz danke ich besonders, da sie mich auf meinem bisherigen Lebensweg unterstützt und stets an mich geglaubt haben. Meinen Freunden Jan-ko, Thomas, Thomas und Philipp danke ich für den Ausgleich den sie mir, jeder auf seine Weise, geboten haben. Sie haben mich von den aktuellen fachlichen Problemen abgelenkt und somit Platz für eine sachlich, neutrale Sichtweise geschaffen sowie Kraft für die Bewältigung der Aufgaben gegeben. Mein größter Dank gilt meiner Lebensgefährtin Aileen Hoppe für den Freiraum, den sie mir zum Verfolgen meiner Ziele eingeräumt hat und für die Aufmunterung, wenn es mal nicht so lief wie vorgesehen.

Daniel Schwarz

# Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis . . . . .	IX
Tabellenverzeichnis . . . . .	XI
Abkürzungsverzeichnis . . . . .	XIII
Symbolverzeichnis . . . . .	XV
<b>1 Einleitung . . . . .</b>	<b>1</b>
1.1 Steuerung und Regelung des Dieselmotors . . . . .	3
1.2 Stand der Technik und Literaturdiskussion . . . . .	5
1.3 Zielsetzung und inhaltliche Gliederung . . . . .	6
<b>2 Grundlagen . . . . .</b>	<b>9</b>
2.1 Dieselmotor . . . . .	9
2.1.1 Einspritzung . . . . .	9
2.1.2 Abgasrückführung und Aufladung . . . . .	10
2.1.3 Emissionen im transienten Betrieb . . . . .	12
2.1.4 Schadstoffbildung . . . . .	12
2.1.5 Abgasnachbehandlung . . . . .	13
2.1.6 Innere AGR und Scavenging . . . . .	15
2.2 Motormanagement . . . . .	18
2.2.1 Steuerungs- und Regelungsansätze des Dieselmotors . . . . .	18
2.2.2 Ladedruckregelung . . . . .	19
2.2.3 Regelung der Abgasrückführung . . . . .	20
2.2.4 Der Sauerstoffmassenanteil als Führungsgröße . . . . .	22
2.3 Entwicklungsumgebung . . . . .	23
2.3.1 Versuchsträger . . . . .	23
2.3.2 Aufbau des Motorprüfstands . . . . .	23
2.3.3 Rapid Control Prototyping . . . . .	24
<b>3 Sauerstoffsensor . . . . .</b>	<b>27</b>
3.1 Grundlagen elektrochemischer Sensoren . . . . .	27
3.1.1 Sprung-Lambdasonde . . . . .	29
3.1.2 Breitband-Lambdasonde und Sauerstoffsensoren . . . . .	30
3.2 Einbauposition und Anforderungen an die Signalgüte . . . . .	30
3.3 Kompensation der Druckabhängigkeit . . . . .	32
<b>4 Physikalische Modellbildung des Gassystems . . . . .</b>	<b>39</b>
4.1 Gassystem des Dieselmotors . . . . .	39
4.1.1 Behälterersatzmodelle . . . . .	40
4.1.2 Drosselersatzmodelle . . . . .	43
4.1.3 Abgas-Turbolader . . . . .	44

4.2	Modellbildung der Zylindergruppe . . . . .	45
4.2.1	Mittelwertmodell der Zylinderfüllung . . . . .	46
4.2.2	Mittelwertmodell des Sauerstoffmassenanteils . . . . .	47
4.3	Regelungsorientierte Modellbildung . . . . .	54
4.4	Parameterschätzung . . . . .	58
<b>5</b>	<b>Regelungsentwurf . . . . .</b>	<b>65</b>
5.1	Zentrale Regelung mit flachheitsbasierten Methoden . . . . .	66
5.1.1	Flachheitsanalyse . . . . .	66
5.1.2	Flachheitsbasierte Folgeregung des Modells 5. Ordnung . . . . .	68
5.1.3	Flachheitsbasierte Folgeregung des Modells 2. Ordnung . . . . .	70
5.2	Zentrale Regelung mittels Erweiterter Linearisierung . . . . .	71
5.2.1	Voraussetzungen für den Entwurf eines MIMO-Optimalreglers . . . . .	72
5.2.2	MIMO-Optimalregler . . . . .	72
5.3	Dezentrale Regelung des Sauerstoffmassenanteils . . . . .	73
5.3.1	Flachheitsbasierte Folgeregung . . . . .	75
5.3.2	SISO-Optimalregler . . . . .	75
5.3.3	Vorsteuerung . . . . .	76
5.3.4	Kompensation der Störgröße Einlassmassenstrom . . . . .	77
5.3.5	Vergleich der dezentralen Regler des Sauerstoffmassenanteils . . . . .	81
5.4	Dezentrale Regelung des Drucks vor NDAGR-Klappe . . . . .	82
5.4.1	Flachheitsbasierte Folgeregung . . . . .	83
5.4.2	Kompensation der Störgröße Abgasmassenstrom . . . . .	83
5.4.3	Stellposition der Abgasklappe . . . . .	85
5.5	Sollwertvorgabe und Kopplung der Teilsysteme . . . . .	86
5.6	Zusammenfassung der untersuchten Regler . . . . .	87
<b>6</b>	<b>Ergebnisse der dezentralen Entwurfsvarianten . . . . .</b>	<b>89</b>
6.1	Simulationsergebnisse . . . . .	89
6.1.1	Regelung des Sauerstoffmassenanteils . . . . .	90
6.1.2	Druckregelung . . . . .	93
6.1.3	Störbeobachter . . . . .	94
6.2	Experimentelle Ergebnisse . . . . .	97
6.2.1	Regelung des Sauerstoffmassenanteils . . . . .	97
6.2.2	Druckregelung . . . . .	100
6.2.3	Störbeobachter . . . . .	102
6.3	Potenzialbewertung . . . . .	105
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick . . . . .</b>	<b>109</b>
	<b>Literaturverzeichnis . . . . .</b>	<b>111</b>

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Sensoren und Aktoren eines Dieselmotors . . . . .	4
1.2	Inhaltliche Gliederung . . . . .	7
2.1	Schematische Darstellung des Luft- und Abgaspfads eines Dieselmotors . .	11
2.2	Konventionelle Ventilhubkurven beim Dieselmotor . . . . .	16
2.3	Abgasrückführung durch Zusatznocken . . . . .	17
2.4	Beispielhafte Darstellung der Prozesse der internen Abgasrückführung und Scavenging in Abhängigkeit der Druckdifferenz . . . . .	18
2.5	Struktur der Ladedruckregelung . . . . .	20
2.6	Struktur der aktuellen Sollwertbildung und Steuerung der Abgasrückführung . . . . .	21
2.7	Dynamisches Verhalten von AGR-Rate und Sauerstoffmassenanteil im Saugrohr bei sprunghafter Änderung der NDAGR-Klappe . . . . .	22
2.8	Schematische Darstellung der Entwicklungsumgebung . . . . .	25
3.1	Kubische Floridstruktur . . . . .	28
3.2	Funktionsprinzip einer Sprung-Lambdasonde . . . . .	29
3.3	Funktionsprinzip einer Breitband-Lambdasonde . . . . .	30
3.4	Einbaupositionen des Sauerstoffsensors im Ansaugtrakt des Motors . . . .	31
3.5	Abhängigkeit des Pumpstroms vom statischen Druck . . . . .	33
3.6	Kompensation der Sensor-Nichtlinearität durch Reihenschaltung mit der inversen Kennlinie . . . . .	33
3.7	Kompensation der statischen Druckabhängigkeit des Sauerstoffsensors . . .	34
3.8	Messung, Modell und Ergebnis der statischen Druckkompensation im Vergleich . . . . .	34
3.9	Dynamische Anregung des Drucks durch Drosselklappenöffnung . . . . .	36
3.10	Kompensation der statischen sowie dynamischen Druckabhängigkeit des Sauerstoffsensors . . . . .	37
3.11	Statisch und dynamisch kompensierter Pumpstrom, Prüfstandsmessung . .	37
4.1	Behälter im Gaspfad des Dieselmotors . . . . .	40
4.2	Schaubild einer Drosselstelle mit veränderlichem Querschnitt . . . . .	44
4.3	Abbildung des Motors durch einen Zylinder . . . . .	46
4.4	Vergleich von Ansätzen zur Bestimmung der AGR-Rate . . . . .	49
4.5	Sauerstoffmassenanteil der Ladeluft und im Zylinder bei iAGR . . . . .	50
4.6	Massenstrom der iAGR und der gemessenen Frischluft . . . . .	51
4.7	iAGR-Rate . . . . .	51
4.8	Verschiedene Sauerstoffmassenanteile bei einer Messung mit Scavenging . . . . .	52
4.9	Massenströme bei einer Messung mit Scavenging . . . . .	53
4.10	Ersatzschaltbild für die regelungsorientierte Modellbildung . . . . .	54

4.11	Parameterschätzung mit Ausgangsfehler . . . . .	59
4.12	Normierte Kennfelder zur Bestimmung der Klappenposition in Abhängigkeit der Strömungsgeschwindigkeit und der Klappenposition . . . . .	60
4.13	Soll- und Istwertverlauf der NDAGR-Klappenposition . . . . .	61
4.14	Soll- und Istwertverlauf der Abgasklappenposition . . . . .	62
4.15	Soll- und Istverlauf des Sauerstoffmassenanteils . . . . .	62
5.1	Systemschaubild der flachheitsbasierten Folgeregelung . . . . .	71
5.2	Systemschaubild der Regelung des Teilsystems Sauerstoffmassenanteil im Mischbehälter NDAGR . . . . .	81
5.3	Blockschaltbild des reduzierten Beobachters zur Bestimmung des Abgasmassenstroms . . . . .	84
5.4	Systemschaubild der Regelung des Teilsystems Druck vor Abgasklappe . . . . .	85
5.5	Systemschaubild der dezentralen Gesamtsystemregelung . . . . .	87
6.1	Simulation: Verlauf des Sauerstoffmassenanteils und Regelfehler . . . . .	90
6.2	Simulation: Verlauf der Stellgröße Massenstrom durch NDAGR-Klappe . . . . .	91
6.3	Simulation: Verlauf der Position der NDAGR-Klappe . . . . .	92
6.4	Simulation: Verlauf des Drucks vor NDAGR-Klappe und Regelfehler . . . . .	93
6.5	Simulation: Verlauf der Position der Abgasklappe . . . . .	94
6.6	Simulation: Verlauf des beobachteten Frischluftmassenstroms und Beobachterfehler . . . . .	95
6.7	Simulation: Verlauf des beobachteten Abgasmassenstroms und Beobachterfehler . . . . .	96
6.8	Motorprüfstand: Verlauf des Sauerstoffmassenanteils und Regelfehler . . . . .	98
6.9	Motorprüfstand: Verlauf der Stellgröße Massenstrom durch NDAGR-Klappe . . . . .	99
6.10	Motorprüfstand: Verlauf der Position der NDAGR-Klappe . . . . .	99
6.11	Motorprüfstand: Verlauf des Drucks vor NDAGR-Klappe und Regelfehler . . . . .	100
6.12	Motorprüfstand: Verlauf der Stellgröße Massenstrom durch Abgasklappe . . . . .	101
6.13	Motorprüfstand: Verlauf der Position der Abgasklappe . . . . .	101
6.14	Motorprüfstand: Verlauf des beobachteten Frischluftmassenstroms . . . . .	102
6.15	Motorprüfstand: Verlauf des beobachteten Abgasmassenstroms bei einer Variation von Drehzahl und Drehmoment . . . . .	104
6.16	Vergleich AGR-Ratenregelung zu Sauerstoffregelung: Sauerstoffmassenanteil . . . . .	105
6.17	Vergleich AGR-Ratenregelung zu Sauerstoffregelung: Position der NDAGR-Klappe . . . . .	106
6.18	Vergleich AGR-Ratenregelung zu Sauerstoffregelung: Druck vor NDAGR-Klappe . . . . .	107
6.19	Vergleich AGR-Ratenregelung zu Sauerstoffregelung: Abgasklappenposition . . . . .	108

# Tabellenverzeichnis

1.1	EU Emissionsstandards für Diesel-Personenkraftwagen . . . . .	2
2.1	Kenndaten des Versuchsträgers 2.0l-135kW-TDI-Motor . . . . .	24
4.1	Modellansätze zur Berechnung des Luft- und Abgaspfades . . . . .	39
4.2	Beziehung zwischen Öffnungswinkel und normierter Stellposition der im Gassystem vorhandenen Klappen . . . . .	44
4.3	Parameter und ihre Bedeutung . . . . .	58
4.4	Identifizierte Parameter der Verzögerungsglieder . . . . .	63
5.1	Regelgesetze der einzelnen Varianten und ihre Aufteilung . . . . .	82

# Abkürzungsverzeichnis

<b>AdBlue</b>	Harnstoff-Wasser-Lösung, Markenname
<b>AGR</b>	Abgasrückführung
<b>AKL</b>	Abgasklappe
<b>AÖ</b>	Auslass-Öffnen
<b>AS</b>	Auslass-Schließen
<b>ATL</b>	Abgasturbolader
<b>CAN</b>	Controller Area Network
<b>DKL</b>	Drosselklappe
<b>DPF</b>	Dieselpartikelfilter
<b>ECU</b>	Electronic Control Unit
<b>EÖ</b>	Einlass-Öffnen
<b>ES</b>	Einlass-Schließen
<b>ETK</b>	Emulator-Tast-Kopf
<b>HFM</b>	Heißfilm-Luftmassenmesser
<b>HiL</b>	Hardware-in-the-Loop
<b>HDAGR</b>	Hochdruck-Abgasrückführung
<b>iAGR</b>	Innere Abgasrückführung
<b>IMC</b>	Internal-Model Control
<b>INCA</b>	Integrated Calibration and Application Tool
<b>MSG</b>	Motorsteuergerät
<b>NDAGR</b>	Niederdruck-Abgasrückführung
<b>NGK</b>	NGK Spark Plug Co., Ltd.
<b>NSC</b>	NO <sub>x</sub> -Speicherkatalysator
<b>OBD</b>	On-Board-Diagnose
<b>OT</b>	Oberer Totpunkt
<b>RCP</b>	Rapid Control Prototyping
<b>RDE</b>	Real Driving Emission

<b>RSG</b>	Riemen-Starter-Generator
<b>SCR</b>	Katalysator mit selektiver katalytischer Reduktion
<b>VTG</b>	Variable Turbinengeometrie
<b>VVT</b>	Variabler Ventiltrieb
<b>WLTP</b>	Worldwide Harmonized Light Vehicle Test Procedure

# Symbolverzeichnis

## Lateinische Formelzeichen

Abkürzung	Bedeutung
$a$	Koeffizient eines Polynoms
$A$	Fläche
$b$	Koeffizient eines Zähler-Polynoms
$c$	Wärmekapazität
$C$	Durchflussfaktor
$e$	Fehler
$f_s$	Sensorkennlinie
$F$	Faraday-Konstante
$h$	Spezifische Enthalpie
$I$	Pumpstrom
$J$	Gütefunktional
$K$	Verstärkungsfaktor
$L_{st}$	Stöchiometrisches Luftverhältnis
$m$	Masse
$\dot{m}$	Massenstrom
$M$	Drehmoment
$n$	Drehzahl
$p$	Druck
$q$	Anzahl der Modelleingänge
$\dot{Q}$	Wandwärmestrom
$r$	Anzahl der Modellausgänge
$R$	Gaskonstante
$s$	Normierte Stellposition
$t$	Zeit
$T$	Zeitkonstante eines Systems
$u$	Innere Energie
$U_{Nernst}$	Nernst-Spannung