Ein Beitrag zur Optimierung des Betriebsverhaltens
abgasturboaufgeladener Ottomotoren

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

zur Erlangung der Würde
eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

von: Dipl.-Ing. Fabian Herbst
geboren in Wolfenbüttel

eingereicht am: 12. Januar 2017

mündliche Prüfung am: 29. Mai 2017

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Peter Eilts
Prof. Dr.-Ing. Roland Baar

Berichte aus dem ivb

Band 18

Fabian Herbst

**Ein Beitrag zur Optimierung des Betriebsverhaltens
abgasturboaufgeladener Ottomotoren**

Shaker Verlag
Aachen 2017

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., 2017

Copyright Shaker Verlag 2017

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5369-2

ISSN 2364-3862

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Diese Arbeit entstand vornehmlich während meiner Anstellung als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Verbrennungskraftmaschinen der Technischen Universität Braunschweig im Rahmen des Forschungsvorhabens „Grundlegende Technologien zur Hochaufladung von Fahrzeugmotoren“ (B.U. 2.2.4) der Niedersächsisch Technischen Hochschule (NTH).

Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Eilts gebührt mein besonderer Dank für die Betreuung dieser Arbeit und für das mir entgegengebrachte Vertrauen während meiner Zeit am Institut. Durch seine konstruktiven Hinweise und wertvollen Anregungen hat er einen entscheidenden Beitrag zum Gelingen dieser Arbeit geleistet. Herrn Prof. Dr.-Ing. Roland Baar danke ich herzlich für die Übernahme des Koreferats und Herrn Prof. Dr.-Ing. Ferit Küçükay für den Vorsitz des Prüfungsausschusses.

Des Weiteren möchte ich mich bei allen Mitarbeitern des Instituts und im Besonderen beim technischen Personal bedanken, die mir stets mit Rat und Tat zur Seite standen und so die Durchführung der Untersuchungen dieser Arbeit ermöglicht haben.

Meinen Kollegen möchte ich für die tolle Zeit und die vielen (nicht immer) fachlichen Diskussionen und verbrachten Stunden am Langen Kamp danken, die wesentlich zur guten Arbeitsatmosphäre beigetragen haben und mir in guter Erinnerung bleiben werden. Weiterhin bedanke ich mich bei allen Studenten, die mir durch ihren Einsatz und ihre Arbeiten eine große Hilfe bei der Erstellung dieser Dissertation waren.

Nicht zuletzt möchte ich mich bei meiner Familie für die vielfältige Unterstützung bedanken, die meinen bisherigen Werdegang erst ermöglicht hat. Besonderer Dank gebührt meiner Frau Jana, die mir durch ihren selbstlosen Einsatz und ihr Verständnis den Rücken auf dem Weg zum Abschluss dieser Arbeit freigehalten hat.

Kurzfassung

Downsizing in Kombination mit Abgasturboaufladung stellt eine der Schlüsseltechnologien zur Erfüllung der aktuellen und zukünftigen CO₂- und Emissionslimitierungen dar. Diese Hubraumreduktion geht jedoch mit erhöhten Anforderungen an das Aufladesystem einher, um dem Motor im gesamten Betriebsbereich einen ausreichenden Ladedruck zur Verfügung stellen zu können. Bei der Auslegung eines Turboladers muss in der Regel ein Kompromiss zur Erfüllung der Anforderungen nach hoher Nennleistung und hohem Low-end-Torque bei gleichzeitigem dynamischem Ansprechverhalten getroffen werden. Im Besonderen bei der Aufladung von Ottomotoren, die aufgrund ihrer höheren Maximaldrehzahl und der Quantitätsregelung eine größere Luftmassenspreizung aufweisen, sind breite Verdichterkennfelder und ein erhöhtes Schluckvermögen der Turbinen zur Lösung dieses Zielkonfliktes erforderlich.

Zur Aufladung eines kleinvolumigen Ottomotors wird ein variables Aufladesystem numerisch und experimentell im Teil- und Volllastbereich des Motors untersucht, das die Anforderungen bezüglich Nennleistung und Low-end-Torque eines 2-stufigen Referenzmotors mit einem einstufigen Aufladesystem erfüllen kann. Für die Bereitstellung einer ausreichenden Turbinenleistung im gesamten Motorkennfeld kommt eine variable Turbinengeometrie mit einem zusätzlichen externen Wastegate zum Einsatz. Am Verdichter, der für den Massendurchsatz im Nennleistungsbereich ausgelegt ist, werden zwei verschiedene Ansätze zur Verdichterkennfelderweiterung zu niedrigen Massenströmen untersucht. Der zusätzliche Einsatz von Phasenstellern auf der Ein- und Auslassnockenwelle des Motors wird zur weiteren Optimierung des motorischen Betriebsverhaltens eingesetzt.

Abstract

Downsizing in combination with turbocharging is nowadays one of the key technologies to meet the current and future CO₂ and emission limitations. Decreasing the engine displacement increases the demands on the turbocharging system in order to provide a sufficient boost pressure for the engine throughout the whole engine operating range. Designing a turbocharger for an engine leads to a compromise to meet the requirements of high power rating and high low-end torque performance with a dynamic response behavior of the engine. Especially the charging of a gasoline engine intensifies this trade-off due to the higher maximum speed and the throttling of the air flow for engine load regulation. Wide compressor operation ranges and turbines with high swallowing capacity are necessary to cover this higher mass flow range and to solve the trade-off.

Numerical and experimental investigations in part and full load of a small sized gasoline engine equipped with a variable charging system are presented. The variable charging system is able to fulfill the requirements of the nominal power and low-end torque of a 2-stage reference engine with a single stage charging system. A variable geometry turbine with an additional external wastegate is used to provide sufficient turbine power in the whole engine operation range. The compressor stage is designed for the nominal power of engine and two variable systems are investigated to extend the compressor map to lower mass flowrates. The additional use of camshaft phasing systems at the inlet and exhaust side of the engine is used to further optimize the engine performance.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	I
Kurzfassung	III
Abstract	V
Nomenklatur.....	IX
1. Einleitung und Motivation	1
2. Stand der Technik.....	5
2.1. Der Arbeitsprozess des direkteinspritzenden Ottomotors.....	5
2.1.1. Brennverfahren des direkteinspritzenden Ottomotors.....	5
2.1.2. Strahlzerfall und Tropfenbildung.....	8
2.1.3. Verdampfung und Vermischung mit der angesaugten Luft.....	9
2.1.4. Zündung und Verbrennung	9
2.1.5. Verbrennungsanomalien.....	11
2.2. Downsizing von Verbrennungskraftmaschinen.....	13
2.3. Aufladung von Verbrennungskraftmaschinen	15
2.3.1. Natürliche Aufladung.....	16
2.3.2. Mechanische Aufladung.....	17
2.3.3. Druckwellenaufladung	18
2.3.4. Abgasturboaufladung.....	19
2.3.5. Kombinierte Aufladung.....	31
2.3.6. Mehrstufige Aufladung und elektrische Systeme.....	31
2.4. Betriebsverhalten von Radialverdichtern.....	33
2.5. Konzepte zur Kennfeldbeeinflussung von Radialverdichtern	39
2.6. Ziele der Arbeit.....	51
3. Untersuchungsmethoden	52
3.1. Experimentelle Untersuchungen am Motorprüfstand.....	52
3.1.1. Referenzmotor und Versuchsträger.....	52
3.1.2. Prüfstands Aufbau und Messtechnik.....	54
3.1.3. Untersuchte Turbolader.....	59

3.1.4. Untersuchte Konzepte zur Verdichterkennfeldbeeinflussung.....	61
3.1.5. Randbedingungen der Untersuchungen.....	63
3.2. Motorprozesssimulation	64
3.2.1. Modellierung der Verbrennung.....	65
3.2.2. Modellierung der klopfenden Verbrennung	71
3.2.3. Modellvalidierung.....	75
4. Ergebnisse der experimentellen und numerischen Untersuchungen	77
4.1. Basismotor mit Wastegate-Lader	77
4.1.1. Variable Steuerzeiten und Ladungsbewegung im Vollastbetrieb.....	77
4.1.2. Variable Steuerzeiten und Ladungsbewegung im Teillastbetrieb.....	93
4.2. Untersuchungen mit variabler Turbinengeometrie und Wastegate.....	99
4.2.1. Verdichter A und B an der Vollast.....	99
4.3. Untersuchungen mit variablem Aufladesystem	101
4.3.1. Verdichter B mit Vordrallerzeuger an der Vollast.....	101
4.3.2. Verdichter B mit Vordrallerzeuger und variablen Steuerzeiten an der Vollast.....	110
4.3.3. Verdichter B mit Vordrallerzeuger in der Teillast.....	115
4.3.4. Verdichter B mit variablem Trim an der Vollast.....	118
4.3.5. Verdichter B mit variablem Trim und variablen Steuerzeiten an der Vollast.....	127
4.3.6. Verdichter B mit variablem Trim in der Teillast.....	133
4.4. Optimierung des Betriebsverhaltens mit variablem Aufladesystem.....	135
5. Zusammenfassung und Ausblick.....	141
Literaturverzeichnis.....	146
Abbildungsverzeichnis.....	160
Tabellenverzeichnis.....	165
Anhang.....	166

Nomenklatur

Formelzeichen	Einheit	Bezeichnung
c	m/s	Fluidgeschwindigkeit
c_p	$\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	isobare spezifische Wärmekapazität
c_u	m/s	Umfangsgeschwindigkeit
h	kJ/kg	spezifische Enthalpie
i	-	Anzahl der Kurbelwellenumdrehungen pro Arbeits- spiel
m	kg	Masse
$\dot{m}$	kg/s	Massenstrom
n	1/min	Drehzahl
p	Pa	Druck
r	m	Radius
r	-	Recovery-Faktor
t	s	Zeit
u	m/s	Umfangsgeschwindigkeit
u'	m/s	Turbulente Schwankungsgeschwindigkeit
w	m/s	relative Strömungsgeschwindigkeit
A	m^2	Querschnittsfläche
A_o	m^2	Oberfläche
C_p	-	Druckverlustkoeffizient
C_f	-	Reibungskoeffizient
D	m	Durchmesser
D_K	%	Drosselklappenwinkel
D_m	m	mittlere Laufraddurchmesser
H	kJ	Enthalpie
H_u	kJ/kg	Heizwert
I	-	Vorreaktionszustand
K	-	K-Wert
L	-	Luftbedarf
M	Nm	Moment
P	kW	Leistung
Q	J	Wärmemenge
S	m/s	Flammengeschwindigkeit
T	K	Temperatur
T	-	Trim
V	m^3	Volumen
Y		Laufradarbeit

Formelzeichen	Einheit	Bezeichnung
α	W/(m ² K)	Konvektiver Wärmeübergangskoeffizient
α	°	Winkel
β	°	Strömungswinkel
ε	-	Verdichtungsverhältnis
η	%	Wirkungsgrad
κ	-	Isentropenexponent
λ	-	Taylor-Mikrolänge
λ	-	Verbrennungsluftverhältnis
ρ	kg/m ³	Dichte
τ	s	Zeit
φ	°KW	Kurbelwinkel

Indizes

0	Normbedingungen
1	Zustand vor Verdichter
2	Zustand nach Verdichter
3	Zustand nach Ladeluftkühler
4	Zustand vor Zylinder
5	Zustand vor Turbine
6	Zustand nach Turbine
A	Abgas
auf	Aufladung
AN	Abgasenergienutzungsgrad
B	Brennstoff
eff	effektiv
f	Reibung
F	Fluid
ges	gesamt
H	Hubvolumen
i	indiziert
K	Klopfen
L	Luft
L	Laminar
m	mechanisch
min	mindest
u	untere
opt	optimal
p	isobar
ref	Referenz

s	isentrop
st	statisch
t	total
T	Turbine
T	Turbulent
u	Umgebung
u	unverbrannt
V	Verdichter
W	Wand
Z	Zylinder

Abkürzungen

1D	1-dimensional
ATL	Abgasturbolader
AVs	Auslassventil-Schließt
AVö	Auslassventil-Öffnet
CFD	Computational Fluid Dynamics
DVA	Druckverlaufsanalyse
ES	Einlass-Schluss
EVö	Einlassventil-Öffnet
EVs	Einlassventil-Schließt
IGV	Inlet Guide Vane
KGB	Klopfbeginn
KSM	Kennfeldstabilisierende Maßnahme
LBK	Ladungsbewegungsklappen
LET	Low-end-Torque
LWOT	Ladungswechsel-OT
OT	Oberer Totpunkt
RG	Restgas
ROZ	Oktanzahl
SWP	Schwerpunktlage
VB	Verbrennungsbeginn
VD	Verbrennungsdauer
VE	Verbrennungsende
VIGV	Variable Inlet Guide Vanes
VTC	Variable Trim Compressor
VTG	Variable Turbinen Geometrie
WG	Wastegate
ZZP	Zündzeitpunkt