Samir Kadunic

Einfluss der Ladelufttemperatur auf den Ottomotor

Ein Potenzial zur Steigerung von Wirkungsgrad und Leistung aufgeladener Motoren



Einfluss der Ladelufttemperatur auf den Ottomotor

Samir Kadunic

Einfluss der Ladelufttemperatur auf den Ottomotor

Ein Potenzial zur Steigerung von Wirkungsgrad und Leistung aufgeladener Motoren

Mit einem Geleitwort von Prof. Dr.-Ing. Helmut Pucher und Prof. Dr.-Ing. E.h. Bernd Wiedemann



Samir Kadunic Berlin, Deutschland

Zugl. Dissertation, Technische Universität Berlin, 2014

ISBN 978-3-658-11135-9 ISBN 978-3-658-11136-6 (eBook) DOI 10.1007/978-3-658-11136-6

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

Springer Vieweg

© Springer Fachmedien Wiesbaden 2015

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.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Fachmedien Wiesbaden ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media (www.springer.com)

Geleitwort

Gilt die Aufladung bei Pkw-Dieselmotoren heute praktisch als Standard, werden zunehmend aber auch Pkw-Ottomotoren aufgeladen, um das sog. *Downsizing* umsetzen zu können. Dieses besteht darin, die gewünschte Nennleistung über einen Motor mit relativ kleinem Hubvolumen darzustellen, der dazu entsprechend hoch aufgeladen werden muss. Die geringere Triebwerksreibung des kleineren Motors und seine im Betrieb ständig höhere Auslastung wirken sich positiv auf den Motorwirkungsgrad aus. Dabei ermöglicht Downsizing zusätzliche Sekundäreffekte im Gesamtfahrzeug. Der aufgeladene Ottomotor ist, zur Vermeidung des Klopfens, auf eine möglichst intensive Rückkühlung der vom Lader verdichteten Luft angewiesen. Mit herkömmlicher Ladeluftkühlung an Pkw-Motoren ist nur theoretisch Umgebungstemperatur erreichbar, praktisch liegt die Ladelufttemperatur deutlich darüber.

In der vorliegenden Arbeit wird unter Kombination von umfangreichen Motorprüfstandsversuchen und digitaler Motorprozess-Simulation untersucht, welche Verbesserungen hinsichtlich Leistungsdichte, Wirkungsgrad und Abgasemission sich erzielen lassen, wenn die Ladelufttemperatur unter die Umgebungstemperatur abgesenkt werden kann, und welche Konsequenzen sich für die Motorauslegung daraus ergeben. Auch wird exemplarisch vorgeführt, wie die Klimaanlage eines Pkw neben ihrer Hauptaufgabe zu solch intensivierter Ladeluftkühlung mit genutzt werden könnte. Die Treffsicherheit der Motorprozess-Simulation steht und fällt mit der Güte der Vorgabe des betriebspunktspezifischen Brennverlaufs, der sich mit geänderten Motorbetriebsbedingungen, so auch mit der Ladelufttemperatur, ändert. Der Verfasser entwickelte dazu ein auf seinen Motorversuchen basierendes, empirisches Rechenmodell, dessen Tauglichkeit er durch Rechnungs/Messungs-Vergleiche zu seinem Versuchsmotor und auch zu einem anderen Ottomotor überzeugend nachweisen konnte.

Die vorgelegten Ergebnisse können zum vertieften Verständnis des Verbrennungsund insgesamt Prozessablaufs des aufgeladenen Ottomotors beitragen und mit der Vorauslegung und Applikation dieser Motorenkategorie befassten Ingenieuren wichtige Impulse für den Einsatz des heute unverzichtbaren Entwicklungswerkzeugs Motorprozess-Simulation geben, das die beeindruckende Entwicklung der motorischen Kennwerte erst ermöglicht hat.

> Prof. Dr.-Ing. Helmut Pucher Prof. Dr.-Ing. E.h. Bernd Wiedemann

Vorwort und Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Verbrennungskraftmaschinen der TU Berlin. Teile der experimentellen Untersuchungen wurden im Rahmen des Projekts *Heat2Cool* von der Forschungsgemeinschaft Verbrennungskraftmaschinen e. V. gefördert. Bestimmte experimentelle und simulative Untersuchungen wurden erst durch die Unterstützung der IAV GmbH ermöglicht. Dafür möchte ich mich herzlich bedanken.

Während meiner Zeit am Fachgebiet Verbrennungskraftmaschinen hatte ich die besondere Gelegenheit, von mehreren Fachgebietsleitern lernen zu dürfen und durch deren starke Persönlichkeiten geprägt zu werden. So hat Herr Prof. Helmut Pucher mit seinen hervorragenden Vorlesungen meine Begeisterung für Verbrennungskraftmaschinen entfacht. Er schlug mich für das Stipendiatenprogramm der Robert Bosch GmbH vor und motivierte mich durch seine bedingungslose Unterstützung, an seinem Fachgebiet zu promovieren. Ich freue mich daher ganz besonders, dass er diese Arbeit als Gutachter betreute, und möchte mich für seinen unermüdlichen Einsatz und seine kritischen aber stets wohlwollenden Anmerkungen herzlich bedanken.

Herr Prof. Bernd Wiedemann übernahm das Fachgebiet in turbulenten Zeiten und konnte es durch seine Entschlossenheit und seinen Mut bewahren. Ich hatte das große Glück in zahlreichen wertvollen Gesprächen, durch seine außerordentliche Erfahrung geformt zu werden. Seine volle Unterstützung, auch außerhalb des akademischen Rahmens, hat einen wesentlichen Anteil zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Ich freue mich daher ganz besonders, dass er das Hauptreferat übernommen hat, und möchte auch ihm meinen herzlichen Dank aussprechen.

Herr Prof. Roland Baar räumte mir großen Freiraum in der wissenschaftlichen Arbeit ein, den ich für eigene Ideen nutzte. Dafür und für die Übernahme des Vorsitzes im Promotionsaus danke ich ihm.

Schließlich möchte ich auch Herrn Prof. Burghard Voß ausdrücklich dafür danken, sich kurzfristig als Gutachter für diese Arbeit zur Verfügung gestellt zu haben. Trotz der überschaubaren Zeit hat er keine Mühe gescheut und sich intensiv mit der Arbeit auseinandergesetzt. Mein Dank gilt auch den Mitarbeitern des Fachgebiets Verbrennungskraftmaschinen. Vor allem die freundschaftliche Zusammenarbeit und der rege Austausch mit Florian Scherer und Holger Mai haben mir den nötigen Rückhalt für diese Arbeit gegeben.

Besonders möchte ich mich bei meinen vielen Studenten bedanken, die mit Ihren Abschlussarbeiten einen wichtigen Beitrag für diese Arbeit geleistet haben. Hervorheben möchte ich dabei Bastian Eberding, Jörg Urban und Bojan Jander ohne deren leidenschaftliche Unterstützung die Arbeit nicht in dieser Qualität entstanden wäre.

Berlin

Samir Kadunic

Abstract

This thesis contributes knowledge about the influence of extreme charge air cooling on the combustion in spark-ignition engines. It investigates a cost-efficient method to decouple charge air temperature from ambient temperature, employing close-toproduction technology. Additionally, a model for combustion prediction is introduced, which is application-friendly and permits projection of characteristic thermodynamic properties and limits of engine operation from engine simulation at an early stage of engine development. For this reason, results from this thesis can be employed for the future development of highly efficient and environment-friendly spark ignition engines.

The first part of this thesis investigates the influence of various parameters of engine operation, particularly charge air temperature, on the combustion within the engine. Experiments were run on an engine dynamometer with a supercharged passenger car spark-ignition engine. A sensitivity analysis was performed beginning from six different significant points of the engine map. The influence of charge air temperature on engine operation is identified and compared to other parameters, employing measurements of more than 1000 points of engine operation.

The second part of this thesis examines the potential of charge air cooling for the improvement of efficiency and power density of a spark ignition engine. The influence on efficiency is researched in representative points of operation at low (NEDC), medium and high engine load. It is demonstrated, that intensive charge air cooling has no negative effect on engine efficiency or exhaust emissions, not even at low engine loads. At higher engine loads, extreme charge air cooling permits adjustment of air-fuel-ratio and ignition timing, which results in efficiency increases up to 20%, as measured on the engine dynamometer. The potential of charge air cooling for increased power density is quantified under close-to-production conditions. The results confirmed specific outputs of up to 150kW/dm³, which exceeds current industry standards as well as current predictions for the future.

The third part of this thesis discusses the application of the second part's results on spark-ignition engines. The employment of a passenger car's AC-compressor for charge air cooling below ambient temperature is analyzed. The stationary break-even engine-load is derived at various engine speeds, where engagement of the AC system becomes energy-efficient. Further on, potential is quantified for an increase in

Low-End-Torque, maximum torque and maximum power output through charge air cooling by the vehicle's AC system.

The last part of this thesis analyzes methods for the consideration of charge air temperature influence on the engine operating limits of supercharged spark-ignition engines during the lay-out phase of the development process. Attention is focused on the reliable prediction of the heat release rate. The empirical and phenomenological approaches known from literature are compared and assessed. Main criterion is each approach's capability to predict exhaust gas temperature and peak cylinder pressure. A new approach is developed to predict heat release and limits of engine operation, which is based and centered on the centre of heat release. The portability of this new approach towards other spark-ignition engines is tested and confirmed.

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit leistet einen Beitrag zum Wissen über den Einfluss von extremer Ladeluftkühlung auf die ottomotorische Verbrennung. Es wird eine seriennahe und kostengünstige Möglichkeit analysiert, um die Ladelufttemperatur von der Umgebungstemperatur zu entkoppeln. Des Weiteren wird ein anwenderfreundliches Modell zur Brennverlaufsvorausberechnung entwickelt, welches eine genaue Vorhersage wesentlicher thermodynamischer Kenngrößen und der Betriebsgrenzen des Ottomotors bereits bei dessen Auslegung in der Motorprozess-Simulation ermöglicht. Dadurch können die Erkenntnisse aus dieser Arbeit unmittelbar bei der Entwicklung hocheffizienter und umweltfreundlicher zukünftiger Ottomotoren eingesetzt werden.

Im ersten Teil werden die Einzeleinflüsse wichtiger Motorbetriebsparameter und insbesondere der Ladelufttemperatur auf den Brennverlauf und damit auf den Motorbetrieb bestimmt. Hierzu wird zu einem aufgeladenen Pkw-Ottomotor am Motorprüfstand, ausgehend von sechs verschiedenen Startpunkten im Motorkennfeld, jeweils eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Anhand von mehr als 1000 am Prüfstand vermessenen Betriebspunkten wird der Einfluss der Ladelufttemperatur auf den Motorbetrieb relativ zu den anderen Parametern identifiziert.

Im zweiten Teil der Arbeit wird das Potenzial der Ladelufttemperatur zur Steigerung von Wirkungsgrad und Leistungsdichte des Motors untersucht. Dem Einfluss auf den Wirkungsgrad wird anhand von repräsentativen Betriebspunkten bei niedriger (NEFZ), mittlerer und hoher Last nachgegangen. Es wird gezeigt, dass selbst bei niedrigen Lasten eine niedrige Ladelufttemperatur weder einen negativen Effekt auf den Motorwirkungsgrad noch auf die Schadstoffemissionen hat. Hin zu hohen Motorlasten können bei extremer Ladeluftkühlung das Luftverhältnis und der Zündzeitpunkt optimiert werden, womit sich Wirkungsgradverbesserungen von über 20% am Prüfstand darstellen lassen. Der Einfluss der Ladeluftkühlung auf die Erhöhung der Leistungsdichte wird unter seriennahen Randbedingungen quantifiziert. Die Untersuchungen ergeben, dass bei einer Ladelufttemperatur von 0°C Literleistungen von bis zu 150kW/l erreichbar sind, was sowohl in Serie befindliche als auch die für absehbare Zukunft prognostizierten Literleistungen deutlich übertrifft.

Im dritten Teil der Arbeit wird die Anwendung der Ergebnisse aus dem zweiten Teil der Arbeit auf die Applikation von Ottomotoren diskutiert. Hierzu wird die Nutzung des Pkw-Klimakompressors als eine praxisnahe Möglichkeit zur Ladeluftkühlung unter die Umgebungstemperatur analysiert. Dazu wird unter Einsatz der Klimaanlage die stationäre Break-Even-Lastlinie bestimmt, ab der sich die Verwendung der Klimaanlage energetisch lohnt. Des Weiteren wird die Anhebung des Low-End-Torque, des Volllastniveaus und der Nennleistung mittels Ladeluftkühlung durch den Pkw-Klimakompressor quantifiziert.

Im vierten und letzten Teil der Arbeit werden Methoden analysiert, wie der Einfluss der Ladelufttemperatur auf die Erweiterung der Motorbetriebsgrenzen von aufgeladenen Ottomotoren bereits bei der Auslegung berücksichtigt werden kann. Die verlässliche Abschätzung des Brennverlaufs steht dabei im Fokus. Die aus der Literatur bekannten empirischen und phänomenologischen Ansätze zur Brennverlaufsvorausberechnung werden vergleichend bewertet. Beurteilt wird dazu die Fähigkeit, des jeweiligen Ansatzes die Abgastemperatur und den maximalen Zylinderdruck vorauszusagen. Es wird ein – verbrennungsschwerpunktbasierter – Ansatz zur Vorausberechnung des Brennverlaufs und der Betriebsgrenzen entwickelt. Die Übertragbarkeit dieses Ansatzes auf andere Ottomotoren wird gezeigt.

Inhaltsverzeichnis

Gel	eitwo	rt		v
Vor	wort	und Da	nksagung	VII
Abs	stract			IX
Kur	zfass	ung		XI
Abb	oildun	igsverz	eichnis	XVII
For	melze	eichen (und Abkürzungen	XXI
1	Einl	eitung		1
2	Ziel	setzung	3	3
3	Gru	ndlage	n und Stand der Technik	5
	3.1	Ottom	otorische Gemischbildung und Verbrennung	5
		3.1.1	Gemischbildung	5
		3.1.2	Verbrennung	8
	3.2	Ladelu	ıftkühlung bei Ottomotoren	12
		3.2.1	Ladeluftkühlung mittels Wärmeübertrager	13
		3.2.2	Ladeluftkühlung ohne Wärmeübertrager	16
	3.3	Betriel	bsgrenzen des aufgeladenen Ottomotors	20
		3.3.1	Verbrennungsanomalien	22
		3.3.2	Mechanische Belastung	27
		3.3.3	Thermische Belastung	28
		3.3.4	Topologie und Kurzbewertung der Maßnahmen zur Einhaltung der Motorbetriebsgrenzen	29
	3.4	Motor	prozess-Simulation und Modellierung der Verbrennung	30
		3.4.1	Motorgesamtprozessanalyse	31
		3.4.2	Modellierung der Verbrennung	33
4	Vers	suchsa	ufbau und Methodik	37
	4.1	Versu	chsaufbau	37
	4.2	Metho	dik	40
		4.2.1	Repräsentativer Zylinderdruckverlauf	41

		4.2.2	Zylinderdruckverlaufsanalyse am Motorprüfstand	43			
		4.2.3	Thermodynamische Druckverlaufsanalyse	48			
5	Sen	sitivitä	tsanalyse von Einflussgrößen auf den Motorbetrieb	51			
	5.1	Brenn	verlauf	53			
	5.2	Wand	wärmeverluste	58			
	5.3	Indizie	erter Wirkungsgrad	60			
	5.4	Maxim	naler Zylinderdruck	61			
	5.5	Zylind	erspitzentemperatur	63			
	5.6	Abgas	temperatur vor Turbine	65			
	5.7	Einflus	ss der Ladelufttemperatur bei unterschiedlicher Last	66			
	5.8	Zusan	nmenfassung	69			
6	Einf	luss de	er Ladelufttemperatur auf die Verbrennung	71			
	6.1	Betriel	bspunkt n=2000min ⁻¹ und p _{me} =2bar	71			
	6.2	Lastso	chnitte bei p _{mi} =6 und 12 bar	72			
	6.3	Motor	betriebsgrenzen	79			
		6.3.1	Klopfgrenze	80			
		6.3.2	Klopf-, Zylinderdruck- und Abgastemperaturgrenze	82			
		6.3.3	Zylinderdruck- und Abgastemperaturgrenze	83			
7	Einf	Einfluss der Ladelufttemperatur auf Leistungsdichte und					
	Wirl	kungsg	rad	85			
	7.1	Anheb	ung der Last bei thermodynamisch erwünschtem				
		Verbre	ennungsschwerpunkt und stöchiometrischem Luftverhältnis	85			
	7.2	Anheb	oung der Last bei variablem Verbrennungsschwerpunkt und				
		stöchi	ometr. Luftverhältnis	87			
	7.3	Volllas	st	90			
		7.3.1	Anhebung der Volllastkurve	90			
		7.3.2	Motorwirkungsgrad und thermische Turbinenbelastung bei konstanter motorischer Volllast	92			
	7.4	Steige	rung des max. Zylinderdrucks und der Nennleistung bis zur	97			
		741	Mitteldruckniveau an der Volllast	97			
		742	Nennleistung	99			
	75	Simula	ationsstudie zum Grenzpotenzial des Brennverfahrens	103			
	7.6	Zwisch	neneraebnis				

8	Pote	nzial d	er Ladeluftkühlung mittels Pkw-Klimaanlage	107
	8.1	Konzej	ot der Ladeluftkühlung mittels der Pkw-Klimaanlage	108
	8.2	Berechnung des Potenzials der Ladeluftkühlung mittels Pkw-Klimaanlage		
		8.2.1	Break-Even-Lastlinie im Motorkennfeld und	
			Wirkungsgradverbesserung bei konstanter Volllast	114
		8.2.2	Steigerung von Low-End Torque, Volllastniveau und Nennleistung.	115
9	Bren	nverla	ufsvoraussage für aufgeladene Ottomotoren	119
	9.1	Empiris	sche Ansätze	120
		9.1.1	Csallner (1981)	121
		9.1.2	Hockel (1982)	121
		9.1.3	Theissen (1989)	121
		9.1.4	Neugebauer (1996)	122
		9.1.5	Witt (1999)	122
		9.1.6	Hoppe (2002)	123
		9.1.7	Milocco (2007)	123
	9.2	Phäno	menologische Ansätze	124
	9.3	Güte d	er Brennverlaufsvoraussage von veröffentlichten Ansätzen für den	
		Versuc	hsträger	125
		9.3.1	Referenzkennfelder	125
		9.3.2	Vorgabe des Zündzeitpunktes	127
		9.3.3	Vorgabe des Verbrennungsschwerpunktes	133
		9.3.4	Einfluss der Kalibrierung der phänomenologischen Modelle auf die Güte der Voraussage im Vergleich zum Wiebe-Brennverlauf bei	
			Vorgabe des Verbrennungsschwerpunktes	135
	9.4	Formul den Ve	lierung eines eigenen Ansatzes zur Brennverlaufsvoraussage für ersuchsträger	137
		9.4.1	Vorbetrachtung zur Brenndauer	139
		9.4.2	Modellannahmen, Messdatenbasis und Methodik	141
		9.4.3	Formulierung der Umrechnungsvorschrift	141
		9.4.4	Validierung am Versuchsträger	145
	9.5	Überpr	üfung der Übertragbarkeit auf andere Ottomotoren	146
10	Zusa	ammen	fassung	149
Lite	raturv	verzeich	nnis	153
Anh	ang			163

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Schematische Darstellung der Einspritzung und des Strahlzerfalls [74]	6
Abb. 2: Zündgrenzen in Abhängigkeit von Temperatur und Lambda	8
Abb. 3: Zünd- und Selbstzündgrenzen von Kraftstoffen bei Umgebungsdruck [53]	9
Abb. 4: Schematisches Bild der laminaren und turbulenten Flammenausbreitung [31]	9
Abb. 5: Einfluss der Temperatur und des Drucks auf die laminare Flammengeschwindigkeit von	
lso-Oktan bei λ =1 [74]	10
Abb. 6: Einfluss der zyklischen Schwankungen auf den Zylinderdruckverlauf	11
Abb. 7: Schematische Darstellung des Wärmedurchgangs [66]	14
Abb. 8: Wärmeübertragerarten rekuperativer Ladeluftkühler [86]	14
Abb. 9: Schematischer Aufbau der Turbokühlung nach [131]	17
Abb. 10: Prinzip des Millerverfahrens im p-V Diagramm	17
Abb. 11: Rechnerische Ladeluftkühlung durch zusätzliche Kraftstoffeinspritzung bei $\lambda \leq 1$	20
Abb. 12: Zeitliche Entwicklung der spezifischen Leistung von Ottomotoren [25]	20
Abb. 13: Typische Betriebsgrenzen des abgasturboaufgeladenen Ottomotors	21
Abb. 14: Arten der Selbstentflammung	22
Abb. 15: Maximaler Zylinderdruck in Abhängigkeit von der spezifischen Leistung für	
freisaugende (links) und aufgeladene (rechts) Ottomotoren [98]	27
Abb. 16: Zeitliche Entwicklung des max. Zylinderdrucks bei Ottomotoren [25]	28
Abb. 17: Topologie der Motorbetriebsgrenzen und Eingriffsorte für Maßnahmen zur Einhaltung	
der Motorbetriebsgrenzen	29
Abb. 18: Schematische Darstellung von Brennverlauf und Durchbrennfunktion	33
Abb. 19: Kategorien von Verbrennungsmodellen [74]	33
Abb. 20: Einfluss des Formparameters auf den Wiebe-Brennverlauf (a) und die	
Durchbrennfunktion (b) bei gleichem Energieumsatz	35
Abb. 21: Versuchsaufbau und Sensorik des Versuchsträgers	38
Abb. 22: Einfluss der Anzahl der gemittelten Arbeitsspiele auf den Zylinderdruck bei	
unterschiedlichem Luftaufwand	41
Abb. 23: Einfluss der Anzahl der gemittelten Arbeitsspiele auf den Zylinderdruck bei	
unterschiedlichem Luftverhältnis	42
Abb. 24: Wandwärmeverluste und Verbrennungsschwerpunkt aus Heiz- bzw. Brennverlauf	
berechnet über der Motordrehzahl	44
Abb. 25: Einfluss des Isentropenexponenten κ auf die Brenndauer $\phi_{10^-90\%}$ des Heizverlaufes	45
Abb. 26: Klopferkennung mittels Filterung des Drucksignals [62]	46
Abb. 27: Definition der Klopfschwelle und Bereich der tolerierten Druckamplituden für die	
Untersuchungen in dieser Arbeit	47
Abb. 28: Variationsparameter (links) und Verteilung Startpunkte des teilfaktoriellen	
Versuchsplans im Motorkennfeld (rechts)	51
Abb. 29: Einfluss der Betriebsparameter auf den Brennverzug ZZP- $\phi_{2\%}$ und p_{mi}	53
Abb. 30: Sensitivität von Brenndauer $\phi_{2-5\%}$ und p_{mi} auf die Betriebsparameter	55
Abb. 31: Einfluss der Betriebsparameter auf die Brenndauer $\phi_{5-10\%}$ und p_{mi}	55
Abb. 32: Einfluss der Betriebsparameter auf die Brenndauer $\phi_{10.90\%}$ und p_{mi}	56
Abb. 33: Beeinflussung des Verbrennungsschwerpunkts durch die Betriebsparameter	57
Abb. 34: Detektion und Einfluss der Betriebsparameter auf das Brennende	58

Abb.	35:	Einfluss der Betriebsparameter auf Wandwärmeverluste und pmi	59
Abb.	36:	Einfluss Betriebsparameter auf indizierten Wirkungsgrad und pmi	60
Abb.	37:	Einfluss der Betriebsparameter auf p _{Zmax} und p _{mi}	62
Abb.	38:	Einfluss der Betriebsparameter auf den Variationskoeffizienten des max.	
		Zylinderdrucks und den indizierten Mitteldruck	63
Abb.	39:	Einfluss der Betriebsparameter auf Zylinderspitzentemperatur und pmi	64
Abb.	40:	Einfluss der Betriebsparameter auf die Abgastemperatur vor Turbine und den	
		indizierten Mitteldruck	65
Abb.	41:	Ladelufttemperatureinfluss auf den Brennverlauf bei unterschiedlicher Last	67
Abb.	42:	Einfluss von Ladelufttemperatur und Last auf die Brenndauer $\phi_{10\cdot90\%}$	67
Abb.	43:	Ladelufttemperatureinfluss auf den Motorbetrieb bei unterschiedlicher Last	69
Abb.	44:	Darstellung der Einflussstärke der Betriebsparameter auf die	
		Motorbetriebskenngrößen	70
Abb.	45:	Einfluss der Ladelufttemperatur auf Wirkungsgrad und Emissionen bei n=2000min ⁻¹	
		und p _{me} =2bar [56]	72
Abb.	46:	Einfluss der Ladelufttemperatur auf Wirkungsgrad (links) und Differenz des MFB50	
		zwischen Heiz- und Brennverlaufsrechnung (rechts) [Kad13]	73
Abb.	47:	Einfluss der Ladelufttemperatur auf die Wandwärmeverluste (oben) und die	
		Ladungswechselarbeit (unten)	74
Abb.	48:	Einfluss der Ladelufttemperatur auf den Brennverzug	75
Abb.	49:	Einfluss der Ladelufttemperatur auf die Brenndauer $\phi_{10.90\%}$	76
Abb.	50:	Einfluss der Ladelufttemperatur auf den Restgasgehalt	77
Abb.	51:	Einfluss der Ladelufttemperatur auf max. Zylinderdruck und Zylinderspitzentemperatur	78
Abb.	52:	Einfluss der Ladelufttemperatur auf die Abgastemperatur vor Turbine	78
Abb.	53:	Einfluss der Ladelufttemperatur auf den Variationskoeffizienten des indizierten	
		Mitteldrucks	79
Abb.	54:	Einfluss der Ladelufttemperatur auf Wirkungsgrad und Motorbetriebsgrenzen entlang	
		der Klopfgrenze bei n=2000min ⁻¹ und Lambda=1	80
Abb.	55:	Einfluss der Ladelufttemperatur auf Druck-, Brennverlauf und Temperatur in der	
		unverbrannten Zone bei n=2000min ⁻¹ und Lambda=1	81
Abb.	56:	Einfluss der Ladelufttemperatur auf Wirkungsgrad entlang der Klopf-, Druck- und	
		Abgastemperaturgrenze bei n=3500min ⁻ und p _{mi} =20bar [57]	82
Abb.	57:	Einfluss der Ladelufttemperatur entlang der Druck- und Abgastemperaturgrenze bei	
		n=4500min ⁻ ' und p _m =16bar [55]	83
Abb.	58:	Einfluss der Ladelufttemperatur auf den indizierten Mitteldruck, den maximalen	
		Zylinderdruck, den Restgasgehalt und die Abgastemperatur vor Turbine über der	
		Motordrehzahl bei MFB50 _{HVA} =8°KW n. ZOT	86
Abb.	59:	Einfluss der Ladelufttemperatur auf die durchschnittlich erzielbare Last (rechts) und	
		den spezifischen Kraftstoffverbrauch (links)	87
Abb.	60:	Einfluss der Ladelufttemperatur auf die erzielbare Last, maximalen Zylinderdruck,	
		MFB50 und Abgastemperatur bei Lambda=1-Betrieb	88
Abb.	61:	Einfluss der Ladelufttemperatur auf den spezifischen Kraftstoffverbrauch (links) und	
		den Restgasanteil (rechts) im Lambda=1-Betrieb	89
Abb.	62:	Mogliche Steigerung der über den Drehzahlbereich gemittelten Last durch	
	00	Ladeluttkuhlung im Lambda=1-Betrieb	89
Abb.	63:	Eintiuss der Ladelutttemperatur auf p_{mi} , p_{me} , p_{Zmax} und P_e	91

Abb.	. 64: Abgastemperatur, Lambda, MFB50 und Restgasgehalt an der Volllast in Abhängigkeit	
	von der Ladelufttemperatur	92
Abb.	. 65: Einfluss der Ladelufttemperatur auf die durchschnittliche Last bei variablem Lambda	
	und zulässigem max. Zylinderdruck von p _{Zmax} =80bar	92
Abb.	. 66: Einfluss der Ladelufttemperatur auf Wirkungsgrad, Abgastemperatur vor Turbine und	
	wichtige Motorbetriebsgrößen bei Volllast (T _{nDK} =80°C)	94
Abb.	. 67: Restgasanteil in Abhängigkeit von Drehzahl und T _{nDK} bei Volllast (T _{nDK} =80°C)	94
Abb.	. 68: Einfluss der Ladelufttemperatur auf Wirkungsgrad, Abgastemperatur vor Turbine und	
	wichtige Motorbetriebsgrößen bei Volllast (T _{nDK} =60°C)	95
Abb.	. 69: Restgasanteil in Abhängigkeit von Drehzahl und T _{nDK} bei Volllast (T _{nDK} =60°C)	96
Abb.	70: Einfluss der Ladelufttemperatur auf den durchschnittlichen effektiven Wirkungsgrad bei	
	den Volllastlinien T _{aDK} = 60° und 80°C	96
Abb.	71: Einfluss der Ladelufttemperatur auf die Verschiebung der Klopfgrenze und die	
	erzielbare Leistung bzw. Last für unterschiedliche p _{Zmax} -Werte bei n=3500min ⁻¹	98
Abb.	72: Einfluss der Ladelufttemperatur auf die Verschiebung der Klopfgrenze und erzielbare	
	Leistung bzw. Last für unterschiedliche p _{Zmax} -Werte bei n=4500min ⁻¹	99
Abb.	73: Einfluss der Ladelufttemperatur auf die Leistungsdichte und erzielbare Leistung bzw.	
	Last für unterschiedliche p _{Zmax} -Werte bei n=5500min ⁻¹	100
Abb.	74: Potenzial der Ladelufttemperatur zur Steigerung der Leistungsdichte bei zusätzlicher	
	Fremdaufladung	101
Abb.	. 75: Potenzial der Ladelufttemperatur auf die Steigerung der Leistungsdichte bei	
	zusätzlicher Fremdaufladung und Anwendung der Serienklopfgrenze	102
Abb.	. 76: Verdichterkennfeld (links) und Turbinenkennfeld (rechts) der ausgesuchten	
	Aufladeaggregate	103
Abb.	77: Luftverhältnis in Abhängigkeit von der Motordrehzahl für die Serienapplikation und die	
	leistungsgesteigerte Variante	104
Abb.	78: Simulation des Grenzpotenzials der Ladelufttemperatur T _{nDK} =0°C zur Steigerung der	
	Leistungsdichte im Vergleich zur Serienapplikation	105
Abb.	. 79: Grenzpotenzial der Ladelufttemperatur auf die Steigerung der Nennleistungsdichte	106
Abb.	. 80: Konzept der Ladeluftkühlung mittels Pkw-Klimaanlage	109
Abb.	. 81: Durch den Klimakompressor bereitgestelltes Kälteleistungsangebot am Verdampfer	
	(links) und Kälteleistungsbedarf des Versuchsträgers (rechts) bei Ladeluftkühlung um	
	50K	110
Abb.	. 82: Schema des Klimaanlagenprozesses Im Druck-Enthalpie-Diagramm für R134a	112
Abb.	83: Wirkungsgradverbesserung durch Ladeluftkühlung mit Pkw-Klimaanlage und Break-	
	Even Lastlinie im Motorkennfeld bei einer Ladelufttemperaturabsenkung von	
	T _{nDK} =60°C auf 10°C	114
Abb.	. 84: Erhöhung des Low-End Torque, der Volllast und der Nennleistung	116
Abb.	. 85: Effektiver (links) und indizierter Wirkungsgrad (rechts) Wirkungsgrad bei Erhöhung der	
	Last mittels um 50K intensivierte Ladeluftkühlung durch die Pkw-Klimaanlage	117
Abb.	. 86: Differenzkennfelder zwischen Simulation in <i>GT-Power</i> mit Brennverläufen aus TDA	
	und Prüfstandsmessung für maximalen Zylinderdruck und Abgastemperatur vor	
	Turbine	126
Abb.	. 87: Abweichungen im Motorkennfeld bei Verwendung von Brennverläufen aus TDA und	
	von daraus abgeleiteten Wiebe-Brennverläufen für Verbrennungsschwerpunkt,	
	Brenndauer, maximalen Zylinderdruck und Abgastemperatur vor Turbine	127

Abb. 88: Vorhersagefähigkeit der untersuchten Modelle für Verbrennungsschwerpunkt,	
Brenndauer, maximalen Zylinderdruck und Abgastemperatur vor Turbine bei	
Kalibrierung auf den Betriebspunkt n=2000min ⁻¹ und p _{mi} =6bar	128
Abb. 89: Vorhersagefähigkeit der untersuchten Modelle für den Zündverzug bei Kalibrierung auf	
den Betriebspunkt n=2000min ⁻¹ und p _{mi} =6bar	129
Abb. 90: Vorhersagefähigkeit der untersuchten Modelle für Verbrennungsschwerpunkt,	
Brenndauer, maximaler Zylinderdruck und Abgastemperatur vor Turbine bei	
Kalibrierung auf den Betriebspunkt n=3000min ⁻¹ und p _{mi} =20bar	130
Abb. 91: Vorhersagefähigkeit der untersuchten Modelle für den Zündverzug bei Kalibrierung auf	
den Betriebspunkt n=3000min ⁻¹ und p _{mi} =20bar	130
Abb. 92: Sensitivität des Einflussfaktors für die Brenndauer auf Zündzeitpunkt und Last bei den	
empirischen Modellen Csallner, Witt und Hoppe für beide Kalibrationspunkte	131
Abb. 93: Sensitivität des Einflussfaktors für den Zündverzug auf Zündzeitpunkt und Last bei den	
empirischen Modellen Csallner, Witt und Hoppe für beide Kalibrationspunkte	132
Abb. 94: Vergleich der Voraussagequalität zwischen Vorgabe von Zündzeitpunkt und	
Verbrennungsschwerpunkt bei Kalibrierung auf n=2000min ⁻¹ und p _m =6bar	134
Abb. 95: Vergleich der Voraussagequalität zwischen Vorgabe von Zündzeitpunkt und	
Verbrennungsschwerpunkt bei Kalibrierung auf n=3000min ⁻¹ und p _{mi} =20bar	135
Abb. 96: Vergleich der Vorhersagefähigkeit zwischen phänomenologischer Modelle bei 1-Punkt-	
(n=2000min ⁻¹ und p _{mi} =6bar), Mehrpunkt-Kalibrierung und Wiebe-basierten	
Ersatzbrennverlauf bei Vorgabe des Verbrennungsschwerpunktes	136
Abb. 97: Vergleich charakteristischer Brenndauern bestimmt mit Heizverlaufsrechnung und	
thermodynamische Druckverlaufsanalyse für das Kennfeld des Versuchsträgers	140
Abb. 98: Eingangs- und Ausgangsgrößen des Modells	141
Abb. 99: Wirkung der Einflussparameter auf die Brenndauer und den Formparameter	143
Abb. 100: Differenzkennfelddarstellung von Formparameter, Brenndauer, max. Zylinderdruck	
sowie Abgastemperatur vor Turbine für den Versuchsträger	145
Abb. 101: Überprüfung der Übertragungsfähigkeit des Ansatzes für einen Ottomotor	147
Abb. 102: Einfluss der Last auf die Kenngrößen des Brennverlaufs und die untersuchten	
Motorbetriebsgrößen	163
Abb. 103: Einfluss des Zündzeitpunkts auf die Kenngrößen des Brennverlaufs und die	
untersuchten Motorbetriebsgrößen	164
Abb. 104: Einfluss des Luftverhältnisses auf die Kenngrößen des Brennverlaufs und die	
untersuchten Motorbetriebsgrößen	165
Abb. 105: Einfluss der Motordrehzahl auf die Kenngrößen des Brennverlaufs und die	
untersuchten Motorbetriebsgrößen	166
Abb. 106: Einfluss des Restgasgehalts auf die Kenngrößen des Brennverlaufs und die	
untersuchten Motorbetriebsgrößen	167
Abb. 107: Einfluss der Ladelufttemperatur auf die Kenngrößen des Brennverlaufs und die	
untersuchten Motorbetriebsgrößen	168
Abb. 108: Einfluss der Ladelufttemperatur auf die Kenngrößen des Brennverlaufs und die	
untersuchten Motorbetriebsgrößen bei geänderter Skalierung	171

Formelzeichen und Abkürzungen

Lateinische Buchstaben

Symbol	Bedeutung	Einheit
Α	Fläche	CM ²
A_f	Flammenfrontfläche	Cm ²
A _l	Flammenfrontfläche bei laminarer Verbrennung	Cm ²
A _t	Flammenfrontfläche bei turbulenter Verbrennung	CM ²
а	Koeffizient der Wiebe-Funktion	-
b _e	spezifischer Kraftstoffverbrauch	g/kWh
$\mathrm{COV}_{\mathrm{pmi}}$	Variationskoeffizient der zyklischen Schwankungen	%
H _u	Heizwert	kJ/kg
h _E	spez. Enthalpie des aus dem Zylinder strömenden Arbeitsgases	J/kg
h _A	spez. Enthalpie des in den Zylinder strömenden Arbeitsgases	J/kg
hz	spezifische Enthalpie des Leckstroms	J/kg
$l_{\rm T}$	charakteristische Taylorlänge	mm
M _D	Drehmoment	Nm
m	Formparameter des Wiebe-Brennverlaufs	-
m _A	ausgeströmte Masse	g
m _E	eingeströmte Masse	g
m _{Kr}	Masse Kraftstoff	g
m_{Le}	Masse des Leckstroms je Arbeitsspiel	g
ṁ	Massenstrom	g/s
, m _e	In die Flammenfront eingebrachter Massenstrom	g/s
m _e	der Verbrennung zugeführte Masse des Arbeitsgases	g
ml	Luftmassenstrom	kg/h
\dot{m}_v	Massenumsatzrate	g/s
ṁγ	Verdichtermassenstrom	kg/s
$\dot{m}_{V,0}$	Korrigierter Verdichtermassenstrom	kg/s
m _v	in Wärme umgesetzte Masse des Verbrennungsgases	g
n	Drehzahl	min⁻¹
р	Druck	bar
Pe	effektive Leistung	kW
p_{L}	Ladedruck	bar
p _{me}	effektiver Mitteldruck	bar
p_{mi}	indizierter Mitteldruck	bar
p _{mi,LDW}	Indizierter Mitteldruck während des Ladungswechsels	bar