
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

 Springer Vieweg

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 intensiver 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 Verbrennungs- und 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-to-production 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 $150\text{kW}/\text{dm}^3$, 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 Vollastniveaus 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 Brennverlaufsvorausrechnung werden vergleichend bewertet. Beurteilt wird dazu die Fähigkeit, des jeweiligen Ansatzes die Abgastemperatur und den maximalen Zylinderdruck vorauszusagen. Es wird ein – verbrennungsschwerpunktbasierter – Ansatz zur Vorausrechnung des Brennverlaufs und der Betriebsgrenzen entwickelt. Die Übertragbarkeit dieses Ansatzes auf andere Ottomotoren wird gezeigt.

Inhaltsverzeichnis

Geleitwort	V
Vorwort und Danksagung	VII
Abstract	IX
Kurzfassung	XI
Abbildungsverzeichnis	XVII
Formelzeichen und Abkürzungen	XXI
1 Einleitung	1
2 Zielsetzung	3
3 Grundlagen und Stand der Technik	5
3.1 Ottomotorische Gemischbildung und Verbrennung	5
3.1.1 Gemischbildung.....	5
3.1.2 Verbrennung.....	8
3.2 Ladeluftkühlung bei Ottomotoren.....	12
3.2.1 Ladeluftkühlung mittels Wärmeübertrager	13
3.2.2 Ladeluftkühlung ohne Wärmeübertrager.....	16
3.3 Betriebsgrenzen 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 Motorprozess-Simulation und Modellierung der Verbrennung	30
3.4.1 Motorgesamtprozessanalyse.....	31
3.4.2 Modellierung der Verbrennung	33
4 Versuchsaufbau und Methodik	37
4.1 Versuchsaufbau	37
4.2 Methodik	40
4.2.1 Repräsentativer Zylinderdruckverlauf	41

4.2.2	Zylinderdruckverlaufsanalyse am Motorprüfstand.....	43
4.2.3	Thermodynamische Druckverlaufsanalyse	48
5	Sensitivitätsanalyse von Einflussgrößen auf den Motorbetrieb	51
5.1	Brennverlauf.....	53
5.2	Wandwärmeverluste.....	58
5.3	Indizierter Wirkungsgrad	60
5.4	Maximaler Zylinderdruck	61
5.5	Zylinderspitzentemperatur.....	63
5.6	Abgastemperatur vor Turbine.....	65
5.7	Einfluss der Ladelufttemperatur bei unterschiedlicher Last.....	66
5.8	Zusammenfassung.....	69
6	Einfluss der Ladelufttemperatur auf die Verbrennung	71
6.1	Betriebspunkt $n=2000\text{min}^{-1}$ und $p_{me}=2\text{bar}$	71
6.2	Lastschnitte bei $p_{mi}=6$ und 12 bar	72
6.3	Motorbetriebsgrenzen	79
6.3.1	Klopfgrenze	80
6.3.2	Klopf-, Zylinderdruck- und Abgastemperaturgrenze.....	82
6.3.3	Zylinderdruck- und Abgastemperaturgrenze.....	83
7	Einfluss der Ladelufttemperatur auf Leistungsdichte und Wirkungsgrad	85
7.1	Anhebung der Last bei thermodynamisch erwünschtem Verbrennungsschwerpunkt und stöchiometrischem Luftverhältnis.....	85
7.2	Anhebung der Last bei variablem Verbrennungsschwerpunkt und stöchiometr. Luftverhältnis.....	87
7.3	Volllast	90
7.3.1	Anhebung der Volllastkurve.....	90
7.3.2	Motorwirkungsgrad und thermische Turbinenbelastung bei konstanter motorischer Volllast.....	92
7.4	Steigerung des max. Zylinderdrucks und der Nennleistung bis zur Klopfgrenze.....	97
7.4.1	Mitteldruckniveau an der Volllast	97
7.4.2	Nennleistung	99
7.5	Simulationsstudie zum Grenzpotenzial des Brennverfahrens	103
7.6	Zwischenergebnis	105

8	Potenzial der Ladeluftkühlung mittels Pkw-Klimaanlage	107
8.1	Konzept der Ladeluftkühlung mittels der Pkw-Klimaanlage	108
8.2	Berechnung des Potenzials der Ladeluftkühlung mittels Pkw-Klimaanlage	113
8.2.1	Break-Even-Lastlinie im Motorkennfeld und Wirkungsgradverbesserung bei konstanter Volllast	114
8.2.2	Steigerung von Low-End Torque, Vollastniveau und Nennleistung	115
9	Brennverlaufsvoraussage für aufgeladene Ottomotoren	119
9.1	Empirische 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	Phänomenologische Ansätze	124
9.3	Güte der Brennverlaufsvoraussage von veröffentlichten Ansätzen für den Versuchsträger.....	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	Formulierung eines eigenen Ansatzes zur Brennverlaufsvoraussage für den Versuchsträger.....	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	Überprüfung der Übertragbarkeit auf andere Ottomotoren	146
10	Zusammenfassung	149
	Literaturverzeichnis	153
	Anhang	163

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Schematische Darstellung der Einspritzung und des Strahlerfalls [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 Flammgeschwindigkeit von Iso-Oktan bei $\lambda=1$ [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 Klopfchwelle 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 ZZZ- $\phi_{2\%}$ 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 p_{mi}	59
Abb. 36: Einfluss Betriebsparameter auf indizierten Wirkungsgrad und p_{mi}	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 p_{mi}	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 $\phi_{10-90\%}$	67
Abb. 43: Ladelufttemperatureinfluss auf den Motorbetrieb bei unterschiedlicher Last	69
Abb. 44: Darstellung der Einflusstärke der Betriebsparameter auf die Motorbetriebskenngrößen	70
Abb. 45: Einfluss der Ladelufttemperatur auf Wirkungsgrad und Emissionen bei $n=2000\text{min}^{-1}$ und $p_{me}=2\text{bar}$ [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 $n=2000\text{min}^{-1}$ und $\Lambda=1$	80
Abb. 55: Einfluss der Ladelufttemperatur auf Druck-, Brennverlauf und Temperatur in der unverbrannten Zone bei $n=2000\text{min}^{-1}$ und $\Lambda=1$	81
Abb. 56: Einfluss der Ladelufttemperatur auf Wirkungsgrad entlang der Klopf-, Druck- und Abgastemperaturgrenze bei $n=3500\text{min}^{-1}$ und $p_{mi}=20\text{bar}$ [57]	82
Abb. 57: Einfluss der Ladelufttemperatur entlang der Druck- und Abgastemperaturgrenze bei $n=4500\text{min}^{-1}$ und $p_{mi}=16\text{bar}$ [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: Mögliche Steigerung der über den Drehzahlbereich gemittelten Last durch Ladeluftkühlung im $\Lambda=1$ -Betrieb	89
Abb. 63: Einfluss der Ladelufttemperatur auf p_{mi} , p_{me} , p_{zmax} und P_e	91

Abb. 64: Abgastemperatur, Lambda, MFB50 und Restgasgehalt an der Vollast in Abhängigkeit von der Ladelufttemperatur	92
Abb. 65: Einfluss der Ladelufttemperatur auf die durchschnittliche Last bei variablem Lambda und zulässigem max. Zylinderdruck von $p_{Zmax}=80\text{bar}$	92
Abb. 66: Einfluss der Ladelufttemperatur auf Wirkungsgrad, Abgastemperatur vor Turbine und wichtige Motorbetriebsgrößen bei Vollast ($T_{nDK}=80^{\circ}\text{C}$)	94
Abb. 67: Restgasanteil in Abhängigkeit von Drehzahl und T_{nDK} bei Vollast ($T_{nDK}=80^{\circ}\text{C}$)	94
Abb. 68: Einfluss der Ladelufttemperatur auf Wirkungsgrad, Abgastemperatur vor Turbine und wichtige Motorbetriebsgrößen bei Vollast ($T_{nDK}=60^{\circ}\text{C}$)	95
Abb. 69: Restgasanteil in Abhängigkeit von Drehzahl und T_{nDK} bei Vollast ($T_{nDK}=60^{\circ}\text{C}$)	96
Abb. 70: Einfluss der Ladelufttemperatur auf den durchschnittlichen effektiven Wirkungsgrad bei den Vollastlinien $T_{nDK}=60^{\circ}$ 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 $n=3500\text{min}^{-1}$	98
Abb. 72: Einfluss der Ladelufttemperatur auf die Verschiebung der Klopfgrenze und erzielbare Leistung bzw. Last für unterschiedliche p_{Zmax} -Werte bei $n=4500\text{min}^{-1}$	99
Abb. 73: Einfluss der Ladelufttemperatur auf die Leistungsdichte und erzielbare Leistung bzw. Last für unterschiedliche p_{Zmax} -Werte bei $n=5500\text{min}^{-1}$	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 $T_{nDK}=0^{\circ}\text{C}$ 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 $T_{nDK}=60^{\circ}\text{C}$ auf 10°C	114
Abb. 84: Erhöhung des Low-End Torque, der Vollast 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 $n=2000\text{min}^{-1}$ und $p_{mi}=6\text{bar}$	128
Abb. 89: Vorhersagefähigkeit der untersuchten Modelle für den Zündverzug bei Kalibrierung auf den Betriebspunkt $n=2000\text{min}^{-1}$ und $p_{mi}=6\text{bar}$	129
Abb. 90: Vorhersagefähigkeit der untersuchten Modelle für Verbrennungsschwerpunkt, Brenndauer, maximaler Zylinderdruck und Abgastemperatur vor Turbine bei Kalibrierung auf den Betriebspunkt $n=3000\text{min}^{-1}$ und $p_{mi}=20\text{bar}$	130
Abb. 91: Vorhersagefähigkeit der untersuchten Modelle für den Zündverzug bei Kalibrierung auf den Betriebspunkt $n=3000\text{min}^{-1}$ und $p_{mi}=20\text{bar}$	130
Abb. 92: Sensitivität des Einflussfaktors für die Brenndauer auf Zündzeitpunkt und Last bei den empirischen Modellen <i>Csallner, Witt</i> und <i>Hoppe für beide Kalibrationspunkte</i>	131
Abb. 93: Sensitivität des Einflussfaktors für den Zündverzug auf Zündzeitpunkt und Last bei den empirischen Modellen <i>Csallner, Witt</i> und <i>Hoppe für beide Kalibrationspunkte</i>	132
Abb. 94: Vergleich der Voraussagequalität zwischen Vorgabe von Zündzeitpunkt und Verbrennungsschwerpunkt bei Kalibrierung auf $n=2000\text{min}^{-1}$ und $p_{mi}=6\text{bar}$	134
Abb. 95: Vergleich der Voraussagequalität zwischen Vorgabe von Zündzeitpunkt und Verbrennungsschwerpunkt bei Kalibrierung auf $n=3000\text{min}^{-1}$ und $p_{mi}=20\text{bar}$	135
Abb. 96: Vergleich der Vorhersagefähigkeit zwischen phänomenologischer Modelle bei 1-Punkt- ($n=2000\text{min}^{-1}$ und $p_{mi}=6\text{bar}$), 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
A	Fläche	cm^2
A_f	Flammenfrontfläche	cm^2
A_l	Flammenfrontfläche bei laminarer Verbrennung	cm^2
A_t	Flammenfrontfläche bei turbulenter Verbrennung	cm^2
a	Koeffizient der Wiebe-Funktion	–
b_e	spezifischer Kraftstoffverbrauch	g/kWh
COV_{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
h_Z	spezifische Enthalpie des Leckstroms	J/kg
l_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
\dot{m}	Massenstrom	g/s
\dot{m}_e	In die Flammenfront eingebrachter Massenstrom	g/s
m_e	der Verbrennung zugeführte Masse des Arbeitsgases	g
m_l	Luftmassenstrom	kg/h
\dot{m}_v	Massenumsatzrate	g/s
\dot{m}_v	Verdichtermassenstrom	kg/s
$\dot{m}_{v,0}$	Korrigierter Verdichtermassenstrom	kg/s
m_v	in Wärme umgesetzte Masse des Verbrennungsgases	g
n	Drehzahl	min^{-1}
p	Druck	bar
P_e	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

$P_{S_{\max}}$	Zulässiger maximaler Scheitelwert der Druckamplitude	bar
$p_{Z_{\max}}$	Maximaler Zylinderdruck	bar
Q_B	zugeführte Verbrennungsenergie je Arbeitsspiel	J
$Q_{B,ges}$	gesamte zugeführte Wärme des Wiebe-Brennverlaufs	J
Q_H	gesamte zugeführte Wärme je Arbeitsspiel	J
Q_W	Wandwärme je Arbeitsspiel	J
$s_{l,0}$	laminare Flammengeschwindigkeit im Referenzzustand	cm/s
s_l	laminare Brenngeschwindigkeit	cm/s
s_t	turbulente Brenngeschwindigkeit	cm/s
T	Temperatur	K
T_{AbgvT}	Abgastemperatur an der Messstelle am Turbineneintritt	°C
T_{Kolben}	Oberflächentemperatur des Kolbenbodens	K
$T_{Laufbuchse}$	Oberflächentemperatur der Laufbuchse	K
T_{Luft}	Ansauglufttemperatur	K
T_{nDK}	Lufttemperatur an der Messstelle nach Drosselklappe	°C
T_G	Temperatur des Arbeitsgases	K
T_U	Temperatur im unverbrannten Gemisch	K
$T_{Um,g}$	Umgebungstemperatur	°C
T_W	Temperatur der Zylinderwand	K
$T_{Z_{\max}}$	maximale Temperatur in der verbrannten Zone des Arbeitsgases	K
$T_{Zylinderkopf}$	Oberflächentemperatur des Zylinderkopfs	K
U	innere Energie	J
\bar{u}	turbulente Schwankungsgeschwindigkeit	cm/s
V	Volumen	cm ³
V_C	Kompressionsvolumen	cm ³
V_H	Hubvolumen des Motors	cm ³
V_h	Hubvolumen des Zylinders	cm ³
V_{Miller}	Hubvolumen bei Anwendung des Millerverfahrens	cm ³
X_{RG}	Massebezogener Restgasanteil des Arbeitsgases	%

Griechische Buchstaben

Symbol	Bedeutung	Einheit
α	allgemeiner Parameter	–
α	Wärmeübergangskoeffizient	kJ/K cm ²
β	allgemeiner Parameter	–
Δ	Differenz	–
ε	Verdichtungsverhältnis	–
ε_{dyn}	dynamisches Verdichtungsverhältnis	–
ε_{geom}	geometrisches Verdichtungsverhältnis	–
ε_{max}	Maximales Verdichtungsverhältnis	–
ε_{Miller}	Verdichtungsverhältnis bei Anwendung des Millerverfahrens	–
η_e	effektiver Wirkungsgrad	%
η_i	indizierter Wirkungsgrad	%
κ	Isentropenexponent	–
λ	Luftverhältnis	–
λ_a	Luftaufwand	–
ρ_u	Dichte des unverbrannten Gemisches	kg/m ³
τ_v	charakteristische Verbrennungszeit	s
φ	Kurbelwinkel	°KW
$\varphi_{2\%}$	Lage des 2%-Umsatzpunkts	°KW
$\varphi_{90\%}$	Lage des 90%-Umsatzpunkts	°KW
$\varphi_{95\%}$	Lage des 95%-Umsatzpunkts	°KW
$\varphi_{98\%}$	Lage des 98%-Umsatzpunkts	°KW
$\varphi_{99\%}$	Lage des 99%-Umsatzpunkts	°KW
$\varphi_{2-5\%}$	Brenndauer zwischen 2%- und 5%-Umsatzpunkt	°KW
$\varphi_{5-10\%}$	Brenndauer zwischen 5%- und 10%-Umsatzpunkt	°KW
$\varphi_{10-50\%}$	Brenndauer zwischen 10%- und 50%-Umsatzpunkt	°KW
$\varphi_{10-90\%}$	Brenndauer zwischen 10%- und 90%-Umsatzpunkt	°KW
φ_{BB}	Kurbelwinkel des Brennbeginns	°KW
φ_{BD}	Gesamtbrenndauer des Wiebe-Brennverlaufs	°KW

Abkürzungen und Indizes

Abkürzung Bedeutung

0	Referenz
ASP	Arbeitsspiel
ATL	Abgasturbolader
BD	burn duration (Brenndauer)
CFD	Computational Fluid Dynamics (Numerische Strömungsmechanik)
CO	Kohlenstoffmonoxid
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
COP	coefficient of performance (Leistungszahl)
E5	Ethanol-Kraftstoff mit 5% Ethanolanteil
E10	Ethanol-Kraftstoff mit 10% Ethanolanteil
E85	Ethanol-Kraftstoff mit 85% Ethanolanteil
EU	Europäische Union
FF	Flammenfront
FSO	Full Scale Output (Maximalwert)
HC	Unverbrannte Kohlenwasserstoffe
HVA	Heizverlaufsanalyse
KD	Kondensator
KW	Kurbelwinkel
LDW	Ladungswechsel
LLK	Ladeluftkühler
MFB50	Verbrennungsschwerpunkt
MOZ	Motor-Oktanzahl
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
NO _x	Stickoxide
OEM	Original Equipment Manufacturer (Erstausrüster)
OFAT	One factor at a time
O/V	Oberflächen-Volumen-Verhältnis
PS	Scheitelwert der Druckamplitude
ref	Referenz
ROZ	Research-Oktanzahl
TDA	Thermodynamische Druckverlaufsanalyse
TUB	Technische Universität Berlin
VD	Verdampfer
VKM	Verbrennungskraftmaschine
ZOT	Zünd-oberer Totpunkt
ZZP	Zündzeitpunkt