

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	ix
Abstract	xi
1 Einleitung und Zielsetzung	1
2 Grundlagen und wissenschaftlicher Kenntnisstand	5
2.1 Abgasturboaufladung der Verbrennungskraftmaschine	5
2.2 Thermodynamische Grundlagen der Abgasturboaufladung	7
2.3 Betriebskenngrößen und Kennfelder der Verdichter- und Turbinenstufe	11
2.4 Grundlagen der Wärmeübertragungsmechanismen	13
2.4.1 Wärmeleitung	13
2.4.2 Wärmestrahlung	14
2.4.3 Konvektion	14
2.5 Wärmeübertragung im Abgasturbolader	15
2.5.1 Mechanismen der Wärmeübertragung und die Einflussparameter	16
2.5.2 Einfluss diabater Effekte auf die ATL-Wirkungsgrade und deren Notation	17
2.5.3 Methoden zur Bestimmung des isentrop adiabaten Verdichterwirkungsgrades	20
2.5.4 Modellierungsansätze der ATL-Wärmetransfermodellierung im Kontext der Motorprozesssimulation	21
2.6 Konventionelle und erweiterte ATL-Kennfeldmessung am Heißgasprüfstand . . .	23
2.6.1 Konventionelle Messung am Heißgasprüfstand	23
2.6.2 Umgang mit der ATL-Reibleistung	24
2.6.3 Methoden zur Erweiterung der Turbinencharakteristik	25
3 Experimentelle Untersuchungsmethoden	27
3.1 Untersuchungen am Motorenprüfstand	27
3.1.1 Einzylinderaggregat	27
3.1.2 Vollmotoraggregat	28
3.1.3 Messprogramm am Einzylindermotor	29
3.1.4 Messprogramm am Vollmotor	29
3.1.5 Beschreibung und Instrumentierung der ATL-Hardware	31
3.2 Konventionelles und erweitertes Messprogramm am Heißgasprüfstand	32
4 Experimentelle Ergebnisse	33
4.1 Ergebnisse des erweiterten Messprogramms am Heißgasprüfstand	33
4.1.1 Variation der Turbineneintrittstemperatur bei konstanter korrigierter Verdichterdrehzahl	33
4.1.2 Variation der Turbineneintrittstemperatur bei konstanter reduzierter Turbinendrehzahl	35
4.2 Messergebnisse der thermischen Analyse des Abgasturboladers am Motorprüfstand	37
4.2.1 Stationäre Analyse	37

4.2.2	Transiente Analyse	42
5	Numerische Methoden in der Motorprozesssimulation	45
5.1	Ansätze zur numerischen Simulation der dieselmotorischen Verbrennung	45
5.2	Grundlagen und Methodik der datenbasierten Modellierung	48
5.3	Ansatz zur datenbasierten Simulation der dieselmotorischen Verbrennung und Emissionen	50
5.3.1	Versuchsplanung	51
5.3.2	Messdatenaufbereitung der Zylinderdrucksignale	55
5.3.3	Methodik der Nachbildung des Zylinderdruckes im Hochdruckprozess	56
5.3.4	Aufbau des datenbasierten Verbrennungsmodells	58
5.3.5	Validierung der Gauß-Prozess-Modellierung	58
5.3.6	Algorithmus zur Replikation des Zylinderdruckverlaufs	61
5.4	Eindimensionale Strömungssimulation	62
6	Erweiterte Modellierung und numerische Ergebnisse der Motorprozesssimulation	65
6.1	Validierung des datenbasierten Verbrennungs- und Emissionsmodells	65
6.1.1	Stationärer Motorbetrieb	65
6.1.2	Transienter Motorbetrieb	69
6.1.3	Fazit der stationären und transienten Verbrennungs- und Emissionsmodellierung	70
6.2	Methode zur Berechnung adiabater Wirkungsgradkennfelder der Turbomaschine	70
6.3	Extrapolationsmethodik zur Erweiterung der Turbinencharakteristik	78
6.4	ATL-Wärmeübergangsmodell im Motorbetrieb	82
6.4.1	Aufbau des ATL-Wärmestrommodells	82
6.4.2	Berechnung der Wärmeübergänge	83
6.4.3	Abstimmung des Wärmeübergangsmodells an der motorischen Volllast	87
6.5	Validierung und Simulationsergebnisse der erweiterten Modellierungsmethodik des Abgasturboladers	92
6.5.1	Validierung stationärer Motorbetrieb	93
6.5.2	Validierung transienter Motorbetrieb	94
6.5.3	Fazit der Validierung der erweiterten Modellierungsmethodik	96
7	Zusammenfassung	97
	Anhang	101
A.1	Herleitung des kombinierten Turbinenwirkungsgrades	101
A.2	Kenngrößen der Versuchsmotoren und Messstellenplan des Vollmotors	101
A.2.1	Einzyylinderaggregat	101
A.2.2	Vollmotor	102
A.3	Korrelation zwischen Schwärzungszahl und Rußkonzentration im Abgas	102
A.4	Stationäre Messdatenbasis des Vollmotors	103
A.5	Kenndaten der ATL-Hardware	104
A.6	Abgasmesstechnik am Motorprüfstand	104
A.7	Berechnung der AGR-Rate am Motorprüfstand	105
A.8	Feuchtekorrektur der gemessenen Stickoxidemissionen	105
A.9	Einfluss der VTG-Position auf das diabate Verhalten des Verdichters	106
A.10	Einfluss höherer Motorlast auf die Temperaturverteilung des Abgasturboladers mit und ohne Strahlungsschild zwischen Abgaskrümmen und Verdichter	106
A.11	Aufteilung des Zylinderdruckverlaufs in Hochdruck- und Ladungswechselphase	107

A.12 Ergänzungen zur Validierung der Gauß–Prozess–Modellierung	108
A.13 Gegenüberstellung des indizierten und replizierten Hochdruck–Arbeitsprozesses	109
A.14 Sensitivitätsanalyse der datenbasierten Emissionsmodellierung	111
A.14.1 Variation der Abgasrückführrate	111
A.14.2 Variation des Ansteuerbeginns der Haupteinspritzung	112
A.14.3 Variation des Ladeluftdruckes	112
A.14.4 Variation des Raildruckes	113
A.14.5 Variation der Ladelufttemperatur	114
A.15 Herleitung der theoretischen Leistungszahl des Verdichters	115
A.16 Iterative Berechnung der Luftdichte am Austritt des Verdichterlaufrades	117
A.17 Empirische Korrelation der ATL–Reibleistung	120
A.18 Berechnung des Windage Pressure Ratio	121
A.19 Ergänzungen zur Extrapolation der Gesamtkennfelder der Turbine	122
A.20 Berechnungsmethodik der Voluten–Ersatzmodelle und Validierung der Volutenab- bildung der Turbine	122
A.21 Modellierung der Thermoelemente in der Motorprozesssimulation	123
A.22 Erweiterte Messung der Turbinenaustrittstemperatur am Motorprüfstand	125
A.23 Ergänzungen zur Validierung der Modellstufen der Motorprozesssimulation	127
Nomenklatur	131
Abbildungsverzeichnis	139
Tabellenverzeichnis	143
Literaturverzeichnis	145
Veröffentlichungen	161
Journalartikel	161
Konferenzbeiträge	161