

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	XV
Tabellenverzeichnis	XXI
Symbolverzeichnis	XXIII
1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung und Motivation	1
1.2 Allgemeiner Stand von Forschung und Technik	4
1.3 Ziele der Arbeit	5
1.4 Vorgehensweise und Gliederung der Arbeit	6
2 Grundlagen	9
2.1 Abgasgesetzgebung und Kundenanforderungen	9
2.2 Aspekte der Leistungs- und Effizienzsteigerung von Motoren	10
2.3 Betriebsverhalten und Herausforderungen bei Abgasturboaufladung	13
2.3.1 Quasi-Stationärer und transienter Betrieb	13
2.3.2 Positives Spülgefälle und spülender Ladungswechsel	14
2.4 Komponenten von Abgasturboladern und Schnittstellen zum Motor	15
2.5 Integrale und reduzierte Kenngrößen	16
2.5.1 Verdichterkenngrößen	16
2.5.2 Turbinenkenngrößen	17
2.6 Weitere Kennzahlen und Definitionen	19
2.7 Genauigkeit und Vergleichbarkeit von Daten aus Simulation und Experiment	22
3 Experimentelle Untersuchungen unter stationären Randbedingungen	27
3.1 Prüfstand und verwendete Messtechnik	27
3.1.1 Heißgasprüfstand und Messaufbau	27
3.1.2 Thermografie	29
3.2 Stand der Technik bei der thermodynamischen Vermessung von Abgasturboladern .	31
3.3 Sensitivitätsuntersuchungen zu Verdichterwärmeträumen	35
3.3.1 Variation des Isolationszustands	35
3.3.2 Variation der Verdichtereintrittstemperatur	39
3.3.3 Variation der Turbineneintrittstemperatur ohne Wasserkühlung	44
3.3.4 Variation der Turbineneintrittstemperatur mit Wasserkühlung	47
3.3.5 Variation Wasserkühlungstemperatur	49
3.4 Wärmestrommodellierung	52
3.4.1 Modellierungsansatz	52
3.4.2 Kalibration der Wärmestrommodellierung durch Parameter- und Koeffizientenvariation	54
3.4.3 Berechnete Wärmeströme und erreichte Modellierungsgüte	60
3.4.4 Exkurs: Einfluss von Wärmeströmen auf den Verdichtungsprozess	62

3.5	Zusammenfassung der bisherigen Erkenntnisse	64
3.6	Erweiterte Turbinenkennfeldvermessung durch Variation der Turbineneintrittstemperatur	64
4	Numerische Untersuchungen unter stationären Randbedingungen	71
4.1	Berechnungsgebiet und Geometrievereinfachungen	71
4.2	Bezugssysteme und Randbedingungen im numerischen Modell	73
4.3	Turbulenzmodellierung und Wandbehandlung	74
4.4	Untersuchte Betriebspunkte	75
4.5	Bestimmung der Turbinenrotorleistung	76
4.5.1	Berechnungsmethoden	76
4.5.1.1	Rotorleistungsbestimmung aus dem Enthalpiegefälle	77
4.5.1.2	Rotorleistungsbestimmung aus dem Rotordrehmoment	77
4.5.1.3	Rotorleistungsbestimmung mittels Eulergleichung	78
4.5.2	Sensitivitätsstudien unter adiabaten und diabaten Bedingungen	79
4.5.2.1	Wirkungsgradauswertung unter adiabaten Bedingungen	79
4.5.2.2	Wirkungsgradauswertung unter diabaten Bedingungen	80
4.5.2.3	Angewandte Berechnungsweise für die Bestimmung des Turbinenstufenwirkungsgrads aus der CFD	83
4.6	Einfluss des Berechnungsgitters auf die CFD-Ergebnisse	83
4.6.1	Angewandtes Verfahren zur Beurteilung des Gittereinflusses	83
4.6.2	Kennzahlen der GCI Methode	84
4.6.3	Untersuchte Gitterfeinheiten und Diskussion der Ergebnisse der GCI Methode	86
4.7	Vergleich der CFD-Ergebnisse mit experimentellen Werten	89
4.7.1	Wirkungsgrad der Turbinenstufe	89
4.7.2	Durchflussparameter der Turbinenstufe	93
5	Erweiterte Messverfahren für die Turbinenkennfeldvermessung	95
5.1	Semi-instationäre Methode zur erweiterten Turbinenkennfeldvermessung	95
5.1.1	High Inertia Rotor (HIR) - Konzept	95
5.1.2	Auslegungssaspekte, Eigenschaften und Limitierungen der HIR Methode	97
5.1.3	HIR Auswertemethodik	99
5.1.4	HIR-Messergebnisse	100
5.1.5	Notwendige modellbasierte Korrekturen	102
5.1.6	Diskussion der HIR-Beschleunigungsphase	105
5.1.7	Diskussion der HIR-Verzögerungsphase	107
5.2	Ergänzende Untersuchungen zur Beschreibung der Turbinenstufencharakteristik	110
5.2.1	Ergebnisse der Durchbrennmessungen	110
5.2.2	Ergebnisse der Durchflussmessungen bei Rotorstillstand	112
5.2.3	Inverser Turbinenbetrieb	113
5.3	Zusammenfassung der Ergebnisse und Erkenntnisse	114

6 Messtechnik zur kontaktlosen Erfassung des Turboladerwellendrehmoments	117
6.1 Motivation	117
6.2 Stand der Technik zur Drehmomentbestimmung in Turbomaschinen	118
6.2.1 Konzepte und verfügbare Systeme für die Drehmomentmessung unter stationären Bedingungen	118
6.2.2 Konzepte und verfügbare Systeme für die Drehmomentmessung unter pulsierenden Bedingungen	119
6.3 Einführung des kontaktlosen Messverfahrens	120
6.3.1 Anforderungen und Ziele für die Entwicklung der Drehmomentmesstechnik	120
6.3.2 Messprinzip	121
6.3.3 Konstruktion, Funktion und Integration in den Abgasturbolader	122
6.4 Eigenschaften des entwickelten Messsystems	124
6.4.1 Drehungleichförmigkeit des Signals	124
6.4.2 Kalibration des Systems und Nulllinienfindung	126
6.4.3 Sensitivitätsstudie zur Auswirkung von Rotorbewegungen	127
6.4.4 Beobachtete Wiederholgenauigkeit am Heißgasprüfstand	129
6.4.5 Rotoreigenfrequenzen und Messung unter pulsierender Beaufschlagung	130
7 Turboladerwellendrehmomentmessung am Heißgasprüfstand	133
7.1 Versuchsaufbau, Auswertung und untersuchte Betriebspunkte	133
7.2 Diskussion der Messergebnisse und Vergleich mit CFD-Ergebnissen	134
7.2.1 Linien konstanter Drehzahl für $T_3 = 600^\circ\text{C}$	134
7.2.2 Kombination der Messdaten für verschiedene Turbineneintrittstemperaturen	137
8 Motorzyklusaufgelöste Turboladerwellendrehmomentmessung	139
8.1 Versuchsaufbau und untersuchte Betriebspunkte	139
8.2 Analyse der Interaktion von Motor und Turbolader	144
8.2.1 Energetische Mittelwertbildung zum Vergleich von Messdaten unter stationären sowie pulsierenden Randbedingungen	144
8.2.2 Vergleich von zyklusaufgelösten und stationären Messdaten	145
8.2.3 Trägheitskorrektur der zyklusaufgelösten Messdaten	147
8.2.4 Phasenkorrektur der zyklusaufgelösten Messdaten	151
8.3 Zusammenfassung der zyklusaufgelösten Untersuchungen	155
9 Zusammenfassung und Ausblick	157
Literaturverzeichnis	161
Anhang	171
A.1 Reibleistungsmodellierung	171