

# 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	Verdichterkenngößen	16
2.5.2	Turbinenkenngößen	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 Verdichterwärmeströmen	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
<b>4</b>	<b>Numerische Untersuchungen unter stationären Randbedingungen</b>	<b>71</b>
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
<b>5</b>	<b>Erweiterte Messverfahren für die Turbinenkennfeldvermessung</b>	<b>95</b>
5.1	Semi-Instationäre Methode zur erweiterten Turbinenkennfeldvermessung . . . . .	95
5.1.1	High Inertia Rotor (HIR) - Konzept . . . . .	95
5.1.2	Auslegungsaspekte, 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

<b>6 Messtechnik zur kontaktlosen Erfassung des Turboladerwellendrehmoments</b>	<b>117</b>
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
<b>7 Turboladerwellendrehmomentmessung am Heißgasprüfstand</b>	<b>133</b>
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 $T_3 = 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ . . . . .	134
7.2.2 Kombination der Messdaten für verschiedene Turbineneintrittstemperaturen . . . . .	137
<b>8 Motorzyklusaufgelöste Turboladerwellendrehmomentmessung</b>	<b>139</b>
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
<b>9 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>157</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>161</b>
<b>Anhang</b>	<b>171</b>
A.1 Reibleistungsmodellierung . . . . .	171