

# Inhaltsverzeichnis

|                                                                                                    |              |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| <b>Abbildungsverzeichnis</b>                                                                       | <b>XV</b>    |
| <b>Tabellenverzeichnis</b>                                                                         | <b>XXI</b>   |
| <b>Symbolverzeichnis</b>                                                                           | <b>XXIII</b> |
| <b>1 Einleitung</b>                                                                                | <b>1</b>     |
| 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            |
| <b>2 Grundlagen</b>                                                                                | <b>9</b>     |
| 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 transients 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           |
| <b>3 Experimentelle Untersuchungen unter stationären Randbedingungen</b>                           | <b>27</b>    |
| 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<br>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<br>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<br>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</b> | <b>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</b> | <b>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 $T_3 = 600\text{ °C}$ . . . . .                                                            | 134        |
| 7.2.2    | Kombination der Messdaten für verschiedene Turbineneintrittstemperaturen . . . . .                                        | 137        |
| <b>8</b> | <b>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</b> | <b>Zusammenfassung und Ausblick</b>                                                                                       | <b>157</b> |
|          | <b>Literaturverzeichnis</b>                                                                                               | <b>161</b> |
|          | <b>Anhang</b>                                                                                                             | <b>171</b> |
| A.1      | Reibleistungsmodellierung . . . . .                                                                                       | 171        |

Stationäres und instationäres Betriebsverhalten von  
Abgasturboladern

Lüddecke, B.

2016, XXVII, 173 S. 89 Abb., 43 Abb. in Farbe., Softcover

ISBN: 978-3-658-12780-0