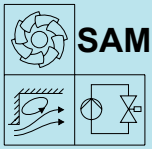
Technische Universität
Kaiserslautern

Lehrstuhl für
Strömungsmechanik und
Strömungsmaschinen - SAM



Hrsg. Prof. Dr.-Ing. M. Böhle

SAM - Fortschrittsberichte

Band 14

Mathias Kosch

Numerische Optimierung einer Turbinenstufe für Abgasturbolader unter Berücksichtigung pulsierender Abgasströmung

Numerische Optimierung einer Turbinenstufe für Abgasturbolader unter Berücksichtigung pulsierender Abgasströmung

Vom Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik

der Technischen Universität Kaiserslautern

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte

Dissertation

von

Herrn

Dipl.-Ing. Mathias Kosch

geb. in Quedlinburg

Tag der mündlichen Prüfung:	07.05.2018
Dekan:	Prof. Dr.-Ing. Jörg Seewig
Vorsitzender:	Prof. Dr.-Ing. Michael Günthner
Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Martin Böhle
	Prof. Dr.-Ing. Roland Baar

SAM-Fortschrittsberichte

Band 14

Mathias Kosch

Numerische Optimierung einer Turbinenstufe für Abgasturbolader unter Berücksichtigung pulsierender Abgasströmung

D 386 (Diss. Technische Universität Kaiserslautern)

Shaker Verlag
Aachen 2018

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.

Zugl.: Kaiserslautern, TU, Diss., 2018

Copyright Shaker Verlag 2018
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6172-7
ISSN 2191-8031

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort und Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand in der Vorentwicklung der BorgWarner Turbo Systems Engineering GmbH.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. M. Böhle und Herrn Dr.-Ing. H. Roclawski möchte ich mich für die Betreuung meiner Arbeit in den vergangenen Jahren bedanken. Außerdem danken möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. R. Baar für die Übernahme des Koreferats und den Mitarbeitern des SAM Lehrstuhls der Technischen Universität Kaiserslautern für die experimentellen Untersuchungen am Pulsationsprüfstand.

Zudem möchte ich allen Kollegen der Vorentwicklung und der anderen Abteilungen der BorgWarner Turbo Systems Engineering GmbH danken, die mich bei dieser Arbeit unterstützt haben und auch für die immer gute Arbeitsatmosphäre.

Besonders danken möchte ich Herrn Dr.-Ing. S. Münz für all seine Bemühungen vor - und während meiner Promotion sowie Herrn A. Coksen und Herrn Dr.-Ing. F. Kruse für ihre Hilfe bei vielen Problemstellungen.

Abschließend danke ich auch meinen Eltern und meinem Bruder für die vielfältige Unterstützung beim Erstellen dieser Arbeit.

Mainz, im August 2018 Mathias Kosch

Kurzfassung/ Abstract

Kurzfassung

Diese Arbeit ermöglicht umfangreiche Einblicke in die Betriebszustände der Turbinenstufe von Abgasturboladern unter pulsierender Gasströmung.
Aufbauend auf einer Literaturanalyse und der Vorstellung der Methodik für die genutzte Software, erfolgt die Herleitung der Randbedingungen der numerischen Simulationen. Auf Basis von 3D CFD - Studien werden wichtige Aspekte zu den Turbinenbetriebsbereichen und den, über der Gaspulsation veränderlichen, Charakteristika der Strömung durch die Turbinenstufe gezeigt.

Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen wird dann eine Optimierung der Turbinenstufe mit Hilfe numerischer Simulationssoftware vorgenommen. Erstmals wird eine Methodik für die Identifikation von den unter Abgaspulsation relevanten Turbinenbetriebsbereichen vorgestellt, die eine gezielte Steigerung des effektiven Turbinenwirkungsgrades ermöglicht. Auf Basis der erarbeiteten Methodik, wird eine vorhandene Referenzturbinenstufe für den Betrieb unter pulsierender Abgasströmung optimiert.
Ein neuartiger Pulsationsprüfstand wird genutzt, um das Optimierungsergebnis unter stationärer - und pulsierender Gasströmung experimentell nachzuweisen.

Abstract

This work allows for extensive insight in the specific operating conditions of a turbocharger turbine stage under pulsating flow. Based on a literature survey and describing the methodology of the software, the derivation of the boundary conditions of the numerical simulations is carried out. With 3D CFD studies important aspects, regarding the turbine operating range and the flow characteristics, which are fluctuating with the gas pulsation, are shown.
With the gained findings an optimization of the turbine stage is done, using numerical simulation software. For the first time a methodology to identify the relevant turbine operating range amidst exhaust gas pulsation is presented, that allows for an increase of the effective turbine efficiencies. Using the methodology, an existing reference turbine stage is optimized for operation under pulsating gas flow.
A novel pulsation test rig is used to prove the optimization result for stationary - and pulsating flow experimentally.

Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur XXXVIII

0 Vorbetrachtungen 1
0.1 Turboaufladung beim Ottomotor 1
0.2 Ziel der Promotionsschrift und Gliederung der Arbeit 6

1 Einleitung 10
1.1 Konventionen und Bezeichnungen 10
1.1.1 Auswerteebenen und geometrische Konventionen 10
1.1.2 Bezeichnungen 12
1.1.3 Nomenklatur von Turbinenstufen und Pulsationsdatensätzen 14
1.2 Wichtige Kenngrößen 15
1.2.1 Thermodynamische Kenngrößen 15
1.2.2 Strömungsmechanische Kennzahlen 18
1.2.3 Instationäre Kenngrößen und Mittelwertbildung 22
1.3 Kennfelddarstellungen für Abgasturboladerturbinen 23
1.4 Besonderheiten der Abgasströmung 27
1.5 Literaturübersicht zur pulsierend beaufschlagten Turbinenstufe 28
1.5.1 Quellenübersicht 28
1.5.2 Pulsationsprüfstand des Imperial College . . 30
1.5.3 Instationäres Verhalten des Impellers 35
1.5.4 Relativströmungswinkel unter Pulsation . . . 36

2 Methodik 37
2.1 Turbomatching als Basis der Turbinenauswahl 37

2.2 Numerische - und CAE Software 39
2.3 Strömungstheoretische - und numerische Grundlagen 40
2.3.1 3D CFD Simulation mit CFX 40
2.3.2 1D gasdynamische Simulation mit GT - Power 41
2.4 Methodik für die 3D CFD 42
2.4.1 Rechengebiet und Rechennetz 42
2.4.2 Vorbereitung der Strömungsberechnung (Pre) 43
2.4.3 Strömungsberechnung (Solve) + Auswertung (Post) 46
2.5 Methodik für die gasdynamische Analyse mit GT-Power 46
2.5.1 Allgemeines 46
2.5.2 Strömungslösung 47
2.5.3 Modellierung des Abgasturboladers in GT-Power 48

3 1D gasdynamische Analysen 49
3.1 1D gasdynamische Analyse zur Pulsationsdatenerzeugung 49
3.2 1D gasdynamisches Motormodell 50
3.2.1 Messdatenbasis 50
3.2.2 Detaillierungsgrad des Motormodells 51
3.2.3 Modell des Abgasturboladers 52
3.3 Datenaufzeichnung und Kenngrößenberechnung . . 53
3.4 Stationärer Motormodellabgleich 53
3.4.1 Vergleich der stationären Mittelwerte 53
3.4.2 Vergleich der instationären Druckverläufe am Turbineneintritt 56
3.4.3 Pulsationsdatensätze 62
3.5 Instationärer Motormodellabgleich 64
3.5.1 Hintergrund 64
3.5.2 Lastsprung am Motorprüfstand 67
3.5.3 Instationärer Abgleich des Motormodells . . . 67
3.6 Relevante Motorbetriebspunkte 70

3.7 Zusammenfassung gasdynamische Grundlagenanalysen 71

4 3D CFD Grundlagenanalysen 73
4.1 Allgemeines zur 3D CFD Grundlagenanalyse 73
4.2 Turbinenstufengeometrien für die Grundlagenanalysen 74
4.2.1 Volutenmodell 74
4.2.2 Kanalsegmentmodell 75
4.3 Rechennetze und spezifische 3D Simulationsmethodik 75
4.3.1 Rechennetze 75
4.3.2 Qualitätskriterien 76
4.3.3 Spezifische Simulationsmethodik 76
4.3.4 Datenauswertung 78
4.4 Netz - und Zeitschrittunabhängigkeitsstudie 78
4.4.1 Rechennetzdiskretisierung 78
4.4.2 Konvergenzverhalten 81
4.4.3 Auflösungsgrad der instationären Inputdaten 82
4.4.4 Frame Change Interface 83
4.4.5 Auswertungsmethodik 84
4.4.6 Ergebnisse der Sensitivitätsstudie 84
4.5 Stationäre Simulationsergebnisse 85
4.5.1 Vergleich CFD - Simulation - BK - Messung . 85
4.5.2 Hintergrund der Strömungsanalyse 90
4.5.3 Absolut - und Relativströmungswinkel 90
4.5.4 Machzahlverteilung in den Schaufelkanälen 95
4.5.5 Verlustprozesse 96
4.5.6 Exkurs - Wirbelsysteme im Laufrad 99
4.6 Instationäre Randbedingungen 99
4.6.1 Einleitende Betrachtungen 99
4.6.2 Veränderliche Randbedingungen 100
4.6.3 Simulationszeit und Simulationszeitschrittweite 101
4.6.4 Hintergrund der Betriebspunktwahl 102
4.6.5 Auswertung 103

4.6.6 Inputdaten 103
4.7 Instationäre Simulationsergebnisse 105
4.7.1 Verlauf wichtiger Turbinenkenngrößen über der Pulsation 105
4.7.2 Aerodynamische Analyse 112
4.8 Zusammenfassung Kapitel 4 121

5 Pulsationsanalyse und Wellenarbeitsanalyse 122
5.1 Einleitende Betrachtungen 122
5.2 Pulsationsanalysemodell in GT-Power 123
5.2.1 Anforderungen an ein gasdynamisches Pulsationsersatzmodell 123
5.2.2 Aufbau des gasdynamischen Ersatzmodells zur Pulsationsanalyse 124
5.2.3 Besonderheiten des bypassierten Turbinenbetriebs 127
5.2.4 Regelung 129
5.3 Inputdaten für das gasdynamische Modell 130
5.3.1 Hintergrund 130
5.3.2 Vergleich der Inputdaten/ Randbedingungen 131
5.4 Vergleich der zeitdiskreten Simulationsergebnisse . 133
5.4.1 Einleitende Betrachtungen 133
5.4.2 Kalibrierung - und Konvergenz des gasdynamischen Modells 133
5.4.3 Unterschiede Impellerkennfeld zu Stufenkennfeld 134
5.4.4 Diskreter Vergleich wichtiger Turbinenkenngrößen 136
5.5 Vergleich der Mittelwerte der Simulationsergebnisse 140
5.6 Erweiterter Abgleich und Validierung des Analysemodells 143
5.6.1 Ergebnisse für die alternative Turbinenstufe 43 - B - 24 143
5.6.2 Referenzvergleich für eine alternative Turbinenstufe 43 - B - 24 145

5.6.3 Zusammenfassung 148
5.7 Relevante Turbinenbetriebsbereiche unter pulsierender Beaufschlagung 149
5.7.1 Einleitende Betrachtungen 149
5.7.2 Zielsetzung der Wellenarbeitsanalyse 149
5.7.3 Mindestinformationen für die Analyse 151
5.7.4 Einzelpunktanalyse/ Mehrpunkteanalyse . . 153
5.7.5 Äquivalenter Einzelabgaspuls bei Mehrzylindermotoren 154
5.7.6 Optimierungspunkte über eine Zielturbinenlaufzahl 158
5.7.7 Optimierungspunkte bei gleicher Turbinenwellenleistung 162
5.7.8 Optimierungspunkte für Puls A* über Turbinenstufe 43-A-27 170
5.7.9 Vergleichende Betrachtung für die isentrope Arbeit als Vergleichsgröße 175
5.7.10 Numerischer Berechnungsablauf für die Wellenarbeitsanalyse 177
5.8 Gesamtmethodik der virtuellen Turbinenstufenoptimierung 178
5.9 Zusammenfassung Kapitel 5 180

6 Ansätze zur Optimierung der Wellenarbeit unter motorischer Pulsation 181
6.1 Einleitende Betrachtungen 181
6.2 Einfluss der Turboladerkomponenten auf die Wellenleistung 181
6.2.1 Verdichterstufe 181
6.2.2 Lagerung 182
6.3 Ermittlung der Referenzturbinenstufe für die Optimierung 184
6.3.1 Geometrische Unterschiede der Turbinenstufen A und B 184
6.3.2 Thermodynamischer Vergleich 185
6.3.3 Massenträgheitsmomente 192

6.3.4 Festigkeitseigenschaften 193
6.3.5 Festlegung des Impellers B als Optimierungsbasis 193
6.4 Turbinenvolute und Reaktionsgrad 194
6.4.1 Turbinenvolute 194
6.4.2 Reaktionsgradstudie 196
6.5 Parameterstudie des Turbinenrades 198
6.5.1 Vorbetrachtungen 198
6.5.2 Optimierungsziel 200
6.5.3 Designparameter für die Optimierung 201
6.5.4 Desingablauf 202
6.5.5 CFD - Simulation für die erste Parametervariation 203
6.5.6 Ergebnisse der Parameterstudie 206
6.5.7 Zusammenfassung der ersten Parameterstudie 212
6.5.8 Kombination verschiedener Designparameter 212
6.5.9 Designvergleich der Radvariante C6 zum Referenzradtyp B 215
6.6 Stationäre aerodynamische Analyse der optimierten Turbinenstufe 220
6.6.1 Einleitende Betrachtungen 220
6.6.2 Relativmachzahlen in den Schaufelkanälen . 220
6.6.3 Normierte spezifische Entropie in den Schaufelkanälen 223
6.6.4 Potential für den Durchsatzkennwert für 160 kW Motorleistung 224
6.7 Analyse der optimierten Stufe unter Abgaspulsation 231
6.7.1 Einleitende Betrachtungen 231
6.7.2 Aerodynamischer Vergleich der Turbinenstufen 43-B-21 und 43-C6-21 231
6.7.3 Vergleich der diskreten Wellenleistung unter Pulsation B 241
6.7.4 Vergleich der Zeitmittelwerte wichtiger Turbinenkenngrößen 243

6.7.5 Vergleich der Turbinenstufen mit gasdynamischem Turbinenmodell 243
6.8 Zusammenfassung Kapitel 6 244

7 Experimentelle Analysen 246
7.1 Einleitung 246
7.2 Brennkammerergebnisse 246
7.2.1 Standardvermessung 246
7.2.2 Closed-Loop Messung 249
7.3 Pulsationsprüfstand an der TU Kaiserslautern 251
7.4 Prüfstandsgrenzen 252
7.5 Stationärer Relativvergleich 254
7.6 Instationärer Relativvergleich 256
7.7 Zusammenfassung 264

8 Zusammenfassung/ Ausblick 265

Literaturverzeichnis 267

A Anhang 274
A.0 Anhang 0 274
A.1 Anhang I 275
A.2 Anhang II 282
A.3 Anhang III 284
A.4 Anhang IV 291
A.5 Anhang V 325
A.6 Anhang VI 354
A.7 Anhang VII 373