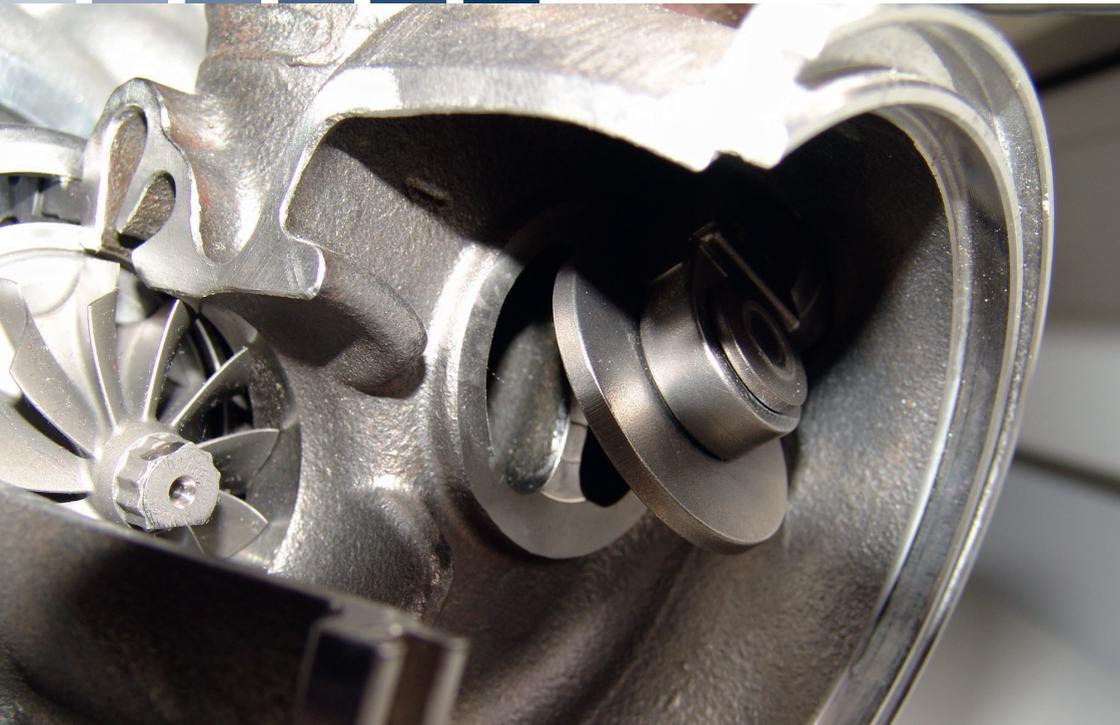


Untersuchungen zur Fluid-Struktur- Wechselwirkung mit Mehrkörperkontakten in Abgasturboladern

Strömungstechnik

Rupert Wildhofer



UNTERSUCHUNGEN ZUR
FLUID-STRUKTUR-WECHSELWIRKUNG MIT
MEHRKÖRPERKONTAKTEN IN
ABGASTURBOLADERN

Von der Fakultät Energie-, Verfahrens- und Biotechnik der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von

RUPERT MAXIMILIAN WILDHOFER

aus Bad Reichenhall

Hauptberichter: Prof. Tekn. Dr. Damian Vogt

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Eckart Laurien

Tag der mündlichen Prüfung: 1. April 2020

Institut für thermische Strömungsmaschinen
und Maschinenlaboratorium der Universität Stuttgart

Berichte aus der Strömungstechnik

Rupert Wildhofer

**Untersuchungen zur Fluid-Struktur-Wechselwirkung
mit Mehrkörperkontakten in Abgasturboladern**

D 93 (Diss. Universität Stuttgart)

Shaker Verlag
Düren 2020

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.: Stuttgart, Univ., Diss., 2020

Copyright Shaker Verlag 2020

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7373-7

ISSN 0945-2230

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand in der Abteilung „Thermodynamik und Emissionskonzept, Auflade- und Abgassystem Ottomotor“ bei der BMW Group in München.

Mein herzlicher Dank gilt an erster Stelle Herrn Professor Tekn. Dr. Damian Vogt für die hervorragende Betreuung der Arbeit sowie für zahlreiche fruchtbare Diskussionen, Hinweise und Anregungen, die entscheidend zum Gelingen beigetragen haben.

Herrn Professor Dr.-Ing. Eckart Laurien danke ich für das Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Korreferats. Bei Herrn Professor Dr. rer. nat. Dr. h. c. Siegfried Schmauder möchte ich mich für die Bereitschaft bedanken, den Vorsitz der Prüfung zu übernehmen.

Ich danke weiterhin Herrn Professor Dr.-Ing. Christian Schwarz und Herrn Dr.-Ing. Oliver Hausner, die mir die Möglichkeit zur Anfertigung dieser Arbeit gegeben haben.

Den Herren Dr.-Ing. Björn Hußmann, Dr.-Ing. Thomas Sailer und besonders Dr.-Ing. Wolfgang Brack danke ich herzlich für die fachliche Betreuung der Arbeit seitens BMW. Für das Korrekturlesen der Arbeit und wertvolle Diskussionen möchte ich mich darüber hinaus bei Herrn Benjamin Weber bedanken.

Für die engagierte Unterstützung bei der Durchführung der Versuche gilt mein besonderer Dank Herrn Frederic Heidinger sowie dem Team der Versuchshalle des Instituts für Thermische Strömungsmaschinen und Maschinenlaboratorium um Herrn Dr.-Ing. Markus Schatz.

Herrn Oliver Kriesche schulde ich großen Dank für die gewissenhafte Unterstützung bei den experimentellen Arbeiten, ebenso Frau Helen Schottenhamml für die Unterstützung bei den numerischen Untersuchungen. Ferner danke ich den Herren Dr.-Ing. Wolfgang Bauer, Dr.-Ing. Johannes

Einzinger und Henning Eickenbusch von der ANSYS Germany GmbH für fachliche Anregungen sowie ihre Unterstützung bei implementierungsspezifischen Fragen.

Widmen möchte ich die Arbeit meinen Eltern, denen mein allergrößter Dank für stete Unterstützung und Zuspruch gilt.

Kurzfassung

Abgasturbolader von Ottomotoren verfügen in vielen Fällen über ein Abblaseventil (*waste gate*) zur Ladedruckregelung. Dieses meist lose gelagerte Ventil unterliegt aufgrund hoher Abgastemperaturen sowie der Beaufschlagung mit hohen Druckpulsationen einer außerordentlichen Belastung, die sich in übermäßigem Verschleiß äußern kann.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird eine Methode entwickelt, die eine effiziente Simulation der schädlichen Aufschlagschwingungen (*impact oscillations*) ermöglicht. Für große Öffnungswinkel und kleines mechanisches Spiel kommt dabei eine Ein-Wege-Kopplung zum Einsatz. Demgegenüber kommt für die umgekehrten Bedingungen, bei welchen eine Bewegung des Ventils signifikante Änderungen des Strömungsquerschnitts bewirkt, eine korrigierte Ein-Wege-Kopplung auf Basis von aerodynamischen Einflusskoeffizienten zum Einsatz. Hierdurch kann bei massiv reduziertem Rechenaufwand eine dreidimensionale Zwei-Wege-Kopplung praktisch gleichwertig ersetzt werden. Die Validierung erfolgt experimentell bei kalter Strömung an generischen Ventilmodellen. Diese verfügen über eine unterschiedliche Anzahl an Bewegungsfreiheitsgraden, ferner können Drehzahl, Last und mechanisches Spiel variiert werden.

Experimentelle Untersuchungen unter realen Bedingungen werden an einem Vierzylindermotor durchgeführt, wobei besonders schädliche Betriebsbereiche identifiziert werden. Hieraus ermittelte Abhilfemaßnahmen werden simulativ genauer untersucht, wonach sich eine abschließende Empfehlung bezüglich einer Applikationsstrategie allerdings nur eingeschränkt abgeben lässt. Die größte Herausforderung liegt dabei in der korrekten Detektion des tatsächlich vorliegenden Verschleißes, wofür sowohl geeignete Messtechnik verbaut als auch ein entsprechendes Verschleißmodell in der Motorsteuerung hinterlegt werden müssen.

Abstract

Turbochargers for gasoline engines often have a blow-off valve (waste gate) for boost pressure control. Due to high exhaust gas temperatures and high pressure pulsations, this valve, which is usually loosely fitted, is subject to an extraordinary load and may therefore undergo excessive wear.

In the context of the present work a method is developed which allows for an efficient simulation of the harmful impact oscillations. A one-way coupling is used for large angles of aperture and small mechanical clearance. On the other hand, a modified one-way coupling based on aerodynamic influence coefficients is used for the inverse conditions, where a movement of the valve causes significant changes in the flow cross-sectional area. Thus, a three-dimensional two-way coupling can equivalently be replaced at massively reduced computational effort. The validation of the method comprises experimental investigations on generic valve models in cold flow conditions. These models differ in the number of degrees of freedom and allow for additional variation in (engine) speed, load and mechanical clearance.

Further experimental investigations are carried out on a four-cylinder engine on the engine test bench under real conditions, identifying particularly harmful operating ranges. The resulting application-related remedial measures are in turn simulatively examined in greater detail, although a final recommendation regarding an application strategy can only be derived to a limited extent. The greatest challenge lies in the correct detection of the actual wear, for which both suitable measurement technology must be installed and a corresponding wear model stored in the engine control system.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	v
Formelzeichen	viii
Lateinische Buchstaben	ix
Griechische Buchstaben	xi
Indizes	xii
Sonderzeichen	xiii
Abkürzungen	xiii
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Stand der Technik	3
1.2.1 Fluid-Struktur-Wechselwirkung an Ventilen	4
1.2.2 Aufschlagschwingungen	8
1.2.3 Aerodynamische Kopplung von Bewegungsmoden	11
1.3 Umriss und Zielsetzung der Arbeit	13
2 Theoretische Grundlagen	15
2.1 Strömungsmechanik	15
2.1.1 Erhaltungsgleichungen	16
2.1.2 Turbulenz	17
2.1.3 Bewegung von Festkörpern im Rechengebiet	18
2.2 Strukturmechanik	23
2.2.1 Starrkörperdynamik	23
2.2.2 Kontaktmechanik	24

2.3	Kopplung von Struktur- und Strömungslöser	29
2.3.1	Zwei-Wege-Kopplung	29
2.3.2	Ein-Wege-Kopplung	32
2.4	Vereinfachte Modellierung der Ventilströmung	33
2.4.1	Bestimmung von Durchfluss- und Kraft- bzw. Mo- mentenbeiwerten	33
2.4.2	Instationäre Ventilströmung	35
2.4.3	Einwegekopplung mit aerodynamischen Einfluss- koeffizienten	35
3	Experimentelle Untersuchungen	37
3.1	Prüfstands Aufbau	37
3.2	Klappenmodelle	39
3.3	Messtechnik	41
3.4	Auswertemethode	42
4	Numerische Untersuchungen	47
4.1	Validierung und Kalibrierung des Kontaktalgorithmus	47
4.1.1	Validierung auftretender Kontaktkräfte	48
4.1.2	Kalibrierung der Kontaktdämpfung	50
4.1.3	Kalibrierung der Referenz-Reibgeschwindigkeit	51
4.1.4	Validierung der Auswertemethode für die Energie- dissipation	53
4.2	Validierung des CFD-Setups	56
4.3	Ermittlung der aerodynamischen Beiwerte	62
4.3.1	Statische Korrekturbeiwerte	63
4.3.2	Dynamische Korrekturbeiwerte	66
4.4	Vergleich der Simulationsmethoden	69
4.4.1	Modell mit einem Bewegungsfreiheitsgrad	69
4.4.2	Modell mit zwei Bewegungsfreiheitsgraden	80

4.4.3	Modell mit fünf Bewegungsfreiheitsgraden	84
4.4.4	Auswahl der geeigneten Simulationsmethode	90
4.5	Weitere Simulationsergebnisse	97
4.5.1	Modell mit einem Bewegungsfreiheitsgrad	97
4.5.2	Modell mit fünf Bewegungsfreiheitsgraden	103
4.6	Diskussion der Ergebnisse	107
5	Anwendung auf den Realmotor	109
5.1	Experimentelle Untersuchungen	109
5.1.1	Auswertemethode	110
5.2	Aufbau des Simulationsmodells	112
5.2.1	CFD-Setup und Randbedingungen	112
5.2.2	Übertrag der Kontaktdämpfung	113
5.3	Experimentelle Ergebnisse	114
5.4	Simulationsergebnisse	123
5.4.1	CFD-Ergebnisse	124
5.4.2	FSI-Ergebnisse	126
6	Zusammenfassung	139
A	Anhang	143
A.1	Fehlerabschätzung für die experimentelle Energiedissipationsrate	143
A.2	Analytische Lösung für das Kontaktmodell	146
A.3	Abschätzung der Kontaktdämpfung für andere Materialien	148
	Literaturverzeichnis	151