Ermitteln von kennungskritischen Bauteileinflüssen im PKW-Schwingungsdämpfer

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde

eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von: Jan-Rickmer Schlegel
aus: Lübeck

eingereicht am: 08. Juni 2015
mündliche Prüfung am: 05. November 2015

Gutachter:
Prof. Dr.-Ing. Rainer Tutsch
Prof. Dr.-Ing. Georg-Peter Ostermeyer
Prof. Dr.-Ing. Martin Meywerk

2015

Schriftenreihe Institut für Dynamik und Schwingungen
TU Braunschweig

Jan-Rickmer Schlegel

Ermitteln von kennungskritischen Bauteileinflüssen im PKW-Schwingungsdämpfer

Shaker Verlag
Aachen 2015

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.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2015

Copyright Shaker Verlag 2015
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4099-9
ISSN 1865-9101

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

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei denen bedanken, die maßgeblich zum Gelingen der vorliegenden Arbeit beigetragen haben und die mir Rückhalt in der intensiven Doktorandenzeit gegeben haben.

Meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. Ostermeyer danke ich für die gute Unterstützung und die herzliche Aufnahme am Institut. Die regelmäßigen Einladungen zu den Doktorandentagen des Instituts gaben nicht nur stets hilfreiche Rückmeldung zum Stand und weiteren Vorgehen, sondern sorgten auch dafür, dass ich als externer Doktorand sehr gut an den Lehrstuhl angebunden und integriert wurde. Herrn Prof. Dr. Meywerk danke ich für die Übernahme des Zweitgutachtens und Herrn Prof. Dr. Tutsch für den Vorsitz der Prüfungskommission.

Bei der Dämpferentwicklung der Volkswagen AG im Werk Braunschweig möchte ich mich ebenfalls recht herzlich bedanken. Die fachliche Betreuung seitens Herrn Kai Reinbothe sowie die Unterstützung der Vorgesetzten Stefan Krawinkel, Detlef Moss, Christian Müller und Jürgen Sellschopp trugen durch fachlichen Input und vor allem das Freistellen zum Arbeiten an der Dissertation maßgeblich zu ihrer erfolgreichen Fertigstellung bei. Und auch dem Rest des Teams danke ich für die fachliche und mentale Unterstützung, wenn es mal gehakt hat oder der eine oder andere Prüfstandversuch mit viel Aufsehen zu unerwarteten Ergebnissen führte.

Den Mitarbeitern des Instituts für Dynamik und Schwingungen gilt mein Dank für die Zusammenarbeit und die gemeinsam verbrachte Zeit im Harz. Herrn Dr. Müller danke ich im Besonderen dafür, dass er mich bei der Findung des Doktorvaters unterstützt hat.

Abschließend möchte ich mich bei meiner Frau Katharina bedanken. Zu Beginn der Doktorandenzeit bekamen wir unsere Tochter Johanna. Ohne das gegenseitige Freispielen im Alltag und den Rückhalt insbesondere während der Fertigstellung der Arbeit wäre mein seit dem Studienende gehegter Wunsch der Promotion unerfüllt geblieben.

Ich danke Ihnen und Euch recht herzlich!

Die Ergebnisse, Meinungen und Schlüsse dieser Dissertation sind nicht notwendigerweise die der Volkswagen AG.

KURZFASSUNG

In der vorliegenden Arbeit werden Streuungen der PKW-Schwingungsdämpfercharakteristik analysiert, die sich aus den Toleranzen der Einzelbauteile und aus den Montageprozessen ergeben. Diese Untersuchungen werden mit verschiedenen Simulationsmethoden sowie Messungen an kompletten Schwingungsdämpfern und an Ventilen durchgeführt.

Das Verhalten des Schwingungsdämpfers bestimmt wesentlich die Fahreigenschaften des Fahrzeugs. Daher werden ihre Charakteristiken in Form von Kraft-Geschwindigkeitskennlinien auf der technischen Zeichnung als toleriertes Maß angegeben. In der Fertigung durchlaufen die Bauteile eine 100%-Kontrolle und bei Nichteinhaltung der Kennlinie müssen die Schwingungsdämpfer nachbearbeitet werden. Die Motivation der Arbeit ergibt sich daher aus Kosten- und Qualitätsgründen. Können Ursachen in den abweichenden Charakteristiken aufgedeckt und reduziert werden, erhöht sich die Auslieferungsqualität deutlich.

Zur Zielerreichung werden zwei Ansätze verfolgt. Der erste beruht auf der Analyse von streuenden Schwingungsdämpfern, die aus der Fertigung ausgefasst werden. Durch Komponententausch werden die ursächlichen Bauteile identifiziert, die trotz gleichen Bauzustands zu unterschiedlichen Ergebnissen führen. Diese Bauteile werden in der Folge am Strömungsprüfstand sowie durch optische Vermessung analysiert. Die Ergebnisse dienen als Eingangsgröße für den zweiten Analyseansatz.

Die Kennlinien ergeben sich hauptsächlich aus den abstimmbaren Ventilen im Schwingungsdämpfer. Daher wird ein Schwerpunkt auf die Ventilmodellierung gelegt. Durch Komponententausch aufgedeckte oder vermutete Streuungseinflüsse werden durch die Modellierung virtuell untersucht und Abstellmaßnahmen werden ohne Prototypenfertigung und -vermessung in großer Variantenzahl bewertet. Da reale Bauteilgeometrien simuliert werden, kommen räumlich diskretisierte Verfahren, wie die finiten Volumen und die finiten Elemente Verfahren, zum Einsatz. Im Schwingungsdämpfer treten starke Kopplungen zwischen der Fluid- und der Strukturmechanik auf. Daher wird zusätzlich die Fluidstrukturinteraktion zur Ventilmodellierung verwendet, die die finite Volumen und die finite Elemente Verfahren in einer Co-Simulation koppelt. Zusätzlich steht ein Ventilbaukasten zur Verfügung, aus dem ein Regressionsmodell abgeleitet wird.

Im Zusammenspiel stellen die verwendeten Verfahren einen Baukasten dar, mit dem je nach Anwendungsfall Kennlinienstreuungen analysiert und minimiert werden. Die Anwendbarkeit der einzelnen Methoden auf die Schwingungsdämpfercharakteristik wird zunächst validiert und im zweiten Teil auf verschiedene Fragestellungen angewendet. Erste Bauteiloptimierungen werden ebenfalls vorgestellt.

ABSTRACT

In this thesis the scattering of the vehicle shock absorber's characteristics is analyzed, which results from the parts' tolerances and assembling processes. These investigations are carried out by using different simulation techniques and measuring complete shock absorbers and single valves.

The shock absorber's behavior essentially influences the handling of vehicles. Thus the characteristics are part of the mechanical drawing. They are defined by a force-velocity-curve with tolerances. During manufacturing each shock absorber is tested. If the testing is failed the parts have to be rebuilt. Hence the motivation of this thesis is given by costs and quality. If sources for the scattering of the characteristics are found and minimized the quality level will increase clearly.

To achieve the thesis' goals two approaches are mainly used. With the first one scattering shock absorbers, which are taken out of the production line, are analyzed. Changing components between two varying shock absorbers detect the responsible parts which cause different characteristics although the assembly is the same. Once identified, these parts will be investigated in detail on the flow bench. The results will be used as input for the second approach.

The characteristics are mainly influenced by the tunable shock absorber valves. Hence the focus is laid on the valve's modeling. Results from the change of components or assumed influences on the scattering are investigated virtually with the 3D-model. In a second step countermeasures are analyzed with many variations without manufacturing and testing prototypes. Since real geometries have to be modeled, spatial discretized methods like the finite volume and the finite element method are used. In the shock absorber strong coupling between structural and fluid mechanics occur. Thus the fluid structure interaction is additionally used for the valve's modeling. This method runs a co-simulation between the finite volume and the finite element method to achieve this bidirectional coupling. In addition to the numerical models the valve measurements on flow bench are used for a regression model.

All of the used methods have their own use case for the investigations. With them scattering causes can be found and minimized. At first these methods are validated and in a second step they are used for different applications in the shock absorber. First optimization results of parts and processes are also presented.

INHALTSVERZEICHNIS

Inhaltsverzeichnis I
Formelzeichen und Abkürzungen III
1 Einleitung 1
2 Grundlagen 5
2.1 Schwingungsdämpfer im PKW-Fahrwerk 5
2.1.1 Verwendung und Aufbau 5
2.1.2 Kraftentstehung 7
2.1.3 Charakteristik 9
2.1.4 Ventile 11
2.2 Beschreibung der Ventilströmung 14
2.2.1 Versuch und Auswertung 15
2.2.2 Auswertung durch messdatenbasierte Funktionen 18
2.2.3 Simulation 20
3 Der Methodenbaukasten 37
3.1 Splinefunktion auf Regressionsbasis 38
3.1.1 Wahl und Herleitung der Ansatzfunktion 39
3.1.2 Ventilvermessung und Koeffizientenvoraussage 43
3.2 Simulation 48
3.2.1 Der Benchmark nach Turek und Hron 49
3.2.2 Fluid-Struktur-Interaktion am Bodenventil 54
3.3 Kombination von Druckverlustkurven 58
4 Streuungsanalyse 63
4.1 Ventilscheiben 63
4.1.1 Verteilungserstellung 63
4.1.2 Iteration über Kennungen 65

4.1.3 Auswertung 69
4.2 Fügeprozesse 73
4.2.1 Kolbenventil 74
4.2.2 Bodenventil 80
4.3 Durchströmung des Kolbenschließventils in Zugrichtung 83
4.3.1 Ist-Analyse 84
4.3.2 Gegenmaßnahmen 92
4.4 Durchströmung des Kolbenschließventils in Druckrichtung 96
4.4.1 Ursachenklärung 97
4.4.2 Einflussanalyse 99
4.5 Leckageeinflüsse 102
4.5.1 Spalt zwischen Kolben und Zylinderrohr 103
4.5.2 Kolbenstangenführung 105
4.6 Variation der Steuerkante im Bodenventil 109
5 Zusammenfassung und Ausblick 113
Anhang 117
Anhang A Überführen von gleich- in normalverteilten Zufallszahlen 119
Anhang B Geometriedaten des FSI-Benchmarks nach Turek und Hron 121
Anhang C Weg zur Lösung einer kubischen Gleichung 123
Literaturverzeichnis 127

FORMELZEICHEN UND ABKÜRZUNGEN

Formelzeichen	Erläuterung	Einheit
a_2, a_3, b_3, c_3, d_3, x_{SP1}, x_{SP2}	Regressionskoeffizienten	diverse
a	Steigung einer Geraden	$[y]/[x]$
$\boldsymbol{a}$	Beschleunigungsmatrix	m/s²
A_{Kst}	Fläche der Kolbenstange	mm²
A_{Zyl}	Fläche des Zylinderrohrs	mm²
C, C^*	Hilfsvariablen für konstante Terme	diverse
C_p	Prozessfähigkeitsindex Streubreite	dimensionslos
c_p	Wärmekapazität bei konstantem Druck	J/kg/K
C_{pk}	Prozessfähigkeitsindex Zentrierung	dimensionslos
c_v	Wärmekapazität bei konstantem Volumen	J/kg/K
d	Scheibendurchmesser	mm
$\boldsymbol{D}$	Differentialoperatorenmatrix der FEM	1/m
$\boldsymbol{d}$	Knotenverschiebungen	m
$\dot{}$	zeitliche Ableitung $\mathrm{d}/\mathrm{d}t$	1/s
d_{Klemm}	Scheibenklemmdurchmesser	mm
d_{max}	maximaler Durchmesser innerhalb eines Scheibenpakets	mm
e	spezifische innere Energie	J/kg
$\boldsymbol{E}$	Materialeigenschaftsmatrix der FEM	N/m²
Eff	Wirkungsfaktor einer Scheibe im Paket	dimensionslos
$\boldsymbol{\varepsilon}$	Dehnungsmatrix	dimensionslos
Exp_d	Exponent des Scheibendurchmessers	dimensionslos
$Exp_{s_{Absatz}}$	Exponent des Absatzmaßes	dimensionslos
Exp_t	Exponent der Scheibendicke	dimensionslos
$\boldsymbol{F}$	Kraftmatrix	N

Formelzeichen	Erläuterung	Einheit
F	Kraft	N
F_D	Kraft des Schwingungsdämpfers	N
F_R	Reibkraft	N
$\boldsymbol{G}$	Matrix der Ansatzfunktionen	dimensionslos
$\boldsymbol{g}$	Gravitationsbeschleunigungsmatrix	m/s²
h	spezifische Enthalpie	J/kg
k	relative Scheibensteifigkeit	dimensionslos
λ	Wärmeleitungskoeffizient	W/(m*K)
m	Masse	kg
η	dynamische Viskosität	Pa*s
μ	Mittelwert	[Messgröße]
$\boldsymbol{p}$	Lastmatrix der FEM	N/m²
p	Druck	N/m²
$\phi, \bar{\phi}, \phi'$	Variablenplatzhalter mit Stationär- und Schwankungswert	diverse
$\boldsymbol{P}$	Plausibilitätsvektor	dimensionslos
$\boldsymbol{q}$	Oberflächenspannung	N/m²
$\dot{q}_s$	spezifische Strahlungswärme	J/kg
R	spezifische Gaskonstante	J/(kg*K)
R^2	Korrelationskoeffizient	dimensionslos
ρ	Dichte	kg/m³
s_{Absatz}	Absatzmaß	mm
σ	Standardabweichung	[Messgröße]
$\boldsymbol{\sigma}$	mechanische Spannungsmatrix	N/m²
Sum_{quad}	Summe der Quadrate	[Messgröße]²
T	Temperatur	K
t	Zeit	s
$\boldsymbol{\tau}$	Spannungsmatrix der Navier-Stokes-Gleichungen	N/m²
Tol_M	Toleranzmittelwert	[Messgröße]
Tol_{OG}	obere Bauteiltoleranz	[Messgröße]
Tol_{UG}	untere Bauteiltoleranz	[Messgröße]
$\boldsymbol{u}$	Verschiebungsmatrix	m
u_f, v_f, w_f	Strömungsgeschwindigkeit in kartesischen Koordinaten	m/s

Formelzeichen	Erläuterung	Einheit
V	Volumen	m³
v_D	Relativgeschwindigkeit Schwingungsdämpfers	m/s
$\dot{\boldsymbol{V}}$	Lösungsvektor mit Volumenströmen	m³/s
W_a	äußere Arbeit	Nm
W_i	innere Arbeit	Nm
x	Einflussvariable	[Messgröße]
$\boldsymbol{x}, \boldsymbol{X}, \boldsymbol{\chi}$	Gitterkoordinaten	m
x, y, z	kartesische Koordinaten	m
(x_i, Y_i)	Messwertpaare	[Messgröße]
y	Ergebnisvariable	[Messgröße]

Abkürzung/Index	Bedeutung
VDA	Verband der Automobilindustrie
Vol	Volumen
Gas	Größen im Gasvolumen
OAR	oberer Arbeitsraum
UAR	unterer Arbeitsraum
aus	ausströmende Größen
ein	einströmende Größen
FEM	Finite-Elemente-Methode
FVM	Finite-Volumen-Methode
CFD	Computational Fluid Dynamics
CSM	Computational Structure Mechanics
SP1, SP2	Schnittpunktindizes der kubischen Splineregression
EP	Index des letzten Messwerts
i,j,n	Laufindizes für Summen und Programmierschleifen
FSI	Fluid-Struktur-Interaktion
LES	Large-Eddy-Simulation
DNS	direkte numerische Simulation
RANS	Reynolds-Averaged Navier-Stokes Simulation
KSF	Kolbenstangenführung