

# **Wirkungsgrade und dynamisches Verhalten von Ventilsteuerungen mit pneumatischer Ventildfeder**

Von der Fakultät für Maschinenbau der  
Technischen Universität Chemnitz

genehmigte

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur

(Dr.-Ing.)

vorgelegt

von: Dipl.-Ing. Heiko Neukirchner

geboren am: 03.08.1968 in Klingenthal

Tag der Einreichung: 18. Januar 2012

Tag der Verteidigung: 30. Juli 2012

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Peter Tenberge

Prof. Dr.-Ing. habil. Werner Haas

Chemnitz, den 14. August 2012

Impressum

# **Wirkungsgrade und dynamisches Verhalten von Ventilsteuerungen mit pneumatischer Ventildfeder**

**Autor:**

Heiko Neukirchner

## **Wichtiger Hinweis:**

Das Werk, einschließlich aller seiner Teile, ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Autors unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigung, Übersetzung, Mikroverfilmung und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

D93 (Diss. TU Chemnitz)

© 2012

Verlag Wissenschaftliche Scripten  
<http://www.verlag-wiss-scripten.de/>

ISBN: 978-3-942267-55-7

## **Bibliografische Beschreibung**

Neukirchner, Heiko

Thema :        Wirkungsgrade und dynamisches Verhalten von Ventilsteuerungen mit pneumatischer Ventulfeder

Dissertation an der Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität Chemnitz, Institut für Konstruktion und Antriebstechnik, Professur Maschinenelemente, Chemnitz, 18.01.2012

176 Seiten, 150 Abbildungen, 7 Tabellen, 76 Literaturzitate

### Referat

Pneumatische Ventulfedern sind heute in Motorsportmotoren Stand der Technik und Voraussetzung für hohe Motordrehzahlen und maximale Motorleistungen. In Serienmotoren ermöglichen sie es, die Verlustarbeit im Ventiltrieb zu mindern. Die Federkraft kann hier im Unterschied zum üblichen Serienventiltrieb mit Schraubendruckfeder bedarfsgerecht angepasst werden. Bei einer pneumatischen Ventulfeder kommt der Kolbenabdichtung besondere Bedeutung zu. Diese verhindert Leakage, führt aber zu Reibungsverlust, welcher in Standardventiltrieben von Serienmotoren nicht entsteht. In der vorliegenden Arbeit wird ein Ersatzmassepunktmodell zur Berechnung des dynamischen Verhaltens und der Energieverluste im Ventiltrieb mit Schraubendruckfeder und dem mit pneumatischer Feder vorgestellt. Verifiziert werden die Berechnungsergebnisse mit Messergebnissen. Am Messaufbau können das Gesamtverlustmoment, das Bewegungsverhalten der Ventile und die Reibungskräfte der Dichtungen ermittelt werden. Mit dem abgeglichenen Modell wird das Potenzial zur Verlustminderung verschiedener Ventiltriebauslegungen berechnet. Um Ventiltriebe zu vergleichen, wird die theoretische Größe des Wirkungsgrades des Ventiltriebs eingeführt. Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen Möglichkeiten der Minderung von Verlusten im Ventiltrieb von Verbrennungsmotoren. Sie sind damit ein Beitrag zur Absenkung des Kraftstoffverbrauches und der CO<sub>2</sub>-Emissionen zukünftiger Fahrzeuge.

### Abstract

Pneumatic valve springs belong to standard technologies in current high performance engines with high maximum revolutions. In addition these make it possible to reduce parasitic losses in series engines. In comparison with conventional helical pressure springs this is achieved by adjusting the spring forces. Of particular importance for the function of pneumatic valve springs are the seals. Seals have to avoid leakages but they generate additional friction losses which do not exist in conventional valve trains. The description of a multibody model for calculation of dynamical behaviour and energetic losses in valve trains with helical pressure springs and pneumatic springs is the main focus of this dissertation. The verification of the simulation model was done by comparing calculation results with measurement results. A specific test rig was set up to measure the entire camshaft's torque, the valve's motion and friction forces on pneumatic spring's seals. By using the verified simulation model the sizing and calculation of dynamic and friction potentials different valve train concepts were carried out. The new dimension "efficiency of valve train" was defined and can be used for comparing different valve train concepts. The results of simulation and measurement investigations show possibilities for reduction of parasitic losses in valve train fuel consumption and CO<sub>2</sub> emissions can be reduced by using combustion engines with pneumatic valve springs.

### Schlagworte:

Verbrennungsmotoren, Ventiltrieb, Ventulfeder, dynamisches Verhalten von Ventiltrieben, Reibung, Wirkungsgrad



## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit in der IAV GmbH im Entwicklungszentrum Chemnitz.

Mein ganz besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Tenberge, dem Leiter der Professur für Maschinenelemente an der Technischen Universität Chemnitz, für die anregenden Gespräche zu methodischen und inhaltlichen Fragen der Arbeit sowie für die Erarbeitung des Erstgutachtens.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Werner Haas, dem Leiter Dichtungstechnik am Institut für Maschinenelemente der Universität Stuttgart, möchte ich mich für das Interesse an meinen Untersuchungen, für die Anregungen aus Sicht der Dichtungsauslegung sowie für die Übernahme des Zweitgutachtens herzlich bedanken.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Dr.-Ing. Jörg Roß, welcher den Impuls für diese Arbeit lieferte und den Fortschritt der Untersuchungen mit fachlichem Rat unterstützte. Herrn Kurt Blumenröder danke ich für die wohlwollende Unterstützung der Arbeit seitens der Geschäftsführung der IAV GmbH.

Bei allen Kollegen der IAV GmbH bedanke ich mich für das kollegiale Verständnis und die freundschaftliche Unterstützung während der Erstellung dieser Arbeit.

Besonders danke ich Herrn Dr. rer. nat. Karl-Heinz Hartwig für die Unterstützung bei der Softwareweiterentwicklung und bei Anwendungsfragen zum Programm VENTIL.

Mein Dank gilt Herrn Dipl.-Ing. Uwe Parsche für die Hilfsbereitschaft beim Austausch zu Fragen der Ventiltriebsdynamik. Bei den Herren Dipl.-Ing. Andreas Werler und Dipl.-Math.techn. Thomas Grund bedanke ich mich für die Diskussionen zu Auslegungsfragen und Messergebnissen.

Den Herren Dipl.-Ing. Jens Bräuer und Dipl.-Ing. Christian Günther danke ich für ihre tatkräftige Unterstützung bei den messtechnischen Untersuchungen am Prüfstand.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Steffen Zwahr danke ich für die Unterstützung bei der Diskussion und der Auswertung von Strömungsuntersuchungen.

Ein großes Dankeschön gilt Frau Dipl.-Ing. Claudia Steiger, Herrn Dipl.-Ing. Martin Ebert, Herrn Dipl.-Ing. Marcel Genge und Herrn Dipl.-Ing. Stephan Rübartsch für ihre engagierte Mitarbeit im Rahmen von Studien- und Diplomarbeiten.

Frau Dr. phil. Angela Donat danke ich herzlich für die fachsprachlichen Hinweise und die stetige Ermutigung bei der schriftlichen Arbeit.

Bei meiner Familie möchte ich mich für das Verständnis und die Unterstützung während der intensiven Zeit zur Erstellung dieser Arbeit bedanken.

Chemnitz, im August 2012

Heiko Neukirchner



## Inhaltsverzeichnis

<b>Formelzeichen und Abkürzungen</b> .....	9
<b>1 Einleitung</b> .....	17
<b>2 Zielsetzung und Methodik</b> .....	18
2.1 Zielsetzung.....	18
2.2 Methodik.....	19
<b>3 Stand der Technik</b> .....	21
3.1 Schwerpunkte der Entwicklung von Verbrennungsmotoren für PKW.....	21
3.2 Bauarten von Ventiltrieben und Entwicklungstrends.....	23
3.3 Veröffentlichte Patentanmeldungen zu pneumatischen Ventildedern.....	25
3.4 Anwendung von pneumatischen Ventildedern.....	30
3.5 Dichtungen für pneumatische Systeme.....	34
3.5.1 Abdichtung bewegter Bauteile.....	35
3.5.2 Auswahl von Dichtungssystemen für pneumatische Ventildedern.....	37
3.5.3 Werkstoffe für Dichtungen.....	38
<b>4. Verlustarbeit und Dynamik im Ventiltrieb – theoretische Grundlagen</b> .....	44
4.1 Energie und Wirkungsgrade.....	44
4.1.1 Energie, Arbeit und Wirkungsgrade in geschlossenen Systemen.....	44
4.1.2 Wirkungsgradkette bei Verbrennungsmotoren.....	46
4.1.3 Verlustarbeit und Wirkungsgrad beim Ventiltrieb.....	50
4.2 Ventiltrieb mit pneumatischer Feder.....	57
4.2.1 Auslegung der Ventiltriebskinetostatik.....	58
4.2.2 Federkrafterzeugung mit pneumatischer Ventildeder.....	65
4.2.3 Berechnung des Druckverlaufes in der pneumatischen Ventildeder.....	70
4.3 Verlustarbeit und Dynamik im Ventiltrieb.....	76
4.3.1 Ansätze zur Reibungsberechnung im Einzelventiltrieb.....	76
4.3.2 Aufbau des Einzelventiltriebsmodells.....	87
4.3.3 Aufbau des Berechnungsmodells für den Messaufbau.....	92
<b>5 Dichtungsreibung bei pneumatischen Ventildedern</b> .....	97
5.1 Kraftverhältnisse und Reibung an Dichtungen für pneumatische Ventildedern ..	97
5.2 Radialkräfte am Beispiel des Dichtungssystems Dichtkantenring/O-Ring.....	101
5.3 Berechnungen mit der Finite-Elemente-Methode.....	103
5.4 Radialkraftberechnungen für verschiedene Dichtsysteme.....	106
5.4.1 Dichtungssystem Dichtkantenring/O-Ring.....	107
5.4.2 Dichtungssystem federunterstützter Nutring.....	110
5.4.3 Berechnung der Radialkraftverläufe unter Ventiltriebsbedingungen.....	112
5.5 Ermittlung der Reibkoeffizienten.....	117

---

<b>6. Experimentelle Untersuchungen .....</b>	<b>122</b>
6.1 Messaufbau zur kontinuierlichen Reibkraftmessung an Dichtungen.....	122
6.2 Reibkraftmessungen.....	126
6.3 Ermittlung der mittleren Antriebsmomente.....	130
<b>7 Wirkungsgrade und Potenzialberechnungen.....</b>	<b>136</b>
7.1. Messungs- und Rechnungsabgleich am Beispiel Rollenschlepphebeltrieb.....	136
7.2 Ermittlung der Verlustmomentanteile.....	140
7.2.1 Ventiltrieb mit Rollenschlepphebel.....	140
7.2.2 Ventiltrieb mit Gleitschlepphebel.....	147
7.3 Potenzialberechnungen für verschiedene Ventiltriebsauslegungen.....	149
7.3.1 Hochdrehzahlventiltrieb mit Rollenschlepphebel und pneumatischer Ventilfeder.....	149
7.3.2 Pneumatische Ventilfeder bei aufgeladenen Motoren mit abgesenkter Nennzahl.....	155
7.4 Zusammenfassung zu Modellabgleich und Potenzialberechnungen.....	159
<b>8 Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>161</b>
<b>9 Literaturverzeichnis.....</b>	<b>163</b>
<b>10 Anlagen.....</b>	<b>169</b>