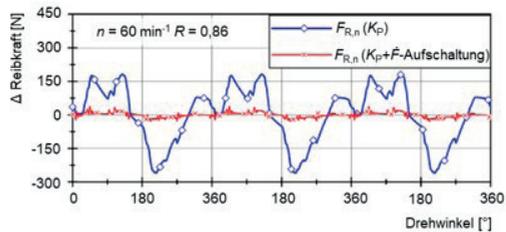


Matthias Hirtz

Reduktion von Bremskraftschwingungen mithilfe reibkraft geregelter Bremsen



**Reduktion von Bremskraftschwingungen mithilfe
reibkraft geregelter Bremsen**

**Reduction of Brake Force Oscillations Using Friction Force
Controlled Brakes**

Von der Fakultät für Maschinenwesen der
Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Matthias Hirtz

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hubertus Murrenhoff
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernd Markert

Tag der mündlichen Prüfung: 01.10.2020

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Universitätsbibliothek online verfügbar.

Reihe Fluidtechnik

D / Band 106

Matthias Hirtz

**Reduktion von Bremskraftschwingungen mithilfe
reibkraft geregelter Bremsen**

Shaker Verlag
Düren 2021

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.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2020)

Copyright Shaker Verlag 2021

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7841-1

ISSN 1437-8434

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

Wer später bremst, fährt länger schnell.

Vorwort und Danksagung

Beschleunigung und Maximalgeschwindigkeiten faszinieren uns im Hinblick auf Mobilität und Fortkommen regelmäßig in besonderem Maße. Den mindestens ebenso wichtigen Bremsvorgängen messen wir hingegen oftmals erst spät oder wenig Bedeutung bei. Hinsichtlich Sicherheit und Komfort spielen Bremsentechnik und die Vermeidung störender Bremskraftschwingungen jedoch eine wesentliche Rolle. Die vorliegende Arbeit rückt dieses Thema mit der Verwendung aktiv geregelter Reibkraftbremsen in den Vordergrund und soll einen Beitrag zur weiteren technischen Entwicklung leisten.

Mein Dank gebührt meinem Doktorvater Prof. Murrenhoff, unter dessen Leitung des ifas die Ergebnisse dieser Arbeit während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter entstanden sind. Ferner bedanke ich mich bei Herrn Prof. Corves für den Vorsitz meiner mündlichen Promotionsprüfung und bei Herrn Prof. Markert für die Übernahme des Korreferats. Für die spannende Zusammenarbeit und den ergänzenden Austausch möchte ich mich bei Abdelkrim Lamjahdy bedanken.

Meinen Bürokollegen Nils Vatheuer und Julian Angerhausen gilt besonderer Dank für die wunderbare Zeit des täglichen „Zusammenlebens“ – ihr ertrugt es (meist) mit Würde. Auch die weiteren Kollegen machten die Zeit am ifas zu etwas Besonderem. Vielen Dank an das gesamte Team!

Für ihre vortreffliche Arbeit danke ich meinen studentischen Mitarbeitern. Hier seien vor allem Ahmed, Christian, Daniel, Dominik, Maximilian, Natalja und Philipp erwähnt.

Bei meiner Familie bedanke ich mich für die Freiheiten und die fortwährende Unterstützung in meinem Werdegang auch in schwierigen Zeiten – ohne Euch wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.

Abschließend ein letztes „Danke“ an Julia und Henrik, welche mich über die Ziellinie der Promotion begleitet und unterstützt haben.

Bad Schönborn, im Januar 2021

Matthias Hirtz

Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit werden zwei reibkraftgeregelter Bremsen hinsichtlich ihrer Fähigkeit analysiert, auftretende Bremskraftschwingungen zu beeinflussen und aktiv zu reduzieren. Aufbauend auf dem Stand der Technik wird zunächst der Prototyp einer selbstverstärkenden elektro-hydraulischen Bremse (SEHB) sowie der dazu gehörige Prüfstand vorgestellt.

Durchgeführte Bremsversuche belegen das Auftreten des Schwingungsphänomens Bremsenrubbeln. Ein detailliertes 1D-Simulationsmodell der SEHB bildet das Schwingverhalten der auftretenden Kräfte detailnah ab und wird mithilfe von Messergebnissen validiert. Sowohl Messungen als auch Simulationsergebnisse zeigen dabei, dass das Kompensationsvermögen des Prototypens hinsichtlich reibkraftinduzierter Schwingungen begrenzt ist.

Im Folgenden werden mithilfe des Simulationsmodells innovative Reglerstrukturen hergeleitet, daraus gewonnene Ergebnisse analysiert und messtechnisch validiert. Besonders erfolgreich können Reibkraftschwingungen mit einer nachgebenden Störgrößenaufschaltung kompensiert werden. Beobachtete Schwingungsamplituden können in ihrer Höhe um bis zu 86 % in Abhängigkeit der Brems Scheibendrehzahl aktiv durch eine angepasste Aktuierung der SEHB sowohl bei konstanten Geschwindigkeiten als auch beim Durchfahren von Drehzahlrampen eliminiert werden.

Anschließend konzentriert sich die Arbeit auf eine hydraulisch-mechanisch geregelte Bremse. Diese zeichnet sich durch die einfache Nachrüstbarkeit in eine bereits in der Praxis eingesetzten unregelmäßigen Bremse aus. Einer umfangreichen Abbildung des Bremssystems mittels 1D-Systemsimulation folgt eine Analyse und Optimierung des Kompensationsvermögens reibkraftinduzierter Bremskraftschwingungen. Auch für die hydraulisch-mechanisch geregelte Bremse können Kompensationsraten von nahezu 90 % in weiten Betriebsbereichen festgestellt werden.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse der Arbeit das große Potential reibkraftgeregelter Bremsen hinsichtlich der Kompensation von Bremskraftschwingungen und im Speziellen des Schwingungsphänomens Bremsenrubbeln. Die weitere Entwicklung solcher Bremssysteme bis hin zur industriellen Umsetzung erscheint daher vielversprechend, da gestiegene Ansprüche an geforderter Leistung, Feinfühligkeit und Reproduzierbarkeit von Bremsvorgängen mit diesen Bremssystemen erfüllt werden können.

Abstract

The research presented in this work analyses two friction force-controlled brakes regarding their ability to influence and actively reduce occurring brake force oscillations. Based on the state of the art, the prototype of a self-energized electro-hydraulic brake (SEHB) and the corresponding test bench are introduced.

Brake tests carried out prove the occurrence of the vibration phenomenon of brake judder. A detailed 1D-simulation model of the SEHB reproduces the vibration behaviour of occurring forces and has been validated by measurement results. Both measurements and simulation results show that the compensatory capacity of the prototype is limited regarding friction-induced vibrations.

In the following, the simulation model is used to derive innovative control structures, analyse the results and validate them on the test bench. A derivative feedforward control successfully compensates frictional force oscillations. Observed vibration amplitudes can be actively reduced up to 86 % depending on the brake disc speed by adjusting the actuation of the SEHB both at constant speeds and when driving through speed ramps.

Subsequently, the work concentrates on a hydraulic-mechanically controlled brake, which is characterized by its simple retrofittability into an uncontrolled brake that has already been used in practice. A comprehensive 1D-simulation model of the brake system is followed by an analysis and optimization of the compensating capacity of brake force oscillations. Compensation rates of almost 90 % can also be determined for the hydraulic-mechanically controlled brake in wide operating ranges.

Overall, the results of the work show the promising potential of friction force-controlled brakes regarding the compensation of brake force oscillations and the phenomenon of brake judder in particular. The further development of such brake systems up to their industrial implementation therefore appears promising, as these brake systems are able to meet increased demands for the required performance, sensitivity and reproducibility of braking processes.

Inhalt

Formelzeichen und Abkürzungen	iii
1 Einleitung	1
2 Stand der Wissenschaft und Technik	3
2.1 Tribologie im Reibkontakt des Bremssystems.....	5
2.2 Verformung der Bremsscheibe	7
2.3 Reibkraftschwingungen	10
2.4 Strategien zur Reduktion reibkraftinduzierter Schwingungen	14
3 Aktive Schwingungskompensation mithilfe der SEHB	23
3.1 Funktionsprinzip der SEHB	23
3.2 Betriebsmodi.....	24
3.3 Messeinrichtung.....	27
3.3.1 SEHB	27
3.3.2 Basisprüfstand.....	29
3.3.3 Schwingungsanregung der Bremsscheibe.....	34
3.4 Simulative Abbildung der SEHB und Bremsscheibe.....	38
3.4.1 Simulationsumgebung	38
3.4.2 Spannung.....	39
3.4.3 Abstützzyylinder.....	50
3.5 Regelungsstrategien zur aktiven Schwingungskompensation.....	55
3.5.1 Basisregelung.....	55
3.5.2 Prädiktive Störgrößenaufschaltung	58
3.5.3 Nachgebende Störgrößenaufschaltung.....	65
4 Schwingungskompensation mithilfe einer hydromechanischen reibkraftgeregelten Bremse	73
4.1 Motivation.....	73
4.2 Funktionsprinzip	74
4.2.1 Ausgangssystem	74
4.2.2 Systemerweiterung durch hydraulisch-mechanischen Regler.....	78

4.2.3 Konzeptionierung	83
4.2.4 Simulative Abbildung	89
4.3 Kompensation von Reibkraftschwingungen	98
4.4 Potential zur Steigerung des Kompensationsvermögens.....	104
5 Zusammenfassung	109
6 Literaturverzeichnis	113
7 Anhang.....	121

Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichen

A	Fläche
\hat{A}	Verstärkungsfaktor
a	Fahrzeugverzögerung
B	Kenngroße
$B_{V1} \dots B_{V4}$	Blendenbeiwerte der Ventilsteuerkanten 1..4
C_H	hydraulische Kapazität
c	Federsteifigkeit
$c_{öl}$	Ölfedersteifigkeit
D_{BS}	Bremsscheibendurchmesser
D_V	Ventildämpfungsgrad
d_p	druckabhängiger Reibbeiwert
d_x, d_y	geschwindigkeitsabhängiger Reibbeiwert
e	Regelabweichung
F, \hat{F}	Kraft, Kraftamplitude
F_B	Bremskraft
F_N, \dot{F}_N	Normal- / Anpresskraft, -änderung
F_R, \dot{F}_R	Reibkraft, Reibkraftänderung
F_S	Stützkraft
f	Frequenz, Kennfrequenz
f_H	Kennfrequenz in drückender Wirkrichtung
f_S	Kennfrequenz in ziehender Wirkrichtung
f_V	Ventilkennfrequenz
h	Zylinderhub
i	Verhältnis
J	Massenträgheitsmoment
K	Verstärkungsfaktor
K_{Lip}	druckabhängiger interner Leckagebeiwert
K_P	proportionaler Reglerübertragungsbeiwert

Formelzeichen und Abkürzungen

$K_{\dot{p}}$	Proportionalitätsfaktor für Ventilsignal
M	Drehmoment, Matrix
m	Masse
M_{Br}	Bremsmoment
$M_{m,ges}$	Gesamtmotormoment
n, \dot{n}	Drehzahl, Drehzahländerung
P_V	Versorgungsleistung
p_0	Versorgungsdruck
p, \dot{p}, \hat{p}	Druck, Druckaufbau, Druckamplitude
p_S	Stelldruck
p_T	Tankdruck
p_V	Versorgungsdruck
Q	Steifigkeitsmatrix
Q_l	Leckagevolumenstrom
Q_N	Ventilnennvolumenstrom
Q_V	Versorgungsvolumenstrom
R	Kompensationsgrad
r^{Rad}	Radradius
r^{reib}	Reibradius
s	Fahrzeugweg
T_H	hydraulische Zeitkonstante
T_M	mechanische Zeitkonstante
t	Zeit
u, u_V	Ventilspannung /-signal
$u_{\dot{p}}$	Ventilsignal mit nachgebender Störgrößenaufschaltung
u_{FS}	Stützkraftsignal
u_P	Ventilsignal mit prädiktiver Regelung
u_{P+}	prädiktives Ventilsignal
V_K	Kreisverstärkung
V_M	mechanischer Verstärkungsfaktor
V_m	Motorschluckvolumen
V_{Qp}	Volumenstrom-Druckverstärkung
V_{Qy}	Volumenstrom-Signalverstärkung

v	Fahrzeuggeschwindigkeit
x, \dot{x}	Position, Geschwindigkeit
\tilde{x}	Eigenvektor der Position
y	Ventilschieberposition
α	Motorschwenkwinkel, Kräfteverhältnis
η	Wirkungsgrad
λ	Eigenwert
μ	Reibungskoeffizient, Reibwert
φ	Phasenverschiebung
φ_{BS}	Winkelposition der Bremsscheibe
ω	Winkelgeschwindigkeit, Kennkreisfrequenz
$\dot{\omega}$	Winkelbeschleunigung

Indizes und Abkürzungen

1,2...i	Aufzählung
A/B	Zylinderseiten A/B
AKR	aktiver Kompensationsregler
AP	Arbeitspunkt
AZ	Abstützzyylinder
BA	Bremsaktor, Bremsaktorkammer
BB	Bremsbelag
BH	Belaghalter
BR	Basisregler
BS	Bremsscheibe
BZ	Bremszange
DTV	engl. Disc Thickness Variation, Variation der Bremsscheibendicke
E	Ersatzgröße
ein/aus	Ein-/Ausströmen
Fed	Federgrößen
hm	hydraulisch-mechanisch
ist	Istwert, Istgröße
L/R	Links / Rechts

Formelzeichen und Abkürzungen

m	gemittelte Größe
mess	gemessene Größe
min/max	Minimal-/Maximalwerte
n	normierte Größe
Reib	Reibungsgrößen
real	Realgrößen
sim	simulierte Größe
soll	Sollwert, Sollgröße
SRO	engl. Sideface Runout, Scheibenschlag
T	Torsionsgröße
V	Ventilgröße
v	volumetrische Größe