



Philippe Stegmann

Ein Ansatz zur Charakterisierung der Robustheit von Scheiben- bremssystemen hinsichtlich Bremsenquietschens



Audi-Dissertationsreihe, Band 121





**Ein Ansatz zur Charakterisierung der Robustheit von
Scheibenbremssystemen hinsichtlich
Bremsenquietschens**

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur
(Dr.-Ing.)

vorgelegt der
Fakultät für Maschinenbau der
Technischen Universität Ilmenau

von Herrn

M.Sc. Philippe Stegmann

geboren am 21.03.1987 in Heidelberg/ Deutschland



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.

1. Aufl. - Göttingen: Cuvillier, 2017

Zugl.: (TU) Ilmenau, Univ., Diss., 2017

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2017

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2017

Gedruckt auf umweltfreundlichem, säurefreiem Papier aus nachhaltiger Forstwirtschaft.

ISBN 978-3-7369-9554-3

eISBN 978-3-7369-8554-4



Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als Doktorand in der Abteilung für die Entwicklung von Radbremsen der Audi AG.

Für die wissenschaftliche Betreuung der Arbeit, die wertvollen Diskussionen und die persönliche Unterstützung möchte ich Herrn Professor Dr. Augsburg danken. Weiterhin gilt mein Dank Professor Dr. rer. nat. Hoffmann für die Übernahme der Rolle des Zweitgutachters und die Begleitung der Arbeit. Aus den Diskussion entsprangen immer zahlreiche Anregungen und neue Aspekte für meine Arbeit. Jan Münchhoff möchte ich für die persönliche Förderung und dafür, dass er dieses Projekt ermöglicht hat, danken.

Meinen Kollegen an der Technischen Ilmenau und bei der Audi AG danke ich besonders für die fachliche und persönliche Unterstützung sowie für die angenehme Arbeitsatmosphäre. Besonders danken möchte ich den Herren Sebastian Kruse und Merten Tiedemann, die mich in besonderem Maße fachlich aber auch persönlich gefördert haben. Nicht vergessen möchte ich meine Kollegen André Cserhati, Sebastian Gramstat, Kai Bode und Karin Ringenaldus.

Motivation und Durchhaltevermögen gaben mir meine Freunde, die mich in schwierigen Phasen aufgebaut haben und an mich geglaubt haben. Besonderer Dank gilt Steffen Krotz, Benedikt Kaczmar, Benjamin Gärtner, Tobias Döbel und Katrien van Nimmen. Für die Unterstützung im Rahmen ihrer studentischen Arbeiten möchte ich Christoph Wick, Stephan Sander, Vincent Stegner und Benjamin Moritz danken.

Nicht zuletzt hat mir meine Familie immer ermöglicht meinen gewählten Weg zu gehen. Ohne sie wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen. Mein Großvater Hans und mein Vater Thomas Stegmann haben bereits in jungen Jahren mein technisches Interesse geweckt und mich immer außerordentlich unterstützt. Meiner Mutter Claudie Gille kann ich nicht genug für den Rückhalt und ihre Liebe danken. Sie war mir immer das wichtigste Vorbild. Meiner Schwester Valérie danke ich für das Vertrauen und die zahlreichen kreativen Ansätze mich wieder aufzubauen. Ein besonderer Dank geht an meine Partnerin Sophie Hildebrand, die mir in der Endphase der Arbeit Kraft gab und mir durch ihre Unterstützung in den letzten Wochen und Monaten oft den Rücken frei hielt.

Ingolstadt, März 2017

Philippe Stegmann





*„Intelligence without ambition is a bird
without wings“*

- Salvador Dalí





Zusammenfassung

In der heutigen Entwicklung von Radbremsen ist einer der Schwerpunkte die Reduzierung von Bremsgeräuschen. Gleichzeitig gibt es einen wachsenden Bedarf für neue und effizientere Methoden zur Bewertung der Robustheit von Radbremsen, um letztendlich den Entwicklungsaufwand zu reduzieren. Im Hinblick auf diese Herausforderungen beschreibt diese Arbeit eine Methodik, die auf der experimentellen Ermittlung der modalen Eigenschaften basiert, um die Robustheit des Schwingungsverhaltens von Scheibenbremssystemen zu bewerten. Zunächst wird ein vereinfachtes Modell eines nichtlinearen reiberregten Systems verwendet, um die Parameterabhängigkeit der modalen Eigenschaften und die Interaktion der Schwingungsmoden zu charakterisieren. Darüber hinaus wird gezeigt, wie die Übertragungsfunktionen im Frequenzbereich zur Untersuchung der Robustheit verwendet werden können. Gleichzeitig werden aus den Modellbetrachtungen Hypothesen für die experimentelle Untersuchung der Robustheit abgeleitet. Anschließend wird ein experimenteller Ansatz vorgestellt, um die Übertragungsfunktionen eines Bremssystems während des Betriebs zu bestimmen. Zur Bewertung der Systemrobustheit erfolgt die Betrachtung der erzwungenen Schwingungsamplituden und der Resonanzfrequenzen der betrachteten Schwingungsmoden. Zur Bestimmung der Übertragungsfunktionen während des Bremsvorgangs werden neue Konzepte für die selektive Anregung des Systems sowie zur Erfassung der Systemantwort für alle relevanten Schwingungsmoden eingeführt. Die Systemanregung des Systems wird mithilfe eines kraftgesteuerten piezoelektrischen Aktuators realisiert, der in den Bremskolben integriert ist. Um die Systemantwort für alle relevanten Schwingungsmoden zu erfassen, wird ein Verfahren zur optimalen Sensorpositionierung basierend auf einem FE-Modell und numerischen Verfahren genutzt. Die anschließenden experimentellen Untersuchungen wenden die entwickelte Methode zur Bewertung der Robustheit auf ausgesuchte Varianten der Radbremse, die sich in der Sattelkonstruktion und im Material der Bremsbeläge unterscheiden, an. Die ermittelte Robustheit für die verschiedenen Schwingungsmoden jeder Variante wird visualisiert und die Bedeutung für die Entwicklung von Scheibenbremssystemen diskutiert. Die vorgestellte Methode zeigt das Potential der Charakterisierung der Robustheit von Radbremsen, in frühen Entwicklungsphasen den Aufwand für zeit- und kostenintensive Prüfstands- und Fahrzeugtests zu reduzieren.





Abstract

In today's development of brake systems the reduction of noise occurrence is one of the key elements. At the same time, there is an increasing demand to reduce the development time and, thus, for new and more efficient techniques to evaluate the robustness of disc brake systems. In view of these challenges, this thesis describes a methodology that bases on the experimental identification of modal properties to determine and evaluate the robustness of the vibration behaviour of disc brake systems. First, a simplified model of a nonlinear friction-induced system is used to characterize the parameter dependency of the modal properties and the interaction of the vibration modes. In addition, it is shown how the frequency response function can be used to investigate the robustness of the involved system. From the simulation model hypothesis' for the experimental investigation of the robustness are derived. Second, an experimental approach to determine the frequency response functions of a brake system during operation is presented. Thereby, the evaluation of the systems robustness is possible using the forced vibration amplitudes and the resonance- frequencies of the considered vibration modes. To determine the frequency response functions during brake operation, new concepts for the selective excitation of the system and for capturing the systems' response for all relevant vibration modes are introduced. The excitation of the system is achieved using an innovative force-controlled piezoelectric actuator which is integrated in the brake piston. To determine the optimal sensorpositions for the investigated brake system, in order to observe the systems response for all relevant vibration modes, a finite element model is used to develop a sensor positioning method basing on singular value decomposition. Subsequently, studies using the experimental techniques investigate different variants of the brake system that differ in the construction and in the material of the brake pads. The evaluation of the robustness of the different vibration modes of each variant is visualized and the significance for the development of disc brake systems is discussed. The presented method shows the potential of a characterization of brake systems regarding the robustness of their vibrational behaviour in an early development phase to reduce the amount of time consuming and expensive dynamometer and vehicle tests.





Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis	xi
Abkürzungsverzeichnis	xv
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Stand der Wissenschaft und der Technik	3
1.2.1 Instabilitätsmechanismen	4
1.2.2 Methoden und Ansätze zur Bewertung von Radbremsen	5
1.2.3 Robustheit von Radbremsen	9
1.2.4 Zusammenfassung	10
1.3 Methodik und Struktur der Arbeit	10
2 Hypothesenbildung	13
2.1 Betrachtung des linearisierten Systems	14
2.1.1 Berechnung der Eigenwerte	15
2.1.2 Betrachtung des Dämpfungsgrads	16
2.2 Betrachtung des nichtlinearen Systems	17
2.2.1 Berechnung der Übertragungsfunktion	18
2.2.2 Berechnung der Arbeit der Reibkraft	21
2.3 Zusammenfassung der Hypothesen	24
3 Konzept für die experimentelle Untersuchung	27
3.1 Anforderungen an die experimentelle Methode	28
3.2 Messprozedur	31
3.3 Indikatorfunktionen	32
3.4 Anregungskonzept	33
3.4.1 Funktionsweise	33
3.4.2 Kraftregelung	37
3.4.3 Systembeeinflussung	39
3.4.4 Betrachtung der modalen Anregung	41
3.4.5 Reproduzierbarkeit der Systemanregung	43