TECHNISCHE UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG
Institut für Dynamik und Schwingungen

Aaron Völpel

Simulative Untersuchungen zum Stabilitätsverhalten dynamischer Reibmodelle im Frequenzbereich

SHAKER VERLAG

Schriftenreihe
Institut für Dynamik und Schwingungen
TU Braunschweig

Simulative Untersuchungen zum Stabilitätsverhalten dynamischer Reibmodelle im Frequenzbereich

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

zur Erlangung der Würde

eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von:	Aaron Völpel
geboren in (Geburtsort):	Berlin

eingereicht am:	26.03.2019
mündliche Prüfung am:	12.12.2019

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

2020

Schriftenreihe Institut für Dynamik und Schwingungen
TU Braunschweig

Aaron Völpel

Simulative Untersuchungen zum Stabilitätsverhalten dynamischer Reibmodelle im Frequenzbereich

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.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2019

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 978-3-8440-7553-3
ISSN 1865-9101

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 im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Dynamik und Schwingungen der TU Braunschweig.

An erster Stelle möchte ich mich herzlich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. G.-P. Ostermeyer für seine vertrauensvolle und hilfreiche Betreuung bedanken. Ich danke ihm für die zahlreichen Anregungen und Ideen, die mir ein weites und spannendes fachliches und überfachliches Handeln eröffneten. Er hat mich stets gefördert und mir wertvolle Gelegenheiten ermöglicht, das Institut sowohl auf nationalen und internationalen Tagungen als auch im Zuge von Industrieprojekten zu vertreten.

Darüber hinaus danke ich Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Meywerk für seine Bereitschaft, sich als Gutachter dieser Arbeit anzunehmen. Herrn Prof. Dr.-Ing. R. Tutsch danke ich für die freundliche Übernahme des Vorsitzes der Promotionskommission.

Für die Unterstützung im Rahmen von zahlreichen Forschungsprojekten und Softwarelizenzen sowie für die vielen fachlich anregenden Gespräche und kritischen Diskussionen danke ich den nachfolgenden Herren stellvertretend für die jeweilige Firma: Dr.-Ing. M. Körner (VOLKSWAGEN AG); Dr.-Ing. D. Wallner & Dr.-Ing. S. Carvajal (PORSCHE AG); Dr.-Ing. K. Bode & Dr.-Ing. M. Tiedemann (AUDI AG); Dr.-Ing. B. Allert (BMW Group); Dr.-Ing. R. F. Nunes & Dr.-Ing. M. Könning (DAIMLER AG); Dr.-Ing. B. Kirchgäßner, Dr.-Ing. N. Wagner & Dr.-Ing. M. Ast (INTES GmbH); M. Belyi, B. Heers & S. Burnet (DASSAULT SYSTEMES).

Den Kolleginnen und Kollegen des Institutes danke ich für das kollegiale Arbeitsklima sowie für die ausgeprägte Bereitschaft zur fachlichen Diskussion. Mein besonderer Dank gilt hier Herrn Priv.-Doz. Dr.-Ing. M. Müller, Herrn Dr.-Ing. F. Schiefer, Frau A. Struckmann, Frau K. Hentrich, Herrn T. Schramm, Herrn S. Raczek, Herrn J. Merlis und Herrn A. Vogel. Für die sehr freundschaftliche und stets motivierende Büroatmosphäre danke ich besonders Herrn Dr.-Ing. L. Wilkening und Herrn J. Otto.

Abschließend danke ich ganz besonders herzlich meiner Frau Viola für all ihre Geduld und ihren mentalen Beistand sowie meinen Eltern, die meinen gesamten Werdegang gefördert und mich stets unterstützt haben.

Kurzfassung

Im Gesamtsystem Fahrzeug nimmt die Fahrzeugbremse trotz und gerade wegen der vielen neuen Fahrerassistenzsysteme und der Elektrifizierung nach wie vor eine zentrale Rolle ein. So dient die Fahrzeugbremse beispielsweise einem Parkassistenten zur Erfüllung seiner Aufgabe und muss gleichzeitig bei einem Elektrofahrzeug noch lautloser sein, da keine störenden Geräusche des Verbrennungsmotors zu hören sind. Die Ursache für eine überwiegende Mehrheit der komfortmindernden Bremsgeräusche und Vibrationen einer Fahrzeugbremse liegt in reibinduzierten Effekten. Das am häufigsten von Kunden reklamierte Bremsgeräusch ist das *Bremsenquietschen.* Das Bremsenquietschen wird sowohl anhand von experimentellen Messungen als auch mit simulativen Werkzeugen erforscht.

In der Wissenschaft und Industrie besteht die Erkenntnis, dass die Genauigkeit der Prognoseergebnisse des vorwiegend heute angewandten simulativen Werkzeuges verbesserungswürdig ist. Dieses Werkzeug, die sogenannte *Complex Eigenvalue Analysis* (CEA), ermöglicht über die im Frequenzraum gewonnenen Eigenwerte eine Stabilitätsaussage des Systems und somit eine Prognose zur Quietschempfindlichkeit einer Bremse zu gewinnen. Die in der Industrie heute angewandten kommerziellen FEM-Tools ermöglichen ausschließlich die Integration eines stationären Reibverhaltens in die CEA. Des Weiteren besteht Einigkeit von Wissenschaft und Industrie, dass der Reibwert des relevanten Tribosystems Bremsscheibe-Reibbelag eine zeitabhängige und somit hochgradig dynamische Systemgröße widerspiegelt.

Diese Arbeit widmet sich speziell dem Stabilitätseinfluss dynamischen Reibverhaltens im Frequenzbereich. Das Ziel dieser Arbeit ist, unter Anwendung kommerzieller FEM-Tools, eine Integration des dynamischen Reibverhaltens im Frequenzraum zu ermöglichen, um das damit einhergehende Stabilitätsverhalten anhand industrieller Bremsenmodelle zu analysieren. Damit eingeschlossen ist die Entwicklung einer experimentellen Messprozedur, die für die Reibmodell-Parametrisierung notwendig ist. Im Hinblick auf eine industrielle Nutzung wird eine Messprozedur angestrebt, die zeiteffizient innerhalb von einem Tag, aber dennoch sehr präzise, anzuwenden ist. Mit Hilfe des modifizierten CEA-Workflows und unter Anwendung von parametrisierten dynamischen Reibmodellen wird nachgewiesen, dass das dynamische Reibverhalten einen signifikanten Einfluss auf das Stabilitätsverhalten ausüben kann.

Abstract

In motor vehicle systems, brakes continue to play a crucial role, both despite and also because of the many new driver assistance systems and vehicle electrification. For example, brakes are a necessary component of parking assistants. In the case of electric vehicles, which produce no disturbing noises otherwise associated with internal combustion engines, the brakes must operate particularly quietly. The overwhelming majority of comfort-diminishing brake noises and vibrations result from friction-induced effects. Of these disturbances, customers most often report issues regarding brake squeal. Brake squeal is currently the subject of scientific research, both via experimental measurements and simulation tools.

In science and in industry, it is recognized that the predictive accuracy of the most commonly used simulation tool is in need of improvement. This tool, known as the Complex Eigenvalue Analysis (CEA), makes it possible to obtain system stability information via the eigenvalues obtained in the frequency domain, and thus to prognosticate brake squeal sensitivity. Commercial FEM tools used in industry today only allow for the implementation of stationary friction behavior in the CEA. There is, however, consensus between scientists in academia and industry that the coefficient of friction is time-dependent and highly dynamic, particularly in the tribosystem relevant to friction brakes.

This work focuses on the influence of dynamic friction behavior on stability in the frequency domain. The aim of this work is to implement dynamic friction behavior in the frequency domain using commercial FEM tools and industrial brake models, in order to analyze the associated stability behavior. This includes the development of an experimental measurement procedure, which is necessary for parameterizing the dynamic friction models. In consideration of industrial applications, a measurement procedure is developed that is both time-efficient (can be carried out with one day) and very precise. Using the modified CEA workflow and parameterized dynamic friction models, it is demonstrated that the dynamic friction behavior can significantly influence the stability behavior.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 1
1.1 Motivation ... 1
1.2 Gliederung dieser Arbeit ... 3

2 Tribologische Zustandsgrößen im Bremssystem 5
2.1 Tribologische Grundlagen ... 6
2.2 Funktionsweise der Pkw-Scheibenbremse ... 12
2.3 Rohstoffklassen und Materialkonzepte ... 15
2.4 Reibinduzierte Anregungsmechanismen ... 22
2.4.1. Stabilitätsverhalten im Frequenzbereich ... 23
2.4.2. Stabilisierende und Destabilisierende Reibungseinflüsse ... 27
2.4.3. Complex Eigenvalue Analysis (CEA) ... 37
2.4.4. Benutzerspezifische Reibmodelle in der CEA ... 40
2.5 Betrachtung der Reibgrenzschicht als Zustandsgröße ... 55

3 Einbettung dynamischer Reibmodelle in den Frequenzraum 63
3.1 Mathematische Beschreibung der Methode der Hochdimensionierung ... 63
3.2 Erweiterung des Zustandsraums unter Anwendung von Minimalmodellen . 69

4 Parametrisierung dynamischer Reibverhalten von Bremsbelägen 81
4.1 Messprozedur zur Ermittlung der Reibmodellparameter ... 82
4.2 Messdatenvergleich unter Variation des Reibmaterials ... 101

5 Methode der Hochdimensionierung in kommerziellen FEM-Tools 115
5.1 Integration der Hochdimensionierung in den CEA Workflow ... 115
5.2 Erweiterung des Zustandsraums unter Anwendung von FEM-Modellen... 130

6 Zusammenfassung und Ausblick 137