



Johannes Otto

## Hochfrequente Schwingungen in der Grenzschicht von Hochlastkontakten am Beispiel der Scheibenbremse

# **Hochfrequente Schwingungen in der Grenzschicht von Hochlastkontakten am Beispiel der Scheibenbremse**

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

zur Erlangung der Würde

eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von: Johannes Otto

aus (Geburtsort): Salzgitter Bad

eingereicht am: 28.02.2020

mündliche Prüfung am: 04.11.2020

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

2020



Schriftenreihe Institut für Dynamik und Schwingungen  
TU Braunschweig

**Johannes Otto**

**Hochfrequente Schwingungen in der  
Grenzschicht von Hochlastkontakten  
am Beispiel der Scheibenbremse**

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.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 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 978-3-8440-7795-7

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](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

---

*Für Anton, meinen kleinen Freund*



# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Dynamik und Schwingungen der Technischen Universität Braunschweig.

Dabei gebührt mein größter Dank dem Leiter des Instituts, Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. G.-P. Ostermeyer für die zahlreichen Ideen, Diskussionen und Anregungen. Als mein Doktorvater hat er wesentlichen Einfluss auf meine fachliche wie auch überfachliche Weiterbildung genommen und mich stets gefördert und gefordert. Sein großes Vertrauen in mich hat mir ein weites Betätigungsfeld ermöglicht und viele Türen eröffnet; auch dafür bin ich Ihm sehr dankbar.

Darüber hinaus danke ich Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Meywerk vom Institut für Fahrzeugtechnik der Helmut Schmidt Universität für seine Bereitschaft, diese Arbeit als Gutachter anzunehmen. Herrn Prof. Dr.-Ing. R. Tutsch möchte ich an dieser Stelle für die Bereitschaft danken, den Prüfungsvorsitz zu übernehmen.

Ein großer Dank gilt meinen Kolleginnen und Kollegen des Instituts für das freundliche Arbeitsklima. Dabei möchte ich besonders Herrn apl. Prof. Dr.-Ing. M. Müller, Herrn Dr.-Ing. F. Schiefer, Herrn M. Sandgaard und Herrn A. Vogel danken. Herrn A. Völpel und Herrn J. Kijanski möchte ich danken für das hervorragende und stets motivierende Büroklima. Ohne die ausgezeichnete Organisation wäre ein reibungsloser Arbeitsablauf in diesem Zeitrahmen nicht möglich gewesen, daher möchte ich auch für die Unterstützung bei Frau A. Struckmann und Frau K. Hentrich bedanken.

Die Fertigstellung einer solchen Arbeit wäre nicht möglich gewesen, ohne die Unterstützung der vielen studentischen Arbeiten und studentischen Hilfskräfte. Ich bedanke mich daher ganz herzlich bei Herrn G. Lehne, Herrn A. Krumm und Herrn F. Rickhoff.

Viel zu verdanken habe ich meiner Familie und insbesondere meinen Eltern, die mich stets gefördert und unterstützt haben und somit maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Nicht zuletzt möchte ich mich bei Alexandra bedanken, die mich in allem bedingungslos unterstützt und mir durch ihre Liebe Kraft gibt.

Braunschweig, November 2020

*Johannes Otto*



# Zusammenfassung

Das tribologische Verhalten von Reibpartnern ist bis heute noch nicht vollständig verstanden und nur bedingt vorhersehbar. Dafür sind Wechselwirkungen von diversen Prozessen innerhalb der Grenzschicht verantwortlich, die auf unterschiedlichen Größen- und Zeitskalen ablaufen. Ein prominentes Beispiel, an welchem die Komplexität der Reibung demonstriert wird, ist die Fahrzeugbremse.

Schwingungsuntersuchungen des Reibkontakts im Bremssystem konzentrieren sich in der Regel auf Betriebsschwingformanalysen und Modalanalysen der Bremsscheibe oder anderer Bremssystemkomponenten. Vor dem Hintergrund des Fahrzeugs komforts finden diese Untersuchungen im fühl- und hörbaren Frequenzbereich des menschlichen Gehörgangs statt. In der Literatur wird jedoch postuliert, dass höherfrequente Schwingungen vorhanden sind, die das tribologische Verhalten beeinflussen können [Ost09][Ost10].

Um diese These zu validieren und einen Beitrag zu dem komplexen Thema Reibung zu leisten, ist es das Ziel dieser Arbeit, den tribologischen Kontakt auf reibinduzierte Schwingungen im Ultraschallbereich zu untersuchen.

Dazu wird ein Messverfahren ausgewählt, welches hochfrequente mechanische Schwingungen bis in den MHz-Bereich erfassen kann. Um effiziente Analysen durchzuführen, wird eine vollautomatisierte Messkette für die Schwingungsmessung an den Tribometern des IDS implementiert. Anschließend wird untersucht, ob der Reibkontakt Frequenzen anregt, die oberhalb des üblichen relevanten Frequenzbereichs liegen. Nach der Identifizierung signifikanter Frequenzen im Bereich zwischen 10 kHz bis 80 kHz wird die Existenz dieser nachgewiesen. Dabei lässt sich u.a. feststellen, dass die Schwingungen unabhängig der Versuchseinrichtung mittels unterschiedlichen Messprinzipien erfassbar, sowie dass die Prozesse und Systemparameter des Reibkontaktes maßgeblich für die auftretenden Frequenzen verantwortlich sind. Neben dem Nachweis lassen sich anhand eines eigens entwickelten Maßes zur Frequenzbeeinflussung Größen wie z.B. Normalkraft, Reibwert, Grenzschicht usw. identifizieren, die eine Frequenzverschiebung der hochfrequenten Schwingungen zur Folge haben.

Als weiteres Werkzeug, um ein Verständnis für die Frequenzen zu schaffen, erweist sich ein passives Verfahren zur Schwingungsreduktion am Tribokontakt. Dadurch war eine Tilgung spezifischer Frequenzen möglich. Weiterhin lassen sich mittels eines eigens entwickelten aktiven Verfahrens die Amplitude der Schwingungen erhöhen und so neue Erkenntnisse zum Verhalten des Reibkontaktes generieren.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse dieser Arbeit die Existenz von spezifischen Frequenzen im Ultraschallbereich eines Bremskontakts und deren Bedeutung für das tribologische Verhalten.



# Abstract

The tribological behaviour of friction partners is still not fully understood and only partially predictable. This is due to interactions of various processes within the boundary layer, which occur on different size and time scales. A prominent example demonstrating the complexity of friction is the vehicle brake.

Vibration investigations of the friction contact in the brake system usually focus on operational vibration shape analyses and modal analyses of the brake disc or other brake system components. Against the background of vehicle comfort, these investigations take place in the tactile and audible frequency range of the human auditory canal. In the literature, however, it is postulated that higher-frequency vibrations are present which can influence the tribological behaviour [Ost09] [Ost10].

To validate this hypothesis and to contribute to the complex topic of friction, the aim of this thesis is to investigate the tribological contact for friction-induced vibrations in the ultrasonic range.

For this purpose, a measuring method is selected which can detect high-frequency mechanical oscillations up to the MHz range. In order to perform efficient analyses, a fully automated measurement chain for vibration measurement at the tribometers of the IDS will be implemented. Subsequently, it will be investigated whether the friction contact excites frequencies that are above the usual relevant frequency range. After identifying significant frequencies in the range between 10 kHz and 80 kHz, the existence of these frequencies is verified. Among other things, it can be determined that the vibrations can be detected by means of different measuring principles independently of the test equipment, and that the processes and system parameters of the friction contact are significantly responsible for the frequencies occurring. In addition to the verification, a specially developed measure of frequency influence allows the identification of quantities such as the normal force, the coefficient of friction, the boundary layer, etc., which result in a frequency shift of the high-frequency vibrations.

Another tool to create an understanding of the frequencies proved to be a passive method for vibration reduction at the tribo contact. This allowed the elimination of specific frequencies. In addition, a specially developed active method allowed the amplitude of the vibrations to be increased, thus generating new insights into the behavior of the friction contact.

Overall, the results of this work show the existence of specific frequencies in the ultrasonic range of a brake contact and their significance for the tribological behaviour.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation . . . . .	1
1.2	Gliederung der Arbeit . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Stand der Wissenschaft zur Tribologie in technischen Bremssystemen</b>	<b>5</b>
2.1	Grundlagen der Tribologie . . . . .	5
2.2	Reibinduzierte Schwingungen . . . . .	7
2.2.1	Stick-Slip . . . . .	7
2.2.2	Fallende Reibkennlinie . . . . .	9
2.2.3	Sprag-Slip . . . . .	10
2.2.4	Modenkopplung . . . . .	11
2.3	Wellenausbreitung in Festkörpern . . . . .	14
2.3.1	Longitudinalwellen . . . . .	14
2.3.2	Transversalwellen . . . . .	14
2.3.3	Schallamachwellen . . . . .	16
2.4	Das tribologische System Scheibenbremse . . . . .	17
2.4.1	Aufbau und Funktionsweise . . . . .	17
2.4.2	Schwingungsphänomene . . . . .	20
2.4.3	Prüfmethoden des Systems . . . . .	21
2.4.4	Experimentelle Untersuchungen zur Grenzschicht . . . . .	26
2.4.5	Simulative Untersuchungen der Grenzschicht . . . . .	27
2.5	Zwischenfazit . . . . .	30
<b>3</b>	<b>Verfahren zum Messen und Auswerten von hochfrequenten Schwingungen</b>	<b>31</b>
3.1	Messverfahren zur Erfassung hochfrequenter Schwingungen . . . . .	31
3.1.1	Laser-Doppler-Vibrometer . . . . .	31
3.1.2	Laser-Triangulation . . . . .	33
3.1.3	Piezoelektrische Sensoren . . . . .	34
3.1.4	Ultraschallmikrofon . . . . .	35
3.2	Kriterien und Auswahl der Messverfahren . . . . .	37
3.3	Validierung der Messtechnik . . . . .	39
3.4	Verfahren zum Auswerten . . . . .	41

<b>4</b>	<b>Untersuchung von hochfrequenten Schwingungen in der Grenzschicht</b>	<b>43</b>
4.1	Versuchseinrichtung . . . . .	43
4.2	Erste Versuche und Messungen . . . . .	47
4.3	Nachweis von hochfrequenten Schwingungen in der Reibgrenzschicht . . . . .	48
4.3.1	Untersuchung zur Systemdynamik . . . . .	48
4.3.2	Implementierung der Messkette und Messaufbau . . . . .	55
4.3.3	Vergleich zwischen zwei unterschiedlichen Messprinzipien . . . . .	58
4.3.4	Abstandsvariation von Luft- und Körperschallmesspunkt zur Reibgrenzschicht . . . . .	60
4.3.5	Vergleich der drei translatorischen Raumrichtungen . . . . .	64
4.3.6	Untersuchung derselben Reibgrenzschicht an verschiedenen Tribometern . . . . .	65
4.3.7	Messungen am Bremssystem . . . . .	67
4.3.8	Überprüfung der Messbarkeit . . . . .	70
4.3.9	Zwischenfazit . . . . .	74
4.4	Untersuchung von Einflussgrößen auf die hochfrequenten Schwingungen	74
4.4.1	Reproduzierbarkeit der Frequenzen . . . . .	75
4.4.2	Geschwindigkeit . . . . .	77
4.4.3	Normalkraft . . . . .	79
4.4.4	Temperatur . . . . .	80
4.4.5	Reibwert . . . . .	82
4.4.6	Grenzschicht . . . . .	84
4.4.7	Probenlänge . . . . .	86
4.4.8	Geometrie und Probenhalter . . . . .	87
4.4.9	Material . . . . .	88
4.4.10	Zusammenfassender Vergleich der Einflussgrößen . . . . .	89
<b>5</b>	<b>Passive und aktive Beeinflussung der hochfrequenten Schwingungen</b>	<b>93</b>
5.1	Passive Beeinflussung . . . . .	93
5.1.1	Entwicklung eines mechanischen Tilgers für hochfrequente Schwingungen . . . . .	98
5.1.2	Messung mit passiver Beeinflussung . . . . .	101
5.2	Aktive Beeinflussung . . . . .	102
5.2.1	Auswahl des Aktors . . . . .	104
5.2.2	Auslegung der Verstärkerschaltung . . . . .	106
5.2.3	Entwicklung eines neuen Probenhalters . . . . .	109
5.2.4	Messung mit aktiver Beeinflussung . . . . .	111
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>117</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>121</b>

**A Weitere Abbildungen und Darstellungen**

**135**