

Jan Malte Sandgaard

Zur Messung von Bremsenemissionen

# Zur Messung von Bremsenemissionen

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

zur Erlangung der Würde

eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

eingereichte Dissertation

von:	Jan Malte Sandgaard
geboren in:	Lüneburg
Vorsitzender:	Prof. Dr.-Ing. Rainer Tutsch
Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. habil. Georg-Peter Ostermeyer Prof. Dr.-Ing. Carsten Schilde

2022



Schriftenreihe Institut für Dynamik und Schwingungen  
TU Braunschweig

**Jan Malte Sandgaard**

**Zur Messung von Bremsenemissionen**

Shaker Verlag  
Düren 2022

**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., 2022

Copyright Shaker Verlag 2022

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8749-9

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)

## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Dynamik und Schwingungen der Technischen Universität Braunschweig in der Zeit vom Juli 2018 bis Februar 2022.

Besonders bedanken möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. G.-P. Ostermeyer für die zahlreichen Ideen und die regen Diskussionen. Durch sein Vertrauen und seine stetige Förderung in meine Person war es mir möglich, neue Wege zu ergründen und mich dadurch fortwährend weiterzuentwickeln.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Carsten Schilde danke ich für die Übernahme des zweiten Gutachtens und die Mitwirkung in der Promotionskommission. Gleichzeitig bedanke ich mich auch für die vielen offen geführten Termine in den gemeinsamen Projekten. Herrn Prof. Dr.-Ing. Rainer Tutsch möchte ich für die Übernahme des Vorsitzes der Promotionskommission meinen Dank aussprechen.

Außerdem bedanke ich mich bei Herrn Dr. F. Schiefer und Herrn apl. Prof. Dr. M. Müller für die große Diskussions- und Hilfsbereitschaft. Gleichzeitig gilt mein Dank an Frau A. Struckmann für die organisatorische und Frau K. Hentrichs für die technische Unterstützung während meiner Tätigkeit am Institut. Ein großer Dank gebührt meinen Freunden und Kollegen: Herr Dr. J. Otto über den ich als Hilfwissenschaftler ans Institut gekommen bin, Herr J. Kijanski für die vielen fachlichen Gespräche und Ideen, Herr L. Stahl für themenübergreifende Diskussionen in den Morgenstunden, G. Lehne für die große Hilfsbereitschaft bei der Sensorentwicklung und das tolle Büroklima, A. Krumm, Dr. A. Vogel, F. Rickhoff für das reibungslose Arbeiten in der Arbeitsgruppe Reibung, Aufrechterhaltung der Maschinen und Werkstätten und das immer offene Ohr. Dazu möchte ich den studentischen Hilfskräften danken, die mich während der Zeit unterstützen: A. Melis, J. Tews und M. Thomsen.

Bei meinen Eltern möchte ich mich für die Förderung und die große Unterstützung, die sie mir jederzeit zuteil werden lassen, bedanken. Abschließend möchte ich einen riesigen Dank an meine Frau Marie Sandgaard aussprechen, die mir während der gesamten Zeit den Rücken gestärkt hat und mich stets unterstützt. Ohne diese große Hilfe hätte ich diese Arbeit nicht anfertigen können.



## Zusammenfassung

In den letzten Jahren sind durch die Reduktion von abgasorientierten Emissionen zusehends nicht-abgasorientierte Emissionsquellen in den Fokus des öffentlichen Interesses gerückt. Die nicht-abgasorientierte Emissionsquellen schließen dabei die Straßen-, Reifen- und Bremsenemissionen ein. Aufgrund der geringen Partikelgröße und der Materialzusammensetzung weisen Bremsenemissionen, neben den ökologischen Auswirkungen, ein hohes Gefährdungspotential für den Menschen auf. Dabei sind Einflüsse, die sich negativ oder positiv auf die ausgestoßene Partikelkonzentration auswirken, bislang wenig erforscht. Bisherige Untersuchungen konzentrieren sich vielmehr auf die Ermittlung der gesamtemittierten Partikelkonzentration bei unterschiedlichen Bremsapplikationen, um Reibpaarungen hinsichtlich derer Emissionsgüte zu bewerten.

Ziel dieser Arbeit ist es, erste Einflussparameter, die sich auf den Ausstoß von Bremspartikeln auswirken, zu identifizieren. Dazu werden umfangreiche Messungen an einem Stift-Scheibe-Tribometer des Instituts für Dynamik und Schwingungen der TU Braunschweig durchgeführt. Da das genutzte Tribometer nicht eingehaust ist, ist eine hohe Anzahl an Emissionsmessgeräten notwendig, um das Emissionsgeschehen abzudecken. Hierzu wird ein kompaktes Sensorsystem für die Messungen der Partikelkonzentration entwickelt. Im Anschluss an eine Kalibrierung werden sowohl die Referenzmessgeräte als auch die entwickelten Sensorsysteme für die Emissionsmessungen in das Tribometer implementiert. Anhand der Messungen von unterschiedlichen Belägen bei gleicher Scheibe werden die Emissionsergebnisse mit ausgewählten Reibparametern korreliert. Es zeigt sich hierbei, dass neben der Materialzusammensetzung der Beläge das Vorkommen von Reservoiren verbunden mit einer hohen Rauheit einen signifikanten Einfluss auf das Emissionsverhalten aufweist. Ferner werden weitere Einflussparameter analysiert und hinsichtlich der Beeinflussung des Emissionsverhaltens charakterisiert. Durch die hohe Anzahl an Sensorsystemen wird zudem die Ausbreitungsdynamik der Partikel am Tribometer untersucht.

Aufbauend auf den Erkenntnissen in der Laborumgebung werden die entwickelten Sensorsysteme für Messungen im Freifeld genutzt. In einer Machbarkeitsstudie werden verschiedene Fahrscenarien hinsichtlich des Partikelaustrittes und der Partikeldynamik untersucht. Durch das Feststellen von Ausbreitungsdynamiken bei unterschiedlichen Fahrevents wird das Potential der Anwendung der entwickelten Sensorsysteme verdeutlicht.

Die vorliegende Arbeit leistet einen Beitrag zu einem besseren Verständnis in Bezug auf die Entstehung der Bremsenemissionen und einen Beitrag zu Emissionsmessungen außerhalb von kontrollierten Laborbedingungen.





# Abstract

In recent years, the reduction of exhaust-oriented emissions has increasingly shifted the focus of public interest to non-exhaust-oriented emission sources which include road, tire and brake emissions. Due to the small particle size and the material composition, brake emissions have a high hazard potential for humans and environment. However, only few studies have been conducted on influences that have a negative or positive effect on the emitted particle concentration. Previous studies have instead concentrated on determining the total emitted particle concentration in different brake applications in order to evaluate friction pairings in terms of their emission quality.

The objective of this work is to identify primary parameters influencing the emission of brake particles. For this purpose, extensive measurements are carried out on a pin-on-disc tribometer at the Institute of Dynamics and Vibration of the TU Braunschweig. Since the tribometer used is not enclosed, a large number of emission measuring devices are required to cover the emission events in several brake applications. Also, a compact sensor system for particle concentration measurements is developed. Following a calibration, both the reference measuring devices and the developed sensor systems for the emission measurements will be implemented in the tribometer. Based on the measurements of different pairing with the same disc, the emission results are correlated with selected friction parameters. It was found that beside the material composition of the friction pairing also the presence of reservoirs combined with a high roughness has a significant influence on the emission behaviour. Furthermore, other influencing parameters are analysed and characterized with respect to their influence. The high number of sensor systems will herein allow investigation of the dispersion dynamics of the particles with the tribometer.

Based on the results in the laboratory environment, the sensor systems developed will be used for measurements in the open field to investigate different driving scenarios regarding particle emission and particle dynamics. Furthermore, the potential of the application of the developed sensor systems is clarified by determining dispersion dynamics during different driving events.

Overall, this thesis contributes to a better understanding of the origin of brake emissions and to emission measurements outside controlled laboratory conditions.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation . . . . .	1
1.2	Struktur der Arbeit . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Stand der Technik</b>	<b>5</b>
2.1	Tribologische Grundlagen . . . . .	5
2.1.1	Reibung . . . . .	6
2.1.2	Verschleiß . . . . .	13
2.2	Emissionen durch das Kraftfahrzeug . . . . .	14
2.2.1	Kraftfahrzeugbremse . . . . .	16
2.2.2	Partikelmesssysteme . . . . .	19
2.2.3	Messung von Bremsenemissionen auf Prüfständen . . . . .	27
2.2.4	Möglichkeiten der Reduktion von Bremsenemissionen . . . . .	34
2.3	Offene Schlussfolgerungen zum Forschungsbedarf . . . . .	35
<b>3</b>	<b>Entwicklung und Aufbau von Sensorsystemen zur Messung von Emissionen</b>	<b>39</b>
3.1	Auswahl der Sensoren für den Aufbau des Sensorsystems . . . . .	39
3.2	Vorstellung der Entwicklungsstufe I . . . . .	42
3.3	Kalibrierung der Feinstaubsensoren . . . . .	45
3.4	Vorstellung der Entwicklungsstufe II . . . . .	50
3.4.1	Hardwareentwicklung der Entwicklungsstufe II . . . . .	52
3.4.2	Softwareentwicklung der Entwicklungsstufe II . . . . .	53
<b>4</b>	<b>Durchführung der Emissionsmessungen am Tribometer</b>	<b>57</b>
4.1	Automated Universal Tribotester . . . . .	57
4.2	Vorstudie zur Reproduzierbarkeit und Positionsfindung der Sensoren . . . . .	61
4.2.1	Untersuchung der Reproduzierbarkeit der Emissionsmess- ergebnisse . . . . .	62
4.2.2	Positionsfindung der Sensorsysteme . . . . .	69
4.2.3	Positionsfindung der Referenzmessgeräte . . . . .	72
4.3	Untersuchung Patchdynamik auf Emissionsverhalten . . . . .	74

4.4	Emissionsverhalten unterschiedlicher Reibpaarungen . . . . .	82
4.4.1	Belagsvariation . . . . .	84
4.4.2	Scheibenvariation . . . . .	98
<b>5</b>	<b>Emissionsmessungen am realen Fahrzeug</b>	<b>111</b>
5.1	Prüfaufbau zur Untersuchung der Emissionsdynamik im Freifeld	111
5.2	Untersuchung der Partikeldynamik . . . . .	114
5.2.1	Auswertung von Messtag 1 . . . . .	114
5.2.2	Auswertung von Messtag 2 . . . . .	124
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>137</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>141</b>