

**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.

---

## 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.