

Nicht nur die computergestützte Simulation von Bremsgeräuschen hat in den vergangenen Jahren beeindruckende Fortschritte gemacht, auch die 3D-Scanning-Vibrometrie hat die messtechnische Schwingungsanalyse erheblich erweitert. Sowohl in-plane- als auch out-of-plane-Schwingungsformen der relevanten Komponenten können in einem Messdurchlauf bestimmt werden. Bei Continental Automotive Systems ist die Scanning-Vibrometrie ein integrierter Bestandteil des Optimierungsprozesses, speziell zur Eliminierung von Bremsgeräuschen.

# Ruhe bitte!

*Bremsenquietschen konstruktiv beseitigen mittels numerischer und experimenteller Schwingungsanalysen*

## Finite-Elemente-Simulationen

Von den störenden Bremsgeräuschen ist das Quietschen das meist zitierte Problem. Es entsteht durch Selbsterregung und tritt in der Regel nur bei bestimmten Temperaturen und Drücken im Bremssystem auf. Eine erste Optimierung zum Verhindern der Selbsterregung besteht aus einer komplexen Eigenwertanalyse mit anschließenden Strukturmodifikationen um instabile Moden zu vermeiden. Die zugrunde liegende Schwingungsgleichung lässt sich allgemein mit:

$$f(t) = M\ddot{q} + D\dot{q} + Kq = 0$$

beschreiben, wobei  $f(t)$  für die anregende Kraft,  $M$  für die Massenmatrix,  $D$  für die Dämpfungsmatrix,  $K$  für die Steifigkeitsmatrix und  $q$  für den Vektor der Auslenkung steht.

Die Entwickler bei Continental Automotive Systems simulieren mit mehreren hunderttausend Freiheits-

graden das komplette Bremssystem mit allen benachbarten Fahrwerkskomponenten. So gerüstet, kann die komplexe Eigenwertanalyse schon während der Konstruktionsphase, ohne Prototyp, durchgeführt werden. Die Methode berechnet allerdings auch instabile Moden, welche nicht zur Entstehung von Geräuschen beitragen. Deshalb ist es notwendig, die Ergebnisse anhand von Simulationen und Tests daraufhin zu prüfen, ob die berechneten Schwingformen tatsächlich in der Praxis auftreten. Bild 1 zeigt die berechnete Betriebsschwingform eines quietschenden Bremssystems.

## Versuchsergebnisse

Bild 2 zeigt den Versuchsaufbau für die Messung der Betriebsschwingformen mit dem 3D Scanning Vibrometer am Bremsenprüfstand. Der Startzeitpunkt für die Scans wird durch das Bremsenquietschen über ein Mikrofon oder

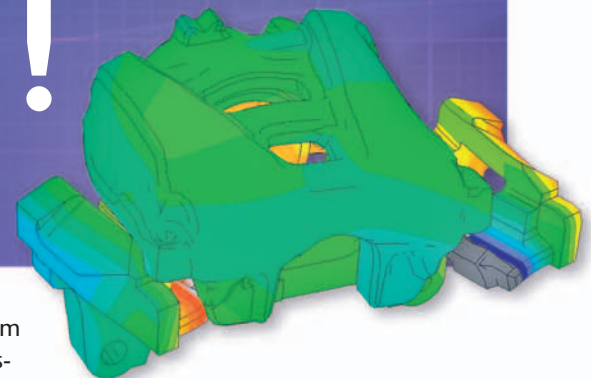


Bild 1: Berechnete Betriebsschwingform eines quietschenden Bremssystems

Bild 2: Messaufbau mit dem 3D Scanning Vibrometer zur Bestimmung der Betriebsschwingformen des Bremssattels und der Bremscheibe

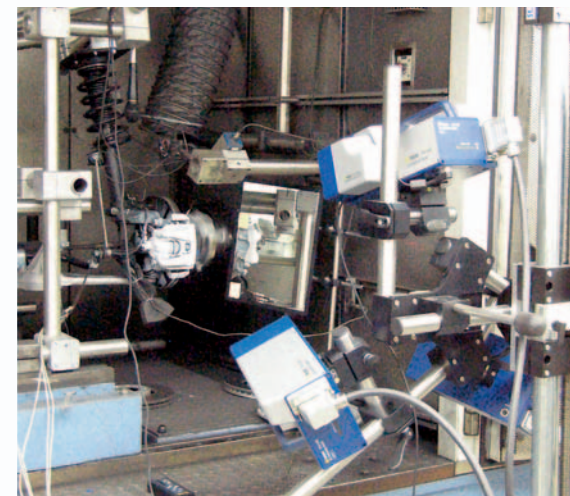




Bild 3: Betriebsschwingform eines Bremsstatts, gemessen mit dem Scanning Vibrometer

einen Drehwinkelgeber getriggert. Dadurch wird sichergestellt, dass die Messdaten mit einem definierten Geräuscheignis korrelieren. Das Schwingverhalten des Bremssystems wird aus drei unterschiedlichen Richtungen simultan gemessen.

Anstatt mehrere Messungen aus unterschiedlichen Positionen zusammenzufügen, werden Bereiche, die nicht direkt zugänglich sind, über Spiegel gemessen. In diesem Fall wird eine Koordinatentransformation notwendig, damit alle Messungen, mit oder ohne Spiegel, im selben Koordinatensystem dargestellt werden. Das kann automatisch geschehen, wenn die Spiegelpositionen während des Setups vordefiniert werden. Bild 3 zeigt die Betriebsschwingform eines Bremsstatts, gemessen mit dem Scanning Vibrometer.

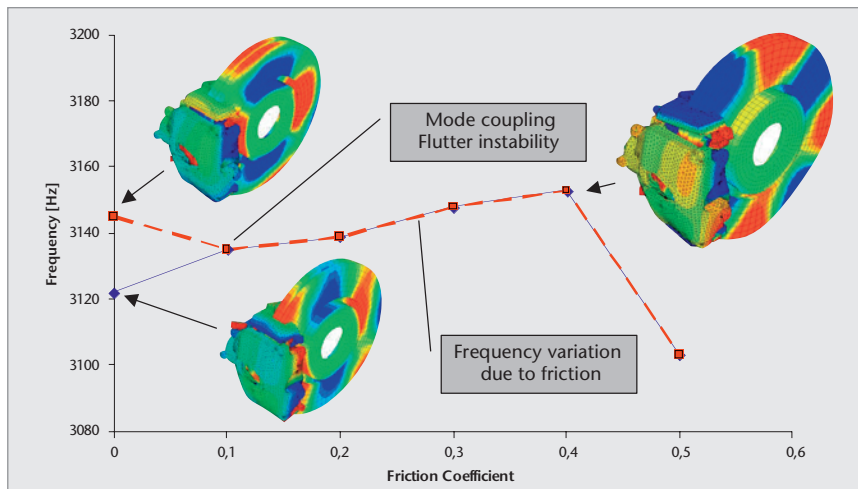
Mit der Erweiterung auf alle drei räumlichen Dimensionen ist das 3D Scanning Vibrometer zu einem leistungsstarken

Werkzeug bei der Entwicklung von Bremssystemen geworden. Es ermöglicht die Bestimmung sowohl von in-plane als auch out-of-plane-Betriebsschwingformen der relevanten Komponenten mit einem Messaufbau. Im Gegensatz zu konventionellen Messungen mit triaxialen Beschleunigungsaufnehmern können damit schnelle und berührungsfreie Messungen ohne Massenbehaftung auf allen optisch zugänglichen Flächen, bei wesentlich höherer Anzahl an Messpunkten, durchgeführt werden. Außerdem ermöglicht ein integrierter Abstandssensor (Geometrie-Scaneinheit) die Definition des ebenfalls räumlichen Messgitters. So ist es nicht unbedingt nötig (wohl aber möglich), Geometriedaten aus einem FEM-Programm zu importieren.

### Erarbeiten von Abhilfemaßnahmen

Sind die Betriebsschwingformen und Eigenformen ermittelt, kann die Entstehung der Selbsterregung anhand der sogenannten Modenkopplung erklärt werden. Bild 4 zeigt, wie die Wechselwirkung zweier Moden des Bremssystems (Bremsattel und -scheibe) vom Reibwert abhängt. Die gestrichelte rote Linie folgt der Frequenz der einen Mode, die durchgezogene blaue Linie einer nahe benachbarten zweiten Mode. Bei einer Zunahme des Reibungskoeffizienten verändert sich die Frequenz

Bild 4: Instabilität infolge der Kopplung von Moden in Abhängigkeit vom Reibungskoeffizient



Polytec Produktinformation



## PSV-400-3D Scanning Vibrometer

Das PSV-400-3D Scanning Vibrometer ist das ideale Messsystem zur schnellen, berührungslosen und rückwirkungslosen Erfassung 3-dimensionaler Schwingungsdaten. Es bietet eine intuitive 3D-Animation der Messergebnisse und Datenschnittstellen zu Modalanalyse- und FEM-Software.

[www.polytec.de/psv3d](http://www.polytec.de/psv3d)



beider Moden. Zunächst nimmt die Frequenz der ersten Mode ab, während die der zweiten zunimmt, bis beide Frequenzen bei einem Reibungskoeffizient von 0,1 zusammenfallen. In diesem Fall koppeln die beiden Moden und erzeugen eine als „flutter“ (Flattern) bezeichnete Instabilität.

Bei weiter zunehmender Reibung bleiben die beiden Moden gekoppelt. Um das Bremsenquietschen zu eliminieren, können beispielsweise die Resonanzfrequenzen durch Strukturmodifikationen verschoben werden, sodass keine Kopplung mehr auftreten kann.

### Zusammenfassung

Die Analyse von Betriebsschwingformen mithilfe experimenteller Daten aus 3D Scanning Vibrometer-Messungen ermöglicht dem Entwicklungsingenieur das methodische Erarbeiten von Maßnahmen gegen unerwünschte Bremsgeräusche.

Holger Marschner, Continental Teves AG & Co. oHG, Frankfurt a.M.  
[holger.marschner@contiautomotive.com](mailto:holger.marschner@contiautomotive.com)  
[dirk.reckwerth@contiautomotive.com](mailto:dirk.reckwerth@contiautomotive.com)