

Ein numerisches Modell zur Untersuchung von Reifen-Fahrbahn-Geräuschen

Otto von Estorff¹, Jan Biermann², Steffen Petersen³

¹ Institut für Modellierung und Berechnung, 21073 Hamburg, Deutschland, Email: estorff@tu-harburg.de

² Institut für Modellierung und Berechnung, 21073 Hamburg, Deutschland, Email: biermann@tu-harburg.de

³ Department of Mechanical Engineering, Stanford, California, 94305-3035, Email: steffep@stanford.edu

Einleitung

Im Rahmen der Geräuschreduzierung von Kraftfahrzeugen kommt dem Reifen-Fahrbahngeräusch eine besondere Bedeutung zu. Im Gegensatz zu anderen Schallquellen am Fahrzeug sind hier kaum passive Maßnahmen möglich, so dass für eine Verringerung der Schallemission die Entwicklung von geräuschoptimierten Reifen und Fahrbahnoberflächen zwingend erforderlich ist. Für eine zielgerichtete und kostengünstige Geräuschoptimierung des Systems Reifen-Fahrbahn ist dabei die Entwicklung von Berechnungsmodellen sinnvoll, die es ermöglichen die Schallabstrahlung für bestimmte Reifen-Fahrbahnkombinationen zu simulieren.

In dem vorliegenden Beitrag wird ein Berechnungsverfahren vorgestellt, das es ermöglicht, das akustische Verhalten von Reifen-Fahrbahnssystemen mit Hilfe von virtuellen Prototypen zu simulieren.

Simulationsstrategie

Das nachfolgend vorgestellte Berechnungsmodell ist in zwei Teilschritte unterteilt. Im ersten Schritt wird die Struktur-schwingung des Reifens ermittelt. Hierbei wird zunächst das Problem des stationären, nichtlinearen Rollkontaktes mittels eines detaillierten Finite-Elemente-Modells in einer ALE-Formulierung [1] gelöst und dann einer Modalanalyse unterzogen. Aus Messungen gewonnene Texturdaten der Straße werden diversen Filterungen unterworfen und schließlich in eine deterministische Anregungsfunktion überführt, die auf die Kontaktknoten des deformierten Systems aufgebracht wird. Die Strukturantwort des Reifens wird schließlich durch modale Superposition ermittelt. Die resultierenden Oberflächenschnellen des Reifens dienen als Eingangsdaten für das akustische Modell.

Das akustische Modell

Das akustische Modell zur Lösung der Helmholtz-Gleichung besteht aus einer Diskretisierung des den Reifen umgebenden Luftraums (Halbraum) mit Finiten und Infiniten Elementen. Das sich ergebende lineare Gleichungssystem hat die Form

$$\mathbf{A}(\omega)\mathbf{p} := [\mathbf{K} + (i\omega)\mathbf{C} - \omega^2\mathbf{M}] \mathbf{p} = \mathbf{f} , \quad (1)$$

mit der inversen Massenmatrix \mathbf{K} , der Admittanzmatrix \mathbf{C} und der Kompressibilitätsmatrix \mathbf{M} . Der Erregervektor \mathbf{f} enthält die Oberflächenschnellen und der Vektor \mathbf{p} die gesuchten Schalldrücke an den Knoten des akustischen Netzes. Gleichung (1) wird für jede im Anregungsspektrum enthaltene Frequenz ω gelöst, wobei iterative Gleichungslöser basie-

rend auf Krylov-Unterraum-Methoden zum Einsatz kommen. Numerische Tests zeigen dabei, dass der Löser BICGSTAB zusammen mit einem „Additive-Schwarz-Method“-Präkonditionierer die beste Leistung bezüglich der benötigten Rechenzeit liefern.

Die verwendeten Elemente sind spezielle Finite-Elemente basierend auf Bernsteinpolynomen [3] sowie Infinite-Elemente nach Astley-Leis basierend auf Jacobipolynomen [2]. Diese zeigen eine verbesserte Stabilität und Effizienz bei der Verwendung von iterativen Gleichungslösern.

Numerische Beispiele

Die bisher durchgeführten Simulationen dienten schwerpunktmäßig der Validierung des Berechnungsmodells. Dabei wurde zunächst ein stehender Reifen im Rahmen eines Shakertests strukturdynamisch und akustisch vermessen und parallel numerisch untersucht. Außerdem wurde ein Test auf einem Trommelprüfstand berechnet und mit Messergebnissen verglichen. Alle Berechnungen wurden mit Hilfe der open-source FE-Programmbibliothek *libMesh* [4] durchgeführt.

Shakertest

Zunächst wurde ein stehender, deformierter Reifen mittels eines Shakers mit einer definierten Anregung beaufschlagt (siehe Bild 1). Dabei wurde sowohl der Schalldruck an diversen Raumpunkten gemessen als auch die Oberflächenbeschleunigungen in Richtung der Normalen. Dabei kam ein Laservibrometer zum Einsatz.



Bild 1: Testaufbau zur strukturdynamischen und akustischen Vermessung eines ruhenden, deformierten Reifens.

Die akustische Simulation erfolgte mit gemessenen, als auch berechneten Randbedingungen. Ein Ergebnis, dass die Eignung des Verfahrens zeigt, ist in Bild 2 zu sehen.

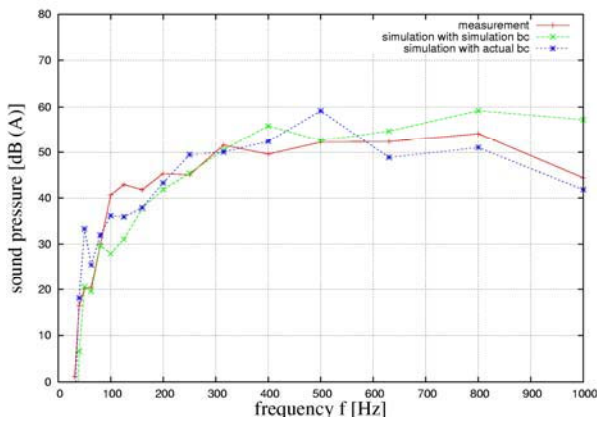


Bild 2: Vergleich des Terzspektrums von Mess- und Simulationsergebnissen des Shakertests für einen Messpunkt im Abstand von 1m von der Radachse und 0,35m über dem Reifen.

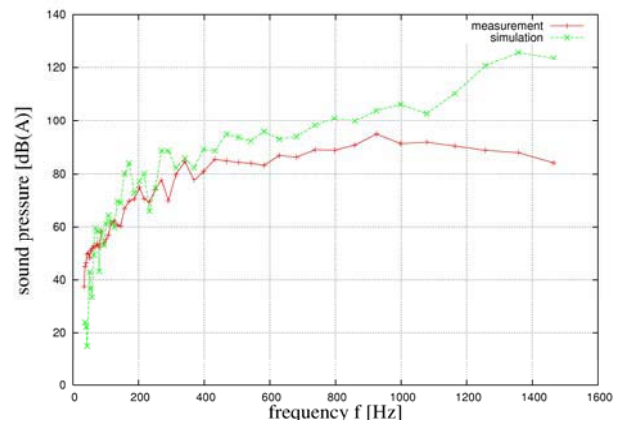


Bild 4: Vergleich der gemessenen und simulierten Schalldrücke (in A-bewerteten Drittel-Terzen) für den Versuch am Trommelprüfstand bei 100 km/h Rollgeschwindigkeit.

Trommelprüfstand

Des Weiteren wurden Reifenprototypen auf einem Trommelprüfstand akustisch vermessen, wie er in Bild 3 zu sehen ist.



Bild 3: Testaufbau eines Trommelprüfstandes mit Myra-Texture in einem schallarmen Raum

Hierbei erfolgte die Anregung durch eine auf die Trommel aufgebrachte Replica einer Myra-Texture. Die Messungen und auch die entsprechenden Simulationen wurden bei Rollgeschwindigkeiten von 40, 60, 80 und 100km/h durchgeführt. Einen Vergleich zwischen Messung und Rechnung zeigt Bild 4. Die auftretenden Abweichungen bis 1100Hz werden als zu große Amplituden in der Anregungsfunktion des Strukturmodells interpretiert. Die derzeitige Deutung der großen Abweichungen ab 1100Hz ist eine Berücksichtigung von Frequenzen in der Struktur Anregung, die der Reifen tatsächlich nicht „sieht“. Die Verbesserung dieser Punkte ist Gegenstand derzeitiger Arbeiten.

Weitere Anwendungsmöglichkeiten

Das hier vorgestellte Berechnungsmodell kann, neben dem „virtuell prototyping“ von Reifen, auch für die Untersuchung anderer, die Schallabstrahlung und Schallausbreitung beeinflussender Parameter verwendet werden.

Zu nennen ist hier beispielsweise der Einfluss des frequenzabhängigen Absorptionskoeffizienten der Straße auf die Schallausbreitung. Eine derzeit andauernde Untersuchung betrifft die Wirksamkeit von Auskleidungen von Radkästen mit schallabsorbierenden Materialien anhand des in Bild 5 dargestellten Modells.

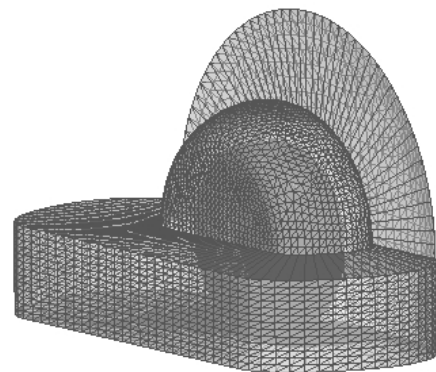


Bild 5: Finite/Infinite-Elemente-Modell zur Untersuchung des Einflusses von absorbierenden Randbedingungen im Radkasten

Literatur

- [1] Nackenhorst, U.: The ALE-formulation of bodies in rolling contact Theoretical foundations and finite element approach, Computational Methods in Applied Mechanics and Engineering 193 (2004), 4299-4322
- [2] D. Dreyer, O.v. Estorff: Improved conditioning of infinite elements for exterior acoustics, Int. J. Numer. Methods Eng. 58 (2003) 933-953
- [3] Steffen Petersen: Adaptive finite und infinite Elementemethoden in der Akustik, Shaker Verlag, Aachen, 2007
- [4] libMesh, URL: <http://libmesh.sourceforge.net>