

# Ein Finite/Infinite Elemente Modell zur akustischen Analyse der Reifen-Fahrbahn-Interaktion

Jan Biermann, Otto von Estorff

Institut für Modellierung und Berechnung, Denickestr.17. 21073 Hamburg,  
E-Mail: [biermann@tuhh.de](mailto:biermann@tuhh.de)

## Einleitung

Im Rahmen der vom Gesetzgeber geforderten Gesamtgeräuschreduzierung von Kraftfahrzeugen kommt dem Reifen-Fahrbahnlärm eine besondere Bedeutung zu. Im Gegensatz zu anderen Schallquellen am Fahrzeug sind hier kaum passiven Maßnahmen möglich, so dass die Entwicklung von geräuschoptimierten Reifen und Fahrbahnoberflächen für eine Verringerung der Geräuschemission unumgänglich ist. Um eine zielgerichtete und kostengünstige Geräuschoptimierung des Systems Reifen-Fahrbahn vornehmen zu können, ist die Entwicklung von Berechnungsmodellen, die es ermöglichen die Schallabstrahlung für bestimmte Reifen-Fahrbahnkombinationen im Vorfeld zu simulieren, von besonderer Wichtigkeit.

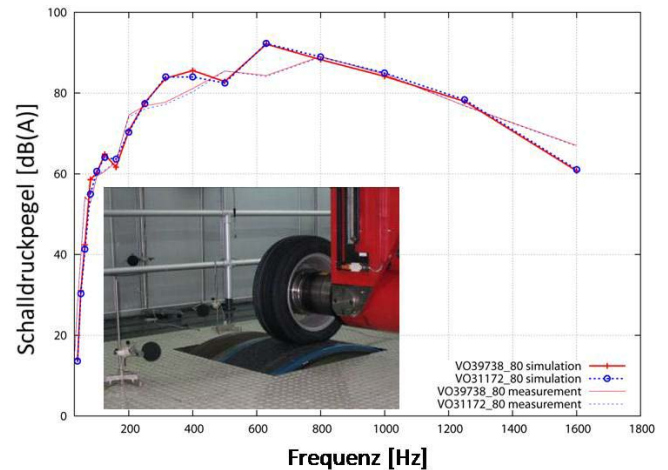
Im Rahmen eines Projektes im Forschungsverbund Leiser Straßenverkehr 2 wurde ein auf finiten und unendlichen Elementen basierendes Berechnungsmodell entwickelt, welches die akustische Analyse von virtuellen Prototypen ermöglicht. Dieses Modell und erste Validierungsschritte wurden bereits in [1] vorgestellt. Der vorliegende Beitrag umfasst die Vorstellung der abschließenden Modellvalidierung und der ersten Schritte in Richtung einer Erweiterung des Modells um die Berücksichtigung von Airpumpingeffekten.

## Modellvalidierung

In einem ersten Schritt wurde zunächst ein stehender Reifen in einem sogenannten „Shakerversuch“ untersucht und das Strukturmodell, welches die Anregung des akustischen Systems liefert, getrennt vom akustischen Modell validiert (siehe [1]). Danach galt es das gesamte Modell für rollende Reifen zu validieren, indem Reifenpaare mit verschiedenen Konstruktionsdetails auf einem Trommelprüfstand vermessen wurden. Ein so ermitteltes Ranking konnte dann mit der Simulation reproduziert werden (siehe exemplarisch **Tabelle 1** und **Bild 1**).

**Tabelle 1:** Vergleich des gemessenen und simulierten Rankings von einem Reifenpaar auf Rauhasphalt anhand des Breitbandpegels an verschiedenen Mikrofonpositionen (F1-1m vor dem Reifen, F2-1m neben dem Reifen, F3-1m hinter dem Reifen).

	F1 [dB(A)] rauh	F2 [dB(A)] rauh	F3 [dB(A)] rauh
Diff.39738/31172			
Messung	-0.1360	-0.2020	-0.2100
Rechnung	-0.2840	-0.3700	-0.2350



**Bild 1:** Terzspektrum der gemessenen und simulierten Schalldruckpegel für ein Reifenpaar mit verschiedenen Konstruktionsdetails und der zur Messung verwendete Trommelprüfstand.

## Numerische Effizienz

Die akustischen Simulationen können als eine Art „Anschlussrechnung“ für die Struktursimulation verstanden werden, in der die akustischen Auswirkungen von konstruktiven Veränderungen ermittelt werden. Für die praktische Anwendbarkeit ist somit die numerische Effizienz des Modells von entscheidender Bedeutung. Bereits in [1] wurde in diesem Zusammenhang auf die Verwendung spezieller Elementformulierungen verwiesen (siehe ebenfalls [3], [4]), da diese eine verbesserte Stabilität und Effizienz bei der Verwendung von iterativen Gleichungslösern aufweisen. Darauf aufbauend wurde eine weitere Elementformulierung entwickelt, die unter gewissen Voraussetzungen den Lösungsprozess weiter beschleunigt (siehe [2]). Diese verwendet ultrasphärische Polynome  $G_n = P_n^\lambda$  als spezielle Form der Jacobipolynome  $P_n^{\alpha,\beta}$  mit  $\alpha = \beta = \lambda - \frac{1}{2}$  mit dem Parameter  $\lambda = \frac{5}{2}$ . Die damit definierten Ansatzfunktionen

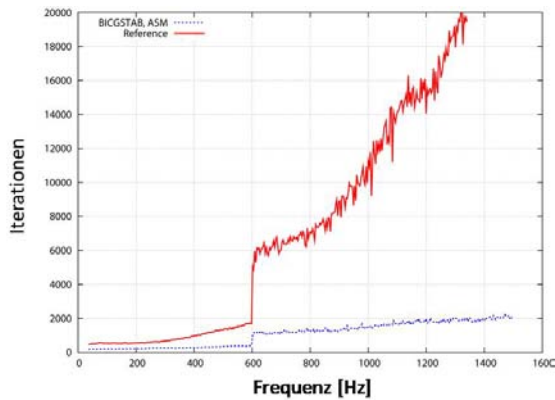
$$g_n(\xi) = (1 - \xi^2)G_{n-2} \quad (1)$$

für Ansatzordnungen  $n \geq 2$  führen, hier vereinfacht für den 1-D Fall dargestellt, auf eine Massenmatrix

$$m_{i,j} = \int_{-1}^1 (1 - \xi^2)^2 G_i G_j d\xi, \quad (2)$$

die exakt mit der Orthogonalitätsbedingung der ultrasphärischen Polynome  $G_n$  übereinstimmt. Dadurch wird die zu den Ansatzordnungen  $n > 2$ gehörende Submatrix der Elementmassenmatrix diagonalisiert, was speziell bei höheren Frequenzen, bei denen die Massenmatrix die

Eigenschaften der Gesamtsystemmatrix zunehmend bestimmt, zu verbesserter Konvergenz der verwendeten iterativen Gleichungslösern führt. Diese Maßnahmen auf Elementebene und eine angepasste Wahl des Gleichungslösers führen insgesamt auf ein numerisch sehr effizientes Verfahren, was durch Bild 2 verdeutlicht wird.



**Bild 2:** Anzahl der benötigten Iterationen des Gleichungslösers für eine typische Reifensimulation unter Verwendung von Standardverfahren (rot, durchgezogen) und unter Berücksichtigung der beschriebenen Maßnahmen (blau, gepunktet)

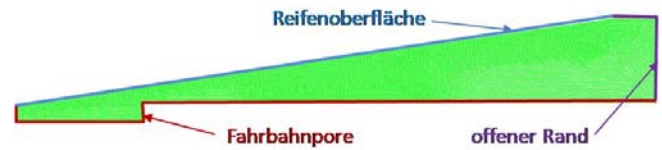
### Erweiterung des Modells um Airpumping-Effekte

Die Reifenschwingungen werden in der Literatur bis ca. 1500Hz als der dominierende Schallentstehungsmechanismus angesehen und sind in dem hier beschriebenen Modell erfasst. Als zweitwichtigste Lärmquelle gilt das sogenannte Airpumping, bei dem aufgrund lokaler Deformationen in der Reifen-Fahrbahn-Kontaktzone mit hoher Geschwindigkeit Luft aus Kavitäten verdrängt wird. Hierbei kann, je nach Ursprung der Kavitäten, zwischen fahrbahntextur- und profilinduziertem Airpumping unterschieden werden. In einem ersten Schritt soll nachfolgend versucht werden, das texturinduzierte Airpumping in das Modell einzubinden.

### Voruntersuchungen

Da die Literatur zu diesem Thema keine eindeutigen und vor allem keine konsistenten Erkenntnisse liefert, wurden vereinfachte numerische Untersuchungen durchgeführt, um das Problemverständnis für dieses strömungsakustische Problem zu erarbeiten. Hierbei wurden zweidimensionale RANS Strömungssimulationen mit *Fluent* durchgeführt, wobei ein RNG k- $\epsilon$  Turbulenzmodell Verwendung fand. Bild 3 zeigt das Berechnungsgebiet und die verwendete Diskretisierung. Es mussten bewegte Ränder mit dynamischer Neuvernetzung berücksichtigt werden, da die als Reifenoberfläche gekennzeichnete Fläche sich vertikal verschob und somit teilweise in die Pore eindrang. Die Berechnungen wurden für unterschiedliche Porengeometrien, Eindringgeschwindigkeiten und Verdichtungsverhältnisse vorgenommen und eine akustische Nachlaufrechnung wurde auf Basis des FWH-Modells durchgeführt. Die Ergebnisse zeigten, dass die Porengeometrie keinen Einfluss auf die Akustik hatte, das Verdichtungsverhältnis nur einen sehr

geringen und die Eindringgeschwindigkeit einen erheblichen.

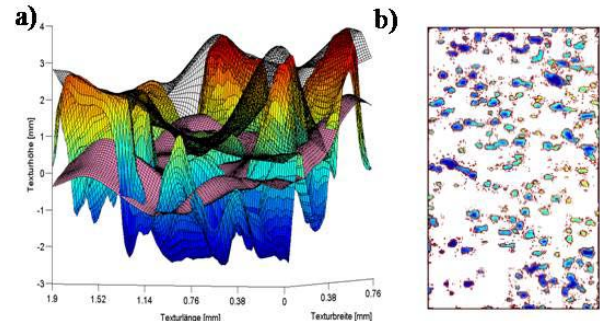


**Bild 3:** Das Berechnungsgebiet der RANS Simulation zur Untersuchung von Airpumping-Effekten.

Zudem lagen die ermittelten Strömungsgeschwindigkeiten bei allen Konfigurationen unter 1Mach. Daraus wurde geschlussfolgert, dass eine Modellierung des Effektes mittels der Monopoltheorie möglich ist.

### Implementierung und Schlussfolgerung

Auf der Grundlage der genannten Ergebnisse wurden Routinen implementiert, die basierend auf den lokalen Kontaktverhältnissen (siehe Bild 4) die verdrängten Luftvolumina ermitteln und daraus wiederum Monopolquellstärken approximieren. Diese Monopole werden im Ein- und Auslauf der Kontaktzone im zuvor beschriebenen akustischen Modell platziert und deren Wirkung unter Berücksichtigung der geometrischen Verhältnisse (Horneffekt) berechnet. Die Ergebnisse bestätigen qualitativ die Dominanz des Effektes im Bereich zwischen 1500-2000Hz, überschätzen derzeit jedoch quantitativ die Realität, sodass weitere Untersuchungen und Modellverfeinerungen nötig sind.



**Bild 4:** a) lokale Kontaktsituation zwischen Reifen und Fahrbahntextur, b) daraus ermittelte Verdrängungsvolumina in der Kontaktzone

### Literatur

- [1] von Estorff, O. et.al.: Ein numerisches Modell zur Untersuchung von Reifen-Fahrbahn-Geräuschen. DAGA (2007),
- [2] Biermann, J., von Estorff, O.: Higher Order Finite and Infinite Acoustical Elements Based on Ultraspherical Polynomial, JASA, submitted 01/2010
- [3] Biermann, J., et.al.: Higher Order Finite and Infinite Elements for the Solution of Helmholtz Problems, CMAME, Vol. 198, Issues 13-14, 3/2009, pp. 1171-118
- [4] D. Dreyer, O.v. Estorff: Improved conditioning of infinite elements for exterior acoustics, Int. J. Numer. Methods Eng. 58 (2003) 933-953