

Der Einfluss der lokalen Variation der Oberflächentextur auf die Simulation von Rollgeräusch und Rollwiderstand

Carsten Hoever¹, Wolfgang Kropp¹, Thomas Beckenbauer²

¹ Chalmers University of Technology, SE-41296 Göteborg, Schweden, Email: carsten.hoever@chalmers.se

² Müller-BBM GmbH, Robert-Koch-Str. 11, 82152 Planegg, Deutschland, Email: thomas.beckenbauer@mbbm.com

Einleitung

In früheren DAGA-Beiträgen [1, 2, 3] wurde das in Abbildung 1 dargestellte Verfahren zur Simulation von Rollwiderstand und Rollgeräusch von PKW-/LKW-Reifen vorgestellt.

Bei der Simulation beider Größen ist dabei die detaillierte Beschreibung der Reifen-/Fahrbahninteraktion essenziell für korrekte Berechnungsergebnisse. Neben leistungsfähigen Modellen werden dabei hochwertige Eingangsdaten benötigt. Dabei spielt die Fahrbahnrauigkeit eine entscheidende Rolle. Entsprechend groß ist der Aufwand für das Scannen der Oberflächentextur: In Fahrtrichtung müssen Strecken von mehreren Metern Länge in einem Abstand von weniger als einem Millimeter gescannt werden. In lateraler Richtung kann eine geringere Auflösung akzeptiert werden; zumeist sind sechs parallele Messspuren ausreichend [4].

Hinsichtlich der Repräsentativität der Texturdaten ergibt sich zudem jedoch auch das in Abbildung 2 gezeigte Problem: Die für die Simulation benutzten Oberflächenscans sind im Vergleich zur Fahrspur des Fahrzeuges während der Rollgeräusch- oder Rollwiderstandsmessung räumlich begrenzt und nicht unbedingt deckungsgleich.

Es wird deswegen untersucht, inwieweit die Rauigkeit an unterschiedlichen Stellen einer Fahrbahn variiert und welchen Einfluss mögliche Variationen auf Simulationen von Rollwiderstand und Rollgeräusch haben.

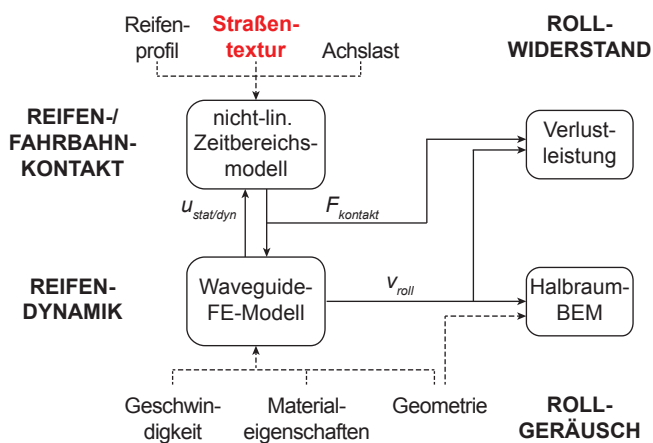


Abbildung 1: Verfahren zur Simulation von Rollgeräusch und Rollwiderstand. $u_{stat/dyn}$ bezeichnet die statische/dynamische Reifenverformung, $F_{kontakt}$ die Kontaktkraft in der Reifen-/Fahrbahninteraktion, und v_{roll} das Schnellefeld des rollenden Reifens.

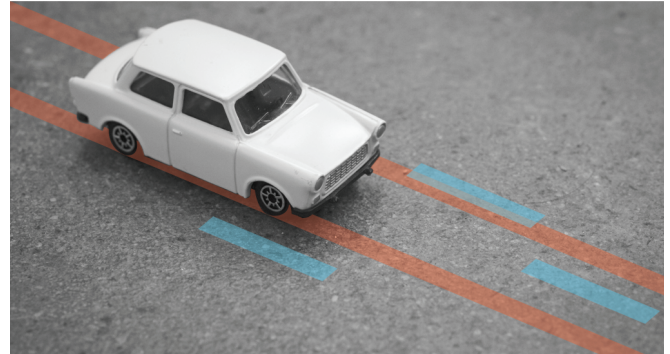


Abbildung 2: Die Oberflächentexturscans weichen in Länge und Position von der Fahrspur des Fahrzeuges während der Rollwiderstands- oder Rollgeräuschmessung ab. Die Eingangsdaten für Messung und Simulation sind somit nicht identisch.

Beschreibung des Simulationsverfahrens

Die Modellierung von Rollgeräusch und Rollwiderstand erfolgt größtenteils analog zu den in [1, 2, 3] vorgestellten Verfahren (siehe auch Abb. 1). Als Basis dient ein effizientes Waveguide-Finite-Element-Modell (WFEM) der Strukturdynamik des Reifens. Dabei wird ein Finite-Elemente-Ansatz im Querschnitt, siehe Abb. 3, mit einem Wellenansatz in Umfangsrichtung kombiniert [5]. Die Materialparameter der Reifen wurden durch den Reifenhersteller für den statischen Fall zur Verfügung gestellt und mittels Vergleich zu gemessenen Mobilitäten für den dynamischen Fall angepasst.

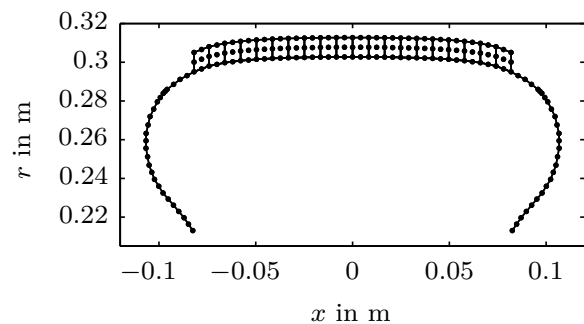


Abbildung 3: WFEM-Diskretisierung des Querschnitts eines 205/55 R16 Glattreifens mit 46 Shell- und 20 Solid-Elementen. Jeder • repräsentiert einen Knoten. In Umfangsrichtung wird ein Wellenansatz benutzt.

Für die Modellierung der Reifen-/Fahrbahninteraktion wird ein nicht-linearer 3D-Zeitbereichsalgorithmus [6] benutzt, welcher für die Rollwiderstandsberechnung um Modelle für kleinmaßstäbliche Verluste und das Reifenprofil erweitert wurde [7, Artikel III]. Der Rollwiderstand bestimmt sich in Form der Verlustleistung aus dem Prinzip der Energieerhaltung über die in den Kontakt eingespeiste Leistung P_{ein} . Diese lässt sich aus Kontaktkraft und -deformation berechnen. Der Rollwiderstandskoeffizient ist damit gegeben als $C_r = P_{\text{ein}}/(F_N V)$, wobei F_N die Achslast und V die Rollgeschwindigkeit sind. Das Reifen-/Fahrbahngeräusch wird mittels eines Halbraum-BEM-Verfahrens [8] aus dem Schnellefeld des rollenden Reifens berechnet.

Beschreibung der Messungen

Es standen Rollwiderstands- bzw. Rollgeräuschdaten aus zwei unterschiedlichen Messreihen zur Verfügung. Für alle Straßenoberflächen beider Messreihen wurde die Oberflächentextur an sechs unterschiedlichen Stellen mit einem Laser gescannt. Jeder Scan besteht aus 10 bis 20 parallelen Linienscans im Abstand von 1 cm, einer Länge von 2 m und einer longitudinalen Auflösung in Fahrtrichtung von 0,2 mm. Für die Simulationen wird die longitudinale Auflösung auf die Diskretisierung des Reifens heruntergerechnet.

Rollwiderstandsmessungen

Gemessene Rollwiderstände für einen 225/60 R16 SRTT PKW-Reifen¹ standen aus [9] für die 18 in Tabelle 1 aufgeführten Oberflächen einer Teststrecke in Klosterzande (NL) zur Verfügung. Die Fahrgeschwindigkeit betrug 80 km/h, die Achslast 4100 N und der Reifennendruck 200 kPa. Die Messdaten liegen als Mittelwert über fünf Einzelmessungen vor.

Tabelle 1: Oberflächen der Rollwiderstandsmessungen

Oberfläche	Abkürzung	Korngrößen (Schichtdicke)
ISO 10844 dichter	ISO DAC	- 0/16
Apshaltbeton		
Dünnschichtasphalt	TLA	2/4, 2/6, 4/8
Splittmastixasphalt	SMA	0/6, 0/8, 0/11, 0/16
offenporiger Asphalt	PAC	2/4, 2/6, 4/8, 0/11, 8/11 (45 mm), 8/11 (200 mm)
abgestreut	SD	5/8, 11/16

¹Simuliert als 205/55 R16 mit 46 Shell- und 20 Solid-Elementen im Querschnitt und einer Auflösung in Umfangsrichtung von ca. 2 mm.

Rollgeräuschmessungen

Auf einer Teststrecke in Geilenkirchen wurden CPX-Rollgeräuschmessungen eines 315/80 R22.5 LKW-Antriebsachsenreifens² auf einem Splittmastixasphalt SMA 0/8 S und einer lärmoptimierten Asphaltdeckschicht LOA 5D durchgeführt. Die Achslast betrug 2000 kg, der Reifennendruck 670 kPa und die Fahrgeschwindigkeit 60 km/h.

Ergebnisse

Variation der Oberflächenrauigkeit

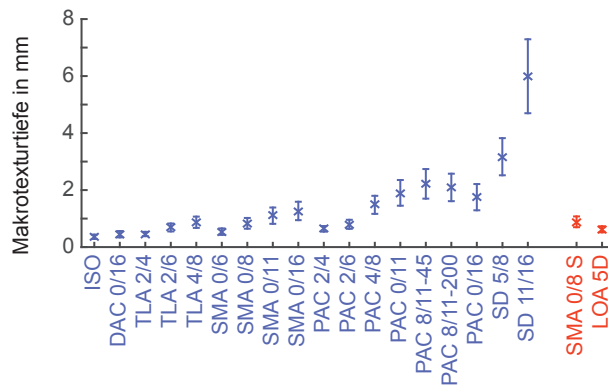


Abbildung 4: Mittelwert (x) und Standardabweichung (Fehlerbalken) der Makrotexturtiefe MPD an den sechs verschiedenen Scanpositionen pro Oberfläche. Oberflächen für den Rollwiderstand in blau, für das Rollgeräusch in rot.

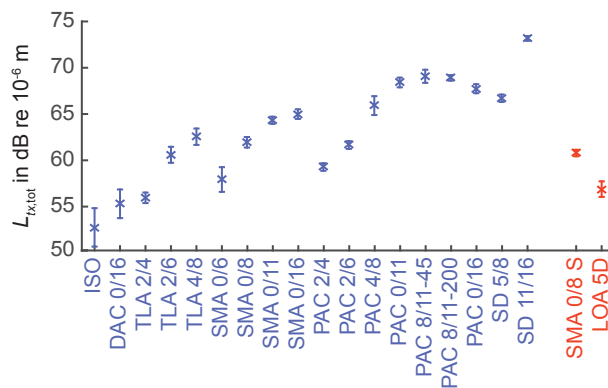


Abbildung 5: Mittelwert (x) und Standardabweichung (Fehlerbalken) des summierten Pegels des Texturspektrums $L_{tx,tot}$ an den sechs verschiedenen Scanpositionen pro Oberfläche. Oberflächen für den Rollwiderstand in blau, für das Rollgeräusch in rot.

Zur Bewertung der Oberflächenrauigkeit wird die Makrotexturgröße MPD benutzt, da diese sehr gut mit dem Rollwiderstand korreliert, siehe z.B. [10]. In Abb. 4 sind für alle Oberflächen die Mittelwerte und die Standardabweichungen der MPD über die jeweiligen sechs Scanpositionen zu sehen. Es zeigt sich eine geringe Variation der MPD für glattere Oberflächen. Mit steigender Makrotexturtiefe, d.h. Rauigkeit, steigt die Variation jedoch auf eine Standardabweichung von bis zu 20 %.

²Simuliert mit 126 Solid- und 65 Shell-Elementen im Querschnitt und einer Auflösung in Umfangsrichtung von ca. 2 mm.

Zur Bewertung der spektralen Eigenschaften der Oberflächentexturen wird auch das Texturspektrum betrachtet. Aus Platzgründen kann dies allerdings nur in Form des summierten Totalpegels $L_{tx,tot}$ erfolgen. Die Ergebnisse sind in Abb. 5 zu sehen und zeigen ebenfalls eine geringe Variation für die meisten Oberflächen. Nur vier Oberflächen haben eine Standardabweichung > 1 dB (max. 2,2 dB für ISO). Im Vergleich zur Makrotexturtiefe in Abb. 4 ergibt sich eine andere Rangfolge der Oberflächen und die Standardabweichung korreliert nicht mit dem Mittelwert.

Variation des simulierten Rollgeräusches

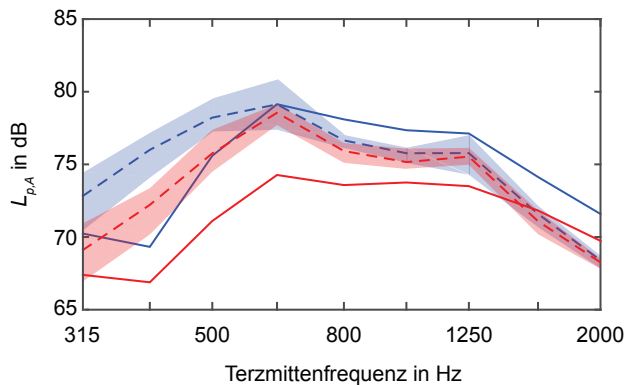


Abbildung 6: CPX-Rollgeräuschpegel für die SMA 0/8 S und die LOA 5D Oberflächen: Mittelwerte (---) und Wertebereich (farblich hinterlegt) der Simulationen im Vergleich zu den Messungen (—).

Für jede der sechs Positionen, für die die Textur der für die Rollgeräuschmessungen benutzten Oberflächen gemessen wurde, wird separat das Rollgeräusch berechnet. Der Wertebereich und die Mittelwerte über alle sechs Simulationen sind in Abb. 6 zusammen mit den Messergebnissen präsentiert. Für die SMA 0/8 S Oberfläche ergibt sich eine gute Übereinstimmung der Messung mit dem Mittelwertes der Simulationen. Die Einzelergebnisse der Simulationen für die sechs Texturscans variieren jedoch je nach Terzband um 2 dB bis 4 dB.

Für die LOA 5D Oberfläche zeigt sich eine mittlere Überschätzung des Messwertes um 3 dB, wobei die Simulationsergebnisse je nach Texturscan um 1 dB bis 3 dB pro Terzband variieren.

Die deutliche Variation der Simulationsergebnisse für beide Oberflächen ist insofern überraschend, als sowohl die Variation der Makrotexturtiefe in Abb. 4, als auch die Variation des summierte Texturspektrums in Abb. 5, relativ gering ist. Dabei korreliert allerdings die größere Schalldruckpegelvariation für die SMA 0/8 S im Vergleich zur LOA 5D mit einer etwas größeren Variation der Makrotexturtiefe in Abb. 4.

Variation des simulierten Rollwiderstandes

Auch für den Rollwiderstand wird für jeden der sechs Texturscans pro Oberfläche eine Berechnung durchgeführt. Die resultierenden Mittelwerte und Standardabweichungen sind im Vergleich zu den Messergebnissen

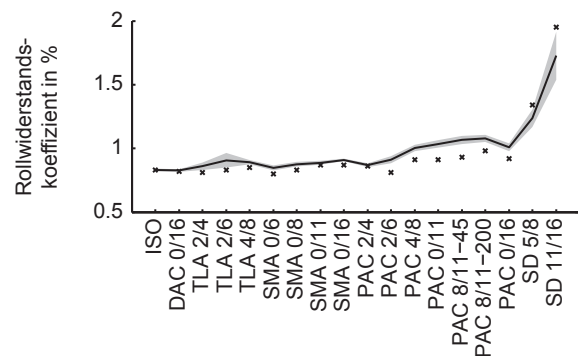


Abbildung 7: Rollwiderstände für 18 verschiedene Oberflächen: Mittelwerte (—) und Standardabweichung (grau hinterlegt) der Simulationen im Vergleich zu den Messungen (×).

in Abb. 7 dargestellt. Für die meisten Oberflächen gibt es eine gute Übereinstimmung der Messergebnisse mit den Mittelwerten der Simulationen. Die durchschnittliche Standardabweichung für die Simulationsergebnisse der jeweiligen Texturscans liegt bei etwa 1 % bis 3 %. Lediglich für die TLA 2/6 und die beiden, sehr rauen, SD-Oberflächen ergibt sich eine höhere Standardabweichung von 5 % bis 10 %. Für einen Großteil der Oberflächen korreliert die Variation des simulierten Rollwiderstandes mit der Variation der Makrotexturtiefe MPD in Abb. 4. Ein Bezug zum summierten Texturpegel $L_{tx,tot}$ in Abb. 5 kann nicht festgestellt werden.

Zusammenfassung

Bei der Bewertung der Variation der Oberflächenrauigkeit über die unterschiedlichen Scanpositionen zeigen sowohl die Makrotexturtiefe als auch der summierte Pegel des Texturspektrums Unterschiede in der Oberflächenrauigkeit an. Das Ausmaß dieser Unterschiede variiert je nach Oberfläche. Die Oberflächen mit starker Variation sind nicht identisch für die beiden Kenngrößen. Weiterhin gibt es eine unterschiedliche Bewertung der Oberflächen durch die beiden Kenngrößen hinsichtlich der Amplitude und Variation der Rauigkeit.

Es ist ein Einfluss der Texturvariationen auf die Simulationsergebnisse erkennbar: Für beide Oberflächen variiert das simulierte Rollgeräusch relativ deutlich mit den Scanpositionen. Dies trotz einer vergleichsweise geringen Variation der Oberflächentextur (siehe Abbildungen 4 und 5). Die Variation des simulierten Rollwiderstandes ist im Mittel vernachlässigbar, jedoch mit Ausnahme einiger weniger Oberflächen, für die relativ deutliche Variationen zu verzeichnen sind.

Simulationen sollten daher für das Rollgeräusch für alle Oberflächen, und für den Rollwiderstand zumindest für rauere Oberflächen, immer für mehrere Scanpositionen pro Oberfläche und anschließender Mittelwertbildung durchgeführt werden.

Es kann kein Zusammenhang zwischen den summierten Pegeln des Texturspektrums und der Variation der Simulationsergebnisse festgestellt werden. Dabei muss ein-

schränkend angemerkt werden, dass dies an der Darstellung des Texturspektrums als Einzahlwert liegen kann. Eine genauere Analyse der Spektren in Terzbändern führt möglicherweise zu anderen Ergebnissen.

Die Variation der Makrotexturtiefe scheint einen leichten Einfluss auf die Variation des simulierten Rollgeräusches und, wie nach [10] zu erwarten, einen deutlichen Einfluss auf die Variation des simulierten Rollwiderstandes zu haben.

Danksagung

Teile dieses Forschungsvorhabens wurden finanziell unterstützt durch das BMWi-Projekt *Leiser Straßenverkehr 3*.

Literatur

- [1] Hoever, C. und Kropp, W.: Simulationsbasierte Parameterstudie zum Zusammenhang zwischen Rollgeräusch und Rollwiderstand von PKW-Reifen. DAGA 2012, Darmstadt, 419–420
- [2] Hoever, C. und Kropp, W.: The influence of modeling parameters on the simulation of car tyre rolling noise and rolling resistance. AIA-DAGA 2013, Meran, 1601–1604
- [3] Hoever, C. und Kropp, W.: Numerische Simulation von Rollgeräusch und Rollwiderstand von LKW-Antriebsachsenreifen. DAGA 2014, Oldenburg, 108–109
- [4] Hoever, C. und Kropp, W.: The influence of lateral road surface resolution on the simulation of car tyre rolling losses and rolling noise. Internoise 2013, Innsbruck
- [5] Finnveden, S. und Fraggstedt, M.: Waveguide finite elements for curved structures, *Journal of Sound and Vibration* 312 (2008), 644–671
- [6] Andersson, P.B.U. und Kropp, W.: Time domain contact model for tyre/road interaction including nonlinear contact stiffness due to small-scale roughness. *Journal of Sound and Vibration* 318 (2008), 296–312
- [7] Hoever, C.: The simulation of car and truck tyre vibrations, rolling resistance and rolling noise. Dissertation Chalmers University of Technology, Göteborg, 2014
- [8] Kropp, W. *et al.*: On the sound radiation of a rolling tyre. *Journal of Sound and Vibration* 331 (2012), 1789–1805
- [9] Boere, S. und van Blokland, G.J.: Influence of road surface properties on rolling resistance of car tyres. Bericht M+P.DVS.08.17.1, M+P – consulting engineers, 2008.
- [10] Ejsmont, J.A. *et al.*: Intermediate report on rolling resistance. PERSUADE Deliverable D.6.2, Technical University of Gdansk, 2014