

# Statistische Modellierung des Zusammenhangs zwischen Waschbeton-Fahrbahntextur und Rollgeräusch

Reinhard Wehr<sup>1</sup>, Claus Aichinger<sup>1</sup>

<sup>1</sup> AIT Austrian Institute of Technology, 1210 Wien, Österreich, Email: reinhard.wehr@ait.ac.at

## Einleitung

Aufgrund ihrer langen Lebensdauer und niedrigen Lärmemissionen sind Fahrbahndecken in Waschbetonbauweise im hochrangigen Straßennetz in Österreich weit verbreitet. In erster Linie werden dabei Bauweisen mit einem Größtkorn von 8 bzw. 11 mm verwendet, wobei in letzter Zeit in erster Linie Deckschichten mit Größtkorn 8 mm eingesetzt werden. Im Zuge des Forschungsprojekts OSILAWA [1], finanziert durch das Förderprogramm „Mobilität der Zukunft“, wurde an einer weiterführenden Optimierung von Betonfahrbahndecken in Bezug auf ihre akustischen Eigenschaften gearbeitet. Dazu wurden kombinierte Messungen der 2D-Textur und des Rollgeräusches mittels ISO/CD 11819-2 (CPX-Methode, [2]) durchgeführt und eingehend analysiert. Durch eine multivariate statistische Modellbildung wurde es ermöglicht, Informationen zum Zusammenhang zwischen der Fahrbahntextur und dem daraus resultierenden Rollgeräusch zu gewinnen und die akustischen Eigenschaften von neuen bzw. alternativen Texturen zu prognostizieren.

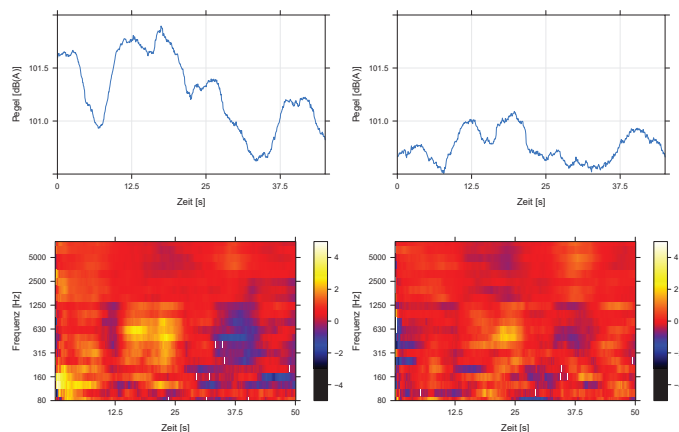
## Messung von Textur und Rollgeräusch

Zur Schaffung einer ausreichenden Datenbasis für die statistische Analyse wurden kombinierte Messungen von Textur und Rollgeräusch durchgeführt. Dazu wurde ein Linientextursensor direkt vor dem Messreifen eines CPX-Rollgeräuschanhängers installiert. Dadurch kann, im Gegensatz zu separaten Messungen, sichergestellt werden, dass die das Rollgeräusch verursachende Textur, welche in das reale Reifen/Fahrbahnssystem eingeht, zeitsynchron erfasst wird.

### Rollgeräusch

Das Rollgeräusch wurde mittels eines CPX-Systems erhoben und die Mikrophonsignale in 5-Sekunden-Blöcken ausgewertet. Durch die konstante Fahrgeschwindigkeit von 80 km/h entspricht dies einer jeweiligen Abschnittsmittelung über ca. 100 m. Die hohe Korrelation zwischen dem vorderen und hinteren Messmikrophon zeigt, dass die beiden Mikrophonpositionen vergleichbare Pegelverläufe aufweisen. Daher wurden, ohne Beschränkung der Allgemeinheit, in den weiteren Untersuchungen lediglich die Messdaten des hinteren Mikrophons berücksichtigt.

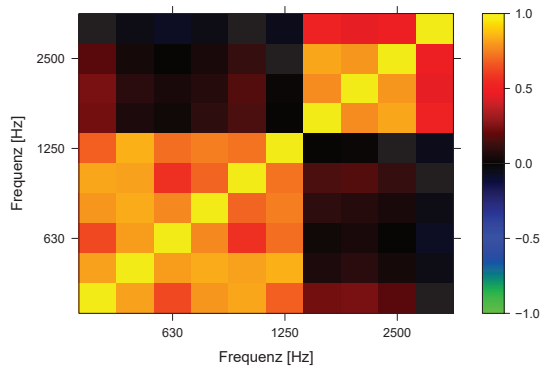
Ebenfalls wurden die Rollgeräuschemissionen in der rechten und linken Radspur des CPX-Messsystems verglichen. In Abbildung 1 ist ein Terzbandpegel-Verlauf der rechten und linken Radspur für eine beispielhafte Messstrecke dargestellt, dabei sind die einzelnen Terzbandpe-



**Abbildung 1:** Vergleich der Gesamt- und relativen Terzband-Pegel der rechten und linken Rollspur einer beispielhaften CPX-Messung; vor allem in den relativen Terzbandpegeln ist der Zusammenhang zwischen den beiden Rollspuren deutlich sichtbar.

gel auf ihre jeweiligen Mittelwerte innerhalb der Messstelle normiert, sodass ein allgemeines Bild über die vorliegenden Relativpegel in der Messstelle gewonnen werden kann. Man erkennt vor allem in den relativen Terzbandpegeln deutlich ein vergleichbares Emissionsverhalten; dies ist insofern nicht selbstverständlich, als die relativen Pegeländerungen innerhalb der Messstrecke trotz selbem Bauloses im Bereich von  $\pm 3$  dB schwanken. Es kann daher angenommen werden, dass lokale Variationen der das Rollgeräusch beeinflussenden Textur durchaus homogen über beide Rollspuren hinweg auftreten. Das hier beschriebene Verhalten zeigt sich ebenfalls bei Wiederholung einer Messfahrt innerhalb der jeweiligen Rollspur.

Des Weiteren kann ein vergleichbares Verhalten des Terzbandpegelverlaufes in den Terzbändern unter bzw. ober 1250 Hz beobachtet werden. In Abbildung 2 ist dazu die Korrelationsmatrix (Pearson-Korrelation) der Terzbandpegel eines Mikrophons der selben Messfahrt dargestellt. Dabei ist eine Trennung bzw. Block-Bildung der Korrelationen oberhalb des Terzbandes bei 1250 Hz klar zu sehen. Dieses Verhalten kann mit hoher Sicherheit auf die verschiedenen Generationsmechanismen des Rollgeräusches zurückgeführt werden, die in unterschiedlichen Frequenzbereichen wirken. Während hochfrequentes Air-Pumping durch eine hohe Texturtiefe verringert wird, kommt es in den tieffrequenten Emissionsbereichen durch vermehrte Reifenvibrationen zu erhöhter Rollgeräuschabstrahlung.



**Abbildung 2:** Korrelationsmatrix (Pearson-Korrelation) der Rollgeräusch-Terzbandpegel eines Mikrophones einer Messfahrt; eine Trennung der Korrelation über 1250 Hz ist erkennbar.

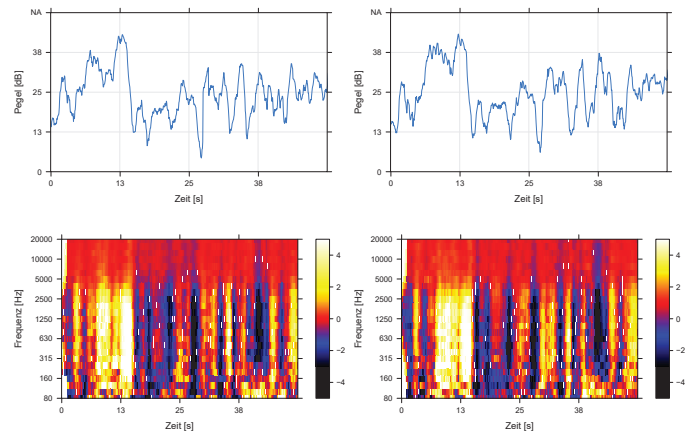
### Textur

Die Fahrbahntextur wurde mittels Linientextursensor gemessen, wobei das Sensorsignal als Zeitsignal aufgenommen und weiter analog zu den akustischen Signalen analysiert wurde. Durch die konstante Messgeschwindigkeit existiert hier ein linearer Zusammenhang zwischen Orts- und Zeit- bzw. Frequenzraum, wobei das Textursignal im Zeitbereich die reale Eingangsfunktion in das Reifen-Fahrbahnsystem beschreibt.

Wie schon im Falle der CPX-Messungen wurde die Wiederholbarkeit der Messungen betrachtet. Dabei wurden die in der Fahrbahntextur klar sichtbaren Übergangsstellen zwischen den einzelnen Waschbetonplatten aus der weiteren Analyse entfernt, da die Peakstrukturen in der Frequenzanalyse durch ihren breitbandigen Einfluss die eigentlichen Texturdaten maskieren, ohne (bei gutem Fahrbahndeckenzustand) einen relevanten Einfluss auf die Schallemission zu haben.

Abbildung 3 zeigt den Gesamtpegelverlauf sowie die Relativ-Terzbandpegel bei Wiederholung einer Texturmessung. Auch hier ist eine gute Wiederholbarkeit sowohl in Bezug auf ihren Gesamtpegel- als auch auf den Terzband-aufgelösten Verlauf zu sehen. Zu beachten ist hier die merkliche Variation der Texturpegel innerhalb einer einzelnen Messstelle sowie deren Wiederholbarkeit trotz Messung einer Linientextur bei unterschiedlicher Messlinie. Es kann daher der Schluss gezogen werden, dass die Texturvariation durchaus ein lokales Phänomen innerhalb eines Unterabschnittes der Messstrecke darstellt und eine punktuelle Texturmessung für eine vollständige Charakterisierung einer gesamten Messstrecke ungenügende Informationen beinhaltet.

Wie auch aus der Korrelationsmatrix in Abbildung 4 ersichtlich, trennt sich das Texturspektrum ebenso wie schon in den CPX-Daten in zwei unterschiedliche Bereiche auf. Dieser Übergang erfolgt dabei weicher als bei den Akustik-Daten bei einer Frequenz zwischen 2500 und 6300 Hz, was einer Texturwellenlänge zwischen ca. 8 und 4 mm, d.h. dem Bereich des Größtkorns der Fahrbahn-



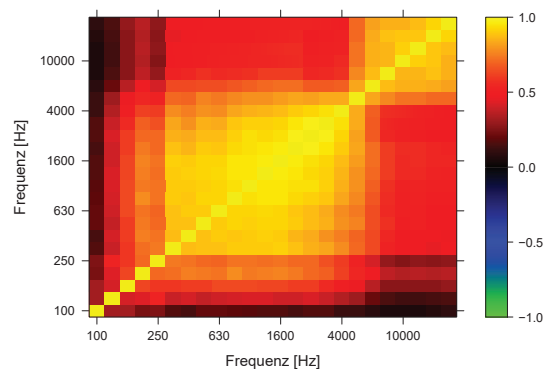
**Abbildung 3:** Vergleich der Gesamt- und relativen Terzband-Pegel der Texturmessung zweier Messfahrten; vor allem in den relativen Terzbandpegeln ist der Zusammenhang zwischen den beiden Messungen deutlich sichtbar.

deckschicht, entspricht.

Ein direkter Vergleich der jeweiligen Korrelationsmatrizen der Akustik- und Texturterzbanddaten gibt bereits einen Hinweis auf einen möglichen funktionalen Zusammenhang. Dies sollte es ermöglichen, aus wenigen Texturterzbandern Rückschlüsse auf die Schallemission zu ziehen.

### Modellbildung

Für die Modellierung des Zusammenhanges zwischen Fahrbahntextur und Rollgeräusch wurde ein multivariater linearer statistischer Ansatz gewählt. Als Eingangsdaten dienen dabei die Texturterzbander, wobei einerseits die Fahrbahntextur ohne vorherige Filterung als auch eine Oberflächeneinhüllende in Terzbander zerlegt wurde. Die einzelnen zu beschreibenden Akustik-Terzbander wurden vor der Modellierung sowohl geschwindigkeits- als auch temperaturkorrigiert, ebenfalls wurde eine Korrektur der shore-A-Härte des Messreifens durchgeführt. Diese ist jedoch für die in das Modell eingehenden Messabschnitte aufgrund desselben verwendeten Messrei-



**Abbildung 4:** Korrelationsmatrix (Pearson-Korrelation) der Textur-Terzbandpegel einer Messfahrt; eine Trennung der Korrelation im Bereich von 5000 Hz ist erkennbar.

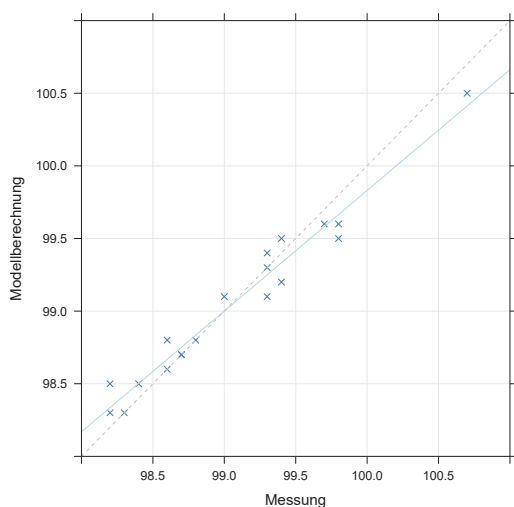
fens konstant. In das Modell gehen aktuell insgesamt ca. 30 km unabhängige Messdaten von knapp 20 Messabschnitten von Waschbetonfahrbahndecken ein.

Für jedes interessierende Akustik-Terzband (Frequenzbereich zwischen 315 und 5000 Hz) wurde ein separates lineares Modell in der Form von (1) erstellt.

$$L_{pA,i}^{acou} = \sum_{j=1}^N \alpha_{i,j} \cdot L_j^{tex} + \epsilon_j \quad (1)$$

Dabei bezeichnet  $L$  den jeweiligen CPX- bzw. Texturterzbandpegel. Aufgrund der Vielzahl an möglichen Eingangsparametern wurde eine schrittweise Parameterauswahl anhand des Akaike Information Criterion (R-MASS stepAIC, [3]) angewandt. Ziel war es, die Anzahl an beschreibenden Parametern pro CPX-Terzband auf unter 10 zu begrenzen. Dabei können für verschiedene CPX-Terzbänder unterschiedliche Untergruppen der Textur in das jeweilige Modell eingang finden, da anzunehmen ist, dass verschiedene Textur-Wellenlängenbereiche verschiedene Rollgeräuschmechanismen beeinflussen.

Nach der algorithmischen Parameterwahl werden die einzelnen CPX-Terzbänder von 4 bis 8 verschiedenen Textur-Terzbändern beschrieben. Das Bestimmtheitsmaß der einzelnen Terzband-Modelle liegt zwischen 0.26 und 0.81, wobei vor allem die Terzbänder um 1 kHz, die das Rollgeräusch maßgeblich begründen, ein hohes Bestimmtheitsmaß aufweisen. Eine Reevaluierung des Modells in Bezug auf den Gesamtpegel weist für die 5-Sekunden-Abschnitte ein Bestimmtheitsmaß von 0.80 sowie einen Standardfehler von ca. 0.40 dB(A) auf. Vor allem bei Mittelung über die jeweiligen Messstrecken ergibt sich ein konsistentes Bild (Abbildung 5) und eine gute Reproduktion der Eingangswerte.



**Abbildung 5:** Zusammenhang der Messergebnisse und der aus dem Gesamtmodell berechneten Mittelungspegel über die jeweiligen Messstrecken

## Zusammenfassung und Ausblick

Es konnte gezeigt werden, dass die Fahrbahntextur als Eingangsfunktion in ein multivariates Regressionsmodell genügt, um das resultierende Rollgeräusch mit zufriedenstellender Genauigkeit zu beschreiben. Eine Reevaluierung der Eingangswerte zeigt eine gute Reproduktionsgenauigkeit, das Modell ist in sich konsistent. Erste Vergleiche anhand von unabhängigen Messungen zeigen ebenfalls eine gute Prognosegenauigkeit des Modells.

Grundsätzlich muss aber beachtet werden, dass das vorgestellte Modell in erster Linie für dichte Fahrbahndecken Gültigkeit aufweist. Durch die Parameterreduktion wurde ein „Over-Fitting“ des Modells verhindert und gleichzeitig vermieden, dass korrelierte Variablen eingehen. Damit gehen einige Textur-Terzbänder nicht in das Modell selbst ein. Sollten nun Prognosen für Fahrbahndecken berechnet werden, die im Gegensatz zu den untersuchten Waschbetondecken gerade in diesen Terzbändern eine hohe Variation aufweisen, können diese Einflüsse nicht abgebildet werden. Poröse Deckschichten sowie anisotrop texturierte Strukturen wie z.B. Grinding-Fahrbahndecken können zum aktuellen Zeitpunkt aufgrund der in das Modell eingehenden Linientextur nur unzureichend beschrieben werden. Eine Verallgemeinerung durch Einbeziehung dieser Parameter ist allerdings durchführbar und wird in Zukunft angestrebt.

## Danksagung

Teile der in diesem Paper vorgestellten Arbeit wurden im Zuge des Projektes „Oberflächenstrukturen für innovative lärmarme Waschbetonfahrbahndecken - OSILAWA“, das durch die FTI-Initiative „Mobilität der Zukunft“ gefördert wurde, durchgeführt. Die Autoren möchten sich ebenfalls bei den Projektpartnern Forschungsinstitut der Österreichischen Zementindustrie, Smart Minerals GmbH, PMS-Consult sowie der Österreichische Betondecken Ausbau GmbH für die konstruktive Zusammenarbeit bedanken.

## Literatur

- [1] Wehr, R., Haider, M and Kriegisch, M.: Forschungsprojekt OSILAWA - Einfluss der Fahrbahntextur auf das Reifen-Fahrbahngeräusch bei Betondecken. DAGA 2015 (2015), 1390-1391
- [2] ISO/CD 11819-2: Acoustics - Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise - Part 2: The close-proximity-method. (2013)
- [3] Venables, W. N. and Ripley, B. D.: Modern Applied Statistics with S. Springer Verlag, (2002)