

# Machine-learning-Ansätze zur Vorhersage von Rollgeräuschemissionen

Reinhard Wehr<sup>1,2</sup>, Andreas Fuchs<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup> *Technische Universität Wien, 1040 Wien, Österreich,*

<sup>3</sup> *Austrian Institute of Technology GmbH, 1210 Wien, Österreich, Email: andreas.fuchs@ait.ac.at*

## Einleitung

Mit zunehmenden Verkehrsmengen wird der Bedarf an dauerhaften lärmindernden Straßendeckschichten deutlich. Um dabei die Entstehungsmechanismen des Rollgeräusches besser zu verstehen, müssen die Lärmemissionen mit den Oberflächentexturen der Fahrbahnen, die als Anregungsfunktionen der Reifenschwingungen wirken, gemeinsam betrachtet werden. Dabei können neben einem physikalischen Simulationsansatz Methoden des maschinellen Lernens bzw. der statistischen Datenanalyse eingesetzt werden.

Im Gebiet des maschinellen Lernens können dabei zwei Ansätze unterschieden werden: einerseits kann das Ziel der Modellerstellung die Vorhersage der Zielparameter mit höchstmöglicher Genauigkeit sein, ohne Kenntnisse über die Vorgänge bei der Prognose zu fordern. Andererseits kann der Fokus der Modellerstellung weniger auf der Prognose als vielmehr auf dem Verständnis die Zielgröße in die eine oder andere Richtung beeinflussender Eingangsparameter liegen. Ziel dieses Papers ist es, mehrere Modelle der statistischen Datenanalyse auf dem selben Datensatz anzuwenden und die Ansätze anschließend zu vergleichen. Der Fokus liegt dabei in erster Linie auf der Identifikation von das Rollgeräusch beeinflussenden Texturparametern, um in weiterer Folge Aussagen über die vermuteten Wirkmechanismen tätigen zu können. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Modellierungen jeweils für den Umfang der Eingangsdaten Gültigkeit besitzt. Darüberhinausgehende Schlüsse, die einer Extrapolation über den Eingangsdatensatz hinaus entsprechen, sind mit dementsprechenden Unsicherheiten behaftet.

## Datensatz

Der die Grundlage der weiteren Modellierung bildende Datensatz setzt sich aus simultan durchgeführten Rollgeräusch- und Fahrbahntexturmessungen zusammen. Die Rollgeräuschmessungen wurden dabei nach der CPX-Methode [1] erhoben, als Messreifen wurde der Reifen P1 [2] verwendet. Da anzunehmen ist, dass die Emissionen frequenzabhängig durch verschiedene Wirkmechanismen hervorgerufen werden, wurden die Terzbandpegel separat betrachtet. Eine Pearson-Korrelation der einzelnen Terzbänder zeigte dabei hohe Ähnlichkeiten in den tief- (315 - 800 Hz), mittel- (1000 - 1250 Hz) und hochfrequenten (1600 - 5000 Hz) Rollgeräuschpegeln. Der Übersichtlichkeit halber wurden die Terzbänder daher für die folgenden Analysen in diese Frequenzbereiche zusammengefasst, die prinzipielle Vorgangsweise bleibt aber davon unberührt. Im vorliegenden Paper wird im Weite-

ren beispielhaft nur der tieffrequente Rollgeräuschbereich vorgestellt, der in erster Linie von Reifenvibrationen als Anregungsmechanismus dominiert wird. Die weiteren Frequenzbereiche können äquivalent betrachtet werden.

Zur Verwendung als Eingangsdaten in die Modellierung wurden 3D-Texturmessungen der Fahrbahntextur durchgeführt. Die Texturmessungen wurden dabei kontinuierlich direkt vor dem Messreifen aufgenommen. Damit kann sichergestellt werden, dass die gemessene Fahrbahntextur tatsächlich als Anregungsfunktion in den Reifen/Fahrbahnkontakt eingeht. Die Auflösung der Oberflächentextur beträgt bei einer Aufnahmebreite von ca. 7 cm dabei ca. 75  $\mu\text{m}$ , womit angenommen werden kann, dass die das Rollgeräusch beeinflussenden Oberflächeneigenschaften durch die Messung vollständig abgebildet werden. Nachdem für die 3D-Oberflächentextur im Gegensatz zur Linientextur von Fahrbahndecken bisher keine genormten Texturparameter vorliegen, wurden vor allem die Struktur der Oberfläche beschreibende Parameter berechnet. Diese umfassen beispielsweise die Dichte der lokalen Maxima, deren Höhenverteilung, einen dem MPD der Linientextur nachempfundenen Parameter, sowie die Gradienten der Oberfläche in bzw. normal zur Fahrtrichtung.

Der Datensatz setzt sich aus über 50 einzelnen Messabschnitten zu jeweils ca. 500 m Messlänge zusammen. Die Messungen wurden bei 60 km/h im Fließverkehr durchgeführt, bei den gemessenen Fahrbahndecken handelt es sich ausschließlich um Splittmastixasphalte mit einem Alter von 1 bis 21 Jahren.

## Lineare 2-Parameter-Modellierung

Als erster Ansatz wird eine lineare 2-Parameter-Modellierung vorgestellt. Dabei wird nicht notwendigerweise von einem direkten linearen Zusammenhang zwischen Modelleingangs- und Ausgangsgröße ausgegangen, jedoch wird eine mögliche bekannte Transformation der Eingangsdaten hin zu einem linearen Zusammenhang vorausgesetzt. Als Beispiel kann dazu die Geschwindigkeitsabhängigkeit des Rollgeräusches genannt werden, die über die Logarithmierung der Geschwindigkeit linearisiert werden kann.

In einem ersten Schritt wird für das tieffrequente Rollgeräusch für alle möglichen Parameterkombinationen ein zweidimensionales lineares interagierendes Modell gesucht. Die Beschränkung auf ein 2-Parameter-Modell erfolgt dabei, um eine Überanpassung des Modells zu verhindern und die weitere Interpretation zu erleichtern. Die

Modellerstellung der einzelnen Parameterkombinationen basiert auf einem Trainingsdatensatz, der 75% der vorhandenen Daten beinhaltet. Das erstellte Modell wird am verbleibenden Testdatensatz evaluiert und daraus die Parameterkombination mit dem besten Bestimmtheitsmaß gewählt. Zur Vermeidung eines Bias durch Ausreißer im Datensatz und zur Abschätzung der Aussagekraft des Modellansatzes wird dieser Vorgang 1000x durchgeführt (Bootstrapping). Bis auf wenige Bootstrapping-Durchläufe werden Bestimmtheitsmaße im Modelltest von über 0,8 erreicht.

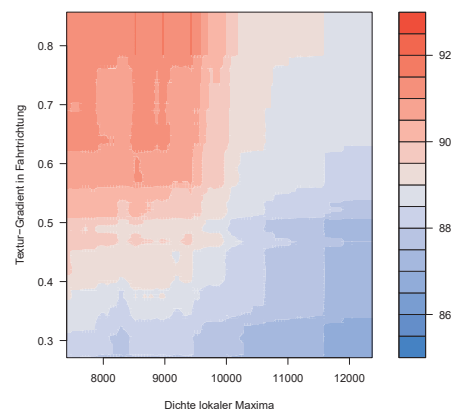
Die am häufigsten auftretende Parameterkombination ist die Anzahl lokaler Maxima mit dem Textur-Gradienten in Fahrtrichtung. Wertet man nun das Modell auf Basis dieser beiden Parameter auf dem gesamten Datensatz aus, so erhält man die Ergebnisse der Tabelle 1. Bei einem Bestimmtheitsmaß von 0,86 und einem Standardfehler von 0,5 dB weist der p-Wert des Modells den Textur-Gradienten in Fahrtrichtung als relevantesten Eingangsparameter aus. Ein hoher Wert des Gradienten führt hierbei zu einem Anstieg in den tieffrequenten Rollgeräuschanteilen. Der nach dem p-Wert geordnet zweite relevante Wert der Regressionsanalyse ist der Interaktionsterm zwischen den Parametern der Dichte an lokalen Maxima und dem Textur-Gradienten in Fahrtrichtung. Das negative Vorzeichen bedeutet in diesem Fall, dass ein hoher Wert des Produktes der beiden Parameter mit einer Verringerung der modellierten tieffrequenten Rollgeräuschemissionen in Zusammenhang steht. Im Sinne eines möglichst geringen Textur-Gradienten führt dies zur Forderung einer gleichzeitig möglichst hohen Dichte lokaler Maxima, selbst wenn der dritte, am wenigsten signifikante Term der Dichte lokaler Maxima dem wieder leicht entgegenwirkt.

	Estimate	Std.-Fehler	p-Wert
(Intercept)	79.553	2.854	< 2e-16
Dichte Max.	0.001	0.000	5.56e-02
Gradient	35.842	6.859	3.40e-06
Dichte:Gradient	-0.003	0.001	2.21e-04

**Tabelle 1:** Ergebnisse des zweidimensionalen interagierenden linearen Regressionsmodells - tieffrequenter Rollgeräuschbereich

## 2-Parameter Random Forest Regression

Die zweite hier vorgestellte Möglichkeit, die Zusammenhänge zwischen Rollgeräusch und Fahrbahtextur zu interpretieren, liegt in der Random Forest Regression. Dabei werden basierend auf den Eingangs- und Ausgangsfunktionen des Modells Entscheidungsbäume erstellt, die es ermöglichen, die Zusammenhänge zwischen den Parametern zu visualisieren. Nichtlinearitäten werden ohne Kenntnis der zugrundeliegenden Funktionen berücksichtigt. Dies führt im Allgemeinen zu einer höheren Prognosegenauigkeit am Datensatz, jedoch kann dadurch die Interpretierbarkeit der Modellergebnisse stark eingeschränkt werden. Eine Visualisierung des Random Forest Ansatzes ist in Abbildung 1 ge-



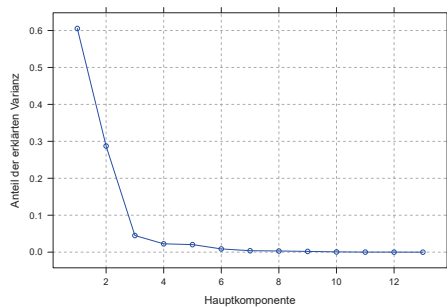
**Abbildung 1:** Zusammenhang zwischen dem Textur-Gradienten, der Dichte lokaler Maxima und dem (durch die Farbkodierung dargestellten) tieffrequenten Rollgeräusch auf Basis einer Random Forest Regression.

zeigt. Dabei wurden die selben Modelleingangsparameter wie schon im Abschnitt der linearen 2-Parameter-Modellierung beschrieben gewählt. Man sieht, dass sich durch die Zulassung von Nichtlinearitäten nur eine geringe Änderung in der grundlegenden Modellform ergibt. Ein geringer Gradient der Oberflächentextur bei gleichzeitig hoher Dichte an lokalen Maxima steht hier im Zusammenhang mit einem verringerten tieffrequenten Rollgeräusch. Der durch die Random Forest Regression verbliebene Standardfehler liegt nahe an dem der im vorigen Abschnitt beschriebenen Modellierung.

## Hauptkomponentenanalyse

Als dritter Ansatz wird eine lineare Ein-Parameter-Modellierung auf Basis einer vorangehenden Hauptkomponentenanalyse der Textur-Modelleingangsparameter vorgestellt. Dabei wird durch die  $n$  Texturparameter ein  $n$ -dimensionaler Raum aufgespannt und anschließend eine orthogonale Koordinatentransformation durchgeführt. Ziel derer ist die Abbildung einer höchstmöglichen Varianz des Datensatzes mittels einer geringen Anzahl von Basisvektoren, d.h. das Koordinatensystem wird so gedreht, dass die neuen Basisvektoren die Spannweiten des Datensatzes schnellstmöglich (in möglichst niedriger Dimension) beschreiben. Ergebnis der Hauptkomponententransformation ist nun eine Ladungsmatrix, die für die einzelnen Hauptkomponenten die Gewichtung der ursprünglichen Eingangsparameter für jede Hauptkomponente angibt. Dies führt dazu, dass Parameter, die im ursprünglichen Datensatz eine hohe Korrelation aufweisen, vor allem in den ersten Hauptkomponenten ähnlich stark laden und erst in späteren Hauptkomponenten, die nur mehr eine geringe Varianz des Gesamtdatensatzes erklären, voneinander abweichen.

In Bezug auf die im Beispieldatensatz vorliegenden Texturdaten beschreiben die ersten drei Hauptkomponenten schon einen Großteil der Varianz des Gesamtdatensatzes (ca. 95 %, siehe Abbildung 2). Die Hauptkomponenten



**Abbildung 2:** Beschriebene Varianz des 3D-Texturdatensatzes durch die Hauptkomponentenanalyse

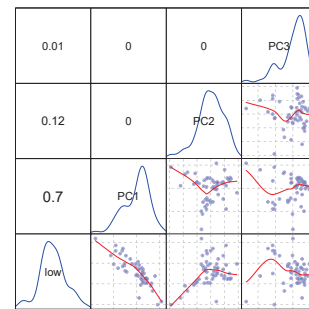
lassen sich auch gut interpretieren: die Parametergruppe der ersten Hauptkomponente beschreibt die Tiefenstruktur der Fahrbahndeckschicht, sowohl die absolute Tiefen- bzw. Höhenwerte als auch die Art der Tiefenstruktur (abgebildet durch die Gradienten bzw. den Gestaltfaktor) geht in diese Hauptkomponente ein. Die zweite Hauptkomponente beschreibt im Gegensatz dazu in erster Linie die Kornstruktur in Bezug auf ihre Packungsdichte bzw. Profilspitzenanzahl.

Betrachtet man nun den Zusammenhang der Rollgeräusch-Frequenzbereiche und der Textur-Hauptkomponenten, so kann schon augenscheinlich ein Zusammenhang gesehen werden (siehe Abbildung 3). Die Streudiagramm-Matrix zeigt hier vor allem einen guten Zusammenhang zwischen der ersten Hauptkomponente und den tieffrequenten Rollgeräuschanteilen. Damit steht ein hoher Wert in der ersten Hauptkomponente (und damit aufgrund der Vorzeichen in der Ladungsmatrix z.B. ein niedriger Gradient der Oberflächentextur) mit einem niedrigen tieffrequenten Rollgeräuschpegel in Zusammenhang.

Im Vergleich mit den oben vorgestellten Mehrparameter-Modellierungen weißt die lineare Modellierung auf Basis der Hauptkomponentenanalyse etwas geringere Güteparameter auf. Das Bestimmtheitsmaß, das bereits der Streudiagramm-Matrix zu entnehmen ist, liegt bei 0,7, der Standardfehler bei ca. 0,7 dB. Dabei bleibt aber zu berücksichtigen, dass im vorliegenden Modellierungsansatz schlussendlich lediglich ein lineares Ein-Parameter-Modell angewandt wurde. Bei zusätzlicher Hinzunahme der zweiten Hauptkomponente steigt das Bestimmtheitsmaß auf über 0,8, wobei sich der Standardfehler auf ca. 0,6 dB reduziert.

## Zusammenfassung

Im vorliegenden Paper wurden drei Ansätze zur Modellierung des Rollgeräusches auf Basis von 3D-Texturparametern vorgestellt. Das Ziel, bei allen drei Ansätzen die Interpretierbarkeit der Ergebnisse zu erhalten, konnte erfüllt werden. Die auf den Texturparametern durchgeführte Hauptkomponentenanalyse im letzten Ansatz ermöglicht dabei einerseits, die Einflussfaktoren der Oberflächentextur zu gruppieren und durch ein Ein-Parameter-Modell bereits hohe Güteparameter zu erreichen,



**Abbildung 3:** Zusammenhang der tieffrequenten Rollgeräusche (low) und der 3D-Textur-Hauptkomponenten (PC1 - PC3). In der unteren Hälfte der Streudiagramm-Matrix sind die Zusammenhänge der einzelnen Parameter (sowie in rot die LOESS-Kurven der Datenpunkte) gezeigt, in der oberen Hälfte werden die Bestimmtheitsmaße des jeweiligen linearen Zusammenhangs angegeben.

ter Berücksichtigung des Ziels der Interpretierbarkeit zu erreichen, andererseits wird durch die Herstellung des Zusammenhangs mit der Hauptkomponente die Augenscheinlichkeit der Wirkmechanismen geringfügig erschwert.

Aufgrund der verhältnismäßig homogenen Eingangstexturen (es wurden nur Fahrbahndeckschichten des Typs Splittmastixasphalt untersucht) stellt sich weiterhin die Frage, ob die verschiedenen Ansätze bei stärker divergierenden Fahrbahntexturen größere Abweichungen in ihren Güteparametern zeigen würden. Gerade unter Berücksichtigung der vermehrt auftretenden stark anisotropen Fahrbahndeckschicht „Grinding“ besteht die Aussicht, durch die Modellierungen weitere Einsichten in die Wirkmechanismen der Rollgeräuschentstehung und somit in die Herstellung von lärmindernden Fahrbahndecken zu erhalten.

## Danksagung

Teile der vorgestellten Arbeiten wurden im Zuge des Forschungsprojektes „ADURA“, finanziert im Rahmen der 1. Ausschreibung des Programms „DACH Kooperation Verkehrsinfrastrukturforschung“, erarbeitet.

## Literatur

- [1] ÖNORM EN ISO 11819-2: Akustik - Messung des Einflusses von Straßenoberflächen auf Verkehrslärm - Teil 2: Nahfeldmessverfahren
- [2] ASTM F2493 - 14: Standard Specification for P225/60R16 97S Radial Standard Reference Test Tire