



AMONTRACK – Ein EU gefördertes Projekt zur automatisierten Detektion von Einzelfehlern auf der Schienenfahrfläche

Downloaded from: <https://research.chalmers.se>, 2024-08-08 06:46 UTC

Citation for the original published paper (version of record):

Pieringer, A., Stangl, M. (2018). AMONTRACK – Ein EU gefördertes Projekt zur automatisierten Detektion von Einzelfehlern auf der Schienenfahrfläche. 5. Fachtagung Bahnakustik

N.B. When citing this work, cite the original published paper.

BAHNAKUSTIK

Infrastruktur, Fahrzeuge, Betrieb

12. – 13. November 2018 Planegg München

AMONTRACK – EIN EU GEFÖRDERTES PROJEKT ZUR AUTOMATISIERTEN DETEKTION VON EINZELFEHLERN AUF DER SCHIENENFAHRFLÄCHE

Dr. Astrid Pieringer^{1,2} und Matthias Stangl¹

¹ DB Systemtechnik GmbH
Akustik und Erschütterung
Völckerstraße 5, 80939 München
E-Mail: matthias.stangl@deutschebahn.com

² Technische Hochschule Chalmers
Angewandte Akustik/CHARMEC
Sven Hultins gata 8a, 41296 Göteborg, Schweden
E-mail: astrid.pieringer@chalmers.se

ÜBERSICHT

Der Schallmesswagen (SMW) der DB Systemtechnik befährt im Rahmen der BüG-Regelinspektion zweimal jährlich einen definierten Teil (ca. 12.000 Gleis-km) des Leistungsnetzes der DB Netz AG. Neben der Überwachung der BüG-Abschnitte dienen die gewonnenen akustischen Messdaten zur Erstellung von Statistiken zur Entwicklung der akustischen Qualität des DB Netzes sowie zur Überwachung und Qualifizierung von Schleifmaßnahmen und -verfahren. Im Rahmen des EU geförderten Forschungsprojektes AMONTRACK sollen aus den in großem Umfang und in regelmäßigen Zeitabständen aufgenommenen akustischen Messsignalen Informationen über weitere Gleisparameter und deren Änderung gewonnen werden. Dazu werden aufbauend auf dem Modell WERAN des Instituts für angewandte Akustik der Technischen Hochschule Chalmers ein Simulationsmodell des SMW erstellt und die Übertragungswege vom Rad-Schiene Kontakt zu den Messaufnehmern des Schallmesswagens validiert. Mit Hilfe des validierten Modells werden akustische Signaturen verschiedener Gleisfehler (Squats, Schleuderstellen, Schienenstöße, etc. ...) ermittelt. Anhand dieser Signaturen soll untersucht werden, welche Signalparameter im Zeit- und im Frequenzbereich eine Identifikation und Beurteilung des jeweiligen Einzelereignisses erlauben. Auf Basis dieser Ergebnisse soll für ausgewählte Gleisfehler ein Algorithmus zur Identifizierung dieser Gleisfehler in den Messdaten des Schallmesswagens implementiert werden. Weiterhin soll überprüft werden, ob aus den Messdaten des Schallmesswagens dynamische Gleisparameter wie Gleisabklingrate oder Schienenrauheit abgeleitet werden können.

1 EINLEITUNG

Beim Rollen der Radsätze von Schienenfahrzeugen über Einzelfehler und andere Diskontinuitäten auf der Fahrfläche der Schiene entsteht in der Regel ein lautes Stoßgeräusch („Klackern“), welches sich deutlich vom Rollgeräusch abhebt. Das legt nahe, dass derartige Einzelereignisse auch in am Drehgestell gemessenen Schall- und Körperschallsignalen deutlich hervortreten und mit entsprechenden Verfahren identifiziert werden können. An dieser Stelle setzt das Projekt AMONTRACK an, welches im Folgenden näher vorgestellt wird. Der wesentliche Vorteil einer frühzeitigen Erkennung von Schienenfehlern liegt darin, dass die Fehler schneller durch Schienenbearbeitung beseitigt werden können und Folgeschäden, die einen vorzeitigen Schienenwechsel nötig machen, vermieden werden können. Zwei Beispiele für Schienenfehler auf der Fahrfläche sind in Abbildung 1 dargestellt. Schleuderstellen werden durch das Schleudern angetriebener Achsen verursacht und treten vorrangig in Anfahr- und Bremsbereichen auf [1]. Das Kennzeichen von Squats, welche aufgrund der Rollkontaktermüdung entstehen, sind halbkreis- oder v-förmige Risse auf der Schienenkopfoberfläche [1]. Schienenstöße und Schweißstellen (Abbildung 2) können ebenfalls aufgrund von geometrischen Abweichungen zu hohen dynamischen Kräften und Stoßgeräuschen führen.



Abbildung 1: Beispiele für Schienenfehler auf der Fahrfläche: Schleuderstelle (links) und Squat (rechts) [1]



Abbildung 2: Beispiele für Diskontinuitäten auf der Fahrfläche: Schweißstelle (links) und Schienenstoß (rechts) (Fotos: DB Systemtechnik GmbH)

Das Projekt AMONTRACK (Acoustic Monitoring of the Track Quality, Akustische Überwachung der Gleisqualität) ist eine 14-monatige Marie-Sklodowska-Curie-Maßnahme, finanziert über das EU Rahmenprogramm für Forschung und Innovation "Horizon 2020" mit der Laufzeit Mai 2018 bis Juni 2019. Das Projekt wird von der DB Systemtechnik GmbH in München in Zusammenarbeit mit der Technischen Hochschule Chalmers in Göteborg, Schweden, durchgeführt. Ziel ist die Entwicklung eines Verfahrens zur Detektion und Beurteilung von Schienenfehlern, Schienenstößen, Schweißstellen usw. in den Messsignalen des Schallmesswagens [2] der DB Systemtechnik. Hierzu soll ein automatisiertes Verfahren zur Mustererkennung zum Einsatz kommen, welches auf der Basis des Modells WERAN [3-5] zur Berechnung von Rad-/Schienengeräuschen entwickelt wird.

Nach einer Vorstellung des Modells WERAN in Kapitel 2 und des Schallmesswagens in Kapitel 3, wird in Kapitel 4 der Inhalt des Projektes AMONTRACK näher dargelegt. In Kapitel 5 werden anschließend erste Ergebnisse des laufenden Projektes präsentiert.

2 DAS MODELL WERAN ZUR BERECHNUNG VON RAD-/SCHIENEGERÄUSCHEN

Das Modell WERAN (**Wheel/Rail Noise**), entwickelt am Institut für Angewandte Akustik der Technischen Universität Chalmers in Göteborg, Schweden, ist ein effizientes Zeitbereichsmodell zur Berechnung von Rollgeräuschen [3], Stoßgeräuschen [4] und Kurvenquietschen [5] von Schienenfahrzeugen. Rollgeräusche werden durch die Rauheit der Laufflächen von Rad und Schiene angeregt. Der Rollvorgang über die kombinierte Rauheit von Rad und Schiene führt zu einer Relativbewegung zwischen Rad und Schiene, durch welche Rad, Schiene und Schwellen zu Schwingungen angeregt werden und in Folge Schall abstrahlen [6]. Die Anregung von Stoßgeräuschen erfolgt durch Diskontinuitäten der Rad- und Schienenlaufflächen und kann als eine extreme Form der Rauheitsanregung betrachtet werden. Kurvenquietschen geht auf Reibanregung im Rad-/Schienekontakt zurück. Während die Rollgeräuschberechnung noch weitgehend eine Linearisierung zulässt und somit im Frequenzbereich behandelt werden kann, erfordert die Behandlung von Stoßgeräuschen aufgrund von hohen dynamischen Kräften und möglichem Kontaktverlust zwingend die Berücksichtigung der Nichtlinearitäten im Kontakt und damit die Beschreibung im Zeitbereich. Auch Kurvenquietschen ist ein nichtlineares Phänomen, das nur im Zeitbereich vollständig beschrieben werden kann.

WERAN bildet den beschriebenen Geräuschenstehungsmechanismus im Zeitbereich nach (Abbildung 3). Herzstück des Berechnungsmodells ist das Modul zur Berechnung der Rad-/Schienechselwirkung im Kontakt, welches ein Radmodell, Gleismodell und Kontaktmodell benötigt. Um ein effizientes und flexibles Berechnungsverfahren zu erhalten, werden Rad und Schiene durch ihre Impulsantworten (Green'schen Funktionen) beschrieben, welche im Vorweg (und damit nur ein einziges Mal) anhand des Rad- bzw. Gleismodells berechnet werden. Dies ermöglicht es, zum einen Kalkers vollständige Theorie des rollenden Kontaktes [7] zu berücksichtigen und somit ein transientes, dreidimensionales und nicht-lineares Kontaktmodell einzubinden. Zum anderen erlaubt es, sowohl das Rad- als auch das Schienenmodell ohne großen Aufwand durch andere Rad- und Schienenmodelle zu ersetzen.

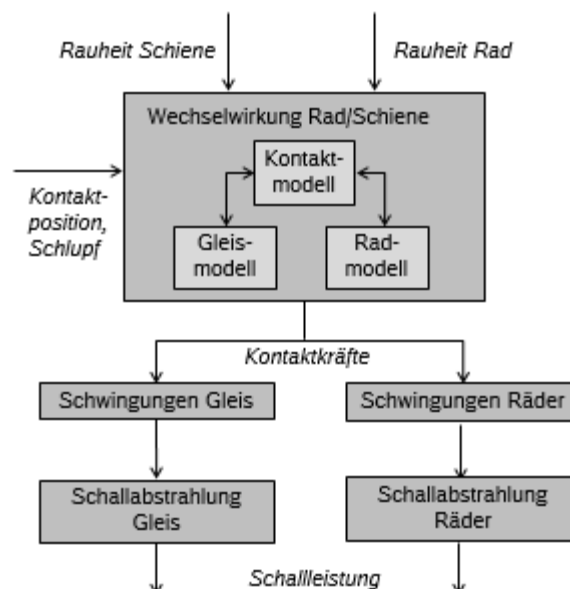


Abbildung 3: Aufbau des Berechnungsmodells WERAN

3 DER SCHALLMESSWAGEN UND DAS BESONDERS ÜBERWACHTE GLEIS

Wie bereits beschrieben spielt bei der Entstehung des Rollgeräusches u. a. die Schienenfahrflächenqualität eine große Rolle. Je glatter der Fahrflächenzustand der Schienen, desto geringer ist die Schallabstrahlung bei der Vorbeifahrt der Züge. Beim Einsatz des Verfahrens "Besonders überwachtes Gleis" (BüG) werden die in den Planfeststellungen festgelegten Gleisabschnitte mit einem besonderen Schleifverfahren geschliffen, in halbjährlichen Abständen auf ihren akustischen Zustand hin überprüft und im Bedarfsfalle akustisch nachgeschliffen. Damit ist gewährleistet, dass auf solchen Gleisabschnitten dauerhaft ein überdurchschnittlich guter, d. h. glatter Schienenfahrflächenzustand mit niedrigen Schallemissionen vorhanden ist. Die Überprüfung des Fahrflächenzustandes der Schienen wird mit dem dafür entwickelten Schallmesswagen durchgeführt. Der dabei aufgezeichnete Schalldruckpegel in dB stellt die Abweichung von einem definierten guten Fahrflächenzustand dar und dient als Vergleich mit dem zulässigen Grenzwert [2].

In der Praxis führt die DB AG eine halbjährliche Regelinspektion mit dem Schallmesszug (Abbildung 4) durch. Der Schallmesszug der DB Systemtechnik besteht aus dem Schallmesswagen, einem Steuerstandwagen, einem Abstandswagen und einer bis zwei Loks (Diesel- bzw. E-Lok). Gemessen wird das Rollgeräusches bei der Fahrt auf unterschiedlichen Schienenfahrflächen, insbesondere zum Nachweis des Verriffelungsgrades der Schienenfahrfläche des „Besonders überwachten Gleises“. Somit lässt sich im Gegensatz zu neben einem Gleis fest installierten Monitoringstationen über die Fahrstrecke eine Aussage zur akustischen Qualität der Schienenfahrfläche treffen. Gemessen wird durch den Schallmesszug nicht nur der Einfluss der Schienenrauheit sondern des kompletten Oberbaus (z.B. feste Fahrbahn, Schienenstegdämpfer). Der Messwagen ist so konzipiert, dass der Schall direkt über dem Drehgestell erfasst wird. In einer absorbierend ausgekleideten Messkabine ist ein Mikrofon über einer Öffnung im Wagenboden aufgebaut (Abbildung 5), mit welchem das Rollgeräusch direkt gemessen wird. Der gemessene Schalldruckpegel wird durch hochgenaue Lagebestimmung mittels GPS-System exakt der Position auf dem Gleis zugeordnet. Die Messgeschwindigkeit liegt zwischen 80 km/h und 200 km/h, die Höchstgeschwindigkeit liegt gezogen bei 200 km/h, geschoben bei 140 km/h. Der Schallmesszug wird als Akkreditiertes Prüflabor nach DIN EN ISO/IEC 17025:2005 beim DAkkS (Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH) von der DB Systemtechnik betrieben.

Zur Erweiterung der Messmethodik ist ein Radsatz des Messdrehgestells des Schallmesswagens mit Beschleunigungsaufnehmern an den Achslagergehäusen ausgestattet (Abbildung 5). Die vertikalen Beschleunigungen werden synchronisiert mit dem Luftschall erfasst.



Abbildung 4: Schallmesszug der DB Systemtechnik (Foto: DB Systemtechnik GmbH)

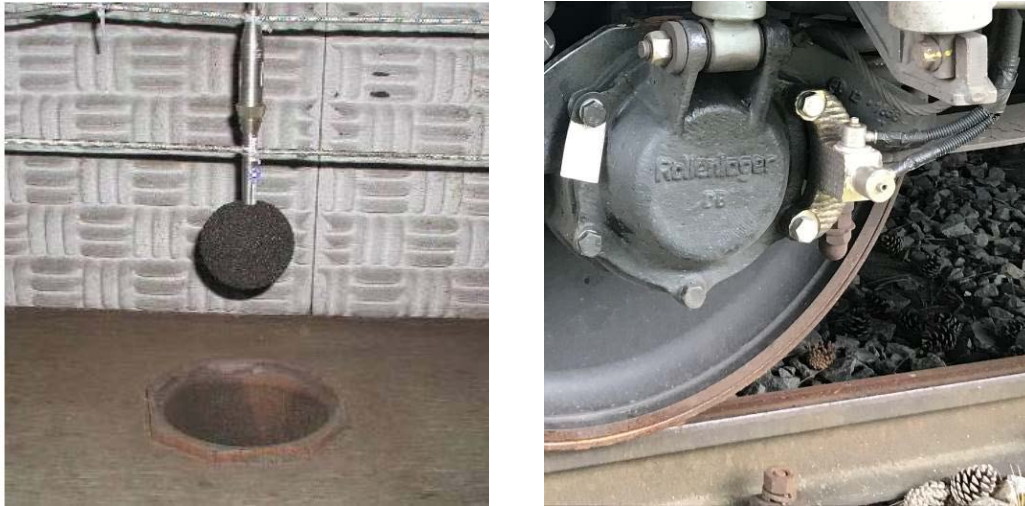


Abbildung 5: Messaufnehmer am Schallmesswagen der DB Systemtechnik: Mikrofon in Messkabine über dem Messdrehgestell (links) und Beschleunigungsaufnehmer am Achslagergehäuse (rechts) (Fotos: DB Systemtechnik GmbH)

3 DAS PROJEKT AMONTRACK

Das Projekt AMONTRACK gliedert sich in vier Teilprojekte, die in den folgenden Abschnitten kurz beschrieben werden.

3.1 Anpassung und Validierung des Berechnungsmodells WERAN

Das Modell WERAN wird an die Randbedingungen des Schallmesswagens angepasst und erweitert, so dass die Übertragungswege bis zu den Messaufnehmern des Schallmesswagens vollständig abgebildet werden. Vorrangig erfolgt die Erweiterung für den Übertragungsweg zu den Beschleunigungsaufnehmern am Achslager. Anschließend erfolgt die Validierung des erweiterten Modells anhand der Ergebnisse einer im Innovationsprojekt Roll2Rail durchgeführten Messkampagne [8].

3.2 Studium der akustischen Signaturen von Einzelereignissen

Mit Hilfe des validierten Berechnungsmodells werden die Achslagerbeschleunigungen bei der Überfahrt des Schallmesswagens über verschiedene Einzelereignisse (Squats, Schienenstöße usw.) mit verschiedenen Abmessungen berechnet. Somit erhält man die akustischen Signaturen der Einzelfehler und Diskontinuitäten in Abhängigkeit von ihren Eigenschaften. Anhand dieser Signaturen wird untersucht, welche Signalparameter im Zeit- und im Frequenzbereich eine Identifikation und Beurteilung des jeweiligen Einzelereignisses erlauben. Liegen ausreichend Messdaten von der Überfahrt des Schallmesswagens über das jeweilige Einzelereignis mit zugehörigen Geometriedaten vor, werden diese bei der Analyse mitberücksichtigt. In diesem Fall steht auch das Luftschallsignal des Schallmesswagens zur Verfügung.

3.3 Implementierung eines Detektionsalgorithmus

Unter Verwendung der Ergebnisse aus 3.2 wird entschieden, für welche Ereignisse ein Algorithmus zur Identifizierung des Einzelereignisses in den Messdaten des Schallmesswagens implementiert wird. Voraussichtlich basiert der Algorithmus auf einem neuronalen Netzwerk zur Mustererkennung. Im zweiten Schritt wird auch ein Algorithmus zur Bewertung/Quantifizierung des Einzelereignisses implementiert, welcher sich auf tabellarisierte Berechnungsergebnisse aus WERAN stützt. Die Validierung der Algorithmen erfolgt zum einen durch Berechnungen und zum anderen durch Anwendung auf die Messdaten des Schallmesswagens und einem direkten Vergleich mit Geometriedaten der Einzelereignisse.

3.4 Machbarkeitsstudie zur indirekten Messung von akustisch relevanten Gleisparametern

Im letzten Teil des Projektes wird eine Machbarkeitsstudie zur indirekten Messung von akustisch relevanten Gleisparametern durchgeführt. Dabei wird untersucht, ob Gleisabklingrate und Schienenrauheit ausgehend von den Messdaten des Schallmesswagens mithilfe des numerischen Modells WERAN abgeschätzt werden können. Da sowohl das unbekannte dynamische Verhalten des Gleises als auch die unbekannte Schienenrauheit die Messsignale des Schallmesswagens beeinflussen, ist es entscheidend, ob es gelingt, diese Einflüsse voneinander zu trennen.

4 ERSTE ERGEBNISSE

Die Anpassung des Modells WERAN an den Schallmesswagen und die Validierung des Modells erfolgt anhand einer Messkampagne, die im Innovationsprojekt Roll2Rail durchgeführt wurde [8]. Die Messkampagne fand im Juni 2016 an der Hochgeschwindigkeitsstrecke München – Augsburg in der Nähe der Ortschaft Haspelmoor ca. 38 km nordwestlich von München statt. Das Gleis an der Teststrecke besteht aus Schienen mit dem Profil UIC60 E2 auf Betonschwellen im Schotteroberbau. Durchgeführt wurden Vorbeifahrtmessungen mit dem Schallmesszug bei 40 km/h, 80 km/h und 160 km/h. Zweck der Messungen war die Validierung verschiedener Messverfahren zur Trennung des Rad- und Schienenanteils am Rollgeräusch. Der große, gut dokumentierte Datensatz ist auch zur Validierung von WERAN geeignet. Vor den Vorbeifahrtmessungen wurden die Gleisabklingrate, die Übertragungsfunktionen des Rades, die Schienenrauheit (in einer Spur) und die Radrauheiten der Räder des Messdrehgestells des Schallmesswagens (in drei parallelen Spuren) gemessen. Während jeder Vorbeifahrt wurden die Schienen- und Schwellenbeschleunigung in mehreren Punkten, die Beschleunigung des Rades (über ein Telemetriesystem), das Rollgeräusch neben der Schiene in mehreren Höhen und Abständen sowie das Rollgeräusch und die Achslagerbeschleunigungen am Schallmesszug aufgenommen.

Zur Modellierung des Gleises in WERAN wurde das Programm DIFF [9] verwendet. Dort wird die Schiene mit einem Finite-Elemente-Modell als diskret unterstützter Rayleigh-Timoshenko Balken dargestellt. Die Parameter des Gleismodells wie Steifigkeit und Dämpfung von Zwischenlagen und Schotter wurden durch Anpassung der berechneten Gleisabklingrate an die gemessene ermittelt (Abbildung 6). Eine sehr gute Übereinstimmung wird für die vertikale Gleisabklingrate bis 1000 Hz erzielt und für die laterale bis ca. 800 Hz. Bei höheren Frequenzen wird das dynamische Verhalten des Gleises von Wellentypen mit einer Verformung des Schienenquerschnitts bestimmt, welche im verwendeten Schienenmodell nicht enthalten sind. Der Vergleich der Abklingraten mit den Grenzkurven aus ISO 3095:2013 [10] zeigt, dass die Abklingraten des Gleises auf der Teststrecke eher niedrig sind (Abbildung 6).

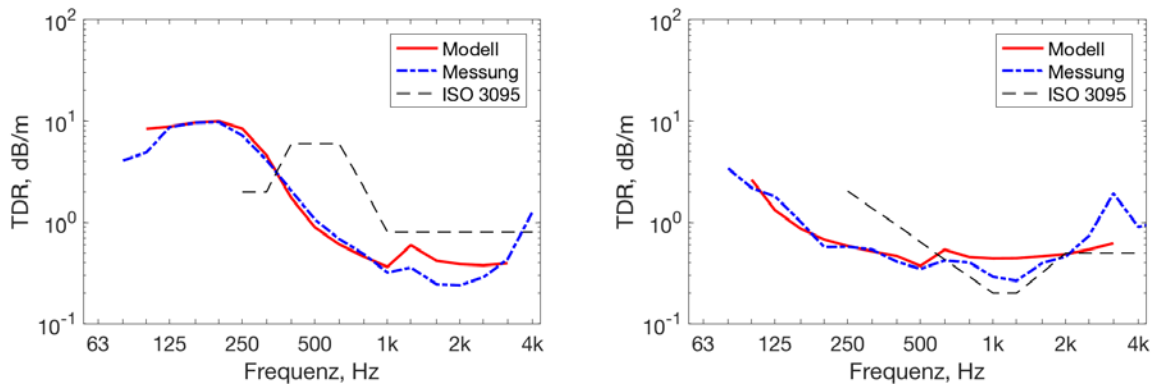


Abbildung 6: Gemessene und modellierte Gleisabklingrate im Vergleich zur Grenzkurve nach ISO 3095 in vertikaler (rechts) und lateraler (links) Richtung

Zur Modellierung des Rades wurde ein Finite-Elemente-Modell verwendet, welches auf achsensymmetrischen Elementen basiert [11]. Die Eigenfrequenzen und modalen Dämpfungen wurden anhand der gemessenen Übertragungsfunktionen des Rades angepasst [8]. Das angepasste Finite-Elemente-Modell wurde von vom ISVR, Universität Southampton, Großbritannien, zur Verfügung gestellt. Abbildung 7 zeigt den Vergleich der gemessenen und modellierten Übertragungsfunktionen des Rades in radialer und axialer Richtung.

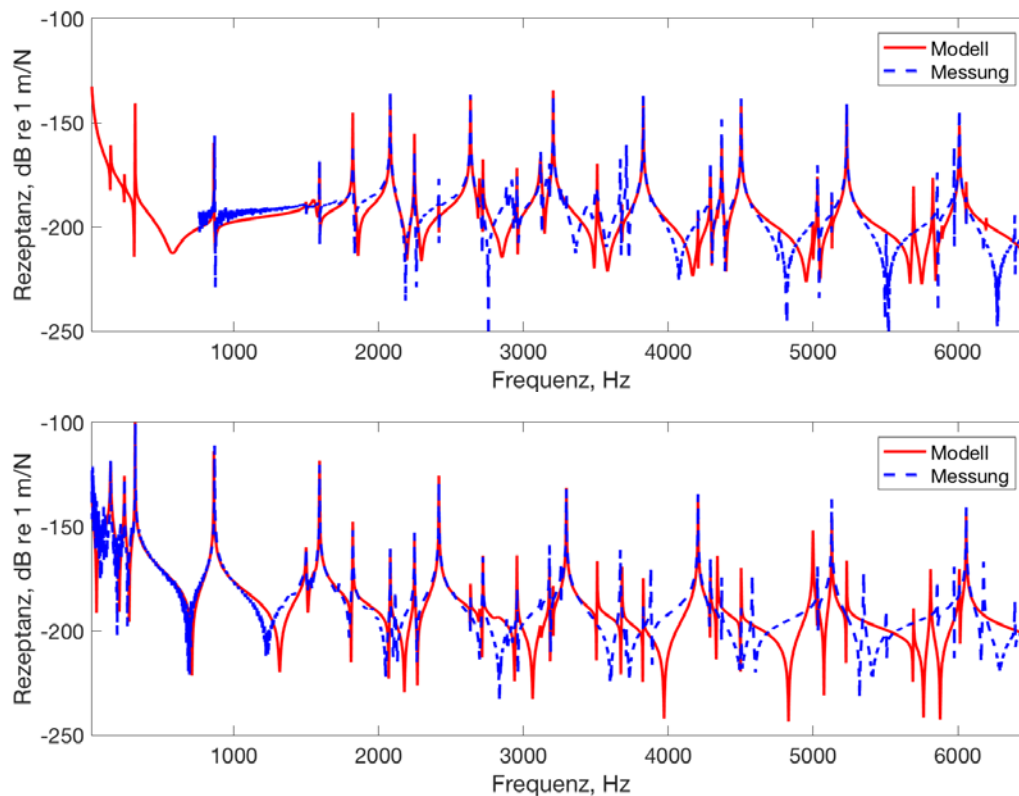


Abbildung 7: Gemessene und modellierte Übertragungsfunktion des Rades im Kontaktpunkt dargestellt als Rezeptanz (Verschiebung/Kraft): radiale Rezeptanz (oben) und axiale Rezeptanz (unten)

Mit der kombinierten Rad- und Schienenrauheit als Eingangsgröße wurde in WERAN die Vorbeifahrt eines Rades auf der Schiene mit 80 km/h modelliert. Mit der damit erhaltenen Zeitreihe der Kontaktkräfte im sich mitbewegenden Kontaktpunkt zwischen Rad und Schiene wurde in einem zweiten Schritt die Schienenbeschleunigung an einem festen Punkt der Schiene berechnet. Hierbei wurden 10 Räder des Schallmesszuges berücksichtigt. Abbildung 8 zeigt die berechnete vertikale Beschleunigung im Vergleich zur gemessenen Beschleunigung. Eine

Schwierigkeit bei diesem Vergleich ist, dass die Schienenrauheit nur in einer Spur längs der Schiene gemessen wurde und somit die Querverteilung der Rauheit über die Schiene unbekannt ist. Da die Querverteilung jedoch nicht vernachlässigt werden kann [3], wurden aus der gemessenen Rauheitslinie zwei Rauheitsprofile der Schiene erzeugt: eine mit maximaler Korrelation in Querrichtung (keine Änderung der Rauheit) und einer mit minimaler Korrelation in Querrichtung (zufällige Änderung der Rauheit in Querrichtung). Die Berechnungsergebnisse mit beiden Schienenrauheitsprofilen als Eingangsgröße sind in Abbildung 8 dargestellt. Die berechnete Beschleunigung ausgehend von einer Schienenrauheit mit minimaler Korrelation in Querrichtung stimmt gut mit der gemessenen Beschleunigung überein, während eine Schienenrauheit mit maximaler Korrelation in Querrichtung (wie sie z.B. bei Riffeln auf der Fahrfläche auftritt) zu einer Überschätzung der Beschleunigung führt. Ein Vergleich von weiteren gemessenen und berechneten Größen ist vorgesehen.

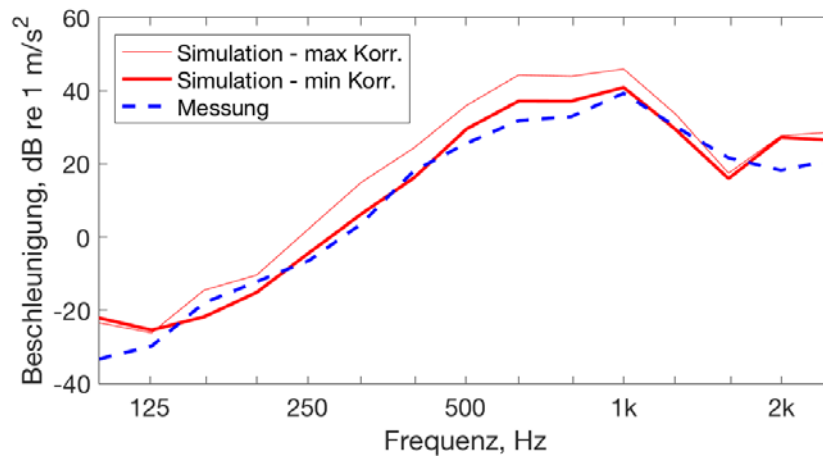


Abbildung 8: Vertikale Schienenbeschleunigung im Abstand von 10 cm nach einer Schwelle bei Vorbeifahrt des Messdrehgestells des Schallmesswagens mit 80 km/h: Vergleich der Messung mit Berechnungsergebnis ausgehend von einer Schienenrauheit mit maximaler und minimaler Korrelation in Querrichtung

8 ZUSAMMENFASSUNG

AMONTRACK ist ein durch das EU Rahmenprogramm „Horizon2020“ gefördertes Forschungsprojekt, dass in Zusammenarbeit mit dem Institut für angewandte Akustik der Technischen Hochschule Chalmers und dem Sachgebiet Akustik und Erschütterung der DB Systemtechnik durchgeführt wird. Das Ziel ist es, aus in großem Umfang vorhandenen Messdaten automatisiert Einzelereignisse wie zum Beispiel Squats oder Schleuderstellen identifizieren und bewerten zu können. Grundlage des Projektes sind das Modell WERAN zur Berechnung von Rad-/Schienegeräuschen im Zeitbereich und der Schallmesszug der DB Systemtechnik zur Gewinnung von Messdaten. In 4 Teilprojekten wird zunächst das Modell WERAN für den Schallmesswagen adaptiert und mit den Messdaten des Forschungsprojektes Roll2Rail validiert. Danach wird mit diesem Modell die Auswirkung der Überfahrt von Schienenfehlern auf der Fahrfläche berechnet, um akustische Signaturen der Schienenfehler zu erzeugen. Aufbauend auf diesen Signaturen wird ein Mustererkennungsverfahren zur automatisierten Detektion der Schienenfehler in den Messdaten des Schallmesswagens implementiert. Im letzten Teilprojekt soll geprüft werden, inwieweit sich das entstandene Modell dafür eignet, aus den Messdaten des Schallmesswagens Rückschlüsse auf die Schienenrauheit, bzw. dynamische Parameter wie die Gleisabklingrate zu ziehen. Erste Ergebnisse der Validierung des Modells WERAN sind vielversprechend.

9 LITERATUR

- [1] Deutsche Bahn AG: Richtlinie 821.2007 A02, Schienenfehlerkatalog. Gültig ab 1.7.2016
- [2] Rothhämel, J., Schröder, S. und Koch, B.: Akustischer Fahrflächenzustand im Netz der DB AG. ZEVrail (2015), 19-25
- [3] Pieringer, A., Kropp, W. und Thompson, D.J.: Investigation of the dynamic contact filter effect in vertical wheel/rail interaction using a 2D and a 3D non-Hertzian contact model. *Wear* (2011), 271(1-2), 328-338
- [4] Pieringer, A., Kropp, W. und Nielsen, J.C.O.: The influence of contact modelling on simulated wheel/rail interaction due to wheel flats. *Wear* (2014), 314(1-2), 273-281
- [5] Pieringer A.: A numerical investigation of curve squeal in the case of constant wheel/rail friction. *Journal of Sound and Vibration* (2014), 333(18), 4295-4313
- [6] Thompson, D.: *Railway Noise and Vibration: Mechanisms, Modelling and Means of Control*. Elsevier, Oxford, UK, 2009
- [7] Kalker, J.J.: *Three-dimensional elastic bodies in rolling contact*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 1990
- [8] Thompson, D. et al.: Assessment of measurement-based methods for separating wheel and track contributions to railway rolling noise. *Applied Acoustics* (2018), 140, 48-62
- [9] Nielsen, J.C.O. und Igeland, A.: Vertical dynamic interaction between train and track – influence of wheel and track imperfections. *Journal of Sound and Vibration* (1995), 187(5), 825-839
- [10] EN ISO 3095:2013: *Akustik – Bahnanwendungen – Messung der Geräuschemission von spurgebundenen Fahrzeugen*, Europäisches Komitee für Normung, Brüssel
- [11] Thompson, D.: Wheel-rail noise generation, Part II: Wheel vibration. *Journal of Sound and Vibration* (1993), 161, 401-419