

Auswirkung von unscharfen Parametern auf die Rollgeräuschsimulation bei Schienenfahrzeugen

Vincent Radmann¹, Katja Stampka¹, Ennes Sarradj¹

¹ Technische Universität Berlin, 10587 Berlin, Deutschland, Email: vincent.radmann@tu-berlin.de

Einleitung

Für effektive Schallschutzmaßnahmen im Schienenverkehr ist es essenziell, die physikalischen Prozesse, die der Schallentstehung und -ausbreitung zugrunde liegen, zu verstehen. Um das Schwingungsverhalten eines Gleises zu beschreiben, kann dabei die Gleisabklingrate (Track Decay Rate, TDR) verwendet werden. Wird diese simuliert, ist das Ziel, eine möglichst realistische Einschätzung der TDR vornehmen zu können. Dafür werden hier drei verschiedene Modelle von NORDBORG, THOMPSON und STAMPKA verwendet. Mit diesen Modellen wird die Schwingungsantwort der Schiene simuliert und aus dieser nach DIN EN 15461 die Gleisabklingrate bestimmt. Die Eigenschaften der Gleiskomponenten beeinflussen dabei maßgeblich das Ergebnis der Simulation. Da jedoch nicht alle Parameter einfach bestimmbar sind, wird die sogenannte General Transformation Method angewandt. Damit kann die TDR mit unscharfen Eingangsparametern simuliert werden, woraus sich ein ebenfalls unscharfes Ergebnis ergibt. Zusätzlich wird eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, um den Einfluss der unscharfen Eingangsparameter zu quantisieren. Die Simulationsergebnisse werden zur besseren Einordnung mit Messungen verglichen.

Fuzzy Arithmetic

Um Rollgeräuschsimulationen mit unscharfen Eingangsparametern durchzuführen, wird die von HANSS in [1] beschriebene Fuzzy Arithmetic angewandt. Damit können beliebige Probleme mit unscharfen Eingangsparametern berechnet werden. Am Ende resultiert ein unscharfes Ergebnis, das als Vertrauensintervall verstanden werden kann.

Fuzzy Numbers

Die Fuzzy Arithmetic ist das Gegenstück zur „normalen“ Arithmetik und arbeitet mit unscharfen Zahlen – den sogenannten Fuzzy Numbers \tilde{p} . Diese unscharfen Zahlen besitzen die Werte \tilde{x} , denen mit der Membership Function μ ein funktionaler Zusammenhang zugeordnet ist, der Werte zwischen 0 und 1 annimmt. Abbildung 1 zeigt eine Beispiel-Fuzzy-Number. In Anlehnung daran kann eine quasi-gaußsche Fuzzy Number in einer Formel wie folgt beschrieben werden:

$$\tilde{p} = \text{gfn}^*(\tilde{x}; \sigma_l; \sigma_r). \quad (1)$$

General Transformation Method

Um die Fuzzy Numbers als Eingangsparameter für Rollgeräuschsimulationen zu verwenden, wird die ebenfalls in [1] beschriebene General Transformation Method (GTM) angewandt. Dabei werden die unscharfen Eingangspara-

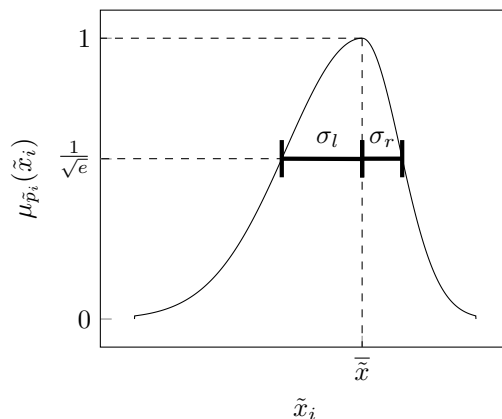


Abbildung 1: Gaußsche Fuzzy Number

meter wieder diskretisiert, mit diesen die Simulationen durchgeführt und anschließend ein unscharfes Ergebnis – das Vertrauensintervall – rekonstruiert. Die GTM gliedert sich nach [1] in die folgenden fünf Schritte.

Zerlegung der Eingangs-Fuzzy-Numbers

Im ersten Schritt wird die Membership Function μ in $m + 1$ Ebenen unterteilt, deren Funktionswerte folgendermaßen beschrieben sind:

$$\mu_j = \frac{j}{m}, \quad j = 0, 1, \dots, m. \quad (2)$$

Wie in Abbildung 2 dargestellt, werden auf jeder Ebene dadurch Intervalle $X_i^{(j)}$ gebildet, die wiederum als Menge P_i die zerlegte Fuzzy Number beschreiben:

$$X_i^j = [a_i^{(j)}, b_i^{(j)}], \quad a_i^{(j)} \leq b_i^{(j)}, \quad j = 0, 1, 2, \dots, m \quad (3)$$

$$P_i = \{X_i^{(0)}, X_i^{(1)}, \dots, X_i^{(m)}\}, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (4)$$

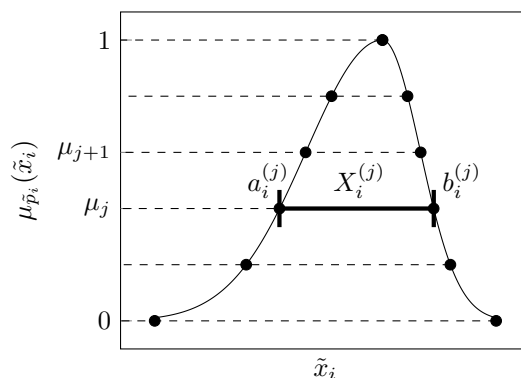


Abbildung 2: In Intervalle zerlegte Fuzzy Number

Transformation des Eingangsintervalls

Im zweiten Schritt werden die Intervalle auf jeder Ebene nach Gleichung (5) in diskrete Punkte unterteilt, wie auch in Abbildung 3 dargestellt:

$$c_{l,i}^{(j)} = \begin{cases} a_i^{(j)} & \text{für } l = 1 \\ & \text{und } j = 0, 1, \dots, m, \\ \frac{1}{2} (c_{l-1,i}^{(j+1)} + c_{l,i}^{(j+1)}) & \text{für } l = 2, 3, \dots, m - j \\ & \text{und } j = 0, 1, \dots, m - 2, \\ b_i^{(j)} & \text{für } l = m - j + 1 \\ & \text{und } j = 0, 1, \dots, m. \end{cases} \quad (5)$$

Damit wird aus jedem Intervall $X_i^{(j)}$ der Ebene μ_j ein Tupel diskreter Werte $\hat{X}_i^{(j)}$.

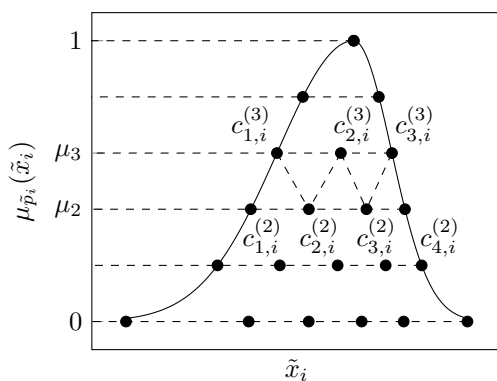


Abbildung 3: Zerlegte und transformierte Fuzzy Number

Auswertung des Modells

Diese diskreten Werte können nun an die Rollgeräuschsimulationen übergeben werden. Bei Berücksichtigung mehrerer unscharfer Eingangsparameter werden auf jeder Ebene alle möglichen Kombinationen dieser diskreten Werte gebildet und diese als Tupel in den Simulationen ausgewertet. Anschließend ergibt sich ein zerlegtes und transformiertes Zwischenergebnis ${}^k z^{(j)}$. Alle Zwischenergebnisse sind in den Vektoren $\hat{Z}^{(j)}$ zusammengefasst. Dabei steht der Index r in Gleichung (6) für die Anzahl der möglichen Kombinationen der k -ten Elemente der n Fuzzy Numbers auf der j -ten Ebene:

$$\hat{Z}^{(j)} = \left({}^1 \hat{z}^{(j)}, {}^2 \hat{z}^{(j)}, \dots, {}^k \hat{z}^{(j)}, \dots, {}^r \hat{z}^{(j)} \right). \quad (6)$$

Rücktransformation des Ergebnisvektors

Im vierten Schritt werden die Ergebnisvektoren $\hat{Z}^{(j)}$ zurücktransformiert, woraus pro μ_j -Ebene ein Intervall $Z^{(j)}$ resultiert. Diese Intervalle bilden die Ergebnismenge

Q :

$$Q = \{ Z^{(0)}, Z^{(1)}, \dots, Z^{(m)} \} \quad (7)$$

$$Z^{(j)} = [f^{(j)}, g^{(j)}], \quad f^{(j)} \leq g^{(j)}, \quad j = 0, 1, \dots, m \quad (8)$$

$$[f^{(j)}, g^{(j)}] = \begin{cases} \left[\min_k (f^{(j+1),k} \hat{z}^{(j)}), \max_k (g^{(j+1),k} \hat{z}^{(j)}) \right], & \text{(I)} \\ \left[\min_k (f^{(j+1),k} \hat{z}^{(j)}), \max_k (g^{(j+1),k} \hat{z}^{(j)}) \right], & \text{(II)} \end{cases} \quad (9)$$

(I) mit $j = 0, 1, \dots, m - 1$

(II) mit $j = m$.

Rekonstruktion des unscharfen Ausgangsintervalls

Im letzten Schritt wird aus den bestimmten Intervallen ein unscharfes Ergebnis in Form einer Fuzzy Number rekonstruiert. Dies geschieht, indem die einzelnen Intervalle $Z^{(j)}$ der Menge Q den einzelnen Ebenen der Membership Function μ_j zugeordnet werden. Daraus ergibt sich letztendlich das unscharfe Ergebnis \tilde{q} .

Sensitivitätsanalyse

Um den Einfluss der einzelnen unscharfen Eingangsparameter auf die unscharfen Ergebnisse der Simulationen zu quantisieren, wird eine ebenfalls in [1] beschriebene Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Dazu werden zusätzliche Informationen genutzt, die in den Ergebnisvektoren $\hat{Z}^{(j)}$ enthalten sind und bei der Rücktransformation verloren gehen. Zunächst wird daraus der sogenannte Gain Factor $\eta^{(j)}$ bestimmt, der im nächsten Schritt in die dimensionslose Größe Standardized Mean Gain Factor κ_i umgerechnet werden kann. Diese Größe kann als Gesamtmaß für den Einfluss der einzelnen unscharfen Eingangsparameter \tilde{p}_i auf das unscharfe Ergebnis verstanden werden. Zuletzt kann daraus der normierte Degree of Influence ρ_i bestimmt werden, der den relativen Einfluss der Parameter angibt. Mit den relativen Einflussfaktoren ρ_i kann eine Aussage darüber getroffen werden, wie groß der prozentuale Anteil eines jeden Eingangsparameters an der Unschärfe des Ergebnisses ist. Es muss dabei $\sum_{i=1}^n \rho_i = 1$ gelten.

Rollgeräuschmodelle und Eingangsparameter

Die unscharfen Eingangsparameter werden mit den Modellen von NORDBORG ([2], [3]), THOMPSON ([4]) und STAMPKA ([5]) ausgewertet und die Gleisabklingrate (Track Decay Rate, TDR) berechnet. Die Modelle von NORDBORG und THOMPSON rechnen analytisch im Zeitbereich während das STAMPKA-Modell eine Finite-Differenzen-Methode (FDM) verwendet. Die Schiene wird entweder als Euler-Bernoulli-Balken (NORDBORG, STAMPKA) oder als Timoschenko-Balken (THOMPSON) modelliert. Alle drei Modelle betrachten die Schiene als unendlich lang, wobei dies im FDM-Modell durch reflexionsfreie Abschlüsse realisiert wird. Das mechanische Ersatzmodell des Gleises ist in Abbildung 4 dargestellt. Dabei wird die Lagerung der Schiene durch ein Feder-Masse-Feder-System angenähert.

Die Steifigkeiten und Verlustfaktoren der Gleiszwischenlagen (K_p, η_p) und des Gleisschotters (K_b, η_b) sind wichtige Eingangsparameter für die Rollgeräuschsimulationen. Diese Größen können jedoch im eingebauten Zustand nur sehr schwer vermessen werden. Auch Laboruntersuchungen sind nur bedingt aussagekräftig, da sich durch Witterung und Belastung die Eigenschaften der Gleiszwischenlagen und des Schotters mit der Zeit ändern. Ein exakter Wert für diese Parameter erscheint daher nicht sinnvoll, weshalb diese Größen im Folgenden als unscharfe Eingangsparameter betrachtet werden. Außerdem werden die längenbezogene Masse (m_r) und das Flächenträgheitsmoment der Schiene (I) als unscharfe Eingangsparameter betrachtet, da auch hier von einer Änderung dieser Größen über die Zeit auszugehen ist. In Tabelle 1 sind die berücksichtigten

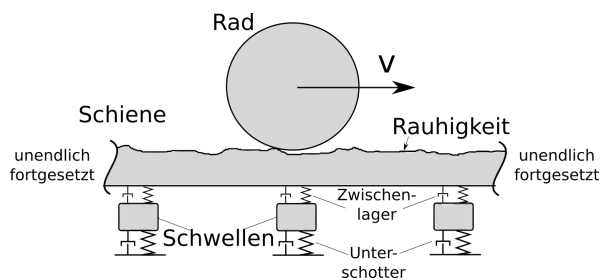


Abbildung 4: Prinzipskizze des mechanischen Ersatzmodells des Oberbaus

unscharfen Eingangsparameter aufgeführt. Dabei wurden alle Parameter als quasi-gaußsche Fuzzy Numbers behandelt. Es sind dabei zwei verschiedene unscharfe Flächenträgheitsmomente angegeben, da das NORD-BORG- und das FDM-Modell zu diesem Zeitpunkt mit 60% des tatsächlichen Wertes rechnen.

Tabelle 1: Verwendete unscharfe Eingangsparameter

Parameter	\bar{x}	σ_1	σ_r
Gleiszwischenlagen			
K_p	600 MN/m	400 MN/m	1000 MN/m
η_p	0,25	0,15	0,35
Gleisschotter			
K_b	42 MN/m	15 MN/m	65 MN/m
η_b	1,0	0,5	1,5
Schiene			
m_r	60,21 kg	54,5 kg	61 kg
I in m^4 (THOMPSON)	$30,38 \cdot 10^{-6}$	$24,78 \cdot 10^{-6}$	$31 \cdot 10^{-6}$
I in m^4 (NORDBORG, FDM)	$18,23 \cdot 10^{-6}$	$14,93 \cdot 10^{-6}$	$19 \cdot 10^{-6}$

Ergebnisse

Der folgende Abschnitt zeigt die Ergebnisse der unscharfen Rollgeräuschsimulationen und der Sensitivitätsanalyse. Die TDRs wurden dabei mit Messdaten

verglichen, die von THOMPSON und LI im Rahmen der Arbeit zu [6] erfasst wurden.

Abbildung 5 zeigt die unscharfe Gleisabklingrate berechnet nach dem FDM-Modell. Die unscharfen Eingangsparameter von Gleiszwischenlagen und -schotter wurden in drei Ebenen eingeteilt, weshalb diese auch im Ergebnis erkennbar sind. Die $\mu_j = 0$ -Kurven begrenzen den gesamten Streubereich des Ergebnisses und bilden so das Vertrauensintervall. Diese Vertrauensintervalle sind für

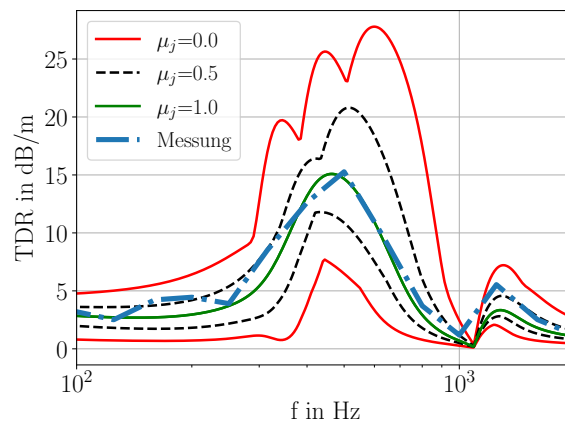


Abbildung 5: Unscharfes Ergebnis der TDR nach STAMPKA sowie gemessen; unscharfe Eingangsparameter: K_p, K_b, η_p, η_b

alle drei Modelle in den Abbildungen 6 und 7 dargestellt. In Abbildung 6 wurden dabei die Steifigkeiten und Verlustfaktoren von Gleiszwischenlagen und Gleisschotter als unscharfe Eingangsparameter verwendet. Es zeigt sich zunächst für alle Modelle der typische Verlauf der Gleisabklingrate durch das breite Sperrband bei mittleren Frequenzen. Verursacht wird dies durch die Schwellen und Gleiszwischenlagen, die sich in diesem Bereich wie ein Schwingungstilger verhalten. Ebenfalls in allen Modellen gut zu erkennen, ist die Pinned-Pinned-Frequenz als Einbruch der TDR bei ca. 1000 Hz, die sich aus der periodischen Lagerung der Schiene ergibt. Es fällt auf, dass alle drei Modelle eine starke Unschärfe aufweisen, wobei sich das THOMPSON-Modell noch einmal deutlich von den anderen beiden unterscheidet und am deutlichsten die Messwerte überschätzt. Ansonsten liegt die Messwertkurve aber über große Teile des Frequenzbereichs innerhalb der Vertrauensintervalle, vor allem derer des NORD-BORG- und des FDM-Modells.

Im Vergleich dazu zeigen sich, wie in Abbildung 7 zu sehen, deutlich schmalere Vertrauensintervalle der Gleisabklingrate, wenn die längenbezogene Masse und das Flächenträgheitsmoment der Schiene als unscharfe Eingangsparameter berücksichtigt werden. Dabei werden zum einen die Unterschiede zwischen den Modellen sehr deutlich, wobei das FDM-Modell die Messwerte am besten abbildet. Zum anderen zeigt dies auch, dass die Steifigkeiten und Verlustfaktoren, unabhängig vom Modell, einen viel größeren Einfluss auf die Ergebnisse haben als Flächenträgheitsmoment und längenbezogene Masse der Schiene.

Um einschätzen zu können, wie stark sich die einzelnen Parameter bei unterschiedlichen Frequenzen auf die un-

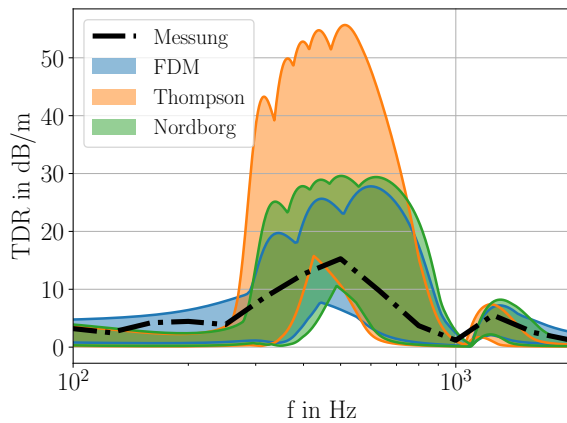


Abbildung 6: Vergleich der unscharfen Ergebnisse der TDR der drei Modelle mit Messwerten; unscharfe Eingangsparameter: K_p , K_b , η_p , η_b

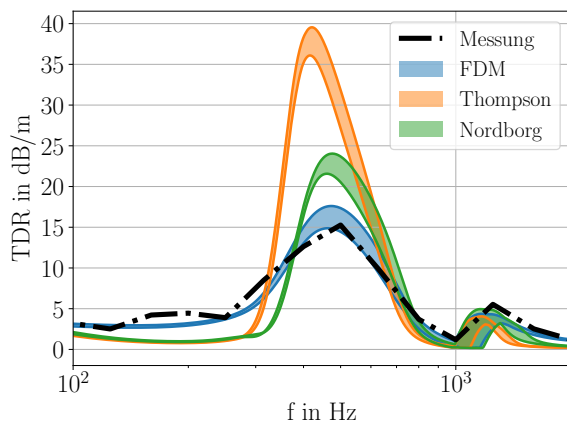


Abbildung 7: Vergleich der unscharfen Ergebnisse der TDR der drei Modelle mit Messwerten; unscharfe Eingangsparameter: I , m_r

scharfen Ergebnisse der Simulationen auswirken, wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Abbildung 8 zeigt die relativen Einflussfaktoren der Steifigkeiten und Verlustfaktoren von Gleiszwischenlagen und -schotter auf die unscharfe TDR der FDM-Simulation entsprechend zu Abbildung 5. Hier zeigt sich, dass die Parameter des Schotters vor allem im tieffrequenten Bereich das unscharfe Ergebnis beeinflussen. Die Gleiszwischenlagen wirken sich dagegen deutlich stärker auf den mittleren und hohen Frequenzbereich aus. Dies deckt sich auch mit Angaben in der Literatur (siehe z.B. [4]) Es fällt jedoch besonders auf, dass die Steifigkeit der Gleiszwischenlagen fast über dem gesamten Frequenzbereich dominiert. Daraus lässt sich folgern, dass durch die Beeinflussung dieses Parameters eine große Auswirkung auf die Gleisabklänge erzielt werden kann.

Fazit

Da eine genaue Bestimmung der Gleisparameter sehr schwierig ist, können oft nur unzureichend exakte Werte an Simulationen übergeben werden. Daraus resultiert häufig eine schlechte Übereinstimmung von Simulation und Rechnung. Werden diese Parameter allerdings als

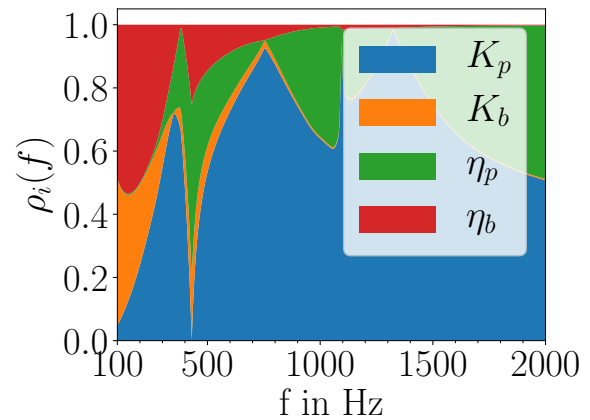


Abbildung 8: Relative Einflussfaktoren der Parameter K_p , K_b , η_p , η_b auf die unscharfe TDR des FDM-Modells

unscharfe Größen im Rahmen der General Transformation Method betrachtet, kann mithilfe des Vertrauensintervalls ein besserer Vergleich zwischen Simulation und Messwerten gezogen werden. Auf diese Weise suggeriert das Simulationsergebnis keine Genauigkeit, die nicht vorhanden ist, sondern gibt einen Bereich an, in dem das Ergebnis liegen kann. Mithilfe der Sensitivitätsanalyse kann außerdem eine Einschätzung darüber getroffen werden, wie groß der Einfluss der einzelnen Parameter über dem Frequenzbereich ist. Damit können die unscharfen Rollgeräuschsimulationen einen Beitrag dazu leisten, wichtige Parameter für die Lärmreduktion am Gleis zu identifizieren und deren Auswirkung zu quantifizieren.

Literatur

- [1] Michael Hanss. Applied Fuzzy Arithmetic: An Introduction with Engineering Applications. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2005.
- [2] Anders Nordborg. Vertical Rail Vibration: Noise and Structure-Born Sound Generation. Dissertation, Königlich Technische Hochschule, Stockholm, 1995.
- [3] Anders Nordborg. Vertical Rail Vibrations: Point-force Excitation. Acta Acustica united with Acustica, 84:280-288, 1998.
- [4] David Thompson. Railway Noise and Vibration: Mechanisms, Modelling and Means of Control. Elsevier professional, o. O., 1. Auflage, 2009.
- [5] K. Stampka und E. Sarradj. Berechnungen von Biegeschwingungen im Zeitbereich auf einem unendlichen Balken mit der Finite Differenzen Methode. Fortschritte der Akustik, 45:467-470, 2019.
- [6] Q. Li, D. J. Thompson und M. G. R. Toward. Estimation of track parameters and wheel-rail combined roughness from rail vibration. Proceeding of the Institute of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Road Transit, 232(4): 1149-1167, 2018.