Akustische Anerkennung neuer Bremssohlen für Güterwagen auf dem Bremsprüfstand

Maria Starnberg[1], Haike Brick[1], Stefan Dörsch[2]

[1] *DB Systemtechnik GmbH, Kompetenzzentrum Akustik und Erschütterungen, 80939 München, E-Mail: maria.starnberg@deutschebahn.com*

[2] *DB Systemtechnik GmbH, Kompetenzzentrum Bremse, Kupplung, Tür- und Einstiegssysteme, 32423 Minden, E-Mail: stefan.h.doersch@deutschebahn.com*

Einleitung

Die Einführung der Strategie der „leiseren Strecken“ mit der TSI Lärm 2019 [1] erfordert ein Verfahren zur akustischen Bewertung von neuen Verbundstoff-Bremssohlen. Zu diesem Zweck initiierte das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) in Zusammenarbeit mit dem Deutschen Zentrum für Schienenverkehrsforschung und dem Eisenbahn-Bundesamt das Forschungsprojekt „Akustische Anerkennung neuer Bremssohlen“. Mit der Bearbeitung wurde die DB Systemtechnik beauftragt.

Ziel des Projektes ist die Entwicklung eines Verfahrens für die Beurteilung akustischer Eigenschaften neuer Bremssohlen auf der Grundlage von Messungen der Radrauheit. Das Verfahren soll zuverlässig, anwendungsfreundlich und zeit- und kosteneffizient sein.

Die akustischen Eigenschaften der Sohlen werden nicht – wie bisher – durch Fahrtmessungen, sondern anhand der resultierenden Rauheit auf der Lauffläche eines Testrades nach Durchführung standardisierter Bremsprüfungen auf einem Reibungsprüfstand ermittelt. Die Beziehung der Radrauheit zum Vorbeifahrtgeräusch wird gemäß dem Rollgeräuschmodell hergestellt, so dass die resultierende Radrauheit mit einem gewichteten Einzahlwert – dem Radrauheitsindex - akustisch beurteilt werden kann.

Im Projekt wurden Versuche mit aktuell verfügbaren und zugelassenen Bremssohlen auf einem Bremsprüfstand durchgeführt. Messdaten aus Fahrversuchen vorheriger Entwicklungsprojekte wie EuropeTrain und LZarG wurden herangezogen, um die Vergleichbarkeit der Prüfstandsergebnisse mit Feldversuchen zu analysieren und Referenzwerte für das Rollgeräuschmodell abzuleiten. Der vorliegende Beitrag stellt eine Kurzfassung des Abschlussberichtes des Forschungsprojektes [2] dar.

Das Modell

Die akustische Radrauheit auf der Lauffläche eines Güterwagenrades entsteht durch den Kontakt von Rad und Schienen und den von Rad und Bremssohlen. Verschiedene Typen von Bremssohlen verursachen je nach Material unterschiedliche Radrauheitsspektren. Die akustischen Rauheiten von Rad und Schiene addieren sich zu der kombinierten Rauheit $L_{R,comb}$, die maßgeblich das Rollgeräusch anregt:

$$L_{R,comb}(\lambda) = 10 \cdot \lg\left(10^{0,1L_{R,rail}(\lambda)} + 10^{0,1L_{R,wheel}(\lambda)}\right) \quad (1)$$

mit λ = Wellenlänge.

Die Schallemission von vorbeifahrenden Zügen mit konventioneller Geschwindigkeit besteht hauptsächlich aus Rollgeräusch. Insbesondere bei Güterwagen ohne Antrieb oder andere geräuschverursachende Ausrüstung ist das Rollgeräusch die dominierende Schallquelle. Es ist bekannt, dass Bremssohlen aus Grauguss die Radlauffläche aufrauen und hohe Rollgeräuschpegel hervorrufen, während Bremssohlen aus Verbundwerkstoffen eine glattere Radoberfläche und entsprechend weniger Geräuschemissionen verursachen.

Die Rollgeräuschübertragungsfunktion $L_H(\lambda)$ beschreibt das Verhältnis der Anregung durch die kombinierte Rauheit zum Vorbeifahrgeräuschpegel $L_{pAeq,Tp}$, d.h. die Schallabstrahlung von Rad, Schiene und Schwelle und die Schallausbreitung vom Fahrzeug zur Messposition wird durch die Übertragungsfunktion erfasst,

$$L_H(\lambda) = L_{pAeq,Tp}(\lambda) - L_{R,comb}(\lambda) - 10\lg\left(\frac{N_{axl}}{l}\right) \quad (2)$$

Die Übertragungsfunktion wird auf N_{axl} = die Anzahl der Radachsen des Fahrzeugs und l = die Länge des Fahrzeugs normiert [3]. Bei bekannter Schienenrauheit und Rollgeräuschübertragungsfunktion wird das Vorbeifahrgeräusch von der Radrauheit bestimmt.

Auf der Basis des Rollgeräuschmodells haben Létourneaux und Aubin 2015 ein Bewertungsverfahren für Bremssohlen anhand der Radrauheit vorgeschlagen [4]. Allerdings sollte dort die Radrauheit im Rahmen von Feldtests an Fahrzeugen ermittelt werden, die mit den zu untersuchenden Bremssohlen ausgestattet sind und eine Laufleistung von 15.000 km aufweisen.

Ziel des aktuellen Forschungsprojekts ist es, zu untersuchen, ob eine für das geprüfte Bremssohlenprodukt charakteristische Radrauheit auf einem Bremsprüfstand erzeugt werden kann und ob die Ergebnisse reproduzierbar sind. Ziel ist es nicht, auf dem Prüfstand die exakte akustische Radrauheit zu erzeugen, wie sie an Rädern im Betrieb zu finden ist. Da es auf dem Prüfstand keinen Rad-Schiene-Kontakt gibt, sind Abweichungen zu den Ergebnissen für die Radrauheit aus dem Betrieb zu erwarten.

Der Radrauheitsindex

Zur Bestimmung des Radrauheitsindex aus der Radrauheit gemäß Gleichung (1) - (4) werden eine Referenzschienenrauheit $L_{R,rail,ref}(\lambda)$ und eine Referenzübertragungsfunktion $L_H^{weight}(\lambda)$ benötigt. Beide Referenzspektren werden aus TSI-konformen Vorbeifahrtgeräuschmessungen gewonnen.

Die auf dem Prüfstand gemessen Rauheit eines Rades, das mit der zu prüfenden Bremssohle gebremst wird, wird zu der vordefinierten Schienenrauheit $L_{R,rail,ref}\ (\lambda)$ gemäß Gleichung (1) addiert, um die kombinierte Rauheit $L_{R,comb}^{new}\ (\lambda)$ zu erhalten.

Die kombinierte Rauheit hat ein typisches Spektrum im Wellenlängenbereich von 0,3 cm – 20 cm, aber nicht der gesamte Bereich ist für den Rollgeräuschpegel gleichermaßen relevant. Die Referenzübertragungsfunktion L_H^{weight} stellt gleichzeitig eine Gewichtungsfunktion dar. Aus dem Spektrum der kombinierten Rauheit werden die Wellenlängen hervorgehoben, die den Vorbeifahrgeräuschpegel am stärksten dominieren. Die gewichtete, kombinierte Rauheit folgt aus Gleichung (3):

$$L_{R,comb}^{weighted}(\lambda) = L_H^{weight}(\lambda) + L_{R,comb}^{new}(\lambda) \qquad (3)$$

Der dritte und letzte Schritt der Berechnung besteht darin, den Radrauheitsindex zu berechnen, indem die Terzbänder der gewichteten, kombinierten Rauheit gemäß Gleichung (4) energetisch aufsummiert werden:

$$RI = 10 \cdot \lg\left(\sum_i 10^{\frac{L_{R,comb}^{weighted}(\lambda_i)}{10}}\right), \mathrm{dB}, \qquad (4)$$

wobei *RI* die Abkürzung für den (Rad-)Rauheitsindex und λ_i die Mittenwellenlänge des i-ten Terzbandes ist.
Die Herleitung der Referenzdaten und die gewählten Spektren für die Referenzschienenrauheit sowie für die Referenzübertragungsfunktion sind im Abschlussbericht des Forschungsprojektes [2] dokumentiert.

Die Prüfstandsversuche

Die Versuche mit verschiedenen Bremssohlen wurden auf dem Bremsprüfstand der DB Systemtechnik GmbH in Minden durchgeführt (Abbildung 1).

Abbildung 1: Der große Reibungsprüfstand der DB Systemtechnik GmbH

Der Bremsprüfstand wird von einem akkreditierten Prüflabor für den Nachweis der reibtechnischen Eigenschaften von Bremssohlen betrieben.

Als Prüfprogramme wurden die sogenannten Leistungsprogramme A2_a für LL-Sohlen und A1_a für K-Sohlen nach UIC 541-4 [6] ausgewählt. Die Programme decken relevante Lastfälle und Bedingungen ab, zum Beispiel leer-beladen, trocken-nass oder unterschiedliche Anpresskräfte. Ein Durchlauf des Standardprogramms dauert 2-3 Tage. Bei vollständigem Programmdurchlauf werden 164 Bremsungen durchgeführt.

Zur Untersuchung der Methode wurden verschiedenen Typen bekannter Verbundstoff-Bremssohlen gewählt, die im Eisenbahnsektor weit verbreitete Anwendung finden: die organisch gebundene LL-Sohle IB116*, die organisch gebundene K-Sohle C810 und die gesinterte LL-Sohle C952-1. Zum Vergleich wurde auch ein Versuch mit einer Grauguss-Sohle durchgeführt.

Abbildung 2: Eine Verbundstoff-Bremssohle vor Einbau

Für die Prüfstandsversuche wurden drei Phasen definiert:

Phase 1: Beobachtung der Entwicklung der Radrauheit während des Prüfprogramms,
Phase 2: Feststellen der Reproduzierbarkeit,
Phase 3: Programmdurchläufe mit verschiedenen Bremssohlen.

Phase 1 und 2 wurden mit der Bremssohle IB116* durchgeführt.

Die Entwicklung der akustischen Radrauheit wurde im Verlauf des Prüfprogramms mehrmals, und zwar nach Abschluss einzelner Belastungsblöcke, überwacht. Zwischen den jeweiligen Programmabschnitten wurden Messungen der Radrauheit durchgeführt. Die Messreihen sind mit Buchstaben gekennzeichnet. Insgesamt wurden 8 Programmabschnitte definiert: A-H für den ersten Programmdurchlauf und I-O für Messreihen, die in einem zweiten Programmdurchlauf mit demselben Rad getestet wurden (Tabelle 1).

Tabelle 1: Messreihen der akustischen Radrauheit während des Prüfprogramms

Messung der akustischen Radrauheit - Marker		Programmabschnitt - Belastungsblock
Erster Programm-durchlauf	Zweiter Programm-durchlauf	
A		Zu Beginn
B	I	Nach dem Einschleifen
C	J	Nach der Konditionierung auf den Massenzustand „leer“
D	K	Nach Belastung “leer” und trocken
E	L	Nach Belastung “leer” mit Benässung

F	M	Nach Belastung “beladen” und trocken
G	N	Nach der Dauerbremsung (Simulation starkes Gefälle)
H	O	Nach Belastung “beladen”, Programmende

Die akustische Radrauheit wurde gemäß Norm EN15610 [5] ermittelt, allerdings mit 8 Messpuren im Abstand von jeweils 5 mm an statt der geforderten 3 Spuren im Abstand von 10 mm, um einen größerer Datensatz für die Überwachung der Rauheitsentwicklung zu erhalten (Abbildung 3). Das Messergebnis der Radrauheitsmessung ist der energetische Mittelwert der Rauheit aller Spuren.

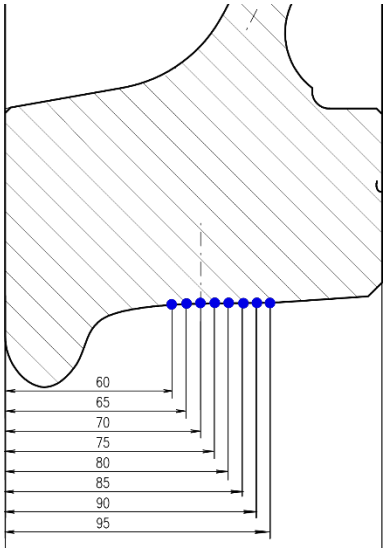

Abbildung 3: Die Position der acht Messspuren auf der Radoberfläche, aus [2].

Abbildung 4 zeigt den Medianwert aller acht Messspuren für die Messreihen A1-H1 für den ersten Programmdurchlauf mit der Bremssohle IB116*. Die Rauheitsspitze im Wellenlängenband von 3,2 cm – durch die Reprofilierung verursacht – ist schon bei Messreihe B1 nach dem Einschleifen verschwunden. Die schwarze Linie zeigt die Grenzkurve einer TSI-gemäßen Schienenrauheit, allerdings nur um eine feste Vergleichskurve einzufügen. Da eine Stabilisierung der Rauheitsentwicklung am Ende des Programms nicht eindeutig festgestellt werden konnte, wurden die Versuche mit demselben Rad- und Bremssohlen-Typ in einem zweiten Programmdurchlauf mit den Messreihen I-O fortgesetzt. Der zweite Programmdurchlauf bestätigte die Entwicklung einer charakteristischen Radrauheit. Auch die Radrauheit der Kurve H1 am Ende des ersten Durchlaufs ist schon als charakteristisches Ergebnis zu werten.

In der Phase 2 wurde das Prüfprogramm mit neuem Rad und neuer Bremssohle IB116* wiederholt (Messreihen A2 - H2), um die Reproduzierbarkeit zu prüfen. Die Versuche zeigen eine gute Übereinstimmung zwischen den Messreihen des ersten und des zweiten Rades (Abbildung 4). Die Differenz zwischen H1 und H2 am Ende des Programms liegt zwischen 0,1 dB - 3,7 dB in den untersuchten Wellenlängen mit einer durchschnittlichen Differenz von 1,3 dB.

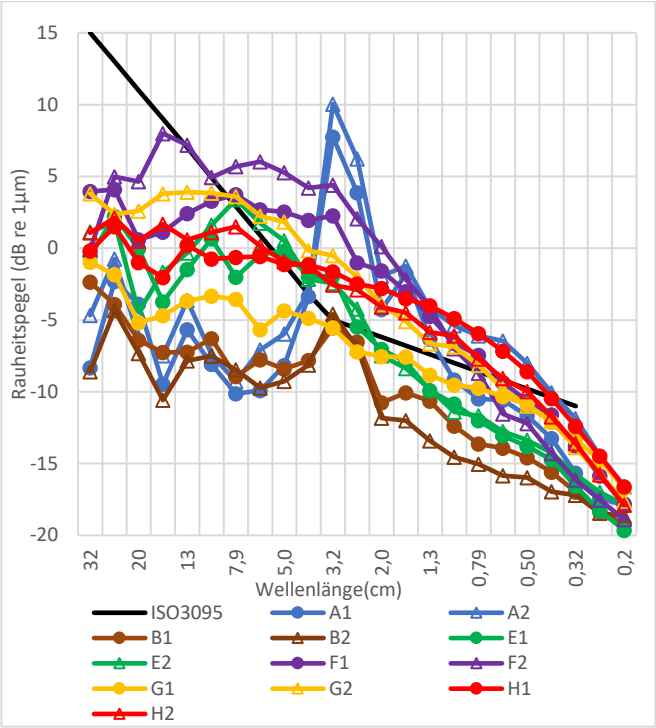

Abbildung 4: Entwicklung der Radrauheit der Bremssohle IB116* auf dem Bremsprüfstand, Messreihe A – H; Index 1: erstes Rad; Index 2: zweites Rad; aus [2].

Nach der Bestätigung der Reproduzierbarkeit wurden in der dritten Phase Versuche mit verschiedenen Typen von Bremssohlen durchgeführt. Die Versuche mit den Bremssohlen C810 (K-Sohle), IB116* (LL-Sohle) und Grauguss-Sohle verliefen erfolgreich. Die Versuche mit der gesinterten LL-Sohle C952-1 mussten wiederholt abgebrochen werden. Die Räder wurden während des Prüfdurchlaufs so stark zu Schwingungen angeregt, dass Risse in den Rädern entstanden und die Versuche nicht weitergefahren werden konnten. Daher konnten für diesen Bremssohlentyp keine validen Messergebnisse erzeugt werden.

Neben den Prüfstandsversuchen wurden auch die Messdaten von Feldversuchen detailliert ausgewertet, die in den früheren Forschungsprojekten EuropeTrain, LZarG und Nicobb durchgeführt wurden (eine kurze Darstellung der verwendeten Projekte EuropeTrain, LZarG und Nicobb findet sich im Abschlussbericht [2]). Damit konnte die auf dem Prüfstand erzeugte Radrauheit mit der betrieblich erzeugten Radrauheit bezüglich der verschiedenen Bremssohlen verglichen werden.

Abbildung 5 zeigt die Ergebnisse der Prüfstandsversuche im Vergleich mit den Feldversuchen für die Bremssohlen C810 (K-Sohle), IB116* (LL-Sohle) und Grauguss-Sohle. Es kann festgestellt werden, dass alle Bremssohlen auf dem Prüfstand ein charakteristisches Rauheitsspektrum erzeugen. Darüber hinaus ist die Radrauheit vom Prüfstand mit der von Rädern im Betrieb vergleichbar. Bei der Grauguss-Sohle ist bei größeren Wellenlängen eine deutliche Abweichung zwischen Prüfstands- und Feldversuchen zu erkennen. Es liegt die Vermutung nahe, dass die Ablagerungen auf dem Rad, die während der Prüfstandsversuche entstanden sind, bei den Betriebsversuchen durch das Rollen des Rades auf der Schiene reduziert werden.

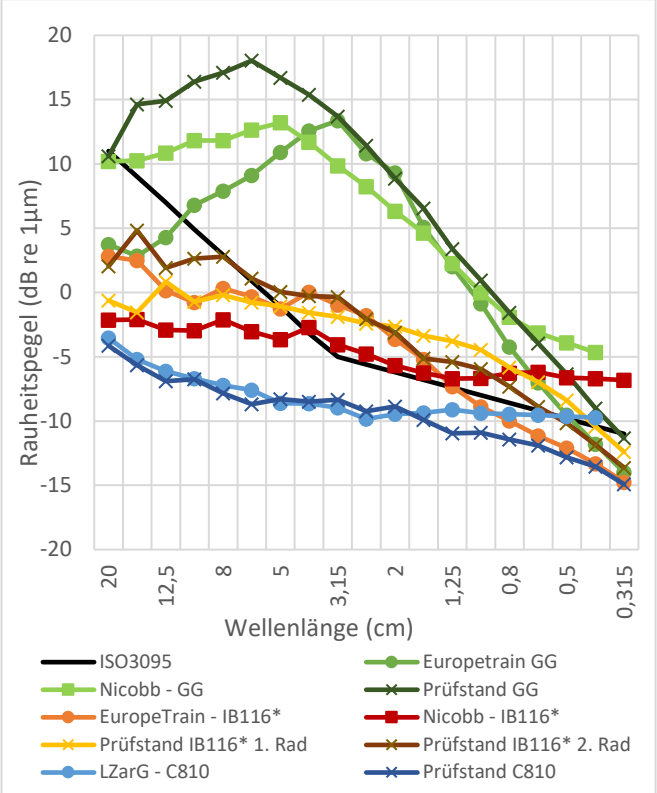

Abbildung 5: Radrauheitsspektren für verschiedene Bremssohlen am Ende der Prüfstandsversuche im Vergleich zu Betriebsversuchen, aus [2].

Bewertung

Mit Hilfe des Radrauheitsindexes werden die Rauheitsspektren in einen Einzahlwert überführt. Mit den aus dem Projekt Nicobb [7] ermittelten Referenzdaten ergeben sich die in Tabelle 2 gezeigten Indizes. Die Berechnung lässt sich sowohl auf die betrieblich gemessenen Radrauheitsspektren als auch auf die auf dem Prüfstand gemessenen Radrauheitsspektren anwenden.

Der Radrauheitsindex ermöglicht eine Unterscheidung in „laute“ und „leisere“ Bremssohlen als auch eine Grenzwertsetzung. Mit den gewählten Referenzdaten erreichen die bekannten, leisen Verbundstoff-Bremssohlen auf dem Prüfstand einen $RI < 1$ dB, der Index für die Graugusssohlen liegt deutlich höher.

Tabelle 2: Radrauheitsindizes für verschiedene Bremssohlen

	Bremssohle (Datensatz)	***RI* [dB]**
Feldversuch	IB116* (EuropeTrain)	-0,5
	C952-1 (EuropeTrain)	-1,7
	C810 (LZarG)	-4,1
	Grauguss (EuropeTrain)	11,0

	Bremssohle (Messreihe)	***RI* [dB]**
Prüfstand	IB116* (H1)	0,4
	IB116* (O1)	-2,4
	IB116* (H2)	0,1
	C810 (N)	-4,4
	Grauguss (F)	12,4

Fazit

Im Rahmen einer intensiven und interdisziplinären Zusammenarbeit der Bereiche Akustik und Erschütterungen, des Engineerings Bremstechnik und der bremstechnischen Versuchsabteilung der DB Systemtechnik GmbH konnte das Projekt „Akustische Anerkennung neuer Bremssohlen“ erfolgreich zum Abschluss gebracht werden.

Die Eignung von Prüfstandstests zur Beurteilung der akustischen Eigenschaften von Bremssohlen anhand der von ihnen erzeugten Radrauheit konnte gezeigt werden. Der Radrauheitsindex als Einzahlindikator lässt eine Klassifizierung in leisere und lautere Bremssohlen zu.

Damit kann das Forschungsprojekt einen wichtigen Beitrag zur Schließung des offenen Punktes im Anhang F der TSI Lärm 2019 [1] leisten.

Literatur

[1] DURCHFÜHRUNGSVERORDNUNG (EU) 2019/774 DER KOMMISSION vom 16. Mai 2019 zur Änderung der Verordnung (EU) Nr. 1304/2014 in Bezug auf die Anwendung der technischen Spezifikation für dbrüsie Interoperabilität des Teilsystems „Fahrzeuge — Lärm“ auf Bestandsgüterwagen

[2] Starnberg, M., Brick, H., Dörsch, S.: Akustische Anerkennung neuer Bremssohlen, Berichte des Deutschen Zentrums für Schienenverkehrsforschung beim Eisenbahn-Bundesamt, Dresden, 2021

[3] CEN/TR 16891: Railway applications – Acoustics - Measurement method for combined roughness, track decay rates and transfer functions, Mai 2016

[4] Létourneaux, F., Aubin, F.: Acoustic Specification of Composite Brake-Blocks for Railway vehicles, Proceedings of the 10th European Congress and Exposition on Noise Control Engineering Euronoise2015, Maastricht, 2015

[5] EN 15610: Railway applications - Acoustics - Rail and wheel roughness measurement related to noise generation, Mai 2019

[6] UIC 541-4: Brakes - Composite brake blocks – General conditions for certification and use, November 2020

[7] Meunier, N., Létourneaux, F., Cremezi-Charlet, C.: The UIC-project Noise Impact of Composite Brake Blocks (Nicobb), Proceedings of the International Conference on Acoustics NAG/DAGA 2009, Rotterdam, 2009