

Reduzierung der Laufgeräusche von Stadtbahnfahrzeugen durch gummigefederte Hybrid-Räder

Martin Fehndrich¹, Franz Murawa¹, Siegmund Wiecha²

¹ Bochumer Verein Verkehrstechnik GmbH (BVV), 44793 Bochum, E-Mail:fehndrich@bochumer-verein.de

² Stadtwerke Verkehrsgesellschaft Frankfurt am Main mbH (VGF)

Einleitung

Aluminium-Hybridräder erfreuen sich beim Einsatz im öffentlichen Schienennahverkehr steigender Beliebtheit. Gewichtseinsparungen von bis zu 70 kg pro Rad führen zu geringeren Energieverbräuchen im Betrieb und ermöglichen höhere Zuladungen. Für den Betriebseinsatz ist auch die Frage des Einflusses auf die Laufgeräusche durch den Einsatz von Hybridrädern wichtig. Hierzu fanden zwei Messkampagnen in den Jahre 2019 und 2021 mit akustischen Vergleichsmessungen bei unterschiedlichen Vorbeifahrtsgeschwindigkeiten an einem Gleis auf dem Betriebshof der VGF Zentralwerkstatt in Frankfurt statt. Verglichen wurden die Vorbeifahrtspegel regulärer Fahrzeuges des "U5"-Typs mit herkömmlichen Straßenbahnradern aus Stahl und eines "U5"-Fahrzeuges, das mit Aluminium Hybridrädern ausgestattet ist.

Gummigefedertes Hybridrad

Die Räder bei Straßen- und Stadtbahnen sind in aller Regel gummigefederte Räder, d.h. ein äußerer Radreifen ist mittels federnder und dämpfender Gummielemente mit einem inneren Scheibenradkörper verbunden. Die Federung durch die Gummielemente erlaubt Radreifen und Scheibenradkörper sich in engen Grenzen (wenige Millimeter) gegeneinander zu bewegen und dadurch Ungleichmäßigkeiten des Fahrwegs auszugleichen.

Während der auf der Schiene laufende Radreifen als Verschleißelement aus Festigkeitsgründen aus Stahl besteht, kann der Scheibenradkörper grundsätzlich auch aus anderen Materialien bestehen. Beim Aluminium Hybridrad bestehen Scheibenradkörper und Radfelgenreifen aus einer Aluminium-Knetlegierung.

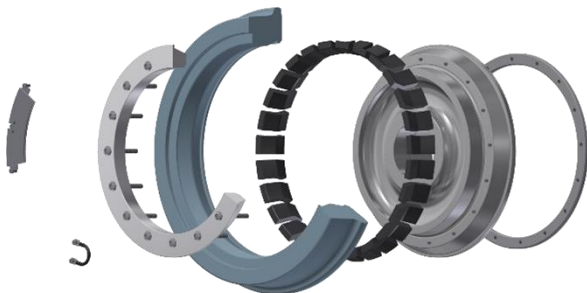


Abbildung 1: Explosionsbild des Hybrid-Rades. Mit (von links nach rechts), Radschallabsorber, Hybrid-Strombrücke, Radfelgenreifen aus Aluminium mit Schrauben, Radreifen aus hochfestem Stahl, Gummikörper, Scheibenradkörper aus Aluminium und Gegenlager aus hochfestem Stahl.

Mit materialangepasstem Design lässt sich mit dem Einsatz von Scheibenradkörper aus Aluminium bis zu 70 kg Gewicht einsparen. Die geringere beschleunigte Masse führt zu geringeren Energieverbräuchen im Betrieb und ermöglicht eine höhere Zuladung [1].

Abbildung 1 zeigt den schematischen Aufbau des bei der VGF, Frankfurt im Einsatz befindlichen Hybrid-Rades (Typ Bo2000).

Die anderen Festigkeitseigenschaften bei Aluminium erfordern ein anderes, massiveres Design des Scheibenradkörpers (siehe Abb. 2). Insbesondere wird der Steg im Gegensatz zu Stahlrädern deutlich dicker (Faktor 3) und kürzer ausgeführt. Dies führt zu einer höheren Steifigkeit des Bauteils und damit zu geringeren Schwingungsamplituden im akustischen Bereich.

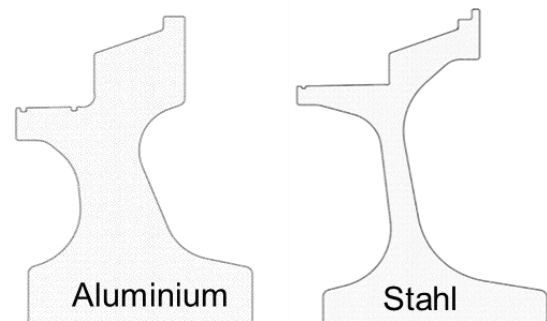


Abbildung 2: Vergleich der Kontur eines Aluminium- und eines Stahlscheibenradkörpers.

Auch FEM Berechnungen bestätigen, dass sich bei gleichen Kräften der Scheibenradkörper aus Aluminium weniger verformt als der Scheibenradkörper aus Stahl [2].

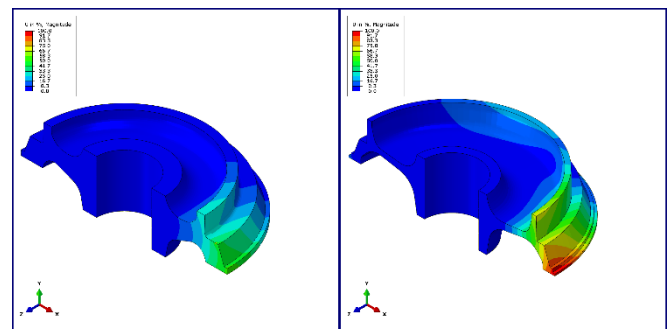


Abbildung 3: FEM Berechnung der Verformung eines Scheibenradkörpers aus Aluminium/Stahl bei gleicher axialer Kräfteinleitung.

Radschallabsorber

Die Hybrid-Räder werden mit an das Rad und dessen dynamischen Eigenschaften angepassten Radschallabsorbern ausgerüstet, die mit Schrauben an der Außenseite der Radreifen befestigt werden.

Die Radschallabsorber haben eine Sandwichstruktur aus Stahl- und Elastomerschichten, die es ermöglichen mit den Eigenfrequenzen des Rades zu schwingen und so tonale Geräusche bei Kurvenfahrten (Kurvenkreischen) zu dämpfen. Radschallabsorber sind geometrisch an die Form und die dynamische Verformung und akustisch an die Eigenfrequenzen des Rades angepasst.



Abbildung 3: Strombrücken und Absorber im eingebauten Zustand am Aluminium Hybridrad [3]

Schwingungsmessung am Rad

Die Dämpfungswirkung von Absorbern lässt sich im Labor durch eine Messung der Übertragungsfunktion zeigen. Dazu wird das Rad auf dem Prüfstand mit einem Impulshammer axial auf der Stirnfläche angeregt und die Beschleunigung der Radschwingungen in derselben Richtung gemessen. Das Verhältnis der Schwingbeschleunigung zur anregenden Kraft wird frequenzabhängig dargestellt.

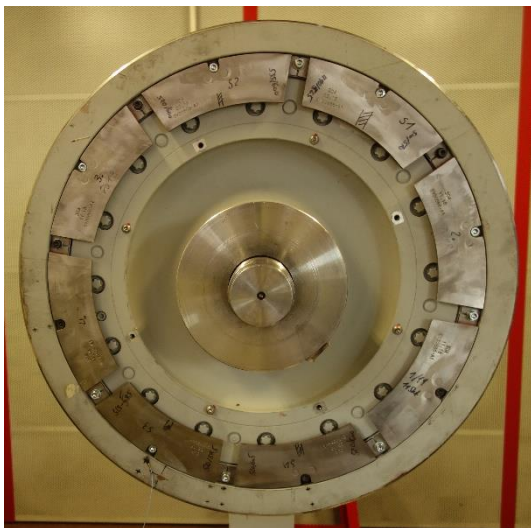


Abbildung 4: Hybrid-Rad mit Radschallabsorbern auf Prüfstand

Im Folgenden wird die axiale Übertragungsfunktion eines Rades mit Absorbern und eines Rades ohne Absorber dargestellt.

Axiale Schwingungen des Rades sind vor allem für Kurvenkreischgeräusche verantwortlich, während radiale Schwingungen das Laufgeräusch bei Geradeausfahrt bestimmen. Dargestellt ist jeweils für einen Frequenzbereich bis 5.000 Hz das Verhältnis von Schwingbeschleunigung zu anregender Kraft des Impulshammers in einem logarithmischen dB-Maßstab.

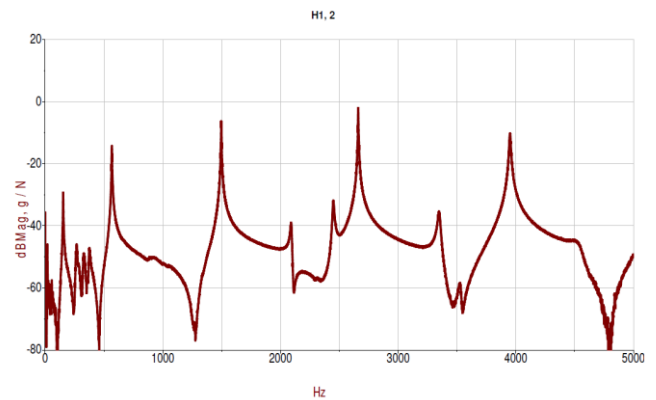


Abbildung 5: Übertragungsfunktionen axial/ohne Absorber

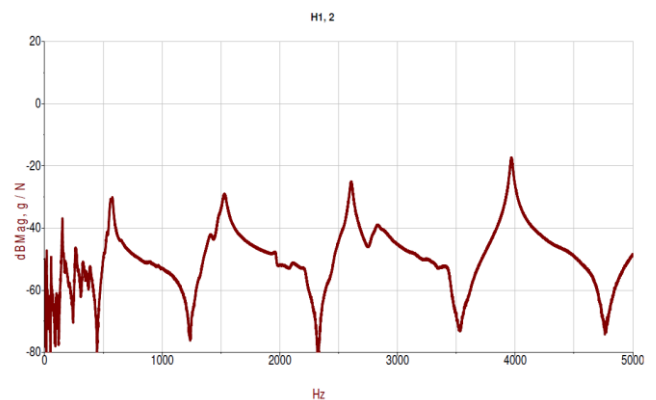


Abbildung 6: Übertragungsfunktionen axial/mit Absorber

In den Übertragungsfunktionen erkennt man deutlicher niedrigere Schwingungspegel bei den Rädern mit Radschallabsorbern.

Betriebserprobung am U5-Stadtbahnfahrzeug

Fahrzeuge der Baureihe U5 sind in Frankfurt seit 2008 im Einsatz. Es handelt sich dabei um sechsachsige Hochflur-Gelenktriebwagen mit einer Länge von 25 m.

Seit 2018 wird im Rahmen eines Feldversuchs zur Serienfreigabe der Hybridräder ein entsprechend ausgerüstetes Zweirichtungsfahrzeug (Nr. 694) im normalen Fahrgastbetrieb der VGF eingesetzt. Teil dieser Betriebserprobung ist eine akustische Messung der Laufgeräusche.



Abbildung 7: U5-Stadtbahnfahrzeug Nr. 694, Frankfurt

Akustische Messungen

Akustische Messungen wurden im Mai 2019 [4] und August 2021 [5] von der Firma FCP IBU GmbH auf der Gleisanlage der VGF Zentralwerkstatt Heerstraße in Frankfurt durchgeführt. Gemessen wurde im Gleisbogen (Radius 65 m) südöstlich der Werkshalle als auch auf dem geraden Gleisstück östlich der Werkshalle. Mikrofonabstand 7,5 m von der Gleismitte, 1,2 m über Gleisoberkante, Bogeninnenseite.

Neben dem Fahrzeug Nr. 694, das mit Hybridrädern ausgerüstet ist, kam als Referenz jeweils ein Serienfahrzeug mit normalen Stahlrädern zum Einsatz.



Abbildung 8: Stadtbahnfahrzeug im Auslauf des südöstlichen Gleisbogens. Foto A. Schäfer/FCP IBU

Die ersten Messungen fanden am 15.05.2019 (Gleisbogen) und 16.05.2019 (Gerade) statt. Zum Einsatz kamen die bis auf die Räder baugleichen Zweirichtungsfahrzeuge Nr. 694 (Hybrid-Räder) und Nr. 663 (Stahlräder), alle Räder ohne Radschallabsorber.

In den Tabellen 1 und 2 finden sich die aus drei Fahrten gemittelten, mittlere Schallpositionspegel SELm in dB(A).

Tabelle 1: Pegel SELm, Gleisbogen (15.05.2019)

Variante	Pegel dB(A)		
	20 km/h	40 km/h	55 km/h
Alu	91,7	92,0	92,3
Stahl	94,1	94,4	94,3
Delta	2,4	2,4	2,0

Tabelle 2: Pegel SELm, Gerade (16.05.2019)

Variante	Pegel dB(A)		
	20 km/h	40 km/h	55 km/h
Alu	82,5	88,3	90,7
Stahl	83,5	89,0	91,6
Delta	1,0	0,7	0,9

Weitere Messungen fanden am 25.06.2021 (Gleisbogen) und 26.08.2021 (Gerade) statt. Die Hybridräder an Fahrzeug Nr. 694 wurden inzwischen mit Radschallabsorbern ausgerüstet.

Referenzfahrzeug war Nr. 644 (Stahlräder ohne Absorber).

In den Tabellen 3 und 4 finden sich die aus drei Fahrten gemittelten, mittlere Schallpositionspegel SELm in dB(A).

Tabelle 3: Pegel SELm, Gleisbogen (25.08.2021)

Variante	Pegel dB(A)		
	20 km/h	40 km/h	55 km/h
Alu Abso.	90,5	91,0	91,0
Stahl	91,6	92,0	92,5
Delta	1,1	1,0	1,5

Tabelle 4: Pegel SELm, Gerade (26.08.2021)

Variante	Pegel dB(A)		
	20 km/h	40 km/h	55 km/h
Alu Abso.	77,7	82,8	84,3
Stahl	77,5	83,5	86,7
Delta	-0,2	0,7	2,4

Bei allen Fahrten war bei den Geräuschen der Bogenfahrt kein pegelbestimmendes Kurvenkreischen wahrnehmbar.

Die Pegel beider Messkampagnen sind (insb. bei den Referenzfahrzeugen) deutlich unterschiedlich, so dass hier ein direkter Vergleich nicht möglich ist. Ursache dieser Pegelunterschiede könnten etwas andere Standorte der Mikrofone sein, aber auch Änderungen des Gleis- und Laufflächenzustandes, z.B. durch Bremsversuche.

Am jeweiligen Messtag lagen die Pegel des Fahrzeugs mit Hybridrädern unter ansonsten gleichen Rahmenbedingungen immer unter denen des Fahrzeugs mit Stahlrädern. Da keine pegelbestimmenden Kreischgeräusche auftraten, konnten Radschallabsorber keine Vorteile ausspielen.

Zusammenfassung/Ausblick

Beim Einsatz von Hybridrädern traten bei akustischen Messungen an Straßenbahnfahrzeugen bei der Vorbeifahrt und im Gleisbogen niedrigere Pegel als beim Einsatz von herkömmlichen Straßenbahnradern aus Stahl auf. Die Befürchtung, dass an leichteren Bauteilen größere Schwingamplituden auftreten, die zu höheren akustischen Pegeln führen, bestätigen sich nicht. Vielmehr führt das voluminösere Design der Aluminiumbauteile zu einer größeren Bauteilsteiifigkeit, und damit zu geringeren akustisch wirksamen Schwingungen.

Acknowledgement

Unser herzlicher Dank geht an die Mitarbeiter der Firma FCP IBU GmbH, Essen, für die professionelle Durchführung der akustischen Messungen und Auswertungen sowie an die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der Frankfurter Verkehrsbetriebe für die professionelle Vorbereitung und Durchführung der Messkampagnen.

Literatur

- [1] Leicht, energiesparend, ausdauernd – Hybridräder der BVV, *bahn manager*, 5, 2021, S. 36
- [2] T. Disterheft: FEM Vergleich von Scheibenradkörpern aus Aluminium und Stahl, Berechnungsbericht RP22004, 2022, Bochumer Verein Verkehrstechnik GmbH
- [3] T. Herbstmann: BVV.Hybridräder bei der Verkehrsgesellschaft Frankfurt am Main, Ein Erfahrungsbericht, Untersuchungsbericht RL20001, 08.09.2020, Bochumer Verein Verkehrstechnik GmbH
- [4] H.-J. Stummeyer: Schalltechnische Vergleichsuntersuchung, Messbericht, 24.06.2019, FCP IBU GmbH
- [5] A. Schäfer: Schalltechnische Vergleichsuntersuchung, Messbericht, 16.09.2021, FCP IBU GmbH