

9

Schalltechnische Charakterisierung des Koralmtunnels

Dipl.-Ing. Dr.techn. Sebastian Floss (Wien), Dipl.-Ing. Roland Fischer (Wien)

Vorliegender Beitrag beschäftigt sich mit den schalltechnischen Untersuchungen des Koralmtunnels. Durch eine Messinstallation an einer Railjet-Garnitur konnten die Schallemissionspegel, die während der Tunneldurchfahrt bei verschiedenen Geschwindigkeiten im Bereich des Rad-Schiene-Kontaktes entstehen, aufgezeichnet werden. Weiters wurden auch die Schallimmissionen im Zuginneren gemessen. Mit diesen konnte auch das Schalldämmmaß des Railjets im Tunnel bestimmt werden. Die Emissionsmessergebnisse dienen zum Nachweis der akustischen Wirksamkeit von Gleisabsorbern im Bereich der Tunnelportale. Die Messdaten aus dem Koralmtunnel werden dann mit den Ergebnissen aus zwei weiteren Tunneln – Wienerwald Tunnel und Gotthard-Basis Tunnel – verglichen.

9.1 Einleitung

Im Zuge der Inbetriebnahmefahrten durch den Koralmtunnel (KAT) wurden schalltechnische Untersuchungen an einer Railjet-Garnitur beim Durchfahren des Tunnels durchgeführt. In Anlehnung an die durchgeführten schalltechnischen Untersuchungen im Rahmen vorrausgegangener Messfahrten im Jahr 2012 sowie Messungen im Gotthard-Basis Tunnel (GBT) und im Wienerwald Tunnel (WWT) aus dem Jahr 2016 [1,2] wird die Wirksamkeit von Absorberplatten (Gleisabsorber, GSA) auf der Festen Fahrbahn (FF) im Tunnel untersucht. Die Charakterisierung des KAT hinsichtlich Schallemissionen, der Schallausbreitung

und der Sprachverständlichkeit wird in Zusammenarbeit mit dem Institut für Verkehrswissenschaften der TU Wien, dem Institut für Schallforschung der Österreichischen Akademie der Wissenschaften (ÖAW) und mit der Abteilung Messtechnik und Fahrweganalyse der ÖBB Infrastruktur AG durchgeführt.

Zur Beurteilung der Wirksamkeit der Gleisabsorber auf der FF im Bereich der Tunnelöffnungen wurden Schallpegelmessungen im und am Fahrzeug geplant.

Die Messungen, sowie die Auswertung der Daten aus dem Oberbaumesswagen wurden von VCE durchgeführt. Die Schallpegelmessung am und im Railjet mit Hilfe der geeichten Mikrofone dient dazu, die Auswirkungen der akustischen Eigenschaften durch das Befahren des Tunnels mittels an Normen angelehnter und objektiv vergleichbarer Pegelgrößen darzustellen, um dadurch die akustische Vergleichbarkeit mit den Gotthard-Basistunnel und Wienerwald Tunnel (GBT und WWT) zu ermöglichen. [3]

Es wurden die folgenden akustischen Größen ermittelt:

- I Emissionspegel im Nahbereich des Rad-Schiene Kontaktes
- I Bestimmung des Schalldämmmaß des Railjets im Tunnel
- I Vergleichswerte der gemessenen Pegel mit anderen Tunneln zur Beurteilung der akustischen Eigenschaften

Zusätzlich zu den Schallpegelmessungen wurde die Messfahrt mit zwei Webcams (WC1 & 2) aufgezeichnet. Die Videokamera im Triebfahrzeug (Vectron-Lok, VK) diente dazu, die Geschwindigkeitsanzeige zu protokollieren, da vor allem in Tunneln die Auswertung der Geschwindigkeit durch einen GPS-Datenlogger aufgrund schlechten Empfangs unzureichend ist. Die Webcams im Steuerwagen (WC2) und in der Zugmaschine (WC1) dienen dazu, die Strecke zu filmen, um etwaige Störungen bei der Auswertung zurückverfolgen zu können (siehe Abbildung 1).

Insgesamt wurden acht Tunneldurchfahrten (sechs bei konstanter und zwei bei nicht konstanter Geschwindigkeit) durchgeführt. Die gemessenen Schallpegel werden dann mit den Werten aus dem GBT (2016,[1,2]) und dem WWT (2016,[1,2]) verglichen.

9.2 Messaufbau und Messdurchführung

9.2.1 Railjet

Der Messaufbau der Messfahrten wurde in Übereinstimmung mit den vorangegangenen Messfahrten aus dem Jahr 2016 gewählt. Das Hauptaugenmerk lag dabei darauf, die Messpunkte so zu wählen, dass der für die Passagiere relevante Innenraumpegel (MP1 und MP3 in Abbildung 1) gemessen wird. Zusätzlich sollte durch Messpunkte außen am Wagen die Schallausbreitung und Akustik im Tunnel charakterisiert werden (MP2 und MP4 in Abbildung 1). Aus dem Vergleich der Messwerte Innen und Außen kann auf das Schalldämmmaß D (Formel 1) im Betrieb rückgeschlossen werden.

$$D = MP2 - MP1 + 10 \log\left(\frac{S}{A}\right) \quad (1)$$

Hier kompensiert der letzte Term $10 \log(S/A)$ den Einfluss der Raumakustik des Empfangsraums mit dem Volumen V ($V = \text{ca. } 260 \text{ m}^3$ und $S = \text{ca. } 100 \text{ m}^2$). Mit einer Nachhallzeit von 0,33 Sekunden ist dieser Term vernachlässigbar ($A = 0,16 \cdot V/T$).

Die exakte Positionierung der Sensoren ist Abbildung 1 gezeigt. Weiters ist die Lage der Videoaufzeichnung im Triebfahrzeug sowie im Steuerwagen des Railjets ersichtlich (siehe Abbildung 1 rechts). Die Videokamera (VK) im Triebfahrzeug diente dazu die Fahrgeschwindigkeit auf der Geschwindigkeitsanzeige zu protokollieren, da vor allem in Tunneln die Auswertung der Geschwindigkeit durch einen GPS-Datenlogger unzureichend ist. Die zwei Webcams (WC1 und WC2) im Steuerwagen dienten dazu, die Strecke aufzuzeichnen, um die Streckenparameter für die Auswertung bestimmen zu können.

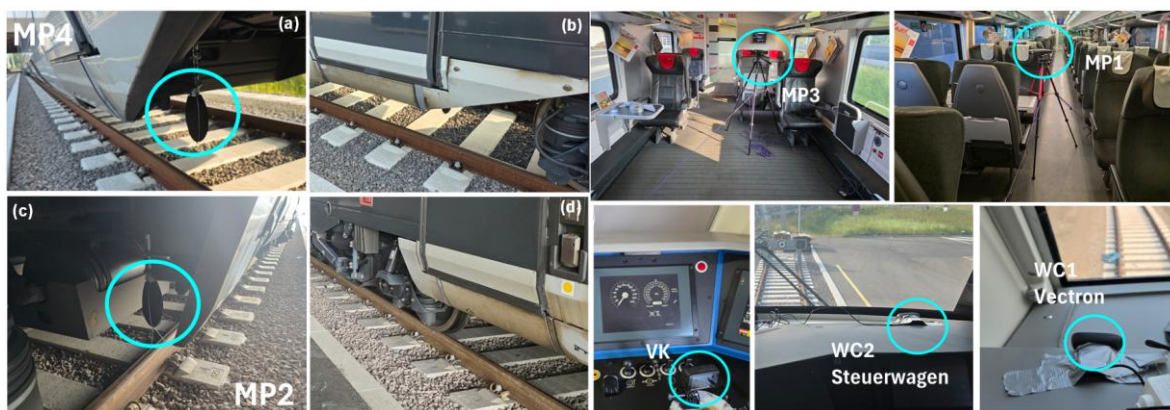


Abbildung 1 Positionierung der Schallpegel-Messgeräte (MP2 und MP4) im Außenbereich des Railjets [1]. Positionierung der Schallpegel-Messgeräte (MP1 und MP3) im Inneren sowie der Webcams (WC1, WC2) und Videokamera (VK) im Railjet [3].

Abbildung 2 zeigt, auf welcher Seite des Zugs die Außensensoren befestigt wurden. Gleis 1 bezieht sich hierbei auf die Südröhre (SR) und Gleis 2 auf die Nordröhre (NR). Im Gegensatz zum GBT ist der KAT leicht und der WWT stark asymmetrisch. Es ist kann daher akustisch von Bedeutung sein, auf welcher Seite das Mikrofon befestigt wurde. Die Ausrichtung und die Abstände der Mikrofone zu den Gleisabsorberplatten (GSA) sind aber in beiden Fällen annähernd gleich.

9.3 Akustik des Koralmtunnels

9.3.1 Mittlere Schallpegelwerte pro Fahrt

Für die akustische Charakterisierung des Tunnels anhand der Emissionspegel im Außenbereich und zusätzlich der Immissionspegel im Innenraum wurden entlang der Strecke in beiden Tunnelröhren acht Fixpunkte (P1 bis P8) nach Streckenkilometer definiert. An diesen Positionen wird ein mittlerer Schallpegel über eine Sekunde berechnet. Die Messpositionen sind an beiden Tunneleinfahrten im GSA-Bereich, in der Tunnelmitte sowie jeweils etwa im ersten und letzten Viertel der Tunnellänge festgelegt (ca. km 41.3, km 43.0, km 50.0, km 55.5, km 60.0, km 65.0, km 72.0 und km 73.3).

Daraus ergeben sich für Fahrten bei **200 km/h** über P1 bis P8 für Gleis 2 (NR) energetische Mittelwerte (EMW) bei MP1 und MP2 von **72,6 dB(A)** und **112,9 dB(A)** und für Gleis 1 (SR) energetische Mittelwerte bei MP1 und MP2 von **71,1 dB(A)** und **113,9 dB(A)**. Werte für Geschwindigkeiten von 180 km/h und 230 km/h sind in Tabelle 1 bzw. 2 hinterlegt.

9.3.2 Vergleich zwischen KAT, GBT und WWT

Im Folgenden werden die Messergebnisse vom GBT, WWT und KAT gegenübergestellt. Zum Vergleich werden dafür die im Bericht von 2016 [1] gekennzeichneten Fahrabschnitte herangezogen. Die Länge der damals ausgewerteten Fahrabschnitte liegt je nach Fahrt zwischen 25 und 400 Sekunden. Im KAT werden die Werte über die gesamte Tunnelfahrt ermittelt (515 bis 655 Sekunden). Dargestellt sind in Tabelle 1 die EMW.

	Schweiz (2016)		Westbahn (2016)		Differenz	Koralmbahn (2025)		Differenz
Fahrgast- raum	GBT Ri. Biasca	GBT Ri. Flüelen	WWT Ri. Tullnerfeld	WWT Ri. Hütteldorf	Min (GBT) – WWT Ri. Tullnerfeld	KAT Ri. Klagfurt (Gleis 2).	KAT Ri. Graz- (Gleis 1)	KAT – WWT Ri. Tullner- feld/Hütteldorf
120 km/h	65,1							
160 km/h	68,7	68,9	66,5		+2,4			
180 km/h	70,6	70,6	68,1		+2,5	72,2	71,1	+3,0
200 km/h	72,1	72,2	69,5	68,9	+2,7	72,6	72,1	+2,6/ +3,7
220 km/h				71,0		-	-	-
230 km/h				72,2 (*)		75,1	74,3	+2,9

Tabelle 1 Zusammenfassung der im Innenraum (MP1) gemessenen Immissionswerte – dargestellt wird der über den Auswertebereich gemittelte A-bewertete energieäquivalente Dauerschallpegel LA,eq wobei teils über mehrere Fahrabschnitte gemittelt wurde ((*) WWT 230 km/h sehr kurze Messdauer). Für den KAT sind die energetischen Mittelwerte (EMW) von MP1 der Messpunkte P1 bis P8 gezeigt

Verglichen werden die Pegel im Fahrgastraum und im Türbereich außen. Beim KAT werden die Pegel am MP1 und MP2 verglichen, da die Mikrofonmembran an MP4 beschädigt war.

Die Auswertung bezieht sich auf die Auslegungsgeschwindigkeit im GBT von 200 km/h. Dem gegenüber kann der WWT auch mit bis zu 230 km/h befahren werden, wobei auch hier 200 km/h als repräsentativer Fahrzustand betrachtet werden. Der KAT wurde mit 180 km/h, 200 km/h und 230 km/h befahren.

Die Lage der Messpositionen bei der Messfahrt 2016 Richtung (Ri.) Hütteldorf und 2025 Richtung Klagenfurt bzw. 2016 Richtung Tullnerfeld und 2025 Richtung Graz sind vergleichbar. In Tabelle 1 fällt auf, dass die Werte Richtung Klagenfurt (Nordröhre, Gleis 2) etwas höher sind als bei der Fahrt in die andere Richtung. Dies passt gut zu dem gefundenen Trend, wonach die Schalldämmung in der Nordröhre (Richtung Graz) geringer ist als in der Südröhre. Hier können die Sekundärschallkomponenten des Innenraumpegels eine Rolle spielen, was durch unterschiedliche Schienenoberflächenzustände erklärt werden kann.

In Tabelle 2 fällt auf, dass die Werte der Außenpegel Richtung Graz (Gleis 1) etwas höher sind, was wahrscheinlich mit der Lage der Mikrofone zur Tunnelwand zusammenhängt. Bei Gleis 1 (siehe Abbildung 2) befinden sich die Mikrofone auf der Seite eines kleineren Raumvolumens; möglicherweise werden mehr Reflexionen in den Bereich des Mikrofons (MP2) eingetragen, was eine erhöhte Nachhallzeit zur Folge haben könnte.

	Schweiz (2016)		Westbahn Wien-NÖ (2016)		Differenz	Koralmbahn (2025)		Differenz
Türbereich Außen	GBT Ri. Biasca	GBT Ri. Flüelen	WWT Ri. Tullnerfeld	WWT Ri. Hütteldorf	Min (GBT) – WWT Ri. Tullnerfeld	KAT Ri. Klagfrt.(Gleis 2)	KAT Ri. Graz (Gleis 1)	KAT – WWT Ri. Tullnerfeld
120 km/h	107,0							
160 km/h	110,9	110,8	104,6		+6,2			
180 km/h	112,3	112,4	106,0		+6,4	112	112,9	+6,9
200 km/h	113,3	113,8	107,4	109,0	+5,9	112,8	113,9	+6,5/ +3,8
220 km/h				110,0		-	-	-
230 km/h				111,0 (*)		11	116,9	5,4

Tabelle 2 Zusammenfassung der im Türbereich Außen (MP2) gemessenen Immissionswerte – dargestellt wird der über den Auswertebereich gemittelte A-bewertete energieäquivalente Dauerschallpegel LA_{eq} ((*) WWT 230 km/h sehr kurze Messdauer). Für den KAT sind die energetischen Mittelwerte (EMW) von MP2 der Messpunkte P1 bis P8 gezeigt

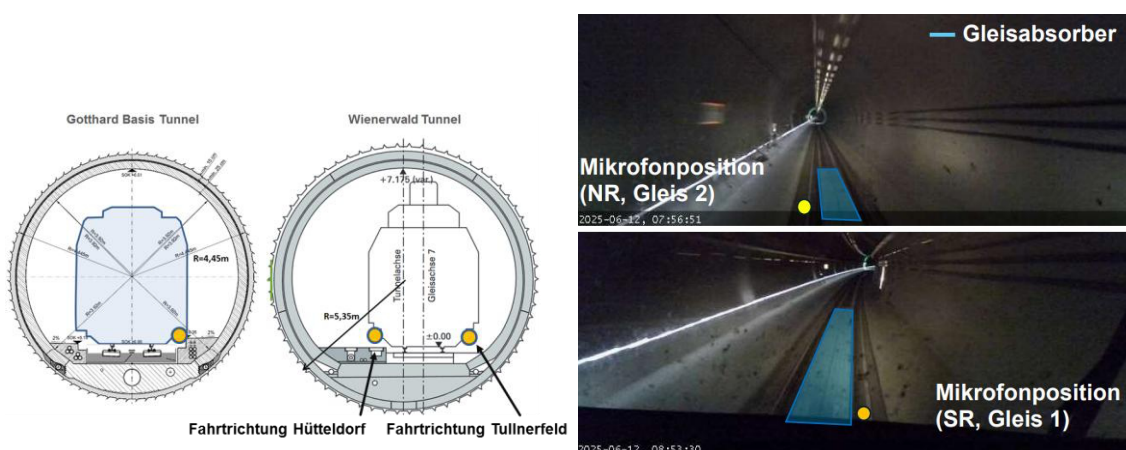


Abbildung 2 linkes: Positionierung der Außensensoren bei den Fahrten durch den GBT und den WWT; rechts: 1 Positionierung der Außensensoren bei den Fahrten durch den KAT) mit abruptem Ende der Gleisabsorber (hellblau); Bilder von WC1 und WC2.

Weiters sind im KAT im Gegensatz zum WWT keine Gleisabsorber im gesamten Tunnel verbaut. Zum Vergleich dazu sind die Mikrofonpositionen bei den Messfahrten durch den GBT und den WWT in Abbildung 2 gezeigt. Beim GBT fällt die gute Übereinstimmung der Schallpegel in beide Fahrtrichtungen auf, was mit der Symmetrie der Tunnelröhren und damit der einheitlichen Nachhallzeit auf beiden Zugseiten zusammenhängen könnte.

9.4 Interpretation

9.4.1 Lage und akustische Wirksamkeit GSA

Die Bereiche mit GSA bestehen aus einem Mittelabsorber, der über der festen Fahrbahn montiert ist. Die akustischen Eigenschaften sind durch den Absorptionskoeffizienten pro Oktavband bestimmt. Der Hersteller geht von einer erhöhten akustischen Wirksamkeit ab ca. 500 Hz aus. Mit Nachhallzeitbetrachtungen über den Querschnitt des Tunnels lässt sich eine theoretische Wirksamkeit von ca. 2.0 dB(A) berechnen (42.5 m² Querschnittsfläche).

Die Bereiche mit Fester Fahrbahn (FF) und GSA gehen in beiden Röhren abrupt in Bereiche mit FF ohne GSA über (siehe Abbildung 2). Dies ist auch akustisch nachweisbar (siehe Abbildung 3).

Anhand der Einzahlwerte pro Messposition bzw. dem energetischen Mittelwert über alle Messpositionen P1 bis P8 kann zwar der Tunnel akustisch charakterisiert werden, nicht aber die akustische Wirksamkeit der Gleisabsorber (GSA) eingeschätzt werden.

Deshalb werden nun Ausschnitte aus den Messschrieben gezeigt. Darin zu sehen sind jeweils die Schallpegelwerte an den Messpunkten im und am Zug (MP1/MP3 bzw. MP2/MP4) während der Einfahrt in den Tunnel und während der Ausfahrt aus dem Tunnel.

Über die Durchschnittsgeschwindigkeit und den Aufbau des Tunnels konnten in den akustischen Messschrieben Abschnittsmarkierungen (vertikale gestrichelte Linien in Abbildung 3) gesetzt werden, die jeweils Informationen über den Tunnel bzw. eine Änderung des Oberbaus – wie Beginn und Ende der GSA – enthalten (orange: Tunnelende/-beginn, dunkelrot: Beginn/Ende GSA, gelb: Beginn/Ende Feste Fahrbahn, grün: Beginn/Ende Masse-Feder System).

In der folgenden Abbildung 3 sind die Schallpegelunterschiede beim abrupten Übergang von FF mit GSA zu ohne GSA mit dem Symbol Δ hervorgehoben.

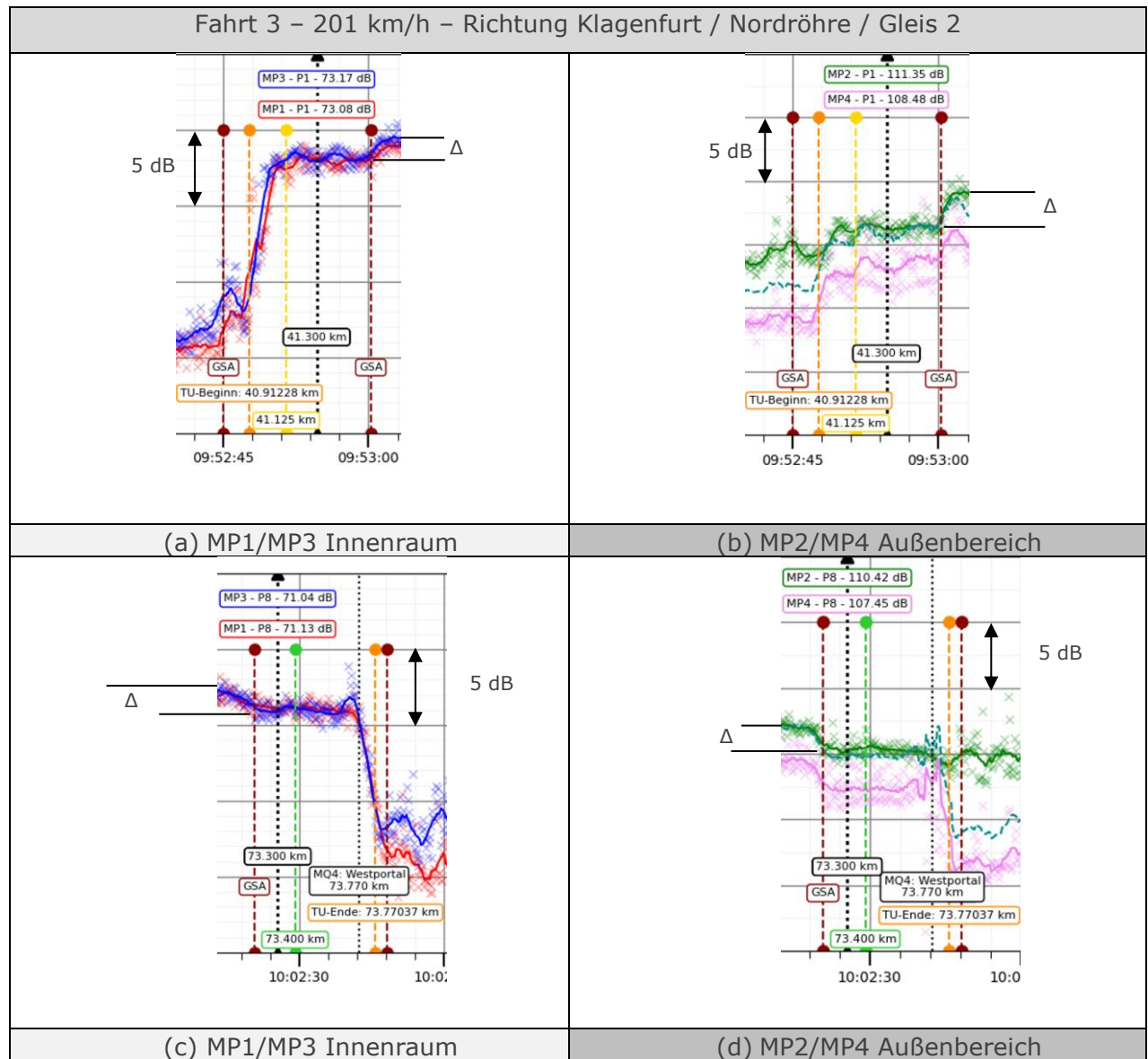


Abbildung 3 Verlauf der Schallpegelwerte im Innenraum (a) und Außenbereich (b) bei Einfahrt und bei Ausfahrt aus dem Tunnel ((c) und (d)); Messfahrt 3 bei durchschnittlicher Geschwindigkeit v_{Zug} , mittl. = 201 km/h. Zusätzlich zu sehen sind die durchschnittlichen Messwerte pro Messpunkt am Zug (MP1 bis MP4) an Messposition P1 und P8 im Tunnel; jeweils mit km-Angabe.

9.4.2 Schalldämmmaß Railjet

Zur Bestimmung des Schalldämmmaßes D des Railjets im Tunnel wird der resultierende Pegel im Senderraum MP2 und im Empfangsraum MP1 gemessen. Der im Empfangsraum (hier im Fahrgastraum) gemessene Pegel hängt dabei primär vom Schalldämmmaß der Außenhülle des Wagens und sekundär von den akustischen Gegebenheiten des Empfangsraums ab.

Im Tunnel liegt das Schalldämmmaß im Bereich von $D=40$ bis $D=42,5$ dB(A) und damit sehr deutlich unter dem Wert außerhalb des KAT (deutlich über $D=45$ dB(A)).

9.5 Zusammenfassung

Während bei den Messungen und Auswertungen mehrere relevante Geschwindigkeiten betrachtet wurden, beziehen sich die wesentlichen Analysen auf die maßgebliche Fahrgeschwindigkeit von 200 km/h:

- I Die gemessene (nicht korrigierte) Pegeldifferenz zwischen KAT und WWT im Innenraum liegt bei 3.7 dB(A); im Außenbereich liegt diese bei 6.5 dB(A).
- I Für die maßgeblichen Immissionen im Innenraum ist sowohl der resultierende Schallpegel im Tunnel reduziert um das Schalldämmmaß des Railjet als auch der sekundäre Luftschall zufolge der auf die Kabine übertragenen Vibration relevant.

Wirksamkeit der Gleisabsorber bzw. akustische Charakterisierung:

- I Die theoretische Wirksamkeit der Gleisabsorber (Mittelabsorber) beträgt ca. 2.0 dB(A). Dies konnte bei den Messfahrten bestätigt werden (1.5 bis 2.5 dB(A)).
- I Die Daten geben Hinweise darauf, dass der Mittelabsorber allein deutlich weniger wirksam ist als die Kombination aus Mittelabsorber und Randabsorber.
- I Das Schalldämmmaß im Südtunnel ist höher als im Nordtunnel; dies kann einerseits an den Sekundärschallkomponenten liegen und ist ein Hinweis darauf, dass anscheinend der Schienenzustand im Südtunnel besser ist; oder die Anordnung der Vectron-Lok als Schiebefahrzeug hat eine akustische Auswirkung.

Das Schalldämmmaß für den Railjet im KAT liegt teilweise deutlich (2.5 dB(A)) unter 43 dB(A); außerhalb des KAT bei deutlich über 45 dB(A).

Literatur

- [1] B. Weiß, G. Achs, Wirksamkeit von Gleisabsorbern, FCP ZT GmbH, Wien, Februar 2017.
- [2] B. Weiß, G. Achs, Messfahrten Gotthard-Basistunnel, FCP ZT GmbH, Wien, August 201
- [3] S. Floss, H. Töll, Verifikationsmessungen – Schallmessungen im Railjet im Koralmtunnel (KAT), FCP ZT GmbH, Wien, August 2025