

Lärmarme Umrichter- und Fahrmotorventilation der SBB Re 460

Markus Hecht, Dr.-Ing.
Bereichsleiter Mess- und Steuerungstechnik
SLM Schweizerische Lokomotiv- und Maschinenfabrik AG

Beat Kühn, Akustikingenieur
Institut für Lärmschutz Kühn & Blickle

Einleitung

Die Lokomotiven Re 460 [1] der SBB unterscheiden sich in erheblichem Mass von früher bei den SBB eingesetzten Fahrzeugen. Zur Feinoptimierung und zum Nachweis der Pflichtenheftvorgaben wurde deshalb zwischen den SBB und der Industrie ein Typenversuchsprogramm vereinbart. Einen Teil dieses Programms bilden die Lärmmessungen.

Da an einem so komplexen Gebilde wie der Lokomotive Re 460 die Optimierung einer Eigenschaft in der Regel auch Auswirkungen auf andere Eigenschaften hat, wurde bald klar, dass der Typenversuch zur Lärmfrage geteilt werden muss, und zwar in einen Vorversuch mit Daten zuhanden der Industrie zur akustischen Optimierung sowie in einen Abnahmeversuch der Bahnen nach allen Optimierungen zur Beschreibung der akustischen Eigenschaften, unter anderem im Hinblick auf die Lärmschutzverordnung.

Zu einem sehr frühen Zeitpunkt, im Oktober 1991, konnte mit den Vorversuchen begonnen werden. Die Resultate waren sehr zufriedenstellend, ausser für den Schalldruckpegel bei maximaler Ventilation im Stillstand.

Obwohl die maximale Ventilation im Jahresmittel eher selten auftreten wird, wurde eine

Bereinigung der Situation für erforderlich gehalten, da

- der Lärm bei hohen Aussentemperaturen auftritt, wenn die Empfindlichkeit der Anwohner durch geöffnete Fenster bereits gesteigert ist,
- im Huckepackverkehr bei Betrieb im Leistungseckpunkt das Ventilationsgeräusch das Rollgeräusch übersteigt,
- Lärmschutzwände gegen das Ventilationsgeräusch wegen der hohen Lage des Luftansauges über der Oberkante der Lärmschutzwände nahezu wirkungslos sind.

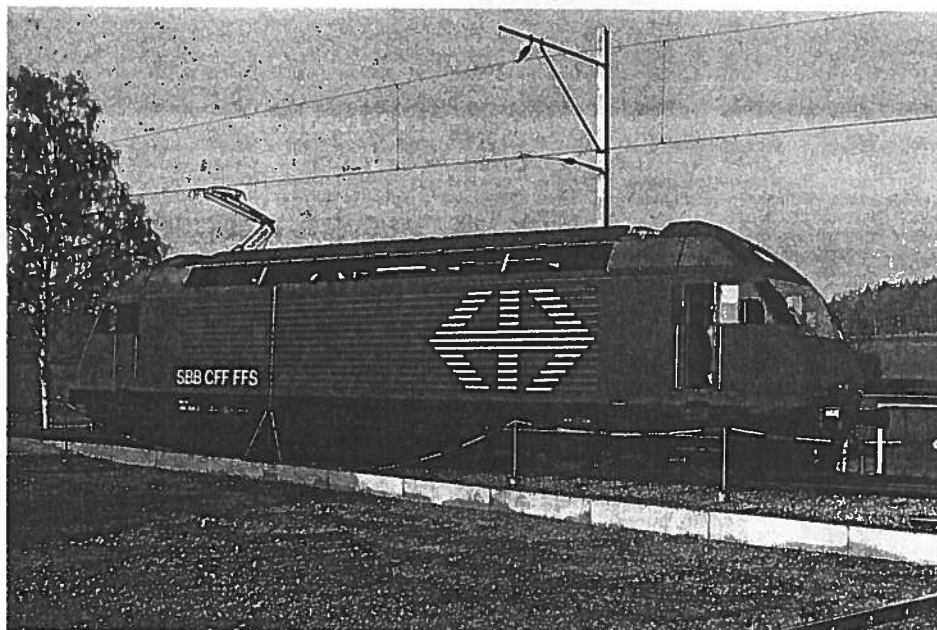
Bei konventionellen Lokomotiven, wie der Re 4/4 II der SBB [2], musste dem Ventilationslärm nicht allzuviel Aufmerksamkeit geschenkt werden. Bei störendem Lärm im Stillstand konnte der Lokomotivführer zur Not durch Tastendruck auf dem Führertisch die Ventilation unterdrücken. Geringe thermische Reserven der Halbleiterelemente verbieten bei modernen Fahrzeugen eine solche Praxis. Zudem hat sich der Kühlluftbedarf nahezu verdoppelt, während aus Platzgründen die engsten Kanalquerschnitte nicht in gleichem Masse wachsen konnten und damit die maximale mittlere Strömungsgeschwindigkeit stark anstieg, wie die folgende Gegenüberstellung zeigt:

Lokomotive		Re 4/4 II	Re 460
Masse	[t]	80	84
Höchstgeschwindigkeit	[km/h]	140	230
Leistung dauernd	[kW]	4452	4800
maximal	[kW]	6920	6100
Kühlluftmenge	[m ³ /s]	12	23
elektrische Leistung der Ventilation	[kW]	44	80
maximale mittlere Strömungsgeschwindigkeit	[m/s]	29,4	43,4

Ausgangslage und Messung

Lärmmessungen an der stillstehenden Lokomotive 460 001 ergaben, dass die von der Umrichter- und Fahrmotorventilation erzeugten Betriebsgeräusche den angestrebten Emissions-Schallpegelwert um mehr als 10 dB(A) übersteigen. Diese deutliche Überschreitung beschränkt sich auf den Betrieb der Ventilation auf höchster Stufe (Stufe III), während die Lärmemissionen auf der Stufe I keine und auf der Stufe II kaum Probleme verursachen.

Bei der Auslegung der Strömungsquerschnitte der Ventilation wurde primär auf die Beherrschung der Strömungsverhältnisse mit geringem Druckabfall und günstiger Druckverteilung bei allen Betriebsbedingungen, insbesondere Tunnelfahrt, Seitenwind und Fahrt mit hohen Geschwindigkeiten, geachtet. Charakteristisch ist der grosse Druckausgleichsraum im Dachbereich [3]. Er bietet ge-



Ventilationslärmmessungen im Stillstand an der Re 460 000 im Februar 1992; das Bild zeigt die Messung ohne Luftfilter. Es zeigte sich, dass der Einfluss der Luftfilter auf den abgestrahlten Lärm unwesentlich ist (Foto SLM).

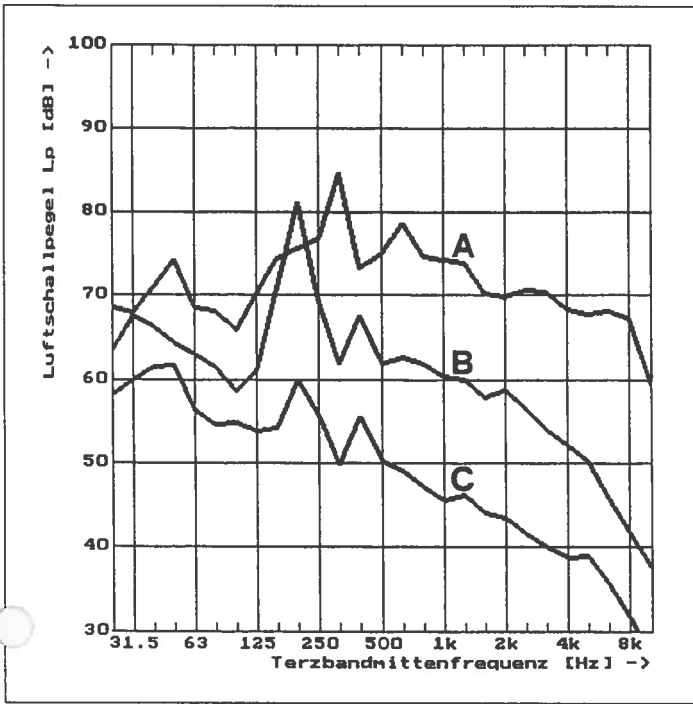


Diagramm 1:
 Spektrale Verteilung der Betriebsgeräusche-Emissionen der Umrichter- und Fahrmotorventilation der Lokomotive SBB Re 4/4 460 (Abstand Mikrofon – Gleisachse: 7,5 m) (Zeichnung Kühn & Blickle).
 Kurve A: Betriebsstufe III entsprechend 3016 U/min: $L_p = 84,8 \text{ dB(A)}$
 Kurve B: Betriebsstufe II entsprechend 1914 U/min: $L_p = 73,6 \text{ dB(A)}$
 Kurve C: Betriebsstufe I entsprechend 986 U/min: $L_p = 58,1 \text{ dB(A)}$

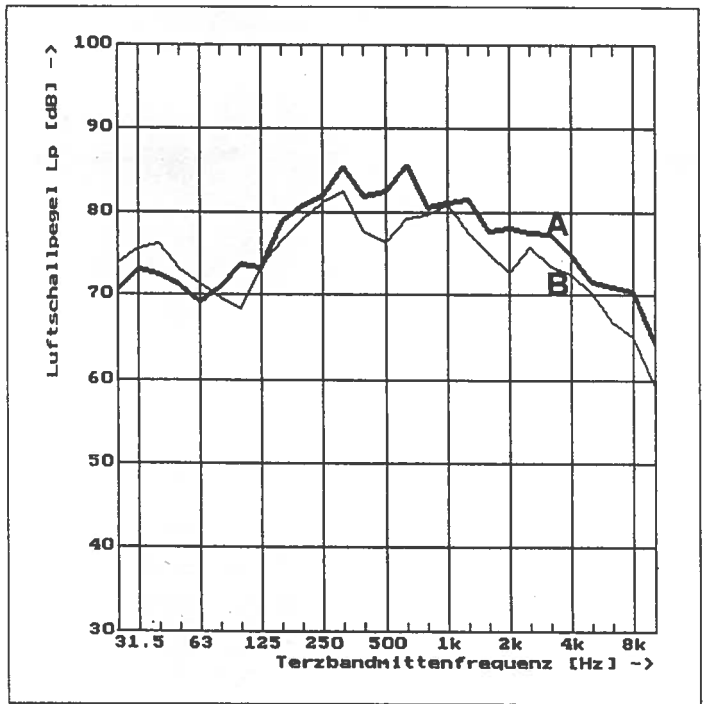


Diagramm 2:
 Spektrale Verteilung des Betriebsgeräusches eines Umrückerkühlventilators auf Stufe III (Abstand Mikrofon – Längswand der Lokomotive : 1,0 m) (Zeichnung Kühn & Blickle).
 Kurve A: Messung vor Luftansaugöffnung, oben: $L_p = 91,0 \text{ dB(A)}$
 Kurve B: Messung vor Luftausblasöffnung, unten: $L_p = 87,9 \text{ dB(A)}$

tive betrug dabei 1,0 m. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in den Diagrammen 2 und 3 eingetragen.

Probleminterpretation

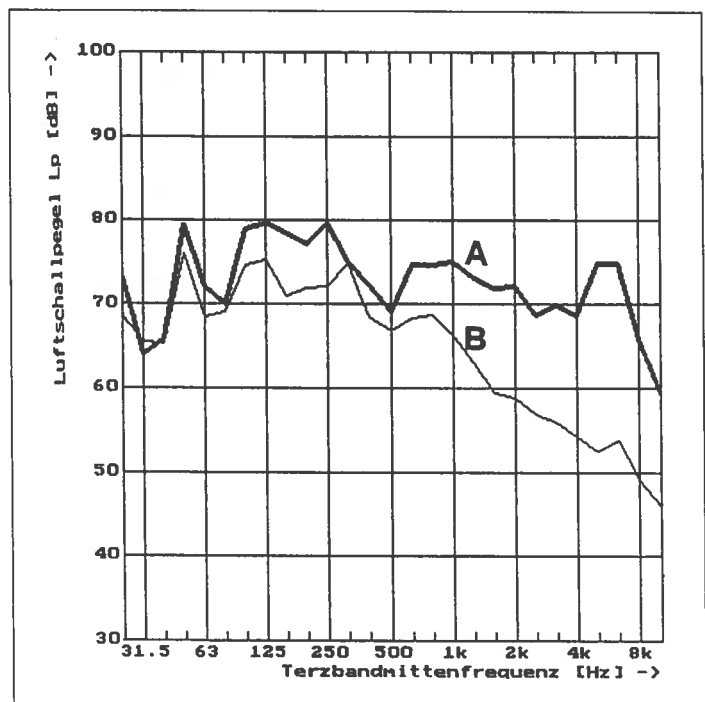
Die im vorangegangenen Abschnitt kurz dargestellten Untersuchungsergebnisse stellen die Basis für eine optimale Auslegung von Massnahmen zur Verminderung der Geräuschemissionen der Umrichter- und Fahrmotorventilation dar. Ein Vergleich der Kurven in den Diagrammen lässt erkennen, welche Quellen (Ventilatoren) und Schallübertragungswege (Übertragung über die Luftansaugöffnungen und über die Luftausblasöffnungen) bei der Bildung der Gesamtemissionen der Ventilation pegelbestimmend sind. Im folgenden Säulendiagramm wird auf einfache Weise dargestellt, mit welchem Anteil die Ventilatoren der Umrichter- und Fahrmotorventilation an der Gesamtemission beteiligt sind. Die Säulen repräsentieren dabei die

nügend Raum für akustische Massnahmen, ohne Abstriche an den oben genannten Auslegungszielen nötig zu machen.

Für Klärung der Ursachen der zu grossen Ventilationsgeräusche und der erforderlichen Lärminderungsmaßnahmen wurden im Februar 1992 an der Lokomotive Re 460 000 umfangreiche akustische Messungen ausgeführt. Dazu wurde bei stillstehender Lokomotive die Ventilationsanlage bei verschiedenen Betriebsstufen und Umdrehungszahlen in Betrieb gesetzt und die am massgebenden Emissionsort (7,5 m seitlicher Abstand ab Gleisachse in Lokomotivmitte, 1,5 m ab Schienenoberkante) erzeugten Betriebsgeräusche gemessen. Das Ergebnis der Untersuchung ist im Diagramm 1 dargestellt.

Die im Diagramm 1 eingezeichneten Spektren stellen die Luftschallemissionen der Ventilationsanlage, welche aus insgesamt zwei Umrückerkühlventilatoren und vier Fahrmotorkühlventilatoren besteht, als Ganzes dar. Die Ventilatoren der beiden Gruppen weisen unterschiedliche Leistungen oder Gesamtdruckdifferenzen und Fördermengen auf, was unterschiedliche Schallemissionen zur Folge hat. Zur Bestimmung der verschiedenen Emissionspegel wurden weitere Messungen in unmittelbarer Nähe der Luftansaug- und -ausblasöffnung eines Umrückerkühlventilators und eines Fahrmotorkühlventilators vorgenommen. Der Abstand des Messmikrofons zur Längswand der Lokomo-

Diagramm 3:
 Spektrale Verteilung des Betriebsgeräusches eines Fahrmotorventilators auf Stufe III (Abstand Mikrofon – Längswand der Lokomotive: 1,0 m) (Zeichnung Kühn & Blickle).
 Kurve A: Messung vor Luftansaugöffnung, oben: $L_p = 84,5 \text{ dB(A)}$
 Kurve B: Messung vor Luftausblasöffnung, unten: $L_p = 75,8 \text{ dB(A)}$



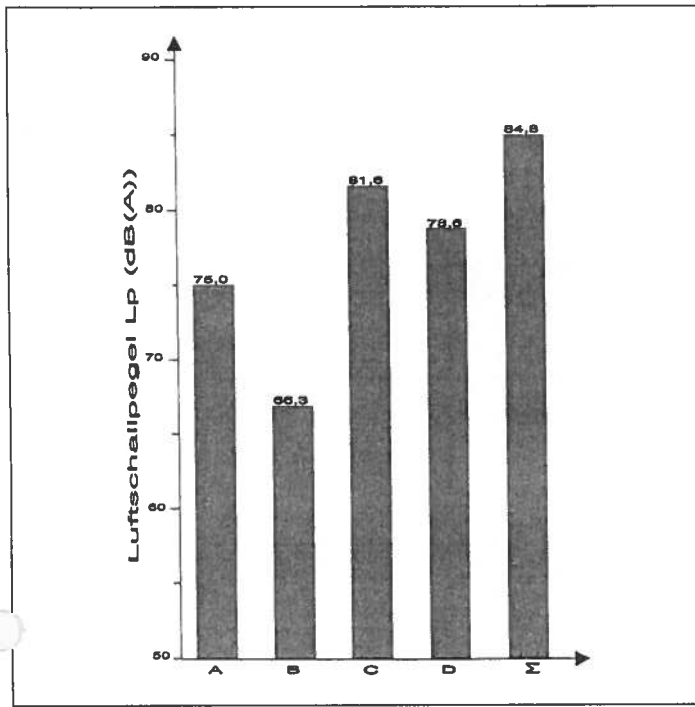


Diagramm 4: Darstellung der Schallemissionspegel der beiden Ventilatorengruppen der untersuchten Umrichter- und Fahrmotorventilation der SBB Re 460 (Betriebsstufe III, Emissionsort: 7,5 m seitlich ab Gleisachse)
 Säule A: Fahrmotorventilation (4 Ventilatoren); Schallübertragung über Ansaugöffnungen
 Säule B: Fahrmotorventilation (4 Ventilatoren); Schallübertragung über Ausblasöffnungen
 Säule C: Umrichterventilation (2 Ventilatoren); Schallübertragung über Ansaugöffnungen
 Säule D: Umrichterventilation (2 Ventilatoren); Schallübertragung über Ausblasöffnungen
 Säule Σ: Emissionen der gesamten Umrichter-Fahrmotorventilation (vergleiche mit Diagramm 1, Kurve A)

bei Ventilationsgeräuschen ist, dass sie sich über einen sehr breiten Frequenzbereich mit relativ grossen Schallpegeln erstrecken.

Lösungsweg

Zur Erreichung einer wirksamen Verminderung der Ventilationsgeräusche können grundsätzlich zwei verschiedene Lösungswege begangen werden. Der erste Weg beinhaltet lärmindernde Massnahmen an der Schallquelle, insbesondere an den einzelnen Ventilatoren (sogenannte Primärmassnahmen), während der zweite Weg schalldämpfende Massnahmen am Übertragungsweg umfasst (sogenannte Sekundärmassnahmen). Im vorliegenden Fall entschied man sich für den zweiten Lösungsweg (Sekundärmassnahmen), da der erste aus folgenden Gründen nicht durchführbar gewesen wäre: Der vorhandene Kanalquerschnitt liess sich nicht mehr vergrössern, und damit konnten der Durchmesser des Ventilatorrades nicht mehr vergrössert und die Strömungsgeschwindigkeit nicht mehr verringert werden. Weiter kommt hinzu, dass mit Primärmassnahmen am Ventilatorrad alleine, insbesondere durch Verringerung des Schaufeldrehklangs, die angestrebte Verminderung der Emission von Ventilationsgeräuschen kaum erreicht worden wäre.

Auf der Basis der in den obigen Abschnitten zusammengefassten Untersuchungsergebnisse versuchte man nun, den Schall auf seinem Übertragungsweg von der Quelle zu der Ansaugöffnung und Ausblasöffnung mittels sogenannter Absorptionsschalldämpfer zu reduzieren. Die zu erbringende frequenzabhängige Einfügungsdämpfung der verschiedenen Schalldämpfer ergibt sich aus den Frequenzgängen der sog- und druckseitig abgestrahlten Ventilationsgeräusche oder deren Schallpegelwerten (siehe dazu das Diagramm 4). Dabei zeigt sich, dass die zum Einsatz kommenden Schalldämpfer der Umrichterventilation wesentlich wirksamer sein müssen als diejenigen der Fahrmotorventilation. Überdies haben die sogseitigen Dämpfer eine grössere Einfügungsdämpfung als die druckseitigen aufzuweisen. Weitere zu berücksichtigende Gesichtspunkte sind: Die in die Kanäle eingebrachten Schalldämpfer dürfen die Gesamtdruckdifferenz der Ventilationsanlage nur unwesentlich erhöhen; die Luftströmungsgeschwindigkeit darf durch den Einbau der Schalldämpfer wegen der Bildung allfälliger sekundärer Schallquellen oder Turbulenzen nicht beliebig erhöht werden; das bei den Schalldämpfern zum Einsatz kommende Dämmmaterial darf keine Abrasionserscheinungen aufweisen, überdies muss es feuerhemmend und feuchtigkeitsbeständig sein.

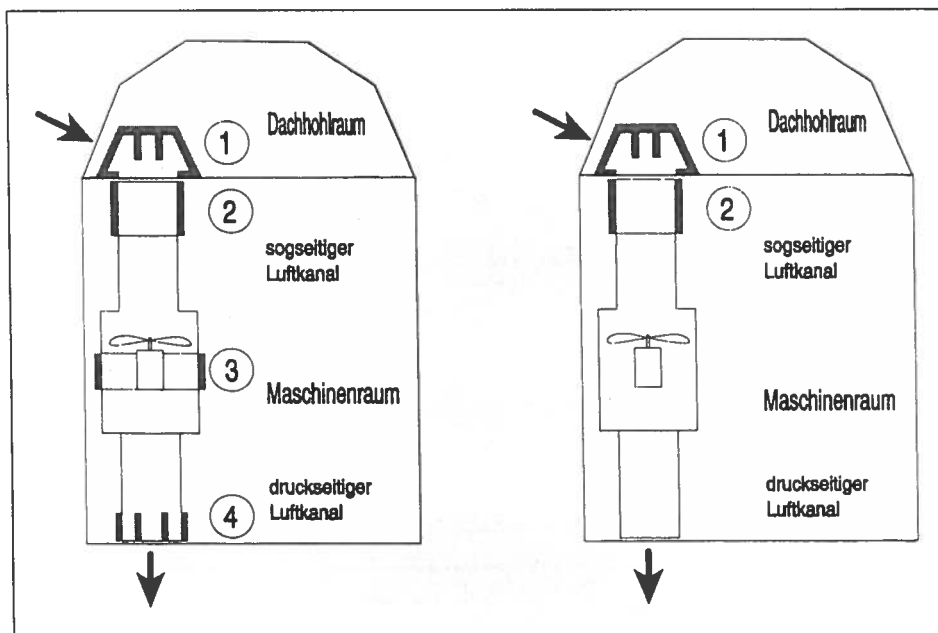
Nach eingehender Prüfung verschiedener Dämmmaterialien entschloss man sich zur Ver-

Schallemissionen der beiden Ventilatorengruppen als Ganzes am massgebenden Emissionsort.

Die Aufgliederung des Ventilationsgeräusches in die einzelnen Komponenten (siehe dazu das Säulendiagramm) zeigt den dominierenden Einfluss des über die Ansaugöffnungen abgestrahlten Lärms der Umrichterventilation (Säule C) auf die Gesamtemissionen der Anlage. Die dazu im Vergleich über die Ansaugöffnungen abgestrahlten Geräusche der vier Fahrmotorkühlventilatoren (Säule A) weisen einen rund 7 dB(A) kleineren Luftschallpegel auf. Die über die Ausblasöffnungen übertragenen Geräusche liegen bei der Umrichterventilation 3 dB(A) und bei der Fahrmotorventilation gar 9 dB(A) unter den über die Ansaugöffnungen abgestrahlten Geräuschen. Der Schallpegelunterschied von 9 dB(A) lässt sich dadurch erklären, dass, im Gegensatz zur Umrichterventilation mit ihren relativ grossen sog- und druckseitigen Kanälen, die druckseitig sich ausbreitende

Schallenergie eine grössere Dämpfung erfährt, da die Ausbreitung zum Teil über enge und verwinkelte Kanäle stattfindet.

Zur Erreichung einer optimalen Auslegung der lärmindernden Massnahmen sind nebst der Kenntnis der verschiedenen Emissionspegel die Frequenzverläufe der einzelnen Schallquellen der Ventilationsanlage von grosser Bedeutung (siehe dazu die Diagramme 1 bis 3). Die Kurven im Diagramm 1 stellen die Betriebsgeräusche-Emissionen der Ventilationsanlage bei den verschiedenen Arbeitsstufen I, II und III dar. Auffallend dabei sind die Pegelmaxima bei Frequenzen von 315 Hz (Kurve A) und 200 Hz (Kurve B). Sie stellen den Grundton des sogenannten Drehklangs dar, welcher sich aus dem Produkt der Umdrehungszahl und der Anzahl der Schaufeln des Ventilators ergibt. Im weiteren ist aus den Diagrammen ersichtlich, dass die Kurvenverläufe des Ventilationsgeräusches mit zunehmender Frequenz ansteigen, um dann oberhalb des Drehklangs zu fallen. Typisch



Schalldämpferprinzip der Umrichter- (links) und Fahrmotorventilation:
 1: örtlich angebrachter Absorptions- oder Kulissenschalldämpfer im Dachhohlraum
 2: absorbierend ausgekleidetes Kanalstück zwischen Dachdeckel und Ventilator
 3: absorbierend ausgekleidetes Kanalstück im Bereich des Ventilatormotors
 4: absorbierend ausgekleidetes Kanalstück mit zusätzlich eingebrachten Kulissen im Bereich der Ausblasöffnung (Zeichnungen Kühn & Blicke)

wendung offenporöser Äther-Schaumstoffplatten mit einer Dichte von 50 kg/m^3 . Bei einer gewählten Dicke von 60 mm weisen die Platten im Frequenzbereich von 200 – 5000 Hz einen mittleren Schallabsorptionsgrad von $\alpha_s = 0,9$ auf.

In den beiden Skizzen ist das Schalldämpferprinzip für die Umrichter- und Fahrmotorventilation schematisch dargestellt.

Messungen am Versuchsträger

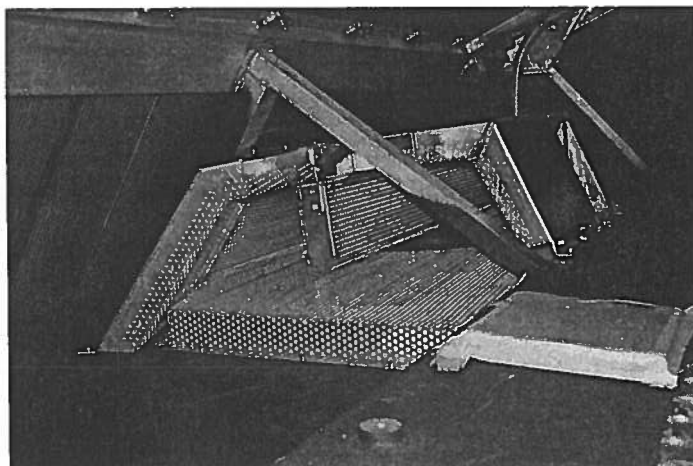
Nach der rechnerischen Auslegung der Absorber und der Messung von Versuchsausführungen im Akustiklabor wurden die Absorptionsschalldämpfer für eine Hälfte der Versuchslokomotive 460 013 gefertigt, eingebaut und erprobt. Diese Lokomotive war für die Versuche nur mit den für die Ventilation relevanten Komponenten ausgerüstet worden. Die nicht beteiligten elektrischen Komponenten fehlten noch.

Es wurden folgende Messwerte im Normpunkt in Lokomotivmitte 7,5 m rechts und links ab Gleismitte und 1,5 m über Schienenoberkante erreicht

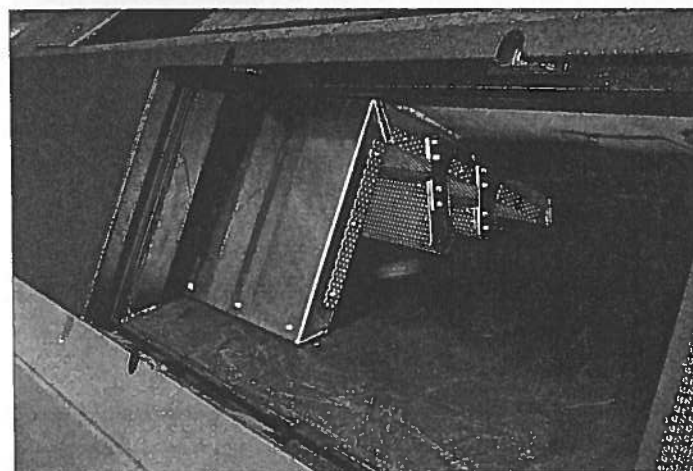
Schalldruckpegel [dB(A)]	Stufe 2		Stufe 3	
	links	rechts	links	rechts
	64,0	62,4	73,0	70,6

Zu beachten ist, dass diese Werte nur für die Ventilation eines Drehgestells gemessen wurden. Für den Schalldruckpegel bei Ventilation beider Drehgestelle ist auf einer Seite die Summe der Pegel zu erwarten, das sind 74,7 dB(A). Da als verlangter Wert für die ganze Lokomotive 74 dB(A) vereinbart wurde, werden für die Serieausführung die Absorberabmessungen noch geringfügig vergrößert, um statt der erzielten 11,8 dB(A) Schallpegelminderung die verlangten 12,5 dB(A) zu erreichen.

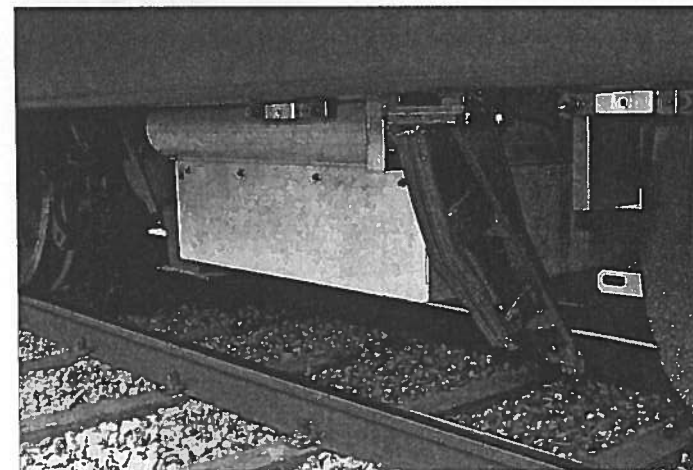
Einlassabsorber für den Umrichter kühl Luftstrom. Ansicht vom Dachberuhigungsraum (Foto SLM).



Einlassabsorber für den Fahrmotorkühl Luftstrom. Ansicht von aussen nach Abnahme des Ansaugluftfilters (Foto SLM).



Auslassabsorber für den Umrichter kühl Luftstrom. Ansicht von aussen nach Abnahme der Schürzen (Foto SLM).



Literatur

- [1] Gerber, M., Drabek, E., Müller, R.: Die Lokomotiven 2000 – Serie 460 der Schweizerischen Bundesbahnen. Schweizer Eisenbahn-Revue 10/1991, Seite 321 – 377.
- [2] Borel, M.A., Florin, Ch.: Die Hochleistungslokomotive Re 4/4 II der Schweizerischen Bundesbahnen. Brown Boveri Mitteilungen Nr. 10/1970, Seite 398 – 409.
- [3] Kummrow, R., Vitins, J.: Die Typenfamilie Lok 2000. ZEV+DET Glasers Annalen 116 (1992), Nr. 8/9, Seite 293 – 307.

Minirex AG

Minirex AG
Verlag und Versandbuchhandlung
Postfach 3720, CH-6002 Luzern
Telefon (041) 36 86 66
Telefax (041) 36 88 06

Sonderdrucke aus der Schweizer Eisenbahn-Revue

Zehn Jahre Einheitswagen IV
(5/1993), 44 Seiten, Fr. 10.80.

Die Umbau-Pendelzüge der Brünigbahn (SBB) und der Luzern – Stans – Engelberg-Bahn
(3/1993), 20 Seiten, Fr. 8.80.

Die neuen Triebwagen Be 4/4 21 – 28 für die Uetlibergbahn
(4/1993), 24 Seiten, Fr. 9.80.

Der Dieseltriebzug VT 610 – der „Deutsche Pendolino“
(1-2/1993), 16 Seiten, Fr. 10.80.

Niederflur-Pendelzüge für den grenzüberschreitenden Betrieb Locarno – Domodossola
(11/1992), 24 Seiten, Fr. 9.80.

1905–1909: Elektrischer Versuchsbetrieb Seebach – Wettlingen
(12/1991, 1-2/1992, 3/1992), 34 Seiten, Fr. 18.80.

Alta Velocidad Espanola – High Speed in Spain
(7-8/1992), 32 Seiten, englisch, Fr. 18.80.

Alta Velocidad Espanola – Hochgeschwindigkeit in Spanien
(7-8/1992), 32 Seiten, Fr. 14.80.