

UMWELTINNOVATIONSPROGRAMM

BUNDESMINISTER FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT

Lärmbekämpfung

Abschlussbericht 20 122

Lärminderungsmaßnahmen an drei Großdieselloks vom Typ BlueTiger

von

Prof. Dr.-Ing. Markus Hecht

Christian Czolbe

Technische Universität Berlin

Institut für Land- und Seeverkehr

Fachgebiet Schienenfahrzeuge

Durchführendes Unternehmen / Organisation

Havelländische Eisenbahn AG

Im Auftrag

des BMU

Mai 2008

1. Berichtsnummer 20 122	2.	3.
4. Titel des Berichts Lärminderung an drei Großdieselloks vom Typ BlueTiger		
5. Autor(en), Name(n), Vorname(n) Hecht, Markus Czolbe, Christian		8. Abschlussdatum Mai 2008
		9. Veröffentlichungsdatum
6. Durchführende Organisation (Name, Anschrift) Havelländische Eisenbahn AG Schönwalder Straße 51, D-13587 Berlin		10. UFOPLAN- Nr.
		11. Seitenzahl 67
7. Fördernde Institution (Name, Anschrift) BMU Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit Förderungsangelegenheiten Alexanderplatz 6, 11055 Berlin		12. Literaturangaben 10
		13. Tabellen und Diagramme 17
KfW Bankengruppe, Niederlassung Bonn.		14. Abbildungen 59
15. Zusätzliche Angaben		
16. Kurzfassung In diesem Projekt werden akustische Maßnahmen an drei modernen Diesel-Lokomotiven vorgestellt. Aufgrund von geringfügigen zusätzlichen Umbauten an Fahrzeugen können die Grenzwerte der TSI-Noise 2006 in Fahrzeugen eingehalten werden. Das Projekt ist mit dem Eisenbahnverkehrsunternehmen HVLE Havelländische Eisenbahn realisiert und als Beitrag zur Umsetzung der Richtlinie 2002/49/EU in den Anwendungsbereich des ökologischen Innovation-Programmes des Bundesministeriums für Umwelt gefördert worden. Der BlueTiger ist eine 6-achsige Güterzuglok mit einem Gewicht von 126t. Sie hat einen 2,5 MW-Diesel-Motor und wird durch elektrische Traktion angetrieben. Für die Einstufung der Schallquellen in Kategorien, sind die Schallintensität entlang der stehenden und auf der fahrenden Lok gemessen worden. Lüfter und vor allem Hilfsaggregate sind für die Überschreitung der Lärmgrenzwerte verantwortlich. Der Dieselmotor in der Mitte des Fahrzeugs wurde durch verschließbare Türen schallisoliert. Die hochfrequenten Tonanteile der Traktionslüfter und der dynamischen Bremse können durch Absorption und Isolation reduziert werden.		
17. Schlagwörter Diesellokomotive, Güterzuglok, Lärminderung		
18.	19.	20.

1. Report No. 20 122	2.	3.
4. Report Title Noise reduction measures at freight train locomotives "BlueTiger"		
5. Author(s), Family Name(s), First Name(s) Hecht, Markus Czolbe, Christian		8. Report Date May 2008
		9. Publication Date
6. Performing Organisation (Name, Address) Havelländische Eisenbahn AG Schönwalder Straße 51, D-13587 Berlin		10. UFOPLAN- Ref.No.
		11. No. of Pages 67
7. Sponsoring Agency (Name, Address) Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety Alexanderplatz 6, 11055 Berlin		12. No. of References 10
		13. No. of Tables, Diag. 17
KfW Bankengruppe, Niederlassung Bonn.		14. No. of Figures 59
15. Supplementary Notes		
16. Abstract In this project acoustical measures at three modern diesel locomotives are presented. Due to additional rebuilding of vehicles to a small amount the noise limitations of the TSI-Noise 2006 also in rolling stock can be kept. The project is realised with the railway operator HVLE Havelländische Eisenbahn and is promoted as a contribution to the conversion of the Directive 2002/49/EU within the scope of the environmental innovation program of the federal ministry for the environment. The BlueTiger is a six-axle freight train locomotive with 126 t heavy weight, supplied by a 2.5 MW diesel power unit and moved by electric traction. For the classification in categories of the sound sources the sound intensity was measured along the standing and onto the moving vehicle. Mainly fans and auxiliary aggregates are responsible for the excess of the noise limit values. The diesel engine in the middle of vehicle is sound insulated by lockable doors. The high-frequency sound parts of traction fan and electro dynamic brake can be reduced by absorption and insulation.		
17. Keywords diesel locomotive, freight train locomotive, noise reduction		
18.	19.	20.

Inhaltsverzeichnis:

1	Zielsetzung und Aufgabenstellung	6
2	Methode und Betrachtungsrahmen	8
2.1	Ausgangsbasis	8
2.2	Grundsätzliches	8
2.2.1	Messgeräte	8
2.2.2	Messgrößen	9
2.3	Methode	9
3	Vorangehende Messungen am Fahrzeug	10
3.1	Stillstand	10
3.2	Vorbeifahrt	14
3.3	Anfahrt unter Last	18
3.4	Zusammenfassung TSI Messungen	19
3.5	Intensitätsmessungen	20
4	Maßnahmen zur Lärminderung	25
4.1	Absorberjalousien	25
4.1.1	Zeichnungen	26
4.1.2	Lamellentypen und -Lage	26
4.1.3	Demontage der Türen und Einbau der Absorber	28
4.1.4	Anbau der Absorberjalousien	28
4.2	Schalldämpfer	30
4.2.1	Schalldämpfertyp	30
4.2.2	Dämpfungseigenschaften	30
4.2.3	Anbau und Konsolen	32
4.3	Kosten und Aufwand	34
5	Prognose	35
6	Abnahmemessungen	36
6.1	BR 250 BlueTiger nach dem Umbau	38
6.2	Stillstand	40
6.3	Vorbeifahrt	41

7	Minderungseffekte	45
7.1	Stillstand	45
7.2	Vorbeifahrt	47
7.3	Anfahrt unter Last	49
8	Wirkungsnachweis	51
8.1	Schalldämpfer	51
8.2	Absorberjalousien	52
8.3	Gesamtwirkung	55
8.4	Innenschall Führerhaus	59
8.5	Luftverbrauch und Kühlleistung	60
9	Zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse	61
10	Ausblick.....	62
	Literaturverzeichnis.....	64

Abbildungsverzeichnis:

Abbildung 1: Kalktransporte mit den BlueTiger Dieselloks der HVLE in Rübeland(Harz)	7
Abbildung 2: Datenblatt Bombardier Transportations - BR 250 Blue Tiger DE-AC 33C	8
Abbildung 3: Anordnung der Messpunkte bei Stillstandsmessungen TU Berlin 2005	11
Abbildung 4: Dauerschallpegel bei Stillstandsmessung bei 330 U/min TU Berlin 2005.....	11
Abbildung 5: Steilstrecke Blankenburg - Königshütte mit Lage der Messstelle	14
Abbildung 6: Vorbeifahrpegel rechts bei 30 km/h 1.100t Güterzug auf der Rübelandbahn 2006	15
Abbildung 7: Vorbeifahrmessung bei 30km/h (1100t Güterzug) mit/ohne Kompressor, Rübeland 2006	16
Abbildung 8: Messstelle im Harz Luftbild	17
Abbildung 9: Vorbeifahrt eines BlueTigers vor Hüttenerode (Harz) 2008	17
Abbildung 10: BlueTiger Loks der HVLE in Blankenburg (Harz) 2006.....	18
Abbildung 11: Schallintensitätspegel der seitlichen Schallquellen des BlueTigers 2006	20
Abbildung 12: Intensitätsspektrum des Traktionslüfters (links in Abbildung 11)	21
Abbildung 13: Intensitätsspektrum des Traktionslüfters (rechts in Abbildung 11)	21
Abbildung 14: Intensitätsspektrum des Kompressors	22
Abbildung 15: Intensitätsspektrum des Motors	23
Abbildung 16: Intensitätsmessungen bei an- und ausgeschaltetem Kompressor	23
Abbildung 17: Intensitätsspektrum des Lüfters für die E-Bremse	24
Abbildung 18: Originalzustand und Zustand nach Umbau der Lok.....	25
Abbildung 19: Tür mit Ausklinkungen links und Vogelschutzgitter rechts	26
Abbildung 20: Produktion der Absorberjalousien bei IAC	27
Abbildung 21: Einfügedämmmaß des Absorbers.....	27
Abbildung 22: BlueTiger ohne Türen mit Vogeldraht	28
Abbildung 23: Anbau der Absorberjalousien.....	29
Abbildung 24: Konstruktionszeichnung eines Cowl- Spiralschalldämpfers	30
Abbildung 25: Dämpfungskurve des Cowl- Spiralschalldämpfers.....	30
Abbildung 26: Druckverlustkurve des Cowl- Spiralschalldämpfers	31
Abbildung 27: Luftfilter am Kompressor ohne Schalldämpfer	31
Abbildung 28: Einbausituation des Cowl- Spiralschalldämpfers (Schema).....	32
Abbildung 29: Konsole für den Schalldämpfer links.....	32
Abbildung 30: Konsole für den Schalldämpfer rechts	33
Abbildung 31: Einbausituation des Cowl- Spiralschalldämpfers (linke Seite)	33

Abbildung 32: Einbausituation des Cowl- Spiralschalldämpfers (rechte Seite).....	34
Abbildung 33: Prognosepegel für die Vorbeifahrt mit 30 km/h (ohne Rollgeräusch).....	35
Abbildung 34: Frequenzanalyse für die Vorbeifahrt mit 30 km/h (ohne Rollgeräusch)	35
Abbildung 35: Schienenrauheit an der Messstelle in Velten am 25.09.2007	36
Abbildung 36: Track-Decay-Rate in y- Richtung.....	37
Abbildung 37: Track-Decay-Rate Velten in y-Richtung.....	37
Abbildung 38: BR 250 BlueTiger V330.1 der HVLE vor/nach dem Umbau.....	38
Abbildung 39: BlueTiger V330.2 nach dem Umbau	38
Abbildung 40: Detailänderungen für BlueTiger V330.2 und V330.3	39
Abbildung 41: Stillstandspegel Vergleich der Maßnahmen.....	40
Abbildung 42: Terzpegelverlauf verschiedener Geschwindigkeiten in Velten 2007 BlueTiger.....	42
Abbildung 43: Prognose der Fahrgeräusche 80 km/h auf TSI Referenzgleis antriebslose Modell	44
Abbildung 44: Prognose der Fahrgeräusche 80 km/h auf TSI Referenzgleis BlueTiger 330.1	44
Abbildung 45: Stillstandsgeräusch im Einzelnen und insgesamt	45
Abbildung 46: erzielte Pegelminderung in dB im Stillstand bei laufendem Kompressor	46
Abbildung 47: Vorbeifahrpegelzeitverlauf in 7,5m bei 40 km/h	48
Abbildung 48: Terzpegelspektrum Anfahrt unter Last Originalzustand und nach Umbau.....	50
Abbildung 49: Intensitätspegel 1m seitlich Ansaugfilter bei Stillstand mit / ohne Schalldämpfer	51
Abbildung 50: Intensitätspegel 1m Abstand bei Stillstand mit/ohne Absorberjalousien.....	52
Abbildung 51: Intensitätsmessung auf der Lok an der E-Bremse	53
Abbildung 52: Vergleich der Intensitätspegel am vorderen Kühlgitter F2	54
Abbildung 53: Vergleich der Intensitätspegel am hinteren langen Kühlgitter F1.....	54
Abbildung 54: Terzspektrum Stillstand MP6 mit laufendem Kompressor in 7,5m Entfernung	55
Abbildung 55: Vergleich Stillstandmessung nach Umbau und Original ohne Kompressor	56
Abbildung 56: Vorbeifahrt mit 30 km/h und laufendem Kompressor	57
Abbildung 57: Vorbeifahrt unter Last vor/nach dem Umbau bei v=40 km/h.....	58
Abbildung 58: Innenschallpegel Führerhaus 1 bei 30 km/h vor/nach Umbau.....	59
Abbildung 59: BlueTiger: Luftströmungsgeschwindigkeiten in m/s gemessen auf der Rübelandbahn	60

Tabellenverzeichnis:

Tabelle 1: Betriebszustände der Lokomotive für Standversuche [7].....	12
Tabelle 2: Stillstandspegel L_{AFm} für die Betriebszustände S1-S3 in dB(A) aus [7]	12
Tabelle 3: Terzsummenpegel ohne und mit Schallschutzschürzen bei Leerlaufdrehzahl [6].....	13
Tabelle 4: Anfahrt unter Last 780t Güterzug auf der Rübelandbahn 2006	18
Tabelle 5: Übersicht bis 2006 verfügbarer Messdaten zur Diesellok BlueTiger	19
Tabelle 6: Vergleich der Stillstandsmessungen bis 2005	19
Tabelle 7: Kosten der Umrüstung für eine BlueTiger Lok	34
Tabelle 8: Vorbeifahrmessungen BlueTiger V 330.1 in Velten 2007	41
Tabelle 9: Rauheitsdaten für die TNO Prognose	42
Tabelle 10: Berechnungstabelle Emissionspegel bei 80 km/h auf einem TSI Referenzgleis	43
Tabelle 11: Stillstand und Kompressor L_{Aeq} relevante Messpunkte seitlich nach Umbau	46
Tabelle 12: Stillstandsgeräusche L_{Aeq} lautesten seitlichen Messpunkten vor/nach Umbau	47
Tabelle 13: Pegeldifferenzen der Messung in Velten 09-2007 bei 80 km/h	47
Tabelle 14: Übersicht L_{Aeq} nach dem Umbau ohne Last in dB(A).....	48
Tabelle 15: Übersicht L_{Aeq} nach dem Umbau auf der Steilstrecke ohne/mit Last in dB(A).....	48
Tabelle 16: Übersicht L_{AFmax} lautesten Mikrofone in der Messebene nach Umbau in dB(A)	49
Tabelle 17: Messwerte für Originalzustand und nach dem Umbau	50

Abkürzungen, Maßeinheiten, Symbole:

BR	Baureihe
D	Dämpfung, Pegelabschwächung
dB(A)	Dezibel
I	Schallintensität
I_{Aeq}	Intensitäts Dauerschallpegel
L_{Aeq}	A-bewerteter energieäquivalenter Dauerschallpegel
L_{AFmax}	A-bewerteter Fast-Maximalpegel
L_{Afmmax}	A Maximalpegel
L_W	Schalleistung
L_{95}	statistischer Pegelanteil zu 95% vorherrschend
Pa	Pascal
TDR	Track Decay Rate
$\Delta L, dL$	Pegeldifferenz

1 Zielsetzung und Aufgabenstellung

In den letzten zwei Jahren haben die Transportströme von Nord nach Süd stark zugenommen und auch dem Güterverkehr auf der Schiene einen erfreulich neuen Wachstumsschub gegeben. Im Gegensatz zum LKW geht dies allerdings bei der Schiene nicht einher mit der technologischen Entwicklung lärmarmere Fahrzeuge und Gleisanlagen. Bedingt auch durch den europäischen Prozess der Vereinheitlichung von Richtlinien wurden die Lärmgrenzwerte für Neufahrzeuge der TSI-Noise erst 2006 rechtlich bindend. Wenn man also von einer durchschnittlichen Nutzungsdauer von 30 Jahren bei Lokomotiven und Güterwagen ausgeht und den Verkehrswachstum der nächsten Jahre berücksichtigt, so nimmt die Lärmbelastung an der Schiene durch Bestandsfahrzeuge erheblich zu. Es sind also dringend und kurzfristig Maßnahmen zur Lärmminde- rung am gesamten System Schiene notwendig, die dieser Entwicklung entgegenwir- ken.

Moderne Dieselloks stehen in Traktionsleistung und Ökobilanz ihren elektrischen Schwestern in nichts nach und eignen sich für Inselbetriebe, Anschlussbahnen und kurzfristige Dispositionen auch auf nichtelektrifizierter Strecke.

In diesem Projekt sollen an drei modernen Großdieselloks BlueTiger durch zusätzliche Umbaumaßnahmen gezeigt werden, dass mit relativ geringem Kostenaufwand auch im Bestand die anspruchsvollen Grenzwerte der TSI-Noise eingehalten werden können. Das Projekt wird bei der HVLE Havelländische Eisenbahn realisiert und wird als Bei- trag zur Umsetzung der EU-Umgebungslärmrichtlinie im Rahmen des Umweltinnovati- onsprogramms des Bundesumweltministeriums gefördert.

Die TU Berlin hat neben Stillstandsmessungen zunächst Vorbeifahrmessungen, insbe- sondere Langsamfahrten und Anfahrten unter Last durchgeführt, um die Ausgangssi- tuation in den relevanten Betriebszuständen zu ermitteln. Die Grenzwerte der TSI- Noise werden hierbei lediglich durch den Betrieb des Kolbenkompressors zur Bereit- stellung des Luftvorrats der Bremse überschritten, was bei erhöhtem Rangieraufkom- men und in Gebieten mit hohem Steilstreckenanteil jedoch häufig der Fall ist. Bei ho- hem Kühlbedarf für Traktion und E-Bremse treten an den Lüftereinlässen störende tonhaltige Geräusche auf. Tonhaltigkeitszuschläge werden jedoch von der TSI nicht verlangt und sind hier aufgrund der kurzen Dauer nicht relevant.



Abbildung 1: Kalktransporte mit den BlueTiger Dieselloks der HVLE in Rübeland(Harz)

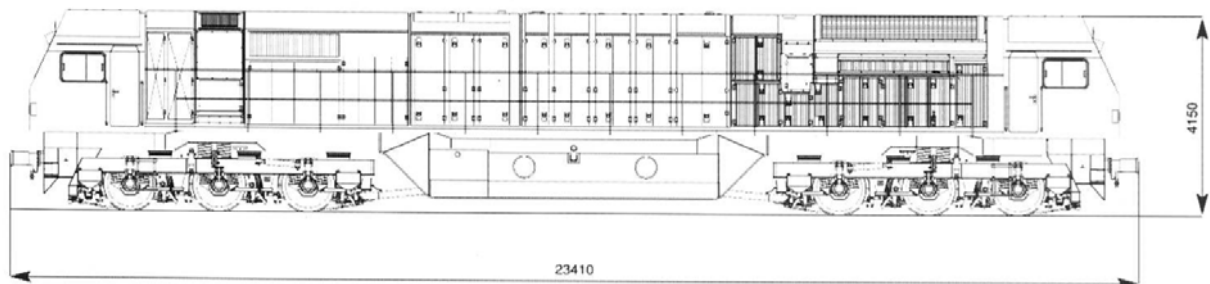
2 Methode und Betrachtungsrahmen

2.1 Ausgangsbasis

Die Diesellok Baureihe BlueTiger DE-AC 33C wurde 2003 für den Bahnbetrieb zugelassen und ist von der Grundkonzeption bereits ein modernes geräuscharmes Fahrzeug. Der Dieselmotor ist vorbildlich gedämmt und schwingungsisoliert, so dass bei Betrieb nun die Zusatzaggregate akustisch in den Vordergrund treten. Durch die Bauweise mit seitlichen Außengängen ist jedoch genügend Raum für zusätzliche Schallschutzmaßnahmen vorhanden. In diesem Projekt kann gezeigt werden, dass mit relativ geringem organisatorischen und konstruktiven Aufwand Lärminderungsmaßnahmen an einer Diesellok zur Einhaltung der heutigen TSI- Normen führen.

2.2 Grundsätzliches

Die hier behandelten Fahrzeuge der HVLE haben die laufenden Fahrzeugnummern V330.1, V330.2 und V330.3 mit den technischen Daten in Abbildung 2.



GENERAL DATA

Type of vehicle	Diesel-electric locomotive
Vehicle designation	<i>BLUE TIGER</i> DE-AC 33C
Track gauge	1,435 mm
Clearance gauge	"high profile" (UIC 505-1 and others)

DIMENSIONS AND WEIGHT

Length over buffer	23,410 mm
Overall width	2,800 mm
Height over roof	4,150 mm
Distance between bogie centres	14,900 mm
Bogie wheel base	1,850 mm
Wheel diameter new	1,067 mm
Wheel diameter worn	987 mm
Locomotive weight (full supplies)	126 t

TECHNICAL CHARACTERISTICS

Wheelset arrangement	Co'Co'
Power transmission	AC/AC
Axle load (full supplies)	21 t
Maximum power	2,460 kW
Maximum starting traction effort	517 kN
Maximum dynamic braking effort	330 kN
Diesel engine	GE 7FDL12EFI
Fuel tank capacity	approx. 6,000 l
Traction motor	GE Type GEB 15
Number of traction motors	6
Transmission gear ratio	83:20
Maximum speed	120 km/h

Abbildung 2: Datenblatt Bombardier Transportations - BR 250 Blue Tiger DE-AC 33C

2.2.1 Messgeräte

Zu den jeweiligen Messungen wurden akustische Messgeräte der Klasse 1 verwendet, welche turnusmäßig geeicht werden und vorab kalibriert wurden.

Die Messwerterfassung fand mit den Geräten IMC Cronos und Onosokki DS-2000 statt.

Für die Intensitätsmessung wurde ein Handschallpegelmesser B&K 2260 verwendet und für die übrigen Stillstandsmessungen ein B&K 2250.

2.2.2 Messgrößen

Bei den akustischen Messungen gemäß ISO 3095 werden Schalldruckpegel LAF aus dem physikalischen Wechseldruck Pa ermittelt. Die Größen LAeq bezeichnen den Dauerschallpegel über einen Zeitraum, der LAFmax beschreibt den maximalen Schalldruckpegel innerhalb eines Zeitraumes.

Die Schallintensität I setzt sich aus Schalldruck und Richtungsvektor an einem Ort zusammen, man ermittelt damit den Schallfluss an einem Punkt oder über eine Fläche.

$$I = p \cdot \vec{v} \text{ [W/m}^2\text{]} \qquad L_I = 10 \log \left(\frac{I}{I_0} \right) \text{ [dB]} \qquad (1)$$

Über die Schallintensität einer Fläche können weitere Eigenschaften der Quelle (z.B. Schalleistung) oder des Bauteils (z.B. Schalldämmung) berechnet werden. Da diese Größe einer Einfallrichtung zugeordnet ist, bei der demnach positive wie negative Intensitäten erfasst werden, ist die Messmethodik relativ unempfindlich gegenüber Umgebungslärm. Somit ist sie zur Lokalisation der Quellen in lärmbelasteter Umgebung gut geeignet.

2.3 Methode

Es wurden Schallmessungen am Fahrzeug im Stillstand, bei der Vorbeifahrt und Anfahrt unter Last durchgeführt, Maßnahmen entwickelt, hergestellt und eingebaut und abschließend erneut messtechnisch bewertet.

3 Vorangehende Messungen am Fahrzeug

Die Ausgangsuntersuchungen für die Auslegung der Maßnahmen waren Stillstandsmessungen nach DIN ISO 3095 an der Lok. Darauf aufbauend folgten experimentelle Untersuchungen zur Anwendung von Schallschürzen im Bereich des Kühler-raums und Kompressors, Vorbeifahrermessungen und Schallintensitätsmessungen wäh-rend der Fahrt auf der Rübelandbahn.

3.1 Stillstand

Die Stillstandsmessungen wurden an den gleichen Messpunkten in 7,5m Entfernung zur Gleismitte und 1,2m Höhe gemessen. Nach TSI Noise sind hierbei alle notwendi-gen Hilfsaggregate der Lok in Betrieb außer dem Kompressor für die Bremsluftversor-gung des Zuges. Da der laufende Kompressor bei den Lastfahrten im Harz jedoch sehr häufig in Betrieb ist und nicht zuletzt den Anlass zu diesem Projekt gegeben hat, wurde dieser bei den Stillstandsmessungen auch gemessen. Dies ist ein definierter Lastzu-stand (Leerlaufdrehzahl 330 1/min) und daher besser zu vergleichen als langsame Vorbeifahrten unter Last.

Der Kompressor ist in seiner Drehzahl mit dem Dieselmotor gekoppelt, der Kühlerlüfter ist in seiner Drehzahl mehrstufig ausgelegt (siehe Tabelle 1).

Nachfolgende Abbildung zeigt den durch eine Ausgangsmessung in vom FG Schienenfahrzeuge 2005 [5] ermittelten Außenpegel an den 18 Messpunkten im Stillstand. Dieser führt lediglich durch den Betrieb des Kompressors an den Messpunkten 6 und 18 zur Überschreitung der Grenzwerte nach TSI von 75 dB(A).

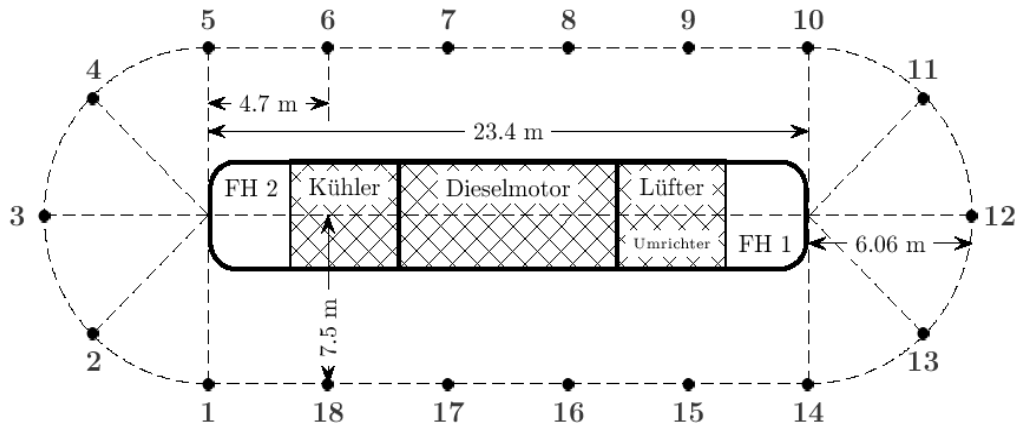


Abbildung 3: Anordnung der Messpunkte bei Stillstandsmessungen TU Berlin 2005

Für die Stillstandsmessungen im Leerlauf wurde folgende Pegelverteilung nach ISO 3095 von der TU Berlin 2005 jeweils mit und ohne Kompressorbetrieb ermittelt.

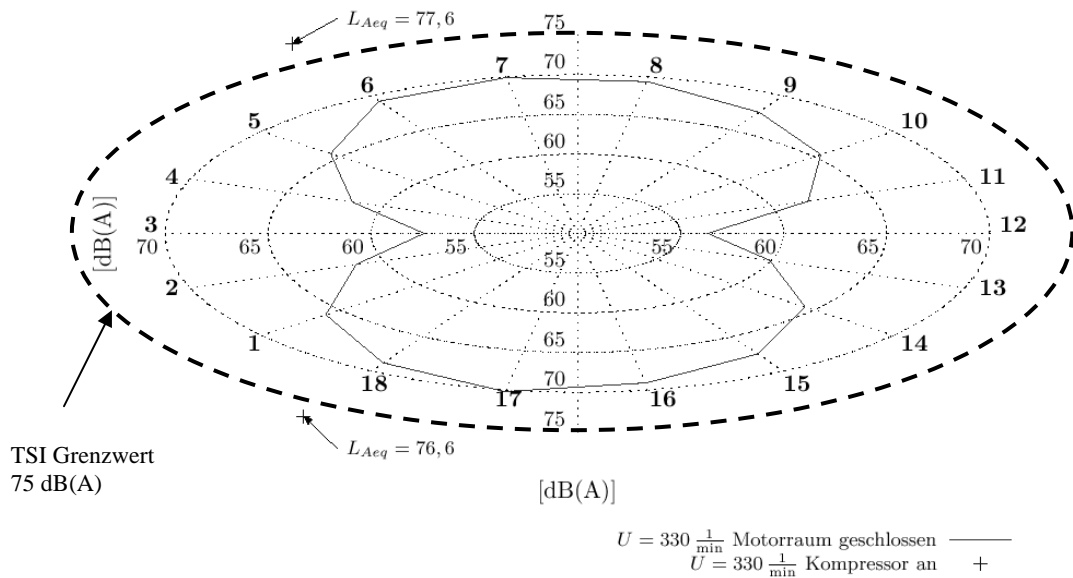


Abbildung 4: Dauerschallpegel bei Stillstandsmessung bei 330 U/min TU Berlin 2005

Zum Vergleich hierzu ist Tabelle 2 aus dem Prüfbericht zum BlueTiger von Müller BBM im Juni 2003 entnommen. Darin sind die Dauerschallpegel der einzelnen Messpunkte von den drei in Tabelle 1 aufgeführten Betriebszuständen enthalten.

Tabelle 1: Betriebszustände der Lokomotive für Standversuche [7]

Betriebszustand	Dieselmotor Drehzahl in min^{-1}	Kühlerlüfter Drehzahl in min^{-1}	Kompressor Drehzahl in min^{-1}	Klimaanlage
S1	430	262	--	Stufe 3
S2	1050	1050	1050	Stufe 3
S3	880	525	880	Stufe 3

Tabelle 2: Stillstandspegel L_{AFm} für die Betriebszustände S1-S3 in dB(A) aus [7]

Messpunkt	Betriebszustand S1		Betriebszustand S2		Betriebszustand S3	
	h=1,2m	h=3,5m	h=1,2m	h=3,5m	h=1,2m	h=3,5m
a	67,3	63,8	74,6	74,9	70,4	70,9
b	70,2	68,3	80,0	81,4	76,1	76,0
c	74,5	75,1	84,7	85,3	82,3	81,2
d	74,8	74,7	87,5	88,3	83,5	83,2
e	72,9	72,8	93,3	92,2	84,0	84,0
f	70,8	71,0	93,2	91,0	82,4	83,5
g	66,2	66,5	85,8	87,2	78,4	78,4
h	60,3	62,0	79,2	81,7	70,5	72,9
i	66,5	65,8	86,8	87,4	77,8	77,8
j	71,1	70,1	91,3	90,8	82,4	83,2
k	74,2	72,8	94,1	92,8	84,9	84,8
l	71,6	73,5	89,8	89,1	83,0	83,4
m	72,4	74,9	86,1	85,2	79,8	81,3
n	68,8	68,3	80,9	80,6	75,8	75,1
Mittelw.:	70,0	69,7	86,7	86,8	79,6	79,9
Gesamt-Mittelw.	69,9		86,8		79,8	

In einer weiteren experimentellen Untersuchung vom FG Schienenfahrzeuge in 2005 wurden an die Geländer im Bereich des Kühlerraums 2m hohe Sperrholzplatten mit innenliegendem Absorbermaterial angebracht, so dass eine vollständige Abdeckung des dahinterliegenden Kompressors erreicht wurde.

Tabelle 3 enthält exemplarisch für 4 Messpunkte die Terzsummenpegel der Stillstandsmessung im Bereich des Kühlerraumes jeweils mit und ohne Schallschutzschürzen (absorbierende Verkleidung im Bereich des Kühlerraums) bei Leerlaufdrehzahl (Messbericht 17/05 FG Schienenfahrzeuge [6]).

Tabelle 3: Terzsummenpegel ohne und mit Schallschutzschürzen bei Leerlaufdrehzahl [6]

Messpunkt	Originalzustand - $L_{Aeq\ 7,5}$	Mit Abschirmmaßnahme - $L_{Aeq\ 7,5}$
4	72,3 dB(A)	68,9 dB(A)
5	73,9 dB(A)	72,4 dB(A)
6	75,7 dB(A)	72,8 dB(A)
7	74,7 dB(A)	71,9 dB(A)

Der Minderungseffekt durch Abschirmwirkung konnte nachgewiesen werden und lag bei etwa 3 dB. Dies greift der Wirkung von den später verwendeten Absorberjalousien im Kühlerraumbereich vor, welche in ähnlicher Dimension lag.

3.2 Vorbeifahrt

Da dieses Projekt auf Grund der spezifischen Lärmbelastigung für Anwohner der Rübelandbahn zu Stande gekommen ist, wurden zunächst Vorbeifahrermessungen „langsam fahrender Güterzug mit häufigem Kompressoreinsatz“ durchgeführt, um den üblichen Betriebszustand widerzuspiegeln. Die Strecke zwischen Blankenburg (Harz) und Rübeland mit Steigungen bis 60 ‰ bietet dazu die notwendige Arbeitsumgebung.

Die folgenden Ergebnisse wurden auf einem Streckenabschnitt vor Hüttenrode und einer leichten Steigung von 25 ‰ bei einer Güterzugmasse von 1100 t ermittelt.

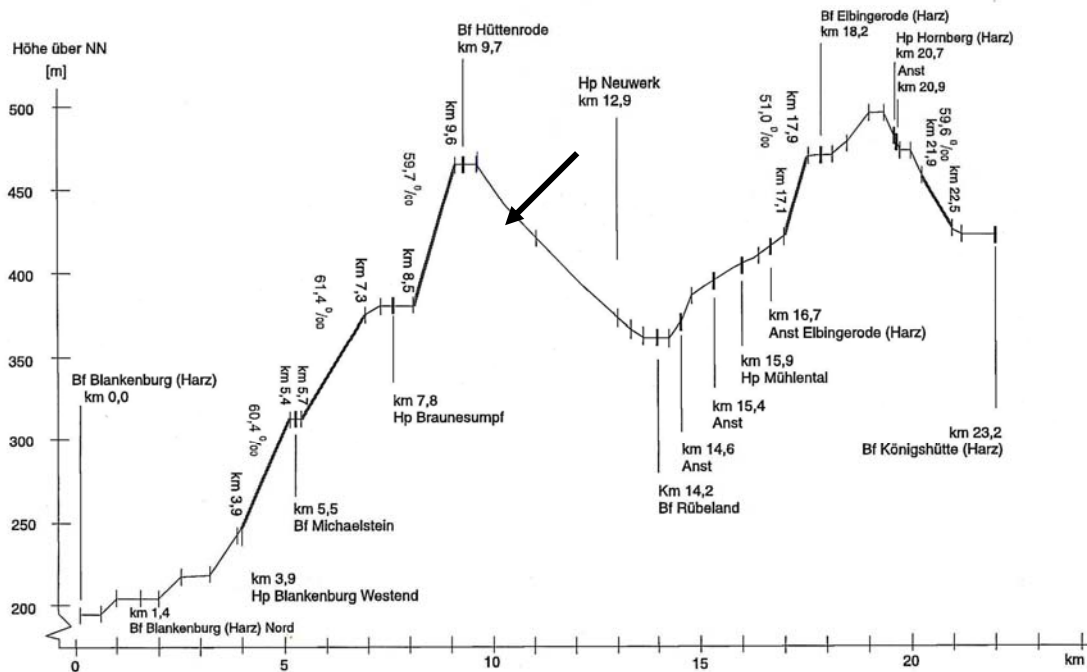
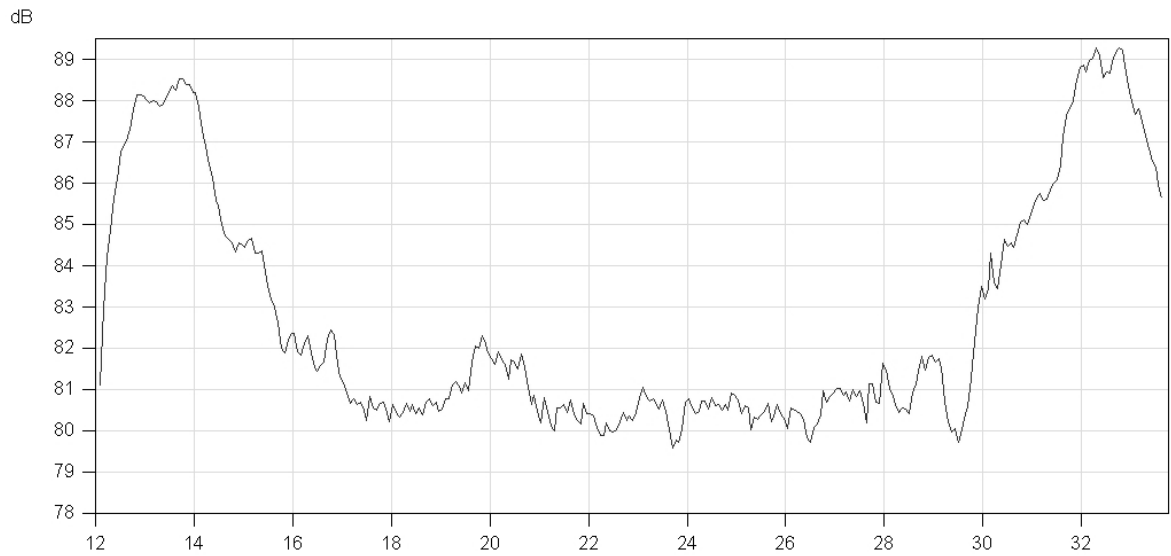
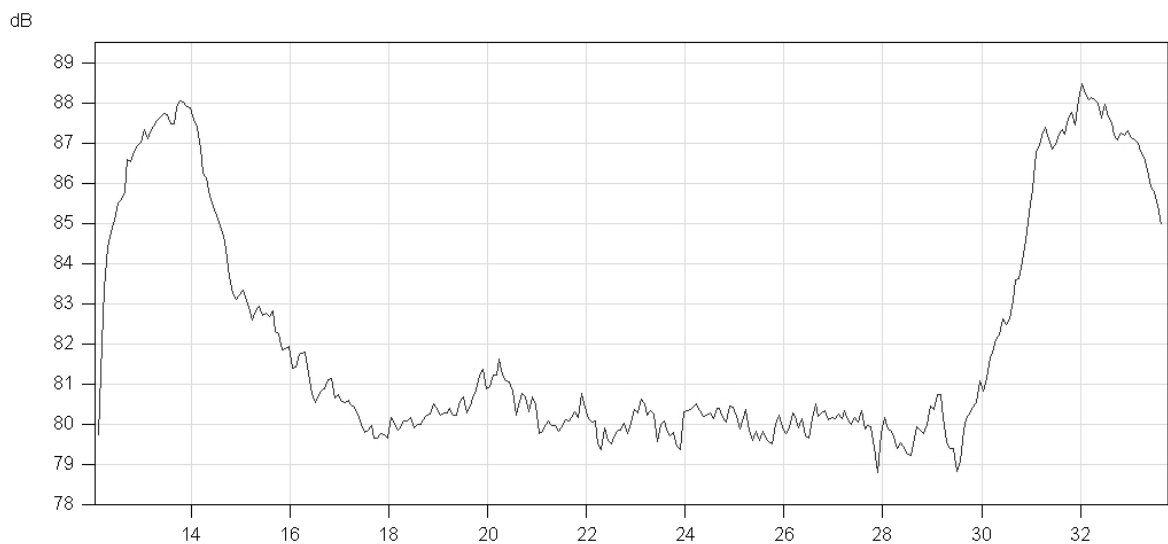


Abbildung 5: Steilstrecke Blankenburg - Königshütte mit Lage der Messstelle

Der Güterzug bestand aus je einem BlueTiger an Zuganfang und Zugende, dazwischen befanden sich 13 Staubgutwagen für den Kalktransport der Felswerke.



s



s

Abbildung 6: Vorbeifahrpegel rechts bei 30 km/h 1.100t Güterzug auf der Rübelandbahn 2006

In den Vorbeifahrpegeln von Abbildung 6 treten die beiden Lokomotiven deutlich aus dem Gesamtgeräusch hervor und übersteigen den Pegelanteil der Wagen um 7-8 dB. Dies wird durch die hohe Zugkraft am Berg und entsprechend benötigte volle Generatorleistung (2460 kW) und der Dieselmotordrehzahl 1050 1/min hervorgerufen. Das Rollgeräusch der Staubgutwagen liegt bei 30 km/h bei 80 dB(A).

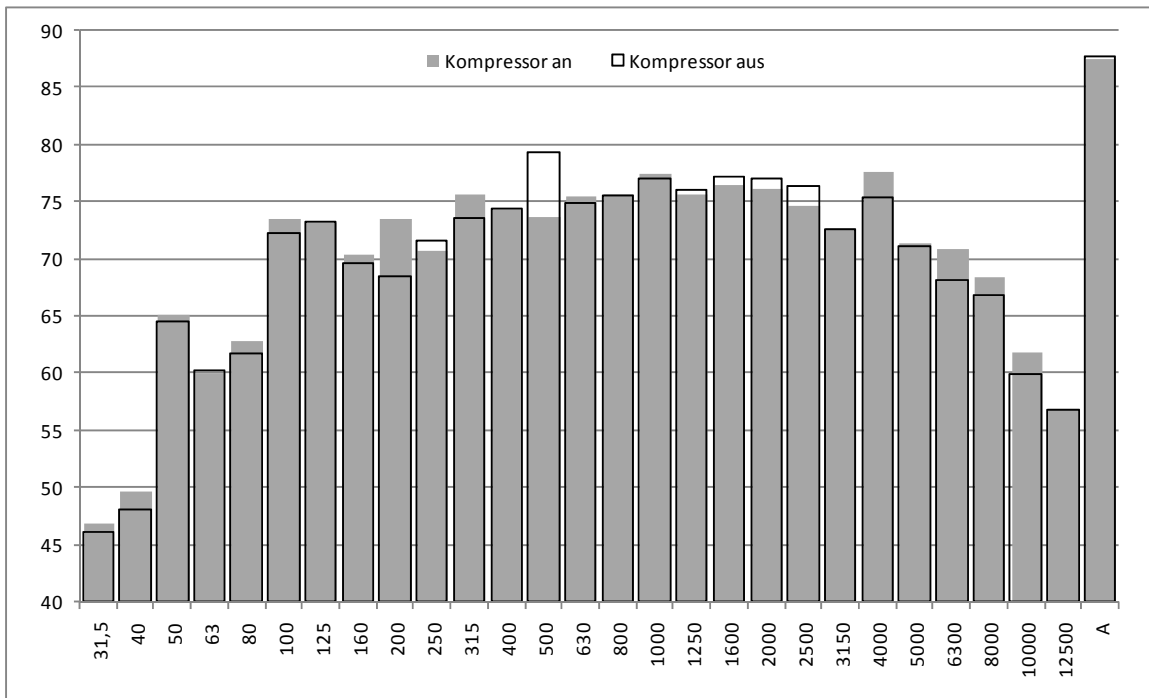


Abbildung 7: Vorbeifahrermessung bei 30km/h (1100t Güterzug) mit/ohne Kompressor, Rübeland 2006

Bei einem Terzpegelvergleich der Vorbeifahrten zeigen sich geringfügige Unterschiede im Bereich der Grundfrequenz des Kompressors 100-160 Hz und der Obertonanteile bei 500 Hz, hier fallen die Terzpegel um bis zu 7 dB geringer aus.

Das Strömungsgeräusch an den Luftfiltern verursacht wahrscheinlich den hochfrequenten Anteil ab 800 Hz. Dies kann jedoch auch vom Hauptkühlerlüfter verursacht sein, welcher dem Bedarf entsprechend in der Drehzahl geregelt ist.

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen noch einmal die Messstelle im Harz aus der Luft und eine Vorbeifahrt eines Güterzuges an dieser Stelle.



Abbildung 8: Messstelle im Harz Luftbild



Abbildung 9: Vorbeifahrt eines BlueTigers vor Hüttenerode (Harz) 2008

3.3 Anfahrt unter Last

Als dritter Betriebszustand gemäß TSI-Noise ist die Anfahrt unter betriebsüblicher Last zu bestimmen, da hier die volle Zugkraft einer Lok gefordert wird und die Hilfsaggregate ggf. laufen. Da hierbei der lauteste Zustand erwartet wird ist der L_{AFmax} für den Zeitraum der Vorbeifahrt der Lok zu ermitteln.

Als betriebsübliche Last wurde hier ein 650t Güterzug und eine zweite passive BlueTiger Lok am Ende mit 130t gezogen. Die Messungen fanden auf der Rübelandbahn im Harz 2006 statt.

Tabelle 4: Anfahrt unter Last 780t Güterzug auf der Rübelandbahn 2006

Messung	v	Zeit	$L_{AFmax 7,5}$	$L_{AFmax 7,5}$	$L_{AFmax 7,5}$	$L_{AFmax 7,5}$
			Li 1,2m	Re 1,2m	Li 3,5m	Re 3,5m
	km/h	s	dB(A)	dB	in dB	in dB
Anfahrt 1	15	11	88,0	86,7	89,4	87,2
Anfahrt 2	16	11	85,0	85,5	87,4	85,4
Anfahrt 3	15	11	84,5	85,0	87,7	85,0



Abbildung 10: BlueTiger Loks der HVLE in Blankenburg (Harz) 2006

3.4 Zusammenfassung TSI Messungen

In nachfolgender Tabelle 5 sind die bis 2005 am BlueTiger vorgenommenen Messungen samt Ergebnisse enthalten. Bei früheren Vorbeifahrten der einzelnen Lok auf einem geeigneten Gleis wurde jeweils nur der maximale Pegel ermittelt.

Tabelle 5: Übersicht bis 2006 verfügbarer Messdaten zur Diesellok BlueTiger

Betriebszustand	TU-Berlin 2006		TU-Berlin 2005		Müller 2003		BBM 1997	
	L _{Aeq}	L _{AFmax}	L _{Aeq}	L _{AFmax}	L _{Aeq}	L _{AFmax}	L _{Aeq}	L _{AFmax}
Stillstand			70,2		70			
Stillstand+K			77,6					
Anfahrt		89						
20 km/h			81					
40 km/h	88		85					
60 km/h						84		
80 km/h						89		89
120 km/h						92		

Tabelle 6: Vergleich der Stillstandsmessungen bis 2005

Stillstand	Motordrehzahl 1/min	Kühlerlüfter 1/min	Kompressor 1/min	maximaler L _{AFm} 7,5m
TU-Berlin 05	330	262	-	70,2 dB(A)
TU-Berlin 05	330	262	660	77,6 dB(A)
TU-Berlin 05	580	525	-	80,3 dB(A)
TU Berlin 05	1050	1050	-	83,4 dB(A)
Müller BBM 03	1050	1050	1050	94,1 dB(A)
Müller BBM 03	880	525	880	84,9 dB(A)
Müller BBM 03	430	262	-	74,8 dB(A)

3.5 Intensitätsmessungen

Auf der fahrenden Lok konnte in Rübeland wurden je nach Betriebsart die Bereiche entlang des Seitenganges vermessen. Der Hauptlüfter im Kühlerraum und die Traktionskühler sind dabei vor allem bei Lastfahrt bergauf aktiv. Die Lüfter der Bremswiderstände laufen hingegen bergab beim Bremsen, abhängig von der gewählten Bremsstufe (1-8).

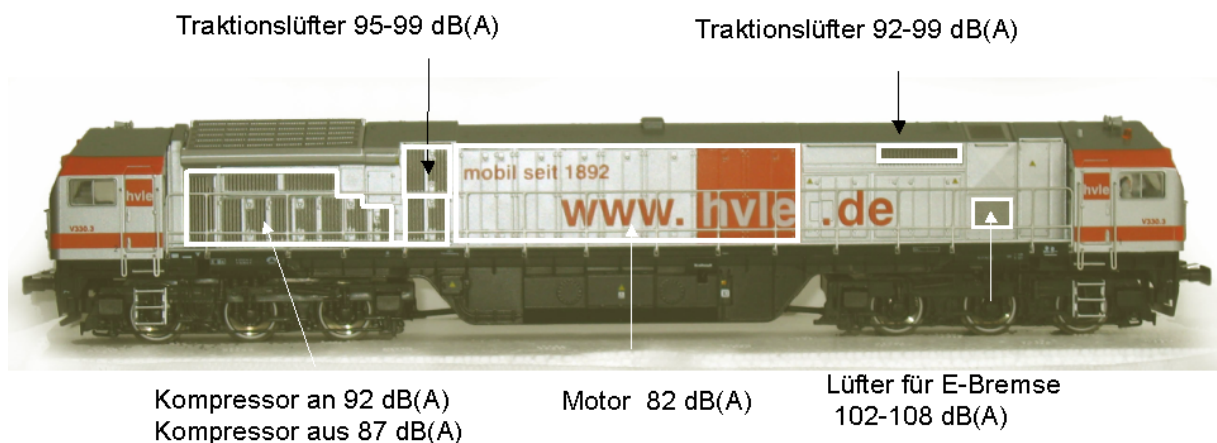


Abbildung 11: Schallintensitätspegel der seitlichen Schallquellen des BlueTigers 2006

Hier ist die Ausgangssituation von 2006 abgebildet, welche die großen Differenzen im Intensitätspegel zwischen E-Bremse, Traktionslüftern, Kompressor und Dieselmotor zeigt. So wird schnell klar, dass bei aktiven Nebenaggregaten und damit um 15-25 dB höheren Intensitätspegel als der Motor das Außengeräusch bei langsamer Fahrt hier von dominiert wird.

Bei genauer Untersuchung der spektralen Anteile der Schallquellen in den nachfolgenden Terzspektren weisen die Traktionslüfter und E-Bremse ihre maximale Energie im hochfrequenten Bereich zwischen 1000 und 3150 Hz auf, während Kompressor und Dieselmotor tieffrequenten dominierende Terzbänder haben. Die Terzspektren stammen von den Intensitätsmessungen und zeigen den jeweiligen I_{Aeq} Intensitätspegel und L_{Aeq} Schalldruckpegel an einer Messstelle.

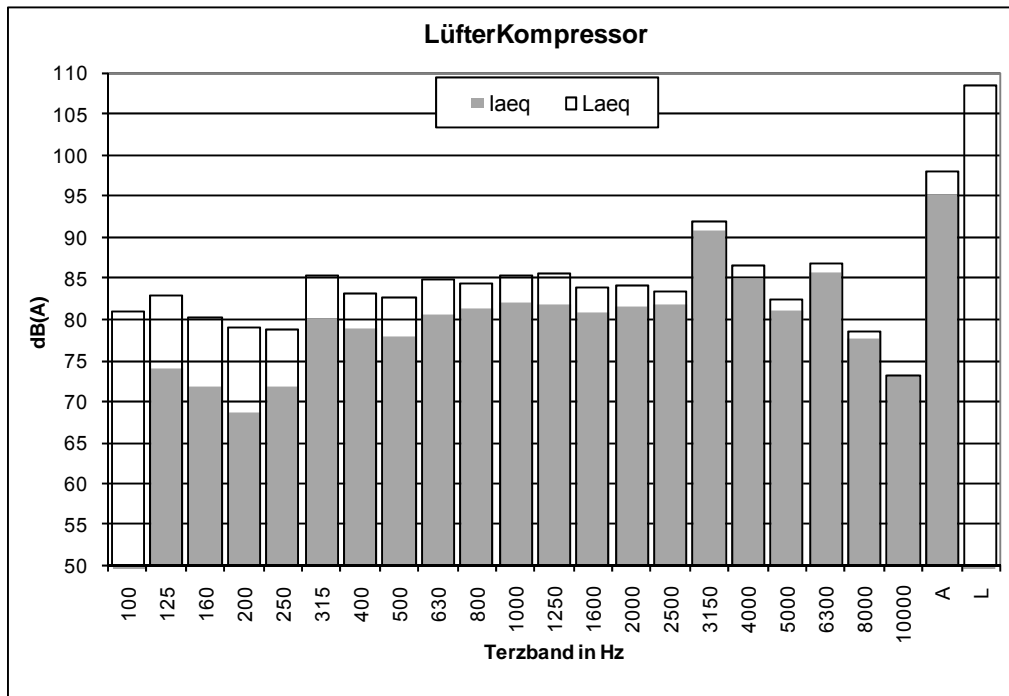


Abbildung 12: Intensitätsspektrum des Traktionslüfters (links in Abbildung 11)

In Abbildung 12 ist zu erkennen, dass der Terzpegel bei 3150 Hz aus dem Spektrum herausragt. Die in diesem Frequenzbereich auftretenden kurzen Wellenlängen, lassen sich durch Absorberjalousien mit einer Bautiefe von 100mm gut reduzieren.

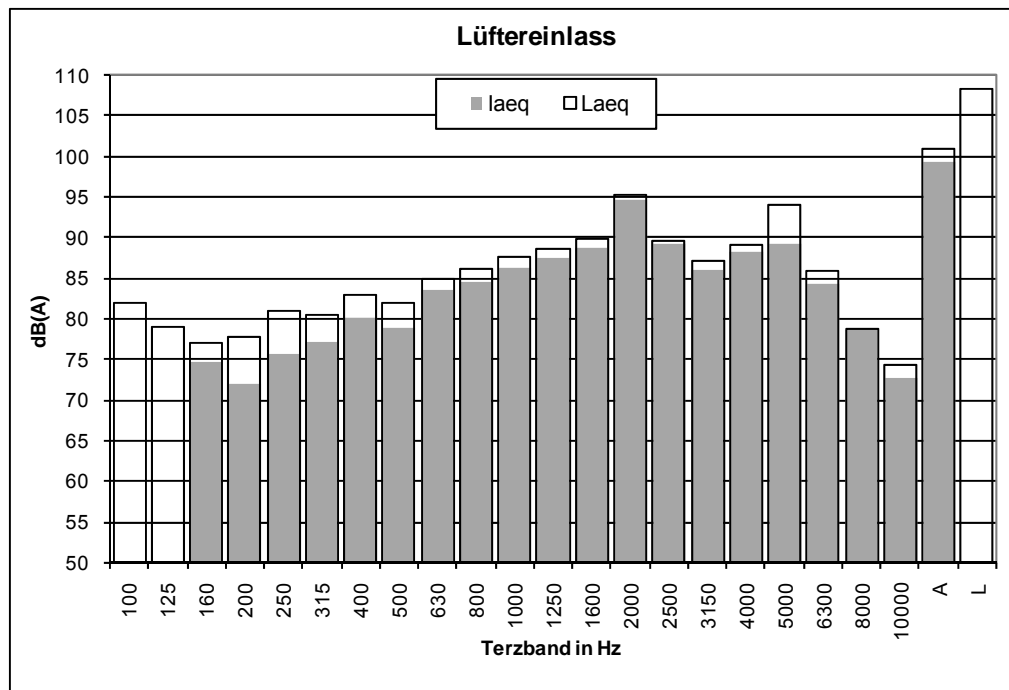


Abbildung 13: Intensitätsspektrum des Traktionslüfters (rechts in Abbildung 11)

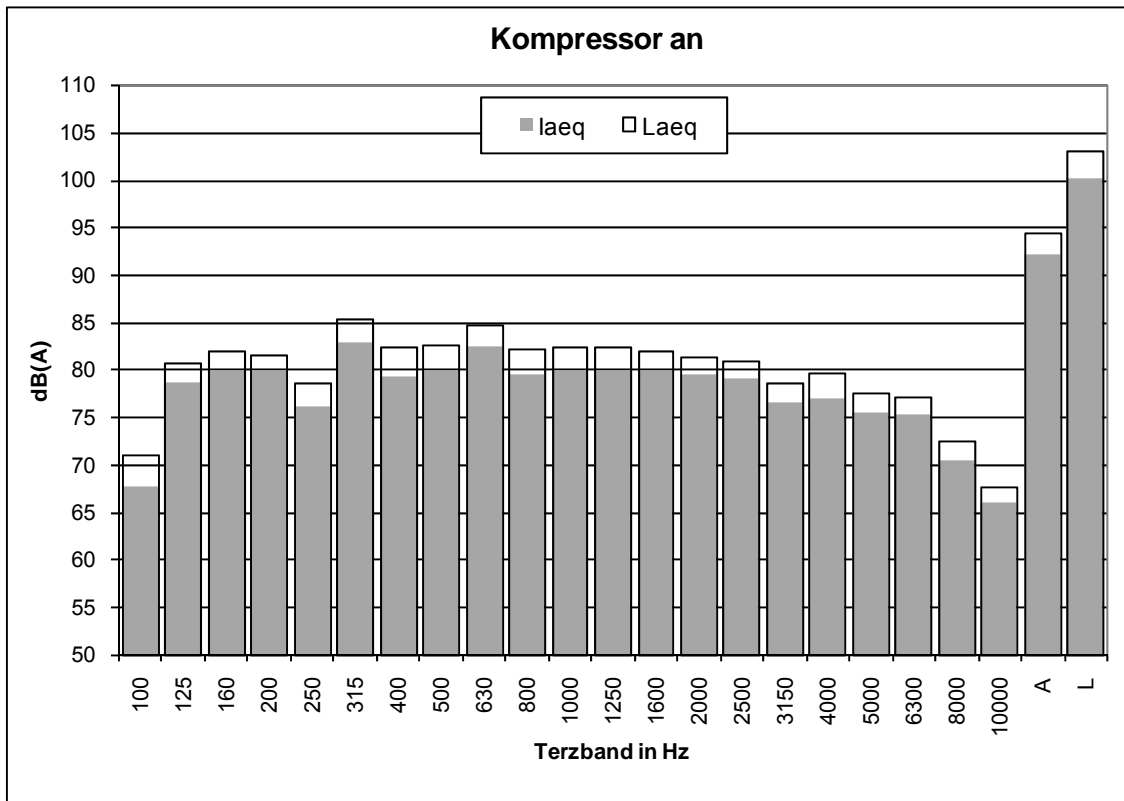


Abbildung 14: Intensitätsspektrum des Kompressors

Da die Drehzahl von Kolbenkompressor und Dieselmotor gekoppelt ist, weisen die Terzspektren auch ähnliche Verläufe und die Lage der Grundfrequenzen bzw. Harmonischen auf (160, 315, 630 Hz Band).

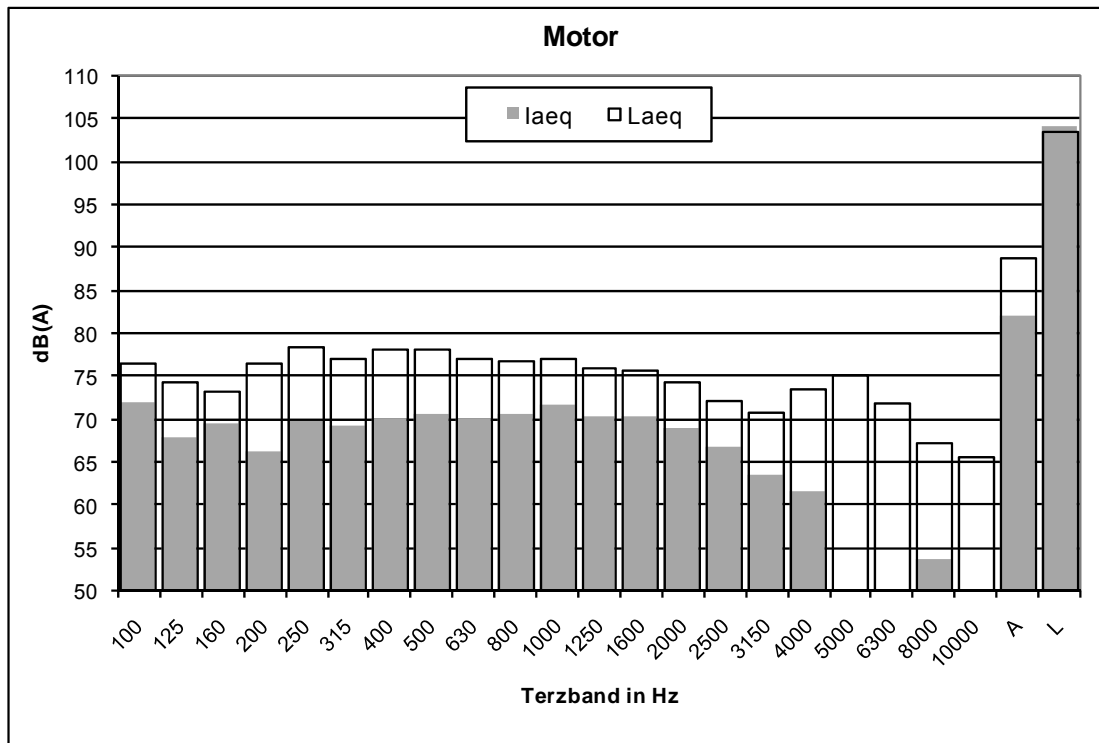


Abbildung 15: Intensitätsspektrum des Motors

Ein Vergleich der seitlichen Intensität beim Einschalten des Kolbenkompressors wurde im Stillstand durchgeführt, um den Einfluss der Nebengeräusche möglichst gering zu halten.

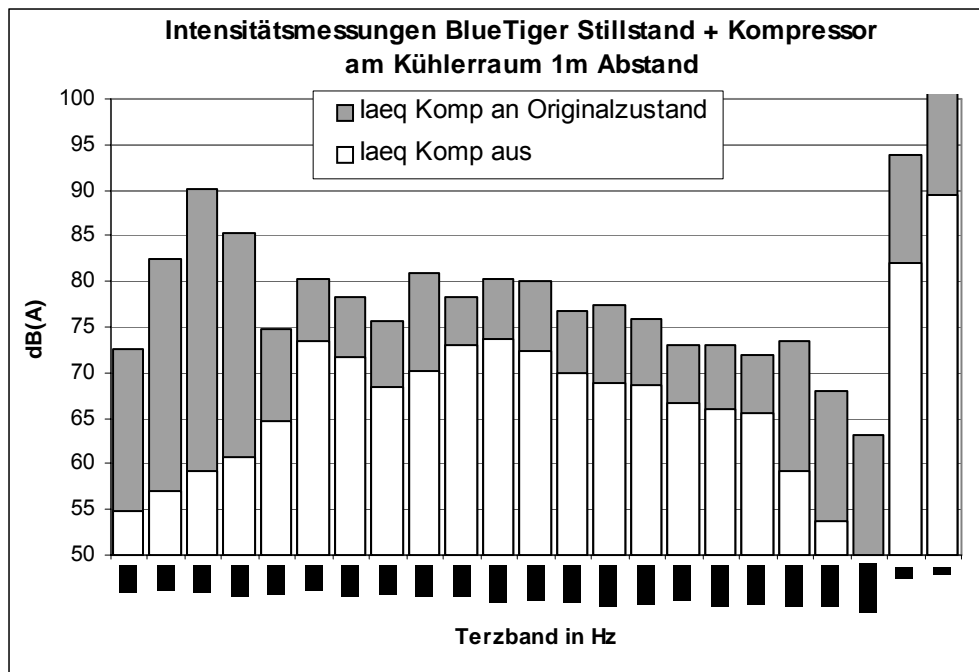


Abbildung 16: Intensitätsmessungen bei an- und ausgeschaltetem Kompressor

Durch Inbetriebnahme des Kolbenkompressors erhöht sich die Schall-Intensität an den seitlichen Gitterblech-Türen um mehr als 10 dB ! Dabei liegt die Hauptenergie im Spektrum um 160 Hz – hier sind es sogar 30 dB Pegelerhöhung. Dieser tieffrequente Anteil am Gesamtgeräusch muss stark unterdrückt werden, um eine deutliche Reduktion des Summenpegels zu erzielen.

Dies kann nur durch eine Maßnahme unmittelbar an der Quelle erzielt werden, da poröse Absorber für diesen Frequenzbereich sonst zu groß dimensioniert werden müssten. Daher wurde an dieser Stelle ein Schalldämpfer appliziert.

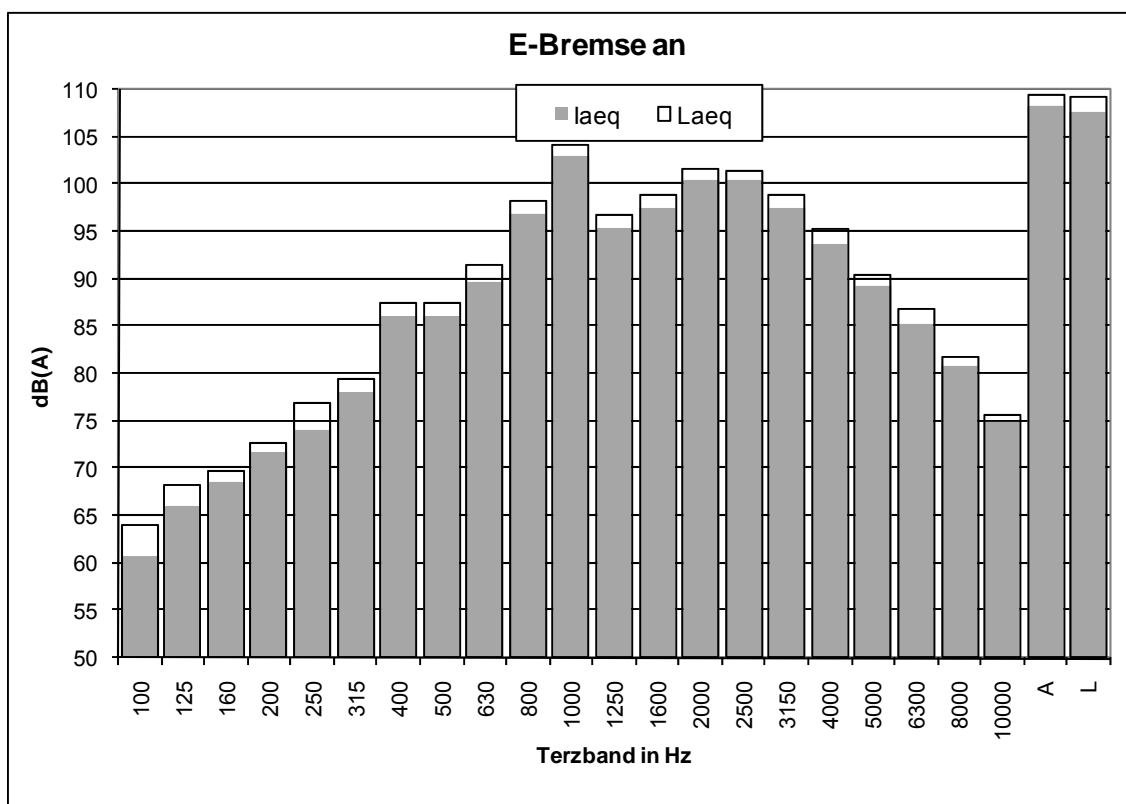


Abbildung 17: Intensitätsspektrum des Lüfters für die E-Bremse

Wie schon bei Abbildung 12 erwähnt, lassen sich Schallschutzmaßnahmen in hohen Frequenzbereichen und damit kleinen Wellenlängen, relativ leicht mit Absorption bekämpfen. Im Bereich des Lüftereinlasses für die elektrodynamische Bremse ist dies von noch viel höherer Bedeutung, weil hier Schall-Intensitäten von nahezu 110 dB(A) erreicht werden.

4 Maßnahmen zur Lärminderung

4.1 Absorberjalousien

Um eine Minderung der Aggregat-Geräusche des BlueTigers zu erzielen müssen die vorhandenen Lochgitter-Elemente auf beiden Seiten ausgetauscht werden. Für die Reduktion ist eine absorbierende Wirkung notwendig, gleichzeitig muss der Luftaustausch für den Kühlbedarf der Lok jedoch gewährleistet bleiben. Diese Kriterien erfüllen Absorberjalousien des Typs Slimshield von IAC, welche aus schrägliegenden Lamellen mit innenliegenden Absorbern aufgebaut sind. Die Lamellen sind nach außen geschlossen und lassen nach innen durch Lochblech den Absorber (Mineralwolle) sichtbar werden.

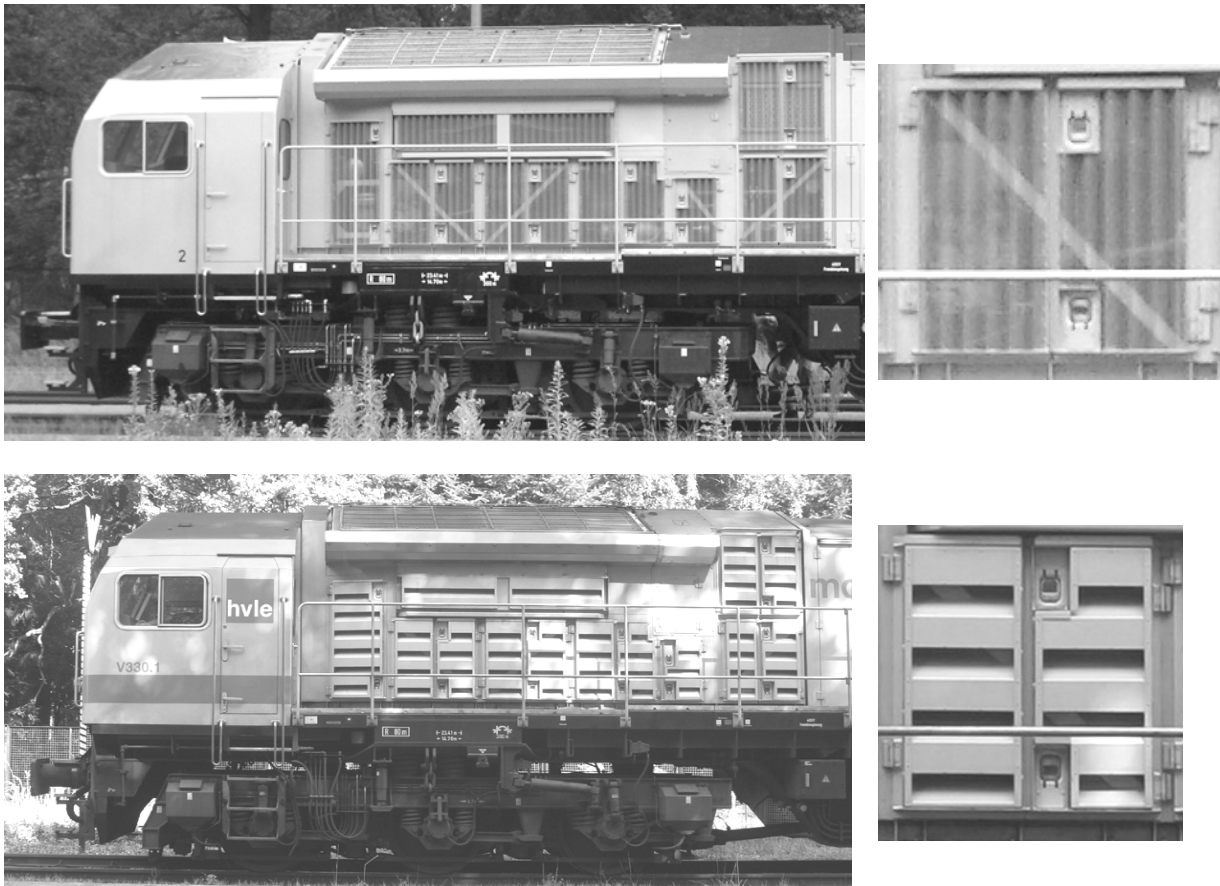


Abbildung 18: Originalzustand und Zustand nach Umbau der Lok

In Abbildung 19 sind einerseits der Originalzustand und der Umbauzustand eines BlueTigers zu sehen und andererseits zeigt eine Nahaufnahme der Türen die Außenansicht.

Schräglaufernde Rahmenteile des Kühlerraums müssen aufwändig durch Ausklinkungen in die Jalousie gebracht werden, welche diese zuweilen filigran und aufwändig erscheinen lässt.

4.1.1 Zeichnungen

Durch das Ingenieurbüro Kühn wurden Zeichnungen angefertigt. Ein kompletter Satz für die Absorbertüren und Ständer der Schalldämpfer ist vorhanden.

4.1.2 Lamellentypen und -Lage

Die Firma IAC war mit der Herstellung der Absorber-Elemente beauftragt, insbesondere der Maßanfertigung gemäß des vorhandenen Zeichnungssatzes.

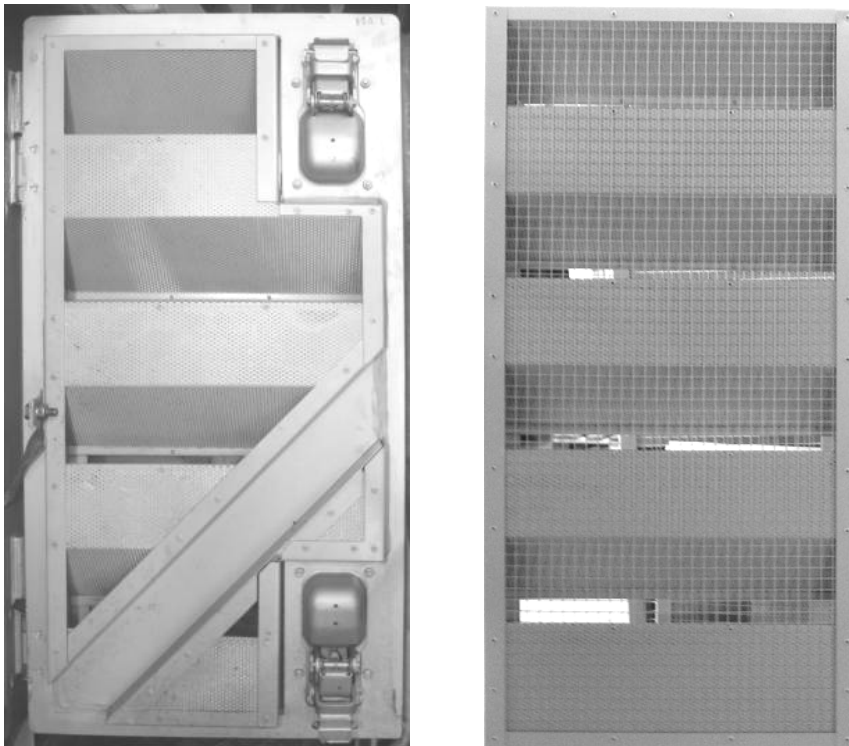


Abbildung 19: Tür mit Ausklinkungen links und Vogelschutzgitter rechts

Sämtliche Elemente sind zur Sicherheit gegen Laub, Kleinteile und Kleintiere mit Vogelschutzdraht bespannt.



Abbildung 20: Produktion der Absorberjalousien bei IAC

Dabei wurde das Gehäuse aus doppelt pulverbeschichtetem Zinkstahl gefertigt und mit Mineralwolle, die wiederum in einem Flies gebettet ist, ausgefüllt.

Somit erreicht die 102mm tiefe Konstruktion das Einfügedämmmaß (siehe Abbildung 21) mit charakteristischem Anstieg zu hohen Frequenzen hin.

Einfügedämmmaß IAC Slimshield 102mm

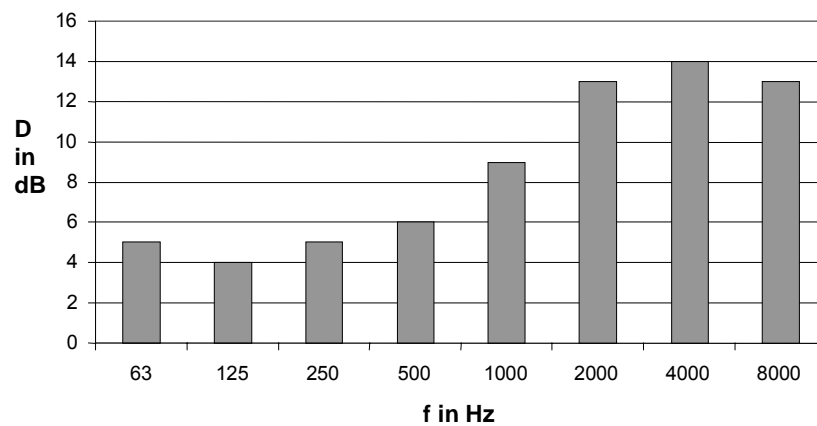


Abbildung 21: Einfügedämmmaß des Absorbers

4.1.3 Demontage der Türen und Einbau der Absorber

Der erste Satz Absorberjalousien für den BlueTiger V330.1 wurde von IAC im Juli 2007 geliefert. Vorab wurden sämtliche Türen und Elemente mit Lochgitterverkleidungen von MAS Guben demontiert und in die Werkstatt transportiert. Hier wurden die Lochgitter von den Türrahmen getrennt und die Absorberelemente für den Einbau vorbereitet. Mitunter mussten einige Elemente auf die Richtbank, da sie sich während der Fahrt verzogen hatten oder noch passgenau gemacht wurden.

Die Türrahmen bestehen aus Aluminium, so dass die Zinkblech-Absorberelemente mittels Nieten und Distanzscheiben fest in den Rahmen installiert wurden. Der Einbau der Elemente dauert bei guter Vorbereitung 14 Tage. Während dieser Zeit müssen die Loks ohne Türen fahren können. Die Lüfteröffnungen wurden dazu mit einem feinmaschigen Vogeldraht verspannt und der Betrieb konnte problemlos erfolgen.



Abbildung 22: BlueTiger ohne Türen mit Vogeldraht

4.1.4 Anbau der Absorberjalousien

Am 26.07.2007 wurden die vorbereiteten neuen Absorber-Türen bei der HVLE in Berlin Spandau angeliefert und dort montiert. Die Verwendung der Originalrahmen führt zu einer hohen Passgenauigkeit der Scharniere und Riegel. Die 102mm Tiefe macht jedoch jede Tür zu einem Einzelstück, welches extra eingepasst werden musste. Die Türen der ersten Lok waren schwierig zu montieren und es musste viel angepasst werden, dies war jedoch zu erwarten.

Um leichtgängiges Schließen zu gewährleisten musste nahezu jede Tür mit Hilfe eines Handtrennschleifers bearbeitet werden. Die neuen Absorberjalousien sind tiefer als die

vorher vorhandenen Türen, deshalb schlugen sie beim schließen gegen diagonal laufende Verstrebungen vorzeitig an. Bei der Vermessung wurde zwar mit Spiel gearbeitet, die Realität erweist sich jedoch oftmals als anders, oder in diesem Fall zu knapp gerechnet.

Bei der ersten Lok V330.1 wurde der Vogelschutzdraht hinterher von innen angebracht, da dies in der Fertigung bei IAC nach unseren Vorstellungen noch nicht integrierbar war. Außerdem mussten zunächst einmal die diagonal verlaufenden Streben eingepasst werden, dies hätte einen großen Teil des Vogelschutzdrahtes zerstört. Nach einigen Wochen Erprobung wurde diese Lok individuell mit Vogeldraht aus Nirossta nachgerüstet.

Die Firma IAC hat an einigen Türen neue Wasserablauföffnungen vorgesehen, an anderen hat sie konstruktive Veränderungen der Ausschnitte vorgenommen. Für die weiteren Loks konnte ein Verfahren bei IAC gefunden werden, bei dem der Vogelschutzdraht vor der Pulverbeschichtung ab Werk angebracht wurde, dies erspart spätere Nacharbeit und die Nietstellen können dauerhaft versiegelt werden.



Abbildung 23: Anbau der Absorberjalousien

4.2 Schalldämpfer

4.2.1 Schalldämpfertyp

In dem recht beengten Kühler-Raum um den Kolbenkompressor herum müssen raumsparende Schalldämpfer verwendet werden, somit kam ein Cowl-Spiralschalldämpfer hier zur Anwendung. Dieser ist trotz der platzsparenden Konstruktion genauso wirksam wie herkömmliche Kammerschalldämpfer.

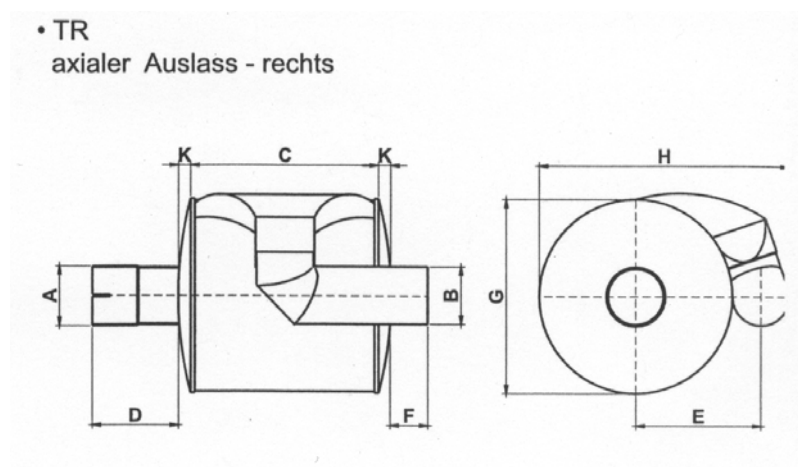


Abbildung 24: Konstruktionszeichnung eines Cowl- Spiralschalldämpfers

4.2.2 Dämpfungseigenschaften

Die Dämpfungskurve des oben beschriebenen Schalldämpfers ist in Abbildung 25 abgetragen. Außerdem wird die Druckverlustkurve in Abbildung 26 gezeigt.

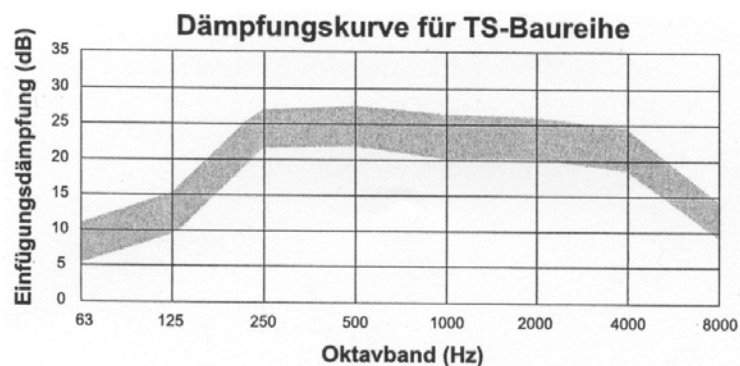


Abbildung 25: Dämpfungskurve des Cowl- Spiralschalldämpfers

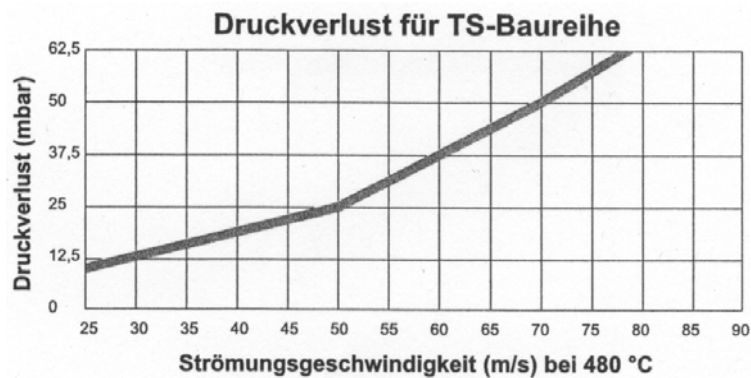


Abbildung 26: Druckverlustkurve des Cowl- Spiralschalldämpfers

Die Druckverluste beziehen sich auf den Abgasstrang bei Verbrennungsmotoren, welche wesentlich sensibler auf zusätzliche Strömungswiderstände reagieren als der Kolbenkompressor. Der Druckverlust wurde durch kurze Schlauchanbindungen gering gehalten.



Abbildung 27: Luftfilter am Kompressor ohne Schalldämpfer

Zwischen Ansaugflansch und Schalldämpfer werden flexible Schläuche mit Stahlspiralen als Ummantelung verwendet, die Unter- und Überdruck standhalten.

4.2.3 Anbau und Konsolen

In der nachfolgenden Abbildung ist der Prinzipaufbau Ansaugstutzen-Schalldämpfer-Luftfilter zu sehen. Für die stabile Anbindung des Schalldämpfers wurden rechts und links Konsolen aus Stahl gefertigt.

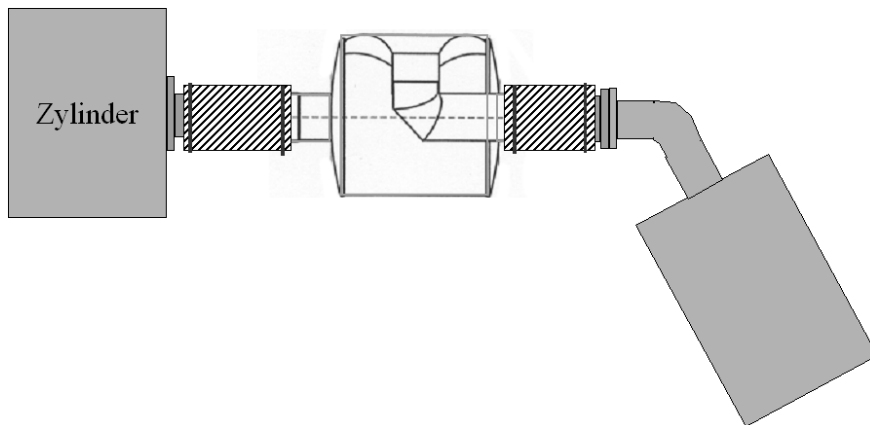


Abbildung 28: Einbausituation des Cowl- Spiralschalldämpfers (Schema)

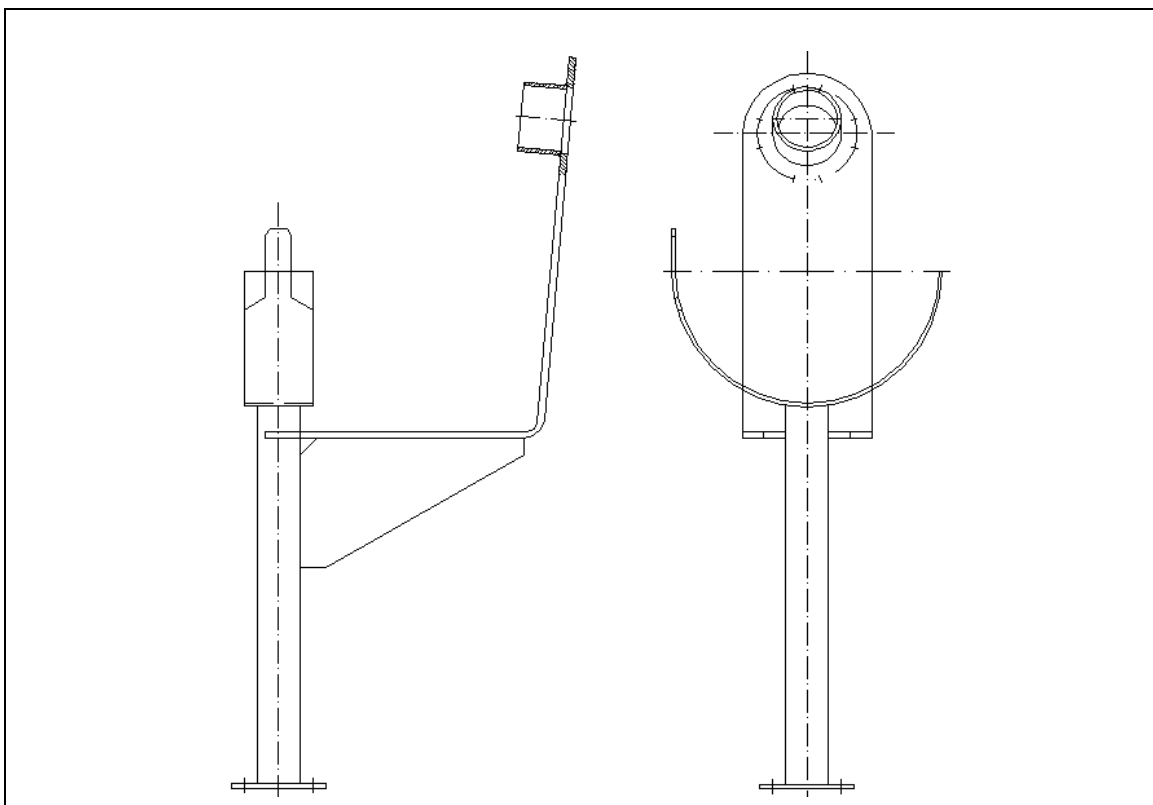


Abbildung 29: Konsole für den Schalldämpfer links

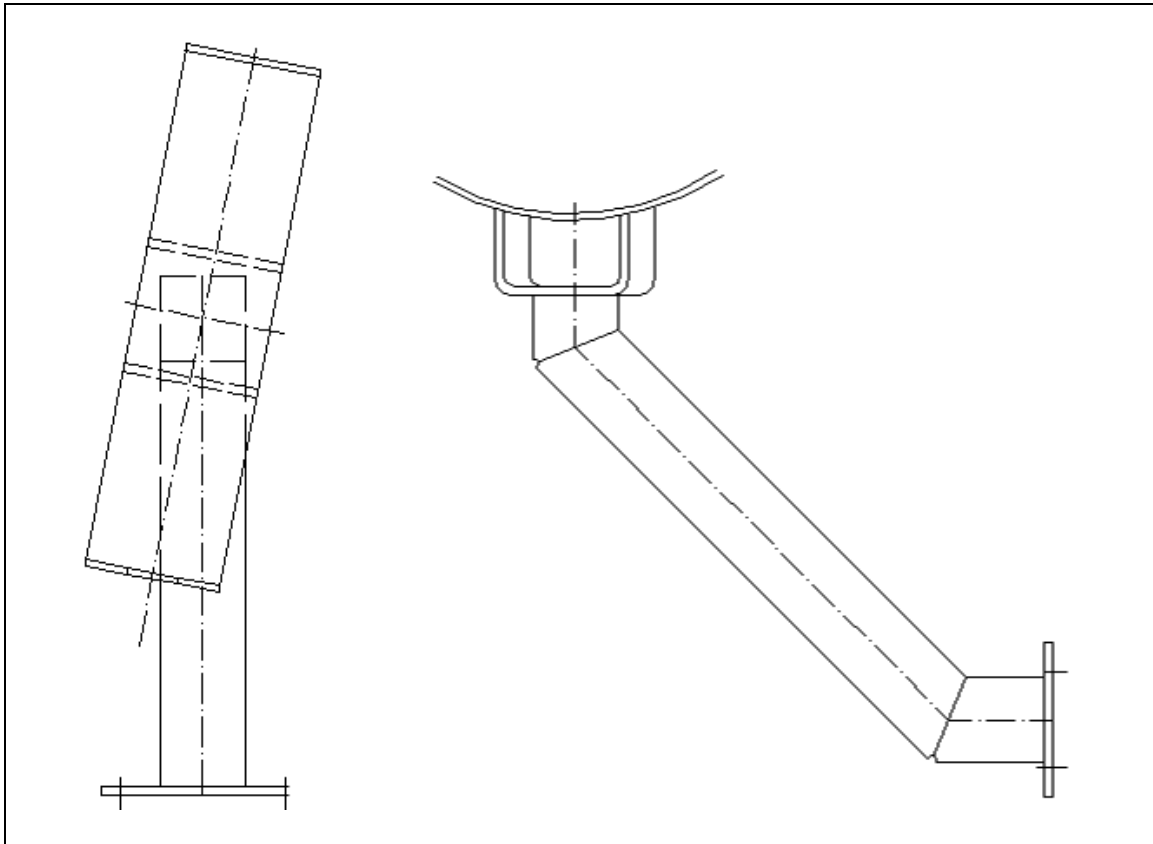


Abbildung 30: Konsole für den Schalldämpfer rechts

Auf der linken Seite wird die Konsole am Boden des Kühlraumes angeschweißt, rechts an ein Seitenträger. Der Schalldämpfer liegt in der halbrunden Lasche und wird mit Flexschläuchen verbunden.

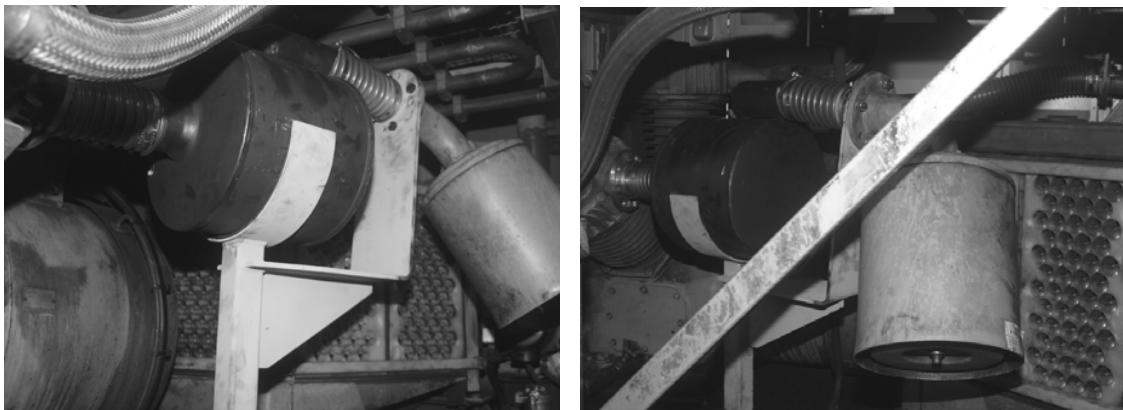


Abbildung 31: Einbausituation des Cowl- Spiralschalldämpfers (linke Seite)

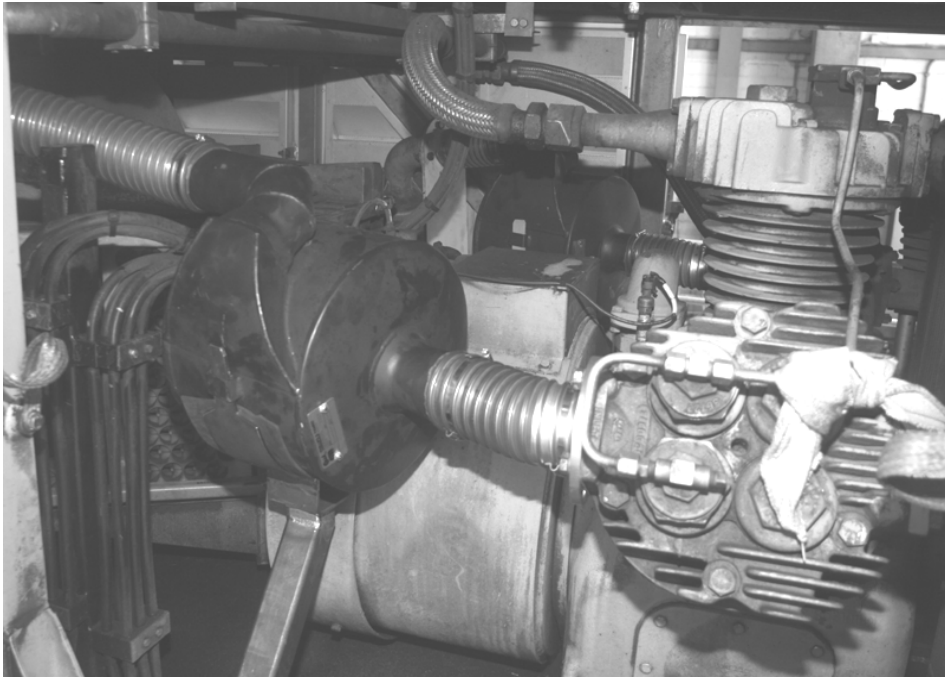


Abbildung 32: Einbausituation des Cowl- Spiralschalldämpfers (rechte Seite)

4.3 Kosten und Aufwand

In der nachfolgenden Tabelle sind die Kosten für eine BlueTiger Diesellok enthalten. Mit einer Summe von 39.000 EUR entspricht dies etwa 2 % des Neuanschaffungspreises dieser Großdieselloks.

Tabelle 7: Kosten der Umrüstung für eine BlueTiger Lok

Maßnahme	€(Netto)	€(Brutto)
Cowl Spiralschalldämpfer TR30	1.500	1.785
Halter und Konsolen, Kleinteile	1.000	1.190
Absorberjalousien	27.500	32.725
Demontage, Vorbereitung, Montage	9.000	10.710
Summe	39.000	46.410

Für die Anpassung an eine Baureihe ähnlichen Typs z.B. GM Class66 sollten für die Konstruktion und akustische Messung/Beratung jeweils 25.000 EUR einkalkuliert werden.

5 Prognose

Aus den Intensitätsmessungen konnten die Schalleistungen der Flächen bestimmt werden und in einem Prognose-Tool eine Vorbeifahrt simuliert werden bei 30 km/h. Die Ergebnisse sind in Abbildung 33 und Abbildung 34 verdeutlicht.

$$L_p = L_l + 10 \cdot \log \frac{S}{S_0} \quad \text{in dB} \quad S_0 = 1 \text{ m}^2$$

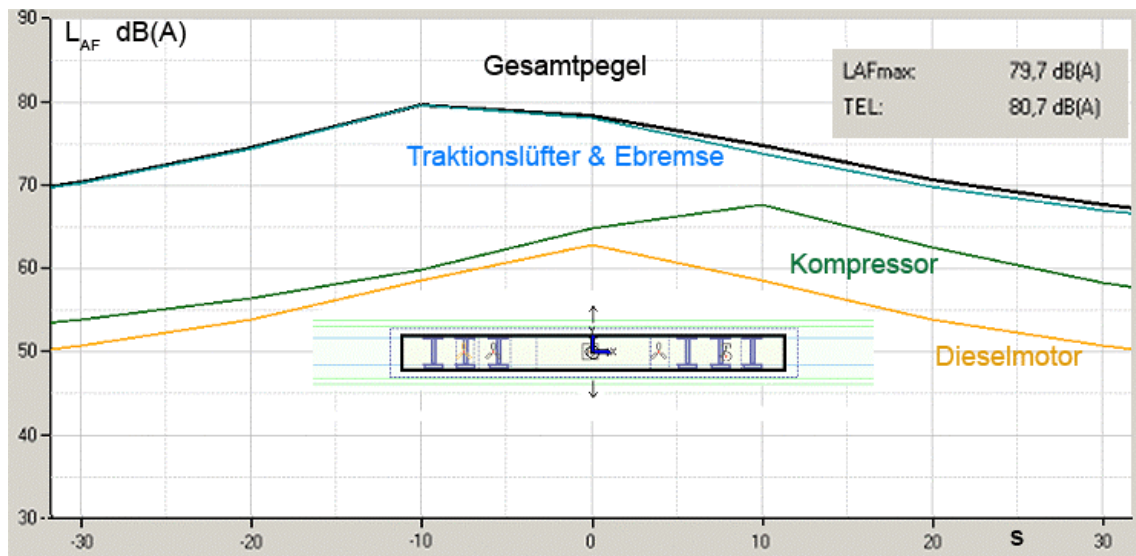


Abbildung 33: Prognosepegel für die Vorbeifahrt mit 30 km/h (ohne Rollgeräusch)

Der Dieselmotor erstreckt sich zwar über die größte Seitenfläche, bestimmte jedoch noch nicht den Hauptanteil im Vorbeifahrpegel.

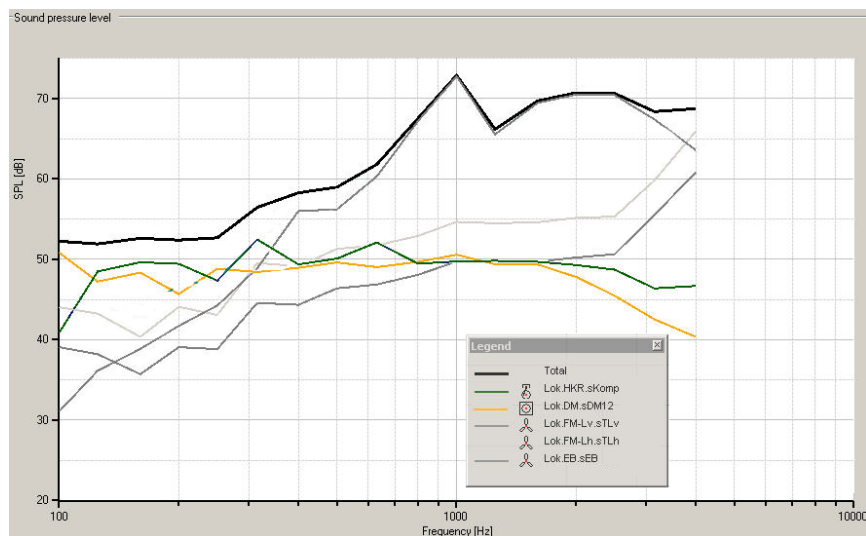


Abbildung 34: Frequenzanalyse für die Vorbeifahrt mit 30 km/h (ohne Rollgeräusch)

6 Abnahmemessungen

Die Abnahmemessungen fanden am 24.10.2007 auf der Test- und Versuchsstrecke von Bombardier in Velten statt. Der Gleiszustand bzgl. Schienenrauheit und Decay-Rate wurde dabei erfasst.

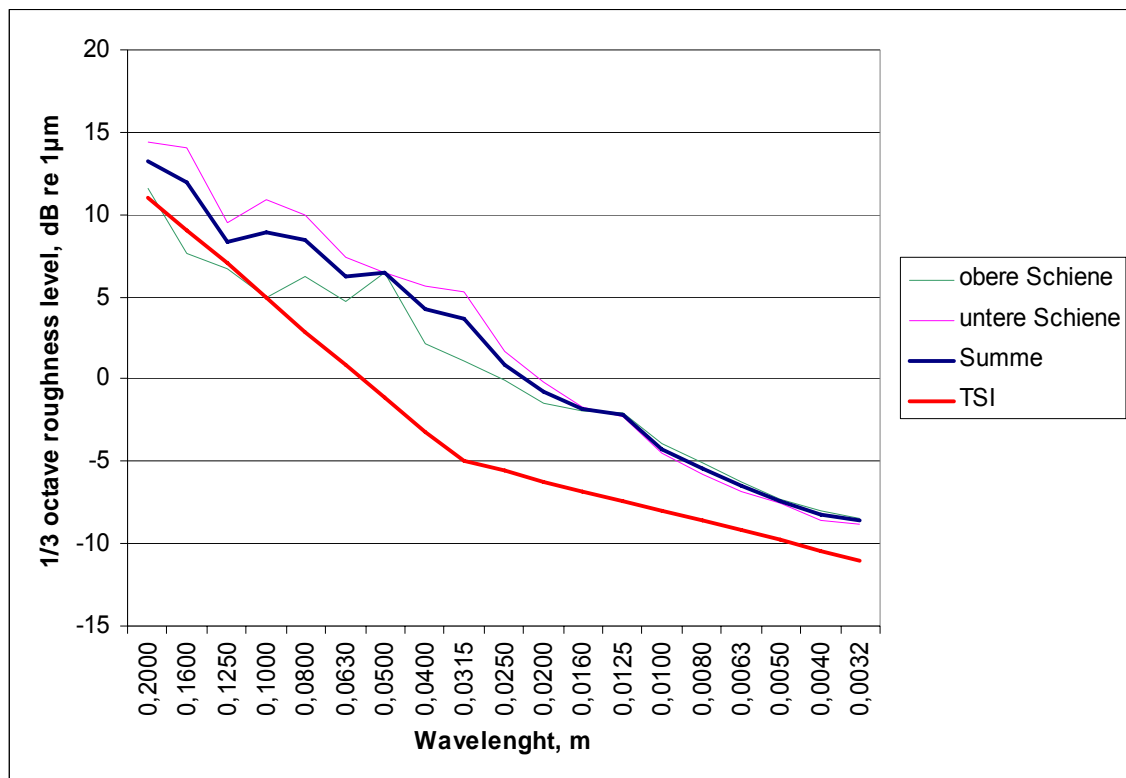


Abbildung 35: Schienenrauheit an der Messstelle in Velten am 25.09.2007

Die Schienen auf der Messstrecke wiesen eine kontinuierliche leichte Überschreitung der TSI Rauheits-Grenzkurve auf, waren jedoch frei von Riffeln und Stoßstellen. Für ein relativ wenig befahrendes Versuchsgleis ist dieser Rauheitsverlauf normal, ein vielbefahrener Streckenabschnitt mit geringem Güterzuganteil verfügt oftmals über glattere Oberflächen, dies war jedoch innerhalb des Projektes nicht zu organisieren.

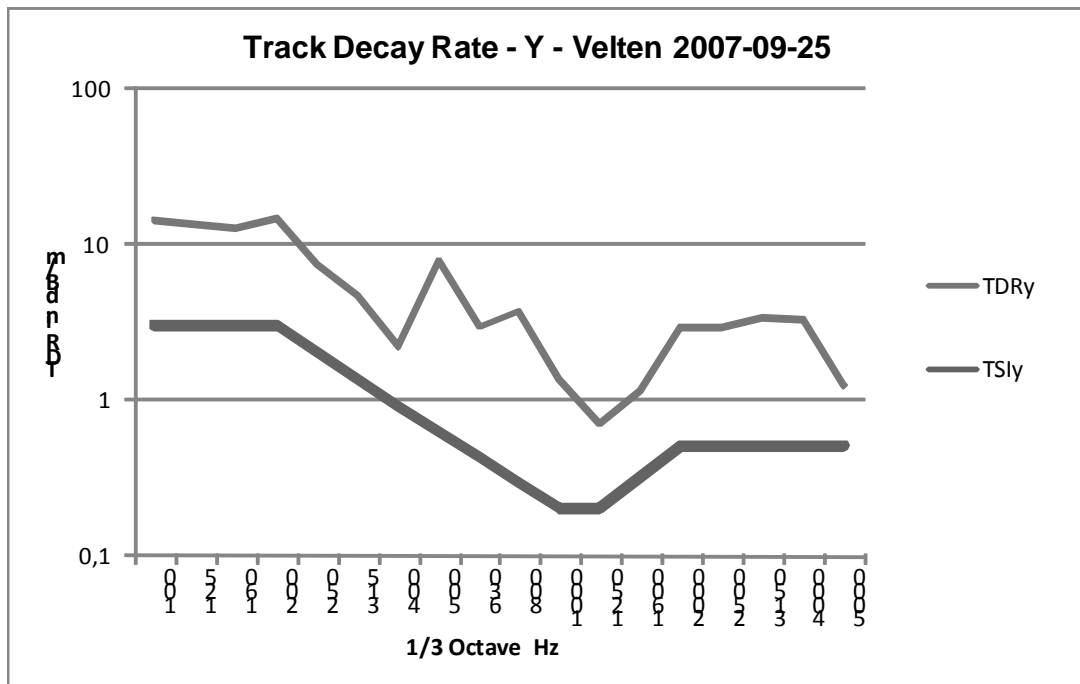


Abbildung 36: Track-Decay-Rate in y- Richtung

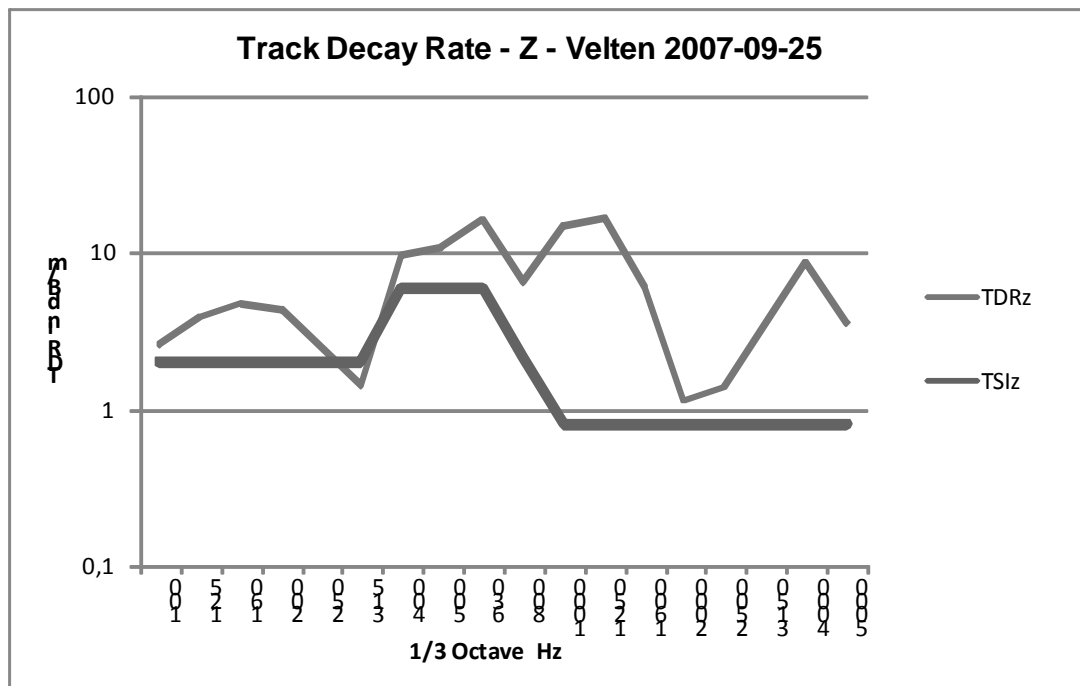


Abbildung 37: Track-Decay-Rate Velten in y-Richtung

Bei der Track-Decay-Rate (TDR) schneidet die vorgefundene UIC-54 Schiene auf Betonschwellen im Schotterbett hingegen gut ab. Die mittlere TDRy und TDRz liegt oberhalb der TSI Grenzkurve.

6.1 BR 250 BlueTiger nach dem Umbau

In einer Seitenansicht erscheint die umgebaute BlueTiger Diesellok in einem modernen und futuristischen Design. Die Absorberelemente wurden farblich der Lok angepasst und fallen durch ihre horizontal verlaufenden Lamellen auf. Es besteht kein direkter Blick auf den Kompressor im Kühlerraum, da die Lamellen in 45° Winkel geneigt sind.



Abbildung 38: BR 250 BlueTiger V330.1 der HVLE vor/nach dem Umbau



Abbildung 39: BlueTiger V330.2 nach dem Umbau



Abbildung 40: Detailänderungen für BlueTiger V330.2 und V330.3

6.2 Stillstand

Beide Maßnahmen einzeln betrachtet führen zur Einhaltung des TSI Grenzwertes von 75 dB(A) im Stillstand bei laufendem Kompressor.

TSI limits
75 dB(A)

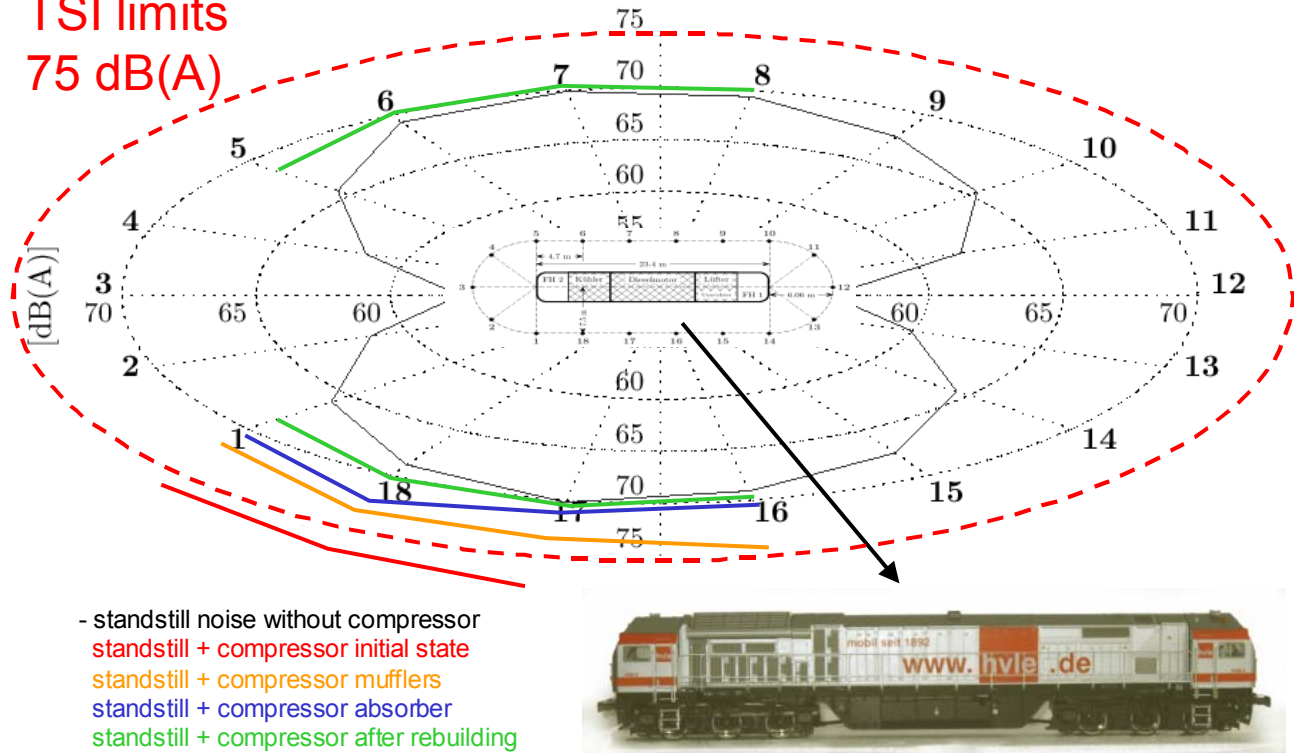


Abbildung 41: Stillstandspegel Vergleich der Maßnahmen

Da die Maßnahmen allerdings in unterschiedlichen Frequenzbereichen wirken, gelingt ihre Kombination hier besonders gut. Somit ist der maximale Stillstandsgeräuschpegel nach dem Umbau auf gleichem Niveau wie der Stillstandspegel im Originalzustand ohne Kompressor und beträgt 70 dB(A).

6.3 Vorbeifahrt

In der nachfolgenden Tabelle sind die Pegelwerte der verschiedenen Vorbeifahrtgeschwindigkeiten angegeben, sowie die jeweilige Standardabweichung und der Mittelwert.

Tabelle 8: Vorbeifahrtmessungen BlueTiger V 330.1 in Velten 2007

	L _{Aeq} ISO 3095					dB(A)	L _{AFmax} ISO 3095				
	Höhe	Links 7,5m		Rechts 7,5m			Höhe	Links 7,5m		Rechts 7,5m	
		1,2m	3,5m	1,2m	3,5m			1,2m	3,5m		
		Mittel	M1	M2	M3			M4	Mittel	M1	M2
v40	81,7	80,6	82,8	81,0	82,5	83,1	81,7	84,4	82,3	83,9	
v40	83,7	82,1	85,5	82,3	85,0	85,4	83,7	87,0	83,9	87,1	
v40	83,8	82,2	85,6	82,4	85,1	85,4	83,5	87,3	84,0	86,8	
v40	83,1	81,6	84,6	81,9	84,2	84,6	83,0	86,2	83,4	86,0	
Stabw40	1,2	0,9	1,6	0,8	1,4	1,4	1,1	1,6	0,9	1,8	
ΔL _{AFmax}	-1,6	-1,4	-1,6	-1,5	-1,8						
v60	83,5	82,0	85,1	82,0	84,7	85,0	83,3	86,7	83,6	86,6	
v60	82,6	81,7	83,8	81,6	83,5	84,9	83,2	86,4	83,4	86,5	
v60											
v60	83,0	81,9	84,4	81,8	84,1	85,0	83,3	86,5	83,5	86,5	
Stabw60	0,6	0,2	0,9	0,3	0,8	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	
ΔL _{AFmax}	-1,9	-1,4	-2,1	-1,7	-2,5						
v80	81,7	82,8	82,8	80,7	80,7	84,4	85,8	87,1	83,2	81,6	
v80	81,7	82,1	82,0	81,1	81,4	82,6	82,9	83,0	82,3	82,5	
v80	82,4	82,2	82,9	82,1	82,4	83,8	83,0	84,9	83,6	83,7	
v80	81,9	82,4	82,6	81,3	81,5	83,6	83,9	85,0	83,0	82,6	
Stabw80	0,6	0,4	0,5	0,7	0,9	1,4	1,7	2,1	0,7	1,0	
ΔL _{AFmax}	-1,7	-1,5	-2,4	-1,7	-1,1						

Aus Tabelle 7 geht demnach ein Vorbeifahrtpegel $L_{Aeq, 80 \text{ km/h}} = 81,9 \text{ dB(A)}$ als Mittelwert hervor, wobei die linke Seite einen $L_{Aeq, 80 \text{ km/h}} = 82,5 \text{ dB(A)}$ und damit 1 dB höheren Pegel als die rechte Seite aufweist.

Bei langsameren Geschwindigkeiten verringern sich die Pegel nicht, es ist jedoch eine höhere Differenz zwischen hochliegenden und tiefliegenden Schallquellen zu beobachten, die auf das Vorhandensein betriebsabhängiger Kühlungsstufen oder anderer Aggregate hinweisen. Beim Rollgeräusch zu langsameren Geschwindigkeiten ist allenfalls Stagnation zu beobachten.

Bei einer solchen dieselelektrischen Lok ist dieses Phänomen plausibel, da die Motordrehzahl nicht proportional zur Geschwindigkeit steigt. Erst bei Geschwindigkeiten über 80 km/h dominiert das Rollgeräusch und wächst proportional zur Geschwindigkeit (mit $L = 30 \log v/80$) an.

Im Frequenzbereich unterscheiden sich die Fahrten mit 40 und 60 km/h kaum voneinander, bei der Fahrt mit 80 km/h fallen die Terzen 100 und 125 Hz um 5-8 dB ab und 250, 315 Hz sowie 500, 630 Hz nehmen um 3-5 dB zu (siehe Abbildung 42). Dies ist nicht allein den Dieselmotor zurückzuführen, denn dieser erzeugt bei den hier gefahrenen mittleren Drehzahlen ($525-880 \text{ min}^{-1}$) eine Grundfrequenz von 50-80 Hz.

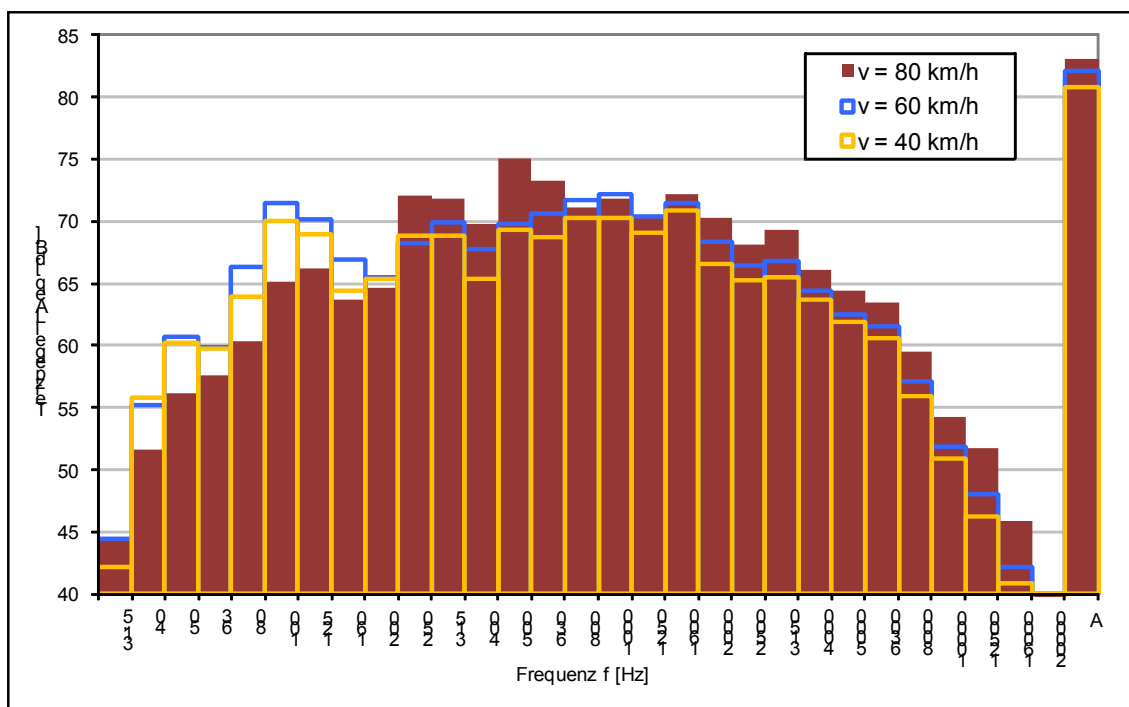


Abbildung 42: Terzpegelverlauf verschiedener Geschwindigkeiten in Velten 2007 BlueTiger

Zur Abschätzung des Einflusses der Schienenrauheit auf das Emissionsverhalten des Blue Tigers wurden Emissionsrechnungen für ein nichtangetriebenes K-Klotz gebremstes Fahrzeug nach der TNO Methode durchgeführt. Dieses Fahrzeug entspricht in Länge, Masse und Achsanzahl den Daten des Blue Tigers.

Tabelle 9: Rauheitsdaten für die TNO Prognose

λ	Schiene		Räder	Kontakt- filter
	Ost	West		
cm	dB	dB	dB	dB
63,0	13,7	16,8	11,2	0
50,0	13,2	16,3	10,2	0
40,0	12,7	15,8	9,2	0
31,5	12,2	15,3	8,2	0
25,0	11,7	14,8	7,2	0
20,0	11,2	14,3	6,2	0
16,0	8,7	12,3	5,2	0
12,5	7,0	10,1	4,6	0
10,0	7,7	11,2	4,8	0
8,00	6,8	10,5	3,6	-0,2
6,30	6,0	6,5	3,9	-0,6
5,00	5,6	6,9	4,6	-1,3
4,00	3,3	5,3	4,9	-2,2
3,15	1,6	2,7	1,8	-3,7

λ	Schiene		Räder	Kontakt- filter
	Ost	West		
2,50	0,2	1,0	1,2	-5,8
2,00	-1,3	-0,9	-2,4	-9
1,60	-2,0	-1,9	-5,9	-12,5
1,20	-2,2	-2,8	-9,3	-13,5
1,00	-4,1	-4,6	-8,1	-13,5
0,80	-5,3	-5,8	-9,9	-15,3
0,63	-6,3	-6,9	-12,6	-16,4
0,50	-7,2	-7,7	-13,3	-17,5
0,40	-7,9	-8,8	-14,8	-18,4
0,32	-8,5	-9,0	-16,3	-19,5
0,25	-9,5	-10,0	-17,8	-20,5
0,20	-10,5	-11,0	-19,3	-21,5
0,16	-11,5	-12,0	-20,8	-22,4
0,13	-12,5	-13,0	-22,3	-23,5
0,10	-13,5	-14,0	-23,8	-24,5

Eine erste Rechnung wurde mit den real gemessenen Schienenrauheiten auf dem Messgleis in Velten 09-2007 durchgeführt. Für die Radrauheit wurde eine mittlere Rauheit für K-Klotz gebremste Fahrzeuge angesetzt. Alle Daten für die Rechnung sind in der Tabelle 17 angegeben. Der berechnete, A-bewertete Vorbeifahrtpegel L_{p_W} in Tabelle 10 entspricht dem real gemessenen Vorbeifahrtpegel des Blue Tiger Fahrzeuges (arithmetisch im Terzspektrum über drei Vorbeifahrten gemittelt, West ↔ M1, M2 links). Daraus ist zu schließen, dass die Antriebsgeräusche keinen dominierenden Einfluss auf das Emissionsverhalten haben.

Tabelle 10: Berechnungstabelle Emissionspegel bei 80 km/h auf einem TSI Referenzgleis

Terz Hz	Messgleis Velten			Referenzgleis TSI Noise			Differenz	
	L_{p_O} dB(A)	L_{p_W} dB(A)	$L_{p_BT_W}$ dB(A)	L_{p_O} dB(A)	L_{p_W} dB(A)	$L_{p_BT_W}$ dB(A)	d_O dB	d_W dB
100	51,9	54,7	65,2	48,9	48,9	59,3	-3,0	-5,8
125	54,1	57,3	66,2	51,7	51,7	60,6	-2,5	-5,6
160	56,5	60,6	63,7	54,6	54,6	57,8	-1,9	-5,9
200	59,3	64,1	64,7	57,1	57,1	57,7	-2,3	-7,0
250	64,2	69,2	72,0	61,3	61,3	64,1	-3,0	-7,9
315	65,3	66,2	71,8	62,3	62,3	67,9	-3,1	-3,9
400	68,6	68,3	69,8	65,4	65,4	66,8	-3,2	-3,0
500	72,0	71,7	75,1	68,1	68,1	71,5	-3,9	-3,6
630	73,1	73,5	73,3	70,3	70,3	70,1	-2,8	-3,2
800	72,2	72,8	71,2	70,9	70,9	69,3	-1,3	-1,9
1000	70,8	71,8	71,8	71,0	71,0	71,0	0,2	-0,8
1250	68,1	69,2	70,6	69,1	69,1	70,4	1,0	-0,2
1600	70,5	70,9	72,2	70,4	70,4	71,7	-0,1	-0,5
2000	75,2	74,2	70,2	72,6	72,6	68,6	-2,7	-1,7
2500	72,7	72,6	68,2	68,0	68,0	63,5	-4,7	-4,6
3150	72,1	72,1	69,4	66,9	66,9	64,2	-5,2	-5,2
4000	70,9	71,1	66,1	66,0	66,0	61,1	-4,8	-5,1
5000	70,4	70,3	64,4	65,0	65,0	59,1	-5,4	-5,3
6300	68,6	68,4	63,5	62,8	62,8	57,9	-5,7	-5,6
8000	65,6	65,6	59,5	59,9	59,9	53,7	-5,8	-5,8
A	83,0	83,2	83,2	80,3	80,3	80,1		

In einer zweiten Rechnung wurde der Emissionspegel des Referenzfahrzeuges auf einem TSI konformen Referenzgleis durchgeführt. Alle Fahrzeugdaten blieben unverändert. Der A-bewertete Emissionspegel auf diesem Gleis ist für beide Fahrzeugseiten gleich, da für jede Schiene die gleiche Rauheit angenommen wurde. Entsprechend der obigen Tabelle 10 kann der Einfluss der Schienenrauheit in Velten auf den Vorbeifahrtpegel mit 3 dB abgeschätzt werden.

In nachfolgender Abbildung 43 ist der Vorbeifahrtpegel des antriebslosen Modellfahrzeuges zu sehen und als Vergleich auf beiden Messgleisen dargestellt. Der Rauheitsverlauf in Abbildung 35 führt offenbar zu einer breitbandigen Pegeländerung tieffrequent bis 800 Hz sowie ab 2.5 kHz hochfrequent steigend. Die Terzen 200 und 250 Hz weisen mit 7-8 dB die höchste Pegeländerung auf, dies erklärt auch den Zuwachs vom 250 Hz Terzpegel in Abbildung 42.

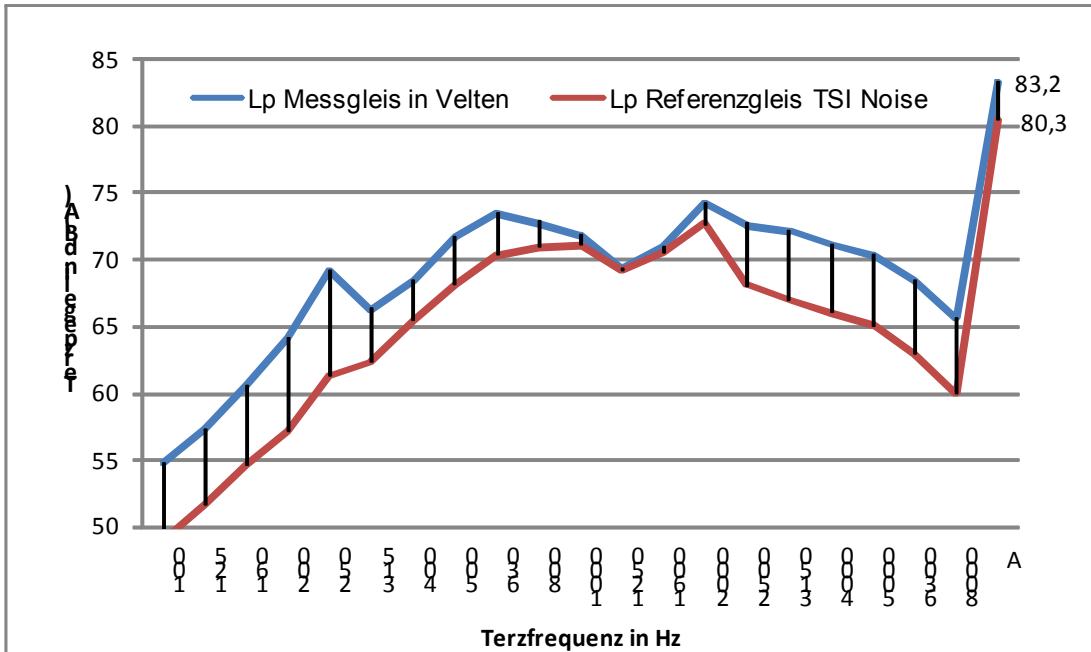


Abbildung 43: Prognose der Fahrgeräusche 80 km/h auf TSI Referenzgleis antriebslose Modell
 Als nächstes wurde das mittlere Terzspektrum vom BlueTiger V330.1 bei 80 km/h (M1_links_West) mit den berechneten Differenzen d_W beaufschlagt.

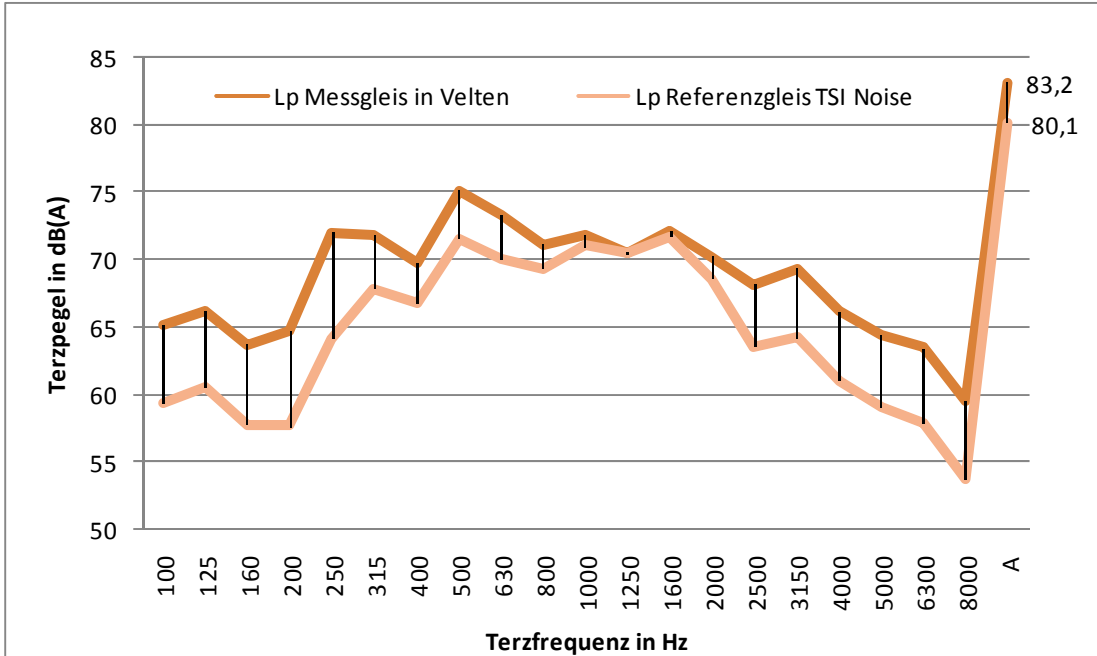


Abbildung 44: Prognose der Fahrgeräusche 80 km/h auf TSI Referenzgleis BlueTiger 330.1
 Die Gesamtpegelminderung wird hauptsächlich durch die 500, 630 und 250 Hz Komponente tieffrequent erzielt. Damit wäre für den BlueTiger nach Umbau auf einem Referenzgleis bei 80 km/h ein um 3dB geringerer Vorbeifahrpegel bei 80 dB(A) realistisch. Abzüglich eines Unsicherheitsdezibels gehen wir allerdings von mindestens 2 dB aus.

7 Minderungseffekte

7.1 Stillstand

Nach dem Umbau betragen die L_{Aeq} Werte im Stillstand bei laufendem Kompressor maximal 70 dB(A) und sind damit gleich hoch wie beim Originalzustand ohne Kompressor.

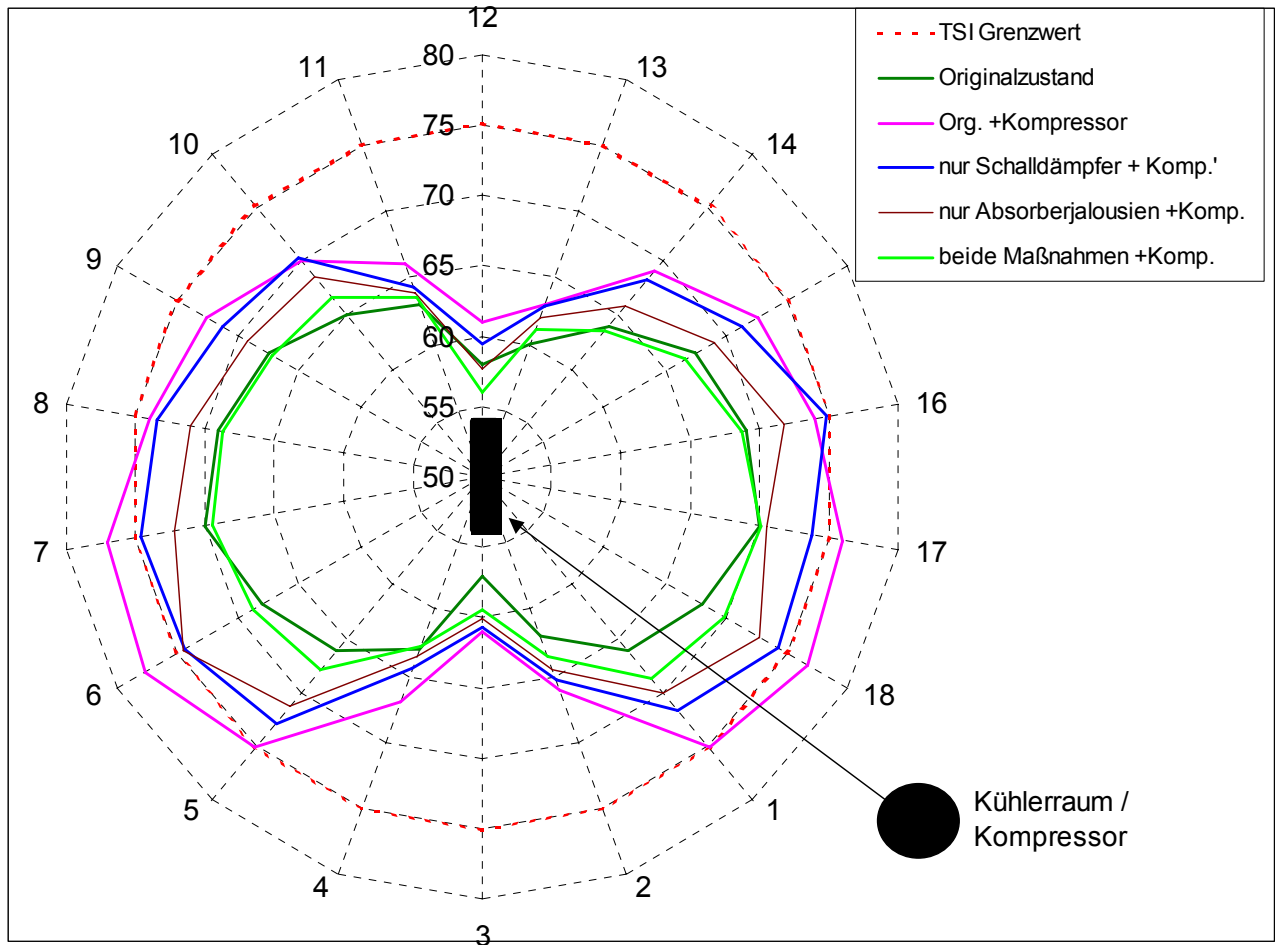


Abbildung 45: Stillstandsgeräusch im Einzelnen und insgesamt

Es ist in Abbildung 45 lediglich noch eine Verschiebung der Lage maximaler L_{Aeq} -Werte zu erkennen, welche sich bei eingeschaltetem Kompressor mehr in Richtung Kühlraum/Kompressor ausprägen.

Die TSI Grenzwerte werden nach Umbau der Lok in allen geforderten Betriebszuständen eingehalten. In Abbildung 46 sind die Pegelreduktionen vor und nach Umbau für den Stillstand umlaufend dargestellt mit maximalen Differenzen von 8 dB bei Kompressorbetrieb. Im Mittel konnte seitlich eine Reduktion von 5 dB erzielt werden.

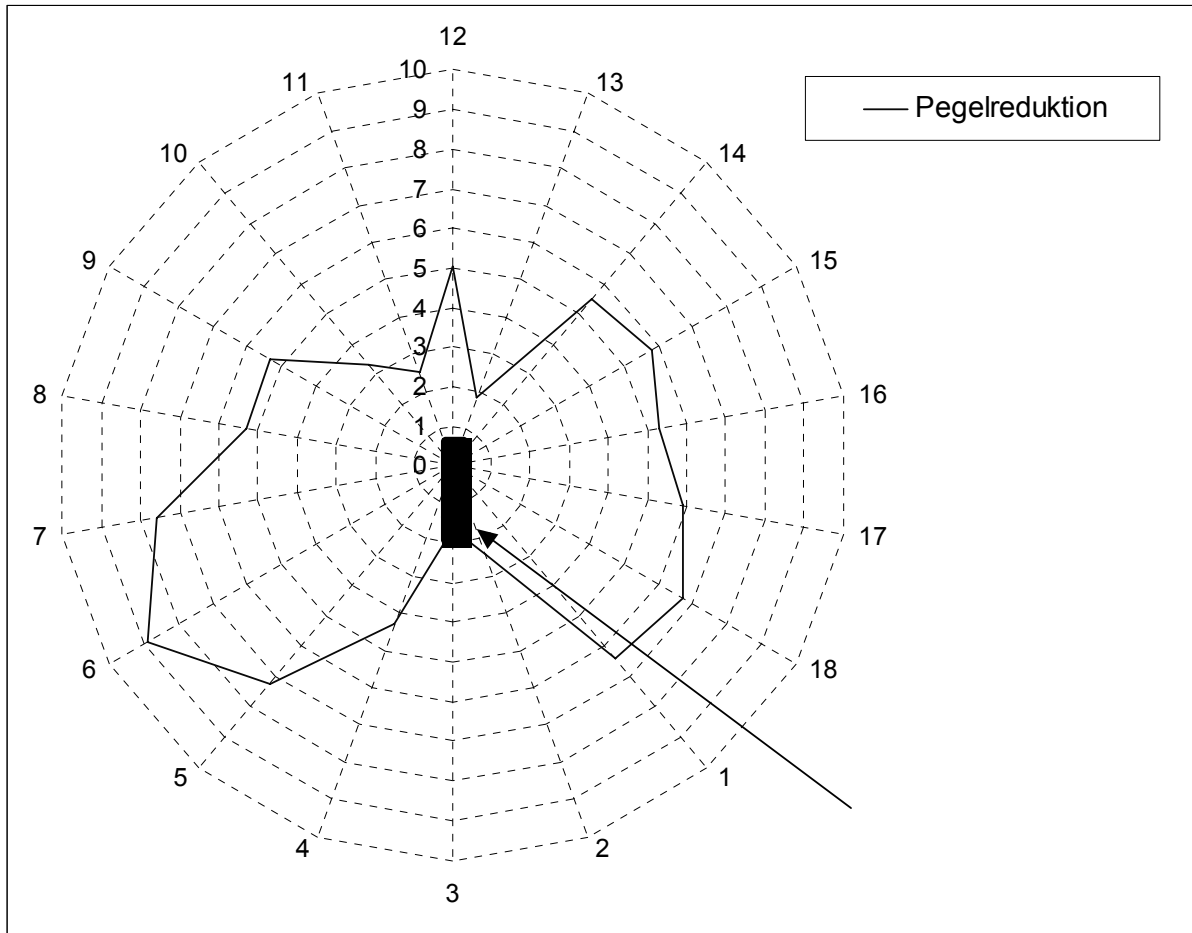


Abbildung 46: erzielte Pegelminderung in dB im Stillstand bei laufendem Kompressor

Tabelle 11: Stillstand und Kompressor L_{Aeq} relevante Messpunkte seitlich nach Umbau

Stillstand	MP 6	MP 7	MP 18	MP 17
Original	77,6	77	76,6	76
V 330.1	68,7	69,4	70,1	69,9
V 330.2	72,1	71,4	70,8	70,0
V 330.3	70,5	69,5	69,8	70,1

Im Stillstand ohne Kompressor haben lediglich die Lüfter einen minimalen Einfluss auf das Gesamtgeräusch.

Tabelle 12: Stillstandsgeräusche LAeq lautesten seitlichen Messpunkten vor/nach Umbau

Stillstand	MP 7	MP 17
Original	70,2	70,0
V 330.1	69,2	68,9

7.2 Vorbeifahrt

Für die Vorbeifahrtmessung bei 80 km/h existiert bisher kein L_{Aeq} Wert, es wurden jedoch von zwei unabhängigen Messungen in Tabelle 5 jeweils der $L_{AFmax, 80 \text{ km/h}} = 89 \text{ dB(A)}$ gemessen.

Wir konnten bei den Messungen in Velten Tabelle 8 einen mittleren Pegelunterschied $\Delta L_{AFmax} = -1,7 \text{ dB}$ bei 80 km/h berechnen. Die L_{AFmax} Pegelwerte wiesen eine Standardabweichung von 1,4 dB im Mittel auf. Gehen wir im worst-case von einem L_{AFmax} Wert am unteren Rand des durch die Standardabweichung gegebenen Intervalls aus und ziehen davon den mittleren Pegelunterschied ab so schätzen wir den Ausgangszustand bei 80 km/h wie folgt: ab:

$$L_{Aeq, 80 \text{ km/h}} = 89 \text{ dB(A)} - 0,7 \text{ dB} - 1,7 \text{ dB} = 86,6 \text{ dB(A)}$$

Tabelle 13: Pegeldifferenzen der Messung in Velten 09-2007 bei 80 km/h

	L_{Aeq} ISO 3095						L_{AFmax} ISO 3095				
		Links 7,5m		Rechts 7,5m				Links 7,5m		Rechts 7,5m	
	Höhe	1,2m	3,5m	1,2m	3,5m		Höhe	1,2m	3,5m	1,2m	3,5m
	Mittel	M1	M2	M3	M4		Mittel	M1	M2	M3	M4
v80	81,7	82,8	82,8	80,7	80,7	dB(A)	84,4	85,8	87,1	83,2	81,6
v80	81,7	82,1	82,0	81,1	81,4	dB(A)	82,6	82,9	83,0	82,3	82,5
v80	82,4	82,2	82,9	82,1	82,4	dB(A)	83,8	83,0	84,9	83,6	83,7
v80	81,9	82,4	82,6	81,3	81,5	dB(A)	83,6	83,9	85,0	83,0	82,6
Stabw80	0,6	0,4	0,5	0,7	0,9	dB	1,4	1,7	2,1	0,7	1,0
ΔL_{AFmax}	-1,7	-1,5	-2,4	-1,7	-1,1	dB					
Orig.v80	86,6	86,6	86,6	86,6	86,6		89	89	89	89	89
ΔL	4,7	4,2	4,0	5,3	5,1		5,4	5,1	4,0	6,0	6,4

In Tabelle 13 wurden nun die Differenzen der Ausgangswerte einzelner Mikrofone und im Mittel berechnet. Der Pegelunterschied bei Vorbeifahrt mit 80 km/h Originalzustand zu umgebautem Zustand liegt damit zwischen 4-6 dB. Wird der Einfluss der Strecke und die Messunsicherheit hinzugezogen, gehen wir davon aus mindestens **3 dB** Verbesserung erzielt zu haben. Wird die TNO Prognose auf einem TSI Referenzgleis aus Abschnitt 6.3 hinzugezogen und einem $L_{Aeq} = 81 \text{ dB(A)}$, so liegt die Pegelminderung bei 5 dB.

Tabelle 14: Übersicht L_{Aeq} nach dem Umbau ohne Last in dB(A)

Geschwindigkeit	120 km/h	100 km/h	80 km/h	60 km/h	40 km/h
V 330.1	87,7	85,3	82,4	82,5	81,7
V 330.2	87,8	85,4	82,5	82,6	81,9
V 330.3	87,5	85,1	82,2	82,0	82,0

120 und 100 km/h wurden berechnet, die übrigen Werte gemessen

Bei unbelasteter Vorbeifahrt treten bis 80 km/h kaum Unterschiede im L_{Aeq} auf, hier bilden Dieselmotor und Antrieb die dominierende Schallquelle. Erst bei einer Belastungsfahrt mit voller Motordrehzahl und hohem Kühlbedarf werden die Unterschiede deutlich.

Tabelle 15: Übersicht L_{Aeq} nach dem Umbau auf der Steilstrecke ohne/mit Last in dB(A)

Geschwindigkeit	40 km/h ohne Last	40 km/h mit Last
V 330.1 vorher	-	87,8
V 330.1 nachher	81,7	87,1

Nachfolgend sind die Vorbeifahrpegel bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten angegeben.

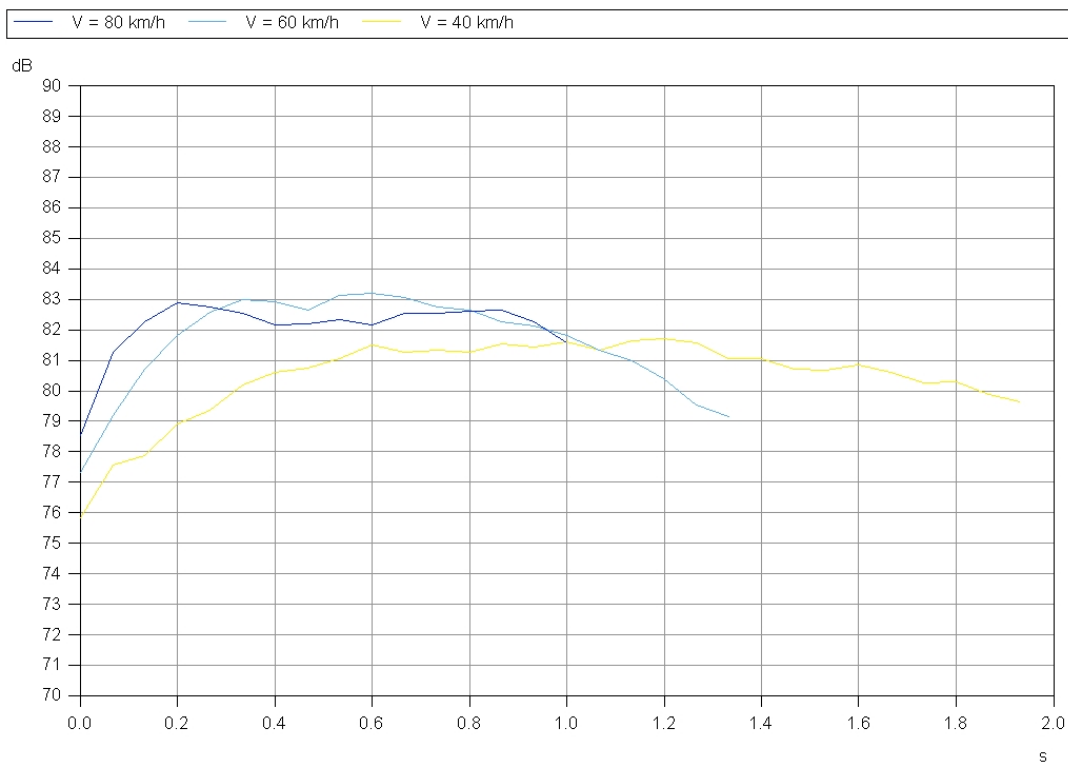


Abbildung 47: Vorbeifahrpegelzeitverlauf in 7,5m bei 40 km/h

7.3 Anfahrt unter Last

Die Anfahrt unter Last ist neben den aufwändigen Versuchsbedingungen auch noch Schwankungen (Wetter, Fahrer, Zeitraum) unterworfen, so dass sich statistisch keine gravierenden Unterschiede im Maximalpegel ergeben.

Tabelle 16: Übersicht L_{AFmax} lautesten Mikrofone in der Messebene nach Umbau in dB(A)

Stillstand	Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3
Original	89,4	87,4	87,7
V 330.1	88,5	88,7	87,5
V 330.2	87,7	88,0	86,5
V 330.3	86,5	87,7	87,0

In diesem Betriebszustand ist eine maximale Zugkraft der Lok gefordert, die auch eine hohe Motordrehzahl bedingt. Somit sind hier vor allem Die Traktionskühler und der Hauptkühlerlüfter aktiv.

Werden sämtliche Anfahrten über die 4 Mikrofone (1,2m und 3,5m Höhe rechts und links) arithmetisch gemittelt, so erhält man für den

Originalzustand $L_{AFmax} = 86,4 \text{ dB(A)}$

Umbauzustand $L_{AFmax} = 85,7 \text{ dB(A)}$

Da die Maßnahmen keinen Einfluss auf den Dieselmotor haben, ist für die Anfahrt auch kein großer Unterschied im Maximalpegel zu erwarten.

Bei Betrachtung des Frequenzspektrums in Abbildung 48 fällt jedoch auf, dass die hochfrequenten Lüfteranteile durch die Absorberelemente bei der umgebauten Lok eine deutliche Pegelminderung erfahren.

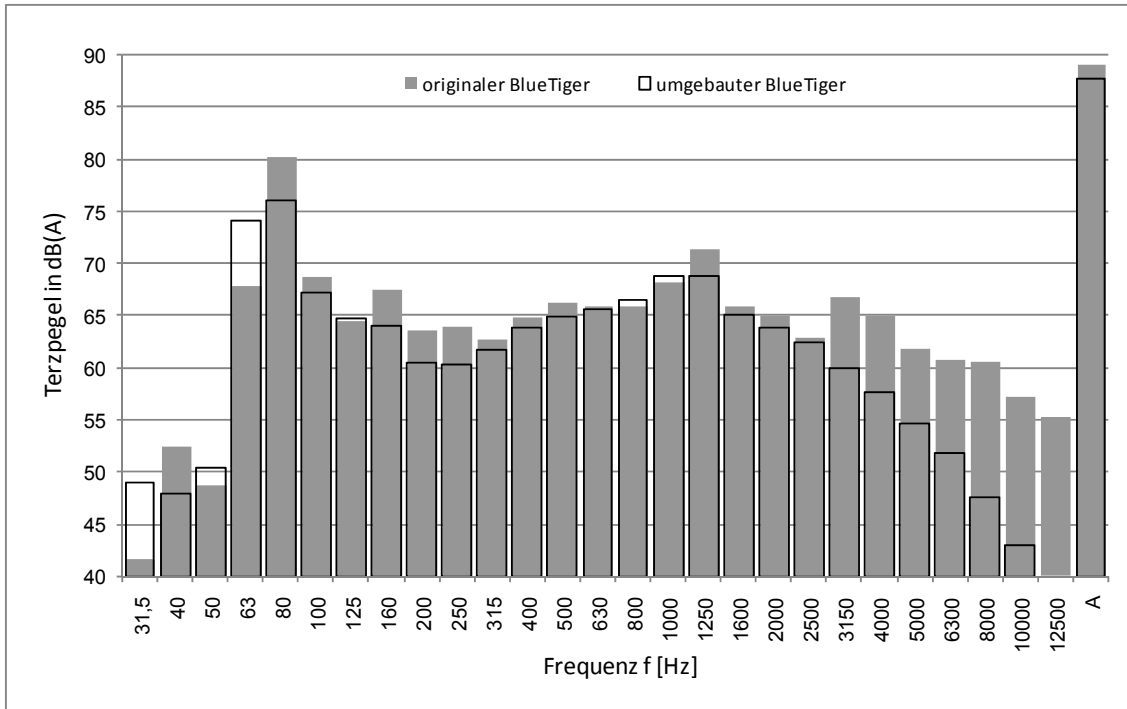


Abbildung 48: Terzpegelspektrum Anfahrt unter Last Originalzustand und nach Umbau
Die Übersicht der TSI-Werte und Minderungswirkung bietet nachfolgende Tabelle 17.

Tabelle 17: Messwerte für Originalzustand und nach dem Umbau

Betrieb	TSI Noise	L _{Aeq}		L _{AFmax}	
		dB(A)			
	Grenzwerte	Ausgangszustand	nach Umrüstung		
Stillstand	75	70	-	69	
Stillstand & Kompressor	75	77		70	
Anfahrt & 780t Last	89		89		88
Vorbeifahrt 30 km/h & Kompressor		85		82	
Vorbeifahrt 80 km/h	85	86	(89)	83	

8 Wirkungsnachweis

Der Wirkungsnachweis dient der Einstufung der Maßnahmen und der Bestimmung der Minderungseffekte.

8.1 Schalldämpfer

Die Maßnahmen wurden durch unterschiedliche Einbautermine im Einzelnen gemessen werden, um das Minderungspotential der Schalldämpfer bzw. der Absorberjalousien zu ermitteln. Die Intensitätspegel in

Abbildung 49 und

Abbildung 50 wurden bei Leerlauf und laufendem Kompressor ermittelt. Der Terzpegelverlauf vom Originalzustand ist bei beiden Darstellungen identisch.

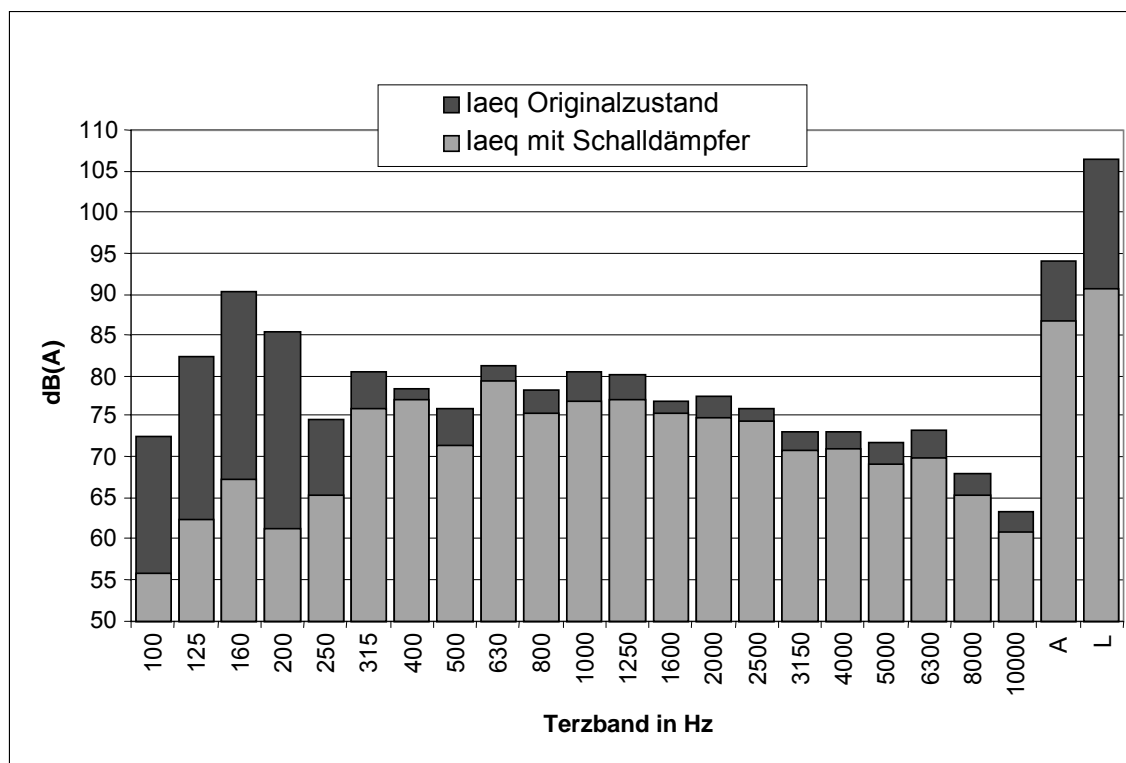


Abbildung 49: Intensitätspegel 1m seitlich Ansaugfilter bei Stillstand mit / ohne Schalldämpfer

Der Schalldämpfer ist vor allem bei tieffrequenten Anteilen hoch wirksam. So kann in den Terzbändern 100-200 Hz einen Minderung um 15-20 dB erzielt werden, darüber hinaus bis 1000 Hz noch um 3-10 dB.

8.2 Absorberjalousien

Die Absorberjalousien zeigen ein umgekehrtes Bild in der Pegelminderung. Für tiefe Frequenzanteile und damit große Wellenlängen ist die Jalousie nicht wirksam, quasi unsichtbar. Erst ab 315 Hz aufwärts ist eine deutliche Terzpegelreduktion zu verzeichnen, welche bei 10-12 dB liegt.

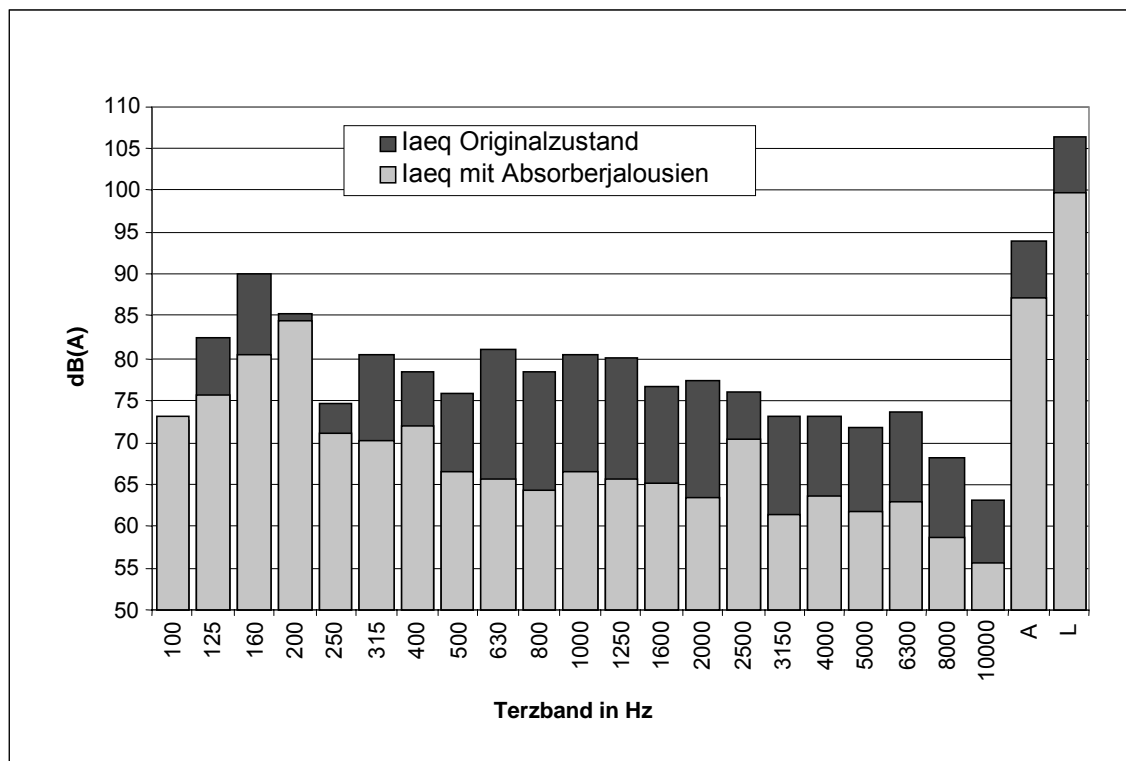


Abbildung 50: Intensitätspegel 1m Abstand bei Stillstand mit/ohne Absorberjalousien

Vergleicht man das Dämpfungsmaß D in Abbildung 21 welches einen Verlauf eines klassischen $\lambda/4$ -Absorbers darstellt, so ist dies plausibel. Bestimmte Anteile der Pegelminderungen unterhalb 500 Hz werden außerdem durch Beugung und Abschirmung erzeugt, also der Form der Jalousien und Flächenanteile gegenüber dem Originalzustand. Hier wird ein Teil der Schallenergie in den Kühlraum mehrfach reflektiert und gelangt somit erst später in gedämpfter Form zum seitlichen Ausgang.

Die Intensitätsmessungen nach dem Umbau auf der fahrenden Lok wurden bei möglichst gleichen Bedingungen den Messungen vom Originalzustand (siehe Abschnitt 3.5) gegenübergestellt.

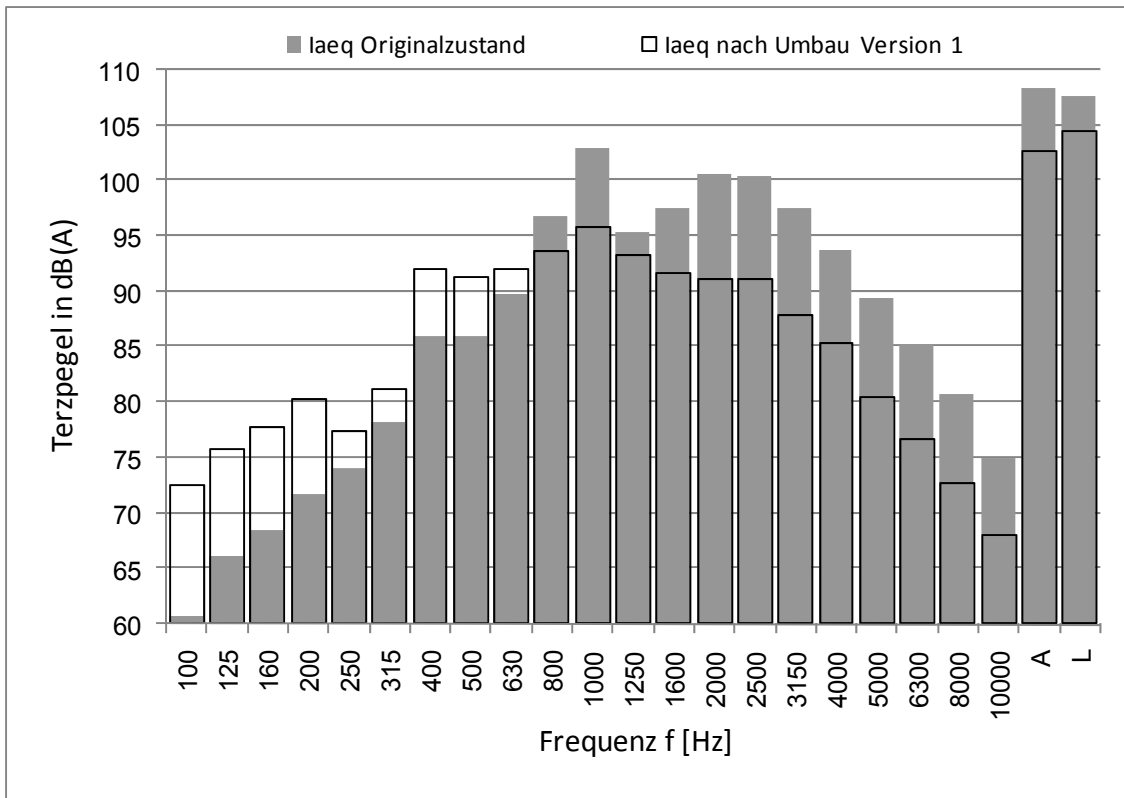


Abbildung 51: Intensitätsmessung auf der Lok an der E-Bremse

Bei der E-Bremse führen die Absorberjalousien zu einer deutlichen Pegelreduktion ab 800 Hz aufwärts. Auch der tonale Anteil bei 1000 Hz konnte abgeschwächt werden. Der Anstieg der Intensitäten zu tiefen Frequenzen ist dadurch erklärbar, dass eine höhere Strömungsgeschwindigkeit unmittelbar vor den Öffnungen durch die Jalousien entsteht. Dies führt im tieffrequenten Bereich bei der Intensitätsmessung zu einer Fehleinschätzung.

Bei den nachfolgenden Messungen der Traktionskühlerlüfter Abbildung 52 und Abbildung 53 ist dies weniger stark ausgeprägt, schlägt sich jedoch im Linearen Gesamtpegel noch immer aus.

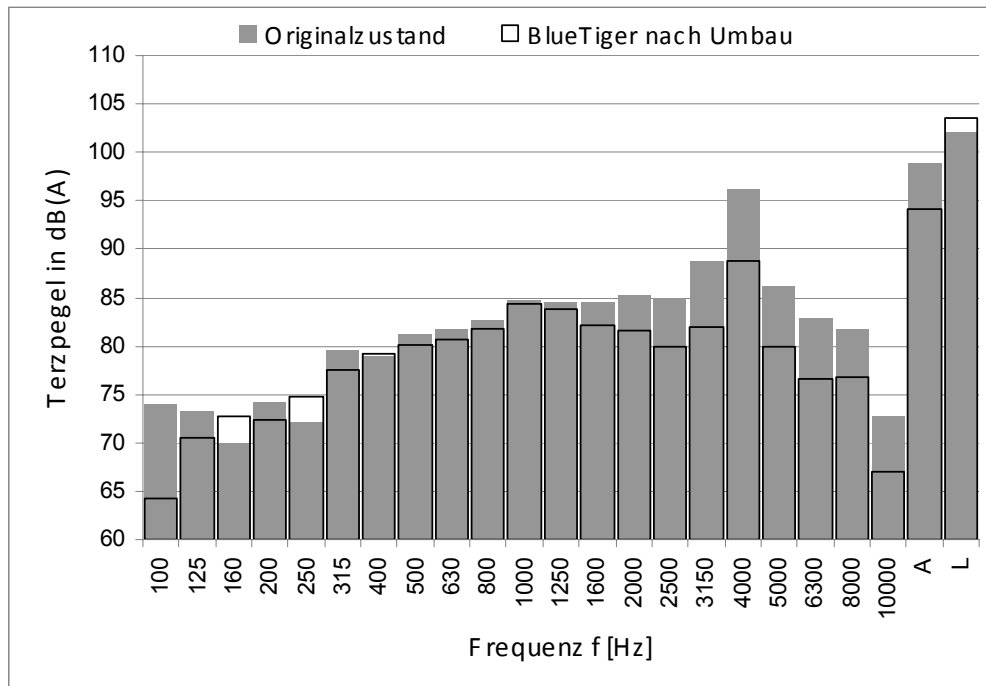


Abbildung 52: Vergleich der Intensitätspegel am vorderen Kühlergitter F2

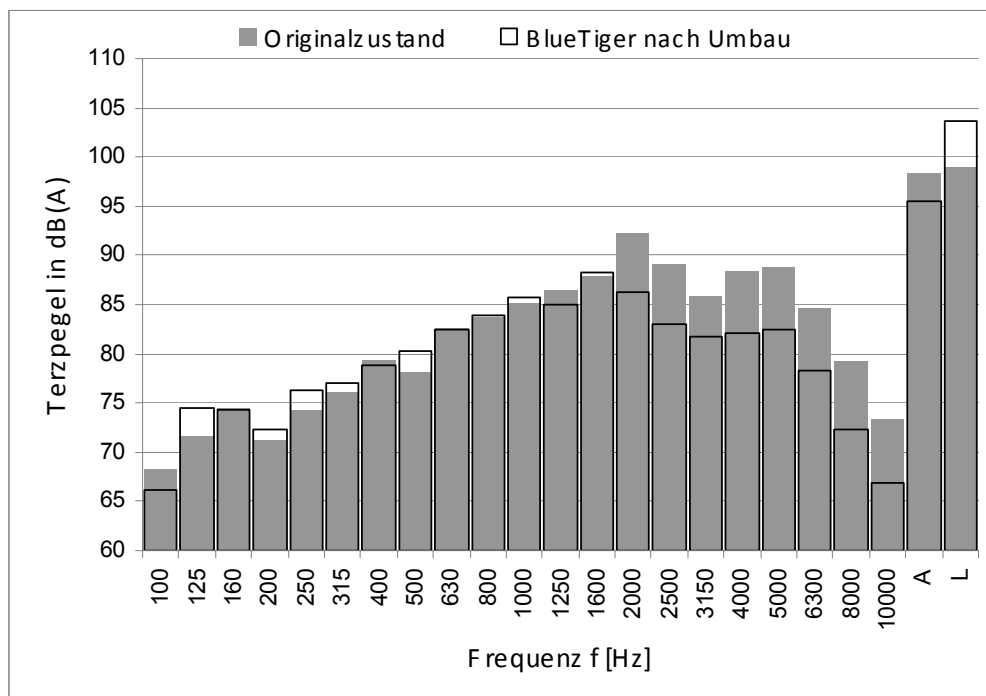


Abbildung 53: Vergleich der Intensitätspegel am hinteren langen Kühlergitter F1

Auch hier ist der Wirkungsbereich der Absorberjalousien klar erkennbar, tonale Komponenten wie in Abbildung 52 werden gedämpft, gehen jedoch dadurch nicht immer im Geräusch unter.

8.3 Gesamtwirkung

Am Messpunkt 6 in 7,5 m Entfernung lässt sich sehr gut der Erfolg im spektralen Bereich der einzelnen Maßnahmen ablesen. So kann von einer breitbandigen Wirkung zwischen 80 Hz und 10 kHz gesprochen werden, mit Pegelreduktionen von 15 dB (160, 200 Hz Terz). Die Gesamtpegelminderung beträgt an diesem Messpunkt 8 dB.

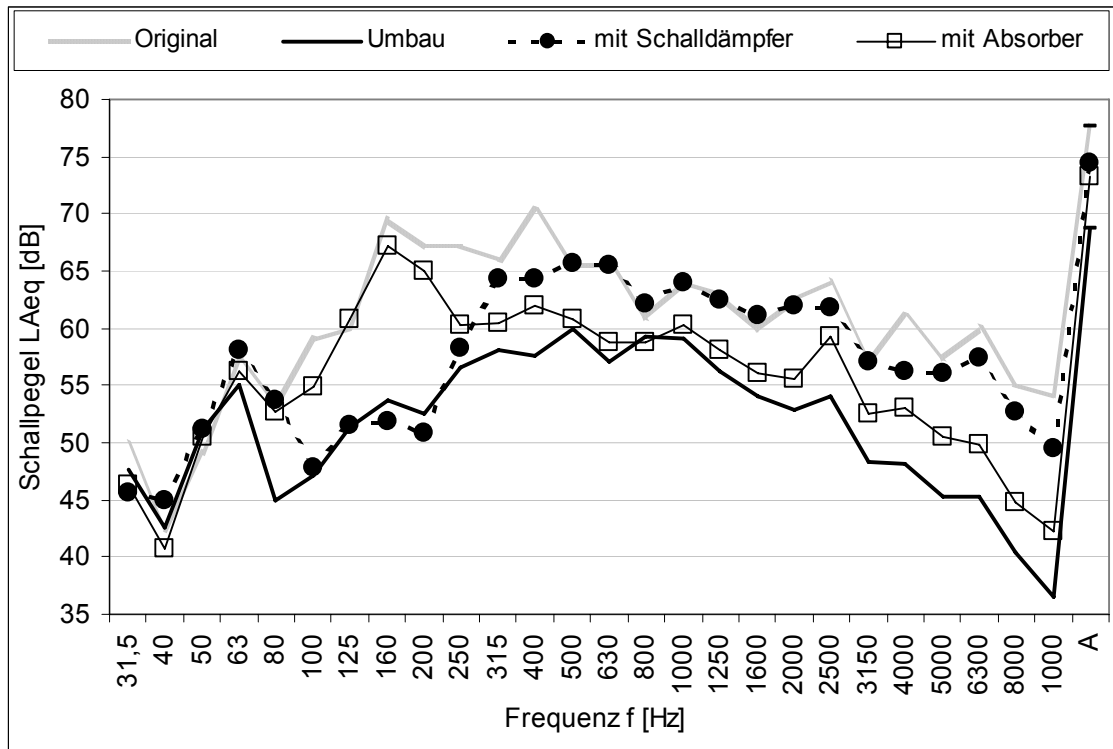


Abbildung 54: Terzspektrum Stillstand MP6 mit laufendem Kompressor in 7,5m Entfernung

Durch die Intensitätsmessungen in

Abbildung 49 und

Abbildung 50 wird die Frequenzcharakteristik der Maßnahmen deutlich und führt auch bei der Schalldruckmessung in Abbildung 54 zu einem ähnlichen Ergebnis. Der Schalldämpfer wirkt im tieffrequenten Bereich (80 – 250 Hz) und die Absorberjalousien im hochfrequenten Bereich oberhalb von 250 Hz.

Bei einem Vergleich des Stillstandgeräusches im Originalzustand ohne Kompressor und nach dem Umbau bei laufendem Kompressor wird der gleiche Summenpegel erreicht.

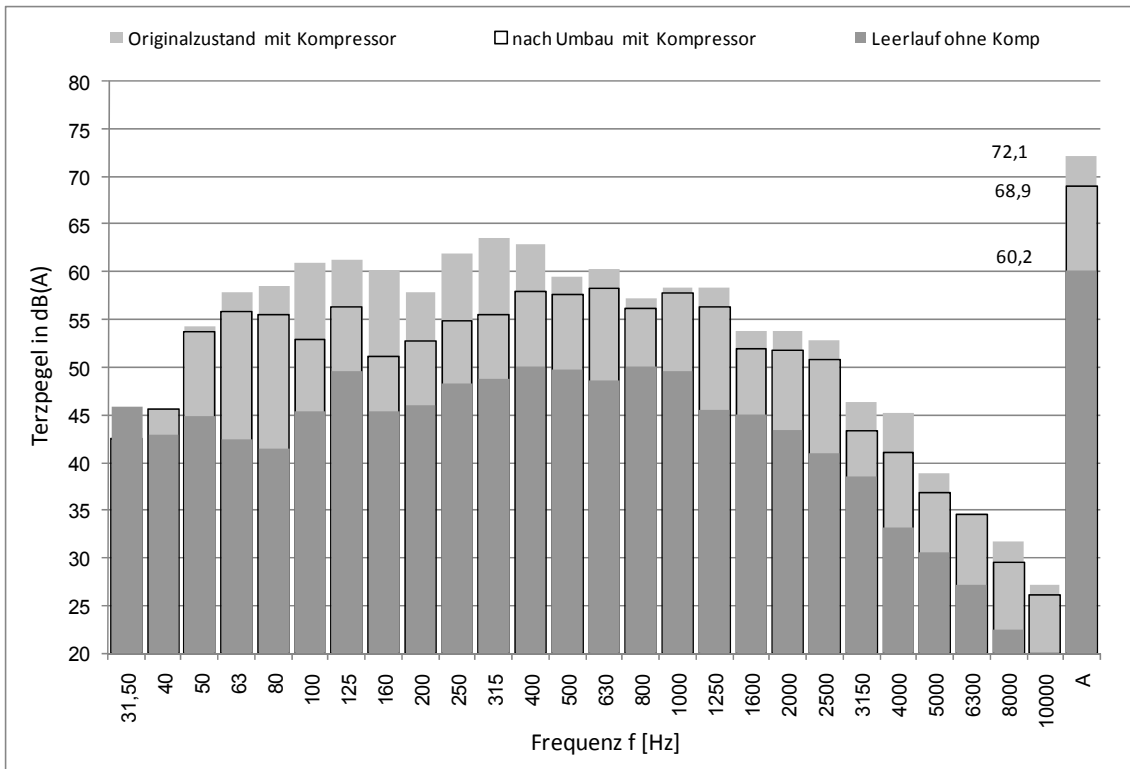


Abbildung 55: Vergleich Stillstandmessung nach Umbau und Original ohne Kompressor

Man kann deutlich erkennen, dass die spektrale Kontur sich durch die breitbandige Wirkung der beiden Maßnahmen ändert. Die Leerlaufgeräusche des Dieselmotors bei 50 –63 Hz bleiben unverändert. Die spektralen Anteile vom Kompressor bei 160 und 250 Hz treten hervor, sowie einige hochfrequente Strömungsgeräusche ab 2000 Hz. Die Pegelspitzen bei 400 und 500 Hz werden jedoch nach Umbau reduziert, so dass durch die A-Bewertung in der Terzpegelsumme nahezu der gleiche Pegelwert entsteht.

Bei einer langsamen Vorbeifahrt ohne Last und laufendem Kompressor fällt die Minderung geringer aus als im Stillstand, es ergibt sich ein Pegelunterschied vorher zu nachher von 3 dB.

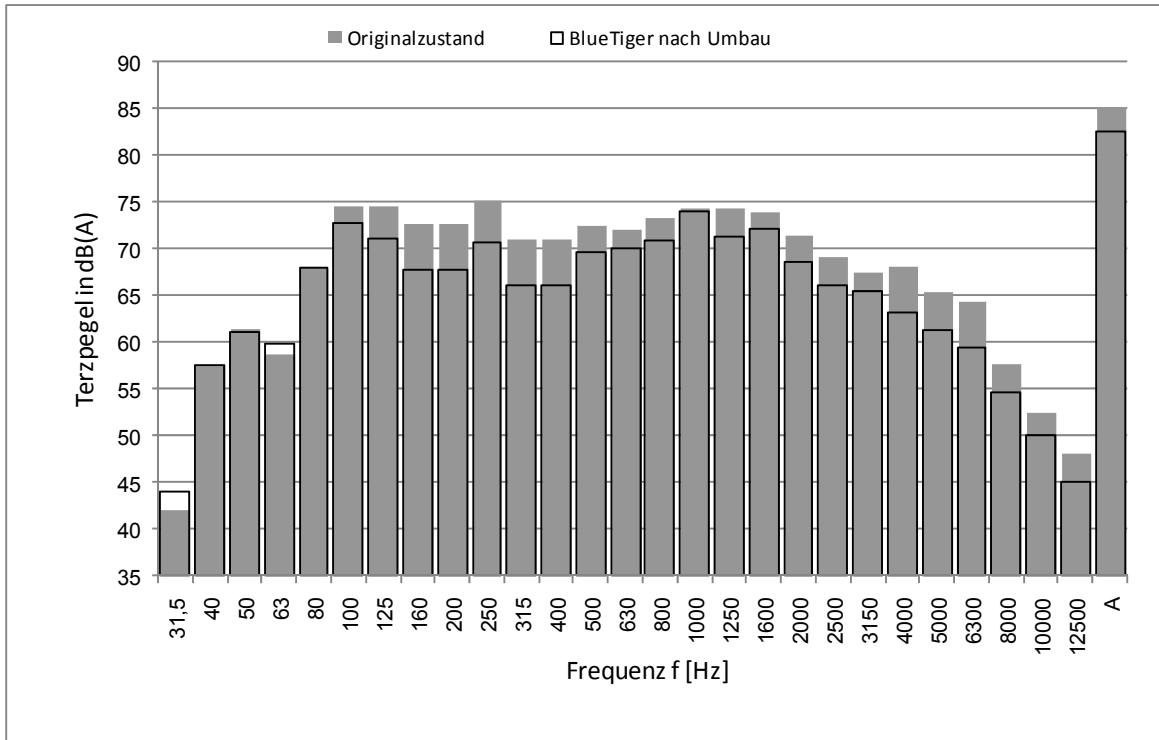


Abbildung 56: Vorbeifahrt mit 30 km/h und laufendem Kompressor

Bei der Vorbeifahrt unter Last liegen die Terzpegel sehr dicht zusammen. Bei voller Motordrehzahl von 1050 min^{-1} fallen die Anteile bei 100 und 125 Hz recht hoch aus. Wenn hier ein Effekt sichtbar ist, dann nur der Minderungseffekt bei den Traktionskühlerlüftern und Hauptlüfter dem Einflussbereich der Absorberjalousien.

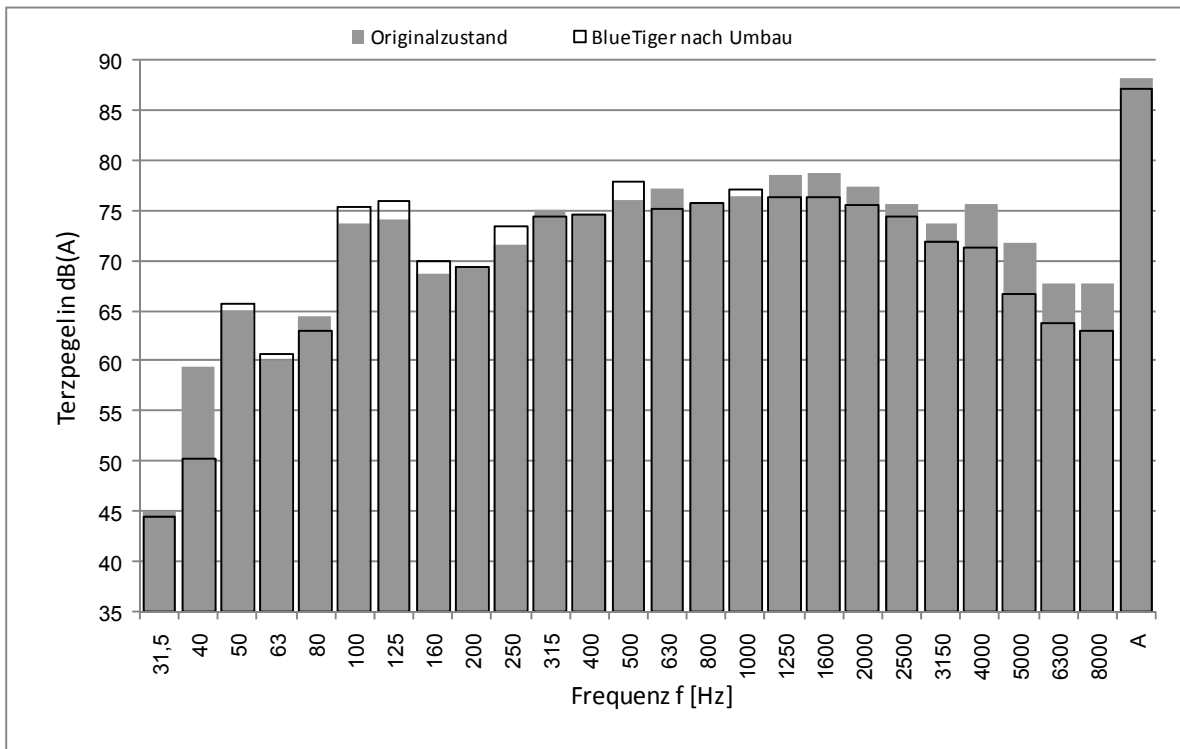


Abbildung 57: Vorbeifahrt unter Last vor/nach dem Umbau bei $v=40 \text{ km/h}$

An der 2000 Hz Terz ist somit eine geringfügige Pegelabnahme beim umgebauten BlueTiger zu verzeichnen. Bei aktivem Kompressor würde sich hier wahrscheinlich ein größerer Unterschied abzeichnen, wie aus der Stillstandsmessung zu entnehmen ist.

8.4 Innenschall Führerhaus

Der Innenschall im Führerhaus 1 nahe dem Kompressor ist deutlich zurückgegangen, was uns auch von den Lokführern bestätigt wurde. Somit konnten auch hier im tieffrequenten Bereich ab 100 Hz Pegelreduktionen um 7-8 dB realisiert werden.

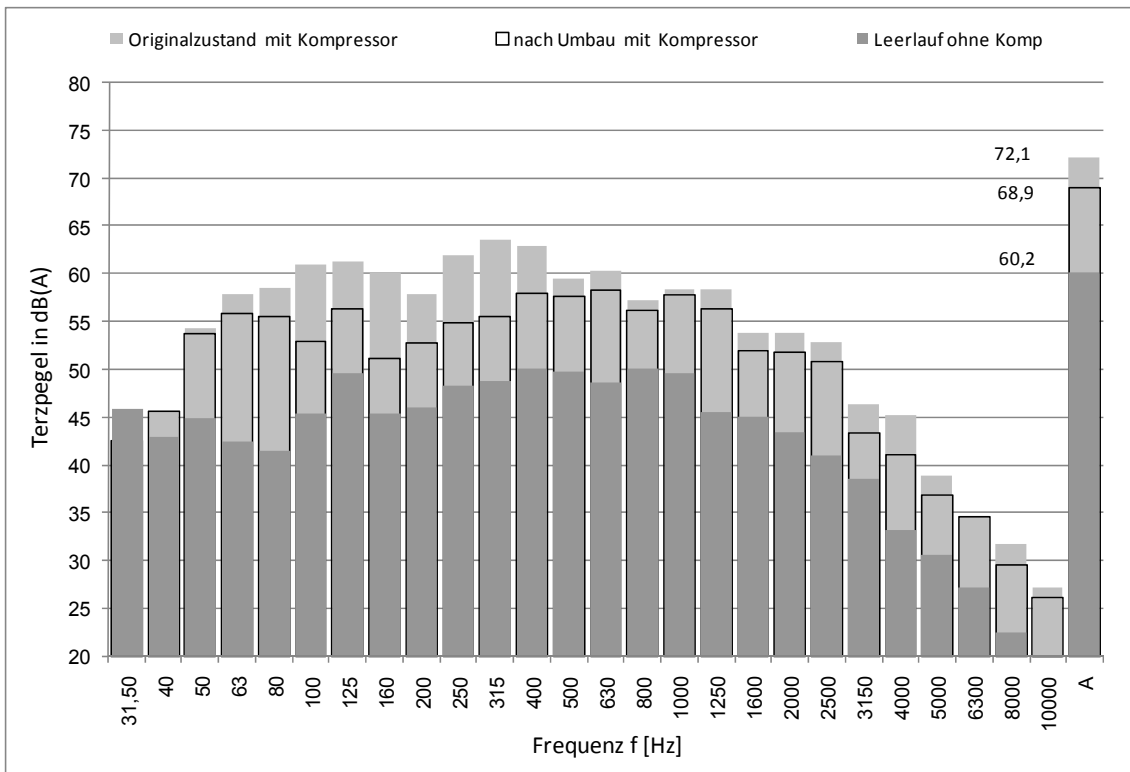


Abbildung 58: Innenschallpegel Führerhaus 1 bei 30 km/h vor/nach Umbau

Insgesamt wurde der Innenschallpegel um 3 dB reduziert. Die hochfrequenten Einflüsse der Maßnahmen auf den Innenschall fallen geringer aus, da hier von Hause aus eine hohe Schalldämmung vorhanden ist.

Es wurde nur der häufigste Fall langsame Fahrt mit hohem Bremsaufkommen gemessen, bei Stillstand ist der Lokführer i.d.R. außerhalb des Fahrzeugs und bei Streckenfahrt mit mittlerer und hoher Geschwindigkeit wird der Kompressor sehr selten und nur kurzzeitig aktiv. Erst nach einer Voll- bzw. Betriebsbremsung des Güterzuges auf der Strecke wird während der Anfahrt oder bei langsamer Fahrt der Hauptluftbehälter wieder gefüllt.

Im Führerhaus 2 auf der gegenüberliegenden Stirnseite ist der Kompressor aufgrund der Entfernung nicht mehr wahrnehmbar.

8.5 Luftverbrauch und Kühlleistung

Es liegen uns für die benötigten Luftmengen lediglich Angaben über die maximale Förderung der Ventilatoren vor. Im Betrieb sind diese Regelungsstufen im Ausgangszustand mit Gitterblechen nur unter entsprechender Last und bei extrem warmer Witterung zu erreichen. Bei den gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten vor dem Umbau sieht man die kritischen Bereiche nach einer Strömungsflächenreduzierung (Absorberjalousien > 50 %). Bei Halbierung der Fläche verdoppeln sich die Strömungsgeschwindigkeiten an den Türen. Kritisch wären hier Kühlraum und E-Bremse.

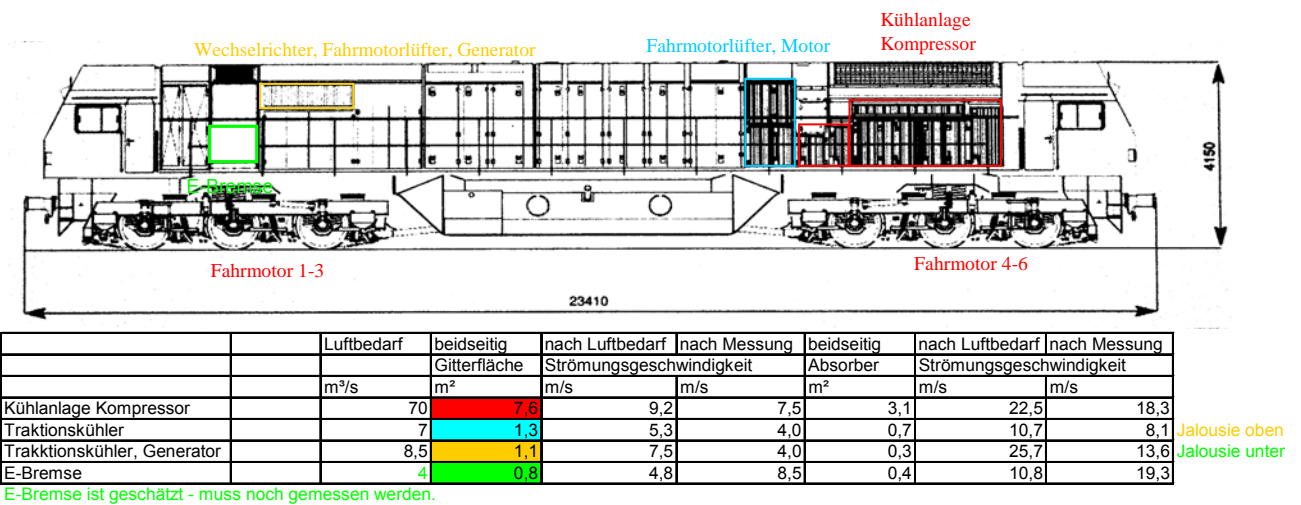


Abbildung 59: BlueTiger: Luftströmungsgeschwindigkeiten in m/s gemessen auf der Rübelandbahn

IAC verfolgt demnach für die beiden übrigen Loks (V330.2 und V330.3) die strömungsoptimierte Bauweise der E-Bremse und des langgezogenen Lüftungsgitters. Die übrigen Elemente werden unverändert beibehalten.

9 Zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse

Mit den Umbaumaßnahmen an der ersten Lok konnte gezeigt werden, dass bereits wirkungsvolle Maßnahmen zur Lärmreduktion an der Quelle existieren, welche nur noch für den Bahnbetrieb ertüchtigt werden müssen und dem harten Einsatz auf einer Diesellok standhalten. So sind mit geringen finanziellen Aufwand auch für die Fahrzeuge aus dem Bestand deutliche Minderungseffekte erzielbar, welche quasi ab heute angewandt werden können und dem Betreiber ein modernes und leises Fahrzeug auf dem Stand der TSI-Noise 2006 für die nächsten Jahrzehnte liefert.

- Die TSI Noise Lärmgrenzwerte werden nach Umbau der BlueTiger Lok für alle dort vorgeschriebenen Betriebszustände eingehalten! (Tabelle 17 Seite 50)
- Durch die neuen Absorberverkleidungen treten keine Einschränkungen im Betrieb, z.B. durch verminderten Luftwechsel eine geringere Kühlwirkung auf. (Abschnitt 8.5)
- Akustische Maßnahmen sind hörbar und sichtbar, sie wirken somit in doppelter Hinsicht als Prototyp mit hohem Modellcharakter.
- Das Kompressorgeräusch ist im Betrieb der Lok im Vergleich zu vorher nicht mehr wahrnehmbar. Es wird im Gegensatz zu vorher vom Motorgeräusch überdeckt (Abbildung 54 Stillstandsgeräusch).
- Der Innengeräuschpegel im Führerhaus am Kompressor wurde insgesamt um 3 dB reduziert, tieffrequent um bis zu 7 dB (Abbildung 58).
- Die hochfrequenten Anteile der Lüftergeräusche und Nebenaggregate, Pfeifen und Heulen wurden durch die Absorberjalousien wirksam reduziert.

Im **Stillstand** wurden durch die Maßnahmen bei laufendem Kompressor Pegelminderungen von **7-8 dB** realisiert, im Mittel fällt die Minderung zur Seite um **5 dB** aus. Der TSI Grenzwert von 75 dB(A) wird mit laufendem Kompressor somit um **5 dB** unterschritten (Abbildung 46), bei Stillstand ohne Kompressor sogar **6 dB**.

Bei langsamer **Vorbeifahrt** mit **30 km/h** und laufendem Kompressor verringert sich der Emissionspegel von 85 dB(A) auf 82 dB(A) um **3 dB**.

Für die **Vorbeifahrt** bei **80 km/h** wird der TSI Grenzwert von 85 dB(A) auf dem Messgleis in Velten bei ungünstiger Schienenrauheit um **2 dB** unterschritten. Auf einem Referenzgleis ist ein Vorbeifahrpegel von 81 dB(A) realistisch. Die Pegelminderung fällt jedoch bei höheren Geschwindigkeiten geringer aus, da die Maßnahmen keinen Einfluss auf das Antriebs- und Rollgeräusch haben. Wird ein Ausgangswert von 86 dB(A) für den Originalzustand herangezogen beträgt die Pegelminderung demnach mindestens **3 dB**, bzw. **5 dB** (TSI Referenzgleis).

Für Geschwindigkeiten 40 und 60 km/h wurden auf dem Messgleis in Velten ähnliche Vorbeifahrpegel wie bei 80 km/h gemessen, mit jeweils 1-2 dB geringeren L_{Aeq} .

Der L_{AFmax} der **Anfahrt unter Last** lag von Beginn an unter dem TSI Wert und wird im Mittel um **1 dB reduziert**.

Durch die umfangreiche Untersuchung konnte eine konstruktive Lösung gefunden werden, die einen „baukastenartigen“ Umbau weiterer Lokomotiven dieser Bauart erlaubt. Die gesamten Aufwendungen gingen dabei mit über 313.000 € über die bewilligte Gesamt-Projektsumme hinaus, indem u. A. die Ergebnisse auf zahlreichen Fachtagungen und Kongressen zu den Themen Akustik oder auch Umwelttechnik präsentiert worden sind. Hier wurden verschiedene Aspekte diskutiert, die schließlich in einer effizienz- und kosten-optimierten Gesamtlösung resultierten. So konnten die Umrüst-Kosten (Materialkosten und Werkstatteinbau) auf nur 46.410 EUR pro Lok (<2 % vom Neuwert) minimiert werden.

Tabelle 18: Kosten für Gesamtaufwand

	Kosten in €brutto
Anmietung Ersatzlokomotive	72.700€
Anmietung Teststrecke	8.900€
Wissenschaftliche Begleitung	58.800€
Materialkosten/ Fremdleistung Umbau	132.400€
Eigenleistung Werkstadt HVLE	40.000€
Gesamtaufwand	312.800€

Es wurden bisher keine Einschränkungen im Betrieb oder der Kühlwirkung festgestellt. Drei Loks wurden identisch ausgestattet, um die Langzeiteffekte zu beobachten. Für andere Loks dieses Typs können die Maßnahmen prinzipiell angewendet werden, wenn Lichtraumprofil und Konstruktion dies ermöglichen.

10 Ausblick

Die TSI Noise als geltender europäischer Standard von 2006 weist mittlerweile zu milde Grenzwerte auf und umfasst längst nicht alle relevanten Betriebszustände. Eine deutliche Lärminderung im Schienenverkehr kann mittelfristig nur dann erreicht werden, wenn parallel zur Erneuerung der Fahrzeugflotte ältere lärmintensive Baureihen durch eine Reihe solcher Maßnahmen umgerüstet werden.

Das Interesse bei den übrigen Besitzern der BlueTiger Lok ist durch den akustischen wie optischen Effekt geweckt und könnte zu einem kompletten Umbau dieser Serie führen.

Berlin, den 15.05.2008

Prof. Dr.-Ing. Markus Hecht

Christian Czolbe

Literaturverzeichnis

- [1] Cremer, L.; Heckl, M.: Körperschall: Springer Verlag, 1982
- [2] Datenblatt BlueTiger Diesellok Bombardier Transportations
- [3] DIN ISO 3095 „Messung der Geräuschemission von spurgebundenen Fahrzeugen“, 2005
- [4] Hecht M., Ben Othman Y. Bericht 05/05 Vergleichsmessungen
Rübelandbahn 03.2005
- [5] Hecht M., Thron T. Bericht 15/05 Messungen am BlueTiger der OHE
07.2005
- [6] Hecht M., Thron T. Bericht 17/05 Abschirmmaßnahme BlueTiger 08.2005
- [7] Müller BBM Prüfbericht Nr. 50 698/1 Dieselelektrische Lokomotive BR 250 DE-AC
33 C (Blue Tiger), 06.2003
- [8] Müller, G.; Möser, M.: Taschenbuch der Technischen Akustik: Springer Berlin, 2003
- [9] TSI Noise 2006/66/EC, www.era.europa.eu
- [10] TNO applied acoustics www.tno.nl