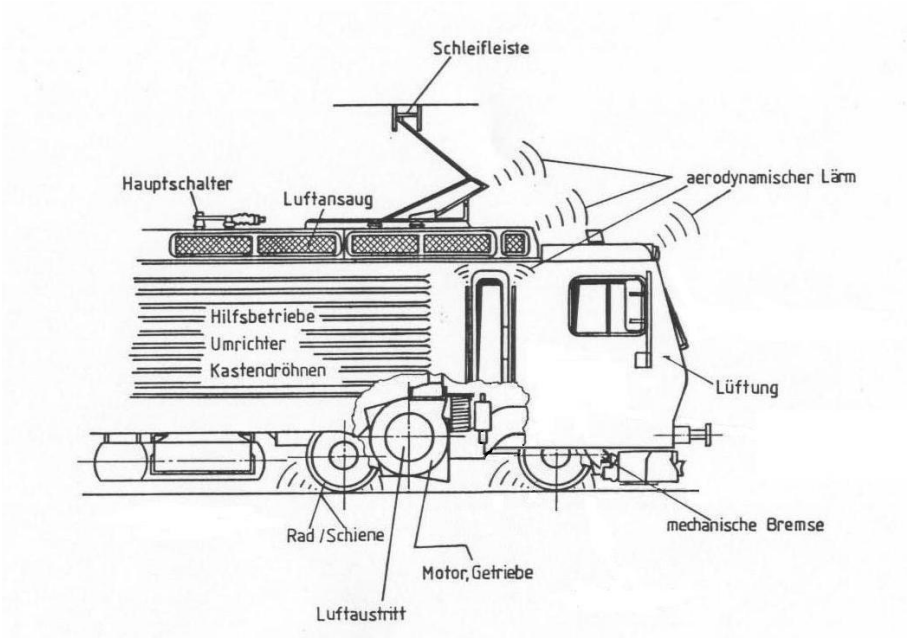
PROSE
Measuring & Testing

Bericht 2-167

Bundesamt für Umwelt (BAFU)



Studie zur Thematik „Lärmminderung an Triebfahrzeugen“

– Abschlussbericht –

PROSE AG
Zürcherstrasse 41
CH-8400 Winterthur
Schweiz
Tel: +41 52 262 74 00
Fax: +41 52 262 74 01
email: info@prose.ch

	Name	Datum	Unterschrift
Erstellt	J. Raubold	06.09.2006	
Geprüft	S. Bühler	06.09.2006	
Freigegeben	J. Raubold	06.09.2006	

Verteiler

Firma	Abteilung	Name	Kopien	Bemerkungen
BAFU		F. Fischer J.-D. Liengme	2	zusätzlich in elektronischer Form (pdf)
PROSE AG	M&T	J. Raubold	1	
PROSE AG	M&T	Archiv	1	

Dieses Dokument gibt Kenntnis von Gegenständen, an denen die PROSE AG, 8400 Winterthur (Schweiz), Eigentumsrechte hat. Weder Erhalt noch Besitz dieses Dokuments verleihen oder übertragen das Recht, seinen Inhalt als Ganzes, einen Teil davon, eine darin enthaltene Information, oder irgendwelche Gegenstände oder Vorrichtungen zu kopieren oder bekannt zu machen oder irgendwelche Methoden oder Prozesse anzuwenden, ausser nach schriftlicher Genehmigung durch die PROSE AG, 8400 Winterthur (Schweiz) oder schriftlicher Vereinbarung mit dieser Firma.

Revisionsindex

	Erstellt, Geprüft, Freigegeben	Datum
Bericht 2-167	J. Raubold, S. Bühler, J. Raubold	06.09.2006

Änderungen

Revision	Seite	Abschnitt	Beschreibung

Inhaltsverzeichnis

1 Zusammenfassung 6

2 Einleitung 7

3 Lärmquellen bei Triebfahrzeugen 8

3.1 Allgemeine Lärmquellen bei Triebfahrzeugen 9
3.1.1 Rad-Schiene-Kontakt 10
3.1.2 Pantograph-Kontakt 12
3.1.3 Fahrmotor und Getriebe 12
3.1.4 Aerodynamische Strömungen 14
3.1.5 Hilfsaggregate 14
3.1.6 Kastendröhnen 18
3.1.7 Mechanische Bremse 18

3.2 Zusätzliche Lärmquellen bei Verbrennungsmotorlokomotiven 18
3.2.1 Verbrennungsmotoranlage 19
3.2.2 Generator (bei dieselelektrischem Antrieb) 19
3.2.3 Hydraulisches Getriebe (bei dieselhydraulischem Antrieb) 20

3.3 Zusätzliche Lärmquellen bei elektrischen Triebwagen und Triebzüge 20
3.3.1 Öffnen und Schliessen der Türen 22
3.3.2 Akustischer Warnton 22
3.3.3 Klimaanlage, Heizung und Lüftung für Fahrgastraum 23

3.4 Zusammenfassung möglicher Lärmquellen 23

4 Prinzipielle Möglichkeiten der Lärmreduzierung 25

4.1 Primäre Lärmminderung 25

4.2 Sekundäre Lärmminderung 25
4.2.1 Luftschalldämmung 25
4.2.2 Luftschallabsorption 26
4.2.3 Körperschalldämmung 27
4.2.4 Entdröhnung 28

5 Untersuchungsrelevante Betriebszustände 29

5.1 Untersuchungsrelevante Betriebszustände nach EN ISO 3095 [5] 29
5.1.1 Messung am stehenden Fahrzeug 29
5.1.2 Messung am Fahrzeug mit konstanter Fahrgeschwindigkeit 30
5.1.3 Messung am anfahrenden Fahrzeug 30
5.1.4 Messung am bremsenden Fahrzeug 31

5.2 Untersuchungsrelevante Betriebszustände nach TSI CR NOISE [6] 32
5.2.1 Messung am stehenden Fahrzeug 32
5.2.2 Messung am anfahrenden Fahrzeug 33
5.2.3 Messung am mit konstanter Fahrgeschwindigkeit vorbeifahrenden Fahrzeug 33

5.3 Diskussion der untersuchungsrelevanten Betriebszustände 34

6 Elektrische Triebfahrzeuge in der Schweiz und deren dominanten Lärmquellen 36

6.1 Streckenlokomotiven 36

6.2 Elektrische Triebwagen und Triebzüge 43

7 Konkrete Massnahmen und Kosten-Nutzen-Abschätzung 49

7.1 Mögliche Massnahmen zur Lärmreduzierung an Triebfahrzeugen 49
7.1.1 Rad-Schiene-Kontakt (Rollgeräusch) 50
7.1.2 Ventilator 53
7.1.3 Fahrmotor und Getriebe 54
7.1.4 Aerodynamische Strömungen 55
7.1.5 Stromrichter 56
7.1.6 Kompressor 56
7.1.7 Dieselmotoranlage 57
7.1.8 Klimagerät 58

7.2 Kosten-Nutzen-Abschätzung für die betrachteten Fahrzeuge 59
7.2.1 Streckenlokomotiven 59
7.2.2 Elektrische Triebwagen und Triebzüge 63

8 Empfehlung für weiteres Vorgehen 67

9 Literatur 68

1 Zusammenfassung

Da die Lärmsanierung der Reisezugwagen auf gutem Wege ist und auch die praktische Umsetzung bei den Güterwagen begonnen hat, stellt sich die Frage, welche Lärmquellen bei Streckenlokomotiven und bei elektrischen Triebwagen und Triebzügen dominant sind und welche Massnahmen zur Lärmsanierung möglich sind.

In dieser Studie werden zuerst typische dominante Lärmquellen bei Triebfahrzeugen aufgezählt und erläutert. Anschliessend werden prinzipielle Möglichkeiten der primären und sekundären Lärmreduzierung im Luft- und Körperschallbereich beschrieben.

Zur Beurteilung von Lärmminderungspotentialen werden die für diese Studie relevanten Streckenlokomotiven und elektrischen Triebwagen und Triebzüge zusammengestellt, die in der Schweiz in ausreichend grosser Stückzahl vorhanden sind und weiträumig eingesetzt werden. Für die typischen Betriebszustände (Stillstand, Anfahrt, Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit) werden für diese Fahrzeugtypen die dominanten Lärmquellen identifiziert und anschliessend konstruktive Massnahmen diskutiert. Neben den konstruktiven Massnahmen kann der Lärm auch durch betriebliche Massnahmen, wie komplettes Abrüsten von Fahrzeugen im Abstellbereich oder geschicktes Platzieren der Züge im Abstellbereich, reduziert werden, dies ist aber nicht Bestandteil dieser Studie.

Wie die anschliessende Diskussion der Lärmminderungsmassnahmen für die einzelnen Fahrzeugtypen zeigt, gibt es bei den Einheitslokomotiven, der S-Bahn Zürich (Re 450) und den NPZs realisierbare Möglichkeiten, das verhältnismässig laute Lärmverhalten mit konstruktiven Änderungen zu reduzieren.

Durch diese Studie sollen Kenntnisse und Zusammenhänge vermittelt werden, die es dem BAFU erlaubt, bei Diskussionen mit den Betreibern oder anderen Amtsstellen mit dem möglichen Nachdruck auftreten zu können und in einer grundsätzlichen Form Aussagen, Vorschläge und Argumente beurteilen zu können.

2 Einleitung

Die Lärmsanierung der Reisezugwagen ist auf gutem Wege und auch das Vorgehen bei den Güterwagen ist klar konzipiert und die praktische Umsetzung hat begonnen. Die Pflege des Oberbaus (primär Laufflächenrauheit, aber auch Querprofile) ist angestossen, bis zu einer netzweiten Umsetzung wird es jedoch noch viel Überzeugungsarbeit und auch etwas Entwicklungsarbeit brauchen. Neu beschafftes Rollmaterial ist in der Regel gleich laut oder leiser als saniertes Rollmaterial.

Durch die logarithmische Charakteristik des Lärmempfindens ist vorgegeben, dass eine Sanierung nur dann Nutzen bringt, wenn die jeweils dominante Quelle behandelt wird. Sobald die oben genannten Massnahmen ihre Wirkung zu entfalten beginnen, ist davon auszugehen, dass der Lärm von Triebfahrzeugen die Geräuschemission von Schienenfahrzeugen dominieren wird.
Dies wird insbesondere der Fall bei lokbespannten Zügen mit älteren Triebfahrzeugen und sanierten oder neuen Wagen sein.

Prinzipiell kann Lärm immer dann entstehen, wenn Energie transportiert oder umgewandelt wird.
Bei Fahrzeugen wird Energie transportiert, indem entweder kompressible Medien, wie Luft, oder inkompressible Medien, wie Öl, in einem Kreislauf zirkulieren. Auch indirekt wird Energie durch das Strömen von magnetischen Kräften transportiert. Bei diesen Energieflüssen wird Lärm durch nichtlaminare Strömungen oder durch einen unstetigen Fluss verursacht.
Andererseits entsteht Lärm, wenn Energie umgewandelt wird. Bei Fahrzeugen geschieht das, wenn mechanische, elektrische oder magnetische Kräfte, beispielsweise in Motoren oder Umrichtern, gewandelt werden.

In dieser Studie werden die dominanten Aussenlärmquellen von Triebfahrzeugen in den typischen Betriebszuständen (Stillstand, Anfahrt, Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit) identifiziert und konstruktive Gegenmassnahmen bezüglich Machbarkeit, Kosten und Nutzen diskutiert. Dadurch sollen Kenntnisse und Zusammenhänge vermittelt werden, die es dem BAFU erlaubt, bei Diskussionen mit den Betreibern oder anderen Amtsstellen mit dem möglichen Nachdruck auftreten zu können und in einer grundsätzlichen Form Aussagen, Vorschläge und Argumente beurteilen zu können.

3 Lärmquellen bei Triebfahrzeugen

Lärm kann bei einem angetriebenen Schienenfahrzeug im Stillstand besonders durch seine Hilfsaggregate (Lüfter, Kompressor, Klimaanlage etc.) entstehen. Sobald das Fahrzeug in Bewegung ist, werden Geräusche aus den folgenden drei Bereichen zur dominierenden Lärmquelle:

- Antriebsaggregate (Fahrmotor, Getriebe etc.),
- Rad-Schiene-Kontakt (Rollgeräusch) und
- aerodynamische Strömungen (Strömungs- und Wirbelablösung an einzelnen Bauteilen).

In **Abbildung 3-1** ist die Zusammensetzung des bei konstanter Vorbeifahrt entstehenden Schalldruckpegels aus diesen drei Hauptlärmanteilen abhängig von der Geschwindigkeit exemplarisch dargestellt. Bis zu einer Geschwindigkeit von ca. 50 km/h sind entweder geschwindigkeits-unabhängige Geräusche (z.B. von Hilfsaggregaten) oder das Antriebsgeräusch meist dominierend (**blau** in der Abbildung), bei mittleren Geschwindigkeiten das Rollgeräusch des Rad-Schiene-Kontakts (**rot** in der Abbildung) und bei hohen Geschwindigkeiten ab ca. 200 km/h dominieren die aerodynamischen Geräusche (**grün** in der Abbildung) [1].

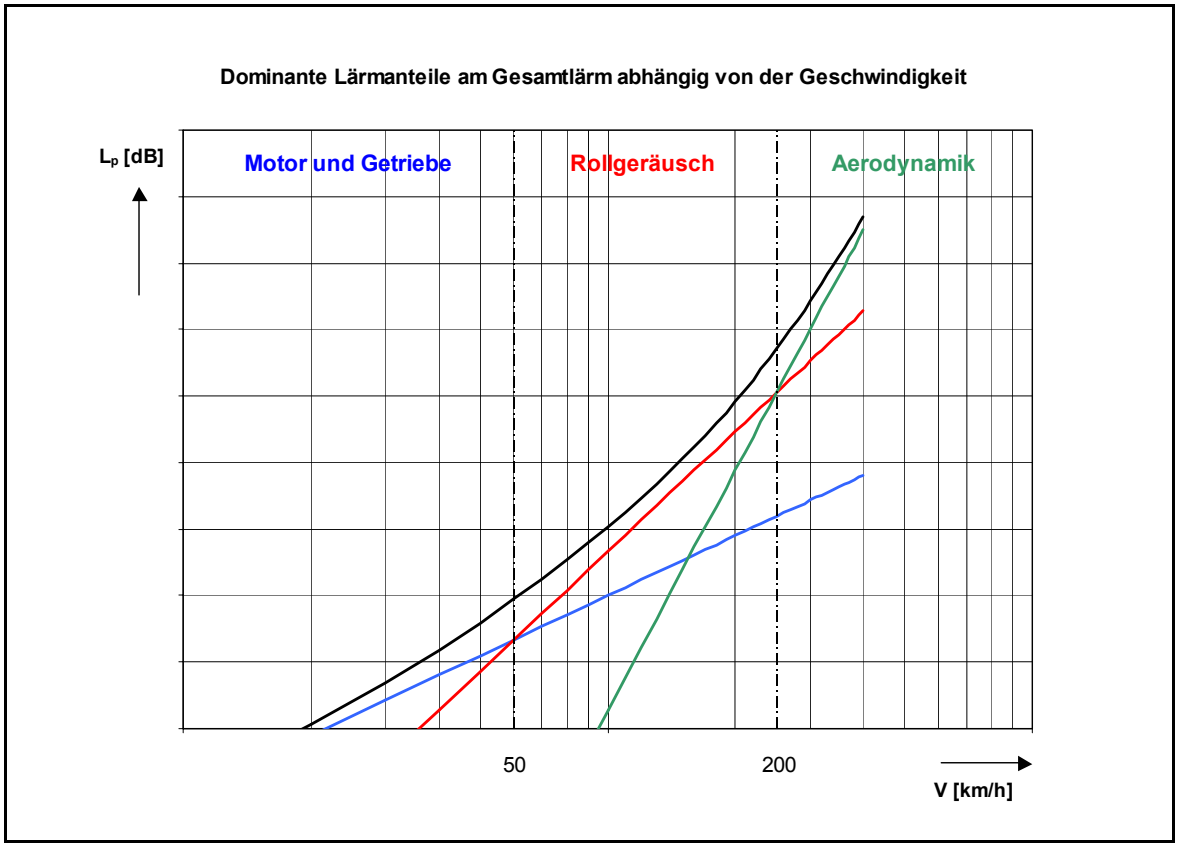


Abbildung 3-1: dominante Lärmquellen während der Fahrt ohne Einzelereignisse (wie Bremsen oder starkes Beschleunigen) [1]

Nachfolgend werden zusätzlich zu den drei Hauptlärmquellen (Fahrmotor und Getriebe, Rad-Schiene-Kontakt und aerodynamische Geräusche) weitere mögliche Lärmquellen bei Triebfahrzeugen aufgezählt. Dies soll einen Überblick über die Vielfältigkeit von Lärmquellen bei angetriebenen Schienenfahrzeugen geben. Abhängig von der Bauart der Fahrzeuge treten diese Lärmquellen stärker oder schwächer in Erscheinung. Aufgezählt werden die Lärmquellen geordnet nach Fahrzeugkategorien. Zuerst werden die hauptsächlichen Lärmquellen bei elektrischen Triebzügen erläutert. Anschliessend werden die Lärmquellen erörtert, die bei Streckenlokomotiven mit Verbrennungskraftmotor oder bei elektrischen Triebzügen oder Triebwagen zusätzlich hinzukommen. In **Abschnitt 6** wird dann auf die dominanten Lärmquellen bei den in der Schweiz am meisten im Einsatz befindlichen Lokomotiven eingegangen.
Warneinrichtungen, wie Tyfon oder Pfeife, werden nicht als zu vermindernde Lärmquelle diskutiert, da es deren Aufgabe ist, Lärm auf Befehl zu machen, um eine Warnung auszugeben.

3.1 Allgemeine Lärmquellen bei Triebfahrzeugen

Mögliche Lärmquellen an einer elektrischen Streckenlokomotive sind in **Abbildung 3-2** schematisch dargestellt. Nachfolgend werden sie näher erläutert.

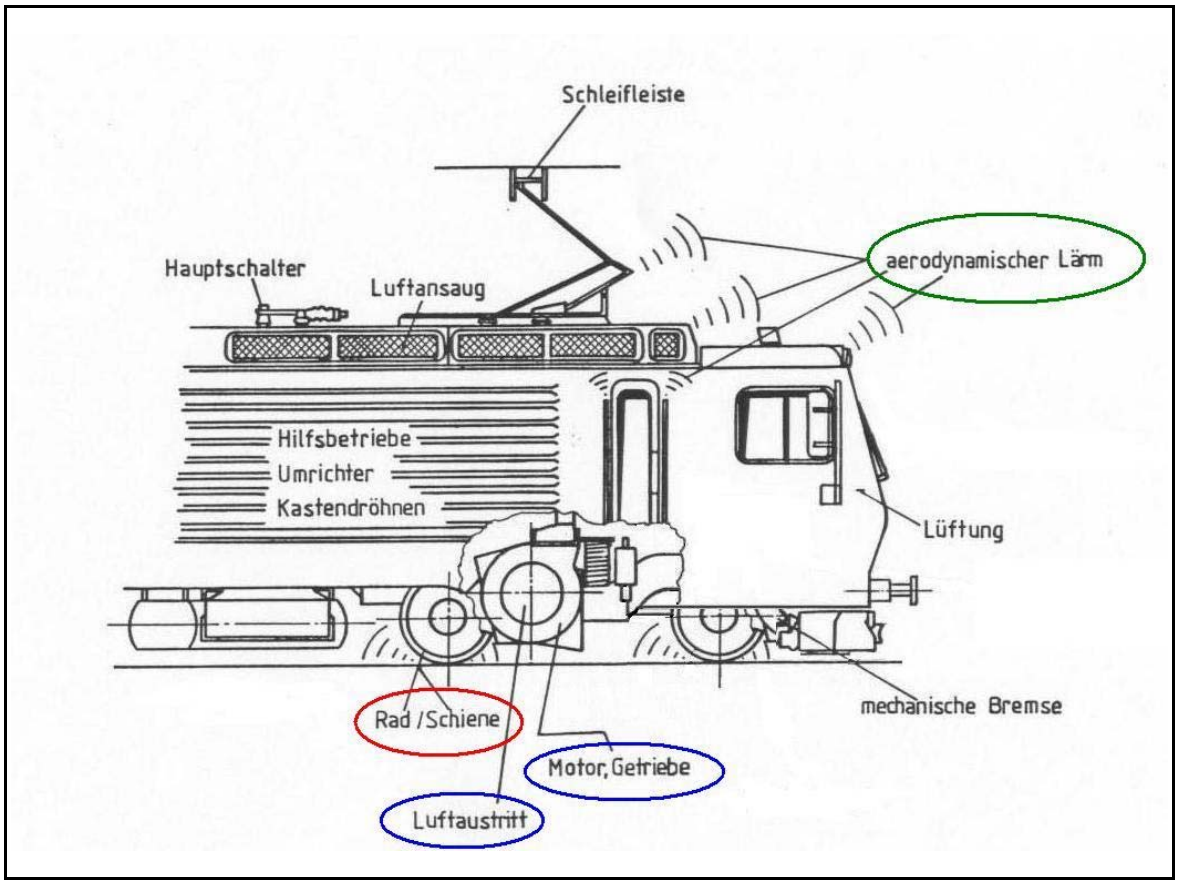


Abbildung 3-2: Lärmquellen an einer elektrischen Streckenlokomotive

Bei elektrischen Streckenlokomotiven befindet sich die Antriebsausrüstung gewöhnlich im Maschinenraum. Einzelne Hilfsaggregate, wie beispielweise der Transformator, können

auch auf dem Dach oder im Unterflurbereich installiert sein. Der Schall, der von den Aggregaten auf dem Dach oder im Unterflurbereich entsteht, kann wegen des fehlenden Schutzes des Maschinenraums breitflächig abgestrahlt werden.

3.1.1 Rad-Schiene-Kontakt

Der Rad-Schiene-Kontakt ist eine der Hauptlärmquellen eines jeden Schienenfahrzeugs und kann aufgrund folgender Ursachen zu Lärm führen:

- **Rollgeräusch**
  Ursachen für das Rollgeräusch können neben Ausbröckelungen oder ähnlichem die Rauheiten oder Riffelbildungen auf Rad und Schiene sein. Durch die schwache Dämpfung von Rad, Schwelle und Schiene kommt es zu einer grossen Schallabstrahlung. Bei den meisten Fahrzeugen ist das Rollgeräusch im Geschwindigkeitsbereich von 60 km/h bis 200 km/h die dominante Lärmquelle.
  Prinzipiell ist der Schallpegel (L_P), der durch das Rollgeräusch des Rad-Schiene-Kontakts entsteht, direkt von der Summenrauheit ($L_{\Sigma R}$) von Rad und Schiene abhängig:

  $$L_P = f(L_{\Sigma R})$$

  Deshalb ist eine Pegelreduktion durch eine Reduktion der Summenrauheit zu erreichen.

  <u>Mögliche Massnahmen:</u>
  Auf Schienenseite kann die Rauheit durch regelmässiges Schleifen der Schienenoberfläche vermindert werden. Bei Fahrzeugen mit Klotzbremsen kann ein Ersatz der Graugussbremsklötze durch Klötze aus Kunststoff oder Sintermaterial zur Reduzierung der Radrauheit führen. Glatte Räder neigen jedoch zu Ausbröckelungen, deshalb ist eine gewisse Abrasion für eine niedrige Radrauheit notwendig.

- **Kurvenkreischen**
  In sehr engen Bogenradien kann es zum Kurvenkreischen kommen. Ursache für das Kurvenkreischen ist, dass in sehr engen Bögen die aufgrund des konischen Radprofils gegebene Rollradiendifferenz nicht mehr ausreicht, um die unterschiedlich langen Laufwege des inneren und äusseren Rades auszugleichen. Deshalb kommt es zum Quergleiten und Spurkranzreiben, das dann zum Kurvenkreischgeräusch führt (siehe **Abbildung 3-3**) [2].

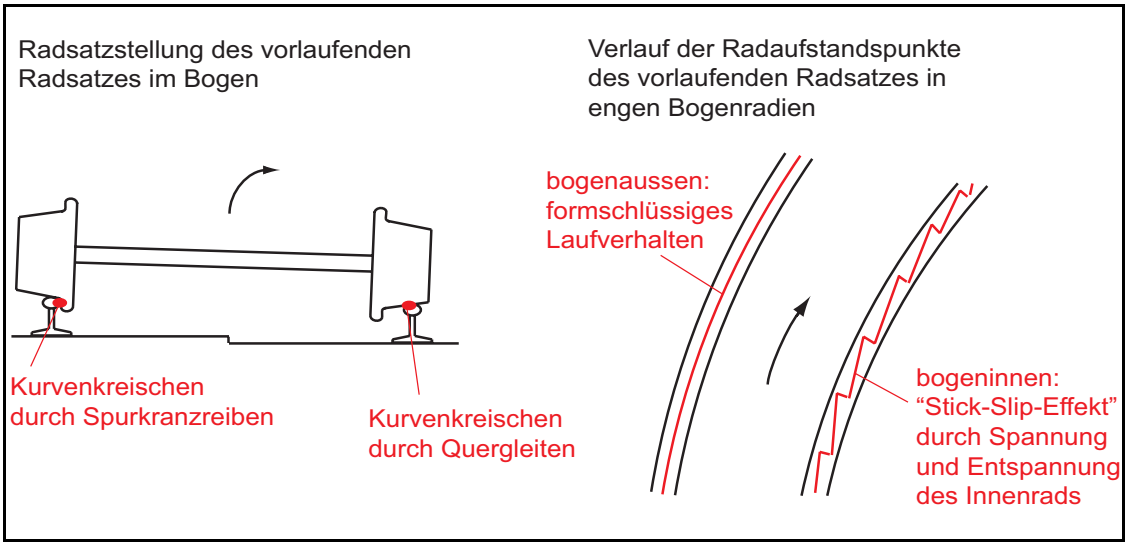


Abbildung 3-3: Entstehen des Kurvenkreischens in engen Bogenradien (Bild aus [2])

Durch das Schwingen der Räder in ihren Eigenmodi weist das Kurvenkreischen meist einen hohen Tonhaltigkeitsanteil auf und somit erhöht sich die subjektiv empfundene Störwirkung noch.

Mögliche Massnahmen:
Dem Kurvenkreischen kann an neuralgischen Bogenabschnitten durch stationäre Schmieranlagen oder bei starren Fahrwerken durch konstruktive Änderungen der Fahrwerkslenkung entgegengewirkt werden (siehe [2]).In einigen Fällen kann das Kurvenkreischen auch durch Anbringen von Radschallabsorber reduziert oder gar ganz eliminiert werden.

- **Makroschlupfpfeifen**
  Beim Anfahren mit maximaler Zugkraft kann es zum Makroschlupfpfeifen kommen. Dabei rotieren die Antriebsräder mit einem so grossen Schlupf, dass ein hochfrequentes Pfeifen entsteht. Dieses Problem tritt besonders bei leistungsstarken elektrischen Lokomotiven auf. Durch das Schwingen der Räder in ihren Eigenmodi besitzt das Makroschlupfpfeifen meist eine Tonhaltigkeit, die das Geräusch noch störender empfinden lässt.

Mögliche Massnahmen:
Durch Radschallabsorber kann das Makroschlupfpfeifen in den meisten Fällen vermindert werden. Eine andere Variante, das Makroschlupfpfeifen zu vermindern, ist, den maximalen Schlupf mit der Regelungstechnik zu limitieren, dadurch wird jedoch die übertragbare Zugkraft begrenzt.

- **Schlaggeräusche**
  Durch Flachstellen oder Schienenstösse (auch beim Überfahren von Weichen) kann es zu markanten Lärmbelästigungen kommen. Der Schallpegel kann um bis zu 15 dB ansteigen.

> *Mögliche Massnahmen:*
> *Abhilfe kann hier eine regelmässige Wartung der Fahrzeuge und des Oberbaus leisten. Sobald eine Flachstelle entstanden ist, so muss dieses Rad zeitnah überdreht werden.*

3.1.2 Pantograph-Kontakt

Der Kontakt zwischen Oberleitung und der Schleifleiste des Pantographen stellt bei jedem elektrisch betriebenen Fahrzeug eine Lärmquelle dar. Besonders wenn es zum Funkenflug kommt, kann Lärm entstehen. Das Geräusch, das beim Kontakt zwischen Oberleitung und Pantograph entsteht, ist besonders bei niedrigen Geschwindigkeiten hörbar.

Ausserdem kann im Stillstand der beim Anheben des Pantographen entstehende Berührungsknall insbesondere in Bahnhofsbereichen zu einer Lärmbelästigung führen.

> *Mögliche Massnahmen:*
> *Durch eine Optimierung des Anpressdrucks des Pantographen im Zusammenspiel mit der Oberleitung kann sichergestellt werden, dass der Kontakt zwischen Pantograph und Oberleitung nicht kurzzeitig verloren geht und es somit zum Funkenflug während der Fahrt kommt.*

3.1.3 Fahrmotor und Getriebe

Das Fahrmotor- und Getriebegeräusch ist bei einigen Fahrzeigen bei Geschwindigkeiten bis ca. 60 km/h dominierend sein. Besonders beim Anfahren spielt es bei einigen Fahrzeugen als Lärmquelle eine grosse Rolle.
Zwar ist das Geräusch, das vom Fahrmotor aufgrund der magnetischen Kräfte auftritt, unter Volllast fast unabhängig von der Geschwindigkeit. Es ist aber besonders bei niedrigen Geschwindigkeiten dominant, weil andere Lärmquellen in diesem Geschwindigkeitsbereich noch keinen hohen Schalldruckpegel produzieren.
Bei modernen Triebfahrzeugen können die entstehenden Schalldruckpegel von Getriebe und Fahrmotor eine Tonhaltigkeit besitzen, die eine Geräuschemission deutlich lauter wahrnehmen lässt. Gründe für die Tonhaltigkeit sind einerseits die höheren Übersetzungsverhältnisse, andererseits die Kurvenformen des Motorstroms bei Umrichterfahrzeugen. Bei älteren Fahrzeugen tritt bei den Getriebelärm aufgrund der breitbandigen Geräusche keine Tonhaltigkeit auf.

Der Lärmentwicklung von Fahrmotor und Getriebe kann von folgenden Einflüssen abhängen:

- **Getriebeverzahnung**
  Das Geräusch entsteht durch den Verlauf der Kontaktkräfte zwischen den im Eingriff stehenden Getrieberadzähnen. Die Kontaktkräfte sind unter anderem abhängig der statischen Kraft zusammen mit den wechselnden Schwingungskräften. Besonders entscheidend ist aber die Bauart. Es wird zwischen Schräg- (z.B. Re 460) und Geradeverzahnung (z.B: Re 450) unterschieden. Ausserdem spielen das Übersetzungsverhältnis und der Ölfluss eine Rolle für das Lärmverhalten des Getriebes. Aufgrund der hohen Getriebeübersetzungen bei modernen Triebfahrzeugen kann es zu Schalldruckpegeln mit Tonhaltigkeit kommen, was die Lästigkeit des Lärmempfindens deutlich verstärkt.

  Mögliche Massnahmen:
  Eine Änderung des Zahneingriffs (Zahnflankenkorrekturen, höhere Gesamtüberdeckung) und eine Schräg- statt einer Geradverzahnung kann eine Verminderung des Lärmverhaltens bringen.

- **Fahrmotorkonstruktion**
  Die magnetischen Kräfte können zu Schwingungen des Ständers führen. Ausserdem kann das Lager und bei älteren Lokomotiven die Motorbürsten Geräuschemissionen erzeugen. Die Dominanz der Lärmquelle ist also von der Motorbauform abhängig.

  Mögliche Massnahmen:
  Die Schwingungen des Ständers können durch optimierte Lagerungen reduziert werden. Eine andere Möglichkeit die Ausbreitung der Geräusche vom Fahrmotor zu vermindern ist, die Luftschallabstrahlung durch Kapselung zu reduzieren.

- **Getriebekasten und Fahrmotorgehäuse**
  Durch Übertragung des Körperschalls auf das jeweilige Gehäuse können das Getriebe- und Fahrmotorgehäuse Schall abstrahlen. Je nach Konstruktion der Aufhängung kann sich dadurch Körperschall auf die Drehgestellrahmen übertragen, die dann wiederum Luftschall abstrahlen.

  Mögliche Massnahmen:
  Eine akustische Entkoppelung der Bauteile kann durch Einbau von Gummielementen (z.B. Gummifedern statt Stahlschraubenfedern) und elastischen Lagerungen erreicht werden. Durch diese akustische Entkoppelung wird die Übertragung des Körperschalls verhindert.

3.1.4 Aerodynamische Strömungen

Im hohen Geschwindigkeitsbereich ab ca. 200 km/h (je nach Fahrzeugtyp) werden aerodynamische Strömungen durch Luftwirbelbildung bei Umströmung des Fahrzeugs zum Lärmproblem. Bei ungünstiger Formgebung des Fahrzeugs können die aerodynamischen Strömungen schon bei geringeren Geschwindigkeiten zu einem Lärmproblem führen. In der Schweiz ist das Lärmproblem aufgrund von aerodynamischen Strömungen nicht sehr dominierend, weil sich das Geschwindigkeitsprofil nicht in einem so hohen Geschwindigkeitsbereich bewegt. Folgende Komponenten spielen aber bei Lärm durch aerodynamische Strömungen eine Rolle:

- **Pantograph**
  Besonders der Pantograph wird zur dominanten Lärmquelle im hohen Geschwindigkeitsbereich. Bei Hochgeschwindigkeitsfahrzeugen ist der Pantograph zwar meist nach aeroakustischen Lärmgesichtspunkten konstruiert, trotzdem bietet er noch Angriffsflächen, die zu Verwirbelungen und Strömungsabrissen führen und dadurch Lärm verursachen. Ausserdem ist der Pantograph die am höchsten angeordnete Lärmquelle am Fahrzeug.

  Mögliche Massnahmen:
  Eine Minimierung der Bauteile des Pantographen kann die Angriffspunkte für Verwirbelungen und Strömungsabrissen reduzieren und damit die Lärmursache bekämpfen.

- **Anbauteile**
  Haltegriffe, Frontkupplungen, Scheibenwischer oder das Drehgestell führen im hohen Geschwindigkeitsbereich zu Luftverwirbelungen, die dann wiederum zu Lärm führen können.

  Mögliche Massnahmen:
  Durch Verkleidungen beziehungsweise Schürzen am Drehgestell und im Dachbereich kann eine strömungstechnisch günstige Form erreicht werden, die weniger Lärm abstrahlt.

3.1.5 Hilfsaggregate

Im Stillstand kann insbesondere durch Hilfsaggregate (Lüfter, Kompressor etc.) Lärm entstehen. Folgende Aggregate spielen dabei eine Rolle:

- **Klimaanlage, Heizung und Lüftung für den Führerraum**
  Die Klimaanlage beziehungsweise die Heizung und Lüftung für den Führerraum kann bei ungünstigen Einbau im Fahrzeug eine dominierende Lärmquelle im Stillstand sein. Die Lärmemission ist vom Luftströmungspfad der Belüftungselemente (Lüfter, Kanalform, Ansaugung, Austritt, Gitter, Filter und Kühlerbauform) abhängig.

Mögliche Massnahmen:
Die Lärmemission der Klimaanlage bzw. des Heiz- und Lüftungsaggregats kann durch Schürzen, Dämmung oder optimierte Frischluftgitter reduziert werden. Bei älteren Aggregaten stellt der Einbau einer modernen Klimaanlage eine Verbesserungsmöglichkeit dar.

- **Hauptschalter**
  Das Ein- und Ausschalten des Hauptschalters kann aufgrund des Trennens beziehungsweise Verbindens von hohen elektrischen Spannungen und Strömen zu einer grossen kurzzeitigen Lärmbelästigung führen.

Mögliche Massnahmen:
Ein Ersatz alter Druckluft-Hauptschalter durch Vakuum-Hauptschalter kann eine Lärmreduzierung bringen.

.

- **Fahrmotorlüfter**
  Motorkühlungen können bei maximaler Lüfterleistung das Lärmverhalten dominieren. Einfluss auf das Lärmverhalten des Fahrmotorlüfters haben alle Elemente im Luftströmungspfad (Lüfter, Kanalform, Luftansaugung, Luftaustritt, Gitter, Filter, Kühlerbauform). Die Fahrmotorkühlung ist besonders im Stillstand und beim Anfahren als Lärmquelle dominierend. Die Art der Steuerung oder Regelung hat dabei einen starken Einfluss auf den entstehenden Lärm. Ausserdem wird die Kühlluft meist im oberen Bereich der Maschinenaussenwand oder auf dem Dach angesaugt, um Festsetzen von vom Boden aufgewirbelten Staub und Schmutz zu vermeiden. Durch diese notwendig hohe Position der Luftansaugung kann der Schall breitflächiger abstrahlen.

Mögliche Massnahmen:
Die Lärmentwicklung der Fahrmotorlüfter kann durch eine derartige Änderung der Steuerung reduziert werden, so dass jeweils nur die minimal notwendige Kühlleistung abgerufen wird.

- **Stromrichter**
  Die hochfrequenten Erregungen, die durch den Traktionsstromrichter erzeugt werden, können zu Geräuschemissionen führen. Das Ausmass der Geräuschemissionen vom Traktionsstromrichter hängt von der Topologie im Fahrzeug ab. Ausserdem ist das Lärmverhalten (Pegel und Tonhaltigkeit) des Stromrichters von der Ansteuerung, dem Taktmuster, der Grösse des Nennstroms und der Nennspannung der Motoren abhängig.

Besonders bei modernen Fahrzeugen können die Umrichter Schalldruckpegel mit Tonhaltigkeit erzeugen. Die Tonhaltigkeit lassen den Schalldruckpegel lauter empfinden als der gemessene Wert aussagt.

Mögliche Massnahmen:
Durch eine Optimierung der Ansteuerung, des Taktmusters, der Grösse des Nennstroms und der Nennspannung kann die Lärmausbreitung des Stromrichters an der Quelle reduziert werden. Eine andere Möglichkeit ist, den entstandenen Lärm durch Dämmung und Absorption an seiner Ausbreitung zu hindern.

- **Kühlturm für Stromrichter**
  Die Kühlung der Traktionsstromrichter kann abhängig von den Elementen im Luftströmungspfad (Lüfter, Kanalform, Ansaugung, Austritt, Gitter, Filter und Kühlerbauform) zu hohen Schalldruckpegeln bei maximaler Lüfterleistung führen. Bei einigen Fahrzeugen werden die Stromrichter und der Transformator gemeinsam gekühlt. Die Art der Steuerung oder Regelung hat einen grossen Einfluss auf die Lärmentstehung. Wie bei den Fahrmotorlüftern ist die Luftansaugung für die Stromrichter meist am Dach angebracht, was zu einer breitflächiger Schallabstrahlung führt.

  Mögliche Massnahmen:
  Der Luftströmungspfad eines Kühlturms kann derart optimiert werden, dass die durchströmende Luft weniger Angriffspunkte für Verwirbelungen vorfindet und somit an der Quelle weniger Lärm entsteht..

- **Hilfsbetriebe-Umrichter**
  Auch die Stromrichter für die Hilfsbetriebe können eine dominante Lärmquelle in einem Fahrzeug sein. Es spielen dabei der Umrichter selbst und dessen Lüftung eine Rolle im Lärmverhalten. Oft sind diese auch im Traktionsstromrichter integriert und müssen nicht einzeln betrachtet werden.

  Mögliche Massnahmen:
  Bei den Hilfsbetriebe-Umrichter gibt es die gleichen akustischen Verbesserungsmöglichkeiten wie bei den Stromrichtern (Optimierung Bauart, Dämmung und Absorption).

- **Bremsluftkompressor**
  Zur Erzeugung des Überdrucks im Hauptluftbehälter ist auf jeder Lokomotive bzw. in jedem Triebzug ein Bremsluftkompressor installiert (bei Schmalspurbahnen z.T. Vakuumpumpe). Dieser Kompressor schaltet sich von Zeit zu Zeit ein, um den Hauptluftbehälter nachzufüllen. Der Hauptluftbehälter speist dann die Hauptluftleitung und die direkte Bremse auf dem Triebfahrzeug. Der Betrieb des Bremsluftkompressors kann

im Stillstand besonders durch das Abblasen von Luft oder durch die Kühlung des Kompressors zu einer enormen Lärmbelastung führen.
Bei Lokomotiven wird der Kompressor üblicherweise im Motorraum montiert, teilweise aber auch unterflur.

Mögliche Massnahmen:
Der durch den Kompressor entstehende Lärm kann durch Wahl eines anderen Einbauorts, einer Kapselung oder dem Einbau eines modernen Kolbenkompressors reduziert werden.

- **Transformator**
  Beim Transformator kann die Ölpumpe zu Geräuschemissionen führen. Die Lärmemission des Transformators hängt ausserdem von der Ansteuerung und der Bauart ab. Zudem können die Lüfter des Transformators abhängig von der Bauform der Elemente im Luftströmungspfad Lärm entwickeln (in der Regel mit den Stromrichtern gemeinsam gekühlt).
  Meist ist der Haupttransformator im Unterflurbereich einer Triebfahrzeugs installiert. Bei unzureichender Abschirmung kann der Schall nahezu ungehindert zur Seite abstrahlen.

  Mögliche Massnahmen:
  Die Lärmemissionen des Transformators kann durch eine geeignete Abschirmung mittels Schürzen und Verkleidungen vermindert werden.

- **Bremswiderstand**
  Ein Bremswiderstand wandelt während und nach einer Bremsung die Bremsenergie in Wärme um. Bremswiderstände werden nur dann verwendet, wenn keine Rückspeisung ins Netz möglich ist, aber trotzdem elektrisch gebremst werden soll.
  Besonders im Stillstand kann dann der Lüfter des Bremswiderstands zur dominanten Lärmquelle werden, wobei die Intensität der Lärmentwicklung hauptsächlich von der Ansteuerung des Bremswiderstands abhängig ist. Die Schaltung ist meist nur auf Vollleistung oder keine Leistung ausgelegt. Bremswiderstände mit grosser Leistung verursachen hohe Temperaturen, die zur Kühlung gerade Kanäle ohne Schikanen und Absorber benötigen. Dies wiederum bedeutet eine grosse Lärmausstrahlung.

  Mögliche Massnahmen:
  Die Lärmemissionen der Bremswiderstandslüftung kann durch ein inteligentes Steuerungsmanagement reduziert werden. Werden die Bremswiderstände zu Zeitpunkten gekühlt während andere Lärmquellen dominant sind, so kann während des Stillstands das Kühlen reduziert werden oder sogar ganz darauf verzichtet werden.

3.1.6 Kastendröhnen

Werden die z.B. vom Getriebe bzw. Motor erzeugten Vibrationen über Körperschallbrücken auf Bauteile mit grossen Flächen übertragen (z.B. Lokomotivkasten, Drehgestell), so können diese zu Strukturschwingungen angeregt werden und so Luftschall erzeugen. Besonders betroffen können davon die Seitenwände des Lokomotivkastens sein. Sie bieten eine grosse Fläche zum Lärmabstrahlen.

Mögliche Massnahmen:
Das Kastendröhnen kann durch eine akustische Entkopplung der vibrierenden Antriebsteilen und den Lokomotivkasten unterbunden werden.

3.1.7 Mechanische Bremse

Die mechanische Bremse ist bei den meisten Lokomotiven entweder als Klotzbremse oder als Radscheibenbremse ausgeführt. Abhängig von Einbauort, Bauform und Raddämpfung kann der Bremsvorgang an sich Lärm erzeugen. Bei einer starken Verzögerung kann es zum Quietschen der Bremsen kommen. Hinzu kommt, dass beim Einsatz von Grauguss-Klotzbremsen die Radlauffläche aufgerauht wird und damit auch der Lärm des Rad-Schiene-Kontakts verstärkt wird.
Auch das Lösen und Anziehen der Bremse kann ein ausgeprägtes Pfeifgeräusch verursachen. Dies entsteht durch Luftablassen beim Betätigen der Bremse, um z.B. eine Bremsprobe durchzuführen. Dies kann besonders im Stillstand zu einer dominanten Lärmquelle werden.
Ausserdem kann Lärm durch Klappern bei formschlüssigen Verbindungen im Bremssystem (z.B. Bremsgestänge) entstehen.

Mögliche Massnahmen:
Lärm der durch Klotzbremsen entsteht kann durch den Umbau auf Scheibenbremsen reduziert werden. Dies ist aber aufgrund der gegebenen Einbausituation nicht bei allen Fahrzeugen möglich. Ausserdem dienen die Klotzbremsen teilweise bewusst als Instrument für die Aufrauhung der Radlaufflächen, um einen höheren Reibwert für die Traktionsübertragung zu bekommen.

3.2 Zusätzliche Lärmquellen bei Verbrennungsmotorlokomotiven

Bei einer Diesellokomotive kommen als Lärmquelle der Verbrennungsmotor mit all seinen Hilfsaggregaten und die Leistungsübertragung hinzu. **Abbildung 3-4** zeigt mögliche Lärmquellen am Beispiel einer Strecken- bzw. Rangierlokomotive mit Dieselmotor. Am linken Drehgestell ist ein elektrischer Antrieb schematisch dargestellt. Am Beispiel des rechten Drehgestells ist ein hydraulischer Antrieb mit Kardanwelle abgebildet.

Des weiteren gibt es auch Fahrzeuge mit hydrostatischem Antrieb, jedoch selten als Streckenlokomotiven (die Baufahrzeuge Tm 234 „Ameise“ sind so gebaut).

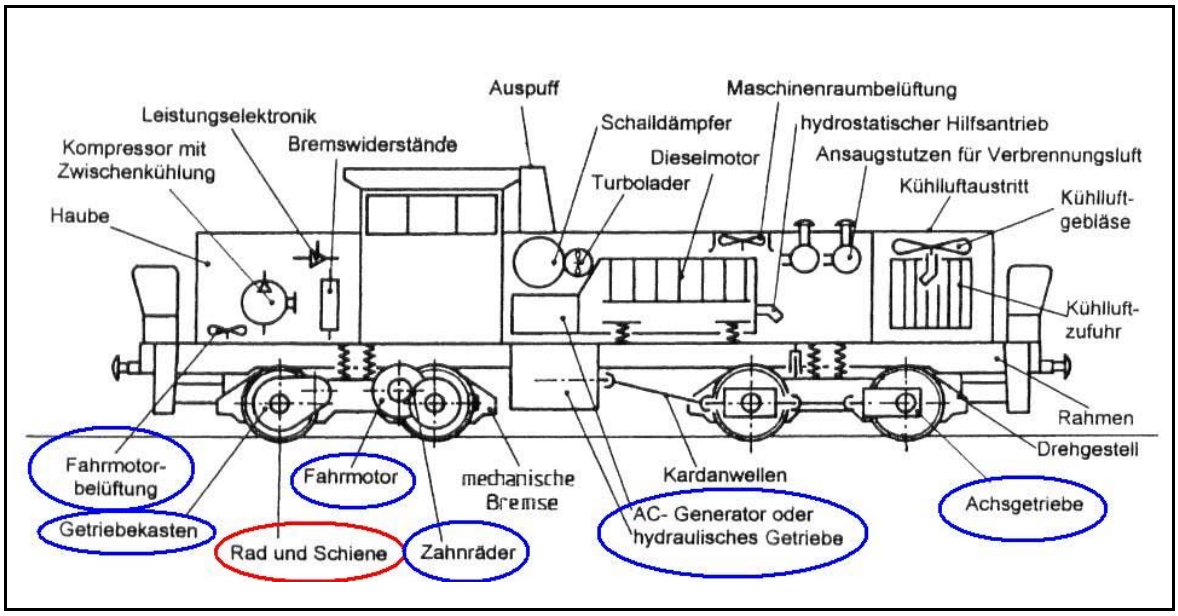


Abbildung 3-4: Lärmquellen an einer Diesellokomotive

Im Folgenden sind mögliche Lärmquellen beschrieben, die bei einer Streckenlokomotive mit Verbrennungsmotor zusätzlich zu den oben aufgezählten Lärmquellen hinzukommen. Andere Lärmquellen, wie Pantograph-Kontakt, sind bei einer Diesellokomotive natürlich nicht relevant.

3.2.1 Verbrennungsmotoranlage

Die Hauptlärmquelle bei einer Lokomotive mit Dieselantrieb stellt der Verbrennungskraftmotor dar. Hinzu kommen noch die notwendigen Hilfsaggregate.
Ein Dieselmotor an sich verursacht aufgrund seiner rotierenden Teile Geräuschemissionen. Besonders bei der Leistungsklasse der Motoren (bis zu 3.0 MW), wie er bei Dieselstreckenlokomotiven eingebaut wird, ist der Dieselmotor eine dominante Lärmquelle. Ausserdem können die Ansaugstutzen, die Abgasanlage, forciert belüftete Kühlanlagen die Lärmentwicklung an einem Triebfahrzeug mit Verbrennungsmotor dominieren.

Mögliche Massnahmen:
Durch eine Optimierung des Verbrennungsmotors und seiner Hilfsaggregate kann das Lärmpotential eines Dieselmotors reduziert werden. Beispiele können aus dem Kraftfahrzeugbau entlehnt werden.

3.2.2 Generator (bei dieselelektrischem Antrieb)

Der Generator ist bei Fahrzeugen mit Verbrennungskraftmotor und elektrischer Leistungsübertragung für die Umwandlung von mechanischer in elektrischer Energie zustän-

dig. Diese elektrische Energie wird dann den Fahrmotoren zugeführt, die dann elektrische Energie wieder in mechanische umwandeln [3].
Der Generator an sich und die erforderliche Kühlung kann für Lärm sorgen. Die Lärmentwicklung ist abhängig von den Elementen im Luftströmungspfad (Lüfter, Kanalform, Ansaugung, Austritt, Gitter, Filter und Kühlerbauform). Auch die Steuerung und Regelung der Kühlung hat einen Einfluss auf das Lärmverhalten.
Der Fahrmotor und das Getriebe kann den gleichen Lärm verursachen, wie er schon bei der elektrischen Streckenlokomotive beschrieben wurde.

Mögliche Massnahmen:
Die Kühlung des Generators kann durch eine Optimierung des Luftströmungspfads und einer geeigneten Abschirmung in seiner Lärmentwicklung reduziert werden.

3.2.3 Hydraulisches Getriebe (bei dieselhydraulischem Antrieb)

Ein hydraulisches Getriebe nutzt zur Leistungsübertragung eine Flüssigkeit als Energieträger. Auf der leistungsaufnehmenden Seite wird in einer Pumpe (Primärteil) der Flüssigkeit Energie zugeführt, die im leistungsabgebenden Teil (Sekundärteil) wieder in mechanische Energie umgewandelt wird. Durch Änderung von Strömungsrichtung und -geschwindigkeit im Getriebe wird die Leistung vom Dieselmotor geregelt [3].
Die Ölströmungen in hydraulischen Leitungen und Getriebe sowie Zahnradgeräusche können für Lärm sorgen. Ausserdem können die antreibenden Kardanwellen und die Achsgetriebe als Lärmquelle wirken. Abhängig von der Verzahnungsart ist auch eine Tonhaltigkeit bei den Getriebegeräuschen möglich.

Mögliche Massnahmen:
Durch eine Optimierung des Ölströmungskreislaufs können die Lärmemissionen eines hydraulischen Getriebes reduziert werden.

3.3 Zusätzliche Lärmquellen bei elektrischen Triebwagen und Triebzüge

Im Vergleich zu einer Streckenlokomotive sind bei Triebfahrzeugen zwar die gleichen Aggregate eingebaut, aber sie können statt in einem Maschinenraum auch im Unterflurbereich oder auf dem Dach angeordnet sein. In **Abbildung 3-5** sind die prinzipiell möglichen Antriebsausrüstungsanordnungen schematisch dargestellt. Wenn die Antriebsausrüstung unterflur angeordnet ist, sind die potentiellen Lärmquellen unten am Fahrzeug platziert und entstehender Lärm kann durch Lärmschutzwände oder Schutzwälle gemindert werden. Nachteil der Antriebsausrüstung im Unterflurbereich ist, dass der Fahrgastraum nicht niederflur ausgeführt werden kann, zumindest nicht durchgehend. Dieser Nachteil ist bei Anordnung der Antriebsausrüstung im Maschinenraum oder auf dem Dach nicht vorhanden, für das Lärmverhalten ist aber eine Platzierung der Antriebsausrüstung auf dem

Dach oder im Maschinenraum ungünstiger, da die Lärmquellen von einer erhöhen Position abstrahlen können und damit die Schallausbreitung durch Lärmschutzwände kaum gemindert wird.
Die Klimaanlage bzw. Lüftung für den Fahrgastraum ist meist auf dem Dach angeordnet. Sie kann aber auch im Unterflurbereich angebracht sein.

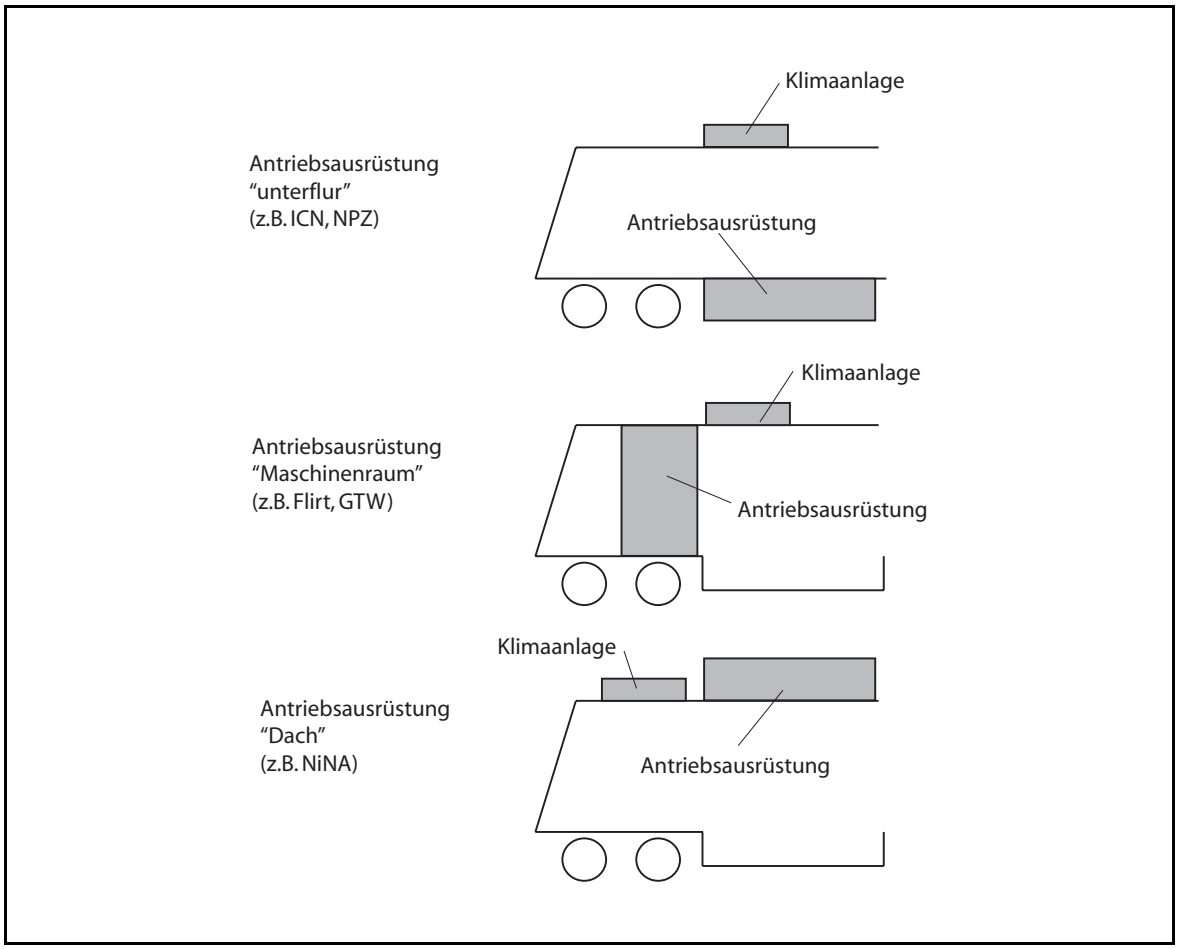


Abbildung 3-5: Platzierungsmöglichkeiten der Antriebsausrüstung bei elektrischen Triebwagen oder Triebzügen

Mögliche Lärmquellen eines elektrisch betriebenen Regionaltriebwagens sind in **Abbildung 3-6** dargestellt.

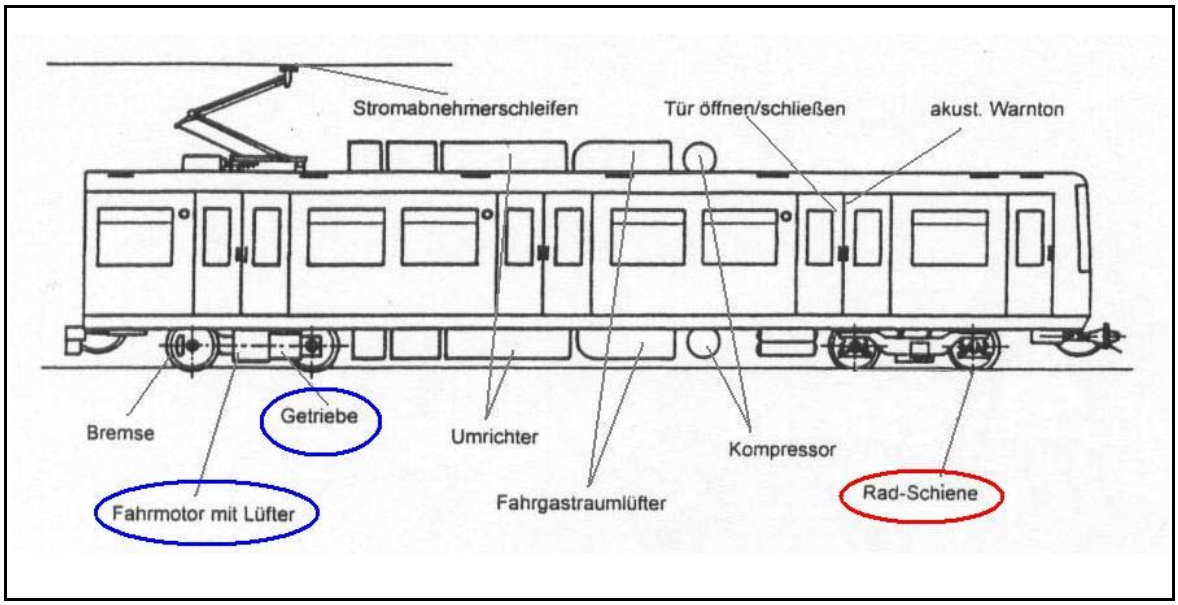


Abbildung 3-6: Lärmquellen an einem elektrisch angetriebenen Regionaltriebwagen (Bild aus [4])

Zusätzlich zu den Lärmquellen, die oben schon erwähnt sind, können bei elektrischen Triebwagen oder Triebzügen noch folgende Lärmquellen hinzukommen.

3.3.1 Öffnen und Schliessen der Türen

Das Öffnen und Schliessen der Türen kann im Bahnhofsbereich zu einer beträchtlichen Lärmquelle werden. Gerade wenn die Türen automatisch nach ein paar Sekunden schliessen, um den Wärmeaustausch zwischen Fahrgastraum und Umgebung zu verhindern, kann dies zu mehrmaligen Toröffnen und –schliessen an einer Haltestelle führen.

Mögliche Massnahmen:
Die Auslegung der Türöffnungs- und Schliessmechanik kann nach akustischen Gesichtspunkten erfolgen, die laute Schläge von Metall auf Metall verhindern.

3.3.2 Akustischer Warnton

Gerade bei Fahrzeugen, die in urbanen Ballungsräumen eingesetzt werden, wird es aufgrund des grossen Fahrgaststromes als notwendig betrachtet, durch einen akustischen Warnton den Schliessvorgang der Türen anzukündigen. Dieser Signalton sorgt für eine zusätzliche Lärmbelästigung für die Umgebung.

Mögliche Massnahmen:
Da der akustische Warnton als Hinweis für die Fahrgäste gewollt ist, macht es keinen Sinn, diesen zu bekämpfen. Alternativ kann über visuelle Warnungen, wie Blinklichter nachgedacht werden.

3.3.3 Klimaanlage, Heizung und Lüftung für Fahrgastraum

Bei elektrischen Triebwagen oder Triebzügen kommt zu der Klimaanlage für den Führerstand noch die Klimaanlage bzw. Lüftungseinrichtung für den Fahrgastraum hinzu. Bei modernen Fahrzeugen ist fast jedes Fahrzeug mit einer Klimaanlage für die Fahrgasträume ausgerüstet. Hier können die gleichen Massnahmen wie bei der Lärmsanierung der Reisezugwagen vorgenommen werden.

Mögliche Massnahmen:
Die Lärmemission der Klimaanlage bzw. des Heiz- und Lüftungsaggregats kann durch Schürzen, Dämmung oder optimierte Frischluftgitter reduziert werden. Bei älteren Aggregaten stellt der Einbau einer modernen Klimaanlage eine Verbesserungsmöglichkeit dar.

3.4 Zusammenfassung möglicher Lärmquellen

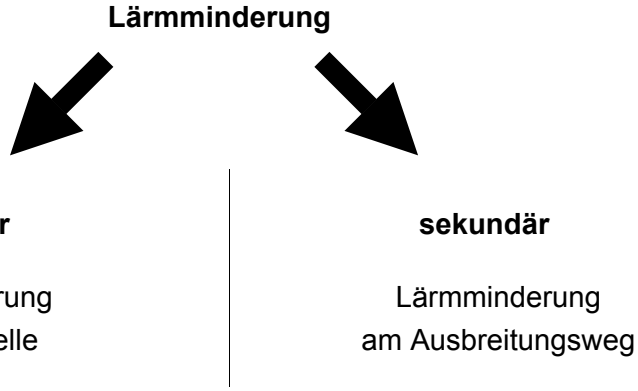
Die zuvor genannten Lärmquellen sind in **Tabelle 3-1** mit jeweils einer kurzen Beschreibung zusammengefasst.

Kap.	Lärmursache		Kurzbeschreibung	Vorkommen			
				E	D_e	D_h	ET
3.1.1	Rad-Schiene-Kontakt	Rollgeräusch	entsteht durch grosse Schienen- und Radrauheiten oder auch durch Ausbröckelungen am Rad	X	X	X	X
		Kurvenkreischen	tritt in sehr engen Bogenradien und bei widrigen Witterungsverhältnissen auf	X	X	X	X
		Makroschlupfpfeifen	entsteht durch grossem Schlupf von Antriebsrädern beim Anfahren mit maximaler Zugkraft	X	X	X	X
		Schlaggeräusche	verursacht durch Flachstellen oder Schienenstösse	X	X	X	X
3.1.2	Pantograph-Kontakt		entsteht durch Kontakt der Schleifleiste des Pantographen mit dem Fahrdraht	X	-	-	X
3.1.3	Fahrmotor und Getriebe	Getriebeverzahnung	verursacht Lärm durch die Übertragung der Kontaktkräfte; Gefahr der Tonhaltigkeit	X	X	-	X
		Fahrmotorkonstruktion	durch Lager und Motorbürsten entsteht Lärm (besonders bei älteren Fahrzeugen)	X	X	-	X
		Getriebekasten, Motorgehäuse	durch Körperschallübertragung kann Schall mittels der Gehäuse abgestrahlt werden	X	X	-	X
3.1.4	Aerodynamische Strömungen	Pantograph	verursacht Lärm durch Verwirbelungen und Strömungsabrissen (nur bei hohen Geschwindigkeiten)	X	-	-	X
		Anbauteile	durch Haltegriffe, Kupplungen etc. werden Luftverwirbelungen verursacht	X	X	X	X
3.1.5	Hilfsaggregate	Klimaanlage, Heizung, Lüftung	Belüftungselemente für Führerraumbelüftung verursacht Lärm	X	X	X	X
		Hauptschalter	kurzzeitiger Lärm durch Trennung bzw. Verbinden von hohen elektrischen Spannungen und Strömen	X	-	-	X
		Fahrmotorlüfter	verursacht Lärm besonders im Stillstand, Anfahrt; abhängig von Bauform der Luftströmungselementen	X	X	-	X
		Stromrichter	Geräuschemissionen entstehen durch die hochfrequenten Erregungen	X	X	-	X
		Kühlturm für Stromrichter	verursacht Lärm durch Verwirbelungen oder Abrisse im Luftströmungspfad	X	X	-	X
		Hilfsbetriebe-Umrichter	können wie die Stromrichter Lärm durch hochfrequente Erregungen erzeugen	X	X	-	X
		Bremsluftkompressor	Lärm entsteht durch Erzeugung des Überdrucks für die Bremsleitung	X	X	X	X
		Transformator	kann durch die Ölpumpe und der Ansteuerung und Bauart Lärm entstehen	X	-	-	X
		Bremswiderstand	wandelt Bremsenergie in Wärme um. Kühlung kann Lärm verursachen.	X	X	-	X
3.1.6	Kastendröhnen		durch Körperschallübertragung können Drehgestelle und Lokomotivkasten Luftschall erzeugen	X	X	X	X
3.1.7	Mechanische Bremse		bei starker Bremsung Quietschgefahr; ausserdem Aufrauhung der Radoberfläche durch Klotzbremsen	X	X	X	X
3.2.1	Verbrennungsmotoranlage		Dieselmotoren verursachen aufgrund der rotierenden Teile Lärm.	-	X	X	-
3.2.2	Generator		erforderliche Kühlung kann Lärm verursachen.	-	X	-	-
3.2.3	Hydraulisches Getriebe		Ölströmungen und Pumpenvorrichtungen sind für Lärm verantwortlich	-	-	X	-
3.3.1	Öffnen / Schliessen Türen		verursacht Lärm während eines Halts am Bahnsteig	-	-	-	X
3.3.2	Akustischer Warnton		zur Warnung der Fahrgäste vor sich schliessenden Türen	-	-	-	X
3.3.3	Klimaanlage, Heizung, Lüftung		Belüftungselemente für Fahrgastbereich verursacht Lärm	-	-	-	X
Abkürzungen: E = elektrische Streckenlokomotive, D_e = dieselelektrische Streckenlokomotive, D_h = dieselhydraulische Elektrolokomotive, ET = elektrische Triebwagen und Triebzüge							

Tabelle 3-1: Zusammenfassung von möglichen Lärmquellen von Schienenfahrzeugen

4 Prinzipielle Möglichkeiten der Lärmreduzierung

Grundsätzlich gibt es zwei Methoden konstruktiv den Lärm zu mindern. Man kann den Lärm entweder in seiner Entstehung an der Quelle oder am Ausbreitungsweg vermindern.



Im Folgenden werden diese beiden prinzipiellen Möglichkeiten näher beschrieben.

4.1 Primäre Lärmminderung

Durch primäre Lärmminderungsmassnahmen wird die Generierung von Lärm eingeschränkt. Diese Reduktion der Anregung kann entweder durch konstruktive Änderungen an lärmintensiven Komponenten (z.B. Getriebeverzahnung) oder durch Einsatz von prinzipiell leiseren Aggregaten oder lärmärmeren Betriebsweisen (z.B. Änderung der Ansteuerung) erreicht werden. Ziel ist es, möglichst stetige Prozesse zu realisieren und schlagartige Änderungen zu vermeiden.
Primäre Lärmminderungsmassnahmen können sehr unterschiedlich ausgestaltet sein, deshalb wird darauf verzichtet, theoretisch weiter darauf einzugehen. Im **Abschnitt 7** werden konkrete primäre Lärmminderungsmassnahmen thematisiert.

4.2 Sekundäre Lärmminderung

Mit sekundären Lärmminderungsmassnahmen wird der generierte Lärm am Ausbreitungsweg durch Dämpfung, Absorption oder Entdröhnung reduziert. Dabei wird zwischen Massnahmen gegen Luft- und Körperschall unterschieden. Der durch eine Lärmquelle entstehende Luftschall kann entweder durch Dämmung oder Absorption vermindert werden. Körperschallübertragung kann prinzipiell durch Dämmung oder Entdröhnung vermindert werden. Im Folgenden werden die einzelnen theoretischen Möglichkeiten näher beschrieben.

4.2.1 Luftschalldämmung

Durch Versperren der unmittelbaren Schallausbreitungsrichtung kann der Schalldurchgang zwischen abgetrennten Räumen vermindert werden (siehe **Abbildung 4-1**). Dabei werden hohe Frequenzen besser zurückgehalten als tiefe Frequenzen. Je mehr Flächen-

masse die Dämmwand aufzuweisen hat, umso höher ist die Dämmwirkung. Sehr effektiv (Nutzen bezogen auf Gewicht) sind zweischalige Wände.

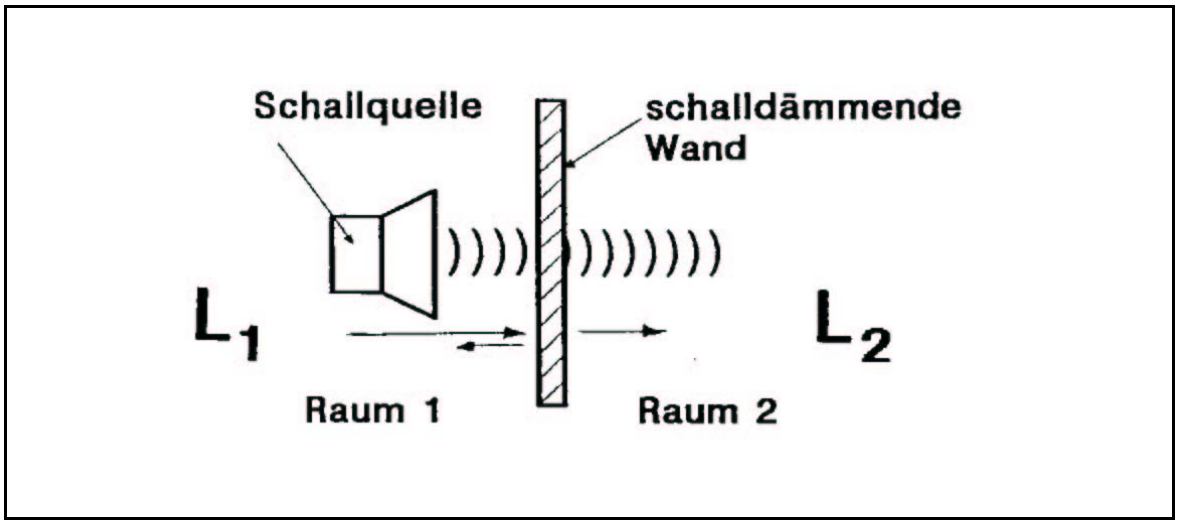


Abbildung 4-1: prinzipielle Wirkungsweise der Luftschalldämmung

Die Methode der Luftschalldämmung kann bei Schienenfahrzeugen auf zwei Wegen umgesetzt werden. Es können die Strecken mit Lärmschutzwänden ausgerüstet werden. Damit kann die unmittelbare Schallausbreitung neben der Strecke vermindert werden. Wenn aber die Lärmquellen auf unterschiedlichen Höhen angeordnet sind (Unterflurbereich, Maschinenraum, Dachbereich), so verschwindet der Nutzen der Lärmschutzwände teilweise. Oder sie müssen sehr hoch gebaut werden, um einen ausreichenden Lärmschutz für alle Fahrzeuge zu erreichen.
Eine andere Variante ist, Luftschalldämmung auf dem Fahrzeug vorzunehmen. Man kann lärmintensive Komponenten mit einer Kapselung versehen oder den Maschinenraum schalldicht ausführen. Notwendige Durchlässe, z.B. für Kühlluftzufuhr, müssen als Schalldämpfer ausgeführt werden, um den Dämmungseffekt nicht wieder zu verlieren.
Der durch den Rad-Schiene-Kontakt erzeugte Lärm kann durch Schürzen im Drehgestellbereich reduziert werden.

4.2.2 Luftschallabsorption

Mit Luftschallabsorption wird die Umwandlung von Schallenergie in Wärme bezeichnet. Dadurch wird der von einer Schallquelle erzeugte Schall durch Absorptionsmaterial vermindert (siehe **Abbildung 4-2**). Die Schallreduktion ist abhängig von der Dicke des Absorptionsmaterial. Je dicker das Absorptionsmaterial ist, umso tiefere Frequenzen werden beeinflusst.
Als Absorptionsmaterial sind am besten Faserplatten, Mineralwolle, Glaswolle oder Schaumstoffe geeignet. Die Absoprtionskörper sollten möglichst offenporig und grossvolumig sein.
Das Reduktionspotential, das durch Absorptionsmassnahmen erzielt werden kann, ist meist zwar klein (abhängig von der Frequenz: 2 bis 10 dB), allerdings sind die Absoprtionsmaterialien leicht und kostengünstig. Ein Nachteil beim Einsatz von Ab-

sorbtionsmaterialien ist, dass das Material ein bestimmtes Brandverhalten erfüllen muss. In der Regel widersprechen sich aber die Zielsetzungen des Brandverhaltens und des akustischen Verhaltens.
Bei den Absorptionsmaterialdicken, wie sie in Fahrzeugen eingebaut werden, werden Frequenzen oberhalb 1500 Hz absorbiert.

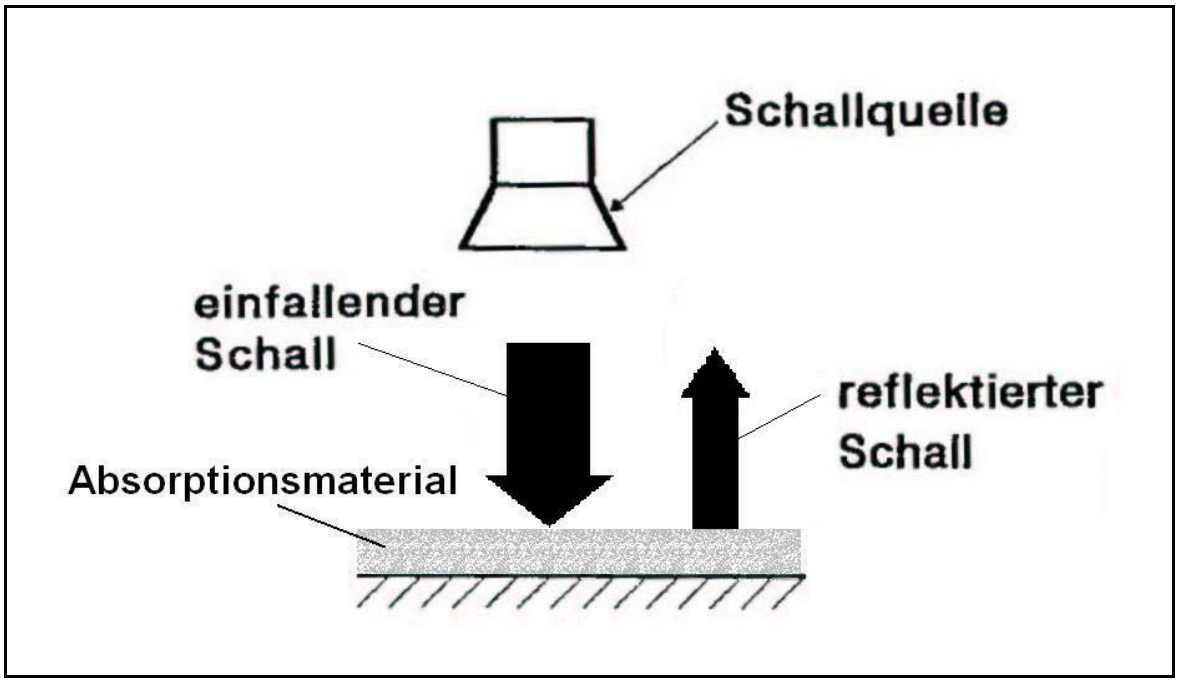


Abbildung 4-2: prinzipielle Wirkungsweise der Luftschallabsorption

In elektrischen Triebfahrzeugen wird Absorptionsmaterial beispielsweise zur Verminderung von Ventilationsgeräuschen verwendet.

4.2.3 Körperschalldämmung

Durch Körperschalldämmung wird die Körperschallübertragung durch elastische Befestigungen oder Abstützungen verhindert (siehe **Abbildung 4-3**). Dadurch wird unterbunden, dass weitere Komponenten zu Strukturschwingungen und damit zu Luftschall angeregt werden.

Bei Triebfahrzeugen wird die Körperschalldämmung von Aggregaten durch Halterungen und Abstützungen aus visco-elastischen Material realisiert. Um die Schallübertragung von Radsatz auf Drehgestell oder vom Drehgestell auf den Aufbau zu verhindern, können Gummifedern statt metallische Schraubenfedern oder Gummizwischenlagen eingebaut werden. Bei Passagierfahrzeugen ist die Luftfederung eine Lösung. Zwischen Drehgestell und Aufbau kann es aber noch weitere Körperschallbrücken, wie kastengesteuerte Radiallenker, Wankstützen etc. geben.

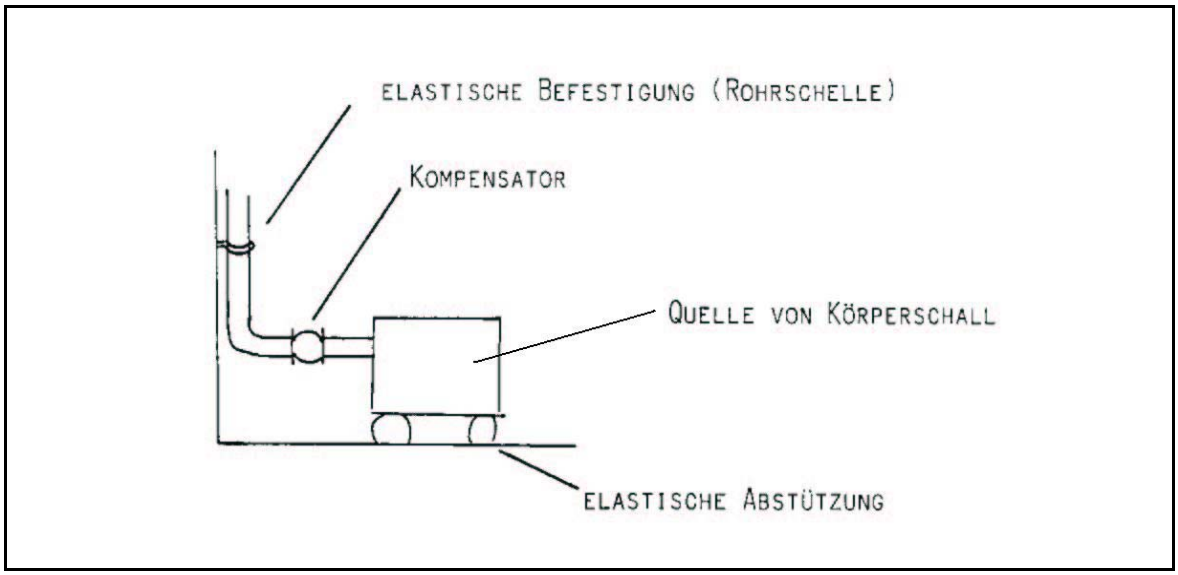


Abbildung 4-3: prinzipielle Wirkungsweise der Körperschalldämmung

4.2.4 Entdröhnung

Durch Entdröhnung werden Strukturschwingungen gedämpft. Die Dämpfung verringert die Körperschallamplituden und dadurch wird auch weniger Luftschall abgestrahlt. Dies kann entweder durch an sich kleine Flächen erreicht werden, weil diese weniger schwingfähig sind. Kleine Flächen können beispielsweise durch Lochblech realisiert werden. Eine andere Variante ist, Flächen aus Aluminium oder Stahl mit aufspritzbaren oder klebbaren wärmeisolierenden Dämpfungsmaterial zu versehen (siehe **Abbildung 4-4**).

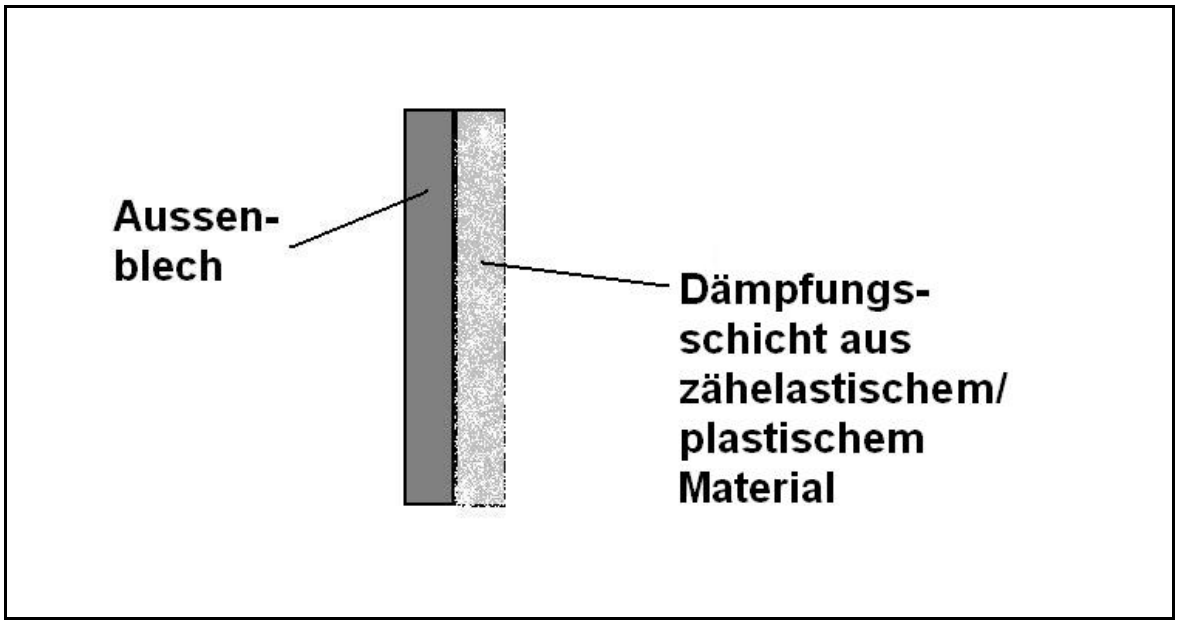


Abbildung 4-4: prinzipielle Wirkungsweise der Entdröhnung

Im Schienenfahrzeugbereich werden beispielsweise Lokomotivkasten durch Aufspritzen von Belägen entdröhnt. Auch gibt es Radschallabsorber, die auf diesem Prinzip beruhen.

5 Untersuchungsrelevante Betriebszustände

Derzeit gibt es zwei Regelwerke, die für Aussenlärmmessungen im konventionellen Schienenverkehr relevant sind. Es existieren die EN ISO 3095 [5] und die TSI CR NOISE [6], die im Rahmen der europäischen Harmonisierung der Normen immer mehr an Bedeutung gewinnt.

5.1 Untersuchungsrelevante Betriebszustände nach EN ISO 3095 [5]

Nach EN ISO 3095 [5] sind akustische Aussenschallmessungen am stehenden, mit konstanter Geschwindigkeit fahrenden, anfahrenden und bremsenden Fahrzeug durchzuführen. Zudem sind nach EN ISO 3381 [7] Schallpegelmessungen im Fahrzeuginnenraum vorgesehen, auf die aber in dieser Studie nicht weiter eingegangen wird.

5.1.1 Messung am stehenden Fahrzeug

Die massgebende Messgrösse für Schalldruckpegelmessungen am stehenden Fahrzeug ist der A-bewertete äquivalente Dauerschalldruckpegel $L_{pAeq,T}$ für eine Messdauer T von 20 s (in der Regel). Das Mikrofon wird an verschiedenen Punkten auf jeder Fahrzeugseite in einem Abstand von 7.5 m von der Gleismitte in einer Höhe von 1.2 m über der Schienenoberkante positioniert (siehe **Abbildung 5-1**). Zusätzlich ist eine Mikrofonposition in einer Höhe von 3.5 m erforderlich, wenn sich Lärmquellen im oberen Bereich des zu prüfenden Fahrzeugs befinden. Jede Messung muss dreimal wiederholt werden.

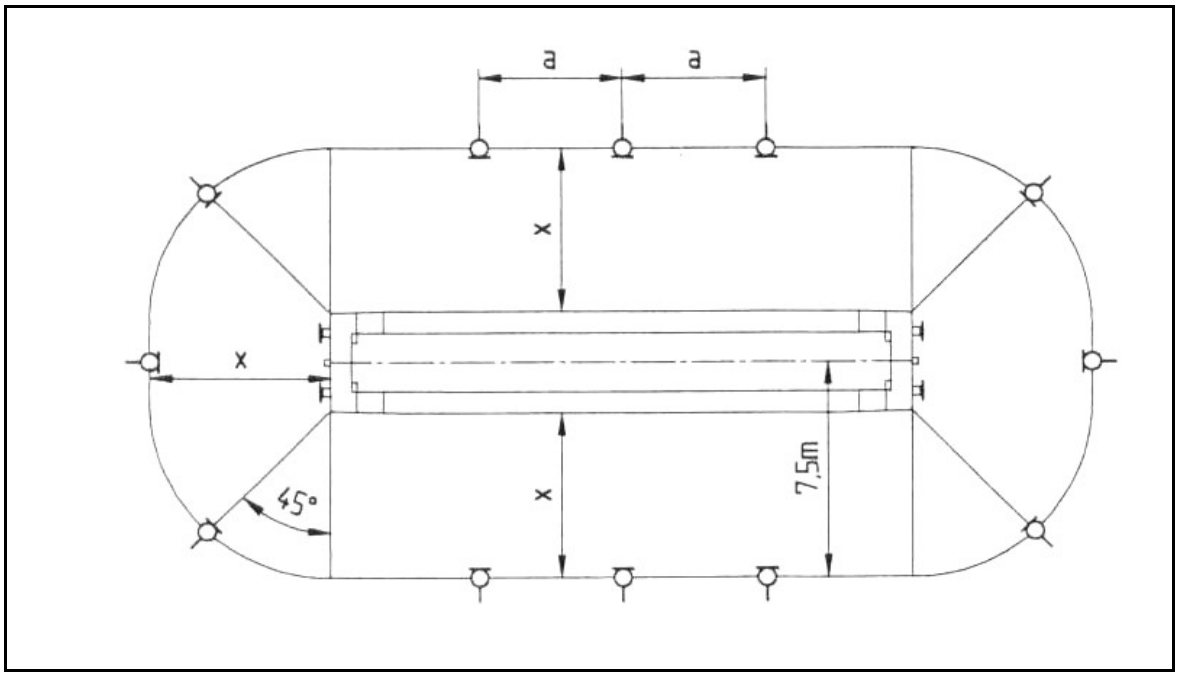


Abbildung 5-1: Mikrofonpositionen für Messungen am stehenden Fahrzeug (Bild aus [5])

Bei elektrischen Triebfahrzeugen müssen alle Hilfsaggregate, die im Stillstand betrieben werden können, unter Volllast in Betrieb sein.

Bei Triebfahrzeugen mit Verbrennungsmotor müssen folgende zwei Betriebszustände im Stillstand untersucht werden:

- Die Maschinenanlage arbeitet im Leerlauf ohne Last. Lüfter mit niedrigster Drehzahl, Hilfsaggregate unter minimaler Last. Der Kompressor arbeitet nicht.
- Die Maschine läuft ohne Last mit höchstmöglicher Drehzahl (beschränkt durch Drehzahlbegrenzer). Lüfter mit höchstmöglicher Drehzahl, Hilfsaggregate arbeiten mit Nennlast und der Kompressor unter Volllast.

5.1.2 Messung am Fahrzeug mit konstanter Fahrgeschwindigkeit

Für mit konstanter Geschwindigkeit vorbeifahrende Züge ist die entscheidende Messgrösse der Vorbeifahrtsexpositionspegel TEL und für Zugteile der A-bewertete äquivalente Dauerschalldruckpegel $L_{pAeq,T}$. Die Mikrofone müssen bei Zugkompositionen über 50 m Länge in einem Abstand von 25 m von der Gleismitte in einer Höhe von 3.5 m positioniert sein (siehe **Abbildung 5-2**). In allen anderen Fällen muss in einem Abstand von 7.5 m von der Gleismitte gemessen werden.

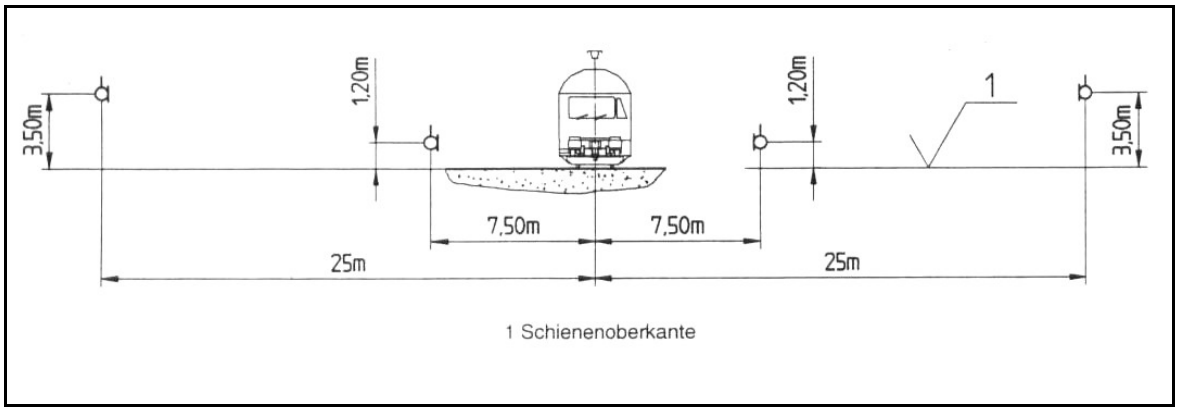


Abbildung 5-2: Mikrofonpositionen für Messungen am vorbeifahrenden Fahrzeug (Bild aus [5])

Es sind jeweils drei Schalldruckpegelmessungen bei 100%, 75% und 50% der maximalen Nenngeschwindigkeit durchzuführen. Die Triebfahrzeuge sind mindestens mit der Leistung zu betreiben, die für die Erhaltung der Fahrgeschwindigkeit erforderlich ist.

5.1.3 Messung am anfahrenden Fahrzeug

Für Schalldruckpegelmessungen am beschleunigenden Fahrzeug ist die ausschlaggebende Messgrösse der AF-bewertete maximale Schalldruckpegel $L_{pAFmax,T}$. Die Messdauer beginnt, wenn die Stirnseite des Fahrzeugs 20 m von der Mikrofonposition entfernt ist, und endet, wenn die Rückseite 20 m hinter der Mikrofonposition ist. Die Mikrofone müssen in einem Abstand von 7.5 m von der Gleismitte in einer Höhe von 1.2 m über der Schienenoberkante und 20 m vor der Fahrzeugvorderseite aufgestellt werden. (siehe **Abbildung 5-3** und **Abbildung 5-4**). Liegen wichtige Schallquellen im oberen Bereich des Fahrzeugs, dann ist der Schalldruckpegel auch in einer Höhe von 3.5 m über der Schienenoberkante zu messen.

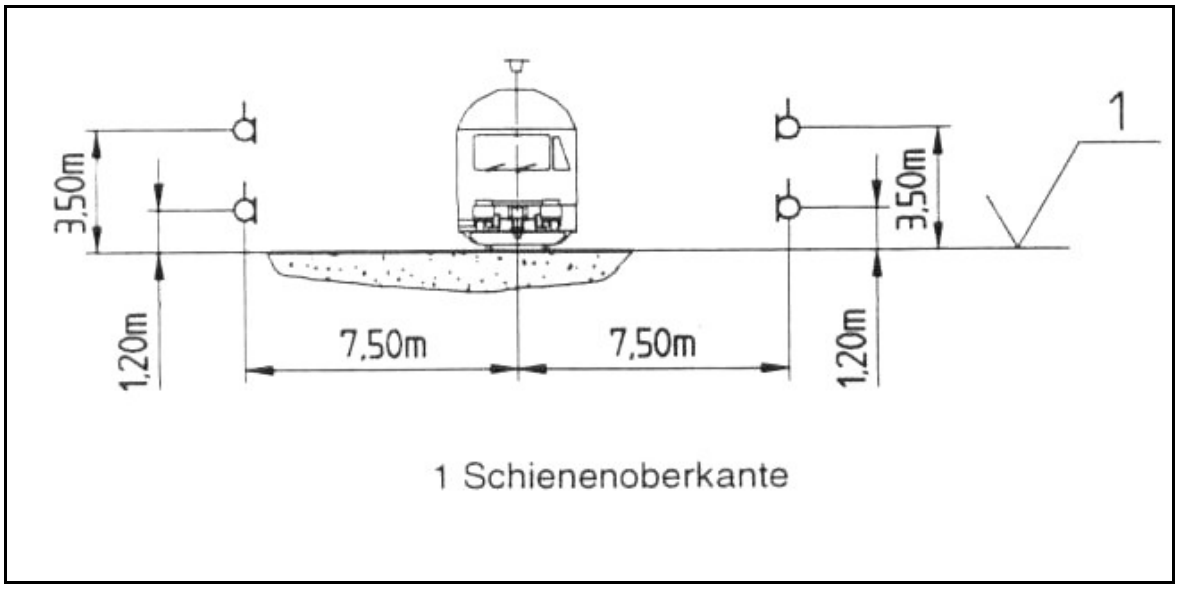


Abbildung 5-3: Mikrofonpositionen (quer) für Messungen am anfahrenden Fahrzeug (Bild aus [5])

Bei Triebzügen mit überwiegend angetriebenen Radsätzen sind zusätzlich Mikrofone am Anfahrpunkt der Fahrzeugstirnseite zu positionieren.

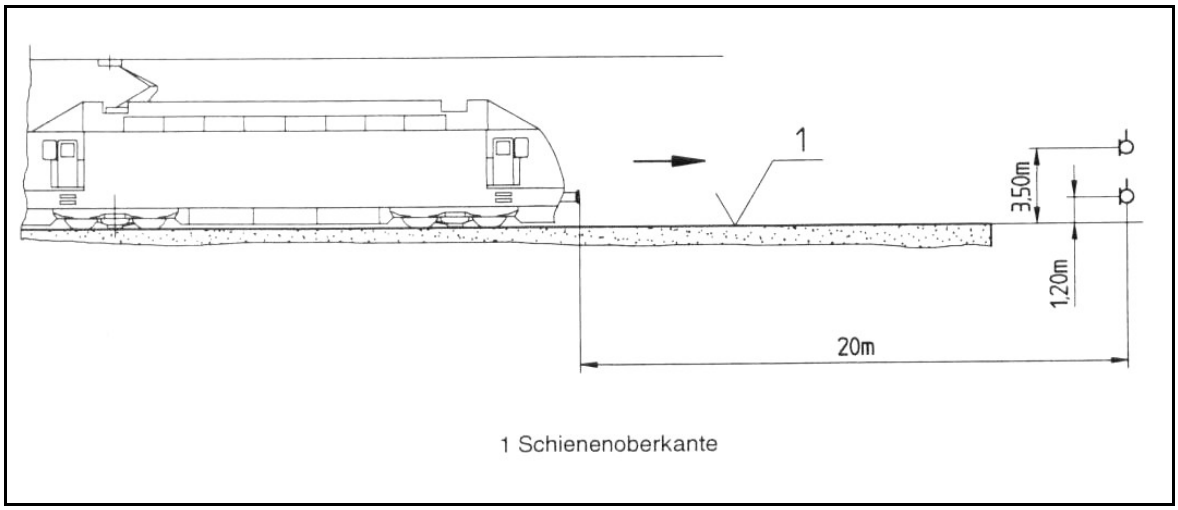


Abbildung 5-4: Mikrofonpositionen (längs) für Messungen am anfahrenden Fahrzeug (Bild aus [5])

Die Messung am anfahrenden Fahrzeug ist mit maximaler Zugkraft ohne durchdrehende Räder dreimal durchzuführen. Lokbespannte Züge sind mit maximaler Beschleunigung bei Betrieb aller Hilfsaggregate anzufahren. Triebzüge mit überwiegend angetriebenen Achsen sind bis 30 km/h zu beschleunigen und dann bei dieser Geschwindigkeit konstant zu fahren.

5.1.4 Messung am bremsenden Fahrzeug

Die Messgrösse bei Messungen am bremsenden Fahrzeug ist wie bei den Messungen am anfahrenden Fahrzeug der AF-bewertete maximale Schalldruckpegel $L_{pAFmax,T}$. Die Mikrofone sind an der Stelle zu positionieren, an der der Bremsvorgang beginnt, und an

der Stelle, die einen halben Drehgestellabstand vor dem Fahrzeug liegt (siehe **Abbildung 5-5**).

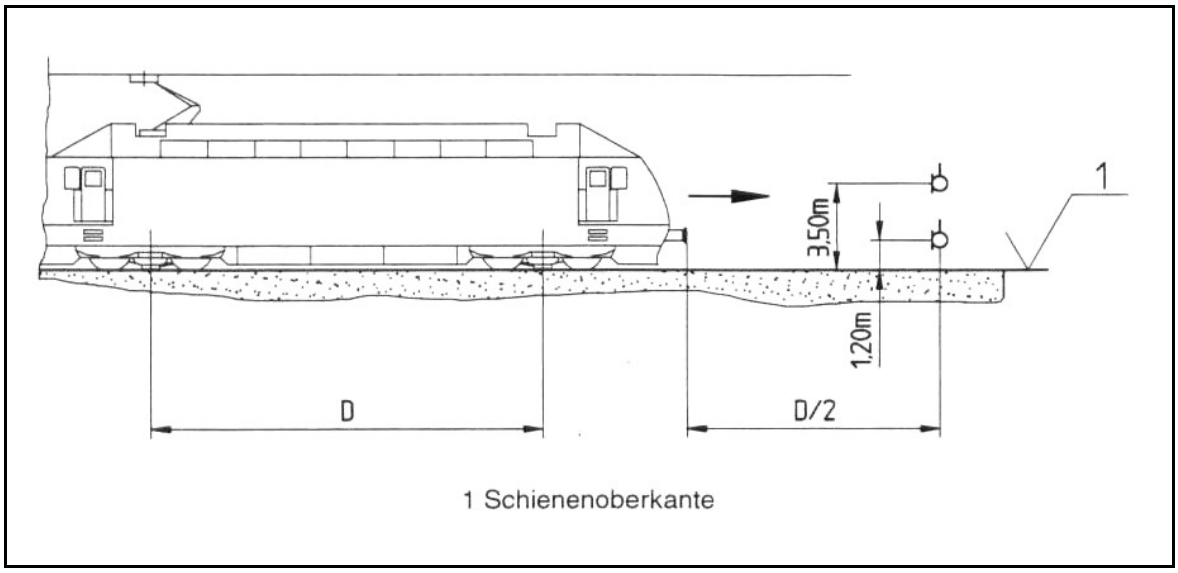


Abbildung 5-5: Mikrofonpositionen (quer) für Messungen am bremsenden Fahrzeug (Bild aus [5])

Die Messung ist dreimal mit maximaler Bremskraft ohne durchrutschende Räder durchzuführen. Das Fahrzeug muss sich anfangs mit einer konstanten Geschwindigkeit von 30 km/h bewegen und beim Passieren der ersten Mikrofonposition bis zum Stillstand abgebremst werden.
Die Messung am bremsenden Fahrzeug hat aber keine praktische Bedeutung, weil schlecht reproduzierbar.

5.2 Untersuchungsrelevante Betriebszustände nach TSI CR NOISE [6]

Nach TSI CR NOISE [6] sind akustische Schallpegelmessungen am stehenden, anfahrenden und mit konstanter Geschwindigkeit fahrenden Fahrzeug erforderlich. In dieser Vorschrift sind auch Schalldruckpegelmessungen im Innenraum des Fahrzeugs definiert, diese werden aber in dieser Studie nicht berücksichtigt.

5.2.1 Messung am stehenden Fahrzeug

Messgrösse für Messungen am stehenden Fahrzeug ist der A-bewertete äquivalente Dauerschalldruckpegel $L_{pAeq,T}$ für eine Messdauer von 60 s. Die Mikrofone sind auf jeder Fahrzeugseite in 7.5 m Abstand auf 1.2 m über Schienenoberkante um das Fahrzeug verteilt, wie in EN ISO 3095 [5] beschrieben (siehe **Abbildung 5-1**), zu positionieren. Für den Vergleich mit dem Grenzwert wird der energetische Mittelwert aller Messpunkte berechnet.
Ablagerungen an den Gittern, Filtern und Lüftern des Fahrzeugs müssen vor den Messungen entfernt werden. Die Traktionsausrüstung soll so betrieben werden, wie sie im Stillstand auftreten kann, und die Hilfsaggregate sollen in normalem Betrieb arbeiten, wie

er bei 20°C Aussentemperatur erforderlich ist. Der Bremsluftkompressor muss bei den Messungen im Stillstand nicht betrieben werden.

5.2.2 Messung am anfahrenden Fahrzeug

Die massgebende Messgrösse am anfahrenden Fahrzeug ist der AF-bewertete maximale Schalldruckpegel $L_{pAFmax,T}$ auf einer Fahrzeugseite in 7.5 m Abstand auf 1.2 m über Schienenoberkante. Die Messdauer und die Mikrofonpositionen sind analog zu den Vorgaben in EN ISO 3095 [5] gefordert (siehe **Abbildung 5-3** und **Abbildung 5-4**).
Die Gitter, Filter und Lüfter am Fahrzeug müssen vor der Messung am beschleunigenden Fahrzeug vom Schmutz befreit werden. Alle Hilfsaggregate sollen unter der normalen Betriebslast betrieben werden, wie sie bei 20°C Aussentemperatur auftritt. Der Schallpegel des Bremsluftkompressors muss bei der Messung nicht beachtet werden. Die Messungen müssen mit maximaler Zugkraft auf trockenen Schienen ohne Schleudern und Makroschlupf durchgeführt werden.

5.2.3 Messung am mit konstanter Fahrgeschwindigkeit vorbeifahrenden Fahrzeug

Bei Messungen am mit konstanter Fahrgeschwindigkeit vorbeifahrenden Fahrzeug ist der A-bewertete äquivalente Dauerschalldruckpegel $L_{pAeq,Tp}$ die relevante Messgrösse. Die Mikrofone sind in einem Abstand von 7.5 m von der Gleismitte in einer Höhe von 1.2 m über Schienenoberkante zu positionieren (siehe **Abbildung 5-2**, aber nur im 7.5-m-Abstand). Es darf kein Gleis zwischen dem Messgleis und der Messstelle liegen.
Die Schalldruckpegelmessungen sind bei 80 km/h und bei maximaler Geschwindigkeit durchzuführen. Vor den Messungen sind die Gitter, Filter und Lüfter am Fahrzeug von Verschmutzungen zu reinigen. Das Fahrzeug ist an der Messstelle mit minimaler Zugkraft zu bewegen, wobei sichergestellt ist, dass die Geschwindigkeit konstant gehalten wird.

Grenzwerte für die geforderten Betriebszustände

In TSI CR NOISE [6] sind Grenzwerte für die oben beschriebenen Betriebszustände definiert. In **Tabelle 5-1** sind diese Grenzwerte zusammengefasst.

Fahrzeugtyp	Stillstand $L_{pAeq,T}$	Anfahrt L_{pAFmax}	Vorbeifahrt $L_{pAeq,T}$	
			80 km/h	Vmax
Elektro-Lokomotive (Leistung < 4.5 MW)	75	82	85	abhängig von Vmax[1]
Elektro-Lokomotive (Leistung > 4.5 MW)		85		
Diesel-Lokomotive (Leistung < 2.0 MW)	75	86	85	abhängig von Vmax[1]
Diesel-Lokomotive (Leistung > 2.0 MW)		89		
Elektrische Triebwagen und Triebzüge	68	82	81	abhängig von Vmax[1]

Tabelle 5-1: Grenzwerte für die unterschiedlichen Betriebszustände und Fahrzeugtypen

[1] Der Grenzwert für Maximalgeschwindigkeit wird abhängig von Vmax nach folgender Formel auf den Grenzwert für 80 km/h bezogen: $L_{pAeq,Tp}(80\ km/h) \leq L_{pAeq,Tp}(V) - 30 * \log (Vmax / 80\ km/h)$

5.3 Diskussion der untersuchungsrelevanten Betriebszustände

Beim Vergleich der zu untersuchenden Betriebzustände nach den beiden Normen EN ISO 3095 [5] und TSI CR NOISE [6] ist festzuhalten, dass das Lärmverhalten am bremsenden Fahrzeug nach der TSI CR NOISE [6] nicht untersucht werden muss. In der Praxis wurden Messungen am bremsenden Fahrzeug meist auch nicht durchgeführt, weil sie schlecht reproduzierbar sind. Auch wenn für die Geräuschemissionen am bremsenden Fahrzeug keine Grenzwerte einzuhalten sind, so muss trotzdem darauf geachtet werden, dass es am bremsenden Fahrzeug nicht zu Quietschgeräuschen kommt.
Die durch die TSI CR NOISE [6] mit Grenzwerten abgedeckten Betriebszustände sind in **Abbildung 5-6** dargestellt.

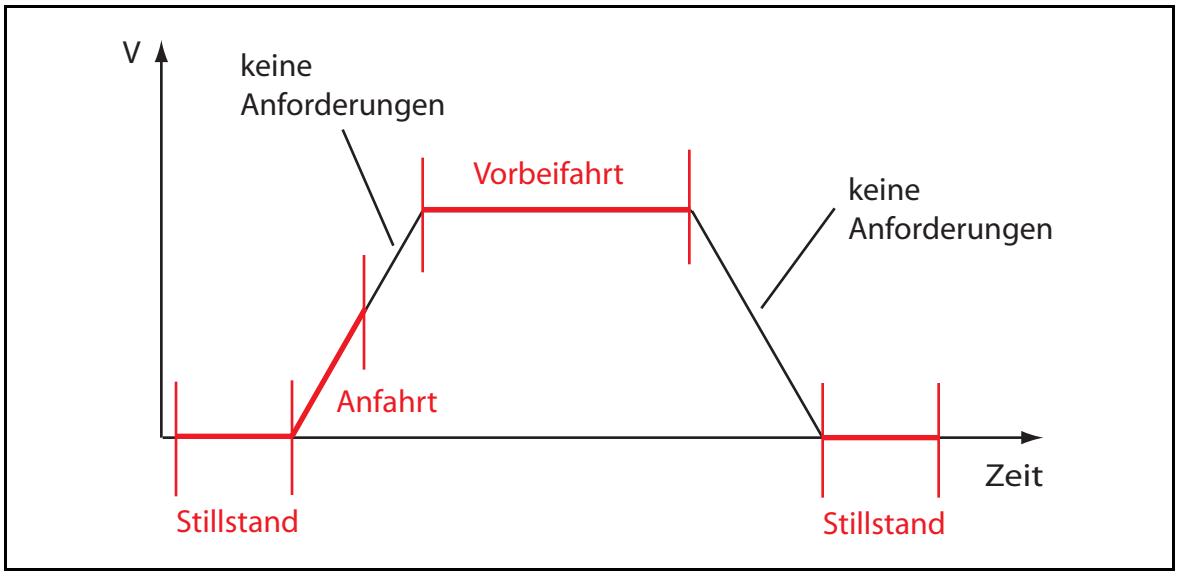


Abbildung 5-6: Durch die TSI CR NOISE [6] mit Grenzwerten abgedeckte Betriebszustände

Ein weiterer Unterschied zwischen den beiden Normen ist, dass bei den Messungen am stehenden und am anfahrenden Fahrzeug die Hilfsaggregate nicht mit maximaler Leistung betrieben werden müssen, sondern im typischen Betriebszustand bei 20°C Umgebungstemperatur. Bei Messungen am stehenden Fahrzeug wird in der TSI CR NOISE [6] gefordert, dass der Bremsluftkompressor nicht betrieben werden muss. Das kann dazu führen, dass die Einbaulösungen beim Kompressor schlechter werden könnten, wenn der eingeschaltete Kompressor nicht mehr Untersuchungsbestandteil der Lärmmessungen ist.

Die Definition „typische Betriebszustand bei 20°C Umgebungstemperatur“ bedeutet für das Klimagerät, dass es in der Regel nur im Lüftungsbetriebsmodus betrieben werden muss. Dass das Klimagerät nicht im Heizmodus betrieben wird, ist für das Lärmverhalten irrelevant, dass es aber nicht im Klimatisierungsmodus arbeitet, macht es in der Regel leiser, weil im Klimatisierungsmodus noch zusätzlich der Klimakompressor laufen würde.

Zudem wird in der TSI CR NOISE [6] über den Zustand des Kompressors für die Messungen bei Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit nichts ausgesagt. Bei normaler Fahrt in Beharrung wird keine Luft aus dem Kompressor verbraucht, daher ist dieser in diesem Zustand selten in Betrieb. Aus diesem Grund wird vorgeschlagen, die Messungen bei Fahrt im typischen Zustand, d.h. mit ausgeschaltetem Kompressor durchzuführen.

Grundsätzlich ist es jedoch klar positiv, wenn auch bei Typenprüfungen typische Betriebsbedingungen und nicht synthetische Betriebsbedingungen bewertet werden. Es erhöht die Chancen, dass Hersteller Massnahmen realisieren, die den Lärm im typischen Betrieb reduzieren.

Bei der Bestimmung der dominanten Lärmquellen für die einzelnen Fahrzeuge werden die Betriebszustände gemäss TSI CR NOISE [6] herangezogen, weil sie dem typischen Betriebsalltag näher kommen. Zusätzlich zu den in TSI CR NOISE [6] definierten Zuständen wird in **Abschnitt 6** das Lärmverhalten im Stillstand mit laufendem Kompressor untersucht.

6 Elektrische Triebfahrzeuge in der Schweiz und deren dominanten Lärmquellen

In dieser Studie wird das Geräuschemissionsverhalten von Triebfahrzeugtypen betrachtet, die in der Schweiz mit einer Stückzahl von über 20 existieren und regelmässig auf schweizerischen Normalspurnetz betrieben werden. Somit kann bei Umsetzung der vorgeschlagenen Massnahmen eine im ganzen Land schnell wirkende Lärmverringerung erreicht werden. Die Triebfahrzeugtypen werden in die Gruppen „Streckenlokomotiven" und „elektrische Triebwagen und Triebzüge" unterteilt. Berücksichtigt sind Fahrzeuge der Schweizerischen Bundesbahnen (SBB), der BLS Lötschbergbahn AG (BLS), vom Regionalverkehr Mittelland (RM), der Südostbahn (SOB), der Sihltal Zürich Uetliberg Bahn (SZU), der Regionalbahn THURBO (THURBO), von Transports Régionaux Neuchâtelois (TRN) und von Transports de Martigny et Régions (TMR).
Für die aufgeführten Fahrzeuge sind anschliessend für die in TSI CR NOISE [6] definierten Betriebszustände die typischerweise dominanten Lärmquellen zusammengestellt. Angaben dazu sind meist den Lärmabnahmeberichten der SBB entnommen.

6.1 Streckenlokomotiven

In **Tabelle 6-1** sind die wichtigsten Streckenlokomotiven der Schweiz zusammengefasst. Die aufgezählten Fahrzeugtypen sind in ausreichend grosser Stückzahl vorhanden und werden in der Schweiz weiträumig eingesetzt.
Die angegebenen Informationen zu den einzelnen Lokomotiven wurden Internetseiten der relevanten Bahnen bzw. der Herstellerfirmen entnommen.

Fahrzeugtyp	Baureihe	Art[2]	Bahn	V_{max}	Leistung	Inbetriebnahme	geplantes Einsatzende	Anzahl	Gesamt
Einheitslok	Re 4/4'', Re 420/1	P, G	SBB	140	4.7 MW	1964 – 1985	2020	271	420
	Re 4/4'', Re 425	P, G	BLS	140	5.0 MW	1964 – 1983		35	
	Re 4/4'', Re 430	G	SBB	125	4.7 MW	1967 – 1971	2020	21	
	Re 4/4'', Re 436	P. G	RM	120	4.7 MW	1969, 1983		5	
	Re 6/6, Re 620	G	SBB	140	7.8 MW	1972 – 1980		88	
S-Bahn Zürich	Re 450	P	SBB	130	3.2 MW	1989 – 1997	2030	115	129
	KTU, Re 456	P, G	RM[3]	130	3.0 MW	1993		2	
		P, G	SOB	130	3.0 MW	1987		6	
		P, G	SZU	130	3.0 MW	1987, 1993		6	
Lok 2000	Re 460	P, G	SBB	200	6.1 MW	1991 – 1996	2030	119	137
	Re 465	P, G	BLS	200	6.4 MW	1994 – 1997		18	
Eurosprinter[4]	Re 474	G	SBB	140	6.4 MW	2003 –2004		6	6

[2] Das jeweilige Einsatzgebiet ist in der Tabelle mit P (Personenverkehr) und G (Güterverkehr) angegeben.
[3] Diese zwei Lokomotiven sind derzeit an SOB vermietet.
[4] Weitere Fahrzeuge dieser Lokomotivfamilie verkehren durch ausländische Bahnunternehmen (z. B. Deutsche Bahn BR 189, Siemens Dispolok) in der Schweiz.

Fahrzeugtyp	Baureihe	Art	Bahn	V_{max}	Leistung	Inbetriebnahme	geplantes Einsatzende	Anzahl	Gesamt
TRAXX[5]	Re 481[6]	G	SBB	140	4.2 MW	2000		6	94
	Re 482	G	SBB	140	5.6 MW	2002 – 2006		50	
	Re 484	P, G	SBB	140	5.6 MW	2004 – 2005		18	
	Re 485	G	BLS	140	5.6 MW	2002 - 2004		20	
Diesel-Streckenlok	Am 841	G	SBB	80	0.9 MW	1996 – 1997		40	113
	Am 843	G	SBB	100	1.5 MW	2003 – 2007		73	
6-Achslok	Ae 6/6, Ae 610	G	SBB	125	4.3 MW	1952 – 1966		112	112

Tabelle 6-1: Übersicht Streckenlokomotiven

Betrachtet werden in diesem Bericht sechs verschiedene Lokomotivtypen. Die Fahrzeuggruppe „Einheitslok“ ist mit einer Stückzahl von 420 die meist verbreitetste Lokomotive in der Schweiz. Sie besteht aus Lokomotiven des Typs Re 420 bis Re 436 und diese werden bei der SBB, BLS und RM eingesetzt. Die Re 620 wird auch zu dieser Fahrzeuggruppe eingruppiert, da sie trotz ihrer sechs Achsen einen sehr ähnlichen Aufbau wie die vierachsige Re 420 hat.
Die zweite Gruppe bilden die Lokomotiven für die S-Bahn Zürich, die ab 1989 von der SBB beschafft wurden, und die KTU-Loks (KTU = konzessionierte Transportunternehmungen). Die KTU-Loks Re 456, die von mehreren Privatbahnen in kleinen Stückzahlen beschafft wurden, sind technisch sehr artverwandt mit der S-Bahn Zürich Re 450.
1991 wurde für den Fern- und Güterverkehr die Mehrzwecklokomotive Re 460 (SBB) bzw. Re 465 (BLS) in grosser Stückzahl beschafft. Diese Lokomotiven sind unter dem Namen Lok 2000 bekannt.
In jüngster Zeit wurden durch die SBB bzw. BLS moderne Mehrsystemlokomotiven von Siemens (Eurosprinter-Familie; Re 474) und von Bombardier Transportation (TRAXX-Familie; Re 481 – Re 485) beschafft. Diese Lokomotivtypen werden auch vermehrt von ausländischen Betreibern in der Schweiz eingesetzt. Deshalb ist auch die Siemens Eurosprinter Lokomotive Re 474 in diese Übersicht aufgenommen worden, obwohl derzeit in der Schweiz nur sechs davon existieren.
Die Diesel-Streckenlokomotiven Am 841 und Am 843 wurden als eigenständige Gruppe in diese Untersuchung aufgenommen, weil sie in grosser Stückzahl von der SBB beschafft wurden und zunehmend auch im Streckendienst eingesetzt werden.
Die Altbaulokomotiven vom Typ Ae 6/6 werden nicht weiter berücksichtigt, da ihre Ausmusterung bevorsteht.

In **Tabelle 6-3** sind für jeden Streckenlokomotivtyp und für jeden nach TSI CR NOISE [6] zu untersuchenden Betriebszustand die typischerweise dominanten Lärmquellen und die maximalen Schalldruckpegel angegeben.

[5] Weitere Fahrzeuge dieser Lokomotivfamilie verkehren durch ausländische Bahnunternehmen (z. B. Deutsche Bahn BR 185) in der Schweiz.
[6] Derzeit werden die sechs Lokomotiven des Typs Re 481 ausschliesslich in Deutschland eingesetzt.

Die dominanten Lärmquellen jedes Fahrzeugtyps sind im folgenden näher beschrieben:

- **Einheitslok**
  Bei der Fahrzeugtypengruppe „Einheitslokomotive“ ist die dominierende Lärmquelle ab einer Geschwindigkeit von 20 km/h bis zur maximalen Geschwindigkeit (140 km/h) das Rollgeräusch des Rad-Schiene-Kontakts. Dies haben Vergleichsmessungen im Stillstand gezeigt, bei denen die Ventilationsaggregate selbst bei Volllast kleinere Immissionen erzeugten als beim anfahrenden Fahrzeug der Rad-Schiene-Kontakt [8]. Zurückzuführen ist die Dominanz des Rad-Schiene-Kontaktgeräuschs darauf, dass diese Lokomotiven mit Graugussklotzbremsen ausgerüstet sind. Im Stillstand ist der Lärm der Ventilatoren die massgebende Lärmquelle. **Abbildung 6-1** zeigt eine Typenskizze der Lokomotive Re 420.

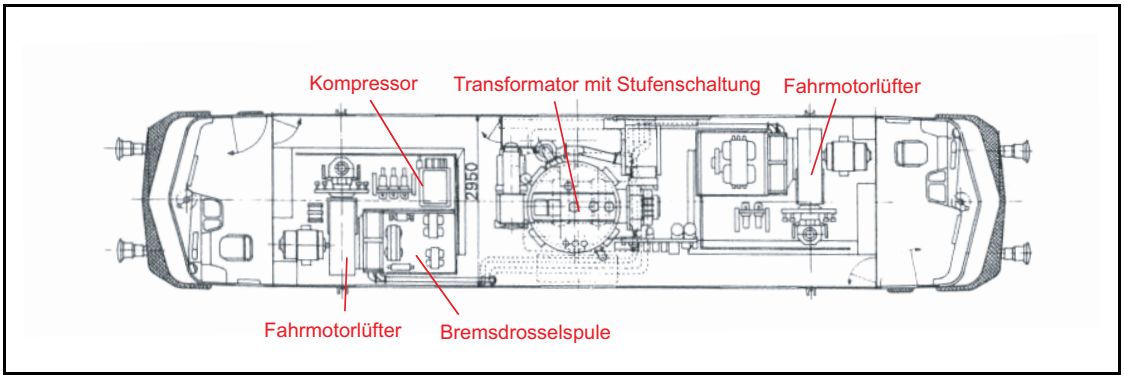


Abbildung 6-1: Typenskizze „Einheitslok“

- **S-Bahn Zürich**
  Bei der S-Bahn-Lokomotive Zürich (Re 450; ausgerüstet mit Sinterklotzbremsen) sowie bei der bauartähnlichen KTU-Lokomotive (Re 456; ausgerüstet mit Graugussklotzbremsen) dominieren als Lärmquelle im Stillstand die Lüftungsventilatoren. Dabei wird als normaler Betrieb im Sinn von den Vorgaben gemäss TSI CR NOISE [6] die Betriebsstufe 2 der Lüftung angenommen. Beim Anfahren werden die Schallpegelspitzen hauptsächlich durch das Getriebe- und Motorgeräusch erzeugt [9]. Wenn das Fahrzeug konstant bei 80 km/h oder bei vmax (= 130 km/h) betrieben wird, ist das Rollgeräusch des Rad-Schiene-Kontakts die dominierende Lärmquelle. In **Abbildung 6-2** ist die Lokomotive Re 450 mit den wichtigsten Aggregaten dargestellt.

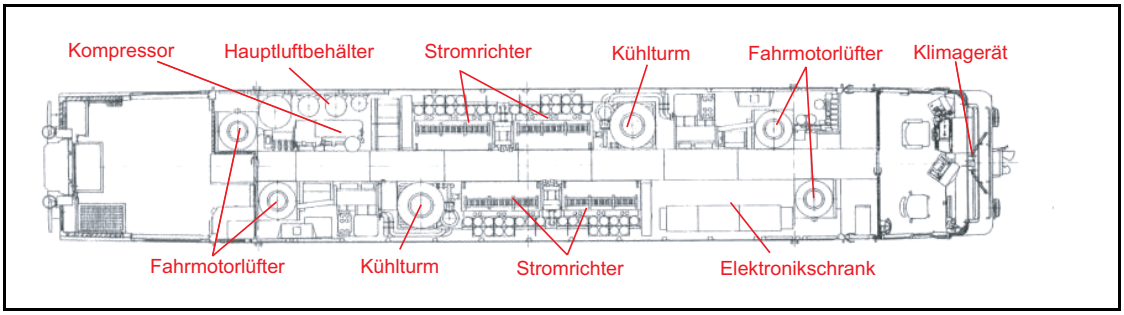


Abbildung 6-2: Typenskizze „S-Bahn-Zürich“

- **Lok 2000**

  Die Lok 2000 ist aufgrund ihrer Bauform und Verschalung an sich eine sehr lärmarme Lokomotive. Im Stillstand dominieren die Ventilatoren als Lärmquelle, wobei sie durch Dämmmaterialien sehr wenig Lärm nach aussen abgeben. Aktuell werden wegen Brandproblemen teilweise die Schallabsorber entfernt. Dies ist ohne grosse Nachteile bezüglich Lärm möglich, weil die höchste Lüfterstufe im Stillstand nie benutzt werden muss. Bei Fahrt wird das Lüftergeräusch durch das Rollgeräusch übertönt.

  Bei der Anfahrt werden die Geräusche von Motor und Getriebe massgebend. Wird das Fahrzeug mit einer konstanten Geschwindigkeit von 80 km/h oder 100 km/h betrieben, so macht sich das Rollgeräusch bemerkbar, wobei dieses durch die tief heruntergezogenen Lokomotivkasten im Drehgestellbereich sehr gut abgeschirmt wird. Zudem ist diese Lokomotive mit Sinterbremsklötzen ausgerüstet. Im Bereich der Höchstgeschwindigkeit[7] der Lok 2000 werden aerodynamische Luftströmungen zur dominanten Lärmquelle (Aufbau der Re 460 siehe **Abbildung 6-3**).

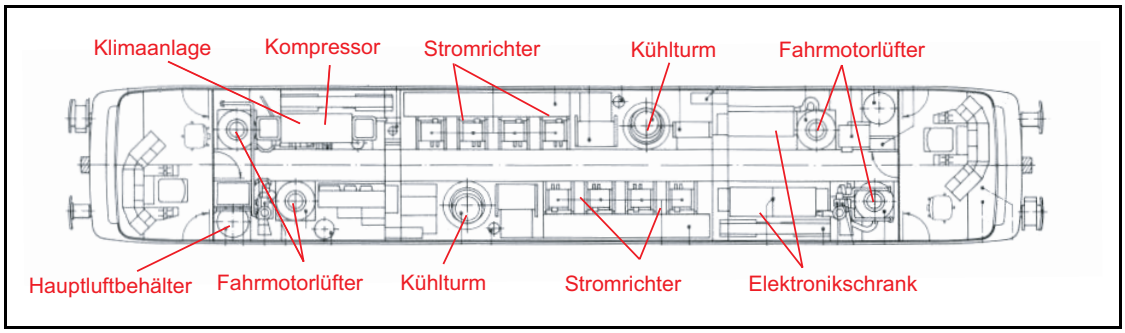


Abbildung 6-3: Typenskizze „Lok 2000“

- **Eurosprinter**

  Für die Fahrzeuge des Typs Eurosprinter von Siemens konnten keine Informationen eingeholt werden. Es kann aber angenommen werden, dass Fahrzeuge dieses Typs grundsätzlich lärmarme Fahrzeuge sind. Sie sind entsprechend dem Stand der Technik mit Radscheibenbremsen ausgerüstet. Der Aufbau ist in **Abbildung 6-4** dargestellt.

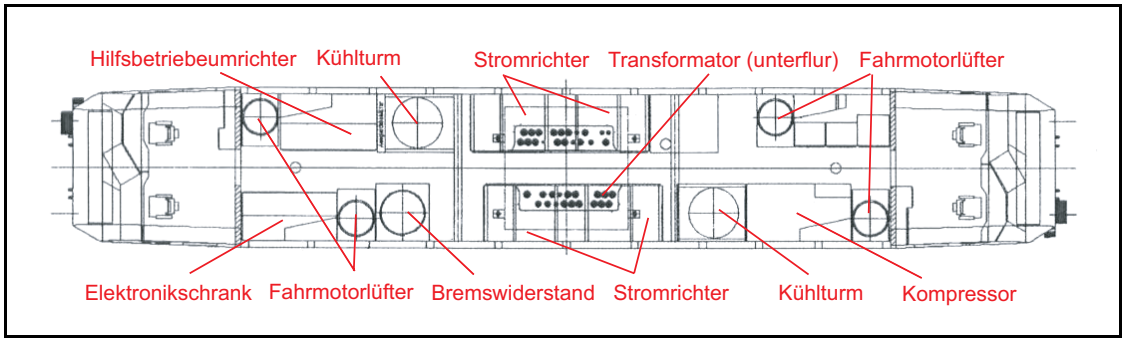


Abbildung 6-4: Typenskizze „Eurosprinter“

[7] theoretisch 230 km/h, die Loks werde aber in näherer Zukunft nur bis 200 km/h betreiben werden.

- **TRAXX**

  Lokomotiven der Familie TRAXX von Bombardier Transportation zeichnen sich durch ein ähnlich geringes Lärmverhalten wie die Lok 2000 aus. Bei dieser Lokomotive ist im Stillstand der Betrieb der Stromrichter sowohl für den Antrieb als auch für die Hilfsbetriebe die dominante Lärmquelle. Bei der Anfahrt ist der Motor und das Getriebe massgebend und bei Vorbeifahrt mit konstanter Geschwindigkeit ist das Rollgeräusch des Rad-Schiene-Kontakts dominierend.

  Die Einbautopologie der Aggregate in der Re 484 ist der **Abbildung 6-5** zu entnehmen. Fahrzeuge der TRAXX-Familie sind mit Radscheibenbremsen ausgerüstet.

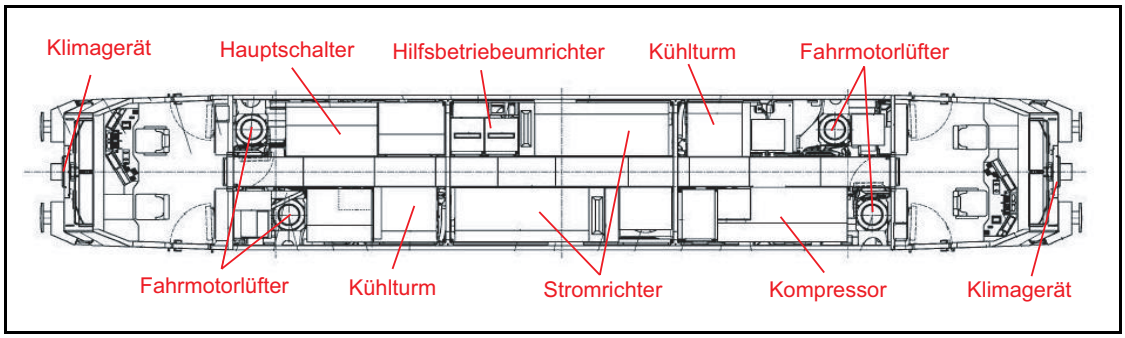


Abbildung 6-5: Typenskizze „TRAXX“

- **Diesel-Streckenlok**

  Die Diesellokomotive Am 843 von Vossloh ist mit einem schnelllaufenden 1.5-MW-starken Dieselmotor und mit einem hydrodynamischen Turbowendegetriebe mit verschleissfreier Bremse ausgestattet. Lokomotiven des Typs Am 841 arbeiten mit einer dieselelektrischen Leistungsübertragung. Im Stillstand ist bei diesen Lokomotivtypen der im Leerlauf betriebene Dieselmotor mit seinen Frischluftansaugstutzen und seiner Abgasanlage die dominante Lärmquelle. Wird das Fahrzeug beschleunigt, werden die Abgasanlage und die Lüfter im Lärmverhalten dominant. Bei konstanter Vorbeifahrt mit einer Geschwindigkeit von 80 km/h bzw. 100 km/h (= Vmax) dominiert das Rollgeräusch des Rad-Schiene-Kontakts. Der prinzipielle Aufbau der Lokomotive Am 841 ist in **Abbildung 6-6** dargestellt.

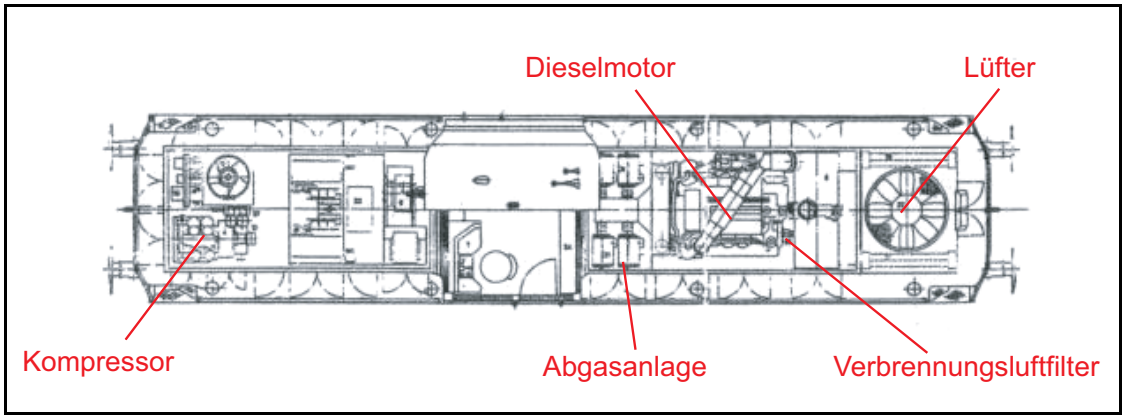


Abbildung 6-6: Typenskizze „Diesel-Streckenlok“

In **Tabelle 6-2** sind die für das Lärmverhalten besonders wichtigen Parameter, wie Raddurchmesser, Bremssystem oder Getriebeübersetzung, für die zuvor vorgestellten Lokomotiven zusammengefasst.

Fahrzeugtyp	Raddurchmesser (neu)	mech. Bremssystem	Getriebeübersetzung
Einheitslok	1260 mm	GG-Bremsklötze	1:2.636
S-Bahn Zürich	1100 mm	Sinterbremsklötze (Re 450) GG-Bremsklötze (Re 456)	1:6.055
Lok 2000	1100 mm	Sinterbremsklötze	1:3.667
Eurosprinter	1250 mm	Radscheibenbremsen[8]	1:6.294
TRAXX	1250 mm	Radscheibenbremsen	1:5.220
Diesel-Streckenlok	1100 mm (Am 841) 1000 m (Am 843)	Kunststoff-Bremsklötze (Am 841) Radscheibenbremsen (Am 843)	1:6.313 (Am 841) 1:5.607 (Am 843)

Tabelle 6-2: Zusammenfassung der für das Lärmverhalten wichtigen Fahrzeugparameter von den betrachteten Lokomotiven

Die in **Tabelle 6-3** genannten maximalen Schalldruckpegel für den Stillstand und für die konstante Vorbeifahrt sind in **Abbildung 6-7** grafisch dargestellt.

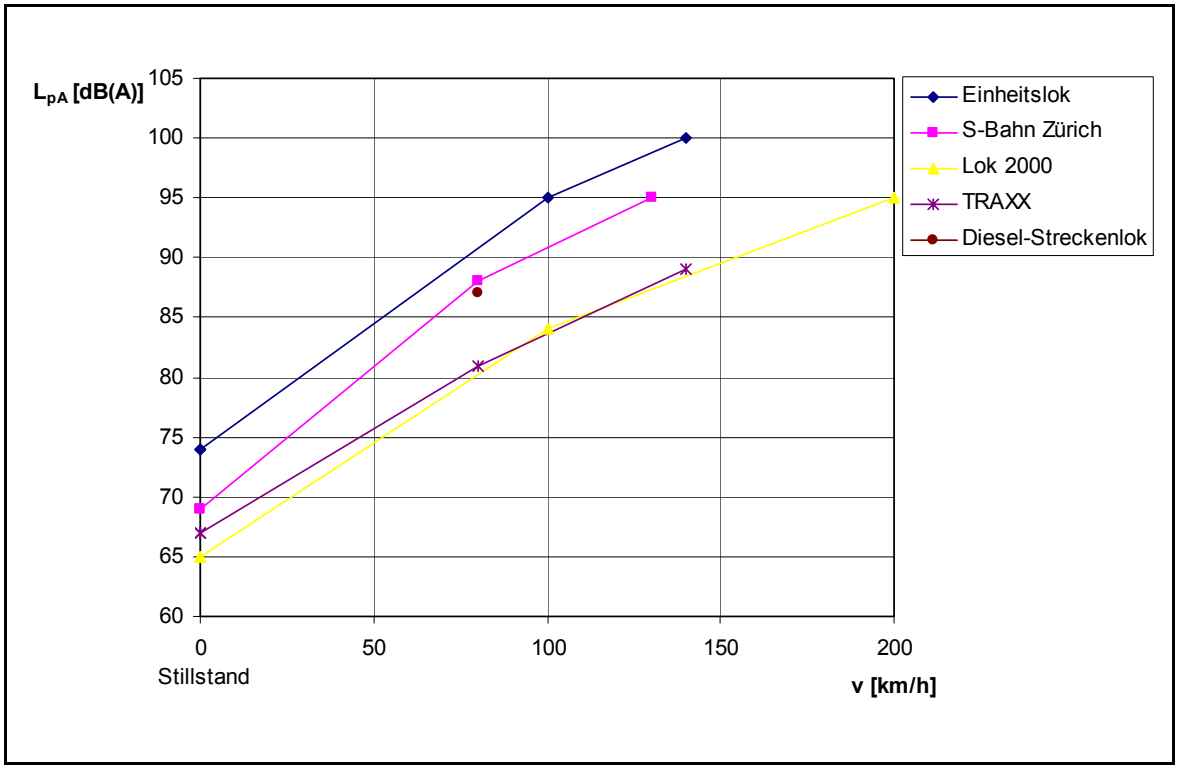


Abbildung 6-7: Schalldruckpegel (7.5 m Entfernung) von den betrachteten Streckenlokomotiven im Stillstand und bei Vorbeifahrt

[8] Zu der Fahrzeugfamilie „Eurosprinter“ gehören auch Fahrzeuge des Typs „Taurus“, die mit Scheibenbremsen auf einer eigenen Bremswelle ausgerüstet sind. Dieser Fahrzeugtyp wurde ursprünglich für die ÖBB entwickelt, wird aber von Privatbahnen auch in der Schweiz eingesetzt.

Fahrzeugtyp	Stillstand		Anfahrt	Vorbeifahrt		Quelle
	Normallast	mit Kompressor		80 km/h	Vmax	
Einheitslok	Ventilator (volle Leistung) 74 dB(A)	Keine Angaben vorhanden.	Rad-Schiene-Kontakt (Rollgeräusch) 84 dB(A)	Rad-Schiene-Kontakt (Rollgeräusch) 95 dB(A) bei 100 km/h	Rad-Schiene-Kontakt (Rollgeräusch) 100 dB(A) bei 140 km/h	SBB-Bericht: Lärm und Erschütterungen, 3. Zwischenbericht [8], SBB Typentest Lärmbericht [10]
S-Bahn Zürich	Ventilator (Stufe 2) 69 dB(A)	Kompressor (allein) 66 dB(A)	Stromrichter, Makroschlupfpfeifen 86 - 90 dB(A)	Rad-Schiene-Kontakt (Rollgeräusch) 88 dB(A)	Rad-Schiene-Kontakt (Rollgeräusch) 95 dB(A) bei 130 km/h	SBB Typentest Lärmbericht [11], SBB-Bericht USE 173, S-Bahn [9]
Lok 2000	Ventilator (Stufe 2) 65 dB(A)	Kompressor (allein) 62 dB(A)	Fahrmotor, Getriebe 75 – 78 dB(A)	Rad-Schiene-Kontakt (Rollgeräusch) 84 dB(A) bei 100 km/h	aerodynamische Strömungen 95 dB(A) bei 200 km/h	SBB-Bericht A015, Re 460 [12], ET-Veröffentlichung: Lärmdesign moderner Triebfahrzeuge [13]
Eurosprinter	Keine Angaben vorhanden.					
TRAXX	Stromrichter 67 dB(A)	Kompressor (allein) 66 dB(A)	Fahrmotor, Getriebe 81 dB(A)	Rad-Schiene-Kontakt (Rollgeräusch) 81 dB(A)	Rad-Schiene-Kontakt (Rollgeräusch) 89 dB(A) bei 140 km/h	SBB Typentest Lärmbericht [14], [15]
Diesel-Streckenlok	Dieselmotor keine Angabe vorhanden.	Kompressor 73 dB(A)	Dieselmotor, Abgasanlage 89 dB(A)	Rad-Schiene-Kontakt (Rollgeräusch) 87 dB(A)	Keine Angaben vorhanden.	SBB Information [16]

Tabelle 6-3: Dominante Lärmquellen und maximale Schalldruckpegel (7.5 m Entfernung) bei Streckenlokomotiven

6.2 Elektrische Triebwagen und Triebzüge

Tabelle 6-4 zeigt die in grossen Stückzahlen vorhandenen elektrischen Triebwagen und Triebzüge. Teilweise gibt es bei kleineren Privatbahnen noch weitere elektrische Triebwagen oder Triebzüge, die aber entweder in nicht relevanter Stückzahl existieren oder artverwandt zu den unten aufgeführten Fahrzeugtypen sind.
Die angegebenen Informationen zu den einzelnen Triebwagen und Triebzügen wurden Internetseiten der relevanten Bahnen bzw. der Herstellerfirmen entnommen.

Fahrzeugtyp	Baureihe	Bahn	V_{max}	Leistung	Inbetriebnahme	geplantes Einsatzende	Anzahl	Gesamt
ICN	RABDe 500	SBB	200	5.2 MW	2000 – 2004	2030	44	44
NINA	RABe 525	BLS	140	1.0 MW	1998 – 2005		36	43
	RABe 527.3	TRN	140	1.0 MW	2002		2	
	RABe 527.5	TMR (MO)	140	1.0 MW	2000 – 2003		5	
GTW	RABe 520	SBB	115	0.5 MW	2002	2030	17	115
	RABe 526.2	RM	140	0.7 MW	2003 – 2004		13	
	RABe 526.6	THURBO	130	0.5 MW	1998 – 1999		10	
	RABe 526.7	THURBO	140	0.7 MW	2003 – 2007		75	
FLIRT	RABe 521	SBB	160	2.0 MW	2004 – 2005	2040	12	62
	RABe 523	SBB	160	2.0 MW	2004 – 2005	2040	30	
	RABe 526.6	THURBO	160	2.0 MW	2006		9	
	RABe xxx	SOB	160	2.0 MW	2007 – 2008		11	
NPZ	RBDe 560	SBB	140	1.7 MW	1984 – 1996	2030	126	175
	RBDe 566.6	THURBO	140	1.7 MW	1994		4	
	RBDe 566.2	RM	125	1.7 MW	1984		13	
	RBDe 565	BLS	125	1.7 MW	1982 – 1992		22	
	RBDe 566.0	SOB	140	1.7 MW	1995		10	
RBe 540	RBe 4/4, RBe 540	SBB	125	2.0 MW	1963 – 1966	2009	76	76

Tabelle 6-4: Übersicht Elektrische Triebwagen und Triebzüge

Die aufgeführten Baureihen wurden zu fünf untersuchungsrelevanten Fahrzeugtypen gruppiert. Eine Gruppe davon stellt der Neigezug ICN dar, den die SBB zwischen 2000 und 2004 in zwei Bauserien für den Fernverkehr beschafft hat. Bei diesem Triebzug sind die Antriebs- und Hilfsaggregate unterflur angebracht.
Von der BLS werden ab 1998 für die S-Bahn Bern Nahverkehrszüge vom Typ NINA eingesetzt. Bei diesen von Bombardier Transportation gebauten Zügen ist die gesamte Antriebseinrichtung auf dem Dach platziert. Dadurch haben diese Fahrzeuge einen grossen Niederfluranteil.
In jüngster Zeit wurden von unterschiedlichen Bahnen viele Fahrzeuge vom Typ GTW oder FLIRT angeschafft. Der GTW (Gelenktriebwagen) hat zwischen den zwei oder drei

Passagierwagen ein eigenständiges Antriebsmodul mit Passagierdurchgang, ähnlich einer Lokomotive. Der FLIRT ist ein zwei- bis viergliedriges Fahrzeug[9], bei dem die Antriebsausrüstung in Maschinenräumen an den Triebwagenenden untergebracht ist.
Für den Nahverkehr beschafften die SBB sowie andere Bahnen in den 80ziger und 90ziger Jahren Triebzüge vom Typ NPZ (teilweise in verschiedenen Varianten). Insgesamt existieren davon 175 Stück. Auch bei diesen Zügen ist die Antriebstechnik unterflur angeordnet.
Die Fahrzeuge des Typs RBe 540 werden in dieser Studie nicht weiter berücksichtigt, weil sie ab 2006 ausgemustert werden. Fahrzeuge vom Typ RABDe 12/12 („Mirage“) werden ebenfalls nicht betrachtet, weil sie nur in einer Stückzahl von 17 vorhanden sind und die Ausmusterung unmittelbar bevorsteht.
Der Aufbau und die dominanten Lärmquellen jedes Fahrzeugtyps von der Gruppe der elektrischen Triebwagen und Triebzüge sind im Folgenden näher beschrieben:

- **ICN**
  Der Intercity-Neigezug (ICN) besteht aus sieben vierachsigen Wagen (siehe **Abbildung 6-8**), wovon an vier Wagen (die ersten und die letzten beiden Wagen) jeweils eine Achse pro Drehgestell angetrieben ist. Der für die radiale Einstellung eingebaute Navigator sorgt für eine lärmarme Bogenfahrt. Er verursacht aber eine Körperschallkupplung zwischen Radsatz und Wagenkasten. Dies hat jedoch auf den Aussenlärm keinen dominierenden Einfluss.
  Im Stillstand wird der grösste Schalldruckpegelwert im Bereich der Führerstands-Klimaanlage erreicht. Bei konstanter Vorbeifahrt mit 80 km/h sind Lüftergeräusche dominierend. Durch Modifikationen an den Lüftern sind die beim Typentest erreichten Werte inzwischen reduziert worden. Eine genaue Quantifizierung ist nicht möglich, deshalb wurde in **Abbildung 6-13** auch ein geschätzter Wert eingetragen. Bei höheren Geschwindigkeiten wird das Geräusch des Rad-Schiene-Kontakts dominierend.

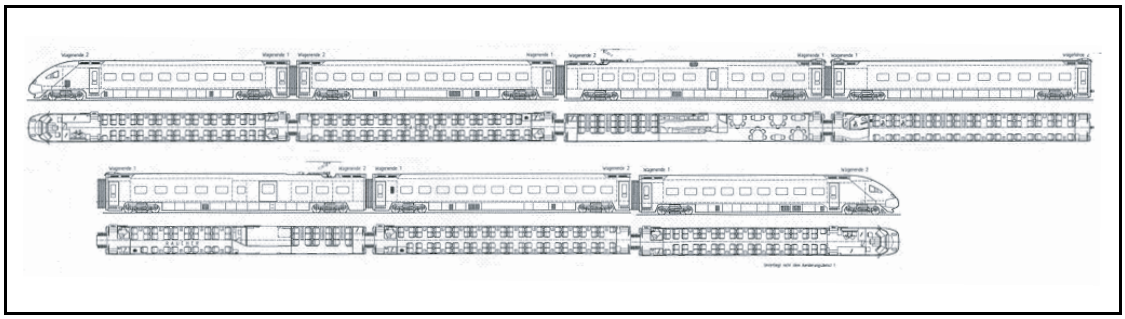


Abbildung 6-8: Typenskizze“ ICN“

- **GTW**
  Die **Abbildung 6-9** zeigt eine Typenskizze des dreiteiligen Gelenktriebwagen (GTW). Angetrieben wird das Fahrzeug durch zwei Achsen (Triebdrehgestell in der Mitte). Bei der vierteiligen Ausführung ist zwischen dem „Powerpack“ in der Mitte und einem Endwagen noch ein Zwischenwagen eingereiht.

[9] in der Schweiz sind bislang nur vierteilige FLIRTs im Einsatz

Beim GTW ist die Klimaanlage das dominierende Geräusch im Stillstand. In der Beschleunigungsphase dominiert das Geräusch, das durch den Fahrmotor und das Getriebe verursacht wird. Bei den älteren GTWs sind die Fahrmotoren eigenbelüftet, bei den neueren und in grösseren Stückzahlen vorhandenen GTWs (THURBO, RM) werden die Fahrmotoren durch Fremdbelüftung gekühlt. Bei konstanter Geschwindigkeit dominiert beim GTW das Rollgeräusch des Rad-Schiene-Kontakts, wobei dies durch tief heruntergezogene Wagenkasten bereits gut abgeschirmt wird.

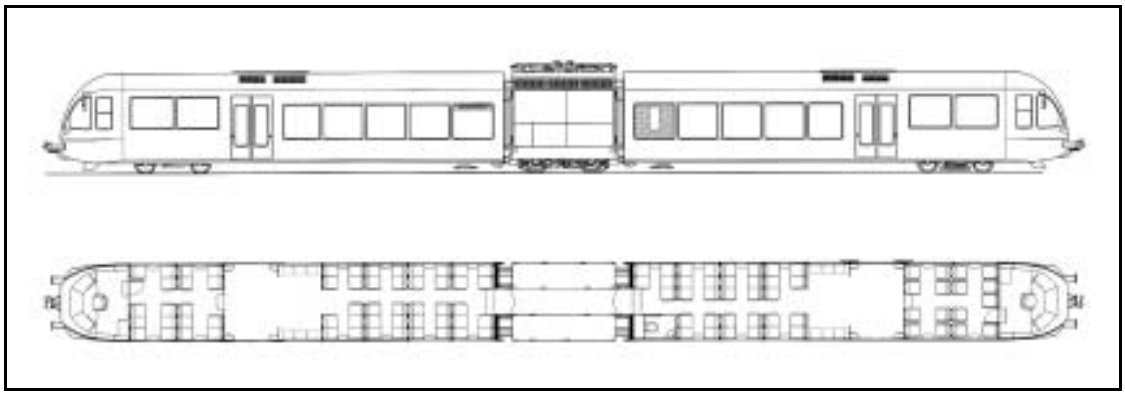


Abbildung 6-9: Typenskizze „GTW“

- **NINA**

  Der Fahrzeugtyp NINA ist von Bombardier Transportation entwickelt und hergestellt. NINA ist ein dreigliedriges Fahrzeug mit vier Drehgestellen (siehe **Abbildung 6-10**). Die mitteleren Drehgestelle sind Jakobsfahrwerke. Angetrieben sind an diesem Fahrzeug die 4 Achsen der Enddrehgestelle. Die Raddurchmesser an diesem Fahrzeug sind zur Realisierung tiefer Bodenhöhen sehr klein. Kleine Raddurchmesser reduzieren auch das Rollgeräusch, das durch tief heruntergezogene Wagenkasten zusätzlich abgeschirmt wird.

  Zu diesem Fahrzeugtyp konnten keine Informationen zum Lärmverhalten eingeholt werden.

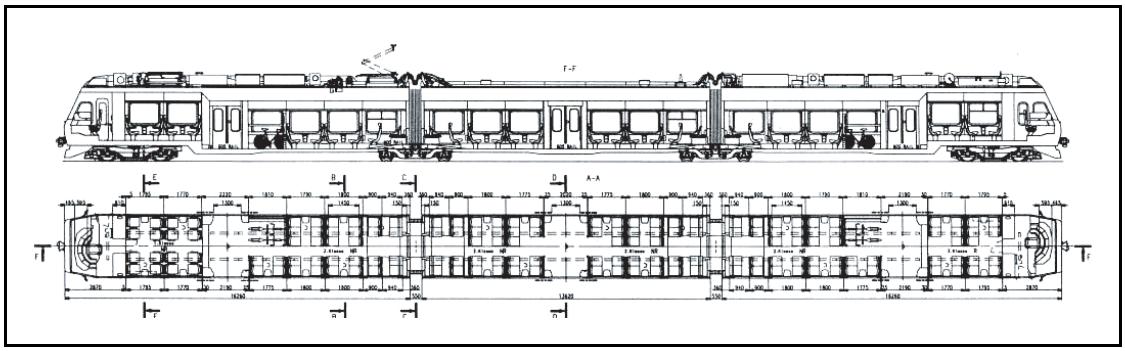


Abbildung 6-10: Typenskizze „NINA“

- **FLIRT**

  FLIRT ist ein viergliedriges Fahrzeug von der Firma Stadler. Die Mittelwagen sowie die zur Fahrzeugmitte zeigende Teile der Endwagen stützen sich auf Jakobsdrehge-

stelle ab (siehe **Abbildung 6-11**). Die Fahrmotoren befinden sich in den beiden Triebdrehgestellen an den jeweiligen Enden des Zuges. Die Räder sind durch tief heruntergezogene Wagenkasten abgeschirmt.
Im Stand dominiert bei diesem Fahrzeug das Klimagerät für den Führerraum. Bei der Anfahrt mit voller Traktionsleistung ist der Antrieb und der Fahrmotor mit seiner Luftansaugung dominierend. Bei Vorbeifahrt mit konstanter Geschwindigkeit ist dann das Rollgeräusch des Rad-Schiene-Kontakts beherrschend.

Abbildung 6-11: Typenskizze „FLIRT“

- **NPZ**
  Der NPZ besteht in der Normalkonfiguration aus je einem Trieb-, Steuer- und Zwischenwagen (siehe **Abbildung 6-12**). Es können aber auch mehr als ein Zwischenwagen dazwischengehängt werden. Am Triebwagen sind alle vier Achsen angetrieben.
  Das Lärmverhalten des NPZ im Stillstand ist durch die Ventilatorengeräusche geprägt. Bei Vorbeifahrt ist das Rad-Schiene-Kontaktgeräusch dominierend. DieTriebradsätze sind mit Grauguss-Klotzbremsen ausgerüstet, die insbesondere zur Aufrauhung der Radlaufflächen zur Adhäsionsverbesserung bei schwierigen klimatischen Bedingungen dienen. Je nach Einsatzort sind deshalb die Radlaufflächen unterschiedlich aufgerauht und können eine dominante Lärmquelle darstellen.

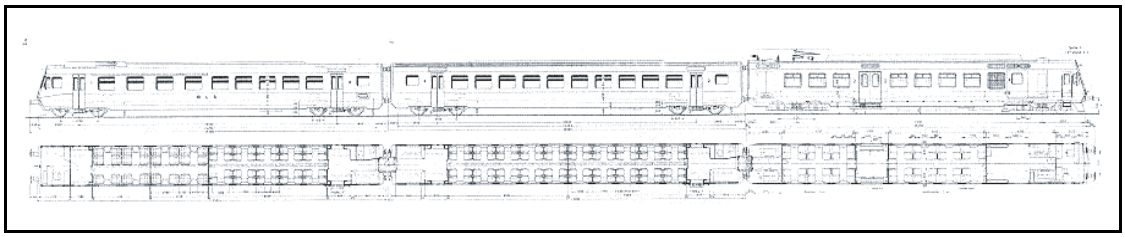


Abbildung 6-12: Typenskizze „NPZ“

Die für das Lärmverhalten wichtigen Parameter sind in **Tabelle 6-5** zusammengefasst. Der Parameter APL (axle per length) beinhaltet eine Aussage über die Anzahl der Radsätze (und somit potentielle Lärmquellen) pro Fahrzeuglänge. Je niedriger dieser Wert ist, desto besser ist das Lärmverhalten.

Fahrzeug-typ	Raddurchmesser (neu) Triebradsatz / Laufradsatz	mech. Bremssystem	APL	Klimaanlage
ICN	820 mm	Scheibenbremsen Magnetschienenbremse	0.148	ja
GTW	860 mm / 750 mm	Scheibenbremsen (LDG) Radscheibenbremsen (TDG) Magnetschienenbremse	0.152 (dreiteilig) 0.147 (vierteilig)	ja
NINA	750 mm / 630 mm	Radscheibenbremsen Magnetschienenbremse	0.168	nein[10]
FLIRT	860 mm / 750 mm	Radscheibenbremsen Magnetschienenbremse	0.135	ja
NPZ	940 mm / 910 mm	GG-Bremsklötze	0.158	nein[11]

Tabelle 6-5: Zusammenfassung der für das Lärmverhalten wichtigen Fahrzeugparameter von elektrischen Triebwagen und Triebzüge

Die maximalen Schalldruckpegel für jede untersuchte Fahrzeuggruppe sind für die Betriebszustände Stillstand und Vorbeifahrt in **Abbildung 6-13** grafisch dargestellt.

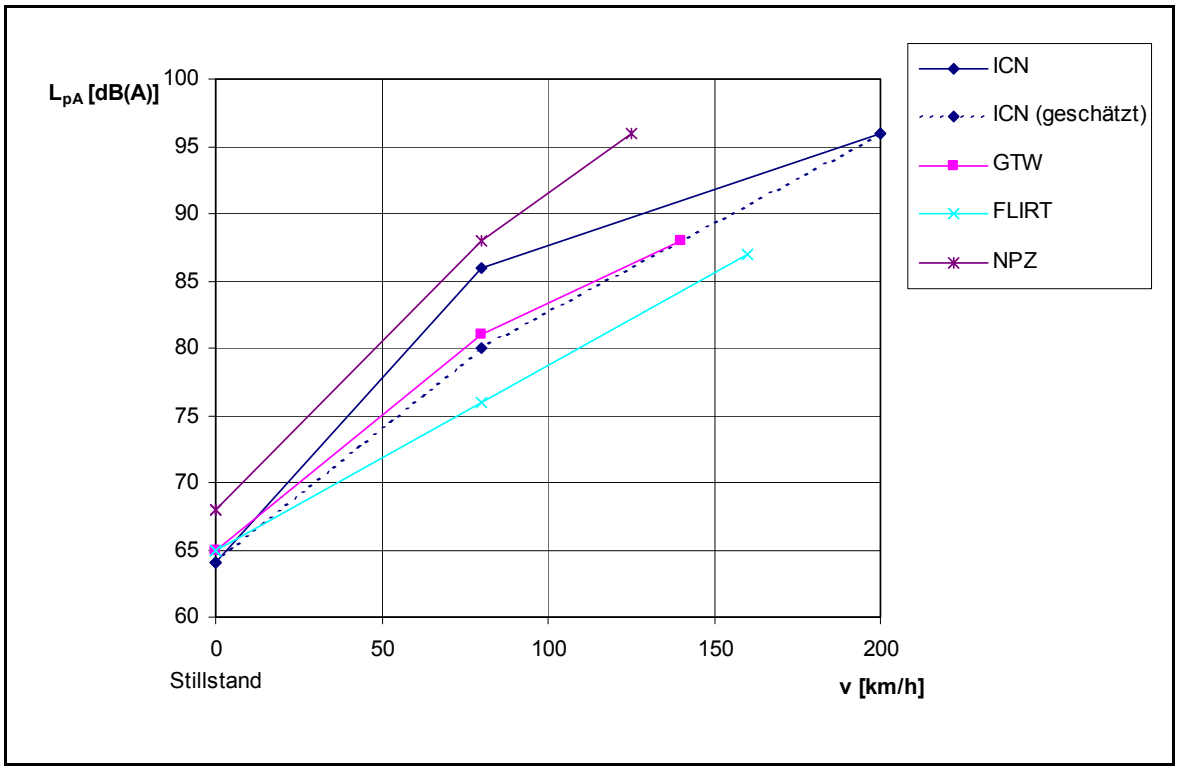


Abbildung 6-13: Schalldruckpegel (7.5 m Entfernung) von den betrachteten elektrischen Triebwagen und Triebzüge im Stillstand und bei Vorbeifahrt

Die **Tabelle 6-6** zeigt zusammenfassend die dominanten Lärmquellen und die maximalen Schalldruckpegel bei 7.5 m Entfernung für die in TSI CR NOISE [6] definierten Betriebszustände von den unterschiedlichen elektrischen Triebwagen und Triebzüge.
Bei ausländischen Triebzügen, die auch in der Schweiz verkehren, sind besonders der ICE1 und der TGV im Lärmverhalten auffällig, weil das Lüftergeräusch im Stillstand bei diesen Fahrzeugen besonders laut ist. Diese Fahrzeuge sind aber nicht Bestandteil dieser Studie.

[10] Der Führerraum ist mit einer Klimaanlage ausgerüstet.
[11] Bei einigen NPZ-Fahrzeugen ist der Führerstand mit einer Klimaanlage ausgerüstet, weitere Fahrzeuge werden derzeit nachgerüstet.

Fahrzeugtyp	Stillstand		Anfahrt	Vorbeifahrt		Quelle
	Normallast	mit Kompressor		80 km/h	Vmax	
ICN	Klimagerät (Führerstand) 64 dB(A)	Keine Angaben vorhanden.	Fahrmotor, Getriebe 77 dB(A)	Lüftergeräusche 86 dB(A)[12]	Rad-Schiene-Kontakt (Rollgeräusch) 96 dB(A) bei 200 km/h	SBB Typentest Lärmbericht [17]
GTW	Klimagerät (Fahrgastraum) 63 dB(A)	Keine Angaben vorhanden.	Fahrmotor, Getriebe 80 dB(A)	Rad-Schiene-Kontakt (Rollgeräusch) 81 dB(A)	Rad-Schiene-Kontakt (Rollgeräusch) 88 dB(A) bei 140 km/h	SBB Typentest Lärmbericht [18]
NINA	Keine Angaben vorhanden.					
FLIRT	Klimagerät (Führerstand) 65 dB(A)	Keine Angaben vorhanden.	Fahrmotor, Getriebe, Motorluftansaugung 75 dB(A)	Rad-Schiene-Kontakt (Rollgeräusch) 76 dB(A)	Rad-Schiene-Kontakt (Rollgeräusch) 87 dB(A) bei 160 km/h	SBB Typentest Lärmbericht [19]
NPZ	Ventilationsaggregate 68 dB(A)	Keine Angaben vorhanden.	Keine Angaben vorhanden.	Rad-Schiene-Kontakt (Rollgeräusch der Triebradsätze) 88 dB(A)	Rad-Schiene-Kontakt (Rollgeräusch der Triebradsätze) 96 dB(A) bei 125 km/h	SBB Typentest Lärmbericht [20]

Tabelle 6-6: Dominante Lärmquellen und maximale Schalldruckpegel (7.5 m Entfernung) bei den elektrischen Triebwagen und Triebzügen

[12] Durch Umbauten an den Lüftergittern dürfte dieser Wert inzwischen geringer geworden sein.

7 Konkrete Massnahmen und Kosten-Nutzen-Abschätzung

In diesem Abschnitt werden für die bei den Fahrzeugen in **Abschnitt 6** genannten dominanten Lärmquellen Massnahmen diskutiert, die die Lärmentwicklung mindern. Anschliessend werden für jede betrachtete Fahrzeuggruppe dazu passende Lärmreduzierungsmassnahmen mit Kosten und Nutzen bewertet.

7.1 Mögliche Massnahmen zur Lärmreduzierung an Triebfahrzeugen

Nachfolgend werden mögliche Massnahmen zur Reduzierung der Lärmentwicklung diskutiert. In **Tabelle 7-1** sind die möglichen Lärmreduzierungsmassnahmen mit Angabe des Reduktionspotenzials zusammengefasst.

Kap.	Mögliche Massnahmen zur Lärmreduzierung		Reduktionspotenzial [dB]
7.1.1	Rad-Schiene-Kontakt	Scheibenbremsen	6
		Sinterbremsklötze	5-6
		Kunststoffbremsklötze	5-6
		Trommelbremse	5-6
		Radschallabsorber	2-3
		Räder mit geradem Steg	1-2
		Kleinerer Raddurchmesser	3-4
		Geschwindigkeitsreduktion	3-4
		Schallschürzen	1
		Gleichmässige Radsatzverteilung, weniger Radsätze	3
		Schienenschleifen	3
		Lärmschutzwände	5-6
		Niedrigstschallschutzwand mit Laufwerksschürzen	8-11
7.1.2	Ventilator	Reduzierter Lüfterbetrieb	5
		Teilabschaltung	5
		Reduzierte Strömungsgeschwindigkeit	2
		Luftstromoptimierung	3-4
		Absorptionsschalldämpfer	6
7.1.3	Fahrmotor und Getriebe	Getriebeänderungen	2
		Kapselung	3
		Elastische Lagerungen	2-3
7.1.4	Aerodynamische Strömungen	Optimierung Anbauteile	2-3
		Optimierung Formgebung	3
		Optimierung Pantograph	3-4
		Drehgestellverkleidung	3
7.1.5	Stromrichter	Optimierung Bauart	3-4
		Dämmung und Absorption	2
7.1.6	Kompressor	Änderung Einbauort	5
		Kapselung	3
		Andere Bauart	3
7.1.7	Dieselmotoranlage	Optimierung Motoreinbausituation	3-4
		Ansaug- und Abgasschalldämpfer	3
		Optimierung Dieselmotor	3
7.1.8	Klimagerät	Schürzen, Dämmung	3
		Optimierte Bauform	5

Tabelle 7-1: Übersicht über die möglichen Lärmreduzierungsmassnahmen mit Angabe des Reduktionspotenzials

7.1.1 Rad-Schiene-Kontakt (Rollgeräusch)

Der Rad-Schiene-Kontakt stellt bei den meisten Fahrzeugen die dominante Lärmquelle im Geschwindigkeitsbereich von 50 km/h bis 200 km/h dar. Es gibt viele Parameter, die das Lärmverhalten im Rad-Schiene-Kontakt beeinflussen. Nachfolgend sind mögliche Lärmminderungsmassnahmen am Fahrzeug aufgezählt und erläutert:

- **Scheibenbremsen**
  Das Lärmverhalten des Rad-Schienen-Kontakts resultiert aus der Oberflächenbeschaffenheit des Rades. Eine hohe Radrauheit wird massgebend durch Bremsungen mit Grauguss-Klotzbremsen verursacht. Dabei wird die Lauffläche des Rades durch das Reiben von Stahl auf Stahl aufgerauht. Abhilfe können Scheibenbremsen bringen. Dadurch wird bei einer Bremsung die Bremskraft nicht mehr auf die Radlauffläche aufgebracht, sondern auf Scheibenbremsen oder Radscheibenbremsen verlagert. Scheibenbremsen können eine Lärmreduktion von etwa 6 dB bringen. Zu beachten ist, dass bei angetriebenen Achsen der Einbauraum für Bremsscheiben nicht vorhanden ist. Hier können Radscheibenbremsen eine Lösung sein, die an der Innen- und Aussenseite des Rades montiert werden. Zudem wirken Radscheibenbremsen auch wie Radschallabsorber, die besonders das Kurvenkreischen und Makroschlupfpfeifen vermindern.
  Nachteil der Scheibenbremsen ist, dass eine Gefahr von Ausbröckelungen besteht, wenn die Laufflächen nur überrollt werden und nicht hin und wieder aufgerauht werden. Deshalb werden gerade bei Lokomotiven mit hohen Radlasten bewusst Klotzbremsen mit Sintermaterial eingesetzt.

- **Sinterbremsklötze**
  Die Radoberflächenbeschaffenheit kann man auch dadurch verbessern, dass die Klotzbremsen mit Sinterklötzen statt mit Grausguss-Klötze ausgestattet werden. Das Sintermaterial raut die Radlauffläche im µm-Wellenlängenbereich auf, der für die Adhäsion wichtig ist, produziert jedoch glatte Räder im akustisch relevanten Wellenlängenbereich (~ cm). Durch diese Radoberflächenbeschaffenheit im Zusammenspiel mit der Schiene wird weniger Lärm entwickelt. Ein Austausch der Grauguss-Klotzbremsen durch Sinterbremsklötze bringt eine Lärmreduzierung um ca. 5 bis 6 dB. Meist ist bei so einem Austausch auch ein Anpassen des Bremsgestänges notwendig. Sinterbremsklötze werden derzeit aufgrund ihres hohen Preises meist nur bei hoher Bremsleistung (z.B. leistungsstarke Lokomotiven) eingesetzt.

- **Kunststoffbremsklötze**
  Die Klotzbremsen können auch mit Kunststoffbremsklötzen ausgerüstet werden. Diese haben den gleichen Effekt wie die Sinterbremsklötze im akustischen relevanten Wellenlängenbereich. Sie tragen auch zu einer glatten Radlauffläche bei. Kunststoffbremsklötze sind im Vergleich zu Sinterbremsklötze preiswerter, aber auch nicht so leistungsfähig. Deshalb sind sie besonders im Bereich der Triebwagen und Triebzüge einsetzbar.

- **Trommelbremse**
  Eine andere Möglichkeit, die Radrauheit und somit das Rollgeräusch zu reduzieren, ist ein bestehendes GG-Bremsklotzsystem in eine Trommelbremse umzurüsten. Bei einer Trommelbremse werden die innen- oder aussenliegenden, feststehenden Bremsklötze gegen ein zylindrisches umlaufendes Gehäuse (Trommel) gepresst. Für die Bremsklötze können die Standardgraugussklötze verwendet werden. Vorteil dabei ist, dass die Bremskraft nicht auf die Radlauffläche aufgebracht wird und damit hohe Radrauheiten vermieden werden. Nachteilig ist, dass eine Trommelbremse einen grossen Einbauplatz braucht und auch schwer und teuer ist.

- **Radschallabsorber**
  Durch das Anbringen von Radschallabsorbern kann die Luftschallabstrahlung vom Rad reduziert werden. Radschallabsorber helfen besonders Kurvenkreischen und Makroschlupfpfeifen zu eliminieren. Problematisch können gerade bei angetriebenen Achsen die Einbauverhältnisse sein oder gar einen Einbau ausschliessen, wenn bereits Radscheibenbremsen montiert sind. Radscheibenbremsen wirken aber auch schallabsorbierend.

- **Räder mit geradem Steg**
  Bei Fahrzeugen mit Klotzbremsen ist es notwendig, Räder mit einer glockenähnlichen Form statt mit geradem Steg einzusetzen, weil Räder mit geradem Steg bei Überhitzung im Radreifen Zugspannungen entwickeln, die Risswachstum begünstigen. Glockenräder haben aber den Nachteil, dass sie eine grössere Fläche zur Luftschallabstrahlung besitzen. Deshalb kann die Schallabstrahlung um 1 bis 2 dB vermindert werden, wenn statt einem Glockenrad ein Rad mit geradem Steg eingesetzt wird. Dabei ist aber zu beachten, dass statt den Klotzbremsen auch ein anderes Bremssystem installiert werden muss, weil Klotzbremsen ein thermisch unempfindliches Rad (z.B. Glockenräder) bedingen.

- **Kleinerer Raddurchmesser**
  Die Luftschallabstrahlung vom Rad kann prinzipiell auch durch eine kleinere Abstrahlfläche am Rad reduziert werden. Eine kleinere Abstrahlfläche kann durch Räder mit kleinerem Durchmesser erreicht werden. Die maximal mögliche Flächenpressung am Rad-Schiene-Kontaktpunkt schränkt abhängig von der Radlast die Verkleinerung des Raddurchmessers ein. Deshalb sind kleine Raddurchmesser besonders bei leichten Triebzügen realisierbar.
  Sinnvoll sind solche Überlegungen meist aber nur bei Neubaufahrzeugen, weil ein kleinerer Raddurchmesser in einem bestehenden Fahrzeug Änderungen an Motor, Getriebe, Bremsanlagen etc. nach sich ziehen würde und zu sehr hohen Umbaukosten führen würde. Dies würde die damit erzielbare Lärmreduktion von 3 bis 4 dB nicht rechtfertigen.

- **Geschwindigkeitsreduktion**
  Prinzipiell kann eine Reduktion der Fahrgeschwindigkeit die Lärmintensität des Rad-Schiene-Kontakts vermindern. Dies steht aber in Widerspruch zur Attraktivität im Personenverkehr und zur Kapazitätsausnutzung der Strecken. Trotzdem kann eine Ge-

schwindigkeitsreduktion an lärmneuralgischen Punkten ein sinnvoller Beitrag zur Lärmreduzierung sein. So kann eine Höchstgeschwindigkeitsreduktion um 20 km/h durchaus eine Schallpegelreduktion von 3 bis 4 dB bringen. Unmittelbare Kosten am Fahrzeug entstehen dabei keine, in einer gesamtwirtschaftlichen Betrachtung müssen aber die Streckenkapazitätseinschränkung und Angebotsverschlechterung berücksichtigt werden.

- **Schallschürzen**
  Der durch den Rad-Schiene-Kontakt entstehende Luftschall kann durch Abschirmungsschürzen im Laufwerksbereich gedämmt werden. Diese Schürzen entfalten ihre Wirkung besonders in Kombination mit streckenseitigen Niedrigstschallschutzwänden. Schallschürzen alleine, ohne Massnahmen am Fahrweg, bringen eine Lärmreduktion von 1 dB. Bei Niederflurfahrzeugen, wie FLIRT, GTW oder NINA, sind Schallschürzen durch tief heruntergezogene Wagenkasten bereits im Design enthalten.
- **Gleichmässige Verteilung der Radsätze, weniger Radsätze**
  Eine weitere theoretische Möglichkeit, den Lärm vom Rad-Schiene-Kontakt zu vermindern, ist die Anzahl der Radsätze zu verringern und dadurch prinzipiell weniger Lärmquellen zu haben. Oder die Radsätze gleichmässiger zu verteilen, um Schallpegelspitzen zu vermeiden. Dies kann praktisch aber nur bei Neukonstruktionen berücksichtigt werden. Beispielsweise erreicht der Talgo-Gliederzug so ca. 3 dB tiefere Werte als ein vierachsiger Reisezugwagen, wenn jeder Radsatz den gleichen Lärm abstrahlt.

Zusätzlich zu den oben beschriebenen Möglichkeiten, die direkt am Fahrzeug durchgeführt werden können, gibt es weitere Lärmreduktionsmassnahmen, die den Fahrweg betreffen. Im Folgenden sind einige davon aufgezählt:

- **Schienenschleifen**
  Durch regelmässiges Schienenschleifen kann die Schienenoberfläche glatt gehalten werden und Schienenriffel verhindert werden. Mit einem besonders überwachten Gleis reduziert sich die Schallanregung um durchschnittlich 3 dB im Vergleich zum durchschnittlich instandgehaltenen Gleis. Schienenriffel können eine Lärmerhöhung von bis zu 20 dB zur Folge haben. Diese Schienenriffel können durch regelmässiges Schleifen vermieden werden. Auch ist es wichtig, die Konizität des Gleises zu pflegen, um einen stabilen Geradeauslauf zu ermöglichen. Instabile Fahrwerke können auch eine grosse Lärmquelle darstellen.
- **Lärmschutzwände**
  Lärmschutzwände bieten streckenseitig einen guten Schutz vor dem Rollgeräusch des Rad-Schiene-Kontakts. Sie dämmen den durch den Rad-Schiene-Kontakt entstehenden Luftschall für die an die Strecke angrenzenden Bewohner.
- **Niedrigstschallschutzwand in Kombination mit Laufwerksschürzen**
  Wenn am Fahrzeug Laufwerksschürzen montiert und gleichzeitig am Fahrweg gleisnahe Niedrigstschallschutzwände (Höhe: 80 cm) installiert werden, so kann eine Lärmreduktion von 8 bis 11 dB erreicht werden. Durch die Niedrigstschallschutzwände

ergeben sich aber Einschränkungen im Betrieb und in der Wartung des Gleises. So kann die Schallschutzwand ein Hindernis beim Schneeräumen oder bei Bauarbeiten sein.

7.1.2 Ventilator

Das Geräusch der Ventilatoren ist besonders im Stillstand bei vielen Fahrzeugtypen die dominante Lärmquelle. Durch folgende Massnahmen kann der vom Ventilator generierte Lärm vermindert werden:

- **Reduzierter Lüfterbetrieb**
  Durch eine veränderte Lüfteransteuerung kann erreicht werden, dass der Ventilator nur für die im Stillstand bzw. Anfahrt notwendige Leistung kühlt. Dadurch kann der Ventilatorlärm reduziert werden. Heute werden Lüfter oft mit konstanter Lüfterdrehzahl unabhängig von der tatsächlich erforderlichen Leistung betrieben. Darüber hinaus kann die erforderliche Kühlleistung im Stand reduziert werden, indem vor dem Anhalten intelligent vorgekühlt wird. Während der Fahrt ist das Ventilatorgeräusch meist nicht dominierend und deshalb können zu dieser Zeit mit voller Leistung die Aggregate mehr als gerade nötig gekühlt werden, so dass dann im Stillstand, wenn der Lärm der Lüfter dominiert, weniger Ventilatorleistung notwendig ist.
  Durch diese Massnahme kann der Lärm, der vom Ventilator ausgeht, abhängig von der bestehenden Betriebsweise um bis zu 5 dB zurückgehen. Teilweise kann es auch ein grösseres Reduktionspotential geben. Beispielsweise ist beim ICE 1 das Reduktionspotential gross, weil der Ventilatorbetrieb bei Stillstand oder langsamer Fahrt besonders störend wirkt. Bei anderen Lokomotiven, wie Lok 2000, ist ein reduzierter Lüfterbetrieb schon umgesetzt.

- **Teilabschaltung**
  Die durch die Ventilatoren verursachte Geräuschbelästigung kann durch eine Teilabschaltung des Antriebs reduziert werden. Wenn nicht die volle Antriebsleistung nötig ist, kann beispielsweise bei einer Lokomotive durch eine fahrtrichtungsabhängige Abschaltung eines Drehgestells die eine Seite des Antriebstrangs stillgelegt werden. Dadurch kann auch ein Teil der Lüfter stillgelegt werden und die Lärmbelästigung nimmt damit ab.

- **Reduzierte Strömungsgeschwindigkeit**
  Durch konstruktive Änderungen lassen sich bestehende Lüfter optimieren. Der Kanalquerschnitt und das Ventilatorrad kann vergrössert werden und dadurch kann die Strömungsgeschwindigkeit reduziert werden. Mit einer reduzierten Strömungsgeschwindigkeit kann der Schaufeldrehklang verringert werden. Damit kann eine Minderung des Schallpegels um etwa 2 dB erreicht werden. Auch kann durch eine Glättung oder Beseitigung von Hindernissen in Rohrleitungen bzw. Kanälen eine Lärmreduzierung erreicht werden [21]. Durch die Optimierung des Lüfters kann eine Schallpegelreduktion von etwa 2 dB erreicht werden. Diese Massnahme ist aber meist nicht praktikabel, weil sie grosse konstruktive Veränderungen nach sich ziehen würde.

- **Luftstromoptimierung**
  Das Ventilatorgeräusch kann durch Umlenkungen des Luftstroms reduziert werden. Sofern noch Platz im Maschinenraum vorhanden ist, kann der Ventilatorluftstrom vor der Ausblasöffnung in einem Luftberuhigungsraum gelenkt werden. Oder es können im Strömungspfad Schikanen eingebaut werden. Dies kann Lärmreduzierungen von 3 bis 4 dB bringen.

- **Absorptionsschalldämpfer**
  Mittels Absorptionsschalldämpfer wird die Lärmentwicklung sowohl an der Ansaug- als auch an der Ausblasöffnung gemindert. An diesen Öffnungen können Schalldämpfer mit offenporigen Schaumstoffplatten angebracht werden.
  Bei der Lok 2000 wurden Schalldämpfer an den Ansaug- und Ausblasöffnungen für die Umrichter- und Fahrmotorventilation angebracht. Dabei wurden Schallpegelminderungen von 12 dB in der höchsten Lüfterstufe erreicht [21].
  Mit dieser Erfahrung kann bei einer mittleren Lüfterstufe von einer Lärmreduktion von 6 dB ausgegangen werden.

7.1.3 Fahrmotor und Getriebe

Das Geräusch von Motor und Getriebe spielt besonders in der Anfahrtphase bei einigen Lokomotiven eine dominante Rolle. Dem kann mit folgenden Massnahmen entgegengewirkt werden [22], wobei all diese Massnahmen für Umbauten nicht unbedingt praktikabel sind:

- **Getriebeänderungen**
  Durch eine Überarbeitung der Getriebeauslegung kann eine Lärmreduzierung erreicht werden. Dies stellt eine primäre Lärmreduktionsmassnahme an der Entstehungsquelle dar. Eine Lärmreduktion am Getriebe kann durch schrägverzahnte Zahnräder, Kopfrücknahme oder elastische Zähne erfolgen. Die Lärmreduktion durch konstruktive Getriebeänderungen sind sehr vom bestehenden Zustand abhängig. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass eine Schallpegelreduktion von 2 dB erreicht werden kann, in Extremfällen auch mehr.

- **Kapselung**
  Die Luftschallabstrahlung von Getriebe und Fahrmotor kann durch eine möglichst vollständige Kapselung gemindert werden. Abhängig von der Fahrzeugtopologie können die Gehäuse vollständig geschlossen und mit Absorptionsmaterial isoliert werden. Ein Schalldurchlass bei notwendigen Drehmomentübertragungselementen kann durch Schalldämpfer verhindert werden. Durch eine Kapselung kann eine Lärmreduktion von bis zu 3 dB erreicht werden.

- **Elastische Lagerungen**
  Durch Befestigungen und Lagerungen der Gehäuse von Fahrmotor und Getriebe kann Körperschall auf andere Bauteile, wie Drehgestell oder Lokomotivkasten, übertragen werden. Dieser übertragene Körperschall kann dann die Bauteile zu Strukturschwingungen anregen, die dann wieder Luftschall abstrahlen. Dieses Phänomen kann dadurch vermieden werden, dass Fahrmotor und Gehäuse elastisch gelagert werden. So

kann kein Körperschall übertragen werden. Zwischen Motor und Getriebe kann durch eine elastische Wellenkupplung die Körperschallübertragung verhindert werden. Um die Körperschallübertragung zwischen Drehgestell und Aufbau zu vermeiden, können allenfalls vorhandene Stahlschraubenfedern durch Gummifedern ersetzt werden. Durch diese Massnahmen kann der abgestrahlte Schallpegel um 2 bis 3 dB reduziert werden.

Dies kann nicht bei Fahrzeugen mit Tatzlagermotor angewendet werden, weil dieser Motor aufgrund seiner Lagerung eine Körperschallverbindung mit den Zahnrädern zwischen Motor und Aufbau hat.

7.1.4 Aerodynamische Strömungen

Geräusche, hervorgerufen durch aerodynamische Strömungen, werden besonders im Geschwindigkeitsbereich über 200 km/h zur dominanten Lärmquelle. Bei ungünstiger Formgebung können Luftströmungen aber auch schon bei niedrigeren Geschwindigkeiten dominierend werden. Folgende Veränderungen können eine Verbesserung des Lärmverhaltens zur Folge haben:

- **Optimierung Anbauteile**
  Jede Kante an einem Schienenfahrzeug führt bei hohen Geschwindigkeiten zu einem Strömungsabriss. Wenn das dadurch entstehende Geräusch zur Hauptlärmquelle wird, so kann durch eine Glättung von besonders hervorstehenden Kanten eine Lärmminderung erreicht werden. Auch spielen Anbauteile, wie beispielsweise Haltegriffe, Frontkupplungen, Seitenspiegel und Scheibenwischer eine Rolle bei der Lärmentwicklung durch aerodynamische Strömungen.
  Eine aerodynamische Lärmsanierung macht nur bei den Fahrzeugen einen Sinn, die mit hohen Geschwindigkeiten verkehren oder die mit besonders exponiert liegenden Anbauteilen ausgestattet sind. So können beispielsweise nicht anklappbare Rückspiegel für Lärm sorgen. Eine Modifikation von solchen Anbauteilen kann eine Lärmreduzierung von 2 bis 3 dB bringen.

- **Optimierung Formgebung**
  Besonders im Hochgeschwindigkeitsverkehr ist eine stromlinienförmige Formgebung der Frontpartie wichtig. Durch eine stromlinienförmige Frontpartie wird die Luft mit möglichst geringen Widerstand um und über das Fahrzeug geleitet. Bei Triebwagen bzw. Triebzügen oder auch lokbespannten Zügen können auch die Wagenübergänge Lärm erzeugen.
  Bei dem gegenwärtigen Rollmaterial in der Schweiz spielt eine Optimierung der Fahrzeugform aus Gründen der Lärmreduzierung derzeit keine Rolle. Bei Erhöhung der Höchstgeschwindigkeiten (ab 2006: 200 km/h) kann dies aber schon relevant werden.

- **Optimierung Pantograph**
  Bei hohen Geschwindigkeiten gewinnen die aerodynamischen Geräusche des Pantograph an Bedeutung, weil der Pantograph eine Lärmquelle in einer Höhe ist, in der die Lärmentwicklung durch sekundäre streckenseitige Lärmminderungsmassnahmen, wie Schallschutzwände, nicht mehr beeinflusst werden kann. Durch Fussverkleidun-

gen am Pantograph und aero-akustische Verbesserungen an der Wippe und den anderen Komponenten des Pantographen können abhängig von der Geschwindigkeit Schallpegelreduzierungen von bis zu 15 dB erreicht werden [23]. Im Geschwindigkeitsbereich, in dem die Fahrzeuge in der Schweiz betrieben werden, sind maximale Reduktionen von 3 bis 4 dB zu erwarten.

- **Drehgestellverkleidung**
  Aerodynamische Abdeckungen für die Drehgestelle sind im Höchstgeschwindigkeitsbereich sinnvoll, um aerodynamischen Lärm, verursacht durch Strömungsabrisse am Drehgestell, einzudämmen.
  Grosses Lärmminderungspotential besitzt diese Massnahme aber nur in einem Geschwindigkeitsbereich ab 300 km/h.

7.1.5 Stromrichter

Eine dominierende Lärmbelästigung durch Traktions- oder Hilfsbetriebestromrichter tritt bei manchen Lokomotiven im Stillstand auf. Durch folgende Massnahmen können die durch die Stromrichter verursachten Geräusche vermindert werden:

- **Optimierung Bauart**
  Durch eine Änderung der Ansteuerung, des Taktmusters, der Grösse des Nennstroms und der Nennspannung zu den Motoren kann eine Lärmreduktion bei Stromrichter erreicht werden. Besonders bei modernen Stromrichtern ist die Tonhaltigkeit störend. Eine Reintonvermeidung lässt sich durch eine veränderte Ansteuerung realisieren. Wird der Ansteuerstrom mit kleinen Störströmen gemischt, so verteilt sich das entstehende Geräusch auf ein breiteres Frequenzspektrum. Das Ausmass der Lärmreduktion hängt von der Bauart der eingebauten Stromrichter ab. Es kann mit einer Lärmminderung von 3 bis 4 dB gerechnet werden.

- **Dämmung und Absorption**
  Die Lärmentwicklung des Stromrichters kann durch Ausstattung der Maschinenraumwände mit Absorptionsmaterial und durch dämmende Isolierungen eingeschränkt werden. So kann eine Lärmreduktion von etwa 2 dB erreicht werden.

7.1.6 Kompressor

Der Druckluftkompressor kann im Stillstand eine dominante Lärmquelle darstellen. Dadurch dass das Lärmverhalten bei laufenden Kompressor nicht Bestandteil des Typentests gemäss TSI CR NOISE [6] ist, besteht bei Neubaufahrzeugen die Tendenz, den Kompressor unterflur oder auf dem Dach ohne bedeutende Lärmschutzmassnahmen zu montieren, wo dies durch den Kunden akzeptiert wird (Güterverkehr).
Es gibt am Kompressor folgende Massnahmen zur Lärmreduzierung:

- **Änderung Einbauort**
  Die Einbaulage des Kompressors hat einen grossen Einfluss, wie dominant der Kompressorlärm im Stillstand werden kann. Wenn der Kompressor unterflur eingebaut ist, so kann eine Verlegung des Kompressors in den schallisolierten Maschinenraum eine deutliche Lärmreduzierung von bis zu 5 dB bringen.

- **Kapselung**
  Wie bei Fahrmotor und Getriebe kann die Luftschallabstrahlung vom Kompressor durch eine möglichst vollständige Kapselung gemindert werden. Abhängig von der Fahrzeugtopologie kann das Kompressorgehäuse vollständig geschlossen und mit Absorptionsmaterial isoliert werden. Durch eine Kapselung kann eine Lärmreduktion von bis zu 3 dB erreicht werden.

- **Andere Bauart**
  Besonders bei älteren Fahrzeugen, die noch mit einem alten Kolbenkompressor ausgestattet sind, kann aus einer Umrüstung auf einen modernen Schrauben- oder Kolbenkompressor und entsprechender Isolierung eine Lärmreduzierung von bis zu 3 dB resultieren. Neben dem leiseren Betrieb sind moderne Kompressoren auch kleiner und leichter. Ein moderner Kolbenkompressor ist prinzipiell etwas leiser als ein Schraubenkompressor. Der Vorteil des Schraubenkompressors im Lärmverhalten ist aber, dass der Schraubenkompressor mit einer höheren Drehzahl arbeitet. Der dabei mehr im oberen Frequenzbereich entstehende Schall kann mit einfacheren Mitteln reduziert werden. Ausserdem sind die Bewegungen des Schraubenkompressors stetiger, weil nur rotierende Bauteile vorhanden sind.

7.1.7 Dieselmotoranlage

Der Dieselmotor stellt bei Fahrzeugen mit Verbrennungsantrieb eine grosse Schallquelle dar. Durch Optimierung der Einbausituation des Motors und der Ansaug- und Abgaskanäle kann die Lärmausbreitung vom Dieselmotor reduziert werden.

- **Optimierung Motoreinbausituation**
  Durch Anbringen von Isolationsmaterial im Motorraum kann ein Teil des abgestrahlten Lärms absorbiert werden und dadurch die Lärmbelästigung gemindert werden. Einbaubeispiele können aus dem Kraftfahrzeug- oder Schiffsdieselbereich abgeleitet werden.
  Ausserdem kann der Dieselmotor so gelagert werden, dass keine Körperschallübertragung möglich ist. Dadurch kann eine Schallabstrahlung von weiteren Bauteilen verhindert werden.
  Durch solche Massnahmen kann der Lärm um 3 bis 4 dB reduziert werden.

- **Ansaug- und Abgasschalldämpfer**
  Das Verbreiten der Dieselmotorgeräusche durch den Abgaskanal oder dem Frischluftansaugkanal kann durch einen Schalldämpfer gemindert werden. Zur Schalldämpfung werden die Reflexionen des Schalls an Querschnittsprüngen oder Umlenkungen und die Schluckung des Schalls durch schalldämpfende Schichten sowie die Kombination von beiden verwandt. Dabei muss aber eine ausreichende Luftzufuhr und Abgasableitung gewährleistet bleiben. Durch die Schalldämpfer kann eine Schallpegelreduktion um etwa 3 dB erreicht werden.

- **Optimierung Dieselmotor**
  Der Motorlärm kann auch an seiner Entstehung reduziert werden, indem die Motorbauart optimiert wird. Durch konstruktive Änderungen am Motor können die Bewe-

gungsabläufe harmonischer gestaltet werden, was dann zu weniger Lärmemissionen in einer Grössenordnung von bis zu 3 dB führt.

7.1.8 Klimagerät

Moderne Schienenfahrzeuge sind heutzutage meist mit Klimageräten für den Führerraum und bei Triebzügen für den Fahrgastraum ausgerüstet. Durch eine verbesserte Dämmung oder eine optimierte Bauform kann der von der Klimaanlage abgestrahlte Lärm reduziert werden.

- **Schürzen, Dämmung**
  Wenn das Klimagerät im Unterflurbereich eines Fahrzeugs eingebaut ist, so kann das Anbringen von Schürzen oder eine verbesserte Bauart der Frischluftgitter eine Lärmreduzierung bringen. Auch kann das Klimagerät durch eine Dämmung und Installation von Schalldämpfer für die Luftzufuhr und -abfuhr lärmreduziert werden. Dadurch können die Lärmemissionen um etwa 3 dB vermindert werden.

- **Optimierte Bauform**
  Durch eine moderne Bauform der Klimaanlage und gegebenenfalls den Austausch der Klimaanlage kann die Lärmquelle Klimaanlage an ihrem Ursprung reduziert werden. Moderne Klimaanlagen können eine Lärmreduktion im Vergleich zu älteren Modellen um bis zu 5 dB bringen.

7.2 Kosten-Nutzen-Abschätzung für die betrachteten Fahrzeuge

Nachfolgend werden für die in **Abschnitt 6** betrachteten Fahrzeugtypen realisierbare Lärmminderungsmassnahmen mit Kosten und Nutzen bewertet.

7.2.1 Streckenlokomotiven

Bei den Streckenlokomotiven sind besonders die Geräusche der Ventilatoren und das Rad-Schiene-Kontaktgeräusch dominierend. Für die einzelnen Fahrzeugtypen werden nachfolgend Lärmsanierungsmöglichkeiten vorgeschlagen, wobei ein Sanierungspotential besonders bei den Einheitslokomotiven und bei den Lokomotiven der S-Bahn-Zürich gesehen wird. Die anderen Lokomotiven sind moderne Universallokomotiven, die bereits nach Lärmgesichtspunkten konstruiert sind, so dass Lärmverbesserungen meist mit einem hohen Aufwand bei gleichzeitig nur geringer Lärmreduktion verbunden sind und deshalb nur schwer realisierbar sind.

- **Einheitslok**
  Im Stillstand wird bei dieser Fahrzeuggruppe das Lärmverhalten durch den Ventilator bestimmt. Bei diesen Fahrzeugen kann der Ventilatorbetrieb derzeit manuell durch Tastendruck des Lokführers unterdrückt werden [21], wenn der Lärm störend wird. Durch eine veränderte automatische Regelung der Lüfter kann der Ventilator prinzipiell nur in der notwendigen Betriebsstufe betrieben werden. Solch eine Änderung kann im Stillstand eine Lärmreduzierung von bis zu 5 dB bringen.
  Eine andere Variante, um das Ventilatorgeräusch zu reduzieren, ist, den Antriebsstrang eines Drehgestells abzuschalten, wenn nicht die vollständige Leistung notwendig ist. Dadurch kann auch der Betrieb der halben Ventilatorleistung abgeschaltet werden. Durch so eine Teilabschaltung kann der Lärm um ca. 6 dB reduziert werden. Dies kann durch den Einbau einer Regelungstechnik realisiert werden.
  Ab einer Fahrgeschwindigkeit von 20 km/h wird der Rad-Schiene-Kontakt die dominierende Lärmquelle. Da die Fahrzeuge dieses Typs mit GG-Bremsklötze ausgerüstet sind, besitzen sie eine grosse Radrauheit, die im Zusammenspiel mit der Schiene für Lärm sorgt. Abhilfe kann hier der Austausch der GG-Bremsklötze durch Klötze aus Sintermaterial bringen. Dies hat eine Lärmreduktion von etwa 5 bis 6 dB zur Folge. Die Kosten werden für Austausch und notwendige Anpassungen des Bremsgestänges als verhältnismässig hoch eingeschätzt.
  Anzumerken ist, dass wegen der höheren Radtemperaturen aufgrund der Sinterbremsklötze die thermischen Stabilität der Speichenräder zu überprüfen ist und gegebenenfalls Vollradscheiben eingebaut werden müssen. Ein Einsatz von Radscheibenbremsen wäre auch nur möglich, wenn die Speichenräder dieses Lokomotivtyps durch Vollräder ersetzt werden und somit die Radscheibenbremsen an dem Steg des Rades angebracht werden können.
  In der untenstehenden Tabelle sind die Massnahmen mit Nutzen und Kosten zusammengefasst.

Massnahme	Betriebszustand	Reduktionspotential	Kosten
Lüftersteuerungsoptimierung	Stillstand	5 dB	gering
Abschaltung eines Drehgestells bei nicht benötigter Leistung	Stillstand	6 dB	mittel
Austausch GG-Bremsklötze durch Sinter-bremsklötze	Anfahrt und Vorbeifahrt	5-6 dB	hoch

- **S-Bahn Zürich**

  Bei der Fahrzeuggruppe „S-Bahn Zürich“ kann der dominierende Lärm im Stillstand (Ventilator) durch Absorptionsschalldämpfer an den Ansaug- und Ausblasöffnungen der Ventilatoren um etwa 4 bis 5 dB gemindert werden.

  Auch kann durch eine veränderte Steuerung der Ventilatoren das Ventilatorgeräusch reduziert werden. Durch eine intelligente Steuerung kann verhindert werden, dass die Lüfter im Stilstand mit voller Leistung betrieben werden müssen. Dabei kann eine Schallpegelreduktion von etwa 5 dB erreicht werden.

  Der Stromrichter besitzt bei der Re 450 und Re 456 eine als störend empfundene Tonhaltigkeit. Durch Änderung der Taktmuster bei der Ansteuerung der Stromrichter kann die Tonhaltigkeit vermindert werden. Der Schallpegel kann dadurch um ca. 3 dB reduziert werden.

  Das Makroschlupfpfeifen beim Anfahren kann durch Austausch der Radschallabsorber eliminiert werden. Die aktuell montierten Schalldämpfer wirken nicht dauernd. Durch die Radschallabsorber wird eine Schallpegelminderung von 2 dB erwartet.

  Bei den Lokomotiven des Typs Re 456 (KTU-Loks) kann auch der Ersatz der GG-Bremsklötze durch Sinterbremsklötze eine Schallreduktion erwirken. Bei den Loks des Typs Re 450 sind bereits Sinterbremsklötze implementiert.

  Die untenstehende Tabelle zeigt die Kosten- und Nutzenabschätzung der realisierbaren Massnahmen an den Lokomotiven der S-Bahn Zürich.

Massnahme	Betriebszustand	Reduktionspotential	Kosten
Absorptionsschalldämpfer	Stillstand	4-5 dB	mittel
Veränderung Ventilatorsteuerung	Stillstand	5 dB	gering
Änderung Taktmuster Stromrichter	Anfahrt	3 dB	gering
Austausch Radschallabsorber	Anfahrt	2 dB	mittel
Austausch GG-Bremsklötze durch Sinter-bremsklötze (Re 456)	Anfahrt / Vorbeifahrt	5-6 dB	hoch

- **Lok 2000**

  Die Lokomotiven Re 460 (SBB) und Re 465 (BLS) sind bereits sehr lärmarme Fahrzeuge, bei denen bereits viele oben vorgeschlagene Massnahmen umgesetzt sind. Deshalb können nur weitergehende Massnahmen bei diesen Lokomotiven eine Schallpegelreduzierung bringen.

  Um das Geräusch des Makroschlupfpfeifens beim Anfahren zu vermindern, kann der Austausch der bisherigen Reibringabsorber durch Radschallabsorber eine Lärmreduktion bringen. Damit kann eine Schallpegelreduktion von ca. 2 dB erreicht werden.

Um eine Reduzierung der Ventilatorgeräusche zu erreichen, kann die Steuerung verändert werden. Bisher arbeitet der Ventilator in drei Stufen. Durch eine stufenlose Steuerung des Ventilators, kann der Lüfter mit der je nach Bedarf nur notwendigen Leistung betrieben werden. Dadurch kann der Schallpegel im Stilstand um 2 bis 3 dB reduziert werden.

Eine andere Möglichkeit, das Geräusch des Rad-Schiene-Kontakts zu vermindern, ist, Schallschürzen am Drehgestell anzubringen. Eine grosse Lärmreduktion kann dabei in Kombination mit Niedrigstschallschutzwände unmittelbar am Gleis erreicht werden. Schallschürzen alleine ohne bauliche Massnahmen am Gleis können eine Pegelreduktion von 1 dB bringen.

Im oberen Geschwindigkeitsbereich ab 200 km/h spielen die aerodynamischen Strömungen um die Lokomotive eine entscheidende Rolle im Lärmverhalten. Besonders bei lokbespannten Zügen ist der Übergang von der Lokomotive zu den Wagen ein neuralgischer Punkt. Gerade bei festen Zugverbänden (Wendezüge) kann ein Umbau der Lokomotive zu einem Triebkopf mit bündigem Übergang zu den Wagen in Erwägung gezogen werden. So ein Umbau ist aber sehr kostenaufwändig. Die Lärmreduktion wird mit 3 bis 4 dB angenommen.

In der unten stehenden Tabelle sind die möglichen Lärmsanierungsmassnahmen an der Lok 2000 mit Bewertung der Kosten und des Nutzens dargestellt.

Massnahme	Betriebszustand	Reduktionspotential	Kosten
Veränderung Ventilatorsteuerung	Stillstand	2-3 dB	gering
Austausch Radschallabsorber	Anfahrt	2 dB	mittel
Umbau zu Triebköpfen	Vorbeifahrt	3-4 dB	hoch
Schallschürzen Drehgestell	Vorbeifahrt	1 dB	hoch

- **TRAXX**

  Prinzipiell sind die Lokomotiven der TRAXX-Familie sehr lärmarme Lokomotiven. Deshalb ist das Lärmreduktionspotential bei den vorgeschlagenen Massnahmen im Vergleich zu den Altbaulokomotiven nicht sehr gross.

  Das dominierende Geräusch des Stromrichters im Stillstand kann durch eine verbesserte Dämmung des Lokomotivkastens nach aussen mittels Ausstattung mit Absorptionsmaterial gemindert werden. Es wird eine Schallpegelreduzierung um 2 dB erwartet.

  Der Lärm des Stromrichters kann auch durch Änderung des Taktmusters bei der Ansteuerung reduziert werden. Besonders die Tonhaltigkeit kann damit reduziert werden. Das Reduktionspotential wird dabei mit 2 bis 3 dB angenommen.

  Bei der Anfahrt dominiert bei Lokomotiven der TRAXX-Familie das Getriebegeräusch. Durch Optimierung der Zahnräder kann eine Lärmreduktion von 2 dB erreicht werden. Dies ist aber mit sehr hohen Kosten verbunden.

  Die Kosten und der Nutzen der Lärmreduzierungsmassnahmen an den Lokomotiven der TRAXX-Familie sind in unten stehender Tabelle zusammengefasst.

Massnahme	Betriebszustand	Reduktionspotential	Kosten
Verbesserte Dämmung Lokomotivkasten	Stillstand / Anfahrt	2 dB	hoch
Änderung Taktmuster Stromrichter	Stillstand / Anfahrt	2-3 dB	mittel
Optimierung Getriebezahnräder	Anfahrt	2 dB	hoch

- **Diesel-Streckenlok**

  Bei den Diesel-Streckenlokomotiven ist besonders der Dieselmotor die dominante Lärmquelle im Stillstand und bei Anfahrt.

  Der Dieselmotorlärm kann durch eine verbesserte Dämmung der Motorabdeckung an seiner Ausbreitung gehindert werden. Durch eine Isolation des Gehäuses und einer Ausstattung der notwendigen Luftein- und –ausgänge mit Schalldämpfern kann das Abstrahlen des durch den Dieselmotor erzeugten Lärms gemindert werden. So kann eine Lärmreduzierung um 5 bis 6 dB erreicht werden.

  Eine andere Variante, den Motorlärm zu reduzieren, wäre, den Lauf des Motors an sich zu optimieren und dadurch harmonischere Bewegungsabläufe zu schaffen. Dadurch kann eine Lärmreduzierung von etwa 3 dB erreicht werden, wobei die Kosten als sehr hoch eingeschätzt werden.

  In den folgenden Tabelle sind die Massnahmen zusammengefasst und mit Kosten und Nutzen bewertet.

Massnahme	Betriebszustand	Reduktionspotential	Kosten
Verbesserte Dämmung Motorabdeckung	Stillstand / Anfahrt	5-6 dB	mittel
Optimierung Dieselmotor	Stillstand / Anfahrt	3 dB	hoch

In **Tabelle 7-2** sind die möglichen Lärmminderungsmassnahmen für die einzelnen Streckenlokomotiven zusammengefasst. Der Nutzen ist mit Angabe des Reduktionspotentials in dB farblich bewertet (**grün** = hoher Nutzen, **rot** = geringer Nutzen). Die geschätzten Kosten sind auch farblich bewertet (**grün** = geringe Kosten, **rot** = hohe Kosten), so dass die Tabelle zeigt, dass bei den Einheitslokomotiven und bei der Re 450 der S-Bahn Zürich das grösste Lärmreduktionspotential mit gleichzeitig geringen Kosten vorhanden ist.

Fahrzeug-typ	NUTZEN [dB]			KOSTEN [GE]												
	Stillstand	Anfahrt	Vorbeifahrt	Optimierung Lüfter-steuerung	Teilabschaltung eines Drehgestells	Einbau Sinterbrems-klötze	Absorptionsschall-dämpfer	torsteuerung	Änderung Taktmuster Stromrichter	Austausch Radschall-absorber	Umbau zu Triebköpfen	Schallschürzen Dreh-gestell	verbesserte Dämmung Lokomotivkasten	Optimierung Getriebe-zahnräder	Verbesserte Dämmung Motorabdeckung	Optimierung Dieselmo-tor
Einheitslok	5			g												
	6				m											
		5-6	5-6			h										
S-Bahn Zürich (Re 450)	4-5						m									
	5							g								
		3							g							
		2								m						
		5-6	5-6			h										
Lok 2000	2-3							g								
		2								m						
			3-4								h					
			1									h				
TRAXX	2	2											h			
	2-3	2-3							m							
		2												h		
Diesel-Streckenlok	5-6	5-6													m	
	3	3														h

Tabelle 7-2: Kosten-Nutzen-Übersicht von den vorgeschlagenen Lärmminderungsmassnahmen für die betrachteten Streckenlokomotiven

7.2.2 Elektrische Triebwagen und Triebzüge

Die betrachteten elektrischen Triebwagen und Triebzüge sind meist moderne Fahrzeuge, da sich in der jüngsten Vergangenheit der Trend zu festen Zugverbänden immer mehr durchsetzt. Wegen der Modernität der Fahrzeuge ist der Lärmsanierungsbedarf nicht sehr offenkundig. Nur die Fahrzeuge vom Typ NPZ zeichnen sich teils durch ein hohes Lärmverhalten aus, so dass hier der grösste Handlungsbedarf besteht.

- **ICN**

  Da der ICN ein modernes Fahrzeug ist und auch teilweise Lärmsanierungsmassnahmen bei störendem Geräuschen schon durchgeführt wurden (Lüftergitteroptimierung), sind Verbesserungsmassnahmen im jetzigen Zustand des ICN sehr aufwändig.

  Im Stillstand ist beim ICN das Geräusch des Klimageräts die lauteste Lärmquelle. Durch eine verbesserte Kapselung des Klimageräts mit Schalldämpfer für Frischluftansaugung und Abluft kann dieses Geräusch um etwa 3 dB reduziert werden.

  Das dominierende Geräusch bei der Anfahrt und bei Vorbeifahrt mit mässiger Geschwindigkeit kann durch eine Änderung der Lüftungsgitter und eine Optimierung der Luftstromkanäle erreicht werden. Hier wurden bereits Verbesserungsmassnahmen im Vergleich zum Ablieferungszustand der Fahrzeuge erzielt, aber es ist eine weitere Lärmreduktion um etwa 2 dB vorstellbar.

Die Massnahmen sind in der unten stehenden Tabelle zusammengefasst. Die Kosten werden bei beiden Massnahmen auf hoch geschätzt, weil die Modifikationen ins Fahrzeugdesign integriert werden müssten.

Massnahme	Betriebszustand	Reduktionspotential	Kosten
bessere Abschirmung Klimagerät	Stillstand	3 dB	hoch
weitere Optimierung Lüftungsgitter	Anfahrt / Vorbeifahrt	2 dB	hoch

- **GTW**

  Der GTW ist ein modernes Nahverkehrsfahrzeug, der sich bereits durch ein gutes Lärmverhalten auszeichnet. Möglichkeiten zur Verbesserung gibt es durch eine Kapselung der Klimaanlage, Anbringen von Radschallabsorber und Optimierung der Lüfter.

  Die Klimaanlage ist derzeit im Stillstand das dominierende Geräusch. Durch eine verbesserte Kapselung im Zusammenhang mit Schalldämpfern kann der Schalldruckpegel um etwa 2 bis 3 dB gesenkt werden.

  Durch eine optimierte Gestaltung der Ventilatoren für Fahrmotor und Stromrichter oder einen reduzierten Lüfterbetrieb, wenn nicht die volle Kühlleistung gebraucht wird, kann das Lüftergeräusch gerade bei der Anfahrt um etwa 2 dB reduziert werden. Ein reduzierter Lüfterbetrieb kann durch eine angepasste Steuerung realisiert werden.

  Um das Makroschlupfpfeifen beim Anfahren zu reduzieren, können Radschallabsorber angebracht werden. Dadurch wird die Lärmabstrahlung vom Rad reduziert und eine Lärmreduzierung von etwa 2 dB erreicht werden.

  Die möglichen Massnahmen zur Lärmsanierung sind in der folgenden Tabelle zusammenfassend dargestellt.

Massnahme	Betriebszustand	Reduktionspotential	Kosten
bessere Abschirmung Klimagerät	Stillstand	2-3 dB	mittel
Optimierung Lüfter	Anfahrt / Vorbeifahrt	2 dB	mittel
Einbau Radschallabsorber	Anfahrt	2 dB	mittel

- **FLIRT**

  Der FLIRT stellt ein an sich lärmarmes Fahrzeug dar. Deshalb sind Verbesserungsmassnahmen hier nur im kleinem Umfang möglich bzw. bei grösseren Änderungen mit sehr hohen Kosten verbunden.

  Das störende Geräusch der Klimaanlage im Stillstand kann durch eine verbesserte Kapselung der Anlage und mit gleichzeitiger Installation von Schalldämpfern erreicht werden. Dadurch kann eine Reduzierung um etwa 3 dB erreicht werden.

  Beim Anfahren kann die Motorluftansaugung durch modifizierte Gitter optimiert werden. So kann eine Reduzierung des Schallpegels um etwa 2 dB erreicht werden.

  Das Makroschlupfpfeifen kann durch den Einbau des Radschallabsorbers um etwa 2 dB reduziert werden.

In der unten stehenden Tabelle sind die möglichen Lärmsanierungsmassnahmen zusammengefasst.

Massnahme	Betriebszustand	Reduktionspotential	Kosten
bessere Abschirmung Klimagerät	Stillstand	3 dB	mittel
Optimierung Motorluftansaugung	Anfahrt	2 dB	mittel
Einbau Radschallabsorber	Anfahrt	2 dB	mittel

- **NPZ**

  Fahrzeuge vom Typ NPZ sind teilweise schon länger als 20 Jahre im Betrieb, so dass bei diesen Fahrzeugen das grösste Lärmsanierungspotential vorhanden ist.

  Im Stillstand können durch eine verbesserte Lüftergestaltung und eine optimierte Luftstromführung die Lärmemissionen reduziert werden. Dadurch kann das Lärmverhalten auf ein Niveau wie bei modernen Fahrzeugen gebracht werden, was einer Reduktion von 4 bis 5 dB entspricht.

  Das laute Rad-Schiene-Kontaktgeräusch bei Vorbeifahrt ist darauf zurückzuführen, dass die Triebradsätze des NPZ mit GG-Bremsklötze ausgerüstet sind. Dadurch werden die Laufflächen der Räder aufgerauht, was zwar für ein gutes Traktionsverhalten benötigt wird, aber auch Lärm entstehen lässt. Durch den Austausch der GG-Bremsklötze durch Bremsklötze aus Sintermaterial kann das Lärmverhalten um etwa 4 bis 5 dB ohne der Gefahr der Traktionsreduktion reduziert werden.

  Die unten stehende Tabelle beinhaltet die Massnahmen zusammengefasst.

Massnahme	Betriebszustand	Reduktionspotential	Kosten
Optimierung Lüfter	Stillstand	4-5 dB	mittel
Austausch GG-Bremsklötze durch Kunststoff- bzw. Sinterbremsklötze	Vorbeifahrt	4-5 dB	mittel - hoch

Die **Tabelle 7-3** zeigt eine Zusammenfassung von den Kosten und Nutzen der vorgeschlagenen Lärmminderungsmassnahmen. Die Tabelle ist analog zur **Tabelle 7-2** aufgebaut und zeigt, dass ein besonders günstiges Kosten-Nutzen-Verhältnis bei der Optimierung der Lüfter von den NPZ-Fahrzeugen vorliegt.

Fahrzeug-typ	NUTZEN [dB]			KOSTEN [GE]					
	Stillstand	Anfahrt	Vorbeifahrt	bessere Abschirmung Klimagerät	weitere Optimierung Lüftungsgitter	Optimierung Lüfter	Einbau Radschallab-sorber	Optimierung Motorluft-ansaugung	Einbau Sinter- bzw. Kunststoffbremsklötze
ICN	3			h					
		2	2		h				
GTW	2-3			m					
		2	2			m			
		2					m		
FLIRT	3			m					
		2						m	
		2					m		
NPZ	4-5					m			
			4-5						m-h

Tabelle 7-3: Kosten-Nutzen-Übersicht von den vorgeschlagenen Lärmminderungsmassnahmen für die betrachteten elektrischen Triebwagen und Triebzüge

8 Empfehlung für weiteres Vorgehen

Wie die Diskussion der Lärmminderungsmassnahmen für die einzelnen Fahrzeugtypen gezeigt hat, gibt es bei den Einheitslokomotiven, der S-Bahn Zürich (Re 450) und den NPZs Möglichkeiten, das derzeitige Lärmverhalten mit vertretbaren Aufwand zu reduzieren. Deshalb schlagen wir als nächsten Schritt zur Lärmreduktion an vorhandenen Triebfahrzeugen vor, bei folgenden Fahrzeugen Projektanträge zur konstruktiven Umsetzung der angedachten Lärmsanierungsmassnahmen auszuarbeiten und Kontakt mit den Fahrzeugeignern aufzunehmen.

- **Vorprojekt Einheitslokomotive**
  Da die Einheitslokomotiven sicher noch eine Restlebensdauer von 15 bis 20 Jahren vor sich haben, macht eine Lärmsanierung an dieser Bauart Sinn. Die vorgeschlagenen Massnahmen der Optimierung der Lüftersteuerung und Abschaltung eines Drehgestells bei Teillast sollen mit dem Fahrzeugeigner geprüft werden und ein Projektantrag mit Auflistung der beteiligten Parteien und Kosten erstellt werden. Der Projektantrag soll die Phasen bis und mit Realisierung an einem Prototyp und Validierung der Lösung enthalten.

- **Vorprojekt Züricher S-Bahn (Re 450)**
  Die bei den Lokomotiven der Züricher S-Bahn (Re 450) vorgeschlagenen Lärmsanierungsmassnahmen sind die Veränderung der Ventilatorsteuerung und Einbau von Absorptionsschalldämpfer an den Ansaug- und Ausblasöffnungen der Ventilatoren. Die Lokomotiven werden bis etwa 2030 im Einsatz stehen, so dass eine Investition in diese Richtung noch zu einem langen Nutzen führen würde. Analog zum Vorprojekt Einheitslokomotive soll ein Projektantrag ausgearbeitet werden.

- **Vorprojekt NPZ**
  Bei den NPZs der SBB steht derzeit eine grössere Sanierung der Fahrzeuge an. In diesem Zusammenhang könnte auch auf lärmkritische Punkte eingegangen werden und im Zuge des Umbaus auch die vorgeschlagene Optimierung der Lüftersteuerung eingeplant werden. Auch hier soll analog zum Vorprojekt Einheitslokomotive ein Projektantrag erstellt werden.

Das Resultat der Vorprojekte wird eine klare Grundlage für eine Prototypsanierung sein. Nach der durchgeführten Prototypsanierung sind Kosten und Nutzen der Massnahmen bekannt und es liegen damit die Entscheidungsgrundlagen für eine Seriensanierung vor.

9 Literatur

[1] *Noise Concept 3 EH-105032*
Adtranz, Center of Expertise, Electrical Locomotives & Powerheads, S. 40, 11.1999.

[2] *Vermeiden von Kurvenkreischen von Eisenbahnen - Veröffentlichungsbericht*
PROSE AG, Bericht Nr.: 2-162, 14.03.2005

[3] *Die Diesellokomotive – Aufbau, Technik und Auslegung*
J. Feihl, transpress-Verlag, Stuttgart, 1997

[4] *Rollgeräuschuntersuchung für verschiedene Radbauarten*
M. Hecht, M. Wiemers, Eisenbahningenieur (50) 7/99, S.49 – S. 53

[5] *EN ISO 3095, Railway applications – Acoustics – Measurement of noise emitted by railbound vehicles (ISO 3095:2005)*

[6] TSI CR NOISE: *Directive 2001/16: Noise Emitted by Freight Wagons, Locomotives, Multiple Units and Coaches,* 23.11.2004.

[7] *EN ISO 3381, Railway applications – Acoustics – Measurement of noise inside railbound vehicles (ISO 3381:2005)*

[8] *Lärm und Erschütterungen – 3. Zwischenbericht*
SBB, Arbeitsgruppe MDS 5.1/2 „Bekämpfung von Lärm und Erschütterungen“, Bern, September 1983

[9] *Typenprüfung S-Bahn Fahrzeuge – Akustische Messungen, Vibrationsmessungen*
Generaldirektion SBB, Bauabteilung, Zentralstelle für Lärmfragen, Bericht USE 173, Februar 1990

[10] *SBB Typentestbericht: Aussenlärmmessung Re 4/4'', Analyse Istzustand und Einfluss Drehgestellrahmenentdröhnung, Klotzbremseinsatz vom Oktober 1994*

[11] *SBB Typentestbericht: Lärmmessung KTU-Lok Re 4/4 vom August 1989*

[12] *Typenprüfung Re 460 – Block 11 Akustische Anforderungen*
Generaldirektion SBB, Baudirektion, Zentralstelle für Lärmfragen, Bericht A015, Dezember 1994

[13] *Lärmdesign moderner Triebfahrzeuge – am Beispiel der Lok 2000-Familie*
M. Hecht, H. Zogg, Sonderdruck aus Elektrische Triebfahrzeuge, 1995

[14] *SBB Typentestbericht: Re 484 Lärmtypentest – Abschlussbericht vom 21.09.2004*

[15] *SBB Typentestbericht: SBB Re 484 Zusatzmessungen Lärm vom 21.09.2004*

[16] *SBB Information: Lärmmesswerte Am 843 vom 21.09.2005*

[17] *SBB Typentestbericht: SBB-Intercity-Neigezug RABDe 500 008-8 Typentest Schall vom 26.10.2001*

[18] *SBB Typentestbericht: RABe 526 701 – 780 („Thurbo-GTW“ 2/6) Lärmtypentest – Abschlussbericht vom 19.05.2004*

[19] *SBB Typentestbericht: Stadler Typentest „FLIRT“ Lärmtypentest vom 20.10.2004*

[20] *Schallmessung NPZ Trieb- und Steuerwagen: RBDE 4/4 und Bt*
Generaldirektion SBB, Bauabteilung, Zentralstelle für Lärmfragen, Bericht 2417, 24.10.1986

[21] *Lärmarme Umrichter- und Fahrmotorventilation der SBB Re 460*
M. Hecht, B. Kühn, Schweizer Eisenbahn-Revue 9/1993, S.396 – S. 399

[22] *Taschenbuch der technischen Akustik*
M. Heckl, H.A. Müller, Springer-Verlag, 2. Auflage, Berlin, Heidelberg, 1994

[23] *Fortschritte zur Reduzierung der akustischen Emissionen*
G. Hölzl, Eisenbahntechnische Rundschau 48 (1999), H. 5, S. 304 – S. 313