

Empa  
Überlandstrasse 129  
CH-8600 Dübendorf  
T +41 58 765 11 11  
F +41 58 765 11 22  
www.empa.ch



Materials Science & Technology

Bundesamt für Umwelt BAFU,  
Abteilung Lärm und NIS  
3003 Bern

## Beurteilung und Begrenzung des Lärms von abgestellten Zügen

Untersuchungsbericht:	Empa-Nr. 460'395-2, int. 516.2549
Ihr Auftrag vom:	19. März 2012
Anzahl Seiten inkl. Beilagen:	35

---

Dübendorf, 30. September 2013

Die Projektleiterin:

*B. Locher*

Barbara Locher

Abteilung Akustik / Lärminderung

Der Abteilungsleiter:

*K. Eggenschwiler*

Kurt Eggenschwiler

## Inhaltsverzeichnis

1	Ausgangslage und Auftrag	4
2	Projektkoordination, Vorgehen und Aufbau des Berichtes	4
3	Quellenbeschreibung	6
4	Empfehlung für die Quellenmodellierung und Ausbreitungsrechnung	8
5	Beurteilung des Lärms abgestellter Züge und Festlegung von Pegelkorrekturen	10
6	Ermittlung von Quellendaten	11
7	Zur Repräsentativität von Emissionsmessungen an einzelnen Zügen	17
8	Unsicherheitsbetrachtung	22
9	Aufbau und Struktur der Emissionsdatenbank	24
10	Berechnungstool für nächtlichen Standlärm von Eisenbahnen	26
11	Validierung des Berechnungstools	30
12	Einreihung der Züge nach Emissionen und Grundlagen für die Empfehlung von Sicherheitsabständen	31
13	Massnahmen zur Lärminderung	32
14	Diskussion	33

## Glossar

Abrüsten	Komplettes Abstellen des Zuges, i.e. wird Pantograph heruntergenommen
Abstellen	Übergang vom Stillstand- bzw. Parkbetrieb zu Schlummerbetrieb (Pantograph am Fahrdrabt)
Aufrüsten	Inbetriebnahme eines komplett abgerüsteten Zuges, inkl. Pantograph hochfahren (nicht betriebstypisch)
Erstellung Fahrbereitschaft	Inbetriebnahme des Zuges aus dem Schlummerbetrieb (Pantograph ist schon oben)
Schlummerbetrieb	Systeme auf Minimalbetrieb
Stillstand / Parken	Halt bei voller Fahrbereitschaft sowie Automatikbetrieb von Hilfsbetriebe, Klima usw.

## Impressum

<b>Auftraggeber:</b>	Bundesamt für Umwelt (BAFU), Abteilung Lärm / NIS, CH-3003 Bern
<b>Auftragnehmer:</b>	Eidg. Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Abteilung Akustik / Lärminderung
<b>Autoren:</b>	Barbara Locher, Jean Marc Wunderli
<b>Begleitung BAFU:</b>	Kornel Köstli
<b>Hinweis:</b>	Dieser Bericht wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

## Zusammenfassung

Die Empa Abteilung Akustik/Lärminderung wurde durch das BAFU, Abteilung Lärm und NIS beauftragt, Grundlagen für einen Leitfaden zur Beurteilung und Begrenzung des Lärms von abgestellten Zügen zu erstellen. Ergänzend dazu sollen ein Berechnungswerkzeug auf Excel-Basis entwickelt sowie vorhandene Emissionsdaten aufbereitet und in einer Datenbank abgelegt werden. Die Durchführung der Emissionsmessungen sowie der Aufbau der Emissionsdatenbank erfolgte mit Unterstützung und Finanzierung der SBB.

Als Schallquellen bei stehenden Zügen treten primär Hilfsaggregate wie Klimaanlage, Kühlsysteme von Restaurants sowie luft- bzw. flüssigkeitsbasierte Kühlsysteme der Energieversorgungs- und Traktionssysteme sowie Druckluftkompressoren in Erscheinung. Diese führen zu intermittierenden Dauergeräuschen und seltener zu impulsartigen Einzelereignissen. Relevante Schallquellen finden sich primär, aber nicht ausschliesslich, an Triebzügen und Lokomotiven. Die Erfassung dieser Quellen erfolgt im Hinblick auf ein Beurteilungswerkzeug sinnvollerweise als einzelne Punktquellen und nicht als integrale Beschreibung ganzer Züge. Die Schallemissionen der Züge hängen stark vom Betriebszustand ab, wobei zwei Zustände unterschieden werden: Stillstand/Parkieren und Schlummern.

Die Beurteilung des Lärms abgestellter Züge erfolgt nach Anhang 6 der Schweizerischen Lärmschutzverordnung. Im Bericht werden Empfehlungen für die Anwendung von Anhang 6 inkl. der Vergabe der Pegelkorrekturen gegeben.

Als Grundlage zum Aufbau einer Emissionsdatenbank bieten sich Abnahmemessungen an, welche nach EN ISO 3095 bzw. TSI CR NOISE durchgeführt wurden. Messberichte welche auf dieser Grundlage erstellt wurden, wurden im Rahmen des Projektes aufbereitet. Ergänzend wurden zusätzliche Messungen durchgeführt, zum einen an Fahrzeugen bzw. Geräuschquellen, für welche keine Messdaten vorliegen, zum anderen zur Klärung zusätzlicher Fragen bezüglich der Repräsentativität von Abnahmemessungen, zur Charakterisierung des realen Betriebes und zur Abschätzung der Streuung der Schallemissionen innerhalb einer Fahrzeugflotte.

Es wurde ein Beurteilungswerkzeug auf Excel-Basis entwickelt, welches ein vereinfachtes Ausbreitungsverfahren ausgehend von der ISO-Norm 9613 verwendet. Mit dem Berechnungswerkzeug wurden für sämtliche Züge aus der Emissionsdatenbank Beurteilungspegel berechnet sowie eine Festlegung von minimalen Sicherheitsabständen vorgenommen. Die minimalen Sicherheitsabstände variieren stark und reichen für Zonen mit Empfindlichkeitsstufe II von unter 50 m für leise Fahrzeuge wie FLIRT und Re450 bis zu knapp 200 m beim TGV. Dieses auf Minimalabständen basierende Konzept kann zur Identifikation potenziell problematischer Abstellorte und somit als Planungswerkzeug eingesetzt werden. Auf ein Clustering, d.h. eine Zusammenfassung der Fahrzeuge in beurteilungsmässig ähnliche Fahrzeugtypen, wurde aufgrund der beschränkten Anzahl relevanter Personenzugsarten mit lediglich 15 bis 20 separaten Fahrzeugtypen verzichtet. Im letzten Kapitel werden zusätzlich verschiedene Massnahmen zur Lärminderung diskutiert.

## 1 Ausgangslage und Auftrag

Mit dem zunehmenden Mobilitätsangebot gibt es immer mehr Züge, was zu einem grösseren Abstellbedarf auf begrenztem Raum führt. Der Lärm von über Nacht abgestellten Zügen ist ein wachsendes Problem. Das Rollmaterial besteht neben lokbespannten Zügen zunehmend aus Triebzügen mit über den ganzen Zug verteilten Emissionsquellen, die dann auch nachts am Netz bleiben. Da die Bahnhöfe und insbesondere die Abstellgleise vorwiegend in überbauten Gebieten mit Wohncharakter liegen, führt dies seitens der betroffenen Anwohner vermehrt zu Lärmbeschwerden. Neben Personenzügen werden auch Güterwagen oder Begleitfahrzeuge der rollenden Landstrasse abgestellt, deren Kühlaggregate erheblichen Lärm abstrahlen können. Da viele der Güterwagen nachts unterwegs sind und die abgestellten Güterwagen normalerweise dezentral resp. in einem Gewerbegebiet stehen, ist der Lärm von abgestellten Güterwagen weniger von Bedeutung und wird deshalb in vorliegendem Bericht nicht weiter untersucht.

Die Empa Abteilung Akustik/Lärminderung mit Vertrag Nr. 00.0334.PZ / L125-0752 wurde vom Bundesamt für Umwelt BAFU beauftragt, Grundlagen zur Beurteilung und Begrenzung des Lärms von abgestellten Zügen zu erarbeiten. Die Auftragsbeschreibung wurde dabei wie folgt vorgegeben:

1. Akustische Identifikation und Beschreibung der massgebenden Emissionen der Lärmquellen der verschiedenen Fahrzeuge; Als Grundlage hierfür dient der Bericht 2-167; PROSE AG, Studie zur Thematik „Lärminderung an Triebfahrzeugen“; 2006.
2. Zusammenfassen (Clustering) der Fahrzeuge zu beurteilungsmässig ähnlichen Fahrzeugtypen.
3. (Wenn möglich) Zusammenfassen (Clustering) der Fahrzeuge zu beurteilungsmässig ähnlichen Zugs-kompositionen.
4. (Wenn möglich) Vereinfachen der Beurteilungsmethode, so dass die Lärmbeurteilung (emissionsseitig) anhand von wenigen, gut zugänglichen Parametern vorgenommen werden kann.
5. Umsetzen der Beurteilungsmethode in ein Excel-Tool.
6. Vorschlagen von möglichen technischen oder betrieblichen Lärminderungsmassnahmen.

## 2 Projektkoordination, Vorgehen und Aufbau des Berichtes

Parallel zu den Aktivitäten des BAFU und dem Auftrag an die Empa laufen auch ähnlich gelagerte Projekte bei BAV und SBB. Anlässlich einer Startsituation mit Vertretern von BAV (Robert Attinger, Philipp Wälterlin), BAFU (Kornel Köstli, Sandro Ferrari) und SBB (Ralf Hofer, Michael Hafner) zum Thema „Lärm abgestellte Züge“ vom 3. April 2012 wurden die Arbeiten koordiniert sowie Zuständigkeiten, Schnittstellen und Synergien festgelegt. Dabei wurden auch fünf Arbeitspakete definiert. Die nachfolgenden Auszüge aus dem Protokoll der Startsituation fassen die Aufträge zusammen:

- Die Infrastrukturhaberinnen (SBB, BLS) sollen mittels Fragebogen (Entwurf des BAFU vom 4. April 2012) ihre Abstellanlagen (Ort, Anzahl Gleise, Kontaktperson etc.), die abgestellten Fahrzeugtypen, deren Aggregate und Betriebszeiten erfassen.
- Die SBB und EMPA erarbeiten ein Messkonzept. Sie werden dabei vom BAFU begleitet. Das Messkonzept wird dem BAV/BAFU zur Prüfung vorgelegt, bevor mit den Messungen begonnen wird.
- AP1 Beurteilung nach LSV: Das BAFU legt in einem schriftlich Exposé dar, nach welchem Geltungsbereich von Anhang 6 Ziff. 1 LSV der Lärm abgestellter Züge zu beurteilen ist und weshalb keine Beurteilung nach Art. 40 Abs. 3 LSV angezeigt ist.
- AP2 Messungen an Fahrzeugen: Bis Ende Mai 2012 erstellt die EMPA mit der SBB das Messkonzept. Die Messungen werden bis Ende 2012 durchgeführt. Ziel ist ein "Kompendium" betreffend Zugsty-

- pen und deren Emissionen je nach Betriebszustand, welches als standardisierte Grundlage für die Immissionsberechnungen bei verschiedenen Abstellanlagen dienen soll.
- AP3 Erhebung Abstellanlagen: SBB prüfen den Fragebogen an einem konkreten Beispiel. Soweit nötig, werden Anpassungen vorgenommen.
  - AP4 Übersicht Anlagen (Grobkataster): Zu klären ist, ob Pläne der Abstellanlagen in einen Grobkataster integriert werden können (Anzahl, Länge der Gleise; Abstand zu den benachbarten Wohnzonen, etc.).
  - AP5 Aufzeigen Massnahmenfelder an Fahrzeugen. Das AP5 gehört nicht zum eigentlichen Projektauftrag. Es betrifft die konkreten Massnahmen an Fahrzeugen, obwohl die Emissionen im Einzelfall noch nicht bekannt sind. Ziel ist es folglich, Vorarbeit zu leisten, um bei Vorliegen der Messergebnisse umgehend mit der Evaluation beginnen zu können.

Entsprechend diesen stark verzahnten Aufträgen wurde beschlossen, die Umsetzung der Projekte gemeinsam voranzutreiben. Anlässlich einer ersten Sitzung vom 12. Mai 2012 wurden die Aufträge konkretisiert und das weitere Vorgehen festgelegt. Als entscheidend wurde die Sichtung der vorhandenen Emissionsdaten sowie die Erarbeitung vertiefter Fahrzeugkenntnisse erachtet. Deshalb wurde durch die SBB ein Treffen mit Dr. Ralf Hofer, Leiter CoC, Fahrzeugklimatechnik anberaumt, welches am 22. Mai in Olten durchgeführt wurde. Die SBB erklärte sich in der Folge bereit, sämtliche Messberichte zur Verfügung zu stellen, welche im Rahmen von Abnahmemessungen durchgeführt wurden. Dies allerdings unter der Voraussetzung, dass von der Empa eine Geheimhaltungserklärung unterschrieben wird, in welcher sich die Empa verpflichtet sämtliche Informationen geheimzuhalten, ausschliesslich im Rahmen dieses Projektes zu verwenden und nicht an unberechtigte oder Dritte zugänglich zu machen. Einen Überblick zu diesen Emissionsdaten ist in Kapitel 6.2 zu finden.

Im Hinblick auf ergänzende Emissionsmessungen wurde am 26. Juni eine Besichtigung eines Abstellbereiches beim Bahnhof Basel in Begleitung von Herrn Merz, Chef Lokpersonal, sowie Herrn Zima, Lokführer, beide von Personenverkehr (P-OP-ZF, Personenverkehr-Operating-Zugführung) durchgeführt. Um ebenfalls eine Zusammenarbeit und einen Austausch mit der BLS einzuleiten, wurde zusätzlich mit Herrn Sydler von der BLS Netz AG Kontakt aufgenommen.

In einem Zwischenbericht vom 11. Juli 2012 mit der Empa-Nr. 460'395 wurde der Stand der Arbeiten dokumentiert sowie das weitere Vorgehen skizziert.

Am 28. und 29. August 2012 wurden im Abstellbereich des Bahnhof Basel während dem Tag Pilot-Messungen an mehreren FLIRT-Kompositionen sowie an einem TGV durchgeführt, dies zum einen um Erfahrungen mit dem Messkonzept zu sammeln und zum anderen um Informationen über die Pegelsteuerung innerhalb einer Zugskategorie zu erhalten.

In enger Zusammenarbeit mit der SBB, Bereiche CoC, Klimatechnik sowie Infrastruktur Lärmschutz (Michael Hafner) wurden am 14. bis 16. November in Chur an einem Domino und einer Re 460 sowie am 22./23. November 2012 in Rapperswil an einem DTZ Emissionsmessungen durchgeführt. Weitere Emissionsmessungen folgten für einen TGV POS am 21./22.6.2013, einen DTZ am 2./3.7.2013 und einen ICN am 8./9.7.2013. Die Auswertungen dieser Messungen sind in einem separaten Bericht zusammengestellt (Empa-Nr. 460'395-3).

Im vorliegenden Untersuchungsbericht werden allgemeine Grundlagen und Empfehlungen zur Beurteilung und Begrenzung des Lärms von abgestellten Zügen zusammengestellt. Namentlich werden:

- Grundlagen zur Quellenbeschreibung und -klassierung sowie zur Beurteilung gegeben.
- Im Rahmen des Projektes entwickelte Werkzeuge, wie die Emissionsdatenbank sowie ein auf Excel basierendes Tool zu Berechnung von Immissionspegeln werden vorgestellt.

- Aufgrund der bisher vorhandenen Emissionsdaten die Fahrzeuge gemäss ihrem Störungspotenzial eingereiht und Sicherheitsabstände abgeleitet.
- In allgemeiner Form Empfehlungen für weitergehende Massnahmen zur Lärminderung gegeben.

### 3 Quellenbeschreibung

#### 3.1 Beschreibung und Klassierung

An stehenden Zügen können ganz unterschiedliche Quellen relevante Schallemissionen erzeugen. Häufig sind dies Hilfsaggregate wie Klimaanlage, luft- und flüssigkeitsbasierte Kühlsysteme für Energieversorgungs- und Antriebssysteme sowie Druckluftkompressoren.

Diese Schallquellen verursachen in der Regel intermittierende Dauergeräusche. In Abbildung 1 ist zur Illustration die Messung eines abgestellten FLIRTS dargestellt. Deutlich zu erkennen ist der regelmässig auftretende Pegelanstieg vom Niveau des Hintergrundgeräusches, zwischen 45 und 50 dB(A), auf rund 64 dB(A) als Folge von Lüftungsaggregaten. Zu Beginn der Messung ist eine grössere Aktivität zu erkennen, da das Fahrzeug aufgrund einer Türöffnung nicht im Parkmodus war. Nach rund einer viertel Stunde wird der Parkmodus automatisch wieder erreicht, so dass sich die Lüftungsintervalle vergrössern. Die zweite Kurve in Abbildung 1 zeigt den Verlauf der 80 Hz Terz. Dieses Terzband wird durch Druckluftkompressor-Geräusche dominiert. Es ist zu erkennen, dass der Druckluftkompressor unabhängig von der Lüftung rund alle 24 Minuten für ca. 5 Minuten anspringt.

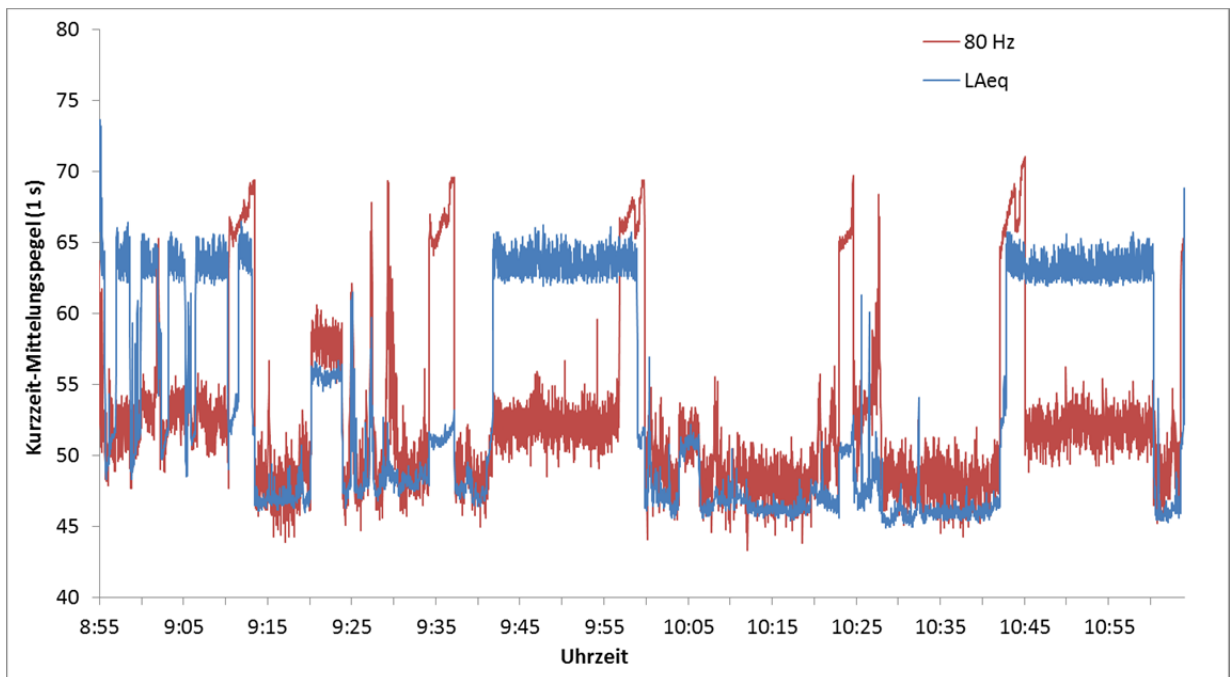


Abbildung 1: Messung eines Endwagens des Triebzugs FLIRT ID 521020, Abstellbereich Bahnhof Basel, 29. August 2012 (Mikrofonposition X/Y/Z relativ zur Fahrzeugspitze: 10.2 / 2.4 / 1.6 m).

In Absprache mit der SBB wurde festgelegt, sämtliche Lärmquellen einer der folgenden sechs Kategorien zuzuweisen:

- 1) **Heizungs-/Lüftungs-/Klimaanlagen** (HLK-Anlagen) für die Führerstände (FST) und die Fahrgasträume (FGR)
- 2) **Lüfter technischer Kühlsysteme** für Fahrmotoren und Energieversorgungssysteme wie Transformatoren, Stromrichter oder Bordnetzumrichter/Hilfsbetriebsumrichter (HBU)

- 3) **Pumpen technischer Kühlsysteme** für Fahrmotoren und Energieversorgungssysteme wie Transformatoren, Stromrichter oder Bordnetzumrichter/Hilfsbetriebsumrichter (HBU)
- 4) **Druckluftkompressoren**, welche zum Druckaufbau in pneumatischen Systemen (Bremsen, Türöffnungen) gebraucht werden)
- 5) **Sicherheitskontrollen zur Erstellung der Fahrbereitschaft**
- 6) **Kühlsysteme von Restaurants**

Die einzelnen Schallquellen sind je nach Fahrzeug an unterschiedlichen Positionen zu finden. Sie können sich im Unterflurbereich, an der Fahrzeugseite oder auch auf dem Dach befinden. Neben Triebzügen und Lokomotiven, welche in der Regel eine Vielzahl von Hilfsaggregaten aufweisen, können auch bei Reisezugwagen relevante Schallquellen lokalisiert werden.

Als weitere störende Ereignisse werden teilweise die Aktivitäten des Reinigungs- und Sicherheitspersonals genannt. Diese Ereignisse treten nur sporadisch auf und sind sehr standortspezifisch. Sie lassen sich weder in einheitlicher Form beschreiben noch geeignet prognostizieren und werden deshalb im Rahmen dieser Untersuchung nicht berücksichtigt.

### **3.2 Betriebszustände**

Die Schallemissionen der Züge hängen stark vom Betriebszustand ab. Gemäss einer Systematik der SBB können zwei Zustände unterschieden werden: **Stillstand/Parken** und **Schlummern**. Als Stillstand wird ein Halt bei voller Betriebsbereitschaft bezeichnet, wie er z.B. an einem Signal oder in einem Bahnhof auftritt. Parkieren ist grundsätzlich gleich wie Stillstand, obwohl einzelne Fahrsysteme nicht aktiv sind, so dass automatische Leistungsreduktionen von Hilfsbetrieben der Antriebssysteme typisch sind. Beim Schlummern sind sämtliche Systeme auf einen Minimalbetrieb herunter gefahren. Der Betriebszustand Schlummern wird nicht von allen Fahrzeugen unterstützt. Bei älteren Fahrzeugen, welche vor ca. 2004 eingeführt wurden, wurde dieser Zustand von den Herstellern noch nicht verlangt. Teilweise, z.B. beim ICN, ist aber eine Nachrüstung möglich, wobei es sich primär um Software-Anpassungen handelt.

Für die Beurteilung des Standlärms, welcher primär ein nächtliches Problem darstellt, ist der Zustand Schlumberbetrieb massgeblich. Beim Abstellen des Zuges dauert der Übergang vom Modus Stillstand/Parken bis zum ruhigeren Modus Schlummern je nach System zwischen wenigen Minuten und rund einer halben Stunde. Als allgemeine Regel wird durch die SBB eine halbe Stunde als Vorgabe für die Software-Steuerungen vorgegeben. Dieser Wert wird entsprechend auch als Standard-Einstellung für das Emissionstool verwendet. Teilweise kann der Lokführer den Übergang zum Schlummer-Modus manuell beschleunigen. Dies erfolgt beispielsweise durch Löschen der Beleuchtung oder durch Eingabe einer Bereitstellungszeit.

Im Schlummermodus werden die Hilfsaggregate aufgrund einer automatischen Steuerung aktiviert bzw. deaktiviert. Die Systeme sind somit nicht die ganze Zeit in Betrieb. Bei pneumatischen Systemen wird ein minimaler Druck von ca. 6 bar aufrecht erhalten, bei Klimatisierungen und Lüftungen werden die Bedingungen innerhalb vorgegebener Parameter gehalten. So wird beispielsweise im Schlummermodus die Klimasteuerung bei den Reisezugwagen aktuell so betrieben, dass zwischen 10 und 28°C Innentemperatur auf eine Klimatisierung vollständig verzichtet wird. Im Schlummermodus wird ebenfalls auf die mechanische Kälteerzeugung verzichtet, und nur mit Aussenluft gelüftet. Generell kommt die eigentliche Fahrgastraum-Lüftung nur zur Anwendung wenn innen heisser als aussen ist und die Innentemperatur mehr als 28°C beträgt, d.h. in ausgesprochen heissen Nächten und somit sehr selten. Die Fahrgast- und Führerstandsheizung wird im Vergleich zur eigentlichen Kühlung zwar häufiger benötigt; bei modernem Rollmaterial sind die Heizungen aber generell sehr leise, so dass diese Schallquelle in der Regel vernachlässigt werden kann. Es kann somit gefolgert werden, dass im Hinblick auf die Lärmbelastigungen die Druckluftkompressoren,

Pumpen und die Lüfter, namentlich der Kühlsysteme der Energieversorgungs- und Antriebseinheiten, entscheidend sind.

Bei der neuerlichen Inbetriebnahme des Fahrzeuges werden verschiedene Sicherheitstests durchgeführt, welche mit Emissionen verbunden sein können. Dabei treten neben den erwähnten Schallquellen von Lüftern, Pumpen und Druckluftkompressoren zusätzlich impulsartige Einzelereignisse auf, beispielsweise bei Bremstests, bei welchen schlagartig Druckluftventile geöffnet werden oder beim Ein- und Ausschalten des Hauptschalters. Der Hauptschalter wird dabei zwei bis maximal vier Mal betätigt und befindet sich in der Regel in unmittelbarer Nähe des Trafos und Stromrichters, resp. der Pantographen. Parallel zur Betätigung des Hauptschalters finden max. 4 Bremsproben statt, wobei die Schallquellen in Drehgestellmitte lokalisiert werden können. Durch die mehrfachen Bremsproben startet der Druckluftkompressor und läuft praktisch durch. Die Erstellung der Fahrbereitschaft, dauert je nach Fahrzeugtyp rund 15 bis 30 Minuten. Die Phase mit erhöhter Lärmbelastung, namentlich aufgrund von impulsartigen Geräuschen, dauert typischerweise 10 Minuten und wird bei der Modellierung als eigene Betriebsphase abgebildet.

Die Triebzüge bleiben beim Abstellen, d.h. dem Übergang zum Park- bzw. Schlummermodus, in der Regel am Netz und verursachen keine impulsartigen Geräusche. Beim Schlummern ist es allerdings möglich, dass während einer gewissen Zeit ( $\leq 20$  Minuten) die Schallemissionen aufgrund grösseren Lüftungsbedarfs noch erhöht sind. Aufgrund der bisherigen Messerfahrungen hat sich jedoch gezeigt, dass dies selten auftritt und im Hinblick auf die resultierenden Beurteilungspegel nicht relevant ist. Aus diesem Grund wird auf eine Festlegung eines eigenen Betriebszustandes verzichtet.

## **4 Empfehlung für die Quellenmodellierung und Ausbreitungsrechnung**

### **4.1 Modellierung als Punktquellen**

Es wird empfohlen, einen Zug bzw. ein einzelnes Fahrzeug nicht integral als Schallquelle zu modellieren, sondern diesen aus mehreren auf der Fahrzeugoberfläche verteilten Punktquellen zusammen zu setzen. Die Abbildung von Geräuschquellen wie Lüftungsaus- oder -einlässen als Punktquellen ist grundsätzlich zulässig, sofern man sich im Fernfeld befindet und sich bei der späteren Ausbreitungsmodellierung bewusst bleibt, dass die Quelle in Wirklichkeit eine Ausdehnung aufweist. Die Lage der Quellen soll sich dabei an den Fahrzeugeigenschaften orientieren und beispielsweise Auslässe von Lüftungen oder Druckluftkompressoren beschreiben. Die Anzahl und Lage der Quellen muss somit für jeden Fahrzeugtyp individuell festgelegt werden.

### **4.2 Richtwirkung**

Es kann nicht a priori davon ausgegangen werden, dass die einzelnen Punktquellen keine Richtwirkung aufweisen. Aufgrund der Tatsache, dass sich entlang eines Zuges eine Vielzahl von Einzelquellen befinden und dass die Züge nicht immer genau an der gleichen Stelle stehen, kann jedoch zumindest die Richtwirkung in der Horizontalen eher vernachlässigt werden. Gerade bei Quellen im Dachbereich, welche bei einer Abstrahlung gegen unten durch das Fahrzeug selbst abgeschirmt werden, ist aber von einer bedeutenden Richtwirkung in der Vertikalen auszugehen. Im Hinblick auf die Wirkung von Hindernissen und die Immissionsberechnung bei Punkten, welche höher als das Fahrzeugdach liegen, wäre es deshalb mit dem Ziel einer hohen Genauigkeit von Vorteil, diese Richtcharakteristik in der Vertikalen zu berücksichtigen. Allerdings wäre eine messtechnische Bestimmung einer Richtwirkungskorrektur aufgrund des Aufwandes nur im Einzelfall möglich, messtechnisch sehr anspruchsvoll und durch Sicherheitsauflagen eingeschränkt (die Messhöhe ist wegen der Nähe zu den Fahrleitungen limitiert). Es wird deshalb vorgeschlagen für Emissionsmes-



sungen Mikrofonpositionen zu wählen, welche für die Ausbreitung in Richtung typischer Immissionspunkte repräsentativ sind und bei der Quellenmodellierung von einer ungerichteten Abstrahlung auszugehen.

### **4.3 Fahrzeugeinfluss**

Die einzelnen Schallquellen können sich zu beiden Seiten der Fahrzeuge, im Dachbereich oder unter dem Fahrzeug befinden. Die Teilquellen werden somit bei der Schallausbreitung hin zu einem bestimmten Immissionspunkt zumindest teilweise durch das Fahrzeug selbst abgeschirmt. Die rechnerische Modellierung dieser Ausbreitungssituation erweist sich als ausgesprochen anspruchsvoll, da nicht nur Hinderniswirkungen sondern auch Reflexionsbeiträge unter dem Fahrzeugboden berücksichtigt werden müssen. Um korrekte Resultate zu ergeben müsste eine Simulation auf dieser Basis auch auf einer deutlich detaillierteren Quellenmodellierung aufbauen können, welche nicht nur Richtwirkungen sondern auch die effektive Ausdehnung der Quelle berücksichtigt. Ein entsprechender Aufwand erscheint weder praktikabel noch praxistauglich. Deshalb wird auf eine Abbildung des Fahrzeugs selbst verzichtet und die Quellenpositionen für die Ausbreitungsrechnung von der Fahrzeugoberfläche in die Fahrzeugachse verschoben. Diese Quellenverschiebung um rund 1.4 m führt in kurzen Distanzen zu einer Unterschätzung der Immissionspegel. Ab einem Abstand von 12.9 m von der Gleismitte beträgt die resultierende Unterschätzung weniger als ein Dezibel. Bei grösseren Abständen hat diese Vereinfachung somit zumindest aus geometrischer Sicht keine relevante Auswirkung auf die resultierenden Immissionspegel mehr.

Distanzunabhängige Auswirkungen dieser Vereinfachung sind für Quellen zu erwarten, welche nicht seitengleich (achsensymmetrisch) angeordnet sind. Dies tritt beispielsweise bei Teilquellen auf, welche punktsymmetrisch platziert sind. In solchen Fällen wird empfohlen die Quellenpositionen ebenfalls in der Fahrzeugachse zu platzieren und zwar an jeder der vorkommenden Positionen. Im Hinblick auf die rechnerische Ermittlung der Abstrahlung auf eine Fahrzeugseite resultiert eine Überschätzung der gesamten Schallleistung von maximal 3 dB. Immissionsberechnungen von Empfangspunkten, welche sich direkt vor einer solchen Schallquelle befinden, werden jedoch korrekte Resultate ergeben. Eine entsprechende Abbildung ist somit im Hinblick auf die Berechnung grenzwertrelevanter Situationen auf der sicheren Seite und vereinfacht zudem die Quellenvermessung, da die Fahrzeuge nicht zwingend beidseitig erfasst werden müssen. Bei beidseitig gemessenen Quellen werden die Messwerte beider Seiten gemittelt.

### **4.4 Ausbreitungsrechnung**

Es wird empfohlen, sich bei der Quellenbeschreibung und der Ausbreitungsrechnung an der ISO-Norm 9613 zu orientieren, welche für Industrielärm-artige Quellen als Standard angesehen werden kann. Die einzelnen Schallquellen werden dabei durch Angabe einer Schallleistung und optional eines Richtwirkungsmasses abgebildet. Es wird dabei generell von einer Abstrahlung in den Vollraum ausgegangen, auch bei Quellen, welche sich auf der Fahrzeugoberfläche befinden. Die Schallleistung soll nach Möglichkeit spektral in Terzen oder Oktaven von 16 Hz bis 8 kHz erfasst werden. Der Frequenzbereich ist auf entsprechend tiefe Frequenzen auszudehnen, da verschiedene Systeme direkt mit Fahrstrom, d.h. Wechselstrom von  $16\frac{2}{3}$  Hz, versorgt werden und deshalb Reintonkomponenten in den untersten Terzbändern aufweisen können. Da davon ausgegangen werden muss, dass zumindest teilweise keine spektralen Messdaten vorhanden sind, soll ebenfalls ein A-bewerteter Schallleistungspegel mitgeführt werden. Die Ausbreitungsrechnung zur Beurteilung von Immissionspunkten kann einfach gehalten werden und auf dem A-Pegel-Modell der ISO 9613 aufbauen, wobei aus bestehenden spektralen Messdaten eine repräsentative Frequenz abgeleitet werden soll.

In Kapitel 10 ist eine Umsetzung dieser Empfehlung auf Excel-Basis beschrieben.

## 5 Beurteilung des Lärms abgestellter Züge und Festlegung von Pegelkorrekturen

Gemäss einer Stellungnahme des BAFU vom 14. September 2012 kann der Lärm von abgestellten Zügen nicht nach Anhang 4 der Schweizerischen Lärmschutzverordnung beurteilt werden, da in Anhang 4 nur der Fahr- und Rangierlärm von Eisenbahnen beurteilt wird. Es stellt sich deshalb die Frage, ob diesbezüglich Anhang 6 LSV herangezogen werden kann oder ob eine Einzelfallbeurteilung direkt gestützt auf das Umweltschutzgesetz durchgeführt werden muss. Anhang 6 der LSV (Belastungsgrenzwerte für Industrie- und Gewerbelärm) bietet die Möglichkeit mit Pegelkorrekturen die Berücksichtigung der Hörbarkeit des Ton- und Impulsgehalts zu berücksichtigen und erlaubt nach heutigem Stand des Wissens eine störungsgerechte Lärmbeurteilung für abgestellte Züge, weshalb auf eine Einzelfallbeurteilung gemäss Art. 40 Abs. 3 LSV verzichtet werden kann.

Abgestellte Züge sind in Verbindung mit den entsprechenden Gleisanlagen als ortsfeste Anlagen der Industrie oder des Gewerbes zu betrachten. Grundsätzlich kann deshalb davon ausgegangen werden, dass Lärm verschiedener Quellen von abgestellten Zügen nach Buchstabe a von Anhang 6 Ziffer 1 Absatz 1 LSV zuzuordnen ist. Bei Ventilatoren von Kühlturmsystemen ist jedoch beispielsweise die Zuordnung nach Buchstabe e dieser Bestimmung im allgemeinen zutreffender. In der nachfolgenden Tabelle wurde eine Zuordnung der Pegelkorrektur K1 ausgehend von der Schallquellen-Kategorisierung des vorhergehenden Kapitels vorgenommen. Ebenfalls aufgeführt ist im Sinne einer Empfehlung eine Zuordnung der Pegelkorrekturen für Ton- und Impulsgehalt. Diese erfolgte auf der Basis des Höreindrucks vor Ort anlässlich der Emissionsmessungen der Empa, welche im Rahmen dieses Projektes durchgeführt wurden, sowie aufgrund von anschliessenden Hörvergleichen verschiedener Aufnahmen im Labor. Einschränkend gilt es allerdings festzuhalten, dass dabei nur eine beschränkte Anzahl Fahrzeuge erfasst wurde und dass die individuellen Streuungen zwischen einzelnen Fahrzeugen und verschiedenen Baureihen nicht nur bezüglich der abgestrahlten Schallleistung sondern auch bezüglich des Geräuschcharakters beträchtlich sein können. Ebenso muss darauf hingewiesen werden, dass die Pegelkorrekturen für Ton- und Impulsgehalt grundsätzlich am Immissionsort zu vergeben sind und sich im Vergleich zu einer Quellen-nahen Festlegung – wie das hier der Fall war – Abweichungen ergeben können. Die definitive Festlegung der Pegelkorrekturen hat deshalb im Einzelfall zu erfolgen.

Schallquelle	K1	K2	K3
	Tag / Nacht	(Tongehalt)	(Impulsgehalt)
<b>HLK-Anlagen</b>	5 / 10	0	0
<b>Kühlsysteme: Lüfter</b>	5 / 10	0	0
<b>Kühlsysteme: Pumpen</b>	5 / 5	2	0
<b>Druckluftkompressoren</b>	5 / 5	4	2
<b>Erstellen Fahrbereitschaft</b>	5 / 5	0	6

Tabelle 1: Klassierung der Quellenarten und Empfehlung zur Vergabe der Pegelkorrekturen gemäss LSV Anhang 6.

Den Druckluftkompressor-Quellen wurde eine mit 4 dB höhere tonale Pegelkorrektur als den Lüftergeräuschen zugewiesen, da die Druckluftkompressor-Geräusche häufig eine tieffrequente Reintonkomponente enthalten, welche den Geräuschcharakter dominiert. Zusätzlich wurde die Pegelkorrektur K3 auf 2 dB gesetzt, da das Ende eines Kompressionszyklus teilweise durch ein zischendes Geräusch begleitet ist, welches

beim Druckablass entsteht. Für das Erstellen der Fahrbereitschaft wird empfohlen, die Pegelkorrektur K3 für den Impulsgehalt pauschal auf 6 dB zu setzen.

Neben einem Mittelungspegel und den Pegelkorrekturen K1 bis K3 muss für eine Beurteilung zusätzlich die Dauer einer Lärmphase pro Tag bzw. Nacht bekannt sein. Entsprechend dem Konzept, Züge nicht integral als Quelle zu erfassen, sondern einzelne Punktquellen separat zu beschreiben, ist es angezeigt, die Betriebsdauer der verschiedenen Teilquellen einzeln zu bestimmen. Die Bestimmung repräsentativer Betriebszeiten für die verschiedenen Aggregate und Zugstypen kann über akustische Langzeitmessungen im realen Betrieb, aus automatisch protokollierten oder gezielt erfassten Fahrzeugparametern und/oder aus Kenntnis der Fahrzeugsteuerungen und -eigenschaften erfolgen. Wie die bisherigen Erfahrungen gezeigt haben, ist nicht nur für die Identifikation der Quellenpositionen sondern auch für die Abschätzung der Betriebszeiten der verschiedenen Aggregate ein tieferes Verständnis der Funktionsweise und Steuerung der Fahrzeuge zwingend notwendig. Des Weiteren braucht es für die Lärmbeurteilung genaue Informationen zu den Fremd- und Hintergrundgeräuschen, um allfällige Beeinflussungen der erfassten Mittelungspegel ausschliessen zu können.

## 6 Ermittlung von Quelldaten

Die akustische Vermessung einer grossen Zahl von verschiedenen Zugssystemen mit einer Vielzahl von Teilschallquellen und Betriebszuständen stellt eine sehr aufwändige Aufgabe dar. Entsprechend ist es angezeigt wo immer möglich auf bereits existierende Messungen zurück zu greifen. In diesem Kapitel wird zuerst ein Überblick zu den existierenden Emissionsmessverfahren gegeben und anschliessend eine Zusammenstellung der bei SBB und BLS vorhandenen Emissionsmessdaten dargestellt. Aus einem Vergleich mit den durch die Empa im Rahmen dieses Projektes vorgenommenen Emissionsmessungen werden Schlussfolgerungen im Hinblick auf eine Anwendung der Daten zur Abbildung von Standlärm gezogen und Empfehlungen für die Neuvermessungen von stehenden Zügen gegeben.

### 6.1 Emissionsmessverfahren<sup>1</sup>

Derzeit gibt es zwei Regelwerke, die für Aussenlärmmessungen im konventionellen Schienenverkehr relevant sind. Es existieren die EN ISO 3095<sup>2</sup> und die TSI CR NOISE<sup>3</sup> die im Rahmen der europäischen Harmonisierung der Normen immer mehr an Bedeutung gewinnt.

#### 6.1.1 EN ISO 3095

Die ISO-Norm 3095 schreibt für Standlärm Messungen in einem horizontalen Abstand zur Gleisachse von 7.5 m rund um den Zug in Höhen von 1.2 m (und falls Hinweise auf höher liegende Quellen vorhanden sind in 3.5 m) vor. Die Messpunkte sollen dabei in der Horizontalen nur 3 bis 5 m auseinander liegen, was bei typischen Zugslängen eine Vielzahl von Messpunkten zur Folge hat. Die massgebende Messgrösse für Schalldruckpegelmessungen ist der A-bewertete äquivalente Dauerschalldruckpegel  $L_{pAeq,T}$ . Jede Mes-

---

<sup>1</sup> Einzelne Textbausteine wurden dem Bericht 2-167 der Firma PROSE entnommen.

<sup>2</sup> EN ISO 3095, Railway applications – Acoustics – Measurement of noise emitted by railbound vehicles (ISO 3095:2005)

<sup>3</sup> TSI CR NOISE: Directive 2001/16: Noise Emitted by Freight Wagons, Locomotives, Multiple Units and Coaches, 13.04.2011.

sung muss dreimal wiederholt werden. Bei elektrischen Triebfahrzeugen müssen alle Hilfsaggregate, die im Stillstand betrieben werden können, unter Volllast laufen.

### **6.1.2 TSI CR NOISE**

Die Messgeometrie gemäss TSI CR Noise stimmt weitgehend mit der ISO-Norm 3095 überein. Allerdings wird gemäss TSI CR NOISE auf eine zusätzliche Messhöhe von 3.5 m verzichtet. Die TSI CR Noise enthält neben einer Messvorschrift auch Grenzwerte für verschiedene Fahrzeugkategorien. Die Grenzwerte ( $L_{pAeq,T}$ ), welche in Tabelle 3 des Regelwerks zusammengefasst sind, liegen zwischen 65 dB(A) in 7.5 m Abstand für Reisewagen und 75 dB(A) für Lokomotiven. Für den Vergleich mit dem Grenzwert wird der längengewichtete energetische Mittelwert ( $L_{pAeq, T}$  mit  $T = 20$  s) aller Messpunkte berechnet.

Neben dem Verzicht auf eine zusätzliche Messhöhe liegt ein weiterer Unterschied zwischen den beiden Normen darin, dass die Hilfsaggregate gemäss TSI CR Noise nicht mit maximaler Leistung betrieben werden müssen, sondern im typischen Betriebszustand bei 20°C Umgebungstemperatur. Zusätzlich müssen die Bremsluftkompressoren nicht in Betrieb sein. Die Definition „typischer Betriebszustand bei 20°C Umgebungstemperatur“ bedeutet für das Klimagerät, dass es in der Regel nur im Lüftungsbetriebsmodus arbeitet. Dass das Klimagerät nicht im Heizmodus läuft, ist für das Lärmverhalten irrelevant, dass es aber nicht im Klimatisierungsmodus betrieben wird, macht es in der Regel leiser, weil im Klimatisierungsmodus noch zusätzlich der Klimakompressor laufen würde.

### **6.1.3 Vergleich und Einschätzung**

Aufgrund der unterschiedlichen Vorgaben zur Betriebsart der Hilfsaggregate kann gefolgert werden, dass Messungen nach TSI CR Noise systematisch tiefere Pegel ergeben werden als nach EN ISO 3095. Dass die Druckluftkompressoren als Schallquelle nicht erfasst werden, erscheint problematisch. Der Verzicht auf eine zusätzliche Messhöhe in 3.5 m macht zusätzlich die Einschätzung von Quellen im Dachbereich schwer bzw. erhöht das Risiko einer Unterschätzung der Quellenleistung als Folge von Abschirmwirkungen des Fahrzeuges. Wegen den klarer definierten Betriebsbedingungen, der Berücksichtigung der Bremsluftkompressoren und der zusätzlichen Messhöhe ist Messungen nach EN ISO 3095 der Vorzug zu geben. Allerdings gilt es festzuhalten, dass die gemäss EN ISO 3095 spezifizierten Betriebsbedingungen für die Zustände Parken und Schlummern eher nicht als repräsentativ anzusehen sind und einer Überschätzung der wahren Emissionen während dem nächtlichen Abstellen entsprechen.

## **6.2 Sichtung vorhandener Messdaten**

Die Abnahmemessungen bei der SBB werden seit 2005 generell mit umfangreichen Messberichten dokumentiert. Neben den TSI Vorschriften werden auch spezifische Anforderungen der SBB berücksichtigt. Dies umfasst neben einer Höhe von 1.2 m ab SOK auch eine Höhe von 3.5 m (entsprechend ISO 3095). Da der in der TSI-Noise vorgesehene Betriebszustand nicht dem Zustand beim Übernachten entspricht, sondern dem Zustand beim Anhalten im Bahnhof oder vor einem Rotsignal (Stillstand), wird von der SBB ein weiterer Zustand gemessen, das sogenannte „Schlummern“, welcher dem Lärm übernachtender Züge entspricht. Für neue Fahrzeuge Bestellzeitraum 2005-2009 (z.B. RV-Dosto) gilt ein Mittelungspegel von 55 dB(A) als Zielwert für das Schlummern. Ab Bestellung des FV-Dosto im 2010 wird der Zielwert des Schlummerns mit 50 dB(A) vorgegeben. Bei der akustischen Beurteilung eines Zuges im Stillstand, Betriebshalt (Bahnhof, Rotlicht) werden gemäss der Norm EN 3095 die Hilfsbetriebssysteme sowie die Klimaanlage unter Volllast betrieben, die Traktionskühlsysteme laufen eher in einem mittlerem Betriebszustand.

Zur Datenlage bei der BLS ist nur der Bericht 2-636 der Firma PROSE vom 21.04.2011 im Auftrag der BLS: „BLS Fahrzeuge – Lärmessungen im Stillstand“ bekannt.

In den zwei Tabellen auf den nachfolgenden beiden Seiten sind die Messberichte von Standlärm-Abnahmemessungen zusammengestellt, welche von der SBB, der BLS bzw. dem BAFU zur Verfügung gestellt wurden. Die Messgeometrie wurde dabei in allen Fällen von der EN ISO 3095 bzw. der TSI CR NOISE übernommen. Wie aus der Charakterisierung der erfassten Betriebszustände entnommen werden kann, weichen diese jedoch von Fall zu Fall deutlich ab. Auch bezüglich des Detaillierungsgrades der Resultate sind grosse Unterschiede festzustellen, beispielsweise in Bezug auf die Anzahl erfasster Messpunkte oder bei der Dokumentation spektraler Informationen.

Q	Flotte	Bezeichnung	Bericht	Messung durch	Betriebszustände	Luftbasierte Kühlsysteme	Druck-luft-kompr.	Klima (FGR / FST)	Anz. Mik	Spektral?	Bemerkungen
SBB	GTW Seetal	RABe 520	SER ES 55 04 01 VM	Bombar-dier	Stillstand	Stufe 1	Max	Max	4x4	(Nein)	Spektren nur in graphi-scher Form
SBB	FLIRT	RABe 521	M59 753/2	Müller BBM	Stillstand Parken – Tag Parken - Nacht	1500 U/min 600 U/min 600 U/min	45 Hz 45 Hz 45 Hz	MaxKühlen Nur Zuluft(3) nein	2x10	Ja	
SBB	DTZ S-Bahn Zürich	RABe 514	M65 299/1	Müller BBM	Stillstand – Norm Stillstand- Ausfall Parken	? ? ?	Ja Ja Nein	Max Max Lüftung/Max	2x24	Ja	Tiefe Aussentemperatu-ren
SBB	Domino	RBDe 560 DO	2-471	Prose	Stillstand(EN3095) Stillstand(TSI N) Parken	Ja 50% Reduziert	Ja Nein Nein	Max 50% Lüftung	2x26	Nein	Triebwagen und Steu-erwagen Teilweise zu hohes Hintergrundgeräusch
SBB	Inova	B/AB NPZ DO	2-470	Prose	Stillstand(EN3095) Parken	Ja Reduziert	Ja Nein	Max Lüftung	2x10	Nein	Teilweise zu hohes Hintergrundgeräusch
SBB	RV Dosto	RABe 511	M85 207/5	Müller BBM	Stillstand Parken 1 Parken 2	1500 U/min 600 U/min 600 U/min	Ja Ja Ja	redKühlen redLüften Lüften	1x23	(Nein)	Spektren nur in graphi-scher Form
SBB	NDW	?	M78 871/11	Müller BBM	Stillstand Voll Stillstand Normal (Schlummern)	Ja reduziert	Ja Nein	? ?	2x14	(Nein)	Spektrale Messdaten nur in graphischer Form Schlumberbetrieb = Hintergrundgeräusch
SBB	DPZ Bt										Abnahmemessungen Frühjahr 2013

Q	Flotte	Bezeichnung	Bericht	Messung durch	Betriebszustände	Luftbasierte Kühlsysteme	Druck-luft-kompr.	Klima (FGR / FST)	Anz. Mik	Spektral?	Bemerkungen
SBB		Re 450	M98512/06	Müller BBM	Parken mit Kompr. Parken ohne Kompr. Abrüsten Aufrüsten	Aus Aus	Ja Nein	Zu-/Fortluft min. Stufe	2x8	Ja	

Tabelle 2: Übersicht der bei der SBB vorhandenen Abnahmemessungen (FGR = Fahrgastraum, FST= Führerstand).

Q	Flotte	Bezeichnung	Bericht	Messung durch	Betriebszustände	Luftbasierte Kühlsysteme	Druck-luft-kompr.	Klima (FGR / FST)	Anz. Mik	Spektral?	Bemerkungen
BLS	Nina	RABe 525	2-636	Prose	Schlummern	50%	?nein?	redLüften?	1x34	Nein	Nur 1.2 m Höhe
BLS	Lötschberger	RABe 535	2-636	Prose	Schlummern	50%	?nein?	redLüften?	1x34	Nein	Nur 1.2 m Höhe
BLS		RBDe 566 II	2-636	Prose	Schlummern	50%	?nein?	redLüften?	1x44	Nein	Nur 1.2 m Höhe
BLS		Re 420 EW III	2-636	Prose	Schlummern	50%	?nein?	redLüften?	1x95	Nein	Nur 1.2 m Höhe
BLS	GTW	RABe 526	2-636	Prose	Schlummern	50%	?nein?	redLüften?	1x30	Nein	Nur 1.2 m Höhe

Tabelle 3: Übersicht der bei der BLS vorhandenen Abnahmemessungen (FGR = Fahrgastraum, FST = Führerstand).

### **6.3 Empfehlungen zur Durchführung und Auswertung von zusätzlichen Quellenvermessung**

Ausgehend von den obigen Erkenntnissen können folgende Anforderungen an die Quellenvermessungen definiert werden:

- Die Messgeometrie soll von der EN ISO 3095 übernommen werden, sowohl was die Lage der Mikrofone als auch die Anzahl an Messpositionen anbelangt.
- Von sämtlichen Messpositionen und Betriebszuständen müssen Mittelungspegel als Terzbandspektren von idealerweise 16 Hz bis 8 kHz erfasst werden. Es sollen Pegelschriebe erstellt und Tonaufnahmen aufgezeichnet werden, welche auch eine nachträgliche Identifikation der Quellen bzw. eine Vergabe der Pegelkorrekturen erlauben.
- Vorgängig muss abgeklärt werden, welche Schallquellen auftreten und in welchen Betriebszuständen sich die einzelnen Teilquellen während dem Abstellbetrieb befinden können.
- Das Messprogramm muss darauf ausgerichtet sein, diese Zustände zu erfassen. Dies kann entweder durch aktiven Einfluss auf die Steuerung oder durch Langzeitmessungen im realen Betrieb erfolgen. Letztere haben zusätzlich den Vorteil, dass neben den Quellenleistungen auch die Häufigkeit des Betriebes erfasst werden kann.
- Da in der Regel nur ein einzelner Repräsentant vermessen wird, ist darauf zu achten, dass die Komposition, d.h. die Anzahl angekoppelter Wagen, der Wartungszustand und die äusseren Bedingungen als repräsentativ für die gesamte Flotte angesehen werden können.
- Zur nachträglichen Interpretation der Ergebnisse sowie zur Charakterisierung der Messbedingungen ist es von Vorteil, wenn die Betriebsparameter erfasst und protokolliert werden.
- Voraussetzung für die Auswertung der Messdaten ist eine Identifikation der Lage relevanter Punktquellen auf den Fahrzeugen. Es ist zu empfehlen, diesen Schritt bereits bei der Messplanung zu berücksichtigen, so dass die Mikrofon- und Quellenpositionen aufeinander abgestimmt werden können.

Die von der Empa durchgeführten Emissionsmessungen (siehe Kap. 2 und 6.4) wurden entsprechend den Vorgaben der Standard-Arbeitsanweisung der Abteilung Akustik/Lärminderung SOP 10 durchgeführt.

Ziel der anschliessenden Auswertung ist es, die Schallleistungen mehrerer, teilweise gleichzeitig aktiver Schallquellen in unmittelbarer Nähe zu bestimmen. Zu diesem Zweck wurde ein Werkzeug entwickelt, welches ausgehend von bis zu fünf Quellenpositionen und Messdaten von bis zu 10 Mikrofonpositionen die Quellenleistungen dahingehend optimiert, die Messwerte möglichst genau zu reproduzieren. Die Optimierung kann dabei Terzweise oder nur ausgehend von A-bewerteten Pegeln erfolgen.

#### **Spezialfall Erstellung der Fahrbereitschaft**

Die Erstellung der Fahrbereitschaft stellt einen Spezialfall dar, da während einer kurzen Zeit zusätzlich zu den Dauergeräuschen der übrigen Quellen impulsartige Geräusche im Bereich der Pantographen und Drehgestelle auftreten. Durch die mehrmaligen Bremsproben sinkt das Druckniveau und als Folge startet der Druckluftkompressor dann. Wie die bisherigen Messerfahrungen gezeigt haben, dominieren die Emissionen der Bremstest den Höreindruck und überdecken dabei sowohl den Lärm der Hauptschalter als auch die übrigen Dauergeräusche. Bei den Drehgestellen kann zwischen den Antriebsdrehgestellen und den Laufdrehgestellen unterschieden werden. Da sich bei den Antriebsdrehgestellen jeweils ein Druckbehälter befindet, sind dort die Emissionen höher. Es wird vorgeschlagen die Antriebs- und Laufdrehgestelle separat zu erfassen. Um den Modellierungsaufwand im Rahmen zu halten, wurde folgendes Vorgehen festgelegt:

- Über den Zeitraum mit Bremsproben und Betätigungen des Hauptschalters wird für jeden Messpunkt der energetische Mittelwert gebildet (ca. 10 Minuten).



- Vereinfacht wird in der Mitte der Antriebs- und Laufdrehgestelle jeweils eine Quelle auf 1 m Höhe angenommen. Aus den Messspektren der verschiedenen Mikrofonpositionen werden die Schallleistungspegel dieser Quellen optimiert.
- In die Emissionsdatenbank wird für jedes Antriebs- resp. Laufdrehgestell eine Quelle mit dem mittleren Schallleistungspegel sämtlicher ausgewerteter Antriebs- resp. Laufdrehgestelle eingesetzt.
- Die Pegelkorrekturen sind in Kapitel 5 aufgeführt.

#### **6.4 Zusammenstellung der im Rahmen des Projektes vorgenommenen zusätzlichen Emissionsmessungen**

Wie bereits in Kapitel 2 erwähnt, wurden in Zusammenarbeit mit der SBB ergänzende Emissionsmessungen durchgeführt. Tabelle 4 zeigt eine Zusammenstellung der so vermessenen Fahrzeuge. Die Auswertungen dieser Messungen sowie sämtlicher anderen Auswertungen sind in einem separaten Bericht mit Empa-Nr. 460'395-3 zusammengestellt.

Flotte	Bezeichnung	Bericht	Messung durch	Datum
FLIRT	RABe 521-522		Empa & SBB	28./29.08.2012
TGV	112/114/ 4406		Empa & SBB	28./29.08.2012
Domino	RBDe 560	Empa-Nr. 460'395-3	Empa & SBB	14./15.11.2012
	Re 460	Empa-Nr. 460'395-3	Empa & SBB	15./16.11.2012
DTZ	RABe 514	Empa-Nr. 460'395-3	Empa & SBB	22./23.11.2012
TGV	112/114/4406	Empa-Nr. 460'395-3	Empa & SBB	21./22.6.2013
DTZ	RABe 514	Empa-Nr. 460'395-3	Empa & SBB	2./3.7.2013
ICN	RABDe 500	Empa-Nr. 460'395-3	Empa & SBB	8./9.7.2013
RV Dosto				24./25.09.2013 Weitere Software-Optimierungen, so z.B. Schlumberbetrieb nicht vor 2015
Re 460 (Umrüstung auf neuen Stromrichter und Druckluftkompressor)				1ter Prototyp voraussichtlich ab Ende 2014 / Anfang 2015

*Tabelle 4: Übersicht der Züge, welche im Rahmen dieses Projektes in Zusammenarbeit mit der SBB vermessen wurden.*

## **7 Zur Repräsentativität von Emissionsmessungen an einzelnen Zügen**

Emissionsmessungen, wie sie in Kapitel 6 zusammengestellt wurden, werden grundsätzlich an einer einzelnen Zugskomposition durchgeführt. Die daraus abgeleiteten Quellendaten repräsentieren somit die Emissionen dieses spezifischen Zuges. Es stellt sich die Frage, wie repräsentativ diese Emissionen für andere Kompositionen des gleichen Typs sind bzw. wie gross die Schwankungen zwischen verschiedenen Vertretern des gleichen Zugstyps ausfallen. Bei Quellendaten, welche ausgehend von Abnahmemessungen ermittelt wurden, gilt zusätzlich zu bedenken, dass diese in der Regel an neuen Fahrzeugen in perfektem Zu-

stand durchgeführt werden. Es besteht die Vermutung, dass die Emissionen im Verlauf der Nutzung, beispielsweise in Abhängigkeit ihres Alters oder Wartungszustandes, zunehmen.

Neben der Ermittlung der Quellenleistungen wurde bei den in Abschnitt 6.4 aufgeführten Messungen auch die Dauer der verschiedenen erfassten Betriebszustände ermittelt. Auch hier stellt sich die Frage, wie repräsentativ die an einem einzelnen Zug in einer einzigen Nacht bestimmten Betriebskenndaten sind und welche Parameter einen massgeblichen Einfluss auf resultierenden Betriebszeiten aufweisen. Aufgrund der Steuerung verschiedener Aggregate in Abhängigkeit der Aussentemperatur kann vermutet werden, dass die Lärmemissionen von abgestellten Zügen im Jahresverlauf variieren. Einerseits können dabei die Schallleistungspegel, z.B. aufgrund unterschiedlicher Lüftungsstufen, und andererseits die Betriebszeiten der verschiedenen Schallquellen beeinflusst werden. Zum anderen werden die Betriebszeiten der Druckluftkompressoren in Funktion der Dichtigkeit der Druckluftsysteme variieren, welche von der Anzahl gekoppelter Wagen, den Kopplungssystemen, dem Wartungszustand und der Aussentemperatur abhängen werden. Die entsprechenden Fragen können im Rahmen dieses Berichtes nicht abschliessend beantwortet werden. Ausgehend von zwei exemplarischen Messreihen soll jedoch versucht werden, die Problemstellung einzugrenzen.

### **7.1 Vergleichsmessungen an verschiedenen FLIRT-Kompositionen**

Zur Diskussion der Emissionsschwankungen innerhalb einer Fahrzeugflotte wurden am 28. und 29. August 2012 im Abstellbereich des Bahnhofs Basel Messungen an FLIRT-Kompositionen durchgeführt. Der Fokus auf FLIRT-Züge wurde gewählt, da diese seit 2002 kontinuierlich in Betrieb genommen werden und deshalb ein breites Spektrum an Betriebsjahren und Wartungszuständen erwartet werden konnte. Während den Messungen wurden sechs verschiedenen Züge erfasst, wobei bei drei der sechs Züge am Folgetag eine zweite Messung vorgenommen wurde. Die Auswahl der gemessenen Züge erfolgte zufällig. Es wurden sämtliche parkierten Fahrzeuge vermessen, bei welchen eine Messung möglich war, d.h. sich keine übermässig störenden Schallquellen in unmittelbarer Nähe befanden und mindestens zwei benachbarte Gleise frei und zugänglich waren.

Die Messungen erfolgten mit einer mobilen Messausrüstung, bestehend aus einem Stativ mit Wasserwaage, einem Distanzlaser und zwei Mikrofonen inklusive Schallpegelmessern vom Typ Norsonic 140. Die Mikrofone wurden jeweils in 7.5 m Abstand von der Gleismitte auf Höhen von 1.2 und 3.5 m über Schienenoberkante direkt gegenüber der dominanten Schallquelle (Lüftungs- und Kompressorauslässe) platziert. Relativ zur Fahrzeugspitze wurden so maximal vier Positionen in Abständen von 10.0, 19.0, 32.0 und 36.4 m erfasst. In Absprache mit einem an den Messungen beteiligten Lokführer wurden gezielt verschiedene Betriebszustände erzeugt und auch spezielle Ereignisse wie z.B. Bremsproben ausgelöst. Pro Messposition und Betriebszustand wurden Tonaufzeichnungen von mindestens einer Minute Dauer vorgenommen und anschliessend im Labor ausgewertet.



*Abbildung 2: Messequipment und -durchführung der FLIRT-Messungen im Abstellbereich Bahnhof Basel.*

In Abbildung 3 bzw. Abbildung 4 sind die Resultate der Messungen für die Messhöhen von 1.2 bzw. 3.5 m dargestellt. Die Messpegel sind dabei nach der dominanten Schallquelle charakterisiert. Zum Vergleich sind die höchsten Mittelungspegel (Messzeiten 13 - 24 s) aufgetragen, welche bei den Abnahmemessungen von Müller-BBM im Jahr 2004 (siehe Tabelle 2) für die Betriebsarten Stillstand, Parken Tag und Parken Nacht aufgezeichnet wurden<sup>4</sup>.

Wie der Vergleich mit den Abnahmemessungen zeigt, werden die nächtlichen Emissionen mit dem Betriebszustand Stillstand, welcher näherungsweise den Normanforderungen gemäss EN ISO 3095 entspricht, deutlich überschätzt. Zusätzlich gilt es zu berücksichtigen, dass die Fahrzeuge sich nicht im Park-Modus befanden, da durch den Lokführer bewusst verschiedene Aggregate in Betrieb aktiviert worden waren und der FLIRT automatisch auf ein höheres Bereitschaftsniveau kam, sobald eine Türe geöffnet wurde (siehe dazu Abbildung 1). Es kann somit gefolgert werden, dass der in EN ISO 3095 definierte Betriebszustand für den Nachtbetrieb als nicht repräsentativ angesehen werden muss und die wahren Emissionen eindeutig überschätzt. Namentlich der Betrieb sämtlicher Hilfsaggregate unter Volllast entspricht nicht dem typischen Abstellverhalten.

---

<sup>4</sup> Die Unterscheidung zwischen Parken Tag und Parken Nacht rührt daher, dass die Zielwerte der Steuerung im Parkzustand beim FLIRT je nach Tageszeit unterschiedlich definiert sind.

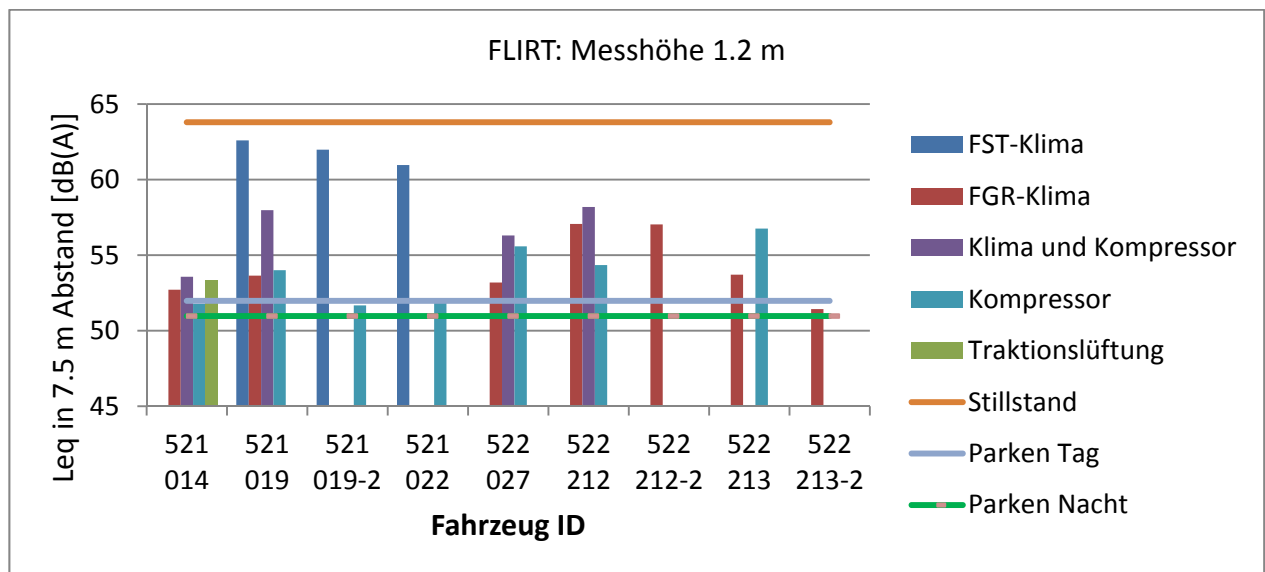


Abbildung 3: Vergleich von Messpegeln in 7.5 m Abstand von der Gleismitte auf 1.2 m Höhe über Schienenoberkante von FLIRT Zugkompositionen inkl. Quellentypisierung (Balken) mit Abnahmemessungen nach TSI Noise gemäss Bericht aus Tabelle 2(Linien).

Die Messwerte liegen mit wenigen Ausnahmen zwischen den aus den Abnahmemessungen ermittelten maximalen Mittelungspegeln (Messzeiten 13 - 24 s) des Stillstands- und der Parkbetriebe. Dass das Niveau des Parkbetriebes nicht erreicht wird, kann durch die Tatsache erklärt werden, dass die einzelnen Schallquellen bei den Messungen forciert wurden und sich die Fahrzeuge nicht im Parkmodus befanden. Somit kann dies nicht als Hinweis gewertet werden, dass die Fahrzeuge im realen Betrieb lauter als bei den Abnahmemessungen sind.

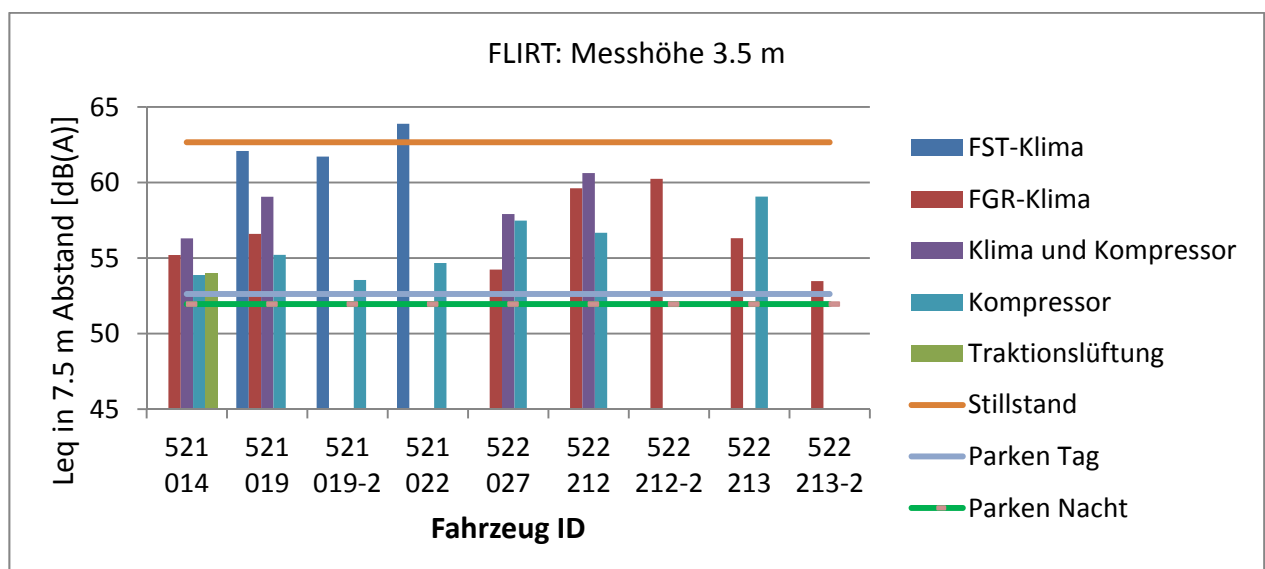


Abbildung 4: Vergleich von Messpegeln in 7.5 m Abstand von der Gleismitte auf 3.5 m Höhe über Schienenoberkante von FLIRT Zugkompositionen inkl. Quellentypisierung (Balken) mit Abnahmemessungen nach TSI Noise gemäss Bericht aus Tabelle 2(Linien).

Es kann somit gefolgert werden, dass Abnahmemessungen durchaus dazu verwendet werden können, die Schallleistungen der einzelnen Teilquellen zu bestimmen, dies unter der Voraussetzung, dass der Betriebszustand mit dem nächtlichen Abstellbetrieb übereinstimmt. Da dieser Betriebszustand in den Normen, welche die Grundlage der Abnahmemessungen darstellen, nicht vorgesehen ist, muss der Auftraggeber dafür sorgen, dass das Messprogramm um diesen Zustand erweitert wird.

Der Vergleich der Messhöhen 1.2 und 3.5 m zeigt, dass auf dem oberen Messniveau im Mittel rund 2 dB(A) höhere Pegel erfasst werden. Es gibt jedoch auch Einzelbeispiele mit tiefliegenden Quellen und entsprechend höheren Pegeln auf 1.2 m. Generell kann festgehalten werden, dass auf eine messtechnische Erfassung des oberen Messniveaus nicht verzichtet werden sollte, wie dies bei der TSI CR NOISE gehandhabt wird.

Wie nachträgliche Abklärungen ergeben haben, wurden sämtliche FLIRT mit Identifikationsnummer 521... zwischen 2004 - 2006 (30 Stück) und diejenigen mit Identifikationsnummer 522... im Jahr 2011 (14 Stück) in Betrieb genommen. Weitere FLIRT-Fahrzeuge sind: 523 (2004 – 2010, 43 Stück), 524 (2007 – heute, 24 Stück, TILO Tessin), 526 (2006, 9 Stück, Seetalfahrzeuge Bodensee).

Tabelle 5 zeigt eine Zusammenstellung der Messergebnisse, wobei die Fahrzeuge der 521- und 522-er Reihe separat ausgewiesen werden. Wie zu erkennen ist, liefern die Züge der Baureihe 522 bei allen Teilquellen leicht höhere Messpegel. Im Vergleich zu den gemessenen Standardabweichungen ist der Unterschied speziell bei den Druckluftkompressoren signifikant. Da die FLIRT-Züge der beiden Baureihen auch konstruktive Unterschiede aufweisen – der FLIRT France, Baureihe 522 musste für eine Zulassung auf dem Französischen Schienennetz angepasst werden – ist eine Aussage zum Alterungsverhalten auf dieser Basis nicht möglich.

Aufgrund der Standardabweichungen der Messwerte innerhalb der gleichen Baureihe bzw. über sämtliche Fahrzeuge betrachtet, können gewisse Rückschlüsse über die individuellen Streuungen der Emissionen bei einzelnen Fahrzeugen gezogen werden. Im Mittel über sämtliche Fahrzeuge und Quellenarten resultiert eine Standardabweichung von rund 2 dB(A). In Anbetracht der nicht zu vernachlässigenden Messunsicherheit aufgrund der nicht idealen Messbedingungen sowie der geringen Zahl an Einzelmessungen darf die Aussagekraft dieser Schlussfolgerung allerdings nicht überbewertet werden. Auch ist eine Übertragbarkeit auf andere Zugarten nicht a priori gegeben.

	521...			522...			Gesamt		
<b>3.5 m</b>	EMW	Stabw	Anzahl	EMW	Stabw	Anzahl	EMW	Stabw	Anzahl
FST-Klima	62.7	1.2	3			0	62.7	1.2	3
Klima	56.0	1.0	2	57.6	3.1	5	57.2	2.6	7
Klima und Kompressor	57.9	2.0	2	59.5	1.9	2	58.8	1.8	4
Druckluftkompressor	54.4	0.8	4	57.9	1.2	3	56.2	2.0	7

<b>1.2 m</b>	EMW	Stabw	Anzahl	EMW	Stabw	Anzahl	EMW	Stabw	Anzahl
FST-Klima	61.9	0.8	3			0	61.9	0.8	3
Klima	53.2	0.7	2	55.0	2.5	5	52.7	2.1	1
Klima und Kompressor	56.3	3.1	2	57.3	1.3	2	55.0	2.1	3
Druckluftkompressor	52.5	1.1	4	55.7	1.2	3	55.4	2.0	5

*Tabelle 5: Zusammenstellung der Messergebnisse der FLIRT-Messungen in Basel, separiert für die Fahrzeuge der Baureihen 521 und 522. Dargestellt sind die energetischen Mittelwerte (EMW), die Standardabweichungen (Stabw) sowie die Anzahl Messungen.*

## **7.2 Durchführung von Emissionsmessungen bei zwei DTZ-Kompositionen**

Aufgrund der Steuerung verschiedener Aggregate in Abhängigkeit der Aussentemperatur kann vermutet werden, dass die Lärmemissionen von abgestellten Zügen im Jahresverlauf variieren. Einerseits können dabei die Schallleistungspegel variieren (z.B. aufgrund höherer Lüftungsstufen) und andererseits die Betriebszeiten der verschiedenen Schallquellen (z.B. häufigere Lüftungen). In der Emissionsdatenbank sollte idealerweise ein repräsentativer Jahresmittelwert eingesetzt werden.

Um den Einfluss der äusseren Bedingungen exemplarisch zu untersuchen wurden für den DTZ Emissionsmessungen im Winter sowie im Sommer durchgeführt und die Resultate der Messungen verglichen. Beide Messungen wurden am gleichen Standort in Rapperswil gemacht. Während den Wintermessungen lagen die Temperaturen während der ganzen Nacht bei ca. 3-4°C und bei den Sommermessungen sanken die Temperaturen nicht unter 18°C (um 23 Uhr wurden noch ca. 20°C gemessen).

Einen Vergleich der Winter- und Sommermessungen des DTZ zeigt, dass im Sommer zusätzlich sporadisch Lüfter des Trafo und des Klimageräts des Führerstandes in Betrieb waren. Direkt nach der Einfahrt war die Lüftung des Hilfsbetriebsumrichters (HBU) zusätzlich für max. ca. 2 Minuten auf einer höheren Stufe. Auf die ganze Nacht gesehen ist diese kurze Zeitphase nicht relevant und wurde deshalb bei der Auswertung nicht berücksichtigt. Während die zusätzlichen Lüftungen (Trafo und Klimagerät) im Sommer zu etwas höheren Emissionen führen, wurde im Vergleich dazu eine reduzierte Aktivität der Druckluftkompressoren festgestellt (Winter ca. 60%, Sommer ca. 30% der Zeit). Der höhere Druckluftbedarf im Winter ist auf einen höheren Luftverlust zurückzuführen, welcher zumindest teilweise durch die schlechtere Dichtigkeit der Druckluftsysteme bei tiefen Temperaturen erklärt werden kann. In der Summe kompensieren sich die beiden Effekte im Falle des DTZ weitgehend. Die ermittelte Differenz zwischen Winter und Sommer ist im Endeffekt mit 0.4 dB(A) höheren Werten im Winter klein und im Vergleich zu den Streuungen der Schallemissionen von Fahrzeug zu Fahrzeug unabhängig der Jahreszeit vernachlässigbar. Einen Vergleich der A-bewerteten mittleren Schalldruckpegel bei den Messpunkten ergab für die Quellen, welche keine jahreszeitlichen Schwankungen zeigen, Differenzen von ca. 0.5 bis 2 dB(A).

Die exemplarische Vergleichsmessung Winter – Sommer am Beispiel des DTZ zeigt, dass die verschiedenen temperaturbedingten Einflüsse sich teilweise gegenteilig auf die Schallemissionen auswirken. Deshalb und aufgrund nur einer Vergleichsmessung kann nicht allgemein festgehalten werden, ob die Schallemissionen im Sommer oder Winter höher ausfallen.

## **8 Unsicherheitsbetrachtung**

Die akustische Charakterisierung von Einzelfahrzeugen und ganzen Zügen gemäss der in Kapitel 6 skizzierten Vorgehensweise ist von Unsicherheiten behaftet. Neben der eigentlichen Messunsicherheit treten zusätzliche Unsicherheiten als Folge von Annahmen und Vereinfachungen bei der Modellierung der Situation auf. Die Summe dieser Unsicherheiten erlaubt eine Aussage dazu, mit welcher Genauigkeit die konkrete messtechnisch erfasste Situation rechnerisch reproduziert werden kann.

Im Hinblick auf die Verwendung der Emissionsdaten zur Berechnung von Prognoserechnungen sind als zusätzliche Unsicherheitsquellen die Aspekte zu berücksichtigen, welche in Kapitel 7 diskutiert wurden, nämlich die Frage, wie gut der einzelne vermessene Zug dem Flottenmittelwert entspricht und wie genau der vermessene Betriebszustand dem Jahresmittelwert entspricht.

In Tabelle 6 sind die entsprechenden Unsicherheitsquellen aufgeführt und mit Werten versehen, wie sie aus den bisherigen Messerfahrungen resultieren. Die Gesamtunsicherheit leitet sich dabei aus den drei fett hervorgehobenen Teilunsicherheiten ab, welche sich wiederum aus mehreren Teilunsicherheiten zusam-

mensetzen. Die Werte sind dabei als Standardabweichungen zu interpretieren und werden in der Emissionsdatenbank bzw. im Berechnungstool in den Kapiteln 9 und 10 entsprechend verwendet.

Unter idealen Bedingungen resultiert gemäss Tabelle 6 eine Unsicherheit bei der Beschreibung der Standlärmquellen von 2.5 dB(A). Da die Annahmen bzgl. der Repräsentativität der Messsituation jedoch lediglich auf wenigen Erfahrungen beruhen, wurde im Sinne einer konservativen Annahme eine minimale Gesamtunsicherheit von 3.0 dB(A) festgelegt.

Verschiedene Faktoren, für welche in der Tabelle stichwortartig Beispiele erwähnt sind, können jedoch dazu führen, dass die Unsicherheiten deutlich grösser ausfallen. Allerdings gilt es zu bemerken, dass diese zusätzlichen Unsicherheiten kaum einmal alle zusammen auftreten und entsprechend die resultierende Gesamtunsicherheit nicht so hoch ausfällt. Da gerade in diesen Situationen die einzelnen Unsicherheitskomponenten gemäss Tabelle 6 schwer abzuschätzen sind, wurde beschlossen für Quellen mit erhöhter Unsicherheit in der Emissionsdatenbank pauschal einen Wert von 4.0 dB(A) zu vergeben.

Ursache der Unsicherheit	Von	Bis	Kommentar höhere Unsicherheit
<b>Messunsicherheit</b>	<b>0.9 dB(A)</b>	<b>3.1 dB(A)</b>	
Unsicherheit der Kalibration und der elektrischen Messkette	0.5 dB(A)	0.5 dB(A)	
Einflüsse in der Nähe der Messstelle (z.B. lokale Reflexionen)	0.5 dB(A)	0.5 dB(A)	
Korrektur des Grundgeräuscheinflusses	0.5 dB(A)	3.0 dB(A)	Bei Störgeräuschen ≈ Nutzsignal
<b>Unsicherheiten bei der Modellierung</b>	<b>1.1 dB(A)</b>	<b>2.5 dB(A)</b>	
Rückrechnung auf die Quellenposition	0.5 dB(A)	1.5 dB(A)	Bei Fehlen spektraler Messdaten
Annahmen zu Quellenposition und -eigenschaften	1.0 dB(A)	2.0 dB(A)	Bei vereinfachter Modellierung, Bsp. Erstellen Fahrbereitschaft
<b>Repräsentativität der Messsituation</b>	<b>2.1 dB(A)</b>	<b>4.2 dB(A)</b>	
Variationen der Emissionen zwischen verschiedenen Fahrzeugen	1.5 dB(A)	3.0 dB(A)	
Variationen der Betriebszeiten (Wettereinfluss, Zugskomposition)	1.5 dB(A)	3.0 dB(A)	Speziell bedeutsam bei Kompressoren
	<b>2.5 dB(A)</b>	<b>5.8 dB(A)</b>	

Tabelle 6: Zusammenstellung und Quantifizierung der Unsicherheitsquellen.

## 9 Aufbau und Struktur der Emissionsdatenbank

Sämtliche ausgewerteten Standlärmemissionsdaten wurden in einer Emissionsdatenbank zusammengefasst. Als Grundlage wurde dabei die Emissionsdatenbank von sonRAIL verwendet, welche alle Eingangsdaten umfasst, die für eine Vorbeifahrtsberechnung mit sonRAIL benötigt werden. Die Datenbankstruktur wurde um eine zusätzliche Tabelle zur Abbildung von Standlärmquellen erweitert. Beim Aufbau der Tabelle und bei der Bezeichnung der Felder wurden nach Möglichkeit Konzepte der bereits existierenden Quellen-datenbank der SBB verwendet. Nachfolgend wird ein kurzer Überblick zum Aufbau der Datenbank und den Feldern gegeben, welche zur Definition von Standlärmquellen verwendet werden.

### 9.1 Struktur

Die zentrale Tabelle der Datenbank (als Root\_Tab bezeichnet) enthält eine Zusammenstellung sämtlicher Fahrzeuge inkl. verschiedener Detailinformationen wie der Fahrzeuglänge, der Anzahl Achsen, der Radlast oder des Raddurchmessers. Die Fahrzeugklassierung und –bezeichnung orientiert sich dabei an den Grundlagen des Berichtes 8-066 der Firma PROSE vom 9. Juli 2012 „Baureihenzuordnung sonRAIL“, welcher im Auftrag des BAFU erstellt wurde.

Im sonRAIL-Modell wird zwischen Rollgeräuschquellen und sekundären Quellen unterschieden, wobei sämtliche Standlärmquellen zur zweiten Kategorie gehören. In der Datenbank sind zwei Möglichkeiten der Erfassung sekundärer Schallquellen vorgesehen, welche sich an der Art der Ermittlung orientieren. Variante 1 (sec\_source\_option1) ist auf Messungen mit Mikrofonarrays ausgerichtet, welche bei Zugsvorbeifahrten durchgeführt werden. Dabei werden energetisch aufsummierte sekundäre Schallleistungen für vier vordefinierte Höhenbereiche für ganze Zugsvorbeifahrten zusammengefasst. Variante 2 (sec\_source\_option2), welche für Standlärm eingesetzt werden kann, geht von einer Erfassung einzelner Aggregate aus.

### 9.2 Beschreibung der Datenbanktabelle „sec\_source\_option2“

In der nachfolgenden Tabelle sind sämtliche Elemente der Datenbanktabelle „sec\_source\_option2“ zusammengestellt und kommentiert. Pro Eintrag bzw. pro Zeile wird dabei eine Punktquelle bei einem Betriebszustand definiert. Zur Abbildung sämtlicher Sekundärquellen bei allen auftretenden Betriebszuständen werden entsprechend eine grössere Anzahl Einträge benötigt.

Für weitere Informationen sei auf die Dokumentation der sonRAIL-Emissionsdatenbank verwiesen.

Spalte	Beschreibung
id	Fortlaufende Identifikationsnummer (pro Zeile eine ID)
id_root	ID des Fahrzeuges, dem die in der aktuellen Zeile eingegebenen Daten zugeordnet werden sollen. Die Fahrzeug-ID ist in der Spalte „id“ der „root_tab“ abzulesen.
description	Optionale Beschreibung zur Erleichterung des Überblicks, z.B. Fahrzeugbaureihe. Massgeblich für die Zuordnung der eingegebenen Daten zu einem Fahrzeug ist aber der Eintrag in der Spalte „id_root“.
unit	Eindeutige Bezeichnung des Aggregats. Es wird empfohlen nur die Klassierung nach Tabelle 1 zu verwenden.
op_cond	Bezeichnung der Betriebsart des Aggregats (z.B. Stillstand, Parken, Schlummern, Erstellten Fahrbereitschaft)
precision	Genauigkeitsangabe in dB(A), welche die Unsicherheit der Quelldaten im Sinne einer



Spalte	Beschreibung
	Standardabweichung beschreibt. <ul style="list-style-type: none"> <li>- Für einzelne Züge, welche detailliert, mit hoher Genauigkeit vermessen wurden, wird von einer Unsicherheit von <math>\pm 3.0</math> dB(A) ausgegangen.</li> <li>- Für Züge mit zusätzlichen Unsicherheitsquellen wird ein Wert von <math>\pm 4.0</math> dB(A) verwendet.</li> </ul>
x_coordinate	Position der Emissionsquelle in Fahrzeuglängsrichtung, gemessen ab Wagenende I
height	Höhe der Emissionsquelle über Schienenoberkante
v_range_low	Fahrgeschwindigkeit, ab der das Aggregat in der Berechnung berücksichtigt werden soll (bei Betrachtung ausschliesslich im Stillstand ist „0“ einzutragen)
v_range_up	Fahrgeschwindigkeit, bis zu der das Aggregat in der Berechnung berücksichtigt werden soll (bei Betrachtung ausschliesslich im Stillstand ist „0.1“ einzutragen)
op_time_night	Prozentualer Anteil an der Nachtzeit (19 bis 07 Uhr), in der sich das Aggregat in Betrieb befindet (bei absoluten Lärmphasen wie z.B. dem Erstellen der Fahrbereitschaft wird der prozentuale Anteil einer durchschnittlichen Aufenthaltszeit angegeben)
K1 bis K3	Pegelkorrekturen für eine Beurteilung des Standlärms nach LSV Anhang 6 (Industrie- und Gewerbelärm) K1: Quellentypkorrektur K2: Tonhaltigkeitskorrektur K3: Impulshaltigkeitskorrektur
Hz_0012_Lw bis Hz_8000_Lw	Sekundärer Schallleistungspegel des betrachteten Aggregats Die aus vier Ziffern bestehende Zahl im Spaltennamen (0012 bis 8000) steht für die jeweilige Terzfrequenz in Hz.
DataOwner	Urheber der Daten
Report	Veröffentlichungsquelle (auch interne Berichte z.B.) der Daten
Year	Veröffentlichungsjahr der Daten
Comments	Ergänzende Hinweise zur Ermittlung der Daten oder Erläuterungen zu ihrer Anwendung

Tabelle 7: Elemente der Datenbanktabelle „sec\_source\_option2“ zur Definition von Standlärmquellen

## 9.3 Ergänzende Kommentare

### 9.3.1 Zur Definition der Quellenposition

Die Punktquellen werden über ihre Position im Zugverband (Abstand zur Spitze und Höhe über Schienenoberkante) definiert. Wie in Kapitel 4 empfohlen, werden die Quellen nicht auf der Fahrzeugoberfläche sondern in der Fahrzeugmittelachse platziert. Entsprechend reichen zwei Koordinaten zur Festlegung der Quellenposition aus.

Gemäss diesem Modellierungskonzept, in welchem Quellen relativ zur Zugsspitze definiert werden, haben die Züge eine Orientierung. Unterschiedliche Emissionen zur linken bzw. zur rechten Seite werden jedoch wie in Kapitel 4 diskutiert, nicht unterschieden. Diese Vereinfachung erscheint jedoch in Anbetracht der Tatsache, dass in der Praxis in der Regel die genaue Position der Züge nicht bekannt ist, angebracht. Eine detailliertere Modellierung würde bei der vorliegenden Datenlage nur eine Scheingenauigkeit bei gleichzei-

tig stark erhöhtem Aufwand sowohl bei der Ermittlung der Quellenleistungen als auch bei der späteren Modellierung konkreter Situationen bedeuten.

### **9.3.2 Zum Umgang mit Messdaten mit eingeschränkter oder ohne spektraler Information**

In der Datenbank können Schallleistungen nur als Terzbandspektren abgespeichert werden, wobei es zulässig ist, nicht bei allen Terzen einen Wert vorzugeben. Dies kann dazu genutzt werden, Emissionsdaten mit eingeschränkten Mess- bzw. Auswertbereich oder Oktavbandspektren abzulegen. Im zweiten Fall kann die Schallenergie pro Oktavband auf die drei zugehörigen Terzen verteilt werden oder die benachbarten Terzen können frei gelassen werden.

Falls keine spektralen Messdaten sondern nur A-bewertete Pegel vorhanden sind, so kann der Eintrag entweder direkt bei der 1 kHz-Terz erfolgen, da bei 1 kHz die A-Bewertung keine Korrektur aufweist und somit der A-Pegel unverändert bleibt. Dies führt allerdings dazu, dass bei der Ausbreitungsrechnung von einer repräsentativen Frequenz von 1 kHz ausgegangen wird. Um alternativ einen spektralen Schwerpunkt zu definieren, kann die Schallleistung auf eine ausgesuchte Terz konzentriert werden. Hier muss allerdings dafür gesorgt werden, dass die A-Bewertung kompensiert wird.

### **9.3.3 Zur Definition der Betriebszeiten**

Die Definition der Betriebszeiten orientiert sich an den Vorgaben von Anhang 6 der Lärmschutzverordnung, auch wenn die entsprechende Tag-Nacht-Definition nicht dem realen Bahnbetrieb entspricht. Die entsprechende Zeitangabe ist als Mittelwert über das ganze Jahr zu interpretieren. Die angegebene Prozentzahl bezieht sich dabei nicht auf die Frage, wie häufig ein gewisses Aggregat gesamthaft pro Tag bzw. Nacht in Betrieb ist, sondern betrachtet nur den Zeitraum in welchem sich das Fahrzeug im vorgegebenen Geschwindigkeitsbereich befindet. Im Hinblick auf die Standlärmproblematik kann die Frage somit folgendermassen umformuliert werden: Wie viel Prozent der Zeit in welcher sich das Fahrzeug über Nacht abgestellt befindet, ist die betroffene Teilschallquelle in Betrieb? Bei einigen Lärmphasen wie z.B. dem Erstellen der Fahrbereitschaft handelt es sich um absolute Zeitphasen, welche in Prozent einer durchschnittlichen Aufenthaltszeit angegeben werden.

Zur Identifikation der eigentlichen Betriebszeit eines Aggregates an einem ausgesuchten Standort muss neben der obigen Information zusätzlich bekannt sein, wie lange der zugehörige Zug am entsprechenden Standort abgestellt bleibt. Diese Angabe wird allerdings erst bei der Modellierung einer konkreten Situation benötigt.

### **9.3.4 Zur Kategorisierung der Genauigkeit**

Neben der Messunsicherheit und den Unsicherheiten, welche sich aus der vereinfachten Modellierung der Quellen ergeben (siehe Kapitel 4), soll mit der Genauigkeitsklassierung auch den Streuungen innerhalb der Fahrzeugflotte sowie dem Einfluss der äusseren Bedingungen Rechnung getragen werden

## **10 Berechnungstool für nächtlichen Standlärm von Eisenbahnen**

Ausgehend von den Empfehlungen aus Kapitel 4 wurde auf Excel-Basis ein Berechnungswerkzeug für den Standlärm von Eisenbahnen inkl. Beurteilung nach LSV Anhang 6 entwickelt. Die Beurteilung beschränkt sich dabei aus folgenden Gründen auf die nächtliche Situation:

- Sowohl aufgrund der Aufenthaltszeiten der Züge als auch aufgrund der strengeren Nachtgrenzwerte ist in aller Regel die Nachtsituation für die Beurteilung dominant.
- Die Emissionsdatenbank bzw. die zugrunde liegenden Messungen wurden entsprechend auch im Hinblick auf die Beurteilung der Nacht konzipiert. Die Emissionen während dem Tag abgestellter

Züge sind bis zum jetzigen Zeitpunkt nicht detailliert ermittelt worden. Eine Aussage zur Tagesbelastung ist deshalb nicht vorgesehen.

Direkt in der Excel-Vorlage integriert ist die zentrale Fahrzeugdatenbank (root\_Tab) sowie die Tabelle mit den als Punktquellen definierten Sekundärquellen (sec\_source\_option2). Nachfolgend wird die Benutzersteuerung und der Berechnungsablauf dokumentiert.

### 10.1 Benutzersteuerung

Die Definition der Berechnungssituation erfolgt auf einer mit *Main* bezeichneten Hauptseite. Der Benutzer muss dabei folgende Eingaben machen:

- **Meteorologische Bedingungen:** Temperatur (°C) und relative Luftfeuchtigkeit (%)
- **Empfangspunkt:** Lage in Landeskoordinaten (X und Y), absolute Höhe (Z) sowie die Höhe über Terrain (H). Zusätzlich muss die Empfindlichkeitsstufe definiert werden. Dazu steht eine Dropdown-Liste zur Verfügung, welche automatisch das dargestellte Grenzwertschema für die Nacht anpasst.
- **Fahrzeugliste** (bis zu 30 Züge): Pro Zeile wird ein Fahrzeug definiert. Pro Fahrzeug muss der Fahrzeugtyp aus einer Dropdownliste ausgewählt werden, welche alle Elemente der Fahrzeugdatenbank enthält für welche Standlärmquellen abgespeichert sind. Die Lage des Fahrzeuges wird durch einen Start- und Endpunkt bestimmt, der in Form von zwei X/Y/Z-Koordinaten definiert wird.
- **Aufenthaltszeit am Standort:** Zusätzlich muss pro Fahrzeug die Aufenthaltszeit für die Nachtzeit von 19-07 Uhr am definierten Standort eingegeben werden. Bei den Betriebszeiten der einzelnen Aggregate resp. Lärmphasen handelt es sich teilweise um absolute Zeiten, welche in der Emissionsdatenbank in Prozent der gesamten Aufenthaltszeit angegeben sind. Dabei wurde von einer durchschnittlichen Aufenthaltszeit von ca. 6 – 8 Stunden ausgegangen. Bei Eingaben, die deutlich von dieser durchschnittlichen Aufenthaltszeit abweichen, müssen die prozentualen Betriebszeiten in der Datenbanktabelle (op\_time\_night) angepasst werden.
- **Ausbreitungssituation:** Es wird auf eine detaillierte Definition der Ausbreitungsbedingungen, namentlich auf eine Eingabe von Geländeschnitten verzichtet. Der Benutzer muss deshalb für jedes Fahrzeug entscheiden, ob die Sichtverbindung zwischen Fahrzeug und Empfangspunkt unterbrochen ist oder nicht. Dazu steht eine Auswahlliste zur Verfügung mit drei Feldern: Freie Sicht, leichte oder starke Abschirmung.

Unterhalb der Fahrzeugliste ist eine Graphik dargestellt, welche die Lage der Fahrzeuge und des Empfangspunktes darstellt.

### 10.2 Berechnungsablauf

Die Aktualisierung der Ausgabe erfolgt durch Betätigen des mit *Update* bezeichneten Knopfes.

Auf der Hauptseite wird danach in der Fahrzeugliste die Beschreibung der ausgewählten Fahrzeuge aktualisiert; diese wird aus der zentralen Fahrzeugdatenbank übernommen. Zusätzlich wird die Fahrzeuglänge in der Datenbank nachgeschlagen und ausgehend vom definierten horizontalen Richtungsvektor korrigierte Fahrzeugendpunkte berechnet. Diese werden jedoch nicht automatisch übernommen. Falls der Benutzer seine Eingabe anpassen will, muss er dies manuell vornehmen.

Als Resultat der Berechnung wird der Beurteilungspegel nach Anhang 6 der Schweizerischen Lärmschutzverordnung für die Nacht sowie eine Schätzung der Unsicherheit des Beurteilungspegels im Sinne einer Standardabweichung ausgegeben.

Die eigentliche Berechnung erfolgt in verschiedenen in Visual Basic for Applications programmierten Funktionen. Umfangreiche Zwischenresultate werden auf der Seite *Calc* dokumentiert, wo für jedes eingegebene

Fahrzeug sämtliche Teilschallquellen und Betriebsbedingungen dargestellt sind. Die Seite weist folgenden Aufbau auf, wobei pro Zeile die Immissionsberechnung einer Teilschallquelle dokumentiert wird:

**a) Export aus der Emissionsdatenbank**

In den ersten 14 Spalten (A bis N) werden Grundlagendaten aufgelistet, welche zu Dokumentationszwecken oder als Grundlage für Berechnungen dienen und die Quelle beschreiben. Die entsprechenden Grundlagen werden dabei direkt aus der Sekundärquellen-Datenbank übernommen und / oder stammen aus den Eingaben des Benutzers.

- Quellenliste: Beschreibung des Fahrzeuges aus der Sekundärquellen-Datenbank
- Op\_Cond: Betriebsbedingung des Fahrzeuges aus der Sekundärquellen-Datenbank
- Quelle: Typisierung der Quelle gemäss Sekundärquellen-Datenbank
- X: X-Koordinate der Teilschallquelle, berechnet aus der Lage des Fahrzeuges gemäss Eingabe des Benutzers und der Lage der Quelle auf dem Fahrzeug
- Y: Y-Koordinate der Teilschallquelle, berechnet aus der Lage des Fahrzeuges gemäss Eingabe des Benutzers und der Lage der Quelle auf dem Fahrzeug
- Z: Z-Koordinate der Teilschallquelle, berechnet aus den Höheneingaben des Benutzers
- H: Höhe der Quelle am Fahrzeug aus der Sekundärquellen-Datenbank
- f(A): Repräsentative Frequenz. Aus dem Emissionsspektrum wird der spektrale Schwerpunkt berechnet, wobei die einzelnen Terzen vorgängig A-bewertet wurden.
- LwA: A-bewerteter Schallleistungspegel der Teilschallquelle, berechnet aus dem Emissionsspektrum gemäss Sekundärquellen-Datenbank
- Precision: Genauigkeitsklasse der Teilschallquelle gemäss der s Sekundärquellen-Datenbank
- K1\_Nacht: Pegelkorrektur K1 (Akzeptanz) gemäss LSV Anhang 6 für die Nacht
- K2: Pegelkorrektur K2 (Tongehalt) gemäss LSV Anhang 6
- K3: Pegelkorrektur K3 (Impulsgehalt) gemäss LSV Anhang 6 für den Tag
- Zeitkorrektur Nacht: Betriebszeitenkorrektur gemäss LSV Anhang 6 für die Nacht. Die Zeitkorrektur berücksichtigt die eingegebene Aufenthaltszeit des Fahrzeuges am Standort und die Laufzeitangabe in Prozent aus der Sekundärquellen-Datenbank.

**b) Ausbreitungsrechnung nach ISO 9613**

In einem zweiten Block werden Grundlagen und Dämpfungsterme aufgelistet, welche bei einer Ausbreitungsrechnung nach ISO 9613 resultieren.

- Dist: Distanz zwischen dem Empfangspunkt und der Teilschallquelle
- horDist: Horizontale Distanz zwischen dem Empfangspunkt und der Teilschallquelle
- Adiv: Geometrische Dämpfung =  $10 \cdot \log(4\pi r^2)$
- Aair: Luftdämpfung, berechnet für die repräsentative Frequenz unter Verwendung der eingegebenen Temperatur und Feuchte
- Agr: Bodeneffekt (A-Pegel-Modell)
- Abar: Hinderniswirkung. Für freie Sicht wird 0 dB(A), für eine leichte Abschirmung 5 dB(A) und für eine starke Abschirmung 10 dB(A) angenommen.
- Atot: Gesamtdämpfung, resultierend aus der Summierung der Teildämpfungen
- Leq,i: Resultierender Mittelungspegel beim Empfangspunkt bei Betrieb der Teilschallquelle

### c) Teilbeurteilungspegel

Aus dem Mittelungspegel und den Pegelkorrekturen inkl. Betriebszeitkorrektur berechnet sich für jede Teilschallquelle der Teilbeurteilungspegel für die Nacht.

- $L_{r,i}(\text{Nacht})$  Teilbeurteilungspegel für die Nacht

### d) Unsicherheitsbetrachtung

Für jede Teilschallquelle wird die Unsicherheit der berechneten Teilbeurteilungspegel im Sinne einer Standardabweichung berechnet. Die resultierende Gesamtunsicherheit setzt sich dabei aus mehreren Teilunsicherheiten zusammen.

- $u(\text{Quelle})$ : Unsicherheit der Emissionsdaten gemäss Kategorisierung der Sekundärquellen-Datenbank
- $u(\text{ISO9613-2})$ : Unsicherheit der Ausbreitungsrechnung gemäss ISO 9613-2
- $u(\text{bar})$ : Bei Vorhandensein einer Abschirmung wird eine zusätzliche Teilunsicherheit von 3 dB angenommen
- $u(\text{tot})$ : Gesamtunsicherheit, berechnet nach den Regeln der Fehlerfortpflanzung unter der Annahme voneinander unabhängiger Teilunsicherheiten

Der Beurteilungspegel, welcher auf der Hauptseite ausgewiesen wird, berechnet sich als energetische Summe der Teilbeurteilungspegel. Zur Verbesserung des Überblicks werden die Teilbeurteilungspegel sämtlicher Teilschallquellen entsprechend ihrem Einfluss auf den resultierenden Beurteilungspegel eingefärbt, mit den lautesten Quellen in Rot und den leisesten in Blau.

Die Gesamtunsicherheit  $s$ , welche auf der Hauptseite dargestellt wird, berechnet sich aus den Unsicherheiten und Teilbeurteilungspegel der Teilschallquellen ( $s_n$  bzw.  $L_n$ ) gemäss nachfolgendem Ansatz (für Details sei auf die Standardarbeitsanweisung 10.8 der Empa Abteilung Akustik/Lärminderung verwiesen):

$$s = \frac{\sqrt{\sum (s_n \cdot 10^{0.1 \cdot L_n})^2}}{\sum 10^{0.1 \cdot L_n}}$$

## 10.3 Ergänzende Kommentare

### 10.3.1 Zur vereinfachten Situationsdefinition und Ausbreitungsrechnung

Bekanntlich haben der Geländeverlauf und die Untergrundeigenschaften einen Einfluss auf die Schallausbreitung. Neben allfälligen Hinderniswirkungen wird dadurch auch der Bodeneffekt, d.h. die Interferenz des Direktschalles mit Bodenreflexionen, beeinflusst. Mit der Vorgabe, ein Berechnungswerkzeug auf Excel-Basis zu erstellen, entfällt die Möglichkeit auf vorhandene Funktionalitäten zur Erstellung und Aufbereitung von topographischen Grundlagen für die Schallausbreitungsrechnung zurück zu greifen. Da eine manuelle Eingabe als sehr umständlich und deshalb kaum praktikabel eingeschätzt wurde, wurde entschieden, eine deutlich vereinfachte Situationsdefinition zu verwenden. Dabei wird davon ausgegangen, dass das Gelände zwischen Quelle und Empfänger plan ist und höchstens eine konstante Steigung (dies bei unterschiedlichen Z-Koordinaten) aufweist. Diese Modellierung ist in ihrer Komplexität auf die Anforderungen des A-Pegel-Modells der ISO 9613-2 angepasst. Einzig die Berechnung von Hinderniskanten kann auf diesem Weg nicht erfolgen. Deshalb wurde eine Zusatzdämpfung als Folge von Hindernissen eingeführt, welche aufgrund einer qualitativen Einschätzung (freie Sicht zwischen Quelle und Empfänger, Sichtlinie knapp unterbrochen, Sichtlinie deutlich unterbrochen) durch den Benutzer vergeben wird.

Dieser Ansatz ist naturgemäss mit einer grösser Unsicherheit behaftet, weshalb die vorgeschlagenen Hinderniswirkungen absichtlich konservativ angenommen wurden. Es kann somit davon ausgegangen werden, dass in abgeschirmten Situationen die effektiven Immissionspegel bei der Berechnung in der Tendenz überschätzt werden.

Eine häufig auftretende Situation bei Abstellanlagen ist, dass Züge parallel platziert sind und sich dabei gegenseitig abschirmen. Hier wird empfohlen, generell nur eine leichte Abschirmung anzunehmen. Da die Fahrzeuge nicht bis zum Boden reichen und so eine bodennahe Schallausbreitung kaum unterbunden wird und gleichzeitig sämtliche Oberflächen schallhart ausgebildet sind und es zu Mehrfachreflexionen kommt, ist das Pegelminderungspotenzial limitiert.

### **10.3.2 Zur Ermittlung der repräsentativen Frequenz**

Die repräsentative Frequenz wird aus dem A-bewerteten Emissionsspektrum bestimmt, wobei der Median ermittelt wird, d.h. diejenige Terz bei welcher ober- und unterhalb gleich viel Schallenergie emittiert wird.

### **10.3.3 Zur Unsicherheitsbetrachtung**

Die Unsicherheitsbetrachtung berücksichtigt Unsicherheiten bei der Quellenmodellierung, der Schallausbreitungsrechnung sowie bei den prozentualen Annahmen zur Häufigkeit mit welcher einzelne Quellen in Betrieb sind. Nicht berücksichtigt sind jedoch Unsicherheiten bei der Vergabe von Pegelkorrekturen.

Die Unsicherheitsangaben sind als Standardabweichungen von Jahresmittelwerten zu interpretieren. Dies bedeutet, dass bei ausgesuchten Situationen und kurzen Messzeiträumen durchaus grössere Abweichungen zwischen Messung und Berechnung resultieren können.

## **11 Validierung des Berechnungstools**

Um das Berechnungstool zu validieren wurden anlässlich der TGV POS Messungen (21./22.6.2013 in Zürich Herdern, Altstetten) sowie der DTZ Messungen (2./3.7.2013 in Rapperswil) gleichzeitig die Immissionen an je einem Punkt in 45 bis 50 m Distanz zum Zug gemessen.

Der Immissionsmesspunkt bei der TGV POS Messung befand sich in 45 m Abstand zum TGV etwa auf Höhe des Restaurantwagens. Die Immissionsmessung ergibt ohne Grundgeräuschkorrektur einen Pegel von 48.9 dB(A). Da während den Immissionsmessungen nie alle Komponenten des TGV ausgeschaltet waren, konnte das Grundgeräusch ganz ohne TGV nicht bestimmt werden. Der Pegel ohne hörbare Geräusche vom TGV betrug 46.3 dB(A), wobei zu dieser Zeit die Verflüssigerventilatoren der Klimageräte als an diesem Messpunkt lauteste Quellen sicher ausgeschaltet waren. Unter der Annahme, dass dieser Pegel in etwa dem Grundgeräusch entspricht, beträgt der Immissionspegel mit Grundgeräuschkorrektur 45.4 dB(A). Da die Immissionspegel nahe dem Grundgeräusch liegen, konnte die Validierung nur für die lautesten Lärmphasen mit eingeschaltetem Verflüssigerventilator der Klimageräte durchgeführt werden. Über die ganze Nacht betrachtet beträgt die Dauer dieser Phase nur ca. 3% der Zeit, d.h. es ist keine repräsentative Lärmphase für den Beurteilungspegel, welcher über die ganze Nacht bestimmt wird. Werden die Berechnungen mit dem Berechnungstool für eine kurze Phase mit eingeschalteten Verflüssigerventilatoren (100% der Zeit) gemacht, so ergibt dies einen Mittelungspegel von 53.0 dB(A) bei einer Unsicherheitsangabe von 1.7 dB(A). In diesen Berechnungen ist jedoch bei jedem Mittelwagen ein Verflüssigerventilator in Betrieb simuliert, was höchst wahrscheinlich – mit Blick auf die kleine Auftretenshäufigkeit - nicht der Realität entsprach. Anhand der Emissionsmessungen wissen wir lediglich, dass ein Verflüssigerventilator beim Mittelwagen vor dem Restaurantwagen eingeschaltet war. Werden die Berechnungen mit nur diesem Verflüssigerventilator durchgeführt, so ergibt sich ein Mittelungspegel von 49.8 dB(A) (Unsicherheit: 2.6 dB(A)). Ergänzend zu erwähnen ist, dass die so berechneten Immissionspegel in der Tendenz etwas zu hoch ausfallen, da die Quelle beim Restaurantwagen im Sinne einer Worst-Case-Annahme anhand der lauterer Seite bestimmt

wurde und diese nicht auf der Seite des Immissionspunktes lag. Deshalb dürften die Pegel in Realität nochmals um mindestens etwa 0.8 dB(A) tiefer liegen. Zusammenfassend kann also festgehalten werden, dass die berechneten Immissionspegel um 49 dB(A) betragen und unter Berücksichtigung der verschiedenen Unsicherheiten gut mit dem gemessenen Pegel von 48.9 dB(A) (ohne Grundgeräuschkorrektur) übereinstimmen.

Der Immissionsmesspunkt bei der DTZ Messung befand sich in 49 m Abstand zum DTZ etwa in der Mitte des Zuges (Höhe Kompressoren). Es wurden Immissionen von 48.5 dB(A) ohne Grundgeräuschkorrektur gemessen. Messungen des Grundgeräuschs während einer Phase in der das Fahrzeug für kurze Zeit ganz ausgeschaltet wurde, ergaben einen Pegel von 46.9 dB(A) (v.a. Firma Weidmann). Die Immissionsberechnungen mit dem Tool ergeben ohne Pegelkorrekturen einen Mittelungspegel von 45.3 dB(A) bei einer Unsicherheit von 2.3 dB(A). Der berechnete Wert liegt also ca. 3 dB(A) unter dem gemessenen Leq resp. 1.6 dB(A) über dem grundgeräuschkorrigierten Wert. Da die gemessenen Immissionen des DTZ nahe beim Grundgeräusch liegen und letzteres im Verlaufe der Nacht schwankte, ist der Messwert selbst mit grösseren Unsicherheiten behaftet. Vor diesem Hintergrund ist auch in diesem Fall die Übereinstimmung zwischen Messung und Berechnung als befriedigend einzustufen.

Ergänzend kann festgehalten werden, dass die Validierung des Berechnungstools in Abständen im Bereich der Grenzwerte schwierig ist, da die Immissionspegel durch die abgestellten Züge im Vergleich zu den Umgebungsgeräuschen tief sind.

## **12 Einreihung der Züge nach Emissionen und Grundlagen für die Empfehlung von Sicherheitsabständen**

Mit dem Berechnungswerkzeug, welches in Kapitel 10 beschrieben wird, wurden für sämtliche Züge aus der Emissionsdatenbank Beurteilungspegel gerechnet. Ausgehend von diesen Berechnungen wurde eine Einreihung der Züge nach Emissionen vorgenommen. Zusätzlich ausgewiesen werden die Distanzen bei welchen die Planungs- bzw. Immissionsgrenzwerte erreicht werden. Diese Information kann für eine Festlegung von minimalen Sicherheitsabständen verwendet werden.

Im Sinne einer Worst-Case-Betrachtung wurde davon ausgegangen, dass sich die Fahrzeuge während der Beurteilungszeit von 19 Uhr bis 07 Uhr während acht Stunden am entsprechenden Standort befinden. Die Berechnungen wurden ohne Abschirmungen und mit flachem Gelände gemacht. Es wurden verschiedene Empfangspunkt-Geometrien berücksichtigt. Im Allgemeinen wurden Empfangspunkte verwendet, welche normal zur Mitte des Zuges oder zur Zugspitze liegen. Bei Fahrzeugen, die an anderen Orten die dominantesten Lärmquellen haben, wurden die Empfangspunkte auf den lautesten Wagen (z.B. Restaurant) ausgerichtet. In der Resultate-Tabelle ist jeweils nur die Empfangspunkt-Geometrie mit den grössten Distanzen aufgeführt. Die Empfangspunkte wurden auf 4 Meter über Boden angenommen.

In der Tabelle 8 sind die minimalen Distanzen zur Einhaltung der Immissionsgrenzwerte und Planungswerte der ES II und ES III zusammengefasst.

Fahrzeugtyp	Empfindlichkeitsstufe II		Empfindlichkeitsstufe III		X-Koord. Beurteilungspunkt [m]
	Min. Distanz in m für Einhaltung PW (45 dB)	Min. Distanz in m für Einhaltung IGW (50 dB)	Min. Distanz in m für Einhaltung PW (50 dB)	Min. Distanz in m für Einhaltung IGW (55 dB)	
TGV POS	192	109	109	61	100*
Re460	125	77	77	45	9*
DTZ	122	73	73	40	50*
ICN	118	67	67	35	120***
Domino	111	66	66	35	12.5**
Re450	47	26	26	14	9*
FLIRT	41	20	20	9	10**

\* Mitte Zug

\*\* Mitte Triebwagen

\*\*\* Höhe Restaurantwagen, nicht ganz Mitte Zug

*Tabelle 8: Minimale Distanzen [m] zur Einhaltung der Planungswerte (PW) und Immissionsgrenzwerte (IGW) der Empfindlichkeitsstufen II und III für die verschiedenen Fahrzeugtypen (Emissionsdatenbank Stand August 2013). Die Werte sind auf 1 m gerundet.*

Die verschiedenen Fahrzeugtypen sind in der Tabelle 8 nach deren Emissionen eingereiht. Der TGV POS mit den grössten Sicherheitsabständen (192 m für den Planungswert ES II) ist von den bisher ausgewerteten Fahrzeugtypen mit Abstand der lauteste. Es folgen die Re460 sowie der DTZ mit 125 m und 122 m minimaler Distanz um den Planungswert der ES II einzuhalten. Die bezüglich Standlärm etwas leiseren Züge ICN und Domino haben ähnliche Sicherheitsabstände von 118 und 111 m für den Planungswert ES II. Viel weniger laut ist gemäss den vorliegenden Resultaten die Re450 und der FLIRT mit Sicherheitsabständen von nur 47 und 41 m für den Planungswert ES II. Hierzu ist zu bemerken, dass es sich bei den Emissionswerten vom FLIRT und der Re450 nicht um Resultate von Messungen handelt, welche im Rahmen dieses Projektes durchgeführt wurden, sondern um Auswertungen von Abnahmemessungen. Für die Re450 wurden neben den Schalldruckpegeln für die verschiedenen Betriebszustände auch die Ein- und Ausschaltzeiten des Kompressors über einen Messzeitraum von 9 h gemessen und ausgewertet, d.h. hier sind auch die Angaben zu den Betriebszeiten relativ gut abgestützt. Für das Erstellen der Fahrbereitschaft wurden die Werte der Re460 eingesetzt. Beim FLIRT hingegen sind keine Angaben zur Betriebsdauer der verschiedenen Aggregate während der Nacht vorhanden. Deshalb beruhen die bei den Berechnungen verwendeten Betriebszeiten auf folgenden eigenen Annahmen: ganze Nacht Betriebszustand Parken Nacht, Kompressor während der Nacht 20% der Zeit eingeschaltet, alle anderen Quellen 100% der Zeit eingeschaltet.

## 13 Massnahmen zur Lärminderung

Im Rahmen der bisherigen Abklärungen wurden Ideen und Ansatzpunkte für ergänzende Massnahmen zur Lärminderung an der Quelle zusammen getragen. Diese werden nachfolgend, ohne eine Wertung bzgl. ihres Potenzials oder ihrer Umsetzbarkeit aufgeführt:

- Standorte für das Abstellen optimieren.
- Schlummermodus für alle Fahrzeugkategorien einführen (Software-Anpassungen bei den Herstellern). Dies ist jedoch i.d.R. aufwändig und da Softwareanpassungen häufig auch sicherheitsrelevante Aspekte tangieren, müssen diese durch das BAV bewilligt werden.



- Einen beschleunigten Übergang vom Park- in den Schlummermodus forcieren (Schulung der Lokomotivführer, Anpassung der Betriebshandbücher).
- Sicherheitskontrollen bei der neuerlichen Inbetriebnahme teilweise an einem anderen Ort durchführen, beispielsweise im Bahnhof.
- Die Vorgaben für den Schlummermodus können allenfalls noch optimiert werden. So wird seit der Einführung des FV-Dosto ein zusätzlicher Betriebszustand mit der Bezeichnung „Energie optimiert abgestellt“ verlangt, welcher noch weniger laut sein wird.
- Teilweise kann sich auch eine Intensivierung des Unterhaltes positiv auf die Lärmbelastung auswirken. Beispielsweise ist bei den Lok-bespannten Zügen respektive dem Domino ein hoher Druckluftbedarf festzustellen, als Folge undichter Kupplungsstellen. Dies hat zur Folge, dass Druckluftkompressoren im Vergleich zu den geschlossenen Triebzugseinheiten eher häufiger zuschalten.
- Theoretisch möglich wäre an neuralgischen Stellen die Züge an ein externes schallisoliertes Luftdrucksystem und an eine externe Stromzufuhr (dies ist teilweise schon möglich) anzuschliessen. Möglicherweise wäre dies ohne Anpassungen der Fahrzeuge umsetzbar, falls die Standardkupplungen derselben genutzt werden können. Der Prellbock könnte dermassen ausgestaltet werden, dass die automatische Kupplung des Fahrzeugs dort ankoppeln kann.
- Als bauliche Massnahmen an den Zügen könnte der Einbau von Kleinkompressoren zur Aufrechterhaltung des Druckniveaus im Schlumberbetrieb geprüft werden. Diese wären zwar länger in Betrieb, könnten aber aufgrund der reduzierten Leistungsanforderungen deutlich leiser ausgelegt werden.
- Das BAV und die SBB sollten wenn möglich Einfluss auf die Ausgestaltung der TSI-Noise-Vorschriften nehmen mit dem Ziel, bessere Messverfahren (Höhe 3.5 m), strengere Grenzwerte und zusätzliche Betriebsmodi (Abstell-Lärm ist heute nicht zulassungsrelevant) einzuführen. Vor dem aktuellen Hintergrund von Lärmreklamationen ist es fragwürdig ob hier die Zulassungsbedingungen den öffentlichen Anforderungen genügen.
- Strenge Vorgaben an das Rollmaterial bei Ausschreibungen, welche bei der Abnahme messtechnisch überprüft werden.
- Theoretisch denkbar sind auch Lärmschutzwände oder Lärmschutzbauten.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass im Bereich betrieblich-organisatorischer Massnahmen mittelfristig das grösste Potenzial auszumachen ist. Konstruktive Änderungen an den Fahrzeugen sind prüfenswert, jedoch zeit- und kostenintensiv. Nachträgliche Umsetzungen erweisen sich dabei als schwierig, da selbst für reine Softwareanpassungen in der Regel eine Neuzulassung des Fahrzeuges durch das Bundesamt für Verkehr notwendig ist. Entsprechend wichtig ist es, dass bereits bei der Neueinführung von Fahrzeugen strenge Vorgaben gemacht werden.

## 14 Diskussion

Die Herausforderung bei der messtechnischen Erfassung der Schallquellen von stehenden Zügen liegt darin, trotz der Vielzahl an Quellen pro Zug und der grossen Anzahl unterschiedlicher Fahrzeuge, den Messaufwand in Grenzen zu halten und gleichzeitig eine im Hinblick auf die Beurteilung akzeptable Genauigkeit zu erreichen. Mit der grossen Anzahl Messpunkte sind die Emissionsmessverfahren gemäss TSI CR Noise und ISO-Norm 3095 vergleichsweise aufwändig. Gleichwohl können dadurch nicht alle Anforderungen im Hinblick auf die Quellenmodellierung erfüllt werden. So können durch die beiden Verfahren weder die Lage der Quellen noch deren Abstrahlcharakteristik bestimmt werden. Zusätzlich entsprechen die vorgeschriebenen Betriebszustände nicht den während der Nachtzeit herrschenden Bedingungen und resultieren tendenziell in einer Überschätzung der Emissionen. Wie aus Kapitel 6.2 zu entnehmen ist, liegen umfangreiche

Messdaten vor, welche nach diesen Messvorschriften durchgeführt wurden. Es wäre allein aus Kosten- und Termingründen nicht vertretbar, diese Messungen zu wiederholen und sämtliche relevanten Fahrzeuge und Betriebszustände neu zu vermessen. Auch gilt es zu bedenken, dass ein Messverfahren, welches die erwähnten Schwachpunkte kompensiert, sowohl bezüglich Messtechnik als auch Zeitbedarf deutlich aufwändiger ausfallen würde. Deshalb liegt es auf der Hand, diese Einschränkungen in Kauf zu nehmen und Messdaten nach EN ISO 3095 bzw. TSI CR NOISE als Basis für die Emissionsdatenbank zu verwenden. Mit Blick in die Zukunft wäre es sinnvoll wenn das BAV und die SBB Einfluss auf die Ausgestaltung der TSI-Noise-Vorschriften nehmen mit dem Ziel, bessere Messlayouts (Höhe 3.5 m), zusätzliche Betriebsmodi (Schlummermodus) und strengere Grenzwerte einzuführen. Wie dem Artikel „Geräuschemissionen europäischer Schienenfahrzeuge, Ermittlung des Stands der Technik“ in Lärmbekämpfung Bd. 8, Nr. 1 Januar 2013 entnommen werden kann, liegen die aktuell gültigen Grenzwerte für das Standgeräusch zum Teil deutlich über dem Stand der Technik. Entsprechend wird im Artikel ebenfalls empfohlen, im Zuge der Revision der TSI-Noise die Grenzwerte auf den Stand der Technik anzupassen.

Schneller erfolgreich ist das schon durch die SBB praktizierte Vorgehen, dass in den Ausschreibungen für neues Rollmaterial strenge Vorgaben gemacht werden, welche auch messtechnisch bei der Abnahme überprüft werden (<50 dB(A) im Abstand 7.5m beim Schlummern).

Neben der Ermittlung der Quellenleistungen stellt die Bestimmung der Betriebszeiten der einzelnen Aggregate eine grosse Herausforderung dar. Wie es sich gezeigt hat, sind weder die Fahrzeughersteller noch die Bahnbetreiber in der Lage dazu detaillierte und verlässliche Aussagen zu machen. Quellenvermessungen, welche auf der Erfassung ganzer Züge im realen Betrieb basieren und idealerweise ganze Abstellzyklen umfassen, bieten die Möglichkeit, die Betriebsdauer der Teilschallquellen separat zu erfassen. Die Erfahrungen der bisherigen Messungen haben teilweise grosse Unterschiede bei den Betriebszeiten vergleichbarer Aggregate zwischen verschiedenen Fahrzeugen ergeben. Die Hoffnung, Standardwerte ableiten zu können, welche auf andere Zugkompositionen übertragen werden können, hat sich deshalb nicht erfüllt. In diesem Sinne muss gefolgert werden, dass Resultate von Abnahmemessungen nach EN ISO 3095 bzw. TSI CR NOISE Messungen im realen Betrieb nicht vollständig ersetzen können.

Mit den bisherigen Auswertungen bestehender Messdaten und den zusätzlich durchgeführten Messungen konnte die Mehrzahl der in der Schweiz verkehrenden Zugstypen erfasst werden. Weitere Messungen in Zusammenarbeit mit der SBB sind geplant. Dies und der Umstand, dass die SBB selbst ein Werkzeug für die Abstellplanung auf der Basis dieser Daten aufbauen, ist als Garant zu werten, dass die Datengrundlagen auch mittelfristig aktuell gehalten werden und die Datenpflege garantiert wird.

Die Emissions- und Betriebsdaten sind in einer Datenbank mit zugehörigem Berechnungstool zusammengefasst, welches im Rahmen der durchgeführten Validierungen seine Fähigkeit zur korrekten Prognose von konkreten Einzelsituationen bewiesen hat. Das Berechnungswerkzeug ermöglicht die Ermittlung von Beurteilungspegeln nach Anhang 6 der Schweizerischen Lärmschutzverordnung ausgehend von wenigen Eingangsparametern. Da die Pegelkorrekturen gemäss Anhang 6 der LSV am Immissionsort unter Berücksichtigung der situativen akustischen Verhältnisse vergeben werden sollten, darf bei einer Modellrechnung, die IGW-Überschreitungen ausweist, aber nicht automatisch auf einen Sanierungsbedarf geschlossen werden. Die Erfahrungen aus den bisherigen Messungen haben gezeigt, dass sich die Standlärmquellen an den LSV-relevanten Immissionspunkten teilweise kaum noch vom Hintergrundgeräusch abheben bzw. sogar von diesem überdeckt werden. In solchen Situationen sind die Pegelkorrekturen für Tonalität und Impulshaltigkeit, welche in unmittelbarer Quellennähe bestimmt wurden, nicht oder nur noch in reduziertem Umfang angebracht.

Generell hat sich eine messtechnische Kontrolle der Belastungsgrenzwerte aufgrund der tiefen Messpegel als ausgesprochen schwierig erwiesen. Da Immissionsseitig eine Identifikation der massgeblichen Teilschallquellen kaum möglich ist, ist auch die Vergabe unterschiedlicher Pegelkorrekturen, namentlich des

K1, als in der Praxis schwierig umsetzbar einzuschätzen. Das Berechnungswerkzeug kann hier sowohl für die Messplanung als auch für die Interpretation der Resultate nützliche Dienste leisten.

Wie in Kapitel 13 ausgeführt, ist neben den Massnahmen an der Quelle vor allem im betrieblich-organisatorischen Bereich ein bedeutendes Lärminderungspotenzial zu erwarten. Hier kommt einem lärmoptimierten Abstellkonzept grosse Bedeutung zu, welches darauf ausgerichtet ist, laute Züge nur in ausreichenden Abständen von Wohngebäuden zu platzieren. Als erste Grundlage für solche Überlegungen wurden in Kapitel 12 minimale Sicherheitsabstände berechnet, welche zur Vermeidung von grenzwertrelevanten Situationen eingehalten werden müssen. Zur Berechnung dieser Sicherheitsabstände wurden verschiedene Annahmen getroffen, welche in der Tendenz auf der sicheren Seite lagen. Somit bedeutet eine knappe Unterschreitung dieser Distanzen nicht automatisch eine Grenzwertüberschreitung, sondern ist vielmehr als Hinweis zu interpretieren, die Situation detaillierter abzuklären.

Wie es sich zeigt, variieren die grenzwertrelevanten Distanzen gemäss Berechnung stark und reichen von unter 50 m für leise Fahrzeuge wie FLIRT und Re450 bis zu knapp 200 m beim TGV für Planungswerte und Zonen mit Empfindlichkeitsstufe II. Da entsprechend grosse Sicherheitsabstände die Flexibilität der Bahnbetriebe bei der Abstellplanung einschränken bzw. grosse Abstellflächen nach sich ziehen, besitzen die Bahnbetreiber ein eigenes Interesse für Massnahmen an der Quelle. Die messtechnische Identifikation der hauptsächlich für die Belastung verantwortlichen Teilschallquellen wie sie im Rahmen der Emissionsmessungen durchgeführt wurde, stellt dabei eine hilfreiche Grundlage für die Planung von Verbesserungsmassnahmen an der Quelle dar.