



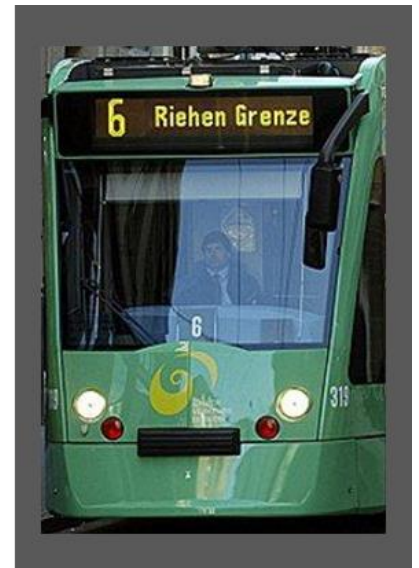
BERNMOBIL
INTELLIGENT UNTERWEGS



Mit Unterstützung des Bundesamt für Umwelt BAFU

Forschungsprojekt Tramlärm 2013

Definition von Emissionswerten



Projektleiter: R. Bayer
Berichtsverfasser: B. Kindler
Datum: 31. Juli 2014

Impressum

Projektverfasser: B+S AG
Muristrasse 60
Postfach 670
3000 Bern 31

Projektleiter: René Bayer

Berichtsverfasser: Bernhard Kindler
sonRAIL: Kurt Heutschi

Messungen: Pierre Perrenoud

Änderungsverzeichnis:

Version	Datum	Verfasser	Bemerkungen
0.1	06.06.2014	Kin	Vorabzug BAFU
0.2	25.06.2014	Kin	Vorabzug Trambetreiber
1.0	31.07.2014	Kin	Publikation

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Messanordnung	14
Abb. 2: Schwarzbelag Normalprofil BERNMOBIL	17
Abb. 3: Schwarzbelag Normalprofil VBZ	17
Abb. 4: Schwarzbelag Normalprofil BLT	18
Abb. 5: Rasengitter	18
Abb. 6: Tram VBZ (Cobra)	19
Abb. 7: Tram BERNMOBIL (Combino XL)	19
Abb. 8: Tram BVB (Combino Be 6/8)	19
Abb. 9: Tram BLT (Tango)	20
Abb. 10: Messung Albisriederstrasse	20
Abb. 11: Messung Badenerstrasse	20
Abb. 12: Messung Uetlibergstrasse	21
Abb. 13: Messung Schlossstrasse	21
Abb. 14: Messung Loryplatz	21
Abb. 15: Messung Thunstrasse	22
Abb. 16: Messung Rosentalstrasse	22
Abb. 17: Die 4 Trams der neusten Generation im Vergleich bei 35 km/h auf Asphalt	28
Abb. 18: Gleicher Tramzug (Cobra) einmal auf Asphalt und einmal auf Rasengitter $v = 36 \text{ km/h}$	29
Abb. 19: Vergleich VBZ Cobra auf horizontalem Trasse und in der Steigung von 80 ‰	30
Abb. 20: Vergleich BE Combino auf horizontalem Trasse und in der Steigung von 32 ‰	30
Abb. 21: Die 4 Trams der neusten Generation im Vergleich an der Haltestelle	32
Abb. 22: Schalldruckpegel einer Tramdurchfahrt pro Stunde in 1m Abstand	34
Abb. 23: Brems- und Beschleunigungsweg in Abhängigkeit der Geschwindigkeit	37
Abb. 24: Schalldruckpegel Tramtyp Cobra VBZ	41
Abb. 25: Schalldruckpegel Tramtyp Combino XL BERNMOBIL	42
Abb. 26: Schalldruckpegel Tramtyp Combino 6/8 BVB	42
Abb. 27: Schalldruckpegel Tramtyp Tango BLT	43
Abb. 28: Schalldruckpegel Tramtyp Vevey BERNMOBIL	43
Abb. 29: Schalldruckpegel Tramtyp Combion BERNMOBIL	44
Abb. 30: Schalldruckpegel Tramtyp Tram 2000 VBZ	44
Abb. 31: Schalldruckpegel Mischverkehr	45
Abb. 32: Schalldruckpegel Trasse Rasengitter	45
Abb. 33: Äquivalenter Schalldruckpegel Haltestellen	46
Abb. 34: Wirkungsbereich äquivalenter Schalldruckpegel im Bereich Haltestellen	46
Abb. 35: Steigungszuschlag	47

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Messunsicherheiten Typ B
Tabelle 2:	Messergebnisse der Messungen 2004 und 2010
Tabelle 3:	Messergebnisse der Durchfahrtmessungen 2013 (ohne Steigung):
Tabelle 4:	Messergebnisse der Durchfahrtmessungen 2013 (mit Steigung):
Tabelle 5:	Messergebnisse der Messungen von simulierten Haltestellen 2013.
Tabelle 6:	Messergebnisse der Durchfahrtmessungen 2013 (Kurve):
Tabelle 7:	Trendlinien Schalldruckpegel in Abhängigkeit Geschwindigkeit
Tabelle 8:	Parameter A_1 und A_2
Tabelle 9:	Vergleich Messung / Berechnung
Tabelle 10:	Differenzen Rasengitter - Asphalt
Tabelle 11:	Differenzen Messung / Berechnung
Tabelle 12:	Differenzen Steigung / horizontale Strecke
Tabelle 13:	Differenzen Gefälle / horizontale Strecke

Abkürzungsverzeichnis

BAFU	Bundesamt für Umwelt (ehemals BUWAL)
BLT	Baselland Transport AG
BVB	Basler Verkehrs-Betriebe
EMPA	Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt
i	Gefälle / Steigung
LE	Schallexpositionspegel
Leq	Energieäquivalenter Dauerschallpegel (Mittelungspegel)
Leq/h	Stundenbezogener energieäquivalenter Dauerschallpegel (Mittelungspegel)
Lqr	Quellenwert einer Tramdurchfahrt pro Stunde in 1 m Abstand
Lr	Beurteilungspegel
LSV	Lärmschutz-Verordnung des Bundes
LW	Schallleistungspegel
MIV	Motorisierter Individualverkehr
SOK	Schienenoberkante
VBZ	Verkehrsbetriebe Zürich

Inhalt

0. Zusammenfassung	9
1. Einleitung	10
1.1. Vorwort	10
1.2. Ausgangslage	10
2. Grundlagen	11
3. Vorgehen / Methodik	12
3.1. Vorgehen Messungen 2004 und 2010	12
3.2. Zielsetzungen Messkampagne 2013	13
4. Messkonzept	14
4.1. Messanordnung	14
4.2. Messequipment	14
4.3. Messdaten	15
4.4. Messunsicherheiten	15
4.5. Trassetypen	17
4.6. Tramtypen	19
4.7. Messstrecken	20
4.8. Haltestellen	22
5. Messergebnisse	23
5.1. Rekapitulation Messergebnisse Tramdurchfahrten (2004 und 2010)	23
5.2. Messergebnisse Messungen 2013	24
5.3. Spektrale Betrachtung der Tramdurchfahrten (2013)	28
5.4. Spektrale Betrachtung bei Tramhaltestellen (2013)	32
5.5. Zusammenfassung der Ergebnisse aus den Messungen	33
6. Auswertung der Messresultate	34
6.1. Tramdurchfahrten	34
6.2. Haltestellen	36
6.3. Steigungen	38
6.4. Gefälle	38
6.5. Kurven	39

7. Integration der Messresultate in das sonRAIL-Emissionsmodell	40
7.1. Ausgangslage	40
7.2. Einleitung	40
7.3. sonRAIL-Emissionsmodell	40
7.4. Ergebnisse / Schlussfolgerungen	40
8. Folgerungen aus den Untersuchungen: Projektierungsrichtlinien	41
8.1. Ausgangslage	41
8.2. Schallabstrahlung und Quellenwerte Tramdurchfahrten (Belag)	41
8.3. Schallabstrahlung und Quellenwerte Tramdurchfahrten auf Rasengitter	45
8.4. Schallabstrahlung und Quellenwerte bei Haltestellen	46
8.5. Steigungszuschlag	47
9. Schlussbemerkung	48

Anhangverzeichnis

Anhang 1 Untersuchungsbericht EMPA

Beilage 1.1 Tramlärm: Formulierung als sonRail-Emission
EMPA, Abteilung Akustik / Lärminderung 06.06.2014

Anhang 2 Datenblätter

Beilage 2.1 Datenblätter Tramzüge VBZ
Beilage 2.2 Datenblätter Tramzüge BERNMOBIL
Beilage 2.3 Datenblatt Tramzug BVB
Beilage 2.4 Datenblatt Tramzug BLT

0. Zusammenfassung

Ausgangslage

Im Jahr 2004 hat die B+S AG in Zusammenarbeit mit der EMPA erstmalig die Lärmemissionen von Trams in Bern und Zürich messtechnisch und rechnerisch untersucht und einen entsprechenden Bericht verfasst. Im Jahr 2010 wurden ergänzend auch in Basel an verschiedenen Immissionsorten Tramlärmaufzeichnungen durchgeführt, welche es erlaubten Emissionsdaten zu ermitteln.

Mit der aktuellen Messkampagne wurden Messdaten von Trams der neusten Generation gewonnen. Durch diese soll der bestehende Forschungsbericht aktualisiert werden und mit zusätzlichen Ergebnissen von Emissionen in Steigungen sowie im Bereich von Haltestellen ergänzt werden.

Zielsetzung

Die aktuelle Messkampagne soll für die zukünftig Ermittlung und Beurteilung von Tramlärmimmissionen die Basis zu allgemeingültigen Richtlinien schaffen.

Ergebnisse

Basierend auf den durchgeführten Messungen resultieren folgende wesentliche Ergebnisse:

- Trams der neusten Generation sind mit Pegeldifferenzen von bis zu 10 dBA im Vergleich zu den älteren Trams deutlich leiser.
- Die Geschwindigkeitszunahme von 20 km/h auf 50 km/h ergibt eine markante Pegelzunahme von bis zu 10 dBA.
- Die Trasseebeschaffenheit spielt eine wesentliche Rolle. Rasengittersteine reduzieren die Lärmimmissionen um etwa 3-4 dBA.
- Bei den Messungen in Steigungen ergaben sich Pegelzunahmen von ca. 1 – 3 dBA.
- Die Messungen eines Haltevorgangs zeigen in etwa einen äquivalenten Mittelungspegel L_{eq} einer Tramdurchfahrt mit 30 km/h.

Schlussfolgerungen

Die Messungen zeigen, dass die Bautechnik und Konstruktion von Tramzügen in Bezug auf die Lärmentwicklung wesentliche Fortschritte erzielt hat. Subjektiv entspricht die Lärmpegel-Differenz von alten Trams zu Trams der neusten Generation, einer Halbierung der Lautstärke.

Mit der sukzessiven Erneuerung der Tramflotte resp. dem konsequenten Einsatz von Trams der neusten Generation, wird sich die Lärmbelastung, bei gleichem Taktraster, zukünftig weiter reduzieren.

Weiter spielt die Trasseebeschaffenheit eine wesentliche Rolle. Rasengittersteine reduzieren im Vergleich zu einer harten Fahrbahn die Lärmimmissionen ebenfalls wahrnehmbar.

Bei der ausschliesslichen Betrachtung der akustischen Aspekte sind demzufolge Trassen mit Rasengittersteinen gegenüber schallharten Fahrbahnflächen vorzuziehen und wenn möglich zu realisieren.

1. Einleitung

1.1. Vorwort

Im Jahr 2004 hat die B+S AG in Zusammenarbeit mit der EMPA erstmalig die Lärmemissionen von Trams in Bern und Zürich messtechnisch und rechnerisch untersucht und einen entsprechenden Bericht verfasst.

Im Jahr 2010 wurden ergänzend auch in Basel an verschiedenen Immissionsorten Tramlärmaufzeichnungen durchgeführt, welche es erlaubten Emissionsdaten zu ermitteln. Der entsprechende aktualisierte Bericht ist auf der Website des BAFU publiziert.

Mit der aktuellen Messkampagne wurden Messdaten von Trams der neusten Generation gewonnen. Durch diese soll der bestehende Forschungsbericht aktualisiert werden und mit zusätzlichen Ergebnissen von Emissionen in Steigungen sowie im Bereich von Haltestellen ergänzt werden.

1.2. Ausgangslage

Die Immissionen von Strassenbahnen oder Trams werden - sofern sie auf der Strasse verkehren und nicht ein eigenes, separates Trasse aufweisen - zum Strassenverkehrslärm aufaddiert (Anhang 3, Ziffer 1 und 3 LSV). Es wird ein Teilbeurteilungspegel infolge des Fahrzeugverkehrs und ein Teilbeurteilungspegel infolge des Tramverkehrs ermittelt und energetisch addiert.

Die Grundlagen für die Immissionsberechnung des Strassenverkehrs sind umfassend, gut dokumentiert und langjährig ausgereift. Für diejenigen infolge des Tramverkehrs wurden 2004/2005 in einem ersten Forschungsprojekt die Emissionswerte der damals gängigen Tramtypen für das Strassenlärmmodell sonROAD, welches durch die EMPA entwickelt wurde, ermittelt.

Injiziert wurde die Studie seinerzeit durch das BUWAL. Mit der Unterstützung von BERNMOBIL und den Verkehrsbetrieben Zürich VBZ wurden Partner gefunden, welche sowohl einen repräsentativen Querschnitt von in der Schweiz verwendeten Tramtypen aufweisen, als auch für die erforderlichen Messkampagnen die notwendige Unterstützung zusicherten.

In der Zwischenzeit werden verschiedene neuere Tramtypen wie Combino, Cobra oder Tango eingesetzt, welche je nach Datum der Inbetriebnahme aus älteren Modellen weiterentwickelt wurden und lärmtechnisch nicht mehr mit den älteren Typen vergleichbar sind.

Ein Update dieser Studie soll die Informationslücken schliessen und das aktuelle Rollmaterial berücksichtigen.

Folgende Themenbereiche sind in der aktualisierten Studie zu bearbeiten:

- Aktuelle Tramtypen → Ergänzung der bestehenden Typenreihe
- Immissionen bzw. Emissionspegel bei Fahrgeschwindigkeiten von 20 – 50 km/h.
- Emissionsauswirkungen bei Steigungen
- Emissionsauswirkungen allfällig neuer Trasseen typen bzw. Unterbauten
- Ermittlung eines Emissionsansatzes im Bereich von Haltestellen
- Aktualisierung Emissionsansatz mit sonRAIL (EMPA, Kurt Heutschi)

Die vorliegende Studie wurde wiederum in Zusammenarbeit mit den VBZ und BERNMOBIL, sowie neu mit der BVB und BLT durchgeführt. Die Studie gibt Aufschluss über die zu verwendenden Emissionswerte von Tramzügen, zeigt die Unterschiede auf und formuliert allgemeingültige Richtlinien, wie die Ermittlung des massgebenden Quellenwertes zu erfolgen hat. Die EMPA hat zudem die vorliegenden Ergebnisse für die Implementierung in das sonRAIL-Eisenbahnlärmmodell umgerechnet und nachfolgend dokumentiert.

2. Grundlagen

Folgende Grundlagen wurden für den vorliegenden Bericht verwendet:

Projektgrundlagen

- [1] Forschungsprojekt: Ermittlung der Tramlärmemissionen, Aktualisierung 2011
Definition von Emissionswerten, B+S AG, 30. Juni 2011
- [2] BLT – Projektierungsrichtlinien
BLT, 28. Mai 2010

Normen / Verordnungen

- [3] ISO 3095:2013 Acoustics -- Railway applications --
Measurement of noise emitted by railbound vehicles
- [4] Lärmschutzverordnung (LSV) des Bundes vom 15. Dezember 1986 (Stand: 1. August)
- [5] JCGM 100:2008 Evaluation of measurement data „Guide to the Expression of Uncertainty in
Measurement“ (ISO/IEC Guide 98-3: 2008)

3. Vorgehen / Methodik

3.1. Vorgehen Messungen 2004 und 2010

Basis der Untersuchungen von 2004 bildeten messtechnische Ermittlungen an realen Trams unter klar definierten Bedingungen. Spezielle Vorkommnisse wie Kurvenquietschen oder Haltestellen wurden damals nicht berücksichtigt. Aufgrund der effektiven Einsatzbedingungen wurden nachfolgend genannte Anforderungen definiert:

Tram:

- Trams, welche regelmässig im Einsatz sind und noch mindestens weitere 5 Jahre betrieben werden.
- Spezielle Wagenkompositionen für Ausnahmefälle (z.B. Ausstellungen, Sportanlässe etc.) werden nicht berücksichtigt.

Trasse:

- Das Trasse muss sich auf der Strasse oder im Strassenquerschnitt befinden.
- Fest eingebundene Schienenlagerung (Normalfall).

Fahrszenarien:

- Es sind die zwei massgebenden Geschwindigkeitsbereiche zu erfassen.
- Messtechnische Ermittlung der Langsamfahrt mit 20 km/h und der zulässigen Maximalgeschwindigkeit von 40 km/h.

Ziel der Messungen im Jahr 2010 für den Kanton Basel-Stadt war die Erfassung der Lärm- und Erschütterungsimmissionen infolge des Tramverkehrs auf dem Strassennetz der Stadt Basel. An 15 Messorten wurden die angetroffenen Lärmimmissionen von total 334 Tramvorbeifahrten aufgezeichnet und ausgewertet. 4 Messorte lagen im Einflussbereich von Haltestellen, so dass diese speziellen Bedingungen ebenfalls registriert werden konnten. Die Messungen waren mit den beiden Basler Verkehrsbetrieben nicht abgesprochen, um möglichst „unverfälschte“ Messwerte zu erhalten.

Im Vergleich zu den Messungen von 2004, welche unter klar definierten Bedingungen in genormten Abständen vorgenommen wurden, sind bei den Messungen 2010, welche LSV-konform im offenen Fenster lärmempfindlicher Räume stattfanden, eine grössere Streuung der Messwerte zu erwarten. Der Vorteil der messtechnischen Erfassung des realen Praxiseinsatzes ist jedoch die Absicherung der Messwerte gegen oben (maximale Lärmimmissionen).

3.2. Zielsetzungen Messkampagne 2013

Die Nachfrage nach dem bestehenden Bericht [1] als Grundlage für die Ermittlung und Prognose von Tramlärmimmissionen ist relativ gross.

Die Fragestellungen der letzten Jahre zeigen, dass der Bericht eine gute Basis ist und Hinweise gibt, jedoch auf verschiedene – mittlerweile dringende – Fragen keine Antworten gibt.

Aufgrund der effektiven Einsatzbedingungen wurden nachfolgend genannte Anforderungen definiert:

Tram:

- Strassenbahnen der neusten Generation, welche regelmässig im Einsatz sind und noch Jahrzehnte betrieben werden.
- Spezielle Wagenkompositionen für Ausnahmefälle (z.B. Ausstellungen, Sportanlässe etc.) werden nicht berücksichtigt.

Trasse:

- Das Trasse muss sich auf der Strasse oder im Strassenquerschnitt befinden.
- Fest eingebundene Schienenlagerung (Normalfall).
- Die Messobjekte, sowohl Tramzüge wie Schienen, sollen eine „durchschnittliche“ Abnützung aufweisen, das heisst dass das Schleifen der Räder oder Schienen weder kürzlich durchgeführt wurde, noch unmittelbar bevorsteht.

Fahrszenarien:

- Messtechnische Ermittlung der Langsamfahrt mit 20 km/h, einer mittleren Geschwindigkeit von 35 km/h und der zulässigen Maximalgeschwindigkeit Innerorts von 50 km/h.
- Längsgefälle horizontal sowie zusätzlich Steigungsstrecke mit Steigung zwischen 3 – 8 %.
- Simulation von Haltestellen.

Zielsetzung

Die Auswertung der Messergebnisse soll für zukünftige Ermittlungen und Beurteilungen von Tramlärmimmissionen die Basis zu allgemeingültigen Richtlinien schaffen. Insbesondere sollen die Messungen Aufschluss geben über

- mögliche Emissionsunterschiede der verschiedenen Tramtypen, sowohl als Gesamtpegel als auch spektral,
- geschwindigkeitsabhängige Emissionen,
- steigungsabhängige Emissionen,
- Emissionspegel bei Haltestellen.

4. Messkonzept

4.1. Messanordnung

Die Messanordnung wurde entsprechend den Normdistanzen [3] durchgeführt, das heisst 7.5 m seitlicher Abstand zur Gleisachse und 1.20 m über Schienenoberkante (SOK).

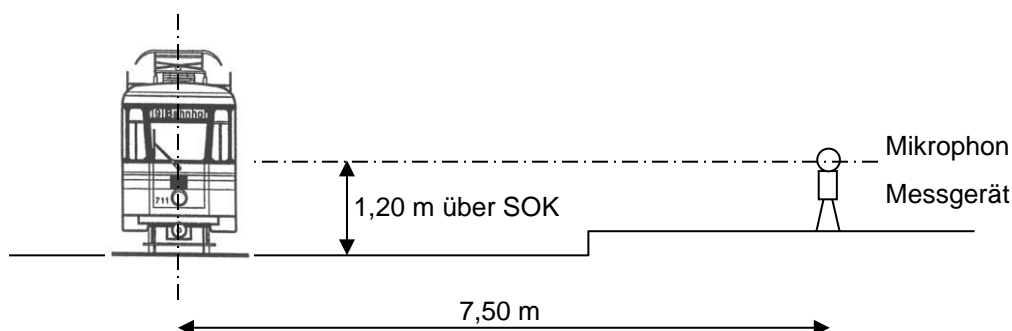


Abb. 1: Messanordnung

Messvorgang

Die Messungen wurden nachts (01.00 - 04.00 Uhr) durchgeführt, um mögliche Fremdeinflüsse und Störungen zu minimieren. Nachfolgend ist das massgebende Messprozedere festgelegt:

- Kurzfristige Sperrung des Strassenabschnittes für den jeweiligen Messdurchgang.
- Konstante Geschwindigkeit des Trams, Geschwindigkeitsbereich 18 - 20 km/h, 35 – 36 km/h und 48 - 50 km/h.
- Mindestens 3 Messdurchgänge pro Tramtyp und Geschwindigkeit resp. eines simulierten Haltes (Abbremsen, Anhalten, alle Türen auf und 5 sec später wieder zu und Weiterfahrt).
- Messung mit 3 verschiedenen Messketten, Mikrofonpositionen 5 – 10 m Abstand voneinander.
- Erfassung des Pegelverlaufes in dBA der einzelnen Durchfahrten.
- Erfassung des Schallexpositionspegels LE.
- Erfassung des Terzbandspektrums LE.

4.2. Messequipment

Für die Messungen wurde folgendes Messequipment verwendet:

MK 1

- Sound Analyser Norsonic 118, Serie-Nr. 31684
- Vorverstärker Norsonic 1201 (Serie-Nr. 26140), Mikrofonkapsel Norsonic 1220 (Serie-Nr. 26080)

MK 2

- Sound Analyser Norsonic 140, Serie-Nr. 1404537
- Vorverstärker Norsonic 1209 (Serie-Nr. 13861), Mikrofonkapsel Norsonic 1225 (Serie-Nr. 128788)

MK3

- Sound Analyser Norsonic 140, Serie-Nr. 1404615
- Vorverstärker Norsonic 1209 (Serie-Nr. 14142), Mikrofonkapsel Norsonic 1225 (Serie-Nr. 142595)

Sämtliches bei den Messungen verwendete Equipment ist amtlich geprüft. Die Messgeräte wurden vor und nach den Messungen akustisch kalibriert (akustischer Kalibrator Norsonic 1251, Serie-Nr. 31046).

4.3. Messdaten

Die Messungen erfolgten jeweils in der Zeitperiode ab ca. 01.00 – 04.00 Uhr an folgenden Daten:

Zürich: 13.10.2013
18.10.2013

Bern: 30.10.2013
31.10.2013

Basel: 11.12.2013

4.4. Messunsicherheiten

4.4.1. Definitionen

Zur Bewertung aller Einflussgrössen auf eine Messung, stehen zwei Kategorien von Methoden zur Verfügung, die auch kombiniert werden können:

- **Typ A** Berechnung der Messunsicherheit durch statistische (z. Bsp. Standardabweichung) Analyse der Messungen
- **Typ B** Berechnung der Messunsicherheit mit anderen Mitteln als der statistischen Analyse (z. Bsp. Gerätetoleranzen, Erfahrungswerte, Vergleichswerte)

Typ A: Standardabweichung

Am gebräuchlichsten ist eine Angabe der Messunsicherheit als Standardabweichung:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1)$$

Typ B: Nicht statistische Informationen

Unsicherheiten von Typ B sind alle die nicht mit statistischen Methoden ermittelt werden. Dies wichtigsten, im Rahmen der vorliegenden Messkampagne, ermittelten Unsicherheiten sind:

- Toleranzen des Messgerätes und der Kalibration
- Unsicherheiten bzgl. Geschwindigkeit
- Unsicherheiten bzgl. Messdistanz (Distanz Quelle zu Mikrofon)
- Unsicherheiten bzgl. Einfluss Wind

4.4.2. Standardabweichung (Typ A)

Die Messwerte weisen eine Standardabweichung (Streuung der Mittelwerte) von 0.1 – 0.5 dB auf. Ausnahme bildet die Messreihe BVB Combino v = 50 km/h mit einer Abweichung von 0.9 dB. Die etwas grössere Abweichung ist nicht auf einen Ausreisser zurückzuführen, vielmehr ist die Streuung der Messwerte insgesamt grösser.

4.4.3. Nicht statistische Abweichungen (Typ B)

Tabelle 1: Messunsicherheiten Typ B

Art / Einflussgrösse	Annahme	Abweichung [dB]
Toleranzen des Messgerätes und der Kalibration ¹⁾	+/- 0.5 dB	+/- 0.5 dB
Unsicherheiten bzgl. Geschwindigkeit ²⁾	+/- 2km/h	+/- 0.6 dB
Unsicherheiten bzgl. Messdistanz: Distanz Quelle zu Mikrofon ³⁾	+/- 10cm	+/- 0.1 dB
Unsicherheiten bzgl. Wind ⁴⁾	+/- 1m/s	+/- 0.1 dB

Erläuterungen

- ¹⁾ Erfahrungswert (Angabe EMPA)
- ²⁾ Umrechnung gemäss Formel (Kap. 6)
- ³⁾ Abstandsgesetz: Umrechnung mit $10 \cdot \log(D)$
- ⁴⁾ Berechnung nach ISO 9613
Linien-schallquelle mit Schallausbreitungssituation Mitwind versus Gegenwind. Für die meteorologische Korrektur C_{met} werden standardmässig die Korrekturen $K_g=10$ dB für die Gegenwindsituation und $K_m=0$ dB für Mitwindsituation angesetzt (Methode LfU Bayern).

4.4.4. Standardunsicherheit

Aus den gemäss Kap. 4.4.2 und 4.4.3 ermittelten und definierten Abweichungen können die Standardunsicherheiten gemäss GUM [5] wie folgt bestimmt werden:

Standardunsicherheit aus Typ A

$$u_1 = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (2)$$

Standardunsicherheit aus Typ B

$$u_2 \dots u_5 = \frac{s}{\sqrt{3}} \quad (3)$$

Aus den einzeln ermittelten Unsicherheitskomponenten kann die gesamte Messunsicherheit wie folgt bestimmt werden:

$$u = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_i^2} \quad (4)$$

Messunsicherheit

In der (akustischen) Messpraxis geht man normalerweise von einer Messunsicherheit von +/- 2 dB aus. Aufgrund der „laborhaften“ Messanordnung ergibt sich für vorliegende Messkampagne eine **Messunsicherheit von +/- 0.6 dB**.

4.5. Trassetypen

Folgende Trassetypen wurden als relevant betrachtet und messtechnisch erhoben:

Schwarzbelaag Normaufbau BERNMOBIL

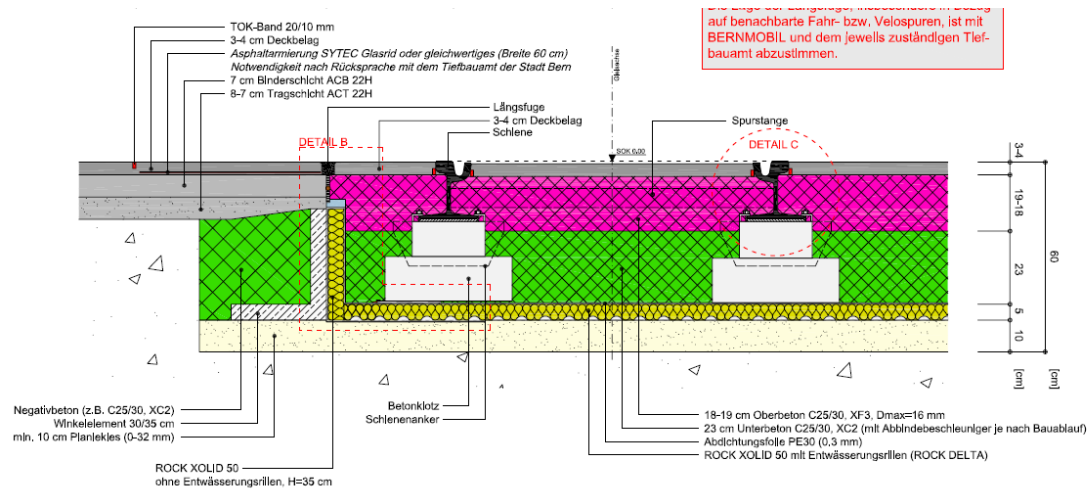


Abb. 2: Schwarzbelaag Normalprofil BERNMOBIL

Schwarzbelaag Normaufbau VBZ

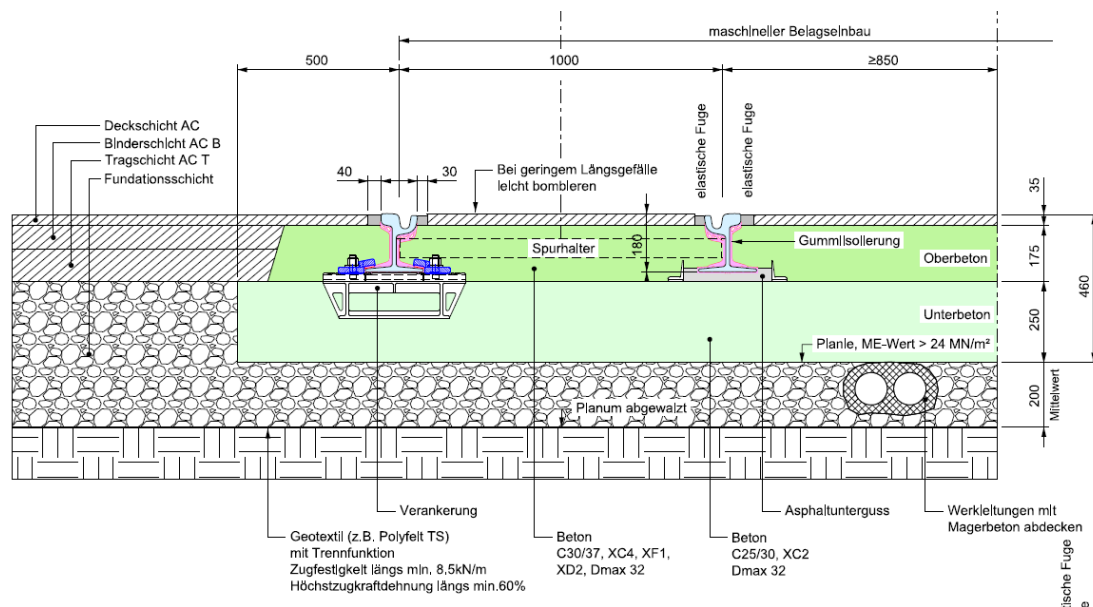


Abb. 3: Schwarzbelaag Normalprofil VBZ

Schwarzbelag Normaufbau BLT

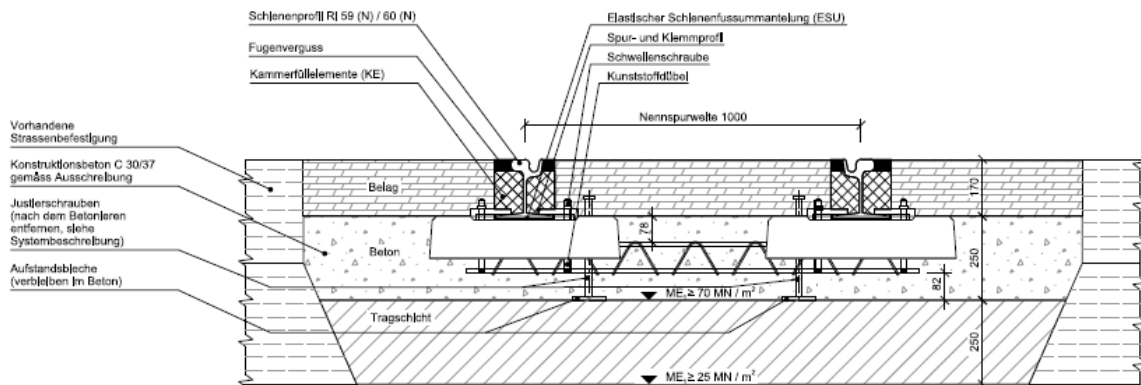


Abb. 4: Schwarzbelag Normalprofil BLT

Rasengitter Normaufbau VBZ

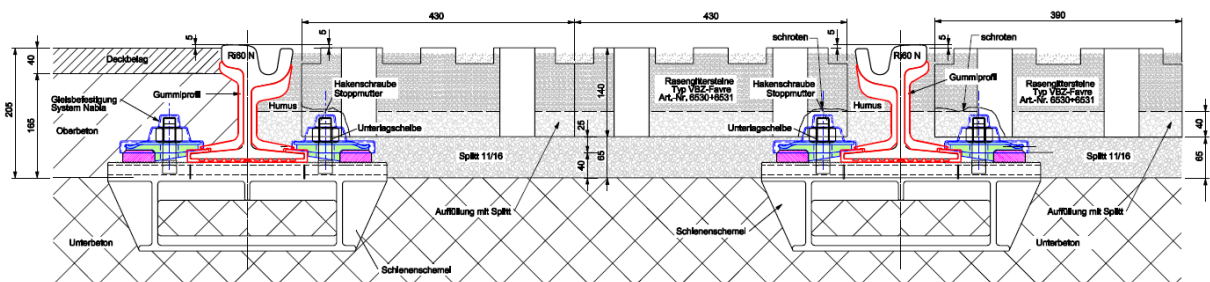


Abb. 5: Rasengitter Normalprofil VBZ

Andere wesentliche Trasseeverhältnisse konnten nicht festgestellt werden, das heisst der Schwarzbelag, repräsentativ für schallharte Bodenbeläge (Beton, Pflästerungen), und Rasen (Rasengitter befahrbar) als teilabsorbierender Bodenbelag. Speziell in Zürich wird letzteres System öfters angetroffen als Rasenmittelstreifen mit Tramverkehr und seitlichen angrenzenden Fahrspuren für den Fahrzeugverkehr.

4.6. Tramtypen

4.6.1. Verkehrsbetriebe Zürich VBZ



Abb. 6: Tram VBZ (Cobra)

Typ: **Cobra**
Länge: ca. 36 m
Anzahl Achsen: 6 (5/6)

4.6.2. BERNMOBIL



Abb. 7: Tram BERNMOBIL (Combino XL)

Typ: **Combino XL**
Länge: ca. 41 m
Anzahl Achsen: 8 (6/8)

4.6.3. Basler Verkehrsbetriebe BVB



Abb. 8: Tram BVB (Combino Be 6/8)

Typ: **Combino Be 6/8**
Länge: ca. 43 m
Anzahl Achsen: 8 (6/8)

4.6.4. Baselland Transport AG BLT



Typ: **Tango**
Länge: ca. 45 m
Anzahl Achsen: 10 (6/10)

Abb. 9: Tram BLT (Tango)

4.7. Messstrecken

Die Messungen wurden auf folgenden Strassenabschnitten¹ durchgeführt:

4.7.1. Messkampagne Zürich



Albisriederstrasse
Abschnitt Hubertus - Albisriederplatz
→ Messungen mit Schwarzbelag

Abb. 10: Messung Albisriederstrasse



Badenerstrasse
Abschnitt Letzigrund - Albisriederplatz
→ Messungen mit Rasengittersteinen

Abb. 11: Messung Badenerstrasse

¹ Messstandorte resp. Messstrecken 2013 nicht identisch mit Messkampagne 2006.



Abb. 12: Messung Uetlibergstrasse

Uetlibergstrasse

Abschnitt Strassenverkehrsamt - Albisgüetli

→ Messungen mit Schwarzbelag und 80% Steigung

4.7.2. Messkampagne Bern



Abb. 13: Messung Schlossstrasse

Schlossstrasse

Abschnitt Loryplatz - Schlossmatte

→ Messungen mit Schwarzbelag



Abb. 14: Messung Loryplatz

Loryplatz

Abschnitt Loryplatz - KV

→ Messungen mit Schwarzbelag in einer Kurve



Abb. 15: Messung Thunstrasse

Thunstrasse

Abschnitt Luisenstrasse - Thunplatz

→ Messungen mit Schwarzbelag und 32‰ Steigung

4.7.3. Messkampagne Basel



Abb. 16: Messung Rosentalstrasse

Rosentalstrasse

Abschnitt Messeplatz - Gewerbeschule

→ Messungen mit Schwarzbelag

4.8. Haltestellen

Im Bereich von Tram- oder Bushaltestellen treten diverse Lärmarten auf. Neben dem eigentlichen Fahrgeräusch des Trams, welches vor der Haltestelle abbremst und danach wieder beschleunigt, gibt es weitere Lärmemissionen infolge Türöffnen- und schliessvorgänge, Ein- und Aussteigen der Personen, Gespräche der Personen sowie häufig ein Warnsignal (Glockenschlag) vor Beginn der Weiterfahrt des Trams.

Im Rahmen der vorliegenden Messkampagne wurden solche Haltvorgänge simuliert d.h. abbremsen, öffnen der Türen, schliessen der Türe und weiterfahrt. Die Simulation eines Haltes erfolgte auf offener Strecke, d.h. es gab keine Hindernisse wie z.B. ein Haltestellenunterstand oder Perronkanten.

5. Messergebnisse

5.1. Rekapitulation Messergebnisse Tramdurchfahrten (2004 und 2010)

Nachfolgend sind die ausgewerteten Messergebnisse aus den Jahren 2004 und 2010, unterschieden nach den Geschwindigkeitsklassen 20, 30 und 40, zusammengestellt. Da die Messungen in Basel im offenen Fenster vorgenommen wurden, sind die Schallexpositionspegel aufgrund der geometrischen Verhältnisse umgerechnet worden. Bei den früheren Messungen handelt es sich jeweils um den Mittelwert aus 3 Tramdurchfahrten nach der in Kap. 4.1 dargestellten Messaufstellung.

Tabelle 2: Messergebnisse der Messungen 2004 und 2010

Betreiber	Tramtyp	Fahrbahn	G.-Klasse 20			G.-Klasse 30		G.-Klasse 40		
			LE,r [dBA]	LE,l [dBA]	Lqr [dBA]	LE [dBA]	Lqr [dBA]	LE,r [dBA]	LE,l [dBA]	Lqr [dBA]
VBZ	Mirage	Asphalt	83.9	83.8	57.1	-	-	90.9	91.5	64.4
		Rasengitter	78.5	77.6	51.2	-	-	86.5	85.2	59.1
	Tram 2000	Asphalt	81.0	81.9	54.7	-	-	90.1	90.9	63.7
		Rasengitter	76.4	74.5	48.6	-	-	85.3	83.9	57.8
	Cobra	Asphalt	75.1	75.9	48.7	-	-	82.0	83.0	55.7
		Rasengitter	72.2	71.7	45.2	-	-	80.5	77.2	52.0
BERN-MOBIL	Be 8/8 o. Anh.	Asphalt	80.5	81.9	54.4	-	-	86.0	88.9	60.7
	Be 8/8 m. Anh.	Asphalt	82.5	81.2	55.1	-	-	88.1	86.6	60.5
	Niederflur	Asphalt	78.7	79.3	52.2	-	-	84.3	85.9	58.3
	Combino	Asphalt	78.1	79.3	52.1	-	-	83.7	85.2	57.7
RBS	Be 4/8 2-Ge-lenktr.wagen	Asphalt	83.8	85.0	57.6	-	-	90.2	91.9	64.2
Energetisches Mittel aller Quellenwerte Asphalt					54.7	← 6.9 →			61.6	
Energetisches Mittel aller Quellenwerte Rasengitter					49.0	← 8.2 →			57.2	
Differenz Asphalt – Rasengitter					5.7				4.4	
BVB	Be 4/4	Asphalt	83.3		56.5	86.3	59.5	-	-	-
	Be 4/6	Asphalt	83.8		57.1	86.8	60.0	-	-	-
	Be 6/8	Asphalt	82.9		56.1	86.5	59.8	-	-	-
BLT	Be 4/8 ²	Asphalt	85.2		58.4	86.1	59.3	-	-	-
Energetisches Mittel aller Quellenwerte Messungen 2010					57.1	←2.6→	59.7			

Legende:

LE rechts/links: Schallexpositionspegel in dBA rechts und links des Trams in 7.50 m Abstand.
Mittelwertangabe aus 3 Durchfahrten.

Lqr: Quellenwert in dBA einer Tramdurchfahrt pro Stunde in 1.0 m Abstand.
Mittelwertangabe aus 3 Durchfahrten.

² Da das Tango-Tram nur 2 Mal erfasst wurde, sind die Messwerte beim Tramtyp Be 4/8 mit eingeflossen.

5.2. Messergebnisse Messungen 2013

5.2.1. Umrechnungen und Bestimmung Quellenwert

Im Allgemeinen wurden beim obigen Messvorgang pro Messort, Geschwindigkeit und Tramtyp mindestens 9 Messungen registriert. Systematisch wurden die Messungen mit den höchsten und den tiefsten LE nicht berücksichtigt und aus den mittleren 7 Messungen das energetische Mittel des LE in dBA und jedes Terzbandes zwischen 6.3 Hz und 20 kHz gebildet (= charakteristische Messung).

$$LE = 10 \log \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{LE_i/10} \quad (5)$$

Anhand der Messzeiten der Einzeldurchfahrt wurden die gemittelten Schallexpositionspiegel (LE) in einen energieäquivalenten Dauerschallpegel umgerechnet:

$$Lq = LE - 10 \log(T) \quad (6)$$

und anschliessend ein stundenbezogener energieäquivalenter Dauerschallpegel gebildet:

$$Lqh = Lq + 10 \log\left(\frac{T}{3600}\right) \quad (7)$$

Daraus folgt schlussendlich der sogenannte Quellenwert für d = 1.0m (eine Tramdurchfahrt pro Stunde in 1m Abstand) mit:

$$Lqr = Lqh + 10 \log(7.5) \quad (8)$$

5.2.2. Messergebnisse Horizontale Fahrt

Nachfolgend sind die ausgewerteten Messergebnisse aus den Messungen 2013 und die daraus berechneten Quellenwerte, auf 1.0 m Distanz umgerechnet, aufgeführt. Es wurden in den Geschwindigkeitsklassen 20, 35 und 50 km/h gemessen. Das Cobra in Zürich hat eine stufenweise Geschwindigkeitsregelung, die nur alle 6 km/h festgestellt werden kann. Darum wurden dort die Geschwindigkeiten 18, 36 und 48 km/h gemessen.

Tabelle 3: Messergebnisse der Durchfahrtmessungen 2013 (ohne Steigung):

Betreiber	Tramtyp	Fahrbahn	Steigung	v = 18 - 20 km/h		v = 35 - 36 km/h		v = 48 - 50 km/h	
				LE rechts 7.5 m	Lqr 1.0 m	LE rechts 7.5 m	Lqr 1.0 m	LE rechts 7.5 m	Lqr 1.0 m
VBZ	Cobra Be 5/6	Asphalt	0	74.5	47.7	81.0	54.2	83.6	56.8
		Rasengitter	0	71.9	45.1	77.6	50.8	78.9	52.1
BERNMOBIL	Combino XL 6/8	Asphalt	0	75.1	48.3	79.8	53.0	84.0	57.2
BVB	Combino 6/8	Asphalt	0	74.2	47.4	79.7	52.9	85.4	58.6
BLT	Tango 8/10	Asphalt	0	76.6	49.8	80.9	54.1	85.4	58.6

Legende:

LE rechts: Schallexpositionspiegel in dBA rechts (Türseite) des Trams in 7.50 m Abstand (energetisches Mittel aus 7 Einzelmessungen).

Lqr: Aus dem LE umgerechneter Quellenwert in dBA einer Tramdurchfahrt pro Stunde in 1.0 m Abstand.

Kommentar / Beurteilung

Basierend auf den durchgeführten Messungen resultieren folgende wesentliche Ergebnisse:

- Trams der neusten Generation sind im Vergleich zu den älteren Trams deutlich leiser: Pegeldifferenzen von bis zu 10 dBA beim Verkehrsregime 20 km/h
- Die Geschwindigkeitszunahme von 20 km/h auf 50 km/h ergibt eine markante Pegelzunahme von 7 - 11 dBA.
- Die Trasseebeschaffenheit spielt eine wesentliche Rolle. Rasengittersteine reduzieren die Lärmimmissionen um ca. 3-4 dBA.
- Die Differenz beim Mittelungspegel L_{eq} der 4 Tramzüge der neusten Generation beträgt je nach Geschwindigkeitsregime 1.8 bis 2.4 dBA.

5.2.3. Messergebnisse Steigung / Gefälle

Tabelle 4: Messergebnisse der Durchfahrtmessungen 2013 (mit Steigung):

Betreiber	Tramtyp	Fahrbahn	Steigung	v = 18 - 20 km/h		v = 35 - 36 km/h		v = 48 - 50 km/h	
				LE rechts 7.5 m	Lqr 1.0 m	LE rechts 7.5 m	Lqr 1.0 m	LE rechts 7.5 m	Lqr 1.0 m
VBZ	Cobra Be 5/6	Asphalt	+8%	75.2	48.4	83.4	56.6	86.3	59.5
		Asphalt	-8%	75.2	48.4	(76.7)*		(79.5)**	
BERNMOBIL	Combino XL 6/8	Asphalt	+3.2	75.9	49.1	78.4	51.6	83.1	56.3
		Asphalt	-3.2	75.2	48.4	78.8	52.0	--	

* v = 25 km/h

** v = 30 km/h

Legende:

LE rechts: Schallexpositionspiegel in dBA rechts (Türseite) des Trams in 7.50 m Abstand (energetisches Mittel aus 7 Einzelmessungen).

Lqr: Aus dem LE umgerechneter Quellenwert in dBA einer Tramdurchfahrt pro Stunde in 1.0 m Abstand.

Bemerkungen:

Bei den Talfahrten gibt es für jeden Streckenabschnitt eine sicherheitstechnisch bedingte Höchstgeschwindigkeit. Bei den Messungen wurde diese selbstverständlich respektiert. Deshalb wurden in diesen Fällen andere Geschwindigkeiten gewählt und die Angaben für höhere Geschwindigkeiten fehlen.

Kommentar / Beurteilung

Basierend auf den durchgeführten Messungen resultieren folgende wesentliche Ergebnisse:

- Bei den Messungen mit Gefälle / Steigung von 3% ergaben sich keine signifikanten Unterschiede beim Mittelungspegel L_{eq} im Vergleich einer horizontalen Strecke.
- Bei den Messungen mit Gefälle / Steigung von 8% ergaben sich in der Steigung Pegelzunahmen von 0.7 dBA (v = 18 km/h) bis 2.7 dBA (v = 48 km/h).

5.2.4. Messergebnisse Haltestellen

Die Simulation eines Haltes erfolgte auf offener Strecke, d.h. es gab keine Hindernisse wie z.B. ein Haltestellenunterstand oder Perronkanten.

Vorgang Haltestelle: Abbremsen, Anhalten, alle Türen öffnen und schliessen und Weiterfahrt

Tabelle 5: Messergebnisse der Messungen von simulierten Haltestellen 2013.

Betreiber	Tramtyp	Fahrbahn	Steigung	Haltestelle		Durchfahrt	
				LE rechts 7.5 m	Lqr 1.0 m	Lqr 1.0 m [20km/h]	Lqr 1.0 m [35km/h]
VBZ	Cobra Be 5/6	Asphalt	0	78.1	51.3	47.7	54.2
		Rasengitter	0	75.1	48.3	45.1	50.8
		Asphalt	+8%	80.2	53.4	48.4	56.6
		Asphalt	-8%	75.6	48.8	--	--
BERNMOBIL	Combino XL 6/8	Asphalt	0	77.9	51.1	48.3	53.0
		Asphalt	+3.1	78.6	51.8	49.1	51.6
		Asphalt	-3.1	78.3	51.5	48.4	52.0
BVB	Combino 6/8	Asphalt	0	77.1	50.3	47.4	52.9
BLT	Tango 8/10	Asphalt	0	78.9	52.1	49.8	54.1

Legende:

LE rechts: Schallexpositionspegel in dBA rechts (Türseite) des Trams in 7.50 m Abstand (energetisches Mittel aus 7 Einzelmessungen).

Lqr: Aus dem LE umgerechneter Quellenwert in dBA einer Tramdurchfahrt pro Stunde in 1.0 m Abstand.

Kommentar / Beurteilung

Basierend auf den durchgeführten Messungen resultieren folgende wesentliche Ergebnisse:

- Die Messungen eines Haltevorgangs zeigen in etwa einen Mittelungspegel L_{eq} der einem äquivalenten Mittelungspegel einer Durchfahrt zwischen 20 km/h und 35 km/h entspricht.
- Beim Vergleich derselben Tramtypen auf einem horizontalen und einem steigenden Trasse zeigen sich bei Haltestellen nur geringe Pegelunterschiede.

5.2.5. Messergebnis Kurve

Tabelle 6: Messergebnisse der Durchfahrtmessungen 2013 (Kurve):

Betreiber	Tramtyp	Fahrbahn	Radius	v = 18 - 20 km/h		v = 35 - 36 km/h		v = 48 - 50 km/h	
				LE rechts 7.5 m	Lqr 1.0 m	LE rechts 7.5 m	Lqr 1.0 m	LE rechts 7.5 m	Lqr 1.0 m
BERNMOBIL	Combino XL 6/8	Asphalt Kurve	ca. 40m	84.6	57.8	(87.8)*		--	

* v = 25 km/h

Legende:

LE rechts: Schallexpositionspiegel in dBA rechts (Türseite) des Trams in 7.50 m Abstand (energetisches Mittel aus 7 Einzelmessungen).

Lqr: Aus dem LE umgerechneter Quellenwert in dBA einer Tramdurchfahrt pro Stunde in 1.0 m Abstand.

Bemerkungen:

- Bei Kurvenfahrten gibt es für jeden Streckenabschnitt eine sicherheitstechnisch bedingte Höchstgeschwindigkeit. Bei den Messungen wurde diese selbstverständlich respektiert. Deshalb wurden in diesem Fall andere Geschwindigkeiten gewählt und die Angaben für höhere Geschwindigkeiten fehlen.
- Die Emissionen in Kurven sind stark von der Witterung abhängig. Nasse Fahrbahn / Schienen führen zu tendenziell höheren Emissionen

Kommentar / Beurteilung

Basierend auf den durchgeführten Messungen resultieren folgende wesentliche Ergebnisse:

- Die Messungen zeigen einen markant höheren Mittelungspegel in der Kurve, im Vergleich zu einer geraden Streckenführung.

5.3. Spektrale Betrachtung der Tramdurchfahrten (2013)

Nachfolgend sind die charakteristischen Durchfahrten³ der unterschiedlichen Tramzüge und Trassen hinsichtlich ihrer spektralen Zusammensetzung dargestellt und beurteilt.

5.3.1. Horizontale Fahrt

Trams der neusten Generation [v=35/36km/h] auf Asphalt

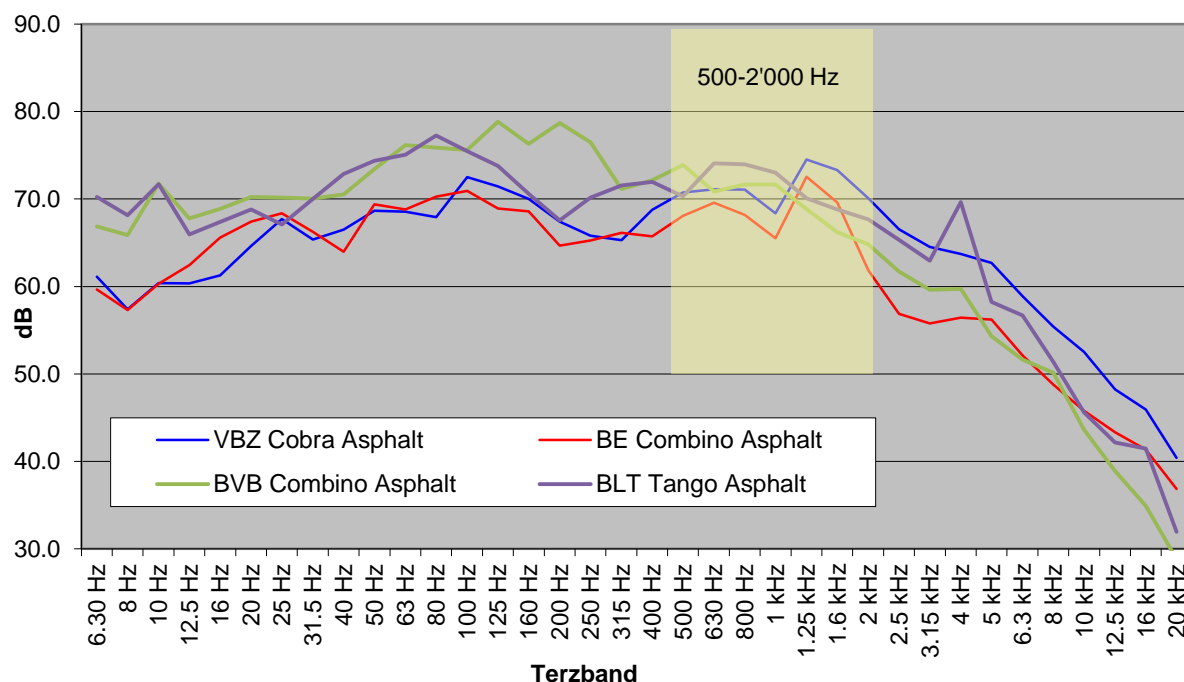


Abb. 17: Vergleich Terzband der 4 Trams der neusten Generation bei 35 km/h auf Asphalt

Kommentar / Beurteilung

Basierend auf der spektralen Auswertung der Messungen resultieren folgende wesentliche Ergebnisse:

- Der spektrale Verlauf der 4 Tramzüge ist ähnlich.
- Die grösste Differenz beim Mittelungspegel Leq der 4 Tramzüge beträgt bei 35 resp. 36km/h lediglich 1.3 dBA. Dies liegt daran, dass die Kurven im Bereich 500 – 2'000 Hz nahe beieinander liegen. Die 4 Tramzüge können daher alle als etwa gleich laut eingestuft werden.

³ Charakteristische Durchfahrt = Energetisches Mittel der 7 ausgewerteten Messungen.

5.3.2. Rasengitter

Vergleich Asphalt / Rasengitter Cobra [$v=36\text{km/h}$]

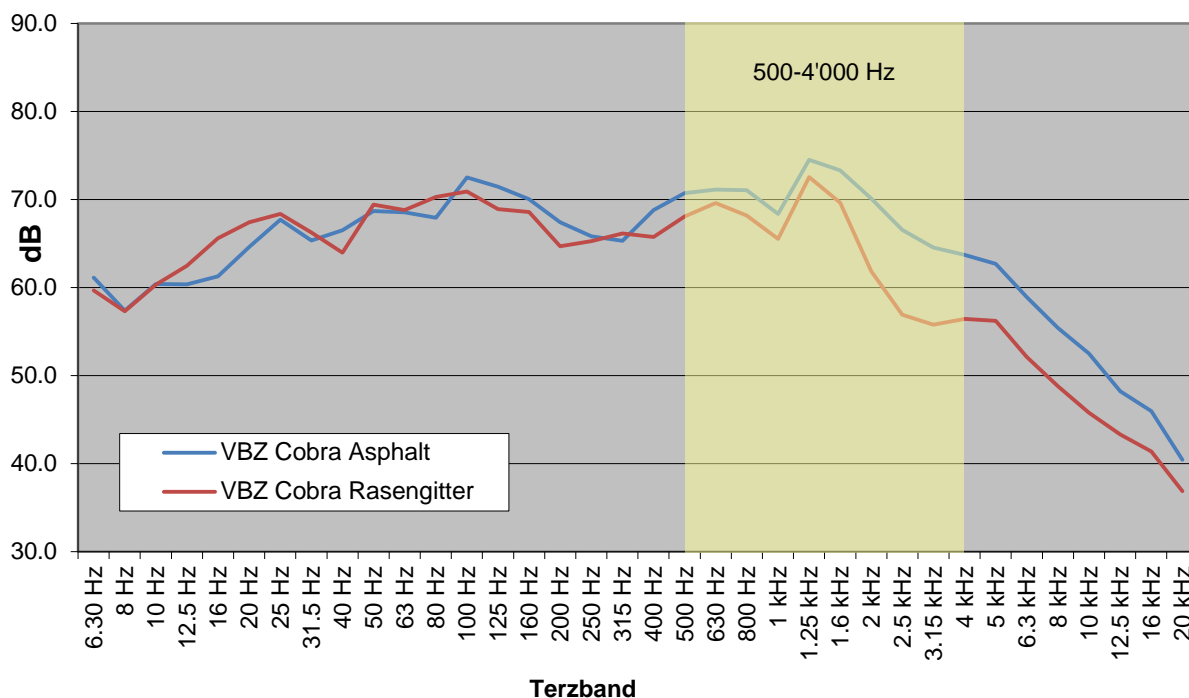


Abb. 18: Terzband gleicher Tramzug (Cobra) einmal auf Asphalt und einmal auf Rasengitter $v = 36\text{ km/h}$

Kommentar / Beurteilung

Basierend auf der spektralen Auswertung der Messungen resultieren folgende wesentliche Ergebnisse:

- Der spektrale Verlauf desselben Tramzuges auf Asphalt und auf Rasengitter hat gewisse Ähnlichkeiten. Die Maxima bewegen sich auch hier im Bereich von 1'000 Hz und von 1.25 kHz.
- Auffallend ist, dass das Tram auf Rasengitter im tieffrequenten Bereich bis ca. 500 Hz in etwa gleich verläuft. Jedoch im akustischen und für das menschliche Ohr relevanten Bereich (500 Hz – 4 kHz) erzielt hingegen das Rasengitter-Trasse eine deutliche Verbesserung von durchschnittlich 3-4 dB.

5.3.3. Steigung

Vergleich Horizontal / Steigung Cobra [$v=36\text{km/h}$] $i = 80 \text{ ‰}$

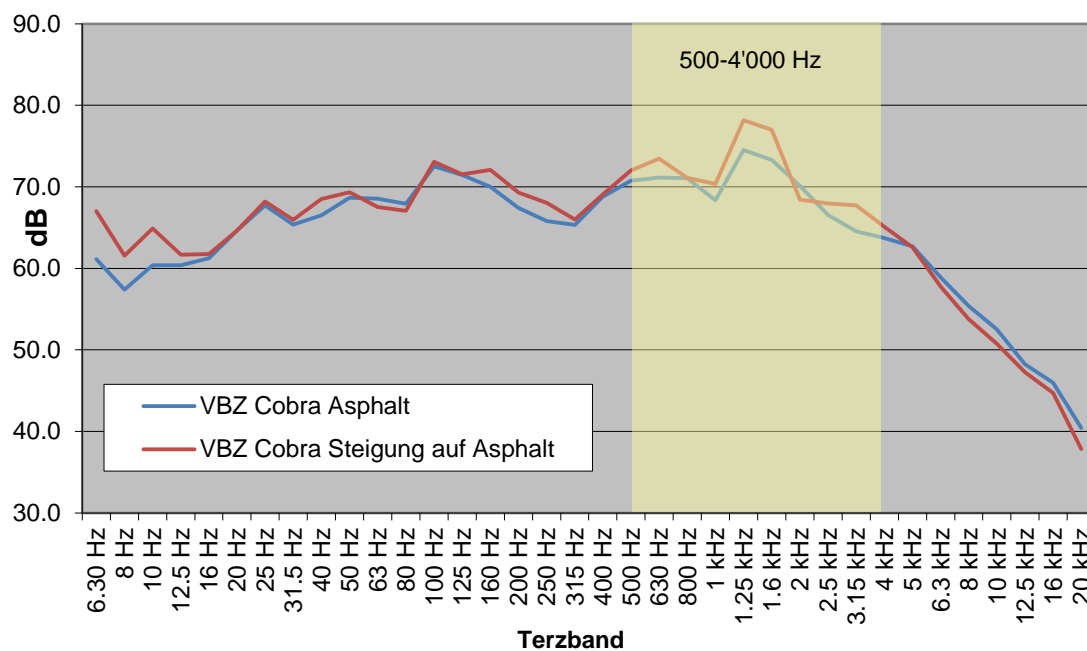


Abb. 19: Terzband-Vergleich VBZ Cobra auf horizontalem Trasse und in der Steigung von 80 ‰

Vergleich Horizontal / Steigung Combino [$v=35\text{km/h}$] $i = 32 \text{ ‰}$

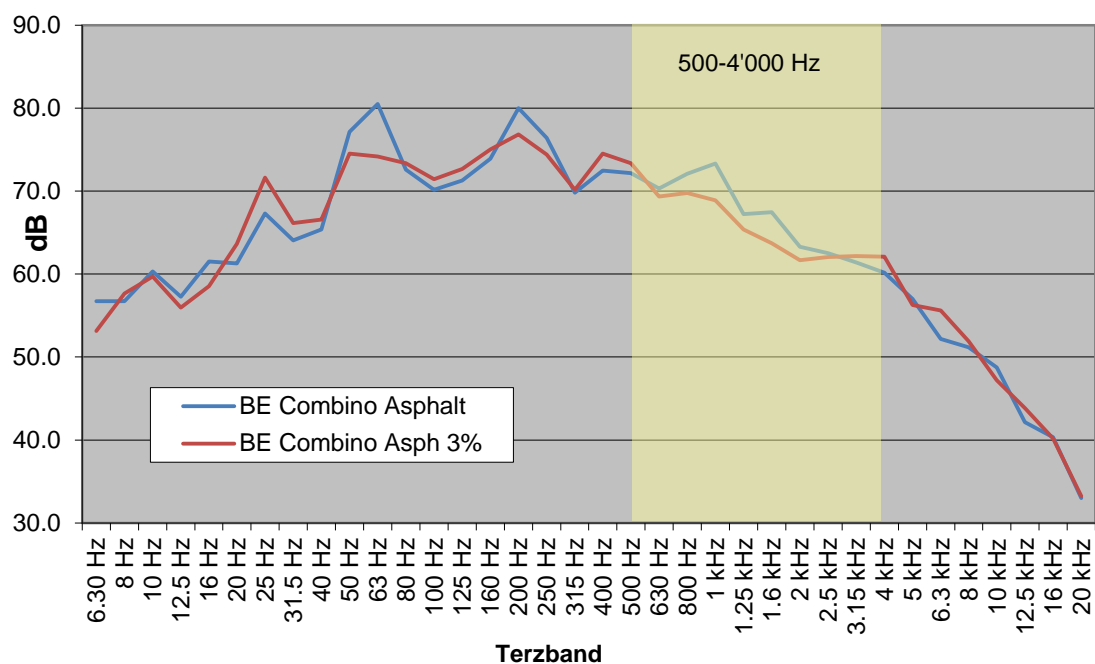


Abb. 20: Terzband-Vergleich Combino auf horizontalem Trasse und in der Steigung von 32 ‰

Kommentar / Beurteilung

Basierend auf der spektralen Auswertung der Messungen resultieren folgende wesentliche Ergebnisse:

- Beim Cobra wurde an der Steigung von 80 ‰ ($v = 35 \text{ km/h}$) eine Quellenwertzunahme von 2.4 dBA festgestellt. Die Frequenzkurven decken sich aber fast und nur im Bereich der für die A-Bewertung massgebenden Frequenzen von 500 – 4 kHz sind die Pegel in der Steigung leicht höher als auf dem horizontalen Trasse.
- Beim Combino sind keine signifikanten Unterschiede festzustellen. Die gemittelten Pegel ergeben sogar ein um ca. 1.4 dBA tieferer Quellenwert bei der Steigung von 32 ‰ als auf dem horizontalen Trasse.

5.4. Spektrale Betrachtung bei Tramhaltestellen (2013)

Im Rahmen der Messungen 2013 wurde für jeden Tramzug und Trasse auch eine Haltestelle resp. Haltevorgang simuliert. Diese bestand aus der Anfahrt, Abbremsen, Anhalten, alle Türen öffnen und nach ca. 5 sec. wieder schliessen und Anfahren und Weiterfahrt. Das Tram hielt so an, dass sich das mittlere der 3 Aufnahmemikrofone genau in der Mitte des Tramzuges während seiner Standphase befand.

Die simulierten Haltestellen befanden sich so auf einer hindernisfreien Strecke. Es ergaben sich somit keine Dämpfungen durch Objekte wie z.B. Tramhaltunterstände oder Perronabsätze.

Nachfolgend sind charakteristische Aufzeichnungen dieser Haltestellensimulationen der unterschiedlichen Tramzüge und Trassen hinsichtlich ihrer spektralen Zusammensetzung dargestellt und beurteilt.

Trams der neusten Generation auf Asphalt bei Haltestellen

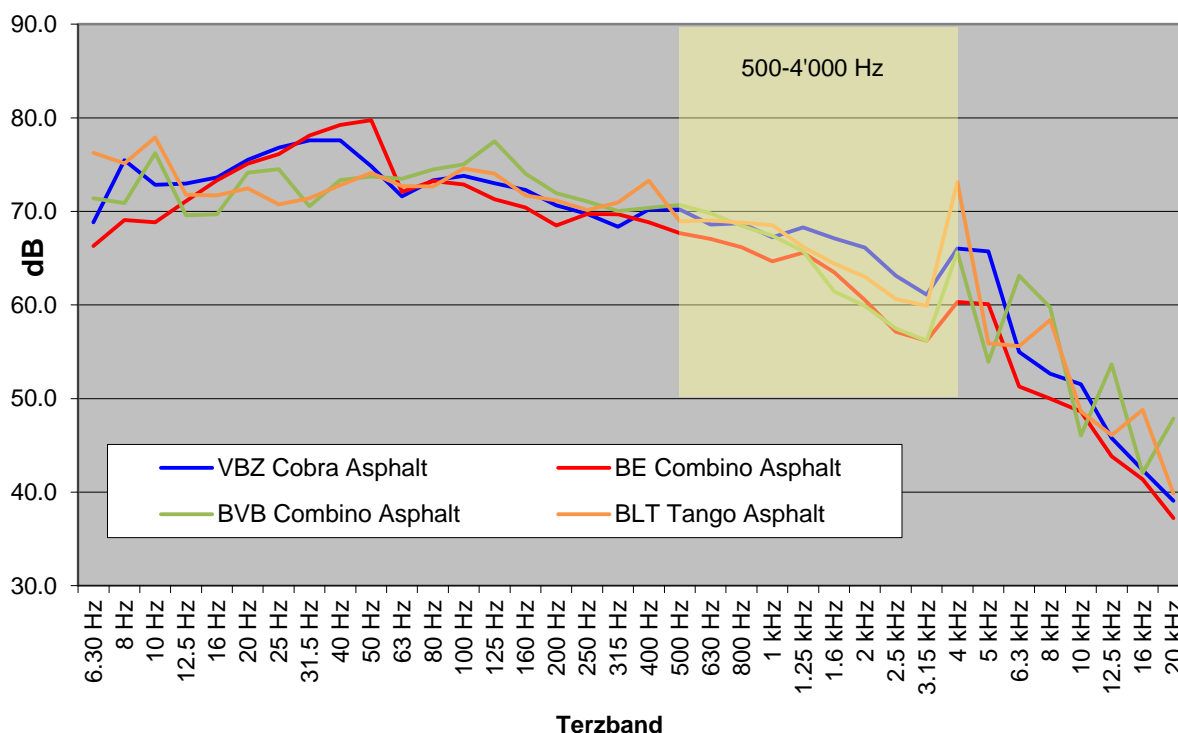


Abb. 21: Terzband der 4 Trams der neusten Generation im Vergleich an der Haltestelle

Kommentar / Beurteilung

Basierend auf der spektralen Auswertung der Messungen resultieren folgende wesentliche Ergebnisse:

- Der spektrale Verlauf der 4 Tramzüge ist ähnlich, mit den Maxima im Bereich von 50 Hz - 100 Hz.
- Die grösste Differenz beim Mittelungspegel L_{eq} der 4 Tramzüge beträgt bei 35 km/h lediglich 1.3 dBA. Dies bedeutet, dass die 4 Tramzüge, in Bezug auf den Haltevorgang, alle als etwa gleich laut eingestuft werden können.

5.5. Zusammenfassung der Ergebnisse aus den Messungen

Basierend auf den durchgeführten Messungen resultieren folgende wesentliche Ergebnisse:

- Trams der neusten Generation sind im Vergleich zu den älteren Trams deutlich leiser: Pegeldifferenzen von bis zu 10 dBA beim Verkehrsregime 20 km/h.
- Die Geschwindigkeitszunahme von 20 km/h auf 50 km/h ergibt eine markante Pegelzunahme von 7 bis 11 dBA.
- Die Trasseebeschaffenheit spielt eine wesentliche Rolle. Rasengittersteine reduzieren die Lärmimmissionen um etwa 3-4 dBA.
- Die Differenz beim Mittelungspegel L_{eq} der 4 Tramzüge der neusten Generation beträgt je nach Geschwindigkeitsregime 1.8 bis 2.4 dBA
- Bei den Messungen in der Steigung / Gefälle $i = 3\%$ ergaben sich keine signifikanten Unterschiede beim Mittelungspegel L_{eq} im Vergleich einer horizontalen Strecke.
- Bei den Messungen in der Steigung / Gefälle $i = 8\%$ ergaben sich in der Steigung Pegelzunahmen von 0.7 dBA ($v = 20$ km/h) bis 2.7 dBA ($v = 40$ km/h).
- Die Messungen eines Haltevorgangs zeigen in etwa einen Mittelungspegel L_{eq} der zwischen demjenigen einer Durchfahrt mit 20 km/h und 35 km/h liegt.

Schlussfolgerungen

Die Bautechnik und Konstruktion von Tramzügen hat in Bezug auf die Lärmentwicklung wesentliche Fortschritte erzielt. So beträgt die Differenz vom leisesten zum lautesten Tramzug in etwa 10 dB, und dies wird vom Menschen als grosser Unterschied wahrgenommen, subjektiv entspricht eine solche Differenz nahezu einer Halbierung oder Verdoppelung der Lautstärke. Gründe für die Pegelminderung dürften in der tiefgezogenen Carosserie und Verschalung der Räder, aber auch in der Bremstechnik sowie der Lagerung und Reduktion der Anzahl Achsen zu suchen sein.

Die Pegelminderungen betragen mit einem Trassee aus Rasengittersteinen weitere ca. 3-4 dBA, was ebenfalls einer wahrnehmbaren Pegelveränderung entspricht.

6. Auswertung der Messresultate

6.1. Tramdurchfahrten

6.1.1. Schalldruckpegel einer Tramdurchfahrt pro Stunde in 1m Abstand

Basierend auf den Messergebnissen für die verschiedenen Geschwindigkeitsregimes, ergeben sich die nachfolgend dargestellten Trendlinien.

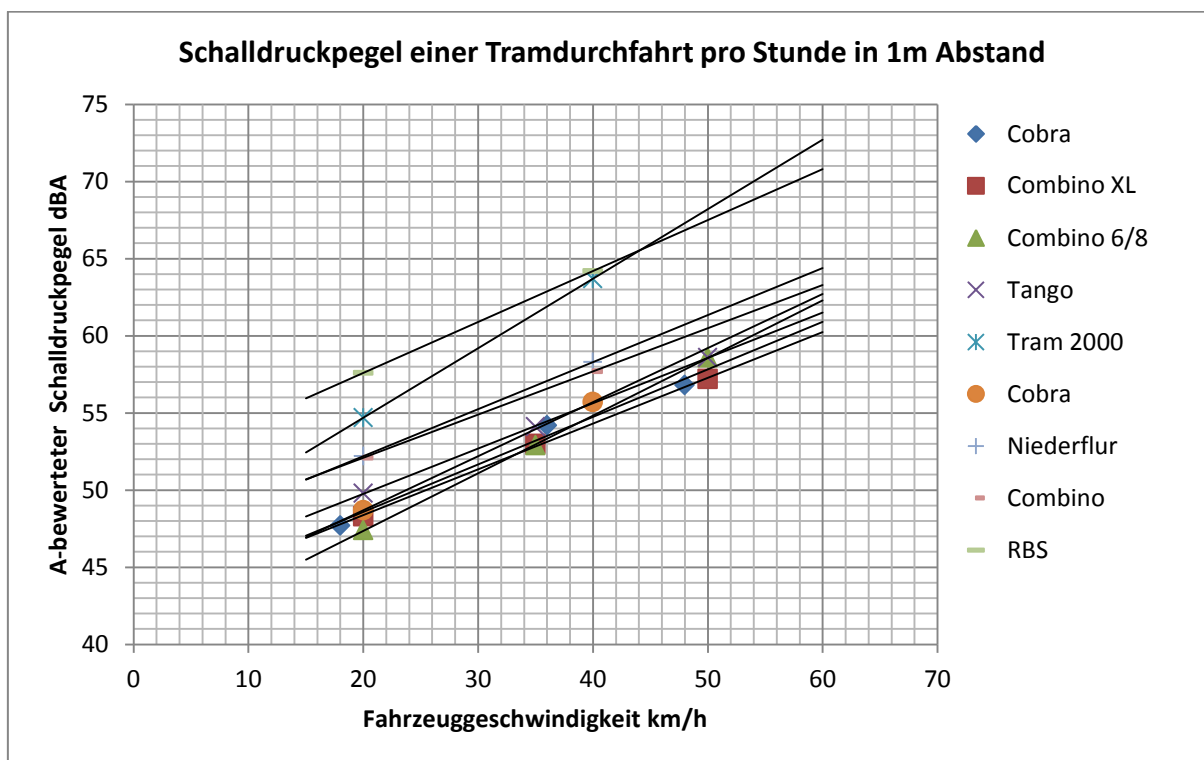


Abb. 22: Schalldruckpegel einer Tramdurchfahrt pro Stunde in 1m Abstand

Die gemäss Abb. 22 resultierenden Trendlinien können wie folgt ausgedrückt werden:

Tabelle 7: Trendlinien Schalldruckpegel in Abhängigkeit Geschwindigkeit

Messungen 2013		Messungen 2004	
Tramtyp	Trendlinie	Tramtyp	Trendlinie
Cobra	$L_{qr} = 0.308 * (v) + 42.4$	Tram 2000	$L_{qr} = 0.450 * (v) + 45.7$
Combino XL	$L_{qr} = 0.297 * (v) + 42.5$	Cobra	$L_{qr} = 0.350 * (v) + 41.7$
Combino 6/8	$L_{qr} = 0.373 * (v) + 39.9$	Niederflur	$L_{qr} = 0.305 * (v) + 46.1$
Tango	$L_{qr} = 0.293 * (v) + 43.9$	Combino	$L_{qr} = 0.280 * (v) + 46.5$
Cobra Rasen	$L_{qr} = 0.240 * (v) + 41.2$	Cobra Rasen	$L_{qr} = 0.340 * (v) + 38.4$
		Tram 2000 Rasen	$L_{qr} = 0.460 * (v) + 39.4$

6.1.2. Emissionsansatz (Asphalt)

Die Trendlinien zeigen, mit Ausnahme des Tramtyps Tram 2000 (Messungen 2004), in der Tendenz eine ähnliche lineare Zunahme des Schalldruckpegels mit steigender Geschwindigkeit.

Ohne Berücksichtigung des Tramtyps Tram 2000 ergibt sich:

$$L_{qr} = (0.24 \dots 0.37) \cdot v \text{ [km/h]} + A \text{ [dBA]}$$

wobei A eine Tramtyp-abhängige Konstante ist. Für den Tramtyp Tram 2000 ergibt sich:

$$L_{qr} = (0.45 \dots 0.46) \cdot v \text{ [km/h]} + A \text{ [dBA]}$$

Um den Schalldruckpegel in Abhängigkeit der Geschwindigkeit und des Tramtyps mit einem einfachen einheitlichen Modellansatz abzubilden, wird eine zweite Tramtyp-abhängige Konstante eingeführt:

$$L_{qr} = (0.3 \cdot A_1) \cdot v \text{ [km/h]} + A_2 \text{ [dBA]}$$

Basierend auf den oben formulierten Trendlinien ergeben sich für die verschiedenen Tramtypen die folgenden Parameter:

Tabelle 8: Parameter A_1 und A_2

Tramtyp	A_1	A_2
Cobra	1.0	43
Combino XL	1.0	42
Combino 6/8	1.0	42
Tango	1.0	44
Niederflur	1.0	46
Combino	1.0	46
Tram 2000	1.5	46
Mischverkehr*	1.0	44

* Einzusetzende Parameter wenn der Trammix nicht bekannt ist

6.1.3. Vergleich Messung / Berechnung

Im A-bewerteten Schalldruckpegel ergeben sich als Differenz Berechnung - Messung die in Tabelle 9 gezeigten Werte [dBA]. Diese liegen nach dem in Kapitel 6.1.2 formulierten Emissionsansatz innerhalb eines Intervalls von +/- 1 dBA (mit Ausnahme Combino 6/8 bei Geschwindigkeit 3) bezogen auf den Messwert.

Tabelle 9: Vergleich Messung / Berechnung

Tramtyp	Geschw. 1 [dBA]	Geschw. 2 [dBA]	Geschw. 3 [dBA]
Cobra (2013)	0.7	-0.4	0.6
Cobra (2006)	0.3	-0.7	--
Combino XL	-0.3	-0.5	-1.6
Combino 6/8	0.6	-0.4	0.4
Tango	0.2	0.4	0.4
Niederflur	-0.2	-0.3	--
Combino	-0.1	0.3	--
Tram 2000	0.3	0.3	--

6.1.4. Emissionsansatz (Rasengitter)

Vergleicht man den gleichen Tramzug einmal auf fester Fahrbahn und einmal auf Rasengitter, zeigen sich bei den Vorbeifahrten auf einem Rasengittertrassee deutlich tiefere Pegel.

Im A-bewerteten Schalldruckpegel ergeben sich als Differenz Rasengitter - Asphalt die in Tabelle 10 gezeigten Differenzen.

Tabelle 10: Differenzen Rasengitter - Asphalt

Tramtyp	v = 18 – 20 km/h [dBA]	v = 36 km/h [dBA]	v = 40 km/h [dBA]	v = 48 km/h [dBA]
Tram 2000	-6.1	--	-5.9	--
Cobra (2006)	-3.5	--	-3.7	--
Cobra (2013)	-2.6	-3.4	--	-4.7
Mirage*	-5.9	--	-5.3	--

* nicht mehr im Einsatz

Die Messreihe 2014 (Cobra) zeigt eine leichte geschwindigkeitsabhängige Komponente. Alle anderen Messreihen zeigen eine generelle geschwindigkeitsunabhängige tiefere Emission.

Beim Typ Cobra beträgt die Reduktion gegenüber einer harten Fahrbahn ca. 3 dBA. Beim Tramtyp Mirage und Tram 2000 sogar ca. 6 dBA.

Erwähnenswert ist, dass die beiden Tramtypen Mirage und Tram 2000 jedoch generell ca. 3 - 5 dBA lauter sind als alle anderen Tramtypen. Da der Typ Mirage heute nicht mehr in Betrieb ist und mangels gesicherten Grundlagendaten wird vorgeschlagen, für den **Trasseotyp Rasengitter** einen Tramtyp unabhängigen Korrektur von -3 dBA einzusetzen:

$$L_{qr} = (0.3 * A_1) * v \text{ [km/h]} + A_2 - 3 \text{ [dBA]}$$

6.2. Haltestellen

6.2.1. Ausgangslage

In Kap. 5.2.4 wurde festgestellt, dass der Mittelungspegel eines Haltevorganges in etwa demjenigen einer ungestörten Durchfahrt im Geschwindigkeitsbereich zwischen 20 km/h und 35 km/h entspricht.

6.2.2. Emissionsansatz

Setzt man in den im Kapitel 6.1.2 ermittelten Emissionsansatz $v = 30 \text{ km/h}$ ein, ergeben sich die in Tabelle 11 ersichtlichen Differenzen Berechnung - Messung. Diese liegen innerhalb eines Intervalls von +/- 1 dBA bezogen auf den Messwert.

$$L_{qr} = (0.3 * A_1) * 30 + A_2 \text{ [dBA]}$$

Tabelle 11: Differenzen Messung / Berechnung

Tramtyp	Messung Lqr [dBA]	Berechnung Lqr [dBA]	Differenz Lqr [dBA]
Cobra	51.3	52.0	0.7
Combino XL	51.1	51.0	-0.1
Combino 6/8	50.3	51.0	0.7
Tango	52.1	53.0	0.9

6.2.3. Wirkungsbereich

Die Messungen haben gezeigt, dass die Gesamtenergie (LE) für einen Haltevorgang, unabhängig des vorangehenden resp. nachgehenden Geschwindigkeitsregimes, in etwa der Gesamtenergie einer Durchfahrt mit Geschwindigkeit $v = 30 \text{ km/h}$ entspricht.

Gemäss Projektierungsrichtlinien BLT [2] beträgt der Betriebsbremsweg für die Geschwindigkeitsregimes $v = 40 \text{ km/h}$ und $v = 50 \text{ km/h}$: 48 m resp. 74 m die Beschleunigungsstrecke: 55 m resp. 100 m.

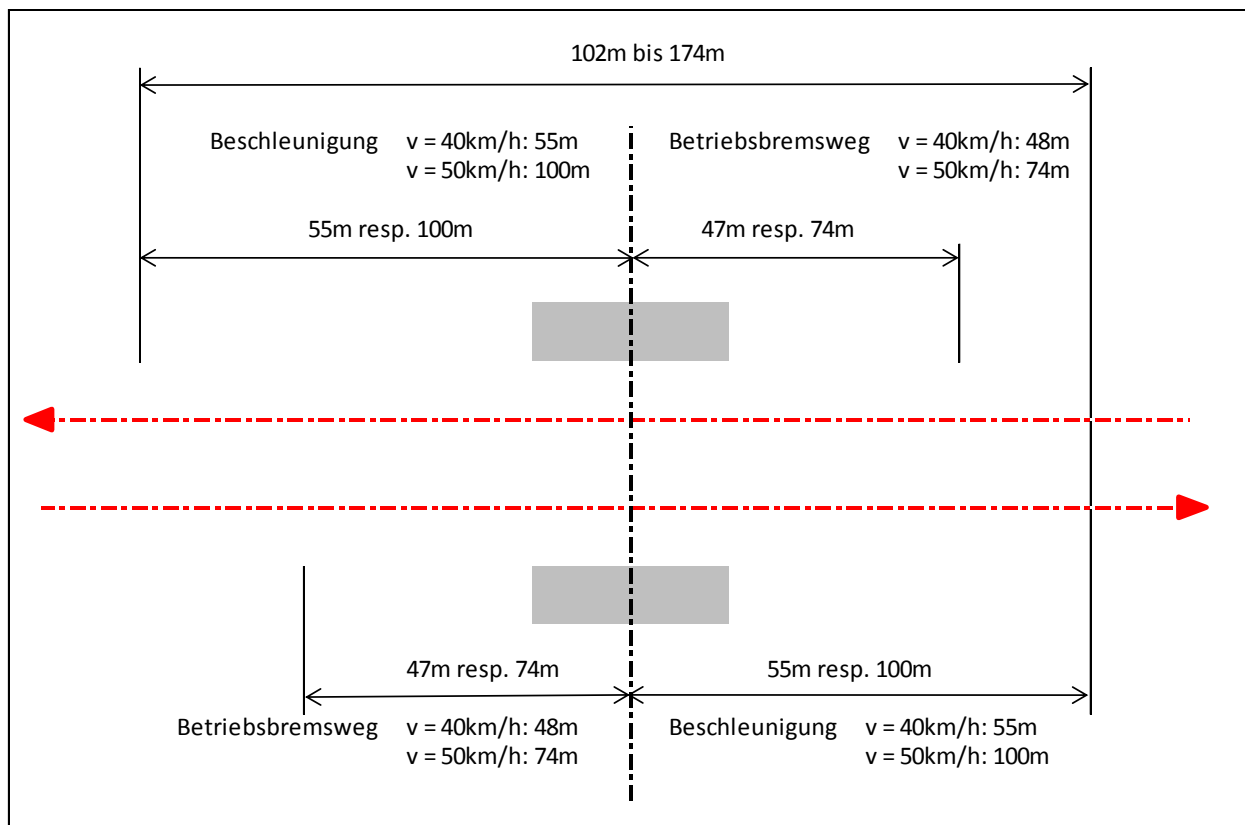


Abb. 23: Brems- und Beschleunigungsweg in Abhängigkeit der Geschwindigkeit

Die mittlere Weglänge beträgt (unter der Annahme, dass vor und nach der Haltestelle dieselbe Geschwindigkeit gilt) zwischen 102 m bis 174 m (Mittelwert = 138 m).

Unter der Berücksichtigung der oben aufgeführten Randbedingungen wird empfohlen, im Haltestellenbereich auf einer Länge von 140 m eine Geschwindigkeit von $v = 30 \text{ km/h}$ in die Berechnungen einzusetzen.

6.3. Steigungen

6.3.1. Ausgangslage

Bei den Messungen in der Steigung mit $i = 3\%$ ergeben sich keine signifikanten Unterschiede beim Mittelungspegel im Vergleich zu einer horizontalen Strecke. Bei den Messungen in der Steigung $i = 8\%$ ergab sich eine geschwindigkeitsabhängige Zunahme des Mittelungspegels im Vergleich zu einer horizontalen Strecke von 0.7 dBA ($v = 18$ km/h) bis 2.7 dBA ($v = 48$ km/h).

Tabelle 12: Differenzen Steigung / horizontale Strecke

Tramtyp	Steigung	$v = 18 - 20$ km/h Lqr [dBA]	$v = 35 - 36$ km/h Lqr [dBA]	$v = 48 - 50$ km/h Lqr [dBA]
Combino XL	$i = 0\%$	48.3	53.0	57.2
	$i = +3\%$	49.1	51.6	56.3
	Delta	+0.8	-1.4	-0.9
Cobra	$i = 0\%$	47.7	54.2	56.8
	$i = +8\%$	48.4	56.6	59.5
	Delta	0.7	2.4	2.7

6.3.2. Emissionsansatz

Die Messungen zeigen bei einer Steigung von 3% keine signifikanten Unterschiede zu einer horizontalen Strecke. Bei einer Steigung von 8% ergibt sich im Geschwindigkeitsregime 36 km/h - 48 km/h eine Pegelzunahme von ca. 2.5 dBA gegenüber einer horizontalen Strecke.

Es wird vorgeschlagen, eine geschwindigkeitsunabhängige lineare Steigungskorrektur für den Steigungsbereich ab $i = 4\%$ bis $i = 8\%$ von 0.5 dBA pro Steigungsprozent einzufügen.

6.4. Gefälle

6.4.1. Ausgangslage

Bei den Messungen im Gefälle mit $i = 3\%$ und Gefälle $i = 8\%$ ergeben sich keine signifikanten Unterschiede beim Mittelungspegel im Vergleich zu einer horizontalen Strecke.

Tabelle 13: Differenzen Gefälle / horizontale Strecke

Tramtyp	Gefälle	$v = 18 - 20$ km/h Lqr [dBA]	$v = 35 - 36$ km/h Lqr [dBA]	$v = 48 - 50$ km/h Lqr [dBA]
Combino XL	$i = 0\%$	48.3	53.0	57.2
	$i = -3\%$	48.4	52.0	--
	Delta	+0.1	-1.0	--
Cobra	$i = 0\%$	47.7	52.0*	56.8
	$i = -8\%$	48.4	52.7**	--
	Delta	0.7	0.7	--

* Berechneter Wert mit $v = 30$ km/h

** Messwert mit $v = 30$ km/h

6.4.2. Emissionsansatz

Eine Korrektur für Streckenführungen mit Gefälle drängt sich aufgrund der Messresultate nicht auf.

6.5. Kurven

6.5.1. Ausgangslage

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen wurde mit einem Tramtyp (Combino XL, BERNMOBIL) eine Kurve (Radius = ca. 40m) mit 2 Geschwindigkeitsregimes befahren. Die beiden Messungen zeigen einen deutlich höheren Mittelungspegel im Vergleich zu einer geraden Streckenführung.

Der Emissionspegel bei einer Kurvendurchfahrt ist, nebst der gefahren Geschwindigkeit, von diversen weiteren Faktoren abhängig wie:

- Kurvenradius
- Vertikale Linienführung
- Gleisüberhöhung
- Messstandort (Kurveninnen- aussen Radius)
- Weichen (stumpfes / spitzes befahren)
- Witterung

6.5.2. Emissionsansatz

Mangels gesicherten Unterlagen (zuwenige resp. zufällige Messungen) wird vorliegend auf die Formulierung eines Emissionsansatzes verzichtet.

Beachte

Gemäss LSV beträgt die Pegelkorrektur K_2 für Bahnlärm $K_2 = -5$. Bei kreischenden Bahnlärm der häufig auftritt und deutlich wahrnehmbar ist, beträgt die Pegelkorrektur $K_2 = 0$.

7. Integration der Messresultate in das sonRAIL-Emissionsmodell

7.1. Ausgangslage

Die EMPA wurde beauftragt die quellennahen akustischen Messungen aufzubereiten für die Integration in das sonRAIL-Emissionsmodell. Der Schlussbericht ist dem Anhang 1 zu entnehmen. Nachfolgend werden die wichtigsten Erkenntnisse zusammenfassend erläutert.

7.2. Einleitung

Für die Bestimmung der akustisch abgestrahlten Leistung von Eisenbahnfahrzeugen steht mit sonRAIL ein detailliertes, auf der TWINS-Modellvorstellung basierendes, Quellenmodell zur Verfügung. Die Rollgeräuschestehung wird nachgebildet, indem ausgehend von der Rad- und Schienenrauheit zusammen mit der Fahrzeuggeschwindigkeit eine Systemanregung ermittelt wird, die dann über eine Fahrzeug- und Oberbautransferfunktion in eine abgestrahlte Schallleistung umgerechnet werden kann. Da bei Tramfahrzeugen die Rollgeräusch-Schallentstehungsmechanismen vergleichbar sind, bietet es sich an, die akustische Emission von Tramfahrzeugen ebenfalls im sonRAIL-Formalismus auszudrücken.

7.3. sonRAIL-Emissionsmodell

Das sonRAIL Emissionsmodell beschreibt die Abstrahlung eines Wagens oder einer Lok durch eine Reihe von Punktquellen auf fünf verschiedenen Höhen (0.0, 0.5, 2.0, 3.0, 4.0 m). Damit werden die unterschiedlichen, möglichen Schallentstehungsmechanismen repräsentiert. Die Aufschlüsselung in unterschiedliche Höhen ist insbesondere bei Hindernissen um beim Bodeneffekt von Bedeutung.

Die Emission eines Schienenfahrzeuges setzt sich aus dem Rollgeräusch einerseits sowie Antriebs- und Aggregatsgeräuschen andererseits zusammen. Diese beiden Anteile werden je durch einen separaten Modellansatz beschrieben.

Unter der Annahme, dass bei modernen Tramfahrzeugen die akustischen Emissionen in der Regel durch das Rollgeräusch dominiert werden, wurden exemplarisch die Vorbeifahrts-Ereignisenergiemessungen an vier Tramtypen bei unterschiedlichem Untergrund in den sonRAIL Quellenmodell-Formalismus übersetzt. Hierbei wurden typische Rad- und Schienenrauheitsspektren und ein analytisch beschreibbares Kontaktfiter zu Grunde gelegt. Durch Anpassung der Oberbautransferfunktion wurde schliesslich spektral beste Übereinstimmung mit den Messdaten erzielt.

7.4. Ergebnisse / Schlussfolgerungen

Die Übersetzung der Tramvorbeifahrts-Ereignisenergiemessungen in den sonRAIL Formalismus zeigt mit plausiblen Annahmen zu den Rad- und Schienenrauheiten und zum Kontaktfiter sowie geeignet gesetzter Transferfunktion eine zuverlässige rechnerische Nachbildung der Messdaten. Als Vergleichsgrösse Messung/Berechnung wurde hier die akustisch abgestrahlte Schallleistung herangezogen.

Für eine Integration in das sonRAIL Webtool müssten im Webtool zusätzliche Anpassungen am Bodeneffekt, d.h. bei der Ausbreitungsrechnung zum 7.5 m Mikrofonpunkt, vorgenommen werden, da bei Tramlärmsituationen in der Regel von harten Bodenflächen auszugehen ist.

8. Folgerungen aus den Untersuchungen: Projektierungsrichtlinien

8.1. Ausgangslage

Wie die Untersuchungen zeigten, ist die Schallabstrahlung bzw. der Quellenwert je nach Typ des Tramtuges unterschiedlich. Im Sinne einer Projektierungshilfe werden die in Kap. 6 gemachten Schlussfolgerungen zusammengefasst.

8.2. Schallabstrahlung und Quellenwerte Tramdurchfahrten (Belag)

8.2.1. Cobra VBZ

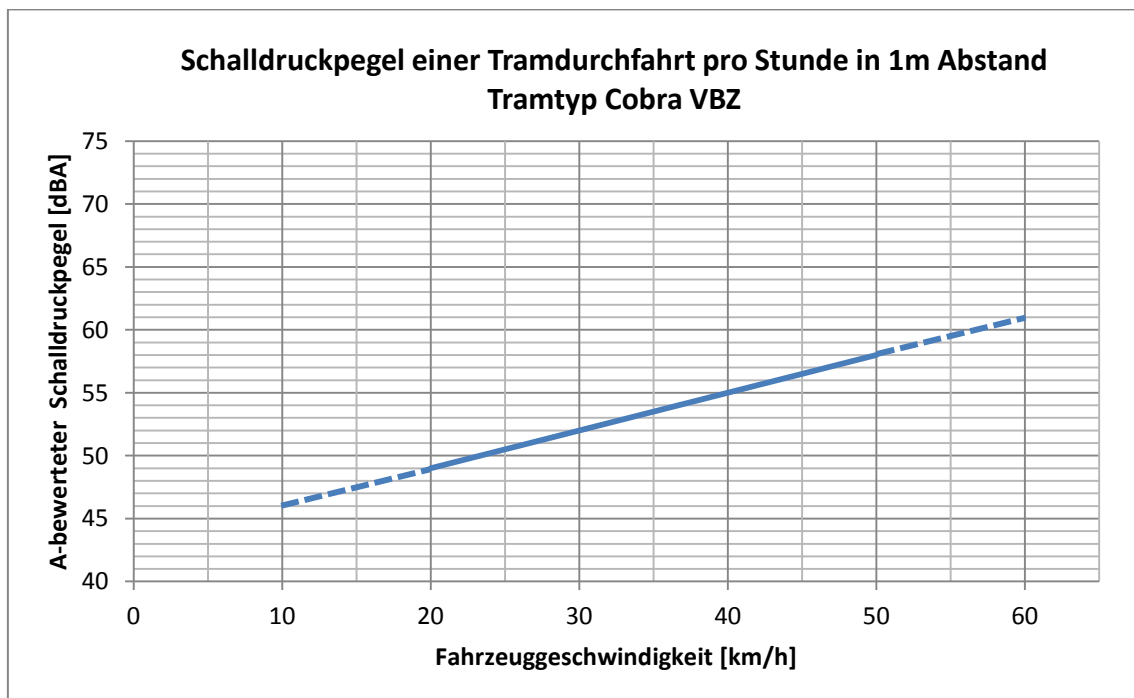


Abb. 24: Quellenwert (L_q) Tramtyp Cobra VBZ

8.2.2. Combino XL BERNMOBIL

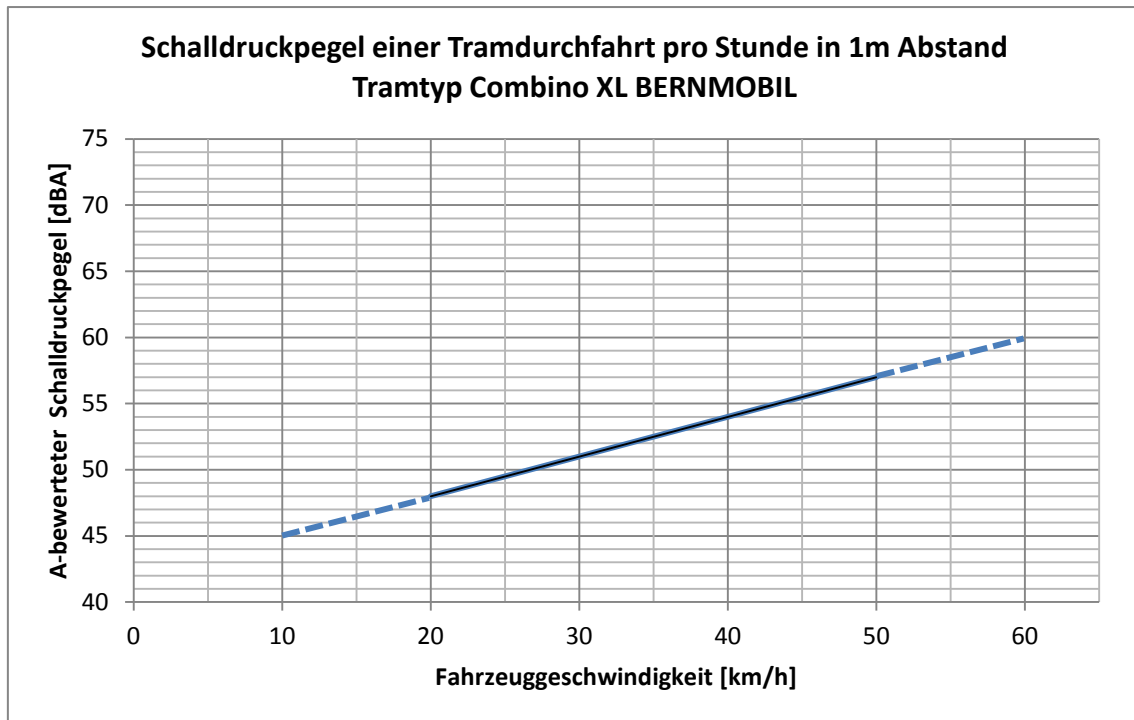


Abb. 25: Quellenwert (L_q) Tramtyp Combino XL BERNMOBIL

8.2.3. Combino 6/8 BVB

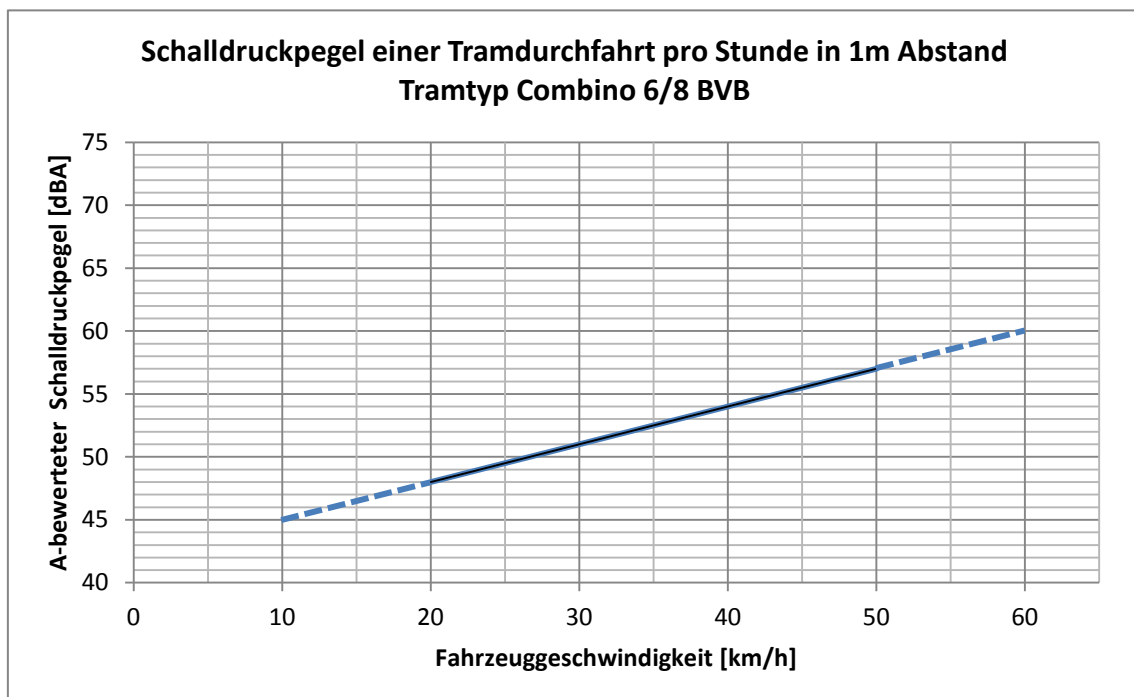


Abb. 26: Quellenwert (L_q) Tramtyp Combino 6/8 BVB

8.2.4. Tango BLT

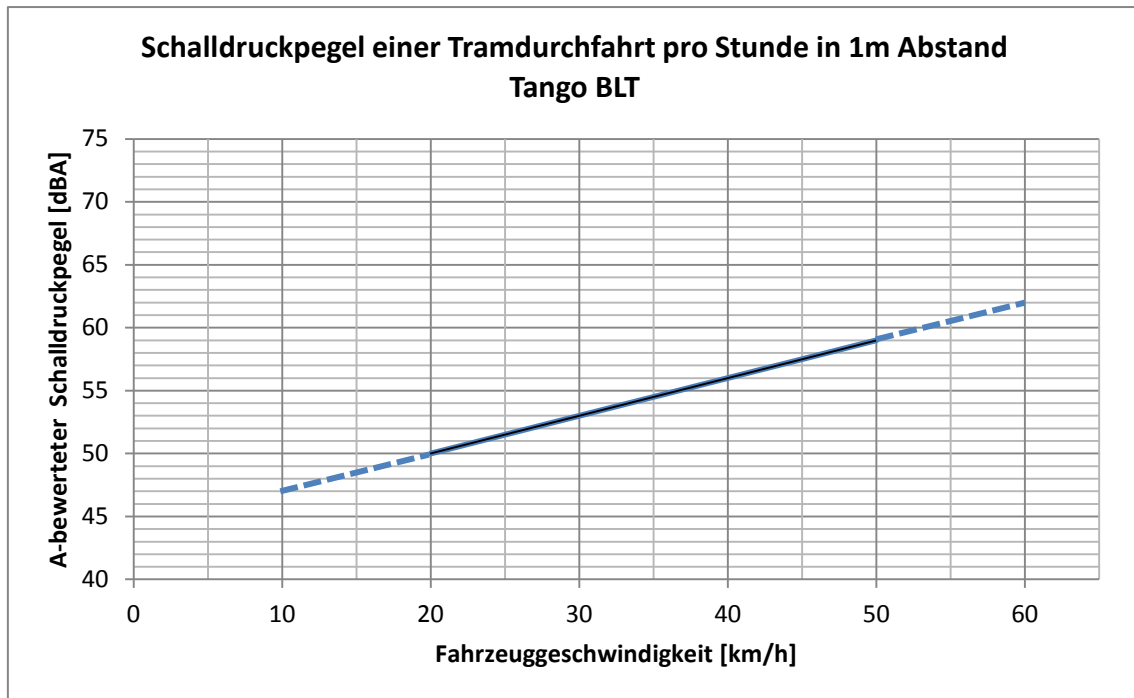


Abb. 27: Quellenwert (Lqr) Tramtyp Tango BLT

8.2.5. Niederflur (Vevey) BERNMOBIL

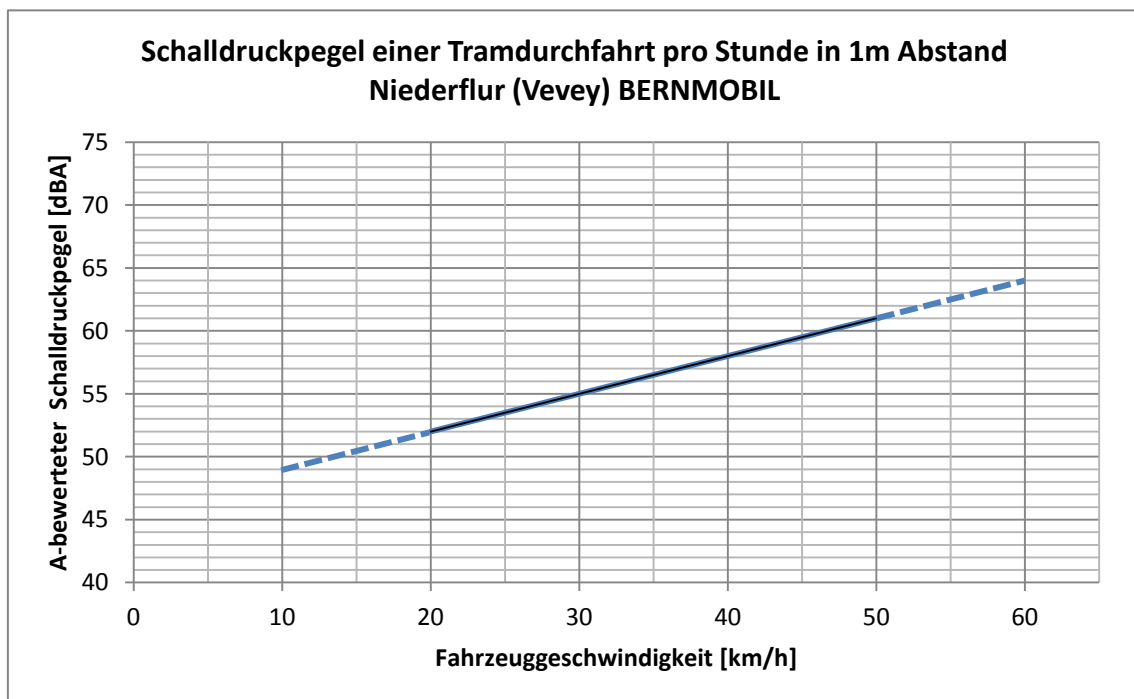


Abb. 28: Quellenwert (Lqr) Tramtyp Vevey BERNMOBIL

8.2.6. Combino BERNMOBIL

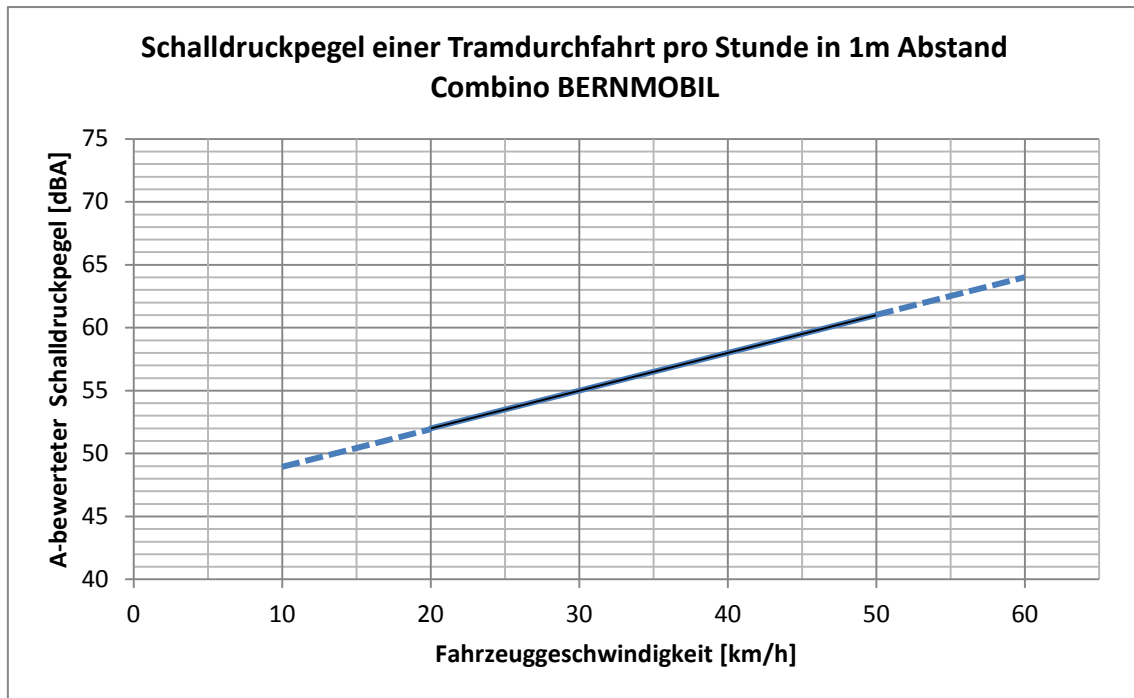


Abb. 29: Quellenwert (Lqr) Tramtyp Combino BERNMOBIL

8.2.7. Tram 2000 VBZ

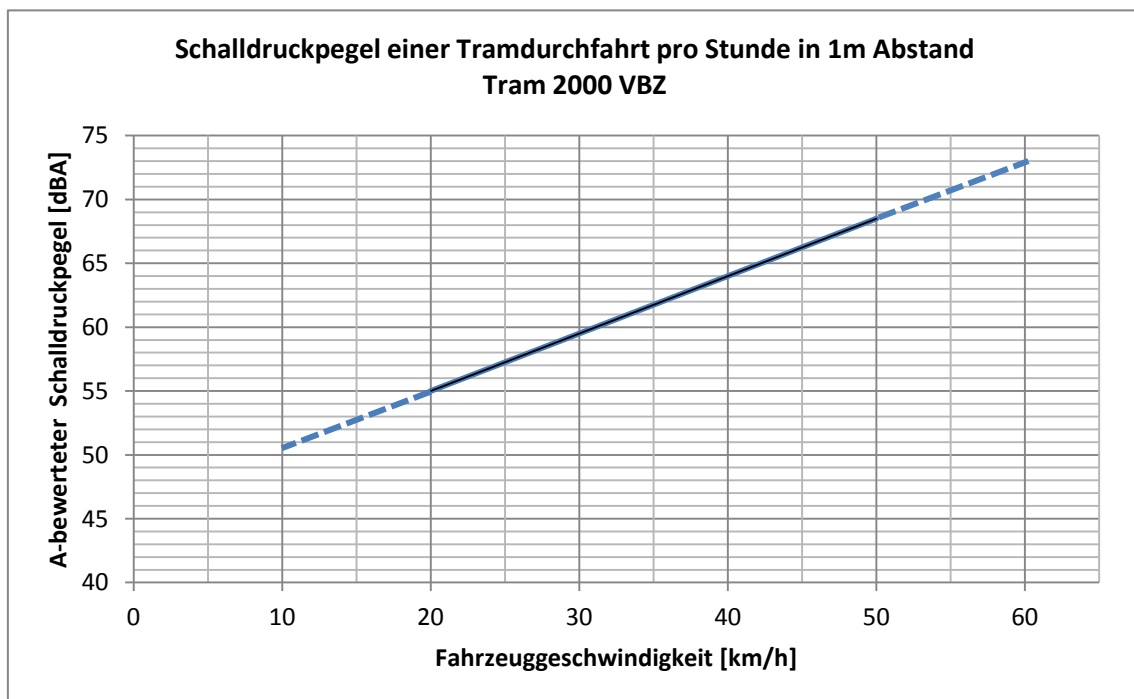


Abb. 30: Quellenwert (Lqr) Tramtyp Tram 2000 VBZ

8.2.8. Mischverkehr

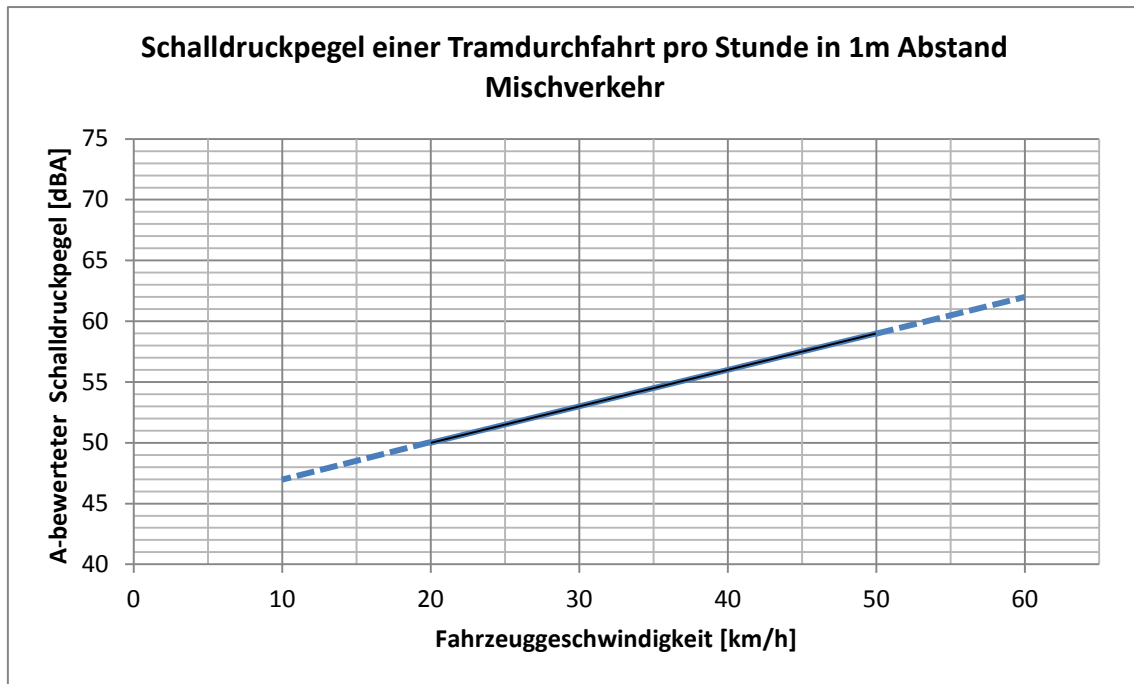


Abb. 31: Quellenwert (L_q) Mischverkehr

8.3. Schallabstrahlung und Quellenwerte Tramdurchfahrten auf Rasengitter

Der Quellenwert (Schalldruckpegel) einer Tramdurchfahrt pro Stunde in 1m Abstand kann mittels der Diagramme gemäss Kapitel 8.2 ermittelt werden und anschliessend um 3 dBA reduziert werden.

$$L_{qr} = (0.3 \cdot A_1) \cdot v \text{ [km/h]} + A_2 - 3 \text{ [dBA]}$$

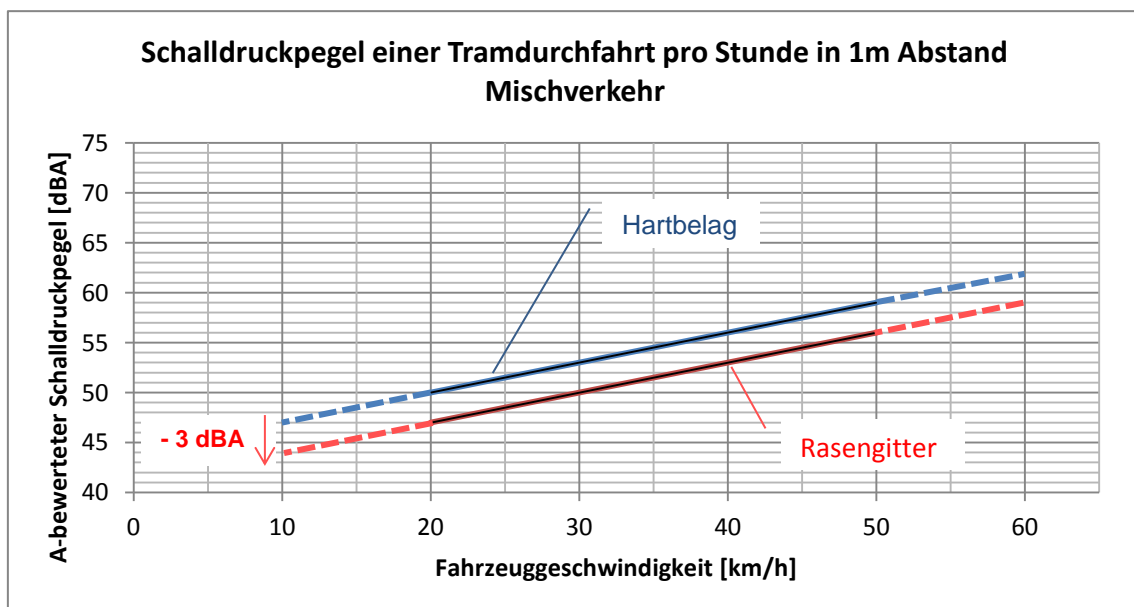


Abb. 32: Quellenwert (L_q) Trasse Rasengitter

8.4. Schallabstrahlung und Quellenwerte bei Haltestellen

8.4.1. Äquivalenter Schalldruckpegel

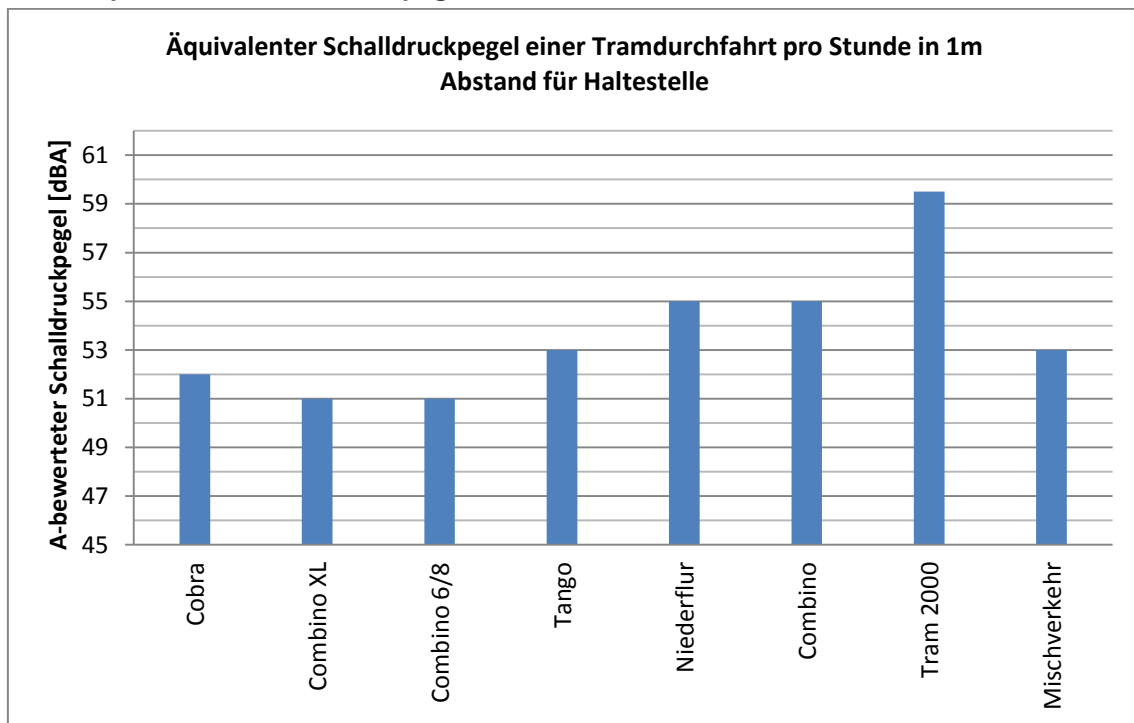


Abb. 33: Äquivalenter Quellenwert (L_q) Haltestellen

8.4.2. Wirkungsbereich äquivalenter Quellenwert (L_q)

Im Haltestellenbereich wird für die Berechnungen auf einer Länge von 140m ein Geschwindigkeitsregime von 30km/h eingesetzt.

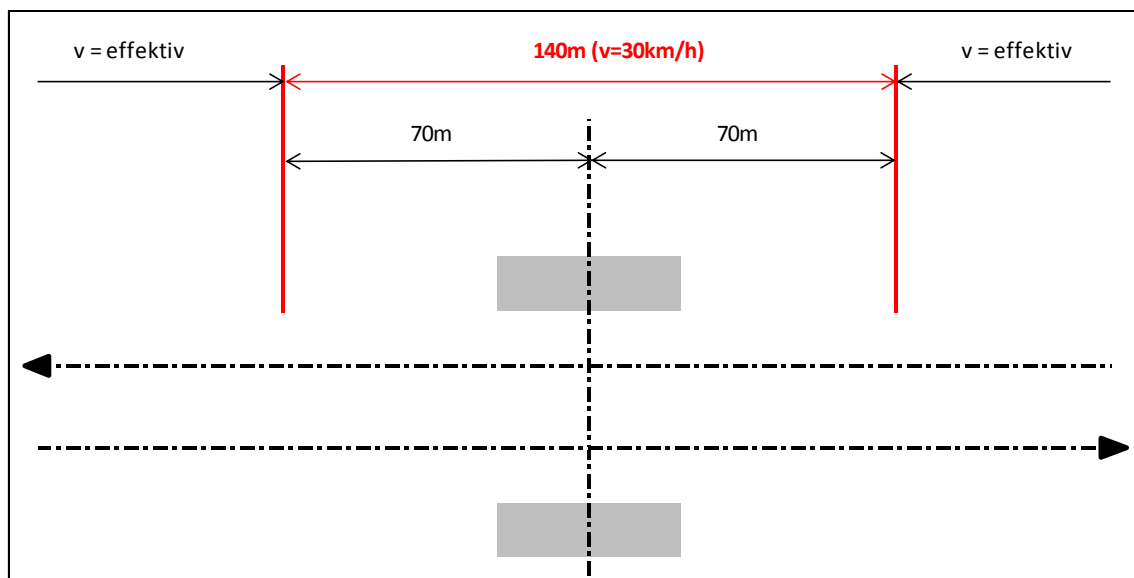


Abb. 34: Wirkungsbereich äquivalenter Quellenwert (L_q) im Bereich Haltestellen

8.5. Steigungszuschlag

Im Bereich von Steigungen > 3% sind die Berechnungen richtungsgetrennt durchzuführen und für die bergwärts fahrenden Trams einen Steigungszuschlag gemäss Abb. 35 einzusetzen.

Gefällstrecken > 3% werden, identisch einer horizontalen Linienführung, d.h. ohne Zuschläge oder Abzüge, berechnet. Zu beachten sind die max. zulässigen Geschwindigkeiten gemäss Betriebsreglement (Angabe Betreiber).

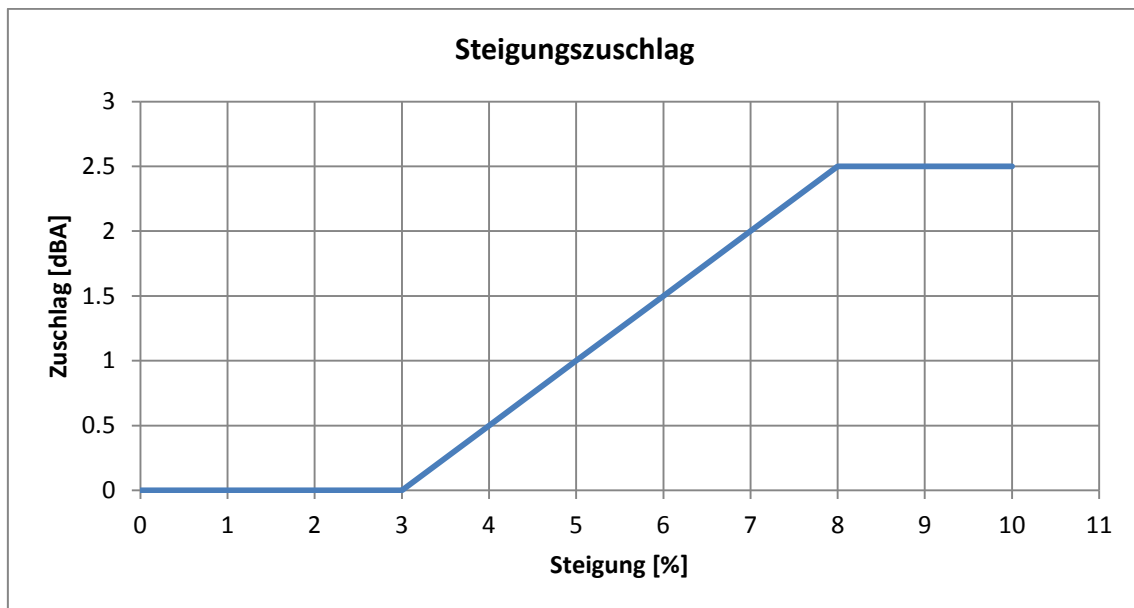


Abb. 35: Steigungszuschlag in dBA

9. Schlussbemerkung

Mit der aktuellen Messkampagne wurden Messdaten von Trams der neusten Generation gewonnen. Die Messungen zeigen, dass die Bautechnik und Konstruktion von Tramzügen in Bezug auf die Lärmentwicklung wesentliche Fortschritte erzielt hat. Subjektiv entspricht die Lärmpegel Differenz von alten Trams zu Trams der neusten Generation einer Halbierung der Lautstärke.

Mit der sukzessiven Erneuerung der Tramflotte resp. dem konsequenten Einsatz von Trams der neusten Generation wird sich die Lärmbelastung, bei gleichem Taktraster, zukünftig weiter reduzieren.

Weiter spielt die Trasseebeschaffenheit eine wesentliche Rolle. Rasengittersteine reduzieren im Vergleich zu einer harten Fahrbahn die Lärmimmissionen ebenfalls wahrnehmbar.

Bei der ausschliesslichen Betrachtung der akustischen Aspekte sind demzufolge Trassen mit Rasengittersteinen gegenüber schallharten Fahrbahnflächen vorzuziehen und wenn möglich zu realisieren.

Bern, den 31. Juli 2014

B+S AG



EMPA

