

Bericht 2-219

Bundesamt für Umwelt BAFU



**Lärmesskonzept
für Eisenbahn-Stahlbrücken**

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

| | Name | Datum | Unterschrift |
|--------------------|--------------------|------------|--------------|
| Erstellt | Bernhard Thallemer | 14.07.2006 | |
| | André Rohrbeck | 14.07.2006 | |
| Gepprüft | Stefan Bühler | 14.07.2006 | |
| Freigegeben | André Rohbeck | 14.07.2006 | |

Verteiler

| Firma | Abteilung | Name | Kopien | Bemerkungen |
|----------|---------------------|--------------------|--------|-------------|
| BAFU | Lärm- bekämpfung | Claude Feiss | 1 | |
| PROSE AG | M&T | Bernhard Thallemer | 1 | |
| PROSE AG | M&T | Archiv | 1 | |

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

Revisionsindex

| | Erstellt, Geprüft, Freigegeben | Datum |
|----------------------|---|------------|
| Bericht 2-219 | Bernhard Thallemer, Stefan Bühler, André Rohrbeck | 14.07.2006 |
| | | |
| | | |

Änderungen

| Revision | Seite | Abschnitt | Beschreibung |
|----------|-------|-----------|--------------|
| | | | |
| | | | |
| | | | |

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|------------|---|-----------|
| 1 | Zusammenfassung | 6 |
| 2 | Einführung | 7 |
| 2.1 | Allgemeines | 7 |
| 2.2 | Ausgangslage | 7 |
| 2.2.1 | Allgemein | 7 |
| 2.2.2 | Grosse Emmenbrücke Burgdorf | 7 |
| 2.2.3 | Aarebrücken Uttigen | 9 |
| 2.3 | Bekannte Fälle von Brückenlärmsanierungen | 10 |
| 2.4 | Projektziel | 11 |
| 3 | Eisenbahnlärm – was ist bei Brücken anders? | 13 |
| 3.1 | Allgemeines | 13 |
| 3.2 | Bauweise von Stahlbrücken | 14 |
| 3.3 | Ursachen des Brückenlärms – Anregung | 15 |
| 3.3.1 | Rollgeräusch | 15 |
| 3.3.2 | Schwellenfachfrequenz | 16 |
| 3.3.3 | Einzelanregung | 16 |
| 3.3.4 | Polygonisierung der Räder und Flachstellen | 16 |
| 3.4 | Unterschiede zwischen Brücken und freier Strecke | 16 |
| 3.4.1 | Abgrenzungen | 16 |
| 3.4.2 | Schallabstrahlung | 17 |
| 3.4.3 | Bemerkungen | 18 |
| 3.4.4 | Praktische Einschränkungen | 19 |
| 4 | Stand der Technik | 20 |
| 4.1 | EN ISO 3095:2005 | 20 |
| 4.2 | prEN ISO 3095:2001 | 20 |
| 4.3 | Technische Spezifikation für Interoperabilität (TSI) Noise | 21 |
| 4.4 | Holländisches Rechenmodell im Oktavbereich | 21 |
| 4.5 | Harmonoise-Projekt | 22 |
| 4.6 | Beurteilung Normenstand | 23 |
| 5 | Entwicklung des Messkonzepts | 24 |
| 5.1 | Genauigkeitsanforderungen | 24 |
| 5.2 | Konzept zur Ermittlung eines Sanierungswerts | 24 |
| 5.2.1 | Einleitender Kommentar | 24 |
| 5.2.2 | Absolutmessung | 25 |
| 5.2.3 | Relativmessung Brücke – Strecke | 25 |
| 5.2.4 | Bewertung der Ansätze | 25 |
| 5.3 | Randbedingungen der Messung | 26 |
| 5.3.1 | Schienezustand | 26 |

| | | |
|------------|---|-----------|
| 5.3.2 | Messentfernung | 26 |
| 5.4 | Rollmaterial als Anregung der Schwingung | 34 |
| 5.4.1 | Radrauheit | 34 |
| 5.4.2 | Zusammenhang zwischen Zuglänge und Brückenlänge | 35 |
| 5.4.3 | Geschwindigkeit der Züge | 36 |
| 5.5 | Messwert | 38 |
| 5.5.1 | Physikalische Messgrösse | 38 |
| 5.5.2 | Lärmbilder | 38 |
| 5.5.3 | Betrachtungen im Frequenzbereich | 39 |
| 5.5.4 | Kriterien im Zeitbereich | 39 |
| 5.5.5 | Äquivalenter Brückenpegel $L_{pAeq,TB}$ | 42 |
| 6 | Literatur | 44 |

Verfahrensanweisung für die Durchführung der Messung im Anhang

1 Zusammenfassung

In der Schweiz wurden in den letzten Jahren vielfältige Lärmschutzmassnahmen im Eisenbahnbereich erfolgreich umgesetzt bzw. begonnen. Der Schwerpunkt lag dabei bis jetzt auf infrastrukturseitigen Massnahmen (z. B. Lärmschutzwänden) und Massnahmen auf der Fahrzeugseite (insb. die Einführung der Kunststoffklotzbremse als Ersatz der Graugussklotzbremse). Bis jetzt wurden die Brückenbauwerke noch nicht mit in die Lärmsanierung mit einbezogen.

Um in Zukunft die Brücken, bei denen insbesondere die Stahlbrücken älterer Bauart erhebliche Lärmquellen darstellen, in die Lärmsanierung mit einzubeziehen, ist es erforderlich, den Erfolg von Sanierungsmassnahmen an Brücken beurteilen zu können. Da es keine Normen für die Beurteilung des Lärmverhaltens von Brücken gibt, sollte ein Messverfahren für diese Beurteilung entwickelt werden.

Es wurde ausgehend von den vorhandenen Normenwerken, dem Stand der Technik und den spezifischen Gegebenheiten an Eisenbahnbrücken ein Messverfahren entwickelt, das für die Beurteilung von Sanierungsmassnahmen an Brückenbauwerken geeignet ist. Insbesondere die schlechte Zugänglichkeit von Brücken für die Messung sowie der lange zeitliche Abstand zwischen der „Vorher“- und der „Nachher“-Messung erschweren die Messung.

Beim vorgeschlagenen Verfahren wird der normale Zugverkehr erfasst. Es wird bewusst auf spezielle Messfahrzeuge verzichtet, da dieser Ansatz von der Auswahl der Fahrzeuge bis zur langfristigen Vorhaltung der Fahrzeuge in einem konstanten Zustand viele Detailprobleme birgt. Der übliche Zugverkehr stellt hingegen eine breite statistische Basis dar, die zudem der real an der Brücke vorkommenden Situation entspricht. Für die übrigen Parameter der Messung (Messposition, Messwert, Geschwindigkeit der Züge, etc.) werden geeignete Werte festgelegt.

Das Verfahren ist wegen des statistischen Ansatzes in der Lage, die erreichte Pegelreduktion in einem Sanierungswert zu konzentrieren. Der Sanierungswert drückt das geänderte Lärmverhalten einer Brücke in einem einzelnen Wert aus.

Auf Grund der Komplexität des zu messenden Systems „Brücke mit überfahrendem Zug“ und dem heutigen Wissensstand wird in diesem Bericht ausführlich auf die Zusammenhänge eingegangen, die zu dem vorgeschlagenen Messverfahren geführt haben. Dadurch ist es möglich, das Messverfahren der Messsituation anzupassen, falls eine Durchführung nach dem hier vorgeschlagenen Messverfahren nicht möglich ist. Ebenso ist so eine fundierte Beurteilung der Messergebnisse möglich.

2 Einführung

2.1 Allgemeines

Im Rahmen der Lärmsanierung der Eisenbahnen wird vorgeschlagen, auch die Sanierung von Stahlbrücken in das Sanierungsprogramm aufzunehmen. Durch Ihre meist exponiert Lage verursachen viele Brücken – und hier insbesondere die Stahlbrücken älterer Bauart – grosse Lärmbelastungen bei vielen Betroffenen.

Um das Brückensanierungsprogramm in die durch FinÖV finanzierten Lärmsanierungen aufnehmen und den Nutzen der Sanierungen bewerten zu können, ist es notwendig, die realisierte Lärmreduktion (als zentralen Nutzen) ermitteln zu können.

Grundsätzlich wird eine Lärmreduktion durch den Vergleich von Messergebnissen vor und nach der Sanierung ermittelt. Es existiert jedoch kein normiertes Verfahren, um den Lärm einer Brücke zu messen und somit auch kein Verfahren, um die realisierte Lärmreduktion beim Brückenlärm zu ermitteln. Die üblichen Normen konzentrieren sich auf die Ermittlung von Fahrzeugeigenschaften und sind daher nicht oder nur in Teilen anwendbar.

Deshalb sollte ein Messkonzept ausgearbeitet werden, das die Verfahren und Anforderungen für eine Messung der Lärmreduktion bei Stahlbrücken beschreibt. Dieses sollte möglichst auf existierenden Normen basieren und mit dem zusätzlich Notwendigen ergänzt werden.

2.2 Ausgangslage

2.2.1 Allgemein

Die Anzahl der zu sanierenden Brücken in der ganzen Schweiz wird auf etwa 15 bis 20 Stück geschätzt. Im Moment sind an zwei Brücken Sanierungsmassnahmen geplant, die durch Messungen verifiziert werden sollen. Dies sind:

- die Brücke über die Emme in Burgdorf und
- die Brücke über die Aare bei Uttigen.

Beide Brücken führen in wenigen Metern Höhe über einen Fluss und sind Stahlbrücken vom Typ „Tragbalken mit Gitterwerk“ [26], [27].

2.2.2 Grosse Emmenbrücke Burgdorf

Die Brücke ist eine Stahlgitterkonstruktion für zwei Gleise aus dem Jahr 1927 mit einer Stützweite der Tragbalken von 57 m beziehungsweise 55 m zwischen den Widerlagern.

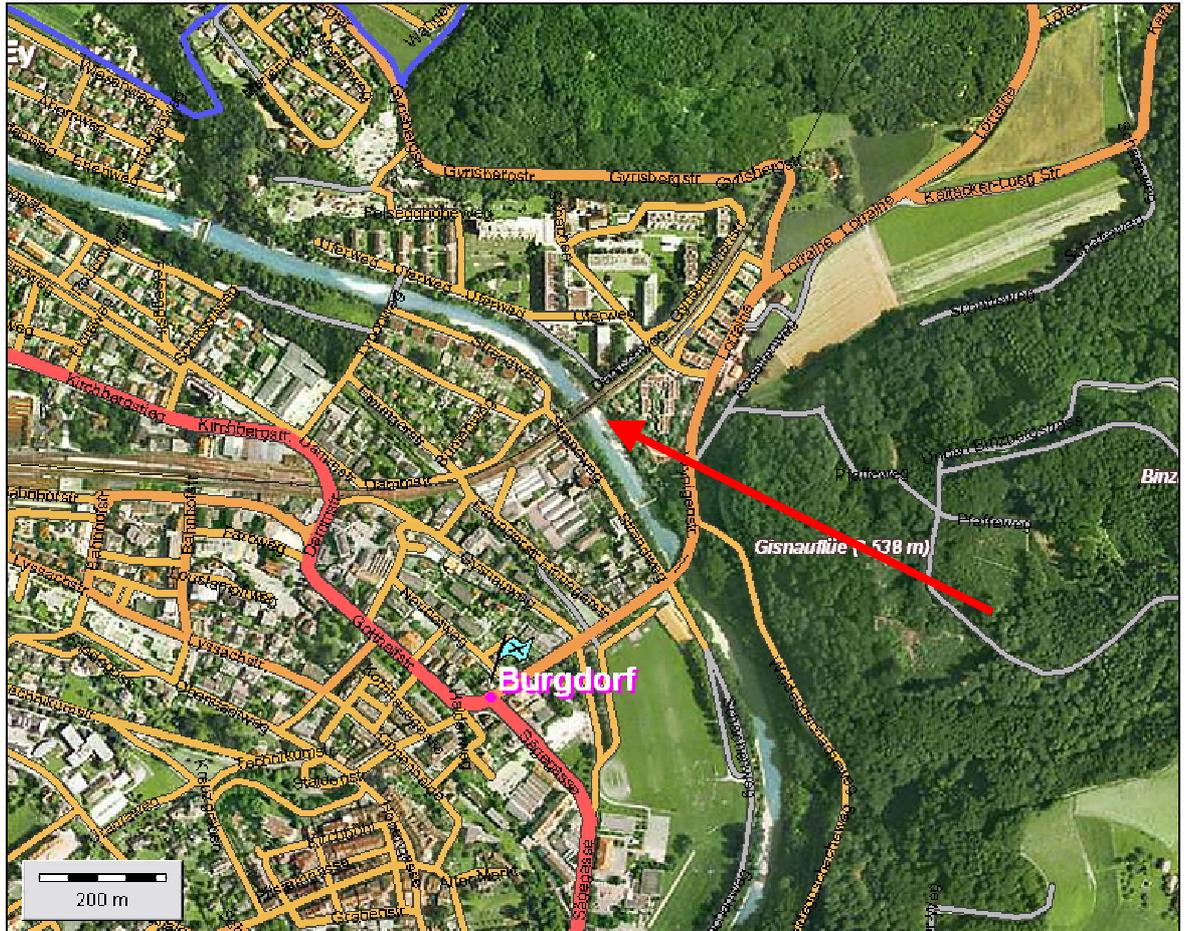


Abbildung 2-1: Luftbild Situation der Emmenbrücke in Burgdorf

In nächster Nähe zu Brücke (50 – 100 m) befinden sich Wohnquartiere und Gewerbe. Die Brücke befindet sich aus Richtung Wynigen kommend ca. 700 m vor dem Bahnhof Burgdorf.

Bei einem Ortsbesuch am 16.5.2006 bestimmte das Geräusch der Emme, das durch Stromschnellen verursacht wird, das Umgebungsgeräusch. Bei den durchfahrenden Güterzügen und älteren Lokomotiven dominierte der tieffrequente rumpelige Brückenlärm, während bei den doppelstöckigen IC-2000 ein singendes Geräusch wahrnehmbar war. In etwa 100 m Entfernung von der Brücke am Strandweg am Ufer der Emme war der Pegel des IC subjektiv nicht das dominierende Geräusch. Gegenüber dem Güterzug konnten hingegen beim IC einzelne Drehgestellpaare auf der Brücke akustisch voneinander unterschieden werden.

2.2.3 Aarebrücken Uttigen

Die Aare wird durch je eine Brücke pro Gleis überquert. Es sind Stahlgitterkonstruktionen für je ein Gleis aus den Jahren 1918 (linkes Gleis) und 1921 (rechtes Gleis) mit einer Stützweite der Tragbalken von 65,8 m beziehungsweise von 64 m zwischen den Widerlagern.

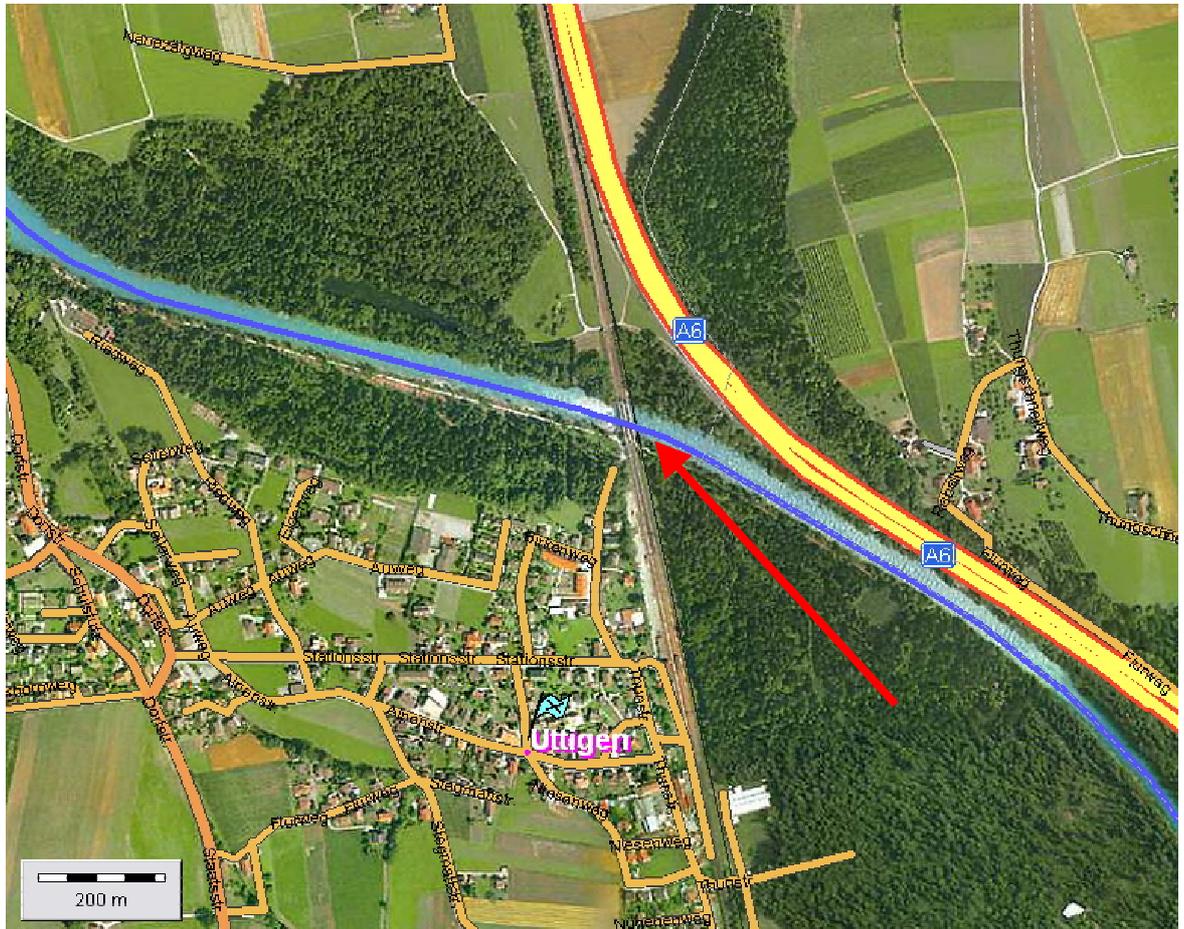


Abbildung 2-2: Luftbild Situation der Aarebrücken in Uttigen

In mittelbarer Nähe zur Brücke, mehr als 100 m entfernt befindet sich der Ort Uttigen. Auf der anderen Seite der Brücke verläuft in etwa 125 m Entfernung die Autobahn A6. Kurz nach der Brücke sind Stromschnellen zu erkennen (siehe auch Abbildung 2-3). Die Brücke befindet sich 350 m vor dem Bahnhof Uttigen aus Richtung Kiesen.



Abbildung 2-3: Vor Ort Situation Uttigen

2.3 Bekannte Fälle von Brückenlärmsanierungen

Wie dem Fall der Sanierung der Wasserparkbrücke in Wien entnommen werden kann, ist eine erfolgreiche Lärmsanierung abhängig davon, dass alle Elemente, die an der Lärmerzeugung beteiligt sind, in die Sanierung mit einbezogen werden [2]. Um die Sanierung möglichst effizient zu gestalten, ist es erforderlich, nicht nur alle Ursachen und Quellen zu berücksichtigen, sondern auch deren Einfluss abzuschätzen, um an den geeigneten Stellen angreifen zu können. Hierzu laufen Projekte, die sich numerischer Methoden bedienen, um die Bewertung quantitativ abzustützen [6], [22].

Um die Rahmenbedingungen für die Ermittlung des Nutzens einer Brückensanierung besser zu kennen, werden nachfolgend beispielhaft Brückensanierungsmethoden aufgelistet.

Grundsätzlich ist bei der Lärmsanierung einer Brücke eine Entkopplung von Schiene und Brückentragwerk anzustreben. Dies wird z. B. durch eine hohe Eingangsimpedanz, grosse Masse und hohe Dämpfung, Steifigkeit und geringe Verformung erreicht. Folgende Sanierungsmassnahmen sind möglich (nicht abschliessend):

- Ersatz der Stahlbrücke durch eine Betonbrücke ersetzen (zu erwartende Pegelreduktion ca. 10 – 15 dB)
- Aufsetzen einer Stahlbetonplatte mit kontinuierlich gelagerter Schiene auf der Stahlbrückenkonstruktion [23] (10 – 15 dB)

- Stahlbrücke bzw. Stahlfahrbahnplatte niedriger Höhe mit kontinuierlicher Schienenlagerung [24] & [25], erwartbar 10 – 15 dB

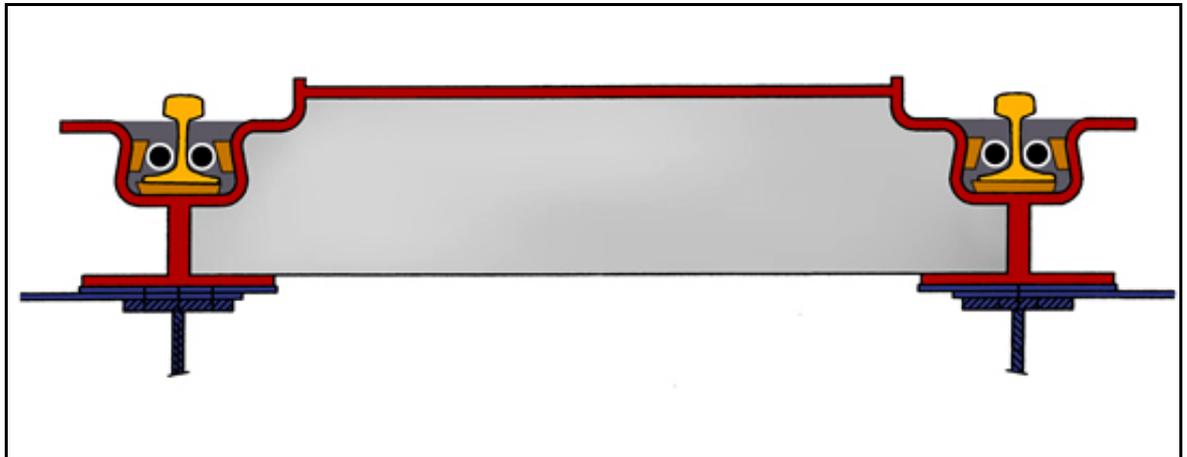


Abbildung 2-4: Querschnitt durch das System "Heerema Silent Bridge", blau ist die bestehende Brückenstruktur und rot ist die neue Stahlfahrbahnplatte dargestellt

- Einbau einer Wanne zur Aufnahme einer Schotterfahrbahn auf dem bestehenden Stahltragwerk (Trogbrücke)
- Wanne in der die seitlichen Strukturen die Funktion einer Lärmschutzwand übernehmen sollen.
- Konzept Hohlkastenbrücke [5]
- Verbund- und Massivbrücken
- Unterschottermatten [1], [6]
- Seitenmatten zur Entkopplung der Seitenwände
- besohlte Schwellen [6]
- elastische Schienenlager [3] (vermutlich ein Überbegriff für optimierte Schienenbefestigungen, siehe auch verschiedene Fallstudien der Firma Pandrol z.B. [8])
- Absorber (Stahl-Gummi-Sandwich) seitlich am Schienenfuss, an den Längsträgern der Brücke und am Brückentragwerk.
- neue Schienen
- Feste Fahrbahn
- Brückenaufleger vibrationsisoliert
- Schienenauszugsvorrichtung von der Brückenseite auf den Bahndamm verlagern.

2.4 Projektziel

Ziel dieser Studie ist einzig die Beurteilung der *Änderung* der Lärmbelastung des Empfängers durch die Sanierung. Da eine Immissionsmessung für alle betroffenen Personen nicht realistisch ist, muss sich eine Messmethode zwangsläufig auf das Lärm aussendende Objekt, d.h. die Brücke, konzentrieren. Da die Anregung einer Brücke durch verschiedene Züge geschieht, die selber Lärm abstrahlen und die Brücke zudem unterschiedlich stark anregen, kann nicht direkt ein Mass für die Lärmabstrahlung der Brücke angegeben werden.

Die Definition eines Masses für die Änderung der Lärmbelastung bzw. des abgestrahlten Lärms, sowie der zugehörigen Messmethode ist das Ziel dieser Studie.

Ausdrücklich *nicht* Ziel dieser Studie ist es, eine Messmethode zu definieren, mit deren Auswertung Sanierungsmassnahmen festgelegt werden können, bzw. mit deren Auswertung der Erfolg einer Einzelmassnahme an der Brücke überprüft werden kann.

3 Eisenbahnlärm – was ist bei Brücken anders?

3.1 Allgemeines

Brücken stellen mit Ihrer Struktur schwingungsfähige Systeme dar, die durch eine Zugsüberfahrt zu Schwingungen angeregt werden (Körperschall). Da die Brücken nur geringe Dämpfungen bzw. Dämmungen aufweisen, wird der Körperschall an die umgebende Luft übertragen. Abhängig von der Bauart der Brücke kommt es dadurch zu weniger oder mehr Schallabstrahlung. Die Schallpegelzunahme gegenüber normalem Gleis kann bis zu 15 dB(A) betragen, wobei der Unterschied zwischen alten Stahlbrücken und modernen Stahlbetonbrücken ca. 7 – 15 dB beträgt ([1], [16] Abschnitt '2.4.3. Train passing a bridge'). Insbesondere im niedrigen Frequenzbereich strahlen Stahlbrücken deutlich mehr Schall ab als moderne Brücken oder das Gleis auf der normalen Strecke (siehe Abbildung 3-1).

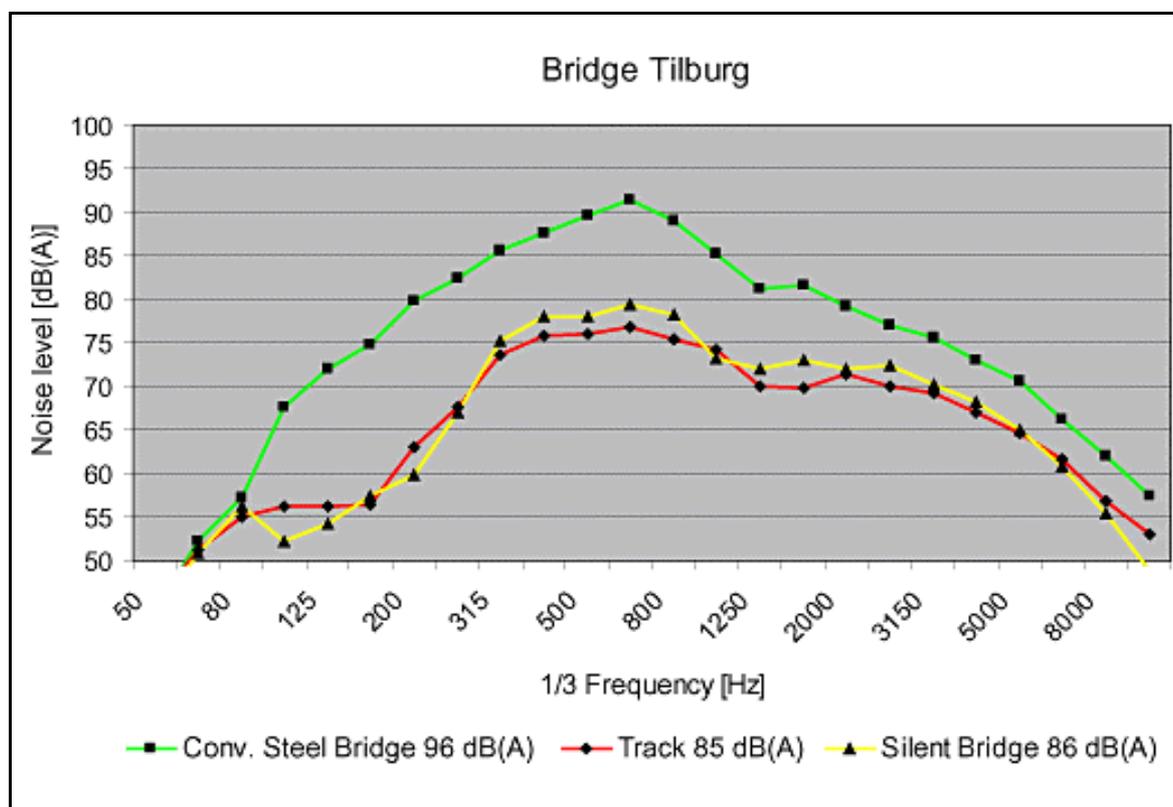


Abbildung 3-1: Vergleich der spektralen Schallabstrahlung einer konventionellen Stahlbrücke (grün) mit modernen Brücken am Beispiel der "Heerema Silent Bridge" (gelb) und zu normalem Gleis (rot). [25]

3.2 Bauweise von Stahlbrücken

Stahlbrücken wurden meist in einem Stahlgitterfachwerk ausgeführt.

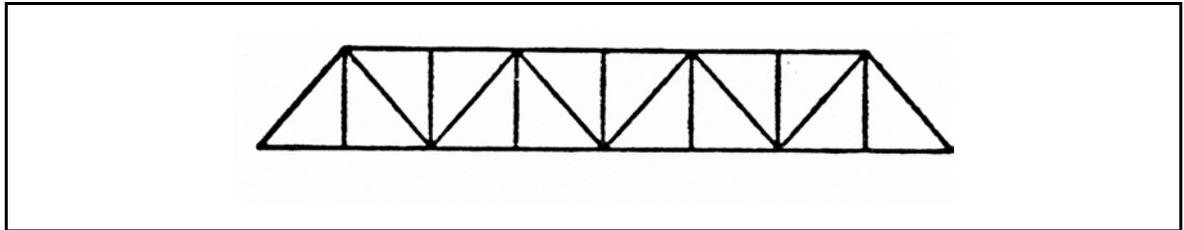


Abbildung 3-2: Einfaches Strebenfachwerk mit Vertikalstreben

Dabei wird die Brücke durch zwei durchgehende Längsträger getragen auf denen abgestützt durch Schwellen die Schienen entlang laufen, wie in der folgenden Abbildung 3-3 symbolisch durch die roten Striche verdeutlicht wird.

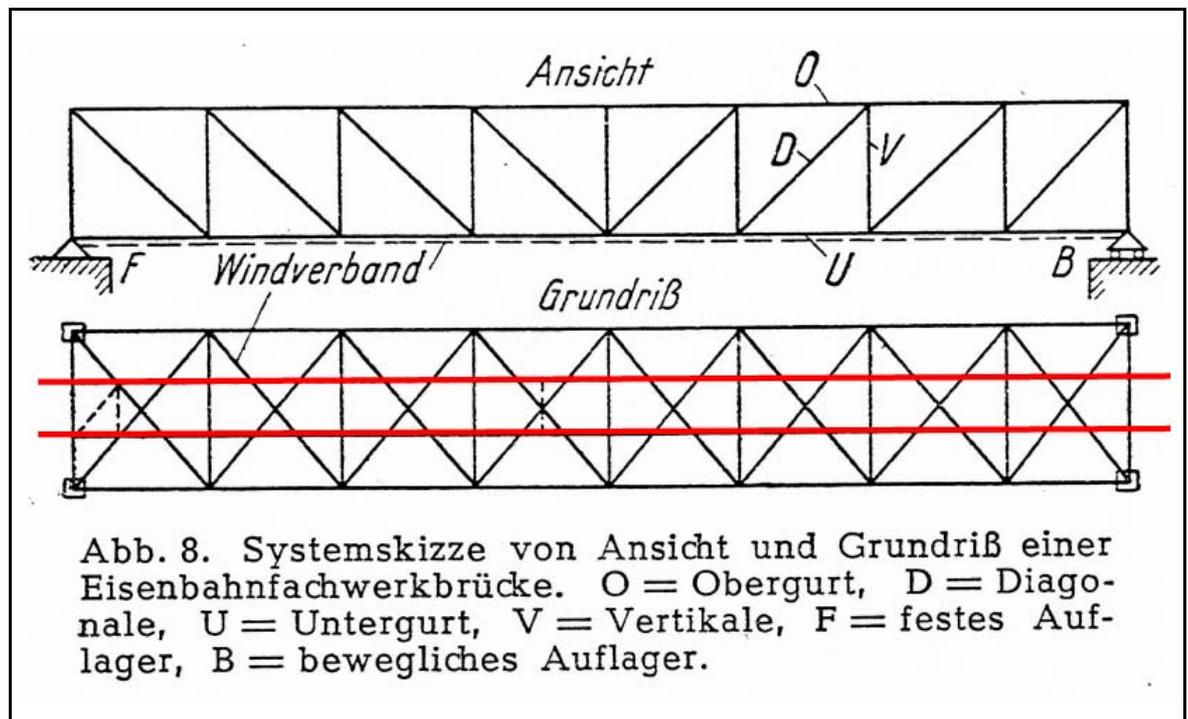


Abbildung 3-3: Skizze zum Verlauf von Längsträger und Schienen (rot) [29]

Bauformen

- Direkt befahrene Stahlbrücken
d.h. die Gleise sind direkt oder über Schwellen fix mit der Brückenkonstruktion verbunden
- Stahlgitterkonstruktion
- Stahlbrücken mit Schotterbett (z.B. mit bombierten Stahlblechwannen)
- Stahlbrücken mit Stahl- oder Betonfahrbahnplatten
- Stahltrog ohne und mit Schotterbett

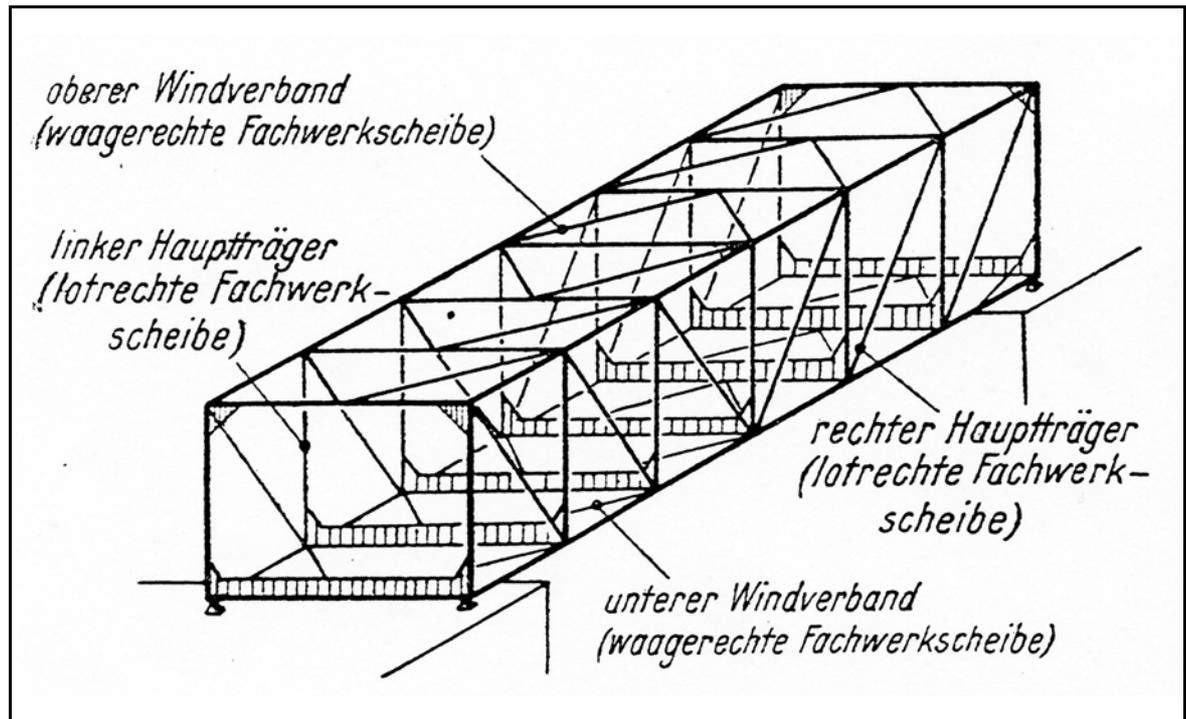


Abbildung 3-4: Konstruktionselemente einer Stahlfachwerkbrücke [29]

3.3 Ursachen des Brückenlärms – Anregung

Die Anregung der Brücke geschieht durch den Rad-Schiene-Kontakt. Auslöser dafür sind zum einen geometrische Inkontinuitäten wie Schienenstösse, Schienenauszüge, Riffelwellen sowie die Rad- und Schienenrauheit. Weiterhin sind Wechsel der Steifigkeit des Oberbaus durch die Lagerung der Schiene und die Schwellen als Auslöser für Schwingungsanregung zu nennen. Allgemeine Betrachtungen hierzu finden sich bei Heckl und Müller [1].

Im Folgenden werden die einzelnen Schallerzeugungs- bzw. Anregungsmechanismen genauer betrachtet.

3.3.1 Rollgeräusch

Das Rollgeräusch entsteht durch geometrische Abweichungen von der idealen Form von Rad und Schiene. Man unterscheidet folgende Abweichtungstypen:

- **Rad- und Schienenrauheit**
Wellenlänge von 0.5 – 20 cm, Fehler im μm -Bereich
- **Riffel**
Wellenlänge von 3 – 6 cm, Fehler in der Grössenordnung 0.2 mm
- **Schlupfwellen**
Wellenlänge von 8 – 30 cm, Fehler in der Grössenordnung 0.3 – 1 mm

3.3.2 Schwellenfachfrequenz

Ist der Oberbau als Schotteroberbau ausgeführt oder liegen die Schwellen direkt auf der Stahlkonstruktion der Brücke auf, bildet sich durch die regelmässige diskrete Lagerung der Schiene und den damit verbundenen Wechsel der Steifigkeit bei der Durchfahrt eines Schienenfahrzeugs eine Anregung aus, entsprechend folgender Gleichung:

$$f = v / l$$

Gleichung 3-1

f : Schwellenfachgrundfrequenz

v : Geschwindigkeit

l : Schwellenabstand

Beim typischen Schwellenabstand von 60 – 70 cm und Fahrgeschwindigkeiten von 40 – 300 km/h findet die Anregung im Frequenzbereich von 15 – 140 Hz statt.

3.3.3 Einzelanregung

An Schienenstössen tritt ein Lärm auf der sich einerseits als einzelner Impuls äussert, aber auch durch den Achsabstand innerhalb des Drehgestells zu tieffrequenten Anregungen der Strukturen führt. Bei einem typischen Achsabstand von 1,8 – 2,8 m im Drehgestell führt dies bei Fahrgeschwindigkeiten von 40 – 300 km/h zur Anregung von Frequenzen im Bereich von 4 – 46 Hz, die aber wegen der impulsförmigen Anregung nicht als Ton wahrgenommen werden.

Im Harmonoise-Projekt werden diese Stossstellen als normalisierte Rauheitspegel eingeführt, die in die gesamte effektive Rauheit einbezogen wird [17].

3.3.4 Polygonisierung der Räder und Flachstellen

Durch die sogenannten Polygonisierung der Räder bzw. durch Flachstellen kann es zu einer periodischen niederfrequenten Anregung kommen. Diese Anregung entspricht von der Art her der Anregung durch die Schwellenfachfrequenz (Polygonisierung) oder der periodischer Einzelanregungen (Flachstelle).

3.4 Unterschiede zwischen Brücken und freier Strecke

3.4.1 Abgrenzungen

Um Probleme in der Beurteilung der Sanierung möglichst frühzeitig auszuschliessen, gilt es, eine allenfalls beabsichtigte Nutzungsänderung zu erfassen, wie z.B. die Erhöhung der Nutzlast oder zusätzlichen Verkehr.

Häufig wird nicht nur die Brücke selbst, sondern auch das Gleis erneuert. Damit stellt sich die Problematik der Abgrenzung des Anteil der Sanierung der Brücke.

Noch zu klären ist der Einfluss der Brückenlänge, falls Sanierungsmethoden miteinander verglichen werden sollen.

Brücken haben die Funktion, darunter eine Öffnung zu bilden, um z.B. Strassenverkehr oder Wasser passieren zu lassen. Hiermit ergibt sich sofort die Frage wie sich die Lärmquellen gegenseitig abgrenzen lassen.

3.4.2 Schallabstrahlung

Berichte zeigen, dass Brücken nennenswert Schall unterhalb der Brücke abstrahlen; [6] und [8].

Falls die zu sanierende Brücke nicht in unmittelbarer Nähe einer Ortschaft ist, spielt die lokale Schallabstrahlung keine Rolle. Für die Berechnung der Schallausbreitung bzw. für Lärmkataster werden genügend genaue Eingangsdaten benötigt, die allenfalls das Erfassen der Schalleistung und die Charakteristik (Mono / Dipol, Linien / Punktquelle, etc.) erfordern.

Es wird angenommen, dass prioritär Stahlbrücken im Ortsbereich saniert werden. Damit liegt es auf der Hand, dass auch die Schallabstrahlung im unteren Bereich der Brücke beurteilt werden können muss.

Im Unterschied zu ebenem Terrain kann sich der Schall nicht nur nach oben und der Seite sondern auch nach unten ausbreiten, analog zur Einschränkung der Ausbreitung durch Lärmschutzwände, wie in Abbildung 3-5 (entnommen aus [22]) dargestellt. Die Wirkung von Lärmschutzwänden lässt erkennen, dass die Topographie in der Umgebung der Brücke einen hohen Einfluss auf die Schallausbreitung hat.

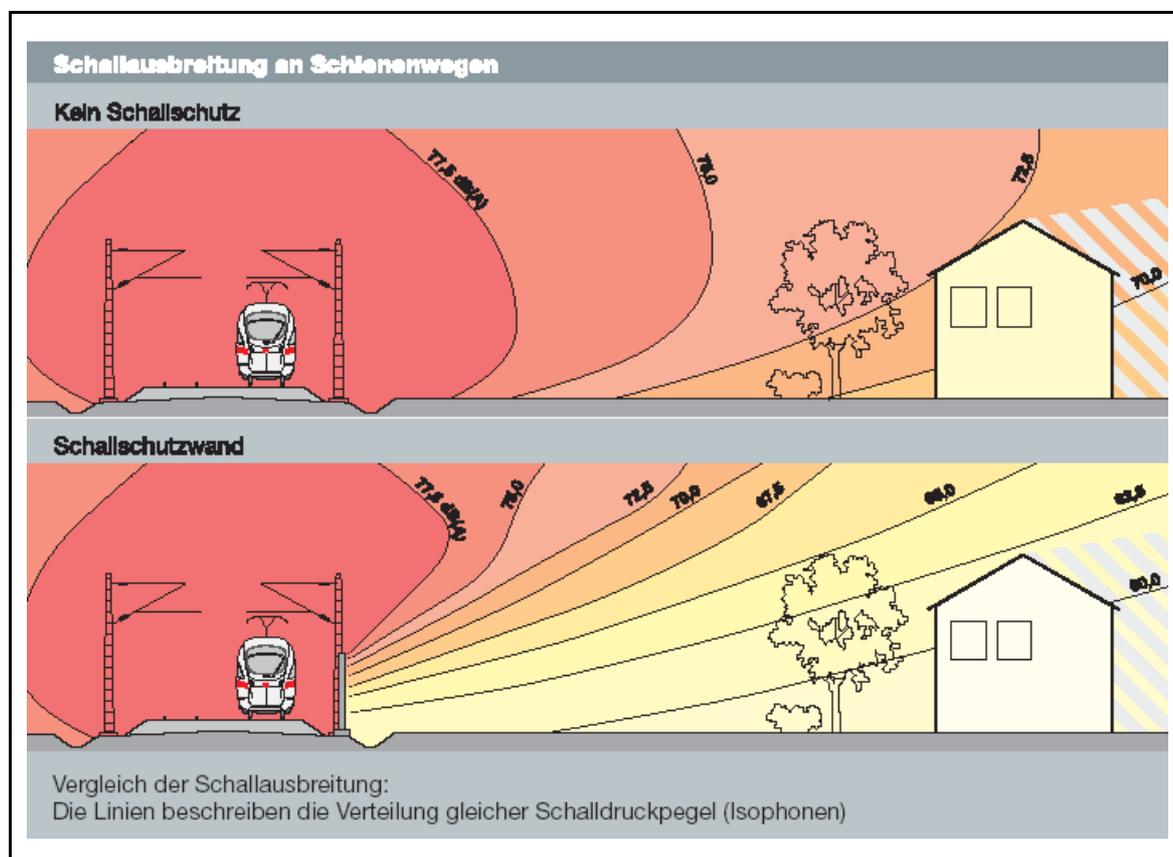


Abbildung 3-5: Schallausbreitung ohne und mit Schallschutzwand in ebenem Gelände

Wie dem Bericht zur Sanierung der ÖBB-Brücke in Leoben [23] zu entnehmen ist, ist die Pegelabnahme entfernungsabhängig. Im Nahbereich von kontinuierlicher Schienenlagerung und Lärmschutzwand beträgt die Reduktion höhenabhängig 9 dB oder mehr. Die Reduktion von 9 dB wurde in zwei Schritten erreicht, 6 dB durch Umbau auf Betontragplatte mit kontinuierlicher Schienenlagerung und 3 dB durch eine 2 m hohe Lärmschutzwand. Im mittleren Entfernungsbereich reduziert sich die Pegelabnahme auf 0 dB durch den Umbau und 3 dB durch die Lärmschutzwand. Es ist keine Geschwindigkeitsabhängigkeit der Reduktion im Bereich der untersuchten Geschwindigkeiten von 60 – 90 km/h erkennbar.

3.4.3 Bemerkungen

Im Rahmen der Definition einer Messmethode zur Beurteilung des Erfolgs einer Lärmsanierung müssen folgende Fragen beantwortet werden:

1. Wie viele Messstellen sind erforderlich und wo liegen diese in Bezug auf die Brücke?
 - a. Anzahl der Messstellen entlang Brücke zur Erfassung wesentlicher Schallanteile [18].
 - b. Lage der Messstelle lateral horizontal
 - c. Messhöhe über und unter SOK
 - d. Lage der Messstelle longitudinal horizontal
 - e. Sind Anzahl und Orte der Messstellen abhängig von der Brückenlänge?
2. Die Brücke wird durch das darüber fahrende Fahrzeug angeregt. Welche Randbedingungen müssen eingehalten werden?
 - a. Gibt es Einschränkungen hinsichtlich der Zuglänge bei gegebener Brückenlänge?
 - b. Muss eine bestimmte Anzahl Radsätze auf der Brücke sein?
 - c. Welche Art von Zügen soll als Anregung der Brücke verwendet werden?
 - d. Muss ein „Normzug“ definiert werden?
 - e. Mit welcher Geschwindigkeit muss/darf/soll der Zug die Brücke passieren?
3. Wie viele Messungen sollen durchgeführt werden?
4. Wie werden die Messungen ausgewertet?
 - a. Gibt es einen geeigneten Wert, der charakteristisch für die Brücke ist und ein „Ein-Wert-Ergebnis“ liefert?

3.4.4 Praktische Einschränkungen

Problematik der Montage

Einerseits ist die Platzierung der Mikrofone durch die Begehbarkeit der Brücke begrenzt, andererseits ist aus Sicherheitsgründen (Fahrleitung) die Länge von Stangen und Gerüstelementen limitiert, um Mikrofone von der Brücke aus zu montieren.

Eine einfache Lösung wäre es, die Mikrofone von der Umgebung aus zu positionieren. Dies gelingt aber auf Grund der örtlichen Randbedingungen (Höhe der Brücke, kein freier fester Standort unterhalb der Brücke, etc.) häufig nicht. Eine weitere Lösung für die horizontale und vertikale Entfernung wären gespannte Seile an denen die Mikrofone befestigt sind bzw. parallel zum Gleis in die longitudinale Position verschoben werden können. Dies ist nur jedoch nur bei relativ kurzen Brücken möglich.

4 Stand der Technik

Es ist aus Gründen der Vergleichbarkeit der Ergebnisse und aus Gründen der Praktikabilität sinnvoll, wenn das zu entwickelnde Messkonzept sich so weit als möglich an existierenden Normenwerken orientiert. Im Folgenden werden daher die bekannten Normen bezüglich des Lärms von Schienenfahrzeugen auf ihre Anwendbarkeit auf das Problem des Brückenlärms hin untersucht.

Es werden nur die Abschnitte der Norm betrachtet, die für das Problem „Messung des Brückenlärms“ speziell interessant sind. Ein Schwerpunkt der Normen ist auch die Beschreibung der Messbedingungen. Diese Abschnitte können als Richtlinie für die Definition entsprechender Randbedingungen bei der Messung des Brückenlärms verwendet werden. Sie werden im Folgenden aber nicht genauer betrachtet.

4.1 EN ISO 3095:2005

Die für Lärmmessungen bei Schienenfahrzeugen angewendete EN ISO 3095 [9] ist eine Messnorm zur Beurteilung von spurgebundenen Fahrzeugen — nicht zur Beurteilung der Infrastrukturanlagen.

Gleichwohl schlägt sie zur Messung auf Brücken die übliche laterale Messposition (7.5 m von Gleismitte in 1.2 m Höhe über Schienenoberkante) in der Brückenmitte vor. Weiterhin werden Messpositionen in 25, 50 und 100 m Entfernung in einer Höhe von 3.5 m über dem Boden empfohlen. Die Mikrofonposition soll in Bezug zur Schienenoberkante sowie zur Brücke und deren Länge erfasst werden.

Über die Methode der Auswertung werden jedoch keinerlei Aussagen gemacht.

4.2 prEN ISO 3095:2001

Die prEN ISO 3095:2001 [10] enthielt noch einige Abschnitte, die in der finalen Norm fortgelassen worden sind.

Zum Einen enthält prEN ISO 3095:2001, [10] Abschnitt 6.2.1, eine Angabe der Mikrofonposition, die von der Zuglänge abhängig ist. Diese ist bei einer Zuglänge unter 50 Metern in einem Abstand von 7.5 m von der Gleismitte in 1.2 m Höhe und bei Zuglängen über 50 Metern in einem Abstand von 25 m von der Gleismitte in 3.5 m Höhe.

Zum Anderen enthält der Normentwurf prEN ISO 3095:2001 [10] einen nicht normativen Anhang B mit dem Titel: "Mögliche Vorgehensweise zur Unterscheidung des vom Fahrzeug und vom Fahrweg verursachten Geräuschpegels". Darin wird die Trennung von Fahrzeug und Fahrweggeräusch durch die Nutzung von leisen Bezugsfahrzeugen genannt, was für den Fall der Brückensanierung interessant sein kann, da es hier auch um die Identifizierung des durch die Brücke abgestrahlten Lärms geht.

Der Grundgedanke dieses Ansatzes ist, dass der Gesamtschalldruckpegel sich aus der energetischen Summe der Anteile von Fahrzeug und Fahrweg ergibt. Wenn man also den

Anteil des Fahrwegs kennt, dann kann der Anteil des Fahrzeugs rechnerisch bestimmt werden.

Hierzu wird zunächst mit sehr leisen Fahrzeugen die Bezugsfunktion für die Strecke bestimmt, die auch die Schnelle des Schienenkopfes berücksichtigt. Durch die Kenntnis dieser Bezugsfunktion und die Messung von Gesamtpegel und Schienenkopfschnelle kann dann der Gesamtpegel in den Fahrweganteil und den Fahrzeuganteil separiert werden.

4.3 Technische Spezifikation für Interoperabilität (TSI) Noise

Die aktuellen TSI Richtlinien, die sich mit dem Schienenfahrzeuglärm beschäftigen [11], gehen nicht auf Brücken ein, da sie nur auf die Fahrzeuge ausgerichtet sind. Ausserdem wird in der TSI weitestgehend auf die vorgenannte prEN ISO 3095:2001 verwiesen, so dass das dort Gesagte gilt.

4.4 Holländisches Rechenmodell im Oktavbereich

Das Holländische Rechenmodell "Reken- en Meetvoorschriften Railverkeerslawaaï", das überarbeitet wurde und nun in der Fassung von 2004 vorliegt, enthält ein Messprotokoll für Stahlbrücken, um den Brückenlärm zu quantifizieren [12].

Die Methode basiert auf dem Vergleich einer synchronen Vergleichsmessung mit demselben Rollmaterial auf der Brücke und auf der freien Strecke. Aus der Pegeldifferenz kann man die Zunahme des Geräusches auf der Brücke ableiten. Für das Rechenmodell wird die Differenz dann aber noch auf eine Rollgeräuschzunahme und eine Brückenabstrahlung aufgeteilt. Für diese Verteilung liegt ein Pauschalfilter vor.

Für die Ermittlung des horizontalen Abstandes zwischen Gleis und Mikrofon sollen die folgenden Punkte betrachtet werden (Auszüge aus der Übersetzung von Paul de Vos [13]):

- Auf Grund der Nahfeldeffekte soll der Messabstand mindestens 1.5 D der Brückenachse betragen, wobei D eine für die Schallabstrahlung relevante Abmessung im Querschnitt der Brücke ist, zum Beispiel die Plattenbreite der Brückendecke oder die Breite der Brücke.
- Auf Grund der totalen Öffnungswinkel soll der Messabstand höchstens die Hälfte betragen des Abstandes vom Messquerschnitt bis zu jedem der Brückendenen, gemessen entlang der Brücke.
- Der Messabstand sollte mindestens 7,5 m aus der Achse des nächstgelegenen Gleises betragen. Bei Brücken kürzer als 30 m wird also in der Mitte der Brücke gemessen, wobei die beschränkte Brückenlänge in Kauf genommen wird.
- Um einen zu großen Einfluss der Bodeneffekte auf der freien Strecke zu verhindern, wird eine Messhöhe von 1,5 m über SOK empfohlen bei einem Messabstand von 7.5 m bis zur Gleisachse. Bei einem Messabstand von 25 m wird eine Höhe von 3,5 m empfohlen.

- Bei Messabständen die dazwischen liegen wird zwischen den beiden Messhöhen interpoliert. Das bedeutet dass die Messhöhe so angepasst wird, dass die vertikale Sichtwinkel zur Schienenoberkante in der Größenordnung von 10 Grad liegt.
- In der Nähe der Brücke wird in zwei Höhen gemessen: +h über SOK und –h über SOK, wobei die niedrige Messhöhe mindestens 1 m oberhalb der in diesem Querschnitt gefundenen Bodenfläche liegt. Die Ergebnisse dieser beiden Messungen werden gemittelt.
- Wenn die Schienenrauhigkeit auf der Brücke signifikant höher ist als der Referenzwert, dann wird unterstellt dass dies für die Brücke typisch und repräsentativ ist, es sei denn es gibt klare Andeutungen für einen anderen Grund. Im allgemeinen sollte der Brückenzuschlag also nicht für die hohe Schienenrauheit korrigiert werden. Der Brückenzuschlag ist also zum Teil eine Folge der Brückenkonstruktion und zum anderen Teil der hohen Schienenrauhigkeit.
- Für alle Messorte wird pro Zugvorbeifahrt pro Zugkategorie der äquivalente Schallpegel ermittelt indem gemittelt wird über den Zeitraum wo der Pegel höher ist als der Maximalpegel minus 3 dB. der Brückenzuschlag pro Kategorie $\Delta L_{i,Brücke,i}$ erfolgt aus der linear über mindestens 5 Vorbeifahrten gemittelten Differenz zwischen den beiden Messorten:

$$\Delta L_{i,Brücke,i,j} = \sum_k L_{Aeq,Br,i,j,k} - L_{Aeq,FS,i,j,k} \quad \text{Gleichung 4-1}$$

mit

i Oktavbandindex

j Zugkategorieindex

k Messung

$L_{Aeq,Br,i,j,k}$ Messergebnis bei der Brücke

$L_{Aeq,FS,i,j,k}$ Messergebnis bei der freien Strecke

4.5 Harmonoise-Projekt

Im Harmonoise-Projekt [16] zur Beurteilung der horizontalen Richtungsabhängigkeit der Schallabstrahlung eines Fahrzeugs gibt es folgende Messempfehlung:

- Das Prinzip basiert darauf, eine genügend grosse Entfernung zwischen Sender und Empfänger einzuhalten, um eine gute Annäherung für eine Kugelquelle zu erhalten, aber kurz genug um noch ein gutes Signal-Rausch-Verhältnis zu gewährleisten.
- Für kurze Fahrzeuge wird eine Messentfernung von 25 m empfohlen.
- Bei langen Fahrzeugen und Zügen werden zwei Positionen vorgegeben. Eine in einer Entfernung von des 1,5-fachen der Zuglänge, woraus sich ein Öffnungswinkel von über 45° ergibt. Die zweite Position ist in einer Entfernung der 3-fachen Zuglänge woraus sich ein Öffnungswinkel von weniger als 45° ergibt.
- Die Höhe ist für alle Positionen dieselbe, in mindestens der halben Fahrzeughöhe und 4 – 10 m über Grund.

Diese Gedanken können analog für Brücken angewendet werden.

4.6 Beurteilung Normenstand

Auch wenn die EN ISO 3095:2005 (siehe 4.1) eine Fahrzeugnorm ist, schlägt sie zumindest Messpositionen vor. Realistisch deckt die Norm den Fall des Brückenzuschlags aber nicht ab. Einerseits da der Einfluss der Fahrzeuge offen bleibt und andererseits die Ergebnisse nicht mit freier Strecke verglichen werden können, da in der Norm eine flache und reflexionsarme Umgebung angenommen wird.

Die Beurteilung einer Brücke anhand des Anhangs B der prEN ISO 3095:2001 (siehe Abschnitt 4.2) ist als solche nicht möglich, da das Modell nur für normale Fahrwege angepasst ist.

Es kann jedoch hilfreich sein, wenn man dieses Konzept um einen weiteren Term, den Brückenanteil, erweitert. Das TWINS-Modell („Track **W**heel Interaction **N**oise **S**oftware“) hat den Gleisanteil in Schienen- und Schwellenanteil aufgeteilt [34]. Genauso ist es möglich, den gesamten Unterbau im Schwellenanteil darzustellen, wenn man die Anteile genügend separieren kann. Genau hier wird deutlich, dass die praktische Umsetzung aufwändig wird. Man benötigt unter anderem einen Referenzzug, dessen Wagen sehr leise sind und dessen Länge deutlich länger als die Brücke ist.

Die RMVR (siehe 4.4) nähert sich dem Problem vom theoretischen Ansatz her, fordert physikalisch motivierte Messpositionen und eignet sich daher zur Beurteilung des Brückenlärm deutlich besser.

Im Harmonoise-Projekt wird insbesondere auf die korrekte Wahl der Messentfernung eingegangen. Übertragen auf den Fall der Brücke bedeuten die dort festgehaltenen Erkenntnisse:

- Die Messentfernung muss gross genug sein, um die Brücke als Punktquelle zu sehen
- Die Messentfernung muss klein genug sein, um ein vernünftiges Signal-Rausch-Verhältnis zu gewährleisten.

5 Entwicklung des Messkonzepts

5.1 Genauigkeitsanforderungen

Eine wesentliche Eingangsgrösse für die Entwicklung eines Messverfahrens, ist die Genauigkeit, mit der die Zielgrösse gemessen werden soll. Die Anforderungen an die Genauigkeit der Messung ergeben sich daher aus der erwarteten Pegelreduktion, die mit dem zu definierenden Verfahren nachgewiesen werden soll.

Die erwartete Pegelreduktion liegt für die beiden Beispielbrücken bei den gewählten Sanierungsmassnahmen bei ca. 3 dB und kann bei anderen Brücken bzw. Sanierungsmassnahmen (siehe Abschnitt 2.3) bis zu 15 dB betragen.

Um ein vertrauenswürdiges Ergebnis zu erhalten, genügt es zumindest von der Seite der eingesetzten Geräte, wenn Geräte der Klasse 1 oder 0 nach IEC 651 eingesetzt werden. Weiterhin muss die Genauigkeit jedoch auch durch das zu definierende Messkonzept gewährleistet sein, was insbesondere bei kleinen erwarteten Pegelreduktionen oft nicht mit vertretbarem Aufwand möglich ist. Auf Grund der zu erwartenden Pegelreduktion ist ein durch die Messmethode bedingter Fehler von weniger als 1 dB anzustreben.

5.2 Konzept zur Ermittlung eines Sanierungswerts

5.2.1 Einleitender Kommentar

Ziel der Messungen ist es, zu ermitteln, wie stark der Schalldruckpegel durch die Brückensanierung gesenkt werden konnte. Grundsätzlich ist hierzu immer eine Differenz zwischen einer „Vorher“- und einer „Nachher“-Messung zu bilden. Für diese beiden Messungen sind die folgenden zwei Ansätze denkbar.

- **Absolutmessung:**

Durch Messung unter kontrollierten Bedingungen wird ein absoluter Wert des „Brückengeräuschs“ ermittelt. Analog zum Vorgehen bei Fahrzeugmessungen, bei denen u. a. Schientyp, Schwellentyp, Schienenrauheit, Gelände, etc. vorgegeben sind, müssten für diesen Fall u. a. Fahrzeugtyp, Radrauhigkeit, etc. vorgegeben sein.

- **Relativmessung:**

Es wird eine Differenz zwischen dem Lärm auf der Brücke und dem Lärm auf freier Strecke gemessen [6]. In diesem Fall sind viele Parameter wie Schientyp und Schienenzustand vergleichbar. Die Messpunkte sind möglichst identisch und befinden sich z. B. in einer Entfernung von 25 m von der Gleismitte 3.5 m oberhalb der Schienenoberkante. Gemessen werden alle Züge an beiden Positionen. Die Auswertung erfolgt getrennt nach Zugtyp und Geschwindigkeit. Die Differenz der unbewerteten Spektren liefert das Brückendröhnen.

Beide Methoden können prinzipiell für die Ermittlung eines Sanierungswerts verwendet werden. Die Ergebnisse zweier Absolutmessungen können direkt miteinander verglichen werden, bei Relativmessungen werden die beiden Differenzen zwischen freier Strecke und Brücke miteinander verglichen.

5.2.2 Absolutmessung

Für die Verwendung der Absolutmessung zur Ermittlung eines Sanierungswertes ist es von entscheidender Bedeutung, dass nur die bewusst veränderten Parameter, d. h. die Brückenkonstruktion, auch tatsächlich von einer Messung zur anderen verändert worden sind. Die Anregungsquelle darf daher nicht verändert werden. Es müssen daher möglichst identische Messzüge gemessen werden. Der Messort sollte ebenfalls vor und nach dem Umbau der selbe sein. Dies sollte auch bei der Messung vor dem Umbau berücksichtigt werden.

Die Bereitstellung des identischen Rollmaterials für beide Messungen ist nur sehr schwer möglich, da im Regelfall eine grosse Zeitspanne zwischen der Messung vor dem Umbau und der Messung nach dem Umbau liegen.

5.2.3 Relativmessung Brücke – Strecke

Dieser Vergleich dient dazu, die Eigenschaften der Brücke zu quantifizieren. Um möglichst ähnliche Parameter zu erhalten, wird häufig die Brücke zu einer angrenzenden normalen Strecke verglichen [6]. Dann sind häufig Oberbau und Schienenzustand vergleichbar.

Die Voraussetzungen des identischen Rollmaterials und der zeitgleichen Messung, um globale Messparameter auszuschliessen, sind gegeben. Da das Umfeld und damit die Schallausbreitung an den zwei Orten unterschiedlich ist, ist dessen Einfluss unbekannt. Dieser kann allenfalls mit Normschallquellen beziffert werden.

Der Bereich der möglichen Aussage beschränkt sich auf den Brückenzuschlag gegenüber einer freien Strecke. Eingeschränkt wird die Aussagekraft, wenn es betriebliche Belange nicht ermöglichen, die selbe Geschwindigkeit an den beiden Orten zu fahren.

5.2.4 Bewertung der Ansätze

Bei der Relativmessung Brücke – Strecke sind die Voraussetzungen an die Messung (vor allem das Rollmaterial) gering. Die Aussage ist allerdings zunächst auf einen Vergleichswert zwischen der Brücke und der freien Strecke beschränkt.

Andererseits sind die Bedingungen für eine Absolutmessung kaum realisierbar, insbesondere da nicht das gleiche Fahrzeug im gleichen Zustand zweimal in beträchtlichem zeitlichen Abstand bereitgestellt werden kann. Z. B. wäre die Radrauheit sicher nicht bei beiden Messungen gleich.

Die Lösung dieses Problems besteht aus einer Kombination beider Messmethoden und einer zusätzlichen statistischen Absicherung. Als grundsätzlichen Ansatz dient die Relativmessung. Sie ist mit ihren relativ hohen Unsicherheiten allein nicht tauglich

Insbesondere ist unsicher, ob der Vergleichswert zwischen Brücke und freier Strecke für unterschiedliche Fahrzeuge stets gleich ist. Dieser Unsicherheit wird zum Einen mit einer möglichst guten – aber machbaren – Definition von Randbedingungen und zum Anderen mit der Anwendung statistischer Methoden für eine breitere Absicherung begegnet.

5.3 Randbedingungen der Messung

5.3.1 Schienenzustand

EN ISO 3095:2005 sieht eine klar definierte Schienenrauheit vor, um ein Fahrzeug messtechnisch bewerten zu können. Bei der Messung ist die Schienenrauheit jedoch eine Eigenschaft des Messobjekts „Brücke“, die sich aus dem Zusammenwirken der die Brücke überfahrenden Züge, des Gleises und der Brücke ergibt. Analog zu dieser Betrachtungsweise werden z. B. auch Schlupfwellen als Eigenschaft des Systems „Bogen“ betrachtet.

Diese Betrachtungsweise bedingt, dass nach der Sanierung der Brücke eine längere Phase des üblichen Betriebs vor der Messung stattfindet, damit sich die Schienenrauheit wieder in einen quasistationären Zustand entwickeln kann.

5.3.2 Messentfernung

So wie es bei Fahrzeugmessungen gewisse Festlegungen für die Messentfernung gibt, ist es auch sinnvoll ähnliche Festlegungen bei der Messung einer Brücke zu treffen. Diese Festlegungen sollten in erster Linie physikalisch motiviert sein. Zielgröße ist, die geforderte Messgenauigkeit des Messergebnisses zu erreichen.

Die wesentlichen Parameter für die korrekte Wahl der Messentfernung sind dabei

- die Brückenlänge und
- der Umgebungsgeräuschpegel, der bezüglich des interessierenden Pegels ein „Rauschen“ darstellt

Grundlegende Überlegungen

In Abbildung 5-1 ist der prinzipielle Schalldruckpegelverlauf, wie er bei einer stationären Messung in der Nähe einer Brücke erwartet wird, dargestellt. Im ersten Bereich steigt das Umgebungsgeräusch langsam mit der Annäherung des Zuges an. Danach folgt der Bereich in der das Rollgeräusch des an die Brücke angrenzenden Abschnitts dominiert. Beim Auffahren auf die Brücke mit den ersten Rädern steigt der Pegel stark an und bleibt dann weitgehend konstant solange sich der Zug auf der Brücke befindet. Beim Verlassen der Brücke gilt das Gesagte in umgekehrter Reihenfolge.

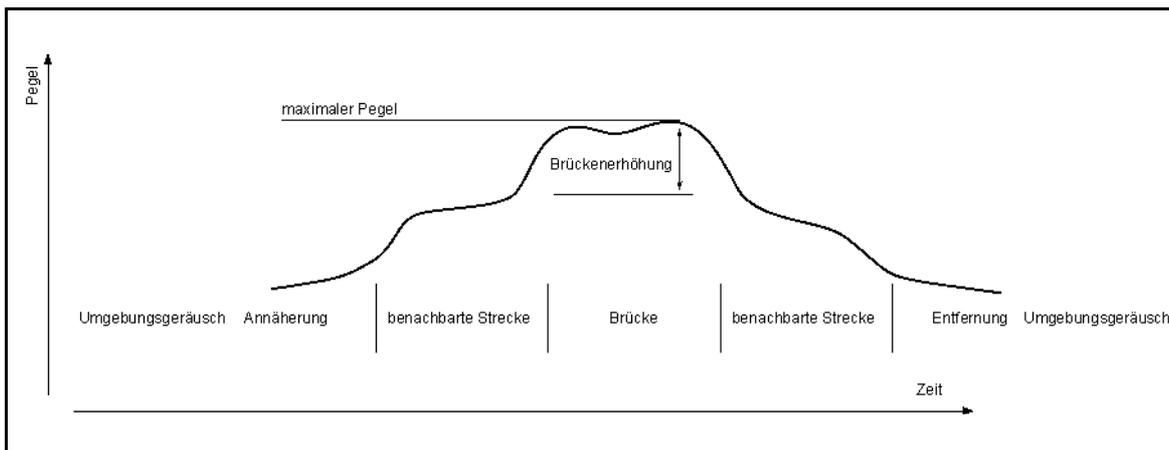


Abbildung 5-1: prinzipieller Schalldruckpegelverlauf in der Nähe einer Stahlbrücke

Die Brücke als Linien- oder Punktquelle

Es stellt sich die Frage, ob eine Brücke als endlich lange Linienquelle oder als Punktquelle betrachtet werden muss. Dies lässt sich gut an Hand der Pegel in verschiedenen Abständen beurteilen.

Abbildung 5-2 zeigt den Pegelverlauf eines Zuges auf freier Strecke in verschiedenen Messabständen. Es ist gut erkennbar, dass der Maximalpegel bei steigendem Abstand fällt und der Pegelverlauf zunehmend „flacher“ wird.

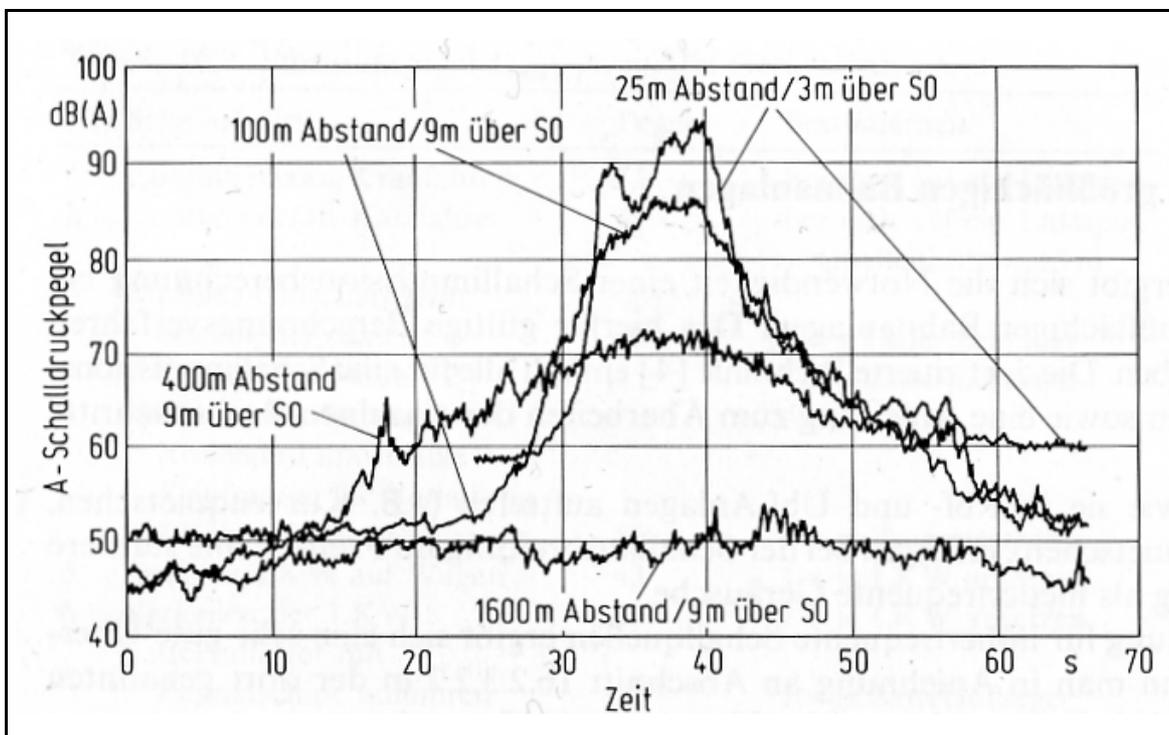


Abbildung 5-2: Schalldruckpegelverlauf bei verschiedenen Messabständen, aus [1] Bild 16.33; die Länge des Personenzuges beträgt ca. 350 m, bei einer Geschwindigkeit von 140 km/h.

Bei der Messung, deren Ergebnis in Abbildung 5-2 dargestellt ist, wurde der Messabstand jeweils vervierfacht, was bei einer konventionellen Annahme einer Punktquelle eine Reduktion des Pegels um 12 dB, bei einer Linienquelle um 6 dB bedeutet.

Aus der obigen Abbildung ergeben sich folgende Werte:

- Abstandsvergrößerung von 25 auf 100 m: Pegelreduktion um 8 dB
- Abstandsvergrößerung von 100 auf 400 m: Pegelreduktion um 14 dB

Damit kann man sagen, dass im behandelten Fall im Bereich bis 100m die Linienquellen-Charakteristik überwiegt. Im Bereich über 100m überwiegt dann die Punktquellen-Charakteristik. Die Pegelreduktionen sind jedoch um 2 dB höher als erwartet.

Dies deckt sich mit Angaben von Walker [28], der eine typische Reduktion des Pegel um 20 dB bei einer Abstandsvergrößerung von 25 m auf 200 m festgestellt hat.

Brücken

Für die Ermittlung des Sanierungswerts einer Brücke muss der von der Brücke erzeugte Lärm vor und nach der Sanierung gemessen werden. Die Abstrahlcharakteristik einer Brücke kann durch die Sanierung jedoch auch ändern. Beispielsweise kann durch eine Unterteilung einer Brücke in Segmente die Abstrahlcharakteristik ändern.

Um solche Einflüsse zu verhindern, sollte weit genug entfernt von der Brücke gemessen werden, da in genügend grosser Entfernung die Brücke nur noch als Punktquelle wahrgenommen wird und damit das Abstrahlverhalten nicht mehr erkennbar ist.

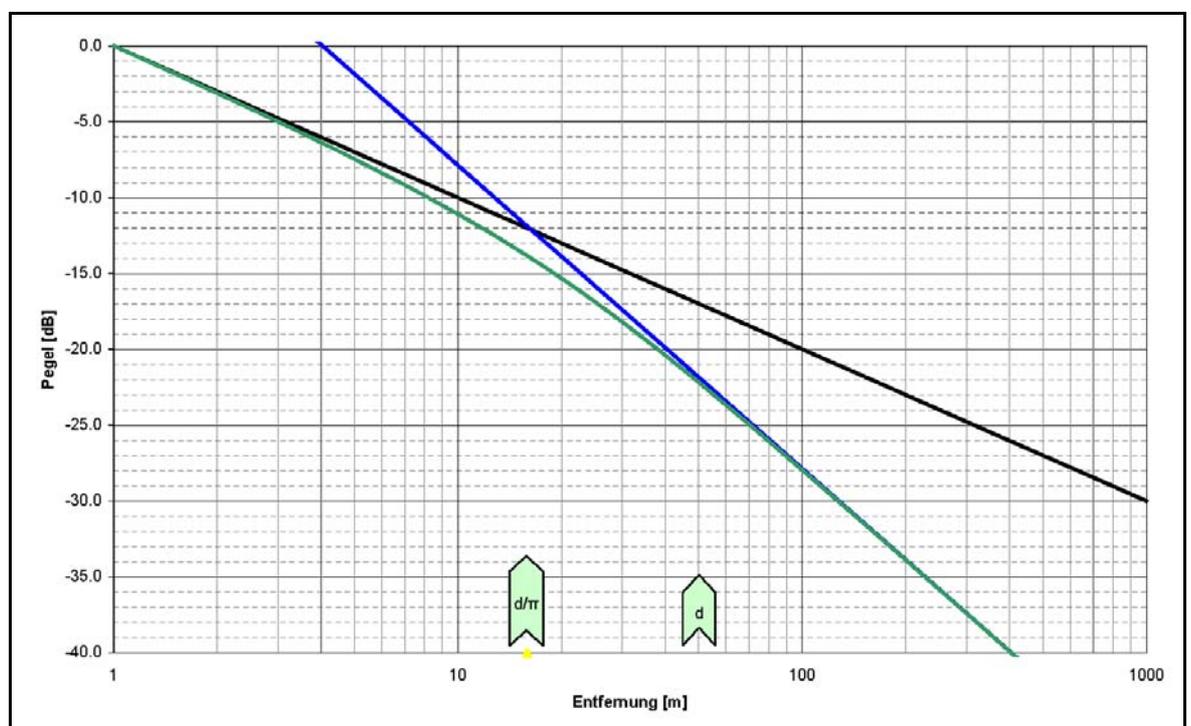


Abbildung 5-3: Pegelverlauf einer Linienquelle (schwarz), einer Kugelquelle (blau) und einer $d = 50$ m langen Linienquelle (grün) in Funktion des Betrachtungsabstandes.

Um den korrekten Messabstand für Brücken abschätzen zu können, wird die Brücke in erster Näherung als endliche homogene Linienquelle modelliert und der Pegelverlauf wird

mit dem einer reinen Linien- und einer reinen Kugelquelle verglichen. In der folgenden Abbildung 5-3 wurde die Brücke mit einer Länge von $d = 50$ m angesetzt, die Abszisse ist die Messentfernung in m.

Es zeigt sich, dass die Brücke ab einer Messentfernung von etwa dem 0.8fachen der Brückenlänge (hier 40 m) als Punktquelle wahrgenommen wird. Der dabei gemachte Fehler liegt unter 0.5 dB.

Wird die Brücke als Linienquelle aufgefasst, dann würde es ausreichen, an einem beliebigen Punkt entlang der Brücke zu messen. Da aber nicht davon ausgegangen werden kann, dass eine Brücke eine Linienquelle mit konstanter Quellenleistung entlang der Linie ist, wären mehrere Messpositionen entlang der Brücke notwendig. Vor allem ist nicht davon auszugehen, dass die lokalen dominanten Quellen vor und nach dem Umbau an derselben Position anzutreffen sind. Es ist zu erwarten, dass sich das spektrale Verhalten der Abstrahlung, und hier vor allem die Abstrahlung des tieffrequenten Schallanteils, lokal ändert.

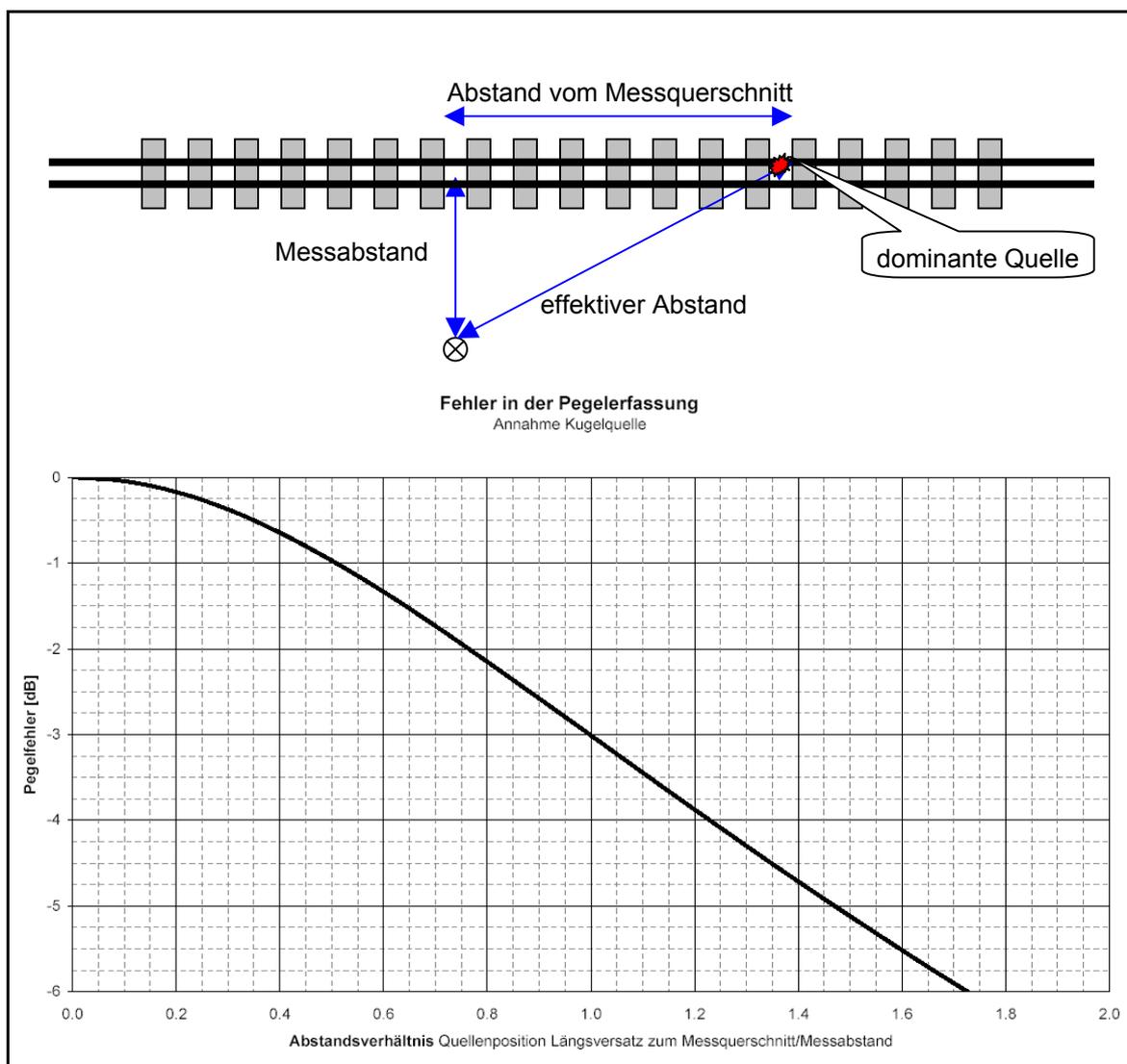


Abbildung 5-4: Fehler bei der Erfassung des Schalldruckpegels, wenn sich die Quelle nicht senkrecht zum Messmikrofon befindet

Es erfolgt daher eine Abschätzung des erforderlichen Messabstands zur Brücke, um den Einfluss einzelner lokaler Schallquellen zu begrenzen. Es wird hierzu der Extremfall einer einzelnen Punktquelle auf der Brücke betrachtet. Der effektive Abstand der Punktquelle zum Mikrofon, das sich im Messquerschnitt befindet, ist grösser als der Messabstand vom Mikrofon zum Gleis. Mit steigender Entfernung der Quelle vom Messquerschnitt reduziert sich der gemessene Pegel (siehe Abbildung 5-4).

Der Zusammenhang zwischen dem Abstandsverhältnis (Messabstand bezogen auf den Abstand zum Messquerschnitt) und die daraus resultierenden Pegelreduktion ist in Abbildung 5-4 für eine dominante Punktquelle dargestellt. Man erkennt, dass bei einem Abstandsverhältnis von 1 der Fehler bei 3 dB liegt. D. h. wenn eine Brücke von 100 m Länge vorliegt und man in der Brückenmitte in 50 m Entfernung misst, würde eine dominante Lärmquelle am Ende der Brücke am Messpunkt 3 dB leiser erscheinen als wenn diese in der Mitte der Brücke wäre.

Für die folgende Betrachtung wird ein einfacher Modellansatz gemacht. Es wird eine Punktquelle betrachtet, die eine konstante Lautstärke hat. Diese wird von einem Brückenende zum anderen bewegt. Die Messposition befindet sich in Längsrichtung in der Brückenmitte in einer Entfernung vom x -fachen der Brückenlänge.

Es ist anschaulich, dass die gemessene Lautstärke der Quelle am Brückenende niedriger ist als die gemessene Lautstärke in Brückenmitte. Die Differenz zwischen den beiden Messungen wird als Fehlerband betrachtet. Gesucht ist nun die Entfernung zwischen Brücke und Messpunkt, bei der das Fehlerband nicht grösser wird als ± 0.5 dB, also 1 dB (siehe Abschnitt 5.1).

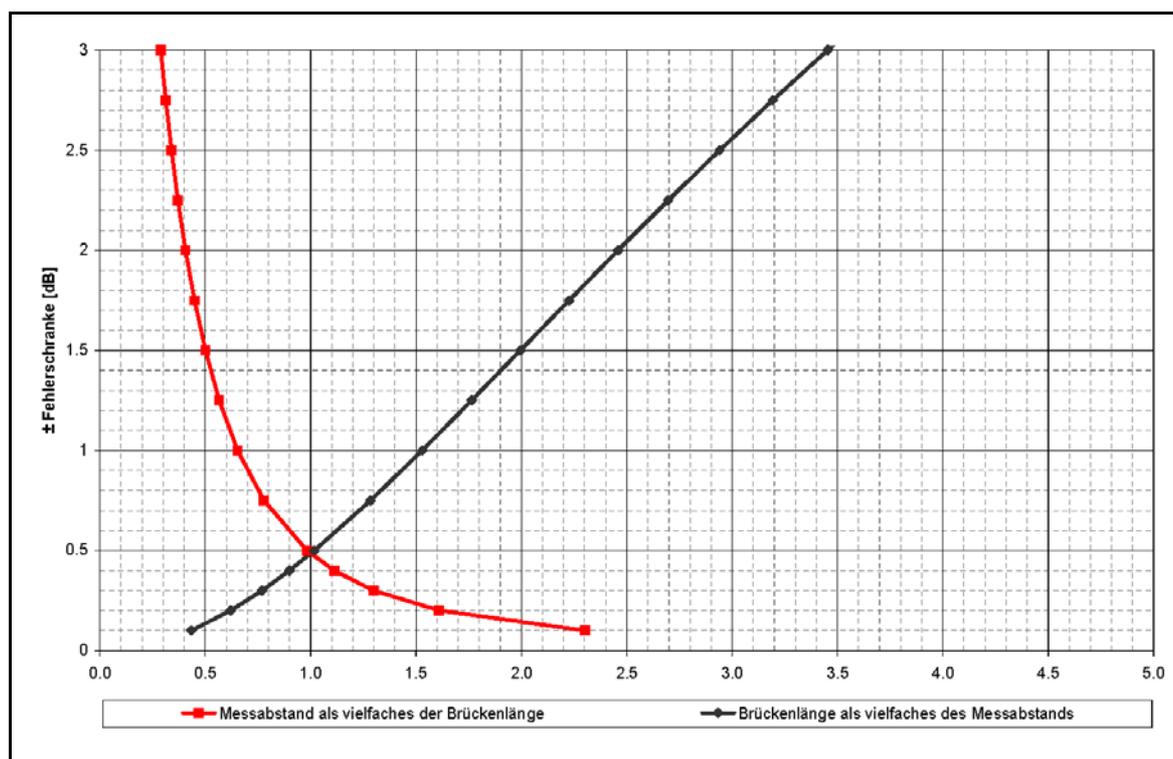


Abbildung 5-5: Fehlerband in Abhängigkeit von den Verhältnissen Messabstand zu Brückenlänge und umgekehrt auf der Basis einer Punktquelle die an der Brücke entlang geführt wird.

In Abbildung 5-5 ist dieser Zusammenhang dargestellt. Man erkennt, dass für einen Fehler von ± 0.5 dB der Messabstand mindestens gleich der Brückenlänge sein muss. Grössere Messabstände sind zulässig. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass der Signal-Rausch-Abstand nicht zu klein wird (siehe hierzu weiter unten).

Sollte die Messposition in Brückenmitte in der nötigen Entfernung nicht realisierbar sein, so soll die aktuelle Situation anhand der Abbildung 5-3 abgeschätzt werden und es sollte an beiden Brückenenden gemessen werden.

Nahfeld einer Brücke

Im Nahfeld eines lärmabstrahlenden Objekts kann die Lärmquelle mit dem Druckpegel nicht mehr beschrieben werden. Eine Messung in diesem Bereich ist daher nicht sinnvoll. Der Übergang vom Nahfeld in das Fernfeld ist frequenzabhängig und kann mit $r = \lambda / 2\pi$ abgeschätzt werden. Für praktische Anwendungen reicht die Abschätzung $r > 50/f$. Für den sinnvollerweise zu betrachtenden Bereich über 20 Hz ergibt sich damit $r > 2.5$ m. Der Messabstand muss daher in jedem Fall grösser als 2.5 m sein.

Das heisst diese Bedingung wird im Fall einer Brücke nie relevant sein.

Longitudinale Entfernung

Es ist immer eine Messposition in Brückenlängsmittle vorzuziehen, da sich die Steifigkeiten am Übergang von der Brücke auf den normalen Oberbau ändern und zudem eventuelle Schienenauszugsvorrichtungen eine Störquelle darstellen können.

Je nach Umgebung, Messentfernung, Brückenhöhe, etc. muss ein Kompromiss gefunden werden.

Minimale Entfernung auf Grund der Charakteristik des Geräusch vorbeifahrender Züge

Das im Abschnitt 5.2 vorgestellte grundsätzliche Messkonzept sieht vor, dass der Vergleich zwischen dem „Vorher“- und dem „Nachher“-Zustand der Brücke über den Vergleich zweier Lärmmessungen der Brücke mit gleichzeitig durchgeführten Lärmmessungen auf der freien Strecke erfolgt. So wie auf der Brücke die Messentfernung dadurch festgelegt wird, dass die Brücke als Punktquelle wahrgenommen wird, muss auch bei der Vergleichsmessung auf freier Strecke ein möglichst gleichmässiger Pegelverlauf bei der Messung angestrebt werden. Dazu ist es sinnvoll, dass auch der Zug nur noch als Punktquelle wahrgenommen wird. Gleichzeitig ist anzustreben, dass die Messposition auf der Brücke und auf freier Strecke möglichst ähnlich gewählt werden sollte.

Abbildung 5-6 zeigt, dass bei der Messung von Zügen in geringem Messabstand die einzelnen Drehgestelle noch als einzelne Lärmquellen wahrgenommen werden.

Wenn man sich weiter vom Zug entfernt, wird das Geräusch homogen und der Zug wird als Linienquelle wahrgenommen. Wie aus Abbildung 5-6 ersichtlich ist dies bei ca. 25 m der Fall. Entfernt man sich noch weiter, wird der Zug als Punktquelle wahrgenommen.

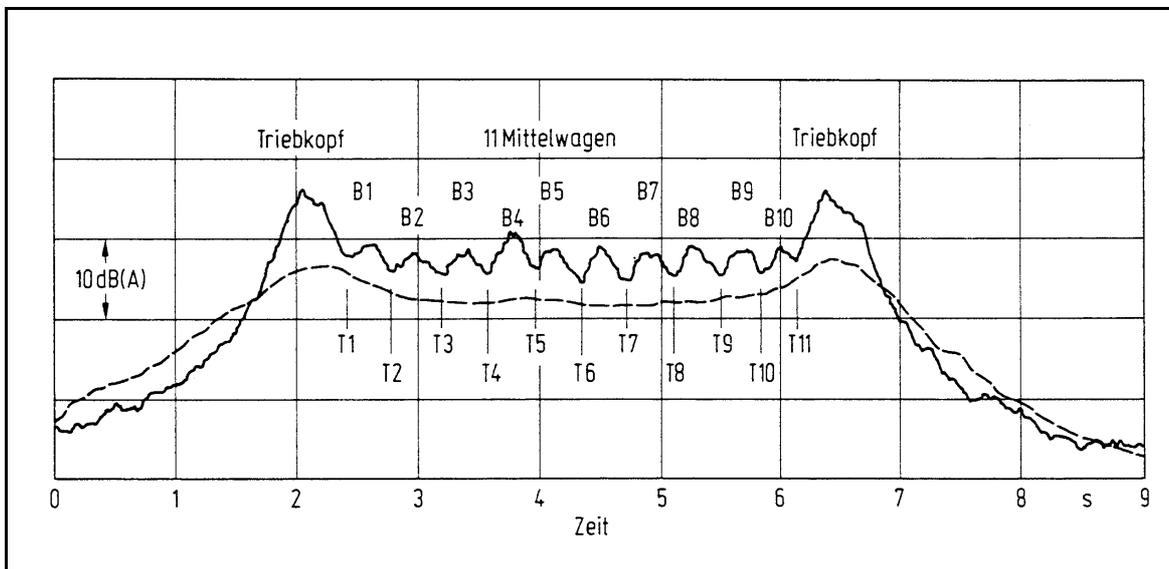


Abbildung 5-6: Schalldruckpegel eines ICE bei 250 km/h an den Standard Messpositionen 7,5 m (durchgezogene Linie) und 25 m (gestrichelte Linie). B = Drehgestellpaare, T = Wagenmitten; entnommen aus Heckel [1] Bild 16.4

Der Abstand, ab dem eine Linienquelle als Punktquelle wahrgenommen wird, lässt sich mit der folgenden Gleichung abschätzen:

$$r \sim \left(\frac{b}{\pi} \right) \tag{Gleichung 5-1}$$

b : Länge der Linienquelle

r : Entfernung Übergang

Damit ergeben sich die in folgender Tabelle dargestellten Übergangsentfernungen für die Linienquellen:

| Quellen | Länge der Linienquelle <i>b</i> [m] | Übergangsentfernung [m] |
|--------------------|-------------------------------------|-------------------------|
| kurze Regionalzüge | 75 | 25 |
| Fernverkehr | 300 | 100 |

Tabelle 5-1: Übergang von Linienquelle in Punktquelle

Einschränkung der Entfernung: Umgebungslärm

Um eine eindeutige Messung zu erhalten benötigt man einen Signal-Stör-Abstand von mehr als 10 dB. Diese Bedingung limitiert oft den möglichen Messabstand nach oben. Aus unserer bisherigen Erfahrung ist als Umgebungslärm in sehr ruhigen Lagen (offenes Feld) mit ca. 45 dB zu rechnen. Der Umgebungsgeräuschpegel erreicht aber in der Nähe von Ortschaften leicht 55 dB. In der Nähe von Brücken, die allenfalls eine laute Strasse

oder einen Fluss mit Stromschnellen überspannen, kann der Umgebungsgeräuschpegel jedoch auch höher sein.

Daher ist eine differenzierte Betrachtung erforderlich. Für diese Betrachtung wird angenommen, dass der Umgebungsgeräuschpegel im Messgebiet annähernd konstant ist. Der Signalpegel ist an der Brücke selbst am höchsten und wird als Punktquelle angenommen.

Für die Pegeländerung bei Abstandsvergrößerung gilt für eine Punktquelle allgemein:

$$L_p(y) = L_p(y_o) - 20 \log\left(\frac{y}{y_o}\right) \quad \text{Gleichung 5-2}$$

L_p : Schalldruckpegel

y_o : Bezugsentfernung

y : Entfernung

Damit ergibt sich bei einer Entfernungsverdoppelung ein um 6 dB reduzierter Pegel.

Aus den Erfahrungen von Messungen auf freier Strecke kann ein minimaler Schallpegel von 74 dB(A) in 7,5 m bei 80 km/h angenommen werden [20]. Dieser wird von modernem Wagenmaterial in gutem Zustand auf normaler Strecke erreicht. Für die Messung an einer Stahlbrücke kann jedoch von einem um ca. 10 bis 30 dB höheren Pegel ausgegangen werden.

Nimmt man folgende Werte an:

- Umgebungsgeräuschpegel: 55 dB
- Brückengeräuschpegel in 7.5 m Entfernung: 95 dB

ergibt sich bei einem minimalen Signal-Stör-Abstand von 10 dB eine mögliche Messentfernung von 240 m. (Der minimal zu messende Pegel beträgt 55 dB + 10 dB = 65 dB, damit beträgt die Pegeldifferenz, die durch die grössere Messentfernung zustande kommen darf 30 dB, was wiederum einer fünfmaligen Verdoppelung der Messentfernung von 7.5 m entspricht.)

Damit sollten auch Messentfernungen im Bereich von 50 bis 200 m realisierbar sein.

Der Einfluss der Luftschalldämpfung kommt erst bei grösseren Entfernungen und primär bei höheren Frequenzen zum Tragen. Für den Frequenzbereich des Brückenlärms bis 500 Hz liegt der Fehler durch Variationen der Luftschalldämpfung unter 0.7 dB / 100 m (siehe Kapitel 18.3 in [1]) und spielt daher keine Rolle.

Fazit

Die korrekte Messentfernung für die Messung des Brückenlärms und die Vergleichsmessung auf freier Strecke wird durch drei Gegebenheiten begrenzt:

- **Messung der Brücke als Punktquelle**

Die Messung sollte in jedem Fall so erfolgen, dass die Brücke als Punktquelle wahrgenommen wird, um allfälliges inhomogenes Abstrahlverhalten der Brücke nicht

durch mehrere Messpositionen kompensieren zu müssen. Damit ergibt sich ein Messabstand, der mindestens so gross ist wie die Brückenlänge.

- **Messung des Zugs als Punktquelle**

Wenn als Messwert ein maximaler Pegel gewählt wird, dann muss in einer Entfernung gemessen werden, die so gross ist, dass auch der längste Messzug noch als Punktquelle wahrgenommen wird. Dies ist der Fall, wenn die Messentfernung grösser als ein Drittel der Zuglänge ist. Wenn ein integrierender Messwert definiert wird, muss diese Bedingung nicht eingehalten werden.

- **Messposition in longitudinaler Richtung**

Die Messung sollte in jedem Fall seitlich der Brückenmitte erfolgen.

- **Umgebungsgeräusch**

Die Messentfernung muss so gewählt werden, dass das gemessene Geräusch mindestens 10 dB über dem Umgebungsgeräuschpegel liegt. Dies begrenzt den Messentfernungsbereich nach oben.

5.4 Rollmaterial als Anregung der Schwingung

5.4.1 Radrauheit

Bei Messungen an Fahrzeugen wird eine maximal zulässige Rauheit des Gleises definiert, um eine Aussage über den durch das Fahrzeug verursachten Lärm und nicht über den durch das Gleis verursachten Lärm zu erhalten. Es stellt sich die Frage, ob analog dazu für eine Messung eines Infrastrukturbauwerks (einer Brücke) somit eine maximal zulässige Radrauheit definiert werden muss. Auf diese Definition soll aber möglichst verzichtet werden, um den Aufwand für die Messungen auf einem vertretbaren Niveau zu halten.

Man kann beim Rollmaterial bezüglich der Laufflächenrauheit zwei Klassen von Fahrzeugen unterscheiden:

- **Reisezüge mit scheibengebremsten oder Kunststoffklotz-gebremsten Wagen**

Bei diesen ist die Radrauheit gering, daher wird eher die tieffrequente Anregung der Brücke durch die Schwellenfachfrequenz dominieren.

- **Graugussklotzgebremste Wagen (Güterwagen und ältere Reisezugwagen)**

Bei diesen ist die Radrauheit hoch. Damit findet eine deutlich stärkere Anregung statt, die ebenfalls stärker die höheren Frequenzen anregt. Insgesamt ist ein deutlich höherer Lärmpegel zu erwarten.

Es stellt sich nun die Frage welche der beiden Gruppen für eine Beurteilung des Lärmverhaltens der Brücke besser geeignet sind.

Im nicht sanierten Zustand der Brücke wird der Lärmanteil, der von der Brücke ausgeht, eher höher sein als der Lärmanteil, der vom Fahrzeug ausgeht, egal ob das Fahrzeug graugussklotzgebremst oder scheibengebremst bzw. kunststoffklotzgebremst ist.

Nach einer optimalen Sanierung kann es jedoch sein, dass trotz der hohen Anregung durch graugussklotzgebremste Fahrzeug der Brückenlärmanteil nicht mehr dominiert. In diesem Fall muss allenfalls auf scheibengebremste bzw. kunststoffklotzgebremste Fahrzeuge zurückgegriffen werden, da diese selbst leiser sind und allenfalls dazu führen, dass wieder der Anteil der Brücke am Gesamtlärm dominiert.

Aus diesem Grund wird empfohlen, die Messung mit beiden Fahrzeugarten auszuführen und getrennt auszuwerten.

5.4.2 Zusammenhang zwischen Zuglänge und Brückenlänge

Wenn ein Zug eine Brücke befährt, wird diese durch den Rad-Schiene-Kontakt zu Schwingungen angeregt. Es ist daher mit grosser Sicherheit davon auszugehen, dass der abgestrahlte Lärm von der Zahl der auf der Brücke befindlichen Radsätze abhängt. Ebenso ist zu vermuten, dass die Achslasten eine Rolle spielen. Weiterhin kann auf Grund der Inhomogenität einer Brücke und dem damit verbundenen modalen Charakter der Brückenschwingungen davon ausgegangen werden, dass auch der Ort der anregenden Radsätze eine Rolle für das abgestrahlte Geräusch spielt (siehe dazu Schallbilder wie in [18]).

Über die genauen Zusammenhänge zwischen der Zahl der Radsätze auf der Brücke und der Achslasten dieser Radsätze mit dem Brückenlärm, konnte in der Literatur kein Hinweis gefunden werden. Daher wird angenommen, dass ein noch unbekannter Zusammenhang besteht.

Ein weiteres Problem ist, dass die Zahl der Radsätze pro Zuglänge nicht bei allen Zügen gleich ist. Bei Güterzügen ist diese in der Regel grösser als bei Personenzügen. Um ein praktikables Mass für die Zahl der Radsätze auf einer Brücke zu haben, wird daher vereinfachend das Verhältnis von Zuglänge und Brückenlänge betrachtet. Ein Mass für die Grösse der Anregung ist somit die Bedeckung der Brücke durch den Zug.

In der Schweiz gibt es nur wenige Brücken, die länger als Regelzüge sind¹. Von den 481 Brückenbauwerken mit einer Länge von über 40 m, sind nur 20 länger als 300 m. Weitere 28 Brückenbauwerke sind zwischen 200 und 300 m lang. Bereits 42 Brücken sind 150 bis 200 m lang und weitere ca. 100 Brücken im Bereich von 100 bis 150 m.

Der durch die Brücke abgestrahlte Lärm ist daher für Züge, die länger als die Brücke sind, in etwa konstant, solange die Brücke vollständig durch den Zug bedeckt ist. Für Züge, die kürzer als die Brücke sind, ist der Lärm abgestrahlte Lärm in etwa konstant, solange der gesamte Zug auf der Brücke ist.

¹ Alle folgenden Angaben entnommen aus [26]

5.4.3 Geschwindigkeit der Züge

Die Brücke wird durch den Rollkontakt zu Schwingungen angeregt. Daher sollte sich die Geschwindigkeit des Fahrzeuges, durch das die Brücke angeregt wird, in dem Bereich befinden, in dem auch beim Fahrzeuggeräusch das Rollgeräusch dominant ist, damit das Gesamtgeräusch nicht vom Antriebsgeräusch oder vom aerodynamischen Geräusch dominiert wird.

Die Geschwindigkeit der zur Messung heranzuziehenden Züge, sollte sich daher im Bereich zwischen 60 und 160 km/h bewegen. Unterhalb von 60 km/h dominieren im allgemeinen die Geräusche die Antriebsgeräusche (Getriebe, Lüfter, Motoren, etc.), im Bereich über 160 km/h werden die aerodynamischen Geräusche dominant.

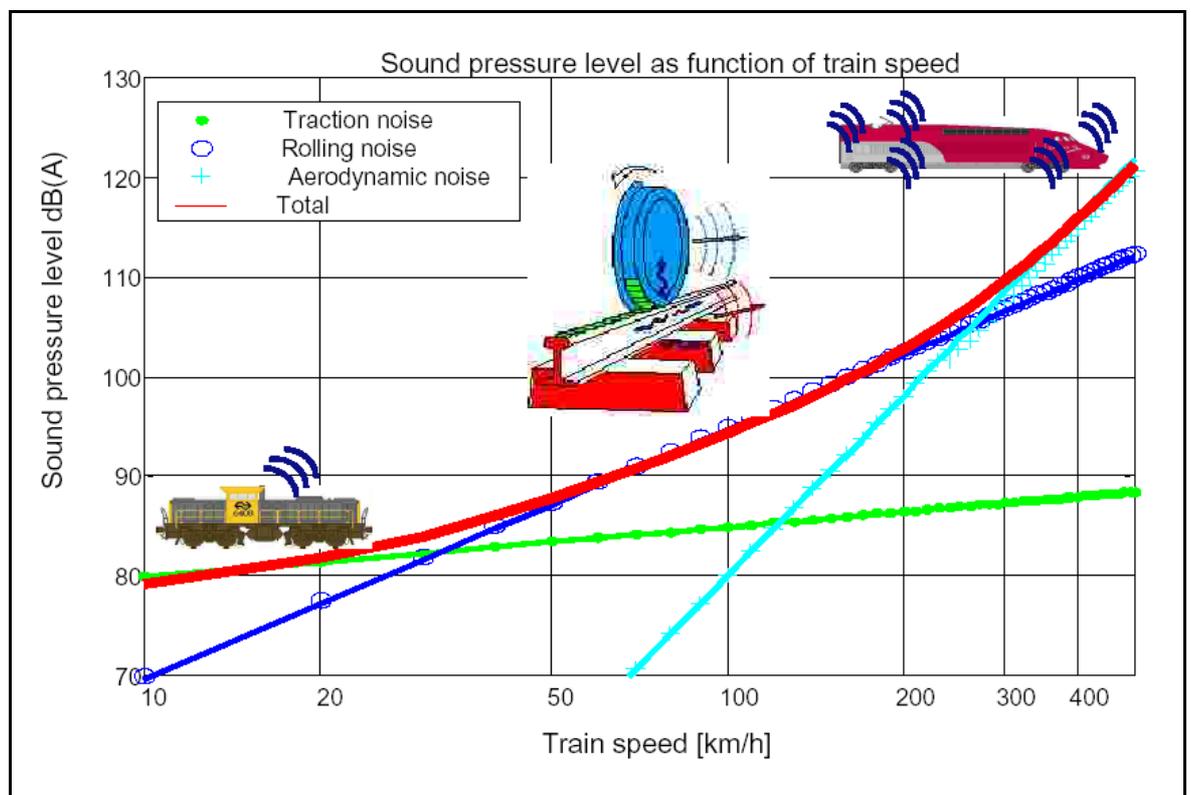


Abbildung 5-7: Allgemeiner Zusammenhang zwischen Schalldruckpegel und Geschwindigkeit mit den primären Erregungsmechanismen, entnommen aus [16]

Der Rollgeräuschpegel eines Fahrzeuges ist abhängig von der gefahrenen Geschwindigkeit. Solange das Rollgeräusch dominant ist, d. h. etwa zwischen 60 und 160 km/h kann der Lärmpegel von einer Geschwindigkeit zur anderen gemäss folgender Formel näherungsweise berechnet werden:

$$L_p(v) = L_p(v_{80}) - n \cdot \log\left(\frac{v}{v_{80}}\right)$$

Gleichung 5-3

L_p : Schallruckpegel

v_{80} : Bezugsgeschwindigkeit

v : Geschwindigkeit

$n = 30$

Nimmt man an, dass sich dieser Zusammenhang auf die Brücke übertragen lässt, da der gleiche Anregungsmechanismus wirkt, lässt sich im Umkehrschluss der Einfluss der Fahrgeschwindigkeit auf das Messergebnis bestimmen.

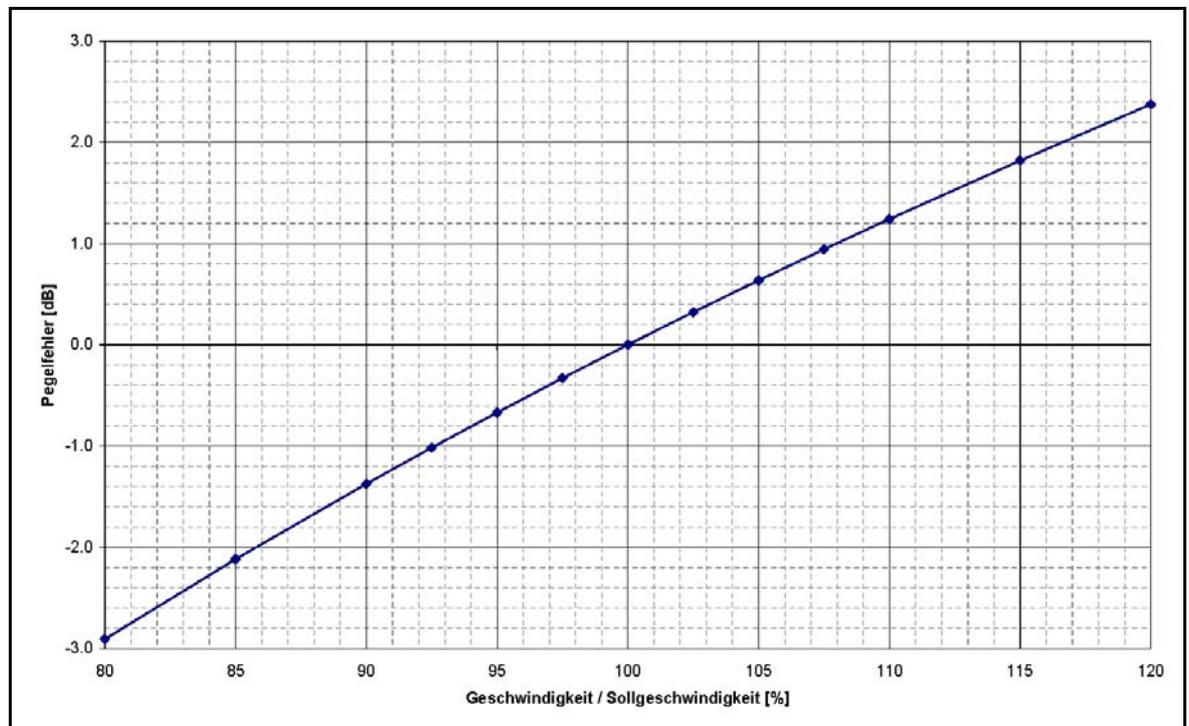


Abbildung 5-8: Fehler bei der Erfassung des Schalldruckpegels, wenn die Fahrzeuggeschwindigkeit nicht korrekt gemessen wird

Aus Abbildung 5-8 wird deutlich, dass die Forderung die in den Normen zu finden ist, dass die Geschwindigkeit mit $\pm 5\%$ [10] bzw. $\pm 3\%$ [9], einzuhalten ist, sinnvoll ist. Dadurch wird ein durch die Geschwindigkeit verursachter Fehler von ca. ± 0.5 dB in Kauf genommen.

Im Allgemeinen lässt sich die Gleichung 5-3 bestätigen, d.h. der Wert für n ist tatsächlich etwa 30. Es wurde jedoch festgestellt [20], dass n zwischen 20 und 40 schwanken kann. Damit ist eine fehlerfreie Umrechnung zwischen verschiedenen Geschwindigkeiten zumindest in Frage gestellt. Weiterhin kommt dazu, dass zwar die Formel für Fahrzeuge bestätigt wurde aber die Gültigkeit für Brücken nur eine Hypothese ist.

Daher ist stets anzustreben, alle Messungen bei der gleichen Geschwindigkeit durchzuführen. Sinnvollerweise sollte die Streckenhöchstgeschwindigkeit gewählt werden, wenn diese in dem Bereich liegt, in dem das Rollgeräusch dominant ist.

Unter Umständen scheitert dies aber, auf Grund von infrastrukturseitigen oder betrieblichen Randbedingungen. In diesen Fällen müssen die Messergebnisse auf eine Geschwindigkeit – in der Regel 80 km/h – umgerechnet werden.

Abbildung 5-9 verdeutlicht den entstehenden Fehler bei einer Geschwindigkeitsumrechnung in Abhängigkeit des realen Faktors n . Es wird deutlich, dass für den Fall, dass die

gleiche Messgeschwindigkeit nicht realisierbar ist, zunächst versucht werden sollte, den Faktor n zu ermitteln.

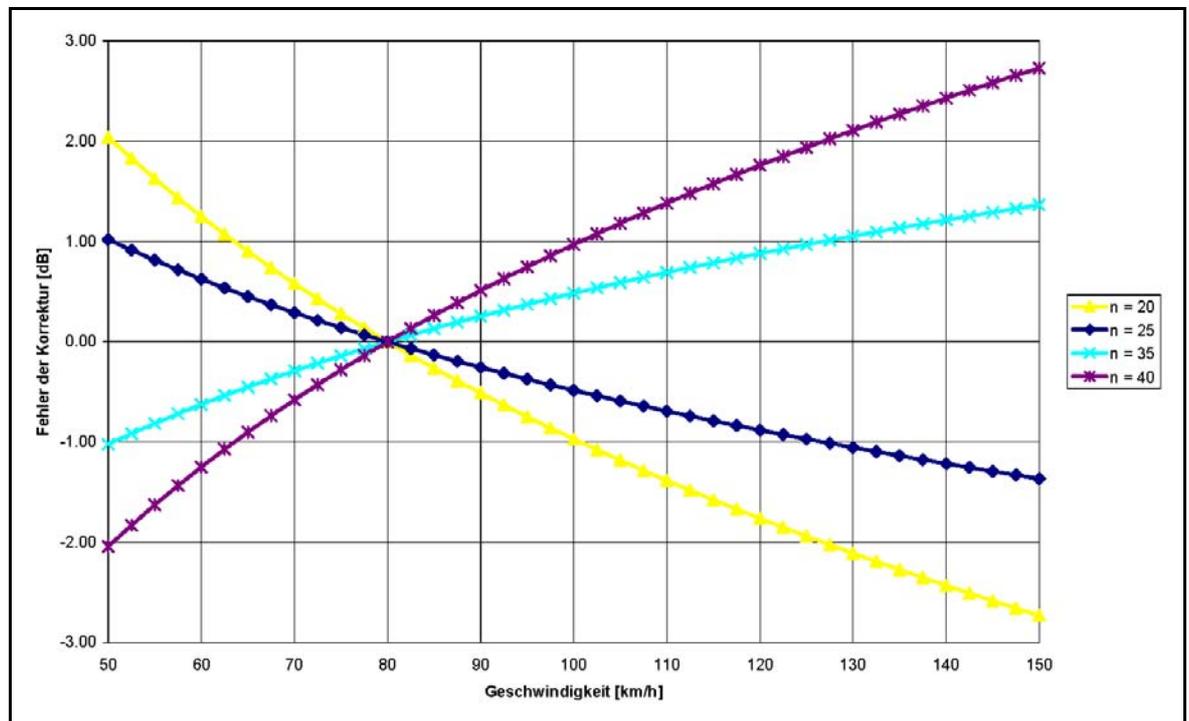


Abbildung 5-9: Fehler der Korrektur der Fahrzeuggeschwindigkeit für verschiedene Geschwindigkeitsabhängigkeiten gegenüber dem Referenzwert $n = 30$

5.5 Messwert

Bei der Definition des Messwerts stellt sich zum einen die Frage nach der mit dem Sensor zu erfassenden direkten Messgröße und zum anderen die Frage nach dem Kennwert, der aus dieser Messgröße abzuleiten ist.

Ziel der Überlegungen ist es, im Idealfall einen Einzahlenwert zu erhalten, der eine Aussage über den Brückenlärm ermöglicht, um daraus den Erfolg der Sanierung abschätzen zu können.

5.5.1 Physikalische Messgröße

Als primäre Messgröße eignet sich nur der Schalldruck im Freifeld. Schallschnelle und Schalldruckmessungen im Nahfeld kommen nicht in Frage.

5.5.2 Lärmbilder

Die Technik der „akustischen Kamera“, die auf einer Arraymessung mit mehreren Mikrofonen basiert und auf Basis dieser Messung ein „akustisches Bild“ der Lärmquelle berechnet, eignet sich für die Ortung von Schallquellen, jedoch nicht zur quantitativen Beurteilung von Schallabstrahlungen [18].

Für die Ermittlung eines Sanierungswertes ist sie daher nicht tauglich.

5.5.3 Betrachtungen im Frequenzbereich

Gewichtung

Nach der Erfassung des Schalldrucks über der Zeit stellt sich die Frage welcher Einzahlenwert daraus abgeleitet werden soll. Als Frequenzbewertung wird im Regelfall die A- Gewichtung angewendet, die der menschlichen Empfindung Rechnung trägt. Die A- Bewertung ist jedoch problematisch, da sie an das Gehörempfinden bei leisen Pegeln (< 40 dB bei 1 kHz) angepasst ist. Bei höheren Pegeln (~80 dB) und eher tieffrequenten Geräuschen, bietet sich einerseits die B-Bewertung an, andererseits ein Verzicht auf eine Bewertung.

Spektrale Betrachtung

Ein Zwischenschritt zu einem Einzahlenwert stellt die spektrale Betrachtung in Oktav- oder Terzbändern dar. Ein Übergang zum kontinuierlichen Spektrum verwischt jedoch den Blick auf generelle Veränderungen und birgt im Detail Probleme, da das Vorgehen nicht genormt ist. Werden Differenzen betrachtet, spielt der Bewertungsfilter keine Rolle, sofern in jedem Frequenzband die Rauschschwelle überschritten ist.

Fazit

Um das Ziel eines Einzahlenwertes als Ergebnis zu erreichen, wird vorgeschlagen den unbewerteten Schalldruckpegel als Messwert zu verwenden. Analog zu EN ISO 3095:2005 soll auf tonale Anteile geachtet werden.

5.5.4 Kriterien im Zeitbereich

Prinzipiell kommen drei Kriterien in Frage:

- Maximalpegel,
- Beurteilungspegel oder
- Dauerschalldruckpegel.

Der maximale Pegel ist sehr stark von Zufallsgrößen und primär von maximalen Radrauhigkeiten geprägt und lässt daher keine generelle Aussage über die Brücke zu.

Die Beurteilungspegel L_r , wie sie für Immissionsbeurteilungen verwendet werden, berücksichtigen in starkem Masse auch die zeitliche Belastung, d. h. wie viele Schallereignisse (Züge) einen bestimmten Ort belasten. Dies ist für die Auswahl der zu sanierende Brücken allenfalls ein sinnvoller Wert, für die Beurteilung des Sanierungserfolgs jedoch nicht.

Ein äquivalenter Dauerschalldruckpegel kommt für die Beurteilung des Brückenlärms in Frage, solange die Messdauer auf die Dauer des Schallereignisses (Zugsdurchfahrt) bezogen wird.

In EN ISO 3095:2005 [9] sind folgende Dauerschalldruckpegel definiert:

- **Äquivalenter Dauerschalldruckpegel $L_{pAeq,T}$**
 Der Pegel wird über die gesamte Messdauer energetisch gemittelt. Eine Messdauer in Abhängigkeit der Zugsvorbeifahrt ist nicht definiert.
- **Äquivalenter Dauerschalldruckpegel während der Vorbeifahrtzeit $L_{pAeq,Tp}$**
 Die Messung beginnt mit der Vorbeifahrt des interessierenden Zugs oder Zugteils an der Messstelle und endet, wenn diese Vorbeifahrt endet.
- **Vorbeifahrtexpositionspegel TEL**
 Die Messung erfasst das gesamte Schallereignis, die Schallenergie wird jedoch auf die Dauer der Vorbeifahrt bezogen. Als Kriterium für Beginn und Ende des Schallereignisses gelten die Punkte an denen der Pegel 10 dB unterhalb des Pegels am Anfang bzw. Ende des Zuges ist.
- **Schallexpositionspegel SEL**
 Die Messung erfasst das gesamte Schallereignis, die Schallenergie wird auf eine Sekunde bezogen.

Diese Werte sind jedoch auf die Messung von Fahrzeugen zugeschnitten. Daher sind sie für die Messung einer Brücke nicht direkt verwendbar.

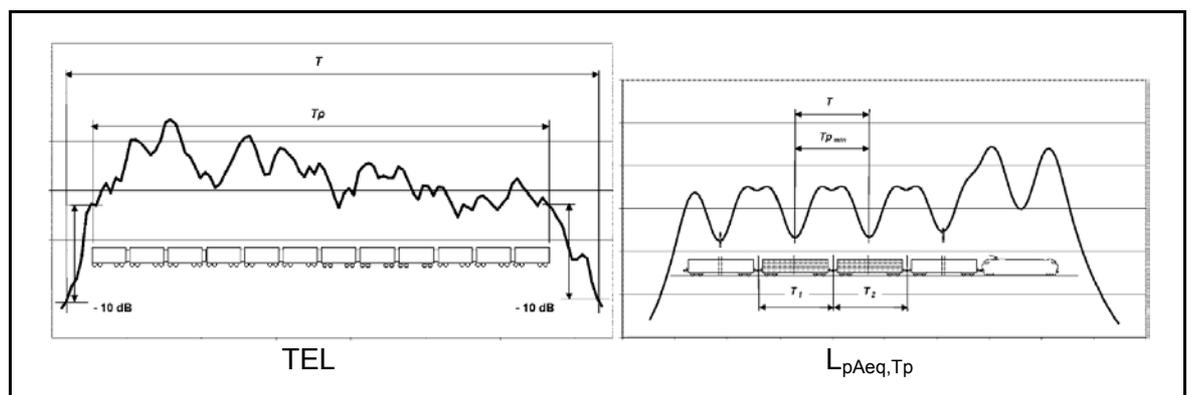


Abbildung 5-10: prinzipieller Schalldruckpegelverlauf einer Zugsvorbeifahrt

Um einen geeigneten Kennwert zu definieren, werden zunächst Überlegungen zum prinzipiellen Verlauf des Schallpegels auf der Brücke gemacht. Entscheidend für den Pegelverlauf ist die Position des Zuganfangs- und des Zugendes in Bezug zur Brücke. Im folgenden der prinzipielle Schallpegelverlauf für Züge die kürzer, beziehungsweise länger als die Brücke sind, dargestellt.

Hierbei wird davon ausgegangen, dass eine Brücke mehr Schall abstrahlt, wenn sie durch mehr Achsen angeregt wird, was sicher plausibel ist. Ausserdem wird nur der hier interessierende Fall betrachtet, dass der Brückenlärm der dominante Anteil am Gesamtgeräusch ist.

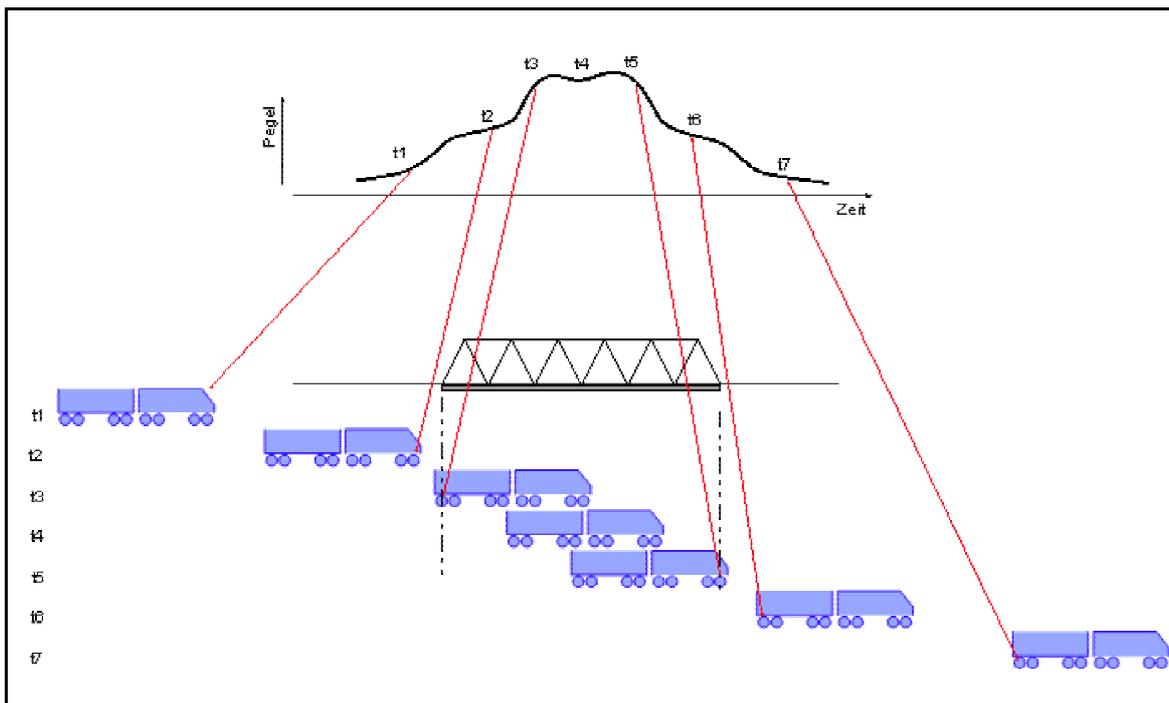


Abbildung 5-11: prinzipieller Schalldruckpegelverlauf eines Zuges der kürzer als die Brücke ist

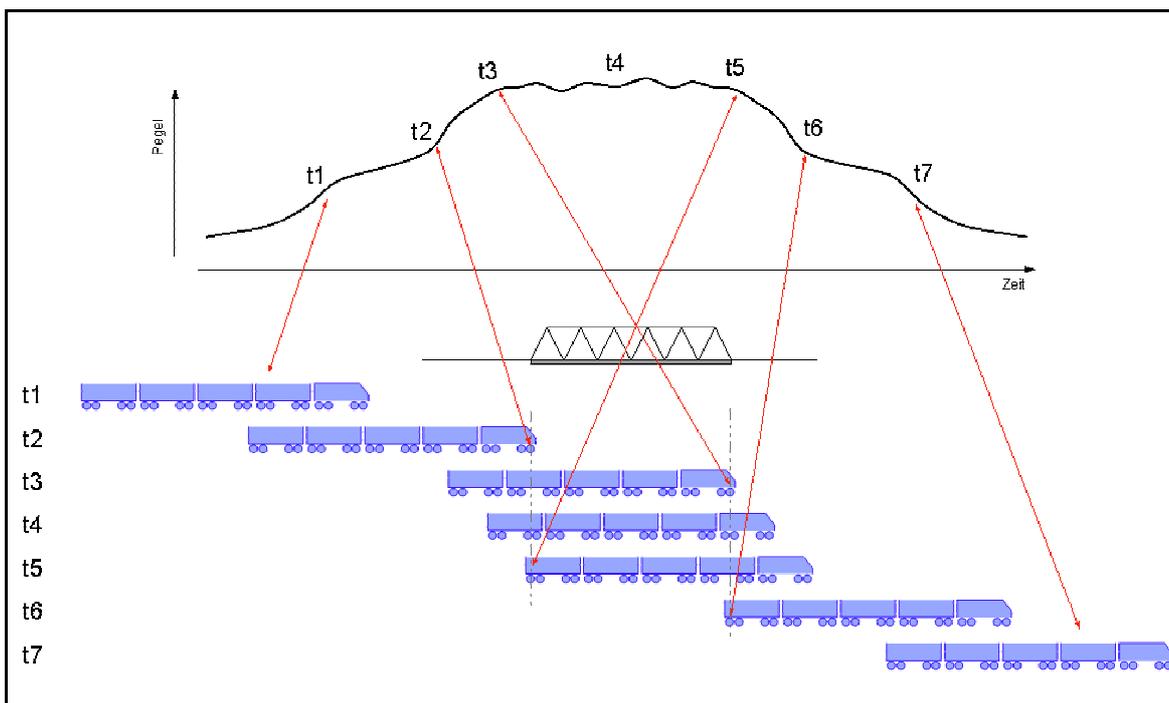


Abbildung 5-12: prinzipieller Schalldruckpegelverlauf eines Zuges der länger als die Brücke ist

Wenn sich der Zug auf freier Strecke der Brücke nähert bzw. sich von ihr entfernt (t1 – t2 bzw. t6 – t7) nimmt der Pegel langsam zu bzw. ab. Sobald der Zug auf die Brücke auffährt (t2 – t3) bzw. sie verlässt (t5 – t6) nimmt der Pegel schneller zu bzw. ab. In dem Bereich in dem die Zahl der Achsen konstant ist, bleibt der Pegel weitgehend konstant (t3 – t5).

Es bleibt festzustellen:

- Bei Zügen, die kürzer als die Brücke sind, ist der Maximalpegel kleiner als bei Zügen, die länger als die Brücke sind, da die Brücke von weniger Achsen gleichzeitig angeregt wird.

- Bei Zügen, die kürzer als die Brücke sind, ist der Pegel weitgehend konstant, solange sich der Zug vollständig auf der Brücke befindet. Bei Zügen, die länger als die Brücke sind, ist der Pegel weitgehend konstant, solange die Brücke vollständig mit dem Zug belegt ist.

Die direkte Anwendbarkeit des $L_{pAeq,Tp}$ ist daher nicht möglich. Dieser definiert die Dauer der Vorbeifahrt des Messobjekts (Zug) an der Mikrofonebene als Messdauer T_p . Damit wird die Dauer des weitgehend konstanten Schallpegels zuverlässig identifiziert. Im Fall der Brückenmessung ist eine Definition der Messdauer erforderlich, auf die die drei Parameter, Zuglänge, Brückenlänge und Geschwindigkeit Einfluss haben.

Es liegt nahe, das Messprinzip des $L_{pAeq,Tp}$ an die Situation bei Brücken anzupassen. Es bietet sich an, die Zeitspanne zu wählen, bei der eine konstante Lärmentwicklung zu erwarten ist. Dem entspricht eine gleich bleibende Anzahl an Radsätzen, die die Brücke anregen. Um auch einen Vergleich zwischen mehreren Zügen zuzulassen, muss die Zuglänge dabei auf Werte, die grösser sind als die Brückenlänge beschränkt werden. Ist dies nicht möglich, sollen bei den Messungen vor und nach der Sanierung gleich lange Züge verwendet werden.

Auf jeden Fall sind für die zwei Gruppen (Züge, die kürzer als die Brücke sind bzw. Züge die länger als die Brücke sind) getrennt Vergleiche durchzuführen

5.5.5 Äquivalenter Brückenpegel $L_{pAeq,TB}$

Wie in Abschnitt 5.5.4 ausgeführt ist, soll die Beurteilung einer Brücke mit einem normbasierten integrativen Ansatz der spezifische Situation angepasst werden.

Die Basis bildet der äquivalente Dauerschalldruckpegel während der Vorbeifahrtzeit $L_{p,eq,Tp}$. Die Messdauer ist die Zeit in der sich der gesamte Zug auf der Brücke befindet. $L_{p,eq,TB}$ (train passage level on a bridge)

$$L_{pAeq,TB} = 10 \lg \left(\frac{1}{T_2 - T_1} \int_{T_1}^{T_2} \frac{p^2}{p_o^2} dt \right)$$

Gleichung 5-4

Die Messdauer T_B beginnt bei T_1 sobald sich das Zugende auf der Brücke befindet oder der Zuanfang die Brücke verlässt.

Die Messdauer T_B endet bei T_2 sobald sich das Zugende auf der Brücke befindet oder der Zuanfang die Brücke verlässt (siehe Abbildung 5-13).

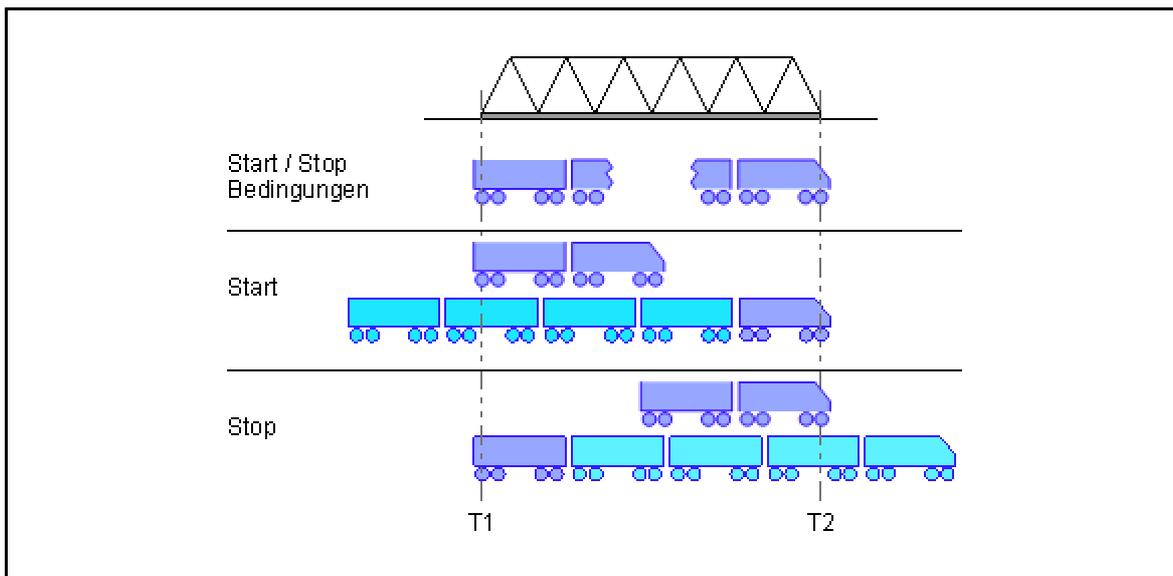


Abbildung 5-13: Bestimmung der Messdauer T_B

6 Literatur

- [1] *Taschenbuch der technischen Akustik*
M. Heckl, H.A. Müller, Springer, 1994

- [2] *Track Compendium – Formation, Permanent Way, Maintenance, Economics*
B. Lichtberger, Eurailpress, 2005

- [3] *Archivmeldung der Rathauskorrespondenz vom 13.12.2000, Wasserparkbrücke ist hörbar leiser geworden:*
Magistrat der Stadt Wien, Magistratsabteilung 53,
<http://www.wien.gv.at/vtx/vtx-rk-xlink?DATUM=20001213&&SEITE=020001213002>

- [4] *Schienen der Siegbücke sollen elastisch werden*
Michael Lehnberg, Mobile Stadt / General-Anzeiger Bonn, 26.05.2005
http://www.mobile-stadt.de/ticker/dyn_article?artid=90074

- [5] *Der Weg zur leisen Eisenbahn-Stahlbrücke in Deutschland*
Paul de Vos, Fortschritte der Akustik: Fachbeitrag der 31. Jahrestagung für Akustik, DAGA 2005 München, 17. März 2005

- [6] *Massnahmen zur Reduzierung des Brückendröhnens*
Dorothee Stiebel, in Fortschritte der Akustik: Fachbeitrag der 31. Jahrestagung für Akustik, DAGA 2005 München, 17. März 2005

- [7] *Wiener Lärmbericht 1997, Abschnitt 3.3 Brücken - Kriterien für die Begrenzung der Schallimmission*
Referat 2 - Lärmbekämpfung und Schallschutz, Wien Magistratsabteilung 22, 1997
<http://www.sylvie.at/laermbericht/KapD2-3.htm>

- [8] *PANDROL VIPA resilient track support system*
Produktinformation Fallbericht, Pandrol, 1999
http://www.pandrol.com/cstudies/c01_bdy.htm

- [9] *EN ISO 3095:2005, Messung der Geräuschemission von spurgebundenen Fahrzeugen*
EN ISO, August 2005

- [10] *prEN ISO 3095:2001, Messung der Geräuschemission von spurgebundenen Fahrzeugen*
EN ISO, Januar 2001

- [11] *TSI CR Noise : Technical Specification for Interoperability, Subsystem: Conventional Rail Rolling Stock, Scope: Noise, Aspect: Noise emitted by Freight Wagons, Locomotives, Multiple Units and Coaches;*
EU Directive 2001/16, 01/16-ST05 part2 Version EN07, 23.11.2004
- [12] *Reken- en Meetvoorschrift Railverkeerslawaaï 2004, RMVR 2004*
Ministerie Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer,
7. Dezember 2004
<http://www.stillerverkeer.nl/rmv/RMVR/RMV%20rail%20versie%2007-12-2004.pdf>
- [13] *Auszug und Übersetzung der RMVR 2004*
Paul de Vos, 21. Februar 2006
- [14] *Reports about source modelling: D10 – D12*
<http://www.imagine-project.org/Harmonoise/>
- [15] *Untersuchung zur Verringerung der Schallabstrahlung von stählernen Eisenbahnbrücken durch konstruktive Maßnahmen, Abschlußbericht zum Projekt 104 der Studiengesellschaft für Anwendungstechnik von Eisen und Stahl e.V. Düsseldorf, 1987*
- [16] *HARMONOISE WP1.2, Rail Sources - Task 1.2.1 State of the art report,*
WP1.2 partners, HAR12TR-020118-SNCF10 Rev. 4, 05/08/02
http://www.imagine-project.org/bestanden/D10_WP1.2_HAR12TR-020118-SNCF10.pdf
- [17] *IMAGINE Work Package 6 - Railway noise source model*
M.G. Dittrich , TNO, Verlag, September 12, 2005
<http://www.imagine-project.org/bestanden/IMA6TR-050912-TNO01.pdf>
- [18] *Schallbild im Aussenbereich – durchgeführte Projekte der GFaI*
Gesellschaft zur Förderung angewandter Informatik, Berlin, 2000
<http://www.acoustic-camera.com/historie.htm>
- [19] *Super-Array*
Sulzer Innotec Publikation, ca. 1998
- [20] *Geräuschmessungen von in Betrieb stehenden Eisenbahngüterwagen, Abschlußbericht*
Bericht 2-068, PROSE AG, 11.11.2003
- [21] *Massnahmen zur Reduzierung des Brückenlärms*
Dorothee Stiebel et. al., DB Systemtechnik T.TZF 12, 14.3.04

- [22] *Schallschutz – eine Investition in die Zukunft der Bahn*
Deutsche Bahn AG, DB Netz AG Kommunikation, Februar 2005
http://www.db.de/site/shared/de/dateianhaenge/publikationen_broschueren/holding/schallschutzbroschuere.pdf
- [23] *Lärmtechnische Sanierung der Murbrücke in Leoben bei der ÖBB*
H. Rieger & M. Hanisch, Eisenbahningenieur (56,p24ff), 7/2005,
- [24] *Heerema Products*
Heerema Fabrication Group
<http://www.heeremasilentbridges.com/en/framesets/about.htm>
- [25] *Silent Bridge*
Heerema Fabrication Group
<http://www.heeremasilentbridges.com/en/framesets/technology.htm>
- [26] *Schienennetz Schweiz – ein technischer Atlas*
Schweizerische Bundesbahnen SBB, 1980
- [27] *Bahnprofil Schweiz 2005 – ein technischer Reisebegleiter*
Hans G. Wägli, Diplomy Verlag, 2004
- [28] *Technology tames the noise problem*
J.W. Walker, Railway Gazette International, Juli 1989 (479)
- [29] *Stählerne Brücken, Band I, Teil 1*
Gottwald Schaper, Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, 1949
- [30] *Lärmsanierung der Eisenbahnen - Aktueller Stand der Realisierung*
Bundesamt für Verkehr, Schweiz, 30.04.2006
http://www.bav-a.admin.ch/Is/d/standbericht_aktuell.pdf
- [31] *Monitoring Eisenbahnlärm Jahresbericht 2005*
Bundesamt für Verkehr, Schweiz; April 2006
http://www.bav-a.admin.ch/download/BusinessInfo/Messbericht_aktuell.pdf
- [32] *UIC R 717 Empfehlungen für die Konstruktion von Brücken unter Berücksichtigung oberbautechnischer Anforderungen und zur Abminderung der Schallemission*
1. Ausgabe, UIC, 01.07.95
- [33] *ISVR Dynamics Group University of Southampton - Railway Rolling Noise*
isvr, web, 24.5.06
<http://www.isvr.soton.ac.uk/DG/RailwayRollingNoise.HTM>

- [34] *ISVR Dynamics Group University of Southampton - Railway Noise and Vibration*
isvr, www, 24.5.06
<http://www.isvr.soton.ac.uk/DG/RailwayNoiseandVibration.htm>

Anhang – Inhaltsverzeichnis

| | | |
|------------|--|------------|
| A | Verfahrensanweisung | A-1 |
| A.1 | Allgemeines | A-1 |
| A.2 | Messgrösse pro Zug | A-1 |
| A.3 | Festlegung der Messposition an der Brücke | A-1 |
| A.4 | Messposition Strecke | A-2 |
| A.5 | Messkollektiv | A-2 |
| A.6 | Zeitpunkt der Messung | A-3 |
| A.7 | Auswertung | A-3 |
| A.8 | Bericht | A-4 |

A Verfahrensanweisung

A.1 Allgemeines

Das Messverfahren basiert auf EN ISO 3095:2005, hinsichtlich Messbedingungen und Bericht sollte diese Norm — soweit nicht explizit davon abgewichen wird — eingehalten werden.

Diese Verfahrensanweisung enthält weder Herleitungen noch Verweise.

Können Bedingungen dieses Messverfahrens in einem Einzelfall nicht eingehalten werden, so darf entsprechend den Herleitungen und Bewertungen im Hauptteil dieses Berichts im Sinne dieser Verfahrensanweisung abgewichen werden. Die getroffenen Abweichungen sind zu begründen und im Bericht zu dokumentieren.

Soweit nicht besonders darauf eingegangen wird, gelten die Anforderungen gleichermaßen für die „Vorher“-Messung (Messung vor der Sanierung der Brücke) und die „Nachher“-Messung (Messung nach Sanierung der Brücke).

A.2 Messgrösse pro Zug

Für jede Messung sind folgende Grössen festzuhalten bzw. auszuwerten.

- $L_{p,eq,TB}$ an der Messposition Brücke [dB]
- $L_{p,A,eq,TP}$ an der Messposition Strecke [dB (A)]
- Zuglänge Z [m]
- Fahrgeschwindigkeit v [km/h]
- Zugkategorie (niedrige Radrauheit NR oder hohe Radrauheit HR)

A.3 Festlegung der Messposition an der Brücke

Die Messposition muss für die „Vorher“- und die „Nachher“-Messung identisch sein. Daher wird sie einmalig bei der „Vorher“-Messung festgelegt. Allfällige geplante Baumassnahmen und die durch diese allenfalls nicht mehr realisierbaren Messpositionen sind dabei zu berücksichtigen.

Wann immer möglich soll eine Messposition in der senkrechten Ebene zur Brücke in Brückenlängsmittle auf einer Seite der Brücke gewählt werden. Ist eine solche Position realisierbar ist wie für die Bestimmung des Messabstandes wie folgt vorzugehen:

1. Der Querabstand der Messposition zur Brückenquermitte soll etwa das 1.5-fache der Brückenlänge B sein.
2. Der Querabstand von 1. wird abgerundet auf 25m, 50m, 100m oder 200m
3. Ist der Querabstand von 2. kleiner als das 0.8-fache der Brückenlänge, so wird der Querabstand verdoppelt.

Sollte eine Messposition in Brückenlängsmittle unmöglich sein, darf statt dessen an den Brückenköpfen gemessen werden. In diesem Fall ist der seitliche Abstand wie folgt festzulegen:

1. Zwei Messpositionen sollen in der senkrechten Ebene zur Brücke je an den Brückenköpfen festgelegt werden.
2. Der Querabstand der beiden Messpositionen zur Brückenquermitte soll dem doppelten der Brückenlänge entsprechen.
3. Der Querabstand von 2. wird abgerundet auf 25m, 50m, 100m oder 200m

In jedem Fall ist zu prüfen, ob der Pegel bei den zu erfassenden Zugsdurchfahrten weniger als 10 dB zuzüglich der durch die Sanierung erwarteten Pegelreduktion über dem Hintergrundgeräusch ist. Ist dies der Fall, so muss der Querabstand reduziert werden, bis die Pegeldifferenz grösser als 10 dB zuzüglich der durch die Sanierung erwarteten Pegelreduktion ist. In diesem Fall kann von den Normentfernungen (25m, 50m, 200m bzw. 200m) abgewichen werden.

A.4 Messposition Strecke

1. Es soll ein Optimum zwischen den folgenden beiden "Bedingungen" gesucht werden (d.h. Kompromisse müssen in der Regel eingegangen werden):
 - Der Messort soll die Normbedingungen an eine Messstelle für Rollmaterial-Lärmmessungen nach Möglichkeit erfüllen.
 - Der Messort soll nahe an der Brücke sein, so dass die Züge mit gleichen Geschwindigkeiten verkehren wie auf der Brücke.
2. Der Messabstand soll gleich gewählt werden wie an der Messposition Brücke. Ist der Pegelunterschied zwischen dem Hintergrundgeräusch und dem Geräusch der Zugsvorbeifahrt kleiner als 10 dB (A) als das Hintergrundgeräusch, so muss der Messabstand reduziert werden, bis diese Forderung erfüllt ist.

A.5 Messkollektiv

- Sowohl für den „Vorher“- wie auch für den „Nachher“-Zustand sollen jeweils 10 Züge der Kategorie "NR" (niedrige Rauheit, d.h. schiebengebremst oder kunststoffklotzgebremst) und 10 Züge der Kategorie "HR" (hohe Rauheit, d.h. graugussklotzgebremst) gemessen werden.
- Die Züge sollen länger als die Brücke sein. Ist es nicht möglich, Züge zu messen, die länger als die Brücke sind, so soll die Auswertung längenabhängig erfolgen.
- Die Züge innerhalb einer Gruppe (NR bzw. HR) sollen bei gleicher Geschwindigkeit v (mit $v = v_0 \pm 3\%$) gemessen werden. Diese Geschwindigkeit v_0 soll zwischen 60 und 160 km/h liegen sowie vor und nach der Sanierung gleich sein.

Ist es nicht möglich, alle Züge bei gleicher Geschwindigkeit zu messen, dann sind so viele Züge bei verschiedenen Geschwindigkeiten zu messen, dass damit die Geschwindigkeitsabhängigkeit des Pegels ermittelt werden kann. Gesucht ist das optimale n in der Gleichung

$$L_p(v) = L_p(v_{80}) + n \cdot \log\left(\frac{v}{v_{80}}\right)$$

L_p : Schallruckpegel

v_{80} : Bezugsgeschwindigkeit

v : Geschwindigkeit

n ist sowohl für die Brücke (B) wie auch für die freie Strecke (S) und für die beiden Kategorien (NR und HR) getrennt zu ermitteln.

A.6 Zeitpunkt der Messung

- Die Norm-Witterungsbedingungen sollen eingehalten werden
- Die Vorhermessung soll bei einem normalen Wartungszustand der Brücke vor der Sanierung stattfinden.
- Nach dem Umbau der Brücke und vor der Nachhermessung sollen mindestens 35'000 Radsätze die Brücke passiert haben.

A.7 Auswertung

- Mussten Züge gemessen werden, die kürzer sind als die Brücke, so ist für jeden Zug das Verhältnis Zuglänge zu Brückenlänge (Z/B) zu bestimmen. Es sollen die 10-er Gruppen (je für niedrige und hohe Rauheit sowie für „vorher“ und „nachher“) für die Auswertung verwendet werden, innerhalb derer das Verhältnis Z/B möglichst ähnlich ist.
- Müssen Messungen von Zügen, die nicht mit der gleichen Geschwindigkeit gefahren sind, verwendet werden, so sind die einzelnen Pegel mit der ermittelten Geschwindigkeitsabhängigkeit n_B bzw. n_S auf 80 km/h umzurechnen.
- Für die Auswertung werden in einem ersten Schritt die Pegeldifferenzen (vorher – nachher) jeweils für die Brücke und die Strecke für die Fahrzeuge mit niedrigen und hohen Radrauheiten ermittelt. Als Basis zur Ermittlung der Differenzen dienen die Mittelwerte der Messungen einer Gruppe:

$$\Delta L_{HR,B} = \text{Mittelwert}(L_{peq,TB,HR,nachher}) - \text{Mittelwert}(L_{peq,TB,HR,vorher})$$

$$\Delta L_{NR,B} = \text{Mittelwert}(L_{peq,TB,NR,nachher}) - \text{Mittelwert}(L_{peq,TB,NR,vorher})$$

$$\Delta L_{HR,S} = \text{Mittelwert}(L_{pAeq,TP,HR,nachher}) - \text{Mittelwert}(L_{pAeq,TP,HR,vorher})$$

$$\Delta L_{NR,S} = \text{Mittelwert}(L_{pAeq,TP,NR,nachher}) - \text{Mittelwert}(L_{pAeq,TP,NR,vorher})$$

(ist der Betrag einer der beiden Pegeldifferenzen $\Delta L_{HR,S}$ oder $\Delta L_{NR,S}$ grösser als 3 dB (A), dann ist eine vertiefte Untersuchung im Frequenzbereich mit Terzspektren vorzunehmen)

- Die Pegelreduktion durch die Sanierung wird bestimmt als:
$$\Delta L_{\text{Sanierung}} = \text{Maximum} ((\Delta L_{\text{HR,B}} - \Delta L_{\text{HR,S}}) ; (\Delta L_{\text{NR,B}} - \Delta L_{\text{NR,S}}))$$

A.8 Bericht

- Der Bericht soll die Normanforderungen erfüllen und alle relevanten Rahmenbedingungen dokumentieren.