

Bundesvereinigung gegen Schienenlärm e.V.

28. Februar 2005

Brücken und ihre Lärmbewertung

1 physikalisch bestimmter Brückenzuschlag

Im Bereich der DB AG gibt es etwa 32000 Eisenbahn-Brücken. Es ist bekannt, dass der Vorbeifahrpegel eines Fahrzeugs auf der Brücke im allgemeinen höher ist als der Vorbeifahrpegel auf einem im Schotterbett verlegten Gleis auf festem Boden. Daher wurde zur Berechnung des Vorbeifahrpegels bei Brücken ein „Brückenzuschlag“ D_{Br} eingeführt, der von der Bahn wie folgt gemessen wird:

<p>Der Meßbereich wird festgelegt durch die beiden folgenden Meßpunkte:</p> <ul style="list-style-type: none">- Meßpunkt B. Dieser befindet sich in 25 m Entfernung senkrecht zu einem Gleis G der zu beurteilenden Brücke.- Meßpunkt S. Dieser befindet sich in einer festgelegten Entfernung¹ von der Brücke entgegen der Fahrtrichtung von Gleis G, ebenfalls 25 m senkrecht zu Gleis G. <p>Für einen der am häufigsten die Brücke befahrenden Zug wird dann</p> <ul style="list-style-type: none">- am Meßpunkt B der Vorbeifahrpegel V_B und- am Meßpunkt S der Vorbeifahrpegel V_S <p>gemessen und die Differenz $\Delta L^{B-S} = V_B - V_S$ gebildet und</p> $D_{Br} := \Delta L^{B-S}$ <p>gesetzt.</p>	(1)
---	-----

Aus heute nicht mehr zu klärenden Gründen wurde in der Schall 03 (1990) dieser Brückenzuschlag für alle Fahrzeugarten und für alle Brückentypen einheitlich durch $D_{Br}=3 \text{ dB}$ festgeschrieben – obwohl bekannt ist, dass jede Brücke ihren eigenen Brückenzuschlag erfordert.

Nun ist nicht zu erwarten, dass der gemessene Brückenzuschlag wirklich 3 dB beträgt. Vielmehr gibt es zumindest eine „Brücke mit stählernem Überbau ohne Schotterbett“, bei dem wir (in Übereinstimmung mit der DB AG) gemäß der oben angegebenen Messvorschrift einen Brückenzuschlag $D_{Br}=17 \text{ dB}$ gemessen haben (bei Güterzügen nachts).

Ist daher die Schall 03 (1990) falsch?

Wenn ein Anlieger an dieser Brücke mit $D_{Br}=17 \text{ dB}$ wohnt, so wird er sich wundern, warum kein oder nur geringer Lärmschutz gewährt wird. Wenn er nachts aufwacht, weil „seine“ Brücke von einem Güterzug befahren wird, dann sollte er sich nach ernsthafter Meinung der Bahn damit trösten, dass es sicherlich Menschen geben wird, die an einer Brücke wohnen, deren nach (1) gemessener Brückenzuschlag niedriger ist als $D_{Br}=3 \text{ dB}$.

Aber wenn dieser Anlieger jede Nacht rechtmäßig durch Güterzüge geweckt wird, dann ist diese Rechtsgrundlage falsch.

Kommentar 1.1:

Für Neubaustrecken, an denen eine Brücke geplant wird, sollte bis zur Fertigstellung

¹ Entfernung zwischen den Messpunkten: physikalisch mindestens eine Zuglänge, praktisch „weniger, aber so weit, dass sich die Messungen nicht beeinflussen“.

der maximal an einer Brücke gleichen Typs gemessene Brückenzuschlag eingesetzt werden - bis durch eine Messung nach obiger Meßvorschrift der physikalische Brückenzuschlag D_{Br} dieser Brücke festgestellt wird.

Kommentar 1.2:

Für bestehende Strecken, an denen eine Brücke eines bestimmten Typs vorhanden ist, sollte der maximal an einer Brücke gleichen Typs gemessene Brückenzuschlag eingesetzt werden - bis durch eine Messung nach obiger Meßvorschrift der physikalische Brückenzuschlag D_{Br} dieser Brücke festgestellt wird. (Für eine Brücke mit stählernem Überbau ohne Schotterbett also zur Zeit $D_{Br} = 17 \text{ dB}$.)

2 Beschreibung aller Brücken in einer Schall 03

Statistisch ist es notwendig, die Meßdaten möglichst aller Brücken mit stählernem Überbau ohne Schotterbett zu kennen..

Da bisher bekannt ist, dass etwa ein Viertel aller vorhandenen Brücken Stahlbrücken sind, gibt es etwa 8000 Stahlbrücken. Der größte Teil ist mit einem Schotteroberbau ausgestattet, also vielleicht 7000. Dann verbleiben etwa 1000 Brücken mit stählernem Überbau ohne Schotterbett.

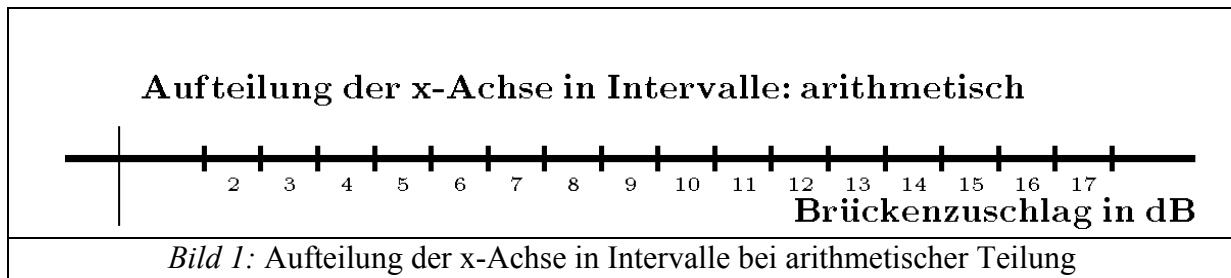
Da bisher jedoch nur für wenige² Brücken dieses Typs der Brückenzuschlag ermittelt wurde, haben wir hier eine Verteilung der gemessenen Brückenzuschläge konstruiert (in *Tabelle 1*)³ und dabei verwendet,

A1 dass der bisher maximal gemessene Brückenzuschlag $\Delta L^{B-S}_{\max} = 17 \text{ dB}$ beträgt

A2 dass der energetische Mittelwert dieser Zuschläge nicht $\Delta L^{B-S}_{\text{schall 03 (1990)}} = 3 \text{ dB}$, sondern $\Delta L^{B-S}_{\text{mit}} = 12 \text{ dB}$ beträgt.

2.1 Bewertung der verschiedenen Brückenzuschläge

Um die Verteilung der Brückenzuschläge angemessen darzustellen, wird die x -Achse in gleichlange Intervalle unterteilt. Hier wird die Länge 1 gewählt.



Nun werden die Brückenzuschläge für die 1000 Brücken mit stählernem Überbau ohne Schotterbett nach ihrer Größe sortiert und den Intervallen zugeordnet. Um die o.g. Anforderungen A1 und A2 zu erfüllen, wird hier angenommen, dass die Verteilung wie folgt aussieht:

² Die Anzahl der vermessenen Brücken mit stählernem Überbau ohne Schotterbett liegt nach unseren Schätzungen unter 50.

³ eine Übereinstimmung zwischen den hier konstruierten Brückenzuschlägen und den gemessenen Brückenzuschlägen wäre rein zufällig

Intervall	I_2	I_3	I_4	I_5	I_6	I_7	I_8	I_9
ΔL^{B-S}	1.5 - 2.5	2.5 - 3.5	3.5 - 4.5	4.5 - 5.5	5.5 - 6.5	6.5 - 7.5	7.5 - 8.5	7.5 - 8.5
Anzahl	80	90	100	110	120	10	10	10

Intervall	I_{10}	I_{11}	I_{12}	I_{13}	I_{14}	I_{15}	I_{16}	I_{17}
ΔL^{B-S}	9.5 - 10.5	10.5 - 11.5	11.5 - 12.5	12.5 - 13.5	13.5 - 14.5	14.5 - 15.5	15.5 - 16.5	16.5 - 17.5
Anzahl	10	60	60	70	80	80	60	50

*Tabelle 1: Verteilung der Brückenzuschläge
für Brücken mit stählernem Überbau ohne Schotterbett
auf Meßintervalle der Länge 1 dB*

Kommentar 2.1:

Die 50 lautesten Brücken sollten lärmsaniert werden! Nach Kommentar 1.2 könnte nach einer solchen Lärmsanierung für alle restlichen 950 Brücken mit stählernem Überbau ohne Schotterbett $D_{Br} = 16$ dB gesetzt werden.

3. Mittelwertbildung der Bahn

Leider läßt sich die Bahn AG nicht davon überzeugen, dass für nächtlichen Güterverkehr die lautesten Brücken beschrieben und saniert werden müssen. Die Bahn bevorzugt statt dessen die Beschreibung aller Brücken mit stählernem Überbau ohne Schotterbett durch eine einzige Zahl: den Mittelwert.

Nach (1) ist der Brückenzuschlag für eine Brücke abhängig von der Brückenkonstruktion und von „dem am häufigsten die Brücke befahrenden Zug“.

Damit sind zwei verschiedene Brückenzuschläge auch dann nicht miteinander vergleichbar, wenn sie vom gleichen Typ sind. Insbesondere sind Brücken mit stählernem Überbau ohne Schotterbett bei gleicher Konstruktion

Dabei gibt es weder physikalisch noch mathematisch eine Berechtigung, den Brückenzuschlag unabhängig von dem gemessenen Brückenzuschlag festzulegen. Ein Mittelwert über alle Brücken gleichen Typs ist daher eine willkürliche Grösse, die keine Aussage über den wirklichen Brückenzuschlag für eine bestimmte Brücke aussagt.

Da die Bahn jedoch einen Mittelwert angibt, werden im Folgenden sowohl der arithmetische als auch der energetische Mittelwerte zu der in *Tabelle 1* angegebenen Verteilung bestimmt. Es wird zusätzlich jeweils die Standardabweichung berechnet.

3.1 Arithmetische Statistik

Der (arithmetische) Mittelwert m der Brückenzuschläge für die in *Tabelle 1* charakterisierten 1000 Brücken mit stählernem Überbau ohne Schotterbett beträgt $m = 8.9$ dB, und die Standardabweichung s beträgt $s = 5.0$ dB.

Arithmetisches Mittel $m = 8.9$ dB und Standardabweichung $s = 5.0$ dB.	(2)
---	-----

Wenn nun diese Brückenzuschläge normalverteilt wären, dann würde für 68 % aller Brückenzuschläge ΔL^{B-S} gelten:

$$3.9 \text{ dB} \leq \Delta L^{B-S} \leq 13.9 \text{ dB}.$$

Dieser Bereich ist in *Bild 2* grün schraffiert.

Die blaue Kurve in *Bild 2* ist die Häufigkeitsverteilung $H(\Delta L^{B-S})$ der zu dem Mittelwert m und der Standardabweichung s gehörigen Normalverteilung.

$$H(\Delta L^{B-S}) = \frac{T}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\Delta L^{B-S} - m}{s} \right)^2} \quad (3)$$

wobei T geeignet zu wählen ist (für $T = 1$ ist der Flächeninhalt zwischen der x -Achse und der blauen Kurve gleich 1).

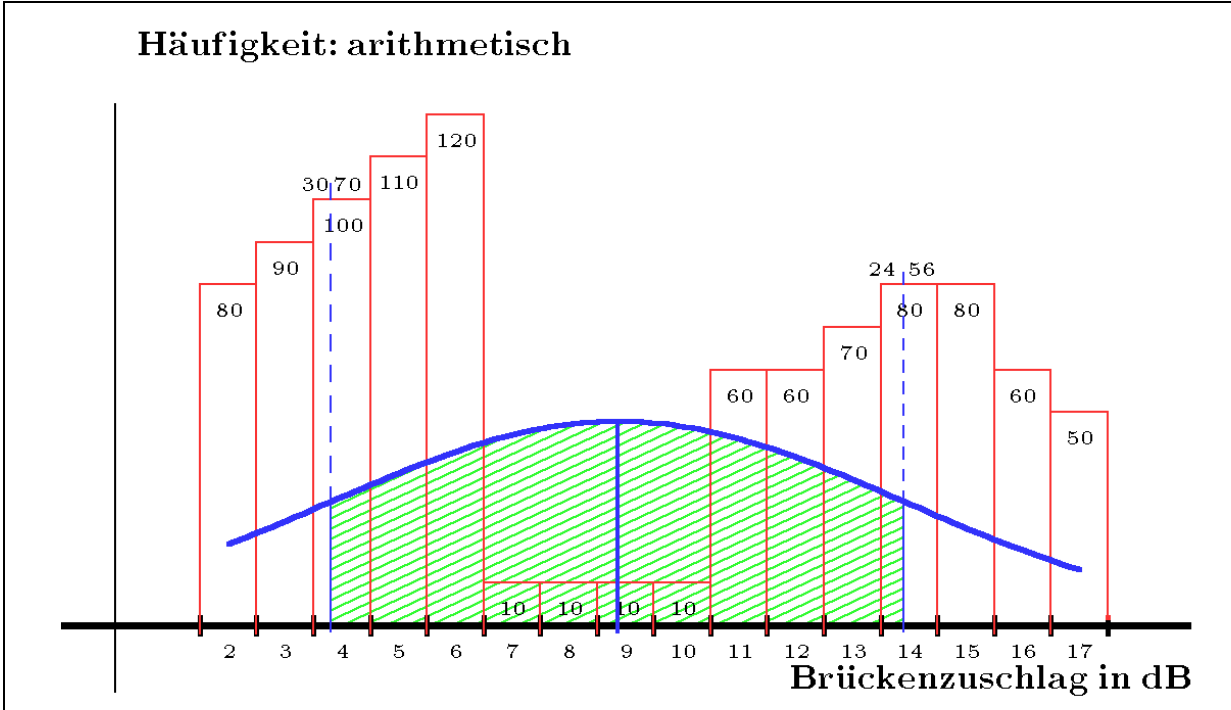


Bild 2: Die roten Blöcke geben zu jedem Brückenzuslags-Intervall die Häufigkeit der Brücken mit stählernem Überbau ohne Schotterbett an. Für diese roten Blöcke beträgt der Mittelwert $m = 8.9 \text{ dB}$ und die Standardabweichung $s = 5.0 \text{ dB}$. Zu diesem Mittelwert und dieser Standardabweichung beschreibt die blaue Kurve die zugehörige Normalverteilung (Formel (3)). Der grün schraffierte Bereich kennzeichnet das Intervall $3.9 \text{ dB} \leq \Delta L^{B-S} \leq 13.9 \text{ dB}$.

Aus *Bild 2* kann abgelesen werden:

Die blaue Kurve charakterisiert die durch die roten Blöcke beschriebene Verteilung nicht. Die Verteilung nach *Tabelle 1* ist „zweizipfelig“ („bimodal“) und keine Normalverteilung.

Die Anzahl der Brücken dieses Typs, die innerhalb des grünen Intervalls liegen, beträgt

$$70+110+120+10+10+10+10+60+60+70+24=554.$$

Die Anzahl der Brücken, die außerhalb des grünen Bereiches liegen, beträgt

$$80+90+30+56+80+60+50=446.$$

Bei

$$56+80+60+50=246$$

dieser Brücken beträgt der Brückenzuslag zwischen 14 und 17 dB, d.h.

für etwa 25% der Anlieger an diesen Brücken liegt der wahre Brückenzuslag höher als der um die Standardabweichung erhöhte (arithmetische) Mittelwert $m+s=13.9 \text{ dB(A)}$.

Nach der in *Tabelle 1* angegebenen Verteilung der 1000 Brückenzuschläge liegen nur 55 % aller Brücken dieses Typs in dem schraffierten Bereich. Wenn – wie bei dem bisher üblichen

Vorgehen - eine Normalverteilung angenommen wird, dann müssten 68 % aller Brücken dieses Typs in dem schraffierten Bereich liegen.

Kommentar 3.1:

Weder der arithmetische Mittelwert m noch die Summe aus Mittelwert und Standardabweichung s aller Brückenzuschläge beschreiben die (physikalisch messbare) Lärmsituation an einer einzelnen Brücke.

3.2 Energetische Statistik

Um die in *Tabelle 1* angegebene Verteilung energetisch angemessen darzustellen, wird hier folgende Umrechnung verwendet:

Es werden zwei graphische Parameter a und b eingeführt, so dass gilt

zu einem Pegel p_i gehört der x -Wert $x_i := f(p_i) = a + b \cdot 10^{0.1 \cdot p_i}$	(4)
--	-----

Zu einem kleinsten Pegel p_1 und einem größten Pegel p_2 soll nun ein Koordinatensystem so gewählt werden, dass gilt

- $f(p_1) = 100$
- $f(p_2) = 100 + 1000 = 1100$

Nach der Gleichung (4) erhalten wir dann durch Lösung der beiden Gleichungen

$x_1 := f(p_1) = a + b \cdot 10^{0.1 \cdot p_1}$	(5)
--	-----

und

$x_2 := f(p_2) = a + b \cdot 10^{0.1 \cdot p_2}$	(6)
--	-----

Aufteilung der x -Achse in Intervalle

Nun wird die x -Achse in Intervalle aufgeteilt. Hier soll jedes Intervall die Länge 1 haben, etwa bei $p_1 = \Delta L^{B-S} = 1.5 \text{ dB}$ beginnen und bei $p_2 = \Delta L^{B-S} = 17.5 \text{ dB}$ enden, d.h. wir bestimmen für

$$p_1 = 1.5 \quad \text{und} \quad p_2 = 17.5 \quad (7)$$

die graphischen Parameter a und b in den Gleichungen (5) und (6):

$$a + b \cdot 10^{0.15} = 100 \quad \text{und} \quad a + b \cdot 10^{1.75} = 1100 \quad (8)$$

Also gilt auch

$$\left\{ a + b \cdot 10^{1.75} \right\} - \left\{ a + b \cdot 10^{0.15} \right\} = 1100 - 100 = 1000 \quad (9)$$

oder

$$b \cdot (10^{1.75} - 10^{0.15}) = 1000 \quad \text{oder} \quad b = \frac{1000}{10^{1.75} - 10^{0.15}} \approx 18.2 \quad (10)$$

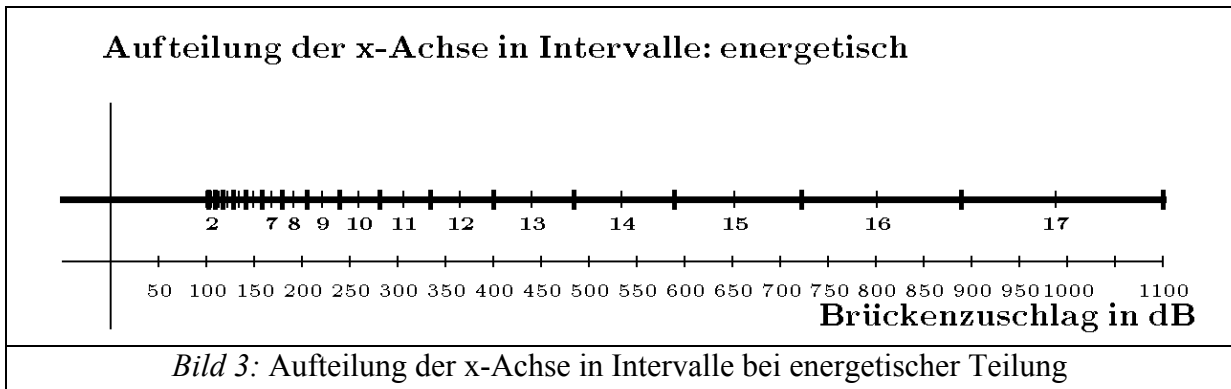
und damit

$$a = 100 - b \cdot 10^{0.15} \approx 74.3 \quad (11)$$

Folglich wird für diese speziellen Werte für p_1 und p_2 aus der Formel (4) die Formel (12):

zu einem Pegel p_i gehört der x -Wert $x_i := f(p_i) = 74.3 + 18.2 \cdot 10^{0.1 \cdot p_i}$	(12)
--	------

Auf der x-Achse werden die Meßwerte in den Intervallen I_2 bis I_{17} mit der Intervalllänge 1 eingetragen:



Wird in Bild 3 jeweils die Häufigkeit (nach *Tabelle 1*) eingetragen, so ergibt sich

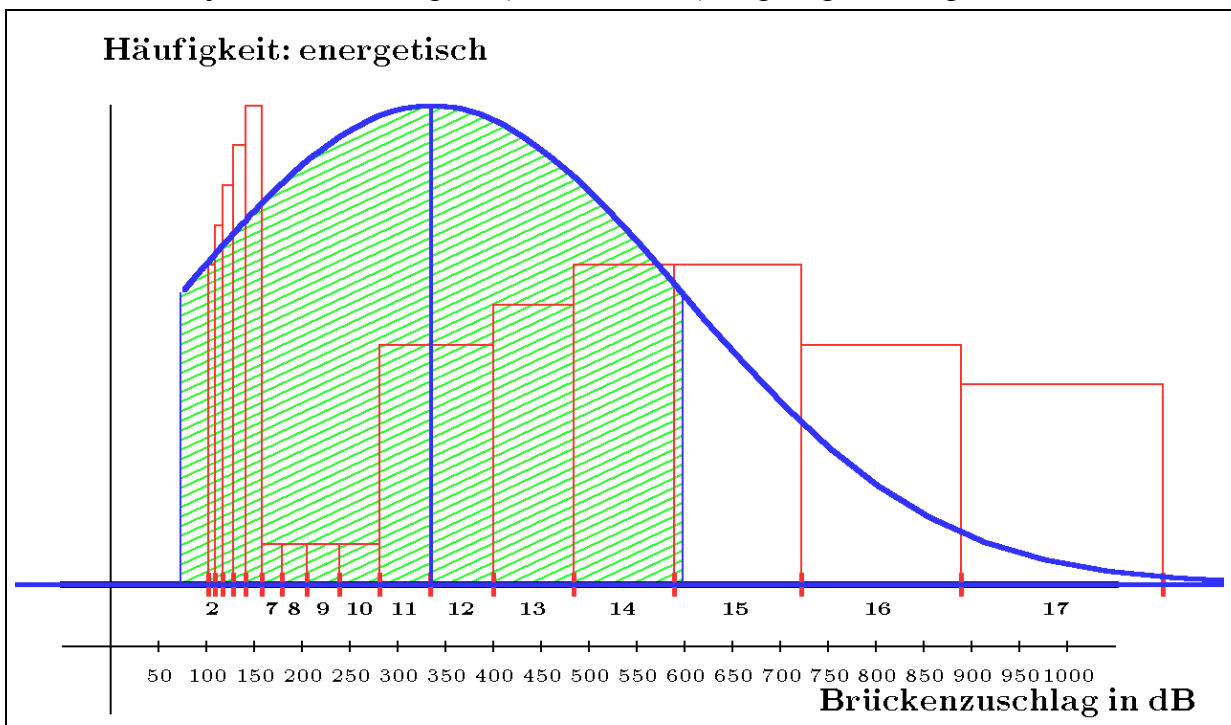


Bild 4: Die roten Blöcke geben zu jedem Brückenzuschlags-Intervall die Häufigkeit der Brücken mit stählernem Überbau ohne Schotterbett an.

Für diese roten Blöcke beträgt der Mittelwert $m = 11.5 \text{ dB}$.

Bezogen auf das arithmetische Koordinatensystem beträgt der Mittelwert 335 und die Standardabweichung 262.

Zu diesem Mittelwert und dieser Standardabweichung beschreibt die blaue Kurve die zugehörige Normalverteilung (Formel (3)).

Der grün schraffierte Bereich kennzeichnet das Intervall

arithmetisch:
 $73 \leq 68 \% \text{ der Fläche einer Normalverteilung} \leq 598$

energetisch:
 $0 \text{ dB} \leq 68 \% \text{ der Fläche einer Normalverteilung} \leq 14.6 \text{ dB}$

Kommentar 3.2.1:

Auch der energetische Mittelwert $m = 11.5 \text{ dB}$ aller Brückenzuschläge beschreibt die (physikalisch messbare) Lärmsituation an einer einzelnen Brücke nicht.

Für 60 % der Anlieger liegt der physikalisch gemessene Brückenzuschlag unter diesem Wert, und für 40 % liegt er darüber; für 5 % der Anlieger sogar um 5 dB.

4 Ergebnis

Physikalisch richtig ist nur der physikalisch nach Gleichung (1) gemessene Brückenzuschlag. Da die größte Lärmbelastung durch nachts fahrende Güterzüge verursacht wird, sollte für Brücken, die nachts von Güterzügen befahren werden, in der Definition (1)

der am häufigsten die Brücke befahrenden Zug

ersetzt werden durch

den lautesten bei Nacht die Brücke befahrenden Güterzug

Dann gilt:

Der Meßbereich zur Bestimmung des Brückenzuschlags einer Brücke B wird festgelegt durch die beiden folgenden Meßpunkte:

- Meßpunkt M_B . Dieser befindet sich in 25 m Entfernung senkrecht zu einem Gleis G der zu beurteilenden Brücke B.
- Meßpunkt M_S . Dieser befindet sich mindestens eine Zuglänge von der Brücke entfernt entgegen der Fahrtrichtung von Gleis G, ebenfalls 25 m senkrecht zu Gleis G.

Bei nachts von Güterzügen befahrenen Brücken ist dann für den lautesten bei Nacht die Brücke befahrenden Güterzug, und

Bei nachts nicht von Güterzügen befahrenen Brücken für einen der am häufigsten die Brücke befahrenden Zug

ist

- am Meßpunkt M_B der Vorbeifahrpegel V_B und
- am Meßpunkt M_S der Vorbeifahrpegel V_S

zu messen. Der Brückenzuschlag D_{Br} für diese Brücke ist dann definiert durch

$$D_{Br} = \Delta L^{B-S} = V_B - V_S$$

(13)

Mit dieser Definition des Brückenzuschlags sollte danach gelten:

Für Neubaustrecken, an denen eine Brücke geplant wird, ist bis zur Fertigstellung der maximal an einer Brücke gleichen Typs gemessene Brückenzuschlag einzusetzen - bis durch eine Messung nach obiger Meßvorschrift der physikalische Brückenzuschlag D_{Br} dieser Brücke festgestellt wird.

Für bestehende Strecken, an denen eine Brücke eines bestimmten Typs vorhanden ist, ist der maximal an einer Brücke gleichen Typs gemessene Brückenzuschlag einzusetzen - bis durch eine Messung nach obiger Meßvorschrift der physikalisch bestimmte Brückenzuschlag D_{Br} festgestellt wird. (Für eine Brücke mit stählernem Überbau ohne Schotterbett also zur Zeit $D_{Br} = 17 \text{ dB}$.)