Messstation Hamminkeln

Plädoyer für einen Vergleich von Messung und Berechnung bei Schienenverkehrslärm

Vortrag am 15. Juni 2012, in Hamminkeln

D. Windelberg
AG Qualität
Leibniz Universität Hannover
Mathematik

Messstation Hamminkeln
Monitoring und Berechnung bei Schienenverkehrslärm

1. Vorbeifahrpegel: Berechnung und Messung
2. Berechnung der Vorbeifahrpegel
3. Messung der Vorbeifahrpegel: Monitoring
4. Daten-Auswertung
5. Lärmauffällige Güterwagen
6. 10 dB Lärmminderung?

1. Vorbeifahrpegel: Berechnung und Messung

An verschiedenen Messstationen wird

„der Schienenverkehrslärm“ gemessen, indem jede einzelne Vorbeifahrt eines Schienenfahrzeuges dokumentiert wird:

Dazu werden während einer „Vorbeifahrzeit“ (oder „Einwirkzeit“)

- **mit einer bestimmten Taktfrequenz (F(ast) oder S(low)) und**
- **mit einer bestimmten Bewertung (meist „A“)**

gemessen.

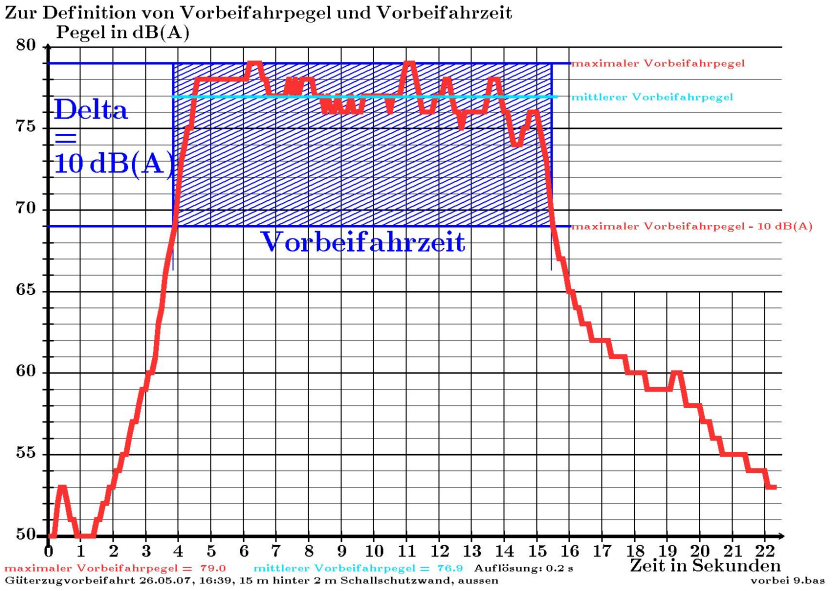

Bild 1.1

Definition (mittlerer) Vorbeifahrpegel

Auflösung: 0.2 s

Aus *Bild 1.1* kann daher erkannt werden:

Vorbeifahrzeit = 16 - 4 =12 s **maximaler Vorbeifahrpegel** $p_{max} = 79.0\,dB(A)$

(mittlerer) Vorbeifahrpegel $p = 76.9\,dB(A)$

In mehreren Schritten werden die einzelnen Vorbeifahrpegel jeweils gemittelt, um daraus für die gesetzliche Bestimmung des Schienenverkehrslärms an einem festen Ort einen „Jahres-Nacht-Mittelungspegel“ zu definieren:

- **Stunden-Mittelungspegel**
  Für jede der 8 Nachtstunden einer Nacht wird das energetische Mittel aller Vorbeifahrpegel der einzelnen Zugvorbeifahrten gebildet.
- **Nacht-Mittelungspegel**
  Für jede der 365 Nächten eines Jahres wird das energetische Mittel aller 8 einzelner Stunden-Mittelungspegel gebildet
- **Jahres-Nacht-Mittelungspegel**
  Für ein Jahr wird das energetische Mittel aller 365 einzelner Stunden-Mittelungspegel gebildet.

Ist dieser Jahres-Nacht-Mittelungspegel „der Mittelungspegel einer *typischen Nacht*“?

2. Berechnung der Vorbeifahrpegel

Der Jahres-Nacht-Mittelungspegel wird nach den Streckenfahrplänen und dem Berechnungsverfahren Schall 03 (1990)
für jeden einzelnen Zug mit Hilfe des eine Stunde bezogene Emissionspegels $L_{m,E}$ für einen Ort O berechnet, der sich 25 m von Gleismitte in 3.5 m über Grund befindet.

Der Zusammenhang zwischen einem während einer Vorbeifahrzeit t (in Sekunden) erzeugten Vorbeifahrpegel p_v (in $dB(A)$) und dem (auf eine Stunde bezogenen) Emissionspegel $L_{m,E}$ ist zwar durch

$$L_{m,E} = 10 \cdot \lg \left[\frac{t}{3600} \right] + p_v \tag{1}$$

bestimmbar, wird aber in der Schall 03 nicht betrachtet.

Für eine Messstation an einem Ort O wird wie folgt gerechnet:

$$L_{m,E} = \mathbf{G} + D_{Fz} + D_D + D_l + D_v + D_{Fb} + D_{Br} + D_{Bü} + D_{Ra} \tag{2}$$

Darin sind

Abkürzung	Erklärung	Definition
$L_{m,E}$	**Emissionspegel des Güterzuges, bezogen auf eine Stunde**	
G	**„Grundwert“ zur Beschreibung eines Grundzustandes aller Schienen („durchschnittlich guter Schienenzustand“) und aller Wagen mit allen ihren Rädern**	
D_{Fz}	**Einfluss der Fahrzeugart**	**Güterzüge:** $D_{Fz} = 0$
D_D	**Einfluss der Bremsbauart (=Anteil p der scheibengebremsten Güterwagen)**	$D_D = 10 \cdot \lg[5 - 0,04 \cdot p]$
D_l	**Einfluss der Länge l des Zuges (in m)**	$D_l = 10 \cdot \lg[0,01 \cdot l]$
D_v	**Einfluss der Geschwindigkeit v (in m/s)**	$D_v = 20 \cdot \lg[0,01 \cdot v]$
D_{Fb}	**Einfluss der Fahrbahnart**	**Betonschwelle:** $D_{Fb} = 2$
D_{Br}	**Einfluss der Brücken**	**keine Brücke:** $D_{Br} = 0$
$D_{Bü}$	**Einfluss der Bahnübergänge**	**kein Bahnübergang:** $D_{Bü} = 0$
D_{Ra}	**Einfluss der Kurven**	**Kurvenradius** $\geq 500\,m$**: 0**

Tabelle 1: **Parameter der Stunden-Pegel**

Bedeutung des Grundwertes für den Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Pegeln

In der Schall 03 (1990) wird der Grundwert konstant gewählt durch

$$G = 51\,dB(A).$$

Wenn sich jedoch der Schienenzustand oder der Zustand der Güterwagen(räder) gegenüber einem bei der Verfassung der Schall 03 (1990) gewählten „normalen“ Zustand ändert, dann ist

$$\textbf{Emissionspegel} \neq L_{m,E}$$

Das heißt: Rechnung und Messung stimmen nicht überein!

Nach der Schall 03 (1990) wird dieser Grundwert $G := 51\,dB(A)$ gesetzt - diesen Wert sollte der Grundwert eines Güterwagens bei „durchschnittlich gutem“ Schienenzustand besitzen.

Vorangegangene Messungen zeigen jedoch, dass dieser Grundwert sehr stark streut - wie bereits mehrfach dokumentiert wurde.

***Bild 1.2* zeigt, dass die Grundwerte von 95% der gemessenen Güterzugvorbeifahrten an verschiedenen Orten**

- **unterhalb von 57 *dB(A)***
  (und nicht überall bei 51 $dB(A)$)
- **im energetischen Mittel bei 53.1 *dB(A)***

liegen.

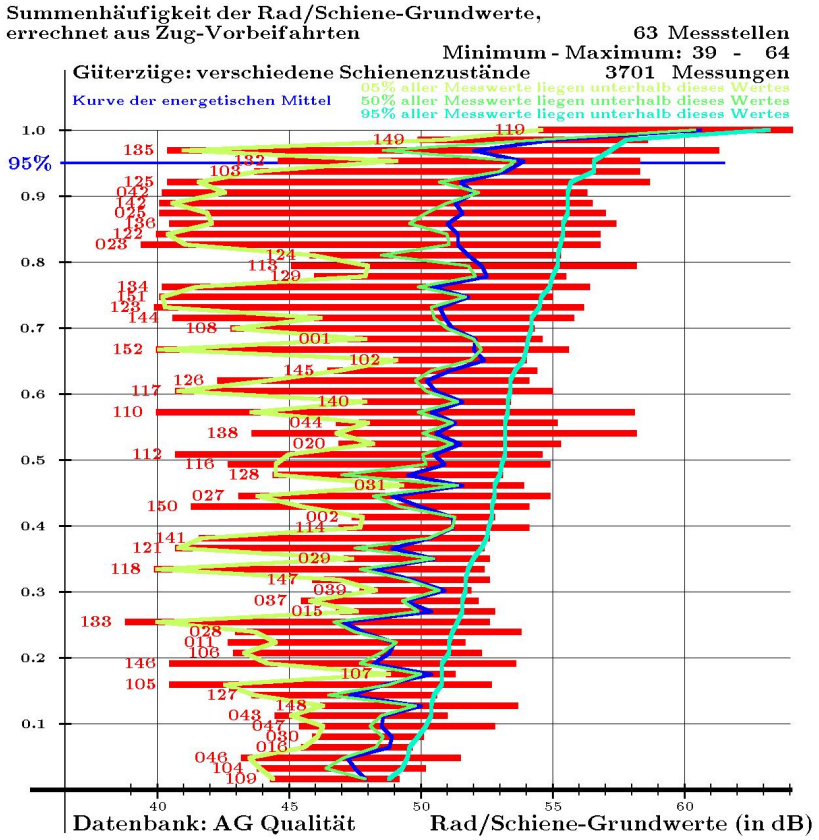

Bild 1.2

Verteilung der Grundwerte von Güterzügen

Hier wird daher die Formel (2) verwendet, um gemessene Vorbeifahrpegel mit den gerechneten Pegel zu vergleichen:

$$\begin{aligned} L_{m,E} &= \mathbf{G} + 0 + D_D + 10 \cdot \lg\left[0.01 \cdot l\right] + 20 \cdot \lg\left[0.01 \cdot v\right] + 2 + 0 + 0 + 0 \\ &= \mathbf{G} + D_D + 2 + 10 \cdot \lg\left[0.01^3 \cdot l \cdot v^2\right] \end{aligned} \tag{3}$$

Der Einfluss der Bremssysteme wird in der *Schall 03* nur durch den Anteil scheibengebremster Fahrzeuge berücksichtigt - nicht aber durch andere Brems-Sohlen. Für Güterwagen wird daher

$$D_D(0\%) = 10 \cdot \lg\left[5\right] = 7$$

gesetzt.

Bemerkung:
Eine Lärmminderung durch Umrüstung des Bremssystems von Güterwagen würde daher nur dann den Wert von $\boxed{D_D(100\%) = 0\,dB(A)}$ **ergeben, wenn sämtliche Güterwagen mit Scheibenbremsen ausgestattet sind.**

Die Gleichung (3) kann nach dem Grundwert G aufgelöst werden:

$$\mathbf{G} = L_{m,E} - D_D - 2 - 10 \cdot \lg\left[0.01^3 \cdot l \cdot v^2\right] \tag{4}$$

oder, nach Gleichung (1),

$$\mathbf{G} = 10 \cdot \lg\left[\frac{t}{3600}\right] + p_v - D_D - 2 - 10 \cdot \lg\left[0.01^3 \cdot l \cdot v^2\right] \tag{5}$$

Diese Formel (5) erlaubt es, aus den Parametern p_v, l und v den Grundwert G jedes einzelnen Güterzuges zu bestimmen.

Bei zweigleisigen Strecken beträgt der Abstand zwischen den Gleismitten meist $4\,m$. Wenn dann - wie in dem folgenden Beispiel - die Messstation an einer langen, geraden Strecke in einem Abstand von $25\,m$ zu der Mitte zwischen den beiden Gleisen installiert wird, so sind nur geringe Korrekturen[1]) notwendig, um den Emissionspegel $L_{m,E}$ für jedes der beiden Gleise zu bestimmen:

- **Für das Gleis, dessen Gleismitte von der Messstation einen Abstand von $23\,m$ beträgt, ist der Emissionspegel**

$$\mathbf{L}_{m,E,23} = L_{m,E} + 0.3 \tag{6}$$

- **Für das Gleis, dessen Gleismitte von der Messstation einen Abstand von $27\,m$ beträgt, ist der Emissionspegel**

$$\mathbf{L}_{m,E,27} = L_{m,E} - 0.4 \tag{7}$$

[1]) nach Schall 03 (1990) ist $D_{s_\perp}(23\,m) = 1.9$, $D_{s_\perp}(25\,m) = 1.6$ und $D_{s_\perp}(27\,m) = 1.2$.

Wenn angenommen wird, dass sich innerhalb zu vernachlässigbarer Schranken der Schienenzustand der Gleise (und die Lage der Gleise) an einer Messstation nicht ändert, dann ist es möglich, für jeden Güterwagen den nach (5) aus Messungen bestimmten Grundwert als

Qualitätsmaß für die Güte des Güterwagens

zu verwenden:

je niedriger der Grundwert, desto leiser ist der Güterwagen

3. Messung der Vorbeifahrpegel: Monitoring

Das Monitoring einer Zugvorbeifahrt wird im Folgenden an einem Beispiel aufgezeigt:

Datum: 31.12.2010 Geschwindigkeit: 97 km/h

Bild 3.1

$v = 79\,km/h$,
$t =$**15:25:00.6**
$p =$ **70.6 / 73.2** $dB(A)$

Bild 3.2

$v = 79\,km/h$,
$t =$**15:25:01.0**
$p =$ **76.3 / 77.5** $dB(A)$

Bild 3.3

$v = 79\,km/h$,
$t =$**15:25:01.2**
$p =$ **76.3 / 77.5** $dB(A)$

Bild 3.4

$v = 72\,km/h$,
$t =$**15:25:01.4**
$p =$ **76.3 / 77.5** $dB(A)$

Aus jedem dieser Bilder wird mit Hilfe eines eigenen Programmes unter anderem die Höhe des Vorbeifahrpegels dieser Fünftel-Sekunde herausgelesen:

```
   x x x x     x x x x x x              x x x x
x           x             x            x           x
x                         x            x           x
x                       x              x           x
x   x x x               x              x         x x
x x         x         x                  x x x   x
x           x         x                            x
x           x     x                                x
x           x     x                    x         x
   x x x x       x                  x     x x x
```

Bild 3.5: **Vorbeifahrpegel-Pixel im *.avi-Format**

Güterzug-Monitoring zur Beurteilung von Lärmminderungsmaßnahmen

pro Vorbeifahrt:

A.1	**Fahrzeugart (Güterzug / andere Geräuschquelle)**
A.2	**Uhrzeit in $hh:min$ der Güterzug-Vorbeifahrt**
A.3	**Fahrtrichtung (zur Berücksichtigung des Abstandes s_k (in m) zum Gleis)**
A.4	**Geschwindigkeit in km/h während der Vorbeifahrt**

während (mindestens) jeder Sekunde der Vorbeifahrt:

A.5	**Vorbeifahrpegel p in $dB(A)$ während jeder Sekunde**
A.6	**maximaler Vorbeifahrpegel p_{max} in $dB(A)$ während jeder Sekunde**
A.7	**Vorbeifahrzeit in s (zur Berechnung der Gesamtlänge des Güterzuges)**

Um für jede Zugvorbeifahrt die zuvor genannten Messwerte automatisiert zu erfassen, werden in Hamminkeln durch den TÜV-Nord folgende Messgeräte eingesetzt:

Messgeräte in Hamminkeln

Schall-Messgerät
zur Dokumentation von Uhrzeit, Vorbeifahrpegel und maximalem Vorbeifahrpegel, jeweils 5 Messungen pro Sekunde

Video-Kamera,
die sich bei jedem Pegel oberhalb eines bestimmten Grenzpegels einschaltet (und nach Unterschreitung dieses Pegels wieder abschaltet), deren Film (im **.avi*-Format) sich in jeweils 5 Bilder pro Sekunde auflösen läßt

Geschwindigkeits-Messgerät,
das mit der Video-Kamera gekoppelt die jeweilige Vorbeifahrgeschwindigkeit registriert - und durch das Vorzeichen die Fahrtrichtung angibt.

4. Daten-Auswertung

	Messwerte				Berechnete Werte			Messwert
Uhr-zeit	Art	Vorbei-fahrzeit t in s	Geschwin-digkeit v v in km/h	Vorbei-fahrpegel in $dB(A)$	Länge in m	Stunden-pegel in $dB(A)$	Grund-wert in $dB(A)$	maximaler Pegel in $dB(A)$
00:50:35	F+C	24.8	80	83.8	551	62.2	47.7	87.6
00:54:25	F+C	27.2	68	83.3	514	62.1	49.3	87.2
01:00:41	C	24.4	68	74.7	461	53.0	40.7	81.2
01:22:37	K	15.2	80	88.3	338	64.6	52.2	90.9
01:44:24	C	20.0	75	79.6	417	57.0	44.3	84.4
01:54:54	F+C	21.4	82	88.3	487	66.0	51.9	91.4
02:13:55	S	20.0	78	83.7	433	61.1	47.9	88.6
02:21:52	C	23.0	75	82.4	479	60.5	47.1	87.7
02:33:57	F+C	22.0	76	87.7	464	65.6	52.3	90.6
02:37:47	K+C	23.2	72	85.6	476	63.8	50.9	89.2
02:44:19	F+C+K	29.4	70	83.2	572	62.3	48.8	87.7
11:49:57	S	22.4	82	78.5	510	56.4	42.1	83.4
12:04:20	S	25.8	61	84.3	437	62.9	51.7	89.7
12:09:13	C+F	29.0	70	77.8	564	56.9	43.4	80.7
12:25:43	C+K+R	27.8	73	83.9	564	62.8	49.0	86.4
12:27:58	S	22.2	66	85.3	407	63.2	51.7	87.4

Tabelle 4.1: Daten (in schwarz) und Ergebnisse (in rot) am 31.12.10 bei Schnee

Eine erste Auswertung dieser Daten zeigt:

- 95% dieser 20 Grundwerte sind geringer als 52.3 $dB(A)$

- 50% dieser 20 Grundwerte sind geringer als 49.0 $dB(A)$

- das energetische Mittel dieser 20 Grundwerte beträgt 48.7 $dB(A)$

Weitere Betrachtungen zum Schienenzustand und zu dem mittleren Rad-Zustand:

- **Um 01:22 Uhr fuhr ein Kesselwagen mit Grundwert 52.2** $dB(A)$**.**
- **Zuvor (um 01.00 Uhr) fuhr ein Containerzug in die gleiche Richtung, aber sein Grundwert betrug 40.7** $dB(A)$**; er war als um 11.5** $dB(A)$ **leiser. (Sein Vorbeifahrpegel von 74.7** $dB(A)$ **war sogar um 13.6** $dB(A)$ **leiser als 88.3** $dB(A)$**.)**
- **Um 12:27 fuhr ein Schotterwagenzug in die andere Richtung - mit einem Grundwert von 51.7** $dB(A)$**.**

Züge mit hohen Grundwerten fuhren also in beide Richtungen, d.h. der Schienenzustand ist vermutlich in beiden Richtungen gleich.
Die Unterschiede stammen daher vermutlich von den Rädern und den Aufbauten.

5. Lärmauffällige Güterwagen

Die Differenz zwischen dem (mittleren) Vorbeifahrpegel und dem Maximalpegel eines Güterzuges zeigt an, ob es einzelne Wagen dieses Zuge gibt, die „auffällig“ lauter sind als das energetische Mittel aller Güterwagen dieses Zuges.

Als „auffällig“ wird hier empfohlen:

$$p_{max} - p > 3\,dB(A) \quad .$$

In dem obigen Beispiel gibt es keinen lärmauffälligen Güterzug.

Für den Umgang mit Güterwagen, die das Mittel p um mehr als $3\,dB(A)$ überschreiten, gibt es bisher noch keine Empfehlung.

6. 10 dB Lärmminderung

Wird etwa nach einem bestimmten Zeitabschnitt (z.B. nach 2 Monaten oder einem Jahr) ein der *Tabelle 4.1* entsprechendes Messprotokoll angelegt und werden die entsprechenden Verteilungen miteinander verglichen, kann entschieden werden, ob sich bestimmte Kenngrößen der Verteilung der Grundwerte im Laufe der vergangenen Zeit signifikant verbessert haben (oder nicht). Eine graphische Darstellung der Ergebnisse würde die Entwicklung leicht erkennen lassen.

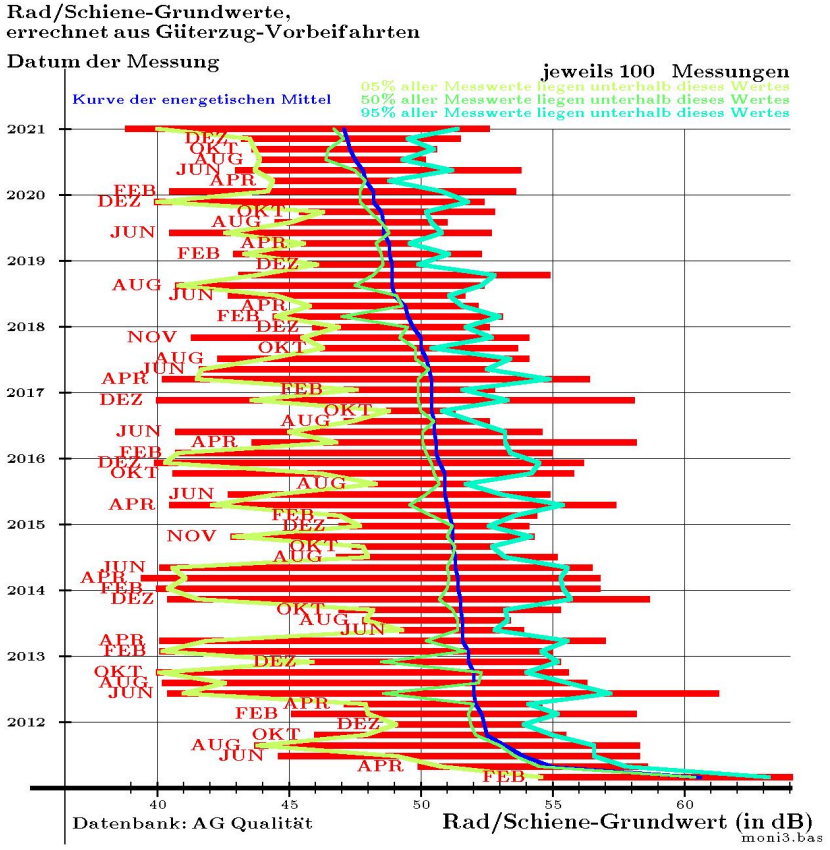

Bild 4.1

Willkürlich modellierte Daten einer Lärmminderung

Herzlichen Dank für Ihr Interesse an einem vollständigen Monitoring von Güterzugvorbeifahrten zur Dokumentierung der Lärm-Grundwerte einzelner Züge