



# Messungen zu Schienenverkehr

Stand: 18. Dezember 2012

## Inhaltsverzeichnis

<b>1 Vorbemerkungen</b>	<b>2</b>
1.1 Definition: (mittlerer) Vorbeifahrpegel . . . . .	2
1.2 Jahres-Nacht-Mittelungspegel . . . . .	2
<b>2 Berechnungsverfahren Schall 03 (1990)</b>	<b>3</b>
2.1 Stundenpegel 25 m von Gleismitte, 3.5 m über Grund . . . . .	3
2.2 Ausbreitungsrechnung . . . . .	5
2.3 Vergleichende Messungen einer Messstation . . . . .	5
2.4 Exemplarisches Messprotokoll mit Auswertung . . . . .	7
2.5 Lärmbewertung . . . . .	7
<b>3 Mittelungs- und Vorbeifahrpegel eines Montags</b>	<b>9</b>
3.1 Messdaten . . . . .	9
3.2 Rekonstruktion einzelner Stundenpegel aus einem Nacht-Mittelungspegel .	9
3.3 Grobanalyse: Annahmen und Anforderungen . . . . .	10
3.4 Feinanalyse: Annahmen und Anforderungen . . . . .	13
3.5 Aufweckwahrscheinlichkeit . . . . .	14
3.5.1 Cortisol-Konzentration . . . . .	15
<b>4 Lärminderung</b>	<b>15</b>
4.1 Nachweis einer Lärminderung durch Rechnung . . . . .	16
4.2 Nachweis einer Lärminderung durch Messung . . . . .	16
<b>5 Beispiele</b>	<b>16</b>
5.1 (optimale) Dokumentation einzelner Vorbeifahrten . . . . .	16
5.2 Dokumentation einer einzelnen Nacht . . . . .	20
<b>6 Dokumentation</b>	<b>21</b>
6.1 Dokumentation von Änderungen der Vorbeifahrpegel . . . . .	21
6.2 Bestimmung der Aufweckwahrscheinlichkeit für einen bestimmten Ort . . .	22
<b>7 weiterführende Betrachtungen</b>	<b>22</b>

# 1 Vorbemerkungen

Um zu erkennen, ob innerhalb eines bestimmten Zeitraumes im Schienenverkehr eine Lärm-minderung eingetreten ist, sind Messungen und Auswerteverfahren erforderlich.

In diesem Aufsatz wird angenommen, dass von einer Messstation bei jeder Zugvorbeifahrt bestimmte Messwerte erfasst werden. Es wird dann berechnet, wie die  $n$  sind, wenn wungen ergebnissen einzelner Messstationen ausgewertet zu prüfen, ob die gesetzlichen Grenzwerte eingehalten werden - aber auch, um eventuelle Änderungen der Lärmbelastung zu dokumentieren. werden (können). Da sich die gesetzlichen Vorschriften (in der 16. BImSchV und in der Schall 03 (1990)) jeweils auf Jahres-Mittelungspegel beziehen, ist eine automatisierte Messung erforderlich, um zu prüfen, ob die gesetzlichen Grenzwerte eingehalten werden - aber auch, um eventuelle Änderungen der Lärmbelastung zu dokumentieren.

Für die nächtliche Lärmbelastung durch Schienenverkehrslärm ist der Jahres-Nacht-Mittelungspegel nur eine sehr grobe Kennziffer, die viele den Schlaf störende Parameter vernachlässigt, wie die in den folgenden Kapiteln beschriebene beispielhafte Auswertung einer Messstation zeigt.

## 1.1 Definition: (mittlerer) Vorbeifahrpegel

An verschiedenen Messstationen wird  
„der (nächtliche) Schienenverkehrslärm“  
gemessen.

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

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

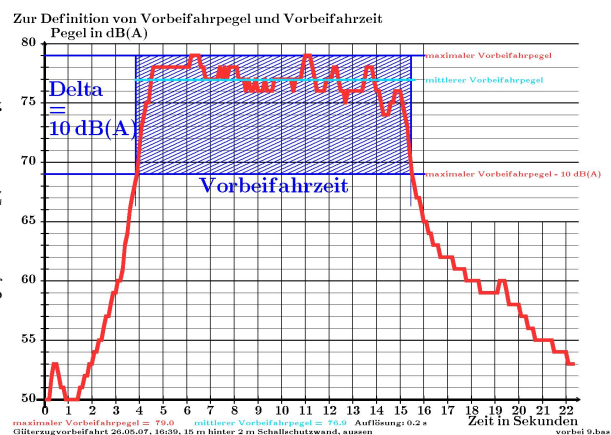
gemessen.

Aus *Bild 1.1* kann daher erkannt werden:

Vorbeifahrzeit =  $16 - 4 = 12$  s

maximaler Vorbeifahrpegel =  $79.0$  dB(A)

mittlerer Vorbeifahrpegel =  $76.9$  dB(A)



*Bild 1.1*

Definition (mittlerer) Vorbeifahrpegel  
Auflösung: 0.2 s

## 1.2 Jahres-Nacht-Mittelungspegel

Durch diesen Aufsatz soll deutlich werden, dass es nicht sinnvoll ist, die Daten einzelner Vorbeifahrten während der Nacht (von 22:00 bis 06:00 Uhr) so oft zu mitteln, bis sich die Zahl „Jahres-Nacht-Mittelungspegel“ ergibt: es gibt Lärmsituationen, die bezüglich nächtlicher Schlafbedingungen sehr unterschiedlich sind, obwohl der zugehörige Jahres-Nacht-Mittelungspegel gleich ist. - „Die typische Nacht“ (oder „die typische Woche“) bezüglich der Wirkung von Schienenverkehrslärm während eines Jahres gibt es daher nicht.

Wenn in der Lärmwirkungsforschung nach einer „Dosis-Wirkungs-Kurve“ gesucht wird, so lässt sich die „Dosis“ Schienenverkehrslärm nicht eindeutig beschreiben. Es ist dann nicht mehr sinnvoll, nach einer „Wirkung“ einer solchen Dosis zu fragen.

## 2 Berechnungsverfahren Schall 03 (1990)

### 2.1 Stundenpegel 25 m von Gleismitte, 3.5 m über Grund

Nach der *Schall 03 (1990)* wird der auf eine Stunde bezogene Emissionspegel  $L_{m,E}$  eines einzelnen Güterzuges (ohne die Lok) für eine Messstation, die sich in einem seitlichen Abstand von 25 m von der Gleismitte und in einer Höhe von 3.5 m über der Schienoberfläche in ebenem Gelände befindet, wie folgt gerechnet:

$$\begin{aligned} L_{m,E} &= \mathbf{G} + D_{Fz} + D_D + D_l + D_v + D_{Fb} + D_{Br} + D_{Bü} + D_{Ra} \\ &= G + 0 + D_D + 10 \cdot \lg [0.01 \cdot l] + 20 \cdot \lg [0.01 \cdot v] + 2 + 0 + 0 + 0 \\ &= G + D_D + 2 + 10 \cdot \lg [0.01^2 \cdot l \cdot v^2] \end{aligned} \quad (1)$$

Darin sind

Abkürzung	Erklärung
$L_{m,E}$	Emissionspegel des Güterzuges, bezogen auf eine Stunde
$\mathbf{G}$	„Grundwert“ zur Beschreibung eines Grundzustandes aller Schienen („durchschnittlich guter Schienenzustand“) und aller Wagen mit allen ihren Rädern
$D_{Fz}$	Einfluss der Fahrzeugart
$D_D$	Einfluss der Bremsbauart (Anteil der scheibengebremsten Güterwagen)
$D_l$	Einfluss der Länge des Güterzuges
$D_v$	Einfluss der Geschwindigkeit
$D_{Fb}$	Einfluss der Fahrbahnart
$D_{Br}$	Einfluss der Brücken
$D_{Bü}$	Einfluss der Bahnübergänge
$D_{Ra}$	Einfluss der Kurven

Tabelle 2.1: Parameter der Stunden-Pegel

#### Bedeutung des Grundwertes für den Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Pegeln

In der Schall 03 (1990) wird der Grundwert konstant durch  $G = 51 \text{ dB}(A)$  angesetzt. Wenn sich jedoch der Schienenzustand oder der Zustand der Güterwagen gegenüber einem bei der Verfassung der Schall 03 (1990) gewählten „normalen“ Zustand ändert, dann stimmen Messung und  $L_{m,E}$  nicht mehr überein.

Hier wird daher die Formel (1) verwendet, um gemessene Vorbeifahrpegel mit den gerechneten Pegel zu vergleichen.

Der Einfluss der Bremssysteme wird nur durch den Anteil scheibengebremster Fahrzeuge berücksichtigt - nicht aber durch andere Brems-Sohlen. Für Güterwagen wird in der *Schall 03 (1990)* daher  $D_D = 7$  gesetzt.<sup>1)</sup>

Diese Gleichung (1) kann nach dem Grundwert  $G$  aufgelöst werden:

$$G = L_{m,E} - D_D - 2 - 10 \cdot \lg [0.01^2 \cdot l \cdot v^2] \quad (2)$$

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 verschiedene Güterzüge die nach (2) berechneten Grundwerte als

Qualitätsmaß für die Schallerzeugung des Güterzuges

<sup>1)</sup> Eine Lärminderung durch Umrüstung des Bremssystems von Güterwagen würde daher nur dann den Höchstwert von  $7 \text{ dB}(A)$  ergeben, wenn sämtliche Güterwagen mit Scheibenbremsen ausgestattet sind.

zu verwenden:

**je höher der Grundwert, desto lauter ist der Güterzug**

(Nach der Schall03 (1990) wird dieser Grundwert  $G := 51$  gesetzt - diesen Wert sollte der Grundwert bei „durchschnittlich gutem“ Schienenzustand besitzen.

## 2.2 Ausbreitungsrechnung

Wenn sich die Messstation nicht in diesem Abstand und/oder dieser Höhe bezüglich des betrachteten Gleises befindet, so ist der Immissionspegel  $L_{r,MS}$  an der Messstation mit Hilfe der Ausbreitungsrechnung aus der Schall03 (1990) zu berechnen:

Die Gleise werden in einer geeigneten Umgebung der Messstation in Teilstücke  $k$  zerlegt, und für jedes dieser Teilstücke wird der Stunden-Immissionspegel  $L_{r,k}$  nach der folgenden Formel (3) berechnet:

$$L_{r,k} = L_{m,E,k} + 19,2 + 10 \cdot \lg [l_k] + D_{I,k} + D_{s,k} + D_{L,k} + D_{BM,k} + D_{Korr,k} \quad (3)$$

Darin sind

Abkürzung	Erklärung
Abhängig von der Höhe des Vorbeifahrpegels oder des Abstandes vom Gleis:	
$L_{m,E,k}$	Stunden-Emissionspegel für das Teilstück $k$ nach (1)
$D_{s,k}$	Pegeldifferenz durch Abstand $D_{s,k} = -10 \cdot \lg [2 \cdot \pi \cdot s_k^2]$
$s_k$	Abstand des Immissionsortes vom Mittelpunkt des Teilstücks $k$
Unabhängig von der Höhe des Vorbeifahrpegels oder des Abstandes vom Gleis:	
$l_k$	Länge des Teilstücks $k$
$D_{I,k}$	Pegeldifferenz durch Richtwirkung
$D_{L,k}$	Pegeldifferenz durch Luftabsorption
$D_{BM,k}$	Pegeldifferenz durch Boden- und Meteorologiedämpfung
$D_{Korr,k}$	Pegeldifferenzen infolge Einflüssen auf dem Ausbreitungsweg

Tabelle 2.2: Parameter der Ausbreitungsrechnung

Damit kann berechnet werden:

Gesamt-Stunden-Immissionspegel an der Messstation  $MS$ :

$$L_{r,MS} := 10 \cdot \lg \left[ \sum_k 10^{0,1 \cdot L_{r,k}} \right]$$

## 2.3 Vergleichende Messungen einer Messstation

Wenn die Pegelmessungen zweier Güterzüge 1 und 2 einer Messstation  $MS$  miteinander verglichen werden sollen, so wird hier zur Vereinfachung nur das Teilstück  $k_0$  betrachtet, das der Messstation am nächsten ist.

Damit ist hier der  $k_0$ -Stunden-Immissionspegel

$$L_{r,k_0} = L_{m,E,k_0} + 19,2 + 10 \cdot \lg [l_{k_0}] + D_{I,k_0} + D_{s,k_0} + D_{L,k_0} + D_{BM,k_0} + D_{Korr,k_0}$$

Die Differenz der  $k_0$ -Stunden-Immissionspegel zweier Güterzüge  $Gz1$  und  $Gz2$  ergibt sich nach (3) und den von der Höhe des Vorbeifahrpegels oder des Abstandes vom Gleis abhängigen Parametern aus Tabelle 2.2 für das Teilstück  $k_0$ :

$$\begin{aligned} L_{r,Gz1} - L_{r,Gz2} &:= L_{r,k_0}(1) - L_{r,k_0}(2) \\ &= L_{m,E,k_0}(1) + 19,2 + 10 \cdot \lg [l_{k_0}] + D_{I,k_0} + D_{s,k_0}(1) + D_{L,k_0} + D_{BM,k_0} + D_{Korr,k_0} \\ &\quad - (L_{m,E,k_0}(2) + 19,2 + 10 \cdot \lg [l_{k_0}] + D_{I,k_0} + D_{s,k_0}(2) + D_{L,k_0} + D_{BM,k_0} + D_{Korr,k_0}) \\ &= L_{m,E,k_0}(1) + D_{s,k_0}(1) - (L_{m,E,k_0}(2) + D_{s,k_0}(2)) \end{aligned} \quad (4)$$

Nach (1) also

$$\begin{aligned} L_{r,Gz1} - L_{r,Gz2} &= G(1) + D_D(1) + 2 + 10 \cdot \lg [0.01^2 \cdot l(1) \cdot v(1)^2] \\ &\quad - (G(2) + D_D(2) + 2 + 10 \cdot \lg [0.01^2 \cdot l(2) \cdot v(2)^2]) \\ &\quad + D_{s,k_0}(1) - D_{s,k_0}(2) \end{aligned} \quad (5)$$

Nach der Definition von  $D_{s,k}$  aus *Tabelle 2.2* ist

$$\text{also} \quad D_{s,k_0}(1) - D_{s,k_0}(2) = -20 \cdot (\lg [s_k(1)] - \lg [s_k(2)]),$$

$$\begin{aligned} L_{r,Gz1} - L_{r,Gz2} &= G(1) - G(2) + D_D(1) - D_D(2) \\ &\quad + 10 \cdot (\lg [l(1) \cdot v(1)^2] - \lg [l(2) \cdot v(2)^2]) \\ &\quad - 20 (\lg [s_k(1)] - \lg [s_k(2)]) \end{aligned} \quad (6)$$

Die Differenz der an der Messstation  $MS$  (gemessenen) Immissionspegel  $L_{r,Gz1}$  und  $L_{r,Gz2}$  der Vorbeifahrpegel zweier Güterzüge  $Gz1$  und  $Gz2$  kann nach (6) dazu verwendet werden, die Differenz  $G(1) - G(2)$  der Grundwerte zu bestimmen:

$$\begin{aligned} G(1) - G(2) &= L_{r,Gz1} - D_D(1) - 10 \cdot \lg [l(1) \cdot v(1)^2] + 20 \cdot \lg [s_k(1)] \\ &\quad - (L_{r,Gz2} - D_D(2) - 10 \cdot \lg [l(2) \cdot v(2)^2] + 20 \cdot \lg [s_k(2)]) \end{aligned} \quad (7)$$

Zu jedem Vorbeifahrpegel  $p(Gz)$  läßt sich der zugehörige Stundenpegel  $L_{r,Gz}$  berechnen:

$$L_{r,Gz} = p(Gz) + 10 \cdot \lg \left[ \frac{t}{3600} \right] \quad (8)$$

wobei  $t$  die Vorbeifahrzeit in  $s$  ist. Daher ist

$$\begin{aligned} L_{r,Gz1} - L_{r,Gz2} &= p(Gz1) - p(Gz2) + 10 \cdot \left( \lg \left[ \frac{t(1)}{3600} \right] - \lg \left[ \frac{t(2)}{3600} \right] \right) \\ &= p(Gz1) - p(Gz2) + 10 \cdot (\lg [t(1)] - \lg [t(2)]) \end{aligned} \quad (9)$$

Folglich kann die Gleichung (7) auch wie folgt durch Vorbeifahrpegel beschrieben werden:

**Differenz der Grundwerte zweier Güterzugvorbeifahrten**

$$\begin{aligned} G(1) - G(2) &= p(Gz1) + 10 \cdot \lg [t(1)] - D_D(1) - 10 \cdot \lg [l(1) \cdot v(1)^2] + 20 \cdot \lg [s_k(1)] \\ &\quad - (p(Gz2) + 10 \cdot \lg [t(2)] - D_D(2) - 10 \cdot \lg [l(2) \cdot v(2)^2] + 20 \cdot \lg [s_k(2)]) \end{aligned} \quad (10)$$

Diese Gleichung (10) erfordert für Messungen zur Bestimmung der Differenz  $G(1) - G(2)$  der Grundwerte zweier Güterzugvorbeifahrten folgende Parameter:

- die Vorbeifahrzeit  $t$  in Sekunden
- den an der Messstation gemessenen Vorbeifahrpegel  $p$
- den Anteil  $D_D$  scheibengebremster Güterwagen
- die Geschwindigkeit  $v$  des Güterzuges  
(damit ist wegen  $l = v \cdot t$  die Länge  $l$  des gesamten Güterzuges bekannt)
- den Abstand  $s_k$  zwischen Messstation und dem Gleis-Teilstück  $k_0$ , das der Messstation am nächsten ist.

Hier wird ein *relativer Grundwert*  $G_{rel}$  definiert, um die relative Belastung durch einzelne Vorbeifahrpegel beurteilen zu können:

**Definition „relativer Grundwert“**

Für die Belastung am Ort der Messstation wird folgende Bezeichnung eingeführt:

$$G_{rel}(i) := p(i) + 10 \cdot \lg [t(i)] - D_D(i) - 10 \cdot \lg [l(i) \cdot v(i)^2] + 20 \cdot \lg [s_k(i)] \quad (11)$$

Damit gilt  $G(i) - G(j) = G_{rel}(i) - G_{rel}(j)$ , d.h. ein Unterschied  $G(i) - G(j)$  der Grundwerte ist gleich groß wie ein Unterschied der relativen Grundwerte.

## 2.4 Exemplarisches Messprotokoll mit Auswertung

Messprotokoll						Auswertung
Uhrzeit	Vorbeifahrpegel $p$ in $dB(A)$	Vorbeifahrdauer $t$ in $s$	Geschwindigkeit $v$ in $m/s$	Abstand zum Gleis $s_k$ in $m$	Maximalpegel $p_{max}$ in $dB(A)$	$G_{rel}$ Gleichung (11) in $dB(A)$
22:40	70	18	28	25	72	47.6
23:17	68	20	25	30	71	48.6
23:19	75	26	22	25	78	55.7

Tabelle 2.3: Messprotokoll und Auswertung

## 2.5 Lärmbewertung

Die Auswertung in *Tabelle 2.3* zeigt ein Verfahren zur Bewertung der Güterzüge:

### (B1) Güterzug/Güterwagen

Die Differenz zwischen Vorbeifahrpegel und Maximalpegel eines Güterzuges zeigt an, ob es einzelne Wagen dieses Zuges gibt, die „auffällig“ lauter sind als das energetische Mittel aller Güterwagen dieses Zuges. Als „auffällig“ wird hier  $p_{max} - p > 3 dB(A)$  empfohlen.

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

### (B2) relativer Grundwert

Bei jeder Güterzugvorbeifahrt werden folgende Parameter berücksichtigt:

- Vorbeifahrpegel  $p$ ,
- Geschwindigkeit  $v$ ,
- Abstand  $s_k$  zum Gleis

Daraus ergibt sich unter Anwendung der Gleichung (11) ein „relativer Grundwert  $G_{rel}$ “, der verwendet werden kann, um die akustischen Eigenschaften eines Güterzuges mit denen eines anderen Güterzuges zu vergleichen. In dem exemplarischen Messprotokoll hat der Güterzug um 23:19 Uhr einen um  $55.7 - 48.6 = 7.1 dB(A)$  höheren Grundwert als der Güterzug um 23:17 Uhr.

Durch ein Messprotokoll mit z.B. 100 aufeinanderfolgenden Güterzugvorbeifahrten lassen sich

- die Verteilung der relativen Grundwerte
- die Verteilung der Differenzen  $p_{max} - p$

bestimmen.

Wird etwa nach einem Jahr ein entsprechendes Messprotokoll angelegt und werden die entsprechenden Verteilungen miteinander verglichen, kann entschieden werden, ob sich die Grundwerte im Laufe eines Jahres verbessert haben (oder nicht). Zusätzlich kann erkannt werden, ob sich die Differenzen  $p_{max} - p$  verkleinert haben. Da  $L_{m,E}(Gz)$  als Emissionspegel eines Güterzuges  $Gz$  für einen bestimmten Punkt ( $25 m$  in seitlichem Abstand von der Gleismitte und  $3.5 m$  über der Schienenoberfläche in ebenem Gelände) berechnet wird, gilt diese Ortsbestimmung auch für den Vorbeifahrpegel  $p(Gz)$ . In der Formel (2) muss daher mit Hilfe der Ausbreitungsrechnung für jedes Gleis  $g$  jeweils ein Ausbreitungskorrektursummand  $\Delta_{abst}(g)$  auf diesen Punkt zurückgerechnet werden (für  $abst = 25 m$

ist dann  $\Delta_{25} = 0$ ).

Bei zweigleisigen Strecken ist daher der Abstand jedes einzelnen Gleises zu berücksichtigen.



### 3 Mittelungs- und Vorbeifahrpegel eines Montags

Es wird angenommen, dass von einer Messstation nur die in der *Tabelle 2.1* genannten Daten veröffentlicht werden. Hier wird dann gezeigt, welche (willkürlichen?) Annahmen erforderlich sind, um aus diesen Daten eine nächtliche Lärmbelastung zunächst für eine einzelne Nacht und weiter für eine einzelne Stunde zu rekonstruieren.

#### 3.1 Messdaten

In einer als „typische Woche“ bezeichneten Woche traten z.B. an einer Bahnstrecke folgende Nacht-Mittelungspegel auf:

Mo	Di	Mi	Do	Fr	Sa	So
68	69	69	68	67	60	67

*Tabelle 2.1:* Nacht-Mittelungspegel während einer „typischen“ Woche.

Dies sind jeweils die Mittelungspegel in  $dB(A)$  von 8 Nachtstundenpegeln. Eigentlich müßte die Frage gestellt werden, ob die 7 Nächte dieser Woche bezüglich der „Dosis Zugvorbeifahrten“ in ihrer Wirkung auf einen Schlafenden „ungefähr gleich“ sind.

#### 3.2 Rekonstruktion einzelner Stundenpegel aus einem Nacht-Mittelungspegel

Es wird der Nacht-Mittelungspegel von  $68 dB(A)$  in der Montagsnacht betrachtet: Da unbekannt bleibt, welche einzelnen Vorbeifahrpegel in dieser typischen Woche auftraten, müssen diese hier willkürlich rekonstruiert werden.

In einem ersten Schritt werden 4 Möglichkeiten einer Rekonstruktion der 8 Stunden-Mittelungspegel abgegeben:

Nachtstunden Mo	22-23	23-24	24-01	01-02	02-03	03-04	04-05	05-06	gesamt
Beispiel 1 :	68	69	69	68	67	60	67	70	67.9
Beispiel 2 :	72	71	60	60	60	60	62	73	68.3
Beispiel 3 :	74	67	30	30	30	30	32	73	68.0
Beispiel 4 :	30	32	33	74	73	50	32	34	67.5

*Tabelle 2.2:* 4 mögliche Rekonstruktionen der Stunden-Mittelungspegel für eine Nacht mit dem Nacht-Mittelungspegel  $68 dB(A)$

also haben wir hier 4 völlig unterschiedliche Nächte rekonstruiert:

- im Beispiel 1 ist es in jeder Nachtstunde laut.
- im Beispiel 2 ist es nur spät abends (bis 24 Uhr) laut und dann wieder morgens ab 05 Uhr.
- im Beispiel 3 ist es auch nur spät abends (bis 24 Uhr) laut und dann wieder morgens ab 05 Uhr, aber während der Nachtstunden von Mitternacht bis 05 Uhr ist es vielleicht schon zu leise!
- im Beispiel 4 ist es abends (bis 01 Uhr) extrem ruhig; dann aber wird es von 01 bis 03 Uhr extrem laut - aber von 03 bis 06 Uhr ist wieder Ruhe eingekehrt.

Nächtliche Lärmbelastung wird nicht durch diese Stunden-Mittelungspegel beschrieben, sondern durch die einzelnen Vorbeifahrpegel.

Die 4 Beispiele zeigen, dass eine Rekonstruktion nicht eindeutig ist. Die nächtliche Lärmbelastung in diesen 4 Fällen ist nicht gleich, obwohl die Nacht-Mittelungspegel gleich sind.

### **Lärmwirkungsforschung zu einer nächtlichen Lästigkeit**

Wenn dennoch Anwohner im Rahmen einer Studie einer Lärmwirkungsforschung nach der Lästigkeit befragt werden, ist es nicht verwunderlich, wenn zu genau diesem Nacht-Mittelungspegel sehr unterschiedliche Lästigkeitsstufen angegeben werden.

Eigentlich müßte im Rahmen der Lärmwirkungsforschung geklärt werden, ob

- eine nächtliche „Dosis“ Schienenverkehrslärm, die durch einen einzigen Nacht-Mittelungspegel beschrieben wird,
- die Beeinträchtigung und/oder Störung des (nächtlichen) Schlafes durch eine Befragung zu der Wirkung am Tage danach

eindeutig beschreibt bzw. mit den medizinisch gemessenen Parametern korreliert - oder ob es sinnvoll wäre, eine feinere Unterteilung der „Dosis“ vorzunehmen (wie hier in der *Tabelle 2.2*).

### **3.3 Grobanalyse: Annahmen und Anforderungen der Lärmbelastung durch nächtlichen Güterzugverkehr**

die Grundwerte Für die Berechnung des Grundwertes einer Vorbeifahrt eines Güterzuges sind Für eine grobe Analyse der Lärmbelastung wird auf den Einsatz einer Kamera, die gleichzeitig die Geschwindigkeit misst, verzichtet. Dann lassen sich Aussagen nur dann sinnvoll formulieren, wenn die folgenden Annahmen vorgenommen werden:

### Grobanalyse: Notwendige Annahmen

1. Es werden nur Güterzüge betrachtet<sup>a)</sup>, d.h. Zugvorbeifahrten, die einen vorgegebenen Grenz-Vorbeifahrpegel  $p_{grenz}$  überschreiten.
2. die Geschwindigkeit  $v$  der Güterzüge ist gleich der 1imal zulässigen Streckengeschwindigkeit  $v_{strecke}$ .
3. die Länge aller betrachteten Güterzüge beträgt jeweils 500 m. (daher benötigen sie für die Vorbeifahrt 18 s bei  $v = 100 \text{ km/h}$ )
4. die Güterzüge haben Grauguß-Klotzbremsen, d.h. der Anteil an scheibengebremsten Güterwagen ist 0% (damit ist nach dem in der *Schall 03 (1990)* angegebenen Berechnungsverfahren  $D_D = 7 \text{ dB(A)}$ <sup>b)</sup>)

Im Mittel sollte dann in 25 m Entfernung vom Gleis, 3.5 m über der Schienenoberkante, der Vorbeifahrpegel 92 dB(A) betragen - aber es gibt natürlich auch lautere und leisere Züge.

<sup>a)</sup> Personenzüge mit Geschwindigkeiten bis 120 km/h sind wesentlich leiser.

<sup>b)</sup> Rollgeräusche nach der Schall 03-2006:

Rauheit	63	125	350	500	1000	2000	4000	8000	<b>A</b>
Radsätze mit Grauguss-Klotzbremse									
Schiene	-50	-40	-24	-8	-3	-6	-11	-30	<b>67</b>
Rad	-40	-30	-22	-9	-3	-5	-15	-26	<b>71</b>
Gesamt									<b>72</b>
Radsätze mit Kunststoff-Klotzbremse (K-Bremse)									
Schiene	-50	-40	-24	-8	-3	-6	-11	-30	<b>67</b>
Rad	-50	-40	-25	-9	-4	-4	-11	-23	<b>58</b>
Gesamt									<b>68</b>

Insgesamt liefert das Rad-Schiene-System daher bei der A-Bewertung

- entweder 72 dB(A), wenn alle Güterwagen mit einer Grauguss-Klotzbremse ausgerüstet sind,
- oder 68 dB(A), wenn alle Güterwagen mit einer Kunststoff-Klotzbremse ausgerüstet sind.

(die Lokomotiven sind stets mit einer Grauguss-Klotzbremse ausgerüstet). d.h. unter Verwendung des Rechenverfahrens *Schall 03 (2006)* wäre eine maximale Lärmreduzierung von 4 dB(A) durch Umrüstung der Bremsen von Grauguss-Klotzbremse auf Kunststoff-Klotzbremse erreichbar - bei jeweils gleichem Schienenzustand.

(Für einen mit Scheibenbremsen ausgestatteten Güterwagen wäre  $D_D = 0 \text{ dB(A)}$ )

**Bemerkung:**

Die Annahme in der Grobanalyse, dass alle Güterzüge eine mit der gleichen Geschwindigkeit fahren, ist im Allgemeinen nicht erfüllt: Bei Geschwindigkeiten von etwa  $100 \text{ km/h}$  streuen die Vorbeifahrpegel um  $\pm 6.5 \text{ dB(A)}$ ; im Mittel ist jeder 20. Güterwagen um  $6 \text{ dB(A)}$  lauter als der Mittelungspegel.

**Annahme 2 (für die Messstation)**

Jeder der vorbeifahrenden Güterzüge hat die gleiche Vorbeifahrzeit von  $18 \text{ s}$  und verursacht während dieser Zeit einen konstanten Vorbeifahrpegel von  $92 \text{ dB(A)}$  in  $25 \text{ m}$  Entfernung von der Gleismitte und  $3.5$  über der Schieneneoberkante.

Eine Messstation sollte dann folgende Informationen liefern:

M.1 Standort der Messstation:

Der Standort der Messstation bezüglich der betrachteten Gleise und bezüglich der betrachteten Wohnungen muss bekannt sein.

M.2 Mittelungspegel für jede der 8 Nachtstunden:

Für jede einzelne Nachtstunde (jeder Nacht) ist der Stundenpegel anzugeben. Der Mittelungspegel für die gesamte Nacht kann zusätzlich angegeben werden<sup>2)</sup>.

M.3 die 6 lautesten Vorbeifahrpegel während der 8 Nachtstunden<sup>3)</sup>:

Uhrzeiten und Pegelhöhen, zu denen diese 6 lautesten Pegel jeweils auftraten.

Aus M.2 und M.3 ergäbe sich nach dem oben genannten Beispiel 2 z.B. folgende Tabelle:

	Nacht-Pegel (in $dB(A)$ )								
	22-23	23-24	24-01	01-02	02-03	03-04	04-05	05-06	gesamt
Messtag	Montag, 01.11.2010								
Stundenpegel	72	71	60	60	60	60	62	73	68.3
6 lauteste Vorbeifahrpegel	94+93	96+92	-	-	-	-	88	93	
Messtag	Dienstag, 02.11.2010								

*Tabelle 2.3:* Die 6 lautesten Vorbeifahrpegel während der 8 Nachtstunden an einem Montag während einer „typischen“ Woche.

Eine Auswertung der Daten von jedem der 7 Wochentage einer Woche ergibt dann zunächst die Verteilung der jeweils lautesten Züge über die 7 Nächte mit ihren Vorbeifahrpegeln in den jeweiligen Nachtstunden.

Von diesen könnten wiederum die 12 lautesten Vorbeifahrpegel und ihre Nachtzeiten bestimmt werden (wobei die Zahl 12 willkürlich gewählt wurde).

Eine Beschreibung der lautesten Vorbeifahrpegel und ihrer Nachtzeiten während sämtlicher Wochen eines Jahres wird noch zu diskutieren sein.

### 3.4 Feinanalyse: Annahmen und Anforderungen der Lärmbelastung durch nächtlichen Güterzugverkehr

An der „optimalen“ Messstation wird zu jeder der 8 Nachtstunden gemessen:

#### Optimale Messdaten von Güterzugvorbeifahrten

- (5.1) die Anzahl  $n(j)$  Güterzüge für die  $j$ -te Nachtstunde ( $1 \leq j \leq 8$ )  
(die Erkennung von Güterzügen kann in Form kurzer Video-Sequenzen erfolgen, die erkennen lassen, ob die Lärmquelle ein Güterzug - oder etwas Anderes - ist).
- (5.2) In jeder Nachtstunde  $j$  von jeder Güterzugvorbeifahrt  $i$  mit  $1 \leq i \leq n(j)$
- (5.21) der Vorbeifahrpegel  $p(i, j)$  in  $dB(A)$
- (5.22) die Vorbeifahrzeit  $t(i, j)$  in Sekunden
- (5.23) die Vorbeifahrtgeschwindigkeit  $v(i, j)$  in  $m/s$

<sup>2)</sup> der Nacht-Mittelungspegel kann auch aus den einzelnen Stundenpegeln berechnet werden.

<sup>3)</sup> Die Zahl 6 wurde den Flugverkehrs-Lärm-Bewertung entlehnt.

Für eine minimale Datenerfassung würde für sämtliche Zugvorbeifahrten die maximale Streckengeschwindigkeit  $v := v(max)$  gewählt werden, für die dann (in Abhängigkeit von der Vorbeifahrzeit  $t(i, j)$ ) aus dieser Tabelle eine „theoretische“ Zuglänge  $l_{theo}(i, j)$  angegeben ist<sup>4</sup>).

Für eine optimale Datenerfassung wäre es notwendig, zur Ermittlung der Zuglänge jeweils Geschwindigkeit und Vorbeifahrzeit zu ermitteln.

### 3.5 Aufweckwahrscheinlichkeit

In dem 2. Entwurf der VDI 3722-2 wird mangels mathematischer Phantasie vorgeschlagen, die durch einen am Ohr eines Schläfers messbaren Vorbeifahrpegel  $L_{ohr,A,F,max}$  verursachte Aufweckwahrscheinlichkeit  $A_{WW}(p)$  - unabhängig von der Einwirkzeit - durch eine lineare Funktion zu beschreiben:

$$A_{WW}(p) = \begin{cases} 0.75 \cdot p - 31.5 \\ \text{für } p := L_{ohr,A,F,max} \end{cases} \quad (12)$$

Die durch diese Definition beschriebene Abhängigkeit ist linear - das entspricht jedoch nicht den bisherigen Erfahrungen:

Bei 42 dB würde noch niemand aufgeweckt werden, und bei einem Vorbeifahrpegel  $p = 175$  dB am Ohr des Schläfers würde nach dieser Gleichung jeder aufgeweckt. Ein solcher Vorbeifahrpegel würde allerdings schwere gesundheitliche Schäden verursachen.

Daher ist diese Formel (12) zur Beschreibung der Aufweckwahrscheinlichkeit nicht geeignet - auch nicht zur Vereinfachung.

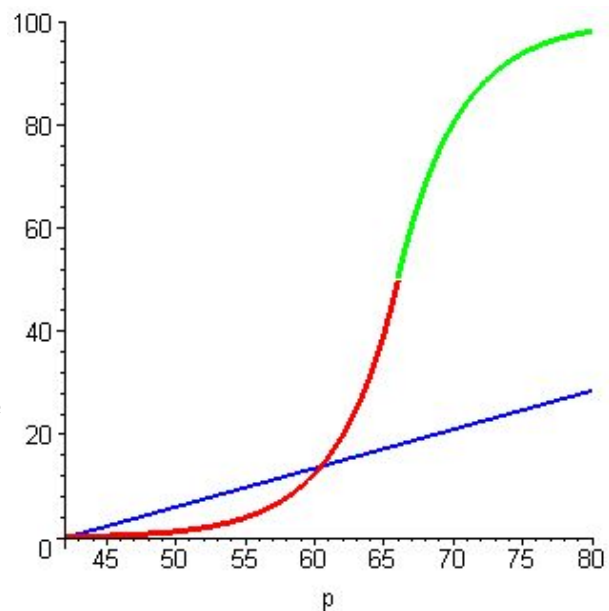


Bild 3.5.1: Aufweckwahrscheinlichkeit mit  $t = 18$  und  $S = 20$  nach (13) und Gerade nach (12)

Hier wurde die Beschreibung der Aufweckwahrscheinlichkeit aus den Beschreibungen der Aufweck-Pegel und Lärmpausen (siehe „weiterführende Betrachtungen“ am Ende dieses Aufsatzes) gewählt:

$$A_{WW}(S, p, t) = \begin{cases} \frac{1}{10} \cdot 2^{\frac{1}{3} \cdot (p-S-18-\frac{27}{t+1})} & \text{für } p \leq pz \\ \frac{1}{10} \cdot 2^{\frac{1}{3} \cdot (2 \cdot pz - p - S - 18 - \frac{27}{t+1})} & \text{für } p > pz \\ \text{wobei } pz \text{ definiert wird durch } 50 = \frac{1}{10} \cdot 2^{\frac{1}{3} \cdot (pz - S - 18 - \frac{27}{t+1})} & \\ S \text{ der individuelle Schlafpegel, } t \text{ die Einwirkzeit in } s & \\ \text{und } p = L_{ohr,A,F,max} \text{ ist.} & \end{cases} \quad (13)$$

<sup>4</sup>) Diese Annahme ist nur selten erfüllt; daher wäre es sinnvoll, entweder auch die reale Geschwindigkeit zu messen oder mit Hilfe von Video-Aufnahmen diese zu berechnen. - Video-Aufnahmen liefern zusätzlich die Möglichkeit, Güterzüge von Personenzügen zu trennen und bei mehrgleisigen Strecken die unterschiedlichen Abstände zwischen Gleis und Messstation zu berücksichtigen.

### 3.5.1 Cortisol-Konzentration

Die Kurven, die sich nach der Formel (13) für die 10%- und 20%-Aufweckwahrscheinlichkeit (also  $A_{WW}(S, p, t) = 0.1$  bzw.  $A_{WW}(S, p, t) = 0.2$ ) ergeben, werden in der nebenstehenden Kurve dargestellt.

Ihre Formeln lauten:

für 10% Aufweckwahrscheinlichkeit:

$$L_{ohr,A,F,max} = S + 18 + \frac{27}{t^{1.1}} \quad (14)$$

für 20% Aufweckwahrscheinlichkeit:

$$L_{ohr,A,F,max} = S + 21 + \frac{27}{t^{1.1}} \quad (15)$$

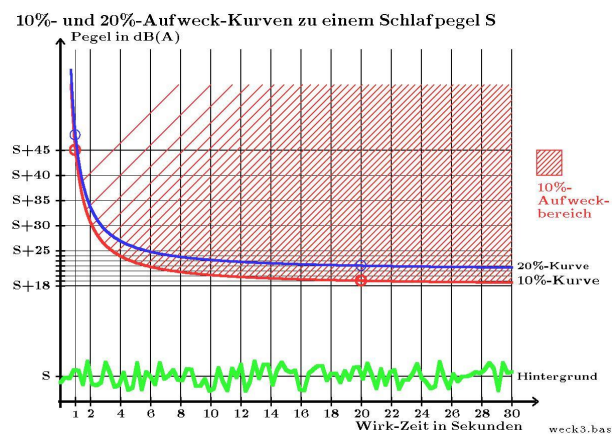


Bild 2.2: 10%- und 20% Aufweckwahrscheinlichkeit

Es gibt weitere Verfahren, bei denen neben dem Vorbeifahrpegel zusätzlich die Pausenstruktur berücksichtigt wird (siehe „weiterführende Betrachtungen“):

$c_{min}(t)$  : Cortisol-Grundwert (in [ng/ml]) in Abhängigkeit von der Nachtzeit

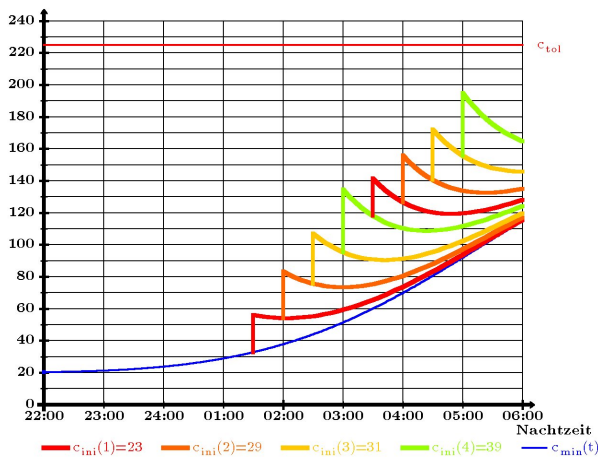


Bild 2.3: Cortisol-Konzentration führt nicht zu Aufweckreaktionen

$c_{min}(t)$  : Cortisol-Grundwert (in [ng/ml]) in Abhängigkeit von der Nachtzeit

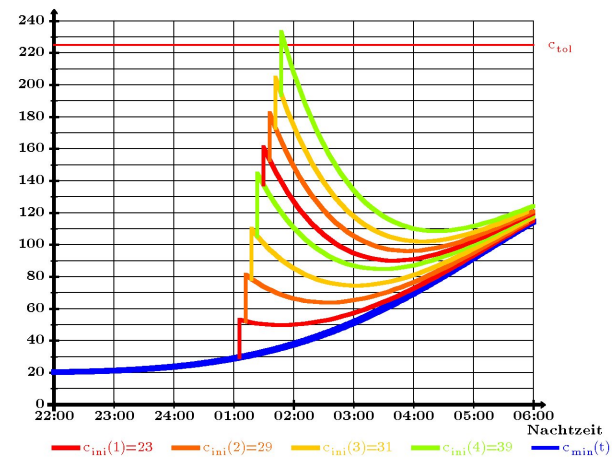


Bild 2.4: Cortisol-Konzentration führt zu einer Aufweckreaktionen

## 4 Lärminderung

Um die Wirksamkeit von Lärminderungsvorhaben zu verfolgen, wird nach der *Schall 03 (1990)* der Emissionspegel eines einzelnen Güterwagens wie folgt gerechnet<sup>5)</sup>:

$$\begin{aligned} p_h(i, j) &= \text{Grundwert} + D_{Fz} + D_D + D_l + D_v + D_{Fb} + D_{Br} + D_{Bü} + D_{Ra} \\ &= \text{Grundwert} + 0 + D_D + 10 \cdot \lg [0.01 \cdot l(i, j)] + 20 \cdot \lg [0.01 \cdot v(i, j)] + 2 + 0 + 0 + 0 \end{aligned}$$

<sup>5)</sup> In der *Schall 03 (1990)* wird der Einfluss der Bremssysteme nur durch den Anteil scheibengebremster Fahrzeuge berücksichtigt - nicht aber durch andere Brems-Sohlen. Für Güterwagen wird in der *Schall 03(1990)* daher  $D_D = 7$  gesetzt.

Eine Lärminderung durch Umrüstung des Bremssystems von Güterwagen würde daher nur dann den Höchstwert von  $7 \text{ dB(A)}$  ergeben, wenn sämtliche Güterwagen mit Scheibenbremsen ausgestattet sind.

Eine geplante Neufassung *Schall 03 (2006)* erklärt:

*Ein Güterwagen mit K-Bremse ist um 5 dB(A) leiser als ein Güterwagen mit Grauguss-Klotz-Bremse.*

also wegen 8 und (refeq:52)

$$\begin{aligned} \text{Grundwert} &= p(i, j) + 10 \cdot \lg \left[ \frac{t(i, j)}{3600} \right] - (D_D + 2) - 10 \cdot \lg [0.01 \cdot v(i, j) \cdot t(i, j)] - 20 \cdot \lg [0.01 \cdot v(i, j)] \\ &= p_h(i, j) - (D_D + 2) - 10 \cdot \lg [0.01 \cdot l(i, j)] - 20 \cdot \lg [0.01 \cdot v(i, j)] \end{aligned} \quad (16)$$

Mit den Gleichungen (8) und (refeq:52) zeigt sich, dass für diese Berechnung die Erfassung der unter (5.1), (5.21), (5.22) und (5.23) genannten Daten ausreichend ist<sup>6</sup>).

#### Merkmale für eine Lärminderung

Eine Lärminderung ist daran erkennbar, dass der nach Gleichung (16) zu jeder einzelnen Güterzugvorbeifahrt berechnete *Grundwert* innerhalb der Jahre bis 2020 sinkt: jede dieser Rechnungen verwendet die nach (5.1) und (5.2) gemessenen Vorbeifahrpegel  $p(i, j)$  und Vorbeifahrzeiten  $t(i, j)$ , die von amtlichen Messstationen an festen Orten erfasst werden.

## 4.1 Nachweis einer Lärminderung durch Rechnung

Aus der Gleichung (refeq:52) ist erkennbar, dass diese Lärminderung **rechnerisch** nur

- durch eine Reduktion des Grundwertes (d.h. Verbesserung des Schienenzustandes),
- durch eine Reduktion des Summanden  $D_D$  (d.h. einer Verbesserung der Bremsbauart jedes einzelnen Güterwagens) und
- durch eine Reduktion des Summanden  $D_{Fb}$  (d.h. einer Verbesserung der Fahrbahnart durch Verbesserung des Unterbaus)

erreicht werden kann. Die entsprechenden Änderungen der Vorbeifahrpegel sind zwar dokumentiert, wurden aber in der Praxis nicht erprobt!

## 4.2 Nachweis einer Lärminderung durch Messung

Nach der o.g. Gleichung

# 5 Beispiele

## 5.1 (optimale) Dokumentation einzelner Vorbeifahrten

Am Ort  $H$  werden „Sekunden-Pegel“ ermittelt: Während der nach *Bild 1.1* definierten Vorbeifahrzeit wird für jede Sekunde

- der A-bewertete Maximalpegel dieser Sekunde
- die Vorbeifahrtsgeschwindigkeit
- ein Foto des (durch eine Lampe beleuchteten) vorbeifahrenden Zuges

dokumentiert und in Form eines Filmes zusammengefasst (der A-bewertete gemittelte Vorbeifahrpegel wird berechnet).

Aus dem Foto ist ersichtlich, ob die dokumentierten Pegel von einem Personenzug oder einem Güterzug stammen - und auf welchem der beiden Gleise der Zug vorbeiführt. (Es ist auch erkennbar, ob der Pegel von irgend einem anderen Ereignis stammt.)

<sup>6</sup>) In der Gleichung (refeq:52) ist  $v(i, j)$  in  $km/h$  einzutragen.



Es wurde eine Messeinrichtung an einem 2-gleisigen Schienenweg im Abstand von 25 m von der Gleismitte des 1. Gleises installiert, auf der Güterzüge nach rechts an der Messstation vorbeifahren; entsprechend weit dahinter lag das 2. Gleis, auf dem die Güterzüge nach links vorbeifahren.

Es wurde jeweils eine Zugvorbeifahrt gemessen.

Die angegebenen Zeiten sind Sekunden (Sek.).

Wenn die Sekunden in schwarz geschrieben sind, ist der Güterzug zwar schon zu hören, aber es ist noch keine „Vorbeifahrzeit“ gemäß *Bild 1.1*.

Während der Vorbeifahrzeit sind die Sekunden in **rot** geschrieben.

H:234705: 2. Gleis (hinten, nach links)				H:232751: 1. Gleis (vorn, nach rechts)			
Sek.	$L_{A,F,eq,1s}$	$L_{A,F,max,1s}$	Geschw.	Sek.	$L_{A,F,eq,1s}$	$L_{A,F,max,1s}$	Geschw.
05	48.3	49.6	–	50	59.8	60.2	-
07	55.6	56.6	88	52	61.8	61.2	-
08	57.7	58.6	86	53	63.2	64.2	-
09	60.2	62.1	79	54	66.3	68.2	-
10	66.0	68.3	88	55	74.4	77.1	91
11	72.8	75.4	82	56	82.3	83.3	88
12	79.3	81.0	82	57	83.0	83.5	92
13	82.2	83.2	77	58	83.0	83.5	91
14	84.4	85.8	76	59	85.1	86.4	87
15	85.2	86.1	79	60	87.7	89.2	92
16	85.4	86.0	83	01	90.0	90.9	86
17	85.1	86.1	80	02	91.0	91.6	86
18	82.8	84.0	81	03	91.3	91.8	91
19	84.5	85.2	78	04	90.5	91.1	87
20	84.7	85.2	82	05	91.4	92.3	87
21	84.3	84.8	76	06	91.2	91.7	91
22	84.3	84.8	76	07	90.8	91.5	88
23	85.2	85.9	82	08	91.3	92.0	92
24	84.6	85.6	83	09	90.6	91.4	88
25	82.7	83.9	83	10	89.0	90.2	83
26	83.3	84.0	76	11	89.0	90.2	83
27	85.1	86.4	79	12	88.3	88.9	85
28	86.9	87.3	80	13	89.7	91.1	89
29	86.7	87.5	78	14	89.7	91.1	89
30	85.5	86.0	80	15	90.8	91.4	89
31	84.2	85.9	83	16	90.1	90.6	87
32	83.1	83.8	67	17	90.1	90.6	97
33	83.2	84.0	82	18	89.4	90.6	97
34	84.0	84.5	80	19	85.8	88.2	98
35	83.8	84.6	65	20	81.1	84.2	97
36	84.7	85.3	59	21	77.8	79.3	97
37	85.1	85.6	59	22	76.1	77.2	97
38	84.1	85.4	59	23	73.6	74.9	97
39	75.0	77.9	59				
40	75.0	77.9	–				
41	71.5	73.1	–				
42	69.0	70.9	–				
<b>mittel</b>	84.2	85.0	77.7	<b>mittel</b>	89.4	90.2	89.0
<b>maximum</b>	86.9	87.5		<b>maximum</b>	91.4	92.3	

*Tabelle 4.1:* Dokumentation und Auswertung zweier Güterzugvorbeifahrten  
(Diese Daten wurden direkt den Video-Aufzeichnungen am Ort  $H$  entnommen)

Diese Aufzeichnung zeigt:

- die Geschwindigkeit wird sehr schlecht erfasst; damit ist die Länge des Zuges nicht genau bestimmbar (das ist vielleicht auch nicht notwendig):  
Für den Zug H:234705 ist die mittlere Geschwindigkeit  $77.7 \text{ km/h}$ , und er benötigt für die Vorbeifahrt 28 Sekunden, also ist seine Länge etwa  $600 \text{ m}$ .  
Für den Zug H:232751 ist die mittlere Geschwindigkeit  $89 \text{ km/h}$ , und er benötigt für die Vorbeifahrt 24 Sekunden, also ist auch seine Länge etwa  $600 \text{ m}$ .
- Die Spitzenpegel während einer Vorbeifahrt lagen in den beiden hier betrachteten Fällen um bis zu  $2.5 \text{ dB}(A)$  höher als der (mittlere) Vorbeifahrpegel.

Für die Bestimmung der Aufweckwahrscheinlichkeit ist - mit Hilfe der Ausbreitungsrechnung - jeder Pegel bis an das Ohr eines Schläfers zu verfolgen.

Erst wenn der Pegel am Ohr des Schläfers bekannt ist, kann über Aufweckreaktionen diskutiert werden.

## 5.2 Dokumentation einer einzelnen Nacht

Hier wurde aus den Video-Aufzeichnungen (siehe *Tabelle 4.1*) die Vorbeifahr-Geschwindigkeit ( $v$  in  $km/h$ ) und die Vorbeifahr-Zeit ( $t$  in  $s$ ) erfasst, um daraus die Aufweckwahrscheinlichkeit bestimmen zu können.

2. Gleis (hinten, nach links)					1. Gleis (vorn, nach rechts)						
Nr.	Zeit	$L_{A,F,eq,1s}$	$L_{A,F,max,1s}$	$v$	$t$	Nr.	Zeit	$L_{A,F,eq,1s}$	$L_{A,F,max,1s}$	$v$	$t$
1	22:05	82.9	84.3	70	23	28	22:04	81.2	82.7	88	19
2	22:06	90.5	93.1	80	20	29	22:28	76.1	78.5	73	19
3	22:14	91.6	94.2	77	19	30	22:52	86.3	87.4	61	30
4	22:44	93.2	94.3	62	29	31	00:05	87.0	89.8	81	23
5	22:51	83.2	86.1	84	27	32	00:21	87.7	89.4	59	24
6	22:57	85.9	87.4	74	23	33	00:43	86.0	86.9	83	19
7	23:36	92.2	95.1	82	25	34	00:56	76.3	78.9	63	24
8	00:13	92.3	93.7	87	25	35	01:12	87.4	89.4	76	30
9	00:36	86.4	88.7	82	17	36	01:14	87.9	90.6	63	22
10	00:40	91.8	92.7	70	30	37	01:17	84.9	87.1	75	27
11	00:55	87.4	87.7	73	25	38	01:38	84.7	85.3	73	19
12	01:11	85.3	88.0	63	27	39	01:49	76.2	76.2	68	22
13	01:16	90.9	92.6	65	17	40	02:17	82.5	83.3	87	29
14	01:37	89.6	92.2	77	23	41	02:19	77.8	80.3	61	28
15	01:38	91.9	94.4	72	20	42	02:25	87.4	89.7	67	20
16	01:45	81.5	83.9	77	20	43	02:29	87.5	90.4	60	28
17	02:28	90.2	93.0	72	30	44	02:57	84.1	86.0	69	25
18	03:11	88.7	88.9	85	20	45	03:14	86.6	87.5	60	22
19	03:22	92.2	94.7	77	23	46	03:28	75.2	78.1	88	20
20	03:31	91.1	91.8	79	21	47	03:29	85.2	87.2	87	20
21	03:36	90.3	91.1	62	16	48	03:35	81.5	83.5	69	20
22	03:56	90.3	90.4	62	24	49	03:42	87.5	90.2	69	25
23	04:27	86.0	88.7	65	29	50	04:21	84.3	84.8	70	19
24	04:33	89.7	92.7	82	23	51	04:24	78.0	79.5	80	19
25	05:12	87.3	88.1	87	26	52	04:31	85.1	86.2	70	26
26	05:12	81.7	83.3	69	17	53	04:53	81.9	84.0	65	18
27	05:35	83.8	84.8	77	19	54	05:58	75.2	77.4	71	16
<b>mittel</b>		89.4	91.5	75	23	<b>mittel</b>		85.0	86.6	72	23
<b>maximum</b>		93.2	95.1	87	30	<b>maximum</b>		87.9	90.6	88	30

*Tabelle 4.2:* Dokumentation der Vorbeifahrten während einer Nacht

Um zu prüfen, ob die in einem Planfeststellungsverfahren angegebenen berechneten Nacht-Stunden-Vorbeifahr-Mittelungspegel für einen bestimmten Ort gültig sind, müßten für jede Nacht eines Jahres Dokumentationen in oben dargestellter Form (*Tabelle 4.2*) vorliegen. Dann wäre das Problem der Beschreibung einer „typischen Nacht“ innerhalb eines Jahres offenkundig:

- 4.1 Es gibt Tage, an denen „sehr wenige“ Güterzüge fahren - und die Nacht mit der niedrigsten Belastung könnte die „typische“ Nacht sein.
- 4.2 Es gibt Tage, an denen „sehr viele“ Güterzüge fahren - und die Nacht mit der höchsten Belastung könnte die „typische“ Nacht sein.
- 4.3 Es gibt Tage, an denen die lautesten Güterzüge in der Zeit zwischen 24 und 05 Uhr fahren - und die Nacht mit der höchsten Belastung während dieser Zeit könnte die

„typische“ Nacht sein, obwohl der Nacht-Stunden-Vorbeifahr-Mittelungspegel dieser Nacht die Belastung während der Zeit zwischen 24 und 05 Uhr nicht gesondert berücksichtigt.

- 4.4 Es gibt Tage, an denen die lautesten Güterzüge in der Zeit zwischen 22 und 24 Uhr und zwischen 05 und 06 Uhr fahren - und die Nacht mit der höchsten Belastung während dieser Zeit könnte die „typische“ Nacht sein, obwohl der Nacht-Stunden-Vorbeifahr-Mittelungspegel dieser Nacht die Belastung während der Zeit zwischen 22 und 24 Uhr sowie zwischen 05 und 06 Uhr nicht gesondert berücksichtigt.

Theoretisch gibt es keine „beste“ Lösung zu Bestimmung der „typischen Nacht“. Aber es wird deutlich, dass für Anwohner an Gleisen mit nächtlichem Güterzugverkehr die unter 4.1 angegebene Definition nicht akzeptabel ist.

## 6 Dokumentation

### 6.1 Dokumentation von Änderungen der Vorbeifahrpegel

Wenn untersucht werden soll, ob sich während eines bestimmten Zeitraumes (z.B. innerhalb eines Jahres) die Vorbeifahrpegel von Güterzügen (z.B. infolge Umrüstung des Bremssystems einiger Güterwagen) änderten, dann sind folgende Messdaten erforderlich:

- A.1 Festlegung eines Messortes mit einem zweigleisigen Güterzug-Schienenweg.  
(Ein zweigleisiger Schienenweg enthält vier Schienen mit meist unterschiedlichem Schienenzustand; dadurch ist eine einfache Mittelung des Schienenzustandes gegeben.)
- A.2 An dem Messort sollten an einem Messtag (24 Stunden) mindestens 100 Güterzüge vorbeifahren.  
(Dadurch soll verhindert werden, die gleichen Güterzüge mehrfach gezählt werden und/oder unterschiedliche Wetterverhältnisse die Messungsergebnisse beeinflussen.)
- A.3 Festlegung der Mess-Zeitpunkte (Anfang, Zwischenmessungen, Ende), zu denen eine Änderung in der mittleren Höhe der Vorbeifahrpegel vermutet wird (z.B. eine Messung pro Jahr zwischen Anfang und Ende), jeweils im gleichen Monat und am gleichen Wochentag.
- A.4 Festlegung eines Messpunktes innerhalb des Messortes, der in einem Abstand zwischen  $7.5\text{ m}$  und  $25\text{ m}$  von der Mitte zwischen den beiden Gleisen entfernt ist und der zu den unter A.3 festgelegten Mess-Zeitpunkten zugänglich ist.

Zur Auswertung werden die Mittel- und Maximal-Pegel der 100 aufeinanderfolgenden Güterzugvorbeifahrten beider Gleise vom Ende der Untersuchung mit den entsprechenden Pegeln vom Anfang der Untersuchung zu vergleichen.

## 6.2 Bestimmung der Aufweckwahrscheinlichkeit für einen bestimmten Ort

Die *Tabelle 4.2* enthält alle zur Berechnung der Aufweckwahrscheinlichkeit der dokumentierten Nacht erforderlichen Informationen. Es bleibt zu entscheiden, ob

- eine der 365 Nächte,
- die Nacht mit der höchsten (lautesten) Belastung oder
- der Mittelwert aller 365 Nächte

als „typische Nacht“ für die Bestimmung der Aufweckwahrscheinlichkeit ausgewählt wird.

## 7 weiterführende Betrachtungen

1. In *Aufweck-Pegel und Lärmpausen bei Schienen- und Fluglärm*, publiziert in *Immissionsschutz 9 (2004)*, 114-124, vom Autor dieses Aufsatzes, wurde eine Formel eingeführt, die auch die Dauer der Lärmeinwirkung berücksichtigt ist.
2. In *Mathematische Aspekte der gesundheitlichen Beeinträchtigung durch transiente Geräuschereignisse auf der Grundlage von zeitlich veränderlichen Cortisol-Konzentrationen*, publiziert im Tagungsbericht DAGA '06, 16.03.2006 Braunschweig, wurde in Zusammenarbeit zwischen B. Vogelsang und dem Autor dieses Aufsatzes eine Formel eingeführt, in der die Pausenstruktur berücksichtigt wird.
3. In *Aufweckreaktionen und Verkehrslärm*, zur Zeit nur publiziert unter [www.iazd.uni-hannover.de/~windelberg/search/laerm/wi3722\\_61.pdf](http://www.iazd.uni-hannover.de/~windelberg/search/laerm/wi3722_61.pdf) und [www.iazd.uni-hannover.de/~windelberg/search/laerm/wi3722\\_62.pdf](http://www.iazd.uni-hannover.de/~windelberg/search/laerm/wi3722_62.pdf) wird ein Verfahren zur Bewertung der Aufweckwahrscheinlichkeit verschieden lauter und verschieden lang einwirkender nächtlicher Schienenverkehrs-Situationen durch Einführung eines „Initialpegels“ angegeben.
4. Der Aufsatz *Wirkungen unterschiedlicher Bremssysteme*, zur Zeit nur publiziert unter [www.iazd.uni-hannover.de/~windelberg/search/laerm/wi\\_brems.pdf](http://www.iazd.uni-hannover.de/~windelberg/search/laerm/wi_brems.pdf) zeigt den Bedarf an Messungen für eine lärmtechnische Beurteilung neuer Bremssysteme.
5. In dem Aufsatz *Mathematische Aspekte der gesundheitlichen Beeinträchtigung durch transiente Geräuschereignisse auf der Grundlage von zeitlich veränderlichen Cortisol-Konzentrationen* hat der Autor zusammen mit B. Vogelsang auf der DAGA-Tagung im Jahre 2006 dargestellt, wie mehrere kurze Geräuschereignisse den Schlafes beeinträchtigen. Dazu wird die Cortisol-Konzentration im menschlichen Körper als Messgröße betrachtet.