

Mathematische Beschreibung von aufweckendem Güterschienenverkehr

Dirk Windelberg

Institut für Mathematik, 30167 Hannover, Deutschland, email: windelberg@math.uni-hannover.de

Einleitung

Hier soll vorausberechnet werden, wie hoch die Wahrscheinlichkeit dafür ist, dass ein bestimmter Güterzug einen Aufweckpegel verursacht. Dafür wird zunächst ein Güterzug-Vorbeifahrpegel angenommen und dann der Weg dieses Schalles bis zum Schlafzimmer verfolgt. Dann wird eine Modellierung für eine Aufweckbedingung angegeben. Dabei wird gezeigt, dass die zur Zeit gültige Beschreibung der Schallemission von Güterzügen nicht geeignet ist, um daraus ableiten zu können, ob ein Schlafender geweckt wird. Schließlich wird eine Bewertung der Pausenstruktur vorgenommen.

Güterzug

Ein Güterzug fahre an einem Schlafzimmerfenster vorbei. Vor diesem Fenster, das sich in 25 m Entfernung vom Gleis und 3.5 m über der Schienenoberkante befindet, werden die folgenden Pegel der Lok sowie der einzelnen Güterwagen bestimmt:

- $a_1 = 1$ Lokomotive mit $p_1 = 94 \text{ dB}(A)$,
- $a_2 = 12$ Flachwagen mit $p_2 = 82 \text{ dB}(A)$,
- $a_3 = 4$ Erzwagen mit $p_3 = 97 \text{ dB}(A)$ und
- $a_4 = 8$ Containertragwagen mit $p_4 = 90 \text{ dB}(A)$.

Die Lok und jeder der Güterwagen habe eine Länge von je 20 m. Der Zug fahre mit einer Geschwindigkeit von 100 km/h, d.h. die Vorbeifahrzeit des gesamten Zuges (mit einer Länge von 500 m) beträgt 18 s und die eines einzelnen Wagens 0.72 s.

Es wird angenommen, dass während einer Nacht genau 16 dieser Güterzüge auf dem betrachteten Gleis vorbeifahren.

Bewertung durch die Schall 03 (1990)

Die Schall 03 enthält die zur Zeit gültigen Berechnungsvorschriften für Schienenverkehrslärm. Nach dieser Regelung wird der Pegel, den die 16 Güterzüge am Schlafzimmerfenster erzeugen, wie folgt berechnet:

Vorbeifahrpegel des Güterzuges

Jede einzelne Vorbeifahrt wird durch den (energetischen) Mittelwert L_G über die Lok und alle 24 Wagen beschrieben, und dieser beträgt bei diesen 25 Fahrzeugen

$$L_G = 10 \cdot \lg \left[\frac{1}{25} \cdot \sum_{i=1}^4 \left(a_i \cdot 10^{(0.1 \cdot p_i)} \right) \right] \text{ dB}(A) = 91$$

Nachtpegel

Nach der Schall 03 wird aus dem Vorbeifahrpegel L_G des Güterzuges der Nachtpegel $L_{e,N}$ als Mittelungspegel über

- die acht Nachtstunden (22:00 bis 06:00 Uhr)
- die 16 Güterzüge während der Nacht
- sämtliche Ruhepausen zwischen zwei Zug-Vorbeifahrten

gebildet:

$$L_{e,N} = 10 \cdot \lg \left[\frac{16 \cdot 18}{8 \cdot 3600} \cdot 10^{(0.1 \cdot 91)} \right] \text{ dB}(A) = 71$$

Schließlich wird der Mittelwert über die Nachtpegel $L_{e,N}$ sämtlicher Nächte eines Jahres gebildet.

Schienenbonus

Die Schall 03 definiert den Beurteilungspegel $L_{r,N}$ am oben beschriebenen Schlafzimmerfenster durch

$$L_{r,N} = L_{e,N} - 5 \text{ dB}(A) = 66 \text{ dB}(A)$$

und nennt diese Reduktion den Schienenbonus.

Aufweckbedingungen

Es ist bekannt, dass Menschen bezüglich ihrer Aufweckbedingungen unterschiedlich sind. Diese Eigenschaft soll durch einen individuellen Schlafpegel S berücksichtigt werden: Wenn ein Anwohner feststellt, dass er „gut“ schläft, wenn vor seinem Schlafzimmerfenster der A-bewertete Gesamtschallpegel unterhalb von S liegt, dann soll S „Schlafpegel“ genannt werden. (In dieser Betrachtung bleibt es ohne Bedeutung, ob der Wert von S „amtlich“ festgelegt wird.)

Wenn der Schlafende dann durch einen Aufweckpegel P geweckt wird, so sollte er vorher mindestens eine Ruhezeit t_p geschlafen haben.

Annahmen

A1	Für jeden Anlieger gibt es einen individuellen Schlafpegel S
A2	Es gibt eine Ruhezeit t_p

Mit diesen Annahmen wird nun eine 10%-Aufweck-Kurve definiert. Dazu sind folgenden Pegel zu bestimmen:

Pegel $W_{10,1}$: Bei 10 Weckversuchen mit jeweils einem 1 s wirkenden Pegel $S + W_{10,1}$ wacht der Schläfer bei mindestens einem Versuch auf.

Pegel $W_{10,20}$: Bei 10 Weckversuchen mit jeweils einem 20 s wirkenden Pegel $S + W_{10,20}$ wacht der Schläfer bei mindestens einem Versuch auf.

Pegel $W_{10,\infty}$: Bei 10 Weckversuchen mit jeweils sehr lange wirkenden Pegel $S + W_{10,\infty}$ wacht der Schläfer bei mindestens einem Versuch auf.

(zwischen je zwei Weckversuchen liegt die Zeit t_p)

A3	Die 10%-Aufweckkurve w_{10} ist definiert durch $w_{10}(S, \alpha, \beta_{10}, \gamma, z) := S + \beta_{10} + \frac{\alpha}{z^\gamma}$ wobei $\beta_{10} = W_{10,\infty}$, $\alpha = W_{10,1} - \beta_{10}$ und $\gamma = \frac{\ln(\alpha) - \ln(W_{10,20} - \beta_{10})}{\ln(20)}$ ist.
-----------	--

Diese Definition der 10%-Aufweck-Kurve erlaubt eine Fortsetzung:

A4	Die 20%-Aufweck-Kurve ergibt sich aus der 10%-Aufweck-Kurve durch $\beta_{20} = \beta_{10} + 3$
A5	Die 40%-Aufweck-Kurve ergibt sich aus der 10%-Aufweck-Kurve durch $\beta_{40} = \beta_{10} + 6$

Beispiel

Wenn zum Beispiel $W_{10,1} = 45$, $W_{10,20} = 19$ und $W_{10,\infty} = 18$ sind, so ist $\beta_{10} = 18$, $\alpha = 27$ und $\gamma = 1.1$. Für diese Parameter ist dann

$$w_{10}(S, \alpha, \beta_{10}, \gamma, z) = S + \left(18 + \frac{27}{z^{1.1}}\right)$$

Anwendung

Der Güterzug, der im ersten Teil beschrieben wurde, enthält 4 Erzwagen mit einem Vorbeifahrpegel von jeweils $p_3 = 97 \text{ dB(A)}$, und dieser Pegel wirkt während einer Zeit von $4 \cdot 0.72 = 2.88 \text{ s}$.

Wenn nun in Anlehnung an die DLR-Schlafstudie zunächst $S = 51 \text{ dB(A)}$ gewählt wird, dann kann nachgerechnet werden, ob in 10% der Vorbeifahrten ein Aufweckpegel anzunehmen ist: Es ist

$$w_{10}(51, 27, 18, 1.1, 2.88) = 51 + \left(18 + \frac{27}{2.88^{1.1}}\right) \approx 77.4$$

d.h. ein Schlafender wird von 10% der vorbeifahrenden Erzwagen geweckt, da $p_3 = 97 > w_{10}(51, 27, 18, 1.1, 2.88) \approx 77.4$ ist.

Aber es ist sogar

$$p_3 = 97 > w_{80}(51, 27, 18+9, 1.1, 2.88) = 77+9 = 86,$$

d.h. 80% der Erzwagen würden diesen Schläfer aufwecken.

Nach der Schall 03 hingegen wird dieses Szenario der 16 Güterzüge nur durch den Beurteilungspegel $L_{r,N} = 66 \text{ dB(A)}$ beschrieben.

Da aber $L_{r,N} = 66 < w_{10}(51, 27, 18, 1.1, 2.88) \approx 77$ ist, gibt es nach diesem Berechnungsverfahren keine Aufweckreaktion.

Ruhedauerbewertung

Bisher wurde die Frage vernachlässigt, zu welchen Zeiten die 16 Güterzüge fahren. Als Extremfälle sollen hier daher die beiden folgenden Szenarien betrachtet werden:

Szenario A	Die 16 Güterzüge fahren in der Zeit zwischen 22:00 und 23:00 Uhr im 3-Minuten-Takt
Szenario B	Die 16 Güterzüge fahren in der Zeit zwischen 22:00 und 06:00 Uhr im 30-Minuten-Takt

Diese beiden Szenarien unterscheiden sich bezüglich ihrer Wirkung auf den Schlaf. Es ist daher notwendig, neben den bisher angegebenen Parametern zur Beschreibung der Güterzug-Emissionen wie Anzahl der Güterzüge pro Nacht, Vorbeifahrpegel der Güterwagen und Vorbeifahrdauer zusätzlich eine Bewertung der Pausenstruktur anzugeben.

Als wesentliche Kenngröße wird hier bezüglich des 10%-Aufweckpegels eingeführt

$$R_{10} = \frac{1}{N} \cdot \sqrt{\sum_{i=0}^{i=n_{ruhe}} t_{10}(r, i)^2}$$

Darin sind

N	die Gesamtdauer der Messung, im Beispiel also $8 \text{ h} = 8 \cdot 3600 \text{ s}$
i	Index der Ruhepausen zwischen zwei aufeinanderfolgenden 10%-Aufweckpegeln
$t_{10}(r, i)$	zeitliche Länge der i -ten Ruhepause (mindestens t_p)

Für die Ruhedauerbewertung R_{10} gilt:

A6	Je geringer die Ruhedauerbewertung R_{10} ist, desto stärker wird die Nachtruhe gestört
-----------	---

Wenn diese Ruhedauerbewertung auf die beiden Szenarien A und B angewandt wird, so ergibt sich

$$R_{10}^A \approx \frac{1}{8} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^{15} \left(\frac{8}{15}\right)^2} = \frac{1}{8} \cdot \sqrt{15 \cdot \left(\frac{8}{15}\right)^2} = \sqrt{\frac{1}{15}} \approx 0.26$$

$$R_{10}^B \approx \frac{1}{8 \cdot 60} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^{15} 3^2 + (15 + 7 \cdot 60)^2} = \frac{1}{8 \cdot 60} \cdot \sqrt{15 \cdot 9 + 435^2} = \sqrt{\frac{1}{15}} \approx 0.91$$

Literatur:

D. Windelberg: Aufweck-Pegel und Lärmpausen bei Schienen- und Fluglärm. Immissionsschutz 9 (2004), 114-124