

Tieffrequenter Luftschall des Eisenbahnverkehrs in Wohnhäusern

Nico Petry¹, Frieder Kunz²

¹ Technische Hochschule Bingen, 55411 Bingen am Rhein, E-Mail: n.petry@th-bingen.de

² E-Mail: frieder.kunz@th-bingen.de

Einleitung

2018 wurden im DAGA-Vortrag „Erschütterungen des Eisenbahnverkehrs am Mittelrhein, Messungen in Wohnhäusern und Interviews mit Anwohnern“ die tieffrequenten Geräusche der Eisenbahn in Innenräume von Wohnhäusern kurz präsentiert [1]. In diesem Beitrag werden die tieffrequenten Geräusche für den Nachtzeitraum eingehender behandelt. Als Bewertungsgrundlage wird die DIN 45680 Entwurf (2013) [2] sowie das dazugehörige Beiblatt 1 [3] verwendet.

Dieser Auswertung liegen 27 Häuser zu Grunde, die an der Studie „Bahnlärm und Erschütterungen im Mittelrheintal“ der Technischen Hochschule Bingen teilgenommen haben. Die Studie wurde über die Forschungsinitiative Rheinland-Pfalz finanziert. Bei dieser Studie wurde die Schall- und Erschütterungsbelastung in Wohnräumen gemessen. Zusätzlich wurden die Anwohner zur subjektiven Belastung befragt. Ein Teil der Studie ist die Masterthesis „Bewertung von Erschütterungen und niederfrequenten Lärmemissionen infolge Bahnverkehrs im Mittelrheintal und Korrelation mit dem Belastungsempfinden von Anliegern“ [4].

Problemstellung

Die Eisenbahngeräusche in Innenräumen enthalten tief-frequente Anteile, die durch Sekundärschall erzeugt oder als primärer Luftschall durch das Mauerwerk oder Fenster nicht hinreichend gedämmt werden. In Abbildung 1 werden die Erschütterung als Schnellepegel (L_{v_eq}) und die Schalldruckpegel (L_{p_Zeq}) einer Güterzugvorbeifahrt als Spektrum gezeigt. Die Messung erfolgte jeweils in der Raummitte.

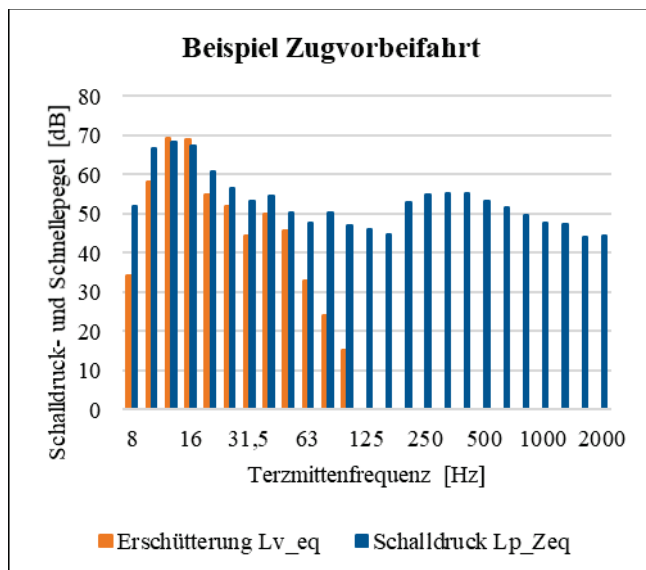


Abbildung 1: Beispiel einer Vorbeifahrt eines Güterzuges (Mittelungszeit 45 Sekunden)

Die Abbildung 1 zeigt, dass um 12,5 Hz und 16 Hz der Schalldruckpegel am höchsten ist. Der Verlauf des Erschütterungs-Spektrums ist bei den tiefen Terzen unter 31,5 Hz ähnlich. Man kann davon ausgehen, dass hier der Sekundärschall einen großen Anteil am Luftschall-Spektrum hat. Mithilfe der DIN 45680 Entwurf wird nun ermittelt, ob tieffrequente Geräusch nach der Norm vorliegen.

Auswertung nach DIN 45680 Entwurf

Das Bewertungsverfahren der DIN 45680 Entwurf sieht vor, dass je Terz ein Überschreitungspegel von 5% gebildet wird. Im zweiten Schritt wird dieses Spektrum zu einem Lautheitsspektrum transformiert, das mit einem Dynamikfaktor je Terz gewichtet wird. Aufsummiert repräsentiert dieses gewichtete Lautheitsspektrum die Kenngröße H. Die Abbildung 2 zeigt die Auswertung einer Nachtmessung. Es handelt sich um dieselbe Messstelle wie in Abbildung 1.

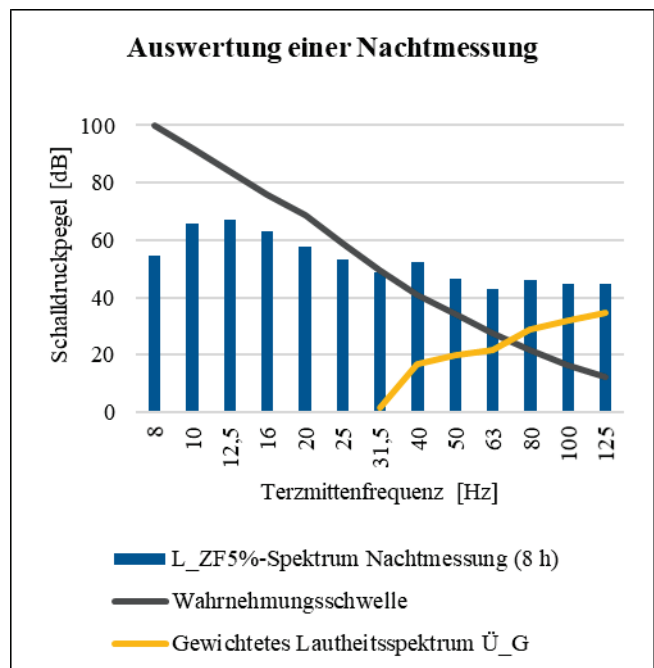


Abbildung 2: Auswertung einer Nachtmessung nach DIN 45680 Entwurf

Auffallend in Abbildung 2 ist, dass bei einer Zugvorbeifahrt die tiefen Frequenzen von 10 Hz, 12,5 Hz und 16 Hz viel zum unbewerteten Gesamtpegel beitragen, aber bei dem gewichteten Lautheitsspektrum nicht einfließen. Der Grund ist, dass diese Terzen die Wahrnehmungsschwelle nicht erreichen. Folglich sind die letzten drei Terzen (80 Hz, 100 Hz und 125 Hz) für die Höhe der Kenngröße H maßgebend.

Der Überschreitungspegel von 5% repräsentiert den Pegel, der von 24 Minuten einer Nachtmessung (8 Stunden) über-

schritten wird. Folglich gibt es Züge, die über diese Schwelle gehen. In Abbildung 3 wird das MAX-Spektrum des Beispielzuges aus Abbildung 1 abgebildet.

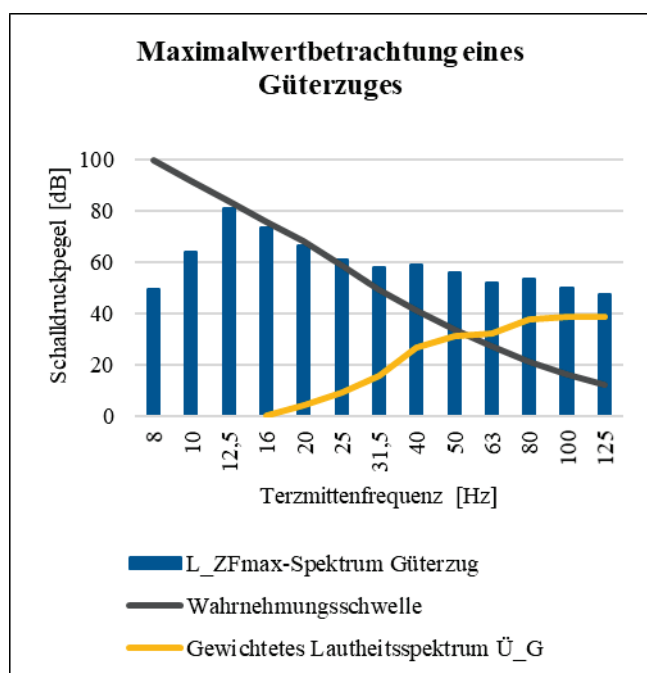


Abbildung 3: Maximalwertbetrachtung eines Güterzuges

Bei der Betrachtung der Maximalwerte in Abbildung 3 liegen die Terzen höher als beim Überschreitungspegel 5% (Abbildung 2). Bei diesem maximalen Spektrum erreichen mehr Terzen die Wahrnehmungsschwelle. Die Terzen 80 Hz, 100 Hz und 125 Hz sind wie bei der 5%-Überschreitung im Gegensatz zu den restlichen besonders gut wahrnehmbar. Die Terzen 12,5 Hz und 16 Hz, die potenziell Sekundärschall enthalten, erreichen die Wahrnehmungsschwelle nicht.

Zusammenfassend können tieffrequente Geräusche vom Eisenbahnverkehr in Innenräumen gemessen werden. Die Terzen 80 Hz, 100 Hz und 125 Hz sind für die Kenngröße H und der maximalen gewichteten Schwellenüberschreitung (\ddot{U}_{Dmax}) maßgebend. Der Anteil des sekundären Luftschall durch die Erschütterungen trägt keinen entscheidenden Anteil bei, da die Wahrnehmungsschwelle in diesem Bereich von 10 Hz bis 31,5 Hz nur gering oder gar nicht überschritten wird. Dies zeigte sich für alle untersuchten Häuser an den Rheintalstrecken.

Alternative Vorgehensweise

Bei dem Berechnungsverfahren nach der DIN 45680 Entwurf wird mit dem Lautheitsspektrum der Flankenerregung von benachbarten Terzen Rechnung getragen. Durch den ersten Berechnungsschritt der Norm werden die realen Spektren des Eisenbahnverkehrs durch ein statistisches Spektrum (Überschreitungspegel $L_{p_ZF5\%}$) ersetzt. Dementsprechend wird im zweiten Schritt ein Lautheitsspektrum aus Terzen berechnet, die nicht zeitgleich vorliegen. Da die Eisenbahngeräusche in sehr unterschiedlichen Ausprägungen auftreten können, wird ein alternatives Verfahren angewandt, bei dem die Reihenfolge der Berechnungsschritte getauscht wird. Bei diesem wird zuerst das gewichtete Lautheitsspektrum für jede Sekunde

erstellt und danach der Überschreitungspegel von 5% gebildet. Als weitere Kenngrößen wird neben dem vorgeschriebenen Überschreitungspegel von 5% der Norm auch 1% und 2% ausgewertet. Bei einer Nachtmessung von 8 Stunden entsprechen 1% etwa 5 Minuten und 2% etwa 10 Minuten in denen es lauter als der angegeben Pegel ist. Die 5% entsprechen 24 Minuten.

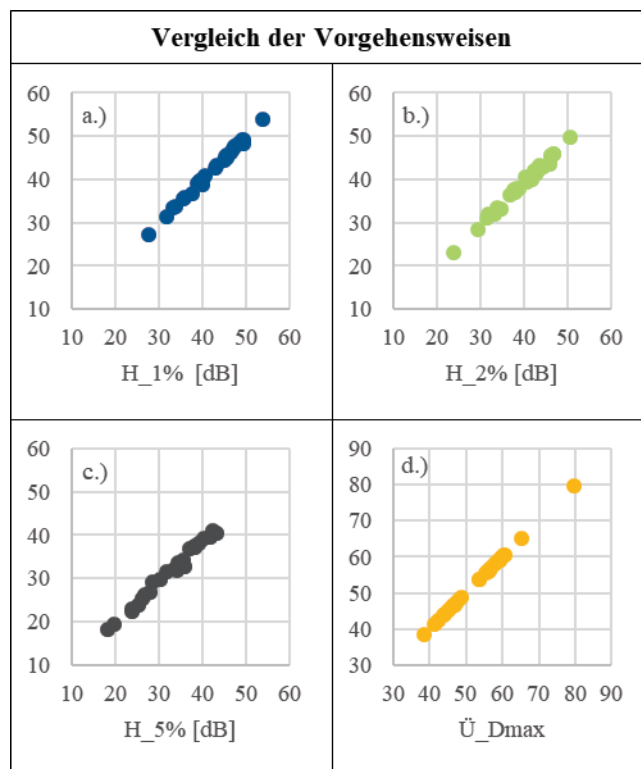


Abbildung 4: Vergleich des alternativen Verfahrens (Abszisse) gegenüber der Vorgehensweise nach DIN 45680 Entwurf (Ordinate)

Abbildung 4 (a, b und c) zeigen auf der Ordinate die Kenngröße H für die einzelnen Häuser, wenn sie mit den nicht zeitgleich vorliegenden Spektren normgerecht berechnet wird. Auf der Abszisse ist der Wert der Größe H aufgetragen, wenn die Lautheit aus den einzelnen Sekundenspektren berechnet wurde. Deutlich ist zu erkennen, dass es keinen wesentlichen Unterschied macht, welche Vorgehensweise angewandt wird. Beide Berechnungen geben mit geringer Abweichung dieselbe Kenngröße H zurück. Unerheblich ob zuerst das gewichtete Lautheitsspektrum erstellt wird (alternatives Verfahren) oder zuerst der spektrale Überschreitungspegel berechnet wird (Verfahren der Norm).

Bei der maximalen gewichteten Schwellenüberschreitung (\ddot{U}_{Dmax}) ermitteln beide Varianten identische Werte. Dies ist in Abbildung 4 d ersichtlich. Die einzelnen Schritte der Norm verändern die maximale Terz nur linear, da kein Lautheitsspektrum erstellt und nur eine Terz zur Bewertung herangezogen wird.

Die Abbildung 4 c lässt einen direkten Vergleich mit dem nächtlich Anhaltswert ($A_H = 20$) zu. Von den 27 Messstellen liegen 25 Häuser über diesen Anhaltswert. Das sind über 90% der Wohnhäuser; bei denen nach der DIN 45680 Entwurf tieffrequente Geräusche vorliegen.

Analog kann der Anhaltswert für die gewichtete Schwellenüberschreitung ($A_o = 30$) mit der Abbildung 4 d verglichen werden. Es ist unschwer zu erkennen, dass keins der Häuser diesen Anhaltswert unterschreitet.

Korrelation mit physikalischen Kennwerten und der subjektiven Befragung

Eine weitere Untersuchung ist, welche Zusammenhänge es zwischen der Kenngröße H und anderen Belastungen gibt. Für diese Zusammenhänge wird jeweils der Spearmans Rangkorrelationskoeffizient r mit dem Signifikanzniveau α angegeben. Die Tabelle 1 zeigt den Korrelationskoeffizienten des C-bewerteten Überschreitungspegel von 2% ($L_{CF2\%}$) und die bisherigen Kenngrößen aus der Abbildung 4.

Tabelle 1: Korrelation der Schallpegelkenngrößen

		\ddot{U}_{Dmax}	H_1%	H_2%	H_5%
L_CF2%	r	0,69	0,88	0,88	0,65
	α	0%	0%	0%	0%
	N	27	27	27	27

In der Tabelle 1 ist ersichtlich, dass es starke Korrelationen zwischen des Überschreitungspegels $L_{CF2\%}$ und der aufgeführten Kenngrößen gibt. Es geht mit einem hohem Überschreitungspegel $L_{CF2\%}$ bei Eisenbahngeräusche im Innenraum auch eine höhere Belastung von tieffrequentem Schall einher.

In der Tabelle 2 wird überprüft, ob es einen Zusammenhang zwischen der Kenngrößen für tieffrequente Geräusche und der Erschütterungswerten der DIN 4150-2 gibt.

Tabelle 2: Korrelation der Erschütterungskenngrößen

		LCF2%	\ddot{U}_{Dmax}	H_2%	H_5%
KB_Fmax	r	0,41	0,07	0,29	0,32
	α	6%	76%	19%	14%
	N	22	22	22	22
KB_FTr	r	0,55	0,23	0,45	0,47
	α	1%	31%	3%	3%
	N	22	22	22	22

Bei der Kenngröße KB_{Fmax} gibt es keinen Zusammenhang, da die Korrelationskoeffizienten r niedrig sind und das Signifikanzniveau α jeweils über der üblichen Schwelle von 5% liegt. Bei KB_{FTr} gibt es bei $H_2\%$ und $H_5\%$ einen schwachen Zusammenhang der signifikant ist. Bedeutet, dass an einigen Häusern im Mittelrheintal die durchschnittliche Erschütterungsbelastung und die tiefrequenten Geräusche hoch sein können. Dabei sei angemerkt, dass alle Wohnhäuser der Studie einer hohen Schallbelastung ausgesetzt sind. Die Erschütterungsbelastung schwankt jedoch zwischen mäßig und hoch belastet.

Neben der physikalischen Belastung von Luftschall und Erschütterungen wurde auch den Anwohnern die Frage gestellt, wie sehr sie sich durch die Eisenbahn gestört fühlen. Die Anwohner konnten bei den Fragen zur Lärm- / Erschütterungsbelastung zwischen gar nicht „0“ und extrem belästigend „10“ wählen. Die Tabelle 3 enthält neben den Kenngrößen $H_2\%$ und $H_5\%$ zum Vergleich auch $L_{CF2\%}$.

Tabelle 3: Korrelation der Belästigungsgrade

		L_CF2%	H_2%	H_5%	
Belästigungsgrad	Lärm	r	0,25	0,35	0,28
		α	20%	8%	15%
		N	27	27	27
	Erschütterungen	r	0,02	0,16	0,20
		α	91%	42%	32%
		N	27	27	27

Aus der Tabelle 3 ist ersichtlich, dass zwischen den subjektiven Belästigungsgraden und den aufgeführten Kenngrößen kein Zusammenhang zu erkennen ist.

Zusammenfassung

Die Eisenbahngeräusche in Innenräume enthalten häufig einen hohen Anteil an tiefen Frequenzen. Durch die Gegenüberstellung des Schnellepegel-Spektrums der Erschütterung und des Luftschalls kann vermutet werden, dass sekundärer Luftschall einen Einfluss auf die gemessenen Spektren hat. Dieser Anteil beschränkt sich in der Bandbreite zwischen 10 Hz und 31,5 Hz, bei denen es auch Vibrationen gibt.

Werden die Eisenbahngeräusche mit der DIN 45680 Entwurf ausgewertet, liegen über 90% der teilnehmenden Häuser der Studie über den Anhaltswerten des Beiblattes 1 der Norm. Die Terzen (80 Hz, 100 Hz und 125 Hz) sind für das gewichtete Lautheitsspektrum (Kenngröße H) und die gewichtete Schwellenüberschreitung (\ddot{U}_{Dmax}) maßgebend. Bei diesen Terzen gehen die Eisenbahngeräusche weitaus mehr über die Wahrnehmungsschwelle als bei Terzen unter 80 Hz. Dementsprechend hat der sekundäre Luftschall durch die Erschütterungen keinen oder nur einen sehr geringen Einfluss auf diese Kenngrößen.

Bei dem Berechnungsverfahren nach der DIN 45680 Entwurf wird zuerst der Überschreitungspegel von 5% je Terz gebildet und danach das Lautheitsspektrum ermittelt. Es wird also das Lautheitsspektrum aus zeitlich unabhängigen Terzen erstellt. Um diese Tatsache zu umgehen, wird in einem alternativen Verfahren die Reihenfolge der Berechnungsschritte getauscht. Bei diesem Verfahren wird das Lautheitsspektrum aus dem realen Spektrum je Sekunde berechnet und danach deren Überschreitungspegel von 5% gebildet. Beide Vorgehensweisen kommen in etwa auf dieselben Kenngrößen H. Schlussfolgernd nähert sich bei dieser Untersuchung mit jeweils mehr als 50 Zügen pro Messung das statische Spektrum den realen Spektren der Züge.

Die Kenngröße H für tieffrequente Geräusche korreliert stark mit dem Überschreitungspegel $L_{CF2\%}$. Dementsprechend korrelieren dann beide Größen auch mit dem Erschütterungskennwert KB_{FTr} . Die von den Anwohnern berichteten Wirkungen wie Belästigung, Schlafstörung, etc. korrelieren nicht signifikant mit den berechneten Kenngrößen nach DIN 45680 Entwurf.

Literatur

- [1] Kunz, F.; Petry, N.: Erschütterungen des Eisenbahnverkehrs am Mittelrhein, Messungen in Wohnhäusern und Interviews mit Anwohner, DAGA 2018 München, 2018
- [2] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: DIN 45680 - Entwurf, Messung und Beurteilung tieffrequenter Geräuschemissionen. September 2013
- [3] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: DIN 45680 Beiblatt 1 - Entwurf, Messung und Beurteilung tieffrequenter Geräuschemissionen. September 2013
- [4] Petry, N.: „Bewertung von Erschütterungen und niederfrequenten Lärmemissionen infolge Bahnverkehrs im Mittelrheintal und Korrelation mit dem Belastungsempfinden von Anliegern“. Masterarbeit, 2018