

Maximalpegelkriterien für die Beurteilung von Schienenverkehrslärm in der Nacht

Ulrich Möhler, Dirk Schreckenber, Uwe Müller, Manfred Liepert, Viktor Skowronek, Christin Belke, Sarah Benz, München, Hagen, Köln

Zusammenfassung In einem interdisziplinären Gutachten wurde überprüft, ob die Auswirkungen des Schienenverkehrslärms auf den nächtlichen Schlaf durch den Mittelungspegel hinreichend beurteilt werden. Durch Re-Analysen vorhandener Studien zu den psychologischen und physiologischen Auswirkungen des Schienenverkehrslärms auf den Nachtschlaf wurde festgestellt, dass zusätzlich zum Mittelungspegel die Einführung von zwei Maximalpegelkriterien erforderlich wird. Durch die Festlegung einer maximalen Differenz zwischen Maximalpegel und Mittelungspegel in Höhe von 17 dB werden die psychologischen Auswirkungen und durch die Einführung einer maximalen Anzahl von zumutbaren Aufwachreaktionen die physiologischen Auswirkungen ausreichend berücksichtigt. Für die Umsetzung dieser Kriterien wurden ein Berechnungsverfahren zur Ermittlung des Maximalpegels auf der Grundlage der Schall 03 sowie eine Beurteilungsmethodik entwickelt

Criteria of maximum noise level for the assessment of railway noise

Summary In an interdisciplinary report it was examined whether the effects of rail noise on sleep were adequately assessed by the equivalent continuous sound pressure level. A re-analysis of existing studies on the psychological and physiological effects of nocturnal railway noise has led to the result, that in addition to the equivalent continuous sound pressure level, the introduction of two maximum-level criteria is required. By the determination of a maximum difference between the maximum sound pressure level and the equivalent continuous sound pressure level of 17 dB the psychological effects are considered; by introducing a maximum number of reasonable awakening reactions, the physiological effects are adequately considered. In order to implement these criteria, a calculation method for the evaluation of the maximum sound pressure level on the basis of Schall 03 as well as a method for the further assessment were developed

In den derzeitigen Regelungen zur Beurteilung von Schienenverkehrslärm wird zumeist der Mittelungspegel als Beurteilungsgröße verwendet. Zunehmend wird im Zusammenhang mit der Diskussion über Neu- und Ausbauplanungen von Eisenbahnstrecken ebenso wie bei der Lärmsanierung bestehender Strecken die bisherige Beurteilung des Schienenverkehrslärms durch den Mittelungspegel hinterfragt. Feldstudien, in denen die Auswirkungen von Verkehrslärm auf den Schlaf physiologisch untersucht wurden, wie etwa die Ergebnisse der NORAH-Studie zur Wirkung von Fluglärm auf den Schlaf („NORAH-Schlafstudie“ [1]) und der Studie des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) 2008–2009 [2]–[3] zur Wirkung nächtlichen Bahnlärms auf den Schlaf zeigen, dass zwischen dem Einzelereignis und dessen Maximalpegel und den Wirkungen auf den Nachtschlaf ein enger Zusammenhang besteht. Auch bezogen auf in Befragungen erhobene Urteile zur Lärmbelästigung und zu Schlafstörungen zeigt sich in der NORAH-Studie am Beispiel des Fluglärms, dass die Lärmreaktionen durch ein Modell mit der Zahl von Geräuscheignissen und dem Maximalpegel, der von mindestens sechs Flugbewegungen über-

sritten wird ($L_{pAmax,6}$), als Erklärungsgrößen (Prädiktoren), eine bessere Modellgüte aufweisen, als ein Modell nur mit dem Dauerschallpegel als Prädiktor [4] [5].

Die Bedeutung des Maximalpegels zur Beurteilung der Wirkung nächtlichen Verkehrslärms zeigt sich auch in Bezug auf Erkrankungsrisiken: So konnte in der NORAH-Fallkontrollstudie zu Erkrankungsrisiken festgestellt werden, dass beim Fluglärm bereits statistisch signifikante erhöhte Risiken hypertensiver (blutdruckbedingter) Herzerkrankungen und Herzinsuffizienz bei relativ niedrigem 24-Stunden-Dauerschallpegel ($L_{pAeq,24h} < 40$ dB) auftreten, wenn ein nächtlicher Maximalpegel von 50 dB bei mindestens sechs Flugbewegungen überschritten wurde [6].

Um zu prüfen, ob aus den Erkenntnissen der Lärmwirkungsforschung zur Bedeutung eines Maximalpegelkriteriums bei der Beurteilung des nächtlichen Schienenverkehrslärms Vorschläge zur etwaigen Ergänzung bzw. Änderung der bestehenden Beurteilungsregelungen abgeleitet werden können und welche Auswirkungen Umsetzungsvorschläge haben, wurde vom Hessischen Umweltministerium das interdisziplinäre Gutachten zur „Berücksichtigung eines Maximalpegelkriteriums bei der Beurteilung von Schienenverkehrslärm in der Nacht“ in Auftrag gegeben.

Der vorliegende Beitrag fasst die wesentlichen Analysen und Ergebnisse dieses Gutachtens [7] zusammen. Dabei wird zunächst die Schlafqualität definiert, dann anhand einer Analyse der Forschungsliteratur Wirkungskriterien des Lärms auf den nächtlichen Schlaf dargestellt und geeignete akustische Kenngrößen beschrieben. Es werden Ergebnisse von Expositions-Wirkungsanalysen mit verschiedenen Wirkungs- und Akustik-Kenngrößen und hieraus abgeleitete Vorschläge von Zumutbarkeitsgrenzen vorgestellt, deren Auswirkungen anhand von Fallbeispielen aufgezeigt werden.

Definition von Schlaf

„Der Schlaf ist ein aktives und äußerst komplexes Geschehen, in dem vielfältige physiologische Prozesse ablaufen (z. B. Proteinbiosynthese, Ausscheidung spezifischer Hormone, oder die Konsolidierung von Gedächtnisinhalten), die im weitesten Sinne der Erholung und damit der Vorbereitung auf die nächste Wachphase dienen. Ungestörter Schlaf von ausreichender Dauer ist unerlässlich für den Erhalt von psychomotorischer Leistungsfähigkeit und Gesundheit.“ ([8] zit. nach [9])

Diese Definition zeigt, dass unabhängig von der genauen Struktur des Schlafs, er insgesamt gesundheitsrelevant ist. Eine gute Schlafgesundheit [10] ist dabei gekennzeichnet durch (1) subjektive Zufriedenheit [mit dem Schlaf], (2) angemessene Zeitperiode, (3) adäquate Dauer (ca. sieben bis neun Stunden für einen gesunden Erwachsenen nach einer Gesamt-Konsensempfehlung der American Academy of Sleep Medicine and Sleep Research Society [11]), (3) hohe Effizienz und (4) nachhaltige Wachheit/Aufmerksamkeit während der Wachstunden. Ist der

Schlaf hinsichtlich dieser Schlafparameter beeinträchtigt, sind weitere Gesundheitswirkungen nicht auszuschließen.

Daraus folgt, dass sowohl die subjektiv erlebte Störung des Schlafs durch Lärm ein Indikator gesundheitlicher Beeinträchtigung darstellt, als auch physiologische Größen, die anzeigen, dass der Schlafverlauf durch Geräuscheinwirkungen (hier: Schienenverkehrslärm) so verändert wird, dass eine Beeinträchtigung des körperlichen, seelischen und sozialen Wohlbefindens anzunehmen ist bzw. nicht ausgeschlossen werden kann.

Porter et al. [12] stellen ein vereinfachtes Modell vor, das die Wirkung nächtlichen Lärms in vier Stufen beschreibt:

- (1) Akute Reaktionen, die eine unmittelbare, direkte Störung durch ein Geräuscheignis beinhalten;
- (2) Lärmeffekte über einen ganzen Nachtzeitraum, die eine Aggregation akuter Reaktionen innerhalb einer Nacht darstellen;
- (3) Nacheffekte am darauffolgenden Tag, die aus den Lärmwirkungen von (1) und (2) resultieren;
- (4) chronische Effekte, die als Langzeitfolgen von (1) bis (3) auftreten können.

Für die Analysen zur Identifizierung geeigneter akustischer Belastungskenngrößen zur Beurteilung des nächtlichen Schienenverkehrslärms wurden jeweils physiologische und psychologische Wirkungskriterien ausgewählt, die sowohl ereignisnah (physiologische Wirkung) als auch integriert über die Bewertung der lärmbedingten Gestörtheit über mehrere Nächte (psychologische Wirkung) ansetzen.

Als psychologisches Wirkungskriterium wurde der Prozentanteil hoch durch Schienenverkehrslärm schlafgestörter Personen (%HSD; highly sleep disturbed) festgelegt. Beim ausgewählten physiologischen Wirkungskriterium handelt es sich um die stärkste physiologische Auswirkung nächtlichen Bahnlärms auf den Schlaf, das Erwachen, für das eine ökologisch valide Expositions-Wirkungskurve zur Aufwachwahrscheinlichkeit aufgrund eines Bahnlärmereignisses abgeleitet wurde.

Psychologische Wirkungen des nächtlichen Bahnlärms

Das %HSD-Kriterium ist in Verfahren zur Beurteilung der Auswirkungen von Lärm auf die Bevölkerung international seit langem etabliert. Auch in einem zum Zeitpunkt dieses Beitrags aktuellen Review zu den Auswirkungen nächtlichen Umgebungslärms auf den Schlaf im Rahmen der Aktualisierung der WHO Environmental Noise Guidelines der Weltgesundheitsorganisation [13] ist das %HSD-Kriterium erneut aufgegriffen worden. Weiterhin findet das %HSD-Kriterium zum Beispiel in der Europäischen Umgebungslärmrichtlinie 2002/49/EG [14] und in der VDI-Norm 3722-2 zur Gesamtlärbewertung [15] Anwendung.

In dem Gutachten wurden in Sensitivitätsanalysen drei Arten von Expositions-Wirkungsmodellen zum %HSD-Anteil berechnet. Die Gestörtheitsangaben stammen aus Befragungen zum Schienenverkehrslärm aus der NORAH-Studie, durchgeführt im Jahr 2012 im Rhein-Main-Gebiet [16]. Diese Studie erlaubt unter anderem die Verknüpfung von psychologischen Wirkungsgrößen mit verschiedenen akustischen Kenngrößen der Schienenverkehrsgeräuschbelastung bei einem breiten Mix von Zugarten mit unterschiedlichem Verkehrsaufkom-

men wie er im aktuellen bundesdeutschen Bahnstreckennetz üblich ist. Für die Re-Analysen von Daten der NORAH-Studie wurden die untersuchten, berichteten Schlafstörungen durch Schienenverkehrslärm auf die Gestörtheit während des Einschlafens, während des Schlafs in der Nacht (während des Durchschlafens), am frühen Morgen (während des Ausschlafens) sowie insgesamt (Mittelwertsscore aus den drei Einzelurteilen zur Schlafgestörtheit) in den zurückliegenden 12 Monaten betrachtet. Die Schlafgestörtheitsurteile wurden jeweils orientiert an den ICBEN-Empfehlungen zur Lärmbelastung [17] anhand einer fünfstufigen Antwortskala von „(1) nicht...“ bis „(5) äußerst gestört“ erhoben. Personen mit der Angabe von „(4) stark“ und „(5) äußerst“ im Schlaf gestört wurden als „highly sleep disturbed“ (HSD) eingestuft. Je nach analysierter Wirkungsvariable wurden Daten von 2 062 bis 2 072 Personen einbezogen.

Die drei Modellarten stellen logistische Regressionen zum %HSD-Anteil beim Einschlafen, während des Nachtschlafs, beim Ausschlafen sowie insgesamt dar und beziehen sich auf folgende akustische Kenngrößen:

- (A) Nächtlicher Dauerschallpegel $L_{pA,eq,22-06h}$
- (B) Höchster Maximalpegel $L_{pAF,max}$ über alle Zugarten
- (C) Kombination von Maximalpegel und nächtliche Zugzahl (22-06 Uhr) im Radius von 250 m

Für alle Modelle wurden die zusätzlichen Einflussgrößen (Co-Determinanten) Befragungsmodus (telefonisch vs. online), der nächtliche Luftverkehrsgeräuschpegel $L_{pA,eq,22-06h}$ und der nächtliche Straßenverkehrsgeräuschpegel $L_{pA,eq,22-06h}$ einberechnet. Die logistischen Regressionsmodelle wurden hinsichtlich der Modellgüte mittels des Akaike Informationskriterium (AIC) bewertet. Dies ist eine Maßeinheit für die Anpassungsgüte eines Regressionsmodells. Das AIC belohnt auf der einen Seite die Anpassungsgüte mit Hilfe der Likelihood - Funktion und „bestraft“ andererseits die Hinzunahme von weiteren Prädiktoren [18]. Damit verhindert dieser Strafterm eine „Überanpassung“, da die Erhöhung der Anzahl der Modellparameter in der Regel die Anpassungsgüte verbessert. Niedrigere AIC-Werte bedeuten eine bessere Modellgüte.

Die Modellberechnungen zeigen, dass der Anteil hoch schlafgestörter Personen durch Schienenverkehrslärm (%HSD) sowohl mit zunehmenden nächtlichem Dauerschallpegel als auch mit dem höchsten Maximalpegel über alle Zugarten und der Anzahl der Züge ansteigt. Aus den untersuchten Expositions-Wirkungsmodellen ergibt sich, dass der Dauerschallpegel allein nicht unbedingt das Geräuschbelastungsmaß mit der besten Passung als Maß zur Vorhersage des %HSD-Anteils ist. Denn bezogen auf alle psychologischen Schlafgestörtheitsvariablen bildet entweder der höchste Maximalpegel über alle

Tabelle 1 Modellgüte (AIC) logistischer Regressionen des Anteils hoch schlafgestörter Personen (%HSD) auf akustische Kenngrößen.

AIC-Werte	Modell A	Modell B	Modell C
	Prädiktor		
Kriteriumsvariable	$L_{pA,eq,22-06h}$	$L_{pAF,max}$	$L_{pAF,max} + \text{Zugzahl } 250m$
%HSD - Störung beim Einschlafen	1.409,629	1.397,532	1.402,047
%HSD - Störung beim Nachtschlaf	1.265,970	1.262,588	1.272,948
%HSD - Störung beim Ausschlafen	1.270,998	1.269,146	1.267,232
%HSD - Schlafgestörtheit insgesamt	1.023,972	1.020,628	1.023,138

AIC = Akaike Informationskriterium (niedrigere Werte = bessere Modellgüte)

Zugarten allein oder in Kombination mit der Anzahl der Züge den %HSD-Anteil besser ab (s. **Tabelle 1**). Für die Berücksichtigung des Maximalpegelkriteriums zum nächtlichen Schienenverkehrslärm sind insbesondere die Expositions-Wirkungsbeziehungen zur Schlafgestörtheit insgesamt (Gesamtscore) relevant. **Bild 1** zeigt die Expositions-Wirkungskurven für den %HSD-Anteil durch Schienenverkehrslärm schlafgestörter Personen (Gesamtscore) bezogen auf den nächtlichen Dauerschallpegel (Modell A) und den höchsten Maximalpegel über alle Zugarten (Modell B). Die Einführung eines Maximalpegelkriteriums für den Nachtzeitraum erscheint erforderlich, da sich der %HSD-Anteil bezogen auf den Mittelungspegel und bezogen auf den Maximalpegel in der absoluten Höhe stark unterscheidet.

Die Einführung eines Maximalpegelkriteriums bzw. eines auf Maximalpegel bezogenen physiologischen Wirkungskriteriums wird zusätzlich unter Beibehaltung des Dauerschallpegels empfohlen. Dafür spricht auch, dass je nach betrachteter Phase des Nachtschlafs (beim Ein-, Durch- oder Ausschlafen) mal nur der Maximalpegel oder die Kombination aus Maximalpegel und Zugzahl eine bessere Modellgüte zur Vorhersage des Anteils hoch schlafgestörter Personen aufweist. Da im Dauerschallpegel beide Informationen (Geräuschpegel und Ereigniszahl) enthalten sind, spricht dies für die Beibehaltung des Dauerschallpegels plus einer Ergänzung durch ein Maximalpegel- bzw. darauf basierendes Wirkungskriterium.

Physiologische Wirkungskenngrößen

Ein ungestörter Schlaf ist wichtig für Leistungsfähigkeit, Wohlbefinden und Gesundheit [19]. Lärmbedingte Schlafstörungen unterteilt man üblicherweise in drei Kategorien: Als „primäre Effekte“ werden die unmittelbaren Reaktionen im Schlaf auf ein Geräuscheinzelereignis bezeichnet. Diese unmittelbaren Auswirkungen von Lärm können Aufwachreaktionen und oft damit einhergehende Herzfrequenzbeschleunigungen und Übergänge vom Tiefschlaf in den Leichtschlaf sein. Die „Sekundären Effekte“ beschreiben die daraus resultierenden Folgen am sich daran anschließenden Tag wie z. B. Tagesmüdigkeit, mangelnde Leistungsfähigkeit und Konzentrationsschwäche. In den „tertiären Effekten“ fasst man in der Regel mögliche gesundheitliche Folgen nach langjähriger Lärmexposition, wie z.B. erhöhte Risiken für Bluthochdruck, Herzinfarkt, Übergewicht oder Depression zusammen. Insbesondere der Zusammenhang zwischen primären und tertiären Effekten ist noch völlig ungeklärt, da außer Lärm und den resultierenden Primäreffekten auch eine Vielzahl von Confoundern zu einer Erhöhung dieser Krankheitsrisiken nach langjähriger Lärmexposition führen kann. Sowohl eine über Jahre verlässliche Berechnung des perzipierten Lärms als auch eine annähernd vollständige und genaue Erfassung der Confounder ist derzeit noch nahezu unmöglich, so dass sich die Tertiäreffekte beschreibenden epidemiologischen Studien mit Näherungen begnügen müssen. Diesen Nachteil können sie zum Teil durch Mittelung über sehr hohe Fallzahlen ausgleichen. Studien zur Untersuchung der Akutwirkungen von Lärm in der Nacht sind sehr ge-

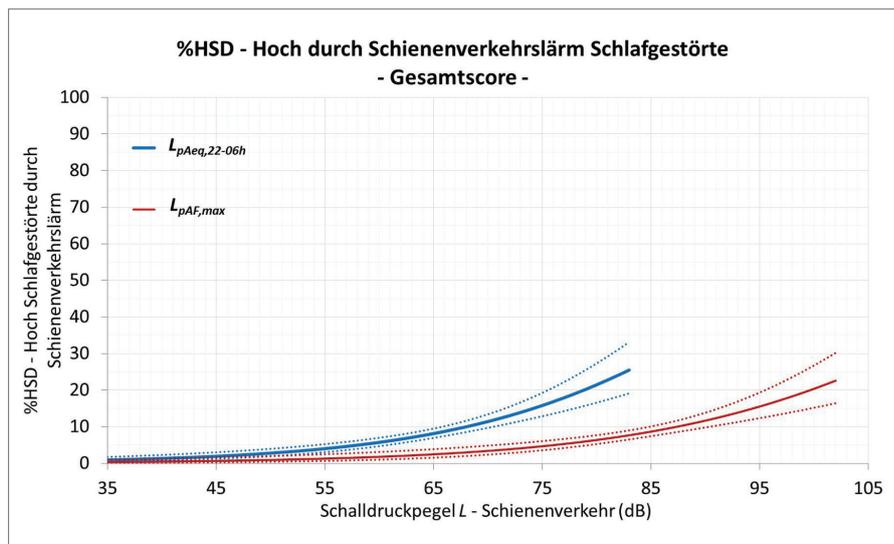


Bild 1 Anteil hoch beim Schlaf insgesamt (unten rechts) gestörter Personen durch Schienenverkehrslärm (%HSD) in Abhängigkeit des nächtlichen Schienenverkehrsgeräuschpegels $L_{pA,eq,22-06h}$ bzw. Maximalpegel $L_{pAF,max}$.

nau bei der Messung des perzipierten Lärms und der zu untersuchenden physiologischen Größen, können in der Regel aufgrund des hohen Studienaufwands und damit einhergehenden -budgets aber in der Regel nur an einer begrenzten Anzahl von Probanden erhoben werden.

Schmidt et al. [20] haben in solch einer Studie zu den Akutwirkungen nächtlichen Fluglärms erstmals einen Nachweis erbracht, welche potenziellen Mechanismen zur Entstehung kardiovaskulärer Erkrankungen nach langjähriger Lärmexposition beitragen können. Deutlich größere Forschungsanstrengungen auf diesem Gebiet sind in Zukunft nötig, um die Auswirkungen langjähriger Lärmexposition auf die Gesundheit zu verstehen.

Die stärkste physiologische Reaktion im menschlichen Schlaf auf Lärm ist die Aufwachreaktion und damit einhergehend eine größere Schlaffragmentierung. Effekte wie Änderungen von Schlafstadiengesamtanteilen in der Nacht sind in der Regel eher weniger stark ausgeprägt [21]. Um ein Schutzkonzept vor nächtlichem Bahnlärm zu entwickeln, muss also u. a. bekannt sein, wie häufig ein Bahnanwohner bei einer vorgegebenen Anzahl an Bahnvorbeifahrten zusätzlich aufwacht.

Eine weltweite Literaturrecherche der Weltgesundheitsorganisation WHO für die Jahre 2000-2014 konnte für den Bahnlärm nur die vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt DLR in den Jahren 2006-2010 im Rahmen der deutsch-französischen Forschungskoooperation DEUFRAKO durchgeführte Feldstudie RAPS (Railway Annoyance Performance Sleep) identifizieren, die ökologisch-valide mittels Polysomnografie gemessene Schlafdaten liefert [22].

Für eine detailliertere Darstellung der in der DEUFRAKO/RAPS-Studie verwandten Methodik und deskriptiven Auswertung der Zugbewegungszahlen und der akustischen Messgrößen sei auf den Endbericht der Studie verwiesen [23].

Zusätzlich zu den dort beschriebenen Auswertungen wurden für das vorliegende Gutachten noch der Einzelereignispegel SEL, der Vorbeifahrtexpositionspegel TEL und die spontane Aufwachwahrscheinlichkeit berechnet. Insbesondere wurden im DEUFRAKO-RAPS-Projekt auch keinerlei Analysen vorgenommen, die den möglichen Beitrag von Pegelfluktuationen (siehe

Bild 2) bei der Vorbeifahrt von Güterzügen auf die Aufwachwahrscheinlichkeit berücksichtigen.

Berechnung der Aufwachwahrscheinlichkeit für ein Einzelereignis einer Güterzugvorbeifahrt

Zur Ermittlung einer Expositions-Wirkungskurve, die eine Beziehung zwischen der Lärmexposition und der Wahrscheinlichkeit, physiologisch zu erwachen, herstellt, ist eine ereigniskorrelierte Auswertung notwendig. „Ereigniskorreliert“ heißt, dass zum Zeitpunkt eines jeden Bahnlärmereignisses statistisch überprüft wird, ob in der beim Auftreten des Lärmereignisses vorliegenden 30s-Schlaf-epoche oder in den kommenden beiden Epochen ein Übergang von dem vor dem Lärmereignis vorliegenden Schlafstadium in das Leichtschlafstadium „S1“ oder in das Stadium „Wach“ stattfindet (im weiteren Text als „Aufwachreaktion“ bezeichnet). Die Berücksichtigung des Übergangs auch in das Leichtschlafstadium „S1“ und nicht nur in das Stadium „Wach“ bei der „Aufwachreaktion“ ist ein für den Anwohner protektiver Ansatz. Für die Berechnung der Aufwachwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von akustischen Größen des Bahnlärmereignisses wird eine logistische Regression mit Zufallseffekten (random effects logistic regression) verwendet [24].

Die Auswahl der Einflussvariablen, die in das Regressionsmodell eingehen, erfolgt schrittweise [25]. Die Entscheidung, ob eine Variable in das Modell aufgenommen oder entfernt wird, geschieht dabei anhand des AICs (Akaike Informationkriterium).

Eine Vielzahl akustischer, persönlicher und situativer Variablen kann einen potenziellen Einfluss auf die Aufwachwahrscheinlichkeit haben. Für die Berechnung der Expositions-Wirkungsbeziehungen wurde der Einfluss folgender Variablen auf die Güte der Modellierung der Aufwachwahrscheinlichkeit hin überprüft:

Akustische Parameter (jeweils bestimmt für den Innenpegel, am Ohr des Schlafenden):

- $L_{pAF,max}$ des Bahnlärmereignisses (in dB)
- Einzelereignispegel SEL des Bahnlärmereignisses (in dB)
- Vorbeifahrtexpositionspegel TEL des Bahnlärmereignisses (in dB)
- Geräuschkdauer des Bahnlärmereignisses (in s)
- Beurteilungsdauer des Bahnlärmereignisses (in s)
- Pegelanstiegssteilheit des Bahnlärmereignisses (in dB/s)
- $L_{pAF,eq\ 1}$ min vor Beginn des Bahnlärmereignisses (in dB, „Hintergrundpegel“)
- Emergenz ($L_{pAF,max}$ minus Hintergrundpegel) des Bahnlärmereignisses (in dB)
- vorherige Anzahl an Bahnlärmereignissen vor Beginn des betrachteten Bahnlärmereignisses
- Fluktuationsmaß Median des Bahnlärmereignisses (in dB/s²)
- Fluktuationsmaß Mittel des Bahnlärmereignisses (in dB/s²)
- $L_{pAF,ShortLeq_01}$ minus $L_{pAF,ShortLeq_10}$ (in dB)
- $L_{pAF,ShortLeq_01}$ minus $L_{pAF,ShortLeq_20}$ (in dB)
- $L_{pAF,ShortLeq_01}$ minus $L_{pAF,ShortLeq_30}$ (in dB)

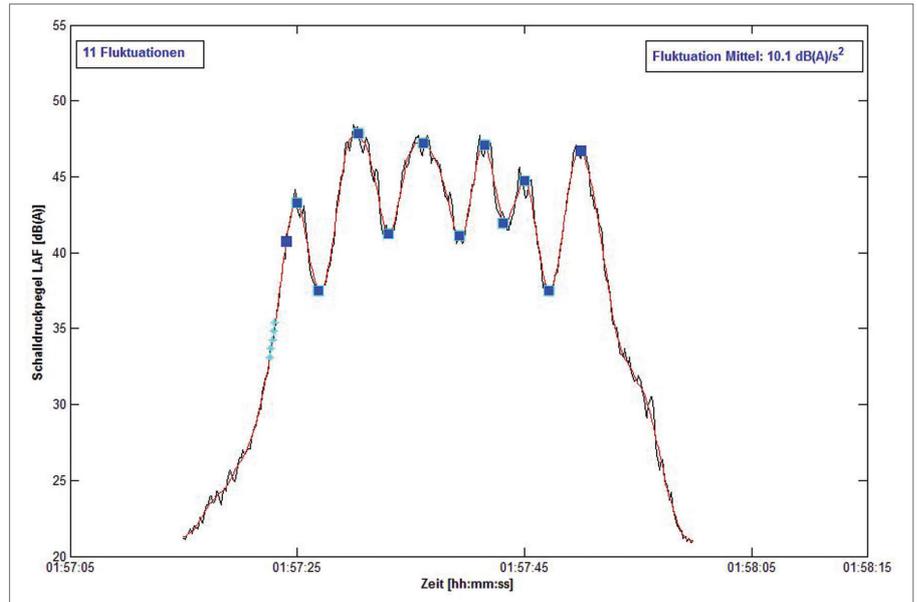


Bild 2 Schalldruckpegelverlauf L_{pAF} (schwarz) eines Güterzuges, innen am Ohr des Schlafenden, gemessen bei geschlossenem Fenster, Abstand Hauswand – erstes Gleis: 6 m, Signalglat- tung (rot), Fluktuationsmaxima und -minima (Punkte blau), Pegelanstiegssteilheit (cyan).

Schlafparameter:

- bisher verstrichene Schlafdauer (in min)
- Schlafstadium unmittelbar vor Auftreten des Bahnlärmgeräusches
- bisheriges Verweilen im Schlafstadium unmittelbar vor Auftreten des Bahnlärmgeräusches (in s)

Personenbezogene Parameter:

- Geschlecht
- Alter

In die Analysen zur Berechnung der Aufwachwahrscheinlichkeit für ein Güterzuglärmereignis gingen insgesamt 5.428 ungestörte Güterzugereignisse aus 252 Nächten von 33 Probanden ein. Unter Berücksichtigung der besten praxisoptimierten Anpassung für eine Güterzugvorbeifahrt GZ und der Berechnung der spontanen Aufwachwahrscheinlichkeit ergibt sich folgende Gleichung zur Berechnung der Aufwachwahrscheinlichkeit für eine Güterzugvorbeifahrt:

$$A_{GZ} = 0.02612 \cdot L_{pAF,max} - 0.0045479 \cdot \text{Geräuschkdauer} + 0.000675 \cdot \text{Zeit nach Einschlafen} - 0.0119262 \cdot \text{Zeit in akt. Schlafst.} + 0.1103385 \cdot L_{pAF,ShortLeq_01_minus_L_{pAF,ShortLeq_10}} - 3.5256369$$

In **Tabelle 2** folgend die Summanden mit den dazugehörigen Einheiten und der Faktoren, für die eine Expositions-Wirkungs-

Tabelle 2 Einheiten und Faktoren der Summanden zur Berechnung der Aufwachwahrscheinlichkeit bei Vorbeifahrt eines Güterzuges.

Summand	Einheit	Faktor
$L_{pAF,max}$	dB	–
Geräuschkdauer	s	67 s (Median)
Zeit nach Einschlafen	min	300 min (Vorgabe)
Zeit in akt. Schlafstadium	min	6.5 min (Median)
$L_{pAF,ShortLeq_01_minus_L_{pAF,ShortLeq_10}}$	dB	0.9 dB (Median)

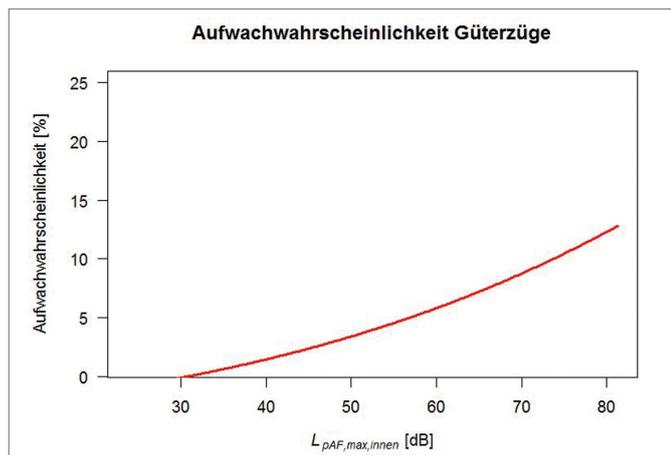


Bild 3 Expositions-Wirkungskurve zwischen dem maximalen Schalldruckpegel $L_{pAF,max}$ eines Güterzuggeräusches und der Aufwachwahrscheinlichkeit beruhend auf dem Modell in Tabelle 2.

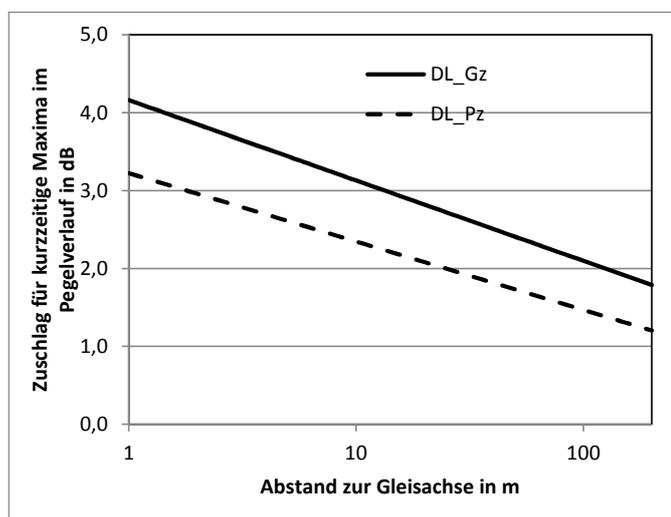


Bild 4 Grafische Darstellung des Zusammenhangs zwischen Zuschlag zur Berücksichtigung von Einzelereignissen und Abstand.

kurve gerechnet wird. Die Faktoren werden entweder vorgegeben oder durch den Median sämtlicher im Modell berücksichtigter Güterzugereignisse bestimmt. Die Aufwachwahrscheinlichkeit wird dann folgendermaßen berechnet:

$$AWW_{GZ} = \frac{e^{AGüterzug}}{1 + e^{AGüterzug}} \cdot 100 - AWW_{spontan}$$

mit $AWW_{spontan}$ – spontane Aufwachwahrscheinlichkeit = 5,7 % (**Bild 3**).

Das Modell gilt in den gemessenen Grenzen für einen $L_{pAF,max}$ von 23,7 bis 81,3 dB, innen am Ohr des Schlafenden. Die Modellanpassung für Personenzüge erfolgte nach der gleichen Vorgehensweise und ist im Gutachten [7] dokumentiert.

Die Pegelfluktuationen treten in der Regel nur bei Güterzügen auf, sind umso größer, je unterschiedlich laut direkt aufeinander folgende Wagen sind und nehmen in der Regel mit dem Abstand der Gleise zum Bett des Probanden ab. Für das Gutachten wurden verschiedene Fluktuationsmaße getestet, wobei sich die Be-

rechnung der Differenz des $L_{pF-ShortLeq}$ für das Überschreitungsmaß 01 und 10 als am besten erwies.

Berechnungsverfahren zur Ermittlung des Maximalpegels von Schienenverkehrslärm

Um die Erkenntnisse aus den psychologischen und physiologischen Untersuchungen in Richtlinien und Verordnungen umzusetzen, ist ein Verfahren zur rechnerischen Ermittlung der akustischen Belastung der Betroffenen erforderlich. Als Kennzeichnungsgröße für die ereignisbezogene Wirkung von Zugvorbeifahrten können unterschiedliche Maximalpegeldefinitionen zugrunde gelegt werden, die sich anhand des Detaillierungsgrades der Prognose und der Prognostizierfähigkeit unterscheiden.

Die Berechnung des Maximalpegels für Schienenverkehrslärm ist in Deutschland derzeit nicht geregelt; daher wurde aus dem in Verordnungen gebräuchlichen Rechenverfahren nach Anlage 2 der Verkehrslärmschutzverordnung (Schall03) [26] eine Berechnungsmethode für den Maximalpegel abgeleitet, indem nach der Methode von NORD 2000 [27] eine begrenzte linienförmige Schallquelle (entsprechend der Zuglänge) entlang der Trasse wandert. Dabei wird die Linienschallquelle iterativ entlang der Trasse bewegt und bei jedem Iterationsschritt, der einem Zeitschritt entspricht, eine Ausbreitungsrechnung zum jeweiligen Immissionspunkt durchgeführt. Die Ausbreitungsrechnung folgt dabei den Regeln nach Kapitel 3 und 6 der Schall 03. Aus diesen Teilquellen wird am Immissionsort für jeden Iterationsschritt der Immissionspegel errechnet. Dadurch ergibt sich eine zeitliche Folge von Immissionspegeln an dem jeweiligen Punkt vergleichbar mit einem Pegel-Zeit-Verlauf, wie er auch messtechnisch ermittelt werden würde. Das Berechnungsverfahren kann in das vorhandene Verfahren der Schall 03 integriert werden.

Die Berechnungswerte berücksichtigen nicht, dass einzelne Fahrzeuge im Zugverband unterschiedliche Emissionen haben können. Hinzu kommen Geräuschanteile, die nicht explizit in der Richtlinie abgebildet werden, wie schadhafte Radsätze (Flachstellen, Polygone) oder besonders laute Aufbauten von Güterwagen. Um diese zeitlich kurzen Pegelmaxima in der Prognose abbilden zu können, werden in Anlehnung an Nord 2000 neben dem von der gleichförmig abstrahlenden Linienquelle ermittelten Maximalpegel einzelne kurzzeitige Ereignisse durch einen abstandsabhängigen Pegelzuschlag berücksichtigt. Grundlage sind die Messdaten aus der DLR-Studie [3]. In grafischer Form sind die Zusammenhänge in **Bild 4** dargestellt:

Vorschlag wirkungsbezogener Kenngrößen des Maximalpegels von Schienenverkehrslärm

Die Re-Analysen der NORAH-Studie haben gezeigt, dass sich ein deutlicher Unterschied im prozentualen Anteil der im Schlaf hoch gestörten Personen ergibt, je nachdem ob man den Maximalpegel oder den Mittelungspegel als Beurteilungsgröße heranzieht. Mit der in Bild 1 dargestellten Pegel – Reaktions-Beziehung für die Schlafgestörtheit ergeben sich bei einem Immissionsgrenzwert von 49 dB(A) nach 16. BImSchV etwa 2,6% hoch Schlafgestörte. Die gleiche Anzahl von hoch Schlafgestörten ergibt sich bei einem Maximalpegel außen von etwa 66 dB, wie folgendes **Bild 5** veranschaulicht.

In Situationen mit Differenzen zwischen Maximalpegel und Mittelungspegel von mehr als 17 dB ergeben sich somit höhere prozentuale Anteile von Schlafgestörten bezogen auf den Maximalpegel als bezogen auf den Mittelungspegel. Um einen höhe-

ren prozentualen Anteil Schlafgestörter bezogen auf den Maximalpegel gegenüber dem Mittelungspegel zu vermeiden, müsste sichergestellt werden, dass der Maximalpegel den Mittelungspegel nicht um mehr als 17 dB überschreitet. Dieser Wert liegt unter dem in der TA Lärm [28] ausgewiesenen Maximalpegelkriterium von 20 dB und über dem in der DIN 4109-4 [29] ausgewiesenen Maximalpegelkriterium von 15 dB.

Aus den physiologischen Auswertungen wurde als weitere Kenngröße die zusätzlichen schienenverkehrslärmbedingten Aufwachreaktionen (AWR) entwickelt. Um in einer gegebenen Situation an einer Strecke die Anzahl der zu erwartenden zusätzlichen Aufwachreaktionen durch Zuggeräusche zu ermitteln, müssen die im folgenden Flussdiagramm dargestellten Arbeitsschritte durchlaufen werden (**Bild 6**).

Ein Grenzwert oder ein Verfahren zur Berücksichtigung von Aufwachreaktionen für den Schienenverkehrslärm gibt es derzeit – auch international – nicht. Als möglicher Grenzwert für eine zumutbare Anzahl von schienenlärmbedingten Aufwachreaktionen werden an dieser Stelle zunächst 3 AWR angenommen.

Die Auswirkungen dieser beiden zusätzlichen Beurteilungskriterien bei einer möglichen Einführung in der 16. BImSchV wurden anhand von zwei stark unterschiedlichen Fallbeispielen aufgezeigt (siehe **Tabelle 3**). Dabei wurde eine Situation mit geringer Verkehrsmengenbelastung mit ca. 20 Vorbeifahrten in der Nacht, davon sechs Güterzüge, und eine Situation mit hoher Verkehrsmengenbelastung mit ca. 100 Vorbeifahrten, davon ca. 70 Güterzüge, ausgewählt. Die Berechnungen erfolgten für Immissionsorte im Nahbereich der Strecken im Abstand von ca. 50 m zur Gleisachse.

Es kann abgeleitet werden, dass in Fällen mit geringen Vorbeifahrthäufigkeiten und hohen Maximalpegeln auch bei Aufwachreaktionen weit unter $AWR = 3$, die Differenz zwischen Mittelungspegel und Maximalpegel weit über 17 dB liegt. Dagegen wird bei hoher Vorbeifahrthäufigkeit der AWR von 3 überschritten, während die Differenz zwischen Mittelungspegel und Maximalpegel mit 19 dB geringer ausfällt.

Die Einführung der o. a. Maximalpegelkriterien haben eine Erweiterung des aktiven Schallschutzes insbesondere bei Bebauung im Nahbereich von Schienenwegen zur Folge. Bei derzeitigen Planungsverfahren hat sich gezeigt, dass betroffene Anwohner und Kommunen die Höhe aktiver Schallschutzmaßnahmen aus ortplanerischen Gründen zunehmend kri-

tisch einschätzen. Daher wird es zukünftig erforderlich sein, vor allem innovative Schallschutzmaßnahmen am Gleis oder an Fahrzeugen umzusetzen. Die besondere Berücksichtigung des Maximalpegels wird zur Folge haben, dass zusätzlich auch die Verbesserung des Schallschutzes von Außenbauteilen erforderlich wird. Daher sollten die dafür maßgeblichen Vorschrif-

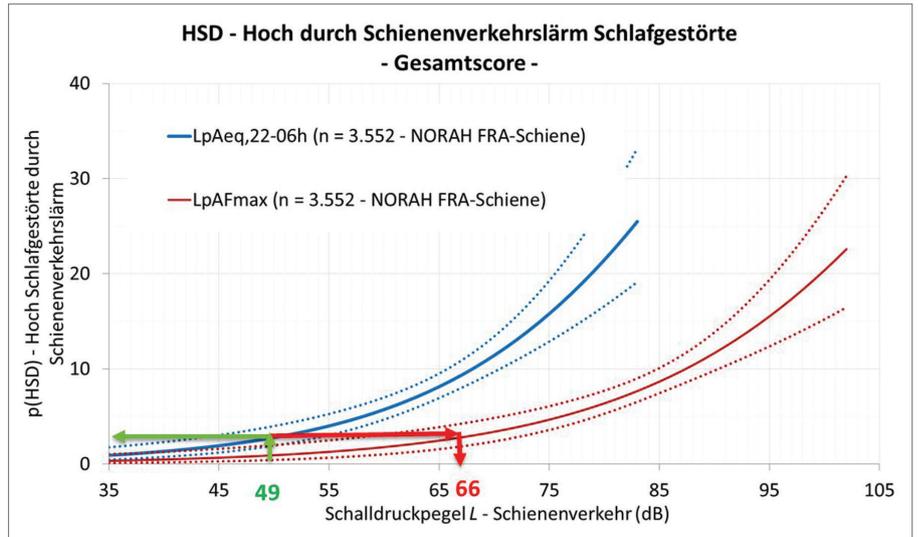


Bild 5 Ableitung eines Maximalpegelkriteriums aus den Befragungsergebnissen der NORAH-Studie.

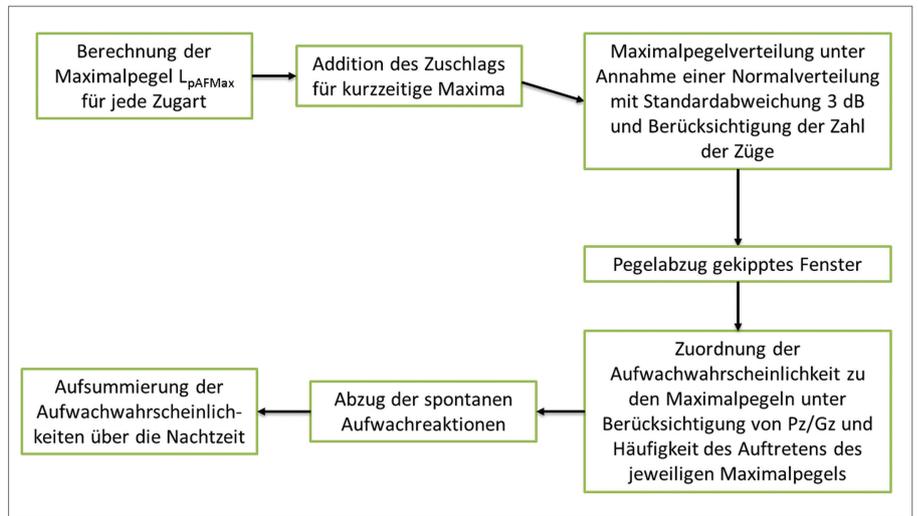


Bild 6 Vorgehensweise zur Ermittlung von zusätzlichen Aufwachreaktionen durch Zuggeräusche.

Tabelle 3 Auswirkungen zusätzlicher Beurteilungskriterien anhand von Fallbeispielen.

Fallbeispiel 1: geringe Verkehrsmengenbelastung					
	$L_{r,N}$	L_{AFmax}	$L_{AFmax}-L_{r,N}$	DHSD %	AWR
ohne Wand	60	87	27	4	1,2
mit Wand	48	74	26	1,9	0,8
Fallbeispiel 2: hohe Verkehrsmengenbelastung					
ohne Wand	60	79	19	0,2	5,7
mit Wand	49	68	19	0,4	3,8

ten 24. BImSchV [30], DIN 4109 [29] und VDI 2719 [31] mit dem Berechnungsverfahren des Maximalpegels bzw. mit Hinweisen darauf ergänzt werden.

Zusammenfassend lässt sich aus vorliegendem Gutachten ableiten, dass mit der derzeitigen Beurteilungssystematik nur auf der Grundlage von Mittelungspegeln ein ausreichender Schutz des Nachtschlafes von Bahnanrainern nicht gewährleistet ist. Insbesondere für Anwohner im Nahbereich von Bahnstrecken ist die Berücksichtigung sowohl der Höhe der Maximalpegel als auch der Häufigkeit der Bahnlärmereignisse für eine angemessene Beurteilung des nächtlichen Schienenverkehrslärms erforderlich. Zu diesem Zweck wurde in diesem Gutachten ein Verfahren entwickelt, das auf der Grundlage der bestehenden Rechenvorschrift Schall 03 eine Berechnung des Maximalpegels ermöglicht. Zur Beurteilung der Wirkung nächtlichen Bahn lärms werden Ergänzungen der maßgeblichen Verordnungen vorgeschlagen, die sowohl die Höhe des Maximalpegels als auch die Anzahl der Aufwachreaktionen bei Nacht berücksichtigen.

Danksagung

Dieses Projekt wurde vom Hessischen Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, Wiesbaden, gefördert.

Ulrich Möhler, Manfred Liepert, Viktor Skowronek

Möhler+ Partner Ingenieure AG, München.

Dirk Schreckenber, Christin Belke, Sarah Benz

ZEUS GmbH, Zentrum für angewandte Psychologie, Umwelt- und Sozialforschung, Hagen.

Dr. Uwe Müller

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V., Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin, Abteilung Schlaf und Humanfaktoren, Köln.

Literaturverzeichnis

- [1] Müller, U., Aeschbach, D., Elmenhorst, E.-M., Mendolia, F., Quehl, J., Hoff, A., Rieger, I., Schmitt, S., Little, W.: Fluglärm und nächtlicher Schlaf. Die NORAH-Studie: Verkehrslärmwirkungen im Flughafenumfeld – Endbericht Band 4, 2015. S. 1-191. http://www.laermstudie.de/fileadmin/files/Laermstudie/Schlafstudie_Wiss_Ergebnisbericht.pdf
- [2] Elmenhorst, E.M., Pennig, S., Rolny, V., Quehl, J., Mueller, U., Maaß, H., Basner, M.: Examining nocturnal railway noise and aircraft noise in the field: Sleep, psychomotor performance, and annoyance. (2012)
- [3] Müller, U.; Elmenhorst, E.-M.; Maass, H.; Rolny, V.; Pennig, S.; Quehl, J.; Basner, M.: Verbundprojekt: DEUFRAKO/RAPS – Railway noise (and other modes) annoyance, performance, sleep: wirkungsorientierte Bewertung unterschiedlicher Verkehrslärmarten; Teilvorhaben Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. in der Helmholtz-Gemeinschaft (DLR): Metaanalyse und Feldstudie. Abschlussbericht 2010. www.edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fb10/639593747.pdf.
- [4] Schreckenber, D., Faulbaum, F., Guski, R., Ninke, L., Peschel, C., Spilski, J.; Wothge, J.: Wirkungen von Verkehrslärm auf die Belästigung und Lebensqualität. NORAH (Noise related annoyance cognition and health): Verkehrslärmwirkungen im Flughafenumfeld (Bd. 3). Hrsg.: Gemeinnützige Umwelthaus gGmbH. Kelssterbach 2015. www.norah-studie.de.
- [5] Möhler, U., Liepert, M., Mühlbacher, M., Beronius, A., Nunberger, M., Braunstein, G., Gillé, M., Schaal, J., Bartel, R.: Erfassung der Verkehrsgeräuschexposition. NORAH (Noise related annoyance cognition and health): Verkehrslärmwirkungen im Flughafenumfeld (Bd. 2) Hrsg.: Gemeinnützige Umwelthaus gGmbH. Kelsterbach 2015. www.norah-studie.de.
- [6] Seidler, A., Wagner, M., Schubert, M., Dröge, P., Römer, K., Pons-Kühnemann, J., Swart, E., Zeeb, H., Hegewald, J. (2016). Aircraft, road and railway traffic noise as risk factors for heart failure and hypertensive heart disease – A case-control study based on secondary data. *International Journal of Hygiene and Environmental Health* 219 (2016) 749-758.
- [7] Möhler, U.; Schreckenber, D.; Müller, U.; Liepert, M.; Skowronek, V.; Belke, C.; Benz, S.: Gutachten zur Berücksichtigung eines Maximalpegelkriteriums bei der Beurteilung von Schienenverkehrslärm in der Nacht, www.umwelt.hessen.de/umwelt-natur/luft-laerm-licht/laerm-schutz/eisenbahnverkehrslaerm
- [8] Banks, S.; Dinges, D. F.: Behavioral and physiological consequences of sleep restriction. *J. Clin. Sleep Med.* 3(5) (2007) S. 519-528.
- [9] Guski, R., Basner, M. & Brink, M.: Gesundheitliche Auswirkungen nächtlichen Fluglärms: aktueller Wissensstand (Literaturauswertung). Schlussbericht im Auftrag des Ministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen. Fakultät für Psychologie der Ruhr-Universität. Bochum 2012.
- [10] Buysse, D.J.: Sleep health: can we define it? Does it matter? *Sleep* 37(1) (2014) S. 9-17.
- [11] Watson, N.F.; Badr, M.S.; Belenky, G.; Bliwise, D.L.; Buxton, O.M.; Buysse, D.; Dinges, D.F.; Gangwisch, J.; Grandner, M.A.; Kushida, C.; Malhotra, R.K.; Martin, J.L.; Patel, S.R.; Quan, S.F.; Tasali, E.: Joint consensus statement of the American Academy of Sleep Medicine and Sleep Research Society on the recommended amount of sleep for a healthy adult: methodology and discussion. *Sleep* 38(8) (2015) S. 1161-1183.
- [12] Porter, N.D.; Kershaw, A.D.; Ollerhead, J.B.: Adverse effects of night-time aircraft noise. R&D report 9964. Hrsg.: Civil Aviation Authority. London (UK) 2000.
- [13] McGuire, S.; Basner, M.: WHO Environmental Noise Guidelines for the European Region: A systematic review on environmental noise and effects on sleep. Proceedings of the 12th ICBCN Congress on Noise as a Public Health Problem, June 18-22, Zurich, Switzerland 2017. ID 3943. www.icbcn.org
- [14] Richtlinie 2002/49/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 25. Juni 2002 über die Bewertung und Bekämpfung von Umgebungslärm. ABl. EG (2002) Nr. L 189/12.
- [15] VDI 3722-2: Wirkung von Verkehrsgeräuschen – Blatt 2: Kenngrößen beim Einwirken mehrerer Quellenarten. Berlin: Beuth Verlag 2013.

- [16] Schreckenber, D.; Faulbaum, F.; Guski, R.; Ninke, L.; Pelschel, C.; Spilski, J.; Wothge, J.: Wirkungen von Verkehrslärm auf die Belastigung und Lebensqualität. Noise related annoyance cognition and health (NORAH): Verkehrslärmwirkungen im Flughafenfeld (Bd. 3). Hrsg.: Gemeinnützige Umwelthaus gGmbH. Kelsterbach 2015. www.norah-studie.de.
- [17] Fields, J.M.; DeJong, R.G.; Gjestland, T.; Flindell, I.H.; Job, R.F.S.; Kurra, S.; Lercher, P.; Vallet, M. Guski, R., Felscher-Suhr, U.; Schuemer, R.: Standardized general-purpose noise reaction questions for community noise surveys: Research and a recommendation. *Journal of Sound and Vibration*, 242(4) (2001). S. 641-679.
- [18] Pinheiro, J.; Bates, D.: *Mixed-Effects Models in S and S-Plus*. Hrsg.: Springer-Verlag Heidelberg 2009.
- [19] Watson, N.F.; Badr, M.S.; Belenky, G.; Bliwise, D.L.; Buxton, O.M.; Buysse, D.; Dinges, D.F.; Gangwisch, J.; Grandner, M.A.; Kushida, C.; Malhotra, R.K.; Martin, J.L.; Patel, S.R.; Quan, S.F. & Tasali, E.: Joint consensus statement of the American Academy of Sleep Medicine and Sleep Research Society on the recommended amount of sleep for a healthy adult: methodology and discussion. *Sleep* 38(8)(2015). S. 1161-1183.
- [20] Schmidt, F.; Kollé, K.; Krüder, K.; Schnorbus, B.; Wild, P.; Hechtner, M.: Nighttime aircraft noise impairs endothelial function and increases blood pressure in patients with or at high risk for coronary artery disease. *Clinical Research Cardiology* 104 (2015). S. 23-30.
- [21] Basner, M.; Samel, A.: Effects of nocturnal aircraft noise on sleep structure. *Somnologie*, 9(2)(2005). S. 84-95.
- [22] Basner, M.; McGuire, S.: Update of WHO's Community Noise Guidelines: Evidence review on the effects of noise on sleep. *Proceedings of Inter-Noise (Hamburg 2016)*. S. 7723-7725. www.pub.dega-akustik.de/IN2016/data/articles/000860.pdf.
- [23] Müller, U.; Elmenhorst, E.-M.; Maass, H.; Rolny, V.; Pennig, S.; Quehl, J.; Basner, M.: Verbundprojekt: DEUFRAKO/RAPS – Railway noise (and other modes) annoyance, performance, sleep: wirkungsorientierte Bewertung unterschiedlicher Verkehrslärmarten; Teilvorhaben: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. in der Helmholtz-Gemeinschaft (DLR) Metaanalyse und Feldstudie. Abschlussbericht 2010. www.edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fb10/639593747.pdf.
- [24] Diggle, P. J.; Heagerty, P.; Liang, K. Y.; Zeger, S. L.: *Analysis of Longitudinal Data*. Oxford University Press. Oxford 2002.
- [25] Hosmer, D. H.; Lemeshow, S.: *Applied Logistic Regression*. (2nd ed.) Wiley Verlag, New York 2000.
- [26] Verkehrslärmschutzverordnung vom 12. Juni 1990 (BGBl. I S. 1036) geändert durch Art. 1, Dezember 2014
- [27] Jonasson, H. G.; Storeheier, S.: Nord 2000. New Nordic Prediction Method for Rail Traffic Noise (2001)
- [28] Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm – TA Lärm). Vom 26. August 1998 (GMBI Nr. 26/1998 S. 503). Fundstelle: GMBI 1998 Nr. 26, S. 503. Geändert VwV Juni 2017
- [29] DIN EN 4109:2016-07: Schallschutz im Hochbau Berlin: Beuth Verlag 2016.
- [30] Verkehrswege-Schallschutzmaßnahmenverordnung – 24. BImSchV). 24. BImSchV. Ausfertigungsdatum: 04.02.1997. Vollzitat: „Verkehrswege-Schallschutzmaßnahmenverordnung vom 4. Februar 1997 (BGBl. I S. 172, 1253)
- [31] VDI 2719: Schalldämmung von Fenstern und deren Zusatzeinrichtungen. Berlin: Beuth Verlag 198.