

**Gutachten zur Berücksichtigung eines  
Maximalpegelkriteriums bei der Beurteilung von  
Schienenverkehrslärm in der Nacht**

im Auftrag des

**Hessischen Ministeriums für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft  
und Verbraucherschutz**

Mainzer Straße 80  
65189 Wiesbaden

vorgelegt von

**Möhler + Partner Ingenieure AG  
Beratung in Schallschutz + Bauphysik**

Landaubogen 10  
81373 München

**ZEUS GmbH  
Zentrum für angewandte Psychologie,  
Umwelt- und Sozialforschung**

Sennbrink 46  
58093 Hagen

**Deutsches Zentrum für Luft- u. Raumfahrt e.V.**

Linder Höhe  
51147 Köln

**MÖHLER+PARTNER**  
 **INGENIEURE AG**

**Z E U S**

GmbH



Oktober 2017

**Autoren:**

Dipl.-Ing. Ulrich Möhler

Dipl.-Ing. Manfred Liepert

Dipl.-Phys. Viktor Skowronek

Möhler + Partner Ingenieure AG, 81373 München

Dipl.-Psych. Dirk Schreckenber

Dipl.-Wirtschaftspsych. Christin Belke

Sarah Benz, B.Sc. Psychologie

ZEUS GmbH, Zentrum für angewandte Psychologie,

Umwelt- und Sozialforschung, 58093 Hagen

Dr. rer. nat. Uwe Müller

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.

Institut für Luft- und Raumfahrtmedizin

Abteilung Schlaf und Humanfaktoren

51147 Köln

**Auftraggeber:**

Hessisches Ministerium für Umwelt, Klimaschutz,

Landwirtschaft und Verbraucherschutz

Mainzer Straße 80

65189 Wiesbaden

## Inhaltsverzeichnis:

0	Kurzfassung.....	10
1	Einleitung .....	16
1.1	Aufgabenstellung.....	16
1.2	Beurteilung von Schienenverkehrslärm: Mittelungs- versus Maximalpegel.....	16
1.3	Definition von Schlaf.....	20
2	Wirkungskriterien zum nächtlichen Schlaf.....	23
2.1	Ausgangssituation.....	23
2.2	Analysen zu psychologischen Wirkungen nächtlichen Bahn lärms.....	28
2.2.1	Auswahl der psychologischen Wirkungskenngrö ße .....	28
2.2.2	Datengrundlage: NORAH-Studie zur Belästigung & Lebensqualität .....	32
2.2.3	Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse der NORAH-Daten.....	35
2.3	Epidemiologische Wirkungskenngrößen .....	38
2.4	Analysen zu physiologischen Wirkungen nächtlichen Bahn lärms.....	44
2.4.1	Ausgangssituation.....	44
2.4.2	Methodik der DEUFRAKO-RAPS Feldstudie.....	46
2.4.3	Zusätzliche im Rahmen dieses Gutachtens vorgenommene Analysen der DEUFRAKO-RAPS Feldstudien daten.....	47
2.4.4	Berechnung der Aufwachwahrscheinlichkeit für ein Einzelereignis einer Güter- und Personenzugvorbeifahrt .....	51
2.4.5	Modellanpassung Personenzug.....	55
2.4.6	Ermittlung der spontanen Aufwachwahrscheinlichkeit.....	56
2.4.7	Gleichungen zur Berechnung der Aufwachwahrscheinlichkeit für ein Einzelereignis einer Güter- und Personenzugvorbeifahrt.....	59
3	Entwicklung von Kenngrößen zur Berechnung des Maximalpegels von Schienenverkehrslärm 62	
3.1	Aufgabenstellung.....	62
3.2	Kennzeichnung des Maximalpegels von Schienenverkehr.....	62
3.2.1	Grundlegende Grö ßen zur Beschreibung von Zugvorbeifahrten durch Schallmessungen.....	62
3.2.2	Weitere Kenngrößen zur akustischen Beschreibung von Vorbeifahrten.....	67
3.2.3	Abstandsbedingte Pegelminderung von Punkt- und Linienschallquellen .....	72
3.2.4	Vorschlag für einen Kennwert des Maximalpegels in der Prognose .....	73
3.2.5	Innen- vs. Außenpegel.....	76
3.3	Ableitung einer rechnerischen Prognose des Maximalpegels aus Schall 03.....	76
3.3.1	Modellierung der Schallquelle als unbegrenzte linienförmige Abstrahlung.....	76
3.3.2	Modell einer wandernden, begrenzten Linienquelle.....	79

3.4	Besondere Effekte des Maximalpegels im Nahbereich .....	81
4	Ermittlung von wirkungsbezogenen Kenngrößen des Maximalpegels .....	85
4.1	Vorbemerkung .....	85
4.2	Ermittlung der Anzahl der schlafgestörten Personen.....	85
4.3	Ermittlung der Anzahl der bahnlärmbedingten zusätzlichen Aufwachreaktionen .....	85
5	Fallbeispiele an einer hoch und gering belasteten Bahnstrecke.....	91
6	Möglichkeiten für die Berücksichtigung eines Maximalkriteriums .....	96
6.1	Maximalpegelkriterium in bestehenden Verordnungen und Richtlinien .....	96
6.2	Maximalpegelkriterium ableitbar aus dem Kriterium "%HSD – Prozentanteil hoch schlafgestörter Personen" .....	97
6.3	Maximalpegelkriterium ableitbar aus dem Kriterium "physiologische Aufwachreaktionen" ...	100
6.4	Vergleichende Betrachtung der Maximalpegelkriterien.....	103
6.5	Diskussion .....	104
7	Verzeichnisse .....	105
	Literaturverzeichnis: .....	110

## Tabellenverzeichnis:

Tabelle 1-1:	Europäische und nationale Grenzwerte zum Schienenverkehrslärm. Auszug UIC-Bericht "Exploring bearable noise limits and emission ceilings for the railways" (Verheijen et al., 2011, p. Table 4, p. 27-28) .....	17
Tabelle 1-2:	Korrelation zwischen Fluglärmelast, selbstberichteten fluglärmbedingten Schlafstörungen und akustischen Kenngrößen zur Luftverkehrsgeräuschbelastung tags und nachts aus der NORAH-Studie (Schreckenberget al., 2015) .....	19
Tabelle 2-1:	Fragen zur Erfassung berichteter Schlafstörungen durch Schienenverkehrslärm in der NORAH-Studie .....	33
Tabelle 2-2:	Produkt-Moment-Korrelationen von HA und HSD mit $L_{pA,eq}$ , $L_{pAF,Max}$ und Zugzahlen im 250 m Radius .....	35
Tabelle 2-3:	Produkt-Moment-Korrelationen der eingesetzten akustischen Maße .....	36
Tabelle 2-4:	Modellpassung .....	37
Tabelle 2-5:	Risikoschätzer (Odds Ratio) zur Gesamtmortalität von Männern und Frauen in Bremen durch Schienenverkehrsgeräuschexposition ( $L_{pA,eq}$ ) am Tag und in der Nacht aus der Bremer Studie zu Umgebungslärm und Gesundheit (Greiser & Greiser, 2015) .....	40
Tabelle 2-6:	Zusammenfassung von Wirkungen nächtlichen Lärms für die ausreichende bzw. begrenzte Evidenz besteht. Quelle: WHO-NNGL (2009) .....	42
Tabelle 2-7:	Modell mit der besten Anpassung des Akaike Information Criterion (AIC) der Expositions-Wirkungsbeziehung zwischen einem Güterzuglärmereignis und der Aufwachwahrscheinlichkeit .....	53
Tabelle 2-8:	Modell mit der besten praxisoptimierten Anpassung des Akaike Information Criterion (AIC) der Expositions-Wirkungsbeziehung zwischen einem Güterzuglärmereignis und der Aufwachwahrscheinlichkeit .....	54
Tabelle 2-9:	Modell mit der besten Anpassung des Akaike Information Criterion (AIC) der Expositions-Wirkungsbeziehung zwischen einem Personenzuglärmereignis und der Aufwachwahrscheinlichkeit .....	55
Tabelle 2-10:	Modell mit der besten praxisoptimierten Anpassung des Akaike Information Criterion (AIC) der Expositions-Wirkungsbeziehung zwischen einem Personenzuglärmereignis und der Aufwachwahrscheinlichkeit .....	56
Tabelle 2-11:	Einheiten und Faktoren der Summanden zur Berechnung der Aufwachwahrscheinlichkeit bei Vorbeifahrt eines Güterzuges .....	59
Tabelle 2-12:	Einheiten und Faktoren der Summanden zur Berechnung der Aufwachwahrscheinlichkeit bei Vorbeifahrt eines Personenzuges. Die Faktoren werden entweder vorgegeben oder durch den Median sämtlicher im Modell berücksichtigter Personenzugereignisse bestimmt.	61
Tabelle 3-1:	Mittelungspegel und Maximalpegel in 25 m Abstand für ausgewählte Züge nach Tabelle 4 der Schall 03(2014) .....	79

Tabelle 3-2:	Ergebnisse der Regressionsberechnungen für abstandsabhängige Zuschläge zur Berücksichtigung von Einzelereignissen .....	83
Tabelle 5-1:	Verkehrsmengenbelastung der Fallbeispiele im Zeitraum Nacht (22:00 Uhr bis 06:00 Uhr), Anzahl Zugvorbeifahrten / 8 h .....	92
Tabelle 5-2:	Zusammenfassung der Rechenergebnisse an Einzelpunkten der Fallbeispiele 1 und 2 ...	94
Tabelle 6-1:	Immissionsgrenzwerte für Mittelungspegel und Maximalpegel Außen und Innen in dB(A) für den Nachtzeitraum 22:00 Uhr bis 06:00 Uhr bei Einführung eines Maximalpegelkriteriums von 15 dB .....	99

## Abbildungsverzeichnis:

Abbildung 0-1: Anteil hoch beim Schlaf insgesamt gestörter Personen durch Schienenverkehrslärm (%HSD) in Abhängigkeit des nächtlichen Schienenverkehrsgeräuschpegels $L_{pA,eq,22-06h}$ bzw. Maximalpegel $L_{pAF,max}$ .....	11
Abbildung 0-2: Vergleich der Expositions-Wirkungskurve zwischen dem maximalen Schalldruckpegel $L_{pAF,max}$ eines Güterzug- (rot) und eines Personenzuggeräusches (blau) und der Aufwachwahrscheinlichkeit innen am Ohr des Schlafenden .....	13
Abbildung 1-1: Unterschiedlicher Schalldruckpegelverlauf von Zugvorbeifahrten außen und innen am Ohr des Schlafenden oben: geringere Fluktuation; unten: höhere Fluktuation.....	20
Abbildung 1-2: Einschätzung von Schlafmedizinern der American Academy of Sleep Medicine and Sleep Research Society zur Schlafdauer für eine optimale Gesundheit bezogen auf verschiedene Gesundheitsbereiche. ....	21
Abbildung 2-1: Modell zur Wirkung nächtlichen Fluglärms von Porter et al. (2000), hier übersetzt und auf Umgebungslärm bezogen.....	23
Abbildung 2-2: Expositions-Wirkungskurven in der Lärmwirkungsforschung und Zumutbarkeitskriterien in Politik und Rechtsprechung. ....	26
Abbildung 2-3: Prozentanteil hoch beim Einschlafen (oben links), während des Nachtschlafs (oben rechts), beim Ausschlafen (unten links) und beim Schlaf insgesamt (unten rechts) gestörter Personen durch Schienenverkehrslärm (%HSD) in Abhängigkeit des nächtlichen Schienenverkehrsgeräuschpegels $L_{pA,eq,22-06h}$ bzw. Maximalpegel $L_{pAF,max}$ ....	36
Abbildung 2-4: Prozentanteil hoch beim Ein-, Nacht- und Ausschlafen gestörter Personen (%HSD) durch Schienenverkehrslärm in Abhängigkeit von Maximalpegel $L_{pAF,max}$ und unterschiedlichen Perzentilstufen der Zugzahl 250 m.....	38
Abbildung 2-5: Expositions-Wirkungskurven zu Erkrankungsrisiken (Odds Ratio) in Abhängigkeit von der Schienenverkehrslärm-Exposition (24-Stunden-Mittelungspegel $L_{pA,eq,24h}$ ) aus der NORAH-Fallkontrollstudie.....	39
Abbildung 2-6: Schalldruckpegelverlauf $L_{pAF}$ (schwarz) eines Güterzuges, innen am Ohr des Schlafenden, gemessen bei geschlossenem Fenster, Abstand Hauswand – erstes Gleis: 6 m.....	48
Abbildung 2-7: Schalldruckpegelverlauf $L_{pAF}$ (schwarz) eines Güterzuges, innen am Ohr des Schlafenden, gemessen bei geschlossenem Fenster, Abstand Hauswand – erstes Gleis: 6 m mit Darstellung der Pegeldifferenz und derzeitlichen Differenz der Fluktuation ...	49
Abbildung 2-8: Schalldruckpegelverlauf $L_{pAF}$ (schwarz) eines Güterzuges, innen am Ohr des Schlafenden, gemessen bei geschlossenem Fenster, Abstand Hauswand – erstes Gleis: 6 m.....	50
Abbildung 2-9: Schalldruckpegelverlauf $L_{pAF}$ (schwarz) eines Güterzuges, innen am Ohr des Schlafenden, gemessen bei gekipptem Fenster, Abstand Hauswand – erstes Gleis: 71 m .....	50

Abbildung 2-10: Expositions-Wirkungskurve NORAH 2012 vor und nach Abzug der spontanen Aufwachwahrscheinlichkeit (blau), STRAIN-Studie 2001/2002 nach Abzug der spontanen Aufwachwahrscheinlichkeit (schwarz) .....	58
Abbildung 2-11: Expositions-Wirkungskurve zwischen dem maximalen Schalldruckpegel $L_{pAF,max}$ eines Güterzuggeräusches und der Aufwachwahrscheinlichkeit beruhend auf dem Modell in Tabelle 2. ....	60
Abbildung 2-12: Expositions-Wirkungskurve zwischen dem maximalen Schalldruckpegel $L_{pAF,max}$ eines Personenzuggeräusches und der Aufwachwahrscheinlichkeit beruhend auf dem Modell in Tabelle 4. ....	61
Abbildung 3-1: Mittelungspegel $L_{pA,eq,1h}$ einer Vorbeifahrt .....	63
Abbildung 3-2: AF-bewerteter maximaler Schalldruckpegel $L_{pAF,max}$ einer ICE-Vorbeifahrt .....	64
Abbildung 3-3: Einzelereignispegel $L_{pT0}$ (SEL) einer ICE-Vorbeifahrt .....	66
Abbildung 3-4: Vorbeifahrtsexpositionspegel TEL einer ICE-Vorbeifahrt .....	67
Abbildung 3-5: Zeitlicher Pegelverlauf einer Zugvorbeifahrt in unterschiedlichen Abständen.....	68
Abbildung 3-6: Mögliche Detektion des Pegelanstiegs eines IC in 25 m Entfernung .....	68
Abbildung 3-7: Simulation des zeitlichen Pegelverlaufes in unterschiedlichen Abständen.....	69
Abbildung 3-8: Zusammenhang zwischen Pegelanstiegsgeschwindigkeit und Abstand .....	70
Abbildung 3-9: Zeitlicher Pegelverlauf des Vorbeifahrtpegels für unterschiedliche Vorbeifahrtsgeschwindigkeit .....	70
Abbildung 3-10: Zusammenhang zwischen Vorbeifahrtzeit $T$ und Vorbeifahrtsgeschwindigkeit $v$ .....	71
Abbildung 3-11: Zeitlicher Verlauf des LAF eines ICE 1 mit einer Geschwindigkeit von 250 km/h in 7,5 m Abstand (durchgezogene Linie) und 25 m Abstand (gestrichelte Linie) .....	72
Abbildung 3-12: Abstandsbedingte Pegelminderung einer linienförmigen und einer punktförmigen Schallquelle.....	72
Abbildung 3-13: Zeitverlauf des $L_{pAF}$ eines ICE (120 km/h) in 15 m Abstand.....	73
Abbildung 3-14: Zeitverlauf des $L_{pAF}$ eines Nahverkehrszuges mit 120 km/h (oben) und eines Güterzuges mit 90 km/h (unten) in 15 m Abstand.....	74
Abbildung 3-15: Zeitverlauf des $L_{pAF}$ eines Güterzuges mit 90 km/h (oben) und eines IC mit 120 km/h (unten) in 15 m Abstand .....	75
Abbildung 3-16: Zeitverlauf des $L_{pAF}$ eines Güterzugs mit 90 km/h in 15 m Abstand.....	75
Abbildung 3-17: Abstrahlung einer unbegrenzten Linienschallquelle begrenzt auf die Dauer der Vorbeifahrt $T_p$ .....	77
Abbildung 3-18: Zeitliche Korrektur der Abstrahlung der unbegrenzten Linienschallquelle.....	78
Abbildung 3-19: Abstrahlung einer begrenzten Linienschallquelle, die durch das Durchlaufen mehrerer Iterationsschritte an der Strecke entlangwandert.....	79

Abbildung 3-20: Beispiel für eine Auswertung einer Güterzugvorbeifahrt in 6 m Abstand; der Vorbeifahrtexpositionspegel TEL .....	82
Abbildung 3-21: Grafische Darstellung des Zusammenhangs zwischen Zuschlag zur Berücksichtigung von Einzelereignissen und Abstand .....	84
Abbildung 4-1: Vorgehensweise zur Ermittlung des Anteils hoch schlafgestörter Personen durch Zuggeräusche .....	85
Abbildung 4-2: Vorgehensweise zur Ermittlung von zusätzlichen Aufwachreaktionen durch Zuggeräusche .....	86
Abbildung 4-3: Beispiel für eine rechnerisch prognostizierte Verteilung der Maximalpegel an einer gegebenen Strecke .....	86
Abbildung 4-4: Zugehörige Dichteverteilung der zu erwartenden Maximalpegel getrennt für Personen- und Güterzüge.....	88
Abbildung 4-5: Expositions-Wirkungskurve der bahnlärmbedingten Aufwachwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit vom Maximalpegel, innen am Ohr des Schlafenden .....	89
Abbildung 4-6: Aus der Dichteverteilung der Maximalpegel gewichtet mit der Aufwachwahrscheinlichkeit (AWR) ermittelte Gesamtaufwachwahrscheinlichkeit, sowie die aus der Kumulierung berechneten zusätzlichen Aufwachreaktionen .....	89
Abbildung 5-1: Ausschnitt der Bebauung in Fallbeispiel 1: Elektrifizierung einer gering belasteten Bahnstrecke mit verschiedenen Gebietsnutzungen. Die roten Markierungen zeigen die ausgewählten Einzelpunkte im Nah- und Fernbereich .....	91
Abbildung 5-2: Ausschnitt der Bebauung in Fallbeispiel 2: dreigleisiger Ausbau einer hoch belasteten Bahnstrecke mit verschiedenen Gebietsnutzungen. Die roten Markierungen zeigen die ausgewählten Einzelpunkte im Nah- und Fernbereich .....	92
Abbildung 5-3: Rasterberechnung der Maximalpegel ohne (links) und mit (rechts) Schallschutzwand am Fallbeispiel mit geringer Verkehrsbelastung für Güterzüge.....	93
Abbildung 5-4: Aufwachwahrscheinlichkeit ohne (links) und mit (rechts) Schallschutzwand am Fallbeispiel mit geringer Verkehrsbelastung; Hinweis: eine Aufwachwahrscheinlichkeit von 100% entspricht einer zusätzlichen lärmeevozierten Aufwachreaktion .....	93
Abbildung 6-1: Ableitung eines Maximalpegelkriteriums aus den Befragungsergebnissen der NORAH-Studie.....	97

## 0 Kurzfassung

Aufgabenstellung des Gutachtens "Berücksichtigung eines Maximalpegelkriteriums bei der Beurteilung von Schienenverkehrslärm in der Nacht" ist es, anhand einer begründeten Auswahl von psychologischen und physiologischen Wirkungskriterien zum nächtlichen Schlaf akustische Belastungskenngrößen als Berechnungs- und Messgröße abzuleiten und Zumutbarkeitskriterien zu entwickeln, deren Auswirkungen dann anhand von Fallbeispielen aufgezeigt werden. Insbesondere soll eine Verbesserung des Schutzes des Nachtschlafes gegenüber der derzeitigen Beurteilungsmethodik für Schienenverkehrslärm, die allein auf der Grundlage des Mittelungspegels basiert, aufgezeigt werden.

Als psychisches Wirkungskriterium wurde der Prozentanteil hoch durch Schienenverkehrslärm schlafgestörter Personen (%HSD; highly sleep disturbed) ausgewählt. 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.

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

In Sensitivitätsanalysen wurden 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. Diese Studie erlaubt unter anderem die Verknüpfung von psychologischen Wirkungsgrößen mit verschiedenen akustischen Kenngrößen der Schienenverkehrsgeräuschbelastung bei einem breiten Mix von Zugarten mit unterschiedlichem Verkehrsaufkommen wie er im aktuellen bundesdeutschen Bahnstreckennetz üblich ist.

Die drei Modellarten zum %HSD-Anteil beim Einschlafen, während des Nachtschlafes, beim Ausschlafen sowie insgesamt beziehen sich auf folgende akustische Kenngrößen:

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

Die Modellberechnungen zeigen, dass der Anteil hoch durch Schienenverkehrslärm schlafgestörter Personen (%HSD) sowohl mit zunehmendem 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 Zugarten allein

oder in Kombination mit der Anzahl der Züge den %HSD-Anteil besser ab, wenn auch die Unterschiede in der Modellgüte nicht sehr hoch sind.

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. Zudem wird aufgrund des geringen Abstands in der Modellgüte die Beibehaltung eines Dauerschallpegelkriteriums für die Nachtzeit und die zusätzliche Einführung eines Maximalpegelkriteriums bzw. eines auf Maximalpegel bezogenes physiologisches Wirkungskriterium 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 auch für die Beibehaltung des Dauerschallpegels plus einer Ergänzung durch ein Maximalpegel- bzw. darauf basierendes Wirkungskriterium. Folgende Abbildung 1 zeigt die Expositions-Wirkungsanalysen zum %HSD-Anteil (Schlafgestörtheit insgesamt) bezogen auf den Dauerschall- und Maximalpegel, abgeleitet aus den Sensitivitätsanalysen der NORAH-Studie.

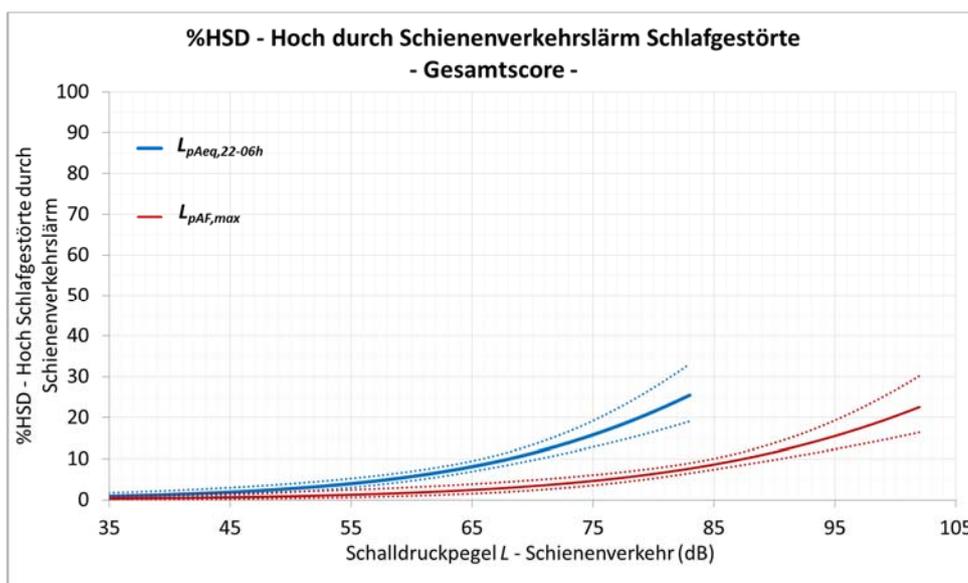


Abbildung 0-1: Anteil hoch beim Schlaf insgesamt gestörter Personen durch Schienenverkehrslärm (%HSD) in Abhängigkeit des nächtlichen Schienenverkehrsgeräuschpegels  $L_{pA,eq,22-06h}$  bzw. Maximalpegel  $L_{pAF,max}$

Im Gutachten wurde zudem hergeleitet, wie mit Hilfe des derzeit weltweit größten verfügbaren Datensatzes zu den physiologischen Auswirkungen nächtlichen Bahnlärms auf den Schlaf, eine ökologisch valide Herleitung einer Expositions-Wirkungskurve für das Erwachen durchgeführt werden kann und welche akustischen, schlaf- und personenbezogenen Parameter in diesem Modell wirkungsrelevant sind. Der Schlaf von Anwohnern an Schienenverkehrsstrecken wird durch die Anzahl, das zeitliche Auftreten und die akustischen Eigenschaften der Einzellärmereignisse beeinträchtigt. Somit beschreibt ein Dauerschallpegel allein auch im Fall physiologischer Messgrößen die Wirkung nicht adäquat. Aufgrund der hohen Kosten und des

großen Zeitaufwandes, der für Durchführung und Auswertung dieser Art von Feldstudien benötigt wird, ist die Zahl möglicher zu untersuchender Anwohner natürlicherweise begrenzt. Um mögliche Veränderungen im Schlaf eindeutig auf den Bahnlärm zurückführen zu können, dürfen die Probanden an keinen intrinsischen Schlafstörungen oder anderen Krankheiten leiden, die Auswirkungen auf den Schlaf haben. Sie müssen zudem altersentsprechend normal hörend sein. In einem Schutzkonzept ist darauf zu achten, dass auch möglicherweise schlafvulnerable Gruppen geschützt werden.

Das hier vorgestellte Modell zur Berechnung der Aufwachwahrscheinlichkeit aufgrund eines Bahnlärmereignisses berücksichtigt schlafvulnerable Gruppen insofern, dass in das Modell einige konservative, d.h. für den Anwohner protektive Annahmen gemacht werden. So wird für die Expositions-Wirkungskurven angenommen,

- a) dass die Aufwachreaktion nicht nur für den Übergang in das Stadium „Wach“, sondern auch für den Übergang in das Leichtschlafstadium „S1“ definiert ist,
- b) dass Aufwachreaktionen bis 90 s nach Geräuschanfang dem Geräusch zugeordnet werden,
- c) dass die Kurve für das vorherige Schlafstadium 2 berechnet ist, d.h. der Anwohner ist bereits im Leichtschlaf und somit einfacher zu erwecken als aus den Tiefschlafphasen,
- d) dass die Kurve für 300 min nach Schlafbeginn berechnet ist, was in der Regel dem letzten Nachtdrittel entspricht, in dem der menschliche Schlaf aufgrund des nachlassenden Schlafdrucks durch deutlich mehr Leichtschlafphasen gekennzeichnet ist als zu Beginn der Nacht.

Es ist in der Schlafforschung völlig unbestritten, dass unabhängig von alters- und geschlechtsspezifischen Einflüssen, auch der Schlaf von Menschen ohne intrinsische Schlafstörungen individuell sehr unterschiedlich sein kann. Die moderate Größe der Konfidenzintervalle in dem hier vorgestellten Modell und auch die Beobachtung, dass mehrere Fluglärmstudien an unterschiedlichen Flughäfen zu sehr ähnlichen Expositions-Wirkungskurven führen, deutet darauf hin, dass die Ergebnisse, die letztlich aufgrund der Untersuchung einer kleinen Anzahl von Probanden gewonnen wurden, zumindest für die Gruppe schlafgesunder Anwohner verallgemeinert werden kann. In Abbildung 2 sind die in diesem Kapitel abgeleiteten Expositions-Wirkungskurven in einem Diagramm dargestellt. Der Messzeitraum waren die Jahre 2008 bis 2009, so dass davon ausgegangen werden muss, dass die meisten Güterzüge in diesem Zeitraum noch mit Grauguß-Klotzbremsen ausgerüstet waren. Da das Modell zur Vorhersage der Aufwachwahrscheinlichkeit bei Vorbeifahrt eines Güterzuges sowohl den Maximalpegel des Güterzugeinzelereignisses als auch einen Fluktuationsparameter berücksichtigt, ist davon auszugehen, dass es die in der Regel leiseren und fluktuationärmeren Güterzüge mit Verbundstoff-Klotzbremsen genauso adäquat beschreibt.

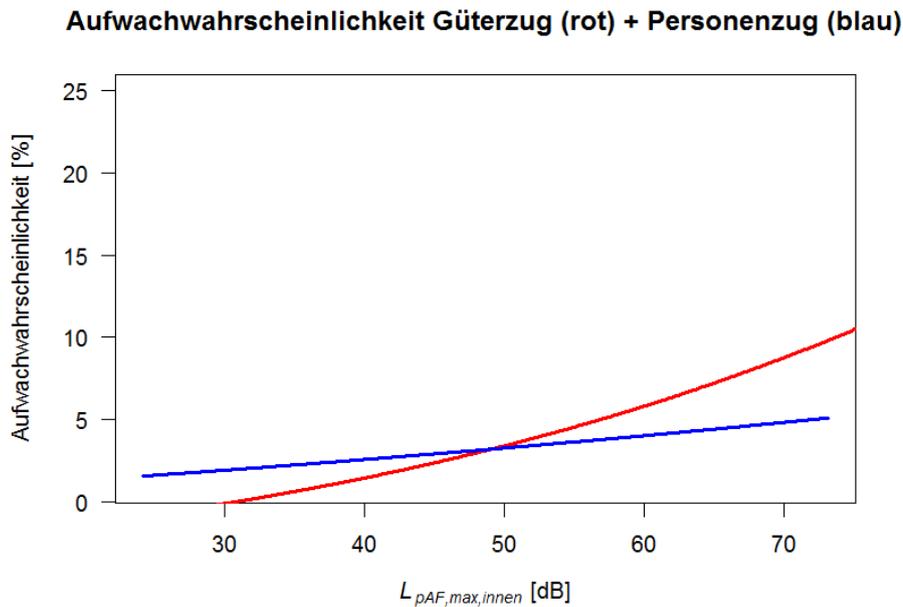


Abbildung 0-2: Vergleich der Expositions-Wirkungskurve zwischen dem maximalen Schalldruckpegel  $L_{pAF,max}$  eines Güterzug- (rot) und eines Personenzuggeräusches (blau) und der Aufwachwahrscheinlichkeit innen am Ohr des Schlafenden

Bei den gemessenen und damit im Anpassungsmodell verwendeten Personenzügen handelte es sich weitgehend um Regional- und S-Bahnen in einem Geschwindigkeitsbereich von 70 km/h bis 120 km/h. Aufgrund der Frequenzzusammensetzung und des fluktuationsarmen Schalldruckpegelverlaufs von Fernverkehrszügen werden diese wie Regional- und S-Bahnen behandelt. Nach Ansicht der Gutachter ist dieser Datensatz zu den akuten physiologischen Auswirkungen nächtlichen Bahnlärms auf den Schlaf gut geeignet, um ein Nachtschutzkonzept zu entwickeln, das die stärkste physiologische Reaktion von Bahnanrainern auf nächtlichen Bahnlärm, die Aufwachreaktion, begrenzt und damit auch mutmaßlich gesundheitliche Folgeschäden nach langjähriger Exposition vermeidet. Ein Schutzkonzept zur Sicherung eines erholsamen Schlafs von Verkehrslärmwohnern muss neben der Begrenzung negativer physiologischer aber immer auch die Begrenzung negativer psychologischer Reaktionen beinhalten, die über stresstheoretische Ansätze in einem Zusammenhang stehen und nicht unabhängig voneinander betrachtet werden können.

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. Zur Bestimmung der akustischen Berechnungsgrößen wurden mögliche Definitionen des Maximalpegels anhand bestehender Normen und Richtlinien zur Schallmessung und Berechnung von Schienenverkehrslärm (z.B.  $SEL$ ,  $TEL$ ,  $L_{pAF,max}$ ) analysiert und auf ihre Anwendbarkeit für vorliegende Fragestellung überprüft. Ergebnis ist, dass der bei Schallmessungen bereits vorwiegend verwendete  $L_{pAF,max}$  am besten geeignet erscheint, da dieser den höchsten Schallpegel während der Vorbeifahrt eines Zuges abbildet. Neben dem Maximalpegel wurde der in den bestehenden Berechnungsverfahren verwendete Mit-

telungspegel  $L_{pAeq}$  betrachtet. Vergleiche zu den Unterschieden zwischen Maximalpegel und Mittelungspegel bezogen auf den Schienenverkehrslärm zeigen, dass der Unterschied besonders groß ist bei geringen Vorbeifahrthäufigkeiten und bei geringen Abständen zwischen Schienenverkehrswegen und Betroffenen. Die Berechnung des Maximalpegels für Schienenverkehrslärm ist in Deutschland derzeit nicht geregelt; daher wurde aus dem in Verordnungen gebräuchlichen Rechenverfahren der Schall 03 eine Berechnungsmethode für den Maximalpegel abgeleitet; für die im Nahbereich besonders lästigen impulshaltigen Geräusche, bedingt durch z.B. Flachstellen, wurde ein Zuschlagsverfahren entwickelt. Das Berechnungsverfahren kann in das vorhandene Verfahren der Schall 03 integriert werden.

Es wurden mehrere alternative Möglichkeiten zur Einführung einer zusätzlichen Kenngröße in der Verkehrslärmschutzverordnung überprüft, die neben dem bereits vorhandenen Immissionsgrenzwerten auf der Grundlage des Mittelungspegels den Schutz des erholsamen Nachtschlafes gewährleisten sollen. Es zeigt sich aus den psychologischen und physiologischen Untersuchungsteilen, dass grundsätzlich sowohl die Höhe des Maximalpegels als auch die Häufigkeit des Auftretens des Maximalpegels Kriterien für einen erholsamen Schlaf darstellen.

Als ein Maximalpegelkriterium konnte aus den psychologischen Untersuchungen abgeleitet werden, dass die Differenz zwischen Maximalpegel und Mittelungspegel auf 17 dB begrenzt werden sollte, da die berichtete Gestörtheit des Schlafes bis zu dieser Differenz durch den Mittelungspegel und den Maximalpegel in etwa gleichwertig beurteilt wird. Bei Betroffenen mit höheren Differenzen würde sich ansonsten bei gleichem Immissionsgrenzwert ein geringeres Schutzniveau einstellen.

Aus den physiologischen Auswertungen wurde als weitere Kenngröße die zusätzlichen schienenverkehrs-lärmbedingten Aufwachreaktionen (AWR) entwickelt und eine Begrenzung der AWR auf höchstens 3 AWR im Nachtzeitraum von 22:00 Uhr bis 06:00 Uhr vorgeschlagen; damit werden die in diesem Gutachten errechneten AWR an einer hoch belasteten Strecke gegenüber dem derzeitigen Beurteilungsverfahren halbiert. Bei einer Anzahl von weniger als 1 zusätzlicher bahn-lärmbedingter Aufwachreaktion pro Nacht sind aus Sicht der Gutachter keine weiteren Maßnahmen erforderlich. Im AWR werden die Anzahl der Vorbeifahrten, die Höhe des Maximalpegels, die Geräuschkdauer, die Pegelfluktuation und die Zeiten nach dem Einschlafen und das Verweilen im aktuellen Schlafstadium berücksichtigt.

Die Anwendung dieser beiden zusätzlichen Beurteilungskriterien in der 16.BImSchV zeigen anhand von zwei stark unterschiedlichen Fallbeispielen, dass in Fällen mit geringen Vorbeifahrthäufigkeiten (ca. 20 Vorbeifahrten / Nacht) und hohen Maximalpegeln auch bei einem AWR < 3 zusätzlicher Anspruch auf Schallschutz besteht, da dann die Differenz zwischen Mittelungspegel und Maximalpegel größer 17 dB ist. In Fällen mit hoher Vorbeifahrthäufigkeit (ca. 100 Vorbeifahrten / Nacht) besteht bei dem untersuchten Fallbeispiel ebenfalls Anspruch auf zusätzlichen Schallschutz, da dann der AWR von 3 überschritten wird, obwohl die Differenz zwischen Mittelungspegel und Maximalpegel kleiner als 17 ist.

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 Bahnlarms werden Ergänzungen der maßgeblichen Verordnungen vorgeschlagen, die sowohl die Höhe des Maximalpegels als auch die Anzahl der Aufwachreaktionen bei Nacht berücksichtigen.

## 1 Einleitung

### 1.1 Aufgabenstellung

Das Gutachten "Berücksichtigung eines Maximalpegelkriteriums bei der Beurteilung von Schienenverkehrslärm in der Nacht" besteht aus drei Arbeitspaketen:

- (1) Ableitung von Wirkungskriterien zum nächtlichen Schlaf und Identifizierung geeigneter akustischer Kenngrößen zu ihrer Beschreibung;
- (2) Entwicklung von Belastungskenngrößen als Berechnungs- und Messgröße;
- (3) Zumutbarkeitskriterium und Fallbeispiel.

Im ersten Arbeitsschritt sollen Erkenntnisse der Lärmwirkungsforschung zu Kriterien der Wirkung von Schienenverkehrslärm auf den nächtlichen Schlaf, die zur Ableitung von Schutzziele herangezogen werden können, dargestellt werden. Im zweiten Schritt werden akustische Kennwerte entwickelt, die einerseits die im ersten Schritt definierten Schutzziele geeignet abbilden, andererseits in die bestehende Vorschriften integriert werden können. Im dritten Schritt werden die in den vorangegangenen beiden Arbeitsschritten gewonnenen Erkenntnisse in Expositions-Wirkungskurven umgesetzt und eine Zumutbarkeitsgrenze abgeleitet. Hier werden Fallbeispiele dargestellt, die die Auswirkung der neu definierten Zumutbarkeitsgrenze in der Praxis aufzeigen.

Das vorliegende Gutachten beschäftigt sich im ersten Teil mit dem Sachstand zur "Ableitung von Wirkungskriterien zum nächtlichen Schlaf" und im zweiten Teil mit dem Sachstand zur „Entwicklung von Belastungskriterien als Berechnungs- und Messgröße“. Im dritten Teil werden mögliche Kennzeichnungsgrößen für den Maximalpegel anhand von Fallbeispielen beschrieben und daraus mögliche Zumutbarkeitsgrenzen abgeleitet und diskutiert.

### 1.2 Beurteilung von Schienenverkehrslärm: Mittelungs- versus Maximalpegel

Im Zusammenhang mit der Diskussion über Neu- und Ausbauplanungen von Eisenbahnstrecken, aber auch bei der Lärmsanierung von bestehenden Strecken wird die bisherige Beurteilung des Schienenverkehrslärms durch den Mittelungspegel zunehmend hinterfragt. In den derzeitigen Regelungen zur Beurteilung von Schienenverkehrslärm wird überwiegend der Mittelungspegel als Beurteilungsgröße verwendet. Dies zeigt in Übersicht der in Tabelle 1-1 dargestellte Auszug aus Tabelle 4 des UIC-Berichts "Exploring bearable noise limits and emission ceilings for the railways" (Verheijen et al., 2011). Dargestellt sind Grenzwerte für Schienenverkehrslärm verschiedener europäische Länder für Wohngebiete an Bestands- sowie Neu- und Ausbaustrecken. In Deutschland wird der Mittelungspegel z.B. in der Verkehrslärmschutzverordnung (16. BImSchV) oder in der DIN 18005, Schallschutz im Städtebau, als Beurteilungspegel bezogen auf den Tages- (06:00 Uhr bis 22:00 Uhr) und Nachtzeitraum (22:00 Uhr bis 06:00 Uhr) definiert. In der EU-Umgebungslärmrichtlinie wird der sog.  $L_{den}$  als Mittelungspegel über 24 Stunden mit einer zusätzlichen Gewichtung des Abend- (18:00 Uhr bis 22:00 Uhr) und Nachtzeitraumes (22:00 Uhr bis 06:00 Uhr) und der  $L_{night}$  (22:00 Uhr bis 06:00 Uhr) herangezogen.

Tabelle 1-1: Europäische und nationale Grenzwerte zum Schienenverkehrslärm. Auszug UIC-Bericht "Exploring bearable noise limits and emission ceilings for the railways" (Verheijen et al., 2011, p. Table 4, p. 27-28)

Country	Line <sup>o</sup>	Applicable situation built-up environment <sup>b</sup>	Day limit <sup>c</sup>	Night limit <sup>d</sup>	Remarks
Netherlands	Ex. Up. New	dwellings	$L_{den}=70$	-	'NoMo-sanering'
		dwellings, schools and hospitals	$L \ 0$	-	objective
			$L_{den}=71$	-	upper limit
		dwellings (2 dB lower limit for schools and hospitals )	$L_{den}=55$	-	objective
		dwellings, schools and hospitals	$L_{den}=68$	-	upper limit
France <sup>o</sup>	Ex. Up. New	all	$L_{den}=73$	$L_{night}=65$	'points noirs'
		all	$L \ 0$	$L \ 0$	objective
			68	63	upper limit
		zone with moderate noise levels	63	58	
		zone with more than moderate noise levels	68	63	
Switzerland	Ex.+ Up. New	recreational or recovery areas (I)	55	45	
		residential areas, areas for public buildings & facilities (II)	60	50	
		residential and commercial zones,	65	55	
		agricultural zones (III)			
		industrial zones (IV)	70	60	
		recreational or recovery areas (I)	50	40	
		residential areas, areas for public buildings & facilities (II)	55	45	
		residential and commercial zones,	60	50	
		agricultural zones (III)			
		industrial zones (IV)	65	55	
Germany	Ex. Up.+ New	hospitals, schools, sanatoriums and nursing homes (1);	70	60	'Lärmsanierung'
		residential areas and small settlements (2)			
		in central areas, village areas and mixed areas (3)	72	62	
		commercial and industrial areas (4)	75	65	
		hospitals, schools, sanatoriums and nursing homes (1)	57	47	'BlmSchG'
		residential areas and small settlements (2)	59	49	
		in central areas, village areas and mixed areas (3)	64	54	
		commercial and industrial areas (4)	69	59	
Sweden	Ex. Up.+ New	inside the building (in the bedroom)	-	$L_{max}=55$	
		outside the building (in the garden or patio)	$L_{Aeq,24h}=70$	-	
		inside the building (in the bedroom)	$L_{Aeq,24h}=30$		
		outside the building (in the garden or patio)	$L_{Aeq,24h}=55$	-	
Poland	Ex.+ Up.+ New	health resorts and hospitals outside city	50	45	
		single-family houses, city hospitals	55	50	
		multi-family houses, recreation areas, farms	60	50	
		city centres above 100 000 inh.	65	55	
Portugal	Ex.+ Up.+ New	sensitive zone (residential, hospitals, schools)	$L_{den}=55$	$L_{night}=45$	
		mixed zone; sensitive zone close to existing major line	$L_{den}=65$	$L_{night}=55$	
		areas not yet classified by municipality	$L_{den}=63$	$L_{night}=53$	
		line projected when approving sensitive zone	$L_{den}=60$	$L_{night}=50$	
<p>Existing lines (Ex.), lines being upgraded (Up.) and new lines (New).  Limits apply to the façade of the building, unless otherwise stated (Sweden).  Limit value as cited in the law (or decree or regulation). This value is expressed in <math>L_{Aeq,6-22h}</math> (dB), unless otherwise stated in this table. '<math>\Delta L \leq 0</math>' means that the objective is to avoid an increase of noise after upgrading.  Night limit expressed in <math>L_{Aeq,22-6hr}</math>, unless otherwise stated. Limits expressed in <math>L_{night}</math> are equal to limits expressed in <math>L_{Aeq,22-6hr}</math>.  [...] (Spalte zur Fußnote entfernt.)  The listed French limits are for conventional lines. For high-speed lines mostly 3 dB lower limits apply.</p>					

Im o.g. UIC-Bericht (Verheijen et al., 2011) wird Schweden als einziges EU-Land aufgeführt, das neben einem  $L_{pA,eq}$ -Kriterium für die Schallimmission durch Schienenverkehrsgeräusche in Wohngebieten (Immissionspegel) ein Maximalpegel-Kriterium verwendet (vgl. Tabelle 1-1). Im ODS-Bericht zu europäischen Prioritäten und Strategien zur Schienenverkehrslärminderung wird neben Schweden mit Stand 2002 noch Norwegen als Land genannt, in dem der Maximalpegel ( $L_{pAF,max,außen}$  70 - 80 dB) beim Schienenverkehrslärm als Schutzkriterium benutzt wird (Degn et al., 2002).

Ergebnisse von Befragungen betroffener Bürgerinnen und Bürger z. B. im Mittelrheintal zeigen, dass vor allem durch den Güterzugverkehr in geringen Abständen insbesondere die Pegelanstiegsgeschwindigkeit, der höchste Schallpegelwert während der Vorbeifahrt (Spitzenpegel oder Maximalpegel), aber auch die Vorbeifahrtzeit der Güterzüge eine besondere Belästigung darstellen und zu Beeinträchtigungen des Nachtschlafes durch Einschlafschwierigkeiten oder Aufwachreaktionen führen. Ergebnisse der NORAH - Studie zur Wirkung von Fluglärm auf den Schlaf ("NORAH-Schlafstudie"; Müller et al., 2015) und der vom DLR 2008-2009 (Elmenhorst et al. 2012; Müller et al., 2010) durchgeführten Feldstudie 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.

Neben dem Dauerschallpegel gibt es demnach weitere akustische Kenngrößen, die mit den physiologischen und in Befragungen erhobenen Wirkungen nächtlichen Bahnlärms in Beziehung stehen und die die Wirkungen als Einzelmaß oder in Ergänzung zum Dauerschallpegel möglicherweise besser abbilden als der Dauerschallpegel allein.

Dazu zählt zum einen - wie oben erwähnt - der Maximalpegel, zum anderen aber auch die Emergenz (Differenz zwischen Maximal- und Hintergrundpegel). Griefahn stellt fest, dass lärmbedingte Schlafstörungen insbesondere durch die zeitliche Verteilung der Geräusche bestimmt sind und dabei intermittierende Geräusche mehr stören als kontinuierliche (Griefahn, 2003, S. 114). Sie führt dazu aus, dass für dieses Ergebnis eher die Emergenz als der absolute Maximalpegel bestimmend ist. Dies leitet sie aus den Beobachtungen einer früheren Studie (Griefahn, 1985) ab, wonach die Wahrscheinlichkeit von Aufwachreaktionen zunächst zunimmt, die Zunahme aber mit der Gesamtzahl der Schallreize pro Nacht kleiner wird, da das Risiko, durch einen einzigen Schallreiz geweckt zu werden, geringer wird. Sie berichtet weiterhin, dass bei 35 oder mehr Geräuschereignissen in der Nacht ein Rückgang der globalen Aufwachhäufigkeit möglich ist.

Dass die nächtliche Emergenz auch bei selbstberichteten Schlafstörungen eine Rolle spielt, zeigen Sensitivitätsanalysen im Rahmen der NORAH-Studie (vgl. Schreckenberget al. (2015), Möhler et al. (2015)) zur Fluglärmbelästigung und selbstberichteten fluglärmbedingten Schlafstörungen (Tabelle 1-2). Die in der Tabelle aufgeführten Korrelationskoeffizienten beschreiben die Stärke des Zusammenhangs zwischen verschiedenen akustischen Kenngrößen der Luftverkehrsgeräuschbelastung und der Fluglärmbelästigung bzw. selbstberichteten fluglärmbedingten Schlafstörungen. (Je höher der Betrag des Korrelationskoeffizienten im Wertebereich von -1 bis 1, desto stärker der Zusammenhang).

Tabelle 1-2: Korrelation zwischen Fluglärmelastigung, selbstberichteten fluglärmbedingten Schlafstörungen und akustischen Kenngrößen zur Luftverkehrsgeräuschbelastung tags und nachts aus der NORAH-Studie (Schreckenberget al., 2015)

Produkt-Moment-Korrelation $r$ zwischen ...		Flughäfen			
		FRA 2011-13	BER 2012	CGN 2013	STR 2013
		<i>Fluglärmelastigung (ohne Tageszeitbezug in der Frageformulierung)</i>			
Tag	Mittelungspegel - $L_{pA,eq,06-22h}$	0,466 - 0,470	0,502	0,409	0,594
	Maximalpegel - $L_{pAF,max,06-22h}$	0,426 - 0,434	0,489	0,362	0,580
Nacht	Mittelungspegel - $L_{pA,eq,22-06h}$	0,406 - 0,425	0,481	0,420	0,555
	Maximalpegel - $L_{pAF,max,22-06h}$	0,436 - 0,454	0,495	0,374	0,581
		<i>Selbstberichtete fluglärmbedingte Schlafstörungen</i>			
Nacht	Mittelungspegel - $L_{pA,eq,22-06h}$	0,354 - 0,400	0,434	0,363	0,415
	Maximalpegel - $L_{pAF,max,22-06h}$	0,382 - 0,407	0,428	0,322	0,420

In den Untersuchungen des DLR zur Wirkung von Verkehrslärm auf den Schlaf hat sich insbesondere beim Vergleich der Wirkung von Flug- und Schienenverkehrslärm auf die Wahrscheinlichkeit von Aufwachreaktionen gezeigt, dass neben dem Maximalpegel, u. a. Geräuscdauer, Anzahl von Geräuschereignissen sowie die Pegelanstiegssteilheit (Geschwindigkeit, mit der der Geräuschpegel bei einer Zugvorbeifahrt ansteigt) eine wesentliche Rolle spielen. Da insbesondere intermittierende Geräuschereignisse schlafstörend sind, wird vermutet, dass dies nicht allein im Falle mehrerer Geräuschereignisse (Zugvorbeifahrten), sondern auch bei Fluktuationen des Geräuschpegels (in der Psychoakustik „Schwankungsstärke“ genannt; siehe Kapitel 3.2.2), während eines Geräuschereignisses (einer einzelnen Zugvorbeifahrt) gilt. Abbildung 1-1 zeigt exemplarisch Zugvorbeifahrten mit geringerer (links) und höherer (rechts) Fluktuation im Schalldruckpegelverlauf. Für die vorgesehenen Re-Analysen ist ein geeignetes Maß zu finden, welches unterschiedliche Schalldruckpegelverläufe im Geräusch adäquat beschreibt.

Welche schutzwürdigen Wirkungen überhaupt durch nächtlichen Lärm auftreten und mit akustischen Kenngrößen zur Analyse der Eignung eines Maximalpegelkriteriums im Rahmen von Re-Analysen vorliegender Daten korreliert werden können, wird in den nachfolgenden Abschnitten von Kapitel 1 beschrieben.

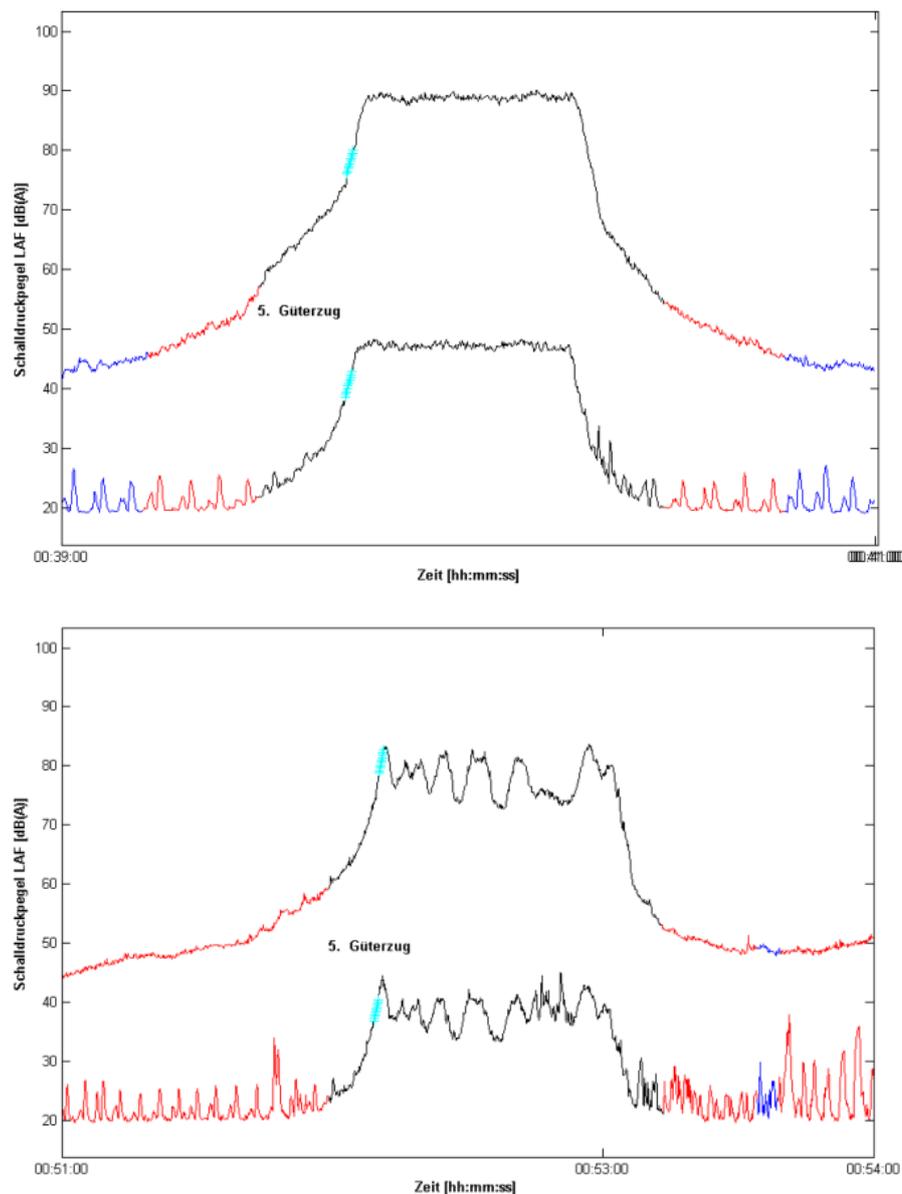


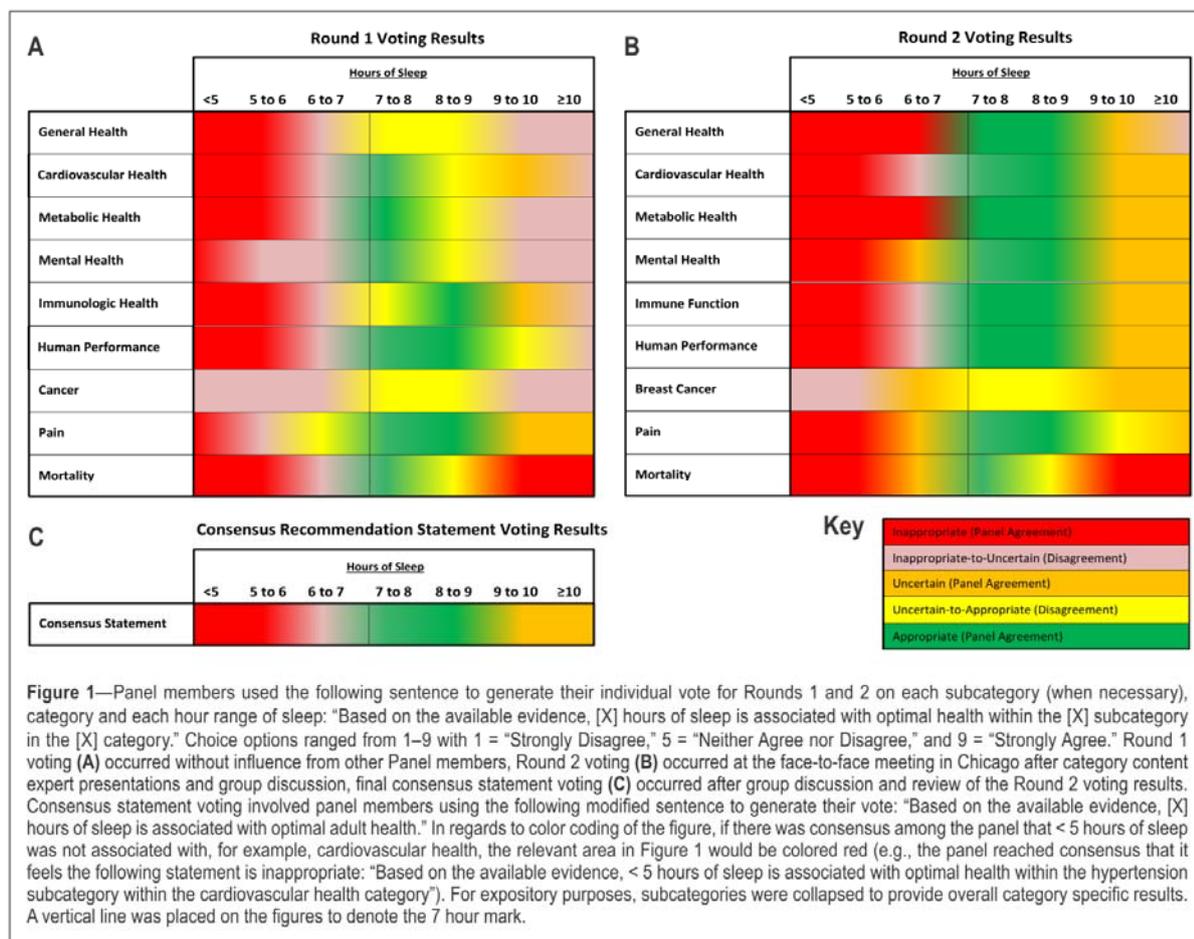
Abbildung 1-1: Unterschiedlicher Schalldruckpegelverlauf von Zugvorbeifahrten außen und innen am Ohr des Schlafenden oben: geringere Fluktuation; unten: höhere Fluktuation

### 1.3 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 (Banks & Dinges, 2007)." (Guski, et al., 2012).

Diese Definition zeigt, dass unabhängig von der genauen Struktur des Schlafs, er insgesamt gesundheitsrelevant ist. Die Autoren des Reviews zu den gesundheitlichen Auswirkungen nächtlichen Fluglärms listen

dabei folgende Hinweise zur Bedeutung des Schlafs auf (Guski et al., 2012): Aufmerksamkeitseinschränkung/Konzentrationsstörungen bei Schlafentzug, wichtige Funktion des Schlafs für die Konsolidierung von Gedächtnisinhalten (Speicherung von Erlebtem im Langzeitgedächtnis, Verfestigung und Trennung von Nervenverbindungen), Störung des Zuckerstoffwechsels und des Immunsystems bei Schlafentzug, Erhöhung des Blutdrucks bei Störung des Schlafs. Guski et al. berichten weiterhin als Ergebnisse – nicht lärmbezogener – epidemiologischer Studien, dass eine dauerhaft verkürzte Schlafzeit (die Autoren definieren diese als 7 Stunden oder kürzer) verbunden ist mit Übergewicht, kardiovaskulären Erkrankungen, Diabetes, Abnahme kognitiver Leistungsfähigkeit und vorzeitige Sterblichkeit. Welche Dauer Schlaf im Hinblick auf die Gesundheit haben sollte, darüber streuen z. B. die Einschätzungen von Schlafmedizinern der American Academy of Sleep Medicine and Sleep Research Society innerhalb und zwischen verschiedenen betrachteten Gesundheitsbereichen (Watson et al., 2015; s. Abbildung 1-2). In einer Gesamt-Konsensempfehlung gibt die American Academy of Sleep Medicine and Sleep Research Society für einen gesunden Erwachsenen eine Schlafdauer von etwa 7 bis 9 Stunden an.



(Bildquelle: Watson et al., 2015, S. 1164, Figure 1)Farblgende zum Konsens über die Angemessenheit der Schlafdauer für eine optimale Gesundheit im genannten Bereich: Grün = Schlafdauer angemessen (Konsens); gelb = unsicher bis angemessen (kein Konsens); orange = unsicher (Konsens); lila = unsicher bis unangemessen (kein Konsens), rot = unangemessen (Konsens).

Abbildung 1-2: Einschätzung von Schlafmedizinern der American Academy of Sleep Medicine and Sleep Research Society zur Schlafdauer für eine optimale Gesundheit bezogen auf verschiedene Gesundheitsbereiche.

Die eingangs zu diesem Abschnitt vorgestellte Definition des Schlafs konzentriert sich auf "vielfältige physiologische Prozesse" (Guski et al., 2012). In Anlehnung an die Definition der Weltgesundheitsorganisation (World Health Organisation WHO, 1946) von Gesundheit als körperlicher Zustand des vollkommenen körperlichen, seelischen und sozialen Wohlbefindens und nicht als die bloße Abwesenheit von Krankheit oder Gebrechen kann "gesunder Schlaf" (*sleep health*) begrifflich auch weiter gefasst werden.

Byusse bemängelt in einem Fachartikel von 2014 das Fehlen einer Definition für *sleep health* und stellt dazu fest: "In short, 'sleep health' is a term that is infrequently used in the literature, and when it is used, it is typically not defined." (Byusse, 2014). Byusse betrachtet Schlaf als multidimensionales Konzept, das die folgenden Faktoren beinhaltet:

- Schlafdauer (*sleep duration*): Die Gesamtmenge an Schlaf innerhalb von 24 Stunden.
- Schlafkontinuität, -effizienz (*sleep continuity or efficiency*): Die Leichtigkeit des Einschlafens bzw. Wiedereinschlafens
- Zeitperiode (*timing*): Die Zeitperiode des Schlafs innerhalb eines 24 Stunden-Tages
- Wachheit/Müdigkeit (*alertness/sleepiness*): Die Fähigkeit, aufmerksame Wachheit beizubehalten
- Zufriedenheit, erlebte Schlafqualität (*satisfaction/quality*): Die subjektive Bewertung eines "guten" oder "schlechten" Schlafs

Jede der genannten Dimensionen ist mit gesundheitsbezogenen Folgen assoziiert. So listet Byusse zum Beispiel für die Zufriedenheit und erlebte Schlafqualität bei negativer Ausprägung vorzeitige Sterblichkeit, metabolisches Syndrom (gemeinsames Auftreten von Übergewicht, Bluthochdruck, Zuckerkrankheit und erhöhten Blutfettwerten), Diabetes, Bluthochdruck, koronare Herzerkrankungen und Depression als mögliche Gesundheitsfolgen auf. Daraus ableitend formuliert Byusse die folgende Definition für gesunden Schlaf (*sleep health*):

"*Sleep health is a multidimensional pattern of sleep-wakefulness, adapted to individual, social, and environmental demands, that promotes physical and mental well-being. Good sleep health is characterized by subjective satisfaction, appropriate timing, adequate duration, high efficiency, and sustained alertness during waking hours.*" (Byusse, 2014).

Übersetzung: Gesunder Schlaf ist ein multidimensionales (Verhaltens-)Muster aus Schlaf-/ Wachheit, angepasst an individuelle, soziale und umweltbezogene Anforderungen, das das körperliche und geistige Wohlbefinden fördert. Eine gute Schlafgesundheit ist durch subjektive Zufriedenheit [mit dem Schlaf], angemessene Zeitperiode, adäquate Dauer, hohe Effizienz und nachhaltige Wachheit/Aufmerksamkeit während der Wachstunden gekennzeichnet.)

Zusammenfassend enthält "gesunder Schlaf" demnach physiologische und psychische Komponenten mit insgesamt langfristigen Gesundheitsfolgen, die im Rahmen von epidemiologischen Studien untersucht werden. Mindestens eine physiologische und eine psychische Komponente sollten demnach als Kriterien für lärmbedingte Schlafstörungen bzw. Beeinträchtigung der "Schlafgesundheit" und – im Rahmen dieses Gutachtens – zur Prüfung der Eignung eines Maximalpegelkriteriums für den Schienenverkehrslärm herangezogen werden.

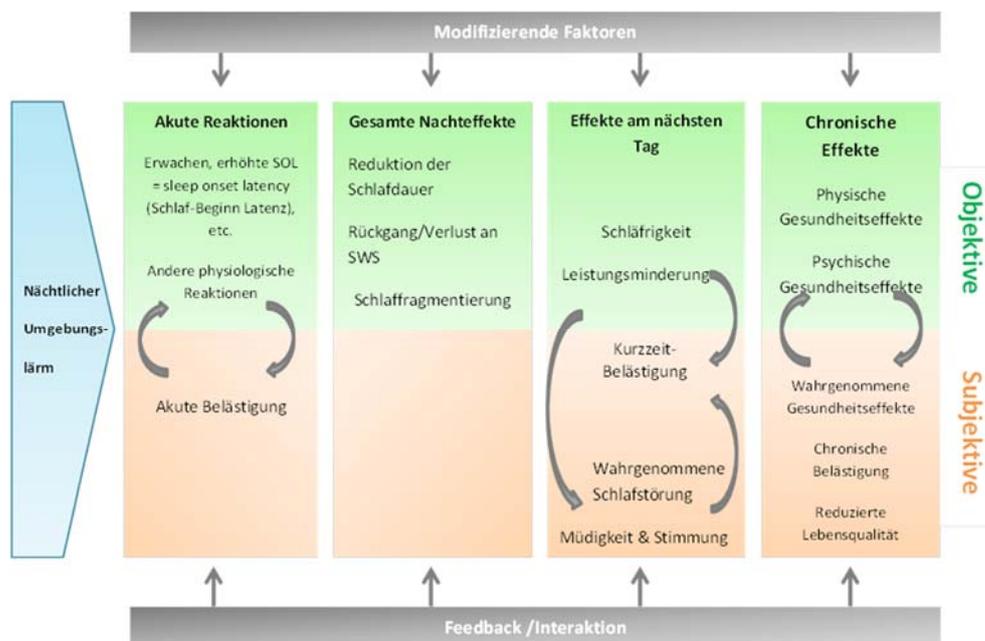
## 2 Wirkungskriterien zum nächtlichen Schlaf

### 2.1 Ausgangssituation

Als Wirkungskenngrößen zur Beschreibung des Einflusses von Lärm auf den Schlaf können grundsätzlich physiologisch gemessene Kenngrößen, durch Befragung ermittelte Schlafstörungen und aus epidemiologischen Studien abgeleitete Kenngrößen herangezogen und akustischen Kenngrößen gegenübergestellt werden. Folgt man der im vorangegangenen Abschnitt vorgestellten Definition vom gesunden Schlaf nach Buysse (2014), dann ist die subjektiv erlebte Störung des Schlafs durch Lärm ebenso ein Indikator gesundheitlicher Beeinträchtigung, wie physiologische Größen, die anzeigen, dass der Schlafverlauf durch externe Einflüsse (hier: Schienenverkehrslärm) so verändert wird, dass eine Beeinträchtigung des körperlichen, seelischen und sozialen Wohlbefindens anzunehmen ist bzw. nicht ausgeschlossen werden kann. Porter et al. (2000) stellen ein vereinfachtes Modell, das die Wirkung nächtlichen Lärms (in ihrem Review: Fluglärm) 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.

Abbildung 2-1 zeigt das Modell von Porter et al. (2000) in einer modifizierten (übersetzten und auf den Umgebungslärm insgesamt bezogenen) Version. Das Modell kann auch für die Wirkung nächtlichen Bahn- lärms als Rahmen dienen.



(Bildquelle: Modifizierte, eigene Darstellung nach Porter et al. (2000, S. 4))

Abbildung 2-1: Modell zur Wirkung nächtlichen Fluglärms von Porter et al. (2000), hier übersetzt und auf Umgebungslärm bezogen.

Die Lärmwirkungen auf Stufe 3 (Nachwirkungen am folgenden Tag) sind insbesondere dann nicht immer eindeutig ausschließlich als Folge der nächtlichen Geräuschbelastung zuzuordnen, wenn zwischen Tages- und Nachtgeräuschpegeln eine hohe Korrelation besteht. Zumindest dürften die Nachwirkungen von der tagsüber auftretenden Geräuschbelastung mit beeinflusst sein. Das heißt, ein nächtliches Schutzziel lässt sich aus den Tages-Nachwirkungen allein kaum ableiten, weswegen für die Ableitung von Schutzzielen für die Nacht die Nachwirkungen tagsüber in diesem Gutachten nicht weiter betrachtet werden.

Grundsätzlich besteht für die kausale Zuordnung der Wirkung von Geräuschbelastungen tagsüber bzw. nachts auf multifaktoriell bedingten Erkrankungsrisiken die gleiche Schwierigkeit. Allerdings kann die Bedeutung der nächtlichen Geräuschbelastung für Erkrankungsrisiken durch Vergleich der Risikoschätzer der akustischen Kenngröße für den Nacht- und Tageszeitraum abgeschätzt werden. Welcher Einfluss auf die langfristige Entwicklung von Erkrankungen besteht, wenn der Lärm physiologisch messbar den Schlafverlauf beeinträchtigt, ist nicht/kaum bekannt. Allerdings legt die o.g. Definition von Buysse (2014) zum gesunden Schlaf auch nahe, dass die akute bzw. über die gesamte Nacht aggregierte Störung des Schlafs an sich gesundheitsrelevant ist.

Giering (2015) listet folgende Untersuchungsitems zu lärmbedingten Schlafstörungen auf: Motilität (Körperbewegungen), selbst berichtete Aufwachreaktionen, Herzschlag, Schlaf-Tagebuch sowie mittels Fragebogen erfasste Schlafstörungen. Dabei betrachtet sie in Anlehnung an Passchier-Vermeer et al. (2007) zur Beurteilung der Wirkung einzelner Geräuschereignisse die Motilität, selbst-berichteten Aufwachreaktionen und den Herzschlag und zur Beurteilung der Geräuschbelastung einer ganzen Nacht darüber hinaus das Schlaftagebuch als anwendbar. Zur Beurteilung der aggregierten Langzeitwirkung nächtlicher Geräuschbelastungen werden alle genannten Zielgrößen bzw. Messmethoden außer dem Schlaf-Tagebuch als anwendbar eingestuft. Im Gutachten von Giering (2015) werden neben selbst-berichteten Aufwachreaktionen Untersuchungen zu physiologischen mittels Polysomnografie erfasster Schlafparameter (insb. EEG-Aufwachreaktionen, Gesamtschlafzeit, Schlaffeffizienz, Wachzeiten) in Abhängigkeit vom ereignisbezogenen Maximalpegel vorgestellt. Neben den Schlafstörungen werden in dem Gutachten von Giering zum Spitzenkriterium auch Befunde zur Belästigung und Herzschlagfrequenz beschrieben. Dabei werden diese Wirkungsgrößen vergleichend im Hinblick auf die Assoziationsstärke von Dauerschall- und Maximalpegel in Bezug auf unterschiedliche Tageszeiten bzw. ohne Tageszeitenbezug, d. h. nicht mit besonderem Augenmerk auf die Nacht- bzw. Schlafenszeit, diskutiert. Maximalpegelbezüge weisen dem Review nach die Belästigung bzw. berichtete Schlafstörungen, Aufwachreaktionen und weitere physiologische Schlafparameter, Herzrate und Motilität auf (Giering, 2015).

Im Review der Umweltministerien der Länder Hessen, Nordrhein-Westfalen und Rheinland-Pfalz zu den gesundheitlichen Auswirkungen von Bahnlärm (Schlattjan et al., 2014) werden als akute physiologische Reaktionen auf Nachtlärm folgende Reaktionen aufgezählt: Motilität (Körperbewegungen), Herzreaktion, autonome Arousals, kortikale Arousals, vaskuläre Reaktionen, Schlafstruktur, sympathischer und parasympathischer Herztonus, Stresshormone (Adrenalin, Noradrenalin, Cortisol), und die psychomotorische Leistungsfähigkeit als Nachwirkung von Störungen des nächtlichen Schlafs. Während die Autoren des Reviews

zu den meisten der genannten physiologischen Reaktionen einen Zusammenhang zum Lärm berichten, stellen sie zur Motilität fest, dass deren Messung durch Aktimetrie allein nicht empfindlich genug ist, um Lärmwirkungen festzustellen. Zu den Stresshormonen weisen sie daraufhin, dass ein Bahnlärmereffekt bislang in keiner Studie festgestellt wurde, verweisen dabei aber auch auf Befunde zum Straßenverkehrslärm. Bezogen auf Leistungseinbußen kommen die Review-Autoren zu dem Schluss, dass keine schlüssigen Zusammenhänge zum Bahnlärm nachgewiesen werden konnte.

Im Hinblick auf langfristige Folgen von Verkehrslärm (Schienen- und/oder Straßenverkehrslärm) zählen die Review-Autoren Originalstudien auf, die die Assoziationen zwischen Verkehrsgeräuschen und kardiovaskulären Erkrankung, Blutdruck bzw. Bluthochdruck und Schlafmittelgebrauch untersuchten. Die Review-Autoren gelangen zu dem Fazit, dass "unterhalb der Schwelle akut Gehör schädigenden Lärms [...] auch bei chronisch / langfristig einwirkenden Lärmereignissen niedrigerer Intensität gesundheitliche Belastungen auftreten [können]" (Schlattjan et al., 2014, S. 56). Der jeweils betrachtete Zeitraum der Geräuschereignisse ist in den Originalarbeiten unterschiedlich. Als akustische Kenngrößen wurden 24-Stunden-Geräuschpegel ( $L_{den}$ ,  $L_{pA,eq,24h}$ ) und Tages- und Nachtdauerschallpegel ( $L_{pA,eq,06-22h}$  und  $L_{pA,eq,22-06h}$ ) verwendet.

Guski et al. (2012, S. 4ff.) nennen ähnlich wie Porter et al. (2000) drei zeitliche Ebenen, auf denen die Wirkungen von (nächtlichem) Lärm auf das Verhalten und die Gesundheit von Menschen untersucht werden:

- Die in Labor- und Feldstudien untersuchten akuten Auswirkungen von Geräuschereignissen auf psychologische und physiologische Zustände (akute Geräuschbeurteilungen, EEG-, Kreislauf- und Muskelaktivitäten);
- die überwiegend in Feldstudien untersuchten mittelfristigen Wirkungen. Dazu gehört die Analyse von statistischen Zusammenhängen zwischen psychologischen (z. B. Belästigungs- und Störungsurteile) und physiologischen Reaktionen (z. B. Veränderungen in der Schlafstruktur, im Herz-Kreislaufsystem), die bei längerfristig (über Wochen und Monate) exponierten Menschen auftreten können.
- Die *langfristigen* Wirkungen, die insbesondere in epidemiologischen Untersuchungen zu Erkrankungsrisiken (u. a. Befragungen, Analyse von Sekundärdaten – z. B. Krankenkassendaten – zu diagnostizierten Erkrankungen oder Medikamentenverschreibungen) in Relation zur langfristigen, über mehrere Jahre andauernden Geräuschbelastung bei Kontrolle anderer potentieller Risikofaktoren bzw. Stör- oder Einflussgrößen betrachtet werden.

Im Review von Guski et al. (2012) werden die Vor- und Nachteile der Untersuchungen der Wirkungen auf den verschiedenen zeitlichen Ebenen aufgezählt: Ein Vorteil der Untersuchung akuter Lärmwirkungen besteht insbesondere im Falle von Laborstudien in der Kontrolle von Störvariablen (Confounder). Nachteilig ist, dass kaum Aussagen über die langfristigen Wirkungen auf die Gesundheit getroffen werden können. Untersuchungen mittelfristiger Wirkungen in Feldstudien erfolgen aufgrund der Feldbedingungen weniger gut kontrolliert, dafür lassen sich unter Rückgriff auf ein plausibles theoretisches Wirkungsmodell (z. B. Stressmodell) Aussagen über längerfristige Gesundheitsfolgen treffen. Epidemiologische Lärmwirkungsstu-

dien erlauben es, die Assoziation der Auftretenshäufigkeit (Prävalenz) und des Entstehens bzw. Neuauftretens (Inzidenz) sowie der Langfristigkeit von gesundheitlichen Beeinträchtigungen und langjähriger Geräuschbelastung statistisch zu analysieren. Allerdings bestehen hier methodische Restriktionen, die auf der Qualität von Daten beruhen. Beispiele hierfür sind der Auflösungsgrad und die Vollständigkeit von Sekundärdaten zur Gesundheit sowie akustischer, z. B. Raster-Lärmkarten entnommener Daten, die (mangelnde) Verfügbarkeit von Informationen über Störvariablen bzw. weitere Risikofaktoren, Unterschiede in der Datenqualität bei mehrjähriger Betrachtung, z. B. wenn sich Lärmberechnungsverfahren oder – bei Verkehrslärm – die Infrastruktur ändern). Als Resultat können Assoziationen zwischen Geräuschbelastung und gesundheitlichen Zuständen aufgezeigt werden, ohne dass dabei zwangsläufig Aussagen zur Kausalität getroffen werden können.

Für alle drei Ebenen der betrachteten Wirkungen (kurz-, mittel- und langfristig) gilt, so führen Guski et al. (2012, S. 5) weiter aus, dass aus den statistischen Beziehungen zwischen der Geräuschexposition und den Wirkungen Expositions-Wirkungskurven erarbeitet werden, die bzgl. der Verallgemeinerbarkeit Limitationen enthalten, da sie an zeitlichen, methodischen und umweltbezogenen Bedingungen gebunden sind. "Hier zeigt sich regelmäßig, dass es – wenn überhaupt – kontinuierliche Beziehungen gibt, die keinen „Knick“ aufweisen, welcher als eine sprunghafte Änderung der Wirkung bei Änderung der Belastung interpretiert werden könnte." (Guski et al., 2012, S. 5). Daraus ergibt sich für die Autoren, dass ein oder mehrere Grenzwerte aus solchen Expositions-Wirkungskurven nicht unmittelbar ableitbar sind, sondern die Kurven vielmehr als wissenschaftlich-empirische Grundlage für die gesellschaftliche Diskussion über die Zumutbarkeit von Lärm verwendet werden können (vgl. Abbildung 2-2).

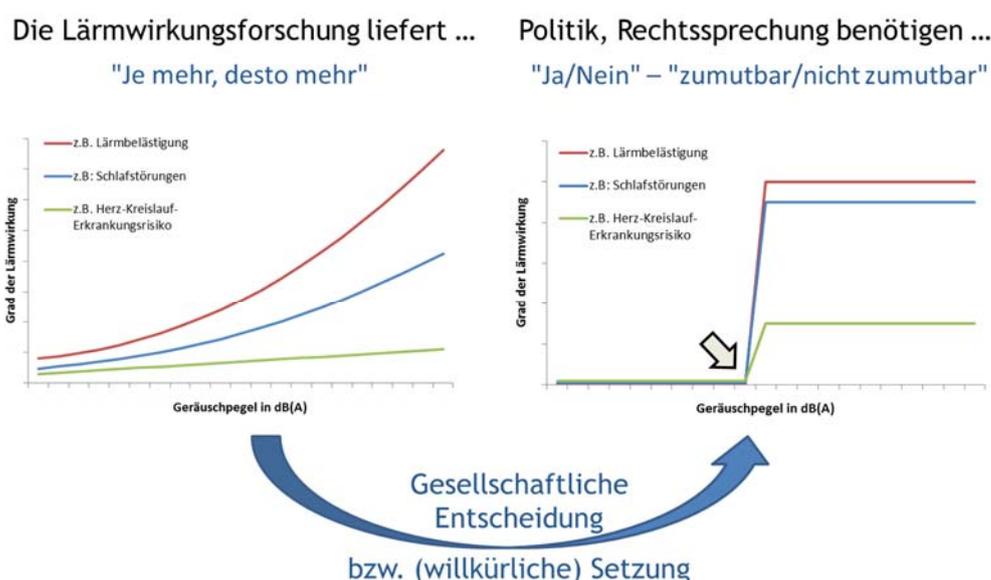


Abbildung 2-2: Expositions-Wirkungskurven in der Lärmwirkungsforschung und Zumutbarkeitskriterien in Politik und Rechtsprechung.

Bezogen auf die Wirkung von Lärm auf physiologische Reaktionen während des Schlafs (Ebene der kurzfristigen Wirkungen) verweisen Guski et al. (2012) auf die Polysomnografie als Goldstandard zur Messung der Schlafqualität (vgl. auch Publikationen zu den DLR-Schlafstudien, u. a. Elmenhorst et al., 2012; Müller et al., 2015). Dabei werden – normalerweise in 30-Sekunden-Epochen – Schlafstadien ermittelt, wobei die Zustände Wach, S1, S2, S3, S4 und der REM-Schlaf (Rapid Eye Movement Sleep, Traumschlaf) unterschieden werden. Die Stadien S1, S2 und der REM-Schlaf zählen zum Leichtschlaf, die Stadien S3 und S4 zum Tiefschlaf.

"Aufwachreaktionen sind als ein Wechsel aus einem der Schlafstadien S1, S2, S3, S4 oder REM in das Stadium Wach definiert. Als solche muss das für Aufwachreaktionen typische Muster in EEG, EOG und EMG mindestens die Hälfte einer 30 Sekunden Epoche bestimmen, damit letztere als Wach klassifiziert wird." (Guski et al., 2012, S. 11-12.) In den DLR-Feldstudien zur Wirkung nächtlichen Fluglärms am Flughafen Köln/Bonn (Basner et al., 2004) sowie zur Wirkung von nächtlichem Bahnlärm im Rheintal (Elmenhorst et al., 2012) wurde allerdings eine stärker präventivmedizinische Definition der Aufwachreaktion gewählt, in dem neben Schlafstadienwechsel in das Stadium Wach auch Schlafstadienwechsel in das Leichtschlafstadium S1 berücksichtigt wurden.

Schließlich nennen Guski et al. (2012, S. 12) folgende Gründe für die Eignung von Aufwachreaktionen als (physiologischer) Indikator für lärmbedingte Schlafstörungen:

- "1. Aufwachreaktionen stellen einen guten Kompromiss bezüglich Sensitivität und Spezifität dar, so dass alle relevanten Schlafstörungen erfasst werden. Die potenzielle Erinnerungsfähigkeit von Aufwachreaktionen und die Assoziation von Aufwachreaktionen mit eingipfligen und verlängerten Aktivierungen des autonomen Nervensystems (Sforza et al., 2004), die langfristige Ursache kardiovaskulärer Folgeerkrankungen sein können (Muzet, 2007), bestimmen hier die medizinische Relevanz. Arousals, also kürzere Aktivierungsreaktionen, führen weder zu erinnerbarem Erwachen noch zu ausgeprägten vegetativen Aktivierungen (Basner et al., 2007; Sforza, Jouny & Ibanez, 2000).*

*Die Anzahl zusätzlicher Aufwachreaktionen korreliert gut mit Veränderungen der Schlafstruktur, die ebenfalls als Schlafstörung klassifiziert werden. So werden ca. 45% der Varianz in der Änderung des Tiefschlafanteils durch die Anzahl zusätzlicher Aufwachreaktionen aufgeklärt (Basner & Samel, 2005).*

*Es herrscht Einigkeit unter Schlafforschern, dass lärmbedingte Aufwachreaktionen eine relevante Schlafstörung darstellen (Ollerhead et al., 1992). Auch neuere Forschungsergebnisse deuten darauf hin, dass Aufwachreaktionen einen geeigneten Indikator für lärmbedingte Schlafstörungen darstellen (Basner, et al., 2008; Griefahn, et al., 2008)."*

Als weitere Methoden zur Quantifizierung der Lärmwirkung auf den Schlaf nennen Guski et al. (2012) Fragebögen, signalisiertes (bewusstes) Erwachen, das Elektrokardiogramm (EKG) und die Aktimetrie. Die Autoren erwähnen dazu einschränkend, dass diese Methoden in der Regel weniger sensitiv sind und eine

geringere Aussagekraft haben. Sie geben aber als Vorteile an, dass die Methoden im Vergleich zur Polysomnografie weniger invasiv (den Schlaf weniger beeinflussen) sowie im Aufwand und Kosten geringer sind und somit größere Stichprobenumfänge untersucht werden können.

Insgesamt werden von Guski et al. (2012) neben den akuten physiologischen Wirkungen von (Flug-) Lärm auf den Schlaf folgende weitere Wirkungsvariablen betrachtet:

- Folgewirkungen am Tag danach sowie als Langzeitfolgen;
- Wirkungen von Lärm auf Kinder;
- Kardiovaskuläre Effekte (Blutdruck, Hypertonie, Herzinfarkt);
- Medikamentengebrauch und -verschreibung;
- sowie endokrine Biomarker (Stresshormone Saliva-Cortisol, Adrenalin, Noradrenalin);
- Belästigung und (berichtete als auch physiologische) Schlafstörungen in den morgendlichen und abendlichen Nachtrandstunden.

Als konsistentes Ergebnis bei den Untersuchungen von Fluglärm auf Kinder geben Guski et al. (2012) die Auswirkungen des Lärms auf die Leseleistung an, wonach Fluglärm die Leseleistung einschränkt. Weiterhin erleben Kinder eine Belästigung und Einschränkung der gesundheitsbezogenen Lebensqualität. In der NORAH-Studie, deren Ergebnisse erst nach Fertigstellung des Gutachtens von Guski et al. (2012) vorgestellt wurden, werden diese Befunde bestätigt (Klatte et al., 2014). Klatte et al. (2014) untersuchten in der NORAH-Studie auch den Effekt der abendlichen und nächtlichen Fluglärmexposition am Wohnort (20:00 Uhr bis 06:00 Uhr) in der Annahme, dass die Gedächtniskonsolidierung bei Kindern während des Schlafs durch die Luftverkehrsgeräuschbelastung in der Nacht beeinträchtigt sein kann. Sie fanden Effekte in vergleichbarer Größenordnung auf die kognitive Leistung und gesundheitsbezogene Lebensqualität von Grundschülerinnen und -schüler der 2. Schulklasse wie bei Einbeziehung der Fluglärmexposition tagsüber am Schulstandort. Aufgrund der hohen Interkorrelation zwischen den Expositionsmaßen konnte keine differentielle Wirkung der Luftverkehrsgeräuschexposition an den Standorten (Schule/Wohnort) bzw. zu verschiedenen Tageszeiten der Exposition (Tag/Nacht) festgestellt werden. Eine entsprechende Untersuchung mit vergleichbarem Studiendesign steht für Schienenverkehrslärm noch aus. Insgesamt bedeuten diese Befunde zur lärmbedingten Beeinträchtigung der kognitiven Leistung von Kindern, dass diese Wirkungen nicht spezifisch als Folge von nächtlicher Geräuschbelastung identifizierbar sind und daher zur Beurteilung nächtlicher Geräuschexpositionen und hierbei der Prüfung der Bedeutung von Maximalpegeln nicht geeignet sind (mangelnde Spezifität).

## 2.2 Analysen zu psychologischen Wirkungen nächtlichen Bahnlärms

### 2.2.1 Auswahl der psychologischen Wirkungskenngröße

Unter der psychologischen Kenngröße der Wirkung nächtlicher Schienenverkehrsgeräuschbelastung wird in diesem Gutachten die folgende in Befragungen erhobene Größe verstanden:

**Schlafgestörtheit durch Schienenverkehrslärm (berichtete schienenverkehrslärmbedingte Schlafstörungen):** Hierunter werden Angaben zu Fragen darüber verstanden, inwieweit der Schienenverkehrslärm nach Meinung der Befragten den Schlaf gestört haben. Dies kann sowohl bezogen auf eine zurückliegende Nacht, oder zusammengefasst bezogen auf Nächte über einen längeren Zeitraum (z. B. 12 Monate) erfolgen. Der fachlich in der Lärmwirkungsforschung traditionell verwendete Begriff lautet "Schlafgestörtheit" bzw. "Gestörtheit beim Schlaf". Vergleichbare Gestörtheitsfragen beziehen sich unter anderem auch auf andere Aktivitäten tagsüber wie Telefonieren, Fernsehschauen, Arbeiten, Lesen, etc. "Gestörtheit" meint dabei immer das subjektive Erleben von Störungen. Um die mittels Befragungen erfasste Schlafgestörtheit deutlicher von physiologischen Messungen von Schlafparametern und daraus abgeleiteten lärmbezogenen Schlafstörungen zu unterscheiden, wurde in den letzten Jahren in manchen Publikationen auch der Begriff "berichtete Schlafstörungen" oder "subjektive Schlafstörungen" eingeführt. Streng genommen ist es nicht dasselbe wie "Schlafgestörtheit", wenn – wie in der NORAH-Studie zur Belästigung und Lebensqualität – nicht nach einzelnen Störungsereignissen, sondern nach Gestörtheit als Summe des Erlebens von Störungsereignissen gefragt wird. Dennoch werden in diesem Gutachten zur Abgrenzung von den hier auch behandelten, aus physiologischen Messungen ermittelten Schlafstörungen die Begriffe "Schlafgestörtheit" und "berichtete Schlafstörungen" synonym verwendet.

Die lärmbedingte Schlafgestörtheit kann in einer Einzelfrage erhoben oder mittels mehrerer Fragen getrennt nach Phasen (Einschlafphase, Schlaf während der Nacht, Ausschlafphase frühmorgens) erfasst werden. Im Rahmen der Re-Analysen von Daten der NORAH-Studie werden in diesem Gutachten die untersuchten, berichteten Schlafstörungen durch Schienenverkehrslärm auf die Gestörtheit während des Einschlafens, während des Schlafs in der Nacht (während des Durchschlafens) und am frühen Morgen (während des Ausschlafens) insgesamt in den zurückliegenden 12 Monaten betrachtet. Sie wurden jeweils orientiert an den IC BEN-Empfehlungen zur Lärmbelästigung (Fields et al., 2001, ISO/TS 15666) mit Hilfe einer fünfstufigen Antwortskala von "(1) nicht..." bis "(5) äußerst gestört" erhoben. Für die Schlafgestörtheit gilt, dass die Zeitangabe von 12 Monaten, über die in der Befragung eine integrierte Beurteilung erfolgen soll, nicht datumsscharf zu verstehen ist, sondern eine Aufforderung darstellen soll, eine Belästigungs-/Gestörtheitsbeurteilung über einen längeren Zeitraum vorzunehmen, die den Lärm in unterschiedlichen Jahreszeiten einschließt (Fields et al., 2001).

Ähnlich wie bei der Lärmbelästigung wird in der Lärmwirkungsforschung bei den berichteten Schlafstörungen der Anteil der hoch schlafgestörten Personen (%HSD, *highly sleep disturbed*) bestimmt, in dem die Personen gezählt werden, welche die oberen Antwortstufen zur Gestörtheit durch Lärm angeben - hier im Gutachten: die Stufen "(4) stark..." und "(5) äußerst gestört" gemäß IC BEN-Empfehlung zur Definition des Anteils hoch belästigter Personen (Fields et al., 2001).

Das Kriterium "Prozentanteil hoch schlafgestörter Personen (%HSD; *highly sleep disturbed*) und zum Teil auch das weiter gefasste Kriterium "Prozentanteil schlafgestörter Personen" (%A; *sleep disturbed*), das auch eine "mittlere" Gestörtheit (die obersten 50% der Abstufungen auf der Beurteilungsskala) einschließt, sind seit vielen Jahrzehnten etablierte Wirkungsgrößen in der Lärmwirkungsforschung, die regelmäßig deutliche

Zusammenhänge zu akustischen Belastungsgrößen aufweisen. %HSD und %SD haben international Eingang in Verfahren zur Beurteilung der Auswirkungen von Lärm auf die Bevölkerung gefunden.

Zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Gutachtens hat die Weltgesundheitsorganisation WHO die Aktualisierung der „WHO Community Noise Guidelines“ aus dem Jahr 1999 (Berglund et al., 1999) für den europäischen Raum in Arbeit. Im Zuge dieser Aktualisierung sind systematische Evidenz-Reviews zu verschiedenen Auswirkungen des Umgebungslärms, darunter auch zu den Auswirkungen auf den Schlaf durchgeführt worden. In dem Evidenz-Review zu den Lärmauswirkungen auf den Schlaf ist neben der Analyse von Studien zu physiologischen Aufwachreaktionen (vgl. Abschnitt 2.4.1) das %HSD-Kriterium erneut aufgegriffen und die Evidenz der Expositions-Wirkungsbeziehungen hierzu dargestellt worden. (Basner et al., 2016; McGuire & Basner, 2017). Weiterhin finden das %HSD- als auch das %SD-Kriterium zum Beispiel in der Europäischen Umgebungslärmrichtlinie 2002/49/EG und in der VDI-Norm 3722-2 zur Gesamtlärbewertung Anwendung.

In der Lärmwirkungsforschung ist bekannt, dass neben der Geräuschbelastung nicht-akustische Faktoren mit der Lärmbelästigung assoziiert sind (Fields, 1993; Guski, 1999; Miedema & Vos, 1999). Zudem können Belästigungs- und Gestörtheitsurteile örtlich und zeitlich bei vergleichbarem Geräuschpegel (zumeist Mittelungspegel) unterschiedlich ausfallen. Diese Urteile weisen also eine gewisse Dynamik auf, die – soweit sie nicht durch Geräuschpegelunterschiede erklärbar sind – oftmals mit dem Einfluss nicht-akustischer Faktoren begründet werden. In Bezug auf berichtete Schlafstörungen ist der Zusammenhang mit nicht-akustischen (Einstellungs-) Faktoren mit Ausnahme der individuellen Disposition der Lärmempfindlichkeit weniger intensiv untersucht worden, kann aber aufgrund der hohen Korrelation zwischen Lärmbelästigung und berichteten Schlafstörungen als wahrscheinlich angenommen werden. Zunächst einmal ist festzustellen, dass berichtete lärmbezogene Schlafstörungen mit nächtlichen Geräuschpegeln korrelieren, diese Urteile demnach nicht völlig losgelöst von der tatsächlichen Geräuschexposition entstehen.

Nicht-akustischen Faktoren wird mitunter die Rolle zugesprochen, den Zusammenhang zwischen der Exposition (Geräuschpegel) und der Lärmbelästigungsreaktion zu verzerren (Fidell, 1988), teils auch mit Absicht, um Verantwortliche wie Betreiber, Politik, Verwaltung durch (höhere) Belästigungsangaben zu weiteren Bemühungen um Lärminderung zu motivieren. Der Begriff "Verzerrung" (*response bias*) ist allerdings nur dann gerechtfertigt, wenn erwartet wird, dass Lärmbelästigungsurteile ebenso wie Angaben zu lärmbedingten Schlafstörungen ausschließlich Schall(reiz)reaktionen ähnlich einer Lautheitsbeurteilung darstellen (sollen). Dies ist allerdings nicht der Fall. Nach der Definition von Guski et al. (1999) beinhaltet ein Lärmbelästigungsurteil die Komponenten (1) Störung durch Lärm, (2) emotionale Bewertung und (3) wahrgenommene (fehlende) Möglichkeit, den Lärm zu bewältigen. Ähnlich beinhalten berichtete Schlafstörungen zumindest die Komponente 1 (den Störungsaspekt), sowie vermutlich Komponente 3 (fehlende Bewältigungsmöglichkeiten).

Folgt man dieser Definition, dann lässt sich konstatieren, dass es sich bei der Lärmbelästigung ebenso wie bei der berichteten Schlafgestörtheit vielmehr um die Beurteilung einer Lärmsituation handelt, die einerseits Geräusche mit all ihren Merkmalen (Intensität, Dauer, Häufigkeit, Charakteristik) beinhaltet, andererseits

aber auch situative Bedingungen (u. a. Aufenthaltsort, Dämmung bzw. Fensterart und -stellung bei innerhäuslichem Aufenthalt, Tageszeit) und die Person selbst, einschließlich der ausgeübten Aktivität (hier: Schlafen), die durch die Geräusche gestört wird, und den physischen und psychischen Möglichkeiten zur Bewältigung der Lärmsituation. Nicht von ungefähr hat die Definition der Lärmbelästigung große Ähnlichkeit mit der Definition von psychischem Stress, wonach dieser entsteht, wenn akute Umwelthanforderungen die psychologischen und physiologischen Regulationsmöglichkeiten eines Menschen überschreiten, insbesondere in Situationen, die Unvorhersehbarkeit und Unkontrollierbarkeit einschließen (vgl. Lazarus & Launier, 1978; Koolhaas et al., 2011). Für die berichteten Schlafstörungen ist ähnlich anzunehmen, dass die hierzu vorgenommenen Angaben der lärmbedingten Gestörtheit des Schlafs, eine Bewertung der Situation darstellt, in der das Schlafen-wollen (und nicht -können) und die wahrnehmbare Geräuscheinwirkung zusammentreffen.

Die mit Belästigungs- und Gestörtheitsangaben assoziierten nicht-akustischen Faktoren – insbesondere Lärmempfindlichkeit und Einstellungen gegenüber der Lärmquelle und als verantwortlich wahrgenommenen Akteure – entpuppen sich schließlich als solche, die auch im Zusammenhang mit der Einschätzung der eigenen Lärmbewältigungsmöglichkeiten stehen (Schreckenberg et al., 2017a).

So oder so haben also die weiteren nicht-akustischen Faktoren etwas mit der akustisch beschreibbaren Lärmsituation, wie sie von Betroffenen, Verwaltung/Politik oder Betreiber bewältigt bzw. geregelt wird, zu tun und sollten auch in der Lärminderungsplanung Berücksichtigung finden. Verändern sich Belästigungs- und Gestörtheitsreaktionen (nicht in Einzelfällen, sondern bevölkerungsweit), ohne dass eine Änderung in Beurteilungspegeln erkennbar ist, so kann dies daran liegen, dass sich (a) akustische Bedingungen verändert haben, die im Beurteilungspegel ggf. nicht adäquat abgebildet sind (z.B. Ereignishäufigkeit, Zeitstruktur, psychoakustische Merkmale) und/oder (b) der Kontext, in dem die Geräusche auftreten. Änderungen in der Lebenssituation von Personen können als drittes auch Ursache von Belästigungs-/ Gestörtheitsänderungen sein, dies gilt dann häufiger in Einzelfällen als bevölkerungsweit. Zu Kontextänderungen zählen z. B. Ankündigungen von künftigen Belastungsänderungen (z. B. durch Aus- oder Neubau einer Bahnstrecke), die bereits im Vorfeld zum Eintritt der Belastungsänderung zu Änderungen in den Belästigungs- und Gestörtheitsurteilen führen können. Bei einem erweiterten Verständnis von Maßnahmen zum Schutz der Bevölkerung vor erheblicher Belästigung und Gestörtheit wären in solch einer Situation Lärmmanagement-Maßnahmen vorzusehen, die Aspekte der Öffentlichkeitsarbeit (Information, Konsultation, Partizipation) aufgreifen.

Das heißt, der Schutz der Bevölkerung vor erheblicher Belästigung und – im Falle nächtlicher Geräuschbelastungen – vor der nächtlichen (berichteten) Gestörtheit des Schlafs – umfasst damit Maßnahmen, die geeignet sind, die Lästigkeit von bzw. Gestörtheit in Lärmsituationen zu minimieren. Das schließt akustische, operative, rechtliche und öffentlichkeitsbezogene Maßnahmen ein.

Abschließend in diesem Abschnitt sei noch darauf hingewiesen, dass nicht-akustischen Faktoren nicht immer bzw. nicht in Gänze Einflussfaktoren der Belästigungs- und Gestörtheitsurteile darstellen müssen, sondern zum Teil auch als Folge davon zu betrachten bzw. reziproke Beziehungen anzunehmen sind (vgl.

Kroesen et al., 2010; Schreckenberget al., 2017b). Außerdem hat sich in der NORAH-Schlafstudie herausgestellt, dass auch physiologische Parameter der Schlafqualität mit der Einstellung zur Lärmquelle assoziiert sind, auch wenn die Kausalrichtung dieser Beziehung noch unklar ist (Müller et al., 2015).

Aus wissenschaftlicher Sicht kann also nach bisherigen Erkenntnissen aus der Annahme, dass neben dem Geräuschpegel auch nicht-akustische Faktoren mit berichteter Schlafgestörtheit zusammenhängen, kein Hinderungsgrund abgeleitet werden, die Schlafgestörtheit (bzw. den Anteil hoch schlafgestörter Personen) für die Definition von Schutzkriterien bzw. für die Prüfung der Eignung eines Maximalpegelkriteriums für die Beurteilung von Schienenverkehrslärm heranzuziehen.

### 2.2.2 Datengrundlage: NORAH-Studie zur Belästigung & Lebensqualität

Es existiert eine Vielzahl von Feldstudien, in denen die Wirkung von Schienenverkehrslärm auf die Belästigung und/oder Gestörtheit des Schlafs mit Hilfe von Befragungen untersucht wurde, die wiederum in Meta-Analysen und daraus abgeleiteten Expositions-Wirkungsfunktionen eingeflossen sind (Miedema & Vos, 2007; Basner & McGuire, 2016). Diese Funktionen beziehen sich überwiegend auf nächtliche Mittelungspegel. In einigen Studien zum Schienenverkehrslärm werden Belästigungs- und Schlafstörungswirkungen auch auf den Maximalpegel bezogen (z.B. Fields & Walker, 1982; Öhrström & Skanberg, 1996). Nach Kenntnis der Gutachter liegt allerdings derzeit nur mit der NORAH-Studie (Noise-Related Annoyance, Cognition, and Health), Studienteil "Belästigung und Lebensqualität" (Wothge et al., 2017) eine Untersuchung vor,

- in der Stör- und Belästigungswirkung nächtlicher Schienenverkehrsgeräusche erhoben in Befragungen berechneten kontinuierlichen Mittelungs- und Maximalpegeldaten und zum Teil Zugzahlen adressengenau zugeordnet sind,
- damit ein direkter Vergleich der Expositions-Wirkungsbeziehungen bezogen auf unterschiedliche akustische Kenngrößen möglich ist und
- die Geräuschbelastungsdaten zudem auf einen breiten Mix von Zugarten beruhen, die aktuell im bundesdeutschen Bahnstreckennetz mit unterschiedlicher Höhe im Verkehrsaufkommen unterwegs sind (Güterzüge, Personenzüge im Nah- und Fernbereich einschließlich ICE-Verkehr), sodass die Untersuchung einen breiten Range an Geräuschbelastung abdeckt, der sich aus dem in Deutschland üblichen Bahnverkehr ergibt.

Die NORAH-Studie umfasst verschiedene Studienteile ("Module"), in denen zu den Wirkungsbereichen Gesundheit), kognitive Leistung und Lebensqualität von Kindern und Belästigung und Lebensqualität der erwachsenen Bevölkerung die Effekte von Flug-, Schienen- und Straßenverkehrslärm auf Flughafenrainer untersucht wurde. Vornehmlich fand die Studie im Rhein-Main-Gebiet im Umfeld des Flughafens Frankfurt statt, im Studienteil "Belästigung und Lebensqualität" fanden zudem Erhebungen an den Flughäfen Berlin-Brandenburg, Köln/Bonn und Stuttgart statt.

Für die nachfolgenden Sensitivitätsanalysen wurden Befragungs- und Akustikdaten des Modul M1 "Belästigung und Lebensqualität" der NORAH-Studie ausgewertet (Wothge et al., 2017). "Sensitivitätsanalyse"

meint hier, dass im Rahmen der Auswertungen nicht so sehr die absolute Höhe der ermittelten Beeinträchtigungen (etwa im Sinne der absoluten Zahl schlafgestörter Personen) im Vordergrund steht. Vielmehr geht es darum, die Sensitivität der betrachteten akustischen Kenngrößen zur Beschreibung des Ausmaßes der erlebten Schlafstörungen durch Schienenverkehrsgeräusche, d.h. des Prozentanteils hoch schlafgestörter Personen zu untersuchen und um den relativen Vergleich der auf den verschiedenen akustischen Kenngrößen beruhenden Expositions-Wirkungsbeziehungen.

In die Sensitivitätsanalysen wurden die Daten einer Querschnitterhebung in 2012 am Flughafen Frankfurt mit Schwerpunkt Schienenverkehrslärm einbezogen. In dieser Erhebung wurden 3.597 Personen untersucht, von 2.085 Personen davon liegen zusätzlich im Rahmen des vorliegenden Gutachtens ermittelte, adressgenaue Angaben zu den Zugzahlen im Radius von 250 m vor. Durch Verschneidung der Befragungs- und Akustikdaten liegen für die nachfolgenden Analysen folgende Fallzahlen vor:

- für die Gestörtheit beim Einschlafen:  $n = 2.070$ ;
- für die Gestörtheit beim Nachtschlaf:  $n = 2.062$ ;
- für die Gestörtheit beim Ausschlafen:  $n = 2.065$ ;
- für den Schlafgestörtheits-Score (Mittelwertsscore aus den drei Einzelurteilen zur Schlafgestörtheit):  $n = 2.072$  (nach Imputation).

Die mit Schienenverkehrslärm assoziierte Gestörtheit des Schlafs wurde mittels einer Ratingskala mit fünf Abstufungen von (1) ‚überhaupt nicht...‘ bis (5) ‚äußerst gestört‘ analog zur Belästigungserhebung gemäß der ISO/TS 15666 bzw. der ICBEN-Empfehlung (Fields et al., 2001) erfasst. Erhoben wurden die Antworten auf drei Items: Störung durch den Lärm vom Schienenverkehr "... beim Einschlafen", "... beim Nachtschlaf", "...beim Ausschlafen" (vgl. Tabelle 2-1). Die Fragen sind Teil einer Abfrage von insgesamt acht Tätigkeiten, die durch Schienenverkehrslärm gestört werden können. Die übrigen, hier nicht dargestellten Fragen beziehen sich auf Aktivitätenstörungen am Tage (Kommunikation, Ruhe/Erholung, Konzentration).

Tabelle 2-1: Fragen zur Erfassung berichteter Schlafstörungen durch Schienenverkehrslärm in der NORAH-Studie

Wie stark hat Sie der Schienenverkehrslärm in den letzten 12 Monaten in den folgenden Situationen insgesamt gestört?		
1.	beim Einschlafen	Schienenverkehrslärm hat ... 1# überhaupt nicht 2# etwas 3# mittelmäßig 4# stark oder 5# äußerst ... gestört
2.	beim Nachtschlaf  * Für Personen mit Nacht- oder Schichtarbeit: "Oder wann Sie üblicherweise schlafen."	
3.	beim Ausschlafen am Ende der Schlafzeit	

Als Zielgröße wird der Prozentanteil der hoch durch Schienenverkehrslärm schlafgestörten Personen (%HSD; *highly sleep disturbed*) definiert. Personen gelten dabei als hoch schlafgestört, wenn sie aufgrund

ihrer Angaben einen Schlafgestörtheits-Score  $\geq 4$  erreichen, d.h. sich "(4) stark..." oder "(5) äußerst gestört" gefühlt haben.

Die Auswertung erfolgte hauptsächlich mittels inferenzstatistischer Verfahren. Zusammenhänge zwischen Variablen wurden über Korrelationsberechnungen erfasst, logistische Regressionen wurden berechnet, um Expositions-Wirkungsbeziehungen darzustellen. Als Maß für die Modellpassung wurde das Akaike Informationskriterium (AIC) angegeben, das eine Maßeinheit für die Anpassungsgüte eines Regressionsmodells ist (Pinheiro & Bates 2009). Das AIC belohnt auf der einen Seite die Anpassungsgüte mit Hilfe der Likelihoodfunktion und „bestraft“ andererseits die Hinzunahme von weiteren Prädiktoren. 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. Das AIC-Maß wurde im Rahmen dieses Gutachtens auch bei den Expositions-Wirkungsmodellen zu den physiologischen Aufwachwahrscheinlichkeiten angewandt (vgl. Abschnitt 2.4.4). Hierbei ist wichtig darauf hinzuweisen, dass die AIC-Werten zwischen verschiedenen Modellen bezogen auf verschiedene Variablen (mal %HSD, mal physiologische Aufwachwahrscheinlichkeit) anhand unterschiedlicher Stichproben nicht verglichen werden können. Ein Modellvergleich ist nur für dieselbe Kriteriumsvariable innerhalb derselben Stichprobe bezogen auf Modelle mit unterschiedlichen bzw. einer unterschiedlichen Zahl von Einflussvariablen möglich.

Als Wirkungsmaße (abhängige Variable) wurden in den Modellen verwendet: die drei Schlafstörungsvariablen (Störung beim Ein-, Nacht- und Ausschlafen) und der Gesamtscore der Schlafgestörtheit bzw. die daraus abgeleiteten %HSD-Variablen. Als Faktoren (unabhängige Variablen) wurden verwendet: der Mittelungspegel für Schienenverkehrsgeräusche während der Nachtzeit  $L_{pA,eq,22-06h}$  der Maximalpegel der lautesten Zugart  $L_{pAF,max}$  sowie die Kombination von Maximalpegel  $L_{pAF,max}$  und Anzahl der Züge in einem 250 m-Radius zum Tragen.

Für den Vergleich der Expositions-Wirkungsbeziehung zwischen den unterschiedlichen Expositionsmaßen (nächtlicher Schienenverkehrsgeräuschpegel  $L_{pA,eq,22-06h}$ , Maximalpegel  $L_{pAF,max}$  und der Kombination aus Maximalpegel und Zugzahlen im 250 m-Radius) bezogen auf die jeweilige abhängige Variable wurde jeweils ein Modell auf Basis des verallgemeinerten linearen Modells berechnet für

- den Anteil der hoch beim Einschlafen gestörten Personen (Personen mit Werten auf der Schlafstörungsskala größer gleich 4 (%HSD-Anteil Einschlafen));
- den Anteil der hoch beim Nachtschlaf gestörten Personen (Personen mit Werten auf der Schlafstörungsskala größer gleich 4 (%HSD-Anteil Nachtschlaf));
- den Anteil der hoch beim Ausschlafen gestörten Personen (Personen mit Werten auf der Schlafstörungsskala größer gleich 4 (%HSD-Anteil Ausschlafen));
- den Anteil der hoch durch Schienenverkehrsgeräusche insgesamt schlafgestörten Personen (Personen mit Werten auf der Schlafstörungsskala größer gleich 4 (%HSD-Anteil insgesamt));

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 zur Adjustierung verwendeten Co-Determinanten wurden jeweils auf null gesetzt (z-standardisiert), so dass sich die dargestellten Beziehungen zwischen der erfragten Schlafgestörtheit durch Schienenverkehrslärm und dem entsprechend/jeweils verwendeten Expositionsmaß auf den Stichprobendurchschnitt beziehen.

### 2.2.3 Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse der NORAH-Daten

#### Bivariate Zusammenhänge zw. berichteten Wirkungen und akustischen Parametern des nächtlichen Schienenverkehrslärms

Die Korrelationen zwischen den Wirkungsmaßen und den Expositionsmaßen sind in Tabelle 2-2 dargestellt, wobei alle Korrelationskoeffizienten statistisch signifikant sind ( $p < 0,01$ ).

Die berichteten Schlafstörungen sowohl beim Ein-, Nacht- als auch Ausschlafen und insgesamt (zusammengefasst als Mittelwerts-Score aus den Angaben zu den Schlafstörungen beim Ein-, Nacht- und Ausschlafen) korrelieren erwartungsgemäß recht hoch mit der Belästigung durch Schienenverkehrslärm mit Korrelationswerten in Höhe von  $r = 0,63$  bis  $r = 0,68$ . Die Schlafstörungsvariablen korrelieren sowohl mit dem Nachtpegel als auch mit dem Maximalpegel und der Zugzahl im 250 m Radius. Der stärkste Zusammenhang zeigt sich zwischen den berichteten Schlafstörungen und dem nächtlichen Dauerschallpegel mit Werten zwischen  $r = 0,21$  und  $r = 0,24$ . Die Zusammenhänge der Wirkungsmaße mit dem Maximalpegel sind in vergleichbarer Größe, jedoch durchweg etwas niedriger als die Korrelationen mit dem nächtlichen Dauerschallpegel. Die Zugzahl im 250 m-Radius korreliert ebenfalls durchweg signifikant mit den Wirkungsmaßen, die Zusammenhänge sind mit Werten von  $r = 0,11$  bis  $r = 0,12$  jedoch entsprechend im kleineren Bereich.

Tabelle 2-2: Produkt-Moment-Korrelationen von HA und HSD mit  $L_{pA,eq}$ ,  $L_{pAF,Max}$  und Zugzahlen im 250 m Radius

Wirkungen Schienenverkehrslärm	Expositionsmaße Schienenverkehr			
	Belästigung durch Schienenverkehrslärm	$L_{pA,eq,22-06h}$	$L_{pAF,max}$	Zugzahl 250m
Störung beim Einschlafen	0,667	0,233	0,206	0,119
Störung des Nachtschlafs	0,633	0,229	0,201	0,107
Störung beim Ausschlafen	0,634	0,210	0,182	0,112
Gestörtheit des Schlafs insgesamt	0,684	0,238	0,209	0,120

Alle Koeffizienten sind statistisch signifikant mit  $p < 0,01$

Tabelle 2-3 Produkt-Moment-Korrelationen der eingesetzten akustischen Maße

	$L_{pA,eq,22-06h}$	$L_{pAF,max}$	Zugzahl 250m
$L_{pA,eq,22-06h}$	1	0,913	0,271
$L_{pAF,max}$	0,913	1	0,096
Zugzahl 250m	0,271	0,096	1

Alle Koeffizienten sind statistisch signifikant mit  $p < 0,01$

In Tabelle 2-3 sind die Korrelationen der Expositionsmaße untereinander dargestellt, welche ebenso alle signifikant sind. Der nächtliche Schienenverkehrsgeräuschpegel und der Maximalpegel korrelieren erwartungsgemäß sehr hoch miteinander. Bei der Zugzahl im 250 m-Radius zeigt sich eine deutlich stärkere Korrelation mit dem nächtlichen Dauerschallpegel als mit dem Maximalpegel ( $r = 0,39$  vs.  $r = 0,17$ ).

### %HSD durch Schienenverkehrslärm bezogen auf den nächtlichen Dauerschall- und Maximalpegel

In Abbildung 2-3 sind die Expositions-Wirkungs-Kurven zum Anteil hoch durch Schienenverkehrslärm schlafgestörter Personen (beim Ein-, Durch- bzw. Ausschlafen) in Abhängigkeit des Expositionsmaßes (Nachtpegel  $L_{pA,eq,22-06h}$  vs. Maximalpegel  $L_{pAF,max}$ ) dargestellt.

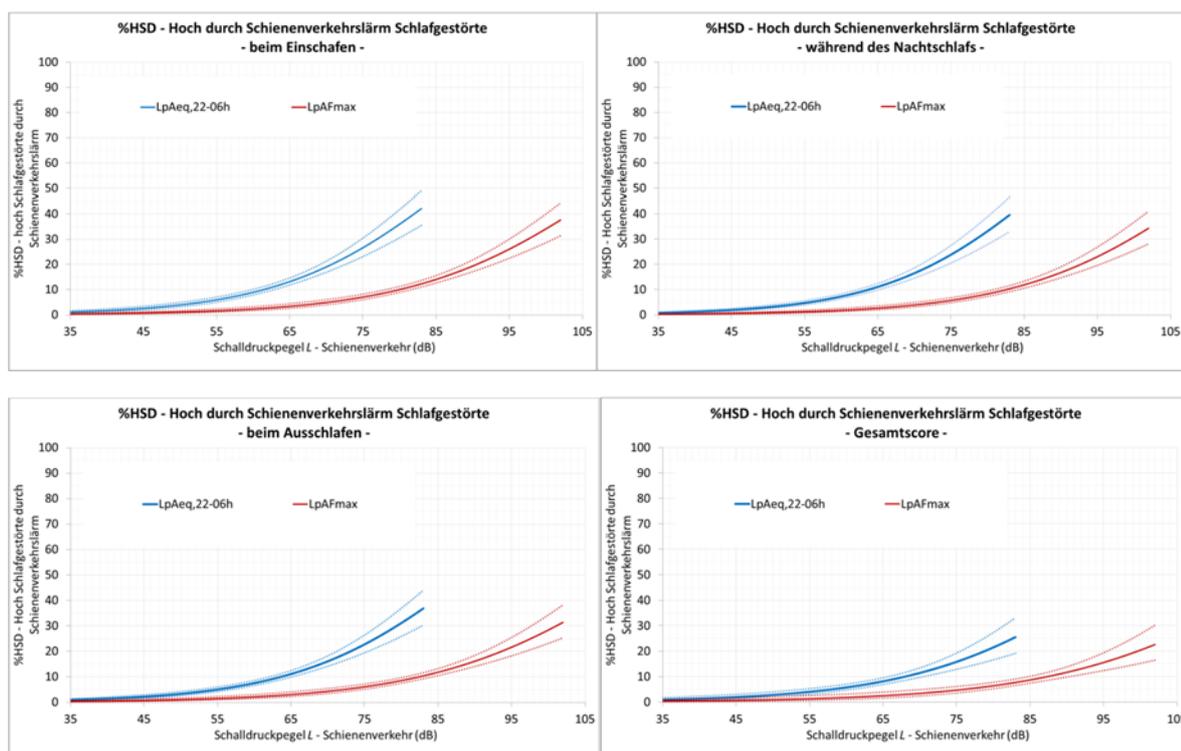


Abbildung 2-3: Prozentanteil hoch beim Einschlafen (oben links), während des Nachtschlafs (oben rechts), beim Ausschlafen (unten links) und beim Schlaf insgesamt (unten rechts) gestörter Personen durch Schienenverkehrslärm (%HSD) in Abhängigkeit des nächtlichen Schienenverkehrsgeräuschpegels  $L_{pA,eq,22-06h}$  bzw. Maximalpegel  $L_{pAF,max}$ .

Anmerkung: Modelle adjustiert nach Befragungsmodus, nächtlichem Straßenverkehrsgeräuschpegel und nächtlichem Flugverkehrsgeräuschpegel.

Der Anteil hoch Schlafgestörter steigt bei allen drei Schlafvariablen (hoch Schlafgestörte durch Schienenverkehrslärm beim Einschlafen, Durchschlafen und Ausschlafen) in Abhängigkeit des Maximalpegels flacher an als in Abhängigkeit des nächtlichen Dauerschallpegels, bewegen sich jedoch für alle drei Wirkungsvariablen in ähnlicher Höhe. Beispielsweise beträgt der Anteil hoch Schlafgestörter beim Einschlafen für den Maximalpegel bei 75 dB etwa 8%, für den nächtlichen Dauerschallpegel liegt er bei etwa 26%. Die Maximalpegelkurve liegt bei allen Variablen unter der Nachtpegelkurve, allerdings ist der Maximalpegelrange mit einem Maximum von 102 dB deutlich größer als der Nachtpegelrange mit einem Maximum von 78 dB beim Schienenverkehrslärm.

Für die Ermittlung von wirkungsbezogenen Kenngrößen des Maximalpegels (vgl. Kapitel 4 ) sind insbesondere die Expositions-Wirkungskurven zur Schlafgestörtheit insgesamt (Abbildung 2-4, unten rechts) relevant. Die Funktionen zu diesen Kurven lauten:

$$\%HSD = \frac{e^{(-7,306+L_{pAeq,06-22h} * 0,075)}}{1+e^{(-7,306+L_{pAeq,06-22h} * 0,075)}} \quad (Gl.-1)$$

bezogen auf den nächtlichen Dauerschallpegel  $L_{pA,eq,22-06hr}$

$$\%HSD = \frac{e^{(-7,975+L_{pAF,max} * 0,066)}}{1+e^{(-7,975+L_{pAF,max} * 0,066)}} \quad (Gl.-2)$$

bezogen auf den Maximalpegel  $L_{pAF,max}$

In Tabelle 2-4 sind mit dem AIC-Wert (Akaike-Informationskriterium) jeweils die Güte der Modellpassung aufgeführt. Je niedriger die AIC-Werte sind desto besser ist die Güte des Modells. Im Hinblick auf die gerechneten Modelle zeigt sich, dass bei den berichteten Störungen beim Ein- und Nachtschlaf sowie bei der Schlafgestörtheit insgesamt das Modell mit dem Expositionsmaß Maximalpegel, bei der berichteten Störung beim Ausschlafen das Modell mit der Kombination von Maximalpegel und Zugzahl am besten geeignet ist. Die Unterschiede zwischen den Modellen in der Modellgüte sind insgesamt jedoch gering. Ein Vergleich der Modelle zur berichteten Schlafgestörtheit mit den Modellen zur physiologischen Aufwachreaktion ist anhand von AIC-Werten nicht statthaft, da hierbei verschiedene Kriteriumsvariablen anhand unterschiedlicher Stichproben untersucht wurden.

Tabelle 2-4: Modellpassung

AV	AIC Wert		
	$L_{pA,eq,22-06h}$	$L_{pAF,max}$	$L_{pAF,max}$ + Zugzahl 250m
Störung beim Einschlafen	1.409,629	1.397,532	1.402,047
Störung beim Nachtschlaf	1.265,970	1.262,588	1.272,948
Störung beim Ausschlafen	1.270,998	1.269,146	1.267,232
Schlafgestörtheit insgesamt	1.023,972	1.020,628	1.023,138

AIC = Akaike Informationskriterium

Die folgenden Abbildungen zeigen die Expositions-Wirkungskurven mit dem Kombinations-Expositionsmaß Maximalpegel und Zugzahl im 250 m-Radius in Abhängigkeit des 20., 40., 60. und 80. Zugzahlperzentils (Abbildung 2-4) Die Anzahl der Züge pro Perzentil sind in den jeweiligen Abbildungen vermerkt.

Der Unterschied zwischen den Kurven ist insbesondere ab einem  $L_{pAF,max} > 80$  dB zwischen dem 20. und dem 40. Perzentil (32 vs. 56 Züge) am größten.

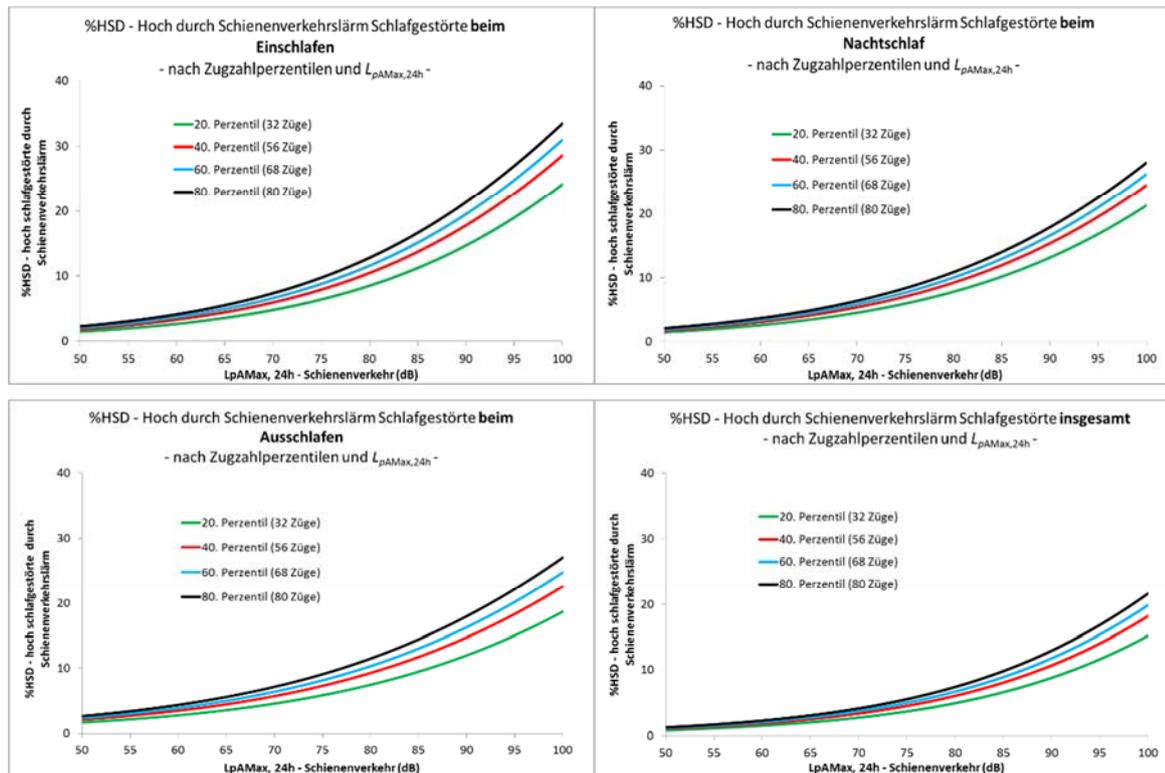


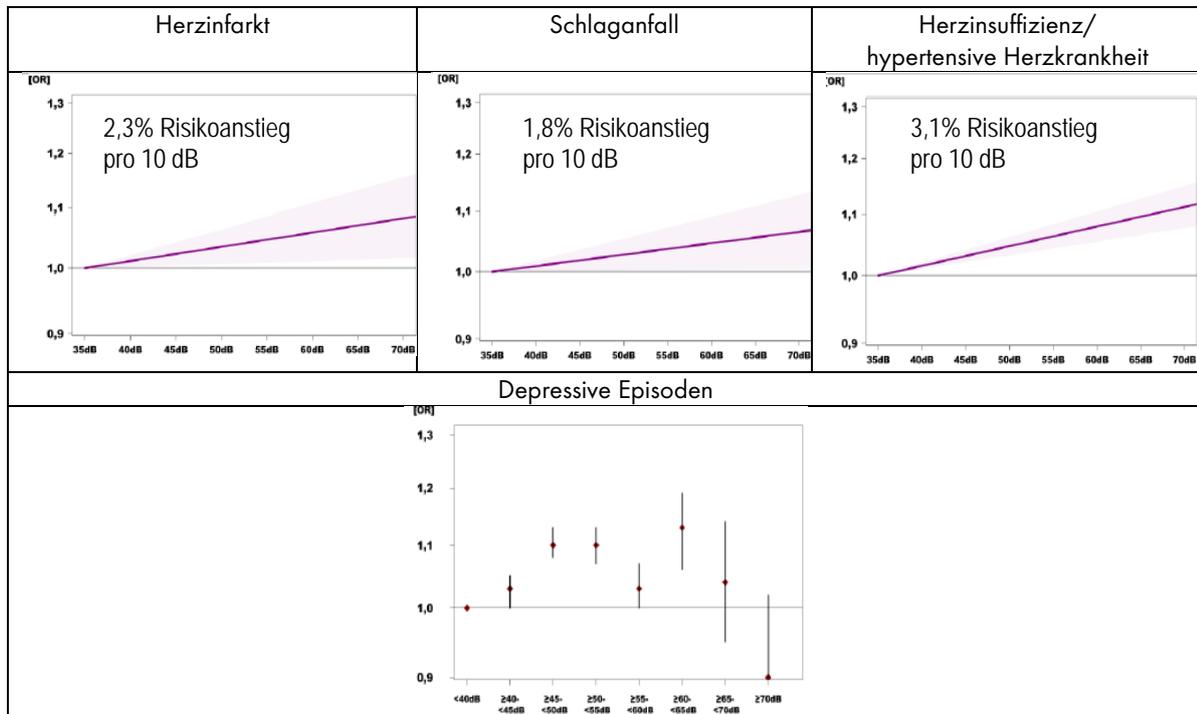
Abbildung 2-4: Prozentanteil hoch beim Ein-, Nacht- und Ausschlafen gestörter Personen (%HSD) durch Schienenverkehrslärm in Abhängigkeit von Maximalpegel  $L_{pAF,max}$  und unterschiedlichen Perzentilstufen der Zugzahl 250 m.

Anmerkung: Modelle zur Gestörtheit durch Schlaf, adjustiert nach Befragungsmodus, nächtlichem Straßenverkehrsgeschäftspegel und nächtlichem Flugverkehrsgeschäftspegel

### 2.3 Epidemiologische Wirkungskenngrößen

Insgesamt besteht kein Zweifel, dass es eine Assoziation zw. Verkehrslärm und kardiovaskulären Erkrankungen gibt; dies ist beim Flug- und Straßenverkehrslärm intensiver untersucht worden als beim Schienenverkehrslärm (Babisch, 2014a, b; Basner et al., 2014; Guski et al., 2012; Seidler et al., 2015; van Kempen et al., 2016). Die derzeit aktuellsten epidemiologischen Studien, in denen die Gesundheitswirkungen von Schienenverkehrslärm in Deutschland untersucht wurden, sind die Bremer Studie zu Umgebungslärm und Gesundheit von Greiser & Greiser (2015) und die Fallkontrollstudie des NORAH-Forschungsverbands (Seidler et al., 2015). In der NORAH-Studie wurden bei Exposition durch Schienenverkehrslärm erhöhte Erkrankungsrisiken für Herzinfarkt (2,3% Risikoanstieg pro 10 dB  $L_{pAeq,24h}$ ), Schlaganfall (1,8% Risikoanstieg

pro 10 dB  $L_{pA,eq,24h}$ ) und Herzinsuffizienz/hypertensive Herzkrankheit (3,1% Risikoanstieg pro 10 dB  $L_{pA,eq,24h}$ ) festgestellt .



(Bildquelle: Seidler et al., 2015)

Abbildung 2-5: Expositions-Wirkungskurven zu Erkrankungsrisiken (Odds Ratio) in Abhängigkeit von der Schienenverkehrslärm-Exposition (24-Stunden-Mittelungspegel  $L_{pA,eq,24h}$ ) aus der NORAH-Fallkontrollstudie

In der Bremer Studie (Greiser & Greiser, 2015) zeigte sich ein erhöhtes Risiko der Gesamtmortalität (Sterblichkeit) tagsüber ab einem  $L_{pA,eq,Tag} > 50$  dB und nachts ab einem  $L_{pA,eq,Nacht} > 45$  dB. Der Risikoanstieg mit zunehmendem Mittelungspegel, ist dabei bezogen auf den Tagespegel größer als bezogen auf den Nachtpegel (vgl. Abbildung 2-5)

Ob nun der Lärm tagsüber oder der nächtliche Lärm hierbei grundsätzlich einen größeren Effekt hat, kann zum jetzigen Zeitpunkt nicht genau gesagt werden. Einzelne Studien finden etwa beim Fluglärm bezogen auf den Dauerschallpegel nächtlicher Stunden höhere (oder dann erst statistisch signifikante) kardiovaskulärer Erkrankungsrisiken (Järup et al., 2008, bezogen auf Bluthochdruck; Greiser & Greiser, 2010, bezogen auf verschiedene Herz-Kreislaufkrankungen). Bezogen auf Straßenverkehrslärm wiederum werden erhöhte Erkrankungsrisiken bezogen auf einen 24-Stundenpegel festgestellt (Järup et al., 2008).

Tabelle 2-5: Risikoschätzer (Odds Ratio) zur Gesamtmortalität von Männern und Frauen in Bremen durch Schienenverkehrsgeräuschexposition ( $L_{pA,eq}$ ) am Tag und in der Nacht aus der Bremer Studie zu Umgebungslärm und Gesundheit (Greiser & Greiser, 2015).

$L_{pA,eq}$ in dB	Odds Ratio (95%-Vertrauensintervall) zur Gesamtmortalität bei Männern und Frauen im Alter von 40 bis 75 Jahren (aus Greiser & Greiser, 2015)	
	Tag	Nacht
45		1,00 (1,00 - 1,01)
50	1,02 (1,00 - 1,03)	1,02 (1,01 - 1,04)
55	1,11 (1,01 - 1,21)	1,04 (1,01 - 1,08)
60	1,21 (1,02 - 1,43)	1,07 (1,02 - 1,12)
65	1,31 (1,03 - 1,68)	1,09 (1,02 - 1,16)
70	1,43 (1,04 - 1,98)	1,11 (1,02 - 1,20)
75	1,56 (1,04 - 2,32)	1,13 (1,03 - 1,24)
76	1,58 (1,05 - 2,40)	1,14 (1,03 - 1,25)
77		1,14 (1,03 - 1,26)

In der NORAH-Studie wurden Erkrankungsrisiken hauptsächlich in Assoziation mit dem Dauerschallpegel für 24 Stunden untersucht, aber in Sensitivitätsanalysen auch die Assoziationen mit dem nächtlichen Dauerschallpegel für verschiedene Zeitscheiben (22:00 Uhr - 06:00 Uhr, 23:00 Uhr - 05:00 Uhr, 23:00 Uhr - 07:00 Uhr) sowie für einzelne Nachtstunden. Die Daten zeigen für den Schienenverkehrslärm kaum Unterschiede im Ausmaß der Erkrankungsrisiken, je nachdem, ob man den 24-Stunden-Dauerschallpegel oder einen der nächtlichen Dauerschallpegel zugrunde liegt. Teilweise wie z. B. beim Herzinfarkt konnten statistisch signifikant erhöhte Erkrankungsrisiken in Assoziation mit der Fluglärmmexposition in einzelnen Nachtstunden (z. B. 05:00 Uhr - 06:00 Uhr im Fall des Herzinfarkts) festgestellt werden, auch wenn bezogen auf den Dauerschallpegel für mehrstündige Nachtzeiträume oder für 24 Stunden keine statistisch signifikante Erhöhung des Erkrankungsrisikos vorlag. Wie bereits dargestellt, zeigt die Bremer Studie dagegen höhere Erkrankungsrisiken in Assoziation mit dem Tagesdauerschallpegel.

Die meisten der Studien zu verkehrslärmassoziierten Erkrankungsrisiken verwenden jedoch einen 24 Stunden-Mittelungspegel ( $L_{pA,eq,24hr}$ ,  $L_{den}$ ,  $L_{dn}$ ) als Expositionsmaß, so dass aus diesen Studien keine quellenübergreifenden Aussagen zu spezifischen Wirkungen des nächtlichen Verkehrslärms auf langfristige Erkrankungen abgeleitet werden können.

Guski et al. (2012) stellen mit Fokus auf Fluglärm dazu fest, dass zu den Lärmauswirkungen auf kardiovaskuläre Parameter, insbesondere Blut(hoch)druck, zahlreiche Untersuchungen vorliegen, "die in Erwachsenenpopulationen eindeutige und signifikante statistische Zusammenhänge zeigten, auch wenn diese nur mit Vorsicht kausal zu interpretieren sind".

Bezogen auf die Nacht kann heutzutage noch nicht genau gesagt werden, ob bzw. zu welchen Anteilen Zusammenhänge zwischen Lärm und kardiovaskulären Erkrankungsrisiken

- (a) auf Schlafmangel, -fragmentierung bzw. lärmbedingtes Aufwachen;
- (b) auf vegetativ-motorische Reaktionen (Anstieg der Herzrate in Verbindung mit Schlafbewegungen), die auch bei Nichtaufwachen durch Geräuschereignissen auftreten (Müller et al., 2015), oder
- (c) auf oxidativen Stress, der zur endothelialen Dysfunktion (Versteifung von Blutgefäßen, s. Schmidt et al., 2013) führen kann, die unabhängig von lärmbedingter Aufwachreaktionen auftreten kann und ein Risikofaktor für Arteriosklerose darstellt, oder
- (d) auf weitere bzw. andere Ursachen zurückzuführen sind.

Aufgrund dieser Ungewissheit und aufgrund des langjährigen Horizonts bei der Entwicklung von Erkrankungen bieten sich epidemiologische Wirkungskriterien wie Erkrankungsrisiken zur Beurteilung der Anwendbarkeit eines Maximalpegelkriteriums bei der Beurteilung von Schienenverkehrslärm in der Nacht im Rahmen dieses Gutachtens nicht an.

In den Night Noise Guidelines (NNGL) der WHO (2009) sind die dem nächtlichen Umgebungslärm zugeschriebenen Wirkungen und dazu die Schwellenwerte aufgeführt, oberhalb der die Effekte auftreten bzw. eine Abhängigkeit vom Geräuschpegel aufweisen. Die Wirkungen – danach unterteilt, ob eine ausreichende ("sufficient") oder eine begrenzte ("limited") Evidenz einer Expositions-Wirkungsbeziehung vorliegt – sind in Tabelle 2-6 wiedergegeben.

Ausreichende Evidenz meint hierbei, dass für einen Gesundheitseffekt eine Expositions-Wirkungsbeziehung bezogen auf nächtliche Geräuschpegel als nachgewiesen angesehen werden kann. Das heißt, dass in gut kontrollierten Studien die Expositions-Wirkungsbeziehung beobachtet wurde und eine biologische Plausibilität für einen Effekt des nächtlichen Lärms gegeben ist. Eine begrenzte Evidenz liegt nach der Definition der WHO-NNGL vor, wenn in Studien die Expositions-Wirkungsbeziehung zwar nicht direkt beobachtet wurde, aber Daten guter Qualität vorliegen, die eine kausale Assoziation zwischen nächtlichem Lärm und der Gesundheitswirkung nahelegen. Dies ist etwa dann der Fall, wenn Wirkungen der Geräuschbelastung auf Veränderungen physiologischer Prozessen beobachtet wurden, welche langfristig zu Gesundheitsproblemen führen können.

Tabelle 2-6: Zusammenfassung von Wirkungen nächtlichen Lärms für die ausreichende bzw. begrenzte Evidenz besteht. Quelle: WHO-NNGL (2009).

Effekt	Indikator	Schwelle in dB	Effekt	Indikator	Abgeschätzte Schwelle in dB
Ausreichende Evidenz ("sufficient") für eine Expositions-Wirkungsbeziehung			Beschränkte Evidenz ("limited") für eine Expositions-Wirkungsbeziehung		
Biologische Effekte					
Veränderung in der kardiovaskulären Aktivität	-	-	Änderungen im Stresshormonlevel	*	*
EEG-Aufwachreaktion	$L_{pAF,max,innen}$	35			
Motilität, Körperbewegungen	$L_{pAF,max,innen}$	32			
Änderung in Dauer verschiedener Schlafstadien, Schlafstruktur, Fragmentierung des Schlafs	$L_{pAF,max,innen}$	35			
Schlafqualität					
(Signalisiertes, bewusstes) Aufwachen in der Nacht und/oder zu früh am Morgen	$L_{pAF,max,innen}$	42			
Verlängerung der Einschlafzeit, Einschlafschwierigkeiten	*	*			
Schlaffragmentierung, reduzierte Schlafzeit	*	*			
Anstieg in durchschnittlicher Zahl der Körperbewegungen während des Schlafs	$L_{night,außen}$	42			
Wohlbefinden					
Selbst-berichtete Schlafstörungen	$L_{night,außen}$	42	Müdigkeit tagsüber/ abends	*	*
Einnahme von Schlaf- und Beruhigungsmitteln	$L_{night,außen}$	40	Tagsüber erhöhte Reizbarkeit	*	*
			Einschränkung sozialer Kontakte	*	*
			Beschwerden	$L_{night,außen}$	35
			Störungen kognitiver Leistungen	*	*
Medizinische Effekte					
(Diagnostizierte) umweltbedingte Schlafstörung	$L_{night,außen}$	42	Insomnia (Schlaflosigkeit, Schlafstörungen)	*	*
			Bluthochdruck	$L_{night,außen}$	50
			Übergewicht, Fettleibigkeit		
			Depression (bei Frauen)		
			Herzinfarkt	$L_{night,außen}$	50
			Reduktion der Lebenserwartung (vorzeitige Sterblichkeit)		
			Psychische Störungen	$L_{night,außen}$	60
			(Arbeits-) Unfälle		

Aus der Tabelle 2-6 geht hervor, dass für die biologischen Effekte, für die nach den WHO-NNGL eine ausreichende Evidenz der Expositions-Wirkungsbeziehung vorliegt, sowie für das signalisierte, bewusste Aufwachen Schwellenwerte bezogen auf den Maximalpegel innen definiert sind. Bezüglich der Gesundheitsrelevanz dieser Effekte enthalten die NNGL der WHO (2009) die folgende Aussage:

*"A number of instantaneous effects are connected to threshold levels expressed in  $L_{Amax}$ . The health relevance of these effects cannot be easily established. It can be safely assumed, however, that an increase in the number of such events over the baseline may constitute a subclinical adverse health effect by itself leading to significant clinical health outcomes." (WHO, 2009, p. XV).*

*(Übersetzung: "Einer Reihe unmittelbarer Effekte sind Schwellenwerte ausgedrückt im  $L_{Amax}$  zugeordnet. Die Gesundheitsrelevanz dieser Effekte festzustellen ist nicht einfach. Trotzdem kann sicher angenommen werden, dass ein Anstieg der Anzahl solcher Effekte über einen Grundwert hinaus (over the baseline) selbst einen subklinische negativen Gesundheitseffekt darstellt, der zu signifikanten klinischen Gesundheitsbeeinträchtigungen führt".)*

Für die übrigen Effekte beziehen sich die Schwellenwerte auf den Nacht-Mittelungspegel  $L_{night,außen}$ .

Zu den Noise Guidelines der WHO – zuletzt veröffentlicht in 1999 als "Guidelines for Community Noise" (Berglund, Lindvall & Schwela, 1999) bzw. bezogen auf nächtlichen Umgebungslärm im Jahr 2009 als Night Noise Guidelines for Europe (WHO, 2009) wird derzeit ein Update erarbeitet, die "WHO Environmental Noise Guidelines for the European Region" (Heroux et al., 2016). Den Guidelines liegen mehrere auf verschiedene Wirkungsbereiche bezogene systematische Reviews des Forschungsstandes zum Umgebungslärm und seinen gesundheitsbezogenen Effekten zugrunde. Die untersuchten Wirkungsbereiche sind Effekte auf den Schlaf, Belästigung, kognitive Störungen, kardiovaskuläre Erkrankungen, Hörbeeinträchtigung, Tinnitus sowie Schwangerschaftsprobleme, Lebensqualität, psychisches Wohlbefinden, Diabetes und metabolische Erkrankungen. Zu den betrachteten Lärmquellen zählen Luft-, Straßen- und Schienenverkehr, Industrie und Gewerbe, Windenergieanlagen und Freizeitlärm, zudem erfolgt für einige Wirkungsbereiche eine Gesamtlärbetrachtung. Darüber hinaus fließt ein Review zu den positiven Gesundheitswirkungen von Lärmschutzmaßnahmen bzw. Interventionen in die Entwicklung der Guidelines ein (zusammenfassend zum Vorgehen: Stansfeld et al., 2016).

Auf der Inter-Noise 2016 wurden erste Ergebnisse bzw. die Vorgehensweise der WHO-Reviews vorgestellt, u.a. des Reviews zu den Effekten des Schlafs (Basner & McGuire, 2016). Die Reviewer führten zur Quantifizierung des Effekts von Umgebungslärm auf den Schlaf zwei Arten von Meta-Analysen von Originalstudienresultaten durch. Eine Art der Meta-Analysen bezieht sich auf Studien, in denen mittels Polysomnografie gemessene Aufwachreaktionen assoziiert mit ereignisbezogenen Maximalpegeln untersucht wurden, die zweite Art der Meta-Analysen bezieht sich auf in Befragungen berichtete lärmbedingte Schlafstörungen in ihren Beziehungen zu Mittelungspegeln ( $L_{den}$ ).

## 2.4 Analysen zu physiologischen Wirkungen nächtlichen Bahnlärms

### 2.4.1 Ausgangssituation

Ein ungestörter Schlaf ist wichtig für Leistungsfähigkeit, Wohlbefinden und Gesundheit (Watson et al., 2015). 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 auf physiologischer Seite Aufwachreaktionen und oft damit einhergehende Herzfrequenzbeschleunigungen oder 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 physiologischen Akutwirkungen von Lärm in der Nacht sind in der Regel sehr genau bei der Messung des perzipierten Lärms und der zu untersuchenden physiologischen Größen, können in der Regel aufgrund des hohen Studien- und damit einhergehenden Kostenaufwands aber in der Regel nur an einer begrenzten Anzahl von Probanden erhoben werden.

Schmidt et al. (2015) haben in solch einer Studie zu den physiologischen Akutwirkungen nächtlichen Fluglärms erstmals einen Nachweis erbracht, welche potentiellen Mechanismen zur Entstehung kardiovaskulärer Erkrankungen nach langjähriger Lärmexposition beitragen können. Deutliche größere Forschungsanstrengungen auf diesem Gebiet sind in Zukunft nötig, um die Auswirkungen langjähriger Lärmexposition auf die Gesundheit zu verstehen.

Obwohl es bisher keine einheitliche, allgemein akzeptierte, Definition von „Gesundem Schlaf“ gibt, ist es unstrittig, dass gestörter nächtlicher Schlaf zu einem erhöhten Risiko für das metabolische Syndrom, damit einhergehende koronare Herzkrankheiten, Bluthochdruck und Diabetes, sowie Depression und Sterblichkeit führt (Buysse, 2014). Ein Konzept zum Schutz der Bevölkerung vor Lärm in der Nacht muss somit darauf angelegt sein, die o.g. „primären Effekte“ von Lärm zu reduzieren, weil dadurch nach heutigem Kenntnisstand auch mögliche Gesundheitsrisiken nach langjähriger Exposition minimiert werden.

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 (Basner et al., 2005). Um ein Schutz-

konzept vor nächtlichem Bahnlärm zu entwickeln, muss also u.a. bekannt sein, wie häufig ein Bahnanwohner bei einer vorgegebenen Anzahl an Bahnvorbeifahrten zusätzlich aufwacht. Bei der akustischen Beschreibung dieser Bahnvorbeifahrten erweist sich ein Mittelungspegel wie der  $L_{pAF,eq}$  der i.d.R. verwendet wird, um mögliche Belästigungsreaktionen am Tag und in der Nacht zu beschreiben (Miedema et al., 1998), als ungeeignet. Der menschliche Organismus reagiert im Schlaf auf das Einzel(-bahn-) geräuscher-eignis, das durch entsprechende akustische Größen (z.B. Maximalpegel, *SEL*, etc., siehe Porter et al., 2000) charakterisiert werden muss. Die Wahrscheinlichkeit von solch einem Bahnlärmereignis zu erwachen, muss dann über sämtliche Bahnlärmereignisse der Nacht addiert werden, um die zusätzlichen bahnlärmbedingten Aufwachreaktionen in der Nacht zu bestimmen. Die Anzahl dieser zusätzlichen bahnlärmbedingten Aufwachreaktionen ist dann in einem Schutzkonzept zu begrenzen.

Die Weltgesundheitsorganisation WHO hat sich 2014 zum Ziel gesetzt, ihre „WHO Community Noise Guidelines“ aus dem Jahr 1999 für den europäischen Raum zu aktualisieren. Um den derzeitigen Stand der wissenschaftlichen Evidenz der Auswirkungen von Verkehrslärm auf den Schlaf aufzuzeigen, wurde ein systematisches Review sämtlicher in den Jahren 2000-2015 zu diesem Thema veröffentlichter Literatur durchgeführt und die Studien auch daraufhin überprüft, ob sie geeignet sind, im Rahmen einer Metaanalyse Expositions-Wirkungsbeziehungen zu liefern. Bezüglich der Bestimmung von physiologischen Aufwachreaktionen wurde insbesondere darauf geachtet, dass in den Studien der Schlaf mittels Polysomnografie, dem sogenannten „Goldstandard“ der Schlafforschung, vermessen wurde (Perron et al., 2012). Literatur zu Laborstudien wurde dabei verworfen, weil Ergebnisse aus solchen Labormessungen aus Erfahrungen des DLR ökologisch nicht valide sind. Probanden schlafen in der Regel im Labor unabhängig vom Lärm schlechter als Zuhause, sie werden nur einer sehr begrenzten Anzahl an unterschiedlichen Verkehrsgeräuschen ausgesetzt, und mögliche Langzeitgewöhnungseffekte an Verkehrslärm können im Labor mit vertretbarem Aufwand nicht untersucht werden. Nach dieser umfangreichen, weltweiten Literaturrecherche der WHO konnte für den Bahnlärm nur die vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) in den Jahren 2006-2010 im Rahmen der deutsch-französischen Forschungsk Kooperation DEUFRAKO durchgeführte Feldstudie RAPS (Railway Annoyance Performance Sleep) identifiziert werden, die oben genannte Kriterien erfüllt. Der WHO-Report „WHO Environmental Noise Guidelines for the European Region: A systematic review on environmental noise and effects on sleep“, lag bei Fertigstellung dieses Gutachtens noch nicht vor. Das im Report beschriebene Vorgehen, die angewendeten Kriterien und letztendlich berücksichtigten Studien wurden aber bereits auf der InterNoise-Konferenz 2016 in Hamburg vorgestellt und können den Proceedings entnommen werden (Basner et. al, 2016).

### 2.4.2 Methodik der DEUFRAKO-RAPS Feldstudie

Ziel der Feldstudie DEUFRAKO-RAPS (2006-2010) war es, die Auswirkungen des nächtlichen Bahn lärms auf den Schlaf der Anwohner verkehrsreicher Güterzugstrecken zu untersuchen. Als Untersuchungsgebiet wurde in dieser Studie die nachts stark von Güterverkehr befahrene Strecke von Köln über Bonn bis Erpel im nördlichen Mittelrheintal gewählt. Neben den Güterzügen fahren in der Nacht nur wenige Personenzüge, fast ausschließlich Regionalverkehr oder S-Bahnen. Diese Wohnlage war neben diesem starken nächtlichen Eisenbahnverkehr auch gleichzeitig durch geringen Lärm anderer Verkehrsträger charakterisiert.

Da die Anzahl der Zugbewegungen auch vom Wochentag und der Jahreszeit abhängt, wurden in neun aufeinander folgenden, das Wochenende einschließenden, Nächten Messungen zu allen Jahreszeiten durchgeführt. Messbeginn war immer ein Montag. Die erste Untersuchungsnacht diente den Probanden zur Gewöhnung an das Messequipment und wurde nicht ausgewertet. Die Schlafzeit konnte von den Probanden individuell gewählt werden. Allerdings sollte eine Mindestbettzeit zwischen Mitternacht und 06:00 Uhr gewährleistet sein. Spätestes Aufstehen war um 08:00 Uhr.

Die Datenerhebung bei den Streckenanwohnern fand zwischen Februar 2008 und Juli 2009 statt. Insgesamt wurden 33 Anwohner im Alter von 22 bis 68 Jahren (Mittelwert  $36,2 \pm 10,3$  Jahre, weiblich:  $n = 22$ ) an 27 unterschiedlichen Messstellen (6 Paare) untersucht. Alle Probanden waren gesund, litten an keinerlei intrinsischen Schlafstörungen und hörten altersgemäß normal. Die Messstellen waren zwischen 6 m und 135 m (Abstand Hauswand – nächstes Gleis) vom Bahnverkehr entfernt (Mittelwert:  $42 \text{ m} \pm 29 \text{ m}$ ).

Die Schalldruckpegel  $L_{pAF}$  und  $L_{pAS}$  wurden kontinuierlich über die gesamte Nacht mit Klasse 1 – Schallpegelmessern (NC10, Cortex Instruments) außen (2 m vor dem Schlafzimmerfenster) und innen (am Ohr des Schlafenden) gemessen und mit einer Samplingrate von 110 ms aufgezeichnet. Sobald der Hintergrundpegel  $L_{90}$  über 3 dB überschritten wurde, wurde zudem das Geräuscheignis selbst als wav-Datei aufgezeichnet, so dass eine spätere Identifizierung der Geräuschquelle (Güter-/Personenzüge, Straßenverkehr, Nachbarschaftslärm etc.) gewährleistet werden konnte. Sämtliche in der Nacht am Ohr des Schlafenden aufgetretene Geräusche wurden mit einer speziell für diese Anforderungen im DLR entwickelten Software im Nachhinein abgehört, markiert, klassifiziert und entsprechend der gültigen DIN-Normen ausgewertet.

Um sämtliche, potentiell relevanten Schlafparameter für eine ereigniskorrelierte Auswertung bestimmen zu können, wurde die Methode der Polysomnografie („Goldstandard“ der Schlafforschung) gewählt. Die Polysomnografie besteht aus der Aufzeichnung des EEGs (Elektroenzephalografie = Hirnaktivität), des EOGs (Elektrookulografie = Augenbewegungen) und des EMGs (Elektromyografie = Muskelaktivität) zur Bewertung des Schlafs in Quantität und Qualität. Um polysomnografischen Größen abzuleiten, werden Elektroden an vorgegebenen Positionen auf die Kopfhaut und im Gesicht geklebt. So kann die elektrische Oberflächenaktivität des Gehirns in Form von Potentialschwankungen kontinuierlich dargestellt werden. Im Schlaf verändern sich Amplitude und Frequenz der Wellenmuster im EEG, die Art der Augenbewegungen und die Muskelaktivität in typischer Weise und erlauben die Einteilung in Schlafstadien (Wach –

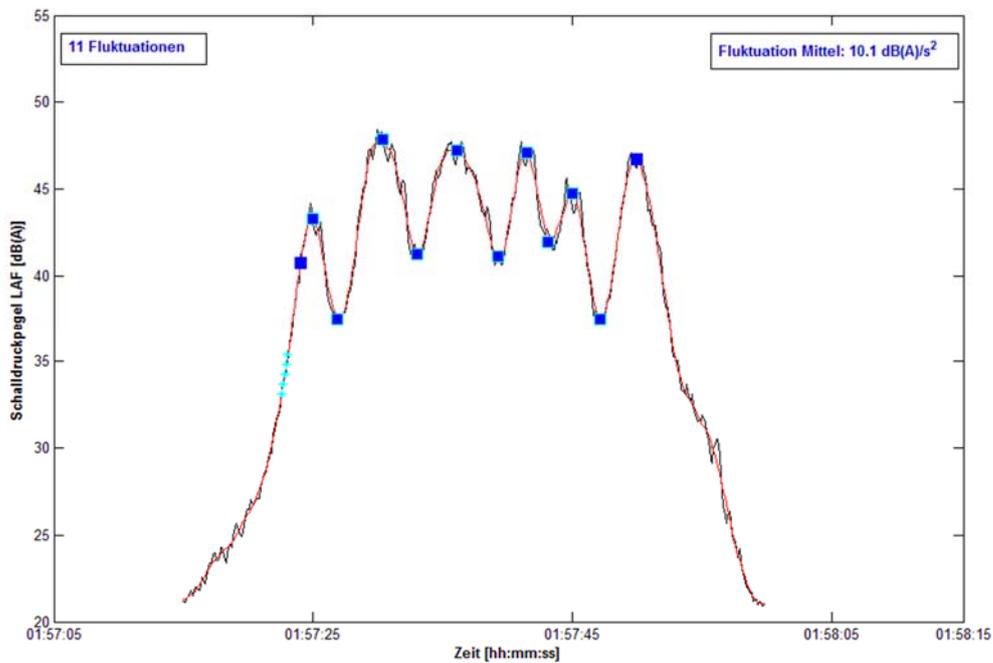
Leichtschlaf (Stadien S1 und S2) – Tiefschlaf (Stadien S3 und S4) – Traumschlaf (Rapid eye movement (REM) – Schlaf). Die Auswertung der Schlafdaten erfolgte klassisch nach Rechtschaffen und Kales (Rechtschaffen et al., 1968). Dabei weist ein geschulter Auswerter jeweils 30-sekündigen Epochen ein Schlafstadium zu.

Durch den hohen Personalaufwand, den sowohl das Applizieren der Elektroden (jeden Abend ca. 1 h, jeden Morgen ca. ½ h beim Probanden vor Ort) als auch das nachfolgende manuelle Bewerten des Schlafs und der Akustik erfordert, ist die Durchführung dieser Feldstudien zeitintensiv und teuer. Dadurch ist die Zahl an untersuchten Probanden zwar auf der einen Seite natürlicherweise begrenzt, auf der anderen Seite liefert diese Studienform aber Daten mit hoher ökologischer Validität für den untersuchten Probandenkreis.

Für eine detailliertere Darstellung der in der DEUFRAKO/RAPS-Studie verwandten Methodik und deskriptiven Auswertung der Zuggbewegungszahlen und der akustischen Messgrößen sei auf den Endbericht der Studie verwiesen (Müller et al., 2010).

#### **2.4.3 Zusätzliche im Rahmen dieses Gutachtens vorgenommene Analysen der DEUFRAKO-RAPS Feldstudien**

Hauptschwerpunkt der Auswertungen im DEUFRAKO-RAPS-Projekt lag gemäß Antrag in dem Vergleich der Auswirkungen nächtlichen Flug- und Bahn lärms auf den Schlaf. Die Fluglärmvergleichsdaten stammten aus der DLR-STRAIN (Study on Human Response on Aircraft Noise)-Feldstudie aus den Jahren 2001/2002 (Basner et al., 2004). Für den Vergleich wurde ausschließlich der bei der Beschreibung von Fluglärm verwendete Schalldruckpegel  $L_{pAS}$  aus der DEUFRAKO/RAPS-Studie ausgewertet. Für den Schalldruckpegel  $L_{pAF}$  wurde nur eine Gesamtanalyse des Bahn lärms, nicht unterschieden nach Güter- und Personenzügen, vorgenommen. Der Einzelereignispegel  $SEL$ , der Vorbeifahrtexpositionspegel  $TEL$  und die spontane Aufwachwahrscheinlichkeit wurden in den damaligen Analysen im Gegensatz zu diesem Gutachten nicht berücksichtigt bzw. nicht berechnet. Insbesondere wurden im DEUFRAKO-RAPS-Projekt auch keinerlei Analysen vorgenommen, die den möglichen Beitrag von Pegelfluktuationen (s. Abbildung 2-6) bei der Vorbeifahrt von Güterzügen auf die Aufwachwahrscheinlichkeit berücksichtigen.

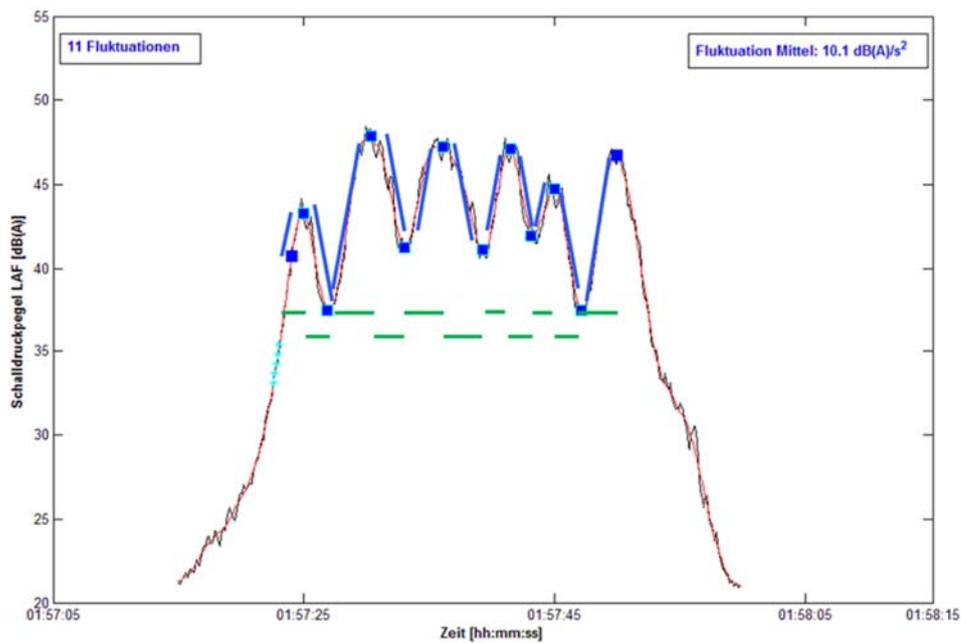


Signalglättung (rot), Fluktuationsmaxima und -minima (Punkte blau), Pegelanstiegssteilheit (cyan).

Abbildung 2-6: Schalldruckpegelverlauf  $L_{pAF}$  (schwarz) eines Güterzuges, innen am Ohr des Schlafenden, gemessen bei geschlossenem Fenster, Abstand Hauswand – erstes Gleis: 6 m

Aus diesem Grund wurde im Rahmen dieses Gutachtens ein Fluktuationsmaß entwickelt. Hierzu wurde mit Hilfe der Entwicklungsumgebung Matlab (Vers. 8.3.0.532, The Mathworks Inc.) ein automatischer Algorithmus programmiert, der zuerst den Schalldruckpegelverlauf  $L_{pAF}$  der Bahngeräusche mittels eines Savitzky-Golay-Filters (Savitzky et al., 1964) glättet, automatisch die Umkehrpunkte im Pegelverlauf während der Vorbeifahrt bestimmt, danach die Pegel- und Zeitdifferenzen zwischen den Umkehrpunkten ermittelt. Die Beurteilungszeit ist definiert als die Zeit zwischen dem ersten und letzten Fluktuationspunkt. Das Fluktuationsmaß wurde danach wie folgt definiert:

$$\text{Fluktuationsmaß}_{\text{Median}} = \frac{\text{Median}\left(\frac{\text{Pegeldifferenzen}}{\text{Zeitdifferenzen}}\right) * \text{Anzahl Fluktuationen} * 10}{\text{Beurteilungszeit}} \quad (\text{Gl.-3})$$

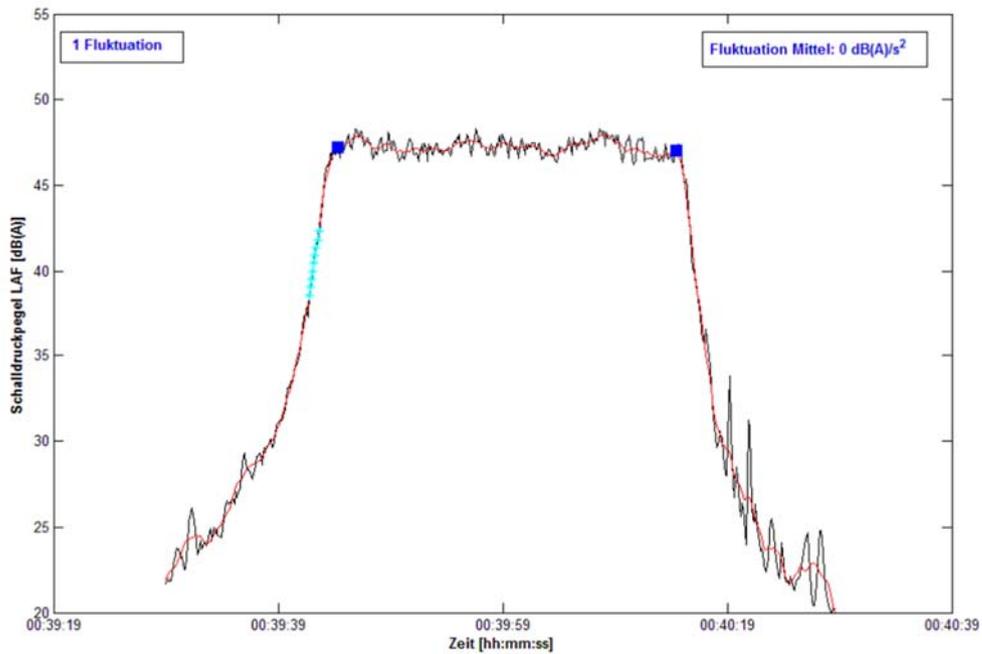


Signalglättung (rot), Fluktuationsmaxima und -minima (Punkte blau), Pegelanstiegssteilheit (cyan), Pegeldifferenzen Fluktuation (blaue Linien), zeitliche Differenz Fluktuation (grüne Linien)

Abbildung 2-7: Schalldruckpegelverlauf  $L_{pAF}$  (schwarz) eines Güterzuges, innen am Ohr des Schlafenden, gemessen bei geschlossenem Fenster, Abstand Hauswand - erstes Gleis: 6 m mit Darstellung der Pegeldifferenz und der zeitlichen Differenz der Fluktuation

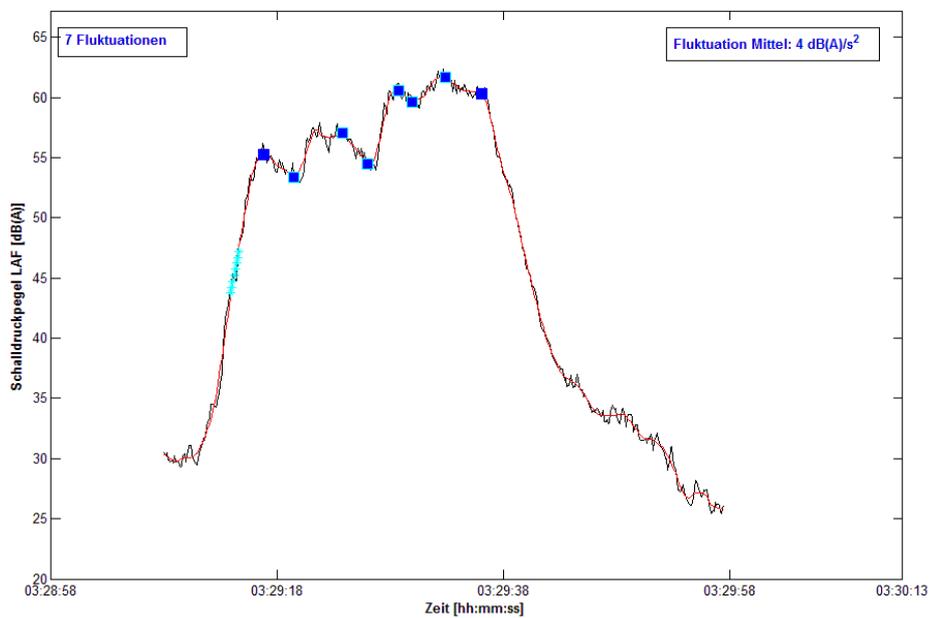
Ein „Fluktuationsmaß\_Mittel“ wurde entsprechend gebildet, wobei der Median durch den Mittelwert ersetzt wurde. Um ein weiteres, möglicherweise in der akustischen Praxis leichter umzusetzendes Maß zur Beschreibung der Pegelfluktuationen zu bekommen, wurden zudem von jedem Bahngeräusch die Short- $L_{eq}$ 's (Ermittlung des energieäquivalenten Dauerschallpegels für eine Sekunde) berechnet und dann die Werte ermittelt, die in 1%, 10%, 20% und 30% für dieses Bahngeräusch überschritten wurden.

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 (s. z.B. Abbildung 2-8). Abbildung 2-9 zeigt auf der anderen Seite auch ein Beispiel dafür, dass es schon im Untersuchungszeitraum 2008/2009 Güterzüge gab, die bei einem geringen Abstand Hauswand - Gleis einen kaum fluktuierenden Pegelverlauf im Beurteilungszeitraum vorwiesen. Es wird davon ausgegangen, dass bei auf Verbundstoff-Klotzbremse umgerüstete Güterzüge die Fluktuation geringer ausfällt, als bei graugussklotzgebremsten Güterzügen. Der Nachweis darüber kann über entsprechende Auswertungen von Monitoringstationen erfolgen.



Signalglättung (rot), Fluktuationsmaxima und -minima (Punkte blau), Pegelanstiegssteilheit (cyan)

Abbildung 2-8: Schalldruckpegelverlauf  $L_{pAF}$  (schwarz) eines Güterzuges, innen am Ohr des Schlafenden, gemessen bei geschlossenem Fenster, Abstand Hauswand – erstes Gleis: 6 m



Signalglättung (rot), Fluktuationsmaxima und -minima (Punkte blau), Pegelanstiegssteilheit (cyan)

Abbildung 2-9: Schalldruckpegelverlauf  $L_{pAF}$  (schwarz) eines Güterzuges, innen am Ohr des Schlafenden, gemessen bei gekipptem Fenster, Abstand Hauswand – erstes Gleis: 71 m

#### 2.4.4 Berechnung der Aufwachwahrscheinlichkeit für ein Einzelereignis einer Güter- und Personenzugvorbeifahrt

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-Schlafepoche 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 ereigniskorrelierte Auswertung wird eine Epoche als „erste Bahnlärmepoche“ definiert, wenn ein Bahnlärmereignis innerhalb von 15 s nach Beginn der Epoche startet. Daraufhin werden die Lärmepoche und die nächsten beiden Epochen auf eine Aufwachreaktion hin überprüft. Dadurch ist das Lärmfenster, welches auf eine Aufwachreaktion überprüft wird, 90 s lang.

Um eine mögliche Aufwachreaktion zum Zeitpunkt eines Bahnlärmereignisses eindeutig auf das Bahnlärmereignis zurückführen zu können, werden nur die Bahnlärmereignisse betrachtet, bei denen von 60 s vor bzw. bis 90 s nach Beginn des Lärmereignisses keine weiteren Geräusche anderer Quellen gleichzeitig auftreten (z.B. vorbeifahrendes Auto, bellender Hund etc., in Folge als „ungestörte Geräusche“ bezeichnet). Ein Bahnlärmereignis wird zudem ausgeschlossen, wenn der Proband in der Epoche vor der 1. Lärmepoche bereits wach ist. Dies bedeutet folgerichtig auch, dass nur Bahnlärmereignisse, die während der Schlafperiodendauer auftreten, in die Analyse mit eingehen.

Die Berechnung der Aufwachwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von akustischen Größen des Bahnlärmereignisses und anderer Einflussvariablen erfolgt mit Hilfe eines Regressionsmodells. Da Aufwachreaktionen desselben Probanden mehrmals in einer Nacht stattfinden können und in der Regel über mehrere Nächte verteilt sind, liegen Messwiederholungen vor. Zusätzlich ist die abhängige Variable dichotom (Aufwachreaktion ja/nein). Daher wird als Regressionsmodell eine logistische Regression mit Zufallseffekten (random effects logistic regression) verwendet (Diggle et al., 2002). Die logistische Regression erlaubt es, Wahrscheinlichkeitswerte in Abhängigkeit der verschiedenen Einflussfaktoren in Form von Expositions-Wirkungskurven zu berechnen.

Die Auswahl der Einflussvariablen, die in das Regressionsmodell eingehen, wird mittels einer Stepwise-Selection (Hosmer et al., 2000) durchgeführt. Man startet hierfür mit einem Intercept-Modell (ein Hauptprädiktor, alle übrigen Prädiktoren sind null) und in jedem Schritt wird eine Variable hinzugefügt oder eine Variable entfernt. Die Entscheidung, ob eine Variable in das Modell aufgenommen oder entfernt wird, geschieht dann ausschließlich anhand des AICs (Akaike Information Criterion; vgl. Abschnitt 2.2.2). Die Prozedur der Stepwise-Selection wird solange wiederholt bis keine Verbesserung mehr hinsichtlich des AICs stattfindet (je kleiner der AIC, desto besser das Modell). Die statistischen Auswertungen wurden mit Hilfe des Softwarepaketes R (Version 3.3.3) (R Core Team, 2017), vorgenommen.

Eine Vielzahl akustischer, persönlicher und situativer Variablen können einen potentiellen 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)
- Einzelergebnispegel *SEL* des Bahnlärmereignisses (in dB)
- Vorbeifahrtexpositionspegel *TEL* des Bahnlärmereignisses (in dB)
- Gesamtdauer 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/s<sup>2</sup>)
- Fluktuationsmaß Mittel des Bahnlärmereignisses (in dB/s<sup>2</sup>)
- $L_{pAF\_ShortLeq\_01}$  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)

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

*Modellanpassung Güterzug*

In die Analysen zur Berechnung der Aufwachwahrscheinlichkeit für ein Güterzuglärmereignis gingen insgesamt 5.428 ungestörte Güterzugereignisse aus 252 Nächten von 33 Probanden ein.

Tabelle 2-7: Modell mit der besten Anpassung des Akaike Information Criterion (AIC) der Expositions-Wirkungsbeziehung zwischen einem Güterzuglärmereignis und der Aufwachwahrscheinlichkeit.

AIC = 3215,736	Schätzer	Std. Fehler	P-Wert
$L_{pAF,max}$ -Maximalpegel	0,0280537	0,0063195	9,03e-06
Gesamtdauer Geräusch	-0,0056700	0,0019560	0,00375
Zeit seit Schlafbeginn	0,0006578	0,0003995	0,09965
Aktuelles Schlafstadium			
Schlafstadium S2	0,000	Referenzgruppe	
Schlafstadium S3	-0,9996851	0,3938991	0,01115
Schlafstadium S4	-0,3650536	0,4316432	0,39770
Schlafstadium REM	0,3040363	0,1058407	0,00407
Zeit in akt. Schlafst.	-0,0119113	0,0050753	0,01893
$L_{pAF,ShortLeq01}$ min 10	0,0940169	0,0349415	0,00713
Anzahl Fluktuationen	0,0222771	0,0116658	0,05619
Intercept	-3,6150415	0,3601365	< 2e-16

In Tabelle 2-7 ist das mittels Stepwise-Selection gefundene Modell mit der besten Anpassung unter Berücksichtigung des Akaike Informationskriteriums (AIC) mit einem AIC = 3215,736 dargestellt (Modell mit kleinstem AIC).

Da es in der Praxis für die Lärmprognoserechnungen an Bahnstrecken in der Regel unmöglich ist, eine realistische Anzahl der Pegelfluktuationen vorzugeben, da diese stark von der Wagenreihung „leiser“ und „lauter“ Wagen abhängen, wird dieses Modell verglichen mit dem Modell ohne den Schätzer „Anzahl Fluktuationen“. Dieses „praxisoptimierte“ Modell hat nur einen leicht größeren AIC-Wert von 3216,994. Der Austausch des Schätzers „ $L_{pAF,ShortLeq01}$  minus  $L_{pAF,ShortLeq10}$ “ durch „ $L_{pAF,ShortLeq01}$  minus  $L_{pAF,ShortLeq20}$ “ im praxisoptimierten Modell führt hingegen zu einer deutlich schlechteren Modellanpassung mit einem AIC von 3225,814. Auch der Austausch dieses Parameters durch das in diesem Gutachten entwickelte Fluktuationsmaß als Mittel- oder Medianwert verbessert mit AICs von 3221,0 bzw. 3222,065 die Modellgüte des praxisoptimierten Modells nicht.

Physiologisch plausibel wäre es, dass die höhere Pegelanstiegssteilheit eines Bahngeräusches auch zu einer erhöhten Aufwachwahrscheinlichkeit führt. Allerdings ist diese Pegelanstiegssteilheit auch hoch mit dem Maximalpegel des Geräusches korreliert – je höher die Pegelanstiegssteilheit (und somit die Geschwindigkeit des Zuges), desto höher auch der Maximalpegel. Nimmt man die Pegelanstiegssteilheit im „praxisoptimierten Modell“ als Schätzer hinzu, erhält man einen leicht schlechteren AIC von 3217,749.

Auch die Ersetzung des Maximalpegels durch den Einzelereignispegel *SEL*, den Vorbeifahrtexpositionspegel *TEL* oder die Emergenz führt mit AICs von 3220,324, 3225,015 und 3225,279 nicht zu einer Modellverbesserung. Die Berücksichtigung der Anzahl der vorhergehenden Züge im Modell führt zu einem AIC von 3217,317 und einem zwar sehr kleinem, aber negativen Schätzer, der abbildet, dass je höher die Anzahl der Züge ist, desto höher wird auch der Schlafdruck im Laufe der Nacht.

Es ist in der Schlafmedizin völlig unbestritten, dass mit zunehmendem Alter die Tiefschlafphasen reduziert werden (Kryger et al., 2017) und somit auch die Aufwachwahrscheinlichkeit aufgrund eines Bahnlärmgeräusches mit zunehmendem Alter steigen müsste. Ein nur leicht schlechterer Modellfit mit einem AIC von 3217,76 bildet dies bei gegebener Altersverteilung in der DEUFRAKO-RAPS-Studie (Alter von 22 bis 68 Jahren, Mittelwert  $36,2 \pm 10,3$  Jahre) gut ab, wenn der Prädiktor „Alter“ im Modell einbezogen wird. Die Berücksichtigung des Geschlechts im Modellfit führt bei der Probandenzusammensetzung in dieser Studie (männlich:  $n = 11$ , weiblich:  $n = 22$ ) zu einem AIC von 3218,599. Da aber sowohl die Berücksichtigung der Alters- als auch der Geschlechtsverteilung von Anwohnern für die praktische Prognoserechnung derzeit nicht umsetzbar ist und die Modellgüte auch bei Berücksichtigung dieser Parameter leicht schlechter als beim AIC=3216,994 vom „praxisoptimierten“ Modell ist, wird somit in diesem Gutachten für die weiteren Rechnungen von folgendem Modell für die Berechnung der Aufwachwahrscheinlichkeit bei Vorbeifahrt eines Güterzuges ausgegangen:

Tabelle 2-8: Modell mit der besten praxisoptimierten Anpassung des Akaike Information Criterion (AIC) der Expositions-Wirkungsbeziehung zwischen einem Güterzuglärmereignis und der Aufwachwahrscheinlichkeit.

AIC = 3216,994	Schätzer	Std. Fehler	P-Wert
$L_{pAF,max}$ -Maximalpegel	0,0261230	0,0063496	3,89e-05
Gesamtdauer Geräusch	-0,0045479	0,0018477	0,013842
Zeit seit Schlafbeginn	0,0006730	0,0003998	0,092303
Aktuelles Schlafstadium			
Schlafstadium S2	0,000	Referenzgruppe	
Schlafstadium S3	-1,0030641	0,3937431	0,010850
Schlafstadium S4	-0,3624968	0,4316189	0,400990
Schlafstadium REM	0,3022731	0,1058251	0,004285
Zeit in akt, Schlafst.	-0,0119262	0,0050723	0,018710
$L_{pAF,ShortLeq01}$ min 10	0,1103385	0,0334063	0,000957
Intercept	-3,5256369	0,3620432	< 2e-16

### 2.4.5 Modellanpassung Personenzug

In die Analysen zur Berechnung der Aufwachwahrscheinlichkeit für ein Personenzuglärmereignis gingen insgesamt 1.604 ungestörte Personenzugereignisse aus 221 Nächten von 31 Probanden ein. Es muss an dieser Stelle noch einmal darauf hingewiesen werden, dass es sich bei den gemessenen Personenzügen weitgehend um Regional- und S-Bahnen handelt und nicht um Fernverkehrszüge. Entsprechend können die Daten auch nur für diesen Zugtyp interpretiert werden. Zudem sind die Schalldruckpegelverläufe dieser Personenzüge deutlich weniger heterogen als die der Güterzüge, was erwarten lässt, dass ein einfacheres Modell die Expositions-Wirkungskurve bestimmt.

In

Tabelle 2-9 ist das mittels Stepwise-Selection gefundene Modell mit der besten Anpassung unter Berücksichtigung des Akaike Informationskriteriums (AIC) mit einem AIC = 878,9031 dargestellt (Modell mit kleinstem AIC).

*Tabelle 2-9: Modell mit der besten Anpassung des Akaike Information Criterion (AIC) der Expositions-Wirkungsbeziehung zwischen einem Personenzuglärmereignis und der Aufwachwahrscheinlichkeit.*

AIC = 878,9031	Schätzer	Std. Fehler	P-Wert
$L_{pAF}$ -Maximalpegel	1,153e-02	1,140e-02	0,311718
Anzahl Züge vorher	-1,005e-02	5,663e-03	0,075958
Zeit seit Schlafbeginn	3,460e-03	9,977e-04	0,000525
Aktuelles Schlafstadium			
Schlafstadium S2	0,000	Referenzgruppe	
Schlafstadium S3	-1,557e+00	1,021e+00	0,127098
Schlafstadium S4	-1,487e+01	1,092e+02	0,891644
Schlafstadium REM	2,605e-01	2,006e-01	0,194241
Zeit in akt. Schlafst.	-1,388e-02	9,710e-03	0,152845
Intercept	-3,392e+00	5,714e-01	2,9e-09

Bei diesem Modellfit zeigt sich, dass der Parameter „Anzahl der Züge vorher“ in der Praxis für Lärmprognosemodelle aufgrund der in der Regel nur vorliegenden Gesamtzugzahlen für die Nacht nicht oder nur sehr schwer berücksichtigen lässt. Der Schätzer in diesem Modell ist sehr klein, hat damit nur einen geringen Einfluss auf die Aufwachwahrscheinlichkeit. Der Modellfit ohne diesen Parameter liefert einen AIC von 879,9376 und ist damit nur etwas schlechter als das optimale Modell. Die Berücksichtigung der Pegelanstiegssteilheit (AIC= 880,5431), der Geräuschkdauer (AIC= 881,1769) oder die Ersetzung des Maximalpegels durch den Einzelereignispegel *SEL* (AIC= 880,3318), den Vorbeifahrtexpositionspegel *TEL* (AIC=

880,4463) oder die Emergenz (AIC= 880,22) verbessern das Modell nicht. Die Berücksichtigung des Fluktuationsparameters „ $L_{pAF-ShortLeq01}$  minus  $L_{pAF-ShortLeq10}$ “ führt ebenfalls aufgrund der in der Regel fehlenden Pegelfluktuationen bei Personenzuggeräuschen erwartungsgemäß zu keiner Verbesserung des Modellfits (AIC= 881,8722).

Allen Modellbildungen ist gemeinsam, dass die Schätzer recht klein sind und der Austausch der akustischen Parameter im Modell zu einer sich kaum ändernden Güte führt. Ob generell die akustischen Eigenschaften der Personenzüge weniger Einfluss auf die Aufwachwahrscheinlichkeit haben oder die geringere Anzahl an Personenzügen, die zudem vorwiegend nur am Anfang (Tiefschlafphase) und am Ende der Nacht (Leichtschlafphase) aufgetreten sind, nicht ausreichend ist, kann anhand der vorliegenden Daten nicht entschieden werden.

Als „praxisoptimiertes“ Modell für dieses Gutachten wurde somit das Ausgangsmodell ohne den Parameter „Anzahl der Züge vorher“ gewählt (siehe Tabelle 2-10).

Tabelle 2-10: Modell mit der besten praxisoptimierten Anpassung des Akaike Information Criterion (AIC) der Expositions-Wirkungsbeziehung zwischen einem Personenzuglärmeignis und der Aufwachwahrscheinlichkeit.

AIC = 879,9376	Schätzer	Std. Fehler	P-Wert
$L_{pAF,max}$ -Maximalpegel	8,837e-03	1,174e-02	0,45142
Zeit seit Schlafbeginn	2,138e-03	6,845e-04	0,00179
Aktuelles Schlafstadium			
Schlafstadium S2	0,000	Referenzgruppe	
Schlafstadium S3	-1,570e+00	1,019e+00	0,12339
Schlafstadium S4	-1,375e+01	1,045e+02	0,89531
Schlafstadium REM	2,585e-01	2,005e-01	0,19721
Zeit in akt. Schlafst.	-1,391e-02	9,717e-03	0,15244
Intercept	-3,315e+00	5,898e-01	1,9e-08

#### 2.4.6 Ermittlung der spontanen Aufwachwahrscheinlichkeit

Es gehört zum normalen, physiologischen Schlafprozess während des Nachtschlafs dazu, auch ohne äußere Störeinflüsse zu erwachen. In der STRAIN-Laborstudie des DLR (1999-2001) wurden in 112 ungestörten Basisnächten im Mittel 24 Aufwachreaktionen pro Nacht beobachtet. Die Reaktionswahrscheinlichkeit auf Lärm ist für Probanden im Labor in der Regel höher als in der häuslichen Umgebung (Feld). Ein Großteil dieser spontanen Aufwachreaktionen ist nur 15-45 s lang und damit zu kurz, um am nächsten

Tag erinnert zu werden. Wie in einer weiteren kontrollierten Laborstudie zu nächtlichem Verkehrslärm gezeigt werden konnte (Basner et al., 2011), wird ein Teil dieses Aufwachens durch lärmbedingte Aufwachreaktionen ersetzt, da der menschliche Organismus bestrebt ist, seine Schlafstruktur zu erhalten.

Es kann somit argumentiert werden, dass nur diejenigen Aufwachreaktionen als lärminduziert zu werten sind, die die natürliche Anzahl an Erwachen übersteigen (Basner et al., 2011). In der DLR-Fluglärmfeldstudie STRAIN wurde die Wahrscheinlichkeit, zusätzlich durch Fluglärm zu erwachen, aus der Differenz der fluglärmassoziierten (=zum Zeitpunkt eines Fluglärmereignisses beobachtete Aufwachreaktion) und der spontanen Aufwachwahrscheinlichkeit berechnet (Basner et al. 2006). Da sich Lärmwirkungen im Labor normalerweise stärker ausprägen als im Feldversuch (Pearsons et al., 1995), (Horne et al., 1994), (Fidell et al., 1995) und es im Feldversuch bei lärmbelasteten Probanden in der Regel keinen längeren Zeitraum lärmfreier Nächte gibt, in denen die individuelle spontane Aufwachwahrscheinlichkeit bestimmt werden könnte, konnte in der Vergangenheit die spontane Aufwachwahrscheinlichkeit nur durch komplexe Berechnungen und Annahmen näherungsweise bestimmt werden. Dabei wurde abgestimmt auf den Einschlafzeitpunkt in einer Lärmnacht geschaut, zu welchem Zeitpunkt Lärmereignisse stattfanden, um dann in den weiteren Lärmnächten zum gleichen Zeitpunkt zu bestimmen, ob der Proband spontan aufwachte, falls hier kein Lärmereignis zeitgleich eintrat. Durch Ermittlung der Aufwachwahrscheinlichkeit zu diesen Kontrollzeitpunkten konnte in einer logistischen Regression in Anlehnung an die Modellierung der Aufwachwahrscheinlichkeit durch Lärm die spontane Aufwachwahrscheinlichkeit berechnet werden (Brink et al. 2006).

Dieses Vorgehen geschieht aber unter der Annahme, dass die zeitliche Verteilung der spontanen Aufwachwahrscheinlichkeiten individuell in lärmfreien Nächten immer sehr ähnlich ist. Dies ist grundsätzlich eine plausible und vernünftige Annahme, allerdings ist sie bisher wissenschaftlich noch nicht bestätigt worden. Das Hauptproblem dieses Ansatzes liegt darin, dass auch die „Referenz“-Nächte keineswegs lärmfrei sind. Es muss vielmehr erst einmal davon ausgegangen werden, dass sich die zeitliche Verteilung und Anzahl der spontanen Aufwachreaktionen durch die lärminduzierten Aufwachreaktionen ändert. Wissenschaftlich „sauber“ könnte dies nur dann beurteilt werden, wenn dieselben Probanden in ihrer häuslichen Umgebung in mehreren Nächten hintereinander ohne Lärm untersucht würden (nach einer gewissen Gewöhnungsphase), was in der Weise in einer Feldstudie in der Regel nicht zu realisieren ist, da die Verkehrslärmquelle nicht abgestellt werden kann.

Oben beschriebener Algorithmus ist auch nur dann anwendbar, wenn genügend viele Nächte bei demselben Probanden bei nicht zu dichtem Verkehr gemessen werden. Andernfalls gibt es nicht genügend viele „Referenznächten“ und damit nicht genügend lärmfreie Zeifenster, die aber zur Anwendung des Algorithmus benötigt werden. Das Design neuerer Feld- und Laborstudien zu den Auswirkungen nächtlichen Verkehrslärms auf den Schlaf tendiert im Gegensatz dazu eher dahin, mehr Probanden in weniger Nächten zu untersuchen, um mehr interindividuelle Unterschiede im Schlafverhalten zu berücksichtigen (siehe z.B. die Bahnlärm-Laborstudie der Universität Göteborg (Smith et al., 2013) oder die Fluglärmfeldstudie NORAH, (Müller et al., 2015)). Aus diesem Grund konnte oben beschriebener Algorithmus

z.B. für die NORAH – Studie sinnvollerweise nicht verwendet werden (wenige Untersuchungs Nächte, Kernruhezeit, sehr dichter Verkehr in den Randzeiten). Der Abzug der mit diesem Algorithmus berechneten spontanen Aufwachwahrscheinlichkeit führte in der NORAH-Studie zu deutlich unplausiblen Ergebnissen. Auch wird der Algorithmus für eine gerade beim DLR laufende Feldstudie zu den Auswirkungen von Straßenverkehrslärm auf den Schlaf aufgrund des deutlich höheren Aufkommens an Lärmereignissen (Autovorbeifahrten) verglichen mit Flug- oder Bahnärmereignissen nicht anwendbar sein. Daher hat sich das DLR für folgende Vorgehensweise zur Abschätzung der spontanen Aufwachwahrscheinlichkeit entschieden, solange keine neuen wissenschaftlichen Erkenntnisse vorliegen:

- Alle Aufwachreaktionen bei Maximalpegeln unterhalb des Medians der Hintergrundpegel vor den im statistischen Modell berücksichtigten Lärmereignissen ( $1 - \min L_{\text{eq}}$  vorher) werden als spontane Aufwachreaktionen definiert.
- Erste Aufwachreaktionen sind nicht direkt bei Überschreitung des Hintergrundpegels zu erwarten. Daher werden 3 dB zu diesem Median des Hintergrundpegels hinzuaddiert (Verdoppelung der Signalenergie, gilt in der Lärmwirkungsforschung als wirkungsrelevant)

Abbildung 2-10 zeigt die Vorgehensweise für die NORAH- im Vergleich zur STRAIN-Studie. In der NORAH-Studie, durchgeführt am Frankfurter Flughafen, lag der Median der Hintergrundpegel bei 29,7 dB, erste Aufwachreaktionen werden somit laut Algorithmus bei 32,7 dB beobachtet und es müssen 5,7 % spontane Aufwachwahrscheinlichkeit von der Expositions-Wirkungskurve abgezogen werden. Dieses Ergebnis liegt plausiblerweise im Rahmen der bisher publizierten Studien (holländische Fluglärmstudie Amsterdam/Schiphol (nur Bewegungs-, keine Polysomnografiemessungen), erste Reaktionen bei 32 dB, (Paschier-Vermeer et al., 2002), Fluglärmstudie STRAIN, Köln/Bonn, 33 dB (Basner et al, 2006).

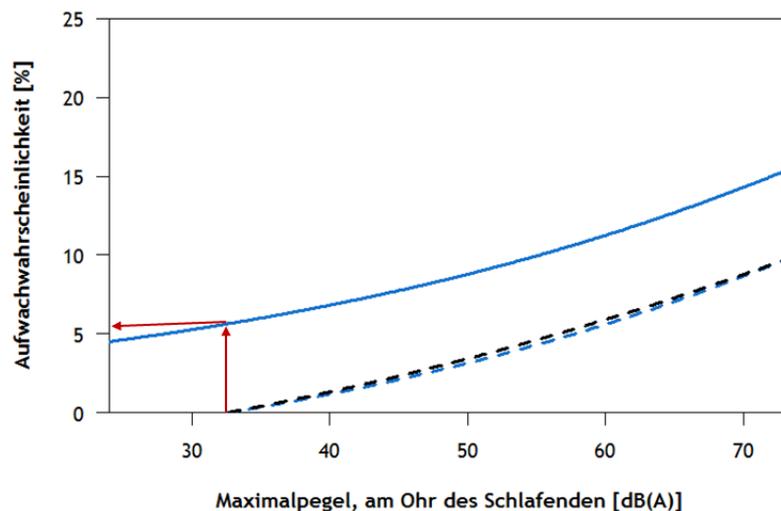


Abbildung 2-10: Expositions-Wirkungskurve NORAH 2012 vor und nach Abzug der spontanen Aufwachwahrscheinlichkeit (blau), STRAIN-Studie 2001/2002 nach Abzug der spontanen Aufwachwahrscheinlichkeit (schwarz)

Angewandt auf den Datensatz der DEUFRAKO-RAPS Studie mit Median-Hintergrundpegeln von 24,7 dB bei den im Anpassungsmodell berücksichtigten nicht-gestörten Güterzuggeräuschen und 24,0 dB bei den

nicht-gestörten Personenzügen wird mit Hilfe der Modelle in Tabelle 2-8 und Tabelle 10 somit eine spontane Aufwachwahrscheinlichkeit von 5,7 % errechnet.

#### 2.4.7 Gleichungen zur Berechnung der Aufwachwahrscheinlichkeit für ein Einzelereignis einer Güter- und Personenzugvorbeifahrt

##### Güterzug

Unter Berücksichtigung der besten praxisoptimierten Anpassung für eine Güterzugvorbeifahrt GZ (Kapitel 2.4.5) und der Berechnung der spontanen Aufwachwahrscheinlichkeit (Kapitel 1.1.7) ergibt sich somit folgender Exponent für die Gleichung zur Berechnung der Aufwachwahrscheinlichkeit für eine Güterzugvorbeifahrt (Modell für vorheriges Schlafstadium 2):

$$A_{GZ} = 0,02612 * L_{pAF,max} - 0,0045479 * \text{Geräuscdauer} + 0,000673 * \text{Zeit nach Einschlafen} - 0,0119262 * \text{Zeit in akt. Schlafst.} + 0,1103385 * L_{pAF\_ShortLeq\_01\_} \text{ minus } L_{pAF\_ShortLeq\_10} - 3,5256369 \quad (\text{Gl.-4})$$

Die Summanden besitzen folgende Einheiten und die Expositions-Wirkungskurve wird für folgende Faktoren gerechnet:

Tabelle 2-11: Einheiten und Faktoren der Summanden zur Berechnung der Aufwachwahrscheinlichkeit bei Vorbeifahrt eines Güterzuges.

Summand	Einheit	Faktor
$L_{pAF,max}$	dB	–
Geräuscdauer	s	67 s (Median)
Zeit nach Einschlafen	min	300 min (Vorgabe)
Zeit in akt. Schlafstadium	min	6,5 min (Median)
$L_{pAF\_ShortLeq\_01\_} \text{ minus } L_{pAF\_ShortLeq\_10}$	dB	0,9 dB (Median)

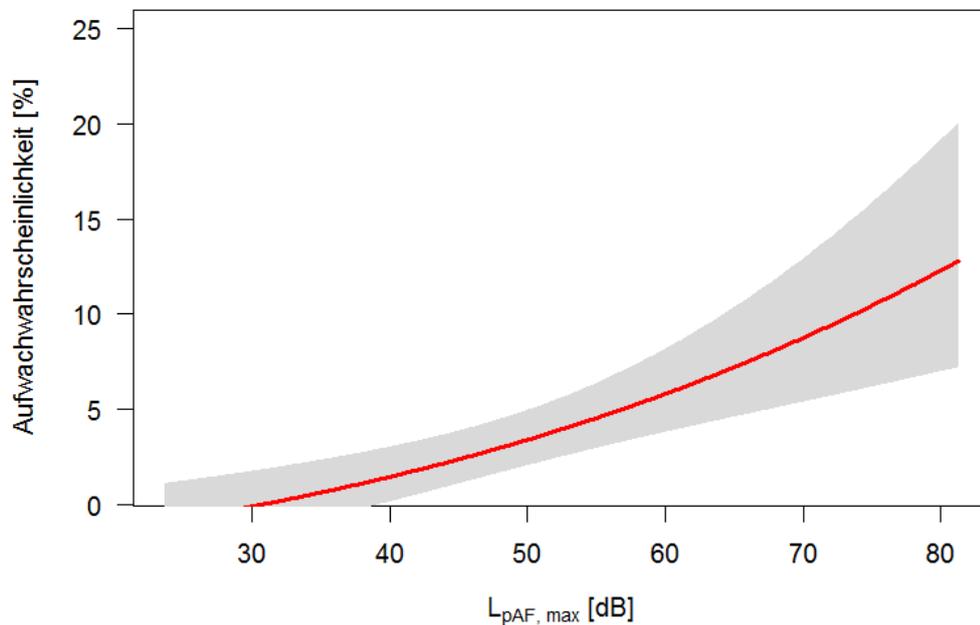
Die Faktoren werden entweder vorgegeben oder durch den Median sämtlicher im Modell berücksichtigter Güterzugereignisse bestimmt.

Die Aufwachwahrscheinlichkeit wird dann folgendermaßen berechnet:

$$AWW_{GZ} = \frac{e^{AGZ}}{1+e^{AGZ}} * 100 - AWW_{spontan} \quad (\text{Gl.-5})$$

mit  $AWW_{spontan}$  - spontane Aufwachwahrscheinlichkeit = 5,7 %

### Aufwachwahrscheinlichkeit Güterzüge



Schraffiert dargestellt sind die 95%-Konfidenzintervalle: aktuelles Schlafstadium = S2, verstrichene Schlafdauer = 300 min, Geräuscdauer: 67 s, Zeit in akt. Schlafstadium: 6,5 min,  $L_{pAF, ShortLeq_{01}}$  minus  $L_{pAF, ShortLeq_{10}}$ : 0,9 dB, spontane Aufwachwahrscheinlichkeit: 5,7 %

Abbildung 2-11: Expositions-Wirkungskurve zwischen dem maximalen Schalldruckpegel  $L_{pAF, max}$  eines Güterzuggeräusches und der Aufwachwahrscheinlichkeit beruhend auf dem Modell in Tabelle 2.

Das Modell gilt in den gemessenen Grenzen von  $L_{pAF, max}$  von 23,7 bis 81,3 dB, innen am Ohr des Schlafenden.

### Personenzug

Unter Berücksichtigung der besten praxisoptimierten Anpassung für eine Personenzugvorbeifahrt PZ (Regional- und S-Bahnen) (Kapitel 2.4.5) und der Berechnung der spontanen Aufwachwahrscheinlichkeit (Kapitel 2.4.6) ergibt sich somit folgender Exponent für die Gleichung zur Berechnung der Aufwachwahrscheinlichkeit für eine Personenzugvorbeifahrt (Modell für vorheriges Schlafstadium 2):

$$A_{pZ} = 0,00837 * L_{pAF, max} + 0,002138 * \text{Zeit nach Einschlafen} - 0,01391 * \text{Zeit in akt. Schlafst.} - 3,315 \quad (\text{Gl. 6})$$

Die Summanden besitzen folgende Einheiten und die Expositions-Wirkungskurve wird für folgende Faktoren gerechnet:

Tabelle 2-12: Einheiten und Faktoren der Summanden zur Berechnung der Aufwachwahrscheinlichkeit bei Vorbeifahrt eines Personenzuges. Die Faktoren werden entweder vorgegeben oder durch den Median sämtlicher im Modell berücksichtigter Personenzugereignisse bestimmt.

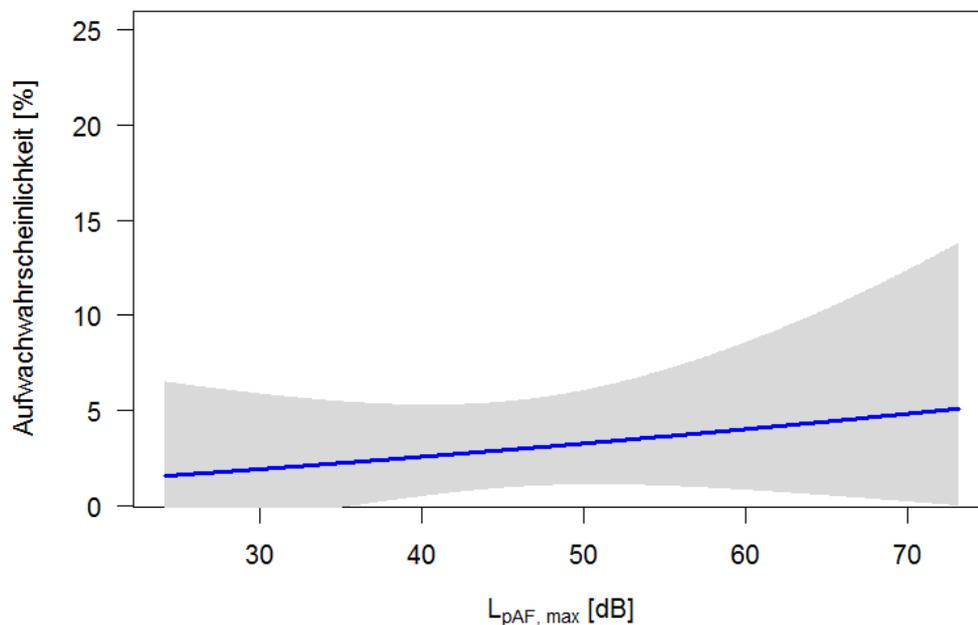
Summand	Einheit	Faktor
$L_{pAF,max}$	dB	—
Zeit nach Einschlafen	min	300 min (Vorgabe)
Zeit in akt. Schlafstadium	min	6,0 min (Median)

Die Aufwachwahrscheinlichkeit wird dann folgendermaßen berechnet:

$$AWW_{PZ} = \frac{e^{APZ}}{1+e^{APZ}} * 100 - AWW_{spontan} \quad (Gl.-7)$$

mit  $AWW_{spontan}$  - spontane Aufwachwahrscheinlichkeit = 5,7 %

### Aufwachwahrscheinlichkeit Personenzüge



Schraffiert dargestellt sind die 95%-Konfidenzintervalle: aktuelles Schlafstadium = S2, verstrichene Schlafdauer = 300 min, Zeit in akt. Schlafstadium: 6,0 min, spontane Aufwachwahrscheinlichkeit: 5,7 %

Abbildung 2-12: Expositions-Wirkungskurve zwischen dem maximalen Schalldruckpegel  $L_{pAF,max}$  eines Personenzuggeräusches und der Aufwachwahrscheinlichkeit beruhend auf dem Modell in Tabelle 4.

Das Modell gilt in den gemessenen Grenzen von  $L_{pAF,max}$  von 24,1 bis 73,2 dB, innen am Ohr des Schlafenden.

### 3 Entwicklung von Kenngrößen zur Berechnung des Maximalpegels von Schienenverkehrslärm

#### 3.1 Aufgabenstellung

Für die im Arbeitsschritt 1 identifizierten Wirkungskenngrößen für das Schutzziel der Vermeidung der Beeinträchtigung des Schlafs sollen im folgenden Arbeitsschritt die erforderlichen Belastungskenngrößen oder Kombinationen hieraus entwickelt werden. Als akustische Beschreibungsgrößen zur Aufklärung der gemessenen physiologischen Größen können die Pegelanstiegsgeschwindigkeit, die Pegelhöhe, die Vorbeifahrtzeit einzelner Züge und die Anzahl der Vorbeifahrten, bei der Erfassung der Belästigung und bei den epidemiologischen Auswertungen der Maximalpegel, die Emergenz und der Mittelungspegel geeignet sein. Dabei können bei unterschiedlichen Wirkungsbereichen möglicherweise auch unterschiedliche akustische Belastungskenngrößen kennzeichnend oder auch Kombinationsmaße derselben für eine maximale Varianzaufklärung sinnvoll sein.

Sofern akustische Kenngrößen durch Messungen ermittelt werden, besteht die Möglichkeit, die oben beschriebenen Wirkungskenngrößen messtechnisch zu bestimmen. Dagegen stehen für rechnerische Prognosen der Schienenverkehrsgeräusche derzeit genormte Methoden nur für die Bildung des Mittelungspegel  $L_{pA,eq}$  zur Verfügung, während für weitere akustische Beschreibungsgrößen, wie z.B. für den Maximalpegel, nur Schätzverfahren vorliegen.

In diesem Untersuchungsteil werden in einem ersten Arbeitsschritt mögliche Kennzeichnungsgrößen des Maximalpegels beschrieben und definiert. Dabei werden Normen und Richtlinien herangezogen, die sowohl die Messung als auch die Berechnung von Maximalpegeln umfassen. In einem zweiten Schritt wird für die Kennzeichnungsgrößen des Maximalpegels eine rechnerische Methode entwickelt.

#### 3.2 Kennzeichnung des Maximalpegels von Schienenverkehr

##### 3.2.1 Grundlegende Größen zur Beschreibung von Zugvorbeifahrten durch Schallmessungen

###### Mittelungspegel

Der Mittelungspegel  $L_{pA,eq,T}$  über die Messdauer  $T$  ist die Ausgangsgröße für die meisten Beurteilungspegelgrößen im deutschen und internationalen Immissionsschutzrecht. Er gibt den energetisch über die Messdauer  $T$  gemittelten Pegel von Geräuscheignissen wieder. Im Falle von A-bewerteten Signalen errechnet sich der Mittelungspegel in der allgemeinen Definition der DIN EN ISO 3095 wie folgt:

$$L_{p,A,eq,T} = 10 \lg \left( \frac{1}{T} \int_0^T \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} dt \right) \text{ dB} \quad (\text{Gl.-8})$$

Dabei ist

$p_{A,i}(t)$  der A-bewertete momentane Schalldruck bei Laufzeit  $t$ , in Pa

$p_0$  der Bezugsschalldruck,  $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$ .

Eine sinngemäß identische Definition des „equivalent continuous sound pressure level“ enthält auch die ISO 1996-1 (2016).

Bei zeitlich annähernd gleichförmigen Geräuschquellen ist der Mittelungspegel vom Zahlenwert nah an den Pegeln, die während der Geräuscheinwirkung messbar ist, solange die Dauer des Geräusches nicht (wesentlich) kürzer als die Messdauer  $T$  ist. Bei stark intermittierenden Geräuschen, wie sie z.B. beim Schienenverkehr auftreten, ergeben sich abhängig vom Verhältnis zwischen Pause und Geräusch mehr oder weniger starke Differenzen zwischen dem Pegel während des Geräusches und dem Mittelungspegel. Bei einzelnen Geräuschereignissen (z.B. Zugvorbeifahrt) hängt somit der Mittelungspegel stark von der Messdauer  $T$  ab.

Die energieäquivalente zeitliche Mittelung gewichtet höhere Pegelwerte stärker als niedrige Pegelwerte, so dass der energieäquivalente Mittelungspegel höhere Pegel ergibt als ein arithmetischer Mittelungspegel. Dennoch würde z.B. der häufig verwendete Stundenmittelungspegel  $L_{pA,eq,1h}$  in dem folgenden Beispiel mehr als 20 dB unterhalb der Vorbeifahrtpegel liegen:

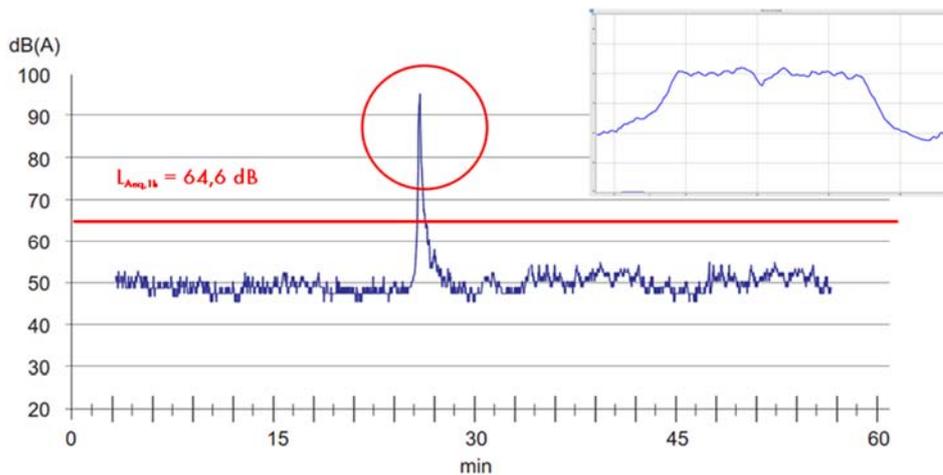


Abbildung 3-1: Mittelungspegel  $L_{pA,eq,1h}$  einer Vorbeifahrt

## Maximalpegel

Beim Maximalpegel ist zu berücksichtigen, welche Zeit- und Frequenzbewertung zugrunde liegt. In der ISO 1996-1 (2016) ist demnach allgemein ein „maximum time-weighted and frequency-weighted sound pressure level“ definiert, der sich für ein bestimmtes Zeitintervall ergibt. Beim Umgebungslärm (speziell im Landverkehrslärbereich) ist dabei fast ausschließlich ein A-bewerteter Pegel mit der Zeitkonstante Fast gemeint. Dementsprechend ist der Maximalpegel in der DIN EN ISO 3095 (2014) als AF-bewerteter maximaler Schalldruckpegel  $L_{pAF,max}$  wie folgt definiert:

Höchstwert des A-bewerteten Schalldruckpegels, der während der Messdauer  $T$  bei Anwendung der Zeitbewertung  $F$  (Fast) bestimmt wird. In dem oben bereits gewählten Beispiel einer ICE-Vorbeifahrt ergibt sich folgendes Ergebnis:

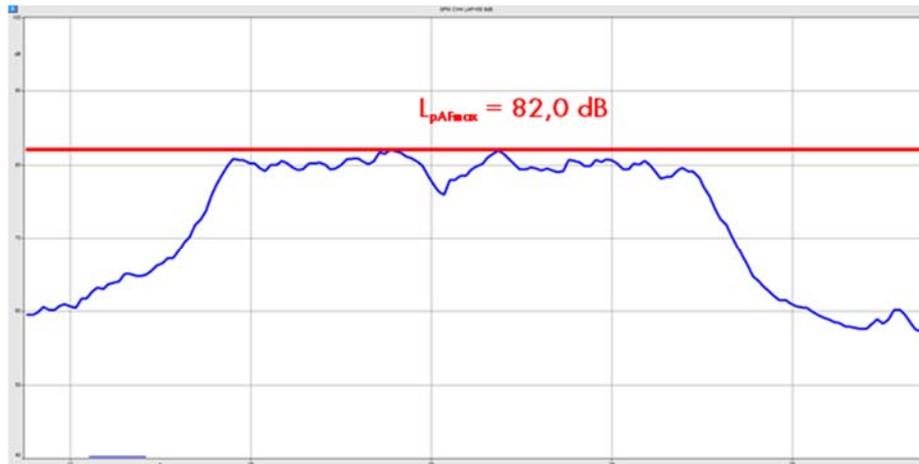


Abbildung 3-2: AF-bewerteter maximaler Schalldruckpegel  $L_{pAF,max}$  einer ICE-Vorbeifahrt

Der Maximalpegel einer Vorbeifahrt ist somit unabhängig von der Messdauer  $T$ , solange die Messdauer größer als die Vorbeifahrtzeitdauer ist und alle Geräusche der Vorbeifahrt in der Messdauer erfasst sind. Für ein Ereignis/eine Vorbeifahrt ist der Maximalpegel somit eindeutig definiert, ebenso wie bei der allgemeinen Definition wie z.B. in der DIN 45645 (1996) als Maximalwert innerhalb des Messintervalls  $T$ . Bei sich wiederholenden Ereignissen stellt sich bereits die Frage, ob hier alle Ereignisse als gleichwertig oder ob einzelne Ereignisse als maßgebend erachtet werden.

In der allgemeinen Form ist in der ISO/DIS 1996-2 (2015) in Kapitel 3.2.2 bei der Auswertung von Maximalpegeln angegeben, dass folgende Werte des  $L_{max}$  „whenever relevant“ angegeben werden sollen:

- das höchste Maximum
- das arithmetische Mittel
- das energetische Mittel
- die Standardabweichung
- die statistische Verteilung

Eine Bestimmung eines maßgeblichen Maximalpegels ist auch für Schienenverkehrsgeräusche in Annex H der ISO/DIS 1996-2 (2015) unter Berücksichtigung der Standardabweichung angegeben. In der DIN 45642 (2004) und der DIN EN ISO 3095 (2014) ist für Verkehrsgeräusche der gleichen Kategorie (Fahrzeug bzw. Gattung) festgelegt, dass als maßgeblicher Messwert das arithmetische Mittel der Wiederholungsmessungen zu bilden ist. Dementsprechend sollte für die unterschiedlichen Kategorien (Zuggattungen) eigene Maximalpegel ermittelt werden. Das resultierende Messergebnis ist somit in erster Näherung unabhängig von der Zahl der Ereignisse bzw. der gewählten Messdauer.

In der Literatur ist neben der arithmetischen Mittelung von Messwiederholungen auch die Abschätzung des mittleren Maximalpegels durch Summenhäufigkeitspegel  $L_1$  (d.i. derjenige A-Schallpegel, der während

1 % der Zeit erreicht oder überschritten wird) bekannt. Bei dieser Abschätzung wird jedoch in Kauf genommen, dass das Ergebnis bei stark intermittierenden Geräuschen mit langen Pausendauern wesentlich von der Messdauer beeinflusst wird.

*Hinweis:*

*Der auch in Messgeräten üblicherweise anzeigbare „peak sound pressure level“ (vgl. ISO 1996-1) kennzeichnet den Pegel des Maximums des (nicht zeit-bewerteten) Schalldrucks. Dieser Wert ist zur Charakterisierung von Gehörgefährdungen gedacht und ist nicht Betrachtungsgegenstand dieser Untersuchung.*

### Einzelereignispegel (SEL)

Der Einzelereignispegel ist ein Mittelungspegel, der gegenüber dem einfachen Mittelungspegel  $L_{pAeq,T}$  die Information über die Zeitdauer des Geräusches in den Ergebniswert einfließen lässt. Nach ISO 1996-1 (2016) ist der „sound exposure level“ wie folgt definiert:

$$L_E = 10 \lg \frac{E}{E_0} \text{ dB} \quad (\text{Gl.-9})$$

mit:

$$E = \int_{t_1}^{t_2} p^2(t) dt$$

$$E_0 = 400 \text{ } \mu\text{Pa}^2\text{s}$$

$p(t)$  der A-bewertete momentane Schalldruck bei Laufzeit  $t$ , in Pa

Dieser Wert charakterisiert die Geräusch-Exposition, d.h. die Höhe und die Dauer der Geräuscheinwirkung. Im Gegensatz zum Mittelungspegel steigt der Messwert kontinuierlich mit der Messdauer an, da der quadrierte Schalldruck im Integral nicht zeitlich gemittelt sondern aufsummiert wird.

In Anhang A.2 der DIN 45641 (1996) und in der DIN 45642 (2004) ist der Einzelereignis-Schalldruckpegel oder Einzelereignispegel wie folgt definiert:

$$L_{p,T_0=1s} = L_{peq} + 10 \lg \frac{T}{T_0} \text{ dB} \quad (\text{Gl.-10})$$

Dabei ist

$T$  die Messdauer in s

$T_0$  die Bezugszeit 1 s

Daraus ist ersichtlich, dass ein gleichförmiges Geräusch mit zunehmender Messdauer  $T$  einen zunehmenden Einzelereignispegel erzeugt. Im Beispiel einer ICE-Vorbeifahrt bedeutet dies, dass ein aus 2 Einheiten gekoppelter Triebzug einen um 3 dB höheren Einzelereignispegel erzeugt wie eine einzelne Einheit.

Der Einzelereignispegel ist auch maßgebliche Messgröße bei der Messung der Emission von Schienenverkehrsgläuschen nach DIN 45642 (2004). Zur Kennzeichnung der Emission einer Zugart sollen demnach die Einzelereignispegel einer Zugart auf einem Gleis arithmetisch gemittelt werden.

Das Ergebnis der Bestimmung des Einzelereignispegels der obigen ICE-Vorbeifahrt gibt folgende Abbildung wieder:

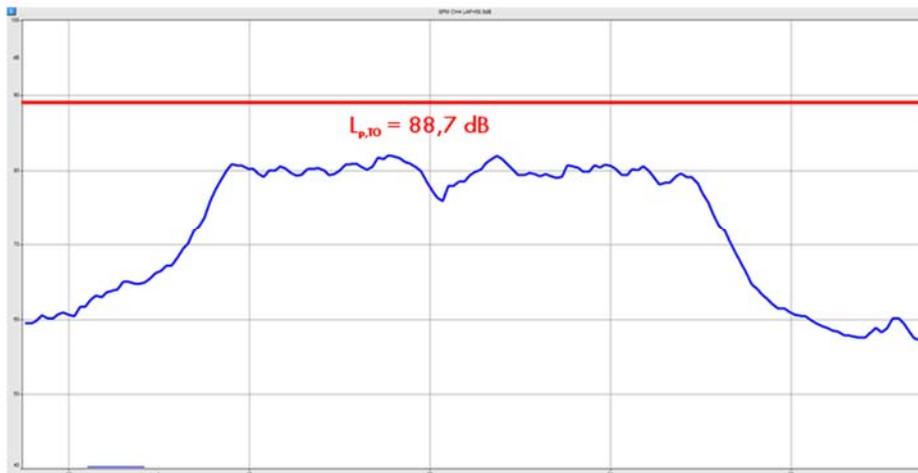


Abbildung 3-3: Einzelereignispegel  $L_{p,10}$  (SEL) einer ICE-Vorbeifahrt

### Vorbeifahrtexpositionspegel

Ein für ganze Zugvorbeifahrten definierter Vorbeifahrtexpositionspegel  $TEL$  ist in EN ISO 3095 (2005) angegeben. Der Vorbeifahrtexpositionspegel ist eine Abwandlung des Einzelereignispegels und gibt den während der Messdauer  $T$  gemessenen und auf die Vorbeifahrtdauer  $T_p$  normierten Mittelungspegel der einzelnen Vorbeifahrt wieder:

$$TEL = 10 \lg \left( \frac{1}{T_p} \int_0^T \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} dt \right) dB = SEL + 10 \lg \frac{T_0}{T_p} dB \quad (\text{Gl.-11})$$

Dabei ist

$T$  die Messdauer in s

$T_p$  die geometrische Vorbeifahrtdauer des Zuges in s

$p_{A,i}(t)$  der A-bewertete momentane Schalldruck bei Laufzeit  $t$ , in Pa

$p_0$  der Bezugsschalldruck,  $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$

Der Vorbeifahrtexpositionspegel gibt im Wesentlichen den über die eigentliche Vorbeifahrt zeitlich gemittelten Mittelungspegel wieder. Er ist von der Messdauer  $T$  unabhängig, kann jedoch bei auffälligen Einzelquellen innerhalb eines Zugverbands oder Einzelwagens deutlich unterhalb des eigentlichen Maximalpegels  $L_{pAF,max}$  der jeweiligen Zugvorbeifahrt liegen.

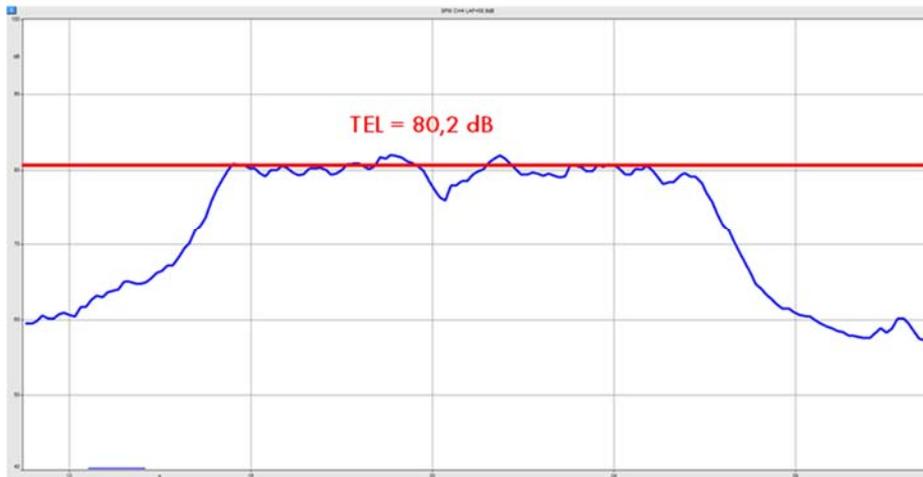


Abbildung 3-4: Vorbeifahrtsexpositionspegel TEL einer ICE-Vorbeifahrt

Der Vorbeifahrtexpositionspegel ist vor allem bei längeren Zugvorbeifahrten (Güterzüge, Fernverkehrszüge) am ehesten mit dem Höreindruck des Vorbeifahrens des Zuges in Einklang zu bringen, jedoch spielt die Dauer der Vorbeifahrt dabei keine Rolle für die Höhe des Vorbeifahrtexpositionspegels. Eine Verdopplung der Vorbeifahrtdauer (z.B. im Falle zweier zusammengekoppelten ICE-Einheiten anstelle einer einzelnen Einheit) ergibt keine Veränderung des  $TEL$ . Bei sehr kurzen Fahrzeugeinheiten (z.B. Nahverkehrstriebzug) liegt der  $TEL$  etwas unterhalb des maximal auftretenden Vorbeifahrtpegels (wenn sich aufgrund der kurzen Dauer kein Pegelplateau ausbildet).

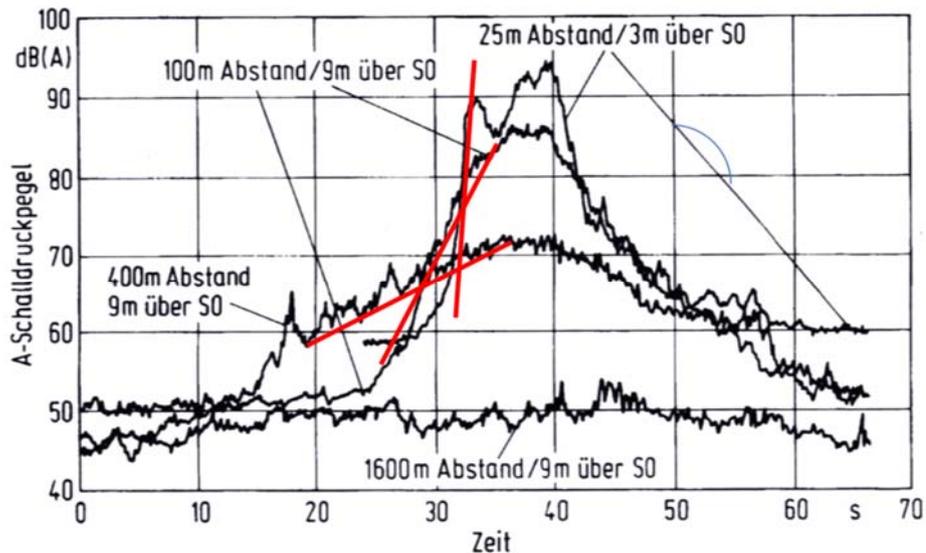
### 3.2.2 Weitere Kenngrößen zur akustischen Beschreibung von Vorbeifahrten

#### Mittlerer Maximalpegel als Summenhäufigkeitspegel $L_1$

In der Literatur, u.a. Schmidt (1989) wird gelegentlich auch der Summenhäufigkeitspegel  $L_1$  als mittlerer Maximalpegel  $\overline{L_{max}}$  bezeichnet. Dieser Summenhäufigkeitspegel hängt jedoch nicht nur von der Höhe der Vorbeifahrtpegel ab, sondern auch von deren Häufigkeit. Bei gleichförmigen Vorbeifahrten (z.B. an einer reinen S-Bahnstrecke) würde der mittlere Maximalpegel mit der Zahl der Vorbeifahrten zunehmen, obwohl jede Vorbeifahrt an sich gleich wäre. Insofern gibt der mittlere Maximalpegel weder einen Mittelungspegel noch einen reinen Maximalpegel wieder. In Möhler (1990) wurde ausgeführt, dass zur Beschreibung des Spitzenpegels des Schienenverkehrs der  $L_1$  ungeeignet ist, da insbesondere bei geringen Vorbeifahrtshäufigkeiten der tatsächliche Spitzenpegel über dem  $L_1$  liegt.

### Pegelanstiegsgeschwindigkeiten

Die Geschwindigkeit, mit der der Pegel bei annäherndem Zug ansteigt, kann als Maß für die Belästigung von einer Lärmquelle ebenfalls einen Teil der Wirkung aufklären. Die Pegelanstiegsgeschwindigkeit ist im Wesentlichen von der Vorbeifahrtsgeschwindigkeit des Zuges und vom Abstand abhängig und ist beispielhaft in folgender Abbildung aus dem Taschenbuch der Akustik, (Müller, Möser ,2004), dargestellt:



Quelle: Taschenbuch der Technischen Akustik, 2007

Abbildung 3-5: Zeitlicher Pegelverlauf einer Zugvorbeifahrt in unterschiedlichen Abständen

Die Pegelanstiegsgeschwindigkeit ist keine genormte Messgröße und lässt sich bei realen Messbedingungen aufgrund der starken Abhängigkeit von Zufälligkeiten bei der Annäherung nur schwer reproduzieren. Eine wesentliche Erschwernis ist das Fehlen einer klaren und möglichst wirkungsäquivalenten Definition der Pegelanstiegsgeschwindigkeit. In der folgenden beispielhaften Abbildung einer IC-Vorbeifahrt in 25 m Abstand gibt es neben der dargestellten Möglichkeit zur Detektion der Pegelanstiegsgeschwindigkeit zahlreiche alternative Vorgehensweisen.

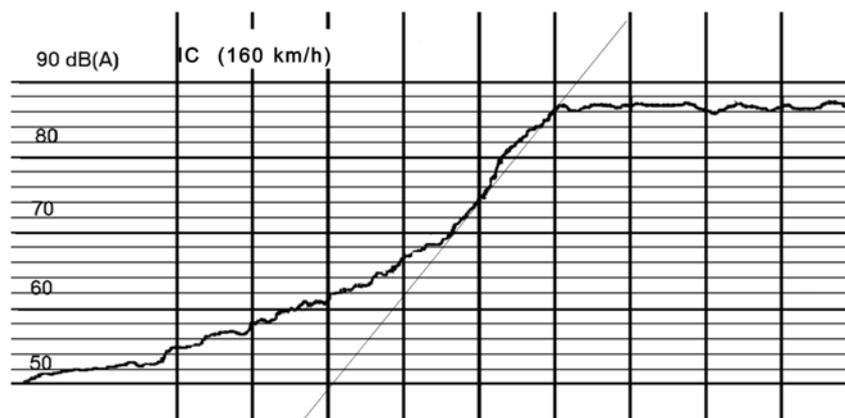


Abbildung 3-6: Mögliche Detektion des Pegelanstiegs eines IC in 25 m Entfernung

Durch Simulationsrechnungen wurde der grundsätzliche Zusammenhang zwischen Pegelanstiegsgeschwindigkeit und Abstand am Beispiel eines Güterzugs und ICEs ermittelt. Als Ausgangsgeschwindigkeit wurde für den Güterzug eine Geschwindigkeit von 80 km/h, für den ICE Zug von 200 km/h zugrunde gelegt. In folgender Abbildung ist der Pegel - Zeitverlauf eines Güterzuges mit einer Geschwindigkeit von 80 km/h im Abstand zwischen 7,5 m und 500 m qualitativ dargestellt.

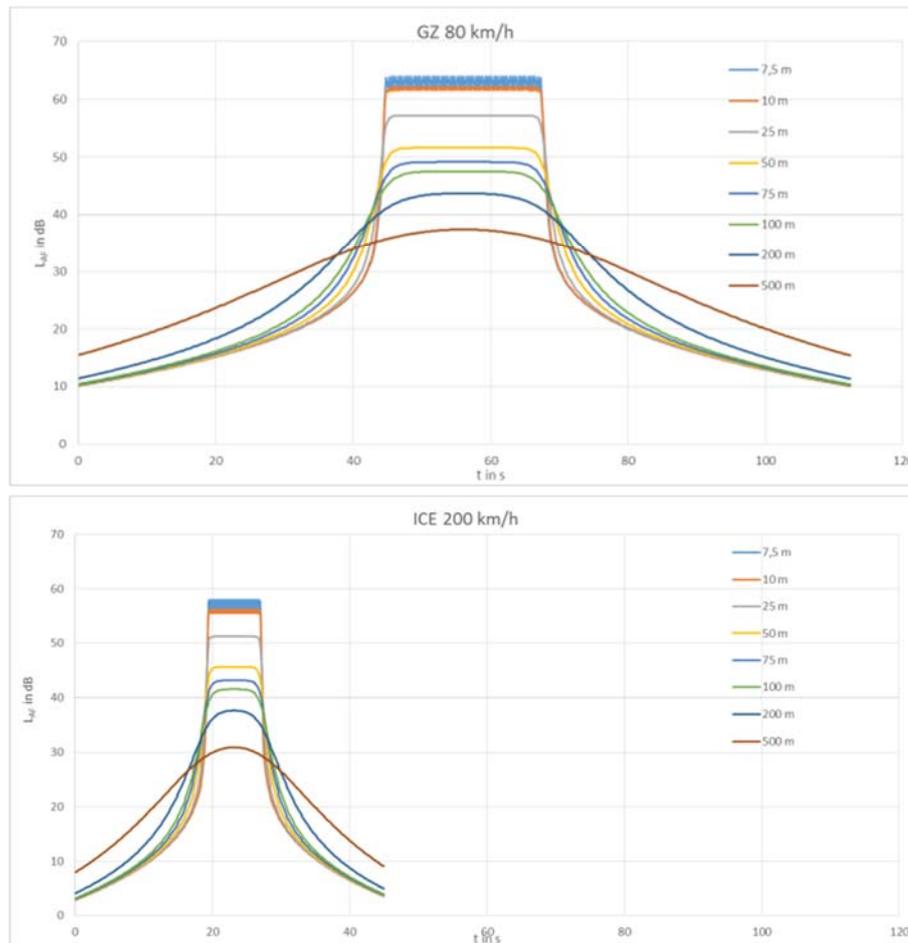


Abbildung 3-7: Simulation des zeitlichen Pegelverlaufes in unterschiedlichen Abständen

Um die Veränderung der Pegelanstiegsgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Abstand und von der Geschwindigkeit quantifizieren zu können, wird als Definition die Pegeldifferenz bezogen auf die Zeitdauer zwischen dem Punkt 10 dB - alternativ 20 dB - unterhalb des ersten Wendepunkts des Pegelverlaufs und dem Wendepunkt gewählt. In folgender Abbildung ist der Zusammenhang zwischen der Pegelanstiegsgeschwindigkeit und dem Abstand dargestellt.

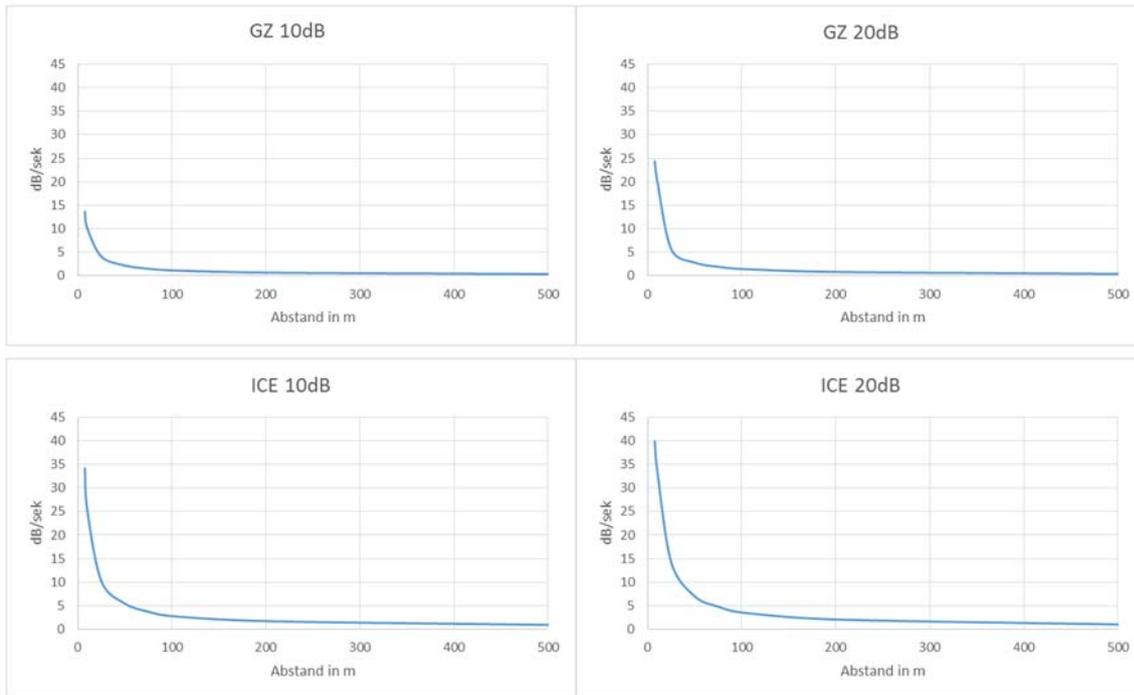


Abbildung 3-8: Zusammenhang zwischen Pegelanstiegsgeschwindigkeit und Abstand

Es zeigt sich, dass bis zu einem Abstand von ca. 50 m die Pegelanstiegsgeschwindigkeit stark zunimmt und mit zunehmendem Abstand langsam geringer wird. In folgender Abbildung ist der zeitliche Pegelverlauf des Vorbeifahrtpegels für unterschiedliche Vorbeifahrtgeschwindigkeit aufgetragen:

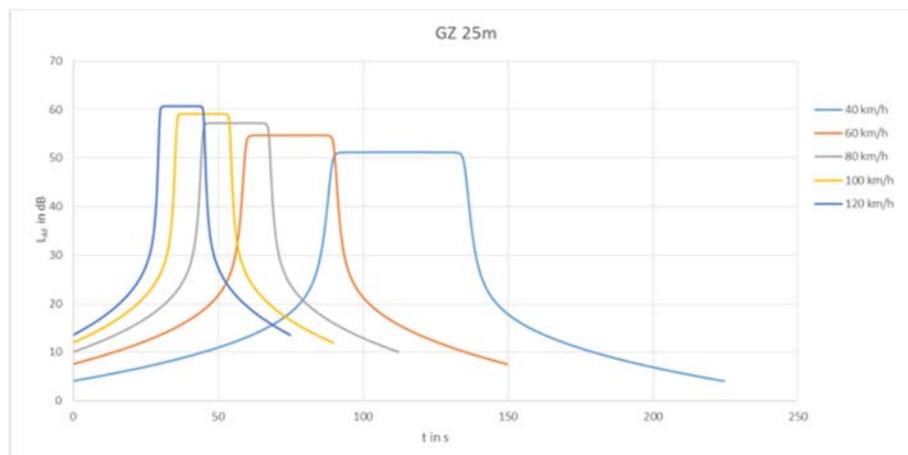


Abbildung 3-9: Zeitlicher Pegelverlauf des Vorbeifahrtpegels für unterschiedliche Vorbeifahrtgeschwindigkeit

Aus o.a. Abbildung lässt sich ableiten, dass mit zunehmender Geschwindigkeiten die Pegelanstiegsgeschwindigkeiten und die Maximalpegel stark zunehmen, die Vorbeifahrtzeiten abnehmen.

## Vorbeifahrtdauer

Der Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit  $v$ , Abstand und Vorbeifahrtdauer  $T$  der Züge wurde mit den gleichen Modellannahmen wie für die Pegelanstiegsgeschwindigkeit ermittelt. Die Ergebnisse sind in folgenden Abbildungen dargestellt:

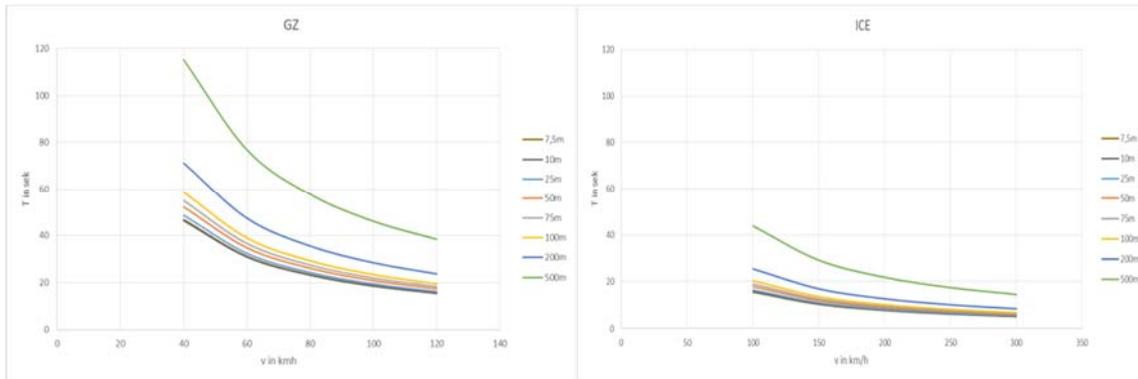
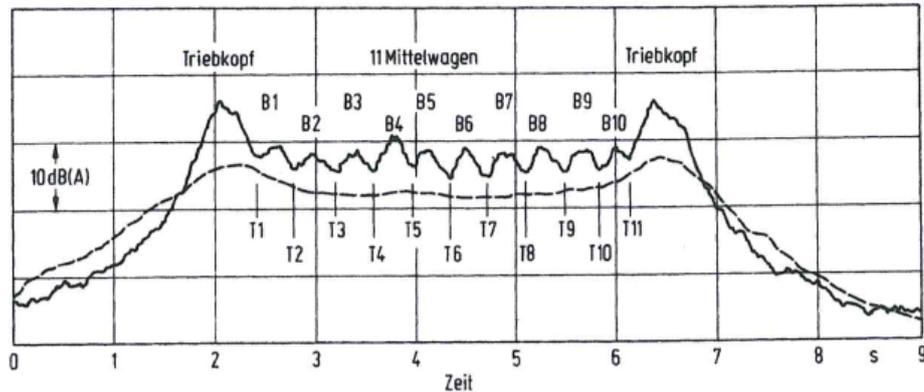


Abbildung 3-10: Zusammenhang zwischen Vorbeifahrtdauer  $T$  und Vorbeifahrtgeschwindigkeit  $v$

Es zeigt sich, dass in Abständen bis zu ca. 100 m die Vorbeifahrtdauer relativ unabhängig vom Abstand ist; in größeren Abständen von ca. 100m bis 500 m erhöhen sich die Vorbeifahrtdauern erheblich.

## Schwankungsstärke

Die Schwankungsstärke (engl. fluctuation strength) ist eine psychoakustische Empfindungsgröße, die die Hörempfindung einer zeitlich veränderlichen Lautheit eines Geräusches wiedergibt, siehe hierzu Fastl, Zwicker (2007). Sie wird hervorgerufen z.B. durch eine Amplitudenmodulation eines breitbandigen Geräusches. Dabei ist zu unterscheiden zwischen der Empfindung der Rauigkeit und der Schwankungsstärke. Während die Rauigkeit eines schneller amplitudenmodulierten Signals (Modulationsfrequenz  $\geq 20$  Hz) ein gleichförmiges Lautstärkeempfinden jedoch eine dem Wortlaut nach empfundene Rauigkeit hervorruft (Beispiel „rollendes R“), kann bei langsamer amplitudenmodulierten Signalen (Modulationsfrequenz  $\leq 20$  Hz) die zeitliche Struktur durch eine schwankende Lautstärke des Geräusches aufgelöst werden. Die Empfindung „Schwankungsstärke“ tritt am stärksten zutage bei Modulationsfrequenzen von etwa 4 Hz, was in etwa der Zahl der Silben pro Sekunde bei gesprochener Sprache entspricht. Eine ähnliche Modulationsfrequenz zeigen in etwa auch Geräusche von Zugvorbeifahrten, deren Modulation durch den Abstand und die Folge der Achsen verursacht wird. Im folgenden Beispiel in Abbildung 3-11 ist der Verlauf des Pegels einer ICE-Vorbeifahrt in 7,5 m Abstand dargestellt. Bei der Geschwindigkeit von 250 km/h passieren den Messpunkt rund 3 Wagen pro Sekunde. Dies entspricht einer Modulationsfrequenz von 3 Hz und bei geringeren Geschwindigkeiten etwas geringeren Modulationsfrequenzen. In diesem Bereich erzeugt die Schwankungsstärke eine erhöhte Aufmerksamkeit bei einem Hörer. Mit zunehmendem Abstand nimmt die Modulationstiefe ab. Aus der folgenden Abbildung ist ersichtlich, dass bereits bei einem Abstand von 25 m Abstand die Modulation des Pegels aufgrund der Achsfolge aufgelöst ist:



(aus: Taschenbuch der Technischen Akustik, Müller, Möser 2004)

Abbildung 3-11: Zeitlicher Verlauf des LAF eines ICE 1 mit einer Geschwindigkeit von 250 km/h in 7,5 m Abstand (durchgezogene Linie) und 25 m Abstand (gestrichelte Linie)

### 3.2.3 Abstandsbedingte Pegelminderung von Punkt- und Linienschallquellen

Die Pegelminderung aufgrund des Abstandes hängt davon ab, welche Quelleigenschaft der jeweilige Kennwert beschreibt. Alle Messwerte, die eine zeitliche Mittelung des Pegelverlaufs bewegender Quellen bilden (wie insbesondere Mittelungspegel  $L_{pA,eq}$ ), spiegeln die linienförmige Ausbildung der Schallquelle wieder. Diejenigen Kennwerte, die nur einen kurzen Zeitausschnitt eines Pegelverlaufs wiedergeben (im Extremfall der Maximalpegel, der nur durch ein singuläres Ereignis bestimmt sein kann), spiegeln punktförmige Eigenschaften einer Quelle wieder.

Der Pegel (bzw. richtiger die Schallintensität) einer idealen punktförmigen Schallquelle nimmt mit dem Quadrat des Abstandes ( $10 \lg(d_0^2/d^2)$ ) ab, während diese bei einer linienförmigen Quelle mit dem Abstand ( $10 \lg(d_0/d)$ ) abnimmt. Diese Zusammenhänge sind idealisiert in folgender Abbildung dargestellt:

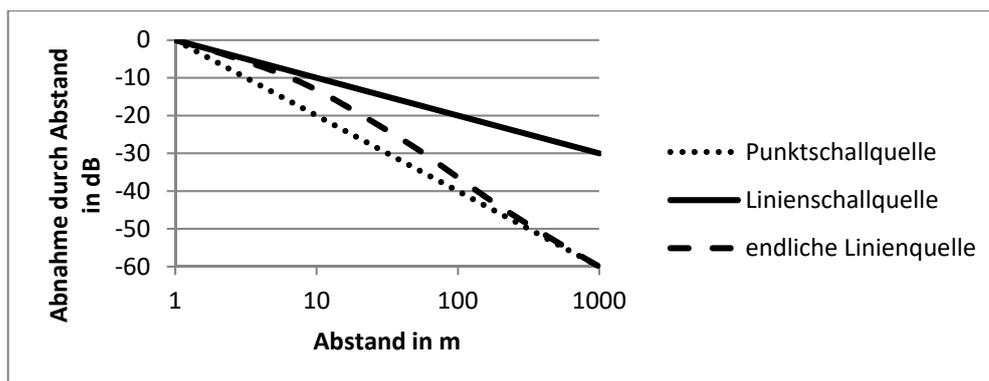


Abbildung 3-12: Abstandsbedingte Pegelminderung einer linienförmigen und einer punktförmigen Schallquelle

Akustische Messwerte, die die begrenzte Ausdehnung der Linienschallquelle berücksichtigen (z.B. der Vorbeifahrtexpositionspegel TEL) zeigen beide Eigenschaften einer Quelle: im Nahbereich nimmt der Kennwert wie bei einer linienförmigen Quelle und bei größeren Abständen wie bei einer punktförmigen Quelle

ab. Das Verhalten einer endlichen Linienquelle mit zunehmendem Abstand ist in Abbildung 3-12 dargestellt.

Die unterschiedlichen Abstandsabhängigkeiten der verschiedenen Kennwerte haben zur Folge, dass bei einer realen Zugvorbeifahrt sich die unterschiedlichen Kennwerte in den oben beschriebenen Weisen mit dem Abstand unterschiedlich abnehmen. So nimmt der Maximalpegel  $L_{pAF,max}$  abstandsbedingt stärker ab als der Mittelungspegel. Mit zunehmendem Abstand nähern sich somit Maximalpegel und Mittelungspegel aneinander im Wert an.

### 3.2.4 Vorschlag für einen Kennwert des Maximalpegels in der Prognose

Als Kennzeichnungsgröße für die ereignisbezogene Wirkung von Zugvorbeifahrten können unterschiedliche Maximalpegeldefinitionen zugrunde gelegt werden. Diese Definitionen unterscheiden sich anhand des Detaillierungsgrades der Prognose und der Prognostizierfähigkeit der entsprechenden Detaillierung:

1. Gemittelter Vorbeifahrtpegel ( $TEL$ ) gemittelt über alle Zuggattungen
2. Gemittelter Vorbeifahrtpegel ( $TEL$ ) für die lauteste Zuggattung
3. Maximalpegel ( $L_{pAF,max}$ ) für die lauteste Fahrzeuggattung
4. Maximalpegel ( $L_{pAF,max}$ ) für das lauteste Einzelereignis

Beispielhaft sind im Folgenden die unterschiedlichen Definitionsmöglichkeiten und deren zahlenmäßige Auswirkungen anhand eines Messpunkts in 15 m Abstand von der nächstgelegenen Gleisachse dargestellt.

Die Methoden nach 1 und 2 lassen sich mit den gebräuchlichen Rechenmodellen der Schall 03 (2014) vergleichsweise einfach prognostizieren. Einfache Methoden sind in Kapitel 2.4.4 beschrieben. Bei homogenen Zugvorbeifahrten, ohne besondere herausragende Einzelereignisse, kann dieses Verfahren eine gute Prognose des sog. Maximalpegels bieten, da der Unterschied zwischen Vorbeifahrtpegel ( $TEL$ ) und einem gemessenen Maximalpegel ( $L_{pAF,max}$ ) gering ausfällt.

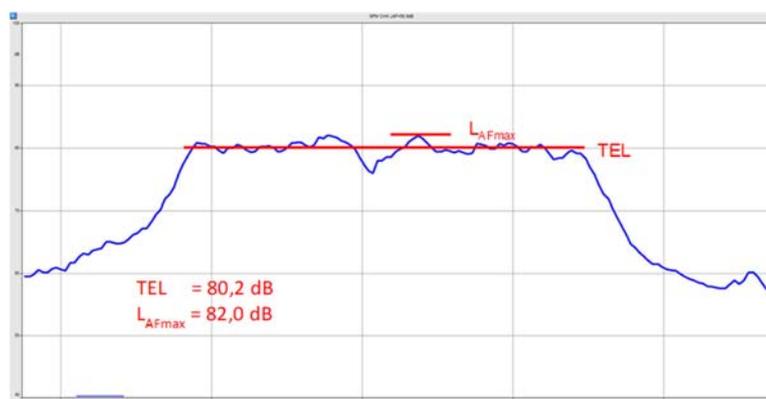


Abbildung 3-13: Zeitverlauf des  $L_{p,AF}$  eines ICE (120 km/h) in 15 m Abstand

Die Mittelung über alle Zuggattungen nach Punkt 1 erscheint jedoch wenig sinnvoll, da zwischen den einzelnen Zuggattungen Schwankungen des Vorbeifahrtpegels von mehr als 10 dB keine Seltenheit sind (vgl. folgende Abbildung 3-14). Diese Mittelung unterschätzt die Wirkung der Vorbeifahrtpegel und bringt zudem gegenüber dem ohnehin zu beurteilenden Mittelungspegel keine wesentliche Mehrinformation. Insofern erscheint die Definition des Maximalpegels als gemittelter Vorbeifahrtpegel der lautesten Zuggattung nach Punkt 2 als Mindestanforderung, die auch mit den vorhandenen Rechenmethoden einfach zu prognostizieren ist.

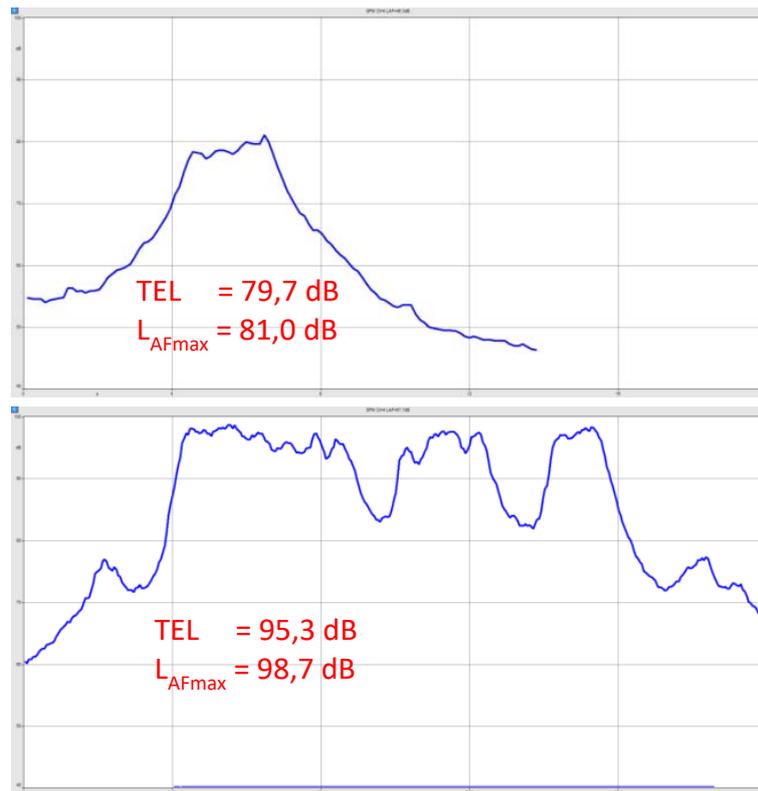


Abbildung 3-14: Zeitverlauf des  $L_{pAF}$  eines Nahverkehrszuges mit 120 km/h (oben) und eines Güterzuges mit 90 km/h (unten) in 15 m Abstand

Eine Vertiefung der Detaillierung durch Berücksichtigung der lautesten Fahrzeugkategorie nach Punkt 3 erscheint vor allem in Fällen sinnvoll, wenn einzelne Fahrzeuge deutlich aus dem Vorbeifahrtgeräusch eines Zuges herausragen. Dies ist aufgrund der Fortschritte bei der Lärminderung an den Fahrzeugen derzeit zunehmend der Fall. Im Fall von Güterzügen fällt bei Messungen eine zunehmende Schwankung der Vorbeifahrtpegel aufgrund der nach und nach eingeführten Fahrzeuge mit Verbundstoff-Klotzbremse auf. Im Zeitverlauf kann daher eine deutliche zeitliche Strukturierung aufgrund von leisen und lauten Fahrzeugen festgestellt werden. Dadurch können je nach Anteil leiser Fahrzeuge Unterschiede zwischen mittlerem Vorbeifahrtpegel und Maximalpegel von 3 dB bei selbst geringem Anteil von leisen Fahrzeugen (vgl. folgende Abbildung 3-15) und deutlich höheren Unterschieden bei hohem Anteil von leisen Fahrzeugen auftreten. Selbst bei IC-Zügen können (jedoch in umgekehrter Richtung) besonders laute Fahrzeuge den Maximalpegel bestimmen. In dem u.g. Beispiel eines IC führt die Vorbeifahrt der Lok mit auffälligen

Aggregatgeräuschen zu einem Maximalpegel, der 6 dB über dem mittleren Vorbeifahrtpegel des gesamten Zuges mit den angehängten leiseren schiebengebremsen Personenwagen liegt. Auch wenn bis Ende des Jahres 2020 voraussichtlich die Umrüstung von Güterwagen mit Grauguss-Klotzbremsen auf Verbundstoff-Klotzbremsen abgeschlossen ist, ist bei Güterzügen mit Pegelverläufen zu rechnen, die qualitativ dem in Abbildung 3-15 gezeigten Pegelverlauf eines IC-Zuges entspricht.

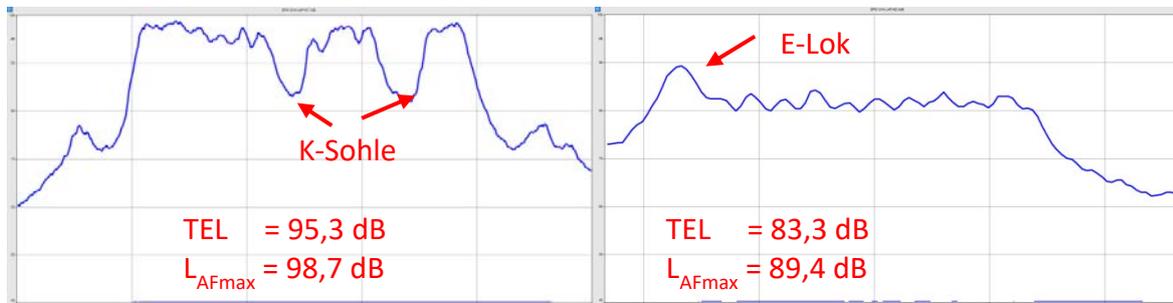


Abbildung 3-15: Zeitverlauf des  $L_{pAF}$  eines Güterzuges mit 90 km/h (oben) und eines IC mit 120 km/h (unten) in 15 m Abstand

Aufgrund der fahrzeugbezogenen Unterteilung der Schallemissionen nach Schall 03 ist auch diese Definition des Maximalpegels einfach in einem Rechenmodell zur Prognose des Maximalpegels umsetzbar. Einzelne auffällige Geräuscheereignisse können darüber hinaus zusätzlich zu einer Erhöhung des Maximalpegels von Vorbeifahrten führen. Dabei sind die Quellen der Pegelerhöhung häufig gar nicht bekannt oder vorhersehbar. Dies sind in den häufigsten Fällen Fehler in der Lauffläche von Rädern (Flachstellen, Polygone im Rad) oder geräuschintensive Aufbauten (flatternde Abspannbänder, quietschende Aufbauten). Das Beispiel einer in einem Güterzug mit Wagen mit Verbundstoff-Klotzbremsen auftretenden Flachstelle ist in folgender Abbildung dargestellt:

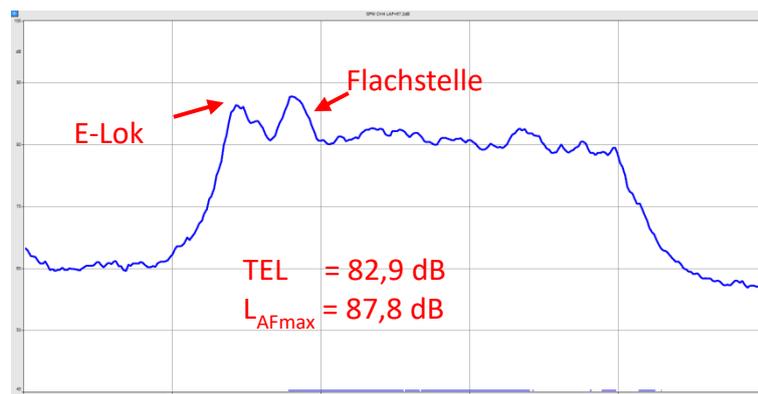


Abbildung 3-16: Zeitverlauf des  $L_{pAF}$  eines Güterzuges mit 90 km/h in 15 m Abstand

In diesem Fall führt die Flachstelle zu einer Erhöhung des Maximalpegels um 5 dB gegenüber dem mittleren Vorbeifahrtpegel. Problematisch bei diesen Ereignissen ist jedoch, dass sie weder vom Auftreten noch von der Höhe der Pegelanhebung prognostiziert werden können. Zudem stellt sich die Frage, auf welchen Zeitraum sich die Maximalwertbildung bezieht (lautestes Ereignis eines Jahres/Monats/Tages).

Im Rahmen der Berechnungsvorschrift für Skandinavien Nord 2000 (Jonasson, Storeheier, 2001) werden diese Erhöhungen durch einen pauschalen aber abstandsabhängigen Zuschlag berücksichtigt, der bei 10 m Abstand + 3 dB beträgt und bis auf 300 m auf 0 dB abnimmt.

Da keine belastbaren Prognosen auf Grundlage von Häufigkeiten von Einzelereignissen getroffen werden können, könnte man sich durch statistische Prognosen auf Grundlage von vorhandenen Messungen behelfen. Im Rahmen der DLR-Studie liegen für ca. 5.000 Güterzugvorbeifahrten und 2.000 Personenzugvorbeifahrten Messwerte des Maximalpegels  $L_{pAF,max}$  und des Vorbeifahrtpegel  $TEL$  in verschiedenen Abstandsbereichen vor. Anhand von statistischen Analysen lässt sich daraus ein Zusammenhang zwischen Maximalpegel und Vorbeifahrtpegel in Abhängigkeit vom Abstand erzeugen, der als Zuschlag in der Prognose Verwendung finden kann (weitere Ausführungen hierzu siehe Kapitel 3.3).

Zusammenfassend zeigt sich, dass unter Berücksichtigung der Methodik der Schall 03 (2014) eine Ermittlung des Maximalpegels für die lauteste Fahrzeuggattung (Methode 3) eine angemessene und verhältnismäßige Methode zur Beschreibung des Maximalpegels sein kann. Eine darüberhinausgehende Beschreibung von (statistischen) Einzelereignissen) kann ähnlich wie in der Nord 2000 (Jonasson, Storeheier, 2001) über einen statistischen Ansatz (s.o.) erfolgen.

### 3.2.5 Innen- vs. Außenpegel

Die o.a. Kennwerte beziehen sich im Allgemeinen auf Schallmessungen außen vor dem Fenstern von Gebäuden, der qualitative zeitliche Pegelverlauf kann auch auf die Situation innerhalb von Wohnräumen übertragen werden. Bei der Ermittlung des Innenpegels ist jedoch zu beachten, dass aufgrund der unterschiedlichen Schalldämmung von Außenbauteilen und durch die Fensterstellung (geschlossen, gekippt oder ganz geöffnet) die Pegeldifferenz zwischen Innen- und Außenpegel stark variieren kann. Die Differenz zwischen Innen- und Außenpegel liegt bei gekippten Fenstern bei etwa 15 dB, bei ganz geöffneten Fenstern bei etwa 0 dB und geschlossenen Fenstern zwischen 20 und 40 dB (vgl. hierzu VDI 2719, 1987)

## 3.3 Ableitung einer rechnerischen Prognose des Maximalpegels aus Schall 03

Im Folgenden werden zwei Möglichkeiten zur rechnerischen Prognose der Maximalpegel bei der Vorbeifahrt eines Zuges beschrieben. Beide Methoden sind grundsätzlich umsetzbar, unterscheiden sich jedoch in der Komplexität der rechnerischen Prognose und damit der Genauigkeit der erzielbaren Ergebnisse.

### 3.3.1 Modellierung der Schallquelle als unbegrenzte linienförmige Abstrahlung

Die Richtlinie Schall 03 (2014) verwendet als Ausganggröße für die Immissionsberechnung Pegel der längenbezogenen Schallleistung  $L_w'$ . Die Ausgangsdaten für die Ermittlung der Schallleistungspegel wurden aus einer Emissionsdatenbank von Schallmessungen gewonnen. Die Methode basiert auf der Rückrechnung der gemessenen Pegel am Messpunkt auf Schallleistungspegel der Quelle. Das Verfahren zur Ermittlung der Schallleistung des Rollgeräusches aus Vorbeifahrtmessungen ist in Gleichung (39) der Schall

03 (2014) anhand des gemessenen Einzelereignispegels  $L_{EA}$  angegeben. In umgekehrter Weise kann dabei auch vom Pegel der längenbezogenen Schalleistung auf einen Vorbeifahrtpegel umgerechnet werden. Dabei kann auf die in Gleichung (39) in Schall 03, angegebene Trennung von Rollgeräuschquellen und sonstigen Quellen verzichtet werden, da für die vorliegende Fragestellung das Gesamtgeräusch der Fahrzeuge maßgeblich ist.

Nach Vereinfachung zur Berücksichtigung des Gesamtgeräusches und weiteren Umformungen kann der Vorbeifahrtpegel eines Zuges oder eines Fahrzeuges im Abstand  $d$  unter Berücksichtigung der Länge des Fahrzeugs  $l_f$  in  $m$  und der Vorbeifahrtgeschwindigkeit  $v$  in  $km/h$  als  $L_{max}$  wie folgt berechnet werden:

$$L_{max} = L_W' - 10 \times \lg\left(\frac{2\pi d}{d_0}\right) + 36 - 10 \times \lg\left(\frac{l_f}{v T_0}\right) \quad (\text{Gl.-12})$$

mit:

$L_W'$  Pegel der längenbezogenen Schalleistung in dB

$d$  Abstand Gleismitte zu Immissionsort

$l_f$  Fahrzeuglänge bzw. Zugänge in  $m$

$v$  Geschwindigkeit in  $km/h$

$T_0$  1 s

Vereinfachend für eine bessere Lesbarkeit der obigen Formel sind die Indices für unterschiedliche Oktaven und unterschiedliche Quellhöhen unberücksichtigt. In dieser Formel wird ausgehend vom Pegel der längenbezogenen Schalleistung zunächst eine Korrektur des Abstands vorgenommen und anschließend die Zeitkorrektur des auf eine Mittelungszeit von einer Stunde bezogenen  $L_W'$  ( $10 \times \lg(3600s/1s) = 36$  dB) auf die Dauer der Vorbeifahrt  $T_p$  (letzter Summand) durchgeführt. Die Umrechnung basiert somit auf der Modellvorstellung einer (theoretisch unbegrenzten) linienförmigen Quelle, die zeitlich auf die Dauer der Vorbeifahrt  $T_p = l_f/v$  begrenzt abstrahlt. Diese Modellvorstellung ist in folgender Abbildung visualisiert. Auf den blau dargestellten Immissionspunkt wirken über die Dauer der Vorbeifahrt alle Teilstücke einer Linienquelle gleichzeitig ein. Die Teilstückzerlegung wird in (Gl. 5) jedoch ersetzt durch die halbzylinderförmige Abstrahlung einer (unendlichen) Linienquelle. Abgesehen vom Abstand werden jedoch keine weiteren Einflüsse auf dem Ausbreitungsweg berücksichtigt.

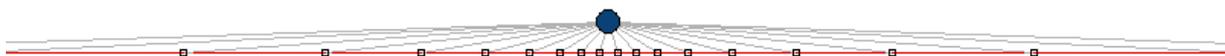


Abbildung 3-17: Abstrahlung einer unbegrenzten Linienquelle begrenzt auf die Dauer der Vorbeifahrt  $T_p$

Die zeitliche Umrechnung des (stündlichen) Pegels der längenbezogenen Schalleistung in eine zeitlich auf die Vorbeifahrtzeit begrenzte Abstrahlung (Summanden 3 und 4 der rechten Seite von Gl. 12) ist schematisch in folgender Abbildung 3-18 dargestellt:

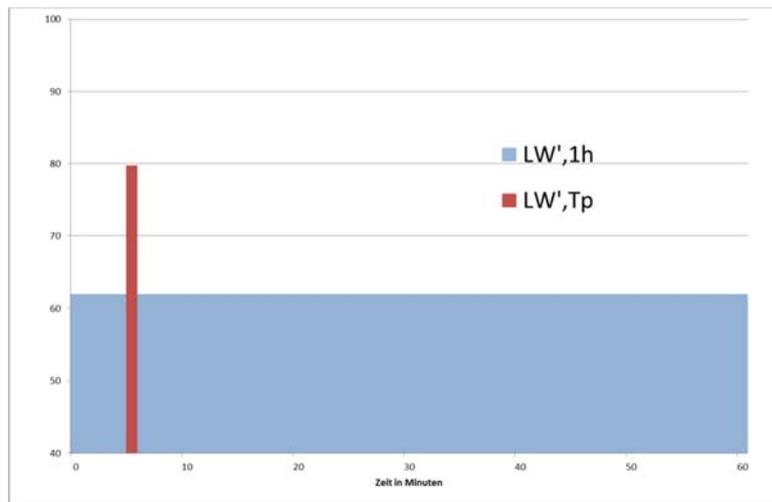


Abbildung 3-18: Zeitliche Korrektur der Abstrahlung der unbegrenzten Linienschallquelle

Das Ergebnis dieser Berechnungen ist ein über die Vorbeifahrtzeit gemittelter Vorbeifahrtpegel, wie er dem  $L_{pA,eq,Tp}$  entsprechen würde. Einzelne Geräuschmaxima innerhalb einer Vorbeifahrt (vergleichbar dem  $L_{pAF,max}$ ) werden durch die Mittelung nicht berücksichtigt. Es besteht jedoch durch die Unterteilung von Zügen nach Schall 03 (2014) in Fahrzeugeinheiten die Möglichkeit, die Berechnung entweder auf den Vorbeifahrtpegel von Zügen (z.B. lauteste Zugart) oder von Fahrzeugen (z.B. lautestes Fahrzeug) zu beziehen. Die grundsätzliche Vorgehensweise nach Gl. 5 bleibt unverändert.

Die Berechnung eines Vorbeifahrtpegels nach dieser Methode unterliegt folgenden Einschränkungen:

- Die Berechnung basiert auf der Annahme einer freien Schallausbreitung zwischen Linienquelle und Empfänger, da dies auch die Anforderung an die Wahl eines Messpunktes ist. Die Methode ist daher nicht geeignet in Bereichen mit Abschirmungen durch Schallschutzwände o.ä. sowie für Immissionsorte innerhalb von Gebieten mit abschirmender Bebauung (d.h. ab der zweiten Bebauungsreihe).
- Die Berechnung des Maximalpegels kann für eine Zugart (z.B. die lauteste Zugart) oder die lauteste Fahrzeugart erfolgen. Für jede Vorbeifahrt dieser Zug- oder Fahrzeugart ergibt sich dann an einem Immissionsort rechnerisch ein identischer Maximalpegel. Die Streuung der Geräusche unterschiedlicher Züge derselben Zugart wird dabei zunächst nicht berücksichtigt.

Mit der oben beschriebenen Methode lassen sich folgende Maximalpegel für verschiedene Zugarten ermitteln:

Tabelle 3-1: Mittelungspegel und Maximalpegel in 25 m Abstand für ausgewählte Züge nach Tabelle 4 der Schall 03(2014)

Zugart	$L_{w,1h}$	$l_F$ in m	v in km/h	$L_{pAF,max}$
ICE 1	79,1	368	200	90,5
ICE 3 Halbzug Drei-Systemversion	80,6	201	250	95,6
IC (WSB)	83,5	338	200	95,3
NV (WSB)	78,3	153	160	92,5
NV ET (WSB)	73,6	65	140	91,0
S-Bahn (RSB)	70,6	65	120	87,3
GZ GG	85,0	380	80	92,3
GZ VB (k-Bremse)	80,3	380	80	87,6

### 3.3.2 Modell einer wandernden, begrenzten Linienquelle

Eine Erweiterung des unbegrenzten Linienquellenmodells ist in der Nord 2000 (Jonasson, Storeheier, 2001) beschrieben. Dabei wird nicht nur die zeitliche Komprimierung der Schallleistung vorgesehen, sondern auch eine örtliche Differenzierung. Grundlage ist das Modell einer (örtlich) begrenzten linienförmigen Quelle, deren Länge der Länge des Zuges entspricht, die entlang der Trasse „wandert“. Für das Fortschreiten der begrenzten linienförmigen Quelle sind jedoch mehrere Iterationsschritte bei der Berechnung erforderlich. Das „Wandern“ der Quelle mit dem Durchlaufen der Iterationsschritte ist in folgender Abbildung dargestellt:

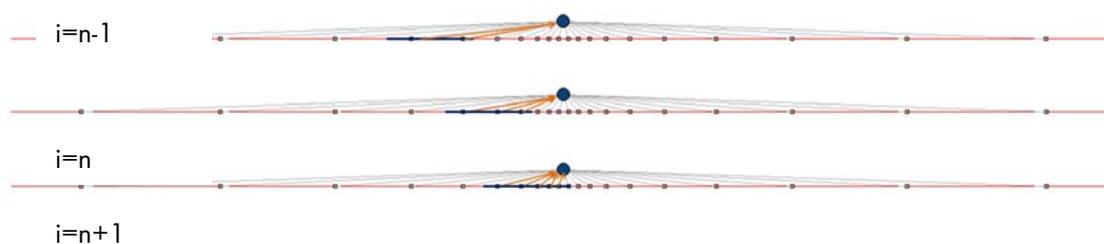


Abbildung 3-19: Abstrahlung einer begrenzten Linienschallquelle, die durch das Durchlaufen mehrerer Iterationsschritte an der Strecke entlangwandert

Die Schallleistung der Linienschallquelle kann anhand der Berechnungsformel zur Emissionsermittlung der Schall 03 bestimmt werden. Die auf die Strecke verteilte Schallleistung muss dann für jede Quellhöhe auf eine begrenzte Linienquelle, die die Länge des Zuges  $l_z$  aufweist, komprimiert werden:

$$L_w = L_w' + 10 \lg \left( \frac{v T_0}{d_0} \right) \quad (\text{Gl.-13})$$

mit  $v$ : Fahrgeschwindigkeit

$T_0$ : 1 Stunde

$d_0$ : 1 m

Bei der Verteilung der Schallleistung auf die wandernde Linienquelle könnte nach den Methoden der Schall 03 auch eine tatsächliche Aneinanderreihung einzelner Fahrzeuge mit ihren jeweiligen Schallleistungen und Fahrzeuglängen berücksichtigt werden. Jedoch spielt in diesem Fall auch die Reihenfolge der Fahrzeuge bei der Ermittlung der Maximalpegel am Immissionsort eine Rolle, da sich die Wirkung von zwei aufeinanderfolgenden Fahrzeugen mit hoher Emission am Immissionsort stärker aufaddiert, als wenn diese im Zugverband einen größeren Abstand voneinander aufweisen. Da jedoch die Information über die Abfolge im Zugverband für Prognoseberechnungen nicht vorliegen, wird auf diese Unterscheidung verzichtet und eine gleichmäßige Verteilung der Schallleistung auf die Zuglänge zugrunde gelegt. (Effekte einzelner lauter Fahrzeuge werden in Kapitel 3.3.1 behandelt.)

Die Linienschallquelle mit der Länge  $l_z$  wird mit rechnerischen Iterationsschritten entlang der Trasse bewegt und bei jedem Iterationsschritt  $i$ , der einem Zeitschritt (Definition s.u.) entspricht, eine Ausbreitungsrechnung zum jeweiligen Immissionspunkt durchgeführt. Die Ausbreitungsrechnung folgt dabei den Regeln nach Kapitel 3 und 6 der Schall 03 wie sie auch für eine unbegrenzte Linienquelle gelten; dies betrifft auch die Zerlegung der Linienquelle in Teilstücke. 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. Der Maximalpegel ergibt sich dann aus der Ermittlung des Maximalwertes, der sich aus den Iterationsschritten ergibt:

$$L_{\max} = \max(L_{Aeq,i}) \quad (\text{Gl.-14})$$

Die Abstände der Iterationsschritte  $i$  können dabei sowohl als zeitliche Abstände zwischen den Schritten als auch als ortsabhängige Abstände bzgl. der weiter wandernden Linienquelle definiert werden. Entscheidend für die Bildung eines Maximalpegels ist jedoch in erster Linie der zeitliche Abstand zwischen den Iterationsschritten, da dieser unabhängig von der Fahrzeuggeschwindigkeit ist. Für einen ausreichenden Detaillierungsgrad des Pegelverlaufs - um das Maximum sicher zu erhalten - erscheinen Iterationsschritte mit zeitlichen Abständen von 100 ms ausreichend; bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit von  $v = 300$  km/h ist in diesem Fall die Linienquelle schrittweise um etwa 8 m zu verschieben.

Diese feine Zeiteinteilung der Iterationsschritte führt dazu, dass zwischen Teilstück und Immissionsort unterschiedlichen Laufzeiten der Ausbreitung entstehen. Die Laufzeitunterschiede können dabei größer sein als

die zeitlichen Abstände der Iterationsschritte. Daher sind die Einzelergebnisse der Teilstücke zeitlich dem Iterationsschritt zuzuordnen, in dem der Pegelanteil des Teilstücks unter Berücksichtigung der Laufzeit bis zum Immissionsort an diesem ankommt. Da die Ausbreitungsrechnung selbst denselben Regeln folgt, wie bei der Berechnung des Beurteilungspegels, werden Abschirmungen auf dem Ausbreitungsweg sowie unterschiedliche Ausbreitungswege berücksichtigt. Der maximale Pegel tritt somit nicht automatisch in dem Iterationsschritt auf, in dem die Linienquelle den geringsten (direkten) Abstand zum Immissionsort aufweist.

### 3.4 Besondere Effekte des Maximalpegels im Nahbereich

Um einzelne Teilquellen mit besonders hoher Emission (wie z.B. Lüfter oder Flachstellen) zu berücksichtigen, wird in der Nord 2000 (Jonasson, Storeheier, 2001) auf den berechneten Maximalpegel ein abstandsabhängiger Aufschlag von 3 dB bei 10 m Abstand vergeben, der mit zunehmendem Abstand (bei 300 m) gegen Null geht. Mit dem in vorigem Kapitel aus der Schall 03 abgeleiteten Berechnungsverfahren einer wandernden Linienquelle wird der Maximalpegel für Züge mit gleichmäßiger Emission ermittelt. Die Berechnungswerte berücksichtigen daher 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, wird eine der Nord 2000 angelehnte Vorgehensweise gewählt. Neben dem von der gleichförmig abstrahlenden Linienquelle ermittelten Maximalpegel werden einzelne kurzzeitige Ereignisse durch einen abstandsabhängigen Pegelzuschlag berücksichtigt. Grundlage sind die Messdaten aus der DLR-Studie (vgl. Kapitel 2.4). Hierbei wurden von den Schallmessungen vor dem Fenster bei 33 Probanden insgesamt etwa 5.000 Güterzug und 2.000 Personenzugvorbeifahrten in der unten dargestellten Form ausgewertet:

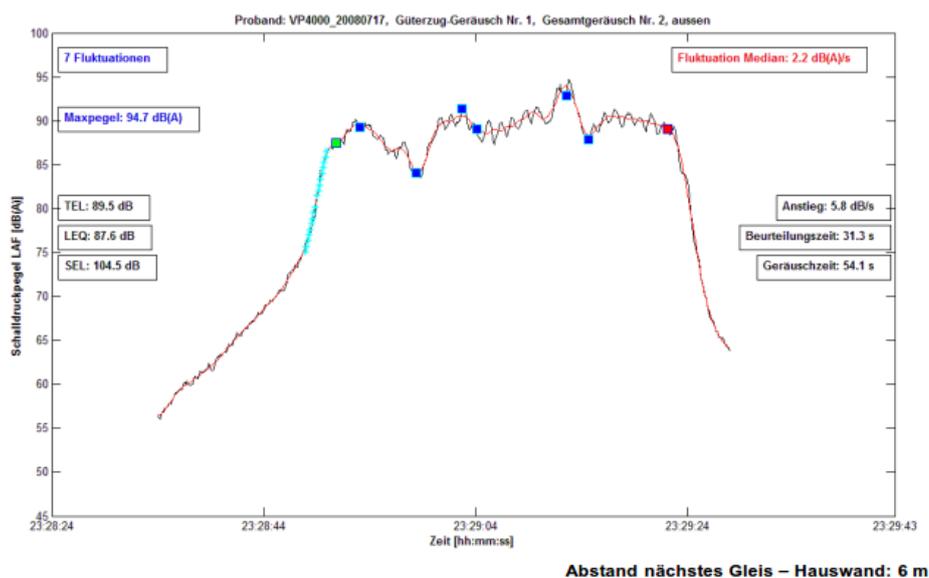


Abbildung 3-20: Beispiel für eine Auswertung einer Güterzugvorbeifahrt in 6 m Abstand; der Vorbeifahrtexpositionspegel TEL

Für jede Vorbeifahrt wurden die Differenz zwischen Maximalpegel  $L_{pAF,max}$  und Vorbeifahrtexpositionspegel  $TEL$  gebildet. Zu jeder Vorbeifahrt sind die Angaben zum Abstand des Messortes zum Gleis ausgewiesen, so dass der Zusammenhang zwischen der Differenz  $L_{pAF,max} - TEL$  und dem Abstand, getrennt nach Güter- und Personenzügen, angegeben werden kann. Diese Differenz zwischen Maximalpegel und dem Vorbeifahrtexpositionspegel kann als Zuschlag  $\Delta L_{Gz}$  bzw.  $\Delta L_{Pz}$  auf den entsprechend o.a. prognostizierten Maximalpegel (ohne Berücksichtigung von Einzelereignissen) aufgeschlagen werden, um den tatsächlichen Maximalpegel einer Vorbeifahrt prognostizieren zu können.

Zur Ermittlung dieses Zuschlags wird eine lineare Regression von  $L_{pAF,max} - TEL$  über dem Logarithmus des Abstands durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Regression sind in Tabelle 3-2 dargestellt:

Tabelle 3-2: Ergebnisse der Regressionsberechnungen für abstandsabhängige Zuschläge zur Berücksichtigung von Einzelereignissen

Regression für Güterzüge:								
Regressions-Statistik								
Multipler Korrelationskoeffizient	0,18472328							
Bestimmtheitsmaß	0,03412269							
Adjustiertes Bestimmtheitsmaß	0,03392501							
Standardfehler	1,68550126							
Beobachtungen	4888							
ANOVA								
	Freiheitsgrade	(dratsummen	Quadratsum	Prüfgröße (F)	F krit			
Regression	1	490,380197	490,380197	172,613501	8,9701E-39			
Residue	4886	13880,7082	2,8409145					
Gesamt	4887	14371,0884						
	Koeffizient	standardfehler	t-Statistik	P-Wert	Untere 95%	Obere 95%	Untere 95,0%	Obere 95,0%
Schnittpunkt	3,12995329	0,04987896	62,7509704	0	3,0321681	3,22773848	3,0321681	3,22773848
	-1,03187058	0,07853945	-13,1382457	8,9701E-39	-1,18584321	-0,87789795	-1,18584321	-0,87789795
Regression für Personenzüge								
Regressions-Statistik								
Multipler Korrelationskoeffizient	0,14663885							
Bestimmtheitsmaß	0,02150295							
Adjustiertes Bestimmtheitsmaß	0,0209726							
Standardfehler	1,85510545							
Beobachtungen	1847							
ANOVA								
	Freiheitsgrade	(dratsummen	Quadratsum	Prüfgröße (F)	F krit			
Regression	1	139,531462	139,531462	40,5447792	2,4193E-10			
Residue	1845	6349,41298	3,44141625					
Gesamt	1846	6488,94444						
	Koeffizient	standardfehler	t-Statistik	P-Wert	Untere 95%	Obere 95%	Untere 95,0%	Obere 95,0%
Schnittpunkt	2,34588632	0,07805587	30,0539402	7,309E-162	2,19279921	2,49897344	2,19279921	2,49897344
	-0,87772101	0,13784437	-6,36747825	2,4193E-10	-1,14806836	-0,60737366	-1,14806836	-0,60737366

In grafischer Form sind die Zusammenhänge in Abbildung 3-21 dargestellt:

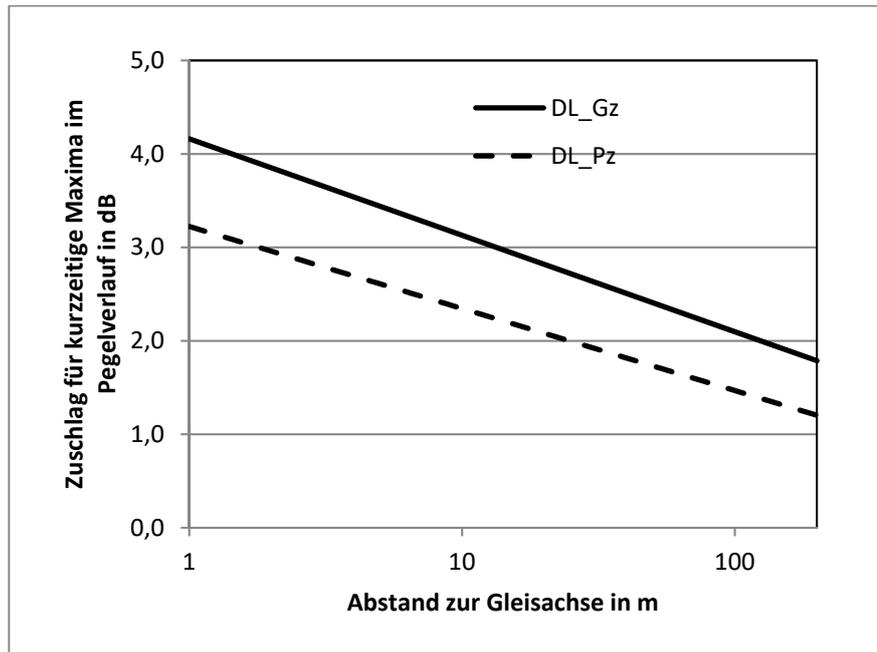


Abbildung 3-21: Grafische Darstellung des Zusammenhangs zwischen Zuschlag zur Berücksichtigung von Einzelergebnissen und Abstand

Der Zuschlag lässt sich durch folgende Formeln berechnen:

$$\Delta L_{Gz} = 3,1 - 1,0 \lg(d/d_0) \quad (\text{Gl.-15})$$

$$\Delta L_{Pz} = 2,3 - 0,9 \lg(d/d_0) \quad (\text{Gl.-16})$$

mit:

$d$  Abstand von Gleismitte zu Immissionsort

$$d_0 = 10 \text{ m}$$

Der Zuschlag entsprechend Nord 2000 mit  $\Delta L = 3 - 2 \lg(d/10)$  ergibt im Nahbereich (10 m) denselben Wert, wie der o.g. Zuschlag für Güterzüge, fällt jedoch mit dem Abstand stärker ab. Eine detaillierte Ermittlung des Zuschlages kann nach Vorliegen der Auswertungen aus den Monitoringstationen des Eisenbahn-Bundesamtes, die derzeit installiert werden, ermittelt werden.

## 4 Ermittlung von wirkungsbezogenen Kenngrößen des Maximalpegels

### 4.1 Vorbemerkung

Die Möglichkeiten zur Berücksichtigung eines Maximalpegelkriteriums werden anhand von Fallbeispielen geprüft. Anhand dieser Fallbeispiele werden der Prozentsatz der erheblich Belästigten als auch die Anzahl der lärmbedingten zusätzlichen Aufwachreaktionen ermittelt und miteinander verglichen. Die dazu erforderlichen Berechnungsverfahren werden nachfolgend dargestellt.

### 4.2 Ermittlung der Anzahl der schlafgestörten Personen

Für die Abschätzung des prozentualen Anteils der durch Schienenverkehrslärm im Schlaf erheblich gestörten Personen an konkreten Immissionspunkten sind die in folgender Darstellung aufgezeigten Arbeitsschritte erforderlich:

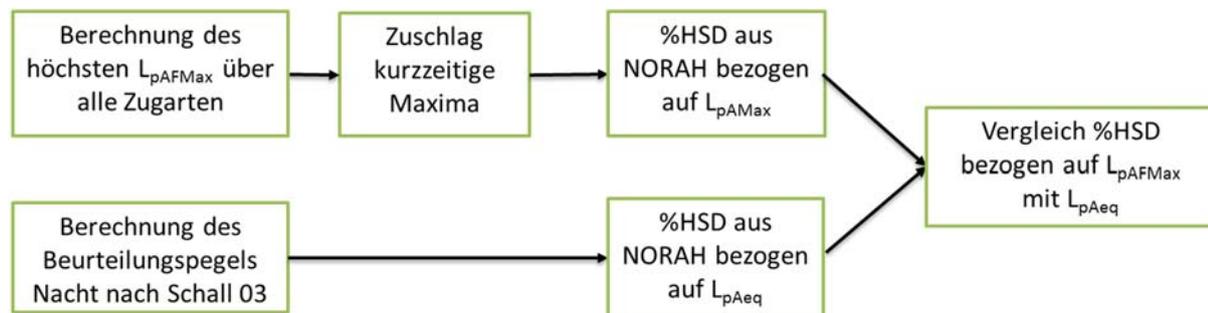


Abbildung 4-1: Vorgehensweise zur Ermittlung des Anteils hoch schlafgestörter Personen durch Zuggeräusche

Zunächst werden die Beurteilungspegel für die Nacht nach dem in der Schall 03 beschriebenen Verfahren ermittelt; die Maximalpegel werden nach dem Kapitel 3.3 einschließlich der Zuschläge für den Nahbereich nach Kapitel 3.4 ermittelt. Der Prozentsatz der erheblich durch Schienenverkehrslärm Schlafgestörten insgesamt (Gesamtscore) ergibt sich aus den in Kapitel 2.2.3 dargestellten Zusammenhängen nach folgenden Funktionen:

$$\%HSD = \frac{e^{(-7,306+L_{pA,eq,06}-22h \cdot 0,075)}}{1+e^{(-7,306+L_{pA,eq,06}-22h \cdot 0,075)}} \text{ bezogen auf den nächtlichen Dauerschallpegel } L_{pA,eq,22-06h}; \quad (\text{Gl.-17})$$

$$\%HSD = \frac{e^{(-7,975+L_{pAF,max} \cdot 0,066)}}{1+e^{(-7,975+L_{pAF,max} \cdot 0,066)}} \text{ bezogen auf den Maximalpegel } L_{pAF,max}. \quad (\text{Gl.-18})$$

### 4.3 Ermittlung der Anzahl der bahlärmbedingten zusätzlichen Aufwachreaktionen

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:

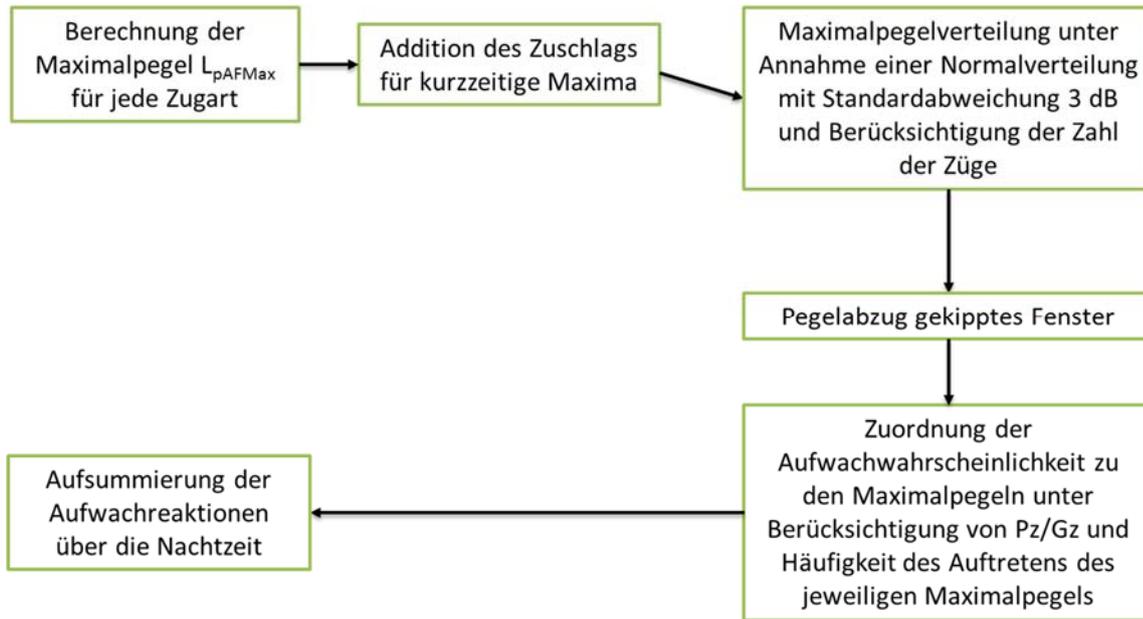


Abbildung 4-2: Vorgehensweise zur Ermittlung von zusätzlichen Aufwachreaktionen durch Zuggeräusche

In einem ersten Schritt werden die zu erwartenden Maximalpegel durch Zugvorbeifahrten rechnerisch nach dem im Kapitel 3.3.2 beschriebenen Verfahren ermittelt und die Zuschläge für kurzzeitige Maximalpegel nach Kapitel 3.4 aufaddiert. Daraus ergibt sich eine Verteilung der zu erwartenden Maximalpegel, wobei für jede Zugart  $n$  identische Werte der einzelnen Vorbeifahrten resultieren:

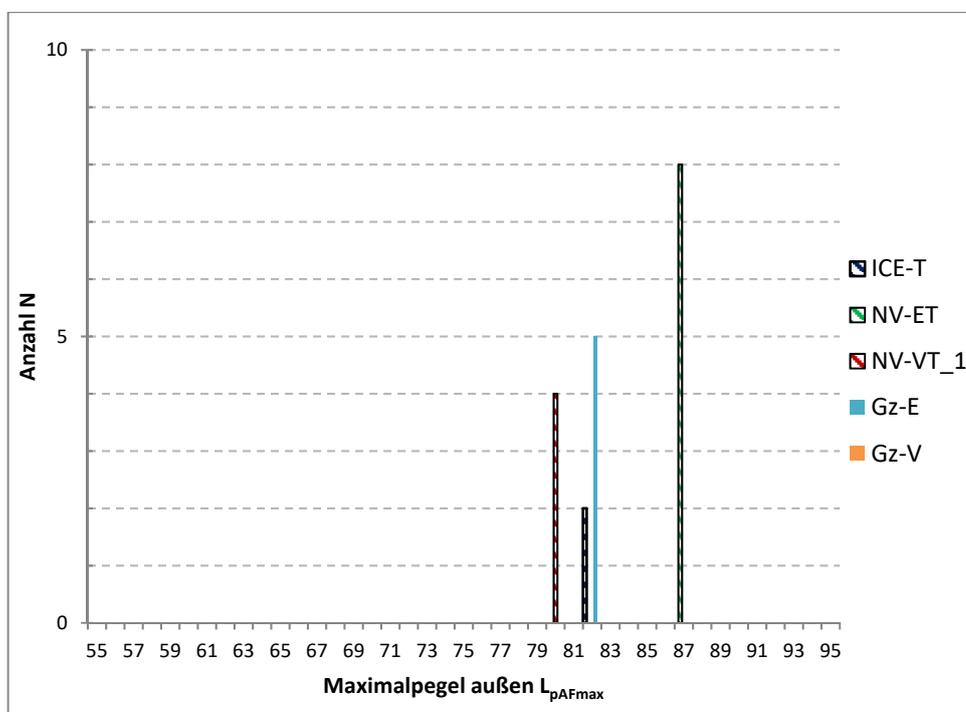


Abbildung 4-3: Beispiel für eine rechnerisch prognostizierte Verteilung der Maximalpegel an einer gegebenen Strecke

In einem zweiten Schritt wird die Streuung einzelner Maximalpegel berücksichtigt. In der Planungspraxis erfolgt die Prognose der Beurteilungspegel durch Schienenverkehrslärm auf Grundlage von Zugzahlenangaben in Zugklassen. Dabei werden z.B. für Ferngüterzüge je Richtungsgleis eine Anzahl von Zügen tags und nachts mit gleicher Fahrzeugzusammenstellung und Geschwindigkeit angegeben. Bei der rechnerischen Prognose der Maximalpegel nach den oben genannten Verfahren bedeutet dies, dass für alle Vorbeifahrten dieser Zugklasse der identische Maximalpegel an einem Immissionsort ermittelt wird.

In der Realität (wie auch bei der Messung) erzeugt jedoch jede Vorbeifahrt dieser Züge einen individuellen Maximalpegel, der innerhalb eines Streubereichs um den erwarteten Wert liegt. Für die Rechenprognose kann diese Streuung durch Annahme einer Normalverteilung der Werte des Maximalpegels mit einer Standardabweichung  $\sigma$  um den berechneten Erwartungswert erweitert werden. Diese Vorgehensweise wird z.B. bei Luftfahrzeuggeräuschen in der AzB (Anleitung zur Berechnung von Lärmschutzbereichen) verwendet.

Anstelle eines Einzahlwerts des Maximalpegels  $L_{pAF,max,i}$  für  $n$  Fahrzeuge der Zugklasse  $i$  ergibt sich eine Dichteverteilung der Form:

$$\varphi_i(L) = n * \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{L - L_{pAF,max,i}}{\sigma} \right)^2} \quad (\text{Gl.-19})$$

mit

$\varphi_i(L)$	Dichteverteilung des Maximalpegels der Zugklasse $i$
$n$	Zahl der Vorbeifahrtereignisse der Zugklasse $i$
$\sigma_i$	Standardabweichung der Zugklasse $i$

Diese Streuung der Werte kann aufgrund von Laufflächenfehlern, klappernden Aufbauten etc. auftreten, ist jedoch auch ohne Auffälligkeiten an einzelnen Fahrzeugen unvermeidbar. Da bislang keine statistischen Auswertungen zur Streuung nominell gleicher Zugvorbeifahrten vorliegen, wird zunächst vorgeschlagen, wie bei der AzB eine Standardabweichung  $\sigma$  von 3 dB anzugehen. Auswertungen aus den derzeit im Aufbau befindlichen Monitoringstationen können in Zukunft dazu verwendet werden, die Standardabweichung zu präzisieren. Für eine Strecke sind dann die Dichteverteilungen für die Zugklassen  $i$  aufzusummieren

$$\varphi(L) = \sum_i \varphi_{i_i} \quad (\text{Gl.-20})$$

$\varphi(L)$  Dichteverteilung der Maximalpegel aller Züge

Die Dichteverteilung der Maximalpegel ist getrennt für Personen- und Güterzüge in folgender Abbildung 4-4 für ein Beispiel dargestellt:

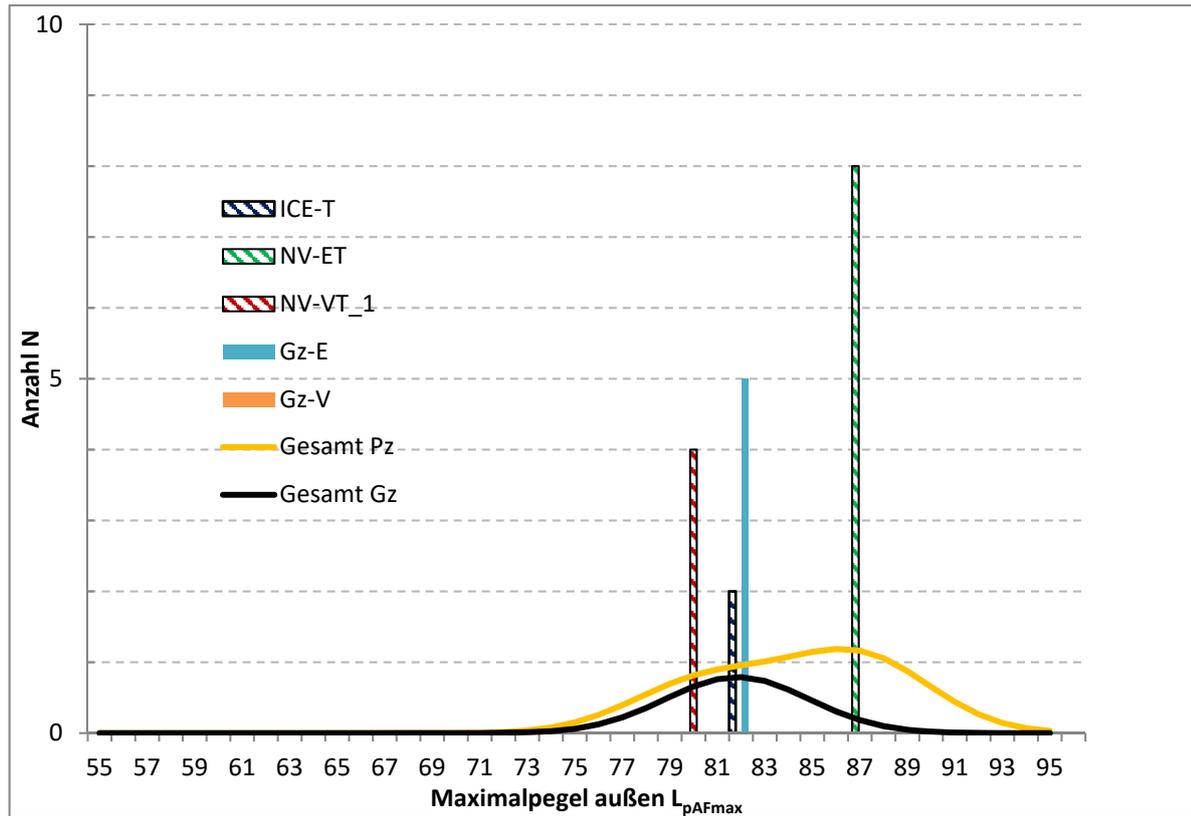


Abbildung 4-4: Zugehörige Dichteverteilung der zu erwartenden Maximalpegel getrennt für Personen- und Güterzüge

Diese Dichteverteilungen der Maximalpegel außen vor dem Fenster der Betroffenen werden anschließend durch einen konstanten Abzug für die örtliche Situation auf einen Innenpegel am Ohr des Schlafenden umgerechnet. Dies erfolgt im Fall eines gekippten Fensters durch Abzug von 15 dB. Die sich daraus ergebenden Dichteverteilungen der Maximalpegel (getrennt für Personen- und Güterzüge) werden nun für jeden Pegelwert mit der Aufwachwahrscheinlichkeit des jeweiligen Maximalpegels aus dem in Kapitel 0 ermittelten Zusammenhang zwischen Maximalpegel und Aufwachwahrscheinlichkeit multipliziert: (ICE Züge wurden als Personenzüge eingestuft)

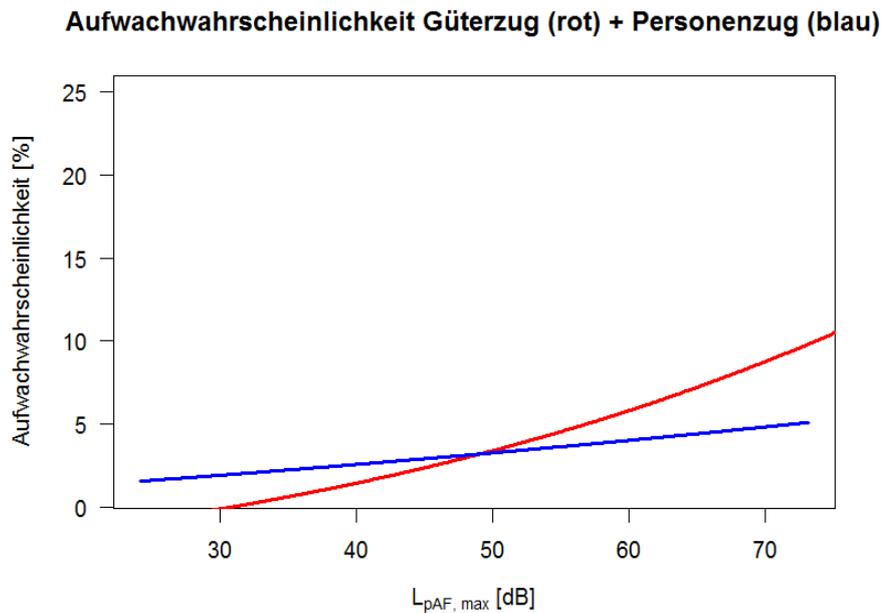


Abbildung 4-5: Expositions-Wirkungskurve der bahnlärmbedingten Aufwachwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit vom Maximalpegel, innen am Ohr des Schlafenden gemäß Kapitel 2.4.

Daraus ergibt sich eine Verteilung der tatsächlich auftretenden Aufwachwahrscheinlichkeiten, aus deren Aufsummierung über alle Werte die Anzahl der zu erwartenden zusätzlichen bahnlärmbedingten Aufwachreaktionen resultiert:

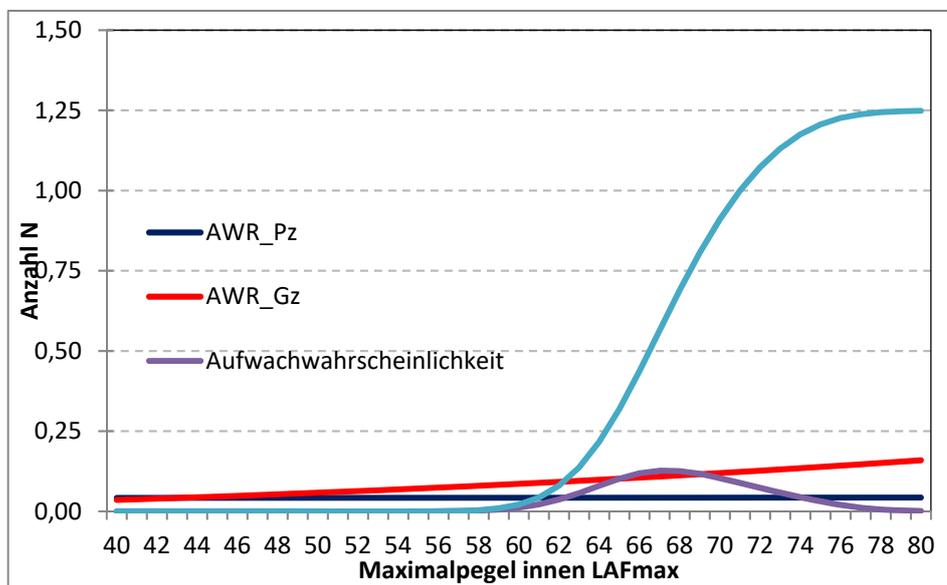


Abbildung 4-6: Aus der Dichteverteilung der Maximalpegel gewichtet mit der Aufwachwahrscheinlichkeit (AWR) ermittelte Gesamtaufwachwahrscheinlichkeit, sowie die aus der Kumulierung berechneten zusätzlichen Aufwachreaktionen

In der obigen Abbildung sind als blaue und rote Kurve die Aufwachwahrscheinlichkeiten in Abhängigkeit vom Maximalpegel innen aus Abbildung 4-5 dargestellt. Diese Abhängigkeit multipliziert mit den jeweiligen Dichteverteilungen der Maximalpegel aus Abbildung 4-4 (abzüglich 15 dB für gekipptes Fenster) ergibt die Verteilung der Aufwachwahrscheinlichkeit (violette Kurve). Der Wert der violetten Kurve gibt somit z.B. bei 68 dB mit 11% die Summe der Aufwachwahrscheinlichkeiten aller Vorbeifahrten bei 68 dB an. Um die Gesamtzahl der zu erwartenden zusätzlichen bahnlärmbedingten Aufwachreaktionen (kumulierte Aufwachwahrscheinlichkeit) zu ermitteln, müssen daher alle Werte unter der violetten Kurve aufsummiert werden. Diese Aufsummierung (Integration) der violetten Kurve ist durch die hellblaue Kurve dargestellt. An deren rechten Ende kann daher die Gesamtaufwachwahrscheinlichkeit aller Vorbeifahrten mit 125 % abgelesen werden. Eine Aufwachwahrscheinlichkeit von 125 % entspricht einer zusätzlichen Anzahl von schienenverkehrslärmbedingten Aufwachreaktionen von 1,25 (siehe hierzu auch Kapitel 2.2).

## 5 Fallbeispiele an einer hoch und gering belasteten Bahnstrecke

Die psychologischen und physiologischen Wirkungen von Bahnlärm auf den Nachtschlaf werden im Folgenden anhand zweier Fallbeispiele mit geringer und hoher Verkehrsmenge vergleichend dargestellt. Die Fallbeispiele wurden aus Planfeststellungsverfahren im Streckennetz der Deutschen Bahn ausgewählt, anonymisiert.

Die exemplarischen Berechnungen dienen dazu, insbesondere die Veränderungen im Schutzniveau der Betroffenen ohne und mit aktiven Schallschutzmaßnahmen gegenüber der bisherigen Beurteilungssystematik darzustellen und zu bewerten. Als Fallbeispiel 1 wird die Elektrifizierung einer eingleisigen Strecke mit geringer Verkehrsmenge und lockerer Einzelhausbebauung (Abbildung 5-1) gewählt. Als Fallbeispiel 2 wird der Ausbau einer dreigleisigen Strecke mit hoher Verkehrsmenge und dichter Bebauung gewählt (Abbildung 5-2). In beiden Fällen wurde der aus den Planfeststellungsverfahren resultierende Schallschutz übernommen. Für die Beispielberechnungen der psychologischen und physiologischen Wirkungen wurde jeweils ein Immissionsort im Nahbereich ausgewählt, an dem der Immissionsgrenzwert für Wohngebiete von 49 dB nachts gerade eingehalten wird, sowie ein weiterer Immissionsort im größeren Abstand.

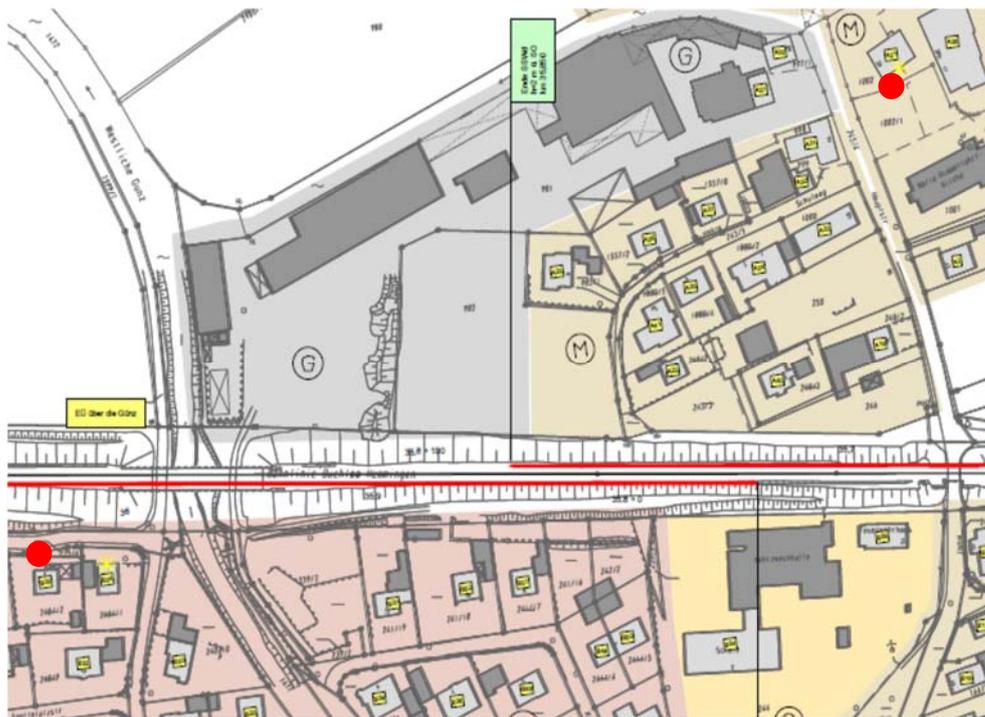


Abbildung 5-1: Ausschnitt der Bebauung in Fallbeispiel 1: Elektrifizierung einer gering belasteten Bahnstrecke mit verschiedenen Gebietsnutzungen. Die roten Markierungen zeigen die ausgewählten Einzelpunkte im Nah- und Fernbereich

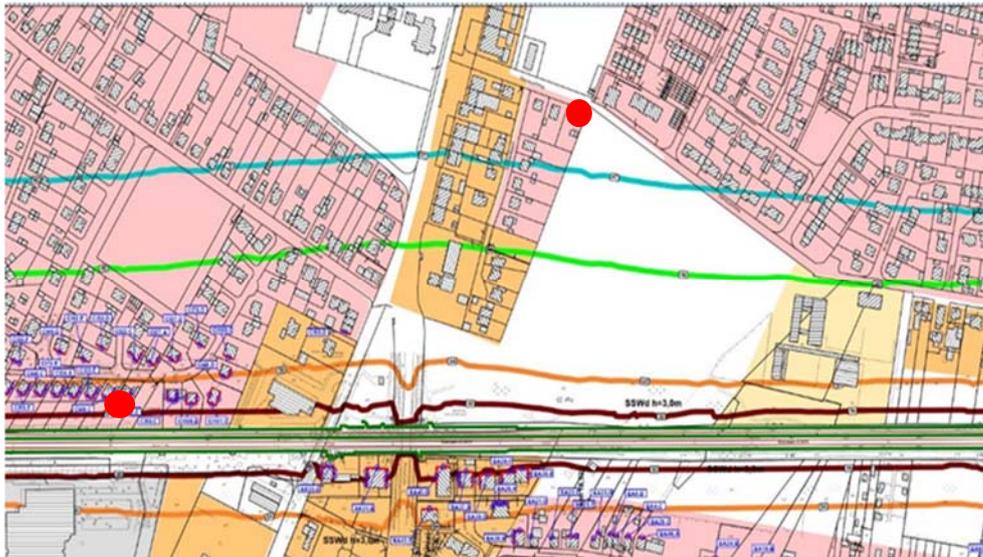


Abbildung 5-2: Ausschnitt der Bebauung in Fallbeispiel 2: dreigleisiger Ausbau einer hoch belasteten Bahnstrecke mit verschiedenen Gebietsnutzungen. Die roten Markierungen zeigen die ausgewählten Einzelpunkte im Nah- und Fernbereich

Die Verkehrsmengen in den beiden Fallbeispielen im Zeitraum Nacht ist in Tabelle 5-1 dargestellt.

Tabelle 5-1: Verkehrsmengenbelastung der Fallbeispiele im Zeitraum Nacht (22:00 Uhr bis 06:00 Uhr), Anzahl Zugvorbeifahrten / 8 h

Fallbeispiel 1: geringe Verkehrsmengenbelastung		
Personenzüge	Güterzüge	Gesamt
14	6	20
Fallbeispiel 2: hohe Verkehrsmengenbelastung		
Personenzüge	Güterzüge	Gesamt
26	67	93

Für die Veranschaulichung wurden für das Fallbeispiel 1 zunächst Rasterberechnungen der Maximalpegel für verschiedene Zugarten (Güterzüge, Nahverkehrszüge, ICE) im Nachtzeitraum nach dem in Kapitel 3.3.2 beschriebenen Verfahren (Modell einer wandernden Linienquelle) mit und ohne Schallschutzwand durchgeführt. Die Ergebnisse der Rasterberechnungen sind exemplarisch für Fallbeispiel 1 für Güterzüge in folgender Abbildung dargestellt:

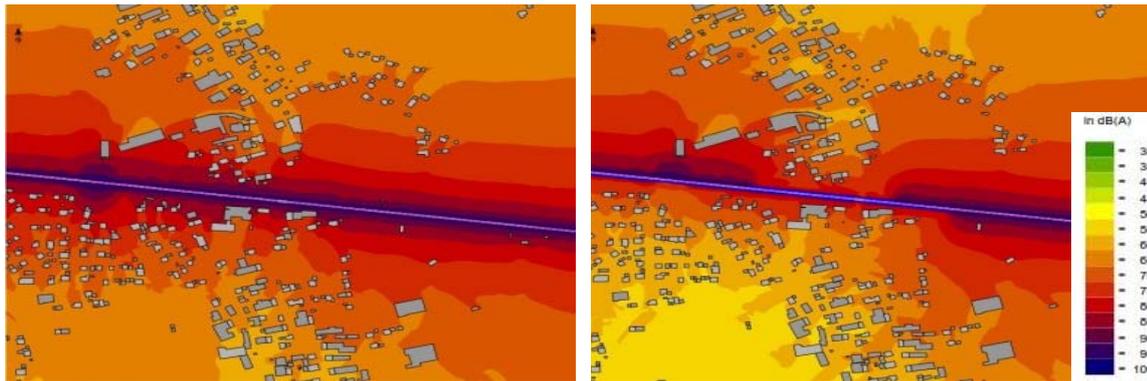


Abbildung 5-3: Rasterberechnung der Maximalpegel ohne (links) und mit (rechts) Schallschutzwand am Fallbeispiel mit geringer Verkehrsbelastung für Güterzüge

Auf Grundlage der berechneten Maximalpegel lassen sich mit den Expositions-Wirkungs-Beziehungen für Personen- und Güterzüge aus Kapitel 2.2 bzw. Abbildung 4-5 für jede Zugart die Aufwachwahrscheinlichkeiten bezogen auf ein Einzelereignis prognostizieren. Durch Aufsummieren über alle Einzelereignisse (Zugvorbeifahrten) erhält man dann die zusätzlichen bahnlärmbedingten Aufwachreaktionen für das ausgewählte Szenario:

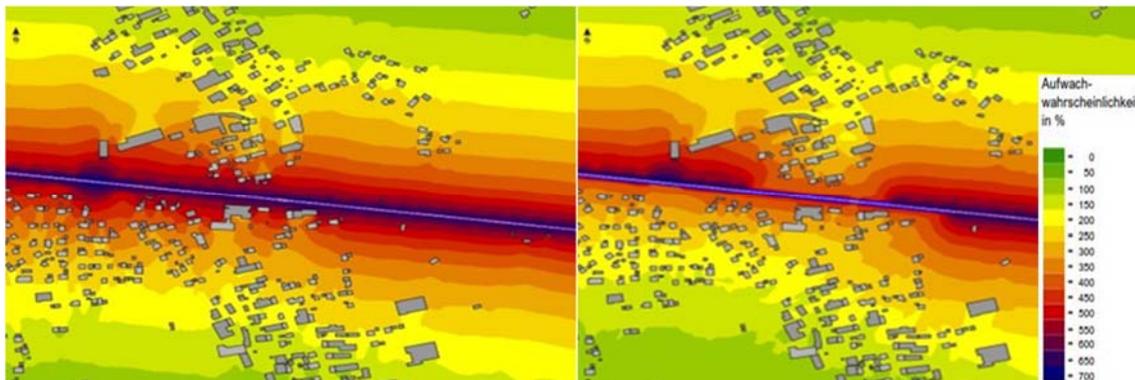


Abbildung 5-4: Aufwachwahrscheinlichkeit ohne (links) und mit (rechts) Schallschutzwand am Fallbeispiel mit geringer Verkehrsbelastung; Hinweis: eine Aufwachwahrscheinlichkeit von 100% entspricht einer zusätzlichen lärmverzierten Aufwachreaktion

Um Kriterien für eine Zumutbarkeitsgrenze ableiten zu können, werden für die beiden Fallbeispiele die prognostizierten psychologischen Wirkungskenngrößen und die physiologisch prognostizierten bahnlärmbedingten Aufwachreaktionen an den entsprechend Abbildung 5-1 und Abbildung 5-2 ausgewählten Einzelpunkten ermittelt. Für beide Fallbeispiele wird die Situation ohne und mit Schallschutz betrachtet. Der nahe Immissionspunkt ist so gewählt, dass der Immissionsgrenzwert von etwa 49 dB für die Situation mit Schallschutz gerade eingehalten wird. In folgender Tabelle sind die Rechenergebnisse an den Einzelpunkten für beide Szenarien zusammengefasst.

Tabelle 5-2: Zusammenfassung der Rechenergebnisse an Einzelpunkten der Fallbeispiele 1 und 2

	Beurteilungspegel Nacht $L_{r,N}$ [dB]	Maximalpegel $L_{pAF,max}$ [dB]	Pegeldifferenz $L_{pAF,max} - L_{r,N}$	%HSD bezogen auf Mittelungspegel $\%HSD L_{eq}$	%HSD bezogen auf Maximalpegel $\%HSD L_{max}$	Differenz $\%HSD L_{eq} - \%HSD L_{max}$	Anzahl zus. Aufwachreaktionen AWR/Nacht
Fallbeispiel 1: geringe Verkehrsmengenbelastung							
Naher Immissionspunkt							
Ohne Wand	60	87	27	5,7	9,7	4	1,2
Mit Wand	48	74	26	2,4	4,3	1,9	0,8
Ferner Immissionspunkt							
Ohne Wand	46	71	25	2,1	3,6	1,5	0,9
Mit Wand	42	64	22	1,5	2,3	0,8	0,6
Fallbeispiel 2: hohe Verkehrsmengenbelastung							
Naher Immissionspunkt							
Ohne Wand	60	79	19	5,7	5,9	0,2	5,7
Mit Wand	49	68	19	2,6	3,0	0,4	3,8
Ferner Immissionspunkt							
Ohne Wand	53	70	18	3,5	3,4	-0,1	4,1
Mit Wand	42	58	16	1,5	1,6	0,1	2,2

Aus Tabelle 5-2 kann abgeleitet werden

- Der Unterschied im Anteil der hoch Schlafgestörten bezogen auf den Mittelungspegel gegenüber dem Maximalpegel ist im Fallbeispiel mit geringer Belastung und dort wiederum im Nahbereich mit einer Differenz von 4 besonders groß.
- Dagegen ist der entsprechende Unterschied der hoch Schlafgestörten im Fallbeispiel mit hoher Verkehrsmengenbelastung insbesondere am fernen Immissionsort mit 0,1 bzw. -0,1 besonders gering.
- Die Anzahl der bahnlärmbedingten zusätzlichen Aufwachreaktionen liegt beim Fallbeispiel mit geringer Belastung bei einer zusätzlichen Aufwachreaktion durch Schienenverkehrslärm, während diese im Fallbeispiel mit hoher Belastung zwischen 2 und 6 zusätzlichen Aufwachreaktionen liegen.

- Bei gleichem Mittelungspegel von etwa 49 dB(A) (naher Immissionsort mit Wand) unterscheidet sich die Anzahl der zusätzlichen Aufwachreaktionen um den Faktor 5; sie liegt bei geringer Belastung bei 0,8, bei hoher Belastung bei 3,8. Dieser Unterschied entspricht in etwa dem Unterschied in der Vorbeifahrthäufigkeit (20 Vorbeifahrten vs. 93 Vorbeifahrten).
- Die hohe Anzahl von zusätzlichen Aufwachreaktionen im Fallbeispiel 2 (hohe Verkehrsmengenbelastung) ist somit insbesondere auf die hohe Anzahl der Vorbeifahrten zurückzuführen, da sowohl die Mittelungspegel als auch die Maximalpegel weit unter den entsprechenden Werten im Fallbeispiel 1 (geringe Verkehrsmengenbelastung) liegen.
- Durch die Anordnung von Schallschutzwänden werden in beiden Fallbeispielen insbesondere am nahen Immissionsort Pegelminderungen von ca. 10 dB sowohl bezogen auf den Mittelungspegel als auch bezogen auf den Maximalpegel erreicht. Durch die Maßnahmen reduzieren sich die Anteile der hoch Schlafgestörten um ca. 60 % von 5,7 auf 2,4, während sich die Anzahl der zusätzlichen Aufwachreaktionen um ca. 30 % von 1,2 auf 0,8 reduzieren.

## 6 Möglichkeiten für die Berücksichtigung eines Maximalkriteriums

### 6.1 Maximalpegelkriterium in bestehenden Verordnungen und Richtlinien

Die Beurteilung von Schienenverkehrslärm bei Nacht erfolgt derzeit beim Neubau und der wesentlichen Änderung von Schienenwegen über die sechzehnte Bundes-Immissionsschutzverordnung (16.BImSchV – Verkehrslärmschutzverordnung), bei der Sanierung von bestehenden Strecken nach der Richtlinie zur Förderung von Maßnahmen zur Lärmsanierung an bestehenden Schienenwegen der Eisenbahnen des Bundes und in der Bauleitplanung nach der DIN 18005, Schallschutz im Städtebau. Die Berechnung des Beurteilungspegels des Schienenverkehrslärms erfolgt in diesen Verordnungen und Richtlinien nach der Schall 03. Sowohl das Berechnungsverfahren als auch die dort enthaltenen Immissionsgrenzwerte bzw. Orientierungswerte enthalten keine Aussagen zum Maximalpegel, sondern beziehen sich auf den Mittelungspegel in der Nacht zwischen 22:00 Uhr und 06:00 Uhr, außen vor dem Fenster des Schlafraumes.

Bezogen auf den Innenraum werden in der vierundzwanzigsten Bundes-Immissionsschutzverordnung (24.BImSchV – Verkehrslärmschutzmaßnahmenverordnung) Aussagen zum notwendigen Schalldämmmaß von Außenbauteilen gemacht; auch diese Aussagen beziehen sich auf den Mittelungspegel. Immissionsgrenzwerte bezogen auf den Innenpegel sind in dieser Verordnung nicht enthalten, jedoch lassen sich aus der Verordnung als zumutbare Innenpegel für Schlafräume Mittelungspegel von 30 dB ableiten:

Der Schallschutz im Hochbau wird durch die DIN 4109 geregelt; darin wird ebenfalls der Mittelungspegel auf der Grundlage der 16.BImSchV verwendet. Die DIN 4109 enthält zusätzlich folgende Regelung zur messtechnischen Erfassung von Schienenverkehrslärm mit Berücksichtigung des Maximalpegels. *„Bei Schienenverkehrsgeräuschen kann in besonderen Fällen die Berücksichtigung der Pegelspitzen zur Kennzeichnung einer erhöhten Störwirkung wichtig sein; in einem solchen Fall sollte zusätzlich zum Mittelungspegel der mittlere Maximalpegel  $L_{pAF,max}$  bestimmt werden (z. B. energetischer Mittelwert der Maximalpegel von Zugvorbeifahrten). Ergibt sich, dass im Beurteilungszeitraum der Mittelungspegel  $L_{pAFm}$  häufiger als 30-mal bzw. häufiger als 15-mal (nicht mehr als 8 zusammenhängende Stunden einer Nacht) oder 2-mal durchschnittlich je Stunde um mehr als 15 dB überschritten wird und die Differenz zwischen dem mittleren Maximalpegel  $L_{pAF,max}$  und dem Mittelungspegel  $L_{pAFm}$  größer als 15 dB ist, so wird für den maßgeblichen Außengeräuschpegel statt des Beurteilungspegels der Wert  $L_{pAF,max} - 15$  dB zu Grunde gelegt.“*

Die VDI 2719, Schalldämmung von Außenbauteilen, enthält Anhaltswerte für Innenschallpegel für von außen in Aufenthaltsräume eindringenden Schall, die nicht überschritten werden sollten. Für Schlafräume nachts in Wohngebieten werden Mittelungspegel zwischen 25 und 30 dB, als Maximalpegel zwischen 35 und 40 dB angegeben.

Nach TA-Lärm, Technischen Anleitung zum Schutz gegen Lärm, werden sowohl Mittelungspegel als auch Maximalpegel für die Beurteilung herangezogen. Bezüglich Maximalpegel gilt: *„Einzelne kurzzeitige Geräuschspitzen dürfen die Immissionsrichtwerte am Tage um nicht mehr als 30 dB und in der Nacht um nicht mehr als 20 dB überschreiten“.*

Im Gesetz zum Schutz gegen Fluglärm wird der Maximalpegel für die Ausweisung von Schutzzonen herangezogen. „Schutzzonen sind jeweils diejenigen Gebiete, in denen der durch Fluglärm hervorgerufene äquivalente Dauerschallpegel  $L_{pA,eq}$  sowie bei der Nacht-Schutzzone auch der fluglärmbedingte Maximalpegel  $L_{pAF,max}$  die nachfolgend genannten Werte übersteigt, wobei die Häufigkeit aus dem Mittelwert über die sechs verkehrsreichsten Monate des Prognosejahres bestimmt wird. Die Werte liegen für den Neubau oder wesentlich geänderte Flughäfen nach dem 01.01.2011 bis  $6 \times 53$  dB, für bestehende Flughäfen bei  $6 \times 57$  dB.“

## 6.2 Maximalpegelkriterium ableitbar aus dem Kriterium "%HSD - Prozentanteil hoch schlafgestörter Personen"

Die Re-Analysen der NORAH-Studie und die daraus abgeleiteten Fallbeispielen 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. Wenn man in der in Kapitel 2.2 beschriebenen Pegel - Reaktions-Beziehung für die Schlafgestörtheit auf der X-Achse den Immissionsgrenzwert, der als Mittelungspegel für den Nachtzeitraum von 22:00 Uhr bis 06:00 Uhr mit 49 dB außen bei Nacht für Wohngebiete festgelegt wurde, ergeben sich etwa 2,6 % hoch Schlafgestörte. Die gleiche Anzahl von hoch Schlafgestörten ergibt sich bei einem Maximalpegel außen von etwa 66 dB, wie folgende Abbildung 6-1 veranschaulicht.

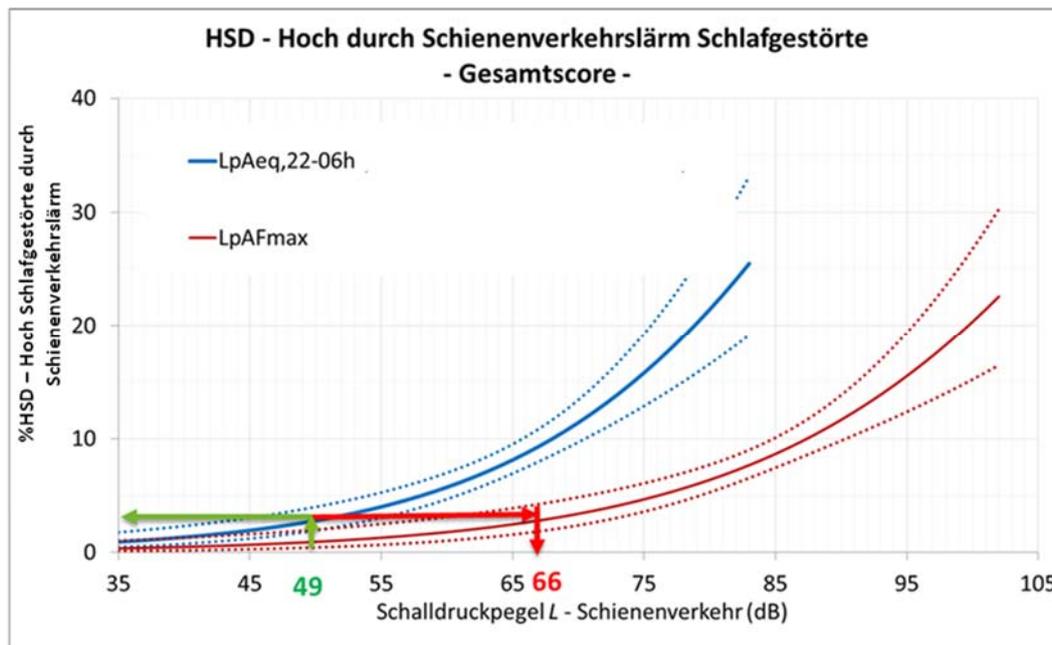


Abbildung 6-1: Ableitung eines Maximalpegelkriteriums aus den Befragungsergebnissen der NORAH-Studie

In Situationen mit Differenzen zwischen Maximalpegel und Mittelungspegel von mehr als 17 dB ergeben sich höhere prozentuale Anteile von Schlafgestörten bezogen auf den Maximalpegel als bezogen auf den Mittelungspegel. Um einen höheren prozentualen Anteil Schlafgestörter bezogen auf den Maximalpegel gegenüber dem Mittelungspegel zu vermeiden, müsste ein Maximalpegelkriterium eingeführt werden, das sicherstellt, dass der Maximalpegel den Mittelungspegel nicht um mehr als 17 dB überschreitet. Dieser

Wert liegt unter dem in der TA Lärm ausgewiesenen Maximalpegelkriterium von 20 dB und über dem in der DIN 4109-4 ausgewiesenen Maximalpegelkriterium von 15 dB.

Ein Maximalpegelkriterium könnte zur Beurteilung des Schienenverkehrslärms nach den Kriterien der Verkehrslärmschutzverordnung -16.BImSchV durch eine Ergänzung im Gesetzestext und in der Anlage 2 zur 16.BImSchV (Schall 03) eingearbeitet werden, indem der Maximalpegel als Zusatzkriterium in Anlehnung an die Vorgehensweis der TA Lärm bzw. DIN 4109 berücksichtigt wird. Es wird vorgeschlagen, dieses Maximalpegelkriterium entsprechend dem Wert der DIN 4109 auf 15 dB festzulegen um nicht weitere Diskrepanzen in den Festlegungen unterschiedlicher Normen und Richtlinien hervorzurufen.

In diesem Fall werden folgende Änderungen im Gesetzestext der 16.BImSchV vorgeschlagen:

## **§ 2 Immissionsgrenzwerte**

*(5) Einzelne Maximalpegel aus Schienenverkehrslärm dürfen die Immissionsgrenzwerte in der Nacht um nicht mehr als 15 dB überschreiten.*

## **§ 4 Berechnung des Beurteilungspegels für Schienenwege**

*1) Der Beurteilungspegel und der Maximalpegel für Schienenwege ist nach Anlage 2 zu berechnen. Die Berechnung des Beurteilungspegels hat getrennt für den Beurteilungszeitraum Tag (6 Uhr bis 22 Uhr) und den Beurteilungszeitraum Nacht (22 Uhr bis 6 Uhr) zu erfolgen; die Berechnung des Maximalpegels erfolgt nur für den Beurteilungszeitraum Nacht (22 Uhr bis 6 Uhr)*

In der Umsetzung müssten u.a. noch geklärt werden, ob weitere Anpassungen des Gesetzestextes erforderlich werden wie z.B. die Anwendung des Maximalpegelkriteriums für die wesentliche Änderung nach § 1, Abs. 2 der 16.BImSchV.

In der Anlage 2 zur 16.BImSchV „Berechnung des Beurteilungspegels für Schienenwege“ sind unter dem dortigen Kapitel 7. „Berechnung der Schallimmission“ und Kapitel 8. „Beurteilungspegel“ zusätzliche Abschnitte zur Bildung des Maximalpegels von Eisenbahnen und Straßenbahnen einzuführen.

Als Berechnungsverfahren für den Maximalpegel des Schienenverkehrs, das in das o.a. Kapitel 7 der Anlage 2 der 16.BImSchV eingeführt werden kann, wird folgende Vorgehensweise vorgeschlagen:

1. Iterative Ermittlung des mittleren Vorbeifahrtpegels einer Zugklasse durch wandernde Linienquelle der Länge  $l_{\text{Zug}}$  und dem Schallleistungspegel (siehe hierzu Kapitel 3.3.2)

$$L_W = L_W' + 10 \lg \left( \frac{v T_0}{d_0} \right) \quad (\text{Gl.-21})$$

Iteration der Berechnung der Immissionspegel  $L_{p,Aeq}$  nach Gleichung 29 der Schall 03 zu den Berechnungszeitpunkten  $i$  und Ermittlung des Maximalwerts am Immissionsort getrennt für Güterzüge und Personenzüge:

$$L_{\text{max}} = \max(L_{Aeq,i}) \quad (\text{Gl.-22})$$

2. Korrektur des maximalen Vorbeifahrtpegels einer Zugklasse durch einen Zuschlag zur Berücksichtigung von Einzelereignissen:

$$\Delta L_{Gz} = 3,1 - 1,0 \lg(d/d_0) \quad (\text{Gl.-23})$$

$$\Delta L_{Pz} = 2,3 - 0,9 \lg(d/d_0) \quad (\text{Gl.-24})$$

mit:  $d_0 = 10 \text{ m}$

$$L_{pAF,max,i,Gz} = L_{max,Gz} + \Delta L_{Gz} \quad (\text{Gl.-25})$$

$$L_{pAF,max,i,Pz} = L_{max,Pz} + \Delta L_{Gz} \quad (\text{Gl.-26})$$

Die genaue normative Festlegung des Verfahrens sollte in einem geeigneten Arbeitskreis abgestimmt werden. Ergänzend dazu muss das Maximalpegelkriterium auch in der 24. BImSchV (Verkehrslärmschutzmaßnahmenverordnung), die den passiven Schallschutz an Verkehrswegen regelt, eingeführt werden. Bei einer Umsetzung dieser Vorschläge ergeben sich die in folgender Tabelle aufgeführten Immissionsgrenzwerte für Innen- und Außenpegel, wobei für die Ermittlung der Innenpegel ein geöffnetes Fenster mit einer Pegelminderung von 15 dB(A) angesetzt wurde:

Tabelle 6-1: Immissionsgrenzwerte für Mittelungspegel und Maximalpegel Außen und Innen in dB(A) für den Nachtzeitraum 22:00 Uhr bis 06:00 Uhr bei Einführung eines Maximalpegelkriteriums von 15 dB

	Außen, vor dem Fenster		Innerhalb von Räumen bei gekipptem Fenster	
	Beurteilungspegel	Maximalpegel	Beurteilungspegel	Maximalpegel
Sondergebiete	47	62	32	47
WA / WR	49	64	34	49
MI / MK / MD	54	69	39	54

Ergänzend dazu muss das Maximalpegelkriterium auch in der 24. BImSchV (Verkehrslärmschutzmaßnahmenverordnung), die den passiven Schallschutz an Verkehrswegen regelt, eingeführt werden. Dies kann zusammen mit den ohnehin erforderlichen Anpassungen aufgrund der Einführung der DIN 4109, Schallschutz im Hochbau, erfolgen.

Für die in Kapitel 5 beschriebenen Fallbeispiele würden sich folgende Auswirkungen ergeben:

Fallbeispiel 1: geringe Verkehrsbelastung

Die errechneten Maximalpegel liegen in diesem Fall zwischen 22 und 27 dB über dem Beurteilungspegel; das Maximalpegelkriterium wird somit an den ausgewählten Immissionsorten um 7 bis 12 dB überschritten. Die Einhaltung des Maximalpegelkriteriums wird erst erreicht, wenn der Maximalpegel  $49 + 15 = 64 \text{ dB}$  unterschreitet. Aufgrund des Maximalpegelkriteriums wird die Ausdehnung des Be-

reiches der Betroffenen mit Anspruch auf Schallschutz erheblich erweitert. Nach den bisherigen Verfahrenshinweisen des Eisenbahnbundesamtes müsste eine Abwägung zusätzlicher Schallschutzmaßnahmen getroffen werden; in diesem Fall hätte dies eine weitere Erhöhung und Verlängerung der vorgesehenen aktiven Schallschutzmaßnahmen und eine wesentliche Erweiterung des Umgriffs von Betroffenen mit Anspruch auf passiven Schallschutz zur Folge.

#### Fallbeispiel 2: hohe Verkehrsbelastung

Das Maximalpegelkriterium wird in diesem Fall im Nahbereich um ca. 4 dB überschritten. Der Umfang von Schallschutzmaßnahmen würde sich in diesem Fall in wesentlich geringerem Ausmaß gegenüber Fallbeispiel 1 erhöhen. Eine weitere geringfügige Erhöhung des aktiven Schallschutzes ist – je nach Ergebnis der Abwägung – nicht ausgeschlossen.

Die Einführung eines Maximalpegelkriteriums von 15 dB in der 16.BImSchV hätte somit bei geringer belasteten Strecken eine erhebliche Ausweitung des erforderlichen Schallschutzes zur Folge; insbesondere im Bereich dichter Bebauung im Nahbereich der Bahnlinien ist dann mit zusätzlichen aktiven Schallschutzmaßnahmen zu rechnen.

### 6.3 Maximalpegelkriterium ableitbar aus dem Kriterium "physiologische Aufwachreaktionen"

Aus den in Kapitel 2.4 geschilderten physiologischen Messungen des Nachtschlafes lassen sich – durch Umrechnungsverfahren entsprechend Kapitel 4 – die zusätzlichen Aufwachreaktionen (AWR) bedingt durch Schienenverkehrslärm ermitteln. 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 Aufweckreaktionen werden an dieser Stelle zunächst 3 AWR angenommen; dieser Wert wird derzeit wohl in etwa im Bereich des Flughafens Köln erreicht (vgl. Müller et. al. 2015). Als untere Grenze, ab der zusätzliche Aufwachreaktionen zu berücksichtigen sind, wird 1 AWR betrachtet; dieser Wert wurde im Rahmen des Fluglärmmkonzeptes für den Flughafen Leipzig vom Bundesverwaltungsgericht als Zumutbarkeitsgrenze bestätigt. Unter diesen Randbedingungen ließe sich die Umsetzung dieses Maximalpegelkriteriums in der 16.BImSchV folgendermaßen darstellen

#### **§ 2 Immissionsgrenzwerte**

*(5) Die Anzahl von zusätzlichen schienenverkehrslärmbedingten Aufwachreaktionen (AWR) im Beurteilungszeitraum Nacht (22 Uhr bis 6 Uhr) beträgt höchstens 3.*

#### **§ 4 Berechnung des Beurteilungspegels für Schienenwege**

*1) Der Beurteilungspegel und die Anzahl der bahnlärmgedingten zusätzlichen AWR ist nach Anlage 2 zu berechnen. Die Berechnung des Beurteilungspegels hat getrennt für den Beurteilungszeitraum Tag (6 Uhr bis 22 Uhr) und den Beurteilungszeitraum Nacht (22 Uhr bis 6 Uhr) erfolgen; die Berechnung der AWR erfolgt nur für den Beurteilungszeitraum Nacht (22 Uhr bis 6 Uhr)*

Als Berechnungsverfahren für die Ermittlung der AWR an einem Immissionsort, das in das Verfahren der Anlage 2 der 16.BImSchV eingeführt werden kann, wird folgende Vorgehensweise vorgeschlagen:

1. Iterative Ermittlung des mittleren Vorbeifahrtpegels jeder Zugklasse an einem Immissionsort durch wandernde Linienquelle der Länge  $l_{\text{zug}}$  und dem Schalleistungspegel

$$L_W = L_W' + 10 \lg \left( \frac{v T_0}{d_0} \right) \quad (\text{Gl.-27})$$

mit

$L_W$  Schalleistungspegel des Zuges

$L_W'$  Pegel der längenbezogenen Schalleistung des Zuges nach Schall 03

$v$  Zuggeschwindigkeit

$T_0$  1 s

$d_0$  1 m

Iteration der Berechnung der Immissionspegel  $L_{p,Aeq}$  nach Gleichung. 29 der Schall 03 zu den Berechnungszeitpunkten  $i$  und Ermittlung des Maximalwerts am Immissionsort getrennt für Güterzüge und Personenzüge:

$$L_{\text{max}} = \max(L_{Aeq,i}) \quad (\text{Gl.-28})$$

2. Ermittlung des maximalen Vorbeifahrtpegels jeder Zugklasse an einem Immissionsort durch Ansatz eines Zuschlags zur Berücksichtigung von Einzelereignissen:

$$\Delta L_{Gz} = 3,1 - 1,0 \lg(d/d_0) \quad (\text{Gl.-29})$$

$$\Delta L_{Pz} = 2,3 - 0,9 \lg(d/d_0) \quad (\text{Gl.-30})$$

mit:

$d$  Abstand Gleismitte zu Immissionsort in m

$d_0$  10 m

$$L_{pAF,max,i,Gz} = L_{max,Gz} + \Delta L_{Gz} \quad (\text{Gl.-31})$$

$$L_{pAF,max,i,Pz} = L_{max,Pz} + \Delta L_{Gz} \quad (\text{Gl.-32})$$

3. Ermittlung einer Dichteverteilung der Maximalpegel aller Zugvorbeifahrten der Zugklassen  $i$  im Zeitraum Nacht der Form:

$$\varphi_i(L) = n * \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{L - L_{AF,max,i}}{\sigma} \right)^2} \quad (\text{Gl.-33})$$

mit

$\varphi_i(L)$  Dichteverteilung des Maximalpegels der Zugklasse  $i$

$n$  Zahl der Vorbeifahrtereignisse der Zugklasse  $i$

$\sigma_i$  Standardabweichung der Zugklasse  $i$

4. Aufsummieren der Dichteverteilungen der Maximalpegel für die Zugklassen  $i$  getrennt für Personen- und Güterzüge:

$$\varphi(L) = \sum_i \varphi_i \quad (\text{Gl.-34})$$

mit

$\varphi(L)$  Dichteverteilung des Maximalpegels aller Züge

5. Multiplikation der Dichteverteilungen der Maximalpegel für Personen- bzw. Güterzüge mit den in folgender Abbildung dargestellten Expositions-Wirkungskurven der Aufwachwahrscheinlichkeit für Personen- bzw. Güterzüge auf der Grundlage der Gleichungen 5 und 7:
6. Aufsummierung der resultierenden Dichteverteilung der Aufwachwahrscheinlichkeit zu einer Gesamtzahl zusätzlich zu erwartender Aufwachreaktionen.

Die detaillierte normative Festlegung des Verfahrens ist in einem geeigneten Arbeitskreis abzustimmen. Die Umsetzung dieses Verfahrens würde sich auf die beiden Fallbeispiele wie folgt auswirken:

Fallbeispiel 1: geringe Vorbeifahrthäufigkeit.

Die AWR liegen am nahen Immissionsort ohne Wand knapp über 1, in allen anderen Situationen wird die  $AWR = 1$  unterschritten. In diesem Fall ergibt sich aufgrund des AWR-Kriteriums am nahegelegenen Immissionsort ohne Schallschutz eine Überschreitung des AWR - Kriteriums und somit Anspruch auf Schallschutzmaßnahmen; dieser ergibt sich auch bereits aufgrund der Überschreitung des bestehenden Immissionsgrenzwertes von 49 dB. In allen anderen Situationen ergibt sich  $AWR < 1$ , sodass sich nach diesem Kriterium kein Anspruch auf zusätzlichen Schallschutz ableiten lässt.

Fallbeispiel 2: hohe Vorbeifahrthäufigkeit.

Die AWR liegen zwischen 2,2 und 5,7; der o.g. Grenzwert für den AWR von 3 kann in diesem Fallbeispiel nur am fernen Immissionsort mit Schallschutzwand unterschritten werden. Am nahen Immissionsort wird die AWR auch mit Wand um 0,8 überschritten. Um diesen Grenzwert unterschreiten zu können, wird eine umfangreiche Ausweitung der Schallschutzmaßnahmen erforderlich.

Die Einführung eines AWR-Kriteriums zwischen 1 und 3 in der 16.BImSchV hätte somit bei geringer belasteten Strecken keine Ausweitung des erforderlichen Schallschutzes zur Folge, während bei hochbelasteten Strecken mit erheblichen zusätzlichen Schallschutzmaßnahmen zu rechnen ist.

#### 6.4 Vergleichende Betrachtung der Maximalpegelkriterien

Die beiden vorgeschlagenen Möglichkeiten zur Berücksichtigung eines Maximalpegelkriteriums zeigen deutlich unterschiedliche Auswirkungen: Während das Verfahren auf der Grundlage der erfragten Gestörtheit des Schlafs (%HSD) die Höhe des Maximalpegels über dem Mittelungspegel stärker gewichtet, ergibt sich beim Verfahren der zusätzlich bahnlärmbedingten Aufwachreaktionen (AWR) eher eine starke Gewichtung der Anzahl der Vorbeifahrten im Nachtzeitraum. Die Auswirkungen auf den Schallschutz gegenüber der derzeitigen Regelung der 16.BImSchV bei Anwendung in der Praxis unterscheiden sich demzufolge auch deutlich:

- Nach dem „%HSD Verfahren“ wird insbesondere bei geringen Abständen zur Bahn und geringen Vorbeifahrthäufigkeiten und damit bei hohen Maximalpegeln im Vergleich zum Mittelungspegel zusätzlicher Schallschutz erforderlich.
- Beim „AWR Verfahren“ zeigen die Vergleichsrechnungen, dass hier insbesondere die Anzahl der Vorbeifahrten die AWR bestimmen; bei geringer Vorbeifahrthäufigkeit können die AWR auch bei hohen Maximalpegeln unter  $AWR=1$  liegen, während bei hohen Vorbeifahrthäufigkeiten ein möglicher Grenzwert von  $AWR=3$  auch bei relativ geringen Maximalpegeln überschritten wird.
- Durch zusätzliche aktive Schallschutzmaßnahmen kann die Höhe des Maximalpegels reduziert werden und damit der %HSD effektiv verringert werden, während aktive Schallschutzmaßnahmen die Anzahl der zusätzlich bahnlärmbedingten Aufwachreaktionen nur in geringerem Umfang reduzieren können.

Das „%HSD“- Verfahren benachteiligt somit Anwohner an Bahnstrecken mit hoher Vorbeifahrthäufigkeit, während das „AWR“- Verfahren Anwohner an Bahnstrecken mit besonders hohen Vorbeifahrpegeln bei geringerer Frequentierung benachteiligt. Um hier einen Ausgleich zu finden, sollte daher eine Kombination aus den beiden beschriebenen Möglichkeiten zur Berücksichtigung beider Verfahren geprüft werden. In diesem Fall könnte eine Änderung der 16.BImSchV wie folgt formuliert werden:

#### **§ 2 Immissionsgrenzwerte**

*(5) Einzelne Maximalpegel aus Schienenverkehrslärm dürfen die Immissionsgrenzwerte in der Nacht um nicht mehr als 15 dB überschreiten. Die Immissionsgrenzwerte sind auch überschritten, wenn die AWR einen Wert von 3 überschreitet.*

#### **§ 4 Berechnung des Beurteilungspegels für Schienenwege**

*1) Der Beurteilungspegel und die Maximalpegel sowie die Anzahl der AWR sind nach Anlage 2 zu berechnen. Die Berechnung des Beurteilungspegels hat getrennt für den Beurteilungszeitraum Tag (06 Uhr bis 22 Uhr) und den Beurteilungszeitraum Nacht (22 Uhr bis 6 Uhr) zu erfolgen; die Berechnung des Maximalpegels und der AWR erfolgt nur für den Beurteilungszeitraum Nacht (22 Uhr bis 06 Uhr)*

Die Anlage 2 der 16.BImSchV müsste in diesem Fall um die in den Kapiteln 6.2 und 6.3 beschriebenen Ausführungen ergänzt werden.

Die Anwendung dieser Kombinationslösung auf die beiden Fallbeispiele hätte zur Folge, dass sowohl bei Fallbeispiel 1 als auch bei Fallbeispiel 2 gegenüber den derzeitigen Regelungen der 16.BImSchV zusätzliche Schallschutzmaßnahmen in erheblichem Umfang erforderlich wären.

## 6.5 Diskussion

Sofern man die o.a. vorgestellten Verfahren in der 16.BImSchV einführt, hat die Einführung der Maximalpegelkriterien 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 kritisch einschätzen. Daher wird es zukünftig erforderlich, 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 sind die dafür maßgeblichen Vorschriften 24.BImSchV, DIN 4109 und VDI 2719 mit dem Berechnungsverfahren des Maximalpegels bzw. mit Hinweisen darauf zu ergänzen.

Zusammenfassend lässt sich aus vorliegendem Gutachten ableiten, dass mit der derzeitigen Beurteilungssystematik nur auf der Grundlage von Mittelungspegeln eine angemessene Bewertung und ein ausreichender Schutz des Nachtschlafes von Bahnanrainern nicht möglich sind. Insbesondere im Nahbereich von Bahnstrecken ist sowohl die Berücksichtigung der Höhe der Maximalpegel als auch die Häufigkeit der Bahnlärmereignisse für eine differenziertere 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 Bahnlärms werden Ergänzungen der maßgeblichen Verordnungen vorgeschlagen, die sowohl die Höhe des Maximalpegels als auch die Anzahl der Aufwachreaktionen bei Nacht berücksichtigen.

## 7 Verzeichnisse

### Verwendete Formelzeichen und Abkürzungen

A	dB	Frequenzbewertung mit A-Bewertungsfilter
BMVBS		Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
BUZ		Bahnumweltzentrum Berlin
DB		Deutsche Bahn
EBA		Eisenbahnbundesamt
EG / EU		Europäische Gemeinschaft bzw. Europäische Union
eq		Angabe der Energieäquivalenz (energetische Mittelung)
FluLärmG		Gesetz zum Schutz gegen Fluglärm
F bzw. S	s	Zeitbewertungsfilter (F = Fast = 0,125 s; S = Slow = 1 s)
HGV		Hochgeschwindigkeitsverkehr
ISO		International Organisation for Standardization
IO		Immissionsort
l	m	Länge der Schallquelle
$l_{\text{Zug}}$	m	Zuglänge
$\Delta L$	dB	Pegeldifferenz
$\Delta L_{(25)}$	dB	Pegeldifferenz zwischen Emissionspegel und Maximalpegel in 25 m Entfernung zum Gleis
$\Delta L_{pA,eq,Tag}$	dB	Intervall der maximalen Differenzen zwischen Messung und Berechnung am Tag (06-22 Uhr)
$\Delta L_{pA,eq,Nacht}$	dB	Intervall der maximalen Differenzen zwischen Messung und Berechnung in der Nacht (22-06 Uhr)
$L_a$	dB	maßgeblicher A-bewerteter Außenschallpegel
$L_{AP}$		Lärmaktionsplanung
$L_{den} / L_{DEN}$	dB	Beurteilungspegel über Tag-Abend-Nacht (06-18 Uhr / 18-22 Uhr / 22-06 Uhr)
$L_{eq}$	dB	äquivalenter Dauerschallpegel

$L_i$	dB	A-bewerteter Innenschallpegel
$L_{m,E}$	dB	Emissionspegel
$L_p$	dB	Schalldruckpegel
$L_{pAF,eq,T}$	dB	Mittelungsschalldruckpegel / äquivalenter Dauerschallpegel
$L_{pAF,max}$	dB	A(F)-bewerteter mittlerer Maximalschallpegel
$L_{pAF,max,A}$	dB	A(F)-bewerteter mittlerer Maximalschallpegel Außenpegel
$L_{pAF,max,I}$	dB	A(F)-bewerteter mittlerer Maximalschallpegel Innenpegel
$L_{pAF,max,Zug}$	dB	A(F)-bewerteter mittlerer Maximalschallpegel eines vorbeifahrenden Zuges
$L_{WA}$	dB	A-bewerteter Schalleistungspegel
$L_{WA'}$	dB	Pegel der längenbezogenen A-bewerteten Schalleistung
Maximalpegel		mittlerer Maximalschalldruckpegel
Mittelungspegel		Langzeitmittelungsschalldruckpegel (Dauerschallpegel)
n	1 / h	Anzahl an Zugfahrten pro Stunde
NE		Non-eligible, stichprobenneutraler Ausfall
PFU		Planfeststellungsuntersuchung
$R_{w,i}$	dB	Schalldämm-Maße der Teilaußenflächen
$R'_{w,i}$	dB	vorhandenes Schalldämm-Maß der Teilaußenflächen
$R_{w,res}$	dB	resultierendes bewertetes Schalldämm-Maß der Gesamtaußenfläche
$R'_{w,res}$	dB	vorhandenes resultierendes bewertetes Schalldämm-Maß der Gesamtaußenfläche
$S_g$	m <sup>2</sup>	Gesamtaußenfläche, die sich aus allen Teilaußenflächen zusammensetzt
$S_i$	m <sup>2</sup>	Teilaußenflächen
$S_I - S_n$	m <sup>2</sup>	Teilaußenflächen
SO		Schienenoberkannte

v	km/h	Geschwindigkeit
v <sub>Zug</sub>	km/h	Geschwindigkeit eines vorbeifahrenden Zuges
V	m <sup>3</sup>	Raumvolumen
Zeus		Zeus GmbH, Zentrum für angewandte Psychologie, Umwelt- und Sozialforschung

## Begriffe

### AF-bewerteter Schalldruckpegel

$$L_{p,AF}(t)$$

als Funktion der Zeit mit der Frequenzbewertung A und der Zeitbewertung F gemessener Schalldruckpegel

### AF-bewerteter Maximalschalldruckpegel

$$L_{p,AF,max,i}$$

Höchstwert des A-bewerteten Schalldruckpegels eines Zuges  $i$ , der während der Messdauer  $T$  eines Zuges bei Anwendung der Zeitbewertung F bestimmt wird.

### mittlerer AF-bewerteter Maximalschalldruckpegel

$$\overline{L_{p,AF,max,T}}$$

energetisch gemittelter AF-bewerteter Maximalschalldruckpegel, gemittelt über die Maximalschalldruckpegel, die in einem betrachteten Zeitintervall  $T$  anfallen

### A-bewerteter äquivalenter Dauerschalldruckpegel

$$L_{p,A,eq,T}$$

10-facher dekadischer Logarithmus des über ein Zeitintervall  $T$  gemittelten Quadrates des Verhältnisses des A-bewerteten Schalldrucks zum Bezugsschalldruck von  $20 \mu\text{Pa}$  in Dezibel

### Vorbeifahrtexpositionspegel

$$TEL$$

Über die Messdauer  $T$  gebildeter und auf die Vorbeifahrtzeitdauer  $T_p$  umgerechneter Mittelungspegel  $L_m$  des von der Vorbeifahrt eines Fahrzeugs am Messort verursachten Geräusches

### Einzelereignispegel

$$SEL, L_{T0}, L_{p,T0}$$

Über die Messdauer  $T$  gebildeter und auf 1 s umgerechneter Mittelungspegel  $L_m$  des von der Vorbeifahrt eines Fahrzeugs am Messort verursachten Geräusches

**Beurteilungspegel** $L_r$ 

Maß für die Stärke der Geräuschbelastung innerhalb der Beurteilungszeit  $T_r$

**Pegelanstiegsgeschwindigkeit**

PA

Pegelanstiegszeit in dB/s als Pegeldifferenz bezogen auf die Zeitdauer zwischen dem Punkt 10 dB bzw. 20 dB unterhalb des ersten Wendepunkts und dem Wendepunkt des Vorbeifahrtpegels eines Fahrzeuges

## Literaturverzeichnis:

- Babisch, W. (2014a). Updated exposure-response relationship between road traffic noise and coronary heart diseases: A meta-analysis. *Noise & Health*, 16, 1-9.
- Babisch, W. (2014b). Cardiovascular burden of disease from environmental noise - evidence, uncertainties and public health implications. Keynote. Proceedings of the 11th International Congress on Noise as a Public Health Problem (ICBEN). Nara (Japan).
- Banks, S. & Dinges, D. F. (2007). Behavioral and physiological consequences of sleep restriction. *J.Clin.Sleep Med.*, 3(5), 519-528.
- Basner M., Buess, H., Elmenhorst, D., Gerlich, A., Luks, N., Maaß, H., Mawet, L., Müller, E.W., Müller, U., Plath, G., Quehl, J., Samel, A., Schulze, M., Vejvoda, V. & Wenzel J. (2004). Nachtfluglärmwirkungen (Band 1): Zusammenfassung. Köln: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR).
- Basner, M. & McGuire, S. (2016). Update of WHO's Community Noise Guidelines: Evidence review on the effects of noise on sleep. Proceedings of Inter-Noise, 2016. (p. 7723-7725). Hamburg, Germany. Zugriff am 22.11.16. Verfügbar unter <http://pub.dega-akustik.de/IN2016/data/articles/000860.pdf>.
- Basner, M. & Samel, A. (2005). Effects of nocturnal aircraft noise on sleep structure. *Somnologie*, 9(2), 84-95.
- Basner, M., Brink, M. & Elmenhorst, E.-M. (2012). Critical appraisal of methods for the assessment of noise effects on sleep. *Noise & Health*, 14(61), 321-329.
- Basner, M., Buess, H., Elmenhorst, D., Gerlich, A., Luks, N., Maaß, H., Mawet, L., Müller, E.-W., Müller, U., Plath, G., Quehl, J., Samel, A., Schulze, M., Vejvoda, M., Wenzel, J. (2004). Nachtfluglärmwirkungen – Band 1 – Zusammenfassung, Forschungsbericht DLR FB 2004-07/D, ISSN 1434-8454.
- Basner, M., Glatz, C., Griefahn, B., Penzel, T. & Samel, A. (2008). Aircraft noise: effects on macro- and micro-structure of sleep. *Sleep Med.*, 9(4), 382-387.
- Basner, M., Mueller, U. & Elmenhorst, E.M. (2011). Single and combined effects of air, road, and rail traffic noise on sleep and recuperation. *Sleep*, 34, 11-23.
- Basner, M., McGuire, S. (2016). Update of WHO's Community Noise Guidelines: Evidence review on the effects of noise on sleep, Proceedings of the 45th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering (InterNoise 2016), August 21-24, Hamburg, Germany, pp. 7723-7725, ISBN 978-3-939296-11-9.
- Berglund, B., Lindvall, T. & Schwela, D.H. (1999). Guidelines for Community Noise. Geneva, Swiss: World Health Organization. Zugriff am 22.11.16. Verfügbar unter <http://www.who.int/docstore/peh/noise/guidelines2.html>
- Brink, M., Schierz, C., Basner, M., Samel, A., Spreng, M., Scheuch, K., Stahl, W.A., Bögli, H. (2006). Bestimmung lärminduzierter Aufwachwahrscheinlichkeiten in der Nachtlärmwirkungsforschung und

- Anwendung entsprechender Wirkungsmodelle für Prognosezwecke. Bericht zum Workshop „Aufwachwahrscheinlichkeit“ (2006). <http://e-collection.library.ethz.ch/view/eth:28983>.
- Buysse, D.J. (2014). Sleep health: can we define it? Does it matter? *Sleep*, 37(1), 9-17.
- Degn, U., Villefrance, L., Maxon, C., Masoero, M., Krüger, F., Kalivoda & Buna, B. (2002). A study of European priorities and strategies for railway noise abatement. Annex I Retrieval of Legislation. ODS Reference No.: 00.2335. Copenhagen (Denmark): Ødegaard & Dannekiold-Samsøe A/S.
- Diggle, P. J., Heagerty, P., Liang, K. Y. & Zeger, S. L. (2002): *Analysis of Longitudinal Data*. Oxford: Oxford University Press.
- DIN 18005: Schallschutz im Städtebau; 2002-07
- DIN 4109: Schallschutz im Hochbau; 2016-07
- DIN 45641: Mittelung von Schallpegeln; 1990-06
- DIN 45642: Messung von Verkehrsgeräuschen; 2004-06
- DIN 45645-1: Ermittlung von Beurteilungspegeln aus Messungen, Teil 1: Geräuschemissionen in der Nachbarschaft; 1996-07
- DIN EN ISO 3095: Akustik – Bahnanwendungen – Messung der Geräuschemissionen von spurgebundenen Fahrzeugen; 2014-07
- DIN EN ISO 3095: Akustik – Bahnanwendungen – Messung der Geräuschemissionen von spurgebundenen Fahrzeugen; 2005-11
- Elmenhorst, E.M., Pennig, S., Rolny, V., Quehl, J., Mueller, U., Maaß, H., Basner, M. (2012): Examining nocturnal railway noise and aircraft noise in the field: Sleep, psychomotor performance, and annoyance
- Erläuterungen zur Anlage 2 der Sechzehnten Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verkehrslärmschutzverordnung – 16.BImSchV), Berechnung des Beurteilungspegels für Schienenwege (Schall 03), 2015
- Fastl, H., Zwicker, A., (2007); *Psychoacoustics – Facts and Models*, Springer Verlag
- Fidell, S., Pearsons, K., Tabachnick, B. G., Howe, R., Silvati, L. & Barber, D. (1995). Field study of noise induced sleep disturbance. *Journal of the Acoustical Society of America*, 98, 1025-1033.
- 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. (2001): Standardized general-purpose noise reaction questions for community noise surveys: Research and a recommendation. *Journal of Sound and Vibration*, 242(4), 641-679
- Fields, J.M. (1993). Effect of personal and situational variables on noise annoyance in residential areas. *Journal of the Acoustical Society of America*, 93(5), 2753-63.

- Fields, J.M., Walker, J.G. (1982). Comparing the relationships between noise level and annoyance in different surveys: a railway noise vs. aircraft and road-traffic comparison. *Journal of Sound and Vibrations* 81 (1), 51-80.
- FlulärmG Gesetz zum Schutz gegen Fluglärm in der Fassung der Bekanntmachung vom 31. Oktober 2007 (BGBl. I S. 2550)
- Giering, K. (2015). Literaturstudie: Berücksichtigung eines Spitzenwertkriteriums bei der Beurteilung von Schienenverkehrslärm in der Nacht. Abschlussbericht im Auftrag des Hessischen Ministeriums für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz. Birkenfeld: Hochschule Trier, Umwelt-Campus Birkenfeld. Zugriff am 28.11.2016. Verfügbar unter [https://umweltministerium.hessen.de/sites/default/files/media/hmuelv/lit\\_abschlussbericht.pdf](https://umweltministerium.hessen.de/sites/default/files/media/hmuelv/lit_abschlussbericht.pdf).
- Greiser E. & Greiser, C. (2010). Risikofaktor nächtlicher Fluglärm. Schriftenreihe Umwelt & Gesundheit, 01/2010. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. Zugriff am 28.11.2016. Verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/3774.pdf>
- Greiser E. & Greiser, C. (2015). Umgebungslärm und Gesundheit am Beispiel Bremen. Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes. Umweltbundesamt, Texte 105/2015. Dessau-Roßlau. Zugriff am 18.11.2016. Verfügbar unter [http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte\\_105\\_2015\\_umgebungslaerm\\_und\\_gesundheit\\_am\\_beispiel\\_bremen.pdf](http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_105_2015_umgebungslaerm_und_gesundheit_am_beispiel_bremen.pdf).
- Griefahn, B. (1985). Schlafverhalten und Geräusche. Feld- und Laboruntersuchungen über Straßenverkehr, EEG-Analyse, Literaturlauswertung. Stuttgart: Ferdinand Enke.
- Griefahn, B. (2003). Physiologische Lärmwirkungen. In R. Schuemer, D. Schreckenbergr & U. Felscher-Suhr (Hrsg.), Wirkungen von Schienen- und Straßenverkehrslärm (S. 111-123). Bochum: ZEUS GmbH. Zugriff am 25.11.2016. Verfügbar unter <http://www.verkehrslaermwirkung.de/03schstr.pdf>.
- Griefahn, B., Bröde, P., Marks, A. & Basner, M. (2008). Autonomic arousals related to traffic noise during sleep. *Sleep*, 31(4), 569-577.
- Guski, R. (1999). Personal and social variables as co-determinants of noise annoyance. *Noise & Health*, 3, 45-56.
- Guski, R., Basner, M. & Brink, M. (2012). Gesundheitliche Auswirkungen nächtlichen Fluglärms: aktueller Wissensstand (Literaturlauswertung). Schlussbericht im Auftrag des Ministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen. Bochum: Fakultät für Psychologie der Ruhr-Universität.
- Heroux, M-E., Babisch, W., Belojevic, G., Brink, M., Janssen, S., Lercher, P., Paviotti, M., Pershagen, G., Persson Waye, L, Preis, A., Stansfeld, S. & Verbeek, J. (2016). WHO Environmental noise guidelines for the European Region - What is new? 1. Policy context and methodology used for guideline development. *Proceedings of Inter-Noise, 2016*. (p. 2546-2551). Hamburg, Germany. Zugriff am 22.11.16. Verfügbar unter <http://pub.dega-akustik.de/IN2016/data/articles/000386.pdf>.

- Horne, J. A., Pankhurst, F. L., Reyner, L. A., Hume, K. & Diamond, I. D. (1994). A field study of sleep disturbance: effects of aircraft noise and other factors on 5,742 nights of actimetrically monitored sleep in a large subject sample. *Sleep*, 17, 146-159.
- Hosmer, D. H. & Lemeshow, S. (2000). *Applied Logistic Regression*. (2nd ed.) New York: Wiley.
- ISO 1996-1: Acoustics – Description, measurement and assessment of environmental noise – Part 1: Basic quantities and assessment procedures; 2016-03-01
- ISO/DIS 1996-2.2: Acoustics – Description, measurement and assessment of environmental noise – Part 2: Determination of environmental noise levels; 2015-09-02
- Järup, L., Babisch, W., Houthuijs, D., Pershagen, G., Katsouyanni, K., Cadum, E., Dudley, M.L., Savigny, P., Seiffert, I., Swart, W., Breugelmans, O., Bluhm, O., Selander, J., Haralabidis, A., Dimakopoulou, K., Soutzi, P., Velonakis, M. & Vigna-Tagliani, F., on behalf of the HYENA study team (2008). Hypertension and Exposure to noise near airports: the HYENA study. *Environmental Health Perspectives*, 116, 329-333.
- Jonasson, H. G., Storeheier, S. (2001). Nord 2000. New Nordic Prediction Method for Rail Traffic Noise
- Klatte, M., Bergström, K., Spilski, J., Mayer, J. & Meis, M. (2014). Wirkungen chronischer Fluglärmbelastung auf kognitive Leistungen und Lebensqualität bei Grundschulkindern. In Gemeinnützige Umwelthaus gGmbH (Hg.), NORAH (Noise related annoyance cognition and health): Verkehrslärmwirkungen im Flughafenumfeld (Bd. 1), Kelsterbach. Zugriff am 15.04.2016. Verfügbar unter [http://www.norah-studie.de/dl.pl?typ=pub&id=1415353771\\_77260](http://www.norah-studie.de/dl.pl?typ=pub&id=1415353771_77260).
- Kroesen, M., Molin, E.J.E. & van Wee, B. (2010). Determining the direction of causality between psychological factors and aircraft noise annoyance. *Noise & Health*, 12(46), 17-25.
- Kryger, M.H., Roth, T., Dement, W.C. et al., (2017). *Principles and Practice of Sleep Medicine*, 6th Edition, Elsevier, ISBN: 978-0-323-24288-2, p 1730.
- McGuire, S. & Basner, M. (2017). WHO Environmental Noise Guidelines for the European Region: A systematic review on environmental noise and effects on sleep. *Proceedings of 12th ICBEN Congress on Noise as a Public Health Problem, ICBEN 2017, Zurich*.
- Miedema, H.M.E. & Vos, H. (1998). Exposure-response relationships for transportation noise, *Journal of the Acoustical Society of America*, 104, 3432 -3445
- Miedema, H.M.E. & Vos, H. (2007). Associations between self-reported sleep disturbance and environmental noise based on reanalyses of pooled data from 24 studies. *Behavioral Sleep Medicine*, 5(1), 1-20.
- Miedema, H.M.E. & Vos, H. (1999). Demographic and attitudinal factors that modify annoyance from transportation noise. *Journal of the Acoustical Society of America*, 105(6), 3336-3344
- Möhler, U., Liepert, M., Mühlbacher, M., Beronius, A., Nunberger, M., Braunstein, G., Gillé, M., Schaal, J., Bartel, R. (2015). Erfassung der Verkehrsgeräuschexposition. In Gemeinnützige Umwelthaus

- gGmbH (Hg.), NORAH (Noise related annoyance cognition and health): Verkehrslärmwirkungen im Flughafenumfeld (Bd. 2), Kelsterbach, [http://www.norah-studie.de/dl.pl?typ=pub&id=1446116917\\_71891](http://www.norah-studie.de/dl.pl?typ=pub&id=1446116917_71891), Abruf am 15.04.2016.
- Möhler, U., Spitzenpegel beim Schienenverkehrslärm, Zeitschrift für Lärmbekämpfung 1990 (37) 35-40
- Müller, G., Möser, M. (2004). Taschenbuch der Technischen Akustik, Springer Verlag
- Müller, U., Aeschbach, D., Elmenhorst, E.-M., Mendolia, F., Quehl, J., Hoff, A., Rieger, I., Schmitt, S., Little, W. (2015): Die NORAH-Studie: Verkehrslärmwirkungen im Flughafenumfeld – Endbericht Band 4, „Fluglärm und nächtlicher Schlaf“, 1-191, [http://www.laermstudie.de/fileadmin/files/Laermstudie/Schlafstudie\\_Wiss\\_Ergebnisbericht.pdf](http://www.laermstudie.de/fileadmin/files/Laermstudie/Schlafstudie_Wiss_Ergebnisbericht.pdf)
- Müller, U., Elmenhorst, E.-M., Maass, H., Rolny, V., Pennig, S., Quehl, J. & Basner, M. (2010). Verbundprojekt: DEUFRAKO/RAPS - Railway noise (and other modes) annoyance, performance, sleep: wirkungsorientierte Bewertung unterschiedlicher Verkehrslärmarten; Teil-vorhaben DLR: Metaanalyse und Feldstudie. Abschlussbericht. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. in der Helmholtz-Gemeinschaft. Zugriff am 18.08.2017. Verfügbar unter <http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fb10/639593747.pdf>.
- Muzet, A. (2007). Environmental noise, sleep and health. *Sleep Medicine Reviews*, 11(2), 135-142.
- Öhrström, E. & Skanberg, A.-B. (1996). A field study on effects of exposure to noise and vibration from railway traffic, part I: Annoyance and activity disturbance effects. *Journal of Sound and Vibration*, 193(1), 39-47.
- Ollerhead, J. B., Jones, C. J., Cadoux, R. E., Woodley, A., Atkinson, B. J., Horne, J. A., ...McKean, J. (1992). Report of a Field Study of Aircraft Noise and Sleep Disturbance. London, United Kingdom: Department of Transport.
- Passchier-Vermeer, W., Vos, H., Janssen, S.A. & Miedema, H.M.E. (2007). Sleep and traffic noise, Summary report. Delft, Niederlande: TNO Summary report.
- Passchier-Vermeer, W., Vos, H., Steenbekkers, JHM., van der Ploeg, FD., Groothuis-Oudshoorn, K., (2002): Sleep disturbance and aircraft noise exposure, TNO report 2002.027, ISBN 90-6743-894-4, p.1-245.
- Pearsons, K., Barber, D., Tabachnick, B.G. & Fidell, S. (1995). Predicting noise-induced sleep disturbance. *Journal of the Acoustical Society of America*, 97, 331-338.
- Perron, S., Tétreault, L.-F., King, N., Plante, C., Smargiassi, A. (2012). Review of the effect of aircraft noise on sleep disturbance in adults, *Noise & Health*, Vol 14:57, p 58-67.
- Pinheiro, J., Bates, D. (2009). *Mixed-Effects Models in S and S-Plus*. Heidelberg: Springer-Verlag.
- Porter, N.D., Kershaw, A.D. & Ollerhead, J.B. (2000). Adverse effects of night-time aircraft noise. R&D report 9964. London (UK): Civil Aviation Authority.

- R Core Team (2017). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <http://www.R-project.org/>, version 3.3.3 released on 06th March 2017.
- Rechtschaffen A., Kales A., Berger R.J. et al. (1968). A manual of standardized terminology, techniques and scoring system for sleep stages of human subjects. Public Health Service, U.S. Government, Printing Office Washington, D.C.
- Richtlinie 2002/49/EG des Europäischen Parlaments und des Rates über die vom 25. Juni 2002 über die Bewertung und Bekämpfung von Umgebungslärm. Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften Nr. L 189/12 vom 18.07.2002.
- Savitzky, A., Golay, M. J. E. (1964). Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures. In: Analytical Chemistry. (36, 8), p. 1627-1639, doi:10.1021/ac60214a047.
- Schall 03: Berechnung des Beurteilungspegels für Schienenwege, Anlage 2 der Sechzehnten Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verkehrslärmschutzverordnung - 16.BImSchV), 2014
- Schlattjan, J.H., Eberwein, G., Nehring, R., Scheler, I. & Witten, J. (2014). Gesundheitliche Auswirkungen von Bahnlärm. Mainz, Wiesbaden, Düsseldorf: Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Ernährung, Weinbau und Forsten des Landes Rheinland-Pfalz, Hessisches Ministerium für Soziales und Integration Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen. Zugriff am 28.11.2016. Verfügbar unter [https://mueef.rlp.de/fileadmin/mulewf/Themen/Umweltschutz/Gesundheitlicher\\_Umweltschutz/Bahnlaerbericht\\_Endversion.pdf](https://mueef.rlp.de/fileadmin/mulewf/Themen/Umweltschutz/Gesundheitlicher_Umweltschutz/Bahnlaerbericht_Endversion.pdf)
- Schmidt, F., Kollé, K., Krüeder, K., Schnorbus, B., Wild, P., Hechtner, M. (2015). 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, 23-30.
- Schmidt, F.P., Basner, M., Kröger, G., Weck, S., Schnorbus, B., Muttray, A., Sariyar, M., Binder, H., Gori, T., Warnholtz & Münzel, T. (2013). Effect of nighttime aircraft noise exposure on endothelial function and stress hormone release in healthy adults. *European Heart Journal*, Epub 2013 Jul 2, doi: 10.1093/eurheartj/eh269.
- Schmidt, H. (1989). Schalltechnisches Taschenbuch, VDI Verlag
- Schreckenberger, D., Faulbaum, F., Guski, R., Ninke, L., Peschel, C., Spilski, J. & Wothge, J. (2015). Wirkungen von Verkehrslärm auf die Belästigung und Lebensqualität. In Gemeinnützige Umwelthaus gGmbH (Hg.), NORAH (Noise related annoyance cognition and health): Verkehrslärmwirkungen im Flughafenumfeld (Bd. 3). Kelsterbach: Umwelthaus gGmbH. Zugriff am 25.11.2016. Verfügbar unter [www.norah-studie.de/dl.pl?typ=pub&id=1446117079\\_73161](http://www.norah-studie.de/dl.pl?typ=pub&id=1446117079_73161).
- Schreckenberger, D., Meis, M., Kahl, C., Peschel, C. & Eikmann, T. (2010). Aircraft noise and quality of life around Frankfurt Airport. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 7, 3382-3405. Zugriff am 25.11.2016. Verfügbar unter <http://www.mdpi.com/1660-4601/7/9/3382/>.

- Schreckenber, D., Belke, C., Spilski, J. & Guski, R. (2017a). First results of the development of a multiple-item annoyance scale (MIAS). Proceedings of the 12th IC BEN Congress on Noise as a Public Health Problem, June 18-22, 2017. Zurich, Switzerland. Zugriff am 10.09.2017 von [http://www.icben.org/2017/ICBEN%202017%20Papers/SubjectArea06\\_Schreckenber\\_0612\\_3634.pdf](http://www.icben.org/2017/ICBEN%202017%20Papers/SubjectArea06_Schreckenber_0612_3634.pdf).
- Schreckenber, D., Benz, S., Kuhlmann, J., Conrady, M. & Felscher-Suhr, U. (2017b). Attitudes towards authorities and aircraft noise annoyance. Sensitivity analyses on the relationship between non-acoustical factors and annoyance. Proceedings of the 12th IC BEN Congress on Noise as a Public Health Problem, June 18-22, 2017. Zurich, Switzerland. Zugriff am 10.09.2017 von [http://www.icben.org/2017/ICBEN%202017%20Papers/SubjectArea06\\_Schreckenber\\_P28\\_3636.pdf](http://www.icben.org/2017/ICBEN%202017%20Papers/SubjectArea06_Schreckenber_P28_3636.pdf).
- Seidler, A., Wagner, M., Schubert, M., Dröge, P., Hegewald, J. (2015). Sekundärdatenbasierte Fallkontrollstudie mit vertiefender Befragung. In Gemeinnützige Umwelthaus gGmbH (Hg.), NORAH (Noise related annoyance cognition and health): Verkehrslärmwirkungen im Flughafenumfeld (Bd. 6). Kelsterbach: Umwelthaus gGmbH. Zugriff am 27.11.2016. Verfügbar unter [www.norah-studie.de//de/alle-studienmodule.html?file=files/norah-studie.de/Downloads/NORAH\\_Bd6\\_M2\\_FKS\\_Endbericht\\_160512\\_Aufl2.pdf](http://www.norah-studie.de//de/alle-studienmodule.html?file=files/norah-studie.de/Downloads/NORAH_Bd6_M2_FKS_Endbericht_160512_Aufl2.pdf).
- Sforza, E., Chapotot, F., Lavoie, S., Roche, F., Pigeau, R. & Buguet, A. (2004). Heart rate activation during spontaneous arousals from sleep: effect of sleep deprivation. *Clin. Neurophysiol.*, 115(11), 2442-2451.
- Smith, M.G., Croy, I., Ögren, M., Persson Waye, K. (2013). On the Influence of Freight Trains on Humans: A Laboratory Investigation of the Impact of Nocturnal Low Frequency Vibration and Noise on Sleep and Heart Rate, *PLoS One*. 2013; 8(2): e55829. Published online 2013 Feb 7. doi: 10.1371/journal.pone.0055829.
- Stansfeld, S., Babisch, W., Belojevic, G., Brink, M., Heroux, M-E., Janssen, S., Lercher, P., Paviotti, M., Pershagen, G., Persson Waye, L, Preis, A., Stansfeld, S. & Verbeek, J. (2016). WHO Environmental noise guidelines for the European Region - What is new? 2. New evidence on health effects from environmental noise and implications for research. Proceedings of Inter-Noise, 2016. (p. 2552-2555). Hamburg, Germany. Zugriff am 22.11.16. Verfügbar unter <http://pub.dega-akustik.de/IN2016/data/articles/000299.pdf>.
- Van Kempen, E., Casas, M., Pershagen, G. & Foraster, M. (2016). Systematic review of evidence of the cardiovascular and metabolic effects of environmental noise. Proceedings of Inter-Noise 2016. (p. 2640 - 2647, 2648 - 2655). Hamburg, Germany. Zugriff am 21.11.2016. Verfügbar unter <http://pub.dega-akustik.de/IN2016/data/articles/000626.pdf> und <http://pub.dega-akustik.de/IN2016/data/articles/001126.pdf>.
- VDI 2719: Schalldämmung von Fenstern und deren Zusatzeinrichtungen, 1987

- VDI 3722-2: Wirkung von Verkehrsgeräuschen. Kenngrößen beim Einwirken mehrerer Quellenarten, 2013.
- Verheijen, E., Elbers, F., & van Golde, W. (2011). Exploring bearable noise limits and emission ceilings for the railways. Part I: National and European legislation and analysis of different noise limit systems. UIC-Report UIC001-01-16ev. Utrecht, Niederlande: dBvision.
- Verkehrslärmschutzverordnung vom 12. Juni 1990 (BGBl. I S. 1036) die durch Artikel 1 der Verordnung vom 18. Dezember 2014 geändert worden ist.
- 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. (2015). 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), 1161–1183.
- World Health Organisation (WHO) (1946). Constitution of the World Health Organization. New York.
- World Health Organisation (WHO) (1999). Guidelines for Community Noise, World Health Organization, Geneva.
- World Health Organisation (WHO) (2009). Night Noise Guidelines for Europe. Copenhagen, Denmark: WHO Regional Office for Europe.
- Wothge, J., Belke, C., Möhler, U., Guski, R. & Schreckenberg, D. (2017). The combined effects of aircraft and road traffic noise and aircraft and railway noise on noise annoyance - an analysis in the context of the joint research initiative NORAH. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(8), 871; doi:10.3390/ijerph14080871.