

Nächtlicher Flug-, Straßen- und Schienenverkehrslärm: Belästigungsunterschiede und kumulative Wirkungen

Julia Quehl, Mathias Basner, Köln

Zusammenfassung Viele in der Vergangenheit durchgeführte Studien deuten darauf hin, dass die Belästigung bei gleichem Dauerschallpegel am Tag in der Reihenfolge Schienenverkehrslärm, Straßenverkehrslärm, Fluglärm ansteigt. In der hier vorgestellten Studie sollte untersucht werden, ob sich bei nächtlicher Lärmexposition die gleichen Unterschiede in der Belästigung zwischen den Verkehrsträgern finden. Zudem sollte untersucht werden, inwiefern sich Belästigungsurteile bei gleichzeitiger Beschallung mit Lärm von zwei oder drei Verkehrsträgern ändern. Als Datenbasis dienten Befragungen aus drei Schlaflaborstudien des DLR-Instituts für Luft- und Raumfahrtmedizin zur Belästigungswirkung und zu subjektiven Schlafstörungen von Flug-, Straßenverkehrs- und Bahnlärm, die mit 72 Probanden durchgeführt wurden. Im direkten Vergleich wird die höchste Belästigung durch Fluglärm ausgelöst, gefolgt von der Belästigung durch Schienenlärm an zweiter und Straßenlärmbelästigung an dritter Position. Eine mögliche Erklärung für die gefundene Rangfolge besteht in der zeitlichen Länge der verwendeten Verkehrsgerausche, von denen die Fluggeräusche im Vergleich zu den Straßenverkehrs- und Bahngeräuschen am längsten waren. Die Fluglärmbelästigung wird anders als die Belästigung durch Schienen- oder Straßenverkehrslärm durch die Lärmwirkung eines zweiten bzw. dritten Verkehrsträgers verstärkt. Die Doppelexposition aus Flug- und Schienenlärm bzw. die Dreifachexposition mit allen drei Verkehrslärmarten ruft eine signifikant stärkere Belästigungsreaktion hervor als die reine Exposition mit Fluggeräuschen. Dieser kumulative Effekt ist ein Hinweis darauf, dass bei Beurteilung von Geräuschsituationen, in denen mehr als eine Verkehrslärmart vorhanden ist, die einzelnen Quellen nicht getrennt voneinander zu bewerten sind.

Nocturnal aircraft, road traffic and rail traffic noise: differences in annoyance and cumulative effects

Summary In the past, various studies indicated that, at the same noise level and during daytime, annoyance increases in the order rail traffic, road traffic and aircraft noise. In the present study, it was analysed if the same differences in annoyance between traffic modes can be found for nocturnal noise exposure. Furthermore, it was analysed how annoyance judgements change during noise exposure with two or three traffic modes. Questionnaire surveys on noise annoyance and subjective sleep disturbances due to aircraft, road and rail traffic noise with 72 subjects of three sleep laboratory studies at the DLR Institute of Aerospace Medicine served as data basis. In direct comparison, the annoyance by aircraft noise ranked first followed by the annoyance due to railway and road noise. A possible explanation for the observed ranking is the duration of the applied transportation noises, where the duration of aircraft noise events exceeded the duration of road and railway traffic noise events. In contrast to road and rail traffic, aircraft noise annoyance is amplified after nights with exposure to a second or third traffic mode. This cumulative effect stresses the fact that a separate assessment of single traffic modes may not be adequate in situations with combined traffic noise exposure.

Geräuscheinwirkungen können in vielfältiger Weise die Lebensbedingungen beeinträchtigen. Jedes hörbare Geräusch, das zu Belästigungen, Störungen oder gar gesundheitlichen Beeinträchtigungen führt, wird als Lärm bezeichnet. Zu den Hauptwirkungen von Lärm zählen Belästigungen. Sie werden primär durch die Störung der Kommunikation, der Erholung und Entspannung, einschließlich des Nachtschlafs, hervorgerufen und vermindern das individuelle Wohlbefinden. Da sich die Belästigung, zeitlich verzögert, den sog. primären Lärmwirkungen (z. B. Schlafstörungen) anschließt, gehört sie zu den Sekundärreaktionen. Hierzu zählen auch z. B. die empfundene Schlafqualität oder Änderungen der Befindlichkeit am Morgen nach einer lärmexponierten Nacht.

Viele Lärmwirkungsstudien zeigen, dass die Geräuschbelastung der Bevölkerung in Deutschland primär durch Verkehrslärm und hier besonders stark durch den Straßenverkehrslärm hervorgerufen wird. Nach Erhebungen des Umweltbundesamts ist knapp die Hälfte der Bevölkerung durch Straßenverkehr mit Mittelungspegeln L_M über 55 dB(A) am Tag belastet, bei denen Beeinträchtigungen des physischen und psychischen Wohlbefindens zu erwarten sind [1; 2]. Beim Schienenverkehr beträgt der Anteil ca. 20%. Die berechnete Geräuschbelastung der Bevölkerung (alte Bundesländer) durch Straßen- und Schienenverkehr ist laut Umweltbundesamt auch nachts an vielen Stellen hoch¹⁾. So ist etwa die Hälfte der Bevölkerung nachts durch Straßenverkehr Pegeln ausgesetzt ($L_M > 45$ dB(A)), bei denen mit Beeinträchtigungen des Schlafs bei geöffnetem Fenster gerechnet werden muss. Beim Schienenverkehr beträgt der Anteil ca. 37%. Betrachtet man nur die Gruppe der „hochgradig“ Belästigten, sind 18 % der Bevölkerung stark bzw. äußerst stark gestört und belästigt. Der Flugverkehr, als zweitwichtigste Verkehrslärmquelle, belästigt knapp 6 % der Bevölkerung äußerst bzw. stark; beim Schienenverkehr sind es etwa 5 %.

Trotz der mitunter geringen Vergleichbarkeit der Lästigkeitsangaben haben sich verschiedene Lärmwirkungsstudien der quellen-spezifischen Wirkung von Fluglärm, Schienenlärm, Straßenlärm und anderen Lärmarten gewidmet [3 bis 8]. Die Beschreibung der akustischen Belastung erfolgt dabei meistens durch die Berechnung des energieäquivalenten Dauerschallpegels. Dass dieser nicht zwangsläufig mit einer entsprechenden Wirkungsäquivalenz verbunden ist, zeigen die Dosis-Wirkungs-Kurven aus diesen Untersuchungen. Die international am häufigsten diskutierten Kurven stammen von *Miedema* und *Vos* [7] und beschreiben Beziehungen für den Prozentsatz der durch die Geräuscharten Straße, Schiene und Fluglärm stark belästigten Personen. Erkennbar ist, dass die Steigung der Fluglärmkurve steiler verläuft als die von Straßen- und Schienenverkehrslärm. Dies bedeutet, dass bei gleichem Pegelzuwachs (in L_{DN}) prozentual mehr Personen durch Fluglärm

¹⁾ www.umweltbundesamt.de/verkehr/laerm/strassen-und-schienen-verkehr.htm

stark belästigt sind als durch die beiden anderen Lärmquellen. Für letztere gilt, dass die Straßenlärmkurve über der Kurve für den Schienenlärm liegt, d. h. dass Straßenlärm bei gleichem Pegel von einem höheren Prozentsatz als stark belästigend empfunden wird als Bahnlärm (s. a. [9]). Empfehlungen zu Bonus-Malus-Regelungen beruhen auf diesen Wirkungskurven. Es ist jedoch nicht geklärt, ob die unterschiedlichen Belästigungsreaktionen auf den unterschiedlichen Lärmarten selbst oder einfach auf einer unterschiedlichen Belastung durch die verschiedenen Verkehrsträger beruhen. Da die Unterschiede mit zunehmender akustischer Belastung ansteigen, ist beispielsweise die Höhe des Schienenbonus [10] in Frage zu stellen, da dieser der Bahn einen um 5 dB(A) höheren äquivalenten Dauerschallpegel als an verkehrsreichen Straßen gestattet. Nach *Gottlob* [11] sind sogar noch größere Unterschiede zugunsten (Bonus), aber auch zuungunsten (Malus) der Bahn zu erwarten, wenn die lärminduzierte Störwirkung auf die spezifische Situation der Betroffenen (z. B. Ruhe/Erholung, Kommunikation, Schlaf) bezogen wird. Einen für alle Wirkungsvariablen durchgängigen Schienenbonus gibt es daher nicht.

Viele Personen, insbesondere die Anwohner von Bahntrassen und Flughäfen, sind von der Einwirkung von zwei oder sogar drei Verkehrslärmarten betroffen. Laut Umweltbundesamt werden von den rund 47 Mio. Einwohnern in Deutschland, die vom Straßenverkehrslärm belästigt sind, rund 13 Mio. durch Fluglärm und etwa 11 Mio. durch Schienenverkehrslärm zusätzlich belästigt [12]. Für die Betroffenen ist die Zusammensetzung einer Geräuschsituation letztlich gleichgültig [13]. Für sie entscheidend ist nur das Ergebnis, nämlich Umfang, Dauer, Charakteristik, Wirkung und Empfindung des Schalls, und dabei vordringlich die Frage, ob die erhebliche Belästigungs- oder gar gesundheitsgefährdende Schwelle überschritten wird. Voraussetzung bei der Gesamtgeräuschbetrachtung laut *Steinebach* und *Rumberg* [13] ist das potenzielle Vorhandensein schädlicher Lärmwirkungen im Sinne erheblicher Belästigungen oder Gesundheitsgefahren. Derzeit existieren jedoch noch keine verbindlichen gesetzlichen Regelungen für die Beurteilung von Geräuschsituationen, in denen mehr als eine Lärmquelle vorliegt [14]. Die Bewertung der drei Verkehrsträger Luft, Straße und Schiene erfolgt bislang immer noch einzeln und getrennt voneinander, obwohl viele Menschen gleichzeitig durch mehrere Verkehrslärmarten belastet und belästigt sind. Die Einstufung der Gesamtsituation ist nicht einfach, da nach den quellen-spezifischen Dosis-Wirkungs-Kurven die einzelnen Verkehrslärmarten bei gleicher akustischer Energie unterschiedlich starke Reaktionen hervorrufen und die Unterschiede mit zunehmendem Schallpegel größer werden. Grundsätzlich wird davon ausgegangen, dass eine Situation, in der mehrere Quellen gegeben sind, „negativer“ einzuschätzen ist als eine Situation mit nur einer Lärmquelle. Die Gesamtbelästigung wird umso höher ausfallen, je mehr Quellen auf den Betroffenen einwirken [1; 15].

Nach *Ortscheid* und *Wende* [12] existieren verschiedene Modelle zur kumulativen Wirkung mehrerer Lärmquellen. Es wird angenommen, dass die resultierende Gesamtbelästigung:

- vom Summenpegel aller Quellen abhängt (Energie – Summationsmodell),
- sich aus der pegelbezogenen Belästigung aller Quellen addiert (Additionsmodell),

Expositionsmuster für die neun Beschallungs-nächte im Schlaflabor. Abkürzungen: Basis = kein Lärm, F = nur Fluggeräusche, S = nur Straßenverkehrsgeräusche, Z = nur Schienenverkehrsgeräusche, FS = F + S, FZ = F + Z, ZS = Z + S, FZS = F + Z + S, $S_{Leq} = 80$ Straßengeräusche mit Leq wie F und Z.

Anzahl der Lärmereignisse					
Exposition	Fluglärm	Straßenlärm	Schienenlärm	Gesamt	$L_{AS,eq}$
F	40	0	0	40	39,7
S	0	40	0	40	36,9
Z	0	0	40	40	39,7
S_{Leq}	0	80	0	80	39,7
FS	40	40	0	80	41,2
FZ	40	0	40	80	42,5
ZS	0	40	40	80	41,2
FZS	40	40	40	120	43,3
Basis	0	0	0	0	30,0

- vom Summenpegel und von einem Korrekturfaktor abhängt, der die absoluten Pegelunterschiede zwischen den Quellen berücksichtigt (Energie-Differenzmodell),
- durch den Gesamtpegel und einen Korrekturfaktor bestimmt wird, der die unterschiedlichen Belästigungspotentiale (Malus/Bonus) der Quellen integriert (Reaktions-Summationsmodell),
- vom Gesamtpegel und von einem Korrekturfaktor abhängt, der Hemmungsprozesse berücksichtigt, die sich durch die Interaktion der Quellen ergeben. Dies bedeutet, dass der Pegel einer Lärmquelle die quellen-spezifische Störung einer anderen reduziert (Summations-Inhibitionsmodell, s. a. [16]).

Für diese Modelle sprechen folgende empirische Befunde:

- Die Gesamtbelästigung kann größer als die höchste quellen-spezifische Einzelbelästigung sein (z. B. bei Schienen- und Straßenverkehrsgeräuschen, s. a. [17]).
- Die quellen-spezifische Einzelbelästigung kann die Gesamtbelästigung überragen (z. B. bei Schießgeräuschen und gleichmäßigen Geräuschen).
- Eine quellen-spezifische Einzelbelästigung kann durch das Vorhandensein einer zweiten Quelle abgeschwächt (z. B. Straßenverkehr bei Anwesenheit von lauten Einzelereignissen) oder verstärkt werden (z. B. Schienenverkehrsgeräusche bei zusätzlichem Dauergeräusch, das die Lärmpausen füllt).

Alle beschriebenen Modelle basieren auf dem klassischen Dosis-Wirkungs-Paradigma, das von einem direkten (linearen) Zusammenhang zwischen energetischer Schalleinwirkung und resultierendem Belästigungsgrad ausgeht, nicht-akustische Moderatorvariablen aber außer Acht lässt, obwohl diese für die Belästigung mindestens genauso wichtig sind wie die physikalische Belastung selbst [18 bis 21]. Bei der „Addition“ von verschiedenen Lärmarten verschärft sich diese Problematik, weil die Wahrnehmung eines überlagerten Gesamtgeräuschs nicht einfach der Summe der Wahrnehmung der Einzelgeräusche entspricht, sondern fallweise von verstärkenden oder abschwächenden Interaktionseffekten auszugehen ist [12]. Die Gesamtbelästigung ist daher auch nicht einfach aus der Kenntnis der spezifischen Einzelwirkungen der einzelnen Lärmarten wirkungsgerecht ableitbar [22]. Laut *Oliva* [23] können die einzelnen Geräuscharten nicht zu einer „gesamthaften Geräuschkulisse“ integriert werden, da sich die Belästigung in den Einzelbewertungen der Geräusche niederschlägt.

Modelle zum wirkungsgerechten Zusammenwirken mehrerer Verkehrslärmarten sind bisher in der Lärmwirkungsforschung noch nicht hinreichend fundiert worden. Dementsprechend mangelt es an einer Aufstellung von ein-

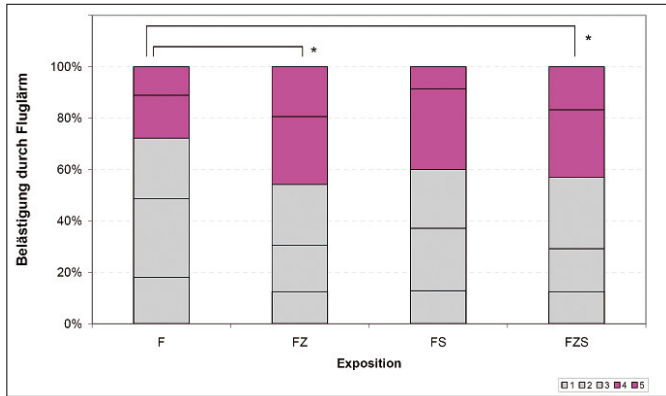


Bild 1 Prozentuale Verteilung der Belästigung durch Fluglärm auf einer 5er Skala (1 = nicht bis 5 = sehr belästigt) in Abhängigkeit von der nächtlichen Exposition mit Fluglärm (* = signifikanter Unterschied im Wilcoxon-Test mit $p \leq 0,008$).

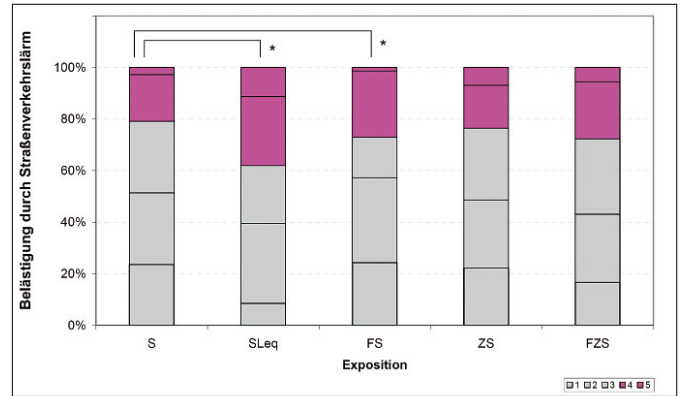


Bild 2 Prozentuale Verteilung der Belästigung durch Straßenverkehrslärm auf einer 5er Skala (1 = nicht bis 5 = sehr belästigt) in Abhängigkeit von der nächtlichen Exposition mit Straßenverkehrslärm (* = signifikanter Unterschied im Wilcoxon-Test mit $p \leq 0,005$).

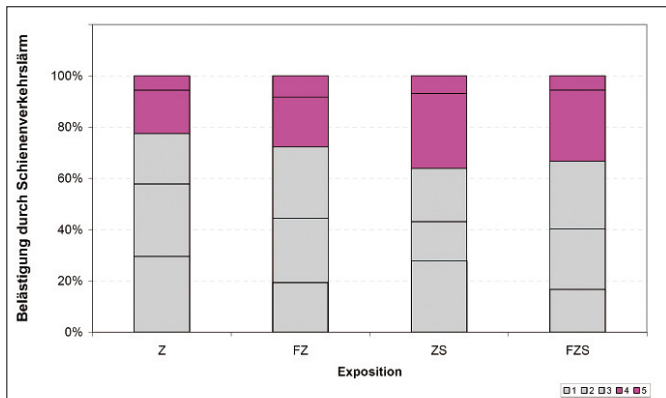


Bild 3 Prozentuale Verteilung der Belästigung durch Schienenverkehrslärm auf einer 5er Skala (1 = nicht bis 5 = sehr belästigt) in Abhängigkeit von der nächtlichen Exposition mit Schienenverkehrslärm.

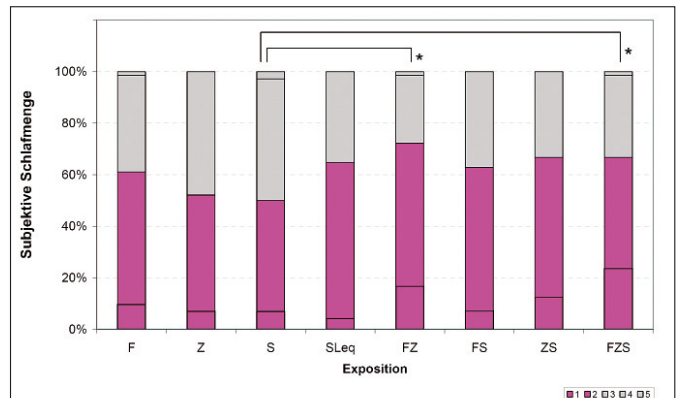


Bild 4 Prozentuale Verteilung der subjektiven Schlafmenge auf einer 5er Skala (1 = viel zu wenig bis 5 = viel zu viel Schlaf) in Abhängigkeit von der nächtlichen Verkehrslärmexposition (* = signifikanter Unterschied im Wilcoxon-Test mit $p \leq 0,002$).

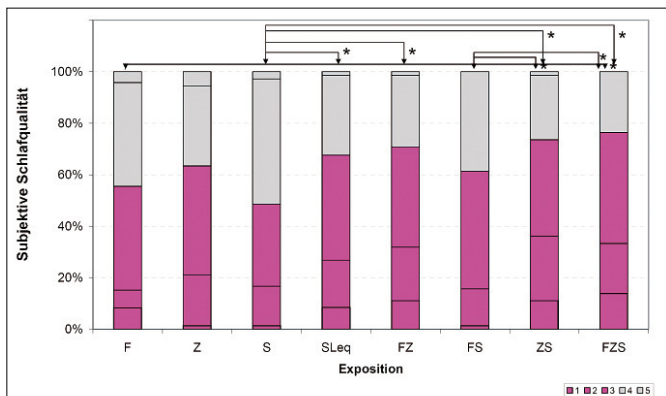


Bild 5 Prozentuale Verteilung der subjektiven Schlafqualität auf einer 5er Skala (1 = nicht bis 5 = sehr guter Schlaf) in Abhängigkeit von der nächtlichen Verkehrslärmexposition (* = signifikanter Unterschied im Wilcoxon-Test mit $p \leq 0,002$).

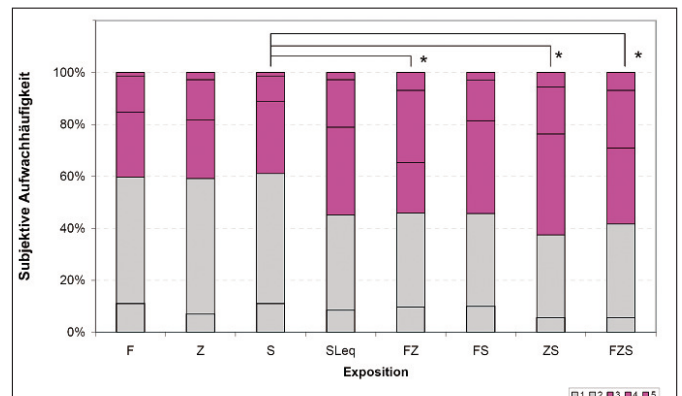


Bild 6 Prozentuale Verteilung der subjektiven Aufwachhäufigkeit auf einer 5er Skala (1 = nie bis 5 = sehr häufig aufgewacht) in Abhängigkeit von der nächtlichen Verkehrslärmexposition (* = signifikanter Unterschied im Wilcoxon-Test mit $p \leq 0,002$).

deutigen Summationsregeln zur Gesamtbelästigung. Untersuchungen zur kumulativen Lärmwirkung mehrerer Verkehrsträger sind dringend erforderlich, z. B. für die Erstellung der neuen europäischen Umgebungslärmrichtlinie, sie existieren momentan aber praktisch nicht. Aus diesem Grunde wurde in drei repräsentativen Laborstudien die kumulative Wirkung verschiedener Verkehrslärmarten in der Nacht untersucht. Zusätzlich wurde überprüft, ob sich die drei Verkehrslärm-

arten auch in der Nacht in ihrer belästigenden Wirkung unterscheiden.

Methodisches Vorgehen

In drei aufeinander folgenden laborexperimentellen Studien wurde die kumulative Wirkung nächtlichen Verkehrslärms mit insgesamt 72 gesunden und altersentsprechend normal hörenden Versuchspersonen (32 Männer, 40 Frauen) im Alter von 19 bis 71

Jahren untersucht. Als Studienzeitraum fungierten elf aufeinander folgende Nächte im Schlaflabor. Die erste Nacht war lärmfrei und diente der Gewöhnung an die Laborbedingungen. Nacht 11 wurde als Back-up im Falle des Verlusts wichtiger elektrophysiologischer Daten genutzt. Während der neun Beschallungsnächte 2 bis 10 wurden neun verschiedene Verkehrslärmereignisse in die zuvor akustisch eingemessenen Schlafräume über Lautsprecher dargeboten (**Tabelle**):

(1) drei Einzelexpositionen mit je 40 Flug-, Schienen- und Straßenverkehrslärmereignissen (pro Verkehrsträger jeweils acht Lärmereignisse mit einem Maximalpegel von 45, 50, 55, 60 oder 65 dBA): F, Z, S;

(2) eine Einzelexposition mit Straßenverkehrslärm mit 80 Lärmereignissen mit einem energieäquivalenten Dauerschallpegel L_{eq} wie die Einzelexposition mit Flug- und Schienenlärm: S_{Leq} ;

(3) drei Doppelexpositionen (Fluglärm und Straßenverkehrslärm, Fluglärm und Schienenverkehrslärm, Schienen- und Straßenverkehrslärm) mit jeweils 80 Lärmereignissen (40 pro Verkehrsträger): FS, FZ, ZS;

(4) eine Dreifachexposition mit allen drei Verkehrslärmarten mit insgesamt 120 Verkehrslärmereignissen (40 pro Verkehrsträger): FZS;

(5) eine lärmfreie Kontrollnacht.

Im Sinne eines vollständig balancierten Versuchsdesigns wurden alle neun Expositionsmuster jeweils einmal auf allen neun möglichen Positionen im Studienverlauf platziert.

Folgende Sekundärreaktionen wurden am Morgen nach dem Aufstehen retrospektiv erfasst:

- die Einzelbelästigung durch Flug-, Schienen- und Straßenverkehrslärm,
- subjektive Schlafstörungen in Bezug auf die Schlafmenge, Schlafqualität und Aufwachhäufigkeit.

Zur Messung der Lärmbelästigung und des Schlaferlebens wurden fünfstufige Antwortskalen mit unterschiedlicher verbaler Verankerung verwendet (siehe **Bilder 1 bis 6**). Bei der Belästigungsskalierung wurden die Empfehlungen zur Lärmbelästigungsmessung des Team 6 der International Commission on Biological Effects of Noise (ICBEN) berücksichtigt. Es wurde leider versäumt, ein Gesamtelastigungsurteil zu erfragen. Vielmehr wurde zwischen den drei Geräuscharten Straße, Schiene und Fluglärm unterschieden. Dies ist insofern problematisch, da die quellenspezifischen Einzelbelästigungsurteile nicht einer Gesamtelastigungsurteil gegenüber gestellt werden können.

Folgende Hypothesen wurden untersucht:

- Die Belästigungswirkung der Verkehrslärmereignisse unterscheidet sich signifikant. Es wird von folgenden Unterschieden ausgegangen:

- Fluglärm wirkt stärker belästigend als Straßen- und Schienenverkehrslärm. Straßenlärm ist belästigender als Schienenlärm.

- Eine quellenspezifische Einzelbelästigung kann durch das Vorhandensein einer zweiten bzw. dritten Verkehrslärmquelle abgeschwächt oder verstärkt werden. Es wird angenommen, dass eine Lärmsituation, in der mehrere Verkehrslärmquellen gegeben sind, belästigender wirkt als eine Situation mit nur einer Lärmquelle, d. h. die Belästigung ist umso höher, je mehr Lärmarten gleichzeitig einwirken.

- Das Schlaferleben wird infolge des nächtlichen Verkehrslärms signifikant beeinträchtigt. Es erfolgt eine Reduzierung der subjektiv eingeschätzten Schlafmenge und -qualität sowie ein Anstieg der subjektiven Aufwachhäufigkeit. Es werden ähnliche Rangfolgen und Wirkungsunterschiede zwischen den Expositionsmustern wie für die Belästigung angenommen (s. a. [24]).

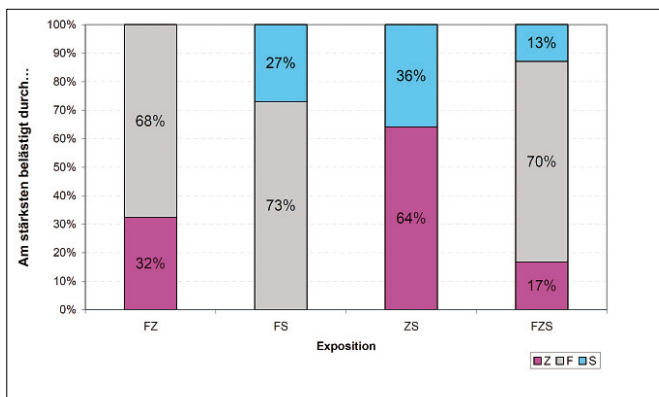


Bild 7 Prozentuale Verteilung der Einzelbelästigung durch die drei Verkehrsträger im Vergleich in Abhängigkeit von der nächtlichen Verkehrslärmexposition.

Aufgrund des nicht metrischen Skalenniveaus aller Befragungsdaten und ihrer nicht hinreichenden Normalverteilung wurden nicht parametrische Analyseverfahren für abhängige Stichproben (Friedman und Wilcoxon-Test) gewählt. Bei den Analysen wurde die zugrunde gelegte Irrtumswahrscheinlichkeit nach *Bonferroni* in Abhängigkeit von der Anzahl der durchgeführten Einzeltests auf α/n korrigiert.

Ergebnisse

Belästigung durch nächtlichen Verkehrslärm

Die Versuchspersonen wurden morgens befragt, welche Verkehrslärmarten sie in der Nacht wahrgenommen haben. War es der Lärm von zwei oder drei Verkehrsträgern, dann wurden sie gefragt, durch welche der Verkehrslärmarten sie sich stärker (zwei Verkehrslärmarten: „Durch welche Verkehrslärmart fühlten Sie sich in der vergangenen Nacht STÄRKER belästigt?“) oder am stärksten (drei Verkehrslärmarten: „Durch welche Verkehrslärmart fühlten Sie sich in der vergangenen Nacht AM STÄRKSTEN belästigt?“) belästigt fühlten (**Bild 7**). Im direkten Vergleich belästigt Fluglärm stärker als Bahnlärm (68% vs. 32%) und stärker als Straßenverkehrslärm (73% vs. 27%). Auch in Nächten, in denen alle drei Verkehrslärmarten wahrgenommen wurde, belästigte Fluglärm am stärksten (70% vs. 13% bzw. 17%). Im direkten Vergleich zwischen Bahnlärm und Straßenverkehrslärm fühlten sich mehr Probanden durch den Bahnlärm stärker belästigt (64% vs. 36%).

Friedman-Tests zeigen einen signifikanten Einfluss der nächtlichen Exposition auf die Einzelbelästigung durch Fluglärm ($\chi^2_{(3, 0,003)} = 14,057$) und durch Straßenverkehrslärm ($\chi^2_{(4, 0,003)} = 16,172$), nicht aber für den Schienenverkehrslärm ($\chi^2_{(3, 0,069)} = 7,100$).

In Untersuchungen zur Lärmbelästigung wird häufig die Gruppe der Personen, die sich nach dem sog. Schultz-Kriterium [8] auf den oberen 25 bis 30% der Antwortskala (bei einer 5-stufigen Skala die Kategorien 4 und 5) verteilen und als „ziemlich“ bzw. „stark“ belästigt („highly annoyed“) gelten, untersucht. Die untere Grenze dieses Bereichs wird international als Mindestwert für die individuelle erhebliche Belästigung verwendet [3; 7; 8]. Entsprechend diesem Kriterium wurden in den Bildern 1 und 2 die ursprünglich fünfstufigen Belästigungsurteile dichotomisiert, d. h. die Stufen 4 und 5 (hohe bis sehr hohe Lärmbelästigung: rosa) sowie die Stufen 1 bis 3 (keine bis mittlere Lärmbelästigung: grau) wurden farblich zusammengefasst. Es ist jeweils die prozentuale Verteilung der Einzelbelästigung durch Flug-, Straßen-, und Schie-

nenlärm in Abhängigkeit vom nächtlichen Expositionsmuster dargestellt.

Bild 1 ist zu entnehmen, dass die starke Belästigung durch Fluglärm nach den Bedingungen „FZ“ (46%) und „FZS“ (43%) am größten ist. Es folgen die Expositionen „FS“ und „F“ mit einem Anteil von 40 bzw. 28 % hoch Belästigter. Im Paarvergleich sind „FZ“ sowie „FZS“ signifikant von „F“ unterschiedlich. In beiden Fällen führt die Kombinationsbedingung zu einer signifikant höheren Belästigungsreaktion. Dies bedeutet für die Fluglärmbelästigung, dass Situationen, in denen neben Fluglärm zusätzlich Straßenverkehrs- und Bahnlärm gegeben sind, signifikant belästigender sind als eine reine Fluglärmsituation. Folglich ist eine Verstärkung der Fluglärmbelästigung durch das Hinzutreten einer zweiten bzw. dritten Verkehrslärmquelle anzunehmen.

In Bild 2 ist die starke Belästigung durch Straßenverkehrslärm nach den Bedingungen „S_{Leq}“ (38%), „FZS“ (28%) und „FS“ (27%) am höchsten. Es folgen die Expositionsmuster „ZS“ (24%) und „S“ (21%). Der Paarvergleich belegt signifikante Unterschiede zwischen „S“ vs. „S_{Leq}“ sowie zwischen „FS“ vs. „S_{Leq}“. In beiden Fällen führt das Muster „S_{Leq}“ (d. h. 80 Straßengeräusche mit einem L_{eq} wie „F“ und „Z“) zu einer signifikant größeren Straßenlärmbelästigung. Damit wird die Bedeutsamkeit der Anzahl an Lärmereignissen im Hinblick auf die Belästigung durch Straßenverkehrslärm gezeigt, da bei dem Expositionsmuster „S_{Leq}“ die Anzahl der Vorbeifahrten im Vergleich zu „S“ und „FS“ doppelt so hoch ist.

Für die Belästigung durch Schienenverkehrslärm liegen keine signifikanten Unterschiede zwischen den einzelnen Expositionsmustern vor (Bild 3).

Subjektive Schlafstörungen durch nächtlichen Verkehrslärm

Friedman-Tests belegen für den Verkehrslärm einen signifikanten Effekt auf die Beurteilung der Schlafmenge ($\chi^2_{(7, 0,001)} = 23,450$) und der Schlafqualität ($\chi^2_{(7, 0,000)} = 40,336$) sowie der Aufwachhäufigkeit ($\chi^2_{(7, 0,001)} = 31,995$).

Analog zur Darstellungsweise der Belastigungsurteile wurden in den Bildern 4 bis 6 die ursprünglich fünfstufigen Schlafbewertungen nach einem Mediansplitt dichotomisiert, d. h. für die subjektive Schlafmenge und Aufwachhäufigkeit (Median = 2) wurden die Stufen 3, 4 und 5 sowie die Stufen 1 bis 2 zusammengefasst. Da der Median für die Schlafqualität dem Wert 3 entspricht, wurden hier die Stufen 4 und 5 sowie die Stufen 1 bis 3 gruppiert.

Die eingestufte Schlafmenge wird signifikant weniger durch die reine Straßenlärmexposition „S“ beeinträchtigt als durch die kombinierte Flug- und Bahnlärmsituation („FZ“) bzw. durch alle drei Verkehrslärmarten („FZS“). Für die Einzelexposition mit Fluglärm („F“) und Schienenlärm („Z“) gibt es keine signifikanten Unterschiede (Bild 4).

Im Hinblick auf die Schlafqualität liegen die signifikanten Unterschiede: „F“ vs. „FZS“, „S“ vs. „S_{Leq}“ bzw. „FZ“ bzw. „ZS“ bzw. „FZS“ sowie „FS“ vs. „ZS“ bzw. „FZS“ vor (Bild 5). Dies bedeutet, dass Straßenlärm und Fluglärm einzeln und kombiniert („F“, „S“, „FS“) die Schlafqualität signifikant weniger vermindert als Doppel- oder Dreifachexpositionen mit Schienenlärm („ZS“, „FZ“, „FZS“). Für die reine Bahnlärmexposition („Z“) bestehen keine signifikanten Unterschiede.

In Bezug auf die Beurteilung der Aufwachhäufigkeit führt die Einzelbedingung „S“ zu einer signifikant geringeren Aufwachhäufigkeit als kombinierte Lärmuster mit zwei („FZ“, „ZS“) oder allen drei Quellen („FZS“) inklusive Bahnlärm (Bild 6). Für die Einzelexposition mit Schienenverkehrslärm („Z“) oder Fluglärm („F“) liegen keine signifikanten Unterschiede vor.

Diskussion

Es wurden Untersuchungen zur kumulativen Wirkung und Bewertung nächtlichen Verkehrslärms durchgeführt. Als Datenbasis dienten Befragungen zur Belästigungswirkung von Flug-, Straßenverkehrs- und Bahnlärm und zu subjektiven Schlafstörungen aus drei Schlaflaborstudien. Die Studien wurden mit 72 Probanden während elf aufeinander folgender Nächte in der Arbeitsmedizinischen Simulationsanlage (AMSAN) des DLR-Instituts für Luft- und Raumfahrtmedizin in Köln durchgeführt. Die Versuchspersonen wurden in neun Nächten mit unterschiedlichen Expositionsmustern aus Flug-, Straßen und Bahnlärm beschallt.

Die Einzelexposition mit Straßenlärm („S“) schneidet im Vergleich zu den Doppel- bzw. Dreifachexpositionen bezüglich der Beurteilung des Schlafs am günstigsten ab, ist jedoch nur für die Schlafmenge und Aufwachhäufigkeit signifikant. Mit Ausnahme der Schlafqualität finden sich für die Einzelbeschallung mit Bahnlärm oder Fluglärm keine signifikanten Unterschiede [s. a. [25]]. Die Schlafqualität wird durch Straßenverkehrs- und Fluglärm (einzeln und zusammen) signifikant weniger beeinträchtigt als durch alle kombinierten Schienenlärmsituationen (d. h. Schiene und Straße, Schiene und Flugzeug oder alle drei Verkehrsträger). Eine ansteigende Störwirkung auf den Schlaf mit der Rangfolge Schienen-, Straßen- und dann Fluglärm konnte anders als bei *Miedema* und *Vos* [24] nicht nachgewiesen werden. Da kombinierte Verkehrslärmexpositionen im Vergleich zu den Einzelbeschallungen signifikant stärkere Einbußen des Schlafenerlebens herbeiführen, ist von einem kumulativen Effekt auszugehen.

Im direkten Vergleich der Lärmwirkung der drei Verkehrsträger (Frage: „Durch welche Verkehrslärmart fühlten Sie sich in der vergangenen Nacht STÄRKER bzw. AM STÄRKSTEN belästigt?“) wird die höchste Belästigung durch Fluglärm ausgelöst, gefolgt von der Belästigung durch Schienenlärm an zweiter und Straßenlärmbelästigung an dritter Position. Dies steht nur teilweise in Einklang mit den eingangs erörterten Dosis-Wirkungs-Kurven zum Vergleich der Geräuscharten Straße, Schiene und Fluglärm, denen zufolge die Straßenlärmkurve über der Kurve für den Schienenlärm liegt. Diese Kurven gelten allerdings für den Tag bzw. einen 24-h- L_{eq} und nicht ausschließlich für die nächtliche Verkehrslärmexposition. Vergleicht man die spezifische Belästigungswirkung (kein Gesamtbelastigungsurteil) der Einzelexpositionen bei gleichem $L_{AS,eq}$ ergibt sich für „F“ ein Anteil von 27,8% hoch Belästigter, für „Z“ sind es 22,5% und für „S_{Leq}“ 38,1% hoch belästigte Personen. Dadurch wird nochmals die Relevanz der Anzahl im Hinblick auf die Belästigungswirkung des Verkehrslärms gezeigt, die bei dem Muster „S_{Leq}“ mit 80 Lärmereignissen im Vergleich zu den anderen Einzelexpositionen mit 40 Ereignissen doppelt so hoch ist. Dies wird zusätzlich dadurch belegt, dass bei der Bedingung „S“ mit ebenfalls 40 Lärmereignissen, aber anderem $L_{AS,eq}$, der Anteil der hoch Belästigten bei nur 21% liegt.

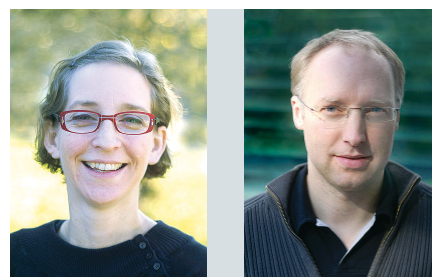
Eine mögliche Erklärung für die gefundene Rangfolge besteht in der zeitlichen Länge der verwendeten Verkehrsgeräusche. Die Einschätzung der Belästigung als Folge lärminduzierter Schlafstörungen ist nicht ganz einfach, da sich die Befragten auf einen bereits abgeschlossenen und nicht bewusst erlebten Zustand beziehen sollen. Sie ist nur indirekt auf der Basis erinnelter und bewusst erlebter Wachzeiten und Einschlafschwierigkeiten möglich [21]. Da die Dauer der Fluggeräusche im Vergleich zu den Straßenverkehrs- und Bahngeräuschen am längsten war, ist davon auszugehen, dass die Probanden in den Phasen des Wachseins und Einschlafens mehr Fluglärmereignisse bewusst erlebten, die ihren Schlaf beeinträchtigten und sie definitionsgemäß stärker belästigten.

Betrachtet man nach dem so genannten Schultz-Kriterium [8] den Anteil der durch eine Verkehrslärmquelle stark Belästigten („highly annoyed“), d. h. nur die Antworten 4 und 5 auf der ursprünglich fünfstufigen Belästigungsskala, ist die Fluglärmbelästigung nach den Bedingungen Fluglärm kombiniert mit Bahnlärm bzw. Fluglärm kombiniert mit Bahn- und Straßenverkehrslärm prozentual am größten. Die Doppelexposition aus Fluglärm und Schienenlärm bzw. die Beschallung mit allen drei Verkehrslärmarten ruft eine signifikant stärkere Belästigungsreaktion auf Fluggeräusche hervor als die reine Exposition mit Fluggeräuschen. Eine Situation, in der mehrere Verkehrslärmquellen vorliegen, wirkt also signifikant belästigender als die reine Fluglärmexposition. Die Fluglärmbelästigung wird demnach durch das zusätzliche Einwirken einer zweiten bzw. dritten Verkehrslärmquelle kumulativ verstärkt. Der aufgezeigte kumulative Effekt lässt sich mithilfe der von *Ortscheid* und *Wende* [12] diskutierten Energie- Summations- bzw. Additionsmodelle zur Gesamtelastigung durch mehrere Lärmverursacher erklären.

Die starke Belästigung durch Straßenverkehrslärm ist unter der Bedingung „ S_{Leq} “ (d. h. 80 Straßengeräusche mit einem L_{eq} wie die Einzelsexposition mit Flug- oder Bahnlärm) prozentual am höchsten. Dieses Expositionsmuster führt ein signifikant höheres Ausmaß an Belästigung herbei als die einfache Straßelärmexposition „S“ bzw. die Kombination aus Straßelärm mit Fluglärm. Damit wird die Bedeutung der Anzahl der Lärmereignisse im Hinblick auf die Belästigung durch Straßenverkehrslärm untermauert, da bei der Bedingung „ S_{Leq} “ die Anzahl an Vorbeifahrten doppelt so hoch ist. Für die Belästigung durch Schienenverkehrslärm wurden keine signifikanten Unterschiede zwischen den einzelnen Verkehrslärmern gefunden. Dies bedeutet, dass weder für die Belästigung durch Straßelärm noch für die Belästigung durch Bahnlärm kumulative Effekte nachgewiesen werden konnten.

Aus den vorliegenden Ergebnissen lässt sich schlussfolgern, dass die Fluglärmelastigung höher ausfällt, wenn zusätzlich zum Fluglärm eine zweite oder dritte Verkehrslärmquelle auf den Betroffenen einwirkt. Eine Fluglärmsituation, in der zusätzlich eine oder

zwei Quellen gegeben sind, wird negativer eingestuft als eine Bedingung, in der es „nur“ Fluggeräusche gibt. Wie bereits in anderen Untersuchungen zur Belästigungswirkung von Verkehrslärm deutlich gemacht wurde [1; 14; 15], sind bei der Beurteilung von Geräuschsituationen, in denen mehr als ein Lärmverursacher einwirkt, die einzelnen Quellen nicht einzeln und getrennt voneinander zu bewerten. Die bisherigen Studien gelten allerdings für den Tag und nicht für die nächtliche Verkehrslärmexposition. Vergleichbare Untersuchungen zur kumulativen Lärmwirkung mehrerer Verkehrsträger in der Nacht existieren momentan praktisch nicht. Da die vorliegenden Ergebnisse auf Befragungen zur Wirkung nächtlichen Verkehrslärms unter Laborbedingungen basieren, ist ihre Übertragbarkeit auf die Gegebenheiten in der realen Wohnumgebung von Flughafenwohnern (d. h. im Feld) begrenzt. Nur durch die Untersuchung im Labor war es jedoch möglich, durch die systematische Kombination der Verkehrslärmarten mögliche kumulative Effekte zu überprüfen. Um die Gültigkeit der Ergebnisse für das Feld zu verifizieren, sind weitere Studien erforderlich, anhand derer das Zusammenwirken mehrerer Verkehrslärmarten modelliert und valide Regeln zur Gesamtlärmwirkung definiert werden können.



Dr. phil. **Julia Quehl**,
Dr. med. **Mathias Basner**, DLR Institut
für Luft- und Raumfahrtmedizin, Köln.

Literatur

- [1] *Ortscheid, J.; Wende, H.*: Lärmbelästigung in Deutschland – Ergebnisse einer repräsentativen Umfrage. Z. Lärmbekämpf. 49 (2002) Nr. 2, S. 41-45.
- [2] *Ortscheid, J.; Wende, H.*: Lärm. Erfassung und Bewertung. Z. Umweltrecht, 12 (2002) Nr. 3, S. 185-189.
- [3] *Fidell, T.; Barber, D.; Schultz, T. J.*: Updating a dosage-effect relationship for the prevalence of annoyance due to general transportation noise. J. Acoust. Soc. Am. 89 (1991) Nr. 1, S. 221-233.
- [4] *Fields, J. M.; Walker, J. G.*: The response to railway noise in residential areas in Great Britain. J. Sound Vibration 85 (1982) Nr. 2, S. 177-255.
- [5] *Finke, H.-O.; Guski, R.; Rohrmann, B.*: Betroffenheit einer Stadt durch Lärm. Bericht über einer interdisziplinäre Untersuchung. Forschungsbericht des Umweltbundesamts. Berlin 1980.
- [6] *Miedema, H. M. E.; Oudshoorn, C. G. M.*: Annoyance from transportation noise. Relationships with exposure metrics DNL and DENL and their confidence intervals. Environm. Health Perspectives 109 (2001) Nr. 4, S. 409-416.
- [7] *Miedema, H. M. E.; Vos, H.*: Exposure-response relationships for transportation noise. J. Acoust. Soc. Am. 104 (1998) Nr. 6, S. 3432-3445.
- [8] *Schultz, T. J.*: Synthesis of social surveys on noise annoyance. J. Acoust. Soc. Am. 64 (1978) Nr. 2, S. 377-405.
- [9] *Guski, R.; Schick, A.*: Belästigung. In: *Guski, R.* et al (Hrsg.): Fluglärm 2004. Stellungnahme des Interdisziplinären Arbeitskreises für Lärmwirkungsfragen beim Umweltbundesamt Berlin 2004, S. 42-52.
- [10] Sechzehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verkehrslärmschutzverordnung – 16. BImSchV) vom 12. Juni 1990. BGBl. I, S. 1036, geändert durch Artikel 3 des Gesetzes vom 19. September 2006, BGBl. I, S. 2146.
- [11] *Gottlob, D.*: Belästigungsunterschiede als Entscheidungshilfe für die Festsetzung von Immissionsrichtwerten. In: Deutsche Gesellschaft für Akustik (DEGA, Hrsg.): Fortschritte der Akustik – DAGA. Oldenburg: Deutsche Gesellschaft für Akustik 1998, S. 78-79.
- [12] *Ortscheid, J.; Wende, H.*: Lärmwirkungen und Lärmsummation. Z. Lärmbekämpf. 48 (2001) Nr. 2, S. 75-76.
- [13] *Steinebach, G.; Rumberg, M.*: Raumplanerische Fragestellungen an die Gesamtgeräuschbetrachtung. Z. Lärmbekämpf. 50 (2003) Nr. 3, S. 82-87.

- [14] *Tegeder, K.*: Summation von Schallpegeln verschiedener Geräuscharten. *Z. Lärmbekämpf.* 48 (2001) Nr. 2, S. 72-74.
- [15] *Notbohm, G.*: Die Erfassung individueller Unterschiede im Erleben der akustischen Umwelt. *Lärmbekämpf.* 3 (2008) Nr. 3, S. 122-129.
- [16] *Powell, C. A.*: A summation and inhibition model of annoyance response to multiple community noise sources. NASA Technical Paper 1479, Virginia: Langley Research Center Hampton 1979.
- [17] *Öhrström, E.; Barregard, L.; Andersson, E.; Skanberg, A.; Svensson, H.; Angerheim, P.*: Annoyance due to single and combined sound exposure from railway and road traffic noise. *J. Acoust. Soc. Am.* 122 (2007) Nr. 5, S. 2642-2652.
- [18] *Guski, R.*: Personal and social variables as co-determinants of noise annoyance. *Noise and Health* 1 (1999) Nr. 3, S. 45-56.
- [19] *Miedema, H. M. E.; Vos, H.*: Demographic and attitudinal factors that modify annoyance from transportation noise. *J. Acoust. Soc. Am.* 105 (1999) Nr. 6, S. 3336-3344.
- [20] *Quehl, J.; Basner, M.*: Belästigung durch Nachtfluglärm im Schlaflabor: Dosis-Wirkungskurven. *Z. Lärmbekämpf.* 52 (2005) Nr. 2, S. 38-45.
- [21] *Quehl, J.; Basner, M.*: Annoyance from nocturnal aircraft noise exposure: Laboratory and field-specific dose-response curves. *J. Environm. Psychol.* 26 (2006) Nr. 2, S. 127-140.
- [22] *Weber, R.; Schulte-Fortkamp, B.*: Literaturstudie zur Gesamtgeräuschbewertung. Oldenburg: Carl-von-Ossietzky Universität, FB 8 Physik, AG Akustik/Psychoakustik 1996.
- [23] *Oliva, C.*: Belastungen der Bevölkerung durch Flug- und Straßenlärm: eine Lärmstudie am Beispiel der Flughäfen Genf und Zürich. Berlin: Duncker und Humblot 1998.
- [24] *Miedema, H. M. E.; Vos, H.*: Associations between self-reported sleep disturbance and environmental noise based on reanalyses of pooled data from 24 studies. *Behavioral Sleep Medicine* 5 (2007) Nr. 1, S. 1-20.
- [25] *Öhrström, E.; Ögren, M.; Jerson, T.; Gidolf-Gunnarsson, A.*: Experimental studies on sleep disturbances due to railway and road traffic noise. In: Proceedings of the 9th International Congress on Noise as a Public Health Problem. Mashantucket, Foxwoods, CT, 2008, S. 471-478.