

# Der Einsatz der Psychoakustik zur Bewertung von Umweltgeräuschen

André Fiebig<sup>1</sup>, Klaus Genuit<sup>2</sup>

<sup>1</sup> HEAD acoustics GmbH, 52134 Herzogenrath, E-Mail: Andre.Fiebig@head-acoustics.de

<sup>2</sup> HEAD acoustics GmbH, 52134 Herzogenrath, E-Mail: Klaus.Genuit@head-acoustics.de

## Einleitung

Lärm ist Schall, der für Betroffene unerwünscht oder geeignet ist, Menschen psychisch, physisch, sozial oder ökonomisch zu beeinträchtigen. Eine präzise Vorhersage der Beeinträchtigung durch Umweltgeräusche allein auf Basis eines gemittelten Schalldruckpegelmaßes ist nur bedingt möglich. Denn spezifische spektrale und zeitliche Geräuscheigenschaften beeinflussen ebenfalls die Angenehmheit von Geräuschen. Die Psychoakustik als interdisziplinärer Ansatz, in der verschiedene Disziplinen, wie Akustik, Audiologie und Psychologie, vereint sind, stellt detailliertes Wissen über die Eigenschaften von Geräuschen und dessen Wirkungen auf den Menschen bereit. Dabei beschäftigt sich die Psychoakustik mit der Beschreibung des Zusammenhanges von physikalischen Reizen und den von ihnen hervorgerufenen Hörwahrnehmungen. Auf diesem Wissen aufbauend sind entsprechende psychoakustische Parameter entwickelt worden, die charakteristische Hörempfindungen widerspiegeln. Damit lässt sich die Wirkung von Umweltgeräuschen auf Betroffene abschätzen. Beispielsweise erlaubt die Berücksichtigung der psychoakustischen Größen Lautheit nach DIN 45631/A1 [1] und Schärfe nach DIN 45692 [2] eine differenziertere Aussage über die Ausprägung eines Schallereignisses als ein einfaches Schalldruckpegelmaß. Die Wahrnehmung der Lautstärke beispielsweise lässt sich besser mit dem psychoakustischen Parameter Lautheit als mit dem A-bewerteten Schalldruckpegel bestimmen, da diese Größe alle wesentlichen Aspekte der menschlichen Wahrnehmung berücksichtigt. Aus vielen Experimenten ist bekannt, dass die Lautstärkeempfindung höher mit dem psychoakustischen Parameter Lautheit als mit dem A-bewerteten Schalldruckpegel korreliert [3]. Die Hörempfindung Schärfe beschreibt dagegen das Phänomen, dass Geräusche, die ihren energetischen Schwerpunkt im Bereich hoher Frequenzen haben, als scharf wahrgenommen werden. Dies führt in der Regel zu einer Erhöhung der Lästigkeit. Ein scharfes Geräusch ist schrill und unangenehm. Weitere psychoakustische Größen, wie Rauigkeit oder Schwankungsstärke, behandeln Empfindungen, die aufgrund spezieller zeitlicher Strukturen in Geräuschen hervorgerufen werden. Die psychoakustischen Parameter verhalten sich dabei (nahezu) orthogonal, d. h. ein psychoakustischer Parameter kann variieren obgleich ein anderer Parameter, der eine spezifische Dimension einer Hörempfindung abdeckt, konstant bleibt. Es entsteht ein Informationsgewinn gegenüber dem Schalldruckpegel und differenziertere Aussagen über Ausprägung und potentielle Reaktionen des Hörers werden ermöglicht [4]. Grundsätzlich belegen aktuelle Untersuchungsergebnisse im Bereich der Bewertung von Umweltgeräuschen auf Basis psychoakustischer Größen das Potential psychoakustischer

Parameter zur verbesserten Prognose von Lästigkeit und Lärmwirkungen.

## Bewertung von Straßenverkehrsgeräuschen an lichtzeichengeregelten Kreuzungen und Kreisverkehren

Es ist allgemein bekannt, dass nach den Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen [5] für die erhöhte Störwirkung nahe lichtzeichengeregelter Kreuzungen und Einmündungen ein Zuschlag von bis zu 3 dB(A) gewährt wird. Der Zuschlag berücksichtigt das veränderte Fahrverhalten von Fahrzeugführern in Annäherung an eine Kreuzung. Der Zuschlag zur Berücksichtigung einer erhöhten Störwirkung soll vor allem dem Bremsverhalten und dem vermehrten Anfahren an einer Kreuzung Rechnung tragen. Für nicht lichtzeichengeregelte Kreuzungen und Einmündungen sowie für Kreisverkehre waren in den Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen bislang keine Zuschläge definiert. In einer experimentellen Untersuchung wurden die akustischen und perceptiven Auswirkungen von Lichtsignalanlagen und Kreisverkehren detailliert erörtert [6]. Zur gezielten Herbeiführung repräsentativer und vergleichbarer Verkehrssituationen wurden spezifische Straßenverkehrsszenarien auf einer Teststrecke generiert (s. Abb. 1). Dadurch sind bei den verschiedenen Messungen immer der gleiche Verkehrsfluss, der gleiche LKW-Anteil, der identische Straßenbelag, konstante Bebauungsreflexionen, das gleiche Straßengefälle und die gleichen Wetterbedingungen gegeben. Ein weiterer Vorteil war, dass nicht repräsentative Störgeräusche, wie Hupen oder unnatürliches Abbremsen, vermieden wurden.

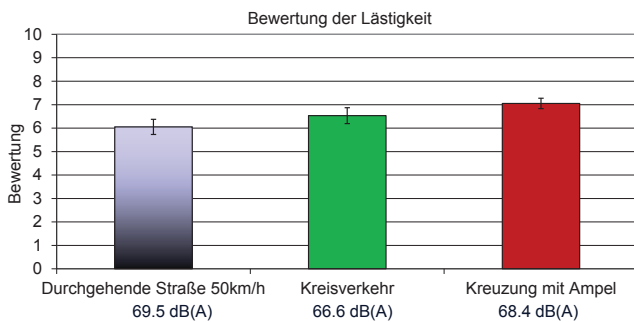


**Abbildung 1:** Messung verschiedener Verkehrssituationen unter kontrollierten Bedingungen auf einer Teststrecke

Der auf der Teststrecke gemessene Mittelungspegel ( $L_{Aeq}$ ) an einer Kreuzung mit einer Lichtsignalanlage war niedriger (68.4 dB(A)) als der Mittelungspegel an der zuführenden durchgehenden Straße mit einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h (69.5 dB(A)). Der Mittelungspegel an einem Kreisverkehr war wiederum geringer

(66.6 dB(A)) als an der Kreuzung mit Lichtzeichenanlage. Weitere Messungen an einer Landstraße bestätigten diese grundsätzlichen Beobachtungen, der an der zuführenden durchgehenden Straße gemessene Mittelungspegel ist für zulässige Geschwindigkeiten größer 30 km/h in der Regel höher als an Kreuzungen mit Lichtzeichenanlage oder an Kreisverkehren.

Die Lästigkeit der verschiedenen Straßenverkehrsgläusche wurde in verschiedenen Hörversuchssitzungen ermittelt. Für die Beurteilung eines Verkehrsszenarios wurde eine Präsentationsdauer von wenigstens einer Minute gewählt. Die Bewertung der Lästigkeit wurde in Anlehnung an die ISO 15666 [7] mittels einer 11-stufigen Kategorienskala erhoben. Der Beurteilungskontext („[...] Sie befinden sich auf einem Balkon im Erdgeschoss [...]“) versetzte den Proband in einen natürlichen und plausiblen passiven Zustand, in dem Straßenverkehr gehört wird. Es nahmen 40 bzw. 41 Testpersonen an jeweils zwei getrennten Hörversuchssitzungen zur Bewertung der verschiedenen Verkehrsgläusche teil. Abbildung 2 zeigt die Hörversuchsergebnisse für einige ausgewählte Verkehrsgläusche. Es ist festzustellen, dass die Bewertung der Lästigkeit nicht gemäß dem Mittelungspegel ausfiel. Das Verkehrsgläusch der durchgehenden Straße wurde als am wenigsten lästig beurteilt, obwohl dort der höchste  $L_{Aeq}$  gemessen wurde.



**Abbildung 2:** Durchschnittliche Bewertung der Lästigkeit von verschiedenen Straßenverkehrssituationen mit gleichem Verkehrsfluss, Verkehrsmenge und Lkw-Anteil. Es sind jeweils der arithmetische Mittelwert und das 95 % Konfidenzintervall dargestellt.

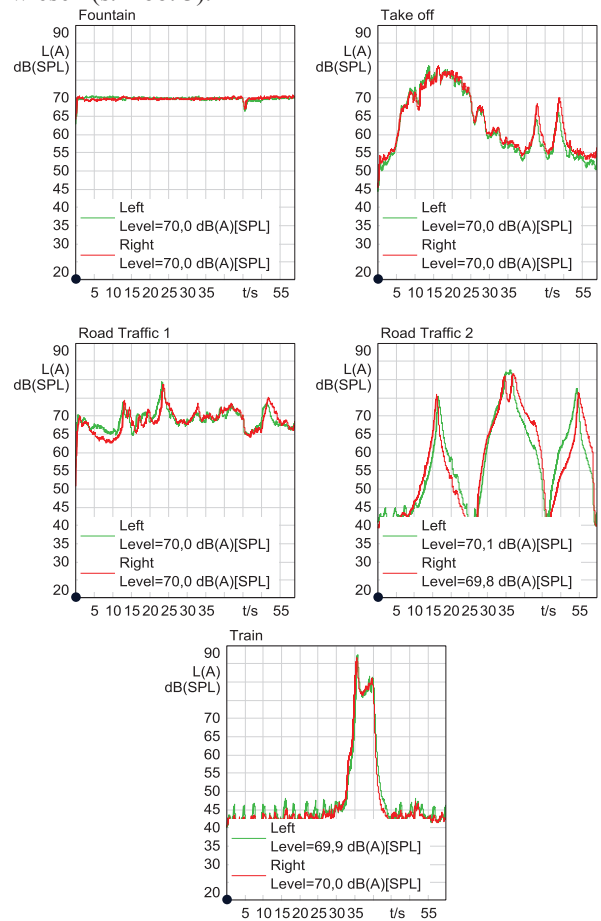
Die Berechnungen der Korrelation zwischen akustischen Größen und der Lästigkeitsurteile von insgesamt 22 Verkehrsgläuschsequenzen zeigten, dass die Korrelation zwischen dem Mittelungspegel ( $L_{Aeq}$ ) und der Lästigkeitsbewertungen nur mäßig ausfiel ( $r_{L_{Aeq}}=0.56^{**}$ ). Dagegen wies die Lautheit nach DIN 45631/A1 [1] eine signifikant höhere Korrelation mit den Bewertungen der Versuchsteilnehmer auf ( $r_{N5}=0.83^{**}$ ). Eine psychoakustisch motivierte Metrik, in der die Lautheit, Schärfe und die Ausprägung an wahrnehmbaren Mustern (Relative Approach [8]) berücksichtigt wurde, konnte die Lästigkeitsurteile mit einer Korrelation von ( $r_{PA}=0.91^{**}$ ) vorhersagen.

Die vorgestellte Untersuchung zeigte, dass Straßenverkehrsgläusche an Verkehrsknoten im Vergleich zur zuführenden durchgehenden Straße eine signifikant höhere Belästigung verursachen. Der akustische Indikator  $L_{Aeq}$  kann nur unzureichend die resultierende Störwirkung im Bereich von Kreuzungen und Kreisverkehren widerspiegeln. Mit Hilfe einer psychoakustisch motivierten Metrik ließen sich die wesentlichen Geräuschphänomene beschreiben, die das Lästigkeitsurteil beeinflussen. Die hier vorgestellten Er-

gebnisse entstanden innerhalb des durch das Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung bzw. diese vertretend durch die Bundesanstalt für Straßenwesen geförderten Forschungsprojektes „Akustische Auswirkungen von Lichtsignalanlagen und Kreisverkehren“.

### Bewertung von typischen Umweltgeräuschen

In einem Laborexperiment wurden typische Umweltgeräusche präsentiert und durch 20 Versuchsteilnehmer mit Hilfe eines semantischen Differentials bewertet. Die Probanden bewerteten u. a. Straßenverkehrsgläusche, Flugzeugstarts, Brunnengeräusche, Zugvorbeifahrten auf verschiedenen 9-stufigen bipolaren Kategorienskalen. Einige Geräuschstimuli wurden dabei derart manipuliert, dass diese identische A-bewertete Schalldruckpegel ( $L_{Aeq}=70\text{dB(A)}$ ) aufwiesen (s. Abb. 3).

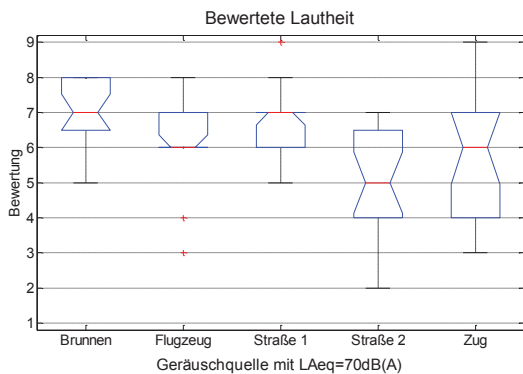


**Abbildung 3:** Schalldruckpegel (A-bewertet) über der Zeit für 5 typische Umweltgeräuschsequenzen

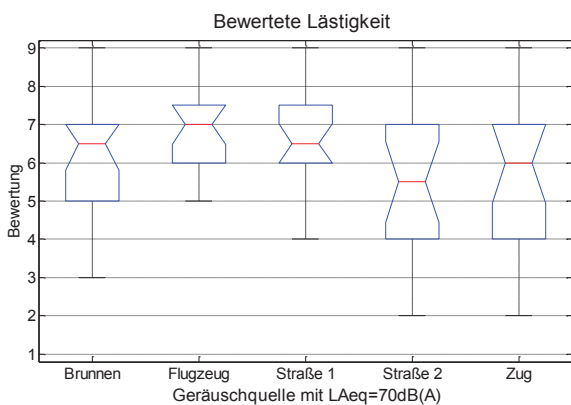
Wie in Abbildung 4 zu erkennen, wurden die mit gleichem A-bewerteten Schalldruckpegel präsentierten Geräusche bezüglich der wahrgenommenen Lautheit unterschiedlich evaluiert. Mit Hilfe einer einfaktoriellen ANOVA mit Messwiederholung konnte belegt werden, dass sich die Mittelwerte der Lautheitsbewertungen statistisch signifikant voneinander unterscheiden ( $F_{(4,76)}_{laut}=9.4, p<0.01^{**}$ ) [9]. Im Gegensatz zum Schalldruckpegel können mit Hilfe des Parameters Lautheit die Urteile gut vorhergesagt werden ( $r=0.85$ ).

Auch bei der Bewertung der Lästigkeit lassen sich signifikante Unterschiede für die betrachteten Umweltgeräuschsequenzen beobachten ( $F_{(4,76)}_{lästig}=3.4, p<0.05^*$ ). Die

Lästigkeit der Umweltgeräusche ist trotz gleichem Mittelungspegel signifikant unterschiedlich [9]. Darüber hinaus lässt sich ebenfalls statistisch belegen, dass die Lautheits- und Lästigkeitsurteile nicht deckungsgleich sind.



**Abbildung 3:** Box-plot - Bewertung der Lautheit von verschiedenen Umweltgeräuschen mit identischem A-bewerteten Schalldruckpegel ( $L_{Aeq}$ ). Die rote Linie gibt den Medianwert der Bewertungen an; der blaue Bereich markiert den Interquartilbereich, welcher durch oberes und unteres Quartil festgelegt ist. Die eingetragenen Einschnürungen im Interquartilbereich kennzeichnen die 95 % Konfidenzintervalle.



**Abbildung 4:** Box-plot - Bewertung der Lästigkeit von verschiedenen Umweltgeräuschen mit identischem A-bewerteten Schalldruckpegel ( $L_{Aeq}$ )

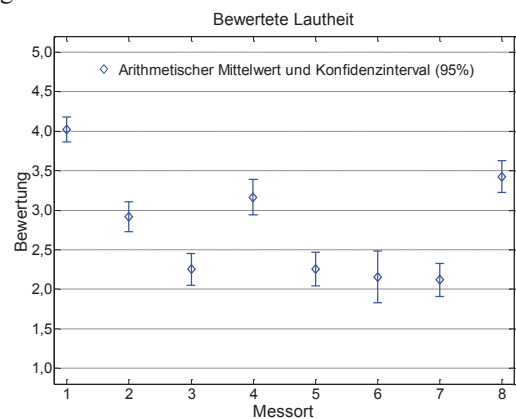
### Bewertung von Umgebungsgeräuschen im Rahmen von Soundwalks

Im Rahmen der COST Action TD0804 “*Network on Soundscape of European Cities and Landscapes*” [10] wurden in drei aufeinanderfolgenden Jahren (2010, 2011 und 2012) Soundwalks in Aachen durchgeführt. Dabei suchten die Teilnehmer des Soundwalks festgelegte Orte auf (s. Abb. 5) und nahmen in-situ Bewertungen bezüglich der vorhandenen Umgebungsgeräusche vor. Zusätzlich wurden vor Ort akustische Messungen mittels eines binauralen Headsets durchgeführt. Ziel der Soundwalks war es, die Wahrnehmung der jeweiligen Umgebungsgeräusche im originalen Kontext zu ermitteln und deren Beständigkeit über den betrachteten Untersuchungszeitraum zu untersuchen.

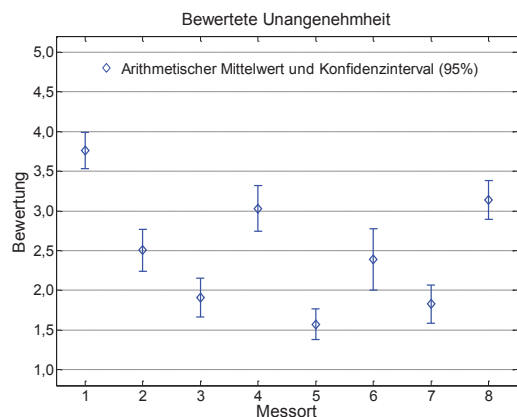


**Abbildung 5:** Betrachtete Soundwalkmessorte in Aachen

Die Messdauer an den definierten Messorten betrug jeweils 3 Minuten. Nach dieser Expositionszeit bewerteten die Versuchsteilnehmer die wahrgenommene Lautheit und die Unangenehmheit der Umgebungsgeräusche auf 5-stufigen kontinuierlichen Kategorienskalen. Insgesamt nahmen 41 Personen an den Soundwalks teil. Um den Einfluss von Reihenfolgeeffekten zu verringern, wurde die Reihenfolge der aufgesuchten Messorte variiert.



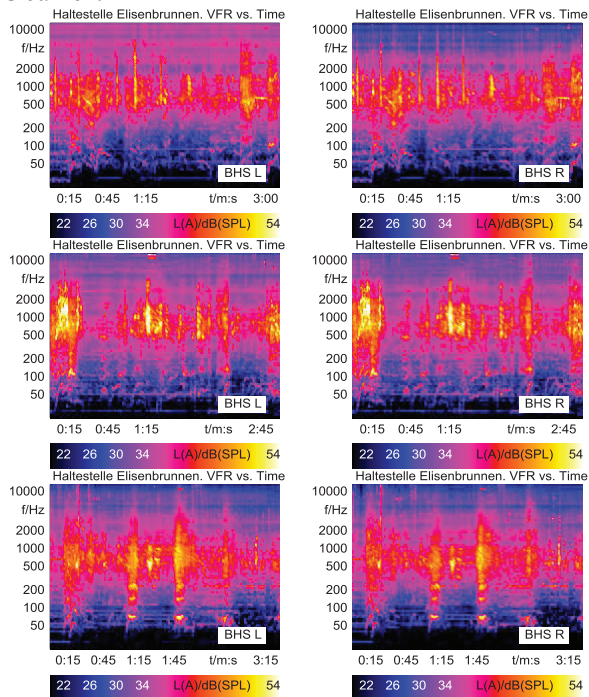
**Abbildung 6:** Bewertung der Lautheit an 8 verschiedenen Messorten in Aachen. Es sind jeweils der arithmetische Mittelwert und das 95 % Konfidenzintervall dargestellt.



**Abbildung 7:** Bewertung der Unangenehmheit an 8 verschiedenen Messorten in Aachen. Es sind jeweils der arithmetische Mittelwert und das 95 % Konfidenzintervall dargestellt.

Wie die Abbildungen 6 und 7 zeigen, bewerteten die Versuchsteilnehmer die verschiedenen Orte bezüglich Lautheit und Unangenehmheit sehr unterschiedlich. Dabei lässt sich konstatieren, dass die Bewertungen über die Jahre ähnlich sind und die Bewertungen konvergieren. Dies deutet an, dass obwohl nur dreiminütige Messintervalle betrachtet wurden, jeweils ortscharakteristische, repräsentative Merkmale in den betrachteten Messintervallen enthalten waren. Abbildung 8 verdeutlicht exemplarisch die Ähnlichkeit der

akustischen Muster für einen Messort über einen Zeitraum von 3 Jahren.



**Abbildung 8:** Spektrogramme der Messungen an einem Ort jeweils das linke und rechte Ohr für das Jahr 2010 (oben), 2011 (Mitte) und 2012 (unten).

Wie in Tabelle 1 zu erkennen, ist die Varianzaufklärung mittels akustischer Indikatoren für die bewertete Lautheit erwartungsgemäß höher als für die Unangenehmheit. Dabei weist die psychoakustische Lautheit nach DIN 45631/A1 für die Lautheitsbewertung und für die Beurteilung der Unangenehmheit eine höhere Varianzaufklärung auf als der Mittelungspegel.

**Tabelle 1:** Bestimmtheitsmaß  $R^2$  und Signifikanz

	$L_{Aeq}$	Lautheit nach DIN 45631/A1
Bewertete Lautheit	0.70**	0.75**
Bewertete Unangenehmheit	0.50**	0.58**

Insgesamt zeigen die Untersuchungen auf Basis der Soundwalkmethode, dass aussagekräftige Daten, instrumentell und perceptiv, im Feldversuch gewonnen werden können. Die psychoakustische Lautheit korrelierte dabei höher mit den Bewertungen der Lautheit und der Unangenehmheit als der Mittelungspegel  $L_{Aeq}$ . Da die Wahrnehmung der Lautheit und die Bewertung der Unangenehmheit nicht deckungsgleich sind, müssen weitere Größen, die die Geräuschausprägung weiter charakterisieren (z. B. Schärfe oder Tonalität), zur verbesserten Vorhersage der Lästigkeit von Umweltgeräuschen betrachtet werden.

### Zusammenfassung

Eine ausschließlich schalldruckpegelbezogene Bewertung von Umweltgeräuschen erscheint bezüglich einer differenzierten Vorhersage von Lästigkeit unzureichend [11]. Mit Hilfe der Psychoakustik lassen sich bestimmte Geräuscheigenschaften und die dadurch hervorgerufenen Reaktionen erfassen. Die zunehmende Standardisierung psychoakustischer Parameter bietet dabei ein hervorragendes

Fundament für einen erweiterten Einsatz der Psychoakustik im Bereich der Umweltgeräuschbewertung. In den dargestellten Untersuchungen zeigte die psychoakustische Lautheit nach DIN 45631/A1 eine bessere Vorhersage der bewerteten Lästigkeit von Umgebungsgeräuschen als der A-bewertete Schalldruckpegel  $L_{Aeq}$ . Da jedoch die Lästigkeit eines Schallereignisses nicht ausschließlich von dessen Lautheit abhängt, müssen weitere psychoakustische Größen, die andere Empfindungsdimensionen abdecken, betrachtet werden, um Lärmelastigkeit zuverlässig vorhersagen zu können. Neben den psychoakustischen Eigenschaften eines Hörereignisses fließen aber noch weitere Aspekte in die Beurteilung von Geräuschen ein. Diese bedürfen ebenfalls der Analyse und können mittels Befragungen eruiert werden.

### Literatur

- [1] DIN 45631/A1: 2010. Berechnung des Lautstärkepegels und der Lautheit aus dem Geräuschspektrum - Verfahren nach E. Zwicker - Änderung 1: Berechnung der Lautheit zeitvarianter Geräusche, Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin
- [2] DIN 45692:2009-08. Messtechnische Simulation der Hörempfindung Schärfe, Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin
- [3] Hellman, R. P., Zwicker, E. (1987). Why can a decrease in dB(A) produce an increase in loudness?, J. Acoust. Soc. Am., 82 (5)
- [4] Genuit, K. Erweiterung von Lärmprognosen durch die Psychoakustik, DAGA 2014, Tagungsband, Oldenburg
- [5] Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen, RLS -90, 8/1990, 1990
- [6] Fiebig, A., Papenfus, T. Untersuchungen zur akustischen Störwirkung von Kreuzungspunkten im Rahmen der Überarbeitung der RLS-90, DAGA 2010, Tagungsband, Berlin
- [7] ISO/TS 15666: 2003. Acoustics. Assessment of noise annoyance by means of social and socio-acoustic surveys, International Standardization Organization, Genf, Schweiz
- [8] Genuit, K. Objective evaluation of acoustic quality based on a relative approach, Internoise 1996, Proceedings, Liverpool, Großbritannien
- [9] Fiebig, A. Cognitive stimulus integration in the context of auditory sensations and sound perceptions, Dissertation (I.E.), Technische Universität Berlin, Berlin, 2015
- [10] COST Action TD 0804 (2010-2012). Soundscape of European Cities and Landscapes COST Action, <http://soundscape-cost.org>
- [11] Genuit, K. The need for transdisciplinary actions - psychoacoustics, sound quality, soundscape and environmental noise, Internoise 2013, Tagungsband, Innsbruck, Österreich