

Lautheitswahrnehmung und –modellierung von zeitvarianten Geräuschen

Roland Sottek¹, Tobias Moll²

¹ HEAD acoustics GmbH, 52134 Herzogenrath, E-Mail: roland.sottek@head-acoustics.de

² HEAD acoustics GmbH, 52134 Herzogenrath, E-Mail: tobias.moll@head-acoustics.de

Einleitung

Die Lautheit ist eine der wichtigsten psychoakustischen Größen. Viele weitere Parameter, wie die Schärfe, die Tonalität und die Impulshaltigkeit hängen von der Lautheit ab. Es existieren verschiedene Lautheitsmodelle, die eine Vorhersage der empfundenen Lautheit ermöglichen. Mit ihrer Hilfe ist es bereits sehr gut möglich, die Lautheit stationärer Geräusche vorherzusagen. Im Gegensatz dazu ist eine zuverlässige Vorhersage der Lautheit für Geräusche mit instationärer Zeitstruktur nur teilweise möglich. Wächtler [1] und Rennie et al. [2] zeigten, dass die Vorhersagen vor allem für tonale und impulshaltige Geräusche nicht den Bewertungen normalhörender Probanden entsprechen. Die Herausforderungen der Lautheitsvorhersage tonaler Geräusche wurde bereits von Sottek [3] oder Hots et al. [4], [5] untersucht. Dieser Beitrag betrachtet daher die Vorhersage der Lautheit für impulshaltige Geräusche.

In Abbildung 1 sind einige Ergebnisse der Experimente von Rennie et al. [2] im Vergleich zur Lautheitsvorhersage verschiedener Modelle für zeitvariante Lautheit aufgetragen: das Dynamic Loudness Modell (DLM) von Chalupper und Fastl [6], eine Erweiterung durch Rennie et al. (extDLM) [7] und das von Glasberg und Moore entwickelte Time Varying Loudness (TVL) Modell mit unterschiedlichen Zeitkonstanten [8].

Darüber hinaus existieren Standards zur Berechnung zeitvarianter Lautheit: die DIN 45631/A1 [9] und die darauf basierende und zur internationalen Standardisierung vorgeschlagene ISO 532-1 [10] als Nachfolger der ISO 532:1975 Abschnitt 2 (Methode B) [11]. Auch wenn die Vorhersagen beider Modelle relativ ähnlich sein sollten, so ist die Berechnungsvorschrift der ISO 532-1 im Vergleich zur DIN 45631/A1 wesentlich genauer definiert und enthält eine Referenzimplementierung. Die Ergebnisse der neuen Standards werden im nächsten Abschnitt betrachtet.

Wie Abbildung 1 zeigt, kann keines der Modelle alle Pegeldifferenzen bei gleicher Lautheit hinreichend genau vorherzusagen. Besonders für das impulshaltige Geräusch „Ratsche“ ergibt sich eine Abweichung von ca. 12 dB. Dies motivierte zu weiteren Untersuchungen, den Einfluss spezifischer Signalparameter impulshaltiger Geräusche auf die Lautheitsempfindung zu erforschen. Die Versuche von Wächtler und Rennie wurden in einem ersten Schritt von Parvizian [12] wiederholt, um deren Ergebnisse zu verifizieren. Anschließend wurden verschiedene Signalparameter des Geräusches „Ratsche“ systematisch verändert, um eine Ursache für die Unterschätzung der Lautheit dieses Geräusches durch die Lautheitsmodelle zu finden.

Im Anschluss daran wurde das Gehörmodell nach Sottek für weitere Untersuchungen herangezogen und überprüft, in wie weit dieses angepasst werden kann, um den speziellen Eigenschaften impulshaltiger Geräusche Rechnung zu tragen.

Abschließend wurden die Ergebnisse durch Experimente mit weiteren Geräuschen verifiziert.

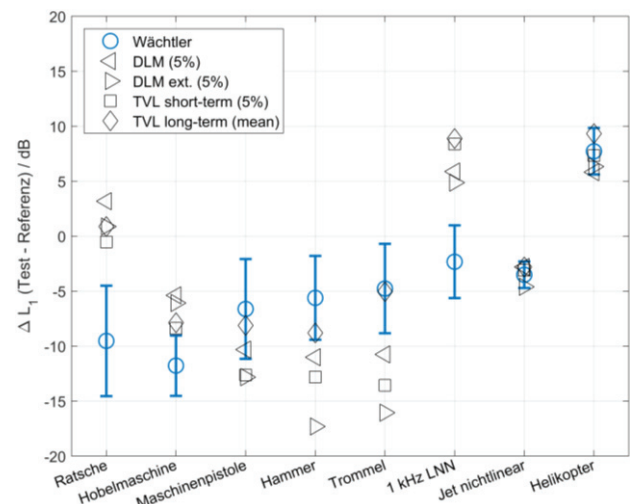


Abbildung 1: Ergebnisse der Experimente zur Lautheitsanpassung von Wächtler [1] und Rennie et al. [2]. Verglichen wurden die angegebenen Geräusche mit einem stationären Referenzgeräusch. Gezeigt sind die Pegeldifferenzen der L_1 -Pegel¹ bei gleicher subjektiv wahrgenommener Lautheit. Die blauen Symbole geben dabei den Mittelwert und das Konfidenzintervall (95 %) an. Zusätzlich sind die Vorhersagen verschiedener Lautheitsmodelle basierend auf den N_5 -Werten² angegeben.

Verifikation vorheriger Ergebnisse der Lautheitsanpassung

Für die Lautheitsanpassung wurde ein adaptives 2-AFC-Verfahren („two-alternative forced-choice“) verwendet (AFC-Toolbox von Ewert [13]). An dem Versuch nahmen 15 Probanden teil, denen jeweils ein Referenzgeräusch und ein Testgeräusch mit einem Abstand von 500 ms über einen Equalizer und Sennheiser HD 650 Kopfhörer präsentiert wurde. Als Referenzgeräusch diente das stationäre Geräusch „Jet linear“ mit einem Pegel von 61 dB ($L_1 = 69$ dB). Die 8 Testgeräusche hatten eine Dauer zwischen 1,6 s und 2,6 s. Die Probanden sollten nach der Darbietung der Geräusche jeweils angeben, welches sie als lauter empfunden haben. Anschließend wurde der Pegel des Testgeräusches auf Basis dieser Antwort angepasst. Die Anpassung wurde beendet,

¹ L_1 -Pegel: Pegel, welcher in 1 % der Zeit überschritten wird, Berechnung anhand der Amplitude des Zeitsignals, ohne Glättung

² N_5 : Lautheit, welche in 5 % der Zeit überschritten wird.

wenn beide Geräusche zur nahezu gleichen wahrgenommenen Lautheit konvergierten. Die Versuche wurden mit drei unterschiedlichen Startpegeln von -10, 0 und +10 dB im Vergleich zu den Startwerten von Wächtler [1] durchgeführt. Außerdem wurden die 24 Geräuschpaare in 4 Blöcken zu je 6 Vergleichen verschachtelt („interleaved“) dargeboten, um eine Verzerrung der Ergebnisse zu minimieren [14].

Die Ergebnisse des Versuchs zeigen, dass die unterschiedlichen Startpegel der Geräusche insgesamt zu nahezu denselben Ergebnispegeln führen. Außerdem liefert der Versuch unter Betrachtung der Mittelwerte und Konfidenzintervalle (95 %) weitgehend ähnliche Ergebnisse zum Versuch von Wächtler, wie in Abbildung 2 zu sehen ist.

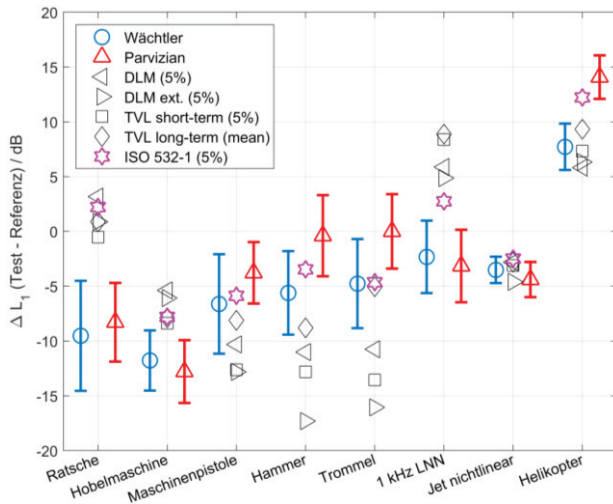


Abbildung 2: Ergebnisse des Versuchs zur Lautheitsanpassung. Gezeigt sind die Pegeldifferenzen der L_1 -Pegel bei gleicher subjektiv wahrgenommener Lautheit. Die blauen und roten Symbole geben dabei den Mittelwert und das Konfidenzintervall (95 %) an. Zusätzlich sind die Vorhersagen der ISO 532-1 basierend auf den N_5 -Werten angegeben.

Die Vorhersagen der ISO 532-1, welche in Abbildung 2 zusätzlich dargestellt sind, liegen insgesamt näher an den Ergebnissen der Experimente als die Vorhersagen der übrigen Lautheitsmodelle. Die große Abweichung von etwa 12 dB für das Geräusch „Ratsche“ ergibt sich jedoch bei allen Modellen. Ebenso unterschätzen alle Lautheitsmodelle die Lautheit der Geräusche „Hobelmaschine“ und „1 kHz LNN“; die Pegeldifferenz bei gleicher Lautheit weicht um etwa 4-5 dB ab (ISO 532-1).

Modifikation der Geräuschparameter

In einem weiteren Schritt sollte nun für das impulshaltige Geräusch „Ratsche“ der Einfluss von Signaleigenschaften auf die Lautheitsempfindung untersucht werden, da für dieses Signal eine besonders hohe Abweichung zwischen Vorhersage und Hörversuchsergebnis festgestellt wurde. Dazu wurde zuerst die Zeitstruktur des Geräusches verändert, indem sowohl das gesamte Geräusche als auch einzelne Impulse zeitlich umgekehrt und randomisiert dargeboten wurden. Hierbei konnte kein signifikanter Einfluss auf die subjektiv wahrgenommene Lautheit erkannt werden. Sodann wurde das Geräusch in Blöcke mit einer

Länge von 500, 250, 100, 50, 25 und 1 Abtastwert(en) aufgeteilt und diese Blöcke randomisiert zu neuen Geräuschen zusammengefügt. In einem vollständigen Paarvergleich, an welchem 17 Probanden teilnahmen, sollte das jeweils lautere Geräusch selektiert werden. Auch hier konnten nur geringe Einflüsse der verschiedenen Blocklängen auf die Lautheit festgestellt werden. Insgesamt wurde jedoch das vollständig randomisierte Geräusch (Blocklänge: 1 Abtastwert) immer als leiser empfunden, während das Originalgeräusch stets als lauter angesehen wurde. Im direkten Vergleich dieser beiden Geräusche wurde das Originalgeräusch in 73,5 % der Bewertungen als lauter empfunden. Wie in Abbildung 3 zu sehen ist, steht dies im Konflikt mit den Lautheitsvorhersagen nach ISO 532-1, bei welchen das vollständig randomisierte Geräusch stets einen höheren Lautheitsverlauf zeigt.

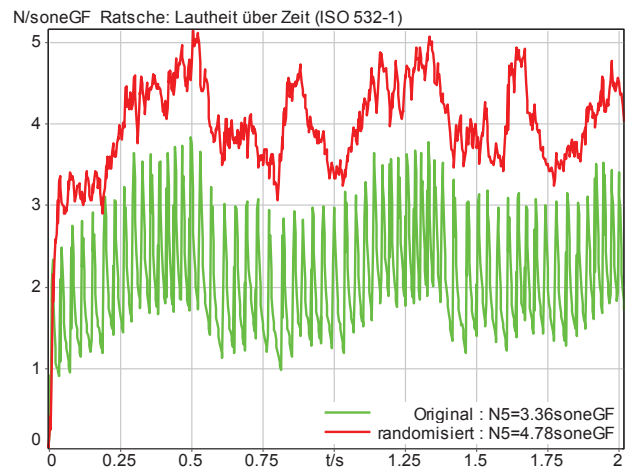


Abbildung 3: Lautheitsverlauf der Vorhersage nach ISO 532-1 für das Originalgeräusch Ratsche und das vollständig randomisierte Geräusch. Die Pegel der beiden Geräusche betragen $L = 47,69$ dB, und auch die A-gewichteten Pegel unterscheiden sich lediglich um 0,14 dB.

In einem weiteren Experiment wurden die Einflüsse der Frequenzstruktur auf die Lautheitsbewertung untersucht. Dazu wurden die Terzspektren L_T der Geräusche „Ratsche“, „Hammer“ und eines Weißen Rauschens (WR, alle 47,7 dB) durch Filterung an die Terzspektren der jeweils anderen Geräusche angepasst. Dadurch entstanden 3 Geräuschgruppen, z. B. „Ratsche“ (Original), „Hammer“ (gefiltert, Terzspektrum „Ratsche“), „Weißes Rauschen“ (gefiltert, Terzspektrum „Ratsche“). Diese 9 Geräusche wurden für einen Versuch zur Lautheitsanpassung verwendet, der wiederum mithilfe einer 2-AFC-Methode durchgeführt wurde. An diesem Versuch nahmen 15 Probanden teil.

Die Ergebnisse, welche in Abbildung 4 dargestellt sind, zeigen, dass die Lautheitsvorhersage nach ISO 532-1 die Lautheit der beiden modifizierten Ratschengeräusche unterschätzt; die Pegeldifferenz bei gleicher Lautheit weicht um etwa 3-4 dB ab. Beim Vergleich des Originalgeräusches „Ratsche“ mit den angepassten Geräuschen „Hammer“ und „Weißes Rauschen“ (jeweils mit dem Terzspektrum der Ratsche) weichen die Pegeldifferenzen bei gleicher Lautheit sogar um 4-8 dB ab. Auffällig ist darüber hinaus, dass die N_5 -Werte basierend auf der ISO 532-1 für alle Geräusche

mit gleichem Terzspektrum unabhängig von der Zeitstruktur der Geräusche nahezu identisch sind (siehe Tabelle 1). Bei der Berechnung nach ISO 532-1 besitzt die Zeitstruktur demnach nur einen sehr geringen Einfluss, was in Widerspruch zu den experimentellen Ergebnissen steht.

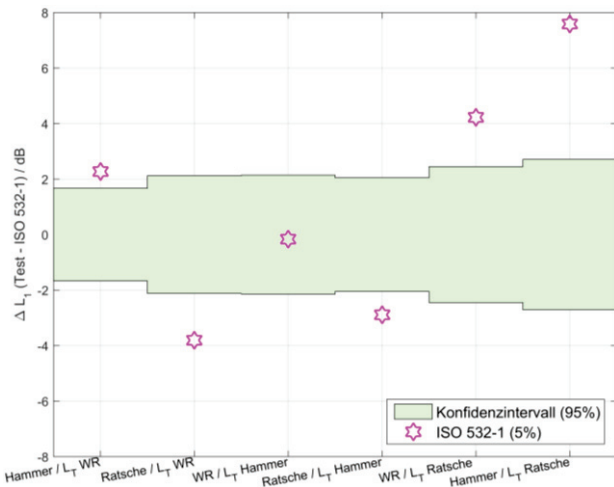


Abbildung 4: Abweichungen der Ergebnisse des Versuchs zur Lautheitsanpassung und der nach ISO 532-1 berechneten Werte für gefilterte Geräusche (angepasste Terzspektren). Der erste Name gibt das Originalgeräusch an, der zweite das angepasste Terzspektrum. Zusätzlich ist das Konfidenzintervall (95 %) der Versuchsergebnisse angegeben.

Tabelle 1: Nach ISO 532-1 berechnete N_5 -Werte der neun Testgeräusche. Die Werte der Referenzgeräusche sind fett gedruckt.

Name	L_T Ratsche N_5 / soneGF	L_T Hammer N_5 / soneGF	L_T WR N_5 / soneGF
Ratsche	3,44	5,00	4,36
Hammer	3,56	4,96	4,53
WR	3,53	5,02	4,42

Gehörmodell nach Sottek

Das Gehörmodell nach Sottek verwendet eine Autokorrelationsfunktion (AKF) (siehe auch Licklider [15]), zur Berechnung der Rauigkeit und Fluktuationsstärke [16] sowie der Tonalität [17].

Die existierenden Gehörmodelle unterscheiden sich vor allem durch die verwendete Frequenzgewichtung, die Frequenzskala (Bark oder ERB), und damit die Implementierung der n-Kanal Filterbank, und den nichtlinearen Zusammenhang zwischen Schalldruck und spezifischer Lautheit. Das Gehörmodell nach Sottek verwendet für die Nichtlinearität Potenzfunktionen mit unterschiedlichen Exponenten für verschiedene Pegelbereiche [16], [18]. Diese Nichtlinearität hat in der Anwendung bewiesen, verschiedene Phänomene wie gerade wahrnehmbare Amplitudenunterschiede oder die Pegelabhängigkeit der Rauigkeit gut vorhersagen zu können.

Nachdem die Lautheitsberechnung im Gehörmodell zu Beginn nur auf der Summation einzelner Bandpasssignale basierte [16], wird in einem neuen Ansatz die AKF verwendet, um tonale Komponenten zu separieren und deren Lautheit separat zu gewichten [19]. Im Folgenden wird die AKF ver-

wendet, um spezifische Eigenschaften impulshaltiger Geräusche zu finden, und dadurch eine bessere Lautheitsvorhersage zu ermöglichen.

Ein möglicher Ansatz ist dabei, die dreidimensionale AKF über eine gewisse Anzahl kritischer Bänder zu summieren. In Abbildung 5 ist zu erkennen, dass der Abfall der Amplitude der AKF für das Geräusch „Ratsche“ wesentlich steiler verläuft als für das Geräusch „Hammer“. Frequenzabhängige Auswertungen könnten also zur Verbesserung der Lautheitsberechnung solcher „kritischen“ impulshaltigen Geräusche beitragen.

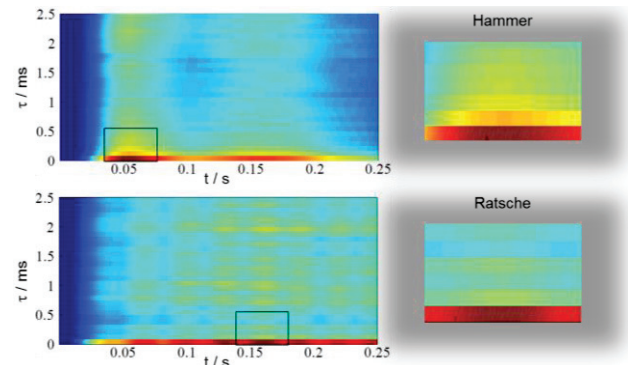


Abbildung 5: Summierte Autokorrelationsfunktion aller kritischen Bänder als Funktion der Zeit t und Verschiebungszeit τ für die Geräusche Hammer (oben) und Ratsche (unten). Die vergrößerten Bereiche verdeutlichen den stärkeren Abfall der AKF über τ für das Geräusch Ratsche.

Versuche mit neuen Testgeräuschen

Nachdem dieser Unterschied im Abfall der AKF über der Verschiebungszeit festgestellt wurde, wurden neue Testgeräusche mit ähnlichen Eigenschaften gesucht. Beispielhaft wurden die Geräusche „Ratsche 2“, „Sprühdose“ und „Türknaarren“ analysiert.

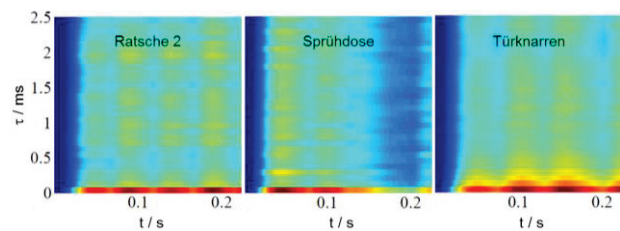


Abbildung 6: Summierte Autokorrelationsfunktion aller kritischen Bänder als Funktion der Zeit t und Verschiebungszeit τ für die Geräusche „Ratsche 2“, „Sprühdose“ und „Türknaarren“.

Es zeigt sich in Abbildung 6 für die beiden Geräusche „Ratsche 2“ und „Sprühdose“ ein ähnlich abrupten Abfall der AKF wie für das Geräusch „Ratsche“. Diese beiden Geräusche sind ebenfalls sehr impulshaltig und besitzen vor allem hochfrequente Anteile. Der Abfall der AKF für das Geräusch „Türknaarren“ ähnelt dem des Geräusches „Hammer“, und das Geräusch ist ebenso weniger impulshaltig und besitzt vorwiegend tieffrequente Komponenten.

Alle 5 Geräusche wurden in einem weiteren 2-AFC-Versuch mit dem Referenzgeräusch „Jet linear“ von 20 Probanden bewertet. Die Hypothese, dass die impulshaltigen Geräusche ähnlich von den Lautheitsmodellen unterschätzt werden,

während das Geräusch „Türknen“ ähnlich dem Geräusch „Hammer“ bewertet wird, konnte dabei bestätigt werden. Abbildung 7 zeigt die Hörversuchsergebnisse und zusätzlich auch die berechneten Werte nach dem Gehörmodell (ohne Berücksichtigung der AKF!), welche ähnliche Ergebnisse zur ISO 532-1 liefern.

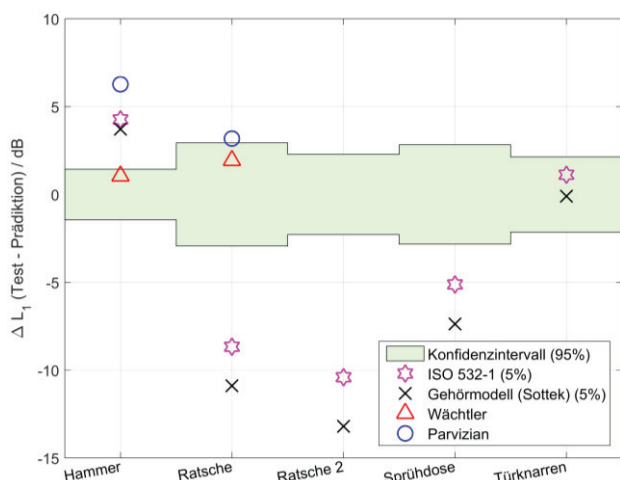


Abbildung 7: Abweichungen der Ergebnisse des Versuchs zur Lautheitsanpassung und der nach ISO 532-1 und dem Gehörmodell berechneten Werte (ohne Berücksichtigung der AKF!). Zusätzlich ist das Konfidenzintervall (95 %) der Ergebnisse des Versuchs angegeben.

Fazit und Ausblick

Die vorhandenen Lautheitsmodelle können die Lautheit impulshaltiger Geräusche nicht zuverlässig vorhersagen. Für einige Geräusche wird die Lautheit stark unterschätzt („Ratsche“), während sie für andere Geräusche überschätzt wird („Hammer“). Der vorgeschlagene neue Standard ISO 532-1 liefert bessere Ergebnisse als existierende Lautheitsmodelle.

Es konnte gezeigt werden, dass eine Änderung an der Zeitstruktur der Geräusche (zeitliche Umkehr, Randomisierung der Impulse) keinen wesentlichen Einfluss auf die wahrgenommene Lautheit hat. Ebenso können unterschiedliche Geräusche mit angepassten Terzspektren deutliche Unterschiede in der wahrgenommenen Lautheit besitzen, welche durch die ISO 532-1 jedoch nicht vorhergesagt werden.

Die Auswertung der dreidimensionalen AKF in der Gehörmodellanalyse der impulshaltigen Geräusche zeigt Möglichkeiten, Parameter zur besseren Vorhersage der Lautheit dieser Geräusche abzuleiten. Weitere Untersuchungen zur Optimierung dieses Modells mit bisher vielversprechenden Ergebnissen dauern an (mittlere Abweichung zu den Ergebnissen der Lautheitsanpassung in Abbildung 7 sinkt auf etwa 3 dB).

Literatur

- [1] M. Wächtler: Wahrnehmung und Modellierung von Lautheit instationärer, technischer Signale, bachelor thesis, Jade Hochschule, Oldenburg, 2012.
- [2] J. Rannies, J.L. Verhey, J.E. Appell, B. Kollmeier: Loudness of complex time-varying sounds? A challenge for current loudness models. Proceedings of Meetings on Acoustics, Vol. 19, 050189, 2013.
- [3] R. Sottek: Loudness models applied to technical sounds, Noise-Con 2010, Baltimore, 2010.
- [4] J. Hots, J. Rannies, J.L. Verhey: Loudness of sounds with a subcritical bandwidth: A challenge to current loudness models? J. Acoust. Soc. Am. 134, EL334–EL339, 2013.
- [5] J. Hots, J. Rannies, J.L. Verhey: Loudness of subcritical sounds as a function of bandwidth, center frequency, and level, J. Acoust. Soc. Am. 135 (3), pp. 1313-1320, 2014.
- [6] J. Chalupper, H. Fastl: Dynamic loudness model (DLM) for normal and hearing-impaired listeners, Acta Acustica united with Acustica 88, 378-386, 2002.
- [7] J. Rannies, J.L. Verhey, J.L. Chalupper, H. Fastl: Modeling Temporal Effects of Spectral Loudness Summation, Acta Acustica united with Acustica 95, 1112-1122, 2009.
- [8] B.R. Glasberg, B.C.J. Moore: A model of loudness applicable to time-varying sounds, Journal of the Audio Engineering Society 50, 331-341, 2002.
- [9] DIN 45631/A1:2010. Calculation of loudness level and loudness from the sound spectrum - Zwicker method - Amendment 1: Calculation of the loudness of time-variant sound, Beuth Verlag, 2010.
- [10] ISO 532-1. Methods for calculating loudness, Part 1: Zwicker method, in preparation.
- [11] ISO 532: 1975. Acoustics – Methods for calculating loudness level, 1975.
- [12] F. Parvizian: Internship report, HEAD acoustics GmbH, 2013.
- [13] S.D. Ewert: AFC - a modular framework for running psychoacoustic experiments and computational perception models, in Proceedings of the International Conference on Acoustics AIA-DAGA 2013, pp. 1326-1329, Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V., Berlin, 2013.
- [14] J.L. Verhey: Psychoacoustics of spectro-temporal effects in masking and loudness perception, Phd thesis, University of Oldenburg, Germany, 1999.
- [15] J.C.R. Licklider: A Duplex Theory of Pitch Perception, Cellular and Molecular Life Sciences, Vol. 7 (4), pp. 128-134, 1951.
- [16] R. Sottek: Modelle zur Signalverarbeitung im menschlichen Gehör. Doctoral Thesis, RWTH Aachen University, 1993.
- [17] R. Sottek, F. Kamp, A. Fiebig: A new hearing model approach to tonality, Proc. Internoise, Innsbruck, 2013.
- [18] T. Bierbaums, R. Sottek: Modellierung der zeitvarianten Lautheit mit einem Gehörmodell. Deutsche Jahrestagung für Akustik, DAGA 2012, Darmstadt, 2012.
- [19] R. Sottek: Progress in calculating tonality of technical sounds, Proc. Internoise, Melbourne, 2014.