

Wahrnehmung der Schärfe von instationären technischen Schallen

André Fiebig¹, Valeriya Tarasova², Roland Sottek¹

¹ HEAD acoustics GmbH, Ebertstr.30a, 52134 Herzogenrath, E-Mail: Andre.Fiebig@head-acoustics.de

² RWTH Aachen University, ITA, Kopernikusstraße 5, 52074 Aachen, E-Mail: Valeriya.Tarasova@rwth-aachen.de

Einleitung

Der psychoakustische Parameter Schärfe ist für die Bewertung von stationären als auch zeitvarianten Schallen oft von besonderer Bedeutung. Gemäß der DIN 45692 beschreibt die Hörempfindung Schärfe denjenigen Aspekt der Klangfarbenwahrnehmung, der mit der spektralen Hüllkurve von Schallen korreliert ist [1]. Die spektrale Feinstruktur eines Signals spielt dagegen bei der Schärfe-wahrnehmung gemäß Fastl und Zwicker keine Rolle [2]. Geräusche mit einer ausgeprägten Schärfe werden oft als *scharf*, *hell*, *schrill*, *hart* oder *zischend* beschrieben. Häufig wird beobachtet, dass ein Zusammenhang zwischen der Ausprägung der Schärfe und der Bewertung der Lästigkeit oder Angenehmheit von Geräuschen besteht.

In Untersuchungen zur Bestimmung der Signaleigenschaften, die die Wahrnehmung Schärfe provozieren, und zur Herleitung einer Berechnungsvorschrift wurden bislang vornehmlich synthetische stationäre Schalle, beispielsweise gefilterte Rauschsignale und Sinustöne, betrachtet. Zeitvariante technische Schalle und deren Bewertungen wurden dagegen in den verschiedenen Ansätzen zur Modellierung der Hörwahrnehmung Schärfe bislang kaum berücksichtigt.

Aktuell werden drei verschiedene Verfahren zur instrumentellen Berechnung der Schärfe eingesetzt: von Bismarck [3,4], Aures [5] und DIN 45692 [1]. Diese Verfahren basieren auf der Analyse der spezifischen Lautheiten des jeweiligen Signals. Die genannten Berechnungsverfahren unterscheiden sich im Wesentlichen in der Gewichtung der spezifischen Lautheitsanteile zur Berechnung der Schärfe und ob die Gesamtlautheit eines Signals bei der Schärferechnung berücksichtigt wird. Da Geräusche als besonders scharf empfunden werden, wenn Spektralanteile bei sehr hohen Frequenzen enthalten sind, werden die spezifischen Lautheiten bei hohen Tonheiten durch die Gewichtungsfunktion $g(z)$ zusätzlich gewichtet. In einem zweiten Schritt wird zur Schärferechnung das mit $g(z)$ gewichtete erste Moment der spezifischen Lautheitsverteilung $N'(z)$ über die Tonheit z ermittelt [1]. Gleichung 1 zeigt die Berechnung der Schärfe gemäß DIN 45692:

$$S = k \frac{\int_{z=0}^{24\text{Bark}} N'(z) \cdot g(z) \cdot \frac{z}{\text{Bark}} \cdot dz}{\int_0^{24\text{Bark}} N'(z) \cdot dz} \quad [\text{acum}] \quad (1)$$

mit

$$g(z) = \begin{cases} 1, & \text{für } z \leq 15,8 \text{ Bark} \\ 0,15 \cdot e^{0,42 \cdot (z/\text{Bark} - 15,8)} + 0,85, & \text{für } z > 15,8 \text{ Bark} \end{cases}$$

Im Rahmen verschiedener Experimente wurden die Anwendbarkeit und die Reichweite verschiedener Verfahren bezüglich der Vorhersage der Wahrnehmung der Schärfe von instationären technischen Schallen untersucht.

Die Bedeutung der Lautheit und der Zeitstruktur für die Wahrnehmung der Schärfe

Zur Untersuchung des Einflusses von Lautheit und Zeitstruktur auf die Wahrnehmung der Schärfe wurden verschiedene technische Geräusche ausgewählt (z. B. Dampflok, Kaffeemaschine, Plätschern eines Bachs, Vogelgezwitzcher, Wasserfontäne). Die Schalldruckpegel der technischen Geräusche wurden einheitlich auf 65 dB SPL angepasst. Neben den originalen technischen Geräuschen wurden weitere Versuchsstimuli durch zusätzliche Manipulationen erzeugt. Ausgewählte Signale wurden im Schalldruckpegel variiert und auf 55 dB SPL sowie 75 dB SPL eingestellt. Darüber hinaus wurde die temporale Struktur bei ausgewählten Signalen verändert. Hierfür wurde in einem ersten Schritt eine Fourier-Transformation über die komplette Signaldauer durchgeführt. Aus dem komplexen Spektrum wurde Betrag und Phase extrahiert und die berechnete Phase durch eine zufällige Zahlenfolge ersetzt. Anschließend wurde die Rücktransformation in den Zeitbereich vorgenommen. Auf diese Art entsteht ein Signal mit gleichen spektralen Eigenschaften (bzgl. des Langzeitspektrums), jedoch ohne ausgeprägte Zeitstruktur (siehe beispielhaft Abb. 1).

Alle Stimuli wiesen eine Dauer von 3 bis 4 s auf. Die Abtastrate aller Stimuli wurde auf 44,1 kHz angeglichen. Die Stimuli wurden mit einer \cos^2 -Rampe (Rampendauer 13,3 ms) jeweils ein- und ausgeblendet.

Insgesamt wurden 39 technische Geräusche durch Probanden mittels multipler Kategorienskalen bewertet. Vor dem Hörversuch konnten sich die Versuchsteilnehmer mit dem Versuchsablauf vertraut machen und exemplarisch einige Bewertungen vornehmen.

Im eigentlichen Versuch wurden die Stimuli hinsichtlich der Attribute *laut*, *scharf*, *rau*, *tonhaltig*, *zischend*, *dumpf*, *angenehm* auf 7-stufigen Kategorienskalen bewertet. Die Geräusche wurden mittels eines programmierbaren Equalizers und über Kopfhörer (Sennheiser HD 650) in randomisierter Reihenfolge präsentiert. Insgesamt nahmen 15 Teilnehmer am Experiment teil, die sich selbst als normalhörend einschätzten.

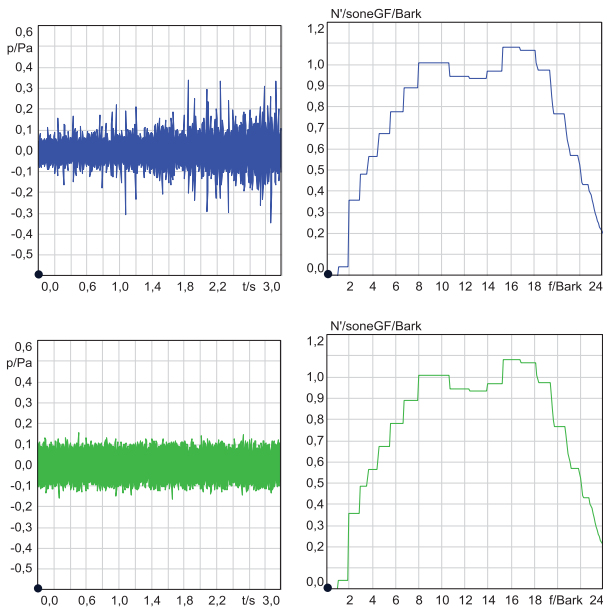


Abbildung 1: Das Plätschern eines Bachs. Die Zeitstruktur des originalen Geräusches (oben) wurde durch das Ersetzen der Phase mittels einer Zufallsphase eliminiert (unten). Links: Zeitsignal, Rechts: Lautheits-Tonheitsmuster.

Erwartungsgemäß bewirkte eine Erhöhung des Schalldruckpegels um 20 dB eine signifikante Veränderung der Lautheitsbewertung (siehe Abb. 2, oben). Ferner, wie Abbildung 2 (unten) verdeutlicht, zeigte die Analyse der Geräuschbewertungen bezüglich des Attributes *scharf* ebenfalls einen statistisch hochsignifikanten Einfluss des Schalldruckpegels auf die Bewertung der Schärfe ($p < 0.01$; $F = 7.25$).

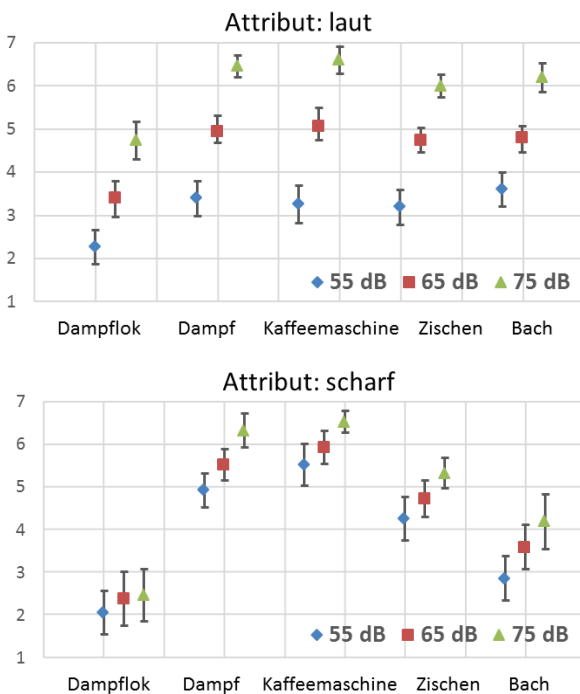


Abbildung 2: Arithmetisch gemittelte Bewertungen von 15 Probanden und entsprechende Standardabweichungen bezüglich des Attributes *laut* (oben) und des Attributes *scharf* (unten) für fünf technische Geräusche bei drei verschiedenen Schalldruckpegeln (55 dB, 65 dB, 75 dB SPL)

Die Manipulation der temporalen Struktur bei gleichbleibendem Langzeitspektrum zeigt dagegen keinen eindeutigen Einfluss auf die Bewertung der Schärfe ($p = 0.8$; $F = 0.06$), wie in Abbildung 3 (unten) verdeutlicht. Allerdings ist für den Stimulus *Bach* ein hochsignifikanter Einfluss der Zeitstruktur auf die Schärfebewertung beobachtbar ($p < 0.01$). Die Randomisierung der Phasen führte zu einer erheblichen Steigerung der bewerteten Schärfe.

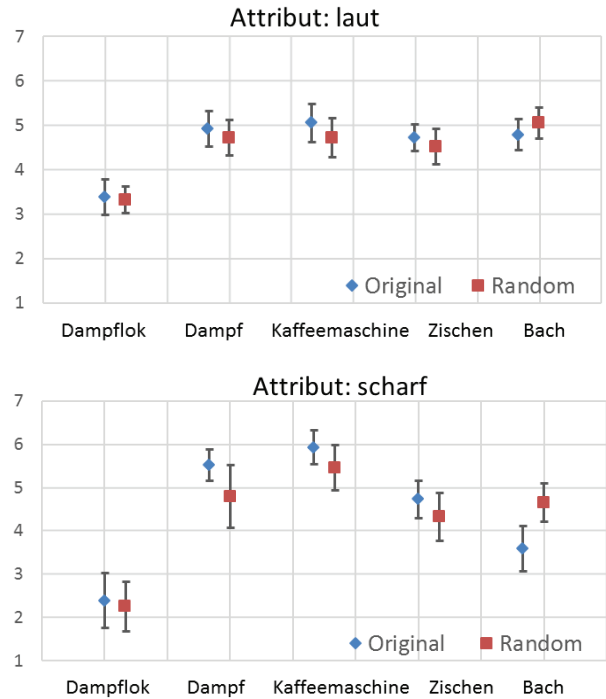


Abbildung 3: Arithmetisch gemittelte Bewertungen von 15 Probanden und entsprechende Standardabweichungen bezüglich des Attributes *laut* (oben) und des Attributes *scharf* (unten) für fünf technische Geräusche, die in ihrer Zeitstruktur jeweils manipuliert wurden

Zusammenfassend lässt sich konstatieren, dass die Lautheit eines Signals einen Einfluss auf die Wahrnehmung der Schärfe besitzt. Dies wurde auch in vorangegangenen Untersuchungen beobachtet [3,5,6]. Darüber hinaus kann sich auch die spezifische Zeitstruktur eines Signals auf die Schärfewahrnehmung auswirken, die genauen Mechanismen sind bisher noch geklärt [7].

Bewertung der Schärfe von technischen Schallen bei gleicher Lautheit mittels Größenschätzung

In einem weiteren Experiment wurde die Schärfempfindung bzw. Bewertung der Hörempfindung Schärfe von zeitvarianten technischen Geräuschen mit jeweils identischer Lautheit untersucht. Alle Stimuli wurden jeweils gemäß der ISO 532-1 [8] auf drei Lautheiten ($N_5 = 5$ sone, $N_5 = 10$ sone, $N_5 = 15$ sone) angepasst. Mit der jeweiligen Anpassung der Lautheit wurde untersucht, ob sich die Schärfeverhältnisse der sechs technischen Geräusche mit unterschiedlichen Zeitstrukturen und verschiedener spektraler Zusammensetzung verändern. Insgesamt wurden sechs technische Schalle, die bereits im obigen Experiment verwendet

wurden, ausgewählt (Vogelgezwitscher, Dampf, Zischen, Kaffeemaschine, Bachgeplätscher und Bachgeplätscher mit randomisierter Phase).

Die Stimuli wurden in einem mehrteiligen Hörversuch bezüglich deren empfundener Schärfeverhältnisse durch einen vollständigen Paarvergleich mit Größenschätzung evaluiert. Innerhalb eines Geräuschpaares wurde demjenigen Stimulus mit der durch die Versuchsperson empfundenen geringeren Schärfenausprägung der Wert „100“ zugeschrieben. Im Vergleich zu diesem Referenzgeräusch wurde das andere Geräusch hinsichtlich dessen relativer Schärfe in seiner Ausprägung geschätzt.

Die Geräusche wurden mittels eines programmierbaren Equalizers und über Kopfhörer (Sennheiser HD 650) in randomisierter Reihenfolge präsentiert. Insgesamt nahmen 18 Probanden teil, die sich selbst als normalhörend einschätzten.

Die Auswertung der Ergebnisse der vollständigen Paarvergleiche, die jeweils in randomisierter Reihenfolge für die drei Lautheiten durchgeführt wurden, zeigte keine auffälligen Effekte der Schärfe technischer Schalle bei variierendem Lautheitsniveau. Die relativen Schärfeverhältnisse blieben über den betrachteten Lautheitsniveaus von $N_5=5$ sone, $N_5=10$ sone und $N_5=15$ sone unverändert. Eine detaillierte Beschreibung der Auswertung der gewonnenen Daten auf Basis eines vollständigen Paarvergleiches, der mit relativer Größenschätzung kombiniert wurde, findet sich in [7].

Abbildung 4 belegt, dass die relativen Verhältnisse der bewerteten Ausprägungen der Schärfe für die sechs technischen Geräusche nicht von der Kondition *Lautheitsniveau* beeinflusst werden.

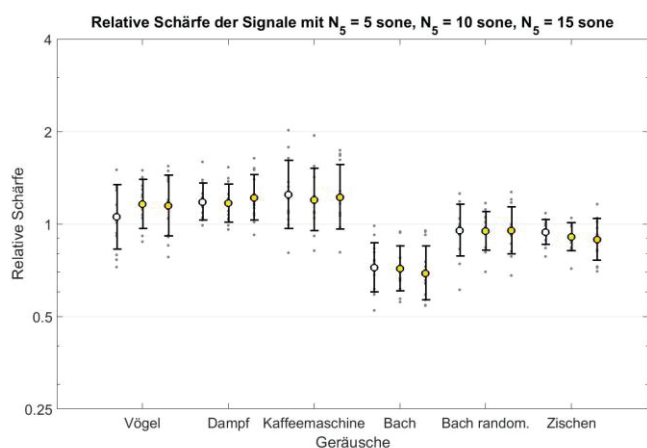


Abbildung 4: Relative Schärfe (geometrischer Mittelwert über alle Probanden mit geometrischer Standardabweichung) der zeitvarianten Schalle. Die Punkte in Grau stellen die relative Schärfe für einzelne Probanden dar. Normierungsfaktor ist der geometrische Mittelwert der Schärfeverhältnisse aller Stimuli. Die Ergebnisse für jeden Stimulus sind als Tripel in der Reihenfolge $N_5=5$ sone (weiß), $N_5=10$ sone (gelb), $N_5=15$ sone (orange) aufgetragen.

Abschließend wurden die ermittelten relativen Schärfeverhältnisse der evaluierten Geräusche mit den Ergebnissen verschiedener Verfahren zur instrumentellen Berechnung der Schärfe verglichen. Die Schärfeverhältnisse der Hörversuchstimuli wurden mit den Verfahren nach v. Bismarck, Aures und DIN 45692 bestimmt und analog zu den experimentellen Ergebnissen auf das geometrische Mittel der Schärfeverhältnisse aller Stimuli normiert. Eine zeitabhängige Schärfe $S(t)$ wurde aus der zeitabhängigen spezifischen Lautheit $N'(z,t)$ berechnet. Die Werte der spezifischen Lautheit liegen bei der Berechnung nach ISO 532-1 [8] alle 2 ms vor. Die Berechnung der zeitabhängigen Schärfe wurde anschließend mit einer zusätzlichen Glättung des zeitlichen Verlaufs der Schärfe mit einem Tiefpass 1. Ordnung (Zeitkonstante: 30 ms) realisiert. Anschließend können beliebige Repräsentativwerte, wie der Mittelwert der Schärfe über Zeit oder entsprechende Perzentilwerte aus dem Zeitverlauf der Schärfe bestimmt werden.

Insgesamt wurden die resultierenden Schärfeverhältnisse $S_{stationär}$ (Schärfe ermittelt auf Basis des Langzeitspektrums), $S_{Mittelwert}$ (arithmetischer Mittelwert der blockweise berechneten Schärfeverhältnisse über Zeit) und S_5 (Wert der blockweise berechneten Schärfeverhältnisse, der nur in 5 % der Dauer des jeweiligen Geräusches erreicht bzw. überschritten wurde) betrachtet.

Bei allen Verfahren zeigt der über den Zeitverlauf der blockweise berechneten Schärfe gebildete arithmetische Mittelwert $S_{Mittelwert}$ die beste Übereinstimmung mit den relativen Schärfeverhältnissen aus den Hörversuchen. Abbildung 5 verdeutlicht die Vorhersagequalität der verschiedenen instrumentellen Indikatoren für die betrachteten 18 Geräusche.

Die hier beobachtete gute Prädiktionsqualität der arithmetisch gemittelten Schärfefunktion über der Zeit zur Beschreibung der *mittleren empfundenen Schärfe* bei zeitvarianten technischen Schallen wurde in weiteren Studien ebenfalls als geeignet ermittelt [9,10].

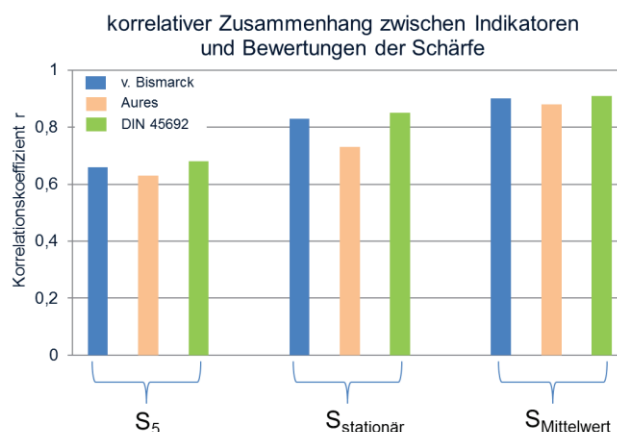


Abbildung 5: Korrelativer Zusammenhang zwischen den Bewertungen der Schärfe von 6 technischen Geräuschen für jeweils 3 verschiedene Lautheitsstufen ($N_5=5$ sone, $N_5=10$ sone, $N_5=15$ sone) und den aus bestehenden Verfahren zur instrumentellen Bestimmung der Schärfe abgeleiteten Indikatoren S_5 , $S_{stationär}$, $S_{Mittelwert}$

Diskussion und Zusammenfassung

Verschiedene Aspekte der Wahrnehmung der Schärfe bei technischen Schallen wurden experimentell untersucht. Es wurde qualitativ der Einfluss des Schalldruckpegels und der Zeitstruktur auf die Wahrnehmung der Schärfe ermittelt. Es zeigte sich, dass eine Veränderung des Schalldruckpegels um 20 dB die Bewertung der Schärfe mittels einer unipolaren Kategorienskala statistisch hochsignifikant beeinflusste. Dies bestätigt die experimentellen Beobachtungen auf Basis der Bewertung von synthetischen Signalen durch Aures [5] und von Bismarck [3], die ebenfalls eine Lautheitsabhängigkeit konstatierten. Bismarck beobachtete bei der Bewertung synthetischer Signale lautheitsabhängige Abweichungen der Schärfewertung von 30 %, die er angesichts eines ermittelten Messfehlers von ± 10 % als nicht schwerwiegend betrachtete und somit nicht in die instrumentelle Bestimmung der Schärfe berücksichtigte. Bislang kann nur das Verfahren nach Aures [5] die hier experimentell beobachtete Abhängigkeit der Wahrnehmung der Schärfe von der Gesamtlautheit abbilden.

Weiterführende Untersuchungen zur Schärferechnung intendieren eine Optimierung der Lautheitsabhängigkeit der Schärfewahrnehmung sowie der Gewichtungsfunktion der spezifischen Lautheiten auch unter Berücksichtigung von Bewertungsdaten technischer Schalle [11].

Ferner zeigte sich, dass die Bewertung der Schärfe von Geräuschen, deren spezifische Zeitstruktur durch die gezielte Manipulation der Phase verändert wurde, beeinflusst werden kann [7]. Ein derartiger Einfluss findet in den bekannten Verfahren zur instrumentellen Bestimmung der Schärfe bislang keine Berücksichtigung.

In einem weiteren Hörversuch wurde ein vollständiger Paarvergleich mit Größenschätzung durchgeführt, um den Einfluss des Lautheitsniveaus ($N_5=5$ sone, 10 sone und 15 sone) auf die Schärfewahrnehmung technischer Schalle zu untersuchen. Hier zeigte sich, dass die relativen Schärfewerte der jeweils 6 bewerteten technischen Geräusche nicht über den verschiedenen Lautheitsniveaus variierten.

Die Vorhersage der aus diesen Experimenten ermittelten relativen Verhältnisse durch bestehende Verfahren zur instrumentellen Bestimmung der Schärfe zeigten keine wesentlichen Unterschiede, da die Stimuli in den jeweiligen Experimenten gleiche Lautheit aufwiesen. Die geringfügigen Unterschiede zwischen den Verfahren lassen sich auf die unterschiedlichen Gewichtungen der spezifischen Lautheiten zurückführen.

Bezüglich der Wahl eines geeigneten Indikators zur Ermittlung eines repräsentativen Einzahlwertes für die mittlere empfundene Schärfe bei zeitvarianten Geräuschen erwies sich tendenziell der arithmetische Mittelwert der blockweise ermittelten Schärfewerte über die Dauer eines technischen Geräusches als am geeignetsten. Damit erscheint sich die kognitive Reizintegration der Schärfewahrnehmung komplexer Geräuscheperioden eher auf eine Mittelung der Momentanempfindungen zu fokussieren. Dagegen wird vielfach bei der Empfindungsgröße *Lautheit* im Rahmen zeitvarianter Geräusche eine kognitive Mittelungsstrategie

angenommen, in der sich der Bewerter eher an die Lautheitsspitzen innerhalb einer Episode bezieht [12, 13].

Literatur

- [1] DIN 45692:2009-08. Messtechnische Simulation der Hörempfindung Schärfe, Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin, 2009
- [2] Fastl, H., Zwicker, E. Psychoacoustics. Facts and models, Heidelberg, New York, Berlin, Springer Verlag, 2007
- [3] Bismarck, G. von. Extraktion und Messung von Merkmalen der Klangfarbenwahrnehmung stationärer Schalle, Dissertation, München, 1972
- [4] Bismarck, von G. Sharpness as an attribute of the timbre of steady sounds, *Acustica*, Vol. 30, 159-172, 1974
- [5] Aures, W. Berechnungsverfahren für den Wohlklang beliebiger Schallsignale. Ein Beitrag zur gehörbezogenen Schallanalyse, Dissertation, München, 1984
- [6] Guirao, M., Stevens, S.S. Measurement of auditory density, *J. Acoust. Soc. Am.* 36, 1176-1182, 1964
- [7] Tarasova, V. Wahrnehmung und Modellierung der Schärfe stationärer und instationärer Schalle, Masterarbeit, RWTH Aachen University, 2016
- [8] ISO/FDIS 532-1. Acoustics. Methods for calculating loudness. Part 1: Zwicker method, International Standardization Organization, Genf, 2017
- [9] Kuwano, S., Namba, S. Sharpness evaluation of temporally varying sounds, *Internoise 2016*, Hamburg, 2016
- [10] Fiebig, A. Cognitive stimulus integration of auditory sensations and sound perceptions, Dissertation, Berlin, 2015
- [11] Sottek, R. Sharpness perception and modeling of stationary and time-varying sounds, *The Journal of the Acoustical Society of America* 140, 2953, 2016
- [12] Fastl, H. Beurteilung und Messung der äquivalenten Dauerlautheit, *Z. f. Lärmbekämpf.* 38, Springer-Verlag, 98-103, 1991
- [13] DIN 45631/A1:2010-03. Berechnung des Lautstärkepegels und der Lautheit aus dem Geräuschespektrum - Verfahren nach E. Zwicker - Änderung 1: Berechnung der Lautheit zeitvarianter Geräusche, Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin, 2010