

## Dissonanz als Bewertungskriterium multi-tonalen Schalls

Anna Rieger<sup>1</sup>, Christian Mühlbauer<sup>1</sup>, Hans-Peter Rabl<sup>1</sup>, Rainer Weber<sup>2</sup>

<sup>1</sup> OTH Regensburg, 93053 Regensburg, Deutschland, Email: anna.rieger@st.oth-regensburg.de

<sup>2</sup> Vitesco Technologies GmbH, 93055 Regensburg, Deutschland, Email: rainer.2.weber@continental-corporation.com

### Einleitung

Im Zuge der Elektrifizierung von Fahrzeugen ergeben sich neue akustische Herausforderungen. Durch den fehlenden verbrennungsmotorischen Antrieb treten typische *pfefende* Eigengeräusche der elektrischen Aggregate in den Vordergrund. Eine Besonderheit stellen außerdem mehrere, gleichzeitig erklingenden Tonhöhen dar. Aus der Musiktheorie ist zudem bekannt, dass nicht jede Kombination aus zusammen erklingenden Tönen ein wohlklingendes Schallereignis erzeugt. Im allgemeinen Sprachgebrauch spricht man dabei von Konsonanz bzw. Dissonanz. Neben der Emission von Eigengeräuschen werden auch die gesetzlichen vorgeschriebenen AVAS (Acoustic Vehicle Alerting Systems) die Geräuschkulisse für Insassen und Umwelt nachhaltig verändern.

In gängigen Analyseverfahren ist durch die Tonalität bereits die Charakterisierung von Einzeltönen berücksichtigt. Es stellt sich jedoch die Frage, ob damit auch multi-tonale Geräusche ausreichend quantifiziert werden können oder ob eine weitere Größe (Konsonanz/Dissonanz) zur psychoakustischen Beschreibung solcher Stimuli nötig ist. Ein weiterer Forschungsgegenstand ist außerdem die Frage inwiefern bestimmte Konsonanzen bzw. Dissonanzen die allgemeine Angenehmheit oder Lästigkeit eines Geräusches beeinflussen.

Die folgenden Kapitel geben eine Übersicht von Theorien aus der Literatur, Probandenbewertungen bezüglich empfundener Dissonanz und Lästigkeit und Korrelationsanalysen zwischen subjektiven Testdaten und beispielhaften Literaturmodellen.

### Überblick der Literatur

Historisch betrachtet gibt es einige Ansätze, die zur Beschreibung der Konsonanz/Dissonanz dienen sollen. Beispiele dazu sind:

- einfache ganzzahlige Frequenzverhältnisse
- Rauigkeit
- kulturelle Aspekte

Es werden zudem auch mehrere Begriffe zur Benennung der Konsonanz in der Literatur aufgeführt. Dabei wird diejenige Konsonanz, die von auftretender Rauigkeit zerstört wird, auch als *sensorische Konsonanz* bezeichnet. Die *psychoakustische Konsonanz* wird als Kombination aus *sensorischer Konsonanz* und einem Harmonieverständnis beschrieben. [1]

Wie sich das menschliche Dissonanzempfinden explizit zusammen setzt und welche Relationen folglich für die psychoakustische Konsonanz/Dissonanz gelten, ist aktu-

ell Gegenstand der Forschung.

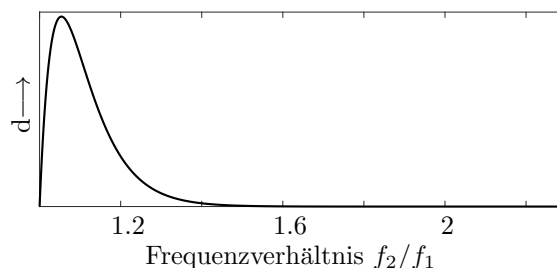
Nachfolgend werden zwei exemplarische Literaturmodelle vorgestellt, die für weitere Korrelationsanalysen mit subjektiven Probandenbewertungen gewählt wurden.

### Beispielhafte Literaturmodelle

Den selektierten Modellen liegt jeweils eine andere Grundlage zur Erklärung des Konsonanz/Dissonanzphänomens zu Grunde.

#### Dissonanz nach Plomp und Levelt

Das Modell nach Plomp und Levelt versucht die Varianz des Dissonanzempfindens durch auftretende Schwebungen zu erklären. Mit der Parametrierung nach Sethares liegt ein Modell vor, dass unter Berücksichtigung der Pegel eine Dissonanz für Zwei- und Mehr-Ton-Komplexe berechnet. Abbildung 1 zeigt den typischen Verlauf der Dissonanzkurve für einen Zwei-Ton-Komplex mit einer Grundfrequenz von  $f_1 = 500$  Hz und größer werdendem Frequenzintervall  $f_2/f_1$ . [1, 2, 3]



**Abbildung 1:** Dissonanz nach dem Modell von Plomp und Levelt mit der Parametrierung nach Sethares.  $f_1 = 500$  Hz mit Anstieg des Intervalls bis zu  $f_2/f_1 = 2.3$ .

#### Harmonische Entropie

Die harmonische Entropie stellt im Gegensatz zum Modell nach Plomp und Levelt ein mathematisches Maß für die Unordnung oder Unsicherheit im harmonischen Raum dar. Prinzipiell wird bei der Bestimmung der harmonischen Entropie die Wahrscheinlichkeit berechnet wie nah ein beliebiges Frequenzintervall  $i$  nahe eines einfachen, ganzzahligen Frequenzintervalls  $j$  liegt. Je näher sich  $i$  an  $j$  befindet, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit und damit desto kleiner die Entropie. [1]

Das Modell der harmonischen Entropie erlaubt grundlegend ausschließlich die Berechnung der Entropie für Zwei-Ton-Komplexe. Darüber hinaus war keine Empfehlung zur Parametrierung ersichtlich, weswegen sich je nach Einstellung der Einflussparameter die Darstellung der Entropie wesentlich unterschieden kann. In der folgenden Abbildung 2 kann der Verlauf der harmonischen

Entropie für die Variation der Einflussparameter beobachtet werden.

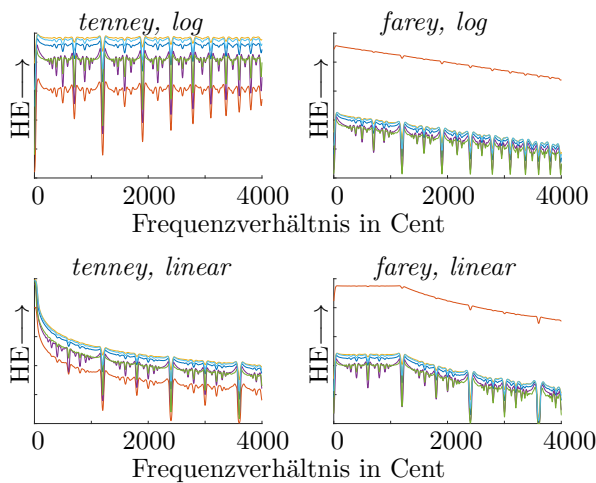


Abbildung 2: Veränderung der Darstellung der Harmonischen Entropie (HE) je nach Parametereinstellungen.

### Dissonanz- und Lästigkeitsbewertung

Zur Untersuchung des subjektiven Dissonanz- und Lästigkeitsempfindens wurde ein Hörtest mit den folgenden Eckdaten durchgeführt: Insgesamt nahmen 22 Probanden am Versuch teil, wovon neun angaben, dass sie musikalische Erfahrung haben. Die Probanden befanden sich außerdem alle im Alter zwischen 20 und 30 Jahren. Als Bewertungsgrößen wurden die *Dissonanz* und *Lästigkeit* vorgestellt. Beide sollten auf einer neunstufigen Kategorialskala von *nicht dissonant/lästig* bis *sehr dissonant/lästig* bewertet werden.

Als Testgeräusche wurde eine Zusammenstellung aus insgesamt 25 Zwei-Ton- sowie Drei-Ton-Komplexen dargeboten. Die Pegel der einzelnen tonalen Komponenten war dabei einheitlich bei 60 dB und die Grundfrequenz  $f_0$  jeweils auf 400 Hz festgelegt. Folgende unterschiedliche Geräusch-Sets wurden definiert:

**Set 1:** Mit diesem Set wurden Zwei-Ton-Komplexe, die größtenteils musikalische Intervalle umfassen, abgetestet.  $f_1 : f_0$  ist 1.025 : 1, 16 : 15 (Sekunde), 5 : 4 (Terz), 45 : 32 (Tritonus), 3 : 2 (Quinte), 12 : 7 und 2 : 1 (Oktave). (Stimuli 1-7)

**Set 2:** Intervalle in Set 2 enthalten Zwei-Ton-Komplexe mit Intervallen größer einer Oktave. Dieses Set soll einen Hinweis darauf geben, wie sich das Dissonanzempfinden von Zweiklängen mit größer werdenden Frequenzintervallen verändert.  $f_1 : f_0$  ist 2.3, 3, 3.6, 4, 4.5, 9, 10. (Stimuli 8-14)

**Set 3:** Set 3 enthält die Drei-Ton-Komplexe des Hörtest. Bei diesen Stimuli wurde die Grundfrequenz  $f_0$  sowie der zweite Oberton  $f_2 = 3 \cdot f_0 = 1200$  Hz konstant gehalten und jeweils der erste Oberton in der Frequenz verändert. Die Stimuli unterliegen der folgenden Vorschrift:  $f_0 : x \cdot f_0 : 3 \cdot f_0$  mit  $x = \{1.05, 1.15, 1.25, 1.5, 1.75, 2, 2.25, 2.5, 2.75, 2.85, 2.9\}$ . Dieses Set dient unter anderem der Untersuchung des Ein-

flusses der Dissonanz von Zweiklängen auf die Dissonanz von Mehrklängen. (Stimuli 15-25)

Abbildung 3 zeigt die Ergebnisse des Hörtest für Dissonanz und Lästigkeit.

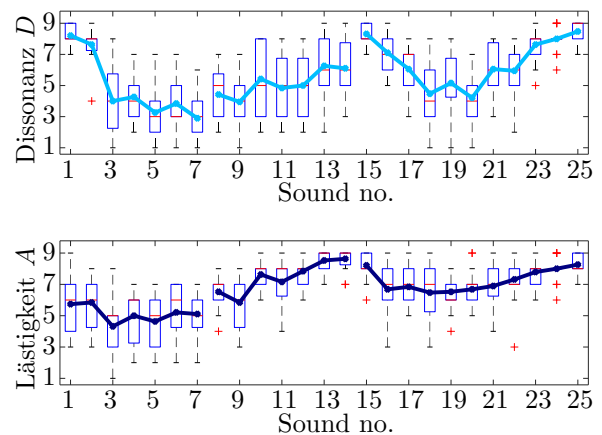


Abbildung 3: Boxplot der Probandenbewertungen für Dissonanz und Lästigkeit. Durchgezogene Linien entsprechen jeweils dem Mittel aller Probanden.

Die Probanden zeigten im Vergleich mit sich selbst und dem Mittel aller Probanden gute bis sehr gute Reliabilität.

Es kann außerdem bemerkt werden, dass die Unterschiede der Antworten des Experiments für Dissonanz und Lästigkeit statistisch signifikant sind.

Die subjektiven Bewertungen für die Dissonanz unterscheiden sich dabei wenig für musikalische und nicht musikalisch vorgebildete Probanden, vergleiche Abbildung 4.

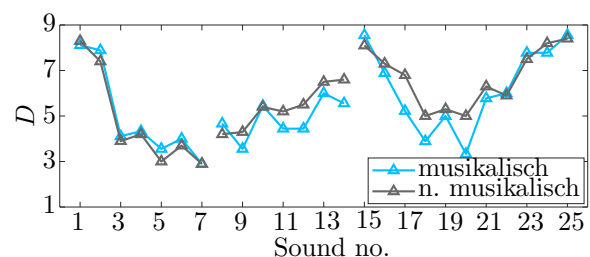
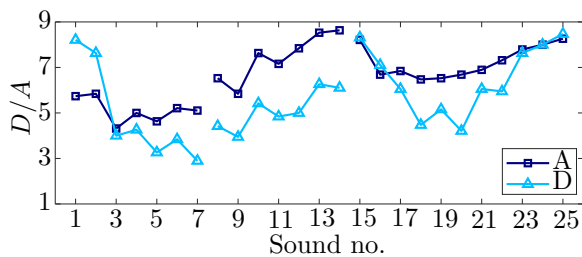


Abbildung 4: Vergleich der Dissonanzbewertungen zwischen musikalisch vorgebildeten und nicht vorgebildeten Probanden.

Abbildung 5 stellt die Dissonanz- und Lästigkeitsbewertungen nochmals direkt gegenüber.

Die Verläufe der Kurven für die empfundene Dissonanz und die Lästigkeit sind prinzipiell nicht gleich. Ein absteigender Trend der Bewertungen bis zu Stimuli 7 (Oktave) sowie ein ansteigender Trend der Bewertungen ab der Oktave kann beobachtet werden. Allgemein steigt die Dissonanz außerdem mit der Anzahl an vorhanden tonalen Komponenten.

Auffallend ist zudem, dass diejenigen Datenpunkte mit



**Abbildung 5:** Gegenüberstellung der mittleren Bewertungen für die empfundene Dissonanz und Lästigkeit.

stärker ausgeprägter Rauigkeit am meisten dissonant bewertet wurden (Stimuli 1, 2, 15, 16, 23, 24, 25).

Das Intervall der Oktave (2:1) bildet das globale Minimum der Dissonanzbewertungen, wobei der Stimuli dabei nicht als *nicht dissonant* (1) bewertet wird.

Eine Ausbildung lokaler Maxima und Minima ist für das Mittel der Probanden ebenfalls erkennbar. Stimuli drei und fünf, welche in der Musik einer konsonanten Terz und Quinte entsprechen, zeigen in den subjektiven Bewertungen ebenfalls Minima. Der Tritonus (Stimuli 4) wurde wiederum subjektiv höher dissonant bewertet, was aus der Musiktheorie ebenfalls zu erwarten war.

Die Dissonanzbewertungen des ersten Sets verteilen sich außerdem über mehr als sechs Kategorien.

Bei Intervallen größer einer Oktave fällt auf, dass Stimuli 13 und 14 (die Intervalle 9:1 und 10:1) relativ hoch dissonant bewertet wurden, obwohl prinzipiell harmonische Relationen vorliegen. Das Verständnis der Probanden, die harmonische Relation zuzuordnen zu können, scheint mit größer werdendem Abstand der tonalen Komponenten (ohne dazwischenliegende Harmonische) zu schwinden. Auch die harmonischen Intervalle 3:1 und 4:1 werden höher dissonant bewertet als die Oktave (Stimuli 7).

Die Ausbildung der lokalen Minima für einfache Frequenzverhältnisse ist außerdem auch in den Bewertungen der Drei-Ton-Komplexe beobachtbar, vergleiche Stimuli 18, 20 und 22.

Die folgenden Abschnitte zeigen die Ergebnisse der Korrelationsanalysen zwischen den beschriebenen Literaturmodellen und den Probandenbewertungen.

### Dissonanz nach Plomp und Levelt

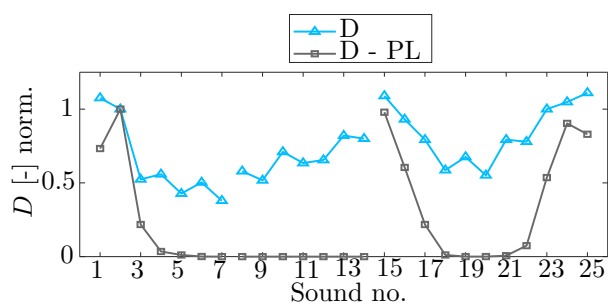
Abbildung 6 zeigt die berechnete Dissonanz nach dem Modell von Plomp und Levelt  $D-PL$  und der subjektiven Probandenbewertungen  $D$  in einer normierten Darstellung.

Da viele der Stimuli keine oder nur verschwindende Rauigkeit aufweisen, werden diese Punkte von dem Modell für diese Testdaten unterschätzt.

Wie auch aus anderen Veröffentlichungen bekannt, lässt das den Schluss zu, dass die Rauigkeit alleine die Varianz des Konsonanz/Dissonanzempfindens nicht erklären kann. [4, 5]

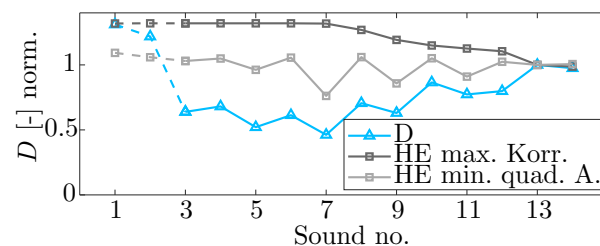
### Harmonische Entropie

Da für das Modell der harmonischen Entropie keine Empfehlung einer Parametrierung vorlag, wurden die Ein-



**Abbildung 6:** Gegenüberstellung der subjektiven Dissonanzbewertungen und der berechneten Dissonanz nach dem Modell von Plomp und Levelt.

flussparameter des Modells sowie die Anzahl an Testdatenpunkten variiert und für jede Einstellung der Korrelationskoeffizient und die mittlere quadratische Abweichung (MQA) in Bezug auf die subjektiven Testdaten der Zwei-Ton-Komplexe berechnet. Mehr-Ton-Komplexe waren zunächst nicht durch das Modell abzubilden. Abbildung 7 zeigt ein exemplarisches Ergebnis für einen der Analyse-Durchläufe.



**Abbildung 7:** Ergebnis einer exemplarischen Parametervariation der Harmonischen Entropie; Vergleich von subjektiven Dissonanzbewertungen mit der Entropie höchster Korrelation und minimaler Abweichung.

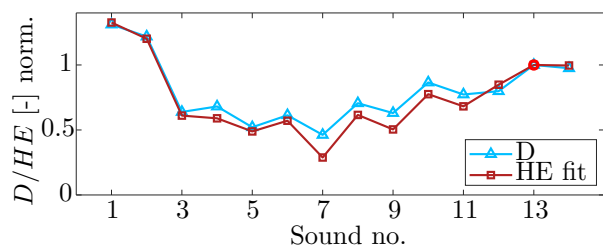
Interessanterweise wurde eine der Parameterkonstellationen mehrfach als best-fit nach der MQA-Methode bestimmt (Kurve *HE min. quad. A.*). Gut zu sehen ist, dass das Modell die Minima und Maxima sehr ähnlich im Vergleich zu den subjektiven Daten ausprägt, die vorher erwähnten generellen Trends in den Dissonanzbewertungen aber ausbleiben.

Zur Beschreibung der vorliegenden Daten reicht somit auch ein rein harmonischer Ansatz, wie das Modell der Harmonischen Entropie, in dieser Form nicht aus.

Eine weitere offene Fragestellung bezüglich der harmonischen Entropie an diesem Punkt war außerdem die Anwendung der Entropie von Zwei-Ton-Komplexen in einer Relation für Mehr-Ton-Komplexe.

Für den weiteren Verlauf wurde der harmonischen Entropie daher zunächst ein teilweise definiertes Ausgleichspolynom zur Modellierung der charakteristischen Trends unterlegt, ohne dabei die Ausprägung der Maxima und Minima zu verändern. Das normierte Ergebnis für die Stimuli mit Zwei-Ton-Komplexen im Vergleich zu den subjektiven Daten ist in Abbildung 8 zu sehen.

Unter Einbezug der zusätzlichen Trends kann die harmo-



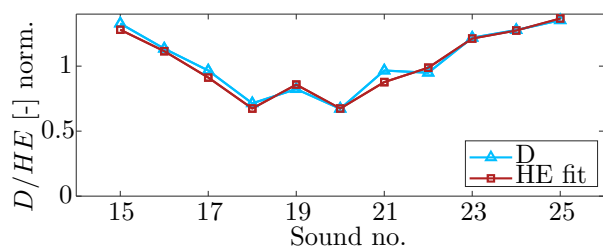
**Abbildung 8:** Gegenüberstellung der subjektiven Dissonanzbewertungen und der berechneten und angepassten Harmonischen Entropie. (Zwei-Ton-Komplexe)

nische Entropie mit der gewählten Parametereinstellung die subjektiven Daten nahezu perfekt abbilden.

Bezüglich der Berechnung von Mehr-Ton-Komplexen lassen sich Anhaltswerte finden, dass sich eine Gesamtdissonanz ( $D_{ges}$ ) aus der (gewichteten) Summe der Dissonanzen ( $d_i$ ) der im Mehr-Ton-Komplex enthaltenen Zwei-Ton-Komplexe zusammensetzt.

Am Beispiel eines Vier-Ton-Komplexes hieße das, dass sich innerhalb des Vierklanges sechs verschiedene Zweiklänge zwischen den Komponenten ausbilden können.

Zur Untersuchung, ob eine solche Relation für die Harmonische Entropie anwendbar ist, wurde nach dieser Vorschrift (mit zunächst variabler Gewichtung), die Gesamtdissonanz bzw. Entropie für die Stimuli des Hörtest mit Drei-Ton-Komplexen berechnet. Das normierte Ergebnis ist in Abbildung 9 zu sehen.



**Abbildung 9:** Gegenüberstellung der subjektiven Dissonanzbewertungen und der berechneten und angepassten Harmonischen Entropie. (Drei-Ton-Komplexe)

Die Gewichtung ist in diesem Fall numerisch nach dem best-fit MQA-Kriterium bestimmt worden, dennoch zeigt die Abbildung, dass die Gesamt-Entropie in diesem Fall durch die Summe der Entropien enthaltener Zweiklänge dargestellt werden kann.

## Zusammenfassung und Ausblick

Generell haben die Probanden des Hörtest unterschiedliche Bewertungen für Dissonanz und Lästigkeit vorgenommen. Der Verlauf der Kurven für Dissonanz und Lästigkeit ist unterschiedlich, woraus ersichtlich wird, dass die Probanden die Dissonanz nicht mit der empfundenen Lästigkeit der Testgeräusche gleichsetzten.

Theorien aus der Musik können in Form von sich ausprägenden Minima und Maxima in den Testergebnissen erkannt werden, wobei die Oktave das lokale Minimum der Dissonanzbewertungen darstellt, aber nicht als *nicht*

*dissonant* empfunden wird.

Stimuli mit vorhandener Rauigkeit werden außerdem am meisten dissonant bewertet.

Bei Zwei-Ton-Komplexen kann ein allgemeiner Abstieg der Dissonanzbewertungen bis zur Oktave und ein Wiederanstieg ab der Oktave beobachtet werden. Generell wird die Dissonanz außerdem bei steigender Anzahl an tonalen Komponenten höher eingestuft.

Zur Beschreibung der gezeigten subjektiven Testergebnisse war weder das Modell nach Plomp und Levelt, noch die Harmonische Entropie alleine ausreichend. Die Harmonische Entropie zeigt sich jedoch konsistent mit der Ausbildung von charakteristischen Maxima und Minima wie sie auch in den Testergebnissen zu sehen sind. Mit dem beschriebenen Ausgleichspolynom konnten die subjektiven Daten außerdem hinreichend genau dargestellt werden. Zusätzlich konnte beobachtet werden, dass die beschriebene Relation zur Beschreibung der Gesamt-Entropie unter Einbezug der Entropien enthaltener Zweiklänge angewendet werden kann.

Das übergeordnete Ziel ist es, anwendbare Bewertungsmodelle für reale Geräusche zu entwickeln.

Die in diesem Hörtest dargebotenen Stimuli waren ausschließlich synthetisch erzeugte Zwei- und Drei-Klänge ohne weitere Komponenten, es kann daher nicht direkt geschlussfolgert werden, dass das allgemeine Konsonanz/Dissonanzempfinden für reale Geräusche in der gezeigten Art und Weise dargestellt werden kann. In weiteren Untersuchungen müssen daher weitere Einflussfaktoren wie Hintergrundrauschen, Variationen in den Schalldruckpegeln der tonalen Komponenten, die Anzahl tonaler Komponenten, der allgemeine Frequenzbereich oder die Bandbreite der tonalen Komponenten miteinbezogen werden.

## Literatur

- [1] William A. Sethares, Hrsg. *Tuning, Timbre, Spectrum, Scale. Second Edition*. London: Springer-Verlag, 2005.
- [2] R. Plomp und W. J. M. Levelt. "Tonal Consonance and Critical Bandwidth". In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 38 (1965).
- [3] William A. Sethares. "Local consonance and the relationship between timbre and scale". In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 94 (1993).
- [4] André Fiebig u. a. "Das Konzept der Dissonanz zur Bewertung von technischen Geräuschen". In: *Fortschritte der Akustik DAGA 2018*.
- [5] Matthias Reffgen und André Fiebig. "Die Grenzen der Rauigkeit zur Beschreibung der Dissonanzwahrnehmung". In: *Fortschritte der Akustik DAGA 2019*.