

# Das Konzept der Dissonanz zur Bewertung von technischen Geräuschen

André Fiebig<sup>1</sup>, Stefan Hank<sup>2</sup>, Andreas Herweg<sup>1</sup>, Julian Becker<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> Technische Universität Berlin, Einsteinufer 25, 10587, Berlin

## Einleitung

Geräusche können spezifische Empfindungen, Wahrnehmungen und Emotionen auslösen. Mittels der Psychoakustik werden die Zusammenhänge zwischen physikalischen Reizen und den durch sie hervorgerufenen Hörempfindungen beschrieben und funktionale Abhängigkeiten von Empfindungsstärke und Reizstärke ermittelt. Ein tieferes Verständnis der Zusammenhänge zwischen Reiz und Wahrnehmung ist beispielsweise für eine gezielte Optimierung von Produktgeräuschen zur Aktivierung spezifischer Empfindungen von Bedeutung.

Psychoakustische Parameter, wie Lautheit, Schärfe, Tonalität oder Rauigkeit erlauben bereits die detaillierte Beschreibung von elementaren Empfindungsgrößen. Darüber hinaus besteht ein großes Interesse, auch komplexere Wahrnehmungsdimensionen zu charakterisieren und instrumentelle Modelle zur Vorhersage von Perzepten zu entwickeln.

Im Bereich der Musik werden häufig die Bewertungsdimensionen „Konsonanz“ und „Dissonanz“ verwendet, denen ein musiktheoretisches Verständnis zu Grunde liegt, vor allem bezüglich der spezifischen Verhältnisse prominenter Töne und deren Harmonischen zueinander. Inwiefern derartige Zusammenhänge auch die Bewertung von technischen Geräuschen hinsichtlich Angenehmheit, Qualität, Konsonanz oder Harmonie beeinflussen, erscheint bislang nicht eindeutig geklärt. Im Rahmen von ersten Hörversuchen zur potentiellen Übertragbarkeit eines Dissonanzkonzeptes auf nicht-musikalische Stimuli wurde das Thema explorativ adressiert.

## Sensorische Konsonanz vs. musikalische Harmonie

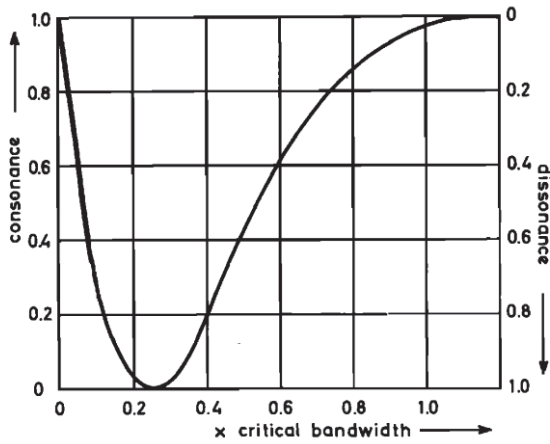
Laut Terhardt lehre grundsätzlich die Erfahrung, dass die Konsonanz bzw. Dissonanz als Eigenschaft der Musik faktisch ist, d.h. nicht auf nur theoretischen Annahmen und willkürlichen Definitionen beruhe [1]. Dennoch hat es sich bislang als schwierig erwiesen, ein allgemeingültiges psychophysikalisches Konzept der Konsonanz zu entwickeln. Obwohl aktuelle Studien eine Indifferenz von musikalisch ungeprägten Personen ohne Berührungen zum westlichen Tonsystem gegenüber klassischen konsonanten oder dissonanten diatonischen Intervallen nahelegen [2], wird nach wie vor die Möglichkeit einer ausgeprägten Konsonanzwahrnehmung a priori nicht vollends verworfen. Beispielsweise zeigte eine Studie mit Kleinkindern im Alter von zwei bis vier Monaten, dass konsonante Klänge gegenüber dissonanten von den Kleinkindern bevorzugt wurden [3].

Da neben der musikalischen Konsonanz und Harmonie Schalle *jeder Art* unterschiedlich wohlklingend sind, führt Terhardt zusätzlich den Begriff der sensorischen Konsonanz ein [1]. Hierbei könne bei der Wahrnehmung und Bewertung von Konsonanz ein Teil sensorischen und ein anderer erlernten Faktoren zugeordnet werden. Analog definieren Schellenberg und Trehub: „[...] sensory consonance is constant across musical styles and cultures, musical consonance presumably results from learning what sounds pleasant in a particular musical style“ [4]. Diese Definition impliziert, dass die *sensorische Konsonanz* sich auf die physikalischen Eigenschaften von Geräuschen beziehe und folgt damit einem psychoakustischen Ansatz, während die Wahrnehmung der *musikalischen Konsonanz* (Harmonie) erst durch Musikerziehung erlernt bzw. durch Erfahrungen internalisiert werden müsse. Dabei folge die Wahrnehmung der musikalischen Konsonanz den Regeln der Musiktheorie.

Für die Ausprägung der sensorischen, psychoakustischen Konsonanz gelte gemäß Terhardt, dass das Element, das sensorische Konsonanz zerstöre, die Rauigkeit sei; diese Form der Konsonanz sei als psychoakustische Konsonanz zu verstehen [5]. Fingerhuth beobachtete in Hörversuchen bei künstlich erzeugten technischen Geräuschen mittels der Kombination aus Rauschsignalen und Tönen ebenfalls einen starken Zusammenhang zwischen den Bewertungen der Dissonanz und der Ausprägung der psychoakustischen Rauigkeit [6].

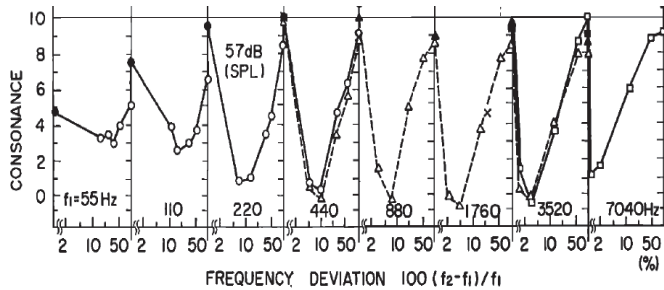
Plomp und Levelt untersuchten die Dissonanz von Tonpaaren mittels Hörversuchen und leiteten die in Abbildung 1 dargestellte Kurve der Dissonanz als Funktion der Frequenzgruppenbreite ab [7]. Sie stellen damit den Zusammenhang zwischen der Frequenzgruppenbreite und der Wahrnehmung von Konsonanz und Dissonanz bei Tonpaaren her. Liegen die Töne eines Tonpaares in verschiedenen Frequenzgruppen, so werden sie als konsonant wahrgenommen. Innerhalb einer Frequenzgruppe wird nach Plomp und Levelt die höchste Dissonanzwahrnehmung bei einem Abstand der Töne zueinander von ca. 25% der Frequenzgruppenbreite erreicht.

Kameoka und Kuriyagawa kritisierten, dass Plomp und Levelt nur Töne im mittleren Frequenzbereich betrachteten und daraus die grundsätzliche Dissonanzwahrnehmung aus dem Verhältnis der Frequenzen von Tonpaaren folgerten. Daher untersuchten Kameoka und Kuriyagawa sowohl die Abhängigkeit der Dissonanzwahrnehmung von der Lage der Töne im Frequenzspektrum, d.h. die Frequenzen der Tonpaare wurden systematisch nahezu über den gesamten Hörbereich variiert, als auch die Pegelverhältnisse der jeweils kombinierten Töne [8]. Ferner betrachteten sie ebenfalls komplexe Klänge mit einem Grundton und mehreren Obertönen.



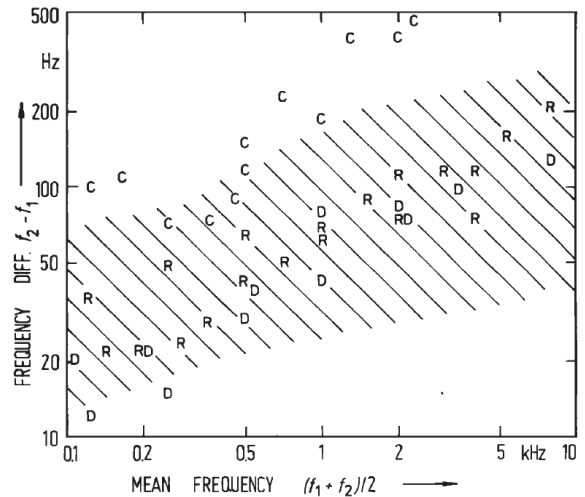
**Abbildung 1:** Wahrnehmung von Konsonanz bzw. Dissonanz eines Tonpaares als Funktion der Frequenzgruppenbreite, nach Plomb und Levelt [7]

Abbildung 2 zeigt den frequenzabhängigen Verlauf der Wahrnehmung von Dissonanz bzw. Konsonanz nach den Untersuchungen von Kameoka und Kuriyagawa. Es zeigte sich, dass sich bei grundsätzlich tiefen Frequenzen eines Tonpaares keine ausgeprägte Dissonanz einstellt. Darüber hinaus ist zu erkennen, dass sich die Ausprägung der maximalen Dissonanz mit zunehmender Frequenz verschiebt, d.h. der relative Abstand der Frequenzen der beiden Töne wird mit zunehmender Frequenz geringer. Wird ein Maximum der Dissonanz bei den Frequenzen eines Tonpaares von 440 Hz und 484 Hz erreicht (10%), so wird bei höheren Frequenzen bereits bei wenigen Prozent Frequenzunterschied der Töne eines Tonpaares eine maximale Dissonanz provoziert.



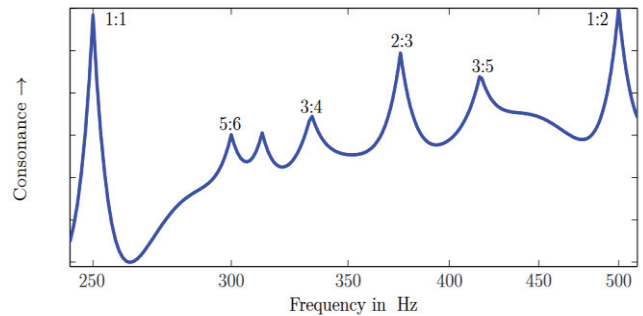
**Abbildung 2:** Wahrnehmung von Konsonanz bzw. Dissonanz von Tonpaaren über den relativen Frequenzabstand der Töne eines Tonpaares in %, nach Kameoka und Kuriyagawa [8]

Ob es sich bei den Bewertungen der Tonpaare eher um eine Beurteilung der sensorischen oder musikalischen Konsonanz handelt, wird von den Autoren nicht ausführlich behandelt. Der Verlauf der Kurven legt jedoch den Bezug zur sensorischen Konsonanz im psychoakustischen Sinne nahe, da spezifische musikalische Tonintervalle als lokale Minima der Dissonanz bzw. Konsonanz durch die Autoren nicht thematisiert werden. Analog zeigt die Abbildung 3 schematisch den Merkmalsraum der Rauigkeit, Dissonanz und Konsonanz für Tonpaare als eine Funktion der gemittelten Tonpaarfrequenz und deren Frequenzabstand. Deutlich ist die Kongruenz zwischen der maximalen Dissonanz und der maximalen Empfindung der Rauigkeit zu erkennen [5]. Sensorische Konsonanz trete dagegen nach Terhardt nur bei vollständiger Abwesenheit einer Rauigkeitsempfindung auf.



**Abbildung 3:** Frequenzabstand zwischen zwei simultan dargebotenen Sinustönen und deren maximale Rauigkeit (R) und maximale Dissonanz (D) als eine Funktion der gemittelten Tonpaarfrequenz nach Terhardt [5]. Der minimale Frequenzabstand eines Tonpaares, um als konsonant wahrgenommen zu werden, ist mit (C) markiert (durch Terhardt aus verschiedenen Veröffentlichungen abgeleitet). Im gestrichelten Bereich wird eine Rauigkeitsempfindung ausgelöst.

Gemäß der Abbildung nach Fingerhuth [6] müsste sich bei Anwendung der westlichen Harmonielehre eine spezifische Struktur der Konsonanz bzw. der Dissonanz ausprägen bei Tonpaaren, die in verschiedene Frequenzgruppe fallen, je nach spezifischem Verhältnis der Frequenzen eines Tonpaares zueinander. Bestimmte Tonverhältnisse, wie die reine Oktave, Quinte oder Quarte, gelten in der Musik als konsonant, andere Intervalle dagegen als grundsätzlich dissonant, wie die kleine Sekunde oder der Tritonus.



**Abbildung 4:** Schematische Darstellung der Konsonanzausprägung bei der Kombination von zwei Tonkomplexen (Ton mit jeweils 6 Harmonischen) nach Fingerhuth [6], wobei der untere Ton die Grundfrequenz von 250 Hz besitzt und die Grundfrequenz des zweiten Tonkomplexes variiert wird.

### Bewertung der Dissonanz von musikalischen und technischen Schallen

Zur Untersuchung der Wahrnehmung bzw. Bewertung von Dissonanz bei musikalischen Exzerpten und technischen Schallen wurden verschiedene quasi-stationäre technische Geräusche sowie Musikexzerpte ausgewählt.

Die Lautheit aller betrachteten Signale wurde gemäß der ISO 532-1 [9] auf jeweils 11 sone ( $N_5$ ) eingestellt. Alle Stimuli

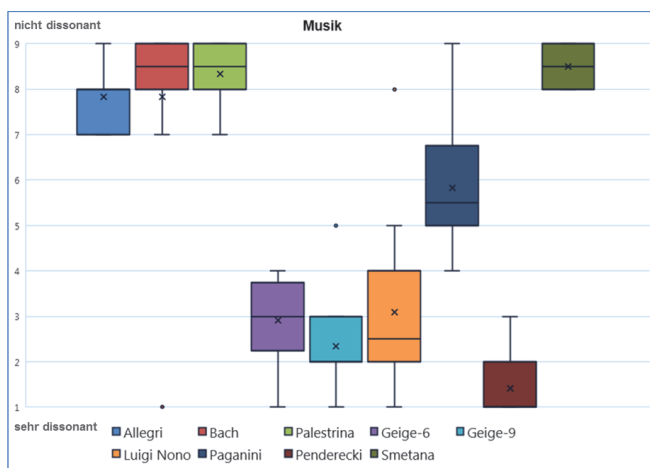
wiesen eine Dauer von 3 bis 5 s auf und konnten, bevor die eigentlichen Hörversuche begannen, angehört werden. Die Signale wurden jeweils für die Musikstücke und die technischen Geräusche in randomisierter Reihenfolge präsentiert.

Insgesamt wurden 9 musikalische und 7 technische Geräusche jeweils in einem kurzen Hörversuch durch Probanden mittels einer 9-stufigen unipolaren Kategorialskala hinsichtlich des Kriteriums *Dissonanz* auf einer Skala, die von *nicht dissonant* (9) bis *sehr dissonant* (1) reicht, unter kontrollierten Bedingungen bewertet. Die Versuchsteilnehmer bewerteten jeweils alle Geräusche. Vor dem Hörversuch konnten sich die Versuchsteilnehmer in einer kurzen Trainingssequenz mit dem Prozedere des Versuchs vertraut machen und exemplarisch einige Bewertungen vornehmen.

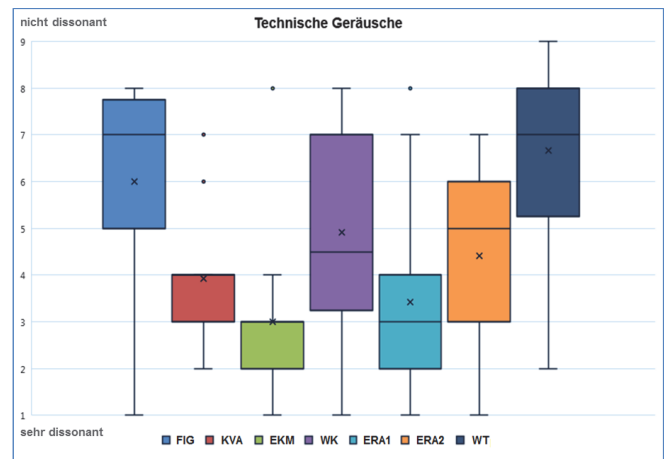
Die Geräusche wurden mittels programmierbaren Equalizers (PEQ V) und über elektrodynamische Kopfhörer (Sennheiser HD 650) randomisiert präsentiert. Die Eingabe der Bewertungen erfolgte über einen Touchscreen.

Insgesamt nahmen 12 Teilnehmer (11 männlich, 1 weiblich) am Hörversuch teil, die sich selbst als normalhörend einschätzten. Insgesamt gaben 5 von 12 Personen an, dass ihr musikalisches Verständnis (Musiktheorie/ Harmonielehre) *ziemlich* oder *sehr* ausgeprägt sei. 8 von 12 Personen gaben an, ein Instrument zu spielen oder sehr gut Singen zu können. Insgesamt waren die Versuchspersonen mehrheitlich unter 30 Jahre alt.

Die Abbildungen 5 und 6 zeigen die Bewertungen der musikalischen bzw. technischen Geräusche bezüglich des Kriteriums der *Dissonanz*. In beiden Teilversuchen wurden die Geräusche durch die Probanden erwartungsgemäß bezüglich der Dissonanz statistisch signifikant unterschiedlich bewertet ( $p < 0.01$ ).



**Abbildung 5:** Bewertungen (Median, arithmetischer Mittelwert, Interquartilbereich, Whisker und Ausreißer) bezüglich der Dissonanz mittels einer unipolaren 9-stufigen Kategorialskala von 12 Probanden von 9 Musikexzerpten. „1“ entspricht „sehr dissonant“ und „9“ entspricht „nicht dissonant“.



**Abbildung 6:** Bewertungen (Median, arithmetischer Mittelwert, Interquartilbereich, Whisker und Ausreißer) bezüglich der Dissonanz mittels einer unipolaren 9-stufigen Kategorialskala von 12 Probanden von 7 technischen Geräuschen. „1“ entspricht „sehr dissonant“ und „9“ entspricht „nicht dissonant“.

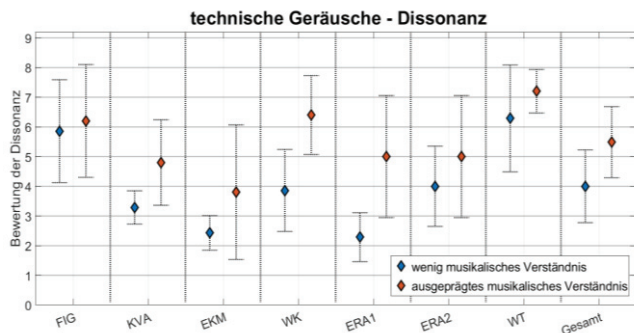
Die Spearman Rangkorrelation der Dissonanzbewertungen mit der Ausprägung der Rauigkeit, berechnet nach dem Gehörmodell von Sottek [10], ist in beiden Teilversuchen statistisch nicht signifikant bzw. zeigt tendenziell nicht die beobachteten Unterschiede in der Bewertung auf Basis der berechneten Rauigkeitswerte an. Beispielsweise besitzen die Signale „Geige-6“ und „Geige-9“ die geringsten Rauigkeitswerte, obwohl diesen durch die Probanden eine hohe Dissonanz bescheinigt wurde. Dagegen weist das Musikexzerpt „Bach“, neben dem Stimulus „Luigi Nono“, die höchste Rauigkeit auf, wurde aber als tendenziell nicht dissonant beurteilt. Insgesamt ist zu konstatieren, dass alle analysierten Musikexzerpte nur sehr geringe Ausprägungen der Rauigkeit absolut aufweisen ( $< 0.12$  asper). Bei den technischen Geräuschen weist das Signal „EKM“ mit 0.35 asper die höchste Rauigkeit auf. Dagegen wurde beim als recht dissonant bewerteten Signal „KVA“ mit 0.04 asper die deutlich geringste Rauigkeit berechnet. Damit kann die Ausprägung der psychoakustischen Rauigkeit offensichtlich nicht die Varianz der Dissonanzurteile aufklären.

## Diskussion

Die Probanden äußerten, dass die Bewertung der technischen Geräusche schwieriger als die Dissonanzbewertung der Musikstimuli sei. Dabei beurteilten die Probanden mit musikalischen Vorkenntnissen die musikalischen Stimuli sehr ähnlich zu den Personen, die angaben, keine musikalischen Kenntnisse zu besitzen. Jedoch zeigte sich ein erheblicher Unterschied bei der Bewertung der technischen Geräusche: Die nach Selbstauskunft musikalisch vorgebildeten Versuchsteilnehmer bewerteten die technischen Geräusche im Mittel um 1.5 Noten dissonanter als die Personen, die angaben, keine musikalische Vorbildung zu besitzen (s. Abbildung 7).

Die generell geringere Urteilskonkordanz bei der Bewertung der technischen Geräusche bezüglich des Grades der Dissonanz belegen die geäußerten Einschätzungen. Der Koeffizient  $r_i$  der Intra-Klassen-Korrelation ist bei der Bewertung der Dissonanz der Musik mit  $r_i = 0.84$  noch sehr

hoch, fiel aber bei der Bewertung der Dissonanz bei den technischen Geräuschen auf  $r_j=0.28$ .



**Abbildung 7:** Vergleich der Bewertungen der Dissonanz von technischen Geräuschen von Probanden, die Angaben, nur ein geringes oder ein sehr ausgeprägtes musikalisches Verständnis zu besitzen

Der mittlere quadratische Fehler aller Probanden zu den Gruppenmittelwerten erhöhte sich dabei von 1.7 auf 4.2. Möglicherweise lassen sich die erlernten Interpretationsmuster basierend auf internalisierten musikalischen Harmoniekenntnissen nicht bzw. nur sehr schwer ad hoc auf technische Geräusche übertragen.

Darüber hinaus zeigte sich, dass bei den vorliegenden Bewertungsdaten die Ausprägungen der psychoakustischen Rauigkeit sich nicht mit den Dissonanzurteilen decken. Obwohl nicht eindeutig unterschieden werden kann, ob die Berechnung der Rauigkeit mittels des vorliegenden Modells nach Sottek [10] das Wahrnehmungsphänomen der psychoakustischen Rauigkeit nur unzureichend abbildet und daher nicht mit den beobachteten Dissonanzurteilen korreliert oder ob der Parameter der psychoakustischen Rauigkeit zur Prädiktion der Wahrnehmung bzw. der Bewertung der Dissonanz von komplexen realen Schallen (Musik und technische Schalle) ungeeignet ist, erscheint ein starke Verknüpfung von psychoakustischer Rauigkeit und „sensorischer Konsonanz“ bzw. Dissonanz, so wie diese durch Versuchsteilnehmer ohne spezifische Instruktion der Bewertungsgröße bewertet wurden, als unwahrscheinlich.

## Zusammenfassung

In einem Hörversuch bewerteten die Versuchsteilnehmer musikalische Stimuli und technische Geräusche hinsichtlich des Kriteriums *Dissonanz*. Während die musikalischen Signale relativ einheitlich bewertet wurden, konnten bei den technischen Geräuschen größere Streuungen und interindividuelle Unterschiede beobachtet werden. Zusammenfassend lässt sich konstatieren, dass die Bewertung der Dissonanz von technischen Geräuschen mittels des vorliegenden Hörversuches weniger konkordant ausfiel als die Dissonanzbeurteilung bei Musikstücken.

Die Ausprägung der psychoakustischen Rauigkeit erklärte die mittels Hörversuchen gesammelten Bewertungen der Dissonanz von verschiedenen Geräuschen nur sehr eingeschränkt. Daher stellen sich die Fragen, ob sich ein grundsätzliches, erlerntes musikalisches Harmonieverständnis unmittelbar auch auf technische Geräusche übertragen lässt

oder ob zur Bewertung der Dissonanz bei technischen, nicht-musikalischen Geräuschen aufgrund von fehlender Hörerfahrung nur die sensorische Konsonanz angewendet werden kann? Und was bewerten Probanden, wenn Sie aufgefordert werden, bei nicht-musikalischen Signalen den Grad der Konsonanz, Harmonie oder Dissonanz einzuschätzen?

Gerade im Bereich von Multi-Tonkomplexen gelten mehrere Bewertungsdimensionen - wie Dissonanz, Rauigkeit, Tonalität, Modulation oder Angenehmheit [11] - als relevant. Daher stellt sich die Frage, inwiefern Versuchsteilnehmer grundsätzlich zwischen diesen Dimensionen scharf trennen und ob diese Dimensionen als Perzepte phänomenologisch überhaupt einzeln vorliegen oder ob die erwähnten Dimensionen vom Beurteiler aktiv konstruiert werden müssen. Nach Terhardt ist die sensorische Konsonanz eng mit der allgemeinen Angenehmheit von Geräuschen verbunden, ohne dabei spezifische musikalische Konsonanz bzw. Harmonieeffekte abdecken zu können [5].

## Literatur

- [1] Terhardt, E. (1998). Akustische Kommunikation. Grundlagen mit Hörbeispielen, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg
- [2] McDermott, J.H., Schultz, A.F., Undurraga, E.A., Godoy, R.A. (2016). Indifference to dissonance in native Amazonians reveals cultural variation in music perception, *Nature* volume 535, 547–550
- [3] Trainor, L.J., Heinmiller, B.M. (1998). The development of evaluative responses to music: Infants prefer to listen to consonance over dissonance, *Infant Behavior and Development*, 21(1), 77–88
- [4] Schellenberg, E.G., Trehub, S. (1994). Frequency ratios and the perception of tone patterns, *Psychonomic Bulletin & Review*, 1 (2), 191-201
- [5] Terhardt, E. (1974). Pitch, consonance, and harmony, *J. Acoust. Soc. Am.*, 55, 1061-1069
- [6] Fingerhuth, S. (2010). Tonalness and consonance of technical sounds, Dissertation, Logos Verlag
- [7] Plomp, R., Levelt, W.J.M. (1965). Tonal Consonance and Critical Bandwidth, *J. Acoust. Soc. Am.*, 38(4), 548-560
- [8] Kameoka, A., Kuriyagawa, M. (1969). Consonance Theory Part I: Consonance of Dyads, *J. Acoust. Soc. Am.*, 45(6), 1451–1459
- [9] ISO 532-1:2017. Acoustics. Methods for calculating loudness. Part 1: Zwicker method, ISO, Genf
- [10] Sottek, R. (2016). A hearing model approach to roughness, *Internoise 2016*, Hamburg
- [11] Töpken, S., Scheel, H., Weber, R. (2014). Signal repetition rates and their relationship to the pleasantness of multi-tone sounds, *Internoise 2014*, Melbourne