

Vergleich von Schall und Sitzschwingungen in verschiedenen Fahrzeugtypen hinsichtlich ihrer Wahrnehmung

Maria Mareen Maravich, M. Ercan Altinsoy

Centre for Tactile Internet with Human-in-the-Loop (CeTI), Professur Akustik und Haptik, Technische Universität Dresden, 01062 Dresden, E-Mail: maria.maravich@tu-dresden.de

Einleitung

Um die Wirkung von Schall und Sitzschwingungen in Fahrzeugsituationen beurteilen zu können, ist Wissen über ihre Wahrnehmung notwendig. Da beide Reize überwiegend gemeinsam auftreten, ist nicht nur Wissen über den einzelnen Reiz, sondern auch Wissen über die gemeinsame Wahrnehmung erforderlich. Bedeutung gewinnt die Wahrnehmung simultaner Reize besonders bei der Beurteilung von bestimmten ungewollten Eigenschaften wie z.B. Lästigkeit. Diese spielt im Kontext einer Fahrzeugsituation z.B. in Nutzfahrzeugen eine wichtige Rolle, sowie in anderen Bereichen, die mit Lärmbelastigung und Schwingungsbelastung einhergehen. Dabei sind vibroakustische Messungen ein essentielles Werkzeug um mit Hilfe von vorhandenem Wissen die Wahrnehmung daraus ableiten zu können.

Im Folgenden wird zunächst ein kurzer Überblick über die Wahrnehmung und Beurteilung der getrennten Reize gegeben. Anschließend wird eine Möglichkeit dargestellt optische und vibro-akustische Reize gleichzeitig aufzuzeichnen. Wahrnehmungsbezogen werden ausgewählte Beispiele von Nutzfahrzeugen und PKW charakterisiert, verglichen und diskutiert.

Beurteilung und Wahrnehmung von Schall und Sitzschwingungen in Fahrzeugen

Eine erste Beurteilung von Schall als auch von Sitzschwingungen erfolgt üblicherweise für beide Signale mit Hilfe von Frequenzbewertungen. Für Schall wird dabei klassischerweise die A oder auch bei sehr hohen Schallen die C-Bewertung genutzt, für Ganzkörperschwingungen wiederum die W-Bewertungen. Eine Empfehlung für die Beurteilung für Sitzschwingen ist in verschiedenen Standards definiert ([1],[2],[3]). Vertikale und horizontale Ganzkörperschwingungen werden unterschiedlich gewichtet (W_k oder W_d [1]), sowie in der Regel für Gesundheit und Komfort von 0,5 bis 80 Hz [2] bandbegrenzt. Die Gesamtbelastung kann auf Grundlage der dominanten Achse oder des Vektorbetrags ermittelt werden. Auch der Grund der Beurteilung, wie Gesundheit oder Komfort, ist von Bedeutung. Die frequenzbewertete Wahrnehmungsgrenze für Ganzkörperschwingungen wird mit etwa $0,015 \text{ m/s}^2$ angegeben [2]. Diese nimmt jedoch mit steigender Frequenz zu [4].

Auslöse- und Grenzwerte für beide Reize sind bezüglich des Arbeitsschutzes in Deutschland in der Arbeitsschutzverordnung [5] als Expositionsgrenz- und auslösewerte geregelt. Beide Reize werden auch in einer multimodalen Gesamtsituation getrennt voneinander berechnet. Für Schall beträgt der untere- bzw. obere Auslösewert des Tagesexpositionswertes 80 bzw. 85 dBA. Für Ganzkörper-

schwingungen beträgt der Auslösewert $0,5 \text{ m/s}^2$ für alle drei Raumrichtungen und $1,15 \text{ m/s}^2$ für horizontale Schwingungen sowie $0,8 \text{ m/s}^2$ für vertikale Schwingungen. Diese Grenzwerte basieren auf frequenzbewerteten Beschleunigungen.

Diese Grenzwerte bedeuten jedoch keineswegs, dass Schall und Schwingungswerte darunter nicht auch als unangenehm oder lästig empfunden werden können. Arbeitsschutzverordnungen haben in erster Linie den Zweck die physische Gesundheit der Mitarbeiter und Mitarbeiterinnen zu schützen und die vorliegenden Signale hinsichtlich dessen zu selektieren. Belästigung kann durch Vorhandensein anderer Signaleigenschaften oder kombinierten Belastungen hervorgerufen werden auch wenn die Messwerte unterhalb der definierten Auslöse- und Grenzwerte liegen und zudem auch sehr subjektiv empfunden werden.

Um diese subjektive Wahrnehmung auch in anderen Gesichtspunkten weiterführend zu beschreiben und zu beurteilen, sind psychoakustische Parameter besser geeignet. Lautheit, Schärfe und weitere psychoakustische Parameter wurden definiert um die Wahrnehmung von Schall umfassender zu beschreiben und stehen zur Analyse der Schallsignale zur Verfügung.

Als Beschreibung für die Wahrnehmung von Schwingungen wiederum können z.B. Attribute wie pulsierend, rüttelnd etc., welche mit bestimmten Signaleigenschaften korrelieren, einbezogen werden [6].

Über die gemeinsame Bewertung von Schall und Schwingungen hinsichtlich möglicher Interaktionseffekte ist weniger definiert als über die separaten Signale. In einer vorangegangenen Studie [7] mit Signalabschnitten von Nutzfahrzeugen wurde beispielsweise ein signifikanter Interaktionseffekt bezüglich der wahrgenommenen Lästigkeit gezeigt. Dieser ist wie folgt zu beschreiben: Bei geringeren Schalldruckpegeln, haben die Sitzschwingungen einen größeren Einfluss auf die Gesamtlästigkeit, welcher beim Anstieg des Schalldruckpegels jedoch wieder geringer wird.

Fahrzeug-Aufnahmen

Die Aufnahmen der im folgenden dargestellten Signalabschnitte wurden mit dem *Head Recorder* von *Head Acoustics* mit dem Frontend (SQuadriga II) und einem Laptop durchgeführt. Für die Aufnahme der Vibration auf dem Fahrersitz wurde ein Beschleunigungsaufnehmer (Typ 4515B von Brüel & Kjær) positioniert.

Die Geräusche wurden zum einen mit Kopfhörern (BHS II) oder wahlweise mit zwei in Ohrhöhe des Fahrers befestigten ICP-Messmikrofonen aufgezeichnet. Die Entscheidung, wann welcher Aufbau verwendet wird, basiert zum einen darauf, ob es möglich ist im entsprechenden Fahrzeug Mikrofone zu befestigen und zum anderen darauf, besonders

bei Aufnahmen in Nutzfahrzeugen, ob der Fahrer oder die Fahrerin eingeschränkt wird beim Erledigen der Arbeit oder in seiner oder ihrer Sicherheit.



Abbildung 1: Müllsammelfahrzeug der Stadtreinigung Dresden als Beispiel für die beschriebenen Messungen (Abbildung oben) und Kameraaufnahmen aus Sicht des Fahrers (Abbildung unten).

Für die Kameraaufnahmen wurden abhängig vom Fahrzeug eine Kamera (Canon EOS 750D/800D) auf einem Stativ in der Mitte des Fahrzeuges positioniert um den Blick aus Augenhöhe der Fahrerposition aufzuzeichnen. Das Kamera-stativ muss beschwert und die Bildstabilisierung am Objektiv aktiviert werden. Diese Bildaufnahmen können von Interesse für die Durchführung von Wahrnehmungsversuchen sein.

Signalbeispiele in Nutzfahrzeugen

Im Folgenden werden von verschiedenen Fahrzeugen quasistationäre Signalbeispiele mit einer Länge von 5s mit der Software Artemis Classic analysiert. Dargestellt werden FFT der Schallsignale der linken Fahrerseite als auch vertikale Sitzschwingungssignale. Es werden von verschiedenen Parametern Einzelwerte tabellarisch dokumentiert. Beschleunigungswerte wurden aus den Einzelwerten umgerechnet.

In den zwei folgenden Abschnitten über Nutzfahrzeugsignale werden 4 verschiedene Signalabschnitte von einem Müllsammelfahrzeug (MSF) auf verschiedenen Straßenbelägen und mit verschiedenen Geschwindigkeiten (Sitzschwingungen: Abb. 2, Tab. 1, Schall im Innenraum: Abb. 4, Tab. 3), ein Signalanschnitt eines Minibaggers sowie vier Szenen von 2 verschiedenen Kehrmaschinen auf zwei verschiedenen Straßenbelägen analysiert (Sitzschwingungen: Abb. 3, Tab. 2, Schall im Innenraum: Abb. 5, Tab. 4). Die ausgewählten Signalabschnitte der Nutzfahrzeuge geben keinen direkten Aufschluss über die tatsächliche Tages-expositionszeit und wurden nur beispielhaft gewählt um verschiedene Frequenzinhalte zu diskutieren.

Vertikale Sitzschwingungen von Nutzfahrzeugen

Die bewerteten Pegel der hier dargestellten vertikalen Sitzschwingungen reichen abhängig vom Fahrzeugtyp und Szene von 96,2 bis 115,6 dB_{Wk}, siehe Tab. 1. Die folgenden Abbildungen 2 und 3 zeigen, dass der Frequenzinhalt unbewertet bis maximal 50 Hz reicht.

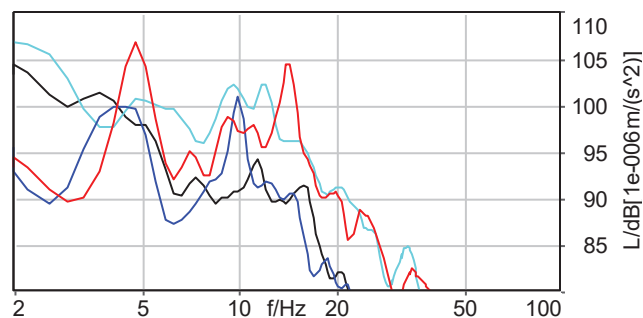


Abbildung 2: FFT (32768, 50.0%, HAN, Glättung) vertikaler Sitzschwingungen (unbewertet) auf dem Fahrersitz eines Müllsammelfahrzeugs während der Fahrt auf verschiedenen Straßenbelägen und Geschwindigkeiten: **Wohngebiet**, **Kopfstein (30km/h)**, **Asphalt (50km/h)**, **Autobahn (80km/h)**.

Tabelle 1: Beschleunigung (unbewertet) und Pegel über die (unbewertet und bewertet) für verschiedene Szenen eines Müllsammelfahrzeuges.

MSF	Wohn- gebiet	Kopfstein	Asphalt	Autobahn
L/dB	112,2	117,4	112,1	115,9
a (m/s ²)	0,41	0,74	0,40	0,62
L/dB _{Wk}	110,0	115,6	111,5	115,2

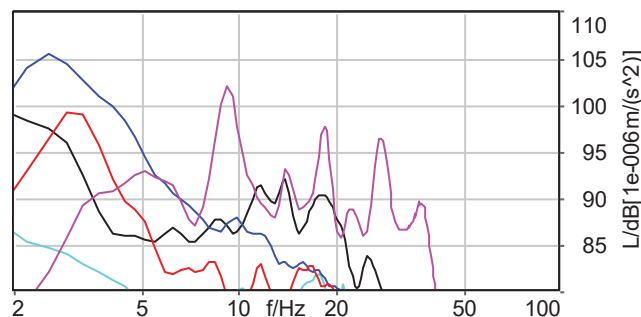


Abbildung 3: FFT (32768, 50.0%, HAN, Glättung) vertikaler Sitzschwingungen (unbewertet) auf dem Fahrersitz verschiedener Nutzfahrzeuge während der Fahrt auf verschiedenen Straßenbelägen: **Minibagger- Fahrt auf Sand**; Große Kehrmaschine: **Kopfstein, Asphalt**; Kleine Kehrmaschine: **Kopfstein, Asphalt**.

Der in den Abbildungen 2 und 3 dargestellte Bereich ab 80 dB ist weitestgehend der wahrnehmbare Bereich. Für den Frequenzinhalt der Sitzschwingungen der Kehrmaschinen in Abb. 3 und szenenabhängig für die des MSF in Abb. 2 bedeutet dies, dass Frequenzen bis ca. 20 Hz wahrgenommen werden, für den Minibaggersignalabschnitt bis 40 Hz. Bei geringen Geschwindigkeiten und unebenen Straßenbelägen entstehen im MSF besonders tieffrequente Sitzschwingungen, bei höheren Geschwindigkeiten bilden sich deutliche tonale Komponenten aus. Tieffrequente Sitzschwingungen im Bereich von 4 bis 8 Hz lösen höhere Belastungen aus und werden daher in Standards [1], [2] höher gewichtet.

Besonders beim MSF auf Kopfsteinpflaster ist dieser Bereich vergleichsweise erhöht. Bei dem Signalabschnitt des Minibaggers, aber auch bei einigen Signalabschnitten des MSF fällt auf, dass diese vergleichsweise starke tonale Komponenten ausbilden. Ob diese zusätzlich eine Rolle für die Wahrnehmung, auch im Zusammenhang mit multimodaler Lästigkeit spielen, ist bisher noch nicht ausreichend untersucht. Es gibt jedoch Untersuchungen zur Wahrnehmung der Intensität von Schwingungen. Merchel zeigte z.B. in seinen Untersuchungen, dass der Anstieg der Intensitätswahrnehmung von vertikalen Sitzschwingungen steiler ist als im Vergleich zu auditiven Signalen [8]. Das bedeutet, dass bereits geringere Pegelerhöhungen zu einer stärker wahrgenommenen Intensität führen.

Schwingungen ab ca. 110 dBW (0,315m/s²) werden nach ISO 2631 als *ein bisschen unangenehm* und ab 114dBW (0,5m/s²) als *ziemlich unangenehm* wahrgenommen, wobei es sich um Richtwerte handelt. Fast alle hier dargestellten Nutzfahrzeuge fallen in diese Bereiche, siehe Tab. 1 und 2.

Tabelle 2: Beschleunigung (unbewertet) und Pegel über die Zeit (unbewertet und bewertet) für verschiedene Szenen verschiedener Nutzfahrzeuge (KM-Kehrmaschine, A-Asphalt, K-Kopfsteinpflaster).

	Mini-bagger	Große KM		Kleine KM	
		K	A	K	A
L/dB	112,8	108,9	102,7	111,9	106,7
a (m/s ²)	0,44	0,28	0,14	0,39	0,22
L/dBW _k	110,3	105,3	96,2	109,3	104,9

Schall im Fahrzeuginnenraum von Nutzfahrzeugen

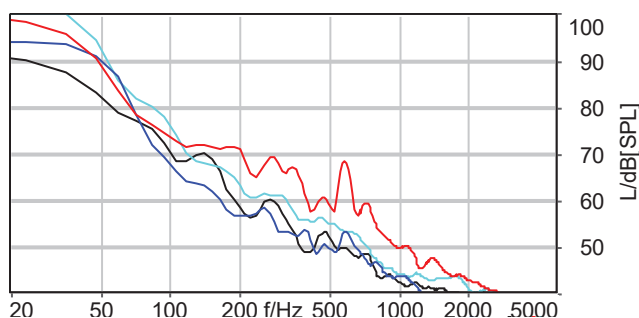


Abbildung 4: FFT (4096, 50.0%, HAN, Glättung) des Schallsignales auf der linken Fahrerseite (unbewertet) eines Müllsammelfahrzeugs während der Fahrt auf verschiedenen Straßenbelägen und Geschwindigkeiten: **Wohngebiet**, **Kopfstein** (30km/h), **Asphalt** (50km/h), **Autobahn** (80km/h).

Die A-bewerteten Pegel reichen von ca. 66 bis 80 dBA, Siehe Tab. 3 und 4. Die in den Abbildungen 4 und 5 dargestellten Frequenzanteile im Bereich ab 40 dB reichen maximal bis ca. 2000 Hz. Die Signale sehen teilweise vergleichbar aus, wobei der Frequenzinhalt der kleinen Kehrmaschine besonders durch die ausgeprägten tonalen Komponenten bei 400 Hz

auffällt. Vermutlich wird dies gemeinsam mit den erhöhten Pegelwerten zu einer höheren Lästigkeit führen.

Bei einem Vergleich der A-bewerteten Pegel, ist die Szene der kleinen Kehrmaschine mit 80 dBA die Lauteste, Siehe Tab. 4. Bei der Auswertung der Lautheit über die Zeit allerdings zeigt sich ein inverses Bild. Der Lautheitswert über die Zeit der Szene des Minibaggers ist mit 46 Sone höher als der der Kehrmaschine mit 42 Sone. Im Gegensatz zur Kehrmaschine hat der Schall im Innenraum des Minibaggers einen stärkeren Anteil von tiefen Frequenzen, die bei der A-Bewertung geringer berücksichtigt werden. Die Schärfe wurde nach Aures berechnet und liegt bei den meisten Signalen von 1,6 bis 2 Acum, Siehe Tab. 3 und 4.

Tabelle 3: Schalldruckpegel (unbewertet und bewertet) und psychoakustische Parameter (*DIN45631, **Aures) für verschiedene Szenen eines Müllsammelfahrzeuges.

MSF	Wohn- gebiet	Kopfstein	Asphalt	Auto- bahn
L/dBSPL	94,8	107,1	98,3	102,8
L/dBA	67,7	70,5	66,3	76,7
Lautheit*/Sone	28,6	38,4	24,3	42,2
Schärfe**/Acum	2,13	2,08	1,63	2,23

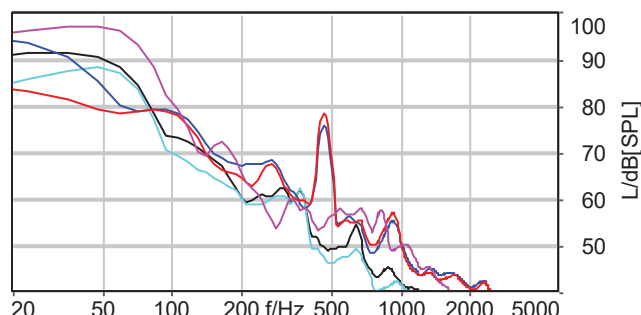


Abbildung 5: FFT (4096, 50.0%, HAN, Glättung) des Schallsignales auf der linken Fahrerseite (unbewertet) auf verschiedenen Straßenbelägen während der Fahrt auf verschiedenen Straßenbelägen: **Minibagger- Fahrt auf Sand**; Große Kehrmaschine: **Kopfstein**, **Asphalt**; Kleine Kehrmaschine: **Kopfstein**, **Asphalt**.

Tabelle 4: Schalldruckpegel (unbewertet und bewertet) und psychoakustische Parameter (*DIN45631, **Aures), für Nutzfahrzeug-Szenen (KM-Kehrmaschine, A-Asphalt, K-Kopfsteinpflaster).

	Mini-bagger	Große KM		Kleine KM	
		K	A	K	A
L/dBSPL	102,5	96,1	92,7	98,3	90,5
L/dBA	74,6	69,2	67,6	78,4	80,0
Lautheit*/Sone	49,1	30,8	28,5	44,2	45,9
Schärfe**/Acum	1,64	1,83	1,83	2,08	2,10

PKW-Signalabschnitte im Vergleich

Die Pegel der vertikalen Sitzschwingungen, Siehe Tab. 5, sind von 103 bis 107 dB_k ausgeprägt und damit erwartungsgemäß geringer als einige Nutzfahrzeuge. Die Frequenzbereiche der PKW-Sitzschwingen untereinander sehen in Abb. 6 vergleichbar aus, bei den Nutzfahrzeugen hingegen sind die Spektren vielfältiger. Auch die Frequenzspektren der Schallsignale im Fahrzeuginnenraum, siehe Abb. 7, sehen vergleichbar untereinander aus. Schalldruckpegel und Lautheit sind ähnlich zu denen der Nutzfahrzeuge. Die in der Tabelle 6 dokumentierten Pegel und Lautheiten reichen von 67 bis 78 dBA und 23 bis 47 Sone. Der Porsche ist nahezu doppelt so laut wie der Mercedes und sogar lauter als das Müllsammel-fahrzeug. Aufgrund der unterschiedlichen Erwartung kann dies durchaus erwünscht sein. Die Schärfe ist hingegen geringer als bei den Nutzfahrzeugen.

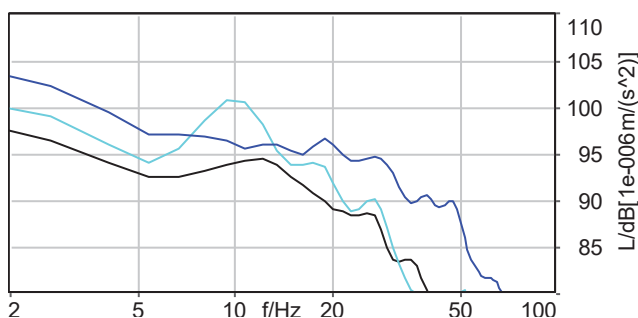


Abbildung 6: FFT (32768, 50.0%, HAN, Glättung) vertikaler Sitzschwingungen (unbewertet) auf dem Fahrersitz verschiedener PKW während der Fahrt auf Asphalt: Mercedes; Opel Meriva, Porsche Cayman.

Tabelle 5: Beschleunigung (unbewertet) und Pegel über die (unbewertet und bewertet) für verschiedene PKW-Szenen.

	Mercedes	Opel	Porsche
L/dB	106,2	109,3	110,6
a (m/s ²)	0,20	0,29	0,34
L/dBW _k	103,1	107,5	107,1

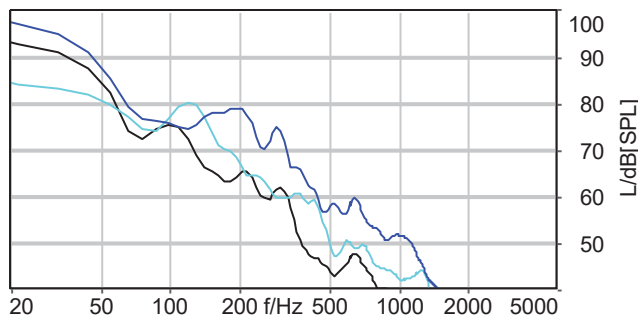


Abbildung 7: FFT (4096, 50.0%, HAN, Glättung) des Schallsignales auf der linken Fahrerseite (unbewertet) auf verschiedener PKW während der Fahrt auf Asphalt: Mercedes; Opel Meriva, Porsche Cayman.

Tabelle 6: Schalldruckpegel (unbewertet und bewertet) und psychoakustische Parameter (*DIN45631, **Aures) für verschiedene PKW-Szenen.

	Mercedes	Opel	Porsche
L/dB	96,8	91,0	101,6
L/dBA	67,0	71,8	78,0
Lautheit*/Sone	23,0	32,3	47,0
Schärfe**/Acum	1,27	1,56	1,57

Zusammenfassung

Es wurden akustische Signale und vertikale Sitzschwingungen, welche aus Sicht des Fahrers aufgezeichnet wurden, von Nutzfahrzeugen und PKW hinsichtlich ihrer Wahrnehmung diskutiert. Diese Analysen können als Grundlage für Wahrnehmungsversuche genutzt werden.

Danksagung

Diese Studie wurde gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (Projekt-Nummer: AL 1473/7-1). Die Aufnahmen in dem Müllsammelfahrzeug und den Kehrmaschinen wurden organisatorisch sowie personell von der Stadtreinigung Dresden unterstützt.

Literatur

- [1] ISO 2631-1: Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part 1. 1997.
- [2] VDI 2057: Einwirkung mechanischer Schwingungen auf den Menschen Ganzkörper-Schwingungen. 2017.
- [3] B. 6841 British Standard, Measurement and evaluation of human exposure to whole-body mechanical vibration and repeated shock, British Standard, BS 6841. British Standards Institution, 1987.
- [4] A. Schwendicke, M. E. Altinsoy, and S. Merchel, "Was fühlen wir noch? – Ganzkörperschwingungsfühschwellen für hohe Frequenzen," DAGA 2015 - 41st German Annual Conference on Acoustics, 2015.
- [5] LärmVibrationsArbSchV, Verordnung zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch Lärm und Vibrationen (Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung-LärmVibrationsArbSchV). 2007.
- [6] R. Rosenkranz, M. Wilberg, and M. E. Altinsoy, "Taktile Wahrnehmungsmerkmalen von Ganzkörperschwingungen und Hand-Arm-Schwingungen im Vergleich," DAGA 2018 - 44th German Annual Conference on Acoustics, 2018.
- [7] M. M. Maravich and M. E. Altinsoy, "Lästigkeit bei gleichzeitiger Exposition von Schall und Schwingungen," in DAGA 2020 - 46th German Annual Conference on Acoustics, 2020.
- [8] S. Merchel, Auditory-Tactile Music Perception. Shaker Verlag, Germany, 2014.