

# Quantifizierung erwarteter taktiler Eigenschaften ohne Vibrationsdarbietung für taktilen Design

Robert Rosenkranz<sup>1</sup>, M. Ercan Altinsoy

*Centre for Tactile Internet with Human-in-the-Loop (CeTI), Professur Akustik und Haptik, Technische Universität Dresden, 01062 Dresden, <sup>1</sup> E-Mail: robert.rosenkranz@tu-dresden.de*

## Einleitung

Ein zentrales Ziel im Rahmen der Produktentwicklung ist die Sicherstellung der Wahrnehmungsqualität beim zukünftigen Nutzer. Qualität ist definiert als eine Übereinstimmung zwischen erwarteten und hervorgerufenen Eigenschaften [1]. Das Ziel der vibrotaktilen Gestaltung von Produkten oder Inhalten für virtuelle Umgebungen ist es also, Vibrationen zu erzeugen, die die Erwartungen der Kunden an das Produkt erfüllen. Es gibt jedoch kein Patentrezept, um dieses Ziel systematisch zu erreichen. Daher ist der Prozess auf die Erfahrung von Experten angewiesen. Darüber hinaus wird häufig ein Versuch-und-Irrtum-Ansatz verfolgt, der iterativ verbesserte Prototypen erfordert [2]. Besonders bei komplexen Produkten verlangsamt dieses Hindernis den Entwicklungsprozess und erhöht somit die Kosten. Daher wäre ein systematischer, regelbasierter und damit automatisierbarer Ansatz wünschenswert, der nicht auf Prototypen angewiesen ist. In Anbetracht der Definition von Qualität, ist es naheliegen die sensorisch taktilen Schwingungseigenschaften explizit zu quantifizieren, um sie direkt in physikalische Schwingungseigenschaften zu übersetzen. Für diese Vision müssen jedoch drei Voraussetzungen erfüllt sein:

1. Der Designer benötigt eine taktile Sprache, um mit potenziellen zukünftigen Nutzern über alle relevanten sensorischen Wahrnehmungseigenschaften der präsentierten Vibration zu kommunizieren.
2. Ein Modell sollte diese Wahrnehmungseigenschaften in physikalische d.h. spektrale und temporale Schwingungseigenschaften übersetzen.
3. Es ist möglich, die erwarteten Wahrnehmungseigenschaften von Vibrationen, die man sich in einem bestimmten Kontext vorstellt, d.h. ohne dass Vibrationen präsentiert werden, so zu bewerten, dass die Bewertung für die in diesem Kontext tatsächlich erlebten Vibrationen repräsentativ ist.

## Sensorische Wahrnehmungsmerkmale als Mittel der Kommunikation

Die Ergebnisse [3] zeigen, dass sich der sensorisch taktile Wahrnehmungsraum von Ganzkörperschwingungen durch die sechs Wahrnehmungsmerkmale „auf und ab“, „kribbelnd“, „schwach“, „wiederholend“, „gleichmäßig“ und „nachschießend“, hinreichend repräsentieren lässt.

## Übersetzung von Bewertungsprofilen der sensorischen Wahrnehmungsmerkmale in Schwingungen

Eine alleinige Quantifizierung der sensorischen Wahrnehmungseigenschaften ist nicht ausreichend. Es ist auch notwendig, sie in physikalische Parameter zu übersetzen, d.h. Pegel, Frequenz usw., vorzugsweise auf automatische Wie-

se. Ein Ansatz wäre die Erstellung einer Datenbank mit konkreten Szenen und ihren entsprechenden Schwingungen [4]. Ein explizites Modell wäre jedoch dem Datenbankansatz vorzuziehen, der darauf angewiesen ist, viele Daten zu enthalten, so dass keine Lücken oder Leerstellen im Wahrnehmungsraum verbleiben. [5], [6] untersuchten ebenfalls die Beziehung zwischen physikalischen Parametern und Wahrnehmungsmerkmalen. Sie konnten jedoch keine kontinuierliche Beziehung finden. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass sie bei der Auswahl der Stimuli, Stimuli mit systematisch variierten Parametern und nicht systematisch variierte Stimuli zusammenfassten. Die Ergebnisse für eine Auswahl von aus realen Ganzkörperschwingungen abstrahierten Stimuli die systematisch in Pegel, Frequenz und Modulationsfrequenz variiert wurden, in [3] legen nahe, dass es eine kontinuierliche Beziehung zwischen physikalischen Schwingungseigenschaften und Wahrnehmungsmerkmalen gibt, die für die Erstellung von Modellen geeignet ist.

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wurde von [7] eine Übersetzung in plausible Ganzkörperschwingungen für virtuelle Umgebungen mit kurzen Fahrzeugszenen mit quasistationären Schwingungen oder einzelnen impulsartigen Ereignissen versucht. Die Synthese basierte auf Wahrnehmungsprofilen der sechs Wahrnehmungsmerkmale, die im vorherigen Abschnitt erwähnt wurden. Diese Profile wurden für aufgezeichneten audiovisuellen taktile Szenen mit Ganzkörperschwingungen erhoben. Durch Minimierung des euklidischen Abstands zwischen dem Wahrnehmungsprofil der aufgezeichneten Szenen und den Wahrnehmungsprofilen der abstrahierten Stimuli aus [3] im sechsdimensionalen Wahrnehmungsmerkmalsraum wurde derjenige Stimulus aus der Datenbank ausgewählt, der der aufgezeichneten Vibration hinsichtlich der Wahrnehmung am ähnlichsten ist. Damit wurde das Wahrnehmungsprofil in eine synthetische Vibration übersetzt. Nach diesem Schritt wurden die reale Vibration und die synthetische Vibration auf ihre Plausibilität im Kontext der aufgezeichneten audiovisuellen Szene bewertet. Die Ergebnisse zeigten, dass die Plausibilitätsbewertungen sehr ähnlich sind, d. h. sich nicht signifikant unterscheiden. Dies deutet darauf hin, dass diese sechs Wahrnehmungsmerkmale ausreichen, um den sensorisch taktilen Wahrnehmungsraum von Ganzkörperschwingungen zu beschreiben. Es deutet auch darauf hin, dass die Bewertungen dieser Attribute ausreichen, um sie in Wahrnehmungsmerkmale zu übersetzen, die die gewünschten Wahrnehmungsmerkmale für kurze Szenen hervorrufen, deren Attributbewertungen sich im Laufe der Zeit nicht ändern. Längere Szenen, bei denen sich die Vibrationen im Laufe der Zeit langsam verändern, müssten als eine Reihe von aufeinanderfolgenden Segmenten behandelt werden, deren Wahrnehmungsmerkmale sich im Laufe der Zeit ändern.

## Fokus dieser Studie: Bewertung der erwarteten sensorischen Wahrnehmungseigenschaften

Bei der Beurteilung der Wahrnehmungsqualität vergleichen die Nutzer den präsentierten Stimulus implizit mit ihren Erwartungen an einem Anwendungskontext hinsichtlich der relevanten Wahrnehmungsmerkmale. Da zu Beginn des Entwicklungsprozesses zunächst keine Prototypen vorliegen, ist es notwendig, die erwarteten Wahrnehmungseigenschaften der Zielvibration ohne Vibrationsdarbietung zu quantifizieren. Die Ergebnisse von [8] legen nahe, dass es möglich ist, taktile Reize mit Wahrnehmungsmerkmalen zu assoziieren, die in der auditiven Modalität vermittelt werden. Es stellt sich daher die Frage, ob die Bewertungen der erwarteten taktilen Eigenschaften einer vorgestellten Vibration eines Kontextes mit den Bewertungen vergleichbar sind, die man durch das Erleben einer realen Vibration dieses Kontextes erhält. Zur Untersuchung dieser Frage wurde eine repräsentative Menge von Fahrzeugszenen in zwei Darstellungsmodi präsentiert: verbale Beschreibung der Szene ohne jegliche Reproduktion (erwartet) und audiovisuelle taktile Szene (multimodal). In jedem Modus sollten die Versuchspersonen die sechs Wahrnehmungsmerkmale, die den sensorisch taktilen Wahrnehmungsraum von Ganzkörperschwingungen ausreichend repräsentieren [3], bewerten. Da die aus quantifizierten Wahrnehmungseigenschaften übersetzte Vibration im zukünftigen Nutzungsszenario in der Regel in einen audiovisuellen Kontext eingebettet wird, wurde angenommen, dass die multimodalen Bewertungen die Referenzbewertungen darstellen, da sie bereits potenzielle multimodale Interaktions- oder Integrationseffekte beinhalten.

## Experiment

### Design

Jedes der sechs Wahrnehmungsmerkmale „auf und ab“, „kribbelnd“, „schwach“, „wiederholend“, „gleichmäßig“ und „nachschiebend“ aus [3] wurde für 19 Fahrzeugszenen bewertet. Diese wurden jeweils durch verbale Beschreibung (Modus „erwartet“) und multimodale Darbietung (Modus „multimodal“) präsentiert. Um Priming durch die multimodale Darbietung zu vermeiden, wurden die Szenen im erwarteten Modus vor den Szenen im multimodalen Modus präsentiert. Unabhängig vom Präsentationsmodus wurde jedes Attribut für jede der 19 Szenen auf der gleichen quasi-kontinuierlichen Skala mit äquidistanten verbalen Ankern "nicht", "wenig", "mittel", "ziemlich" und "sehr" bei 0, 25, 50, 75 und 100 bewertet [9], die in einer MATLAB-GUI implementiert wurde. Alle Stimuli wurden in zufälliger Reihenfolge pro Modus präsentiert. Die Aufgabe im multimodalen Modus bestand darin, die tatsächlich wahrgenommenen Eigenschaften der Vibration der Szene zu bewerten. Die Aufgabe des verbalen Modus bestand darin, sich die erwarteten Eigenschaften der Vibration anhand der verbalen Beschreibung der Szene vorzustellen, z. B. "Stellen Sie sich vor, Sie fahren mit einem Mittelklassewagen über eine raue Kopfsteinpflasterstraße mit einer konstanten Geschwindigkeit von 30 km/h. Wie würde sich die Vibration anfühlen?".

## Stimuli

Die Stimuli bestanden aus Szenen mit einer Dauer von 4 s bis 17 s in einem Mittelklassewagen (Renault Scenic 1.6), die alltägliche Erfahrungen mit Ganzkörpervibrationen repräsentieren. Die Parameter Geschwindigkeit, Betriebszustand und Straßenoberfläche wurden systematisch variiert, um die häufigsten Situationen im Alltag zu berücksichtigen. Zwölf quasistationäre Szenen wurden aufgezeichnet, bei denen die Fahrbahnoberfläche und der Betriebszustand konstant gehalten wurden. Sieben Szenen mit impulsartigen Ereignissen, z. B. das Überfahren von Gullydeckeln, wurden ebenfalls aufgenommen. Eine Übersicht über die aufgezeichneten Szenen ist in Tabelle 1 zu finden. Zur Aufzeichnung der in den Fahrer eingeleiteten vertikalen Ganzkörperschwingungen wurden ein Sitzkissen-Beschleunigungssensor (B&K 4515B) und ein Kistler-Beschleunigungssensor 8305B10 verwendet. Für die Videoaufnahmen wurde eine Canon EOS 600D Kamera mit optischem Bildstabilisator verwendet. Der Ton wurde mit zwei B&K 2671 ICP-Mikrofonen aufgenommen, die an der Kopfstütze neben den Ohren des Fahrers angebracht waren. Die multimodalen Szenen setzten sich aus diesen Aufnahmen zusammen. Die Stimuli des erwarteten Modus bestanden aus verbalen Beschreibungen des Szeneninhalts: Fahrzeugtyp, Geschwindigkeit, Betriebszustand (konstante Geschwindigkeit, Beschleunigung), Straßenoberfläche.

## Versuchsaufbau

Das Experiment wurde in einem Virtual-Reality-Labor [10] durchgeführt, in dem Bild, Ton und Vibration wiedergegeben werden können (Abbildung 1). Die aufgezeichneten vertikalen

**Tabelle 1:** Übersicht über die aufgezeichneten multimodalen Szenen

Nr.	Kategorie	v	Belag
1	nicht-transient	5 bis 50	Kopfstein (fein)
2	nicht-transient	30	Kopfstein (fein)
3	nicht-transient	50	Kopfstein (fein)
4	nicht-transient	5 bis 50	Kopfstein (grob)
5	nicht-transient	30	Kopfstein (grob)
6	nicht-transient	50	Kopfstein (grob)
7	nicht-transient	50	Asphalt (Landstraße)
8	nicht-transient	70	Asphalt (Landstraße)
9	nicht-transient	5 bis 50	Asphalt
10	nicht-transient	30	Asphalt
11	nicht-transient	50	Asphalt
12	nicht-transient	100	Beton
13	transient	100	Belagwechsel
14	transient	40	Bahnschienen
15	transient	50	Dehnungsfuge
16	transient	100	Dehnungsfuge
17	transient	30	Gullydeckel Kopfstein
18	transient	30	Gullydeckel Asphalt
19	transient	50	Gullydeckel Asphalt

len Ganzkörperschwingungen wurden mit einer pegelabhängigen Frequenz von 7 bis 15 Hz getrennt. Die tiefpassgefilterten Schwingungen wurden mit einer Steward-Motion-Plattform und die hochpassgefilterten Schwingungen mit einem elektrodynamischen Shaker präsentiert. Die potenziellen individuellen Unterschiede in der Vibration, die verschiedenen Versuchspersonen z. B. aufgrund ihres Gewichts dargeboten wurden, wurden mit einem FIR-Filter [11] kompensiert, um die aufgezeichnete Vibration genau zu reproduzieren. Für die sieben impulsartigen Szenen wurde ein Untertitel "rate now" für die Dauer des impulsartigen Ereignisses präsentiert. Ein Projektor wurde verwendet, um die Videos der Szene für den multimodalen Modus zu präsentieren. Der Ton wurde im multimodalen Modus mit einem Wellenfeldsynthesesystem mit 464 Lautsprechern als fokussierte Schallquellen an den Ohren der Probanden präsentiert.

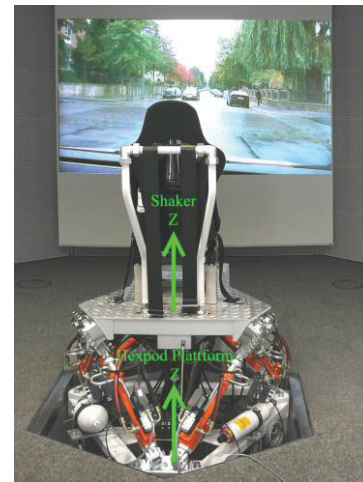


Abbildung 1: Wiedergabesystem zur Erzeugung von auditiv-visuell-taktilen Stimuli

**Probanden**

Insgesamt 22 Probanden (13 Männer, 9 Frauen) mit einem Durchschnittsalter von 30 Jahren (19 bis 61 Jahre) nahmen an dem Experiment teil. Die Studie wurde mit dem Einverständnis und der schriftlichen Zustimmung aller Teilnehmer durchgeführt.

**Ergebnisse**

Abbildung 2 zeigt ein Diagramm mit den mittleren Bewertungen für jedes Wahrnehmungsmerkmal und den 95%-Konfidenzintervallen für jedes Szenario und jede Szene. Das Wahrnehmungsmerkmal und die dargestellte Szene haben einen deutlichen Einfluss auf die Bewertungsmittelwerte, während der Präsentationsmodus insgesamt einen viel geringeren Einfluss zu haben scheint. Der mittlere Bewertungsunterschied zwischen dem erwarteten Modus und dem multimodalen Modus über alle Szenen und Wahrnehmungsmerkmale liegt bei nur 2 Punkten auf der 100-Punkte-Skala. Der

Bereich der Konfidenzintervalle für den erwarteten Modus liegt bei 4 bis 16 Skaleneinheiten und für den multimodalen Modus bei 4 bis 15 Punkten. Um diese Ergebnisse aus statistischer Sicht zu bewerten, wurde mit SPSS eine dreifache ANOVA mit Messwiederholung mit den Faktoren Szene, Wahrnehmungsmerkmal und Präsentationsmodus (multimodal vs. erwartet) durchgeführt. Der Faktor Szene zeigt einen hochsignifikanten Effekt ( $p < 0,001$ ), was bestätigt, dass die sensorisch-taktilen Attribute die Wahrnehmungsunterschiede der Vibration erklären können. Der Faktor Wahrnehmungsmerkmal zeigt ebenfalls einen hochsignifikanten Effekt ( $p < 0,001$ ), was bestätigt, dass die Wahrnehmungsmerkmale nicht redundant sind. Der Faktor Präsentationsmodus hat jedoch keinen signifikanten Effekt auf die mittleren Wahrnehmungsmerkmale über alle Attribute und alle Szenen. Ein paarweiser Kontrast für den Unterschied zwischen multimodalem und erwartetem Modus ergab ein 95%-Konfidenz-

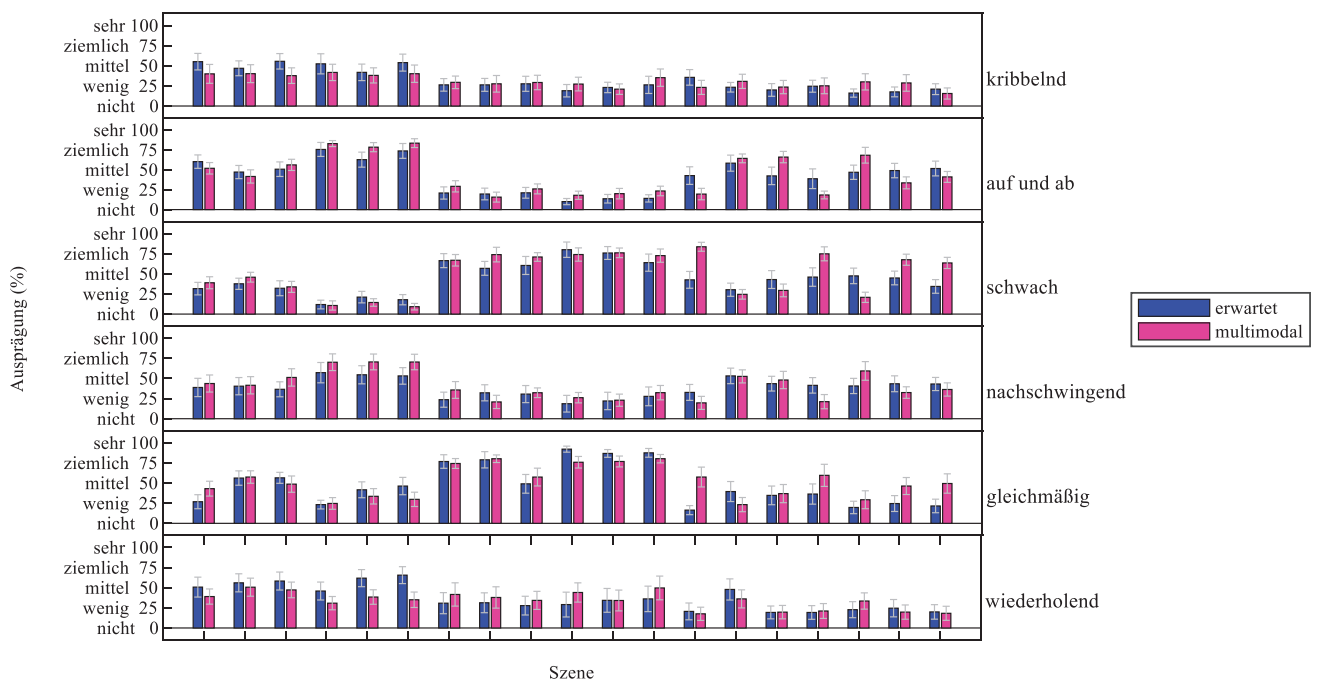


Abbildung 2: Mittelwerte und 95%-Konfidenzintervalle der Wahrnehmungsmerkmale für jede Szene und beide Präsentationsmodi.

tervall für die Effektgröße von -1 bis 4 Punkten. Es ist also unwahrscheinlich, dass der kleine Unterschied zwischen den Präsentationsmodi ein Fünftel des 25-Punkte-Skalenintervalls oder 1/25 der 100-Punkte-Bewertungsskala überschreitet. Dies deutet darauf hin, dass es für praktische Zwecke keinen relevanten Unterschied zwischen den Modi gibt. Während der Gesamteinfluss der Darstellungsweise nicht signifikant ist, konnten bei einigen Wahrnehmungsmerkmalen für einige Szenen Unterschiede von etwa einem Viertel der Ratingskala festgestellt werden. Die sehr allgemeinen verbalen Beschreibungen unterschätzen möglicherweise die Varianz, die in der gesamten Klasse (bspw. Kopfsteinpflaster Szenen) der Szene auftritt. Wenn die multimodale Szene atypisch für die verbal vermittelte Szenenkategorie war, dann hätten die Versuchspersonen z.B. die Eigenschaften einer typischen Fahrt über Kopfsteinpflaster mit einer atypischen verglichen. Dies unterstreicht die Notwendigkeit, genaue verbale Beschreibungen zu verwenden.

## Diskussion

Die Ergebnisse zeigen, dass die erwarteten taktilen Eigenschaften den tatsächlichen hervorgerufenen taktilen Wahrnehmungseigenschaften, eines entsprechenden realen auditiv-visuellen Kontexts werden, ähneln. Damit lassen sich die erwarteten Eigenschaften auch ohne die Darbietung von Vibrationen. Zusammen mit der in [7] demonstrierten Synthese aus solchen taktilen Wahrnehmungseigenschaften, deuten diese Ergebnisse darauf hin, dass Vibrationsparameter direkt aus den erwarteten taktilen Eigenschaften abgeleitet werden können, was die Vision eines prototypreduzierten oder sogar prototyplosen taktilen Designprozesses ermöglicht. Der Entwicklungsingenieur könnte die erwünschten taktilen Wahrnehmungsmerkmale durch zukünftige Nutzer z.B. über das Internet bewerten lassen, ohne dass eine Vibration dargeboten werden müsste. Aus Bewertungen ließen sich Vibrationen erzeugen, die mit hoher Wahrscheinlichkeit den Erwartungen der Nutzer entsprechen. Um diese Ergebnisse zu bestätigen, sollten weitere Szenarien untersucht werden, insbesondere Szenarien, die für Laien eher ungewohnt sind, oder Szenarien mit sich im Laufe der Zeit ändernden Wahrnehmungsmerkmalen. Eine weitere interessante Frage wäre die Ausweitung der Ergebnisse auf andere Anregungsorte, z. B. Finger oder Hand. Aus [12] geht hervor, dass Hand-Arm- und Ganzkörperschwingungen mit denselben Wahrnehmungsmerkmalen beschrieben werden und ähnliche Wahrnehmungsbewertungen hervorrufen. Für ein Design, das nicht durch physikalische Parameter eingeschränkt ist, wäre ein Synthesemodell ausreichend. In vielen Anwendungen werden Schwingungen jedoch z. B. durch Aktoren mit begrenzten Fähigkeiten oder durch Maschinen erzeugt, deren Erregung nicht beliebig durch Dämpfung oder Resonanzfrequenzverschiebungen variiert werden kann. Ein Analysemodell könnte den Bereich der Wahrnehmungsmerkmale vorhersagen, der durch die eingeschränkte Schwingung hervorgerufen wird. Das Ausmaß der Diskrepanz zwischen den taktilen sensorischen Eigenschaften der erwarteten und der spezifischen Vibration könnte einen Prädiktor für die taktile Qualität darstellen.

## Danksagung

Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen der Exzellenzstrategie des Bundes und der Länder – EXC 2050/1 – Projektnummer 390696704 – als Exzellenzcluster „Centre for Tactile Internet with Human-in-the-Loop“ (CeTI) der Technischen Universität Dresden.

## Literatur

- [1] U. Jekosch, “Basic Concepts and Terms of ‘Quality’, Reconsidered in the Context of Product-Sound Quality,” *acta acustica united with Acustica*, vol. 90, no. 6, pp. 999–1006, 2004.
- [2] O. Schneider, K. MacLean, C. Swindells, and K. Booth, “Haptic experience design: What hapticians do and where they need help,” *International Journal of Human-Computer Studies*, vol. 107, pp. 5–21, 2017.
- [3] R. Rosenkranz and M. E. Altinsoy, “Mapping the Sensory-Perceptual Space of Vibration for User-Centered Intuitive Tactile Design,” *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 14, no. 1, pp. 95–108, 2021.
- [4] A. Israr, S. Zhao, K. Schwalje, R. Klatzky, and J. Lehman, “Feel Effects: Enriching Storytelling with Haptic Feedback,” *ACM Trans. Appl. Percept.*, vol. 11, no. 3, pp. 11:1–11:17, 2014.
- [5] H. Seifi and K. E. MacLean, “Exploiting haptic facets: Users’ sensemaking schemas as a path to design and personalization of experience,” *International Journal of Human-Computer Studies*, vol. 107, pp. 38–61, 2017.
- [6] H. Seifi, K. Zhang, and K. E. MacLean, “VibViz: Organizing, visualizing and navigating vibration libraries,” in *World Haptics Conference (WHC), 2015 IEEE*, 2015, pp. 254–259.
- [7] R. Rosenkranz and M. E. Altinsoy, “Tactile Design: Translating User Expectations into Vibration for Plausible Virtual Environments,” in *2019 IEEE World Haptics Conference (WHC)*, 2019, pp. 307–312.
- [8] E. Hoggan and S. Brewster, “Designing Audio and Tactile Crossmodal Icons for Mobile Devices,” in *Proceedings of the 9th International Conference on Multimodal Interfaces*, 2007, pp. 162–169.
- [9] B. Rohrmann, “Empirische Studien zur Entwicklung von Antwortskalen für die sozialwissenschaftliche Forschung,” *Zeitschrift für Sozialpsychologie*, vol. 107, no. 5, pp. 222–245, 1978.
- [10] M. E. Altinsoy, U. Jekosch, J. Landgraf, and S. Merchel, “Progress in Auditory Perception Research Laboratories - Multimodal Measurement Laboratory of Dresden University of Technology,” in *Audio Engineering Society Convention 129*, 2010, pp. 1–8.
- [11] M. E. Altinsoy and S. Merchel, “BRTF (Body-Related Transfer Function) and Whole-Body Vibration Reproduction Systems,” in *Audio Engineering Society Convention 130*, 2011, pp. 1–5.
- [12] R. Rosenkranz, S. Gruschwitz, M. Wilberg, M. E. Altinsoy, and S. Merchel, “Identification and Evaluation of Perceptual Attributes for Periodic Whole-Body and Hand-Arm Vibration,” in *Euro Haptics 2018*, 2018, pp. 113–124.