

Taktil Design: Übersetzung von Nutzererwartungen in Vibrationen zur Gestaltung von plausiblen virtuellen Umgebungen

Robert Rosenkranz¹, M. Ercan Altinsoy²

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

Einleitung

Taktil Design bezeichnet den wahrnehmungszentrierten Gestaltungsprozess von Schwingungen für Produkte oder für virtuelle Umgebungen. Bisher wird dieser Prozess ganz oder teilweise nach dem Prinzip Versuch und Irrtum durchgeführt. D. h. ein Prototypenentwurf wird in iterativen Nutzerstudien getestet. In diesen Studien wird ermittelt, in wie weit der Entwurf mit den impliziten Nutzererwartungen übereinstimmt (Abbildung 1, linker Pfad). Über die Erfahrung des Entwurfsingenieurs kann dieser Prozess lediglich für stark ähnliche Nutzungskontexte beschleunigt werden, während die Erfahrung häufig nicht auf neuartige Nutzungskontexte übertragbar ist. Diese Vorgehensweise verlängert den Entwurfsprozess und erhöht daher die Kosten. Damit ergibt sich ein Bedarf nach einem effektiveren, wissens- und damit modellgetriebenen Entwurfsprozess. Ein Ansatzpunkt besteht darin, die Nutzererwartungen explizit zu erheben und in Vibrationsparameter zu überführen. Dadurch könnte man möglicherweise mehrere Iterationsschritte überflüssig machen (Abbildung 1, rechter Pfad). Um die taktilen Erwartungen zu quantifizieren, muss verstanden werden, wie Produktnutzer über ihre Vibrationswahrnehmung kommunizieren, denn diese können nicht direkt Expertengrößen wie Pegel und Frequenz zur Beschreibung verwenden. Um die quantifizierten Erwartungen zu übersetzen, müsste die Beziehung zwischen taktilen Wahrnehmungsmerkmalen und den physikalischen Vibrationseigenschaften bestimmt werden.

Bestimmung einer sensorischen Beschreibungssprache für Vibrationen

Im Gegensatz zu Experten, die physikalische Vibrationsparameter zu Beschreibung von Vibrationen nutzen können, sind nicht-Experten eher in der Lage Wahrnehmungseigenschaften, welche durch alltägliche Vibrationen hervorgerufen werden, zu beschreiben. Mit dieser Frage beschäftigt

sich der „Ecological Approach to Perception“, welchen Gaver [1] für die auditive Modalität beschreibt. Im Alltag sind nicht nur Geräusche sondern auch Vibrationen Träger von Information (z. B. „kribbelnd“) über die Umgebung. Für das Ziel des taktilen Designs sind signalvermittelte, d.h. die sensorische Wahrnehmung unmittelbar beschreibende Merkmale von Interesse. In vorherigen Studien wurden solche Wahrnehmungsmerkmale, welche von sinusoidalen [2–4], Amplitudenmoduliert-sinusoidalen [5], rauschartigen [6] Ganzkörperschwingungen (GKS) hervorgerufen werden, bestimmt. Dieselbe Vorgehensweise wurde auch auf impulsartige Schwingungen übertragen. Im Folgenden wird der Datensatz, welcher aus diesen Studien resultierte, beschrieben.

Ganzkörperschwingungen

Alltäglich GKS sind Träger von Informationen über die Umgebung. Zur Erfassung dieser Informationen in Form von taktilen Wahrnehmungsmerkmalen, müsste eine unendliche Anzahl an alltäglichen GKS aufgenommen werden. Daher wurden alltäglichen GKS basierend auf ihren zugrundeliegenden Anregungsmustern abstrahiert. Periodische Anregungen, wie sie bspw. beim Befahren einer Kopfsteinpflasterstraße auftreten, wurden als sinusoidale Schwingung abstrahiert. Korrelierte periodische Anregungen, wie sie bspw. in Form von Motorordnungen eines Verbrennungsmotors verursacht werden, wurden als amplitudenmodulierte Schwingung abstrahiert. Stochastische Breitbandanregung, wie sie bspw. beim Befahren einer Asphaltstraße auftreten, wurden als bandbegrenzt weißes Rauschen abstrahiert. Impulsartige Anregungen eines Feder-Masse-Dämpfersystems, wie sie bspw. beim Überqueren einer Dehnungsfuge auftreten, wurden in Form einer abklingenden sinusoidalen Schwingung abstrahiert. Diese Abstrahierung ermöglichte die systematische Variation der Vibrationsparameter Beschleunigungspegel relativ zur Fühlschwelle (Sensation Level, SL), (Träger- oder Mitten-) Frequenz, Modulationsfrequenz, Bandbreite und Abklingkonstante. Durch Variation der Signalparameter dieser 4 Anregungsmuster wurden 91 Stimuli erzeugt. Die abstrahierten GKS sind alltäglichen GKS ähnlich genug, um relevante sensorische Wahrnehmungsmerkmale hervorzurufen.

Sensorisch-taktile Wahrnehmungsmerkmale

Die 91 Stimuli wurden jeweils 18 bis 20 Probanden über das Wiedergabesystem in Abbildung 2 dargeboten und die hervorgerufenen sensorischen Wahrnehmungsmerkmale in einem freien Interview bestimmt. Die 21 am häufigsten genannten Merkmale wurden anschließend auf einer quasikontinuierlichen Rohrmannskala mit verbalen Anker für jeden der 91 Stimuli auf ihre Ausprägung bewertet. Mit Hilfe einer Hauptkomponentenanalyse wurden sechs sensorische Wahrnehmungsmerkmale („schwach“; „auf und

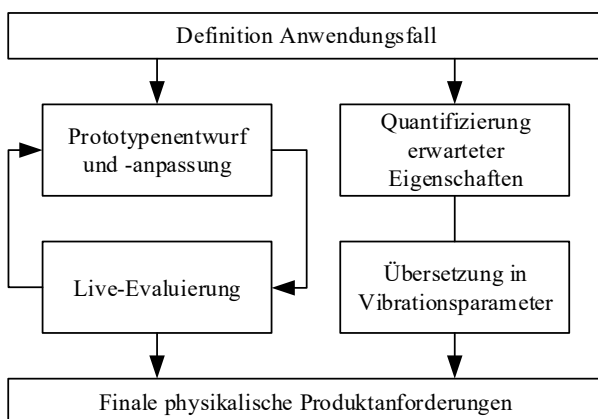


Abbildung 1: Iteratives taktil Design (links) und erwartungsbasiertes taktil Design (rechts).

ab“, „kribbelnd“, „wiederholend“, „gleichmäßig“ und „nachschiebend“) ausgewählt, welche über 91% der auftretenden Varianz der Merkmalsbewertungen erklären. Diese sechs sensorischen Wahrnehmungsmerkmale bilden die taktile Beschreibungssprache, mit denen die sensorische Wahrnehmung von GKS charakterisiert werden kann.

Beziehung zwischen Vibrationsparametern und sensorisch-taktilen Wahrnehmungsmerkmalen

Aus den Wahrnehmungsmerkmalsbewertungen resultierte eine Datenbank mit 91 Vibrations-Beschreibungsprofil-Paarungen. Vibrationen sind durch die Parameter Beschleunigungspegel, (Träger- oder Mitten-) Frequenz, Modulationsfrequenz, Bandbreite und Abklingkonstante beschrieben. Die Beschreibungsprofile bestehen aus den Merkmalsbewertungen der sechs sensorischen Wahrnehmungsmerkmale „schwach“, „auf und ab“, „kribbelnd“, „wiederholend“, „gleichmäßig“ und „nachschiebend“.

Nutzererwartungen als Basis für taktilen Design

Die taktile Beschreibungssprache, bestehend aus den sechs sensorischen Wahrnehmungsmerkmalen und ihrer Beziehung zu GKS bildet die Grundlage für diese Studie. Es sollte untersucht werden, ob eine erwartungsgemäße Vibrationssynthese für einen Situationskontext für plausible virtuelle Umgebungen möglich ist. Die im Folgenden beschriebene Vorgehensweise ist in Abbildung 3 dargestellt.

Quantifizierung von Nutzererwartungen an GKS

Zunächst wurde eine repräsentative Menge von 19 Fahrzeugszenen in einem Mittelklassefahrzeug mit GKS ausgewählt, welche sich in Straßenbelag und Geschwindigkeit unterscheiden. Weiterhin wurden impulsartige Einzelereignisse wie das Überqueren von Dehnungsfugen oder Gullideckeln ausgewählt (siehe Abbildung 1, Aufgenommene Szene). Für die optische Aufnahme im Fahrzeug wurde eine

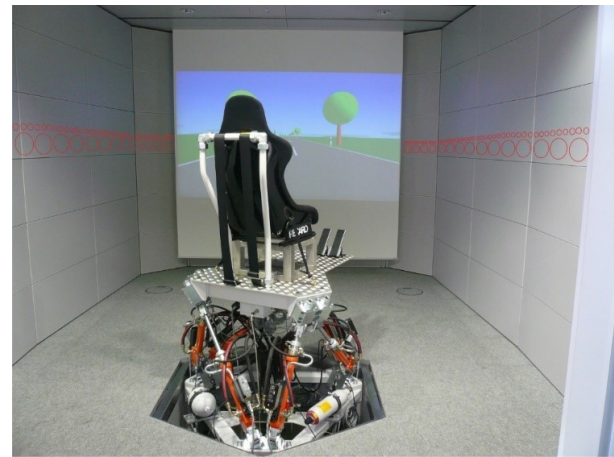


Abbildung 2: Wiedergabesystem zu Generierung der Audio-Visuell-taktilen, virtuellen Umgebung zum Vergleich der Plausibilität der originalen mit den synthetisierten Vibrationen

Canon EOS 600D Kamera mit optischem Bildstabilisator und für die akustische Aufnahme zwei B&K 2671 ICP Mikrofone neben der Kopfstütze verwendet. Vertikale GKS wurden unter 4 Hz mit einem Kistler 8305B10 Beschleunigungssensor und über 4 Hz mit einem B&K 4515B Sitzkissenbeschleunigungsaufnehmer aufgezeichnet. Anschließend wurden diese multimodalen Szenen in einer virtuellen Umgebung [7] dargeboten (siehe Abbildung 2). Optische Aufnahmen wurden über einen Full-HD Projektor und akustische Aufnahmen als fokussierte Punktschallquellen neben dem Probandenkopf über ein Wellenfeldsynthesesystem dargeboten. Vibrationen wurden unter 15 Hz über eine Hydraulische Bewegungsplattform und über 15 Hz über einen elektrodynamischen Shaker präsentiert. Die Übertragungsfunktion des Vibrationswiedergabesystems wurde für jeden Probanden separat ermittelt und kompensiert. 31 Nicht-Experten bewerteten die sechs Wahrnehm-

Tabelle 1: Übersicht der Szeneneigenschaften und Beschreibungsprofile der Szenen bestehend aus den erwarteten Wahrnehmungsmerkmalsbewertungen. Diese Beschreibungsprofile wurden in Vibrationen übersetzt, indem aus einer Datenbank mit rund 350 Vibrations-Beschreibungsprofil-Paarungen das ähnlichste Beschreibungsprofil bestimmt wurde.

Aufgenommene Szenen			Mittelwerte der erwarteten Merkmale						Übersetzte Vibrationsparameter				
Nummer	Geschwindigkeit	Belag	schwach	auf und ab	kribbelnd	wiederholend	gleichmäßig	nachschiebend	Sensation Level	(Mitten / Träger) frequenz	Bandbreite	Modulationsfrequenz	Abklingkonstante
1	5 bis 50	feines Kopfsteinpflaster	39	43	30	56	50	46	26 dB	9 Hz			
2	30	feines Kopfsteinpflaster	48	39	35	63	62	39	26 dB	9 Hz			
3	50	feines Kopfsteinpflaster	40	45	37	61	53	55	26 dB	9 Hz			
4	5 bis 50	Kopfsteinpflaster	16	73	45	54	25	73	36 dB	26 Hz	50 Hz		
5	30	Kopfsteinpflaster	20	70	48	64	29	69	33 dB	26 Hz	50 Hz		
6	50	Kopfsteinpflaster	17	74	41	61	34	73	36 dB	26 Hz	50 Hz		
7	50	Asphalt (Bundesstraße)	70	24	27	57	77	38	10 dB	7 Hz		2 Hz	
8	70	Asphalt (Bundesstraße)	74	12	24	56	82	21	17 dB	155 Hz		15 Hz	
9	5 bis 50	Asphalt	71	19	26	51	60	25	17 dB	9 Hz			
10	30	Asphalt	75	19	23	52	73	26	10 dB	15 Hz		5 Hz	
11	50	Asphalt	78	15	21	47	74	23	13 dB	155 Hz		15 Hz	
12	100	Beton (Autobahn)	62	19	29	62	75	29	23 dB	15 Hz			
13	100	Belagwechsel	72	19	26	31	74	23	13 dB	90 Hz			
14	40	Straßenbahnschienen	32	64	23	38	27	55	30 dB	26 Hz	50 Hz		
15	50	Dehnungsfuge	39	60	20	18	25	50	26 dB	26 Hz	50 Hz		
16	100	Dehnungsfuge	67	17	31	35	73	28	20 dB	26 Hz			
17	30	Gullideckel Kopfsteinpflaster	18	78	32	76	50	71	36 dB	9 Hz		2 Hz	
18	30	Gullideckel Asphalt	62	31	26	27	54	36	17 dB	201 Hz	400 Hz		
19	50	Gullideckel Asphalt	60	38	30	20	49	45	20 dB	201 Hz	400 Hz		

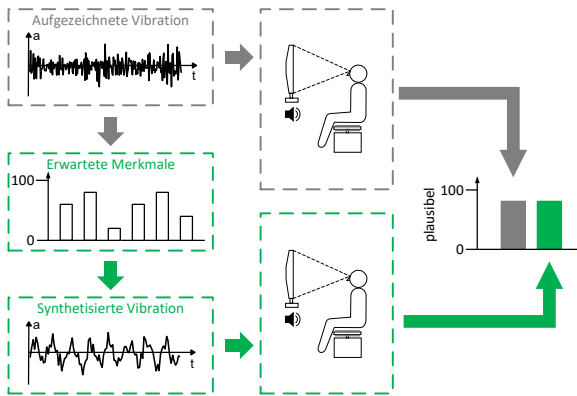


Abbildung 3: Untersuchungsmethodik zu Evaluierung des erwartungs-basierten taktilen Designs.

ungsmerkmale der taktilen Beschreibungssprache für jede der 19 Szenen auf einer quasikontinuierlichen Rohrmannskala mit verbalen Anker [8]. Die Mittelwerte dieser Bewertungen sind in Tabelle 1 dargestellt. Diese Beschreibungsprofile der Szenen repräsentieren die sensorisch-taktilen Nutzererwartungen an den jeweiligen Situationskontext.

Übersetzung von Nutzererwartungen in GKS

Aufbauend auf den Beschreibungsprofilen, welche die taktilen Erwartungen an den Situationskontext repräsentieren, sollten nun Vibrationen bestimmt werden, welche diese Erwartungen erfüllen. Plausibilität ist ein Maß für die Übereinstimmung der hervorgerufenen Wahrnehmungseigenschaften mit den erwarteten Wahrnehmungseigenschaften [9]. Demzufolge lässt sich Plausibilität als ein Ähnlichkeitsurteil im in einem n -dimensionalen Wahrnehmungsraum interpretieren, d.h. als eine euklidische Distanz zwischen dem erwarteten Wahrnehmungsobjekt und dem hervorgerufenen Wahrnehmungsobjekt. Übertragen auf die taktilen Wahrnehmung bedeutet dies, dass die sechs Wahrnehmungsmerkmale „schwach“; „auf und ab“; „kribbelnd“; „wiederholend“; „gleichmäßig“ und „nachschiebend“ diese Dimensionen repräsentieren könnten. Wenn also originale und synthetische Vibrationen gleich plausibel wahrgenommen werden, dann weil sie die gleichen Wahrnehmungsmerkmale hervorrufen. Die maximale Plausibilität ist also zu erwarten, wenn die euklidische Distanz zwischen dem erwarteten taktilen Wahrnehmungsobjekt und dem hervorgerufenen taktilen Wahrnehmungsobjekt im sensorisch-taktilen Wahrnehmungsraum minimal ist (siehe Abbildung 4). Dies ist dann der Fall, wenn die Merkmalsausprägungen eines taktilen Beschreibungsprofils einer Vibration identisch zu den Merkmalsausprägungen des erwarteten taktilen Beschreibungsprofils sind.

Ein gegebenes Beschreibungsprofil müsste sich also in die Vibrationen übersetzen lassen, deren Beschreibungsprofil (aus einer Datenbank mit Vibrations-Beschreibungsprofil-Paarungen) den geringsten euklidischen Abstand zum erwarteten Profil besitzt. Solch eine Datenbank mit Vibrations-Beschreibungsprofil-Paarungen wurde für 91 GKS-Stimuli im Abschnitt „Bestimmung einer sensorischen Beschreibungssprache für Vibrationen“ vorgestellt. Es wurden darin jeweils nur zwei Beschleunigungspegel mit einem Pegelunterschied von bis zu 26 dB je Vibrationspara-

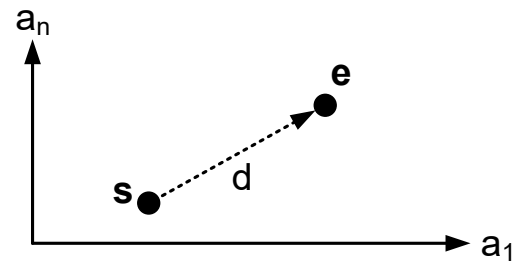


Abbildung 4: Plausibilität als euklidisches Distanzurteil d zwischen dem von einem Stimulus hervorgerufenem Wahrnehmungsobjekt s und dem erwarteten Wahrnehmungsobjekt e im sechs-dimensionalen sensorisch-taktilen Wahrnehmungsraum mit den Dimensionen $a_1 \dots a_6$.

meterkombination verwendet. Die Unterschiedsschwelle für Vibrationspegel beträgt jedoch rund 1 dB für GKS [10]. Daher wurden zusätzliche Vibrations-Beschreibungsprofil-Paarungen durch Interpolation in 3 dB Schritten zwischen den Wahrnehmungsmerkmalsausprägungen der GKS der 10 dB Stufe und den GKS der 26 dB Stufe generiert. Basierend auf der interpolierten Datenbank, wurden für die erwarteten Beschreibungsprofile, die Vibration mit dem jeweils ähnlichsten Beschreibungsprofil bestimmt. Die Vibrationsparameter der synthetisierten GKS sind in Tabelle 1 für jede der 19 Szenen angegeben.

Validierung

Zur Überprüfung, ob die synthetisierten Vibrationen plausibel sind, d. h. die Erwartungen an die Fahrzeugszenen erfüllen, wurde ein Wahrnehmungsversuch durchgeführt. Dazu wurden zunächst die 19 audio-visuellen Szenen mit synthetisierten Vibrationen dargeboten. 22 Probanden bewerteten die Plausibilität der Vibrationen im dargestellten audio-visuellen Situationskontext. Zur besseren Einordnung der Plausibilitätsurteile, wurden anschließend in einem zweiten Block die 19 audio-visuellen Szenen mit originalen Vibrationen dargeboten. Die Szenen wurden ebenfalls mit dem in Abbildung 2 dargestellten Wiedergabesystem präsentiert. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5 dargestellt. Es ist offensichtlich, dass die Plausibilitätsurteile der synthetisierten und originalen Vibrationen sehr ähnlich ausfallen. Der paarweise Kontrast zwischen beiden Szenarien wurde mit SPSS statistisch im Rahmen einer zweifaktoriellen ANOVA mit Messwiederholung untersucht. Es zeigte sich, dass der Faktor Präsentationsmodus (synthetisiert oder original) keinen signifikanten Einfluss auf das Plausibilitätsurteil besitzt. Der mittlere Plausibilitätsunterschied zwischen originalen und synthetisierten Vibrationen beträgt lediglich rund 5 Punkte auf der 100 Punkte Plausibilitätsskala. Das Konfidenzintervall des mittleren Unterschiedes erstreckt sich von rund -2 bis 11 Punkten. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass es unwahrscheinlich ist, einen praktisch relevanten Plausibilitätsunterschied zwischen den Präsentationsmodi zu beobachten. Dieses Ergebnis impliziert, dass die synthetisierten Vibrationen die Erwartungen an die jeweilige Szene genauso erfüllen wie originale Vibrationen der Szene.

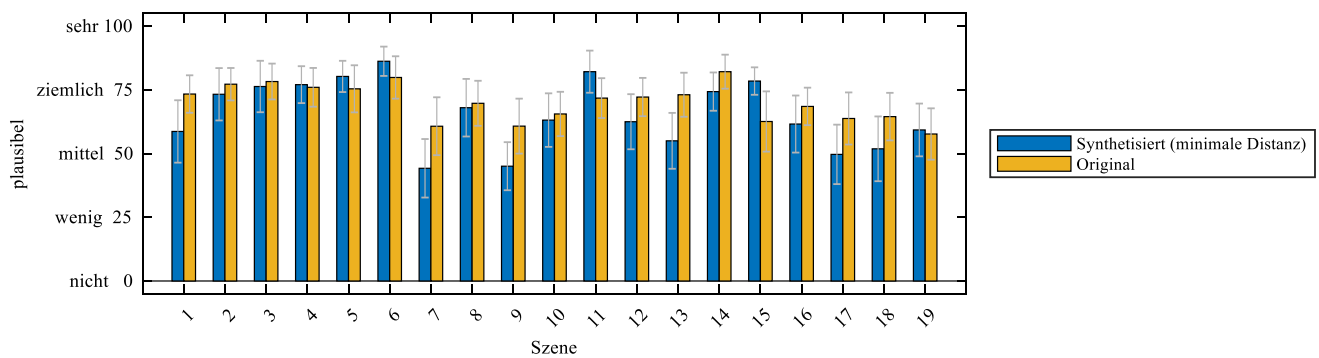


Abbildung 5: Mittelwerte und 95% Konfidenzintervalle der Plausibilitätsurteile für synthetisierte und originale Vibrationen.

Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde nachgewiesen, dass es möglich ist, taktile Erwartungen an GKS in einem gegebenen Situationskontexte in Form von Beschreibungsprofilen zu quantifizieren. Diese Beschreibungsprofile bestehen aus den Bewertungen der sensorischen Wahrnehmungsmerkmale „schwach“; „auf und ab“, „kribbelnd“, „wiederholend“, „gleichmäßig“ und „nachschiebend“. Diese Beschreibungsprofile können in Vibrationen übersetzt werden, welche als ebenso plausibel wie originale Vibrationen des Situationskontextes wahrgenommen werden und damit die Erwartungen an den Situationskontext erfüllen. Diese Ergebnisse implizieren weiterhin, dass lediglich sechs Wahrnehmungsmerkmalen, nicht nur notwendig, sondern auch hinreichend sind, zur Beschreibung der sensorischen Wahrnehmung von GKS sind. In weiteren Schritten soll überprüft werden, ob es möglich ist, die Erwartungen an einen verbal kommunizierten Situationskontext auch ohne die Präsentation von Vibrationen mit Hilfe von sensorisch-taktilen Wahrnehmungsmerkmalen zu quantifizieren. Die Ergebnisse von [11] scheinen darauf hinzudeuten, dass dies möglich ist. Der neuartige taktile Designansatz, könnte auch zur erwartungsgemäßen Gestaltung von Produkten verwendet werden. Qualität kann ebenso wie Plausibilität als ein Maß für die Übereinstimmung von hervorgerufenen Wahrnehmungsmerkmalen und erwarteten Wahrnehmungsmerkmalen interpretiert werden.

Danksagung

Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) AL1473/5-1 sowie 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 Technische Universität Dresden

Literatur

- [1] W. W. Gaver, “What in the World Do We Hear? An Ecological Approach to Auditory Event Perception,” *Ecological psychology*, vol. 5, no. 1, pp. 1–29, 1993.
- [2] M. E. Altinsoy, “Wahrnehmungsmerkmale von Ganzkörperschwingungen,” *Lärmbekämpfung*, vol. 11, no. 1, 2016.
- [3] A. Hoffmann, J. Verhey, and R. Weber, “Charakteristische Empfindungen bei sinusförmigen Ganzkörpervibrationen,” in *DAGA 2010 proceedings*, 2010.

- [4] 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.
- [5] R. Rosenkranz, S. Gruschwitz, M. E. Altinsoy, and S. Merchel, “Nutzung von Wahrnehmungsmerkmalen zur Charakterisierung von amplitudenmodulierten sinusoidalen Ganzkörperschwingungen,” in *DAGA 2017 - 43rd German Annual Conference on Acoustics*, 2017.
- [6] R. Rosenkranz, S. Gruschwitz, M. E. Altinsoy, and S. Merchel, “Wahrnehmungsmerkmale von breitbandigen Ganzkörperschwingungen im Vergleich zu sinusoidalen Ganzkörperschwingungen,” in *DAGA 2016 - 42th German Annual Conference on Acoustics*, 2016.
- [7] 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.
- [8] B. Rohrmann, “Empirische Studien zur Entwicklung von Antwortskalen für die sozialwissenschaftliche Forschung,” *Zeitschrift für Sozialpsychologie*, vol. 107, no. 5, pp. 222–245, 1978.
- [9] K. Kuhn-Rahloff, “Prozesse der Plausibilitätsbeurteilung am Beispiel ausgewählter elektroakustischer Wiedergabesituationen,” Technische Universität Berlin, 2011.
- [10] M. Morioka and M. J. Griffin, “Difference Thresholds for Intensity Perception of Whole-Body Vertical Vibration: Effect of Frequency and Magnitude,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 107, no. 1, pp. 620–624, 2000.
- [11] R. Rosenkranz, M. E. Altinsoy, M. Stamm, and S. Merchel, “Nutzung von taktilen semantischen Informationen zur Synthese von plausiblen Ganzkörperschwingungen,” in *DAGA 2013 - 39th German Annual Conference on Acoustics*, 2013.