

# Wahrnehmungsmerkmale von breitbandigen Ganzkörperschwingungen im Vergleich zu sinusoidalen Ganzkörperschwingungen

Robert Rosenkranz, Sebastian Gruschwitz, Ercan Altinsoy, Sebastian Merchel

Lehrstuhl für Kommunikationsakustik, TU Dresden, 01062, Deutschland,

Email: robert.rosenkranz@tu-dresden.de

## Einleitung

In vielen alltäglichen Situationen, wie bspw. in Fahrzeugen, Flugzeugen, Schiffen oder musikalischen Vorstellungen (Konzertsaal), treten neben Geräuschen auch Vibrationen in Form von Ganzkörperschwingungen (GKS) auf. Sobald z.B. der Fahrer eines Fahrzeugs das Gaspedal betätigt, werden Vibrationen erzeugt. Diese kann der Fahrer taktil u.a. über den Fahrzeugsitz wahrnehmen. Die spektralen und zeitlichen Strukturen von Schwingungssignalen spielen, ähnlich wie bei der Beurteilung von Hörereignissen, eine wichtige Rolle für die Beurteilung von GKS. Die Erforschung der auditiven Wahrnehmung hat bereits große Aufmerksamkeit gefunden.

Das Wissen bezüglich der Ganzkörperschwingungswahrnehmung beschränkt sich im Wesentlichen auf grundlegende psychophysikalische Eigenschaften wie Fühlschwelle [1], [2], Just Noticeable Level Difference (JNDL) [3] oder Just Noticeable Frequency Difference [3], [4]. Eine vollständigere Beschreibung der relevanten Wahrnehmungsmerkmale von GKS wäre wünschenswert. Die Begriffe zur Beschreibung sollten möglichst so gewählt werden, dass sie auch für Laien intuitiv verständlich und somit auch ohne Erläuterung vielseitig einsetzbar sind. Mit Hilfe von Modellen solcher Wahrnehmungsmerkmale kann die Analyse und Synthese von GKS vereinfacht werden. Diese Modelle ließen sich für Schwingungsdesign, bei der Gestaltung von Produkten oder der Generierung von Szenen für virtuelle Umgebungen [5] einsetzen, wo gezielt eine bestimmte Wahrnehmung beim Nutzer erzeugt werden soll.

## Wahrnehmungsmerkmale von GKS

Wahrnehmungsmerkmale von GKS wurden bereits durch Altinsoy [4] untersucht. Er hat unter anderem Wahrnehmungsmerkmale für sinusoidale GKS-Signale in einem freien Interview ermittelt und in einem Wahrnehmungsexperiment ihre Korrelation mit einfachen Signalmustern überprüft. Eine Frequenzabhängigkeit der Wahrnehmungsmerkmale konnte aufgezeigt werden. Diese Untersuchung wurde durch Rosenkranz [6] erweitert, wodurch die Beziehung zwischen dem Pegel von sinusoidalen GKS und der Ausprägung der durch sie hervorgerufenen Wahrnehmungsmerkmale aufgezeigt werden konnte.

Bei der Auswahl der Stimuli wurden psychovibratorische Forschungsergebnisse, wie Fühlschwelle [1], [2], JNDL [3], JNDF [3], [4] berücksichtigt. Es sollte möglichst der gesamte wahrnehmbare Frequenzbereich und der Pegelbereich zwischen Fühlschwelle und Belastungsgrenze [7] für einstündige GKS-Exposition abgedeckt werden. Es wurden zwei Pegelstufen gewählt: 10 dB und 36 dB über Fühlschwelle (sensation level, SL). Die in der Untersuchung verwendeten Signale sind in Abbildung 1 zu sehen.

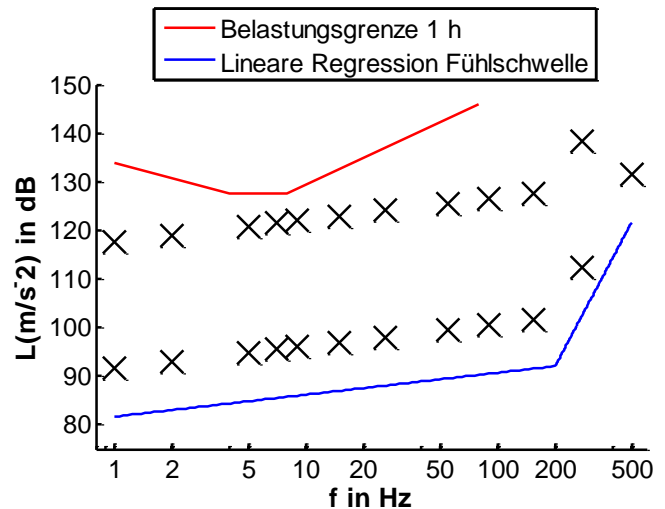


Abbildung 1: GKS-Stimuli, die für das Experiment ausgewählt wurden mit Fühlschwelle [3], [4] und Belastungsgrenze [7]

Nachdem in einem freien Interview die durch diese GKS-Signale hervorgerufenen Wahrnehmungsmerkmale bestimmt worden waren, konnte die Ausprägung der am häufigsten genannten Wahrnehmungsmerkmale bestimmt werden. Die Ergebnisse zeigten einerseits die Verwendung des Wahrnehmungsmerkmals *schwach* zur Beschreibung von Pegelunterschieden. Andererseits ist die Pegelabhängigkeit implizit in den Ausprägungen der bereits gefundenen anderen Wahrnehmungsmerkmale enthalten. Dies ist exemplarisch für 3 Wahrnehmungsmerkmale in Abbildung 2 dargestellt. Jedes der Wahrnehmungsmerkmale hat ein frequenzabhängiges Maximum. Der Ausprägungsverlauf ist für beide Pegelstufen ähnlich, unterscheidet sich jedoch in der Höhe der Ausprägung dieses Maximums. Bisher wurden im Wesentlichen solche sinusoidalen GKS-Signale betrachtet. Da reale GKS meist breitbandig sind, sollte eine Übertragbarkeit von bisherigen Ergebnissen auf breitbandige Signale in Form von weißem Rauschen untersucht werden.

Es sollten folgende Hypothesen überprüft werden:

1. Der Unterschied in der Wahrnehmung zwischen sinusoidalen und rauschartigen Signalen werden durch weitere Wahrnehmungsmerkmale beschrieben
2. Eine Sinusschwingung einer bestimmten Frequenz, führt zu einer vergleichbaren Ausprägung wie ein Schmalbandrauschen im gleichen Frequenzbereich
3. Eine Erhöhung der Bandbreite des Rauschens verringert die Ausprägung des Wahrnehmungsmerkmals

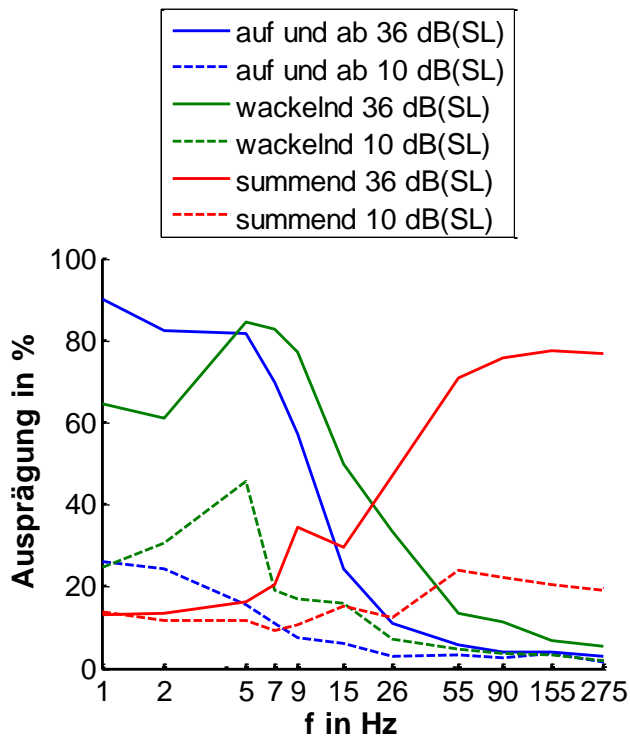


Abbildung 2: Ausprägung der pegel- und frequenzabhängigen Wahrnehmungsmerkmale *auf und ab*, *wackelnd*, *summend*

### Erweiterung der Wahrnehmungsmerkmale von breitbandigen GKS

Um mögliche weitere Wahrnehmungsmerkmale zu finden, die diese Signaltypen hervorrufen, wurde zunächst ein freies Interview durchgeführt.

#### Stimuli

Um die Vergleichbarkeit zur vorherigen Studie [6] sicherzustellen, sollten in dem dort verwendeten Frequenz- bzw. Pegelbereich Schmalbandrauschen dargeboten werden. Es wurden Schmalbandrauschen mit unterschiedlichen Bandbreiten und unterschiedlichen Mittenfrequenzen im taktil wahrnehmbaren Frequenzbereich verwendet, welcher zu hohen Frequenzen durch die stark ansteigende Fühlschwelle [2] bei ca. 400 Hz begrenzt wird. Es wurden die gleichen Pegelstufen (10 dB über Fühlschwelle bzw. 36 dB) verwendet, wobei dieser Wert auf die taktile Fühlschwelle bei der Mittenfrequenz des Rauschens bezogen ist. Da in der Literatur bisher keine Fühlschwellen für rauschartige Signale bestimmt wurden, musste stattdessen die für sinusoidale Signale ermittelte Fühlschwelle [1], [2] genutzt werden. Der wahrgenommene Diskomfort von sinusoidalen GKS ist jedoch mit schmalbandigen, rauschartigen GKS mit gleichem RMS-Pegel vergleichbar [8]. Die für die Studie verwendeten Signale sind in Abbildung 3 dargestellt.

#### Wiedergabesystem

Die Schwingungssignale wurden im *Multimodalen Messlabor* des Lehrstuhls für Kommunikationsakustik [9] präsentiert, siehe Abbildung 4. Tieffrequente Vibrationen wurden vertikal über die Stewart-Plattform und hochfrequente Vibrationen vertikal über einen elektrodynamischen Shaker dargeboten. Stimuli mit 10 dB(SL) wurden ab 7Hz und Stimuli mit 36 dB(SL) ab 15Hz über den Shaker wiedergegeben.

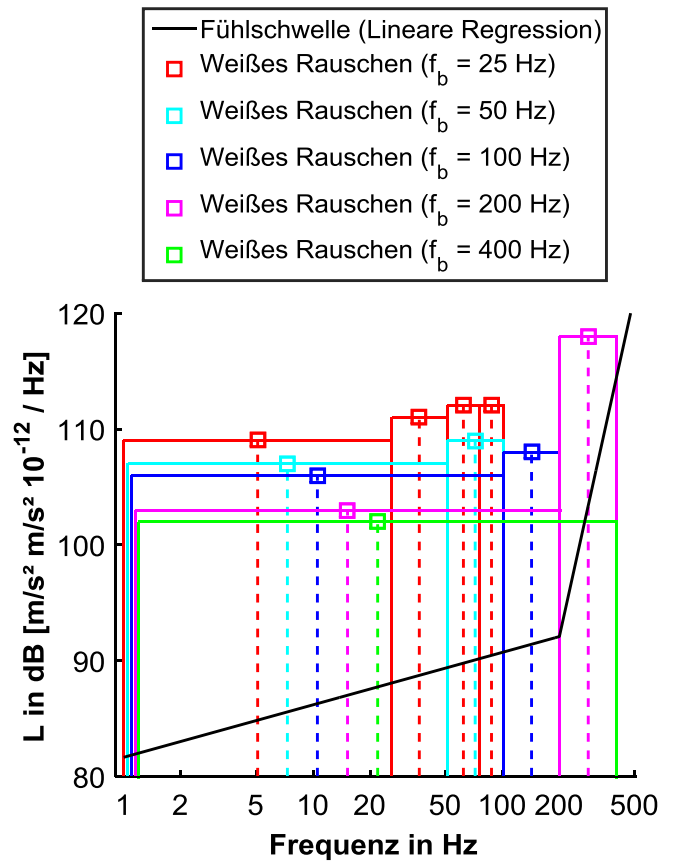


Abbildung 3: In der Studie verwendete GKS-Signale

Die probandenabhängige Übertragungsfunktion des Wiedergabesystems wurde für jede Versuchsperson individuell entzerrt [10]. Die Geräusche der Wiedergabesysteme wurden akustisch durch rosa Rauschen maskiert.

#### Versuchsdurchführung

Zur Ermittlung der Wahrnehmungsmerkmale, die durch diese Stimuli hervorgerufen werden, wurde ein freies Interview durchgeführt. Die Aufgabenstellung des Versuchs lautete: „Bitte nennen Sie die Begriffe, die Sie zur Beschreibung der folgenden Schwingungen benutzen würden. Dabei kommt es nicht darauf an wie stark oder schwach der Begriff ausgeprägt ist.“

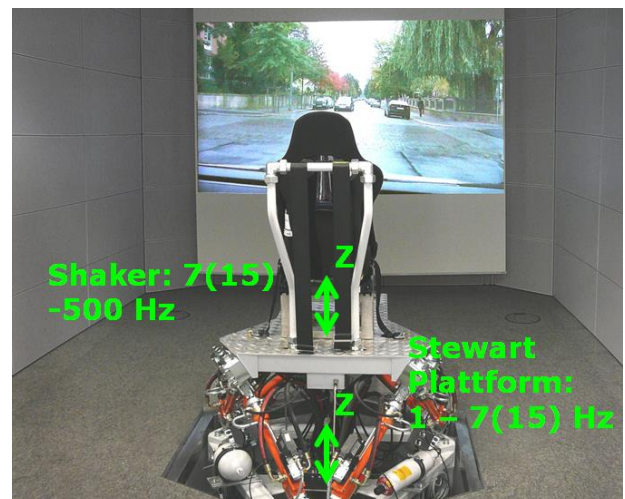


Abbildung 4: Wiedergabesystem über das die GKS-Stimuli präsentiert wurden

Um die Anknüpfbarkeit an die vorherige Studie sicher zu stellen, konnten Probanden zusätzlich zu den eigenen Begriffen auch Begriffe von einer Liste, der in der vorherigen Studie gefunden Begriffe, nennen. Alle Stimuli wurden zur Vermeidung von Reihenfolgeeffekten randomisiert dargeboten. Am Versuch nahmen 23 Probanden (15m, 8w) mit einem Durchschnittsalter von 35 Jahren (23 bis 71) teil.

### Ergebnisse

Insgesamt wurden 35 Wahrnehmungsmerkmale mit mindestens 2 Nennungen gefunden. Mit einem Thesaurus wurden Synonyme und Antonyme zusammengefasst. Die am häufigsten genannten Wahrnehmungsmerkmale sind wahrscheinlich für die meisten Probanden gut verständlich. Deswegen wurden alle Wahrnehmungsmerkmale, die bei einem Stimulus von mindestens 10% der Probanden genannt wurden, zur genaueren Betrachtung ausgewählt. Die so resultierenden häufigsten Begriffe sind in Tabelle 1 zu sehen. Für rauschartige Wahrnehmungsmerkmale wurden nur Wahrnehmungsmerkmale gefunden, die ebenfalls bei sinusoidalen Signalen gefunden wurden. Zusätzlich wurde jedoch für rauschartige Signale das Attribut *ungleichmäßig* verwendet, welche in der Tabelle als dessen Antonym *gleichmäßig* vertreten ist.

### Ausprägung der Wahrnehmungsmerkmale von breitbandigen GKS

Zur Überprüfung der anderen Hypothesen wurde im Folgenden die Ausprägung der gefunden Wahrnehmungsmerkmale in Abhängigkeit des rauschartigen GKS-Signals bestimmt.

### Versuchsdurchführung

Im zweiten Versuch wurden dieselben Stimuli wie im ersten Versuch dargeboten. Zwecks besserer Skalenausnutzung wurde vor dem Versuch ein Training mit den Extrema der Stimuli durchgeführt. Zur Vermeidung von Reihenfolgeeffekten wurden alle Stimuli randomisiert über das Wiedergabesystem dargeboten. Die Probanden nutzen zur Bewertung eine quasikontinuierliche Rohrmannskala [10], die als MATLAB GUI implementiert wurde. Es nahmen 34 Probanden (23m, 11w) mit einem durchschnittlichen Alter von 35 Jahren (16 bis 74) an diesem Versuch teil.

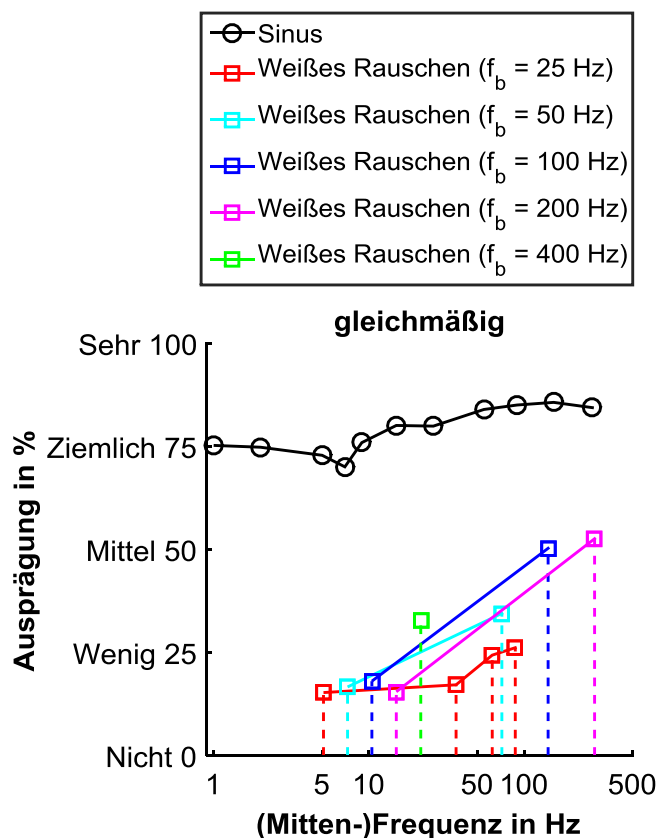
**Tabelle 1:** Tabelle mit den häufigsten Begriffen, die im freien Interview genannt wurden

Sinusoidale Signale		Rauschartige Signale	
Begriff	Nennungen	Begriff	Nennungen
schwach	259	schwach	102
kribbelnd	214	kribbelnd	48
pulsierend	194		
schlagend	189	schlagend	32
summend	173	summend	14
wackelnd	138	wackelnd	49
ruhig	133	ruhig	10
ratternd	132	ratternd	18
rauschend	109	rauschend	22
holprig	92	holprig	70
brummend	87	brummend	17
rüttelnd	78	rüttelnd	27
zittrig	77	zittrig	19
wummernd	68		
tickend	33		
auf und ab	32	auf und ab	11
		gleichmäßig	33

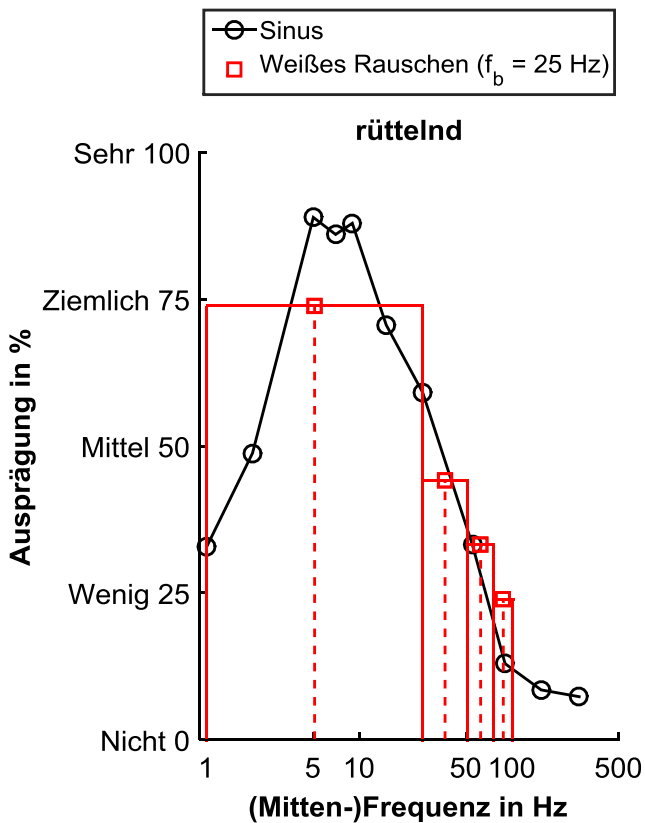
### Ergebnisse

Die Ausprägung des Attributs *gleichmäßig* für sinusoidale Signale im Vergleich zu rauschartigen Signalen (Abbildung 5) zeigt die Bestätigung der ersten Hypothese. Sinusoidalen GKS wurden als *ziemlich* bis *sehr gleichmäßig* bezeichnet, während dieses Attribut auf rauschartige GKS nur *wenig* bis *mittel* zutrif. Überraschenderweise führte das Attribut *rauschend* bei beiden Signaltypen nur zu einer Ausprägung von *wenig*.

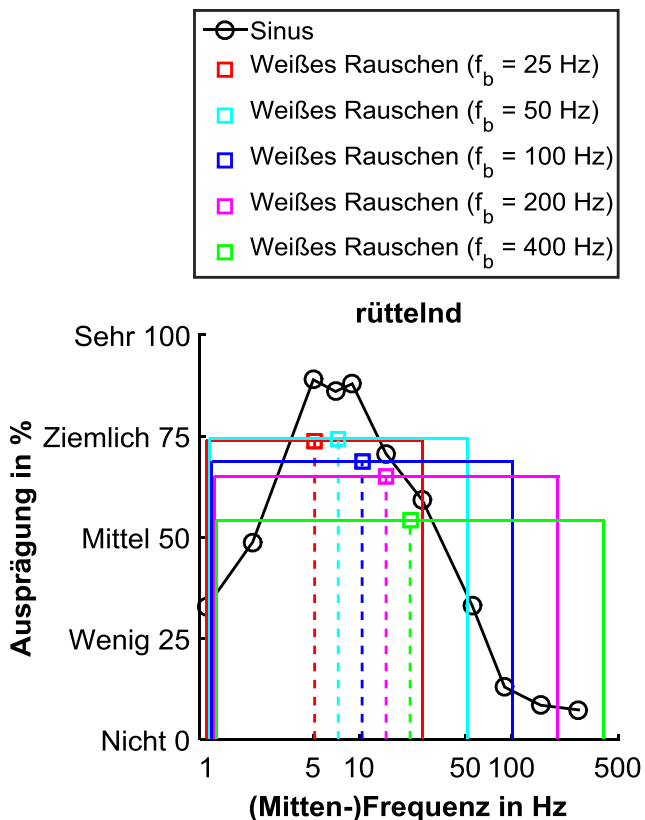
Für die Wahrnehmungsmerkmale, die bei sinusoidalen GKS-Signalen ein deutliches Ausprägungsmaximum zeigten (*Auf und ab, brummend, holprig, kribbelnd, ratternd, rüttelnd, summend, wackelnd, zittrig*), ergab sich der in Abbildung 6 dargestellte Verlauf. Die Ausprägung des Wahrnehmungsmerkmals der Schmalbandrauschsignale ist vergleichbar mit der mittleren Ausprägung, die für ein sinusoidales GKS-Signal im Frequenzbereich des Schmalbandrauschens ermittelt wurde. Dieser Zusammenhang zeigte sich ebenfalls, wenn die Bandbreite des Rauschsignals erhöht wurde (Abbildung 7). Mit steigender Bandbreite werden einerseits in zunehmendem Maße Frequenzbereiche angeregt, in denen die Ausprägung des jeweiligen Wahrnehmungsmerkmals für sinusoidale Signale nur noch gering ist. Da der Signalpegel sich nicht verändert, wird die Gesamtsignalenergie auf einen breiteren Frequenzbereich verteilt. Damit sinkt andererseits die Energie des Rauschsignals im Frequenzbereich des mit sinusoidalen Signalen ermittelten Ausprägungsmaximums. Dies könnte ebenfalls die sinkende Ausprägung bei Rauschsignalen mit steigender Bandbreite erklären.



**Abbildung 5:** Ausprägung des Attributs *gleichmäßig* für sinusoidale Signale im Vergleich zu rauschartigen Signalen



**Abbildung 6:** Ausprägung des Attributs rüttelnd für sinusoidale Signale im Vergleich zu rauschartigen Signalen in Abhängigkeit der Mittenfrequenz (Frequenzbereich der Rauschsignale durch Kästen angedeutet)



**Abbildung 7:** Ausprägung des Attributs rüttelnd für sinusoidale Signale im Vergleich zu rauschartigen Signalen in Abhängigkeit der Bandbreite (Frequenzbereich der Rauschsignale durch Kästen angedeutet)

## Zusammenfassung

Es gibt ein Wahrnehmungsmerkmal für GKS (*gleichmäßig*) dessen Ausprägung sich bei sinusoidalen im vgl. zu rauschartigen Signalen unterscheidet. Eine Sinusschwingung einer bestimmten Frequenz, führt zu einer vergleichbaren Ausprägung wie ein Schmalbandrauschen im gleichen Frequenzbereich. Eine Erhöhung der Bandbreite des Rauschens verringert die Ausprägung des Wahrnehmungsmerkmals. Die Beziehung zwischen GKS-Signal und der Ausprägung der jeweiligen Wahrnehmungsmerkmale könnte für Analyse & Synthese von GKS genutzt werden.

## Literaturverzeichnis

- [1] M. Morioka and M. J. Griffin, "Absolute Thresholds for the Perception of Fore-And-Aft, Lateral, and Vertical Vibration at the Hand, the Seat, and the Foot.," *Journal of Sound and Vibration.*, vol. 314, pp. 357–370, 2008.
- [2] A. Schwendicke, M. E. Altinsoy, and S. Merchel, "Die Grenzen der Wahrnehmung — Frühschwellen für Ganzkörperschwingungen bei hohen Frequenzen," in *DAGA 2015 - 41th German Annual Conference on Acoustics*, 2015.
- [3] M. A. Bellmann, "Perception of Whole-Body Vibrations - From Basic Experiments to Effects of Seat and Steering Wheel Vibrations on the Passenger's Comfort Inside Vehicles," Universität Oldenburg, 2002.
- [4] S. Merchel, M. E. Altinsoy, and M. Stamm, "Just-Noticeable Frequency Differences for Whole-Body Vibrations.," in *Proceedings of Internoise 2011*, 2011.
- [5] 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.
- [6] R. Rosenkranz, S. Gruschwitz, M. E. Altinsoy, and S. Merchel, "Untersuchung der Pegelabhängigkeit von Wahrnehmungsmerkmalen von Ganzkörperschwingungen," in *DAGA 2015 - 41th German Annual Conference on Acoustics*, 2015.
- [7] ISO2631, "Mechanical Vibration and Shock – Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibration," International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 1978.
- [8] M. J. Griffin, "Subjective Equivalence of Sinusoidal and Random Whole-Body Vibration," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 60, no. 5, pp. 1140–1145, 1976.
- [9] 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.
- [10] M. E. Altinsoy and S. Merchel, "BRTF (Body-Related Transfer Function) and Whole-Body Vibration Reproduction Systems," in *Audio Engineering Society Convention 130*, 2011.