

# Nutzung von Wahrnehmungsmerkmalen zur Charakterisierung von amplitudenmodulierten sinusoidalen Ganzkörperschwingungen

Robert Rosenkranz, Sebastian Gruschwitz, M.Ercan Altinsoy, Sebastian Merchel  
 Professur Akustik und Haptik, 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 bspw. in Form von Motorordnungen (siehe Abbildung 1) 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.

Das Wissen bezüglich der GKS-wahrnehmung beschränkt sich im Wesentlichen auf grundlegende psychophysikalische Eigenschaften wie Fühlschwelle [1], [2], Just Noticeable Difference in Level (JNDL) [3] oder Just Noticeable Difference in Frequency [3], [4]. Eine vollständige 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.

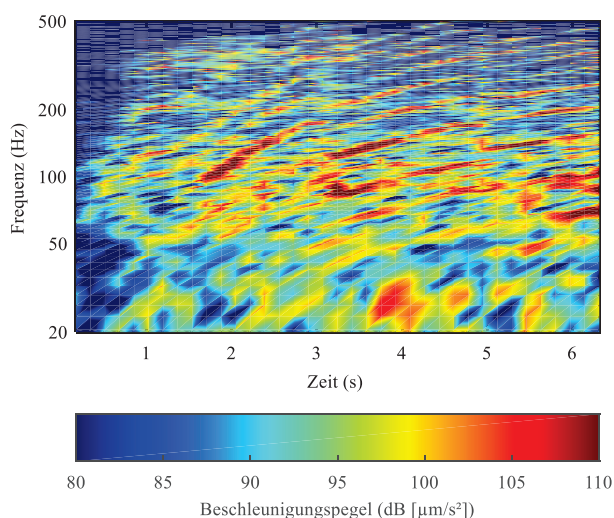


Abbildung 1: Beschleunigungsspektrum mit Motorordnungen eines anfahrenen Fahrzeugs

## Wahrnehmungsmerkmale von GKS

Wahrnehmungsmerkmale von GKS wurden bereits durch Altinsoy [4] und Rosenkranz [6], [7] untersucht. Zunächst wurden Wahrnehmungsmerkmale für sinusoidale und rauschartige GKS-Signale in einem freien Interview ermittelt. Danach wurde die Ausprägung der am häufigsten genannten Wahrnehmungsmerkmale bestimmt und hinsichtlich der Korrelation mit einfachen Signalmustern überprüft. Es zeigte sich, dass das Wahrnehmungsmerkmals *schwach* zur Beschreibung von Pegelunterschieden verwendet wird und, weitgehend frequenzunabhängig ist. Unterschiede in der Frequenz wurden durch folgende Wahrnehmungsmerkmale ausgedrückt: „auf und ab“, „wackelnd“, „holprig“, „rüttelnd“, „zittrig“, „ratternd“, „brummend“, „kribbelnd“, „summend“. Die Ausprägung dieser frequenzbeschreibenden Wahrnehmungsmerkmale ist jedoch auch pegelabhängig. Dieser Zusammenhang konnte sowohl für sinusoidale als auch für rauschartige GKS-Signale beobachtet werden und ist exemplarisch für drei Wahrnehmungsmerkmale in Abbildung 2 dargestellt. Jedes der Wahrnehmungsmerkmale zeigt ein frequenzabhängiges Maximum. Der Ausprägungsverlauf ist für beide Pegelstufen (36 dB(SL), 10 dB(SL)) ähnlich, unterscheidet sich jedoch in der Höhe der Ausprägung dieses Maximums.

Bisher wurden nur sinusoidale und rauschartige GKS-Signale betrachtet. Da reale GKS, wie sie bspw. in Fahrzeugen auftreten (vgl. Abbildung 1), häufig auch Amplitudenmodulierte (AM) Signalanteile enthalten, sollte eine Übertragbarkeit von bisherigen Ergebnissen von

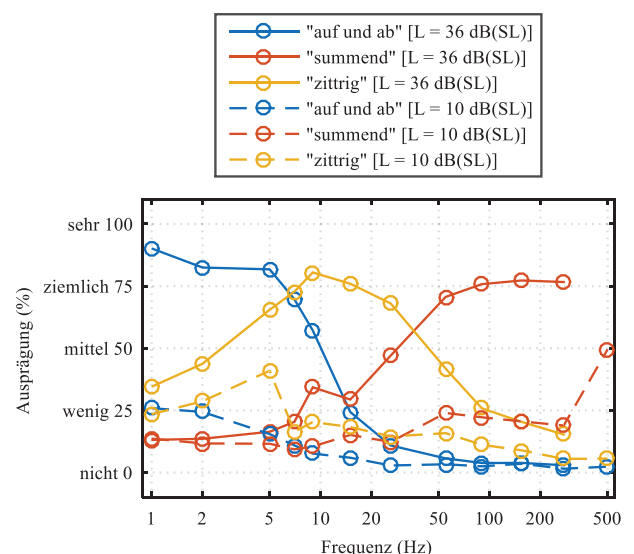


Abbildung 2: Ausprägung der pegel- und frequenzabhängigen Wahrnehmungsmerkmale *auf und ab*, *zittrig*, *summend*

sinusoidalen Signalen auf AM-sinusoidale Signale untersucht werden.

Es sollten folgende Hypothesen überprüft werden

1. Unterschiede in der Wahrnehmung zwischen sinusoidalen und AM-sinusoidalen Signalen werden durch weitere Wahrnehmungsmerkmale beschrieben.
2. Wenn die Trägerfrequenz des AM-sinusoidalen Signals gleich der Frequenz des reinen Sinussignals ist, dann wird eine vergleichbare Ausprägung bei der Gruppe der frequenzbeschreibenden Wahrnehmungsmerkmale hervorgerufen.
3. Wenn die Modulationsfrequenz des AM-sinusoidalen Signals gleich der Frequenz des reinen Sinussignals ist, dann wird eine vergleichbare Ausprägung bei der Gruppe der frequenzbeschreibenden Wahrnehmungsmerkmale hervorgerufen

### Wahrnehmungsmerkmale von sinusoidalen und (am-) sinusoidalen GKS

Das im Rahmen einer vorherigen Studie [6] durchgeführte freie Interview beinhaltete sowohl sinusoidale als auch AM-sinusoidale Stimuli.

#### Stimuli

Bei der Auswahl der sinusoidalen Stimuli (siehe Abbildung 3) wurden psychovibratorische Forschungsergebnisse, wie Fühlschwelle [1], [2], JNDL [3] und JNDF [3], [4] berücksichtigt. Es sollte möglichst der gesamte wahrnehmbare Frequenzbereich und der Pegelbereich zwischen Fühlschwelle und Belastungsgrenze [9] für einstündige GKS-Exposition abgedeckt werden. Es wurden zwei Pegelstufen gewählt: 10 dB und 36 dB über Fühlschwelle (Sensation Level, SL). Über den Frequenzbereich von 1 Hz bis 500 Hz wurden 12 Frequenzstufen verteilt.

Um die Vergleichbarkeit zu den sinusoidalen Stimuli sicherzustellen, wurden die gleichen Pegelstufen für die AM-sinusoidalen Signale verwendet. Für Träger- bzw. Modulationsfrequenz wurde jeweils eine Teilmenge der Frequenzstufen der sinusoidalen Signale gewählt, wobei die Trägerfrequenz stets mindestens das dreifache der Modulationsfrequenz betrug. Die für die Studie verwendeten AM-sinusoidalen Signale sind in Abbildung 4 dargestellt.

#### Wiedergabesystem

Die Schwingungssignale wurden im *Multimodalen Messlabor* des Lehrstuhls Akustik und Haptik [10] präsentiert, siehe Abbildung 5. Tieffrequente Vibrationen wurden vertikal über die Stewart-Plattform und hochfrequente Vibrationen vertikal über einen elektrodynamischen Shaker dargeboten. Aufgrund Limitierungen der Wiedergabesysteme war die Trennfrequenz zwischen den Geräten abhängig vom Pegel der Stimuli. Stimuli mit 10 dB(SL) wurden ab 7 Hz und Stimuli mit 36 dB(SL) ab 15 Hz über den Shaker wiedergegeben. Die

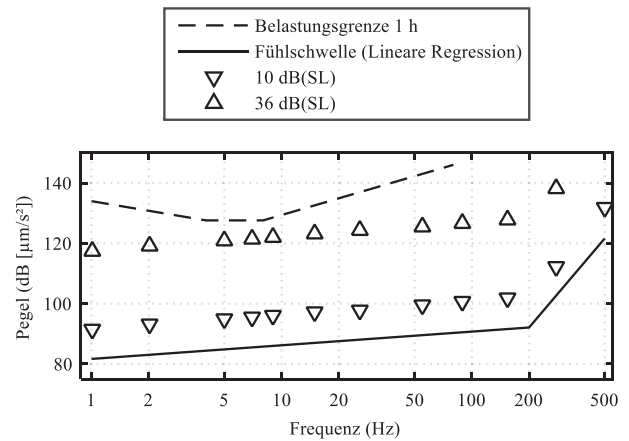


Abbildung 3: Sinusoidale GKS-Stimuli, die für das Experiment [6] ausgewählt wurden mit Fühlschwelle nach [3], [4] und Belastungsgrenze nach [7]

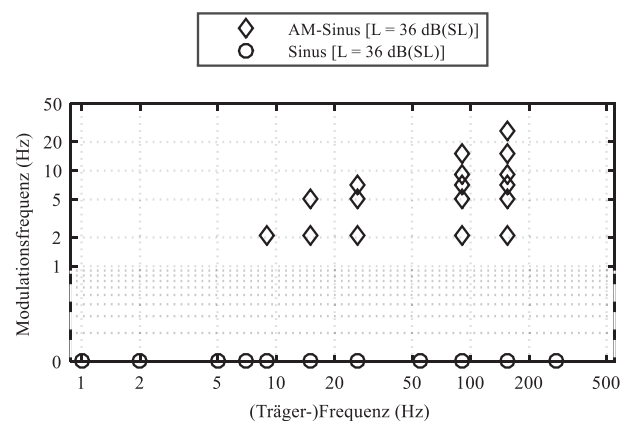


Abbildung 4: In der Studie verwendete Kombinationen aus Träger- und Modulationsfrequenz der AM-sinusoidale GKS-Signale



Abbildung 5: Wiedergabesystem über das die GKS-Stimuli präsentiert wurden, bestehend aus einer Stewartplattform und einem elektrodynamischen Shaker

probandenabhängige Übertragungsfunktion des Wiedergabesystems wurde für jede Versuchsperson individuell entzerrt [11]. 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.“

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.

## Ausprägung der Wahrnehmungsmerkmale von AM-sinusoidalen GKS

Zur Überprüfung der Hypothesen wurde im Folgenden die Ausprägung der gefunden Wahrnehmungsmerkmale in Abhängigkeit des sinusoidalen bzw. AM-Sinusoidalen 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 Reihenfolge-

effekten wurden alle Stimuli randomisiert über das Wiedergabesystem dargeboten. Die Probanden nutzen zur Bewertung eine quasikontinuierliche Skala mit verbalen Anker nach Rohrman [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.

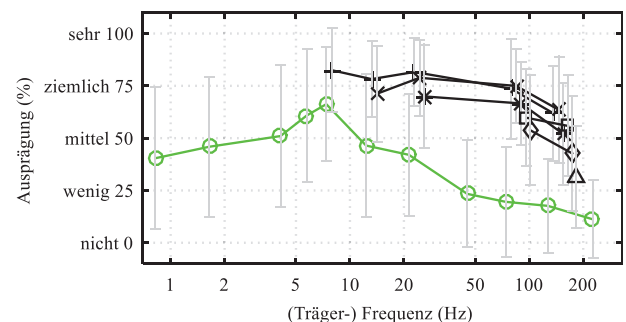
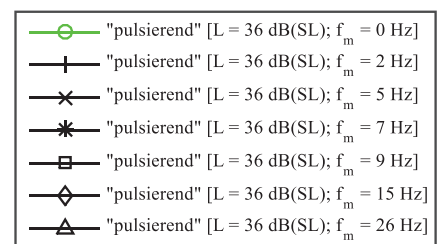
## Ergebnisse

Bei der Betrachtung der Ausprägungen unterschiedlicher Wahrnehmungsmerkmale konnte eine Gruppe von modulationsbeschreibenden Merkmalen gefunden werden: („pulsierend“, „wummernd“, „schlagend“, „tickend“. Die Ausprägung in Abhängigkeit des dargebotenen Stimulus ist beispielhaft für „pulsierend“ in Abbildung 6 dargestellt. Sinusoidale GKS wurden als wenig bis mittel „pulsierend“ bezeichnet, während AM-sinusoidale GKS mit mittel bis sehr „pulsierend“ bewertet wurden. Die im Vergleich zu sinusoidalen GKS erhöhte Ausprägung bei AM-sinusoidalen GKS konnte auch bei den anderen Merkmalen dieser Gruppe beobachtet werden.

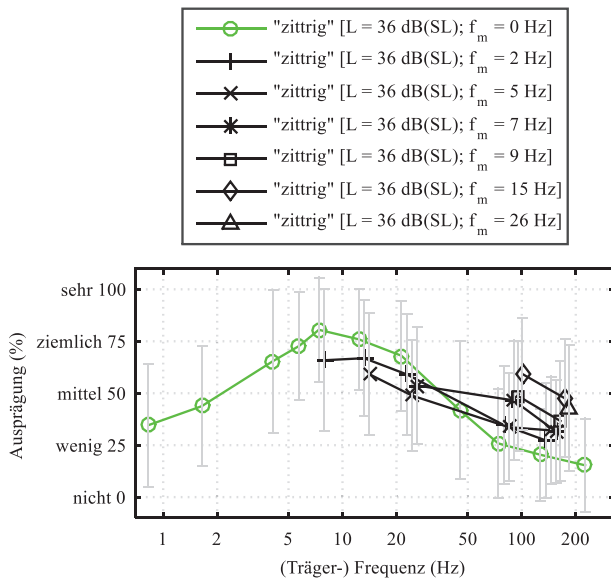
Für die Gruppe der frequenzbeschreibenden Wahrnehmungsmerkmalen („auf und ab“, „brummend“, „holprig“, „kribbelnd“, „ratternd“, „rüttelnd“, „summend“, „wackelnd“, „zittrig“) , konnte bei den AM-sinusoidalen GKS-Signalen ein ähnlicher Ausprägungsverlauf festgestellt werden. Die Ausprägung des Attributs „zittrig“ in Abhängigkeit der (Träger-) Frequenz ist in Abbildung 7 dargestellt. Im Bereich des Ausprägungsmaximums des Merkmals „zittrig“ bei 10 bis 20 Hz führt eine Modulation zu einer geringfügig niedrigeren Ausprägung. Bei höheren (Träger-) Frequenzen kann jedoch ein Anstieg bei Modulation beobachtet werden. Bei Betrachtung der Ausprägung über der Modulationsfrequenz (siehe Abbildung 8) wird ersichtlich, dass die Ausprägung besonders bei Modulationsfrequenzen, welche im Frequenzbereich (ca. 10 bis 20 Hz) der maximalen Ausprägung des Merkmals „zittrig“ bei sinusoidalen Signalen ansteigt.

**Tabelle 1** Häufigste Begriffe, die im freien Interview genannt wurden

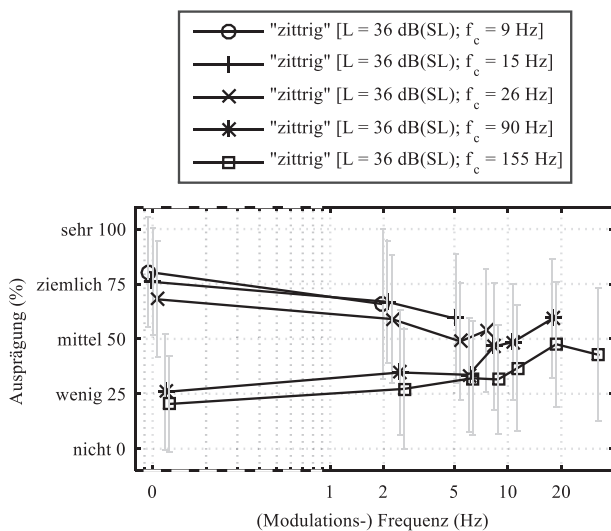
Begriff	Nennungen
schwach	259
kribbelnd	214
pulsierend	194
schlagend	189
summend	173
wackelnd	138
ruhig	133
ratternd	132
rauschend	109
holprig	92
brummend	87
rüttelnd	78
zittrig	77
wummernd	68
tickend	33
auf und ab	32



**Abbildung 6:** Ausprägung des Attributs „pulsierend“ für AM-sinusoidale Signale im Vergleich zu sinusoidalen Signalen



**Abbildung 7:** Ausprägung des Attributs „zittrig“ für sinusoidale Signale im Vergleich zu AM-sinusoidalen Signalen in Abhängigkeit der Trägerfrequenz



**Abbildung 8:** Ausprägung des Attributs „zittrig“ für sinusoidale Signale im Vergleich zu AM-sinusoidalen Signalen in Abhängigkeit der Modulationsfrequenz

## Zusammenfassung

Es gibt Wahrnehmungsmerkmale, welche vor Allem für die Beschreibung von AM-sinusoidalen GKS geeignet sind („pulsierend“, „wummernd“, „schlagend“, „tickend“).

Für die Gruppe der frequenzbeschreibenden Wahrnehmungsmerkmalen („auf und ab“, „brummend“, „holprig“, „kribbelnd“, „rattern“, „rüttelnd“, „summend“, „wackelnd“, „zittrig“) kann eine Überlagerung von zwei Effekten beobachtet werden:

1. Eine sinusoidale GKS und eine AM-sinusoidale GKS rufen bei einem frequenzbeschreibenden Merkmal ein Ausprägungsmaximum im gleichen Frequenzbereich - bezogen auf ihre Frequenz bzw. Trägerfrequenz - hervor. ( $f_{\text{mod}} = \text{konst.}$ )
2. Eine sinusoidale GKS und eine AM-sinusoidale GKS rufen bei einem frequenzbeschreibenden

Merkmal ein Ausprägungsmaximum im gleichen Frequenzbereich - bezogen auf ihre Frequenz bzw. Modulationsfrequenz - hervor. ( $f_{\text{car}} = \text{konst.}$ )

Die Beziehung zwischen GKS-Signal und der Ausprägung der jeweiligen Wahrnehmungsmerkmale bildet die Grundlage für Wahrnehmungsmodelle, welche zukünftig für Analysen und Synthesen von GKS genutzt werden können.

## 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, M. E. Altinsoy, and S. Merchel, “Untersuchung der Pegelabhängigkeit von Wahrnehmungsmerkmalen von Ganzkörperschwingungen,” in *DAGA 2015 - 41st German Annual Conference on Acoustics*, 2015.
- [7] R. Rosenkranz, S. Gruschwitz, M. E. Altinsoy, and S. Merchel, “Wahrnehmungsmerkmale von breitbandigen Ganzkörperschwingungen im Vergleich zu sinusoidalen Ganzkörperschwingungen,” in *DAGA 2016 - 42nd German Annual Conference on Acoustics*, 2016.
- [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] ISO2631, “Mechanical Vibration and Shock – Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibration,” International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 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.
- [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.