

# Perzeptuelle Interaktion zwischen akustischen Modulationen und Ganzkörpervibrationen

Louis Krause<sup>1</sup>, Arne Oetjen<sup>1</sup>, Steven van de Par<sup>1</sup>, Stephan D. Ewert<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Carl-von-Ossietzky Universität Oldenburg, Acoustics Group, 26129 Oldenburg, E-Mail: louis.krause@uol.de

<sup>2</sup> Carl-von-Ossietzky Universität Oldenburg, 26129 Oldenburg, E-Mail: stephan.ewert@uol.de

## Einleitung

Zeitliche Modulationen eines Geräuschs liefern wichtige Informationen in Bezug auf den Geräuschcharakter. In realen Situationen, wie z.B. in Fahrzeuginnenräumen, haben modulationsbasierte psychoakustische Größen, wie die wahrgenommene R-Rauigkeit, einen starken Einfluss auf die wahrgenommene Angenehmheit und Qualität des Umgebungsgeräusches. Solche Geräusche treten jedoch in der Regel im Zusammenspiel mit Vibrationen auf. Eine rein akustische Analyse eines solchen Umgebungsgeräusches kann somit nicht zwingend die Wahrnehmung in einer realen Situation nachbilden.

Die Wahrnehmung von akustischen Reizen durch das auditorische System kann durch sogenannte auditorische Filter beschrieben werden [1]. Bei der Wahrnehmung von Amplitudenmodulation kann gezeigt werden, dass sich die Modulationsfrequenzselektivität durch bandpassförmige Modulationsfilter beschreiben lässt [2]. Es stellt sich die Frage, welchen Einfluss Ganzkörpervibrationen, die im gleichen Frequenzbereich wie die auditorischen Modulationen dargeboten werden, auf die frequenzselektive Wahrnehmung von Amplitudenmodulationen haben. In Wahrnehmungsexperimenten wird untersucht, ob die zusätzliche Darbietung von Vibrationen einen Einfluss auf die Maskierung von Modulationen hat. Es wird geprüft, ob Ganzkörpervibrationen im Bereich von 20 Hz bis 50 Hz die Detektionsschwelle von Amplitudenmodulationen im gleichen Frequenzbereich beeinflusst. Darüber hinaus wird der Einfluss der Vibrationsstärke und Vibrationsfrequenz auf die Ausprägtheit der wahrgenommenen R-Rauigkeit eines amplitudenmodulierten Audiosignals untersucht. Die integrierte Betrachtung zusammen mit auftretenden Vibrationen könnte eine Analyse von amplitudenmodulierten Umgebungsgeräusche verbessern und hilfreiche Informationen für das Design von Produktgeräuschen liefern.

## Messmethode

In der ersten Studie wird der Einfluss von Ganzkörpervibrationen auf die frequenzselektive Wahrnehmung von akustischen Amplitudenmodulationen untersucht. Dazu werden fünf Modulationsdetektionsschwellen adaptiv durch ein 3-AFC-Verfahren mithilfe eines an der Universität Oldenburg entwickelten Software-Pakets [3] gemessen. Die Zielmodulation wird bei den Experimenten in fünf unterschiedlichen Konditionen durch Modulationen und Vibrationen maskiert. Jeder Durchgang einer Schwellenmessung beinhaltet drei aufeinanderfolgende 500-ms-lange Intervalle die jeweils durch eine 500-ms-lange Pause voneinander getrennt sind. Zwei der drei Intervalle enthalten dabei einen Referenzstimulus, das dritte Intervall enthält den Zielstimulus. Der Referenzstimulus setzt sich dabei je nach Kondition aus einer Kombination eines

Audiosignals X und eines Vibrationssignals Y zusammen. Der Zielstimulus enthält im Gegensatz zum Referenzstimulus eine Zielmodulation ZM. In jedem Durchgang ist es die Aufgabe der Versuchspersonen den Zielstimulus zu identifizieren. Der Zielparameter, die Modulationstiefe in dB, wird durch ein 1-up-2-down-Verfahren verändert. Der Anfangswert der Schrittweite beträgt 4 dB und wird bei jeder oberen Umkehrung halbiert, bis ein minimaler Wert von 1 dB erreicht ist. Die Messphase mit einer Schrittweite von 1 dB beinhaltet sechs Umkehrungen, aus denen der Mittelwert zur Bestimmung der Maskierungsschwelle berechnet wird. Nach jeder Darbietung der drei Stimuli und Entscheidung der Versuchsperson bekommt diese eine visuelle Antwort, ob der richtige Stimulus ausgewählt wurde.

## Versuchsaufbau

Die Experimente der ersten und zweiten Studie werden im Vibrationslabor der Universität Oldenburg durchgeführt. Die in Abbildung 1 dargestellte Vibrationsplattform wird zur Wiedergabe der Vibrationssignale genutzt. Eine detaillierte Beschreibung des Versuchsaufbaus wird in Krause, 2020 [4] behandelt. Die Wiedergabe der in Matlab generierten Audiosignale erfolgt über ein Audiointerface RME Fireface UC und einen Kopfhörer des Typs Sennheiser HD 650.



Abbildung 1: Vibrationsplattform der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg

## Versuchspersonen

Es haben 9 Teilnehmende im Alter von 22 Jahren bis 29 Jahren die Experimente durchgeführt, wobei alle Versuchspersonen angaben, nicht hörgeschädigt zu sein. Die Daten von 8 Versuchspersonen wurden für die Auswertung genutzt (Von einer Versuchsperson konnten, durch zu häufiges Abbrechen der Telexperimente, keine verwertbaren Daten gesammelt werden). Der Altersdurchschnitt beträgt 24,8 Jahre. Der Anteil weiblicher Teilnehmer beträgt 38 %. Der Anteil männlicher Teilnehmer liegt bei 63 %. Die Versuchspersonen besitzen ein Gewicht im Bereich zwischen 64,4 kg und 158,0 kg. Das mittlere Gewicht

beträgt 83,0 kg und der Median liegt bei 73,4 kg. Die Vibrationsdarbietung wurde für jede Versuchsperson separat kalibriert.

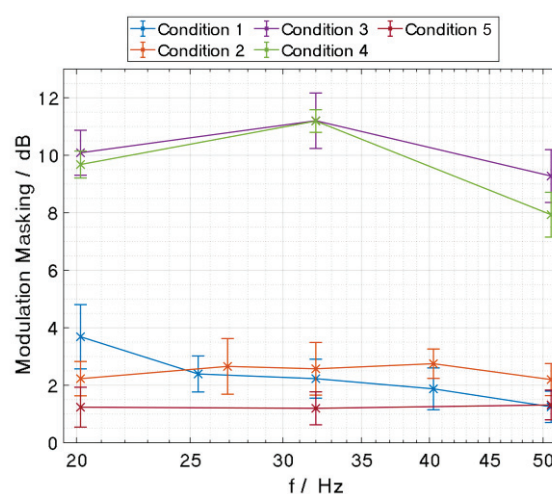
## Stimuli

Die Stimuli der ersten Studie setzen sich je nach Kondition aus einem Audiosignal X oder einem Audiosignal X und Vibrationssignal Y zusammen. In Tabelle 1 sind die 5 Konditionen des Maskierungsexperiment aufgelistet. Das Audiosignal X besteht dabei immer aus einem rosa Trägerrauschen T, welches eine Länge von 500 ms besitzt und durch eine 50-ms-lange  $\cos^2$ -Rampe ein- bzw. ausgeblendet wird. Dem Rauschträger T wird bei allen Konditionen eine sinusförmige Zielmodulation ZM hinzugefügt. Die Zielmodulation besitzt dabei eine Frequenz von 32 Hz und einen Startwert der Modulationstiefe  $m$  am Anfang eines Experiments von  $m = -6$  dB. Zusätzlich zur Zielmodulation wird bei Kondition 3 und 4 ein Modulationsmaskierer M additiv hinzugefügt. Dieser besteht aus einem schmalbandigen Rauschen im Modulationsbereich mit einer Breite von einer halben Oktave. Die Modulationstiefe des Modulations-maskierers beträgt dabei 0,35 und wird bei jeder Darbietung zufällig in einem Bereich von  $\pm 0,05$  gleichverteilt variiert. Es werden drei verschiedene Mittenfrequenzen des Maskierers, die in Terzabständen auf logarithmischer Skala symmetrisch um die Frequenz der Zielmodulation liegen, untersucht. Bei den Modulationsmaskierungsexperimenten mit den Konditionen 1, 2 und 3 wird zusätzlich ein Vibrationssignal Y als Maskierer dargeboten. Der Maskierer RM besitzt für Kondition 1 und 3 die Form eines schmalbandigen Rauschens mit einer Breite einer halben Oktave. In Kondition 3 wird der Vibrationsmaskierer RM simultan zum Modulationsmaskierer M dargeboten. In Kondition 2 wird statt eines Vibrationsrauschmaskierers ein sinusförmiger Vibrationsmaskierer SM verwendet. Die Frequenz  $f_{SM} = 27$  Hz wurde gewählt, da eine sinusförmige Vibration mit einer Frequenz von 25 Hz bei häufiger Darbietung als sehr unangenehm vom Versuchsleiter wahrgenommen wurde. In Kondition 5 wird als Maskierer eine Simulation S der Schallemissionen der Vibrationsplattform als Maskierer verwendet, um zu überprüfen, ob mögliche Maskierungseffekte alleine durch die dargebotenen Vibrationen oder auch durch die dabei auftretenden wahrnehmbaren Schallemissionen der Vibrationsplattform zustande kommen. Die Schallemissionen wurden mithilfe eines Mikrofons für schmalbandige Rauschvibrationen mit einer Breite einer halben Oktave, Mittenfrequenzen von 20 Hz, 32 Hz und 50 Hz und einem Beschleunigungspegel von 110 dB aufgezeichnet. Dabei besitzen die mit Versuchsperson aufgezeichneten Vibrations-schallemissionen einen Pegel von 74 dB SPL für eine Vibrationsfrequenz von 20 Hz und 32 Hz bzw. 64 dB SPL für 50 Hz. Die Signale werden additiv zum Zielmodulationsträger hinzugefügt und dabei um 3 dB verstärkt, um möglicherweise vorhandene Maskierungseffekte zu verstärken. Für die Zielmodulation werden zusätzlich Hörschwellen ohne zusätzlichen Maskierer gemessen. Alle amplitudenmodulierten Rauschsignale der ersten Studie sind auf 65 dB kalibriert.

**Tabelle 1:** Zusammensetzung der Audiosignale X und Vibrationssignale Y der Maskierungsexperimente. ZM: Zielmodulation, M: schmalbandiger Modulationsmaskierer, S: Simulation der Schallemissionen der Vibrationsplattform, RM: schmalbandiger Vibrationsmaskierer, SM: sinusförmiger Vibrationsmaskierer.

Kondition	X	Y	Mittenfrequenz des Maskierers (Anzahl der Durchläufe)
1	ZM	RM	20 Hz, 25 Hz, 32 Hz, 40 Hz, 50 Hz (5 + Schwelle)
2	ZM	SM	20 Hz, 25 Hz, 32 Hz, 40 Hz, 50 Hz (5)
3	ZM + M	RM	20 Hz, 32 Hz, 50 Hz (3)
4	ZM + M	-	20 Hz, 32 Hz, 50 Hz (3)
5	ZM + S	-	(3)

## Ergebnisse



**Abbildung 2:** Mittlere Maskierung inklusive Standardfehler für eine Zielmodulationsfrequenz von 32 Hz als Funktion der Maskierfrequenz für alle Konditionen. Die verwendeten Maskierer der einzelnen Konditionen sind in Tabelle 1 aufgelistet.

Die über alle Versuchspersonen (ohne VP 06, da diese auf Grund von zu häufigem Abbrechen der Teilerperimente nicht betrachtet wurde) gemittelte Modulationsmaskierung ist in Abbildung 2 in Abhängigkeit von der Maskierfrequenz dargestellt. Dabei sind die Maskierungsmuster für Kondition 1 (blau), 2 (orange), 3 (lila), 4 (grün) und 5 (rot) abgebildet. Betrachtet man zunächst Kondition 5 ist zu erkennen, dass diese die Zielmodulation am geringsten maskiert. Dabei liegt die Maskierung in einem Bereich um circa 1 dB und zeigt keine Abhängigkeit von der Maskierfrequenz. Die Zielmodulation wird, durch die in Kondition 5 verwendete Simulation der Schallemissionen der Vibrationsplattform, nahezu nicht maskiert. Wird ein Vibrationsrauschmaskierer aus Kondition 1 genutzt zeigt sich für tiefe Vibrationsfrequenzen eine etwas höhere Maskierung der Zielmodulation. Diese liegt für eine Vibrationsmittenfrequenz von 20 Hz bei circa  $(3,6 \pm 1,1)$  dB und fällt Richtung hoher Frequenzen stetig bis auf einen Wert von  $(1,3 \pm 0,5)$  dB ab. Für einen sinusförmigen Vibrationsmaskierer aus Kondition 2 ist keine frequenzabhängige Maskierung zu erkennen. Die Maskierung liegt in einem Bereich um circa 2,5 dB. In Kondition 3 und 4 wird eine deutlich höhere Maskierung

erreicht. In Kondition 4, bei der ein schmalbandiges Modulationsrauschen als Maskierer dient, wird eine maximale Maskierung erreicht, wenn die Maskierermittelfrequenz des Modulationsmaskiers der Frequenz der Zielmodulation entspricht. Diese beträgt  $(11,2 \pm 0,4)$  dB. Wird die Maskierermittelfrequenz auf 50 Hz erhöht, sinkt die Maskierung um 3,3 dB. Verringert man die Maskierermittelfrequenz auf 20 Hz ist dieser Effekt deutlich geringer. Hier sinkt die Maskierung nur um 1,5 dB. In Kondition 3 wird zusätzlich ein Vibrationsmaskierer dargeboten. Auch hier wird eine maximale Maskierung erreicht, wenn die Maskierermittelfrequenz der Frequenz der Zielmodulation entspricht. Durch Hinzufügen des Vibrationsmaskierers entsteht jedoch keine zusätzliche Maskierung im Vergleich zu Kondition 4. Wird die Maskierermittelfrequenz erhöht bzw. verringert, ist auch hier ein Abfall der Maskierung zu erkennen. Auch wenn dieser Abfall etwas geringer ist als in Kondition 4, konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen Kondition 3 und 4 gemessen werden.

## Zweite Studie: Einfluss von Ganzkörpervibrationen auf die R-Rauigkeit

### Messmethode

In der zweiten Studie wird der Einfluss von Ganzkörpervibrationen auf die wahrgenommene R-Rauigkeit eines amplitudenmodulierten Audiosignals untersucht. Es werden Punkte subjektiver Gleichheit (engl. „Point of subjective Equality“, kurz „PSE“) mithilfe eines 2-AFC-Verfahrens bestimmt. Dazu wird das AFC-Software-Paket [1] für Mathworks Matlab, verwendet. Bei den Experimenten wird ein Referenzstimulus mit einem Zielstimulus verglichen. Der Referenzstimulus besteht aus einem amplitudenmodulierten Audiosignal mit fester Modulationstiefe  $m_{ref}$  und der Zielstimulus aus dem gleichen amplitudenmodulierten Audiosignal jedoch mit variabler Modulationstiefe  $m$  und einem sinusförmigen Vibrationssignal. Jeder Durchgang einer PSE-Messung beinhaltet zwei aufeinanderfolgende Intervalle die durch eine 500-ms-lange Pause getrennt sind. Eines der Intervalle enthält den Referenzstimulus, das andere Intervall den Zielstimulus. Die Reihenfolge der Intervalle wird bei jedem Durchgang zufällig gewählt. In jedem Durchgang ist es die Aufgabe der Versuchspersonen den Stimulus zu wählen, der als stärker R-Rau wahrgenommen wird. Der Zielparameter, die Modulationstiefe  $m$  in dB, wird durch ein 1-up-1-down-Verfahren verändert. Der Anfangswert der Schrittweite beträgt 4 dB und wird nach jeder oberen Umkehrung halbiert, bis eine minimale Schrittweite von 1 dB erreicht ist. Die Messphase mit einer Schrittweite von 1 dB beinhaltet fünf Umkehrungen, aus denen der Mittelwert zur Bestimmung des Punktes subjektiver Gleichheit berechnet wird. Für 15 Konditionen wird ein Punkt subjektiver Gleichheit bestimmt, wobei die Einzelmessungen aller Konditionen in zufälliger verschachtelter Reihenfolge vermessen werden.

### Versuchspersonen

Es haben 10 Teilnehmende im Alter von 22 Jahren bis 27 Jahren die Experimente durchgeführt, wobei alle Versuchspersonen angaben, nicht hörgeschädigt zu sein. Daten von 8 Versuchspersonen wurden für die Auswertung genutzt (Von zwei Versuchspersonen konnten, durch zu häufiges Abbrechen der

Teilexperimente, keine verwertbaren Daten gesammelt werden). Der Altersdurchschnitt beträgt 23,9 Jahre. Der Anteil weiblicher Teilnehmer beträgt 50 %. Der Anteil männlicher Teilnehmer liegt bei 50 %. Die Versuchspersonen besitzen ein Gewicht im Bereich zwischen 64,7 kg und 90,8 kg. Das mittlere Gewicht beträgt 73,3 kg.

### Stimuli

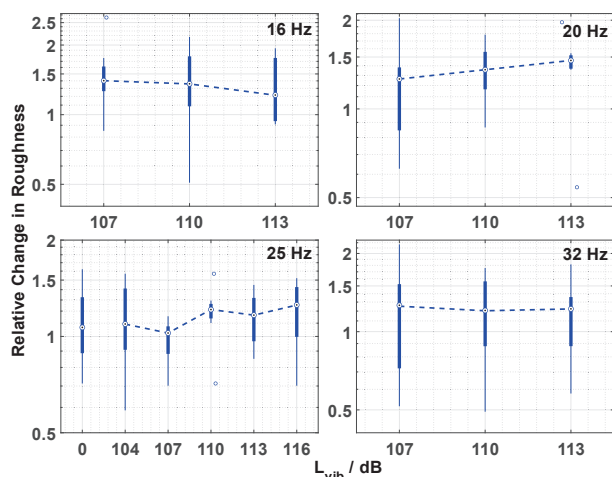
Kondition	$f_{mod}$ / Hz	$L_{vib}$ / dB
1, 2, 3	16	107, 110, 113
4, 5, 6	20	107, 110, 113
7, 8, 9, 10, 11, 12	25	0, 104, 107, 110, 113, 116
13, 14, 15	32	107, 110, 113

**Tabelle 2:** Zielstimuluszusammensetzung der 15 Konditionen der PSE-Messung. Diese setzen sich aus einem amplitudenmodulierten rosa Rauschen mit einer Modulationsfrequenz  $f_{mod}$  und einer sinusförmigen vertikalen Ganzkörpervibration mit identischer Frequenz und einem Beschleunigungspegel  $L_{vib}$  zusammen. In Kondition 7 wurde anstatt der Ganzkörpervibration eine Simulation S der Schallemissionen der Vibrationsplattform verwendet.

Die Stimuli der PSE-Messung setzen sich aus einer Kombination eines Audiosignals X und eines Vibrationsignals Y zusammen. Tabelle 2 zeigt die Zusammensetzung der Stimuli für die 15 Konditionen. Der Referenzstimulus besteht immer aus einem sinusförmig amplitudenmodulierten Audiosignal  $X_{ref}$ . Als Träger T für die Amplitudenmodulation wird ein rosa Rauschen verwendet, welches eine Länge von 3 s besitzt und durch eine 50-ms-lange  $\cos^2$ -Rampe ein- bzw. ausgeblendet wird. Der Träger T des Referenzstimulus wird sinusförmig amplitudenmoduliert mit einer Modulationsfrequenz von  $f_{mod}$  und einer Modulationstiefe von -9 dB. Der Unterschied des Audiosignals X zum Audiosignal  $X_{ref}$  des Referenzstimulus besteht in der variablen Modulationstiefe  $m$ , die während des AFC-Verfahrens verändert wird. Am Anfang einer PSE-Messung beträgt der Startwert der Modulationstiefe  $m$  immer -15 dB. Zusätzlich zum Audiosignal X enthält der Zielstimulus ein Vibrationssignal Y. Die Frequenz  $f_{vib}$  der sinusförmigen Vibration entspricht dabei der Modulationsfrequenz  $f_{mod}$  der jeweiligen Kondition. Abhängig von der Kondition besitzen die Vibrationssignale Y unterschiedliche Pegel  $L_{vib}$  von 104 dB, 107 dB, 110 dB, 113 dB oder 116 dB. Das Vibrationssignal Y besitzt wie das Audiosignal X eine Länge von 3 s und wird durch eine 75-ms-lange  $\cos^2$ -Rampe ein- bzw. ausgeblendet. In Kondition 7 besteht der Zielstimulus nur aus einem Audiosignal X, dem eine Simulation S der Schallemissionen der Vibrationsplattform hinzugefügt wird. Die Schallemissionen wurden mithilfe eines Mikrofons für eine sinusförmige Vibration mit einer Frequenz von 25 Hz und einem Beschleunigungspegel von 116 dB in der Nähe des Ohrs der Versuchsperson aufgezeichnet. Dabei besitzt das mit Versuchsperson aufgezeichnete Signal der Vibrations schallemissionen einen Pegel von 84 dB SPL (45 dBA). Die Simulation wird additiv zum Audiosignal X hinzugefügt und dabei um 3 dB verstärkt, um mögliche Effekte auf die R-Rauigkeit zu verstärken.



## Ergebnisse



**Abbildung 3:** Mediane der relativen approximierten Rauigkeitsänderung nach Gl. (1) durch Hinzufügen einer vertikalen sinusförmigen Ganzkörpervibration in Abhängigkeit vom Beschleunigungspegel  $L_{vib}$  der Vibration des Testsignals und der Modulations-/Vibrationsfrequenz. Die blauen Balken stellen das 25 %- bzw. 75 %-Quantil dar. Der Punkt für einen Beschleunigungspegel von 0 dB zeigt die relative Rauigkeitsänderung für das Testsignal, welchem eine Simulation S der Schallemissionen der Vibrationsplattform beigefügt wurde.

In Abbildung 3 sind die Mediane der relativen approximierten Rauigkeitsänderung durch Hinzufügen einer vertikalen sinusförmigen Ganzkörpervibration für die Vibrationsfrequenzen von 16 Hz, 20 Hz, 25 Hz und 32 Hz dargestellt. Die relative Rauigkeitsänderung ergibt sich dabei nach [5] wie folgt:

$$\frac{\Delta R}{R_0} = (\Delta m)^{1,4} \quad (1)$$

$\Delta m$  beschreibt dabei die gemessene Differenz der Modulationstiefe  $m_{ref}$  des Referenzsignals und der Modulationstiefe  $m_{test}$  des Testsignals am Punkt subjektiver Gleichheit. Dabei wurden die Punkte für Beschleunigungspegel der Vibration von 107 dB, 110 dB und 113 dB bestimmt. Für eine Frequenz von 25 Hz wurden zusätzlich Punkte für Beschleunigungspegel von 104 dB und 116 dB gemessen. Der Punkt für  $L_{vib}=0$  dB gibt die relative Rauigkeitsänderung durch Hinzufügen einer Simulation der Schallemissionen der Vibrationsplattform an. In allen Konditionen zeigt sich, dass das Testsignal, welchem eine Vibration hinzugefügt wurde, eine größere wahrgenommene Rauigkeit am Punkt subjektiver Gleichheit besitzt als das Referenzsignal. Für eine Frequenz von 16 Hz zeigt sich, dass die größte relative Rauigkeitsänderung für einen Beschleunigungspegel von 107 dB gemessen wurde. Wird dieser auf 113 dB erhöht, sinkt diese von 1,40 auf 1,21. Für eine Frequenz von 20 Hz zeigt sich, dass die relative Rauigkeitsänderung mit zunehmendem Beschleunigungspegel linear ansteigt. Für eine Vibrationsfrequenz von 25 Hz ist kein linearer Zusammenhang zwischen Beschleunigungspegel und relativer Rauigkeitsänderung zu erkennen. Jedoch zeigt sich, dass diese am größten wird, wenn die Vibration mit dem größten Beschleunigungspegel dargeboten wird. Durch Darbietung der Simulation S der Schallemissionen zeigt sich nur eine minimale relative Rauigkeitsänderung von 1,06. Für eine Frequenz von 32

Hz zeigt sich eine relative Rauigkeitsänderung im Bereich zwischen 1,20 und 1,25 und somit keine signifikante Abhängigkeit vom Beschleunigungspegel.

## Zusammenfassung

Das Ziel der ersten Studie ist es den Einfluss von Ganzkörpervibrationen auf die frequenzselektive Wahrnehmung von Amplitudenmodulationen zu untersuchen. Folgende Ergebnisse können zusammenfassend festgehalten werden:

- Das Maskierungsmuster für einen schmalbandigen Modulationsmaskierer zeigt ein Maskierungsmaximum, wenn die Maskierermittenfrequenz der Frequenz der Zielmodulation entspricht. Wird der Abstand der Maskierermittenfrequenz zur Zielmodulationsfrequenz vergrößert, verringert sich die Maskierung der Zielmodulation. Dabei konnten Ergebnisse aus der Literatur reproduziert werden.
- Durch Hinzufügen eines schmalbandigen Vibrationsmaskierers mit identischer Mittenfrequenz zur Frequenz des Modulationsmaskierer zeigt sich keine signifikante Änderung des Maskierungsmusters.
- Die Zielmodulation wird nicht signifikant durch einen sinusförmigen oder schmalbandigen Vibration maskiert.

In der zweiten Studie wird der Einfluss von Ganzkörpervibrationen auf die Wahrnehmung der R-Rauigkeit eines Audiosignals untersucht. Zusammenfassend kann ein Punkt festgehalten werden:

- Durch Hinzufügen einer Ganzkörpervibration steigt die wahrgenommene R-Rauigkeit der Audiosignale der PSE-Messung um das 1,02- bis 1,46-fache.

## Literatur

- [1] H. Fastl and E. Zwicker, *Psychoacoustics: Facts and models*, 2007.
- [2] S. D. Ewert and T. Dau, "Characterizing frequency selectivity for envelope fluctuations," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 108, no. 3, p. 1181, 2000.
- [3] S. D. Ewert, "AFC - A modular framework for running psychoacoustic experiments and computational perception models," in *Proceedings of the International Conference on Acoustics AIA-DAGA 2013*, Merano, Italy, 2013, pp. 1326–1329.
- [4] L. Krause, "Perzeptuelle Interaktion zwischen akustischen Amplitudenmodulationen und Ganzkörpervibrationen", 2020.
- [5] M. Guirao and J. M. Garavilla, "Perceived roughness of amplitude-modulated tones and noise," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 60, p. 1335–1338, 1976.