

Subjektive Bestimmung der Rauigkeit von AM-Signalen mit dreiecksförmiger unsymmetrischer Einhüllendenform

Henning Oetjen, Arne Oetjen und Reinhard Weber

Carl-von-Ossietzky-Universität, AG Akustik

Einleitung

Wird ein Ton mit einer geringen Frequenz von unter $f_{mod} = 10\text{Hz}$ moduliert nimmt der Mensch dies noch als Lautheitsänderung wahr. Bei einer weiteren Erhöhung der Modulationsfrequenz kann der Mensch der Lautheitsänderung nicht mehr folgen und der Ton wird als rau wahrgenommen. Diese psychoakustische Größe Rauigkeit wird durch Amplituden- bzw. Frequenzmodulation hervorgerufen. Als Ankerpunkt der Rauigkeitseinheit *asper* dient mit $R = 1$ das Rauigkeitsmaximum von sinusförmiger Amplitudenmodulation mit $f_{mod} = 70\text{Hz}$, einer Trägerfrequenz $f_{tr} = 1\text{kHz}$ sowie einem Modulationsgrad von $m = 1$ bei einem Schalldruckpegel von $L = 60\text{dB SPL}$. Raue Alltagsgeräusche sind zum Beispiel Motorengeräusche aller Art, insbesondere Fahrzeuggeräusche.

Motivation

Für die Modellierung der Rauigkeit wird in der Regel auf Rauigkeitsbewertungen in der Literatur zurückgegriffen, die mit sinusförmig modulierten Schallen gewonnen worden sind. Als Grundlage dienen dabei meist die von Zwicker und Fastl [1] erhobenen Daten, die jedoch lediglich Rauigkeitswerte in *asper* für ausgewählte sinusförmig amplitudenmodulierte und frequenzmodulierte Töne angeben. So ist eine Modulationstiefenabhängigkeit in *asper* nur für den Ton mit einer Trägerfrequenz $f_{tr} = 1\text{kHz}$ und einer Modulationsfrequenz $f_{mod} = 70\text{Hz}$ bekannt

Die Studie nach [2] hat gezeigt, dass die Form der Einhüllenden bei amplitudenmodulierten (AM) Geräuschen einen großen Einfluss auf die Rauigkeit besitzt. So lassen sich mit dreiecksförmigen, unsymmetrischen Einhüllenden leicht große Rauigkeiten, auch von über 1 *asper* erzeugen. Dazu sind bisher allerdings nur einzelne Verhältnismessungen durchgeführt worden, sodass keine genauen Werte in *asper* vorliegen. Da viele Umweltgeräusche, insbesondere Fahrzeuggeräusche, eine deutlich hörbare Rauigkeit mit meist nicht symmetrischer Einhüllenden besitzen, ist ein genaueres Verständnis dieses Einflusses notwendig.

Das Ziel dieser Studie ist deshalb die Bestimmung der Rauigkeit in *asper* als Funktion der Modulationstiefe eines dreiecksförmig amplitudenmodulierten Sinustons.

Methode

In einem 2-Alternative-Forced-Choice Verfahren vergleichen 26 Probanden die Rauigkeit R des Testtons mit der Rauigkeit des Referenztons. Durch Veränderung der Mo-

dulationstiefe m des Testtons wird der Punkt der subjektiven Gleichheit der Rauigkeit eingestellt, wohingegen der Referenzton konstant bleibt. Als Testton, welcher in Abbildung 1 dargestellt ist, dient ein dreiecksförmig amplitudenmodulierter Sinuston mit ansteigendem Anteil der Einhüllenden $a = 5\%$, einer Trägerfrequenz $f_{mod} = 500\text{Hz}$ sowie einer Modulationsfrequenz von $f_{mod} = 25\text{Hz}$.

Als Referenztöne werden vier AM- und vier frequenz-

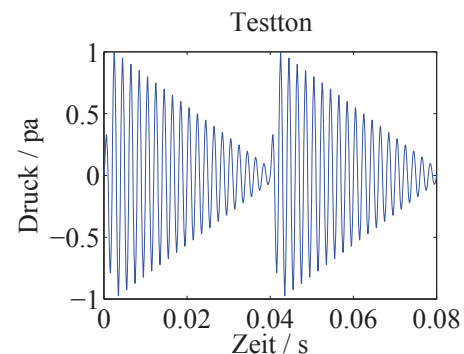


Abbildung 1: Ausschnitt des dreiecksförmig amplitudenmodulierten Testtons mit ansteigendem Anteil der Einhüllenden $a = 5\%$, $f_{tr} = 500\text{Hz}$ sowie $f_{mod} = 25\text{Hz}$.

modulierte (FM) Töne aus Tabelle 1 verwendet, deren Rauigkeiten aus [1] bekannt sind und zwischen $R = 0,2$ *asper* bis $R = 1,08$ *asper* liegen. Gleichzeitig wird auf

Modulationsform	f_{mod} / Hz	f_{tr} / Hz	m	f_{hub} / Hz
AM	70	1000	1	
	70	1000	0,8	
	70	1000	0,65	
	70	1000	0,366	
FM	18	1600		800
	22	1600		800
	180	1600		800
	313	1600		800

Tabelle 1: Tabelle der verwendeten amplitudenmodulierten (AM) und frequenzmodulierten (FM) Referenztöne. Angegeben sind jeweils die Modulationsfrequenz f_{mod} , die Trägerfrequenz f_{tr} sowie der Modulationsgrad m für AM-Töne bzw. der Frequenzhub f_{hub} für FM-Töne.

diese Weise auch die Abhängigkeit der Rauigkeit dreiecksförmig modulierter Schalle von der Modulationstiefe bestimmt. Alle Töne werden bei einem Pegel von $L = 65\text{dB SPL}$ und mit einer Dauer von drei Sekunden abgespielt.

Ergebnisse

In Abbildung 2 ist die Abhängigkeit zwischen der bekannten Rauigkeit R der AM-Referenztöne aus [1] und dem Mittelwert mit Standardabweichung des eingestellten Modulationsgrades m des Testtons doppellogarithmisch aufgetragen. Die Ergebnisse legen einen Fit nahe, der mit

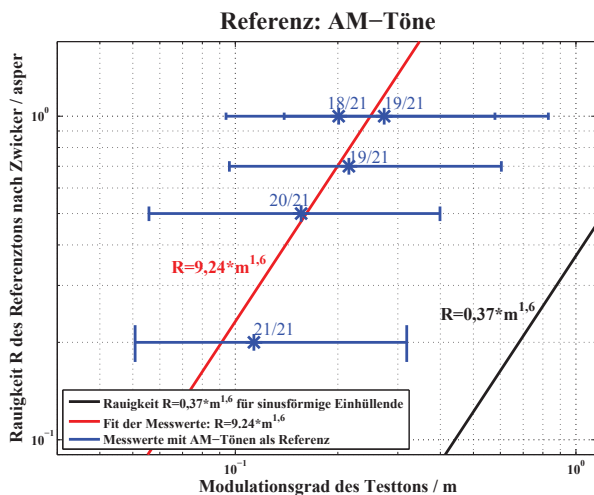


Abbildung 2: Zusammenhang zwischen der bekannten Rauigkeit R der AM-Referenztöne und dem Mittelwert mit Standardabweichung des eingestellten Modulationsgrades m des dreiecksförmig modulierten Testtons (doppellogarithmisch). Die rote Linie stellt den Fit der Ergebnisse mit $R = 9,24 \cdot m^{1,6}$ und die schwarze die aus [1] bekannte Abhängigkeit $R = 0,37 \cdot m^{1,6}$ für sinusförmige Einhüllende mit gleicher Träger- und Modulationsfrequenz dar. Die Zahl neben jedem Punkt gibt die Anzahl der im vorgegebenen Wertebereich gebliebenen Probanden sowie die Gesamtprobandenanzahl an.

$R = 9,24 \cdot m^{1,6}$ in rot eingezeichnet ist, wohingegen in schwarz die nach [1] bekannte Abhängigkeit $R = 0,37 \cdot m^{1,6}$ für sinusförmige Einhüllende mit gleicher Träger- und Modulationsfrequenz eingezeichnet ist. Die Modulationsgradabhängigkeiten für beide Einhüllendenformen sind sehr ähnlich und unterscheiden sich nicht im Exponenten von 1,6, sondern nur im Vorfaktor mit 0,37 bzw. 9,24. Dies würde bedeuten, dass eine dreieckförmige Einhüllende mit $a = 5\%$ etwa eine 25-fache größere Rauigkeit erzeugt, wie eine vergleichbare sinusförmige Einhüllende.

In Abbildung 3 sind in selber Auftragsung die Ergebnisse mit FM-Referenztönen sowie der AM-Kurvenfit dargestellt. Diese eingestellten Werte weichen vom AM-Kurvenfit ab, sodass die Abhängigkeit mit einem Exponenten von 1,6 für die frequenzmodulierten Töne nicht bestätigt werden kann. Desweiteren wird deutlich, dass bei zwei FM-Referenztönen nur etwa die Hälfte der Probanden im vorgegebenen Wertebereich bleibt. Die alleamt großen Standardabweichungen in beiden Abbildungen lassen auf eine große Schwierigkeit des Rauigkeitsvergleich vermuten. Dies bestätigten auch die Aussagen der Probanden nach Beendigung des Versuches.

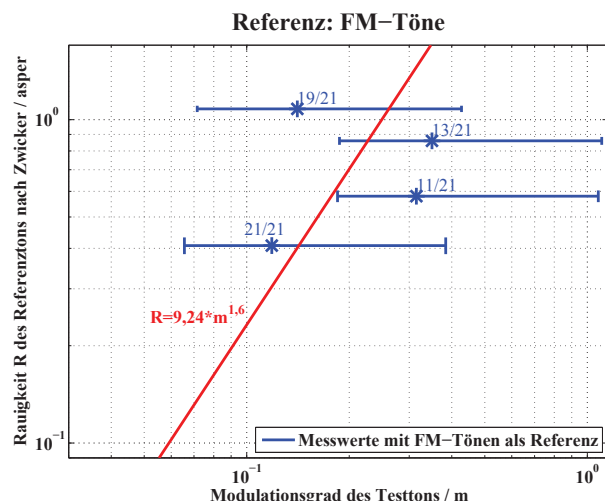


Abbildung 3: Zusammenhang zwischen der bekannten Rauigkeit R der FM-Referenztöne und dem Mittelwert mit Standardabweichung des eingestellten Modulationsgrades m des dreiecksförmig modulierten Testtons (doppellogarithmisch). Die rote Linie stellt den Fit der AM-Töne aus Abbildung 2 dar. Die Zahl neben jedem Punkt gibt die Anzahl der im vorgegebenen Wertebereich gebliebenen Probanden sowie die Gesamtprobandenanzahl an.

Diskussion

Die Übereinstimmung des Exponenten von 1,6 des Am-Kurvenfits mit dem Exponenten für sinusförmige Einhüllende zeigt, dass die Rauigkeit beider Töne unproblematisch miteinander verglichen werden kann. Dies bestätigt auch die geringe Anzahl der Probanden, die außerhalb des vorgegebenen Wertebereichs antworteten. Desweiteren wird vermutet, dass $R = R_0 \cdot m^{1,6}$ Abhängigkeit für sämtliche dreiecksförmig amplitudenmodulierte Geräusche gilt. Somit sollte der Vorfaktor R_0 der einzige freie Parameter sein und hauptsächlich von dem ansteigenden Anteil der Einhüllenden a sowie von der Träger- und Modulationsfrequenz abhängen.

Fazit

Die Ergebnisse bestätigen, dass eine dreiecksförmige Einhüllendenform einen stärker ausgeprägten Rauigkeitseindruck als eine sinusförmige erzeugt. Außerdem zeigt sich für die Rauigkeit R von dreiecksförmig amplitudenmodulierten Sinustönen bei AM-Referenztönen mit $R \sim m^{1,6}$ die gleiche exponentielle Abhängigkeit vom Modulationsgrad m wie die Rauigkeit von sinusförmig amplitudenmodulierten Sinustönen. Bei FM-Referenztönen konnte diese Abhängigkeit nicht bestätigt werden.

Literatur

- [1] Zwicker, E., und Fastl, H., (1990), „Psychoacoustics“ Springer, Berlin, Heidelberg.
- [2] Yasui, N., und Miura M., (2011) „Perception of Roughness on sounds amplitude-modulated with triangular wave“, European Acoustics Association