

Ausgeprägtheit der virtuellen Tonhöhe von AM- und QFM-Tönen

H. FASTL, N. WIESMANN

(Institut für Elektroakustik, TU München)

Einleitung

Tonhöhenempfindungen werden meist in eine Skale hoch - tief eingeordnet; sie lassen sich jedoch auch längs einer Skale ausgeprägt - unausgeprägt skalieren. Auf diese Art und Weise kann die Hörempfindung "Ausgeprägtheit der Tonhöhe" untersucht werden. Ein Überblick über die Ausgeprägtheit der Tonhöhe verschiedenartigster Schalle [2] erbrachte folgendes Ergebnis: Sinustöne rufen die ausgeprägteste Tonhöhe hervor. Die Ausgeprägtheit der (virtuellen) Tonhöhe von komplexen Tönen erreicht maximal etwa 85% der Ausgeprägtheit der (spektralen) Tonhöhe von Sinustönen. Da viele Untersuchungen zur virtuellen Tonhöhe von AM-Tönen vorliegen, wird in dieser Arbeit die Ausgeprägtheit der virtuellen Tonhöhe von AM-Tönen in Abhängigkeit von der Trägerfrequenz für verschiedene Modulationsfrequenzen untersucht. Die Ergebnisse werden dem Existenzbereich der virtuellen Tonhöhe von AM-Tönen (vgl. [3]) gegenübergestellt. Darüber hinaus soll ein Vergleich von AM- und QFM-Tönen Hinweise darauf geben, wie die Ausgeprägtheit der Tonhöhe von mehr oder weniger starken Schwankungen der zeitlichen Hüllkurve beeinflusst wird.

Messungen

Alle Experimente wurden von acht normalhörenden Versuchspersonen im Alter von 25-45 Jahren (Zentralwert 27 Jahre) durchgeführt. Die Töne wurden diotisch über elektrodynamische Kopfhörer (Beyer DT 48) mit Freifeldentzerrer nach Zwicker und Feldtkeller [4] dargeboten. Der Schalldruckpegel war immer 50 dB, der Modulationsgrad immer 100%. Als Meßmethode wurde Größenschätzung mit Ankerschall verwendet. Dabei waren der Ankerschall und der Testschall je 1s lang und durch eine Pause von 0,7s Dauer getrennt. Zwischen den Paaren lag eine Pause von 1,2s Dauer; nach der Darbietung von jeweils drei Paaren hatte die Versuchsperson ihr Urteil über eine Tastatur in einen PC einzugeben. Da AM-Töne sowohl spektrale als auch virtuelle Tonhöhen hervorrufen, wurde im "Hinversuch" der Tonhöhenbereich, in dem die Ausgeprägtheit der (virtuellen) Tonhöhe anzugeben war, durch einen Sinuston (Ankerschall) mit der Modulationsfrequenz markiert. Für den "Rückversuch" wurde jeweils ein AM-Ton als Ankerschall gewählt, der bei allen Versuchspersonen eine virtuelle Tonhöhe erzeugte. Beim direkten Paarvergleich der Ausgeprägtheit der Tonhöhe von AM- und QFM-Tönen (gleiches Amplitudenspektrum, aber unterschiedliche Phasenlage) wurde jeweils vor den drei zu beurteilenden Paaren ein Sinuston mit der Modulationsfrequenz dargeboten, um den Tonhöhenbereich festzulegen. Weitere methodische Details sind in früheren Arbeiten beschrieben ([1], [2]). Jede Schallkonfiguration wurde von jeder Versuchsperson viermal beurteilt. Aus den jeweils resultierenden 32 Daten wurden Zentralwerte und Wahrscheinliche Schwankungen gebildet. In Tabelle 1 sind die bei den verschiedenen Modulationsfrequenzen verwendeten Trägerfrequenzen der AM-Töne aufgelistet.

Tabelle 1: Trägerfrequenzen f_c der verwendeten AM-Töne

f_{mod} in Hz	f_c in Hz							
60	120	180	240	360	480	720	960	1440
125	250	375	625	1k	2k	3k	4k	5k
250	500	750	1k	1.5k	2k	3k	4k	6k
500	1k	1.5k	2k	3k	4k	5k	6k	
1000	2k	3k	4k	5k	6k			

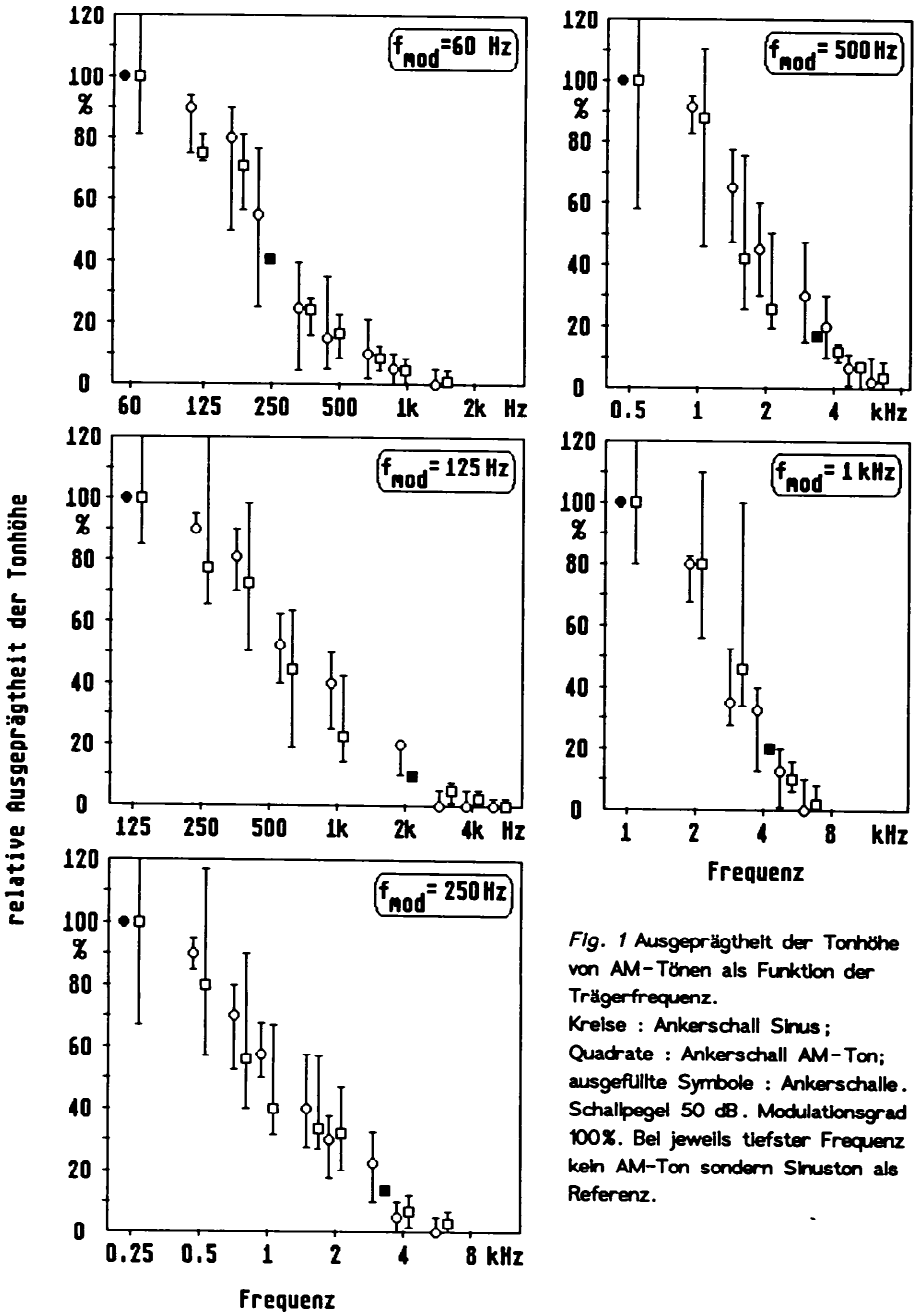


Fig. 1 Ausprägtheit der Tonhöhe von AM-Tönen als Funktion der Trägerfrequenz.
 Kreise : Ankerschall Sinus ;
 Quadrate : Ankerschall AM-Ton ;
 ausgefüllte Symbole : Ankerschalle .
 Schallpegel 50 dB . Modulationsgrad 100% .
 Bei jeweils tiefster Frequenz kein AM-Ton sondern Sinuston als Referenz .

Ergebnisse

Fig. 1 zeigt die Ausprägtheit der virtuellen Tonhöhe von AM-Tönen als Funktion der Trägerfrequenz für verschiedene Modulationsfrequenzen. Mit zunehmender Frequenz ergibt sich eine Abnahme der Ausprägtheit der Tonhöhe. Die mit verschiedenen Ankerschallen gewonnenen Daten (vgl. Kreise und Quadrate) stimmen im Rahmen der Wahrscheinlichen Schwankungen gut miteinander überein. Sehr große Wahrscheinliche Schwankungen, die insbesondere für AM-Töne als Ankerschalle auftreten (Quadrate), beruhen vorwiegend auf inter-individuellen Unterschieden, da die intra-individuellen Unterschiede im Mittel lediglich ± 5 Prozentpunkte betragen. In allen Fällen ruft ein Sinuston mit der Modulationsfrequenz die größte Ausprägtheit der Tonhöhe hervor. Für eine Trägerfrequenz von AM-Tönen, die um zwei Oktaven über der Modulationsfrequenz liegt, ist die Ausprägtheit der Tonhöhe bereits auf weniger als die Hälfte des Maximalwertes abgesunken. Bei Modulationsfrequenzen bis zu 250 Hz erreicht die Ausprägtheit der Tonhöhe von AM-Tönen den Wert Null bei einer Trägerfrequenz, die etwa dem zwanzigfachen der Modulationsfrequenz entspricht. Für $f_{mod} = 500$ Hz ergibt sich der Wert Null etwa bei der zehnfachen, für $f_{mod} = 1$ kHz sogar schon bei der fünffachen Modulationsfrequenz. Dieses Verhalten entspricht dem "Existenzbereich der virtuellen Tonhöhe". Die zugehörigen Ergebnisse sind in Fig. 2 dargestellt. Für verschiedene Modulationsfrequenzen ist die Ausprägtheit der Tonhöhe (eingekreiste Zahlenwerte) als Funktion der Frequenz des tiefsten Teiltons der AM-Töne angegeben. Die Zahlenwerte repräsentieren den arithmetischen Mittelwert der mit beiden Ankerschallen (Kreise und Quadrate in Fig.1) ermittelten Daten. Die Kurve in Fig. 2 illustriert den Existenzbereich der virtuellen Tonhöhe nach Terhardt et al. [3]. Wenn die Frequenz des tiefsten Teiltons der AM-Töne mit der Modulationsfrequenz übereinstimmt (45° -Gerade), nimmt die relative Ausprägtheit der Tonhöhe Werte um 85% an. Mit zunehmender Frequenz des tiefsten Teiltons nimmt die Ausprägtheit der Tonhöhe ab und erreicht an der Grenze des Existenzbereiches der virtuellen Tonhöhe sehr kleine Werte. Somit wird der Existenzbereich der virtuellen Tonhöhe anhand einer völlig anderen Meßmethode sehr gut bestätigt.

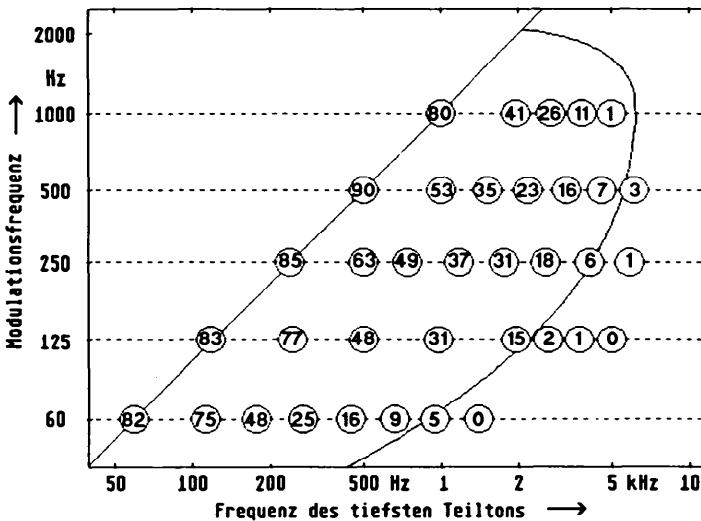


Fig. 2 Relative Ausprägtheit der virtuellen Tonhöhe von AM-Tönen und Existenzbereich der virtuellen Tonhöhe.

In einer weiteren Meßreihe wurde der Einfluß zeitlicher Hüllkurvenschwankungen auf die Ausprägtheit der Tonhöhe untersucht. Fig. 3 zeigt die relative Ausprägtheit der Tonhöhe von QFM-Tönen im Vergleich zu derjenigen von AM-Tönen als Funktion der Trägerfrequenz für

zwei Modulationsfrequenzen. Kreise repräsentieren die Daten für AM-Töne als Bezugsschall, Quadrate die normierten Daten für QFM-Töne als Bezugsschall. Die Ziffern in den Symbolen deuten an, wie häufig eine virtuelle Tonhöhe wahrgenommen wurde (Maximalwert 32). Während bei tiefen Trägerfrequenzen AM- und QFM-Töne die gleiche Ausprägtheit der Tonhöhe aufweisen, ist sie bei hohen Trägerfrequenzen für QFM-Töne etwa um den Faktor 2 geringer. Bei tiefen Frequenzen fallen die einzelnen Spektrallinien in verschiedene Frequenzgruppen und Phasenunterschiede spielen keine Rolle. Bei hohen Frequenzen erscheinen jedoch alle drei Spektrallinien innerhalb derselben Frequenzgruppe und für AM-Töne ergeben sich stark schwankende zeitliche Hüllkurven, welche die Ausprägtheit der Tonhöhe vergrößern. Allerdings ist bei hohen Frequenzen die Ausprägtheit der Tonhöhe gering, so daß einige Versuchspersonen keine virtuelle Tonhöhe mehr wahrnehmen. Insgesamt ist festzuhalten, daß die Ausprägtheit der Tonhöhe von AM-Tönen mit steigender Trägerfrequenz abnimmt, und der Existenzbereich der virtuellen Tonhöhe mit einer neuen Meßmethode bestätigt wird. AM-Töne können bei hohen Trägerfrequenzen eine größere Ausprägtheit der virtuellen Tonhöhe erzeugen als QFM-Töne.

Die Autoren danken Prof. Dr.-Ing. E. Zwicker und Prof. Dr.-Ing. E. Terhardt für wertvolle Hinweise. Diese Arbeit wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft im Rahmen des SFB 204 Gehör gefördert.

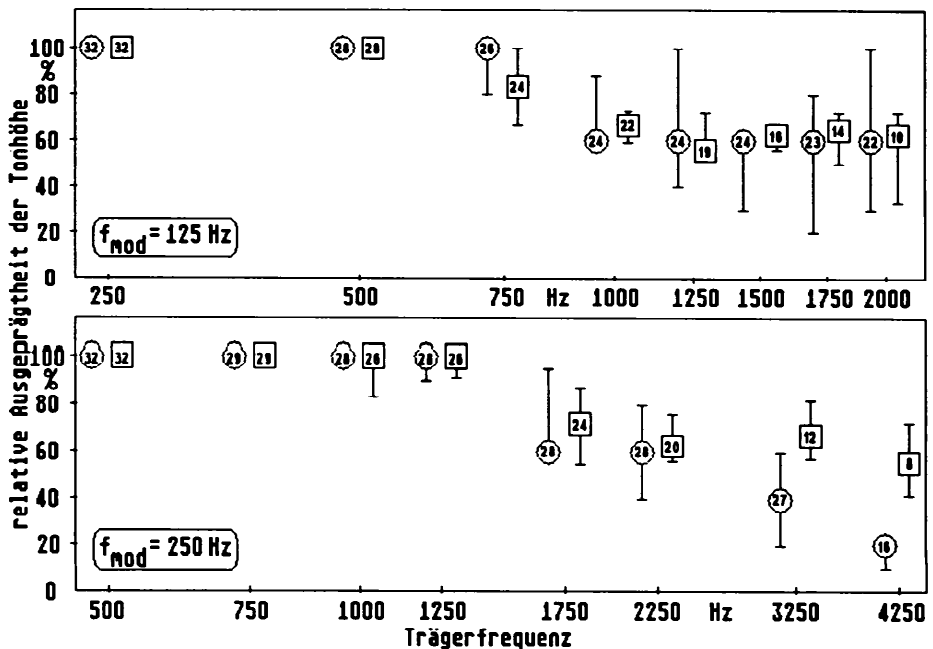


Fig. 3 Ausprägtheit der Tonhöhe von QFM-Tönen relativ zu derjenigen von AM-Tönen als Funktion der Trägerfrequenz.

Literatur

- [1]: Fastl, H. (1989) : Pitch strength of pure tones. Proc.13. ICA Belgrade, Vol. 3, 11-14
- [2]: Fastl, H. und Stoll, G. (1979) : Scaling of pitch strength. Hearing Research 1, 293-301
- [3]: Terhardt, E., Stoll G. und Seewann, M. (1982) : Pitch of complex signals according to virtual-pitch theory: Tests, examples, and predictions. J. Acoust. Soc. Am. 71, 671-678
- [4]: Zwicker, E., Feldtkeller, R.: Das Ohr als Nachrichtenempfänger. Hirzel-Verlag Stuttgart (1967)