

# Auswirkungen einer Phasendrehung bei Dreiton-Komplexen auf psychoakustische Empfindungsgrößen

Ch. Patsouras, H. Fastl

Lehrstuhl für Mensch-Maschine-Kommunikation, Technische Universität München

## Einleitung

Für einen kleinen Modulationsindex ( $\Delta f/f_{\text{mod}} \leq 0,3$ ) kann eine frequenzmodulierte Schwingung als eine aus drei Spektrallinien zusammengesetzte Schwingung angesehen werden, wobei die Phasenlage dreier Linien so gewählt wird, daß die Amplitude des Gesamtzeigers nahezu gleich bleibt [1]. Ebenso kann eine amplitudenmodulierte Schwingung aus drei Spektrallinien erzeugt werden, wobei hier die Phasenlage der Einzelschwingungen bewirkt, daß die Seitenlinien die Trägerfrequenz in der Amplitude verändern. So kann also eine amplitudenmodulierte Schwingung bei gleichem Amplitudenspektrum durch Änderung der Phasenlage in eine frequenzmodulierte Schwingung (Quasifrequenzmodulation) übergeführt werden [1]. Die Änderung der Phasenlage führt zu einer Änderung der Zeitstruktur der Einhüllenden des Gesamtklanges: so hat der Übergang der Amplituden- zur Quasifrequenzmodulation eine Verdoppelung der Modulationsfrequenz bei einer Verringerung des Modulationsgrades zur Folge (Abbildung 1).

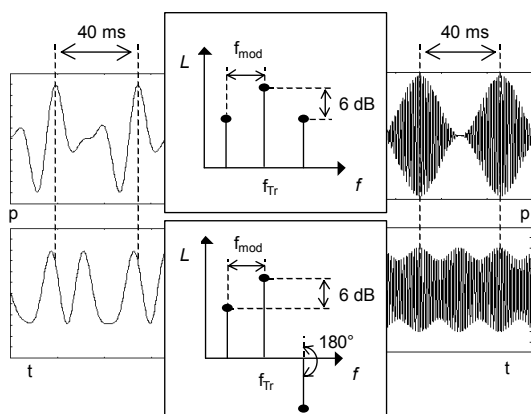


Abb. 1: Schematische Darstellung eines AM- (Mitte oben) und eines QFM- (Mitte unten) Sinustons und deren Schalldruck-Zeitverläufe mit den Parametern  $f_{\text{mod}} = 25 \text{ Hz}$  und  $f_{\text{Tr}} = 50 \text{ Hz}$  (links) bzw.  $f_{\text{Tr}} = 400 \text{ Hz}$  (rechts).

In dieser Studie wurde untersucht, inwieweit eine solche Phasenveränderung sich in den psychoakustischen Empfindungsgrößen Lautheit, Schärfe, Rauigkeit, Schwankungsstärke und Lästigkeit niederschlägt.

## Experimente

Es wurden 100% amplitudenmodulierte (AM) Sinustöne aus drei in Phase liegenden Sinustönen (Abb. 1, mitte oben) bei den Trägerfrequenzen ( $f_{\text{Tr}}$ ) 50, 100, 200, 400 und 800 Hz mit Modulationsfrequenzen ( $f_{\text{mod}}$ ) von 12,5, 25, 50 und 100 Hz (wobei immer  $f_{\text{mod}} < f_{\text{Tr}}$  eingehalten wurde) digital unter Matlab synthetisiert. Der entsprechende quasifrequenzmodulierte (QFM) Sinustone wurde - mit gleichen Pegeln der einzelnen Spektrallinien - durch Drehung der oberen Seitenlinie um  $180^\circ$  realisiert (Abb. 1, mitte unten).

Die Darbietung der Schalle erfolgte freifeldentzerrt [2] diotisch über einen dynamischen Kopfhörer (Beyer DT 48). An den

Experimenten nahmen 10 normalhörende Versuchspersonen (mit einem Alter von im Median 27 Jahren) teil.

In einer ersten Versuchsreihe sollten die Unterschiede zwischen dem AM- und dem jeweiligen QFM-Sinustone in den Empfindungsgrößen Lautheit, Schärfe, Schwankungsstärke und Rauigkeit gemessen werden. Hierzu wurde den Versuchspersonen jeweils im Paarvergleich der AM- und der QFM-Sinustone dargeboten. Danach sollten die Unterschiede bezüglich der vier Empfindungen in folgende vier Kategorien eingestuft werden: Zwischen dem ersten und zweiten Schall besteht bezüglich deren Lautheit (bzw. Schärfe, Rauigkeit, Schwankungsstärke) kein (X), ein geringer (-), ein mittlerer (O), ein großer (+) Unterschied.

In einer zweiten Versuchsreihe wurde die Lästigkeit jedes AM- oder QFM-Tons anhand einer 7-stufigen Kategorienskala befragt (mit den Abstufungen: extrem geringe (---), sehr geringe (--), geringe (-), mittlere (O), große (+), sehr große (++) und extrem große (+++) Lästigkeit).

## Ergebnisse

Abbildung 2 zeigt die Ergebnisse der ersten Versuchsreihe für die Unterschiede zwischen Amplituden- und Quasifrequenzmodulation in Lautheit (a), Schärfe (b), Schwankungsstärke (c) und Rauigkeit (d). Dargestellt sind die Mediane und Wahrscheinlichen Schwankungen aus jeweils 40 Urteilen (jeweils 4 Bewertungen der 10 Versuchspersonen).

In Übereinstimmung mit der Literatur [3] scheinen die Versuchspersonen bei höheren Trägerfrequenzen grundsätzlich häufiger Unterschiede wahrnehmen zu können.

In der Lautheit können durchwegs über 50% der Versuchspersonen (Median bei "X") keinen Unterschied feststellen. Bezüglich der Schärfe kann man eine Zunahme der wahrgenommenen Unterschiede zu hohen Trägerfrequenzen hin beobachten, wobei bis Trägerfrequenzen von 400 Hz auch hier über 50% der Versuchspersonen noch keinen Unterschied wahrnehmen. Bei einer Trägerfrequenz von 800 Hz verschiebt sich der Median der Urteile dann hin zur Kategorie "geringe Unterschiede". Bei den Empfindungen Schwankungsstärke und Rauigkeit treten häufiger "geringe" bis "mittlere Unterschiede" mit Wahrscheinlichen Schwankungen auch zu "großen Unterschieden" auf. So werden bei der Schwankungsstärke besonders bei Modulationsfrequenzen von 12,5 Hz "mittlere Unterschiede" zwischen AM und QFM wahrgenommen, bei der Rauigkeit verstärkt bei Modulationsfrequenzen von 25 bis 50 Hz.

Auch bei der Lästigkeit (Abb. 3) kann man einen Anstieg der Lästigkeit zu hohen Trägerfrequenzen hin beobachten. Zwischen AM und QFM treten jedoch nur in weniger als der Hälfte der Fälle im Median überhaupt Unterschiede in der Lästigkeit auf, die sich maximal auf einer Kategorie belaufen und fast durchwegs positiv für die Quasifrequenzmodulation ausfallen.

## Diskussion

Betrachtet man die Schalldruck-Zeitverläufe der zwei in Abbildung 1 exemplarisch dargestellten AM- (oben) und QFM- Sinustöne (unten), so verdeutlicht dies, weshalb die

Versuchspersonen grundsätzlich bei niedrigeren Trägerfrequenzen geringere Unterschiede zwischen Amplituden- und Quasifrequenzmodulation wahrnehmen können: während sich bei einer Trägerfrequenz von 400 Hz (rechts) die Träger- und die Modulationsfrequenz stark unterscheiden, die Einhüllende deshalb deutlich die Verdoppelung der Modulationsfrequenz und die Verringerung des Modulationsgrades aufweist, ist dies bei der Trägerfrequenz von 50 Hz (links) nicht möglich: Träger-schwingung und Modulation überlagern sich so, daß sie vom Gehör nicht mehr getrennt aufgelöst werden können. Die Verdoppelung der Modulationsfrequenz beim Übergang zur Quasifrequenzmodulation kann auch die Ergebnisse bei den Unterschieden in Schwankungsstärke und Rauigkeit erklären: Die größten Unterschiede in der Schwankungsstärke treten bei einer Modulationsfrequenz von 12,5 Hz auf, bei welcher eine starke Schwankungsstärke zu verzeichnen ist. Durch die Verdoppelung der Modulationsfrequenz auf 25 Hz gerät man jedoch in den Bereich der abklingenden Schwankungsstärke und den Übergang zur Rauigkeit [2]. Dementsprechend zeigen sich bei der Rauigkeit starke Unterschiede bei Modulationsfrequenzen von 25 Hz bzw. 50 Hz, bei welchen je nach Frequenzgruppenbreite eine starke Rauigkeit hervorgerufen wird. Beim Übergang zur Quasifrequenzmodulation und der damit verbundenen Verdoppelung der Modulationsfrequenz auf 50 Hz bzw. 100 Hz klingt die Rauigkeitswahrnehmung jedoch bereits ab und geht über in eine Dreiklangswahrnehmung [2]. So interpretiert, kann man die Ergebnisse der Schwankungsstärken- und Rauigkeitsunterschiede für die Unterschiede in der Lästigkeitsbeurteilung verantwortlich machen. Bei denjenigen AM- / QFM- Paaren, bei welchen ein

größerer Unterschied in der Rauigkeit wahrnehmbar ist, zeigt sich meist eine Verbesserung der Lästigkeit im Median um eine Kategorie bei Phasendrehung. Größere Unterschiede in der Schwankungsstärke finden sich jedoch nur tendentiell in den Quartilen der Lästigkeitbeurteilung wieder.

### Zusammenfassung

Insgesamt ist festzustellen, daß bei Dreiton-Komplexen die Phasenlage deren Lautheit praktisch nicht beeinflußt. Wegen der Änderungen der zeitlichen Hüllkurve zeigen sich Phaseneinflüsse vor allem bei Schwankungsstärke und Rauigkeit.

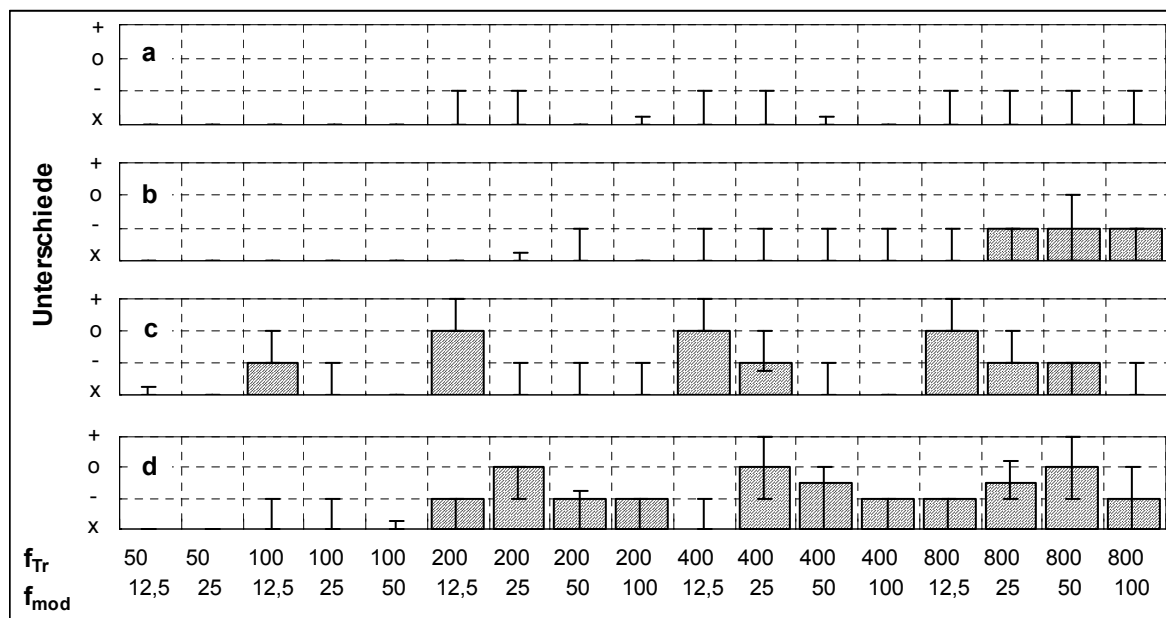
Bezüglich der Lästigkeit ergeben sich geringe Phaseneinflüsse bei den untersuchten Dreiton-Komplexen. Mit einer Ausnahme ( $f_{Tr} = 50$  Hz,  $f_{mod} = 25$  Hz) führt der Übergang von AM zu QFM eher zu einer Reduktion der Lästigkeit. Dies bedeutet, daß Phaseneffekte in der Praxis der Geräuschbeurteilung durchaus das Urteil (positiv) beeinflussen können.

### Dank

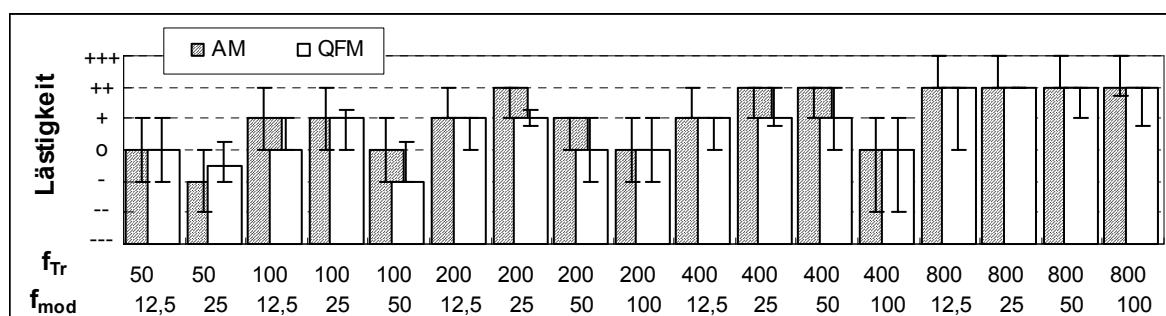
Die Autoren danken der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V. (FVV) für die Unterstützung dieser Arbeit.

### Literatur

- [1] Zwicker, E.: Psychoakustik. Springer-Verlag (1982).
- [2] Zwicker, E., Fastl, H.: Psychoacoustics - Facts and Models. 2<sup>nd</sup> updated edition. Springer, Heidelberg, New York (1999).
- [3] Fleischer, H.: Subjektive Bewertung von Unterschieden in den Phasenlagen stationärer Klänge. In: Fortschritte der Akustik, DAGA'76, VDI-Verlag, Düsseldorf, 581-584 (1976).



**Abb. 2:** Mediane und Wahrscheinliche Schwankungen für die Unterschiede zwischen AM- und QFM-Tönen mit den angegebenen Träger- ( $f_{Tr}$ ) und Modulationsfrequenzen ( $f_{mod}$ ) in Lautheit (a), Schärfe (b), Schwankungsstärke (c) und Rauigkeit (d).



**Abb. 3:** Mediane und Wahrscheinliche Schwankungen für die Lästigkeit in Kategorien für AM- und QFM-Töne.