

# Akzentuierung kurzer Testtöne in Harmonischen Komplexen Tönen

STEFAN WARTINI

Fachgebiet Akustische Kommunikation, Technische Universität München

Wird ein Teilton eines Harmonischen Komplexen Klangs zunächst unterdrückt und mit Verzögerung wieder eingefügt, dann wird er vor dem Hintergrund der übrigen Teiltöne einige Sekunden lang als eigenes Hörereignis (als „reiner Ton“) deutlich wahrgenommen [1]. Diese Verbesserung der Wahrnehmbarkeit (Akzentuierung) einzelner Teiltöne ist auch über Pausen hinweg wirksam [8]. Als sinnvolles Maß für den Grad der Akzentuierung einzelner Teiltöne eines harmonischen Klangs dient die Absenkung der Mithörschwellen, welche sich in Abhängigkeit eines vorangehenden Schalles mit einer Lücke bei der Frequenz dieser Teiltöne ergibt.

Die vorliegende Arbeit beschreibt Untersuchungen der Mithörschwellen kurzer Testtöne in *Harmonischen Komplexen Tönen* (HKT). Zweckmäßigerweise unterscheidet man bei den Messungen zwischen dem Schall, der dem Testton vorausgeht, und demjenigen, welcher ihn simultan überlagert (vgl. Fig. 1). Im folgenden wird der vorausgehende (in der Regel Akzentuierung hervorruufende) Schall als *Adaptor*, der simultan zum Testton dargebotene Schall als *Maskierer* bezeichnet. Adaptor und Maskierer besitzen, falls nicht anders angegeben, bei der Testtonfrequenz eine spektrale Lücke.

## 1. Versuchsschalle und Versuchsablauf

Als Versuchsschalle dienten der synthetische Vokal /a/ und ein HKT, beide mit der Grundfrequenz 200 Hz und der Bandbreite 5 kHz. Der HKT wurde mit der Spektralhüllkurve von Gleichmäßig Anregendem Rauschen versehen und wird im folgenden mit /x/ bezeichnet. Die Spektralhüllkurve des synthetischen Vokals wurde unter Verwendung der Formantfrequenzen 0,8 kHz, 1,2 kHz, 2,8 kHz und 3,5 kHz mit einer Formel nach Terhardt [6] ermittelt. Die Testtonfrequenz betrug bei allen Messungen 1,8 kHz.

Bei der digitalen Fourier-Synthese der Adaptor- und Maskiererschalle wurde die spektrale Lücke bei 1,8 kHz durch Auslassen der entsprechenden Harmonischen hergestellt. Alle verwendeten Schalle wurden mit gaußförmigen Schaltflanken mit einer Anstiegs- bzw. Abfallzeit von 10 ms versehen. Damit die Signale einen ähnlich impulshaften Verlauf wie das Glottissignal der Stimme aufweisen, wurden alle Harmonischen mit gleicher Startphase (Sinusphase) versehen. Um definierte Phasenbeziehungen zwischen Maskierer und Testton sicherzustellen, wurden die Testtöne mit derselben Startphase wie die Maskiererschalle berechnet. Auf diese Weise besitzt das Zeitsignal des Maskierers während der Testtondarbietung denselben Verlauf wie das Zeitsignal des vollständigen HKT. Die Harmonischen des Maskierers erben die Phase der Harmonischen am Adaptorende, was einen knackfreien Übergang zwischen Adaptor und Maskierer sicherstellt.

Die Darbietung der Schalle erfolgte monotonisch in einer schallisolierten Meßkabine über einen freifeldzentrierten Kopfhörer (Beyer DT48). Der Darbietungspegel wurde so eingestellt, daß der Schalldruckpegel der vollständigen Vokals 60 dB betrug. Die Versuchspersonen variierten den Pegel des Testtones mittels einer Eichleitung. Ihre Antworten wurden über ein Terminal in der Meßkabine registriert. Fig. 1 zeigt schematisch den zeitlichen Verlauf der Versuchsschalle. Jede Darbietung besteht aus einem Adaptor und einem Maskierer der Dauer  $T_A$  bzw.  $T_M$ , die unmittelbar aufeinander folgen. Adaptor und Maskierer besitzen in allen Messungen dieselbe Spektralhüllkurve. Der Testton der Dauer  $T_T = 80$  ms beginnt stets gemeinsam mit dem Maskierer (vgl. Fig. 1). Der Maskierer dauerte zwischen 90 ms und 1,89 s an ( $T_M$ ). Die Adaptordauer variierte zwischen 10 ms und 1,51 s. Zusätzlich wurden die Messungen bei kontinuierlicher Darbietung von Adaptor und Maskierer durchgeführt.

Die Hörversuche wurden nach der Einregelungsmethode durchgeführt. Die Mithörschwelle wurde als arithmetischer Mittelwert von zwei Schwellen definiert. Zunächst wurde die untere Schwelle bestimmt, indem die Versuchsperson den Pegel des Testtones mit der Eichleitung solange absenkte, bis sie den Testton nicht mehr hörte. Anschließend sollte der Testtonpegel angehoben werden, bis der Testton wieder hörbar wurde (obere Schwelle). Die Schalldarbietungen wurden solange wiederholt, bis die Versuchsperson beide Schwellen bestimmt hatte. Messungen mit einer adaptiven Abfragemethode hätten vor allem bei langen Darbietungsdauern den Zeitaufwand untragbar erhöht, da zwischen den Darbietungen Pausen von 2,5 s vorgesehen werden mußten, um die gegenseitige Beeinflussung aufeinanderfolgender Darbietungen zu vermeiden.

An den Messungen nahmen vier Versuchspersonen im Alter von 24 bis 31 Jahren teil. Die einzelnen Sitzungen umfaßten 12 Darbietungen und dauerten ungefähr 20 Minuten. Jede Messung wurde, verteilt über mehrere Sitzungen, sechsmal durchgeführt. Die ermittelten Hörschwellen waren in der Regel gut reproduzierbar. Die individuellen Schwankungen lagen mit wenigen Ausnahmen unter 4 dB.

## 2. Ergebnisse

### Vollständige Adaptor- und Maskiererspektren

Zunächst wurden die Mithörschwellen von Testtönen bei vollständigem Adaptor und Maskierer (d.h. ohne spektrale Lücke) ermittelt. Diese Schalle können, da sie keine Lücke bei der Testtonfrequenz besitzen, auch keine Akzentuierung des Testtones hervorrufen. Der Verlauf der Mithörschwellen sollte also weitgehend konstant bleiben. Die Maskiererdauer betrug 90 ms. Daher variierte die Gesamtdarbietungsdauer mit der Adaptordauer zwischen 100 ms und 1,6 s.

In Fig. 2 ist der Einfluß der Adaptordauer auf die Mithörschwelle des Testtones dargestellt. Aufgetragen sind Median und Interquartilbereich der Pegeldifferenz  $\Delta L_T$  zwischen dem Testtonpegel an der Mithörschwelle und dem ursprünglichen Pegel der Harmonischen im Maskierer. Negative Werte von  $\Delta L_T$  beschreiben eine Mithörschwellenabsenkung unter den ursprünglichen Teiltonpegel. Die Bezeichnung kont kennzeichnet Meßwerte, bei denen der Maskierer kontinuierlich und der Testton alle 2 s dargeboten wurde. Der Unterschied der Mithörschwelle zwischen 10 ms Adaptordauer und kontinuierlicher Darbietung beträgt 8 dB für den Vokal /a/ und 4 dB für den HKT /x/. Für Adaptordauern über 300 ms verlaufen die Mithörschwellen beider Maskierer weitgehend konstant.

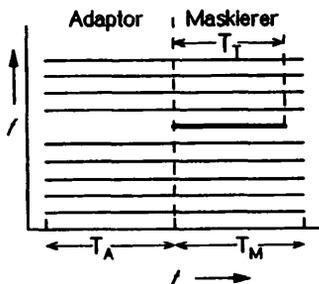


Fig. 1. Zeitverlauf einer Versuchsschalldarbietung. Die Darbietung wurde solange wiederholt, bis die Versuchsperson den Pegel des Testtones (dicke Linie) so eingeregelt hatte, daß er gerade nicht mehr bzw. gerade wieder wahrnehmbar war.

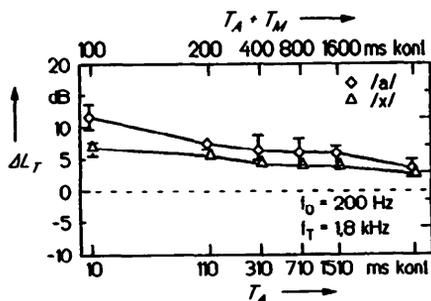


Fig. 2. Vollständiger Adaptor: Pegeldifferenz  $\Delta L_T$  als Funktion der Adaptordauer  $T_A$ , gemittelt über vier Versuchspersonen. Vollständige Spektren Vokal /a/ und HKT /x/ als Adaptor und Maskierer.

### Adaptor variabler Dauer und Maskierer konstanter Dauer

Fig. 3 zeigt die Mithörschwellen des Testtones bei konstanter Maskiererdauer ( $T_M = 90$  ms) als Funktion der Adaptordauer  $T_A$ . Dargestellt sind Mediane und Interquartilbereiche der Pegeldifferenz  $\Delta L_T$ . Zum Vergleich sind die Kurven der vollständigen Spektren aus Fig. 2 gestrichelt eingezeichnet. Die Absenkung der Mithörschwelle durch den Adaptor beträgt beim Vokal /a/ 13,5 dB, beim HKT /x/ 18,5 dB. Während die Pegeldifferenzen des Vokals /a/ bereits nach 110 ms Adaptordauer einen konstanten Wert um 2 dB erreichen, sinkt  $\Delta L_T$  beim HKT /x/ mit steigender Adaptordauer weiter ab. Ein Vergleich mit den Werten aus Fig. 2 zeigt die größten Unterschiede bei langen Adaptoren, während die Mithörschwellen bei kurzem Adaptor praktisch identisch sind. Dieser Vergleich verdeutlicht die akzentuierende Wirkung des Adaptors. Die Mithörschwellen der Testtöne sinken mit zunehmender Adaptordauer ab. Umgekehrt bedeutet dies, daß ein Testton konstanten Pegels mit zunehmender Adaptordauer innerhalb des Maskierers immer deutlicher hörbar wird. Die Ergebnisse vergleichbarer Untersuchungen Viemeisters [7] stimmen unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Versuchsschalle gut mit den hier beschriebenen Ergebnissen überein.

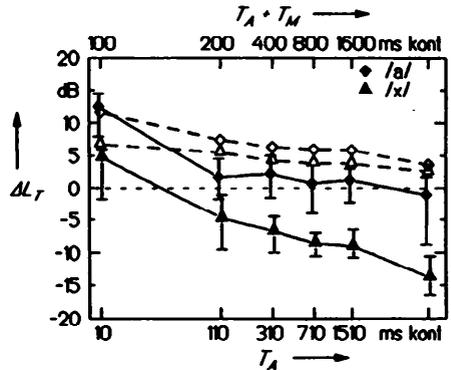


Fig. 3. Adaptor mit Lücke: Median und Interquartilbereich der Pegeldifferenzen  $\Delta L_T$  für die Schalle /a/ und /x/ gemittelt über die vier Versuchspersonen. Gestrichelt sind die Ergebnisse der Mithörschwellenmessungen mit vollständigen Spektren aus Fig. 2 eingezeichnet.

Die Mithörschwellen der Testtöne sinken mit zunehmender Adaptordauer ab. Umgekehrt bedeutet dies, daß ein Testton konstanten Pegels mit zunehmender Adaptordauer innerhalb des Maskierers immer deutlicher hörbar wird. Die Ergebnisse vergleichbarer Untersuchungen Viemeisters [7] stimmen unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Versuchsschalle gut mit den hier beschriebenen Ergebnissen überein.

### Adaptor und Maskierer variabler Dauer

Die bisher beschriebenen Messungen wurden mit konstanter Maskiererdauer und variabler Gesamtdarstellungsdauer durchgeführt. In einer weiteren Meßreihe wurden Adaptor- und Maskiererdauer variiert und die Gesamtdarstellungsdauer konstant gehalten. Der Testton (80 ms) beginnt gleichzeitig mit dem Maskierer, der solange andauert, bis die Gesamtdarstellungsdauer 1,9 s beträgt. Die Ergebnisse dieser Messungen zeigt Fig. 4. Aufgetragen ist die Pegeldifferenz  $\Delta L_T$  als Funktion der Adaptordauer  $T_A$ . Zum Vergleich sind die Ergebnisse mit konstanter

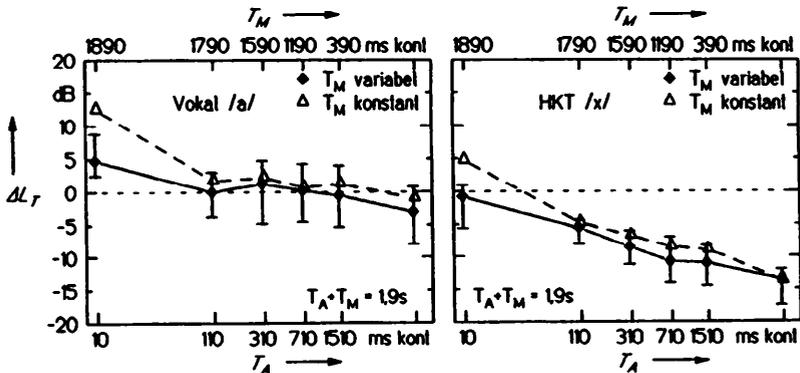


Fig. 4. Variable Maskiererdauer: Pegeldifferenz  $\Delta L_T$  als Funktion der Adaptordauer  $T_A$ . Median über vier Versuchspersonen. Gesamtdarstellungsdauer  $T_A + T_M = 1,9$  s,  $T_T = 80$  ms. Gestrichelt eingezeichnet: Mediane aus Fig. 3 (Konstante Maskiererdauer).

Maskiererdauer aus Fig. 3 gestrichelt eingezeichnet. Insgesamt sinken die Mithörschwellen mit zunehmender Adaptordauer bei variabler Maskiererdauer im Falle des Vokals /a/ um 8,5 dB und im Falle des HKT /x/ um 12,5 dB ab. Die Mithörschwelle des Vokals /a/ bleibt auch bei diesen Messungen für Adaptordauern über 110 ms praktisch konstant, während sie beim HKT /x/ weiter abnimmt. Die Schwellen bei kurzen Adaptordauern unterscheiden sich von denen für konstante Maskiererdauer um 8,5 dB (/a/) bzw. 5 dB (/x/). Mit zunehmender Adaptordauer verlaufen die Mithörschwellen der Maskierer variabler und konstanter Dauer annähernd gleich.

### 3. Diskussion

Der sogenannte *Overshoot*-Effekt ist als zeitabhängige Hörschwellenanhebung bei Simultanverdeckung bekannt, die jedoch nur bei kurzen Verzögerungszeiten, vergleichsweise kurzen Testtondauern und einem erheblichem Unterschied in der spektralen Struktur von Maskierer und Testschall auftritt [2, 3, 4]. Zum *Overshoot*-Effekt bei HKT konnten keine vergleichbaren Untersuchungen gefunden werden, da in der Regel Rauschen unterschiedlicher Bandbreite oder Sinustöne als Maskierer dienen. Diese Untersuchungen lassen aufgrund der langen Testtondauer bei den Messungen mit vollständigem Adaptor und Maskierer keinen Zusammenhang mit dem *Overshoot*-Effekt erwarten. In der Tat bleibt die Mithörschwelle im HKT /x/ weitgehend unabhängig von der Adaptordauer (Fig. 2). Lediglich der leichte Abfall der Mithörschwelle um insgesamt 4 dB könnte als eine Art *Overshoot* gedeutet werden, der aufgrund der verhältnismäßig langen Testtondauer von 80 ms nur sehr gering ausfällt. Der leichte Abfall der Mithörschwelle im Vokal /a/ kann hingegen als schwache Akzentuierung des Testtones durch die benachbarten Formanten des Vokals bei 1,2 kHz und 2,8 kHz interpretiert werden.

Im zweiten Experiment (Fig. 3) sinken die Mithörschwellen beider Versuchsschalle mit zunehmender Adaptordauer  $T_A$  deutlich ab. Die Wahl der Testtonfrequenz basiert auf Untersuchungen von Stoll [5] zur Wahrnehmung von Spektraltonhöhen in HKT. Seine Messungen zeigten, daß bei der Darbietung des Vokals /a/ oder des HKTs /x/ keine ausgeprägte Tonhöhenwahrnehmung im Bereich um 1,8 kHz auftritt. Demgegenüber bleibt der Testton bei 1,8 kHz für Adaptordauern über 110 ms hörbar, obwohl sein Pegel unter seinen ursprünglichen Wert im Maskierer abgesenkt wird ( $\Delta L_T < 0$  dB). Dieses Ergebnis legt nahe, daß an der Akzentuierung beteiligte Prozesse in der Peripherie des Gehörs ablaufen.

Die Mithörschwellen bei variabler Maskiererdauer liegen bei allen Adaptordauern unter denen bei konstanter (kurzer) Maskiererdauer (Fig. 4). Viemeister [7] beschreibt ein allmähliches Abklingen der Akzentuierung über Zeiträume von 10 s nach der Darbietung eines 2,4 s langen Adaptors. Daher ist nicht auszuschließen, daß eine Schalldarbietung der hier beschriebenen Versuche über die Pause ( $T = 2,5$  s) hinweg von der vorhergehenden Darbietung beeinflusst wird. Ein Maskierer, der nach der Testtondarbietung noch andauert, kann als zusätzlicher Adaptor auf eine folgende Darbietung nachwirken. Sein Einfluß wird für kurze Adaptordauern am größten sein, da der kurze Adaptor keine vollständige Akzentuierung bewirkt. Dies zeigt sich in den beschriebenen Meßergebnissen (Fig. 4).

Die Untersuchungen wurden im SFB 204 „Gehör“ mit Unterstützung der DFG durchgeführt.

- [1] Cardozo, B. L. (1967). Annual Progress Report 2: 59-64, IPO Institute for Perception Research, Eindhoven.
- [2] Fastl, H. (1976). *Acustica*, 35(5): 287-302.
- [3] Fastl, H. (1977). *Acustica*, 36(5): 317-331.
- [4] Fastl, H. (1979). *Acustica*, 43(5): 282-294.
- [5] Stoll, G. (1982). In: Clynnes, M., Editor, *Music, Mind and Brain, The Neuropsychology of Music*, S. 271-278. Plenum Press, New York.
- [6] Terhardt, E. (1979). *Hearing Research*, 1: 155-182.
- [7] Viemeister, N. (1980). In: *Psychophysical, physiological and behavioral studies in hearing*, S. 190-199. Delft University Press.
- [8] Wartini, S. (1994). In: *Fortschritte der Akustik - DAGA '94, Dresden*, S. 1021-1024