

Wahrnehmbarkeit von Phasenverzerrungen

Sebastian Goossens, Institut für Rundfunktechnik, München

Moderne Meßverfahren (z.B. Maximalfolgen) erlauben eine reproduzierbare Messung des Phasenverlaufes von Lautsprechern mit vergleichsweise geringem Aufwand. Gleichzeitig wird das Zeitverhalten von Lautsprechern in Testberichten bewertet. Die Interpretation der Meßergebnisse wirkt dabei meist etwas willkürlich.

Für eine geeignete Darstellung und qualifizierte Bewertung der Ergebnisse von Phasenmessungen sollten die Grenzen für die Wahrnehmbarkeit von Phasenverzerrungen durch das menschliche Gehör berücksichtigt werden.

In der Literatur findet man etliche grundlegende Arbeiten zu diesem Thema. Übereinstimmend wird berichtet, daß Phasenverzerrungen bei Kopfhörerbeschallung bzw. bei Lautsprecherbeschallung in reflexionsarmer Umgebung am deutlichsten hörbar sind. Raumeinflüsse können Phasenverzerrungen ganz oder teilweise verdecken. Grenzwerte für zulässige Phasenverzerrungen von Lautsprechern sollten sich an einer kritischen aber auch realistischen Abhörsituation orientieren.

Von den verschiedenen Autoren werden die Grenzen der Wahrnehmbarkeit von Phasen- bzw. Laufzeitverzerrungen je nach Programmmaterial und Versuchskonzept sehr unterschiedlich angegeben. Eigene Untersuchungen führen zu dem Schluß, daß zunächst deutlich unterschieden werden muß zwischen periodischer und impulsartiger Anregung des Gehörs.

Periodische Anregung

Fleischer [3,4] verwendet in seinen Untersuchungen Dreitonkomplexe, die z.B. bei einer sinusförmigen Amplitudenmodulation mit einem ebenfalls sinusförmigen Träger entstehen. Er gibt an, daß Phasenverzerrungen dann wahrgenommen werden, wenn der Phasenverlauf innerhalb einer Frequenzgruppe eine ausgeprägte Frequenzabhängigkeit aufweist. Er definiert den Betrag des sogenannten "effektiven Phasenwinkels".

$$|\Theta| = |\varphi_2 - (\varphi_1 + \varphi_3)/2|$$

Übersteigt dieser Winkel innerhalb einer Frequenzgruppe einen Wert von ca. 15° bei mittleren und etwa 25° bei hohen bzw. tiefen Frequenzen, so sind bei den von ihm verwendeten Testschallens Änderungen der Rauigkeit bzw. der Klangfarbe hörbar. Die Ergebnisse werden auch für andere periodische Testsignale in neueren Arbeiten (Schmid/Jung [8], Braun [2]) sowie in eigenen Experimenten bestätigt.

Seit einiger Zeit erfassen wir bei Lautsprechermessungen im IRT den effektiven Phasenwinkel im Frequenzbereich zwischen 200 Hz und 10 kHz in folgender Weise:

Für den Grenzfall, daß sich alle drei Teiltöne gerade noch in einer Frequenzgruppe befinden wird aus dem gemessenen Phasenverlauf der effektive Phasenwinkel für jede Frequenzstützstelle berechnet und über der Frequenz dargestellt. Hörversuche mit entsprechenden Dreitonkomplexen bestätigen, daß der so ermittelte effektive Phasenwinkel tatsächlich ein zuverlässiges Maß für die Hörwahrnehmung darstellt.

Impulsartige Anregung

Eine ausgeprägte Frequenzabhängigkeit des Phasenverlaufs ergibt einen sprunghaften Verlauf der ersten Ableitung der Phase nach der Zeit also der Gruppenlaufzeit. Daher ist es naheliegend die Hörbarkeit von Verzerrungen der Gruppenlaufzeit zu untersuchen. Zahlreiche Autoren haben sich damit beschäftigt. In Tabelle 1 werden einige Arbeiten mit den jeweiligen Schwellenwerten aufgeführt. Die niedrigsten Schwellen wurden mit impulsartigen Testsignalen ermittelt und liegen im mittleren Frequenzbereich bei wenigen Millisekunden.

Neben synthetischen Testschallens (bandbegrenzte Rechteckimpulse [1], [6]) hat sich Händeklatschen als natürliches und zugleich besonders kritisches Testsignal erwiesen [7].

Es ist plausibel, daß unser Gehör einen einzelnen Händeklatsch-Impuls mit der besten Zeitauflösung verarbeitet. Nach Zwicker u. Fastl [10] ist die Nachverdeckung von der Dauer des Maskierers abhängig. Die Nachhörschwelle eines 5 ms langen Impulses verläuft bei niedrigeren Pegeln als die eines 200 ms langen Maskierers.

Zwicker gibt die kürzeste Zeitkonstante des Gehörs mit etwa 2 ms an. Sie beschreibt, bis zu welcher Grenze unser Gehör die zeitliche Struktur eines Schalles überhaupt auszuwerten vermag. Diese Zeitkonstante von 2 ms gilt allerdings nur für mittlere und hohe Frequenzen, weil unser Gehör darunter mit Filterbandbreiten arbeitet, deren Einschwingzeiten größer als 2 ms sind [11].

Autoren	tiefe Frequenzen	mittlere Frequenzen	hohe Frequenzen
Zwicker u. Feldtkeller 1967	5 ms (f < 500 Hz)	2 ms (f > 500 Hz)	
Laws u. Blauert 1973	1,5 ms bzw. 5 ms (500 Hz)	1,7 ms (2 kHz) 2,5 ms (4 kHz)	2,4 ms bzw. 4 ms (8 kHz)
Blauert u. Laws 1978	3 ms (500 Hz)	0,5 ms (900Hz - 3kHz) 0,4 ms (4 kHz)	1,1 ms (7 kHz)
Klippel 1988	90 ms (Cembalo)	8 ms (Sprache) 50 ms (Cembalo)	
Leckschat 1992	10 ms (55-220Hz) 2 ms (220-880Hz)	1 ms - 3 ms (880 Hz - 3,5 kHz)	0,5 ms - 1 ms (3,5kHz-14kHz)

Tabelle 1: Schwellen für die Hörbarkeit von Verzerrungen der Gruppenlaufzeit

Versucht man nun aus den in Tabelle 1 aufgeführten Literaturdaten Toleranzgrenzen für den Verlauf der Gruppenlaufzeit eines Regielautsprechers abzuleiten, so stößt man auf erhebliche Schwierigkeiten. Selbst wenn man die hohen Werte bei Sprache und Cembalo außer acht läßt, schwanken die Schwellenangaben für mittlere und hohe Frequenzen bei impulsartiger Anregung von 0,4 ms bis 4 ms, also um den Faktor 10. Durch Training konnte in einer Arbeit [1] die Schwelle der Versuchspersonen von über 1 ms auf 0,4 ms abgesenkt werden. Dieser Effekt allein reicht aber als Erklärung für die großen Schwankungen nicht aus.

Eigene Experimente

Den Versuchspersonen wurde über Kopfhörer ein im reflexionsarmen Raum aufgenommenes Händeklatschen dargeboten. Das Testsignal wurde im Abstand von ca. 1 Sekunde fortwährend wiederholt. Die Teilnehmer konnten zwischen zwei Darbietungskanälen frei hin- und herschalten. Ein Kanal gab das Testsignal direkt und unverzerrt wieder, über den zweiten Kanal wurde das Signal mit Hilfe eines Allpasses in seinem Phasenverlauf verzerrt angeboten.

Art der Phasenmanipulation

Zunächst war der Allpaß so abgestimmt, daß alle Frequenzen unter 1,4 kHz mit einer konstanten Gruppenlaufzeit beaufschlagt wurden. Der Wert dieser Gruppenlaufzeit wurde vom Versuchsleiter variiert. Die Versuchspersonen sollten angeben, ob sie einen Unterschied in der Darbietung über Kanal A oder B wahrnehmen. Alle hörten sicher einen Unterschied ab einem Wert von 1,5 ms.

Für das zweite Experiment wurde der Allpaß so abgestimmt, daß nur Frequenzen von 1,2 kHz bis 1,6 kHz verzögert wurden. Ansonsten blieb der Versuchsablauf unverändert. Bei 1,5 ms hörte keine Versuchsperson einen Unterschied. Der Wert der Gruppenlaufzeit mußte auf etwa 3,5 ms erhöht werden, damit alle Teilnehmer einen Unterschied wahrnehmen konnten.

In beiden Experimenten wurde der Verlauf der Gruppenlaufzeit bei 1,4 kHz sprunghaft verändert. Die Wahrnehmungsschwelle lag im zweiten Experiment um den Faktor 2 bis 3 höher. Entscheidend ist also nicht der maximale Wert der Gruppenlaufzeitverzerrung, sondern der gesamte Verlauf der Gruppenlaufzeit über der Frequenz.

Ansatz zur Klärung der widersprüchlichen Schwellenwerte

Die folgenden Überlegungen sollen die scheinbaren Widersprüche in den Angaben über die Schwellen der Hörbarkeit von Gruppenlaufzeitverzerrungen klären:

Händeklatschen ist ein Impuls mit einer über der Frequenz weitgehend konstanten Energiedichte. Dieser Impuls wird zeitlich gesehen durch den Allpaß in zwei aufeinanderfolgende Impulse zerlegt. Der erste Impuls beinhaltet die Frequenzen mit der Gruppenlaufzeit 0, der zweite Impuls die um den konstanten Wert verzögerten Frequenzen.

Das Gehör kann den Doppelimpuls von dem unverzerrten Impuls nur dann unterscheiden, wenn der zweite Impuls aufgrund seines zeitlichen Abstandes zum ersten Impuls oder aufgrund seiner hohen Energie aus der Nachhörschwelle des ersten Impulses herausragt. Bild 2 soll das verdeutlichen:

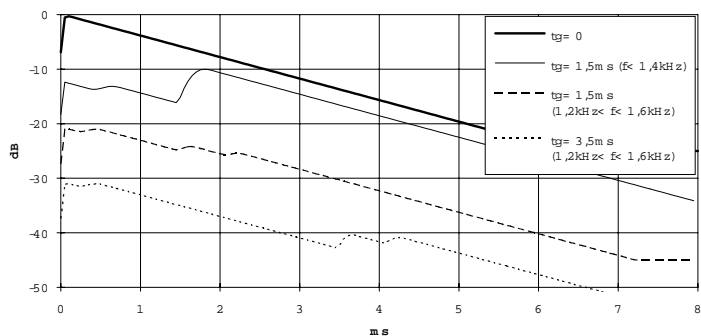


Bild 2: Nachhörschwelle für vier Anregungsimpulse

Die oberste Kurve zeigt die Nachhörschwelle in Dezibel über der Zeit in Millisekunden, die ein unverzerrter Impuls erzeugt. Der Impuls wurde gleichgerichtet (Einweggleichrichtung), mit einem Tiefpaß erster Ordnung gefiltert und logarithmiert. Die Zeitkonstante von 2 ms des Tiefpasses bildet hierbei die niedrigste Grenzdauer des Gehörs nach.

Die zweite Kurve von oben zeigt (um 10 dB verschoben) die Nachhörschwelle des Doppelimpulses aus dem ersten Experiment. Der zweite Impuls ragt bei etwa 1,5 ms deutlich aus der Nachhörschwelle des ersten Impulses hervor und wird deshalb getrennt wahrgenommen.

Die dritte Kurve von oben zeigt (um 20 dB verschoben) die entsprechende Nachhörschwelle für das zweite Experiment. Der zweite Impuls (ebenfalls bei 1,5 ms) kann vom Gehör nicht getrennt wahrgenommen werden, weil er von der Nachhörschwelle des ersten Impulses verdeckt wird. Seine Energie reicht nicht aus um nach nur 1,5 ms herauszuragen.

Die letzte Kurve (um 30 dB verschoben) zeigt für das zweite Experiment, daß nach einer Gruppenlaufzeit von 3,5 ms die Nachhörschwelle des ersten Impulses ausreichend abgeklungen ist. Der zweite Impuls ragt nun deutlich heraus.

In ähnlicher Weise lassen sich mit Hilfe dieses Ansatzes die sehr unterschiedlichen Literaturangaben zur Hörbarkeit von Gruppenlaufzeitverzerrungen nachvollziehen.

Konsequenzen für die Interpretation von Messungen der Gruppenlaufzeit

Neben dem effektiven Phasenwinkel berechnen wir im IRT auch den Verlauf der Gruppenlaufzeit aus dem gemessenen Phasenverlauf der Lautsprecher. Der Verlauf der Gruppenlaufzeit sollte sicherstellen, daß ein Impuls nicht in getrennt wahrnehmbare Einzelimpulse zerfällt. Der oben gezeigte Ansatz läßt folgende Anforderungen an den Verlauf der Gruppenlaufzeit hochwertiger Lautsprecher zu:

Bei mittleren und hohen Frequenzen sollten die Schwankungen der Gruppenlaufzeit möglichst klein (z.B. +/- 0,2 ms) sein. Ein gleichmäßiger Anstieg der Gruppenlaufzeit zu tiefen Frequenzen auf wenige Millisekunden scheint nach gegenwärtigem Stand der Erkenntnis nicht wahrnehmbar zu sein.

Eine gleichmäßige Erhöhung der Gruppenlaufzeit über größere Frequenzbereiche ("Treppenverläufe") kann bei impulsartiger Anregung je nach Energieverteilung des Signals zu hörbaren Verzerrungen führen.

Einfluß der Gruppenlaufzeit auf die Lokalisation von Schallquellen

Um eine sichere Lokalisation durch ein Lautsprecherpaar zu erhalten, sollten die Phasengänge bzw. die Gruppenlaufzeitverläufe der beiden

Lautsprecher gleich sein. Leckschat [7] fand, daß Abweichungen von +/- 1 ms auch in recht schmalen Frequenzbereichen die Position einiger Orchesterinstrumente merklich verschieben. Bei +/- 0,1 ms Abweichung war sicher kein Unterschied zu bemerken.

Für die Messungen an Regielautsprechern kann es daher sinnvoll sein, für ein bestimmtes Lautsprecherpaar die Differenz der Gruppenlaufzeitverläufe anzugeben.

Vor allem aber ist daraus abzuleiten, daß die Phasenverläufe bei Regielautsprechern auch über Jahre nur minimale Serienstreuungen aufweisen dürfen. Im Rundfunkbetrieb werden häufig Lautsprecher desselben Typs zu einem neuen Paar kombiniert.

Zusammenfassung

In der Literatur werden die Grenzen der Wahrnehmbarkeit von Phasen- bzw. Laufzeitverzerrungen je nach Autor, Programmmaterial und Versuchskonzept sehr unterschiedlich angegeben. Die Literaturdaten passen sehr viel besser zueinander, wenn deutlich in der Art der Anregung des Gehörs durch das Programmmaterial (periodisch oder impulsartig) unterschieden wird. Zusätzlich ist die Art der Phasenmanipulation bei den verschiedenen Hörversuchen der Literatur zu berücksichtigen.

Bei periodischer Anregung hat sich die Berechnung des effektiven Phasenwinkels [4] in Abhängigkeit von der Frequenz aus dem gemessenen Phasengang bewährt.

Die Überschreitung der angegebenen Grenzwerte bewirkt eine Veränderung der zeitlichen Hüllkurve des Signals und äußert sich in der Veränderung der wahrgenommenen Rauigkeit bzw. der Klangfarbe.

Bei impulsartiger Anregung (z.B. Händeklatschen) ist die Änderung der Gruppenlaufzeit über der Frequenz von besonderer Bedeutung.

Für die Verarbeitung solcher Impulse muß die niedrigste Zeitkonstante des Gehörs (2 ms) angenommen werden. Der Verlauf der Gruppenlaufzeit sollte sicherstellen, daß ein Impuls nicht in getrennt wahrnehmbare Einzelimpulse zerfällt.

Zur Beschreibung des Zeitverhaltens eines Lautsprechers wird die Darstellung des effektiven Phasenwinkels und der Gruppenlaufzeit im Frequenzbereich von 200 Hz bis 10 kHz empfohlen.

Literatur

- [1] Blauert, J.; Laws, P.: Group Delay Distortions in Electroacoustical Systems. J. Acoust. Soc. Am., Vol. 63, No. 5, 1978, pp. 1478-1483.
- [2] Braun, D: Hörbarkeit von Phasenänderungen an Rechtecksignalen. Bericht 18. Tonmeistertagung 1994, S.659-674
- [3] Fleischer, H.: Über die Wahrnehmbarkeit von Phasenänderungen. Acustica, Vol. 35, No. 3, 1976, S. 202-209.
- [4] Fleischer, H.: Hörbarkeit von Phasenunterschieden bei verschiedenen Arten der Schalldarbietung. Acustica, Vol. 36, No. 2, 1976/77, S. 90-99.
- [5] Klippel, W.- Zusammenhang zwischen objektiven Lautsprecherparametern und subjektiver Qualitätsbeurteilung. Angewandte Akustik, Band 1, S. 46, VEB Verlag Technik, Berlin 1988.
- [6] Laws, P., Blauert, J.: Ein Beitrag zur Hörbarkeit von Laufzeitverzerrungen. Fortschritte der Akustik DAGA 73, 1973, S. 447-450.
- [7] Leckschat, D.: Verbesserung der Wiedergabequalität von Lautsprechern mit Hilfe von Digitalfiltern. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, RWTH Aachen 1992.
- [8] Schmid, W., Jung, G.: Psychoakustische Experimente mit einem elektroakustischen Wiedergabesystem mit variierbarer Sprungantwort. Fortschritte der Akustik DAGA 95, 1995, S. 931-934.
- [9] Zwicker, E.: Die Zeitkonstanten (Grenzdauern) des Gehörs. Z. Hörger. Akustik 13, 1974, S. 82-102
- [10] Zwicker, E.; Fastl, H.: Psychoacoustics, Facts and Models. Springer-Verlag, Berlin 1990.
- [11] Zwicker, E.; Zollner, M.: Elektroakustik. 2. Auflage, Springer-Verlag, Berlin 1984.