

Sehen und verstehen

Grundlagen der Lautsprechermesstechnik, Teil 3

Von Fabian Reimann

Dieser dritte Teil unserer Serie zu den Grundlagen der Lautsprechermesstechnik soll sich mit der Erfassung und Interpretation von Verzerrungen beschäftigen. Neben den zuvor bereits behandelten Messungen der Frequenzgänge sowie des Ausschwingverhaltens zählen Verzerrungen zu einem der maßgeblichen Faktoren, die bei der klanglichen Beurteilung eines Lautsprechers eine Rolle spielen. Besonders im P.A.-Bereich, wo regelmäßig Pegel vorkommen, die das übliche HiFi- oder Studioanwendungs-Niveau weit übertreffen, wird die Erfassung der Verzerrungen von einigen Puristen sogar als das wichtigste Kriterium überhaupt verstanden.

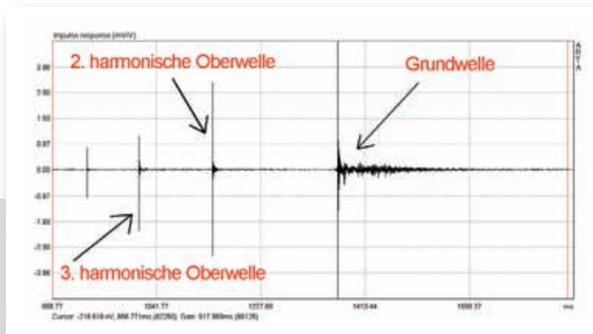


Abb. 1 Impulsantworten der Grundwelle und ihrer harmonischen Oberwellen als Ausgangsdaten für die Verzerrungsanalyse

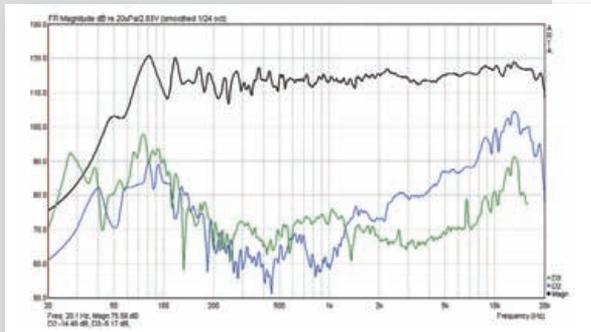


Abb. 2 Beispielmessung einer 12-Zoll/1-Zoll-Box bei circa 115 dB SPL mit deutlich erhöhten Verzerrungen im Hoch- und Tieftonbereich

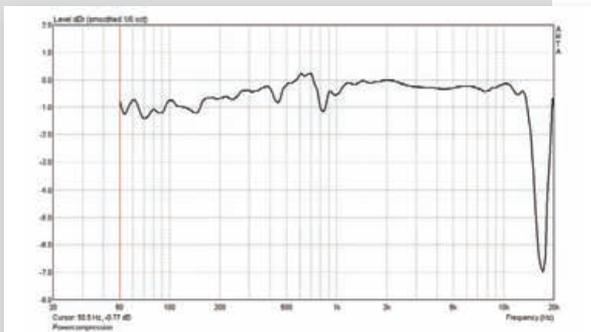


Abb. 3 Differenzmessung nach 30 Minuten „Vollgas“ (Stichwort: Power Compression)

Verzerrungen von Audiosignalen sind jedem Musiker und Techniker bestens bekannt: Beim letzten Konzert schien der Gesang aufgrund der deutlich überfahrenen Lautsprecher völlig verfärbt und unnatürlich, bei vielen Konzertbesuchern zeichneten sich aufgrund der aggressiv-kreisenden Wiedergabe tiefe Falten auf der Stirn ab und man selbst verließ die Veranstaltung mit einem nervigen Klingeln in den Ohren. Es scheint ganz klar: Verzerrungen sollten in der gesamten Wiedergabekette möglichst gering ausfallen, um eine annehmbare Reproduktion von Musik zu ermöglichen. Dies gilt in besonderem Maße für die Lautsprecher – und mit diesem Statement ist dieser Grundlagenartikel zu Ende. Nun ja, fast ...

Lineares und nichtlineares Übertragungsverhalten

Grundsätzlich wird generell zwischen linearem und nichtlinearem Übertragungsverhalten unterschieden. Lautsprecher zeigen üblicherweise eine Vielzahl linearer Verzerrungen, da sie bestenfalls angenäherte, aber niemals wirklich perfekte Frequenz- und Phasengänge haben. Streng genommen könnte man auch alle erwünschten Eingriffe im Bereich der elektronischen Wiedergabekette als „Verzerrung“ bezeichnen, da sie das Signal ja ir-

gendwie beeinflussen, auch wenn hierfür in der Praxis meist andere Begriffe gebräuchlich sind (zum Beispiel „Entzerrung“ für den Einsatz eines Equalizers).

Darüber hinaus zeigen Lautsprecher auch eine Vielzahl nichtlinearer Verzerrungen, die gerade dann besonders deutlich werden, wenn der Lautsprecher hohe Leistungen verarbeitet und hohe Schalldruckpegel erzeugen soll. In diesem Fall wird das Ursprungssignal nicht einfach unverändert („linear“) verstärkt, sondern ihm werden neue Signale hinzugefügt – es besteht dann kein lineares Verhältnis mehr zwischen Ein- und Ausgangssignal. Aus theoretischer Sicht ist diese Eigenschaft natürlich nicht erwünscht, in der Praxis aber bekannt und wird von vielen Hörern wie selbstverständlich akzeptiert. Tatsächlich sind Lautsprecher die dominante Quelle für Verzerrungen und liegen mit ihren Klirranteilen meist mehrere Prozentpunkte über den Mikrofonen und noch gleich mehrere Zehnerpotenzen über der üblichen Verstärkerelektronik.

Anregung

Traditionellerweise werden Lautsprecher für Verzerrungsmessungen mit einem Sinussignal beaufschlagt. Neben der eigentlichen Frequenz

des Anregungssignals („Grundwelle“) lassen sich dann relativ einfach die vom Lautsprecher generierten Verzerrungsprodukte höherer Ordnung ablesen. Dies verdeutlicht **Abb. 1**, wo jeweils die gemessenen Impulse eines 12-Zoll-/1-Zoll-Topteils zu sehen sind.

Ganz rechts im Bild ist der Impuls der Grundwelle abgebildet (auch bekannt als „Frequenzgang“), im weiteren Verlauf sind die harmonischen Verzerrungskomponenten gekennzeichnet, zunächst die zweite und dritte Ordnung. Dabei handelt es sich um verzerrungsbedingte, vom Lautsprecher neu „generierte“ Signale, die jeweils in Oktavabständen oberhalb der Anregungsfrequenz angegliedert sind (K-2, K-3,...K-n). Die Messsoftware verrechnet anschließend die gemessenen Impulse und stellt sie jeweils in Frequenz und Amplitude dar (**Abb. 2**). Dort ist die Grundwelle (schwarz) abgebildet sowie die Komponenten zweiter (blau) und dritter (grün) Ordnung. Die Kurve zeigt ein typisches Bild für einen P.A.-Lautsprecher bei erhöhtem Pegel. Zu den oberen bzw. unteren Grenzen des Frequenzspektrums steigen die Verzerrungen langsam an, im mittleren Frequenzbereich fallen sie relativ gering aus. Das liegt einfach daran, dass die verwendeten Lautsprecherkomponenten in diesem Bereich einen höheren Wirkungsgrad haben und sich entsprechend weniger abmühen müssen, den geforderten Schalldruck zu liefern – zu den Randbereichen hin, beispielsweise im Bassbereich unter 100 Hz, geht das nur durch eine höhere Endstufenleistung und vergrößerten Membranhub. All dies quittiert der Lautsprecher in diesem Bereich durch deutliche Zunahme der Verzerrungen (siehe blaue/grüne Kurve).

Verzerrungsursachen

Als prinzipiell mechanisch-verlustbehaftete Wandler haben Lautsprecher eine ganze Reihe von Schwachpunkten, die sie anfällig für Verzerrungen machen. Dazu gehören neben den mechanischen Einschränkungen wie dem reichlich nichtlinearen Verhalten von Sicke, Aufhängung, Membran u. a. vor allem auch die elektrischen Nichtli-

nearitäten. Hier spielt die Position der Schwingspule im Magnetfeld des Lautsprechers eine Rolle, die sich ja bei Musikwiedergabe niemals in der mittleren Ruheposition befindet. Besonders kritisch wird es, wenn die Schwingspule bei großen Auslenkungen der Membran das Magnetfeld verlässt – drastische Verzerrungswerte markieren hier das „Ende der Fahnenstange“.

Aber auch Aufhitzungseffekte schlagen sich sehr deutlich im Verzerrungsverhalten nieder (Stichwort: Power Compression). Bewegt man sich in den Grenzbereichen der Leistungsfähigkeit eines Lautsprechers, führt eine Erhöhung der zugeführten Verstärkerleistung nicht immer dazu, dass das Signal wie erwartet auch gleichmäßig höher verstärkt wird. In **Abb. 3** wird die Differenzkurve gezeigt, die auf zwei Messungen einer typischen P.A.-Box basiert, die zuerst im Kaltzustand und anschließend nach 30 Minuten Volllast gemessen wurde. Diese Differenzkurve zeigt vor allem im Grund- und Tieftonbereich, aber auch im Hochton eine um etwa 1 dB absinkende Kurve. Dieses Verhalten lässt sich auf den erwärmungsbedingten Anstieg des elektrischen Widerstands der Schwingspulen zurückführen – es wird weniger Leistung in akustische Wirkleistung, sondern verstärkt in Abwärme umgesetzt.

Grenzwertiges im Medium Luft

Vor allem bei Messungen an Hochtonhörnern werden oft relativ starke Verzerrungen festgestellt. Um dies zu erklären, muss man sich die Konstruktion der dort verwendeten Kompressionstreiber anschauen. **Abb. 4** zeigt einen für den HiFi-Bereich typischen Hochtonlautsprecher, dessen Membran wie ein Kugelabschnitt („Kalotte“) aussieht. Er strahlt mit seiner gesamten Fläche nach vorne ab, jedoch ist der Wirkungsgrad dieses Lautsprechers eher bescheiden und nicht für Beschallungsaufgaben geeignet. Um den Wirkungsgrad zu erhöhen, arbeitet man in P.A.-Treibern mit erhöhter Kompression. **Abb. 5** zeigt einen Treiber neuerer Generation, der zwar ebenfalls mit einer kalottenförmigen Membran ausgestattet

Wie war das noch ...?

- **lineare Verzerrungen: allgemeine Abweichung des Übertragungsverhaltens in Relation zum Original („lineare Modellvorstellung“ mit begrenzter Gültigkeit)**
- **nichtlineare Verzerrungen: Hinzufügen von zuvor nicht vorhandenen, harmonischen Obertönen (ganzzahlige Vielfache des Ausgangssignals)**
- **bei frequenzabhängiger Betrachtung der Verzerrungen auch als Indikator für mechanische bzw. elektrische Überlastungen eines Lautsprechers bzw. von Teilen der Wiedergabekette (Medium Luft, Ohr...)**
- **hohe Relevanz für den Klangeindruck, auch wenn Klirrfaktoren als Einzahlwerte der komplexen, psychoakustischen Realität nicht völlig gerecht werden können**
- **der Selbstversuch auf www.klippel-listenings-test.de wird angeraten!**



Abb. 4 Üblicher HiFi-Hochtöner mit Kalottenmembran (Visaton G-25 FFL)

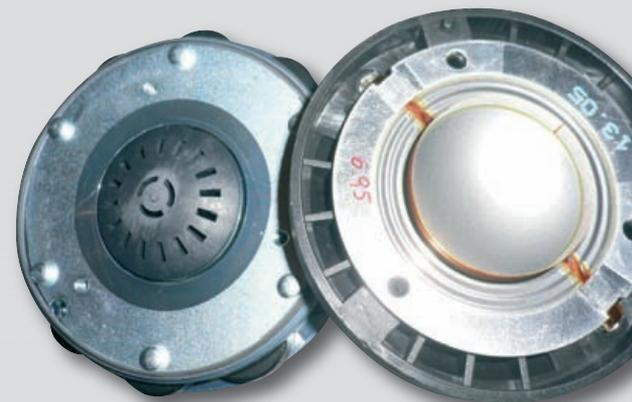


Abb. 5 1 Zoll P.A.-Kompressionstreiber mit Titanmembran und geschlitzten Austrittsöffnungen im Phaseplug (18sound ND-1030; Blick ins Innere durch abgeschraubten Deckel)

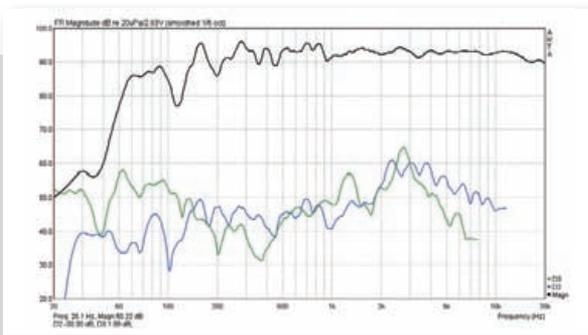


Abb. 6 8 Zöll-Box mit unterdimensioniertem Hochtöner

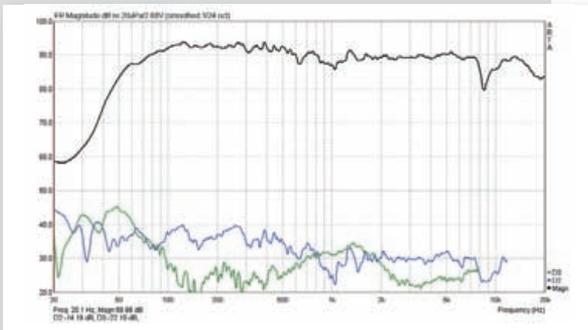


Abb. 7 Studiomonitor mit ca. 90 dB SPL und...

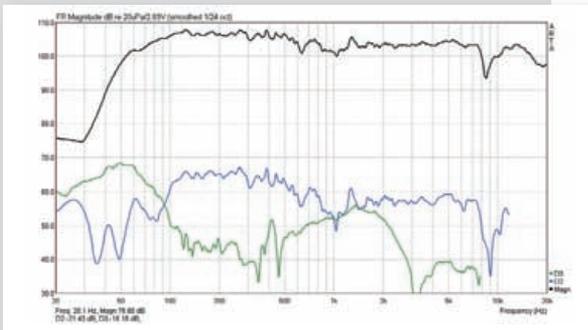


Abb. 8 ... ca. 105 dB SPL – interessant ist die insgesamt geringe Zunahme der Verzerrungen

ist, die den Schall jedoch nicht direkt, sondern über einen gewissen Umweg (kleine Schlitz- und Öffnungen im links davon sichtbaren Phaseplug) abstrahlt. Die Kompression liegt hier, gegenüber einer direkt abstrahlenden HiFi-Kalotte, aber etwa um den Faktor 10 höher. Der Schalldruckpegel innerhalb eines Kompressionstreibers kann so leicht 160 dB und mehr erreichen, womit die Luft selbst als schallübertragendes Medium an ihre Grenzen kommt. Insgesamt erscheint es daher wenig verwunderlich, dass man bei P.A.-Boxen im Hochtonbereich oftmals recht hohe Verzerrungswerte messen kann.

Interpretation

Üblicherweise werden Verzerrungen in prozentualen Anteilen gewertet, wofür sich einige Grenzwerte zur Beurteilung eingebürgert haben – bei besonders kritischen Anwendungen (Studio, Mastering) wird oftmals 1 % als Grenze gesetzt. Im Beschallungsbereich gibt man sich mit 3 % im Mittel zufrieden; 10 % markieren die absolute Leistungsgrenze und sollten nicht überschritten werden. Zu unterscheiden ist zwischen den beiden maßgeblichen Verzerrungskomponenten K-2 und K-3, die sich klanglich unterschiedlich auswirken. Die zweite harmonische Oberwelle (K-2) stört beim Musikhören meist weniger, da sie genau mit Oktavabstand zur Grundwelle liegt und sich (Achtung, Wortspiel!) „harmonischer“ in das Klangbild einfügt. Im Gegensatz dazu steht die dritte harmonische, die sich am ehesten als „aggressive“ oder „raue“ Komponente beschreiben lässt. K-3-Anteile werden zudem schon bei wesentlich geringerer Dosierung als störend bemerkt.

Im Folgenden sollen nun einige Messungen an Lautsprechern exemplarisch ausgewertet werden.

In **Abb. 6** sieht man die Messung eines 8-Zöll-Lautsprechers mit deutlich unterdimensioniertem Hochtonsystem. Bei 2 bis 3 kHz steigen die Verzerrungen stark an, erreichen einen ca. zweiprozentigen Anteil, was in diesem besonders hörempfindlichen Bereich durchaus schon als störend empfunden werden kann (zur Umrechnung der

Kurven in handlichere Prozentwerte siehe Kasten 2 „Klirrdämpfung und Umrechnung“).

Abb. 7 zeigt einen hochwertigen Studiomonitor bei geringer Leistung – die Verzerrungen bewegen sich weit unterhalb von einem Prozent und am Rande des Messbaren. Gehörmäßige Beeinträchtigungen sind hier nicht zu erwarten. Nach Erhöhung des Pegels um etwa 15 dB (**Abb. 8**) erreichen nur die Verzerrungen im Bassbereich etwas höhere Werte, die übrigen Bereiche bleiben nach wie vor völlig unkritisch. Diese Box scheint also recht pegelfest und ermöglicht entspanntes Arbeiten.

Abb. 9 zeigt eine 15-Zöll-Box von HK Audio (vgl. Test in dieser Ausgabe), zunächst bei etwa 100 dB SPL, dann bei etwa 120 dB SPL (**Abb. 10**). Sehr deutlich kann man hier den Unterschied zwischen den beiden Messungen erkennen, zwischen denen immerhin 20 dB Dynamikunterschied liegen. Zunächst fallen erhöhte Verzerrungen im Bassbereich unter 70 Hz auf, da das 15-Zöll-Chassis unterhalb dieser Frequenz nicht mehr ausreichend bedämpft wird und somit quasi freischwingt. Ebenfalls auffällig sind die erhöhten Verzerrungen ab ca. 1 kHz, deren Kurven ab dort beinahe parallel zur Grundwelle liegen. Wie im vorherigen Abschnitt erläutert, handelt es sich hierbei um die typischen Verzerrungen eines Kompressionstreibers, die man so erstmal hinnehmen muss. Etwas unschön sind jedoch die starken Anteile des K-3 in der Region um 1 kHz, die psychoakustisch besonders anfällig ist. Besonders deutlich wird hier die hohe Abhängigkeit der Verzerrungen vom geforderten Pegel. Leicht können sich kritische Werte durch verhältnismäßig geringe Pegelveränderungen einstellen.

Hör mal!

Leider ist die Ermittlung der Klirrateile (wie bisher gezeigt) nicht allzu aussagekräftig, auch wenn die handlichen Prozentwerte eine scheinbar gute Vergleichsmöglichkeit eröffnen und das Verfahren selbst weit verbreitet ist. Es liegt jedoch auf der Hand, dass das Messen eines Lautsprechers mit einer Sinusanregung kaum etwas mit der

Klirrdämpfung und Umrechnung in prozentualen Klirrfaktor

- 0 db = 100 %
- 5 db = 56 %
- 10 db = 31 %
- 20 db = 10 %
- 30 db = 3 %
- 40 db = 1 %
- 50 db = 0,32 %
- 60 db = 0,1 %

Weiterführende Links & Literatur

- www.klippel-listeningtest.de
- www.sengpielaudio.com/Rechner-klirr.htm
- Earl Geddes: „Audio Transducers“ (2002), S. 223 ff.
- Wolfgang Klippel: „Large Signal Performance of Tweeters, Micro Speakers and Horn Drivers“; AES Convention 118 (Mai 2005)

Realität zu tun hat, da normalerweise nicht nur eine, sondern mehrere tausend Frequenzen gleichzeitig wiedergegeben werden sollen (Stichwort: Intermodulationsverzerrungen und spektrale Verdeckung). Auch die üblichen Grenzwerte von 1 %, 3 % oder 10 % sind in ihrer Wahrnehmung extrem vom Musikmaterial abhängig – so können bei guten Gesangsaufnahmen schon geringste Verzerrungen herausgehört werden, wohingegen bei eher impulsartigen Geräuschen (z. B. Schlagzeug) noch Verzerrungen im hohen zweistelligen Prozentbereich nicht als störend wahrgenommen werden. Bezieht man jetzt noch die bekannten Fehler eines Lautsprechers in puncto Frequenzgang und Ausschwingverhalten sowie die Eigenverzerrungen des Ohrs in die Überlegung ein, so entsteht ein wilder „Cocktail“, der kaum noch Ähnlichkeiten mit seinen Ausgangszutaten (dem ursprünglichen Signal) zu haben scheint. Daher möchten wir den geneigten Leser ermutigen,

sich auf der sehr gut gemachten Internetseite von Wolfgang Klippel unter www.klippel-listeningtest.de einfach selbst ein Bild von der klanglichen Relevanz der hier beschriebenen Verzerrungen zu machen. Voraussetzung ist lediglich ein wenig Zeit und ein gutes Paar Kopfhörer.

Finale

Im dritten Teil dieser Grundlagenreihe wurde in knapper Form in die Messung und beispielhafte Interpretation von Verzerrungen eingeführt. Wie immer gilt, dass unsere Grundlagenartikel nur einen kleinen Einblick in die Materie liefern können. Durch Nachfragen im tools-Forum unter www.tools4music.de oder per Mail an redaktion@tools4music.de können alle weiteren Unklarheiten aus der Welt geräumt werden.

Der vierte Teil dieser Serie wird sich in der kommenden Ausgabe mit Abstrahlungsmessungen beschäftigen. ■

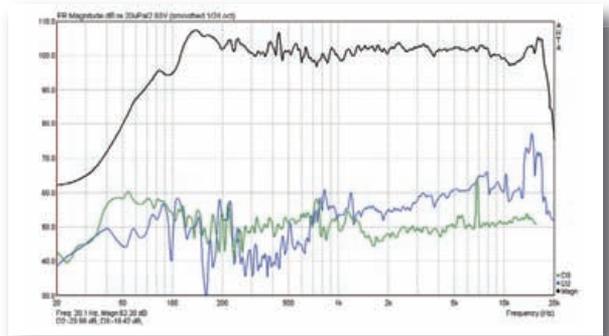


Abb. 9 HK CN-115 mit ca. 100 dB SPL und...

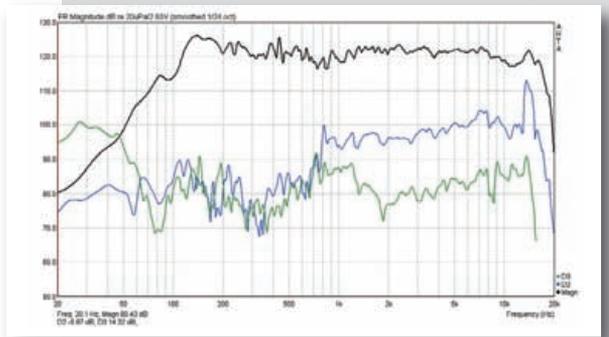


Abb. 10 ... ca. 120 dB SPL – besonders im Bassbereich <70 Hz und im Hochton ab 1 kHz deutliche Steigerung des Klirrs

Anzeige

Die Saite mit dem großen Sound und dem perfekten Spielgefühl.

Gig für Gig.



Endlich gibt es Saiten, die 3-5 x länger halten, die du deshalb auch seltener kaufen und aufziehen musst, und die dafür sorgen, dass deine Gitarre immer dann bereit ist, wenn du sie brauchst.

www.elixirstrings.com

