

# Untersuchungen zum Impulsverhalten von Lautsprechern

G. KRUMP

Harman/Becker Automotive Systems GmbH, Straubing

## 1. Einführung

Die Impulswiedergabe ist bei Lautsprechern in allen Bereichen der Anwendung ein wichtiges Kriterium. Tiefe Frequenzen müssen von Lautsprechersystemen bei entsprechender Lautstärke nicht nur möglichst verzerrungsfrei wiedergegeben werden, sondern auch mit der notwendigen Impulshaftigkeit und Dynamik.

In der vorliegenden Untersuchung werden unterschiedliche Lautsprecher zunächst in Hörversuchen bezüglich ihrer tieffrequenten Impulswiedergabe und verwandter Eigenschaften miteinander verglichen. Mit Hilfe von Multisinus-Signalen verschiedener spektraler Zusammensetzung wird versucht, durch Korrelationsanalysen zwischen Anregung und Wiedergabesignal im Zeit- und Spektralbereich ein physikalisches Maß für die Impulswiedergabe zu ermitteln.

## 2. Hörtest

Sechs Lautsprecher mit Konusmembranen (Strahlerfläche: 135 cm<sup>2</sup>) und einem Gesamtdurchmesser von ca. 160 mm wurden jeweils in dieselbe geschlossene Box mit 70 l Volumen eingebaut, während ein 58x84 cm<sup>2</sup> großes Flat Panel mit mehreren Treibern (LP-Nr. 2) im Freifeld mit großem Wandabstand betrieben wurde. Lautsprecher Nr. 4 stellt schließlich neben dem Flat Panel einen weiteren BiegeWellenwandler (ab 150 Hz) mit sehr leichter Membrane (Strahlerfläche: 220 cm<sup>2</sup>) dar, der ebenfalls in die Box eingebaut wurde. Die wesentlichen Daten der acht Lautsprecher sind, sofern angebar, in Tab. 1 aufgeführt. Die geübten Versuchspersonen sollten im Blindtest in Form einer Größenschätzung ohne Ankerschall auf einer Linie mit einer äquidistanten Einteilung von 1 bis 10 im Fragebogen die Basswiedergabe, die Impulswiedergabe sowie das Verzerrungsverhalten der Lautsprecher abschätzen [6]. Die Zahl 10 sollte dabei eine vollkommen natürliche Wiedergabe repräsentieren, während die Zahl 1 einer sehr schlechten Reproduktion entspricht [3]. Allen 12 Personen wurden in einer Sitzung in gleicher Reihenfolge pro Kriterium drei unterschiedliche Musikstücke von einer harmaninternen Test-CD vorgespielt, die neben den mit etwa gleicher Lautheit aufgenommenen Musikstücken auch ein Rosa Rauschen zum Einpegeln beinhaltete. Der Darbietungspegel des Rosa Rauschens am Sitzplatz der Versuchspersonen in ca. 2 m Abstand von den Lautsprechern betrug in einem Abhör-raum mit über der Frequenz in etwa konstanter Nachhallzeit von 0,4 sec. für alle Lautsprecher 75 dB. Die Impulswiedergabe und das Verzerrungsverhalten wurde zusätzlich auch bei einem Pegel von 85 dB beurteilt, wobei die Personen ihre einmal abgegebenen Urteile nicht mehr einsehen konnten. Der Pegel war so gewählt, daß auch beim kritischen Lautsprecher keine offensichtlichen Störungen wie Anschlagen der Spule zu hören waren. Unterschiedliche Wirkungsgrade der Lautsprecher wurden durch Dämpfungsglieder ausgeglichen. Alle Musikstücke liefen über einen Tiefpaßfilter mit 1 kHz Grenzfrequenz und einer Flankensteilheit von -40 dB/Dekade.

Aus den 12 Angaben der Versuchspersonen wurden für jedes Kriterium Zentralwert und Wahrscheinliche Schwankung ermittelt und in Fig. 1 dargestellt. Die Ergebnisse sind nach der Impulsbewertung bei 75 dB in aufsteigender Reihenfolge aufgetragen. Die Zentralwerte sind in Tab. 1 zum Vergleich nochmals angeführt. Die Beurteilungen der sehr unterschiedlichen Lautsprecher bewegen sich relativ eng im Mittelfeld. Die Wahrscheinlichen Schwankungen repräsentieren letztendlich die interindividuellen Streuungen, wobei bei einer Größenschätzung ohne Ankerschall mit größeren Schwankungen zu rechnen ist.

Die Basswiedergabe wird bei den beiden BiegeWellenwandlern 2 und 4 am schlechtesten beurteilt, das beste Ergebnis erhält der speziell dafür ausgelegte Lautsprecher 1 mit harter Aufhängung, aber dem größten Kraftfaktor Bxl, der größten bewegten Masse Mms und dem größten Hub von ± 18 mm. Interessant ist auch, daß der

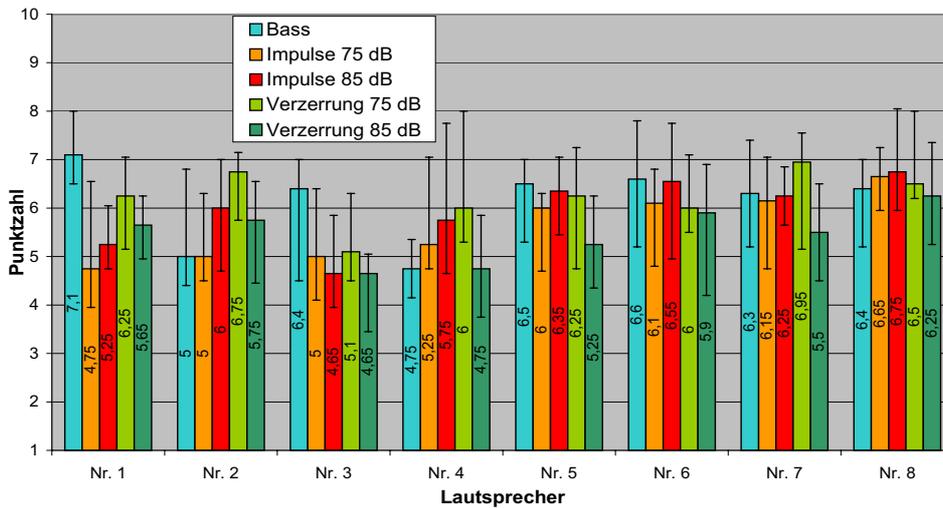
Wandler Nr. 6 mit der höchsten Resonanzfrequenz Fs unter den Konuslautsprechern infolge seiner sehr hohen elektrischen Güte Qe und einer Gesamtgüte Qts von 1 einen gleich guten, sogar etwas besseren Basseindruck erzielt als der Wandler 8 mit der tiefsten Resonanz und dem größten äquivalenten Volumen Vas, der wegen seiner geringen Güte mehr für den Einsatz in einer Bassreflexbox prädestiniert ist.

Die Beurteilung der Impulswiedergabe bei einem Pegel von 75 dB wurde von den Personen wegen des geringen Pegels als schwierig bezeichnet, dennoch sind im Mittel die Wahrscheinlichen Schwankungen im Vergleich zu denen bei höherem Pegel eher etwas geringer. Die ersten vier Lautsprecher erhalten eine Einstufung um den Zahlenwert 5, während die Wandler 5 bis 8 bei Note 6 oder darüber liegen. Beim höheren Pegel von 85 dB erzielten fast alle Lautsprecher eine etwas bessere Einstufung. Die beste Bewertung erhielt in beiden Fällen Lautsprecher 8, der die geringste Güte aufweist. Das Impulsverhalten korrespondiert nicht mit der Basswiedergabe. Der Wandler 1 mit dem besten Bass wird bei der Impulswiedergabe sehr schlecht bewertet. Ähnliches trifft auf Wandler 3 zu, während der BiegeWellenwandler Nr. 4 mit dem schlechtesten Bass sich bzgl. Impulsverhalten im Mittelfeld bewegt, die Wahrscheinlichen Schwankungen sogar sehr gute Werte erreichen. Die Verzerrungen werden bei 85 dB Darbietungspegel, ausgedrückt durch einen niedrigeren Zahlenwert, konsequent schlechter beurteilt als bei 75 dB, die Urteile können in ihrer Rangfolge durch entsprechende Messungen des Klirrfaktors nachvollzogen werden. Verzerrungsverhalten und Impulswiedergabe korrelieren kaum, da beispielsweise der schwere Flat Panel Wandler Nr. 2 trotz schlechter Impulswiedergabe ein gutes Verzerrungsverhalten aufweist. Bei Pegelerhöhung verhalten sich Impulsbewertung und Verzerrungsbeurteilungen konträr.

## 3. Korrelationsuntersuchungen

Um nun ein objektives Maß über das Impulsverhalten der Lautsprecher zu bekommen, wurden Korrelationsberechnungen zwischen dem elektrischen Signal an den Klemmen der in die Box eingebauten Lautsprecher und dem in einem Meter entfernt aufgenommenen Mikrofonsignal im Zeit- und Frequenzbereich durchgeführt. Es wurde ein Korrelationsalgorithmus gemäß [1] verwendet, der nur die Signalformen bewertete, nicht jedoch die Amplitudenverhältnisse, so daß unterschiedliche Wandlerempfindlichkeiten keine Rolle spielten. Als Messsignale wurden drei Multisinus-tonsignale konstanter Amplitude mit Spektrallinien n zwischen 20 und 100 Hz bzw. 100 und 1000 Hz sowie 20 und 1000 Hz verwendet, so daß im ersten und dritten, nicht aber im zweiten Fall die Resonanzfrequenz der Wandler erfaßt wurde. Die Spektrallinienabstände betragen jeweils 1 Hz. Die Phasenanzuordnung  $\varphi_n = \pi f_n$  bewirkte einen Impuls gemäß Fig. 2 in der Mitte der Periode von 1 Sekunde, der per Speicheroszilloskop aufgenommen wurde [2,4,5]. Die Breite des Impulses hängt vom gewählten Spektrum ab, alle Lautsprecher hatten jedoch einen Übertragungsbereich über 1 kHz, so daß das Spektrum gut wiedergegeben werden konnte. Um größere Verzerrungen zu vermeiden, wurde der elektrische Impuls stets mit einer maximalen Impulsleistung von 10 W an die Lautsprecherklemmen angelegt. Die Polung war immer gleich. Die infolge der Schalllaufzeit in der Luft verzögerten Mikrofonsignale wurden zur Korrelationsberechnung im Zeitbereich so verschoben, daß sich die Minima entsprachen. Für Korrelationen im Spektralbereich wurden Anregungsimpuls und Impulsantwort per FFT transformiert und die Spektren miteinander verglichen.

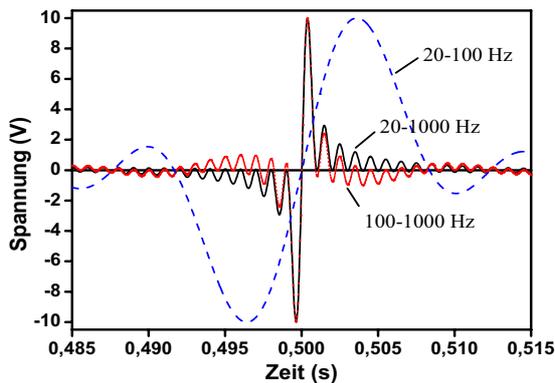
In Tab. 1 sind für die verschiedenen Lautsprecher die Korrelationswerte  $R_{\text{Spek}}$  der verwendeten drei Spektren sowie  $R_{\text{Zeit}}$  der Zeitfunktionen des Signals mit Spektrallinien zwischen 20 und 1000 Hz aufgeführt. Aufgrund der Ungenauigkeiten des Hörtestes und der relativ eng beieinanderliegenden Beurteilungen sollten die



**Fig. 1:** Hörversuchsergebnis. Zentralwert (Balken) und Wahrscheinliche Schwankung (Striche) für die acht verschiedenen Wandler. Die Beurteilungskriterien und Pegel jeweils von links nach rechts: Bass 75 dB, Impuls 75 dB, Impuls 85 dB, Verzerrung 75 dB, Verzerrung 85 dB.

Nr.	Re Ω	Fs Hz	Qe	Qts	Vas l	Mms g	Bxl Tm	Bass 75 dB	Imp. 75 dB	Imp. 85 dB	Verz. 75 dB	Verz. 85 dB	R <sub>Zeit</sub> % 20-1000 Hz	R <sub>Spek</sub> % 20-100 Hz	R <sub>Spek</sub> % 100-1000Hz	R <sub>Spek</sub> % 20-1000 Hz
1	3,0	46	0,75	0,68	8,2	38,3	6,6	7,10	4,75	5,25	6,25	5,65	79,1	84,1	77,5	54,7
2	3,6							5,00	5,00	6,00	6,75	5,75	51,4	62,3	53,9	55,8
3	2,1	66	0,76	0,68	10,5	14,3	4,0	6,40	5,00	4,65	5,10	4,65	58,0	75,9	91,5	75,0
4	7,1	75	1,25	0,88	15,0		4,3	4,75	5,25	5,75	6,00	4,75	57,3	57,9	81,6	75,2
5	3,5	62	0,79	0,70	20,3	8,3	3,8	6,50	6,00	6,35	6,25	5,25	47,1	75,6	91,3	85,8
6	3,6	74	1,30	1,00	8,0	14,8	4,4	6,60	6,10	6,55	6,00	5,90	59,7	77,6	87,4	78,1
7	3,7	55	0,67	0,56	15,7	14,0	5,1	6,30	6,15	6,25	6,95	5,50	64,2	68,7	91,1	79,5
8	3,4	42	0,34	0,30	32,3	11,5	5,5	6,40	6,65	6,75	6,50	6,25	54,9	75,1	90,5	86,1

**Tab. 1:** Kleinsignalparameter der Lautsprecher, Zentralwerte der Hörversuchsergebnisse und Ergebnisse der Korrelationen.



**Fig. 2:** Ausschnitt der Zeitfunktion eines Multisinus-Signals mit Spektrallinien  $n$  von 20 Hz bis 100 Hz (gestrichelt) bzw. 100 Hz bis 1 kHz bzw. 20 Hz bis 1 kHz im Abstand von 1 Hz, Amplitude konstant, Phase  $\varphi_n = \pi f_n$ , Periodendauer 1 Sek.

Korrelationswerte die Rangfolge ungefähr, aber mit Sicherheit die Extrema abbilden. Ein Vergleich der Werte mit den Hörtestergebnissen des Impulsverhaltens bei 75 dB Darbietungspegel in Tab. 1 zeigt, daß hinsichtlich der Rangfolge nur die Korrelation  $R_{\text{Spek}}$  der Spektren von Signalen mit Spektrallinien zwischen 20 und 1000 Hz noch am besten passen, da dieses Spektrum den Übertragungsbereich der Lautsprecher gut abdeckt. Werden diese Korrelationswerte als Prozentzahl durch 13 dividiert, so erhält man den Wert der Hörtestergebnisse auf 15 Prozent genau. Eine Korrelation im Zeitbereich hingegen führte zu keinen auswertbaren Ergebnissen.

#### 4. Zusammenfassung

Hörversuche mit Lautsprechern mit sehr unterschiedlichen Kenndaten zeigen, daß die Impulswiedergabe nur sehr wenig mit dem Bassverhalten einhergeht und auch vom Verzerrungsverhalten sehr gut unterschieden werden kann. Ein höherer Darbietungspegel

führt trotz schlechteren Verzerrungseigenschaften zu einer besseren Impulsbeurteilung, während Lautsprecher mit sehr guter Basswiedergabe ein sehr schlechtes Impulsverhalten aufweisen können. Die beste Impulsbeurteilung hat ein Wandler mit gutem Kraftfaktor, geringer bewegter Masse, weicher Aufhängung und sehr kleiner elektrischer Güte erhalten.

Korrelationen zwischen elektrischem Signal an den Lautsprecherklemmen und dem akustischen Signal im Zeitbereich führten im Vergleich zu den Hörtestergebnissen zu keinen annähernd stimmigen Rangfolgen. Die Korrelation der entsprechenden Spektren ergab hingegen bei Anregung mit Multisinus-Signalen mit Spektrallinien zwischen 20 und 1000 Hz im Rahmen der zu erwartenden Genauigkeiten brauchbare Rangfolgen. Breitbandige Multisinus-Signale mit linear mit der Frequenz ansteigender Phasenzuordnung können für die Impulsbeurteilung von Tieftönern in erster Näherung verwendet werden. Weitere Untersuchungen mit anderen Lautsprechergrößen im höherfrequenten Bereich unter Berücksichtigung der Signalverarbeitung des Gehörs sind sicher notwendig.

Der Autor dankt Herrn Markus Fuchs, der im Rahmen seines Praktikums bei der Fa. Harman/Becker die Hörversuche und Korrelationsberechnungen durchgeführt hat.

#### Literatur

- [1] Ifeachor E. C. und Jervis B. W., *Digital Signal Processing - A Practical Approach*. Addison Wesley Longman Limited, ISBN 0-201-54413-X.
- [2] Krump G., *Limienpektren als Testsignale in der Akustik*. In: DAGA '96, Verlag: DEGA, Oldenburg, 1996, 288-289.
- [3] Krump G., *Ein Hörtest zur Beurteilung von Lautsprechersystemen in Kraftfahrzeugen*. In: DAGA '98, DEGA, Oldenburg, 1998, 108-109.
- [4] Krump G., *Multisinus-Signale in der Praxis - 1.Teil*. In: *Elektronik 20*, WEKA-Fachzeitschriftenverlag, Poing, 2001, 68-74.
- [5] Krump G., *Multisinus-Signale in der Praxis - 2.Teil*. In: *Elektronik 23*, WEKA-Fachzeitschriftenverlag, Poing, 2001, 42-49.
- [6] Zwicker E. und Fastl H., *Psychoacoustics - Facts and Models*. Second edition, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1999.