Welche Lautsprecherdaten werden für eine aussagekräftige Simulation benötigt?

(Speakerdata for Simulation Tools)

*Anselm Goertz *, Michael Makarski **, Stefan Feistel ****

* TU Berlin (Fachgebiet Audiokommunikation) und IFAA, anselm.goertz@ifaa-akustik.de

** IFAA (Institut für Akustik und Audiotechnik), michael.makarski@ifaa-akustik.de

*** AFMG (Ahnert Feistel Media Group), sfeistel@afmg.eu

Kurzfassung

Simulationsprogramme für akustische Berechnungen von Räumen und Beschallungsanlagen berücksichtigen Lautsprecher in der Regel als Balloon-Datensatz mit 5° Winkelauflösung. Einfache Lautsprecher können mit diesem nur im Fernfeld des Lautsprechers gültigen Format hinreichend gut dargestellt werden. Komplexere Anordnungen wie Line-Arrays oder DSP-gesteuerte Zeilen erfordern jedoch aufgrund des sehr weit ausgedehnten Nahfeldes eine korrekte Betrachtung und Darstellung der Schallabstrahlung sowohl für das Fernfeld, wie auch für das Nahfeld. Im ersten Teil beschäftigt sich dieser Beitrag mit den dafür erforderlichen Voraussetzungen und stellt eine Lösung durch die Zerlegung eines Lautsprechers in einzelne Module vor, aus denen dann in der Simulation durch Superposition das Verhalten der kompletten Anordnung berechnet wird.
Ebenso von großer Bedeutung ist die richtige Vorhersage des erreichbaren Maximalpegels durch eine Simulation. Hier gehen die Parameter der Belastbarkeit der einzelnen Lautsprecherwege, die verfügbare Verstärkerleistung und die Filtereinstellungen in die Berechnungen ein. Diese Werte in ihrer Gesamtheit betrachtet, zusammen mit der spektralen Zusammensetzung und dem Crestfaktor des Nutzsignals, ermöglichen die Vorhersage der erreichbaren Maximalpegel. Für die Festlegung der dabei zu Grunde gelegten Werte der Belastbarkeit werden zwei neue Verfahren vorgestellt und einer kritischen Betrachtung unterzogen.

1. Einleitung

Die Planung der Raumakustik und Beschallungstechnik wird heutzutage ab einer bestimmten Größenordnung nahezu ausnahmslos per Computersimulationen durchgeführt. Unabhängig von der verwendeten Software ist dabei die erzielte Planungssicherheit für den Ausführenden einer der wichtigsten Aspekte. Wie vertrauenswürdig oder realitätsnah die Ergebnisse einer Simulation sind, hängt neben der verwendeten Berechnungsmethode auch maßgeblich von den Eingangsdaten ab. Diese setzen sich aus den akustischen Eigenschaften (Absorption und Streugrad) der Raumbegrenzungsflächen und den Daten der akustischen Quellen zusammen. Die Quellen sind meist Lautsprecher, die in den Simulationsprogrammen in der Regel über einen Balloon-Datensatz mit 10° oder 5° Winkelauflösung definiert werden. Einfache Lautsprecheranordnungen können mit diesem nur im Fernfeld des Lautsprechers gültigen Format hinreichend gut dargestellt werden. Schwierige raumakustische Verhältnisse

verlangen jedoch häufig nach komplexeren Lautsprecheranordnungen wie Line-Arrays oder DSP-gesteuerte Zeilen, die aufgrund ihrer flexiblen Konfiguration und des davon abhängigen teilweise sehr weit ausgedehnten Nahfeldes eine korrekte Betrachtung und Darstellung der Schallabstrahlung sowohl für das Fernfeld, wie auch für das Nahfeld zwingend erfordern. Diese Vorgabe könnte selbst mit vielen einzelnen Balloon Datensätzen für ein Lautsprechersystem nicht zufriedenstellend gelöst werden, so dass hier erweiterte Methoden zur Beschreibung des Lautsprechers innerhalb einer Simulation erforderlich werden.

In der Planungsphase von Beschallungsanlagen sollte die korrekte Auslegung und Funktion der Anlage durch eine Simulation nachgewiesen werden. Dazu gehört maßgeblich auch ein mindest zu erreichender Signal/Noise Wert. Von großer Bedeutung ist daher die richtige Vorhersage des erreichbaren Maximalpegels. Die Ausgangsdaten für die Berechnung sind die Empfindlichkeit und Belastbarkeit der Lautsprecher sowie die spektrale Verteilung und der Crestfaktor des wiederzugebenden Nutzsignals. Ist die Anlage zu schwach ausgelegt, wird es u.U. nicht möglich sein sich gegenüber dem vorhandenen Störpegel hinreichend durchzusetzen, womit eine kostspielige Nachbesserung erforderlich werden kann. Wird die Anlage überdimensioniert, dann entstehen unnötige Aufwendungen und somit auch wieder Kosten, was es ebenfalls zu vermeiden gilt. Die bisher üblichen stark vereinfachenden und auf rein rechnerischen Werten basierenden Verfahren zu Vorhersage des Maximalpegels führen häufig zu nicht nachvollziehbaren Aussagen.

Dieser Beitrag stellt daher ein erweitertes Verfahren vor, bei dem der Lautsprecher zunächst in seine einzelnen Module (Tieftöner, Hochtöner, Filter, ...) unterteilt und dann gemessen wird, um im Anschluss daran den Datensatz für die Simulation aus den Daten der einzelnen Wege und Filter zu konstruieren [3]. Die Zielsetzung ist es, dabei eine flexible Konfiguration durch den Anwender zu ermöglichen, das Abstrahlverhalten im Nah- und Fernfeld korrekt darzustellen und die signifikanten Nichtlinearitäten innerhalb eines Lautsprechers zu berücksichtigen und damit insgesamt eine zuverlässigere Aussage über die Leistungsfähigkeit eines Lautsprechers zu erhalten.

2. Das Lautsprechermodell für die Simulation

Abb. 1 zeigt das Blockschaltbild eines Lautsprechers einschließlich aller signalverarbeitenden Module in der zugehörigen Elektronik. Je nach Lautsprechertyp (aktiv/passiv) und Ausstattung können diese Module vorhanden sein oder auch nicht. Die Basis für einen Datensatz zur Anwendung in einem Simulationsprogramm geht nun nicht mehr von einem Lautsprecher als eine einzige komplette zu beschreibende Einheit aus, sondern besteht aufbauend auf dem Blockschaltbild aus den Messwerten der einzelnen Module, die zu einem System zusammengefügt werden. Für die einzelnen Wege bzw. Wandler innerhalb des Systems sind der Schalldruckfrequenzgang in Betrag und Phase, der Verlauf der elektrischen Impedanz, ebenfalls in Betrag und Phase, und das räumliche Abstrahlverhalten in Form eines Balloons zu bestimmen. Die einzelnen Wandler innerhalb eines Lautsprechersystems können damit in ihrem linearen Übertragungs- und auch im räumlichen Abstrahlverhalten, hinreichend gut beschrieben werden. Nicht erfasst werden jedoch die nichtlinearen Eigenschaften, die sich durch Verzerrungen, Powercompression oder auch Dynamikverlust zeigen.

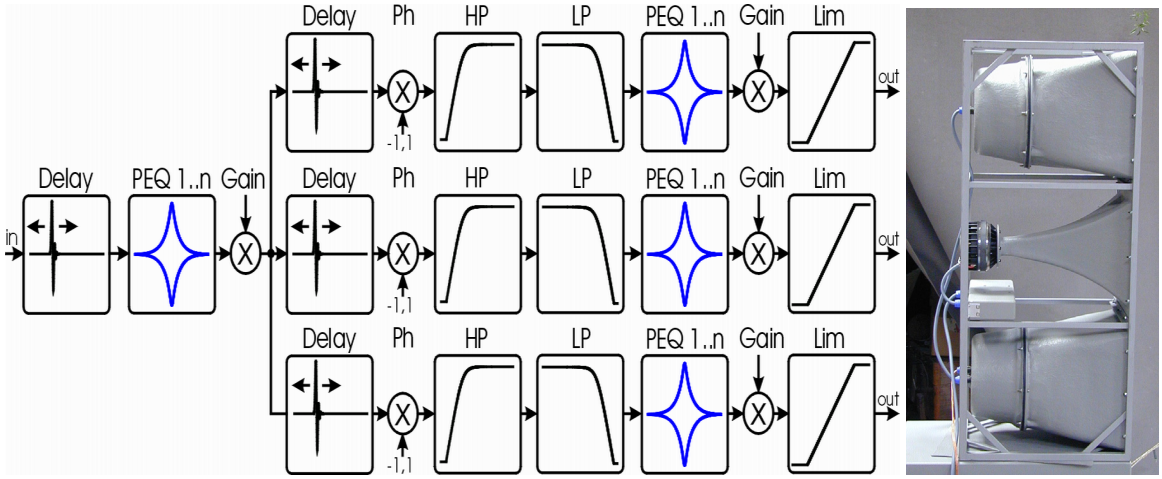


Abb. 1: Blockschaltbild eines 3-Wege Lautsprechersystems mit seinen Modulen

Gleiches gilt für die nichtlinearen Elemente innerhalb der Elektronik, wie z.B. Compressoren oder Limitern. Für alle anderen elektronischen Module aus *Abb. 1* kann mit hinreichender Genauigkeit ein vollständig lineares Verhalten vorausgesetzt und davon ausgegangen werden, dass nichtlineare Verzerrungen bei Hoch- und Tiefpassfiltern sowie Equalizern keine relevante Rolle spielen. Filter können daher über ihre komplexe Übertragungsfunktion vollständig abgebildet werden. Delays, Pegelsteller oder auch Phaseninverter gehen ebenfalls ausschließlich als lineare Übertragungselemente in das Simulationsmodell des Lautsprechers ein.

3. Messtechnische Erfassung der Daten

Für das oben beschriebene Modell muss jeder Weg des Lautsprechers und die zugehörigen Filterfunktionen einzeln erfasst werden. Alle Messungen, einschließlich der Balloon-Daten, sind dabei als komplexe Datensätze mit Amplituden- und Phasendaten [1] in frequenzlinearer Aufteilung abzulegen. Für das Format sind FFT Spektren mit 16K bis 64K Länge bei 48 kHz Abtastrate zu bevorzugen. Die Auflösung liegt dem entsprechend bei 0,73 bis 2,93 Hz.

3.1. Elektrische Anschlusswerte

Der Impedanzverlauf im Datensatz eines Lautsprechers hat zurzeit noch eine rein informative Funktion und geht nicht in die Berechnungen ein. Lediglich der Wert für die Nennimpedanz dient als Bezugsgröße für die Leistungsberechnung bei einer gegebenen Spannung. Für möglich spätere Erweiterungen zur Berechnung der Interaktion mit passiven Filter sollten die Kurven jedoch immer in Betrag und Phase abgespeichert werden. *Abb. 2* zeigt für den hier vorgestellten 2-Wege Musterlautsprecher exemplarisch die Kurven, die als 256 K FFT Spektren gemessen und für den Import in den Datensatz auf 64 K reduziert wurden.

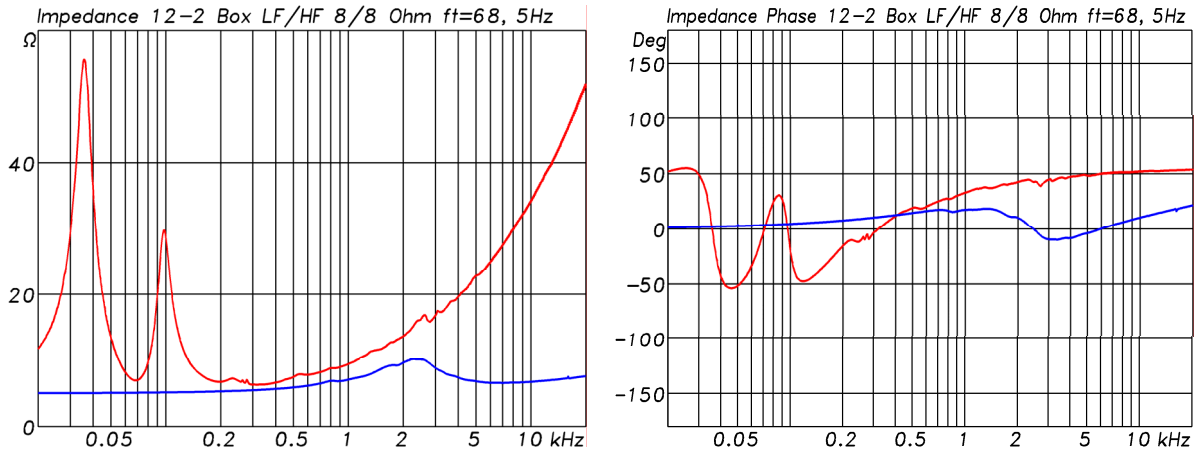


Abb. 2: Impedanz in Betrag (links) und Phase (rechts) für den LF-(rot) und HF-Weg (blau) des 2-Wege Lautsprechers ohne Filter

3.2. Lineare Übertragungsfunktionen

Die Übertragungsfunktionen der einzelnen Wege sind ebenfalls als komplexe Frequenzgänge mit Betrag und Phase zu messen. Die Messung muss in einem hinreichend großen Abstand (4-8 m, jedoch mindestens im Fernfeld des Lautsprechers) erfolgen und sich auf den gleichen Referenzpunkt beziehen, mit dem auch die spätere Balloonmessung erfolgt. Je nach Art der weiteren Datenspeicherung wird die Frequenzgangmessungen entweder als FFT Spektrum mit frequenzlinearer Auflösung gespeichert (z.B. 64 K FFT) oder als Terz bzw. Oktav gemittelter Verlauf abgelegt (siehe auch *Abb. 4*). Die beiden letzt genannten benötigen nur sehr wenig Speicherplatz, sind allerdings unter dem Aspekt einer exakten Berechnung von komplexeren Lautsprecheranordnungen zu ungenau. Bei der Nutzung moderner Rechner fällt zudem das Argument des Speicherplatzes und der schnelleren Datenverarbeitung kaum noch ins Gewicht.

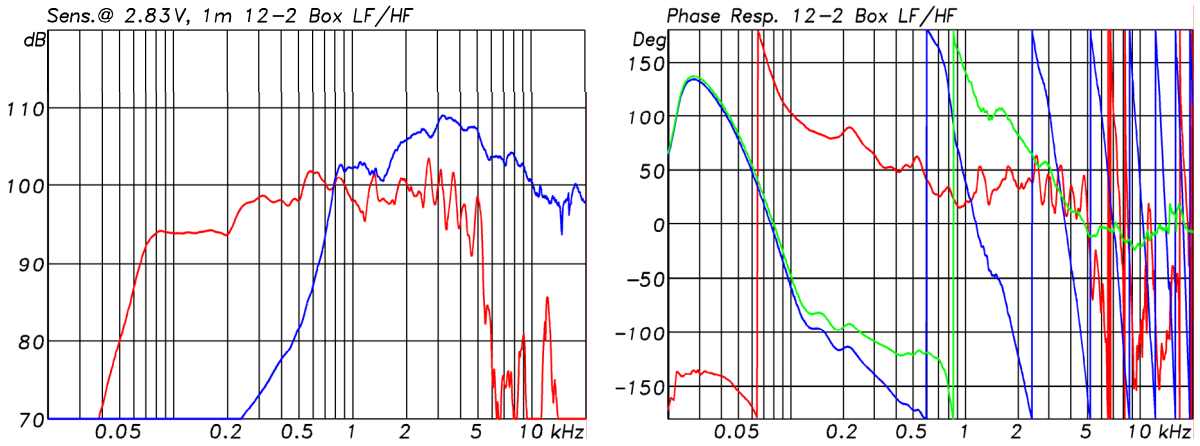


Abb. 3: Schalldruck in Betrag (links) und Phase (rechts) für den LF-(rot) und HF-Weg (blau) des 2-Wege Lautsprechers ohne Filter. Die Pegelwerte beziehen sich auf eine Klemmenspannung von 2,83 V und eine Entfernung von 1 m, die Phasengänge beinhalten den Laufzeitunterschied zwischen LF- und HF-Weg mit Bezug auf den LF-Weg. Die grüne Kurve zeigt den minimalphasigen Anteil des HF-Weges nach Abzug der Laufzeit.

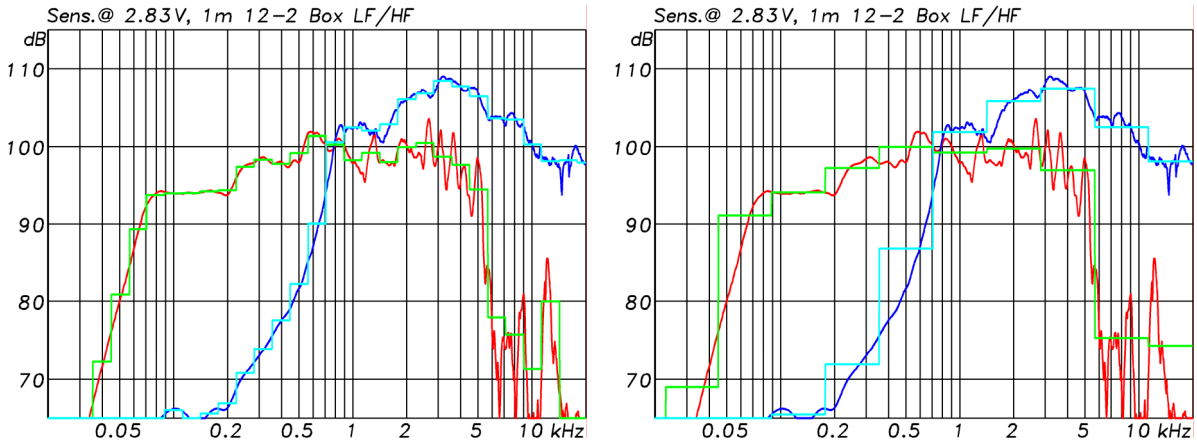


Abb. 4: Frequenzgänge für den HF- und LF-Weg ungeglättet mit frequenzlinearer Auflösung von 0,7 Hz und im Vergleich dazu mit Terz-(links) und Oktavglättung(rechts).

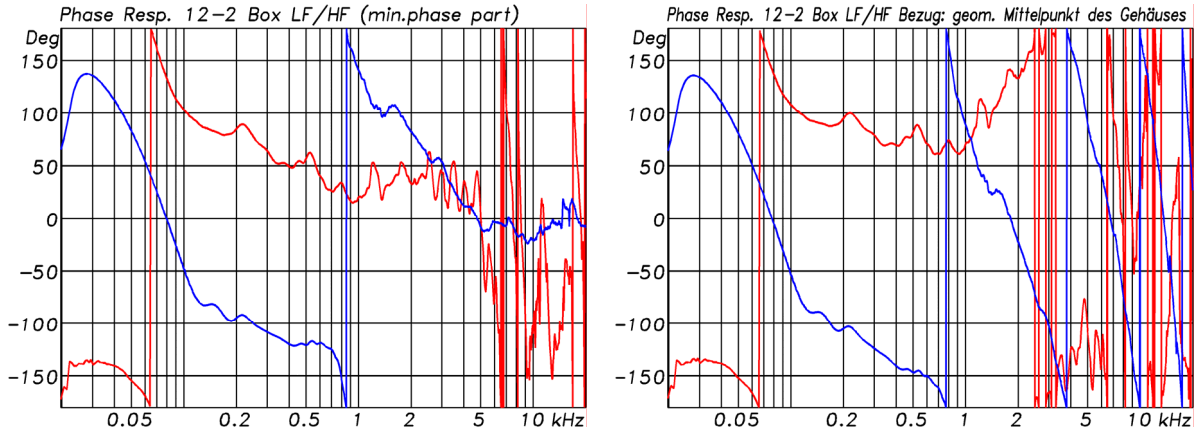


Abb. 5: Phasenverläufe des LF- (rot) und HF-Weges (blau). Links in beiden Fällen der minimalphasige Anteil, rechts mit gemeinsamen Bezugspunkt im geometrischen Mittelpunkt der Box. In Relation zum geometrischen Mittelpunkt eilt der Tieftöner zeitlich ein wenig vor und der Hochtöner ein wenig nach.

Für eine korrekte Kombination der einzelnen Wege in einer Lautsprecheranordnung kommt den Phasendaten eine wichtige Bedeutung zu. Bei der Berechnung des Abstrahlverhaltens mehrerer Weg müssen alle Wege so aufsummiert werden, dass ihre Laufzeitbezüge exakt denen der realen Anordnung entsprechen. Die sonst gerne genutzte Darstellung des minimalphasigen Anteils ohne Laufzeit für jeden einzelnen Weg (siehe auch *Abb. 3*) darf hier nicht angewandt werden, da ansonsten die Laufzeitbezüge der Wege untereinander verloren gehen. Für eine korrekte Darstellung der Laufzeitbezüge gibt es zwei Methoden:

- Jeder Weg wird auf sein eigenes akustisches Zentrum bezogen gemessen und anschließend wird im Datensatz des Lautsprechers die Lage der akustischen Zentren definiert.
- Die Messungen für alle beteiligten Wege erfolgen mit Bezug auf den geometrischen Mittelpunkt der Box.

Beide Methoden wurden in diversen Versuchsreihen miteinander verglichen, wo sich bei einem insgesamt hinreichend großen Messabstand (hier 8 m) keine signifikanten Unterschiede herausstellten. Den geometrischen Mittelpunkt der Box als Bezug zu nutzen, vereinfacht jedoch die Balloonmessung erheblich, da so alle Wege mit einer Einstellung gemessen

werden können und sich in der Regel auch der Schwerpunkt einer Box in der Nähe des geometrischen Mittelpunktes befindet. *Abb. 5* zeigt dazu die Phasengänge des LF- und HF-Weges der Beispielbox, links in beiden Fällen der minimalphasige Anteil mit Bezug auf das akustische Zentrum des jeweiligen Weges, rechts mit einem gemeinsamen Bezugspunkt im geometrischen Mittelpunkt der Box.

3.3. Filterfunktionen

Die Filtermodule im Blockschaltbild des Lautsprechersystems (*Abb. 1*) können aus passiven oder aktiven Weichen oder auch aus digitalen Filtern stammen. Eine Kombination ist ebenfalls möglich, so dass z.B. die X-Over Funktion über eine passive Weiche erfolgt und die EQ-Filter sich als aktive oder digitale Filter in einem Controller befinden.

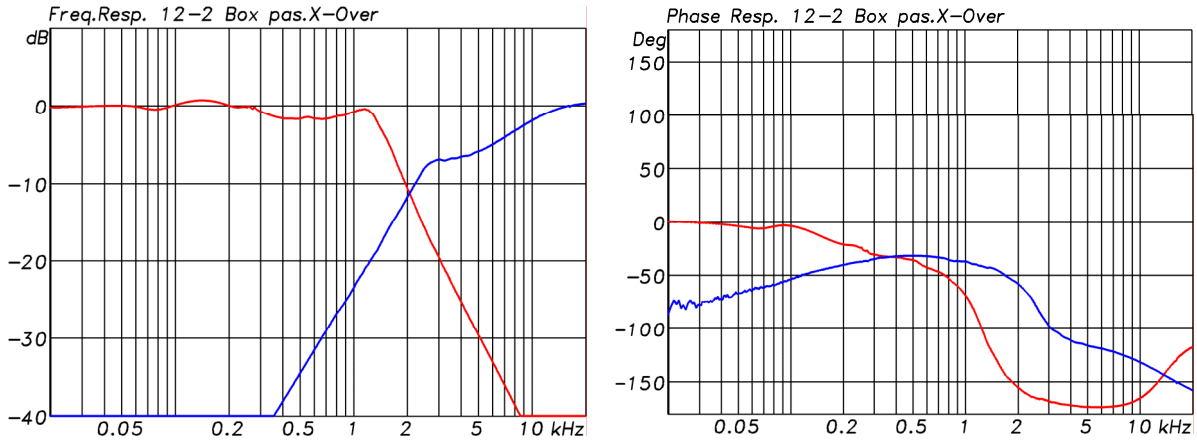


Abb. 6: Übertragungsfunktion der passiven Weiche in Betrag(links) und Phase(rechts) für den LF-(rot) und HF-Weg(blau).

Abb. 6 zeigt als Beispiel die Übertragungsfunktion der passiven Filter in der 2-Wege Musterbox. Für die Messung gilt hier das schon für die Frequenzgangmessung der Chassis gesagte, dass die Frequenzgänge in Betrag und Phase möglichst als hoch aufgelöste FFT Spektren zu erfassen sind. Mögliche Laufzeiten durch zusätzliche Delays in den Filtern sind auch hier in jedem Fall mit in die Messung einzubeziehen. Gleiches gilt für Latenzen von Digitalfiltern, die durch die Art des Filters und durch die AD- und DA-Umsetzung entstehen können. Letztere sind für den Lautsprecher selbst nicht weiter relevant. Sobald in der Simulation jedoch das Zusammenspiel mit anderen Lautsprechern berechnet wird, müssen auch die Grundlatenzen der beteiligten Wege eingehen.

3.4. Balloon Messungen

Mit Polardiagrammen und Isobaren wird die Richtcharakteristik eines Lautsprechers nur für jeweils eine Ebene betrachtet. Für einige wenige Lautsprecher, wie z.B. Breitbänder oder Koax-Systeme mit kreissymmetrischem Aufbau sind in dieser zweidimensionalen Darstellung bereits alle Informationen enthalten. Für die meisten Lautsprecher bedarf es jedoch zur vollständigen Darstellung des räumlichen Abstrahlverhaltens einer dreidimensionalen Form. Diese findet sich in den so genannten Balloon-Daten, die auf einem Kugelrasternetz mit einer bestimmten Winkelauflösung um den Lautsprecher herum gemessen werden. Der Lautsprecher wird dazu mit zwei Drehachsen bewegt und um einen zu definierenden Drehpunkt geschwenkt, wo sich beide Drehachsen schneiden. Abb. 7 zeigt das Ergebnis einer solchen Balloon-Messung, wo neben dem Richtverhalten des Lautsprechers auch noch das

Kugelrasternetz eingezeichnet ist. Alle Mikrophonbahnen verlaufen als Großkreise durch die Nullachse des Lautsprechers. In der Praxis befindet sich das Mikrophon meist auf einer festen Position und der Lautsprecher wird gedreht, so wie in *Abb. 9* links dargestellt.

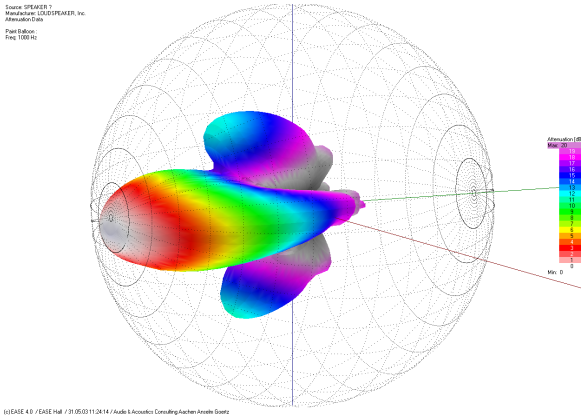


Abb. 7: Amplitudenballoon mit 10° Kugelrasternetz und einer farblich abgestuften Darstellung der zur Mittelachse relativen Werte

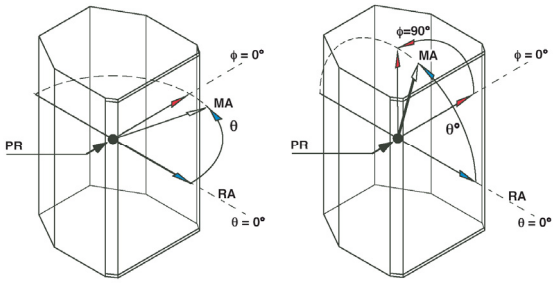


Abb. 8: Winkeldefinitionen für die Balloonmessung mit dem Drehpunkt (PR) im geometrischen Mittelpunkt des Lautsprechergehäuses

Die erforderliche Winkelauflösung des Balloons steht im Zusammenhang mit seiner weiteren Verwendung. Werden mit den Balloon-Daten Anordnungen wie Strahlerzeilen, Line-Arrays etc. gebildet, dann sollte die Winkelauflösung in Abhängigkeit von der Ausdehnung und dem Abstand der Einzelquellen zwischen 1° und 10° liegen [2].

Ausdehnung [m]	0,1	0,2	0,4	0,8
Winkelauflösung [°]	10	5	2	1

Tab. 1: Mindest erforderliche Winkelauflösung des Balloons in Abhängigkeit von der Ausdehnung und dem Abstand der Einzelquellen

Mögliche Symmetrien des Strahlers können zur Reduzierung der Datenmenge genutzt werden. Decken- und Wandein- oder Aufbaulautsprecher sind in oder auf einer Grenzfläche unter Halbraumbedingungen zu messen, so wie in *Abb. 9* rechts abgebildet.

Symmetrien	keine	Kreis	Hor.	Ver.	Hor. u. Ver.
Winkelbereich für φ [°]	-180..+180	0	-90..+90	0..+180	0..+90

Tab. 2: Zu messender Winkelbereich für den Winkel φ entsprechend der Symmetrien eines Lautsprechers. Der Winkel θ läuft bei Vollraummessungen immer von 0° (vorne) bis 180° (hinten) und bei Halbraummessungen von 0° bis 90°.

In der Praxis haben sich FFT Längen von 16K für die Balloon-Daten und 64K für alle anderen Messungen bewährt. Die dabei entstehenden Datenmengen sind für aktuelle Computersysteme gut zu verarbeiten.

Winkelauflösung [°]	10	5	2	1
Anzahl der Messpunkte	703	2701	16471	65314
Datenmenge in MB	45	180	1125	4500

Tab. 3: Anzahl der Messpunkte und die Datenmenge in Abhängigkeit von der Winkelauflösung bei Messung eines vollständige Balloons ohne Symmetrien unter Vollraumbedingungen

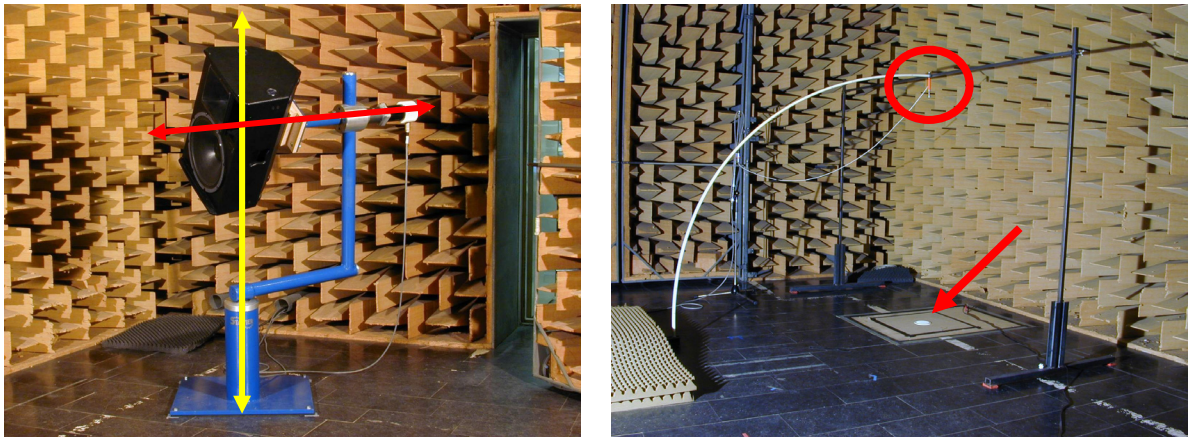


Abb. 9: Aufbauten für Balloon Messungen. Einfacher Lautsprecher an der Drehmaschine mit zwei Achsen (links). Um die gelbe Achse erfolgt die Drehung des Winkels θ der immer von 0° (vorne) bis 180° (hinten) läuft.
Um die rote Achse erfolgt die Drehung des Winkels φ von -180° bis +180°.
Rechts ein Deckenlautsprecher unter Halbraumbedingungen mit dem Messmikrophon auf einem Kreisviertelbogen.

3.5. Directivity im Nah- und Fernfeld

Komplexere Lautsprecheranordnung wie Line-Arrays oder DSP-gesteuerte Zeilen können aufgrund ihrer Größe und Variationsmöglichkeiten nicht mit einem einfachen Balloon Datensatz dargestellt werden. Der hier vorgestellte Ansatz geht daher von den Einzelmessungen aller beteiligten Quellen und der anschließend Kombination durch die Simulationssoftware aus.

Die Messentfernung für einen Directivity Balloon sollte generell möglichst groß sein, mindestens jedoch im Fernfeld des jeweiligen Strahlers liegen. Typische Messentfernungen liegen bei 4-8 m, so dass man sich bei herkömmlichen Lautsprechern sicher im Fernfeld befindet. Gleichung 3.1 zeigt eine einfache Formel zur Abschätzung des Übergangs vom Nah- ins Fernfeld.

$$r_{Fernfeld} = \frac{l^2 \cdot f}{340\ {}^{m}\!/_{s}} \quad [\mathrm{m}] \qquad \begin{array}{l} l = \text{Ausdehnung des Strahlers in m} \\ f = \text{Frequenz in Hz} \end{array} \qquad 3.1$$

Aus dieser Formel geht hervor, dass sich unter diesem Aspekt größere Anordnung wie Line-Arrays oder Strahlerzeilen als problematisch darstellen. Das Nahfeld einer l = 3,72 m langen Zeile hat so z.B. bei f = 2500 Hz bereits eine Ausdehnung von r = 100 m. Selbst wenn es möglich wäre eine Balloonmessung in einer hinreichenden Entfernung durchzuführen, könnten diese Daten nicht für eine Simulation verwendet werden, da sie nur für das Fernfeld Gültigkeit haben, sich die Zuhörer und damit der relevante Abstrahlungsbereich aber im Nahfeld befinden. Betrachtet man eine ausgedehnte Quelle im Nahfeld, dann ändert sich das auf eine Kreisbahn oder Kugel projizierte Abstrahlverhalten in Abhängigkeit vom Radius und ist damit nicht mehr entfernungsinvariant. Der Lösungsansatz für eine korrekte Darstellung im Nah- und Fernfeld besteht darin, die Komponenten der Anordnung zunächst einzeln zu messen und später in der Simulation durch eine komplexe Summation wieder zusammenzusetzen. Die Einzelkomponenten können aufgrund ihrer geringen Ausdehnung problemlos im Fernfeld gemessen werden. Wichtig ist dabei die Erfassung der Phasendaten und die hinreichende Winkelauflösung. Die Software ist durch die komplexe Addition der Quellen anschließend in der Lage das Abstrahlverhalten der Gesamtanordnung sowohl im Fernfeld, wie auch im Nahfeld richtig wiederzugeben. Ein weiterer Pluspunkt dieser Vorgehensweise ist die Möglichkeit die Anordnung in der Simulation noch mit variablen Filter und variabler Geometrie zu versehen.

Die Superpositionsmethode mit einzeln gemessenen Quellen setzt voraus, dass eine entsprechende Zerlegung in Einzelquellen auch möglich und messbar ist. *Abb. 10* zeigt ein Beispiel für einen Zeilenlautsprecher, für dessen Datensatz auf allen Positionen Einzelmessungen eingesetzt wurden. Ebenfalls in *Abb. 10* ist ein ca. 1,9 m langer Magnetostat abgebildet, bei dem sich die Membran als eine durchgehende Linie über die gesamte Ausdehnung erstreckt. Hier ist eine messtechnische Diskretisierung nicht möglich. Eine Alternative besteht in einer BEM Simulation für kurze Teilstücke, die dann wiederum als Einzelquellen in den Datensatz eingefügt werden können.

Abb. 11 zeigt drei Beispiele von Lautsprechern, deren Simulationsdaten nach dieser Vorgehensweise mit Messungen der Einzelwege zusammengestellt wurden. Ein Line-Array mit flexibler Länge sowie variablem Curving und ausgedehntem Nahfeld, eine Dipolscheibe mit elektronisch schwenkbarer Richtcharakteristik und ein kleiner Studiomonitor. Bei letzterem wäre eine Einzelmessung aller Komponenten weder aus Gründen der Strahlergröße noch wegen einer variablen Anordnung notwendig gewesen. Der große Vorzug zeigt sich jedoch bei der Maximalpegelbestimmung, wo jetzt recht genau anhand der Einzelwerte der maximal mögliche Pegel in Abhängigkeit vom Signalspektrum bestimmt werden kann. Näheres hierzu im folgenden Absatz.

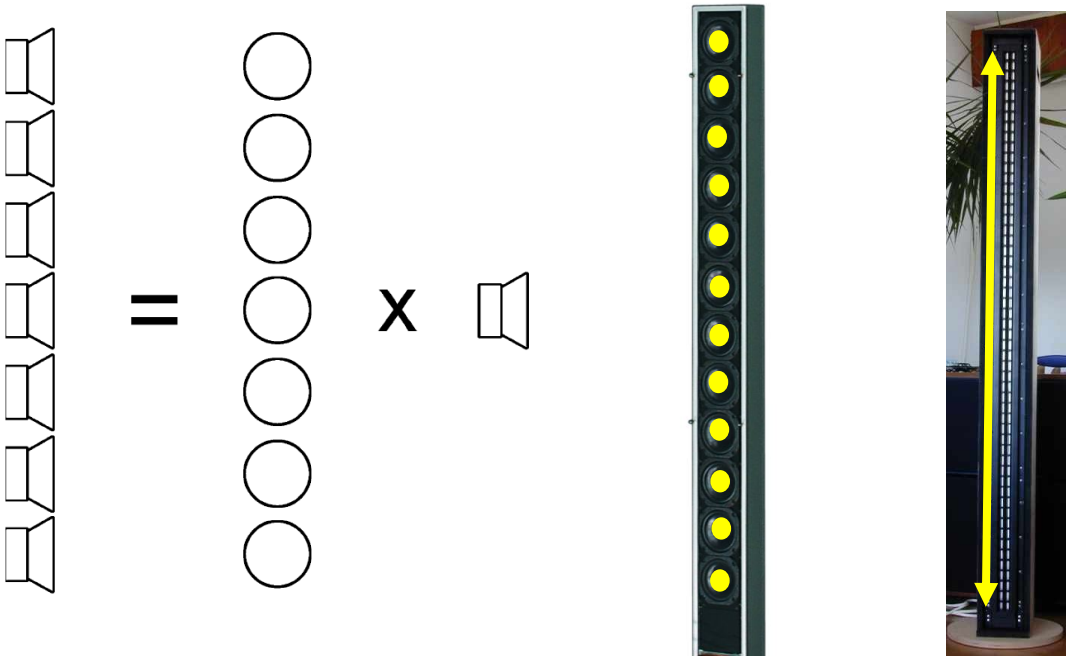


Abb. 10: Berechnung einer linienförmigen Anordnung diskreter Quellen nach dem Superpositionsprinzip. Ganz rechts ein Magnetostat als Linienquelle. Diese Art Lautsprecher ermöglicht keine messtechnische Diskretisierung.

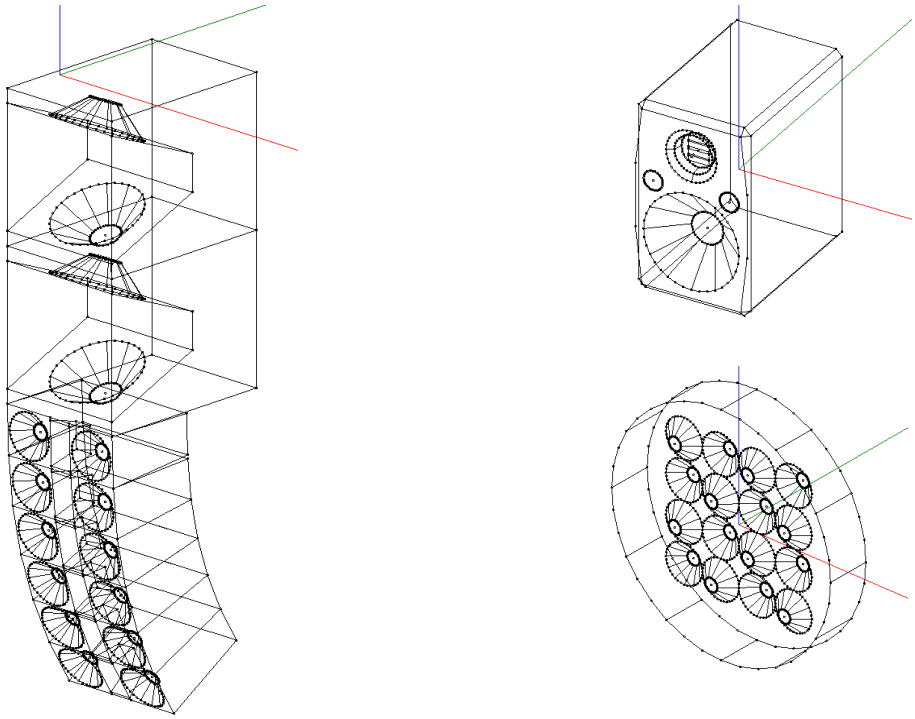


Abb. 11: Beispiele für die Modellbildung in der GLL für ein Line-Array (links), für einen 2-Wege Studiomonitor (rechts oben) und einen Scheiben-Dipolstrahler (rechts unten). Jeder Lautsprecherweg wird in diesen Modellen durch eine eigene Quelle mit Balloon Daten repräsentiert.

4. Maximalpegel und Powercompression

Simulationen werden in der Planungsphase einer Beschallungsanlage häufig zum Nachweis der Sprachverständlichkeit und des erreichbaren Schalldrucks benötigt. Die hier gemachten Aussagen sollten daher der Realität möglichst gut entsprechen und belastbar sein, was in der Vergangenheit bereits häufiger zum Streitpunkt wurde. Es stellt sich daher die wichtige Frage, wie der maximale SPL-Wert eines Lautsprechers zu berechnen ist. Ein einfacher Ansatz besteht darin, aus der angegebenen Sensitivity und der Belastbarkeit des Lautsprechers einen Wert zu berechnen, was von Fall zu Fall jedoch zu unrealistisch hohen SPL Werten führen kann.

Für Lautsprecher mit mehreren Wegen und internen Filtern sind pauschale Angaben zur Belastbarkeit nur schwer zu machen, da es eine mehr oder weniger starke Abhängigkeit vom Signalspektrum gibt. Ein Signal mit vielen hochfrequenten Anteilen, z.B. ein weißes Rauschen, wird so eher den Hochtöner als den Tieftöner an seine Leistungsgrenzen bringen. Besteht daher die Möglichkeit in einem Lautsprechermodell für die Simulation jeden Weg getrennt zu betrachten, dann kann anhand des Signalspektrums und der Filterfunktionen die daraus resultierende Belastung für jeden Weg ausgerechnet und mit dem gegebenen Grenzwert verglichen werden.

4.1. Signalspektren und Aufteilung

Verwendeten man zur Darstellung des Lautsprechers das hier vorgestellte Modell, dann lässt sich anhand der Filterfunktionen schnell und einfach die vom Signalspektrum abhängige Belastung eines jeden einzelnen Weges berechnen.

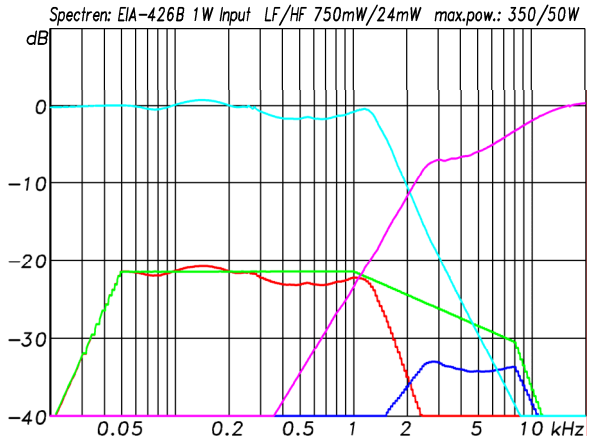


Abb. 12: Leistungsspektrum des EIA-426B Signals (grün) sowie dessen Aufteilung durch die passive Weiche
oben: Filterfunktionen der Weiche

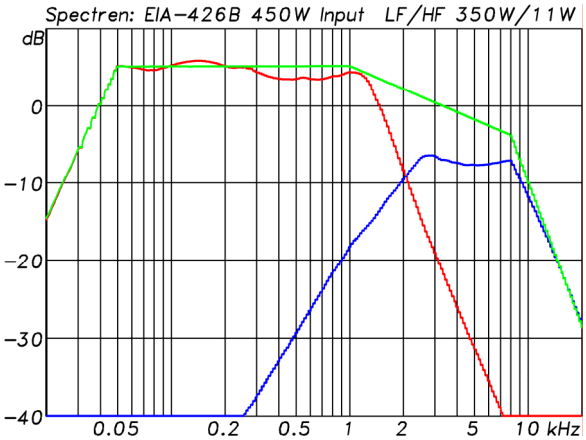


Abb. 13: Mit einem Signalspektrum nach EIA-426-B erreicht der Tieftöner zuerst sein Leistungslimit

Betrachten wir dazu den 2-Wege Musterlautsprecher mit einer passiven Frequenzweiche. *Abb. 12* zeigt in violett und hellblau die Filterfunktionen der Weiche für den Hoch- und Tiefpass einschließlich der Systementzerrungen. Das eingespeiste Leistungsspektrum nach EIA-426-B ist als grüne Kurve dargestellt. Nach der Weiche verteilt sich die eingespeiste Leistung entsprechend der roten und blauen Kurve auf den Tief- und Hochtöner. Bei einer

Eingangsspannung für umgerechnet 1 W eingespeister Leistung an der Nennimpedanz entfallen dann 750 mW auf den Tieftöner und 24 mW auf den Hochtöner. Die Leistungsdifferenz zwischen Ein- und Ausgang der Filter ist in der Realität so nicht vorhanden, da hier durchgängig mit Nennimpedanzen gerechnet wurde und nicht mit den tatsächlichen teilweise wesentlich hochohmigeren realen Verläufen. So wird z.B. die Pegelabsenkung des Hochtonweges oberhalb der Trennfrequenz durch Vorwiderstände erreicht, die in diesem Frequenzbereich einen deutlich höheren Widerstand als die Nennimpedanz bewirken, womit die real eingespeiste Leistung absinkt. Die für die Treiber berechnete und ebenfalls auf die Nennimpedanz bezogene Leistung ist aus der Übertragungsfunktion der Weiche abgeleitet und somit exakt. An dieser Stelle ist auch der Bezug auf die Nennimpedanz statthaft, da sich die Leistungsangaben der Treiber aus einer maximal zulässigen Spannung als RMS Wert und der Nennimpedanz berechnen.

Legt man für den Musterlautsprecher die Belastbarkeitswerte der Hersteller mit 350 W (LF) und 25 W (HF) Nennleistung zugrunde, dann erreicht zuerst der Tieftöner seinen Grenzwert (siehe *Abb. 13*). Auf den Hochtöner entfallen dabei mit einem EIA-426-B Spektrum lediglich 11 W. Die Gründe sind nahe liegend, da zum einen das Leistungsspektrum des Signals hier schon abfällt und der Hochtöner zudem eine deutlich höhere Sensitivity aufweist als der Tieftöner und daher durch die Weiche entsprechend vorgedämpft wird, wie sich auch an der Übertragungsfunktion der Weiche erkennen lässt. Berechnet man bei diesen Leistungswerten von 350 W und 11 W auf Basis der Sensitivity Kurve für 1W/1m den erreichten Gesamtschalldruck als Summenpegel, so ergibt sich ein Wert von 123,3 dB in 1 m Entfernung. Das Verfahren erscheint somit plausibel, für ein Signal mit einem gegebenen Spektrum über die Filterfunktionen des Lautsprechers zu prüfen, wie weit der Pegel erhöht werden kann, bis der erste Weg an seinen Grenzwert stößt. Als Unsicherheitsfaktoren treten bei dieser Berechnung die Belastbarkeitswerte der Hersteller und die bisher völlige Vernachlässigung der Powercompression auf. Der Begriff Powercompression beschreibt den bei zunehmender Leistung nicht mehr linearen Zusammenhang zwischen einer Pegelsteigerung am Eingang und am Ausgang eines Systems.

4.2. Crestfaktor

Der Crestfaktor beschreibt das Verhältnis vom Spitzenwert zum RMS-Wert eines Signals und kann als Faktor oder auch in dB angegeben werden. Der Crestfaktor eines Sinussignals beträgt 1,414 oder 3 dB, eines Rechtecksignals 1 bzw. 0 dB. Typische Testsignale wie das EIA-426-B Rauschen werden meist auf einen Crestfaktor von 6 dB komprimiert. Das für die Messung von Beschallungsanlagen zur Bestimmung der Sprachverständlichkeit und des Sprachsignalpegels gerne verwendete STI-PA Testsignal hat unkomprimiert einen Crestfaktor von 14 dB.

Für die Pegelmessung mit einem solchen Testsignal ist zu bedenken, dass bei Vollaussteuerung einer Anlage ohne weitere Kompression der zu messenden L_{eq} Wert 11 dB unter dem rechnerischen Wert der Simulation liegt, da die Simulation immer von RMS-Werten mit 3 dB Crestfaktor ausgeht. Wird bei der Messung ein Testsignal mit mehr als 3 dB Crestfaktor (Sinussignal) verwendet, dann muß entweder die kurzzeitig verfügbare Verstärkerleistung entsprechend höher sein, bzw. der zu messenden L_{eq} Wert fällt entsprechend geringer aus.

Bespiel: Der berechnete SPL-Wert einer Lautsprecheranlage bei Nennleistung beträgt 102 dB. Die Verstärker liefern exakt die erforderliche Nennleistung für die Lautsprecher ohne weitere Kurzzeitreserve. Die Anlage wird mit einem Signal mit 6 dB Crestfaktor voll ausgesteuert, dann liegt der zu messende L_{eq} Wert bei

102 - 3 = 99 dB. Beträgt der Crestfaktor 14 dB (STI-PA Testsignal ohne Kompressor), dann liegt der zu messende L_{eq} Wert nur noch bei 102 - 11 = 91 dB.

In der Praxis wird das meist verwendete STI-PA Testsignal bis auf ein Crestfaktor von ca. 6 dB komprimiert werden, so dass von ca. 3 dB Pegelverlust auszugehen ist. Alternativ können entsprechend größere Verstärker eingesetzt werden, die bei Abgabe der RMS Nennleistung noch über 3 dB Headroom verfügen.

4.3. Belastbarkeit

Wie der wichtige Wert der Belastbarkeit zu bestimmen ist, wird in verschiedenen Normen und Standards beschrieben. Der Grenzwert wird so festgelegt, dass der Lautsprecher in einem bestimmten Zeitraum nicht zerstört werden darf, respektive sich in einem thermischen Gleichgewicht befinden muss. Als Testsignale werden typischer Weise bandpassbegrenzte Rauschsignale mit einem auf 6 dB begrenzten Crestfaktor genutzt [6]. Die Messdauer beträgt je nach Anforderung 1 s (Max. Kurzzeitleistung), 1 min (Max. Langzeitleistung), 2 h (Rated Power) oder 100 h (Nennleistung) [5], [7]. Die beiden letzt genannten Zeiten dienen zur Ermittlungen der thermischen Dauerbelastbarkeit, wo sich der gesamte Lautsprecher mit Spule, Korb und Magnet im thermischen Gleichgewicht befinden soll. Mit einer Zeitspanne von 1 min. wird lediglich die Zeitkonstante zur Erwärmung der Schwingspule berücksichtigt. Der 1 s Test prüft die mechanische Zerstörungsgrenze des Lautsprechers. Alle hier aufgeführten Verfahren haben gemeinsam, dass sie weder eine Aussage über die bei dieser Belastung entstehende Powercompression ermöglichen noch über die Verzerrungen die das Signal erfährt.

Daraus entstand die Bestrebung ein Testverfahren zu entwickeln, das für jeden Weg eines Lautsprechers sowohl die Powercompression erfasst, wie auch einen groben Anhaltspunkt zu den entstehenden Verzerrungen zu liefern in der Lage ist.

4.4. Powercompression Messung

Die einem Lautsprecher zugeführte elektrische Leistung wird zu einem großen Teil in thermische Verlustleistung der Schwingspule umgewandelt. Die damit einhergehende Erwärmung der Spule lässt deren ohmschen Widerstand ansteigen und verringert gleichzeitig den Stromfluss und damit die Antriebskraft. Es kommt zur sogenannten Powercompression. Weitere Ursachen für die Powercompression sind in mechanischen Limitierungen der Treiber zu finden, sowie in den mit der elektrischen Eingangsleistung ansteigenden Verlusten in Induktivitäten von passiven Weichen. Dieser Effekt tritt besonders bei unterdimensionierten Spulen in den Tieftonwegen auf. Die effektive Sensitivity des Lautsprechers verringert sich daher bei hohen Leistungen in signifikanter Weise. Um diesen Effekt messtechnisch zu erfassen, wird eine Frequenzgangmessung mit einem Rauschsignal vorgeschlagen [10]. Dazu wird bandbegrenztes Rauschen mit einem begrenzten Crestfaktor genutzt. Zunächst wird die Messung mit einer geringen Leistung (≤1W) durchgeführt und daraus ein Referenzfrequenzgang mit Angabe der Sensitivity ermittelt. Anschließend wird der Pegel schrittweise erhöht und dabei die Abweichung von der Referenzmessung in Terzbändern geprüft. Überschreitet die Abweichung einen bestimmten Wert (z.B. -3 dB), dann wird die dabei eingestellte Leistung als Grenzwert definiert. Verwendet man ein auf der Sende- und Empfangsseite synchron laufendes FFT Messverfahren, dann lässt sich mit dieser Messung in besonders eleganter Weise direkt eine hoch aufgelöste Frequenzgang und Sensitivity Messung kombinieren, bei der der frequenzabhängige Sensitivity-Verlust direkt abgelesen werden kann [4]. Mehrfachmessungen und Mittelungen sind bei einer synchronen Messung

nicht erforderlich, so dass die Veränderung der Sensitivity im Sekunden Takt hoch aufgelöst beobachtet werden kann.

Zunächst stellt sich jedoch die Frage nach einem geeigneten Testsignal, das vorab nur ganz allgemein mit einem Rauschsignal bezeichnet wurde. *Abb. 15* zeigt dazu die Oktavband Leistungsspektren eines Pinknoise, eines männlichen Sprechers nach 60268-16 [8] und eines Testsignals nach EIA-426-B [9].

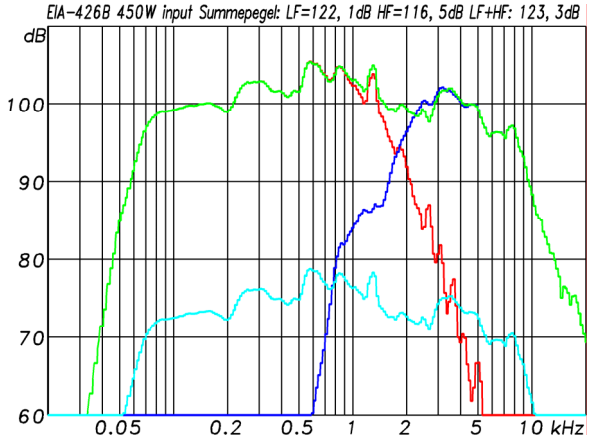


Abb. 14: SPL Signalspektrum bei 1W (hellblau) und als rechnerischer Wert bei Maximalleistung (grün).

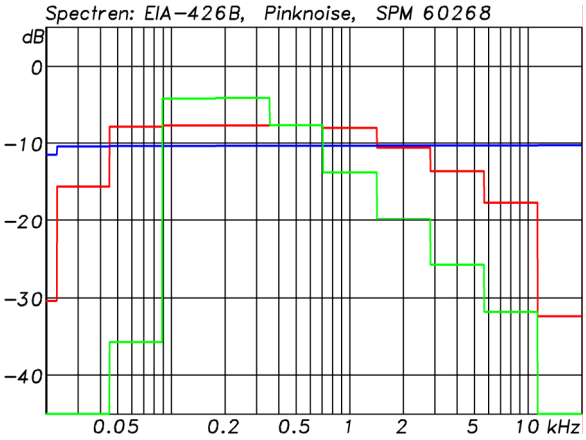


Abb. 15: Leistungsspektren in Oktavbändern für ein Pinknoise (blau), ein EIA-426B Signal (rot) und für einen männlichen Sprecher nach 60268-16 (grün)

Je nach Anwendung ist für die Powercompression Messung die Verwendung eines typischen Testsignals zu empfehlen. D.h. für PA- Lautsprecher ein Signal mit einem EIA-426-B Spektrum und bei klassischen ELA Lautsprechern für Sprachübertragung ein Signal mit der spektralen Verteilung eines männlichen Sprechers nach 60268-16.

Die Bandbegrenzung für die Testsignale ist entsprechend des Übertragungsbereiches der gemessenen Wege zu wählen. Für die hier gestestete 2-Wege Beschallungsbox mit einer Trennfrequenz von 2 kHz wurden die Bandbegrenzung für den Tieftöner auf 70 Hz bis 2 kHz definiert und für den Hochtöner auf 2 bis 20 kHz.

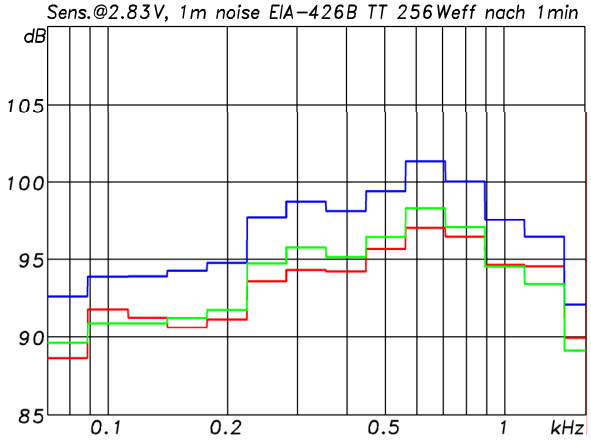


Abb. 16: Messung der Powercompression für den LF-Weg. In blau die mit geringer Leistung gemessen Referenzkurve, in grün die -3 dB Kurve und in rot die Messung mit 256 W Leistung nach 1 min. Messdauer.

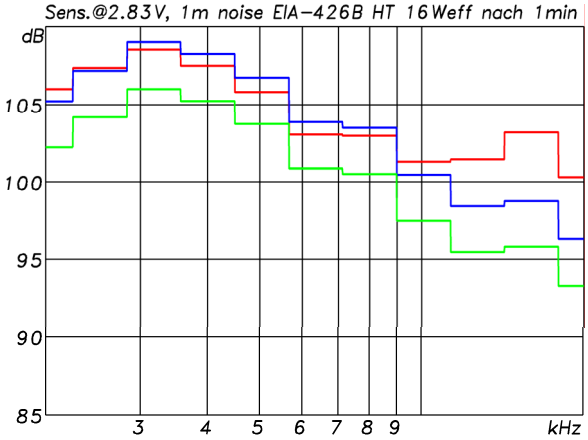


Abb. 17: Messung der Powercompression für den HF-Weg. In blau die mit geringer Leistung gemessen Referenzkurve, in grün die -3 dB Kurve und in rot die Messung mit 16 W Leistung nach 1 min. Messdauer.

Die Messergebnisse der Powercompression Messung nach der oben beschriebenen Methode zeigen *Abb. 16* und *Abb. 17* für den LF- und HF-Weg. Die Referenzmessung erfolgte mit 1 W für den Tieftöner und mit 0,25 W für den Hochtöner. Von dort ausgehend wurde die Leistung in 3 dB Schritten erhöht und jeweils nach einer Minute die Sensitivity in Terzauflösung ausgewertet. Für den Tieftöner wurde bei 256 W Leistung eine Powercompression von mehr als 3 dB in mindestens einem Terzband und damit der Grenzwert erreicht. Für den Hochtöner stellte sich ein interessanter Effekt ein. Mit zunehmender Leistung setzte unterhalb von 8 kHz eine leichte Powercompression in einer Größenordnung von 1 dB ein. Oberhalb von 8 kHz stieg die Sensitivity dagegen scheinbar sogar an. Die Ursache dürfte vermutlich in erheblichen Verzerrungen liegen. Die so erzeugten Oberwellen lassen einen vermeintlichen Zuwachs in der Sensitivity entstehen. Die breitbandige Messung der Powercompression scheint somit nicht für alle Treiber zur Bestimmung des Grenzwertes für die Belastbarkeit geeignet zu sein. Eine weitere Steigerung der Leistung würde den Effekt noch verstärken und zum Durchbrennen des Treibers führen.

Es wäre allerdings auch möglich als Grenzwert nicht nur einen Abfall der effektiven Sensitivity zu definieren, sondern auch einen Anstieg. So würde man beispielsweise festlegen, dass die effektive Sensitivity sich für kein Terzband um mehr als +/- 3dB verändern darf, und hätte so die Verzerrungsaspekte bei der Powercompression Messung ebenfalls durch eine Toleranz berücksichtigt. Da diese einfache Betrachtung im Einzelfall zu undifferenziert erscheint, wird im Folgenden noch eine weitere Testmethode basierend auf Verzerrungsmessungen vorgeschlagen, die auch zusammen mit der Powercompression Methode zur Anwendung kommen kann.

4.5. Max. SPL Bestimmung über THD-Messungen

Unabhängig von der Zerstörungsgrenze und der möglichen Powercompression besteht auch der Wunsch mit einem Messverfahren einen Grenzwert für den erreichbaren Pegel bei Einhaltung bestimmter qualitativer Vorgaben bestimmen zu können. Eine mögliche Variante besteht in einer THD-Messung in Abhängigkeit von der Frequenz, bei der ein maximal

zulässiger Verzerrungsgrenzwert festgelegt wird. Der Messalgorithmus [4] steigert dabei den Pegel so lange, bis dieser THD-Grenzwert oder ein ebenfalls einstellbares Leistungslimit erreicht ist. Die obere und untere Grenzfrequenz der Messung beschränkt sich auf den typischen Einsatzbereich des jeweiligen Lautsprechers zuzüglich einer Oktave in die jeweiligen Richtungen. Das Leistungslimit kann je nach Dauer der Messpausen an den 1 min oder 1 s Belastbarkeitswert des Lautsprechers angelehnt werden. In der Praxis haben sich Grenzwerte von 3% und 10% als gut geeignet und korreliert mit dem Höreindruck herausgestellt. *Abb. 18* zeigt eine Messreihe für den Tieftöner für höchstens 3% (rote Kurve) und höchsten 10% THD (blaue Kurve). Als Leistungslimit wurde der 1 min. Langzeitgrenzwert des Treibers von 700 W angesetzt. Dort wo beide Kurven für höchstens 3% und 10% THD zusammenfallen, wurde der höhere Wert nicht erreicht, bevor das Leistungslimit erreicht war. In gleicher Weise, jedoch mit einem angepassten Leistungswert von jetzt 50 W für die Langzeitbelastbarkeit, wurde der Hochtöner gemessen. Die Ergebnisse sind in *Abb. 19* dargestellt.

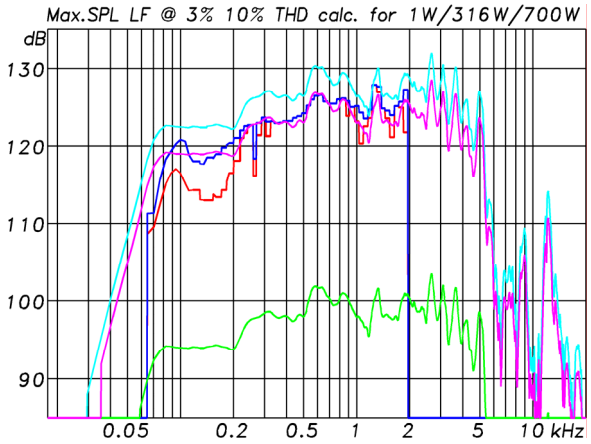


Abb. 18: LF-Weg:
grün: Sensitivity Kurve für 1W/1m
rot: max. Pegel bei höchstens 3% THD
blau: max. Pegel bei höchstens 10% THD
hellblau: rechn. max. Pegel bei 700 W
violett: rechn. max. Pegel bei 316 W

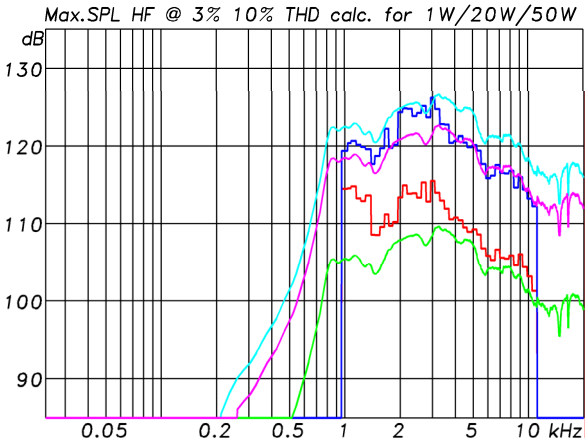


Abb. 19: HF-Weg:
grün: Sensitivity Kurve für 1W/1m
rot: max. Pegel bei höchstens 3% THD
blau: max. Pegel bei höchstens 10% THD
hellblau: rechn. max. Pegel bei 50 W
violett: rechn. max. Pegel bei 20 W

Für beide Wege lässt sich nun ein Vergleich der bei einem gegebenen Klirrfaktor erreichten Schalldruckwerte mit dem rechnerischen Wert aus der Sensitivity und der maximalen Langzeitbelastbarkeit (1 min.) ermitteln. Die gemessene SPL-Kurve für höchstens 10% Verzerrungen (blau) liegen einige dB unter dem rechnerischen Wert (hellblau). Dafür gibt es zwei dominante Ursachen:

- Schon vor dem Erreichen der Leistungsgrenzen wird der 10% THD Grenzwert erreicht, was vor allem auf den Hochtöner zutrifft.
- Die maximale Leistung wird zwar erreicht, aber durch Powercompression entsteht ein Pegelverlust gegenüber dem rechnerischen Wert, was vor allem den Tieftöner oberhalb von 200 Hz betrifft.

Es stellt sich nun die Frage, wie man z.B. den 10% Grenzwert für die Verzerrungen in die Maximalpegelberechnung der Simulation einfließen lassen könnte? Dabei sind gewissen Beschränkungen hinzunehmen, da es aktuell nur möglich ist einen einzelnen Zahlenwert für

die Belastbarkeit für einen Weg zu hinterlegen. Eine Abhängigkeit von der Frequenz ist für den Wert der maximalen Leistung leider noch nicht möglich. Eine solche Max.Power[f] Kurve könnte mit einer einfachen Berechnung aus dem erreichten Maximalpegel und der Sensitivity bestimmt werden, womit es dann möglich wäre, zugleich die Verzerrungen und auch die Powercompression zu berücksichtigen.

In *Abb. 18* und *Abb. 19* wurde zu diesem Zweck die Sensitivity Kurve so verschoben, dass sie im Mittel der Max.SPL Kurve für 10% THD entspricht. Aus der Verschiebung ist dann der Belastbarkeitswert zu berechnen, der hier für den Tieftöner bei 316 W und für den Hochtöner bei 20 W liegt. Die Werte liegen niedriger als die angegebenen Werte der Hersteller und entsprechen auch nicht der tatsächlichen für diesen Schalldruck erforderlich Leistung, da die Berechnung von einem linearen Zusammenhang ohne Powercompression ausgeht.

4.6. Berücksichtigung der THD-Werte und Powercompression in der Simulation

Die aktuell vorhandenen Möglichkeiten im Lautsprecherdatensatz stellen sich wie folgt dar:

- die 1W/1m Sensitivity wird frequenzabhängig gespeichert
- die Belastbarkeit kann als Einzelwert ohne Frequenzabhängigkeit angegeben werden
- nichtlineare Zusammenhänge können nicht dargestellt werden
- eine frequenzabhängige Maximalpegelkurve kann nicht abgelegt werden

Möchte man trotzdem die THD-Werte und Powercompression in der Simulation berücksichtigen, dann bestehen zwei Möglichkeiten:

- Aus der gegebenen Maximalpegelkurve und dem Wert der Belastbarkeit wird eine neue nicht dem realen Verlauf entsprechende frequenzabhängige 1W/1m Sensitivity Kurve bestimmt. Damit würde aber auch der Frequenzgang des Lautsprechers in der Simulation unzulässig verändert, was diese Möglichkeit bereits ausschließt.
- Der einfach anzupassende Wert für die Belastbarkeit wird so abgeändert, dass sich zusammen mit der frequenzabhängigen Sensitivity in mehr oder weniger guter Übereinstimmung die Maximalpegelkurve ergibt.

Die zweite Methode den Belastbarkeitswert aus der Maximalpegelkurve und der Sensitivity zu ermitteln, erscheint unter den gegebenen Beschränkungen der beste Kompromiss zu sein.

5. Schlussfolgerungen

Die Zerlegung und Einzelmessung komplexerer Strahleranordnungen mit anschießender Synthetisierung in der Simulation ist ein gut geeignetes Verfahren diese in der Simulation möglichst genau im Nah- und Fernfeld zu berücksichtigen. Zusätzlich wird durch dieses Verfahren auch noch eine hohe Flexibilität bezüglich der geometrischen Strahleranordnung und der elektrischen Filter erreicht. Problematisch und noch nicht eindeutig definiert erscheint jedoch die Berechnung der möglichen Maximalpegel, wo in diesem Beitrag neben den bekannten Belastbarkeitstests mit der THD- und der Powercompression Messung zwei weitere Verfahren zur Diskussion gestellt werden.

6. Quellenverzeichnis

[1] Feistel S., Ahnert W.: The Significance of Phase Data for the Acoustic Prediction of Combinations of Sound Sources. AES Convention Paper 6632, 2005 October

[2] Feistel S., Thompson A., Ahnert W.: Methods and Limitations of Line Source Simulation. J. Audio Eng. Soc., Vol. 57, No. 6, 2009 June

[3] EASE SpeakerLab, AFMG Technologies GmbH
http://www.afmg.eu

[4] Monkey Forest Mess-Software, Four-Audio GmbH
http://www.four-audio.com

[5] DIN EN 60268-5 Elektroakustische Geräte Teil 5: Lautsprecher
Europäische Norm Dezember 2003

[6] DIN IEC 268-1 Elektroakustische Geräte Teil 1: Allgemeines
Deutsche Norm Juli 1988

[7] AES2-1984 (r2003): AES Recommended Practice
Specification of loudspeaker components used in
professional audio and sound reinforcement

[8] DIN EN 60268-16 Elektroakustische Geräte Teil 16: Objektive Bewertung
der Sprachverständlichkeit durch den Sprachübertragungsindex
Europäische Norm Januar 2004

[9] Keele Jr., D.B.: Development of Test Signals for the EIA-426-B Loudspeaker Power Rating Compact Disk. AES Convention Paper 5451, 2001 November

[10] Guide to Loudspeaker Power Testing
Document Version v1.0d, AFMG (Ahnert Feistel Media Group) 2008-10-14
Based on suggestions and findings by Pat Brown, ETC Inc., USA

Lautsprecherdaten für Simulationen

26. Tonmeistertagung 2010 Leipzig

Anselm Goertz*[1], Michael Makarski*[1], Stefan Feistel*[2]

*[1] IFAA *(Institut für Akustik und Audiotechnik Aachen)*
*[2] AFMG *(Ahnert Feistel Media Group)*

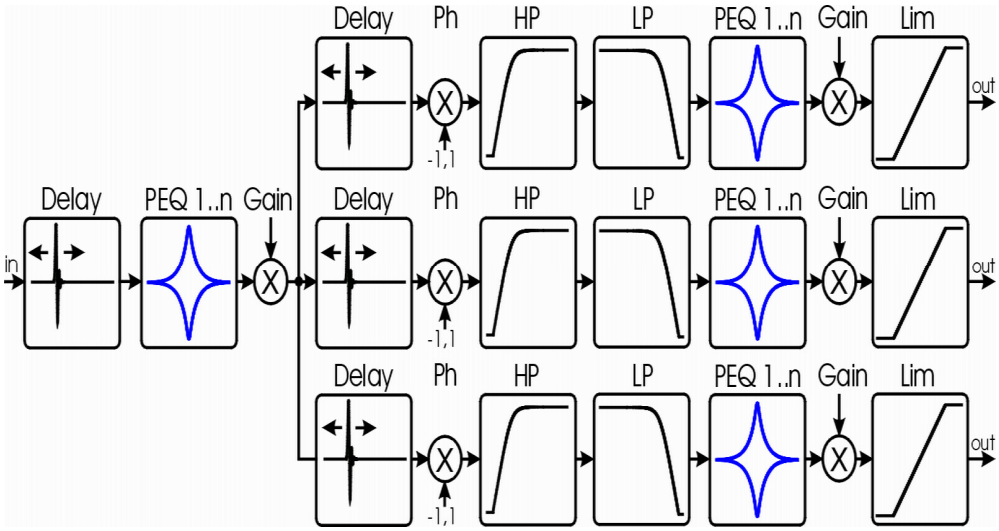
Übersicht zum Vortrag

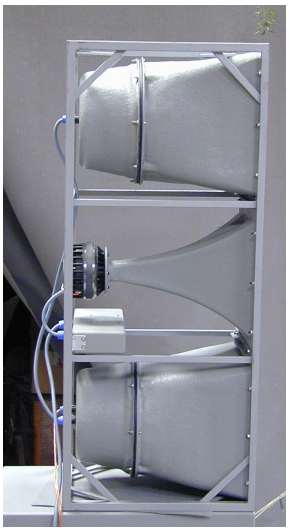
- Einleitung
- Lautsprecherdatensätze
  - Elektrische Anschlusswerte
  - Lautsprecher Frequenz- und Phasengang
  - Filter Frequenz- und Phasengang
  - **Directivity**
    - Balloondaten
      - Auflösung
      - Amplituden- und Phasendaten
      - Vereinfachungen durch Symmetrien und Interpolation
      - Vollraum- und Halbraummessung
      - Nahfeld-Fernfeld Betrachtung
  - **Maximalpegel**
    - Max.SPL Messung
    - Sensitivity Messung mit Rauschsignalen
- Konstruktion der Datensätze
  - Mehrwege Lautsprecher
  - Linienquellen
  - Arrays
- **Problemstellen und Ausblick**
- Fazit

Datensätze von Lautsprechern

- Eine Box als ganzes zu betrachten ist meist zu undifferenziert und zu ungenau
  - Keine Nahfeld-/Fernfeld Unterscheidung möglich
  - Unpräzise Angaben zum erreichbaren Maximalpegel
  - Insgesamt zu unflexibel
- Genauerer Ansatz
  - Alle Wege und die zugehörigen Filter zunächst einzeln betrachten und messen
  - Aus den einzelnen Elementen die Box und den Datensatz für die Simulation konstruieren

Blockschaltbild

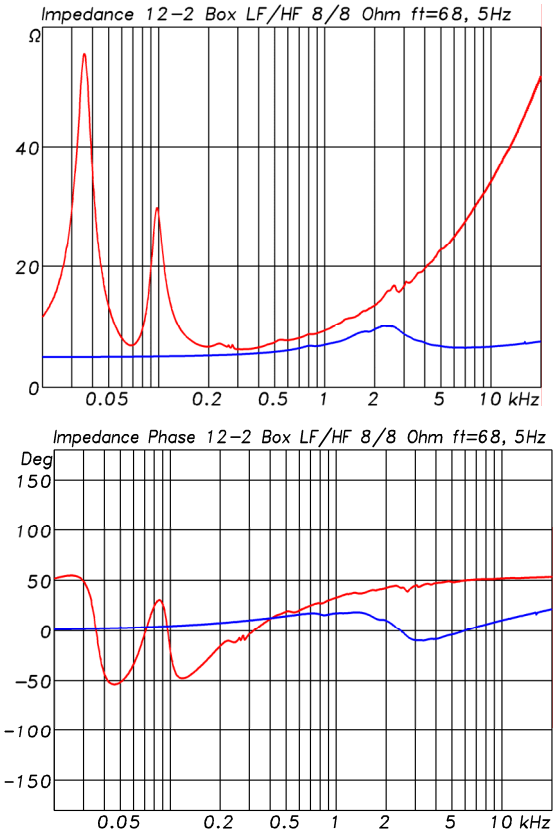




- Alle Lautsprecher als Einzelwege: LF, MF, HF
- Filter, X-Over, Delays, Pegeleinstellungen

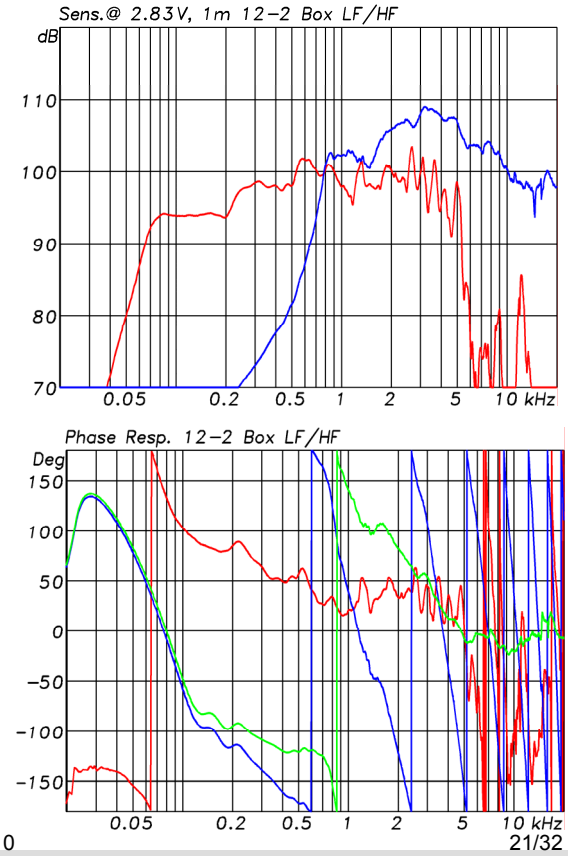
Elektrische Anschlusswerte

- Für jeden Weg
  - Betrag der Impedanz
  - Phase der Impedanz
- Auflösung
  - 1/1 Oct.
  - 1/3 Oct.
  - Frequenz linear
    - Samplerate: 48 kHz
    - 64 K FFT
    - Δf = 0,73 Hz
- Die Impedanzdaten werden aktuell noch nicht weiter verwertet und sein rein informativ

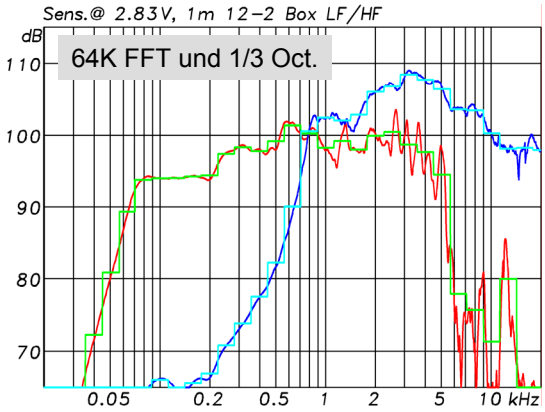


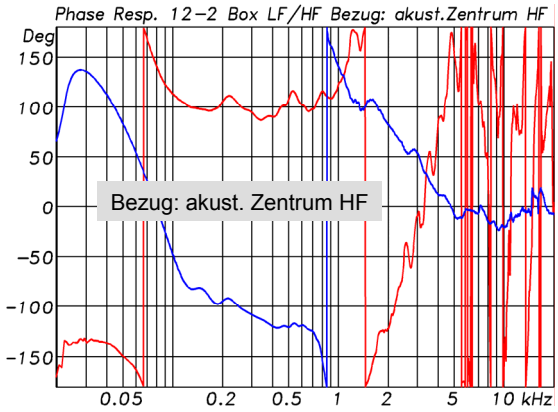
Frequenz- und Phasengang

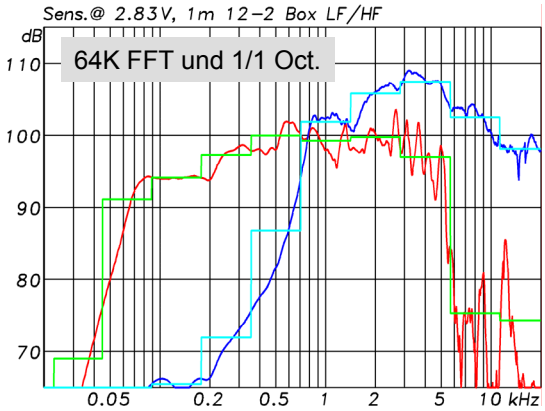
- Für jeden Weg
  - Frequenzgang auf Achse
  - zugehöriger Phasengang
    - Laufzeitbezüge untereinander beibehalten
    - Bezug zum Referenzpunkt
- Angabe der Sensitivity
  - 1W/1m bei Nennimpedanz
  - 2,83V/1m oder auch 1V/1m
- Auflösung
  - 1/1 Oct.
  - 1/3 Oct.
  - Frequenz linear
    - Samplerate: 48 kHz
    - 64 K FFT
    - Δf = 0,73 Hz

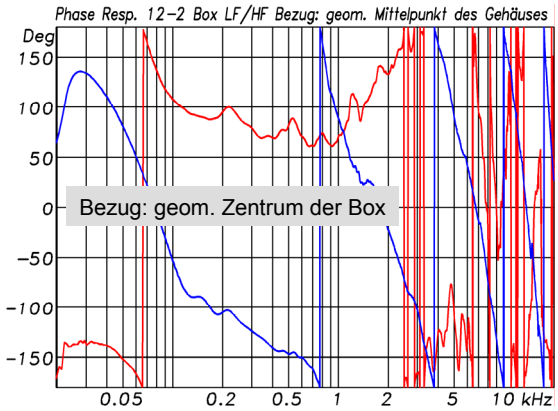


Frequenz- und Phasengang (2)



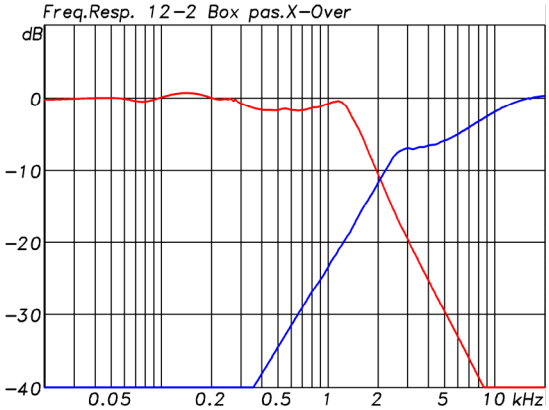


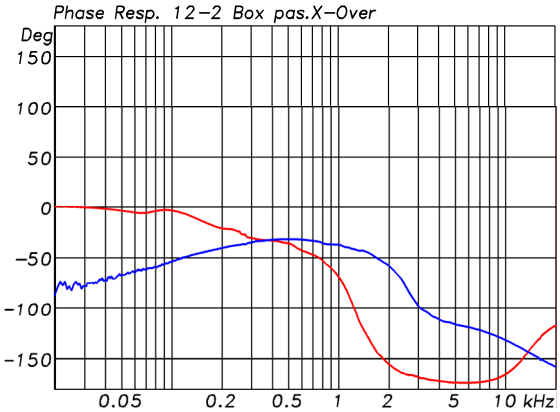




Filter

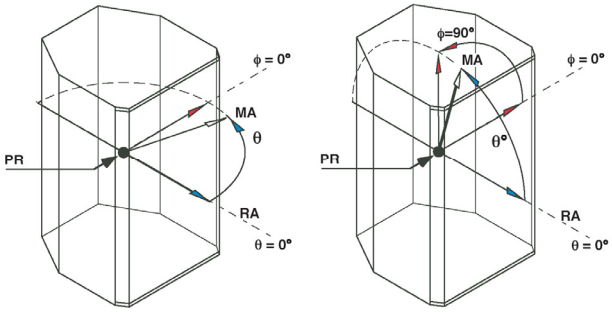
- Filterfunktionen aller Wege
  - X-Over Funktionen
  - EQs der einzelnen Wege
  - Eingangsfilter
  - weitere individuelle Filter
- Betrag und Phase mit Bezug zueinander
- Delays berücksichtigen
  - Delays von Digitalcontrollern beachten und mit einbeziehen
- Auflösung
  - 1/1 Oct.
  - 1/3 Oct.
  - Frequenz linear
    - Samplerate: 48 kHz
    - 64 K FFT
    - $\Delta f = 0{,}73$ Hz

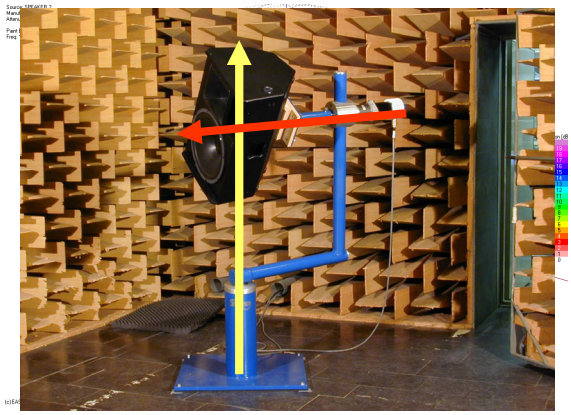




Directivity

- Definition über Balloondaten
  - Amplituden- und Phasendaten
  - Pro Position ein komplexer Frequenzgang oder eine Impulsantwort (min. Δf = 2,93 Hz)
- Die Lautsprecherachse zeigt über die Polachse auf das Mikrophon
- Messpunkte auf Großkreisen durch die Pole
- Winkelauflösung
  - Standard : 5°
  - Quellen für Arrays: *1
    - Einzelquellen bis 0,1 m: 10°
    - Einzelquellen bis 0,2 m: 5°
    - Einzelquellen bis 0,4 m: 2°
    - Einzelquellen bis 0,8 m: 1°

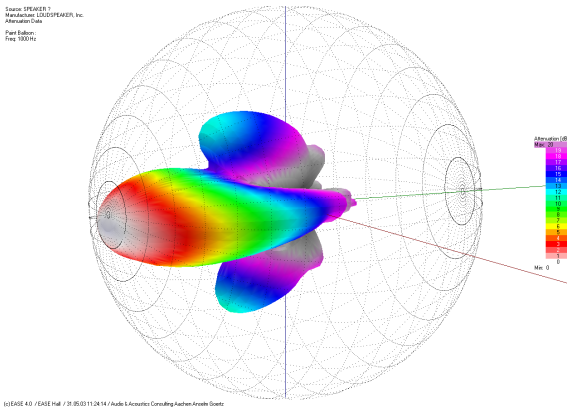


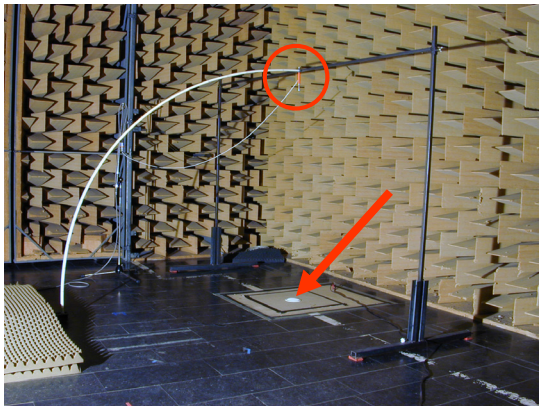


*1 **Methods and Limitations of Line Source Simulation Feistel et al. AES Convention Paper 2008 Oct.**

Directivity

- Anzahl der Messpunkte mit jeweils 64 kByte Daten (Δf = 2,93 Hz bei 48 kHz)
  - 10° : 703 45 MB
  - 5° : 2701 180 MB
  - 2° : 16471 1125 MB
  - 1° : 65314 4500 MB
- Symmetrien können ausgenutzt werden
  - Horizontal
  - Vertikal
  - Horizontal und Vertikal
  - Kreissymmetrie
- Halbraummessungen mit Grenzflächeneinbau für Decken – und Wandeinbaulautsprecher
- Interpolation aus hor. und ver. Messungen nur bei Lautsprechern mit einer einfachen und gleichmäßigen Directivity
- Balloondaten müssen im Fernfeld gemessen werden !



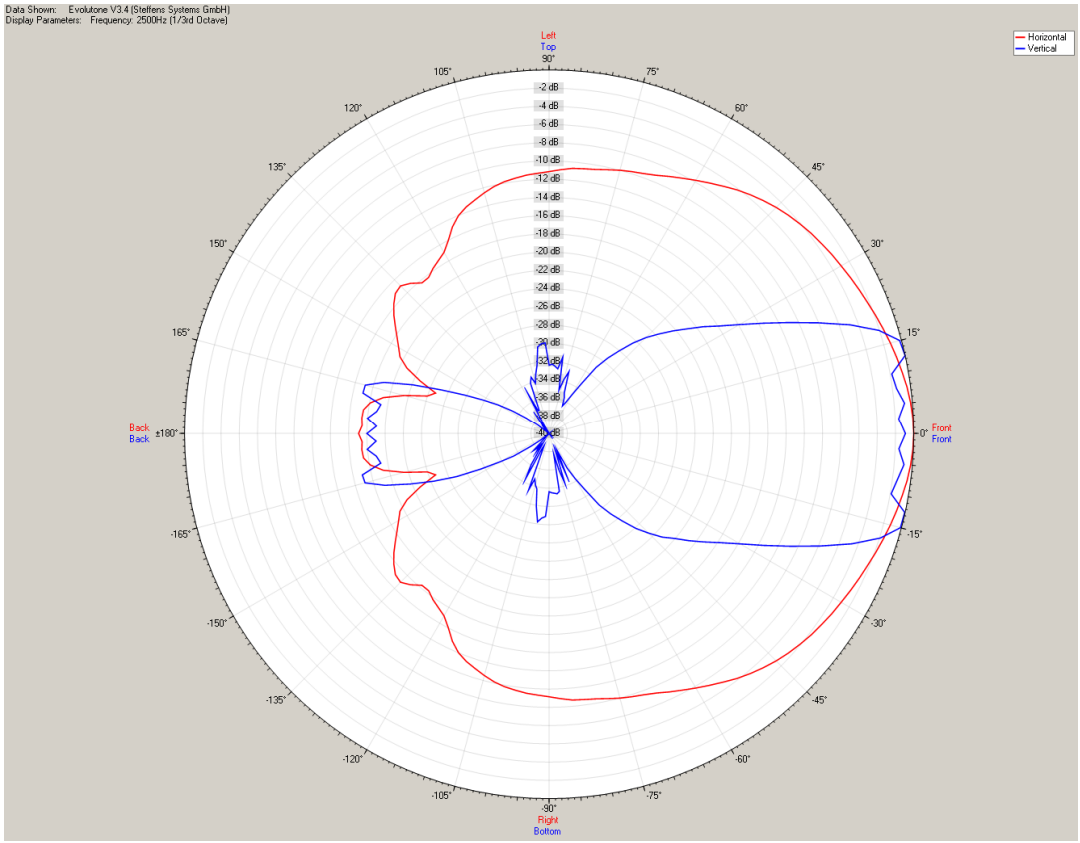


Nahfeld- Fernfeldbetrachtung

- Problem
  - Einfache Balloon Daten gelten nur im Fernfeld
  - Für Zeilen, Line-Arrays und andere ausgedehnte Anordnungen mit einem weit reichenden Nahfeld muß für die Simulation eine korrekte Nahfeld – Fernfeld Betrachtung erfolgen !
  - Das Richtverhalten dieser Lautsprecher ändert sich innerhalb der für den Einsatz relevanten Entfernungen
    - Das Nahfeld einer 3,72 m langen Zeile hat bei 2,5 kHz bereits eine Ausdehnung von 100 m !

$$r_{Fernfeld} = \frac{l^2 \cdot f}{340\ {}^{m}\!/_{s}}$$

Entfernungsabhängiges Richtverhalten



Länge der Zeile:
l = 3,72 m

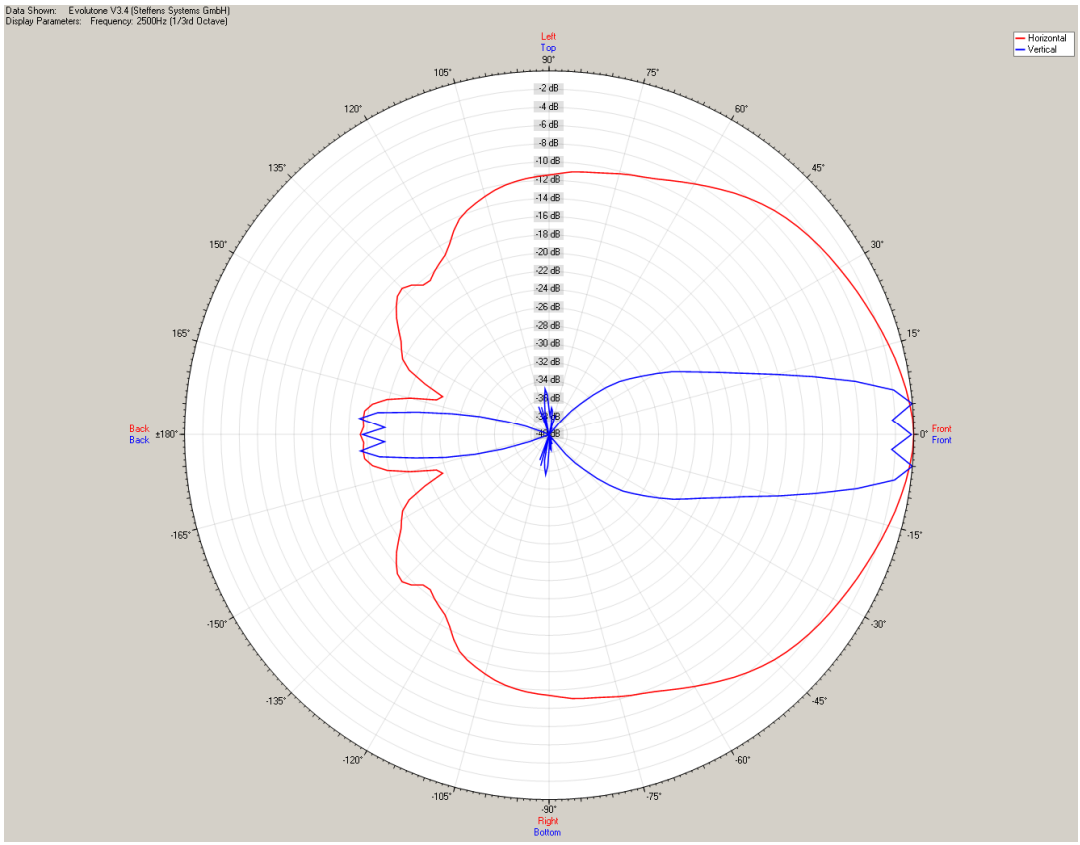
Messentfernung
d = 5 m

Frequenz:
2500 Hz
1/3 Oct.

Horizontal

Vertikal

Entfernungsabhängiges Richtverhalten



Länge der Zeile:
l = 3,72 m

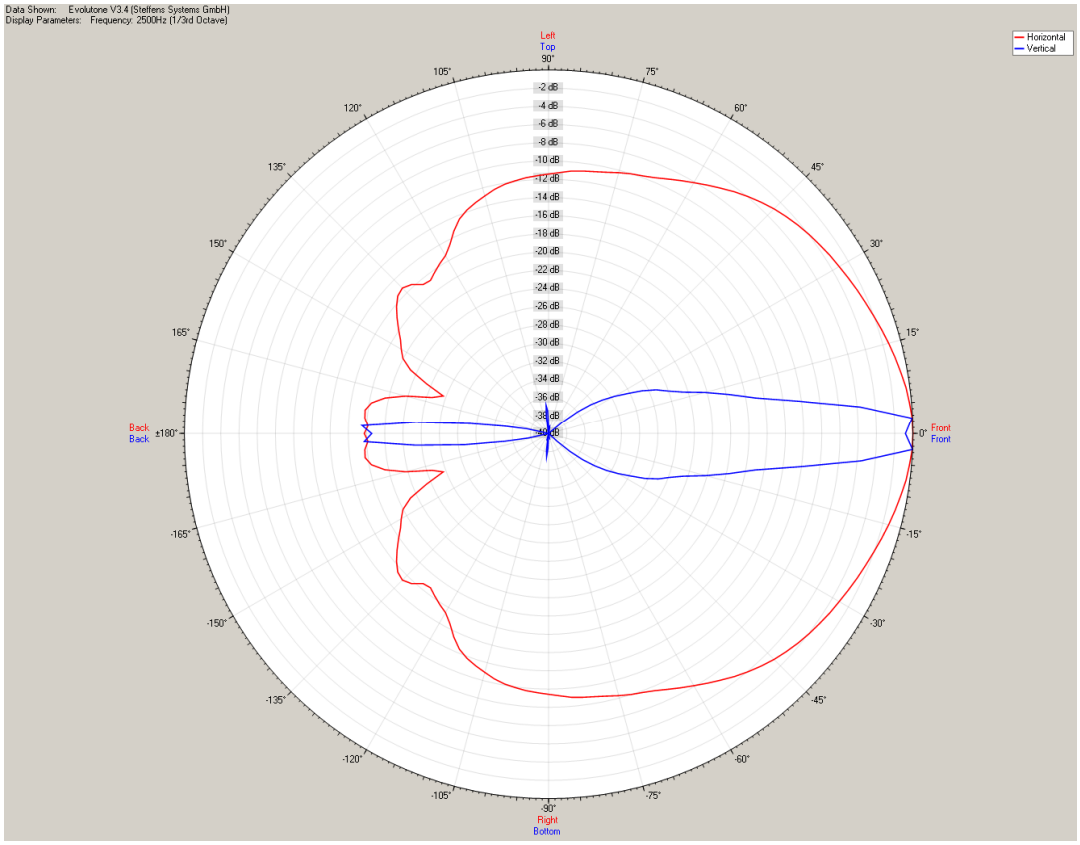
Messentfernung
d = 10 m

Frequenz:
2500 Hz
1/3 Oct.

Horizontal

Vertikal

Entfernungsabhängiges Richtverhalten



Länge der Zeile:
l = 3,72 m

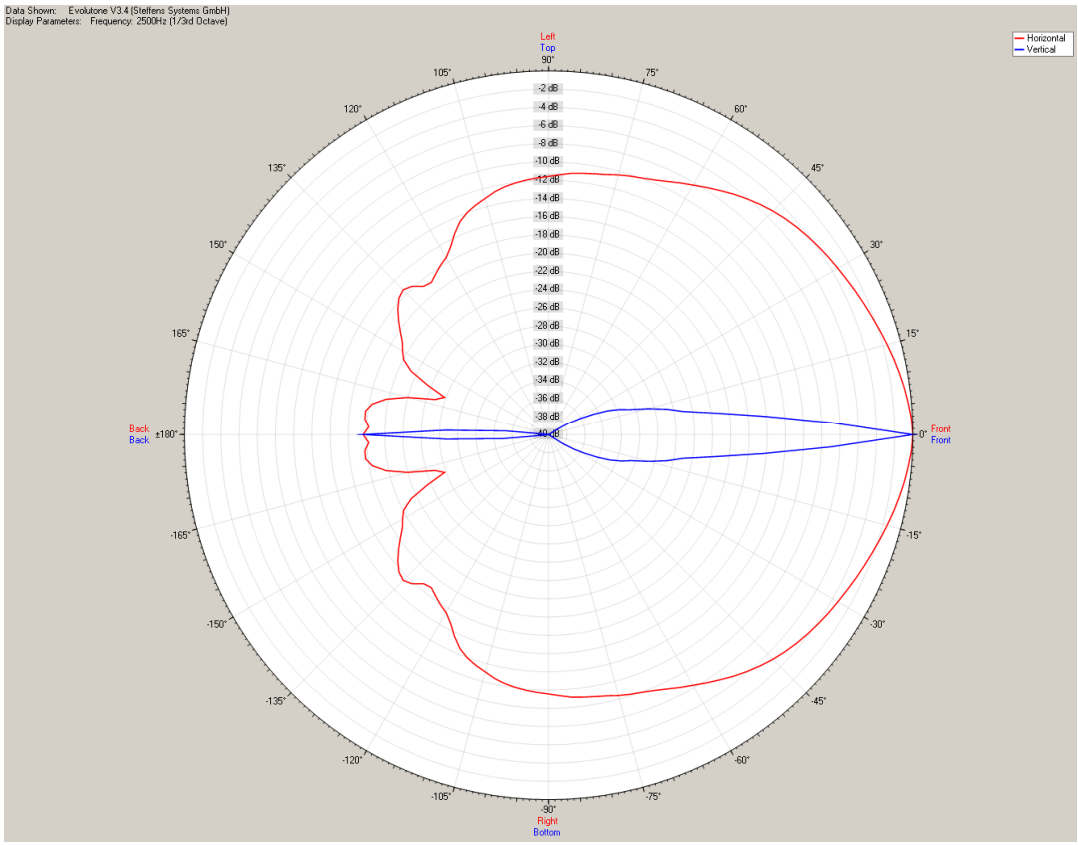
Messentfernung
d = 20 m

Frequenz:
2500 Hz
1/3 Oct.

Horizontal

Vertikal

Entfernungsabhängiges Richtverhalten



Länge der Zeile:
l = 3,72 m

Messentfernung
d = 50 m

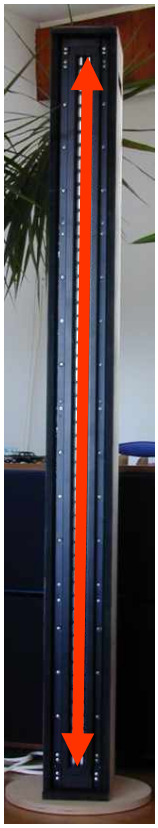
Frequenz:
2500 Hz
1/3 Oct.

Horizontal

Vertikal

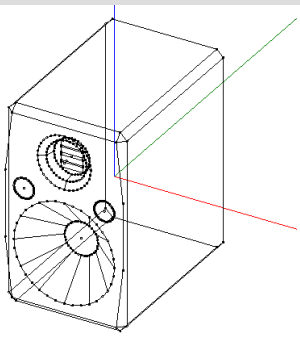
Nahfeld- Fernfeldbetrachtung

- Lösung
  - Messung der einzelnen kleinen Quellen einer Zeile im Fernfeld mit möglichst hoher Auflösung und mit Phasendaten !
  - Die Software setzt daraus das Verhalten der gesamten Anordnung mit korrekter Nahfeld – Fernfeld Betrachtung zusammen
- Voraussetzung
  - Eine Zerlegung der Anordnung in Einzelquellen für die Messung ist möglich.
  - oder BEM Simulation einzelner Segmente für messtechnisch nicht teilbare Quellen

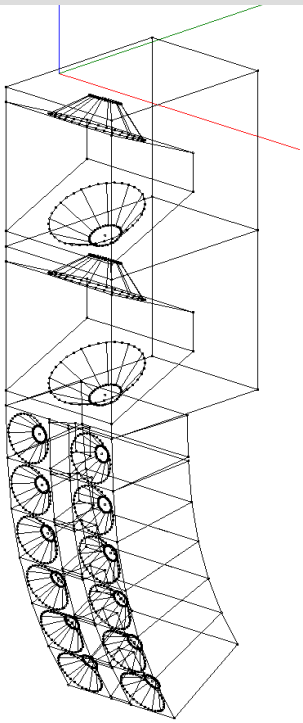


Konstruktion der Datensätze

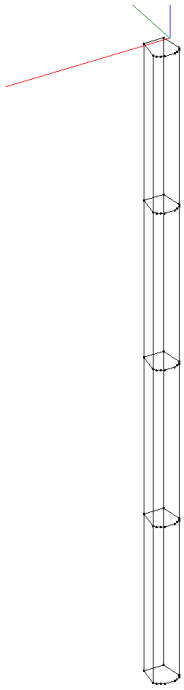
Einfacher 2-Wege Monitor



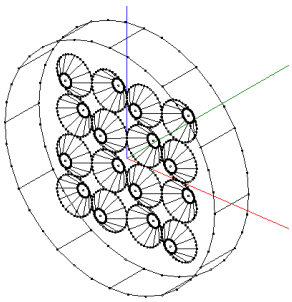
Line-Array mit Subwoofern



Zeilenlautsprecher

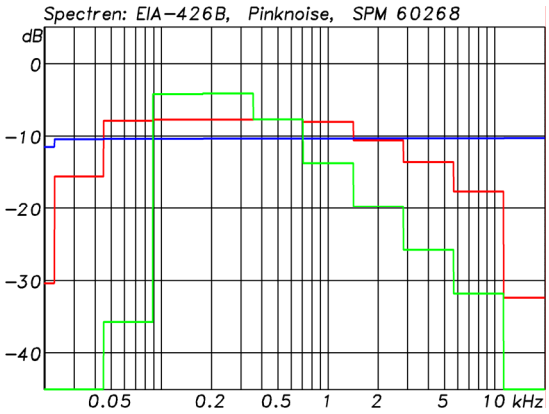


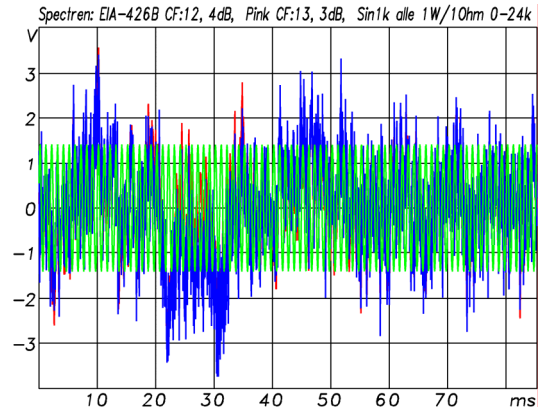
Flächenstrahler mit Einzelquellen



Maximalpegel ?

- Rechnerische oder messtechnische Bestimmung?
  - Sensitivity + Belastbarkeit (RMS/Programm/Peak) ?
- Für welche Signale ?
  - Noise, Sinus, ...
  - Spektrale Verteilung (EIA-426B, Pinknoise, Sprache, ...)
  - Crestfaktor (Peak/RMS)
- Für welchen Zeitraum ?
  - 1 s (mechanisches Limit)
  - 1 min (therm. Limit der Spule)
  - 2 h (therm. Limit ? (Praxis))
  - 100 h (therm. Limit long term)
- Bei welchen Kriterien ?
- Zerstörungsgrenze
- Verzerrungen
  - Harmonische (THD)
  - Intermodulation (IMD)
- Powercompression
  - Breitbandig
  - Terz- oder Oktavband
  - 1, 3, 6, 10, ... dB
- Reduzierung des Crestfaktors
  - durch den Lautsprecher
  - durch den Verstärker
  - Crestfaktoren: Pinknoise 13 dB, STI-PA Signal: 14 dB



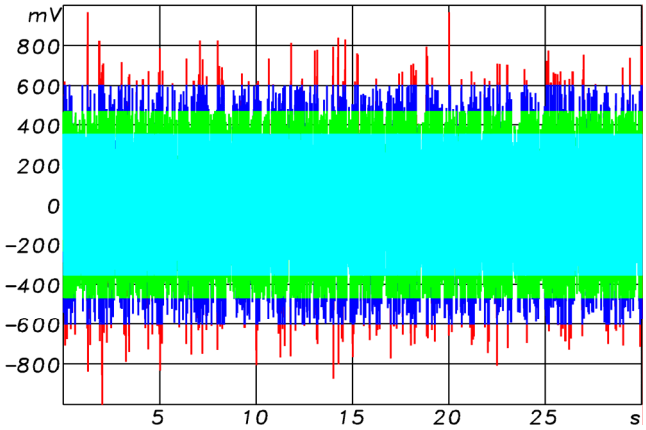


Übersicht der Messvorschriften

Eigenschaft nach DIN 60268-5	Testsignal	Einschalt-dauer	Pausen	Ableitung Leistung
Nennrauschspannung	60268-1 mit 6 dB Crestfaktor	1 x 100 h	-	Durch Bezug auf Nennimpedanz: Nennleistung, Nennbelastbarkeit
Maximale Kurzzeit-Eingangsspannung	60268-1 mit 6 dB Crestfaktor	60 x 1 s	1 min	Durch Bezug auf Nennimpedanz: Maximale Kurzzeiteingangsleistung
Maximale Langzeit-Eingangsspannung	60268-1 mit 6 dB Crestfaktor	10 x 1 min	2 min	Durch Bezug auf Nennimpedanz: Maximale Langzeiteingangsleistung
Nenn-Sinusspannung	Sinuston im Übertragungs-bereich	1 h	-	Durch Bezug auf Nennimpedanz: Nennsinusleistung
Eigenschaft nach AES2-1984 (r2003)				
„Rated“ Voltage	Bandpass 12 dB Butterworth im Nennüber-tragungsbereich*1 Pink Noise 6 dB Crestfaktor	2 h	-	Durch Bezug auf Nennimpedanz: Rated Power *1 für Einzelchassis

Messsignale

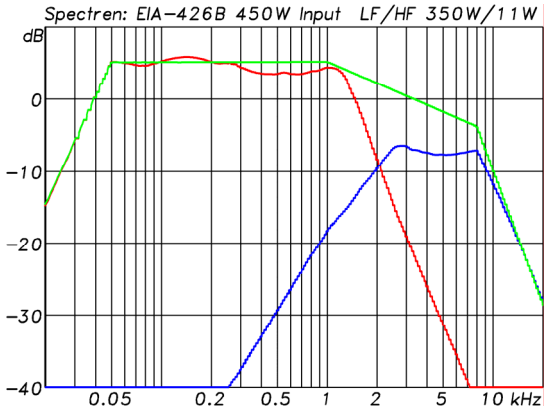
- spektrale Zusammensetzung
- Crestfaktor (Peak/RMS)
- z.B. STI-PA Testsignale
  - moduliertes Rauschen
  - 7 Frequenzbänder von 125 Hz bis 8 kHz
  - spektrale Verteilung entsprechend einem männlichen Sprecher nach 60268-16
  - Crestfaktor 14 dB

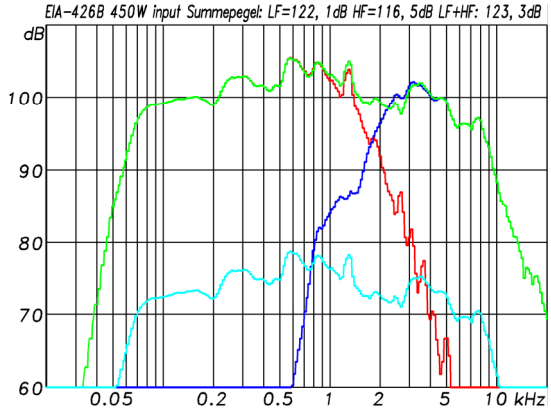


CF [dB]	RMS [dB]	Peak-reserve	Leistung Peak/Dauer	STI
14	0	11 dB	12,6	1,0
10	-0,03	7 dB	5	0,97
8	-0,16	5 dB	3,16	0,96
6	-0,58	3 dB	2	0,91

Simulationsdaten

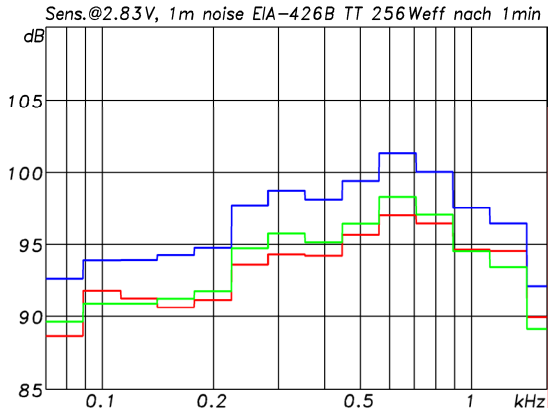
- Ausgangswerte:
  - Signalspektrum
  - Filter im Signalweg zu den einzelnen Lautsprechern (LF,MF,HF,....)
  - Belastbarkeit der einzelnen Wege
- Berechnung
  - welcher Weg erreicht als erstes seinen Grenzwert
- Nicht berücksichtigt werden dabei:
  - Verzerrungen
  - Powercompression
  - Reduktion des Crestfaktors

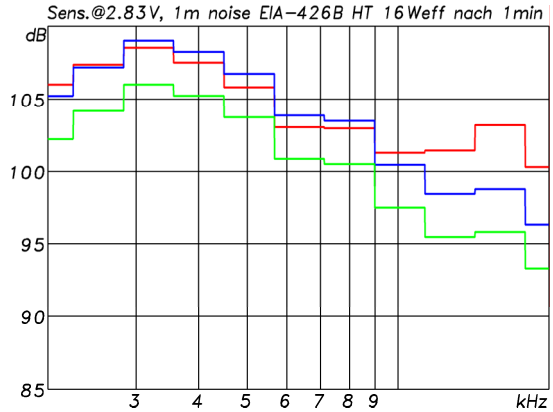




Powercompression Messung

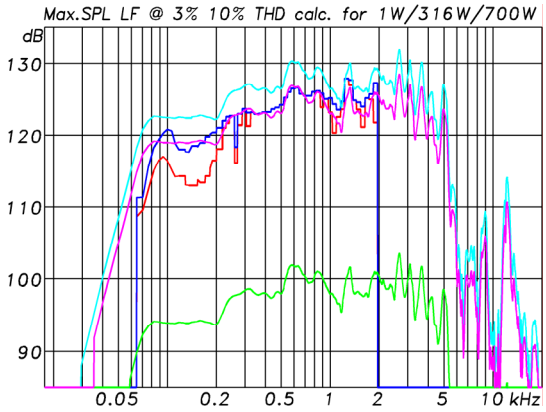
- Messsignale
  - Bandbegrenztes EIA-426B Noise (1,36 s Perioden)
    - Als synchrone Messung !
    - FFT Länge: 64K
  - Crestfaktor ohne Clip ca. 13 dB sonst 6 dB
  - Bandbegrenzung
    - LF: 70 Hz bis 2 kHz
    - HF: 2 kHz bis 20 kHz
- Messwert
  - Frequenzgang mit Sensitivity 1W/1m
- Grenzwerte
  - Bezug: Referenzkurve niedriger Leistung
  - Glättung: 1/3 Oct.
  - Abweichung: max. 3dB
- Messungen LF, HF
  - Sensitivity 1W/1m Referenz (——)
  - -3 dB Toleranzschlauch (-----)
  - Messwert bei gegebener Leistung (——)
  - Limit: LF bei 250 W ; HF <u>ohne Limit</u>

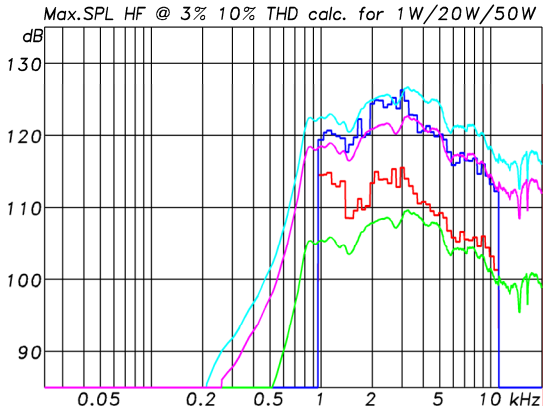




THD Messung

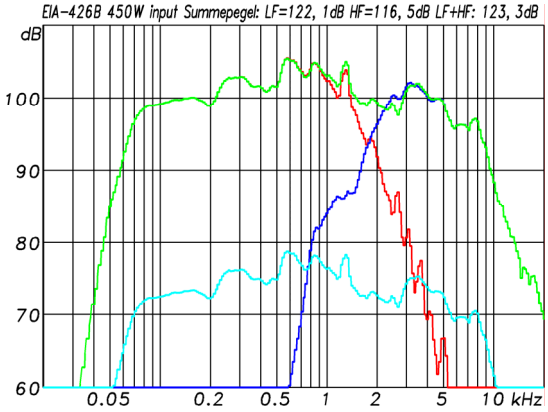
- Messsignale:
  - Sinusburst
    - 171ms (4K FFT) Δf = 11,6 Hz
    - 342ms (8K FFT) Δf = 5,8 Hz
- Grenzwerte
  - THD 1%, 3%, 10%
  - Leistungslimit
- Messungen LF, HF
  - Sensitivity 1W/1m grün
  - Calc. Max.SPL
    - LF 316 W und 700 W
    - HF 20 W und 50 W
  - Max.THD 3%
  - Max.THD 10%

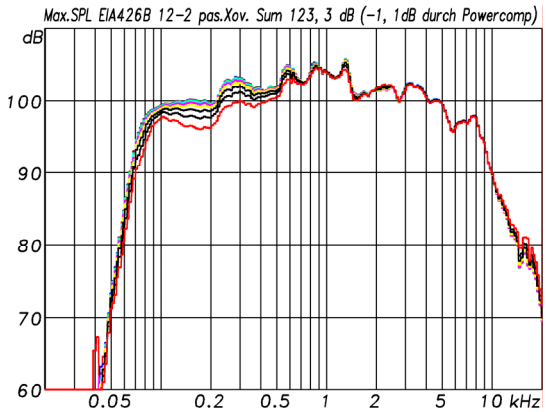




Max.SPL Berechnung die 2.

- Powercompression
  - max. 3 dB Compression für ein Terzband innerhalb des untersuchten Frequenzbandes
  - Kriterium nicht immer anwendbar
- Max. Power nach Herstellerangabe
  - AES Rated Power für 2 h
- THD-Messung
  - 10% oder auch 3% Grenzwert
  - als zusätzliches Leistungslimit
- Berechnung des max. SPL
  - Leistung mit 10% THD oder -3 dB Powercompression Grenzwert
  - Powercompression in die Berechnung einfließen lassen





Problemstellen und Ausblick

IFAA INSTITUT FÜR AKUSTIK UND AUDIOTECHNIK

- Probleme
  - Die wichtige Größe des erreichbaren Max.SPL ist noch nicht eindeutig beschrieben und definiert
  - Die Powercompression findet in den Modellen noch keine direkte Berücksichtigung
  - Der Verlust im Crestfaktor (Dynamikverlust) wird bisher noch nirgendwo berücksichtigt
  - Ausgedehnte Quellen, die sich nicht in Einzelkomponenten zerlegen lassen (z.B. lange Bändchenlautsprecher oder Elektrostaten) können messtechnisch nicht erfasst werden.
- Ausblick
  - Testsignale und Methoden für die Messung der Powercompression und des Crestfaktors sind zu definieren
  - Festlegung von Grenzwerten im Hinblick auf den Höreindruck und die erwarteten audiophilen Qualitäten
  - BEM Simulationen für einzelne Segmente ausgedehnter Quellen sind zu erproben

Fazit

IFAA INSTITUT FÜR AKUSTIK UND AUDIOTECHNIK

- Einzelmessung aller beteiligten Komponenten mit anschließender Modellierung des Lautsprechers oder Arrays

+ Sehr flexibel einzusetzen
+ Spätere Änderungen einfach auszuführen
+ Korrekte Nahfeld-Fernfeld Betrachtung
+ Genauere Max.SPL Bestimmung

– Hoher Aufwand bei der Messung
– Mehraufwand für die Konstruktion der Lautsprecherdaten
– Max.SPL Berechnung befindet sich noch in der Entwicklung
– Nicht zerlegbare ausgedehnte Quellen können nicht messtechnisch erfasst werden.

! Für die Modellerstellung von Arrays, Linienquellen, Flächenstrahlern etc. zwingend erforderlich

Paper Download

IFAA
INSTITUT FÜR AKUSTIK UND AUDIOTECHNIK

www.ifaa-akustik.de

Manuskript zu diesem Vortrag mit Text und Grafiken
als PDF File ab dem 29. November 2010