PRODUCTION PARTNER
Fachmagazin für Veranstaltungstechnik

Test
aus Ausgabe 02/2019

Das Fachportal für die AV- und Event-Branche
PRODUCTION PARTNER

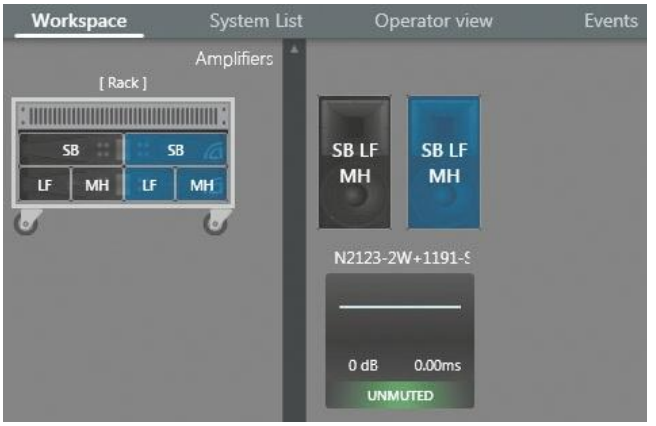
Vierkanalige Touring-Amps

Powersoft T-Serie

Mit der T-Serie entwickelte Powersoft vier neue Endstufenmodelle in der mittleren Leistungsklasse: Mit 3 kW oder 6 kW Gesamtleistung gibt es je ein zwei- und ein vierkanaliges Modell, die unabhängig von der Leistung alle über eine „Vollausstattung“ mit Armonía-DSP, Dante-Interface und AES3-Eingang verfügen. Zielgruppe für die neuen preislich besonders attraktiven Amps sind Verleiher, Bands und DJs, die solides Touring-Equipment benötigen

Text und Messungen: Anselm Goertz | Fotos: Anselm Goertz, Dieter Stork

Workspace *von Armonía Plus. In dieser Einstellung sieht man rechts im Speaker-Fenster die Lautsprecher und links die zugehörigen Verstärker. Sind mit der Add-Funktion alle Komponenten im Workspace, können mit „Link" sehr schnell und einfach die Zuordnungen hergestellt werden. Die Verstärker werden dann automatisch mit den entsprechenden Setups für die Lautsprecher bestückt (Abb. 1)*



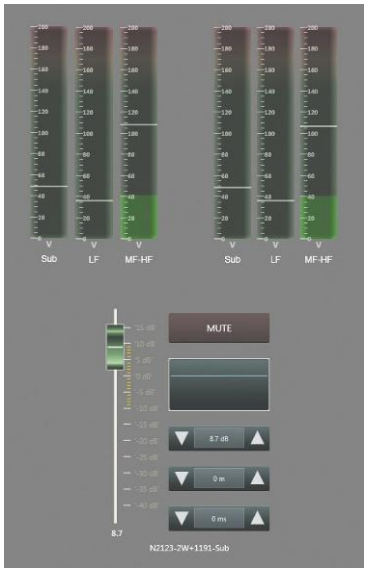
Wer gehört zu wem? *Das ist mit einem einfachen Klick auf den betreffenden Lautsprecher im Workspace direkt zu erkennen. Mit dem hier ausgewählten 2-Wege-Topteil mit Subwoofer (blau) sind drei Verstärkerkanäle aus dem Rack (links) verlinkt (Abb. 2)*

Eine gemeinsame Plattform, die mit wenigen Komponenten eine große Bandbreite an Produkten liefert – dieser Gedanke wird beim italienischen Endstufenhersteller Powersoft schon länger verfolgt und prägt auch die neue T-Serie mit ihren vier Modellen. Als Basis dafür dienen Endstufenmodule, Netzteile und der Armonía-DSP. Mit einem oder zwei Netzteilen können in der Summe Leistungswerte von 3 kW oder 6 kW bereitgestellt werden, die dann zwei oder vier Endstufen versorgen, die wiederum einzeln oder parallel betrieben werden. Die Konfiguration erfolgt über die Bestückungsvarianten der Netzteile und Endstufen-PCBs, so wie man es auch schon von den Duecanali- und Quattrocanali-Modellen aus der Installationsserie kennt. Die weitere Ausstattung betreffend gibt es in der T-Serie immer das volle Programm mit allen DSP-Funktionen, einem Dante-Interface und digitalen Eingängen im AES3-Format. Zur schon länger am Markt befindlichen X-Serie unterscheidet sich die T-Serie auf dem Papier primär zunächst einmal durch die Leistungswerte. Für die Praxis gibt es aber noch den wichtigen Unterschied in der Bedienung: Während die X-Serie bis auf die Mute-Funktion ausschließlich via Netzwerk über die Armonía-Software zu bedienen und zu konfigurieren ist, gibt es bei der T-Serie ein farbiges Display und acht farbig hinterleuchtete Taster, über die alle wesentlichen Funktionen und Abfragen zu erreichen sind. Diese Bedieneinheit ist speziell im Hinblick auf den Einsatz bei kleineren Events in die T-Serie integriert worden, bei denen man nicht immer davon ausgehen kann, dass alle Geräte vernetzt sind und die entsprechende Software bereitsteht. So lassen sich bei der T-Serie an der Endstufe selber auch Presets prüfen und abrufen, Pegel und Delays einstellen, die Matrix konfigurieren oder auch die Eingänge auswählen. Damit ist im Falle eines Falles auch auf einer kleinen Baustelle schnelle Selbsthilfe möglich, falls einmal das geladene Setup nicht stimmt oder fehlt. Welche Funktionen am Frontpanel verfügbar sind, kann bereits vorab konfiguriert werden.

Neue Software: Armonía Plus

Bereits 2017 wurde die Powersoft-Systemmanager-Software Armonía in der neuen Plus-Version vorgestellt. Die Änderungen bzw. Erweiterungen gegenüber der „Armonía Pro Audio Suite" betreffen primär die Konfiguration kompletter Systeme und die Zuordnung von Lautsprechern und Verstärkern zueinander. Abb. 1 zeigt ein einfaches Beispiel, wie im zweigeteilten Workspace Lautsprecher und Verstärker gruppiert, in Racks zusammengestellt und anschließend verlinkt werden können. Bei sehr vielen Verstärkern oder Lautsprechern im Workspace oder zu kleinen Bildschirmen kann auch eine alternierende Darstellung von Lautsprechern und Verstärkern gewählt werden.

Wer zu wem gehört lässt sich im Workspace (Abb. 2) einfach durch Anklicken eines Lautsprechers oder Verstärkers klä-



Operator View *in der Armonía-Software. Der Anwender kann sich im Operator View seine eigene Bedienoberfläche mit den für ihn wichtigen Funktionen zusammenstellen. Hier ein einfaches Beispiel für das zuvor gezeigt Setup (Abb. 3)*

ren, wodurch entweder die Zuordnungen für einzelne Kombinationen oder auch von Lautsprechergruppen zu Ampracks angezeigt werden. Um vorgefertigte Setups mit realen Ampracks im System zu verknüpfen, gibt es in der Designebene die Match-Funktion. Die Discovery-Suchfunktion listet zuerst alle im Netzwerk real gefundenen Endstufen auf, die dann den im Setup vorhandenen Endstufen zugeordnet werden. Eine Übersicht aller Endstufen inklusive Seriennummern, IP-Adressen und Firmware-Versionen bietet die Seite „System List". Neben diesen eher formalen Details werden in der System List auch die Pegelanzeigen, eine mögliche Gain Reduction, die Temperaturen der Amps und die an den Ausgängen gemessenen Impedanzen aufgeführt.

Zwei weitere Fenster sind mit „Operator View" und „Events" benannt. Letzteres listet möglich Fehler im System, Überlastungen, Stromausfälle etc. auf und ermöglicht auch den automatisierten Versand einer E-Mail und/oder SMS im Falle einer Störung. Vor allem bei größeren Installationen oder mehreren Bühnen auf Festivals kann diese Funktion nützlich sein, wenn man als Techniker weiß, dass man über Störungen direkt informiert wird, ohne immer direkt vor Ort sein zu müssen. Wer sich eine eigene Bedienoberfläche zusammenstellen möchte, kann dieses im Operator View machen. Hier lassen sich Einzel- und Gruppenfunktionen nach Bedarf anordnen und auch mit Grafiken, z. B. mit einem Grundriss der Location, hinterlegen.

Die aus der bisherigen Armonía-Software bekannten Funktionen zur Erstellung kompletter lautsprecherspezifischer Setups mit X-Over, EQ und Limiterfunktionen finden sich unter Config und Tune wieder. Werden vorgefertigte Presets geladen, dann sind die lautsprecherspezifischen Funktionen nicht mehr zugänglich, sodass nur noch für einen Lautsprecher insgesamt Mute, Gain, Delay und Master-EQs eingestellt werden können.

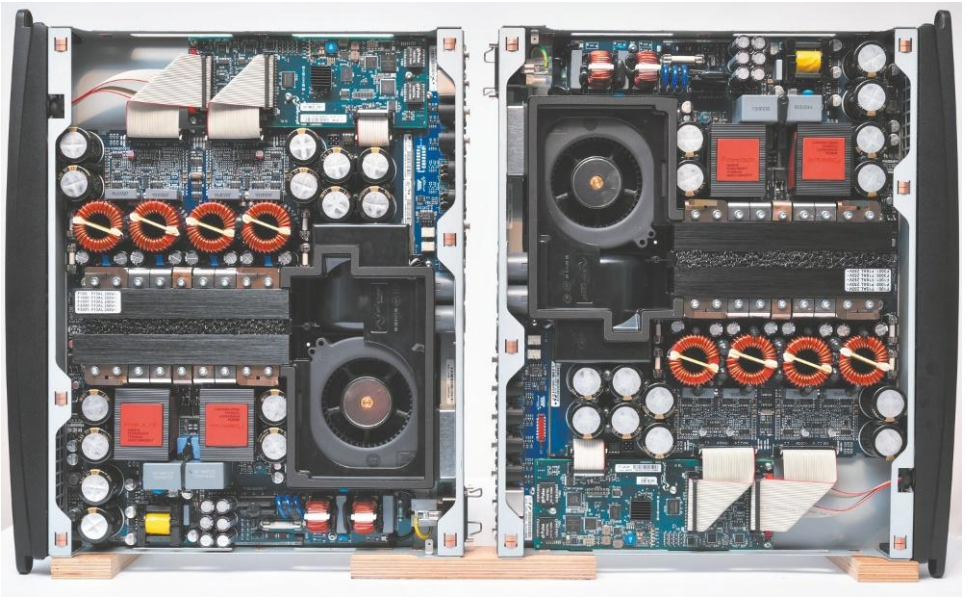
Die Armonía Plus ist in der Struktur so aufgebaut, dass der Workflow angefangen bei der Zusammenstellung des Systems über die Inbetriebnahme bis hin zur Show in dieser Abfolge abgebildet wird. Die Abfolge und auch die Darstellung im Workspace eignen sich dabei sowohl für große Systeme wie auch für kleine Setups, ohne dabei überladen zu wirken oder die Arbeit unnötig zu verkomplizieren. Ein wenig Kritik muss man jedoch an dem zur neuen Armonía-Plus-Software gehörigen Manual äußern, das bisher nur sehr kurz einige Punkte anreißt und keine systematische Einführung oder einen Überblick über das System Armonía gibt. Aktuell fünf kleine YouTube-Videos beleuchten auch nur einzelne Aspekte und helfen nur partiell weiter. Wer sich also mit der Software ausführlicher befassen möchte, und das gilt insbesondere für Lautsprecherentwickler, der nimmt sich am besten einige Stunden Zeit und geht selber auf Erkundungstour. Bei konkreten Fragen per E-Mail hilft man dann im Hause Powersoft auch gerne und schnell weiter.

Welche umfangreichen Funktionen für Entwickler und Lautsprecherhersteller in der Armonía-Software zur Verfügung stehen, soll an dieser Stelle nicht weiter erläutert werden. In Stichworten sind das: Raised-Cosine-Filter in mehreren Ebenen, X-Over-Filter aller Art mit bis zu 48 dB/Oct Steilheit, phasenlineare FIR-Hoch- und Tiefpässe, Peak- und RMS-Limiter für die Ausgangsspannung, Strom und Leistungsbegrenzer sowie reichhaltige Schutz- und Kontrollfunktionen inklusive einer Messung der Lastimpedanzen mit Referenzwertvergleich. Eine ausführliche Beschreibung zu diesen vielfältigen Features findet sich bereits im Testbericht zur X-Serie (Production Partner Ausgabe 7+8/2015, Online-Download via www.production-partner.de). Neu im Vergleich zu den früheren Modellen von Powersoft ist jedoch die Möglichkeit, pro Weg jetzt ein Custom-FIR-Filter mit 2048 Taps (anstelle bislang nur 384) zu nutzen. Details dazu weiter unten.

Plattform T-Serie

Klas Dalbjörn (Powersoft Product Manager, früher Lab Gruppen) erläutert zur T-Serie, dass alle Modelle mit Bedacht für eine hohe maximale Ausgangsspannung von 145 V_{pk} ausgelegt sind, sodass auch 8- oder 16-Ω-Wege voll ausgenutzt werden können. Je nach Strombedarf kann dann ein Modell

mit 3-kW-Netzteil oder mit 6 kW eingesetzt werden. Da sich die Endstufenkanäle die Netzteilkapazität teilen (Power Sharing), kann diese optimal ausgenutzt werden. Nimmt man als Beispiel eine voll aktive PA mit 2-Wege-Topteilen und 2 × 18"-Subwoofern, dann würde sich eine Endstufe T304 für die Tops und eine T602 für die Subwoofer anbieten: Die T304 versorgt mit zwei Kanälen die Hochtöner der Tops, wo nur wenig Leistung benötigt wird und hat dann noch reichlich Reserven im Netzteil für die Tieftöner in den Tops. Die T602 mit dem großen 6-kW-Netzteil bietet neben der hohen Ausgangsspannung auch noch hinreichend Strom für die 4-Ω-Subwoofer, sodass Endstufen und Lautsprecher optimal ausgelastet sind.



Original und „Fälschung“: *Eine zweikanalige T602 und eine vierkanalige T604 mit fast identischem Aufbau*

Typ	Leistung*	Max.	Max.	Endstufen
	[W]	[V_{pk}]	[A_{pk}]	
T302	2 × 1500	145	50	2
T602	2 × 2500	145	100	2 × 2
T304	4 × 750	145	50	4
T604	4 × 1500	145	50	4

Modelle *der T-Serie mit Leistungswerten (nach Datenblatt an 4 Ω) und Bestückung (Tab. 1)*

Tabelle 1 zeigt die Eckdaten der vier T-Serie-Modelle in einer Übersicht mit Leistungswerten und den Maximalwerten für die Ausgangsspannung und den Strom. Zum Test gestellt wurden uns bereits die zweikanalige T602 und die vierkanalige T604. Die maximale Ausgangsspannung von 145 V_{pk} konnte für beide Testmodelle messtechnisch leicht nachgewiesen werden. Der maximale Ausgangsstrom lag mit knapp 60 A_{pk} bei der T604 und 120 A_{pk} für einen 1-ms-Burst sogar noch etwas höher als im Datenblatt angegeben.

Ein Blick ins Innere der T602 und T604 zeigt die für Powersoft übliche extreme Packungsdichte. Unterschiede zwischen den beiden 600er-Modellen sind auf den ersten Blick nicht zu erkennen. Lediglich von außen erkennt man die T602 an den zusätzlichen Link-Buchsen für die analogen Eingänge, die bei der T604 als Eingänge für den dritten und vierten Kanal bestückt sind. Das doppelte Netzteil und die vier Ausgangsstufen sind in beiden Endstufen vorhanden. In der T602 arbeiten dann je zwei Ausgangsstufen zusammen, so dass der doppelte Ausgangsstrom möglich wird.

Von außen betrachtet machen beide Verstärker einen übersichtlichen und klaren Eindruck. Das mittig angeordnete farbige Display ermöglicht zusammen mit den acht Tastern eine schnelle und intuitive Bedienung. Welche Tasten nutzbar sind, erkennt man an der Beleuchtung: Taster die grau bleiben, sind für das gerade geöffnete Menu ohne Funktion. Auf der Rückseite gibt es die zwei bzw. vier analogen Eingänge, je einen AES3-Eingang mit Link-Buchse und zwei Netzwerkbuchsen, die in der Funktion als Switch arbeiten. Dahinter steckt ein Dante-UlitmoX4-Interface, das jeweils zwei Kanäle aus dem Dante-Datenstrom für die Endstufe abgreift und zwei ausgibt. Die beiden als Transmitter zur Verfügung gestellten Dante-Signale sind die DSP-Ausgangssignale der Kanäle 1 und 2 des internen DSP und somit Signale, die das komplette Processing des DSPs bereits durchlaufen haben. Leider sind diese Zusammenhänge nicht weiter dokumentiert oder in ihrer Anwendung erläutert.

Frontansicht *der T604 (oben) und T602 (unten). Der kleine Unterschied findet sich lediglich im Inhalt auf dem Display und bei der Tastenbelegung.*

Rückansicht *der T604 (oben) und T602 (unten). Die T602 mit nur zwei Kanälen verfügt über zusätzlich Link-Buchse für die analogen Eingänge. Kleine Unterschiede gibt es auch in der Belegung der Speakon-Buchsen.*

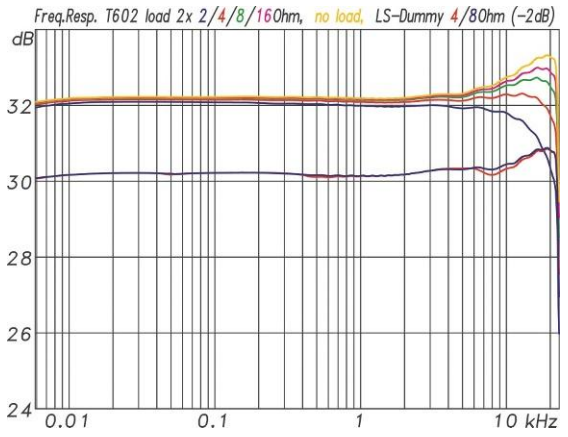
Für die drei Eingangsvarianten analog, AES3 oder Dante kann eine Backup-Reihenfolge mit Pegelanpassung definiert werden, die im Falle eines Ausfalls eines Datenstroms automatisch auf die nächste Ebene umschaltet.

Frequenzgang und Dämpfungsfaktor

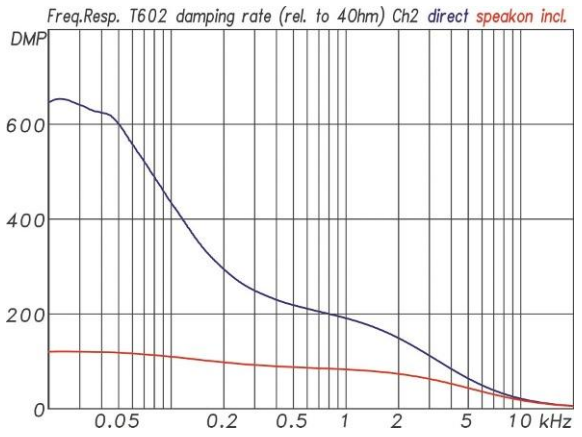
Beginnen wir mit der Frequenzgangmessung der T602 in Abb. 4 mit mehreren Kurven in Abhängigkeit von der Last. Die Verstärkung bei Nutzung der analogen Eingänge liegt bei 32 dB. Bedingt durch das Schaltungskonzept einer Class-D-Endstufe mit passiven Tiefpassfiltern in den Ausgängen kommt es abhängig von der Last zu mehr oder weniger starken Schwankungen im Frequenzgang am oberen Ende des Übertragungsbereiches.

Mit Ausnahme der Messung an einer 2-Ohm-Last steigen alle Kurven zu den Höhen hin leicht an. Bei einer 16-Ω-Last liegt so der Pegelanstieg bei 20 kHz bei einem knappen dB. Im Leerlauf ohne Last fällt der Anstieg noch etwas kräftiger aus. Die Endstufenschaltung kompensiert damit vorauseilend den Pegelverlust durch den bei hohen Frequenzen ansteigenden Innenwiderstand. Für eine 4-Ω-Last ist die Kurve dann fast ausgeglichen. Klanglich sollte das speziell bei Beschallungslautsprechern kaum relevant sein oder sich sogar positiv auswirken.

Bezieht man den Wert des Innenwiderstandes der Quelle auf die Lastimpedanz, dann wird daraus der bekannte Dämpfungsfaktor (Abb. 5). Auf 4 Ω bezogen ergibt das für die T602 bei 100 Hz einen Wert von 110, bei 1 kHz von 83 und bei 10 kHz von 18. Wichtig ist ein hoher Dämpfungsfaktor vor allem bei tiefen Frequenzen, wo der Lautsprecher eine gute Kontrolle durch den Verstärker benötigt, um nicht zu lange auszuschwingen. Werte von 100 für die Endstufe sind in der Praxis schon mehr als hinreichend, da meist durch Kabel- und Kontaktwiderstände ohnehin noch größere Widerstände auf dem Signalweg entstehen. Wie sehr sich Kontaktwiderstände auswirken, zeigt die zweite blaue Kurve für den Dämpfungsfaktor in Abb. 5, die über die zweite Speakonbuchse als eine Art Sense-Leitung ohne Laststrom gemessen wurde, womit die Übergangswiderstände von der Endstufenplatine bis zum Ausgang an der ersten Speakonbuchse umgangen werden konnten. Der Wert bei 100 Hz steigt von 110 auf 430 an. Daraus berechnet sich ein Übergangswiderstand der Verbindung von der Platine bis zur Speakonbuchse von 27 mΩ. Möchte man den hohen Dämpfungsfaktor einer Endstufe bis zum Lautsprecher erhalten, dann gibt es die Möglichkeiten einer mitgeführten Sense-



Frequenzgang *mit 2-, 4-, 8- und 16-Ω-Lastwiderständen, ohne Last und mit 4- bzw. 8-Ω-Lautsprecher-Dummy-Loads (in der Darstellung um 2 dB nach unten versetzt, Abb. 4)*

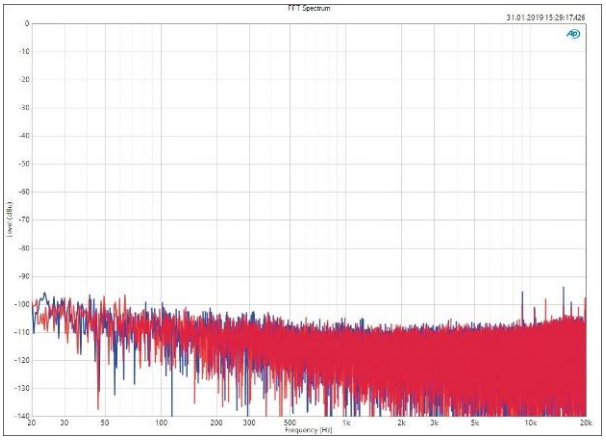


Dämpfungsfaktor *bezogen auf eine 4-Ω-Last über Speakon-Buchse gemessen (rot) und separat über den zweiten Ausgang gemessen (blau, Abb. 5)*

Leitung oder einer Art vorauseilenden Kabelkompensation, wie sie in der T-Serie und auch bei anderen bei Powersoft-Endstufen schon eingebaut ist. Um Instabilitäten zu vermeiden, kann das Verfahren aber nur bis maximal 400 Hz eingesetzt werden.

Dynamik und Störabstand

Kommen wir zum nächsten Messwert einer Endstufe, dem Dynamikumfang. Für die Berechnung ist zunächst die maximale Ausgangsspannung zu bestimmen. Diese liegt für alle Modelle der T-Serie bei 145 V_{pk} und somit bei ca. 42,4 dBu. Dem gegenüber steht der an den Ausgängen zu messende Störpegel, der einmal bei Nutzung der analogen Eingänge und einmal mit digitalen Eingängen gemessen wurde. Die analogen Eingängen wurden dazu mit einem 200-Ω-Widerstand abgeschlossen. Der so gemessene Störpegel lag bei −67 dBu unbewertet und bei −70 dBu mit A-Bewertung. Nach der Umschaltung auf die digitale Signalzuspielung verbesserten sich die Werte noch um weitere 2 dB. Legt man den A-bewerteten Störpegel zu Grunde, dann wird ein Störabstand von etwas mehr als 112 dB analog bzw. 114 dB bei digitaler Signalzuspielung erreicht. Die zugehörigen Störspektren aus Abb. 6 zeigen die Messung mit analogen Eingängen. Monofrequente Komponenten, die besonders störend sein können, gibt es nur einige wenige mit vernachlässigbaren Pegeln, und dann auch erst oberhalb von 9 kHz.



Störspektrum *am Ausgang der T602 (CH1 rot, CH2 blau) Gesamtpegel −67 dBu und −70 dBu(A). Bei Nutzung der digitalen Eingänge jeweils 2 dB weniger (Abb. 6)*

Verzerrungsmessungen

Endstufen erzeugen primär dann Verzerrungen, wenn sie die Grenze ihrer maximalen Ausgangsspannung oder ihres maximalen Ausgangsstromes erreichen. Bei modernen Schaltungskonzepten führt das nicht mehr zu hartem Clipping, quasi einem Abschneiden der Signale, sondern wird kontrolliert durch Strom- und Spannungslimiter begrenzt. Ausnahmen können dann entstehen, wenn in Extremsituationen eine Überlastung der Halbleiter verhindert werden

Was sagen Messwerte über Endstufen aus?

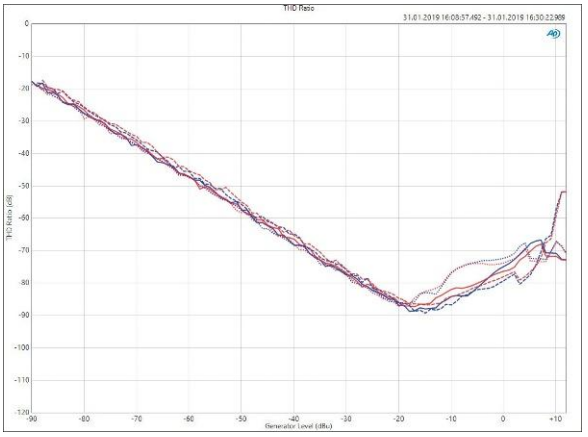
Bevor man in die Diskussion über Klirrfaktorwerte im Promillebereich einsteigt, sollte ein kurzer Blick auf die Messwerte geworfen werden, die man bei einer Endstufe typischerweise erfasst: Das sind das lineare Übertragungsverhalten in Form vom Frequenz- und Phasengang, der Störabstand, die Verzerrungswerte zu unterteilen in harmonische Verzerrungen und Intermodulationsverzerrungen und natürlich die Leistungswerte. Welche Werte wie wichtig sind, hängt immer auch von der Anwendung ab. Die Schwankungen im Frequenzgang im hörbaren Frequenzbereich spielen sich in Größenordnungen ab, die in Relation zum Frequenzgang von Lautsprechern sicherlich als vernachlässigbar gelten dürfen, solange es nicht um Hörvergleiche oder ähnliches geht. Gleiches gilt für den Phasengang. Ist, wie hier in der T-Serie, ein DSP im Spiel, dann sollte jedoch die Latenz beachtet werden. Für die T-Modelle liegt diese bei 2,54 ms. Aktiviert man die phasenlinearen Hoch- oder Tiefpassfilter, dann kommen noch mal 1,3 ms durch die 128 Taps langen FIR-Filter hinzu. Der Störabstand kann in einer kritischen Umgebung im Zusammenspiel mit hoch sensitiven Lautsprechern, speziell im voll aktiven Betrieb, ein Thema werden. Ein Störpegel von −70 dBu am Ausgang der Endstufe kombiniert mit einem Hochtonsystem mit 110 dB 1 W/1 m Sensitivity bedeuten 30 dB Störpegel in 1 m Entfernung. Ein Wert, der in 99% aller Anwendungsfälle unkritisch sein sollte – aber auch nicht völlig vernachlässigt werden darf. Bei den Verzerrungswerten lässt es sich darüber streiten, ob die Werte von Endstufen mit 0,1% und weniger in Relation zum Lautsprecher noch relevant sind. Grundsätzlich gilt jedoch auch hier, besser weniger als mehrn. Keiner Diskussion bedürfen dagegen die Leistungswerte. Soll ein Signal verzerrungsfrei – und das auch in den Peaks – übertragen werden, dann zählen Spannung und Strom am Ausgang. Letzterer umso mehr, je niederohmiger die Lautsprecher sind. Im Folgenden werden immer nur die Messwerte der T602 gezeigt und besprochen, da diese mit denen der T604 weitgehend identisch sind. Eine Ausnahme sind die Leistungswerte, die für beide Endstufen aufgeführt sind.

muss, wo dann auch schon mal hart begrenzt wird. Eine erste typische Messung dazu zeigt Abb. 7 für beide Kanäle der T602 als THD-Kurven in Abhängigkeit vom Eingangspegel gemessen mit Lasten von 2, 4 und 8 Ω. Die Kurven fallen bis auf sehr gute −90 dB (=0,003%) und weisen zudem auch nur eine ganz geringe Lastabhängigkeit auf. Die Leistungsgrenze der Endstufe wird je nach Last für Eingangspegel zwischen +2 und +10 dBu erreicht. Die Limitierung von Strom und/oder Spannung erfolgt dabei immer so, dass die Verzerrungen nicht merklich über −70 dB ansteigen. Aus dieser Art der Darstellung geht jedoch nicht direkt hervor, welche Ausgangsspannung die Endstufe dabei liefert. Dafür gibt es die Kurven aus Abb. 8, die auf der gleichen Messung basieren, jetzt aber die Verzerrungen über der Ausgangsspannung (x-Achse) zeigen. Daraus lässt sich ablesen, dass an 8 Ω eine maximale Ausgangsspannung von ca. 100 V_{rms} erreicht wird, an 4 Ω von ca. 70 V_{rms} und an 2 Ω von ca. 50 V_{rms}. Die Werte sind in ungefähr mit denen vergleichbar, die bei der Leistungsmessung für ein Sinussignal mit 1 s Dauer ermittelt wurden. Die teilweise Doppeldeutigkeit der Kurven entsteht durch den Einsatz der Limiter, die bei länger anhaltenden zu hohen Strömen oder Spannungen noch weiter zurückregeln.

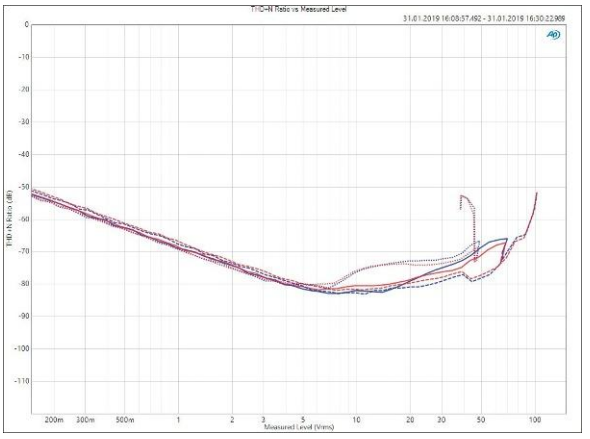
Speziell bei Class-D-Endstufen ist die Frage relevant, wie sich die THD-Kurven in Abhängigkeit von der Frequenz entwickeln. Abb. 9 zeigt dazu eine zu Abb. 7 vergleichbare Messung an 4-Ω-Lasten gemessen bei 100 Hz, bei 1 kHz und bei 6,3 kHz. Für die T602 ist zu erkennen, dass die Verzerrungen mit zunehmender Frequenz zwar ansteigen, signifikante Unterscheide sich aber erst im Bereich der Clipgrenze ergeben, wo sich die 6,3-kHz-Kurven dann etwas abheben.

Wie sich die harmonischen Verzerrungen zusammensetzen, erkennt man im Klirrspektrum aus Abb. 10. Die Messung an der T602 erfolgte mit einer 2 × 4-Ω-Last bei 500 W pro Kanal. Es gibt zwar relativ viele Oberwellen höherer Ordnung, diese bleiben aber alle unterhalb der −80 dB Linie, d. h. unter 0,01%. Ein solches Spektrum für eine PA-Endstufe hält auch einer kritischen Betrachtung stand.

Weitere THD-Kurven aus Abb. 11 wurden bei konstantem Pegel in Abhängigkeit von der Frequenz gemessen. Die insgesamt sechs Kurven zeigen wiederum die beiden Kanäle an 2-Ω-, 4-Ω- und an 8-Ω-Lasten. Bei 1 kHz finden sich die bekannten Werte aus Abb. 7 wieder. Zu tieferen Frequenzen hin fallen die Verzerrungswerte, zu höheren Frequenzen steigen sie gleichmäßig an.

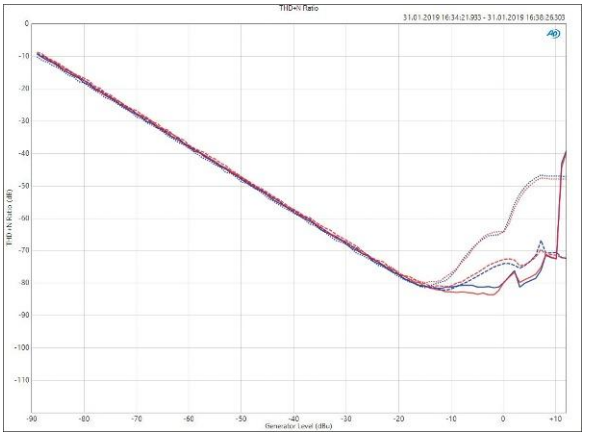


Klirrfaktor (THD) *der T602 bei 1 kHz (CH1 rot, CH2 blau) in Abhängigkeit vom Eingangspegel auf der x-Achse an 2 Ω (gepunktet), 4 Ω (durchgezogen) und 8 Ω (gestrichelt) Last (Abb. 7)*

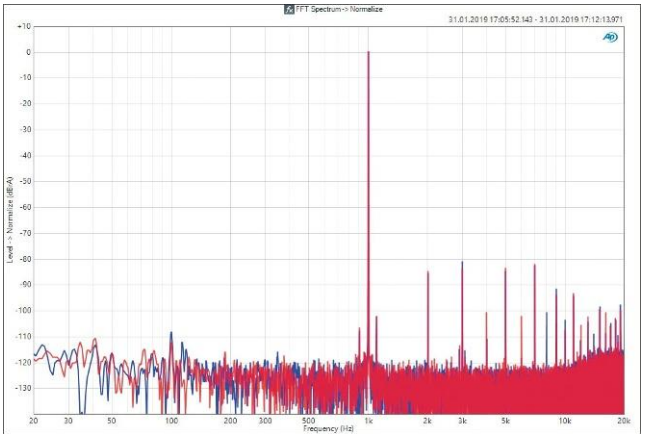


Klirrfaktor (THD) *der 4804 bei 1 kHz (CH1 rot, CH2 blau) in Abhängigkeit von der Ausgangsspannung auf der x-Achse mit Belastungen von 2 Ω (gepunktet), 4 Ω (durchgezogen) und 8 Ω (gestrichelt). Beim Einsatz der Limiter bricht die Kurve ab oder wird rückläufig (Abb. 8)*

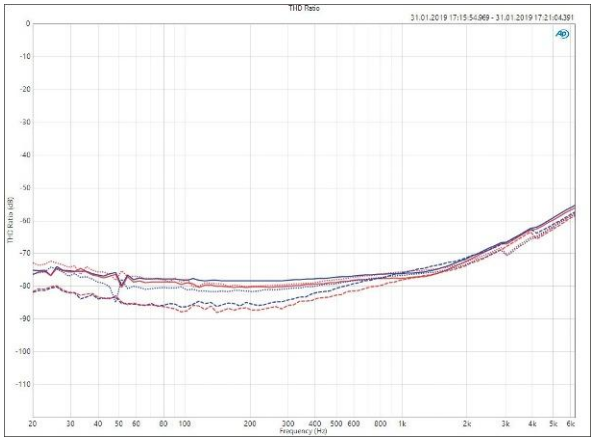
Als abschließende Verzerrungsmessung folgt noch die DIM-Messung (Dynamic Intermodulation Distortion) (Abb. 12), bei der ein 15 kHz Sinus mit einem steilflankigen Rechteck von 3,15 kHz überlagert wird. Ausgewertet werden die dabei entstehenden Intermodulationsprodukte. Diese Messung fördert vor allem Schwächen bei schnellen transienten Signalen zu Tage. Die steilen Flanken der Rechteckanteils fordern die Endstufe deutlich mehr als ein eingeschwungener Sinus bei der THD-Messung. Der DIM-Messung wird daher auch eine relativ große Bedeutung im Zusammenhang mit den klanglichen Qualitäten einer Endstufe zugeschrieben. Sobald hohe Ströme gefordert werden, steigen die transienten Verzerrungen häufig an. Im direkten Vergleich liegen hier herkömmliche Class-AB- oder Class-H-Endstufen meist noch vorne gegenüber den Class-D-Modellen. Sieht man sich dazu die DIM-Messungen der T602 an und vergleicht diese mit einer guten Class-AB-Endstufe, dann fallen die Werte für eine 8-Ω-Last ca. 10 dB schlechter aus, an 4 Ω oder gar 2 Ω liegt die T602 dann jedoch gleichauf oder liefert teilweise sogar bessere Werte.



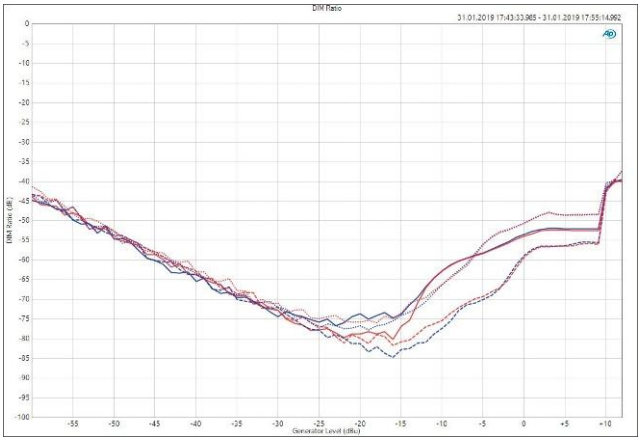
Klirrfaktor (THD) *der T602 bei 100 Hz (durchgezogen), 1 kHz (gestrichelt) und 6,3 kHz (gepunktet) (CH1, CH2) in Abhängigkeit vom Eingangspegel auf der x-Achse an 4-Ω-Last (Abb. 9)*



Klirrspektrum (THD+N) *der T602 bei 1 kHz (CH1,CH2) mit einer Leistung von 2 × 500 W an einer 4-Ω-Last (Abb. 10)*



Klirrfaktor (THD) *der T602 (CH1, CH2) in Abhängigkeit von der Frequenz bei einer Leistung von 2 × 250 W an 2 Ω (gepunktet), 2 × 250 W an 4 Ω (durchgezogen) und 2 × 250 W an 8 Ω (gestrichelt) Last (Abb. 11)*



Intermodulationsverzerrungen DIM100 *der T602 (CH1, CH2) in Abhängigkeit vom Eingangspegel auf der x-Achse an 2 Ω (gepunktet), 4 Ω (durchgezogen) und 8 Ω (gestrichelt) Last (Abb. 12)*

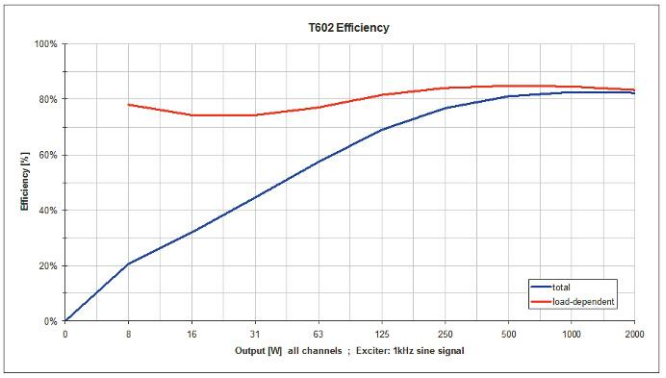
Netzlast und Smart Rail Management

Die Netzbelastung ist bei Endstufen hoher Leistung ein wichtiges Thema. Wichtige Aspekte sind dabei der Wirkungsgrad, die Netzbelastung (Stichwort Leistungsfaktor) und vor allem bei Dauerbetrieb auch die Ruheleistungsaufnahme.

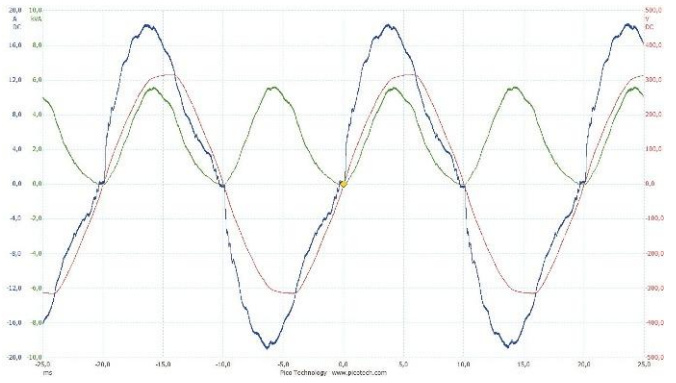
Abb.13 zeigt dazu mit zwei Kurven den Wirkungsgrad der Endstufe. Die blaue Kurve setzt die Ausgangsleistung in Relation zur insgesamt aus dem Stromnetz aufgenommen Wirkleistung. Zusammen mit der Grundlast ergeben sich daher bei kleinen Ausgangsleistungen für den Wirkungsgrad eher geringe Werte. Für die rote Kurve wird daher die Ausgangsleistung nur zu der zusätzlich zur Grundlast aufgenommenen Leistung in Relation gesetzt. Daraus ergibt sich für die T602 ein sehr guter Wirkungsgrad von 75 bis 85%. Hinzu kommt dann noch die Grundlast, die je nach Vorgeschichte zwischen 32 und 95 W liegen kann. Das Smart Rails Management (SMR) von Powersoft sorgt dafür, dass die Netzteilspannung für die Endstufen nicht immer konstant hoch ist, sondern ganz nach Bedarf angepasst wird. Liegt kein oder nur wenig Signal an, dann liefert das Netzteil eine geringe Spannung. Kommt entsprechender Bedarf auf, der durch ein kurzes Delay in der Signalkette frühzeitig erkannt wird, dann wird die Netzteilspannung sehr schnell hochgefahren. Der Regelbereich erstreckt sich von ca. 60 V bis 145 V. Besteht der Bedarf nicht mehr, dann bleibt die Spannung eine relativ lange Zeit (hold time) von ca. 10 Minuten noch auf dem hohen Niveau, um dann mit einer Release Zeitkonstanten von 8 V/s wieder zurückgefahren zu werden. Die Verlustleistung betreffend gibt es daher vor allem dann Vorteile, wenn keine oder nur wenig Ausgangsspannung benötigt wird. Als weiterer Vorteil reduziert sich auch der Störpegel am Ausgang um ca. 2 dB, wenn kein Signal anliegt. Die Messungen aus Abb. 13 erfolgten von den niedrigen zu den hohen Leistungswerten hin, so dass bei kleinen Leistungen nur eine geringere Ruheleistung mit in die Berechnung einging.

Der aus dem Stromnetz aufgenommene Strom sollte in seinem Verlauf möglichst der Spannung folgen und die Endstufe sich somit vergleichbar einem reellen Widerstand als Last für das Stromnetz verhalten. Abweichungen entstehen durch Verschiebungsblindströme (kapazitiv oder induktiv) und durch Verzerrungsblindströme (Oberwellenanteil). Wie gut sich der Stromverlauf dem Spannungsverlauf annähert, wird durch den Leistungsfaktor (PF = Powerfactor) messtechnisch ausgedrückt. Abb. 14 zeigt dazu die Messung der T602 bei Volllast. Bis auf einen leichten Versatz und ein wenig Verzerrung der Kurvenform folgt der Stromverlauf (blau) dem Spannungsverlauf (rot) sehr gut. Die Powerfactor beträgt 0,95. Erreicht wird ein solcher Wert durch eine aktive PFC (Power Factor Correction).

Auf den ersten Blick auffällig sind bei den Werten für die Leistungsaufnahme aus dem Stromnetz die Angaben bei Vollauslastung der Endstufe mit einem Signal von 12 dB Crestfaktor an 4-Ω-Lasten auf allen Kanälen. Der Wert für die T604 beträgt das Doppelte der T602. Die Begründung liegt darin,



Wirkungsgrad *der T602 in % in Abhängigkeit von der abgegebenen Leistung (x-Achse). In rot die Kurve ohne Grundlast die einen sehr guten Wirkungsgrad der Endstufen von ca. 80% erkennen lässt (Abb. 13)*



Verlauf *von Netzspannung (rot), Netzstrom (blau) und der daraus berechneten Leistungsaufnahme (grün) mit einem RMS-Wert von 2710 VA. Dank der aktiven PFC nähert sich der Stromverlauf der Spannung gut an. Der gemessen Powerfactor liegt hier bei 0,95 (Abb. 14)*

dass eine Begrenzung hier nur durch die maximale Ausgangsspannung der Endstufen erfolgt, die bei beiden Modellen gleich hoch ist. Strom und Leistungswerte stoßen bei diesem Signal bei keinem Modell an ihre Grenzen. Entsprechend nimmt dann die T604 mit vier Endstufen die doppelte Leistung einer T602 mit zwei Endstufenkanälen auf. Anders verhält es sich bei dauerhaft voller Auslastung mit einem Sinussignal, wo die T604 die einzelnen Endstufen auf 380 W limitiert und die T602 1037 W pro Kanal zulässt. Entsprechend ist dann die Leistungsaufnahme der T602 mit 2560 W aus dem Stromnetz auch höher als die 1950 W der T604.

Fazit

Mit der T-Serie füllt Powersoft eine kleine Lücke im Programm, die sich zwischen den großen Modellen der X-Serie und den schon etwas älteren Modellen der K-Serie für den Touring-Markt ergeben hat. Nicht jeder benötigt die hohen Leistungswerte der X-Serie, trotzdem möchte man aber gerne die Annehmlichkeiten des modernen DSP-Systems, der Dante-Schnittstellen und des integrierten Netzwerk-Switches haben. Unterschiede in der Ausstattung gibt es in der T-Serie nicht. Alle Endstufen verfügen über das integrierte DSP-System, ein Dante-Interface und Eingänge im AES3-Format.

In der T-Serie gibt es die beiden Leistungsklassen mit 3 kW oder 6 kW Gesamtleistung verteilt je nach Modell auf zwei oder vier Kanäle. Dank der einheitlichen und teilweise auch serienübergreifenden Plattformstruktur der Powersoft-Endstufen kommt die T-Serie mit erfreulichen Preisen daher, womit die Endstufen auch für kleinere Verleiher, Bands oder DJs als solide und professionelle Lösung interessant sind.

Technisch spielen die Powersoft Amps heute auf einem sehr hohen Niveau, das keinen Zweifel an der Class-D-Technik mehr aufkommen lässt. Als herausragend in seinen Möglichkeiten stellt sich auch das DSP-System der T-Serie dar. Der Funktionsumfang ist in allen Disziplinen riesig. Raised-Cosine-Filter und Custom-FIR-Filter mit bis zu 2048 Taps pro Kanal sind hier nur einige der Highlights, die jeden Lautsprecherentwickler begeistern dürften. Die schon 2018 vorgestellte System Manager Software Armonía Plus, die für alle Powersoft-Endstufenserien eingesetzt werden kann, vereinfacht zudem die Bedienung der Endstufen vor Ort im Live-Einsatz.

Übersicht: Powersoft T602

Leistung 4 Ω/2 Ch	Sinus 60 s	12 dB CF 360 s	Peak 1 ms
in W pro Ch	1037	2634	2634

Noise	dBu	dBu(A)
analog (dig) input	–67 (–69)	–70 (–72)
Dynamik	**dB**	**dB(A)**
	109 (111)	112 (114)

f[Hz]	20	1 k	20 k
Gain dB	32,1	32,1	31,7
Phase °	+4°	0°	–98°
HP-Filter		<5 Hz	
TP-Filter		22,8 kHz	

f[Hz]	100	1 k	10 k
CTC dB	85	75	57
CMRR dB	71	71	69
DF rel. 4 Ω	110	83	18

THD(f) @ 25% Power	–78	–77	–55
	Min.	vor Clip	
THD 1 kHz dB	–88	–70	
DIM100 dB	–75	–53	

Leistungsaufnahme	PFC
Standby	15 W
No signal	32–95 W
Full power 12 dB	870 W @ 2 × 4 Ω bei 12dB CF
Full power Sinus	2560 W @ 2 × 4 Ω 1 kHz Sinus

Gewicht in kg	7,5 kg
Bauhöhe HE	1

S.Nr.	00477726
Netzteil	HF-Schaltnetzteil 100–240 V mit aktiver PFC und SRM
Schaltung	Class-D
DSP System	Powersoft Armonía DSP
PC Software	Armonía Plus System Manager

Übersicht: Powersoft T604

Leistung 4 Ω/2 Ch	Sinus 60 s	12 dB CF 360 s	Peak 1 ms
in W pro Ch	380	1329	2580

Noise	dBu	dBu(A)
analog (dig) input	-67 (-69)	-70 (-72)
Dynamik	**dB**	**dB(A)**
	109 (111)	112 (114)

f[Hz]	20	1 k	20 k
Gain dB	32,0	32,0	30,2
Phase °	+4°	0°	-98°
HP-Filter		<5 Hz	
TP-Filter		22,8 kHz	

f[Hz]	100	1 k	10 k
CTC dB	80	72	55
CMRR dB	73	73	72
DF rel. 4 Ω	108	66	10

THD(f) @ 25% Power	-80	-77	-53
	Min.	vor Clip	
THD 1 kHz dB	-80	-70	
DIM100 dB	-75	-50	

Leistungsaufnahme	PFC
Standby	15 W
No signal	32-95 W
Full power 12 dB	1770 W @ 4 × 4 Ω bei 12dB CF
Full power Sinus	1950 W @ 4 × 4 Ω 1 kHz Sinus

Gewicht in kg	7,5 kg
Bauhöhe HE	1

S.Nr.	00479001
Netzteil	HF-Schaltnetzteil 100-240 V mit aktiver PFC und SRM
Schaltung	Class-D
DSP System	Powersoft Armonía DSP
PC Software	Armonía Plus System Manager

Endstufenleistung zählt – aber welche?

Leistungswerte einer Endstufe sind ein viel diskutiertes Thema: Wie und unter welchen Bedingungen wird gemessen, wie sind die Werte zu interpretieren und was bedeuten sie für die Praxis? Nehmen wir als Beispiel die Powersoft T602, dann findet sich in den Datenblättern ein Wert von 2 × 2500 W an 4 Ω. Bei Powersoft testet man nach EIAJ mit 8 ms langen Burst alle 40 ms. Der Wert wurde mit 2634 W an 4 Ω in unserem Labor sogar noch ein wenig übertroffen. Misst man jedoch mit einem konstant anliegenden Sinussignal, dann werden nach wenigen Sekunden nur noch kappe 1037 W an 4 Ω pro Kanal erreicht. Beide Werte sind richtig – es liegt aber ein Faktor 2,5 dazwischen. Die erste Quintessenz daraus ist, dass Leistungsangaben nur dann sinnvoll verglichen werden können, wenn unter identischen Bedingungen gemessen wurde. Für die Praxis sind drei weitere Aspekte wichtig:

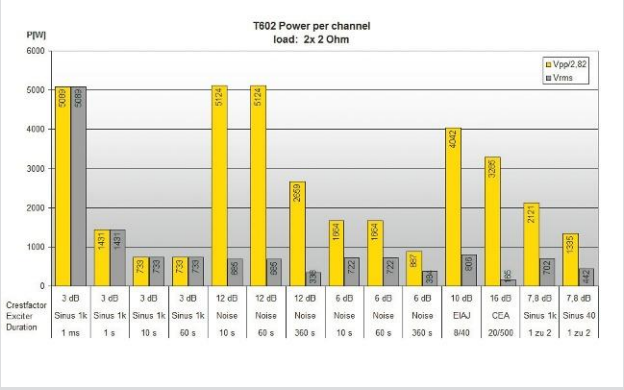
- Welche kurzzeitige Impulsleistung kann eine Endstufe liefern? Dieser Wert ist für die meisten Anwendungsfälle der mit der größten Aussagekraft.
- Welche Leistung kann eine Endstufe mit einem Sinussignal liefern? Dieser Wert sagt aus, wie stabil das Netzteil einer Endstufe ist und wie gut z. B. lang anhaltende Basssignale ohne Kompression wiedergegeben werden können. Einige Normen, z. B. für Sprachalarmanlagen, verlangen auch einen 60-Sekunden-Dauertest mit einem Sinussignal.
- Wie verhält sich die Endstufe bei dauerhaft hoher Belastung thermisch? Wird ein thermisch stabiler Zustand erreicht, oder muss die Leistung nach einiger Zeit reduziert werden oder schaltet sich die Endstufe sogar komplett ab?

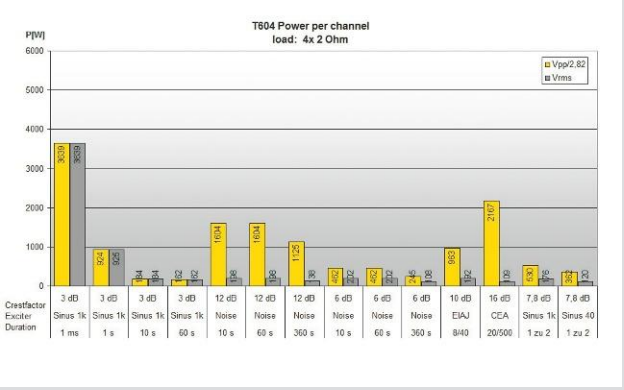
Unsere Labormessungen decken alle Varianten der Belastung einer Endstufe ab. Um vergleichbar mit den Herstellerdaten zu sein, führen wir eine Reihe verschiedener Messungen nach unterschiedlichen Normen für alle möglichen Lastfälle von 2 Ω (falls zulässig) bis 8 Ω durch. Im Detail werden folgende Werte bestimmt:

- Impulsleistung für eine 1 ms dauernde einzelne Periode eines Sinussignals von 1 kHz
- Sinusleistung bei einem konstant anliegenden Sinussignal von 1 kHz nach einer Sekunde, nach zehn Sekunden und nach einer Minute
- Leistung bei einem konstant anliegenden Rauschen mit 12 dB Crestfaktor nach 10 s, nach einer Minute und nach sechs Minuten
- Leistung bei einem konstant anliegenden Rauschen mit 6 dB Crestfaktor nach 10 s, nach einer Minute und nach sechs Minuten
- Leistung nach EIAJ gemessen mit einem gepulsten Sinussignal (1 kHz) von 8 ms Dauer alle 40 ms, das Signal hat einen Crestfaktor von 10 dB
- Leistung nach CEA 2006 mit einem Sinussignal (1 kHz), dessen Pegel alle 500 ms für 20 ms einen Pegelsprung von +20 dB erfährt. Das Signal hat einen Crestfaktor von 16 dB
- Leistung für einen sich periodisch wiederholenden 1-kHz-Burst einer Länge von 33 ms gefolgt von einer Ruhephase mit 66 ms, der Crestfaktor dieses Signals beträgt 7,8 dB
- Leistung für einen sich periodisch wiederholenden 40-Hz-Burst einer Länge von 825 ms gefolgt von einer Ruhephase 1650 ms, der Crestfaktor dieses Signals beträgt ebenfalls 7,8 dB

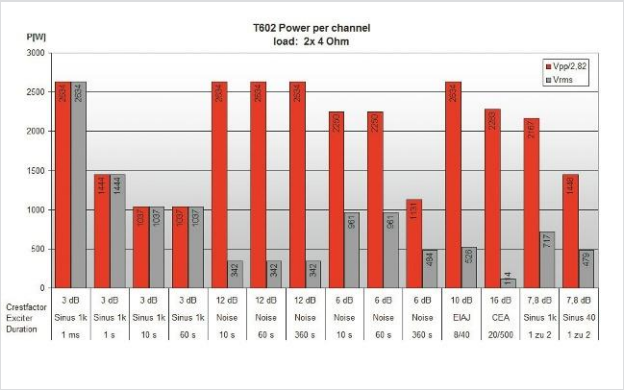
Für die sinusförmigen Messsignale fällt die Auswertung relativ leicht: Man erfasst den Effektivwert und berechnet daraus die Leistung. Die Sinuswelle sollte dabei noch nicht sichtbar verzerrt sein. Für die Sinusburst-Signale nach EIAJ oder CEA lassen sich zwei Werte bestimmen. Zum einen der kurzzeitige Effektivwert während der Dauer des Bursts und der Effektivwert über alles inklusive der Signalpausen. Das Verhältnis der beiden Werte beträgt für das EIAJ-Signal 7 dB und für das CEA-Signal 13 dB. Der Crestfaktor, der das Verhältnis des Spitzenwertes im Burst zum Effektivwert über alles beschreibt, ist jeweils 3 dB größer und beträgt somit 10 dB bzw. 16 dB. Für die Burst-Messmethoden wird in der Übersicht jeweils der Leistungswert, berechnet aus dem kurzzeitigen Effektivwert des Bursts, und der Über-alles-Effektivwert angegeben. Eine weitere Burst-Messmethode arbeitet mit 33 ms langen 1-kHz-Bursts gefolgt von 66 ms langen Ruhephasen. Hier beträgt der Crestfaktor 7,8 dB. Angelehnt an diese Messung wurde speziell im Hinblick auf die Fähigkeiten einer Endstufe bei der Basswiedergabe, wo Töne häufig länger anstehen, der Burst in der Frequenz um den Faktor 25 auf 40 Hz reduziert und die Zeitspannen entsprechend um den Faktor 25 verlängert.

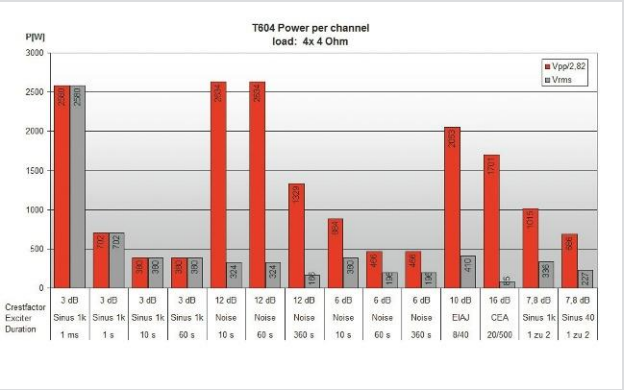
Welche Burst-Messungen nun besser oder aussagekräftiger ist, lässt sich so pauschal nicht sagen. Wichtig ist es jedoch, bei einem Vergleich nur die Messungen nebeneinander zu stellen, die auf der gleichen Messmethode basieren.



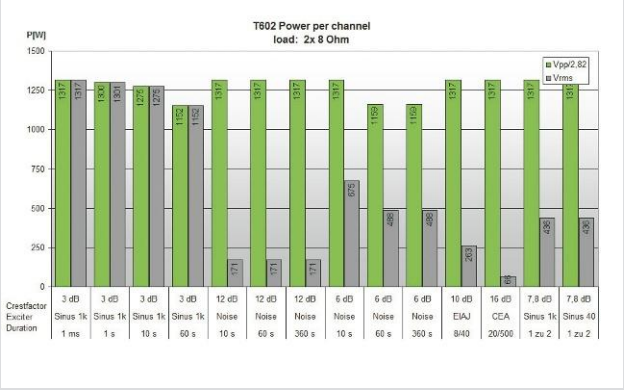


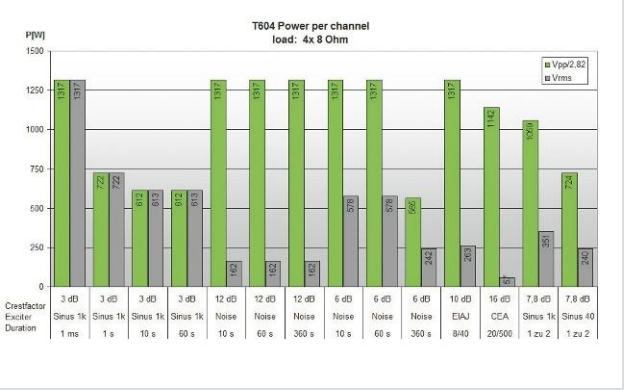
Leistungswerte pro Kanal an 2 Ω *der T602 (links) und T604 (rechts) bei gleichzeitiger Belastung aller Kanäle (Abb. 15)*





Leistungswerte pro Kanal an 4 Ω *der T602 (links) und T604 (rechts) bei gleichzeitiger Belastung aller Kanäle, die 602 soll mit der finalen Firmware 101 V_{rms} / >2500 W liefern (Abb. 16)*





Leistungswerte pro Kanal an 8 Ω *der T602 (links) und T604 (rechts) bei gleichzeitiger Belastung aller Kanäle, die 604 soll mit der finalen Firmware 101 V_{rms} / >1250 W liefern (Abb. 17)*

Etwas anders gestaltet sich die Messung mit den Noise-Signalen mit 12 oder 6 dB Crestfaktor. Der Verstärker wird mit diesen Signalen bis an seine Clip-Grenze ausgesteuert und dann dauerhaft belastet. Gemessen werden nach zehn Sekunden, nach einer Minute und nach sechs Minuten jeweils der Wert Spitze-Spitze (V_{pp}) und der Effektivwert (V_{rms})

Endstufenleistung zählt – aber welche?

des Signals. Daraus werden vergleichbar zur Burst-Messung je ein Leistungswert aus dem Effektivwert der Spannung und einer aus dem Wert Spitze-Spitze durch 2,82 berechnet. Die Werte sind so mit den Werten der Burst-Messungen vergleichbar.

Nimmt man als wichtigste Werte die Impulsleistung, den Wert für ein Signal mit 12 dB Crestfaktor und die Sinusleistung jeweils für eine Belastung mit 2 x 4 Ω, dann ergibt der direkte Vergleich der Modelle T602 und T604 die Leistungswerte aus Tabelle 2. An 4 Ω ist die 1-ms-Burstleistung bei beiden Modellen vergleichbar, da hier die Begrenzung durch die maximale Ausgangsspannung erfolgt. Größere Unterschiede gibt es erst an einer 2-Ω-Last, wo die T602 dann dank ihrer höheren Stromlieferfähigkeit weit vorne liegt. Grundsätzlich ist jedoch ein 2-Ω-Betrieb, unabhängig von der Endstufe, nicht unbedingt zu empfehlen, da es zu hohen Leitungsverlusten und extremen Belastungen der Endstufen kommt. Soll mit der T-Serie trotzdem mal ein 2-Ω-Betrieb realisierst werden, dann sollte es möglichst die T602 sein, die hier auch dauerhaft noch relevante Leistungswerte liefern kann (siehe Abb. 15). Gleiches gilt bei Dauerbetrieb im Grenzlastbereich an 4 Ω, z. B. zum Antrieb von Subwoofern, wo auch die T602 die erste Wahl ist. Die T604 kann dagegen mit ihren vier Kanälen für Mehrwege-Systeme punkten, wo in der Summe keine so hohe Leistung verlangt wird und auch Wege mit 8 Ω oder 16 Ω mit im Spiel sind, womit es dann zu einer günstigen Lastverteilung innerhalb der Endstufe kommt.

Leistung gemessen an 2 (4) × 4 Ω in W pro Kanal	Sinus 60 s	12 dB CF 60 s	Peak 1 ms	Wert im Datenblatt
T602	1037	2634	2634	2500
T604	380	1329	2580	1500

Leistungswerte *der T602 und T604 mit verschiedenen Messmethoden an einer 4-Ω-Last bei gleichzeitiger Messung aller Kanäle (Tab. 2)*

Steckerbeschaltung *je nach Modell als vier einzelne Kanäle oder zwei Kanäle plus Link*

Was bringt ein FIR mit 2048 Taps?!

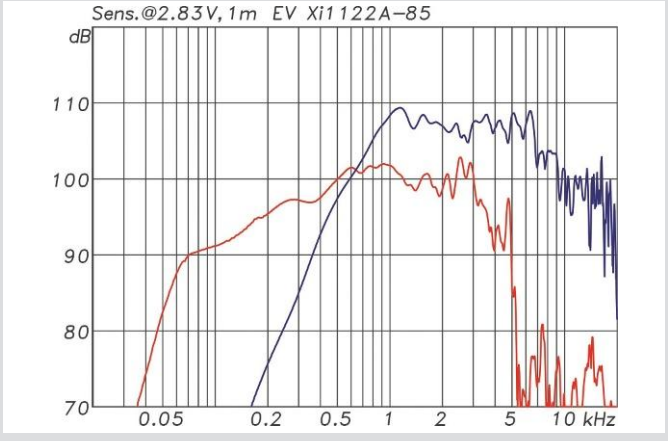
Was können lange FIR-Filter mehr? Und steigt dann die Latenz?

Die Möglichkeit, bei den Endstufen der Powersoft-T-Serie FIR-Filter mit bis zu 2048 Taps pro Kanal zu nutzen, klingt verlockend. Was aber lässt sich damit erreichen? 2048 Taps bedeutet zusammen mit einer Abtastrate von 48 kHz zunächst einmal eine maximale Länge der Filterimpulsantwort von 42,66 ms. Es bedeutet jedoch *nicht*, dass zwangsläufig auch eine Latenz von 21,33 ms damit einhergeht. Die Regel, dass ein FIR-Filter die Hälfte seiner Filterlänge als Latenz verursacht, trifft nur dann zu, wenn es sich um linearphasige Filter handelt, deren Impulsmaximum in der Mitte der Filterimpulsantwort steht. Für alle anderen FIR-Filter-Varianten gilt, dass die Filterlatenz von der Filterfunktion abhängt. Sie kann im Extremfall zwischen 0 und der maximalen Länge der Filterimpulsantwort liegen.

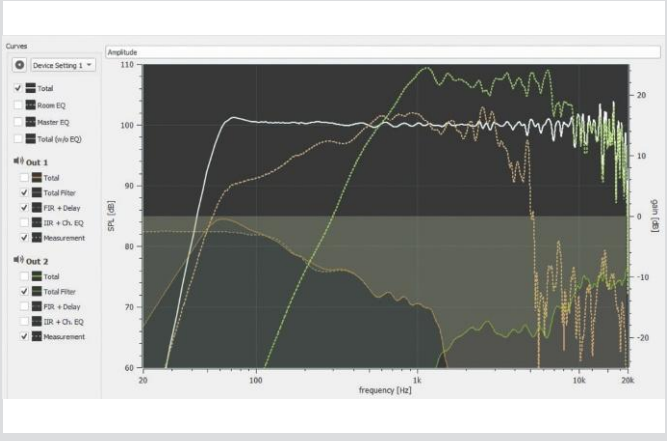
Für FIR-Filter gibt es zusammen mit Lautsprechern zwei typische Anwendungen: Zum einen linearphasige Hoch- und Tiefpassfilter für Frequenzweichenfunktionen ohne Phasendrehung. Diese Funktion ist im Powersoft-DSP bereits bei den Hoch- und Tiefpassfunktionen integriert, allerdings mit der Limitierung einer maximalen Filterlänge von 128 Taps, womit Hoch- und Tiefpässe mit einer Eckfrequenz bis zu 400 Hz hinab möglich sind. Tiefere Eckfrequenzen sind mit diesen relativ kurzen Filtern nicht möglich. Die Begründung dafür findet sich im vorab gesagten bei der Filterlatenz, da es sich um linearphasige Filter handelt. Bei einer Filterlänge von 128 Taps beträgt die Latenz 1,33 ms.

Die zweite und wesentlich effektivere Anwendung für FIR-Filter ist eine Kombination aus Lautsprecherentzerrung zusammen mit einer Frequenzweichenfunktion: Das Filter equalisiert den Lautsprecher so, dass der Summenfrequenzgang aus Lautsprecher und Filter einer gewünschten Bandpassfunktion entspricht. Die Basis für die Berechnung eines solchen Filters ist zunächst die Messung der einzelnen Wege eines Lautsprechers. Wichtig ist, dabei auf echte Freifeldbedingungen zu achten, sodass die Messung völlig frei von Reflexionen ist und alle Wege mit der gleichen Position für Lautsprecher und Mikrofon zu messen, um exakte Laufzeit und Phasenbezüge der Wege zueinander zu haben. Was so vielleicht etwas zu theoretisch klingt, ist an einem einfachen Bespiel gut zu erklären.

Wir betrachten dazu eine 12/2-PA-Box für den voll aktiven Betrieb. Abb. 18 zeigt dazu die Frequenzgangmessungen von Hoch- und Tieftöner. Die Messungen erfolgten in 4 m Abstand auf der Mittelachse zwischen Hoch- und Tieftöner im reflexionsarmen Raum. Unterhalb von 100 Hz wurde für



Ausgangsdaten *für die Berechnung von FIR-Filtern mit Lautsprecherentzerrungen sind die Freifeld-Frequenzgangmessungen der Lautsprecher. Als Beispiel eine 2-Wege-Box mit den Frequenzgängen von Tieftöner (rot) und Hochtöner (blau, Abb. 18)*

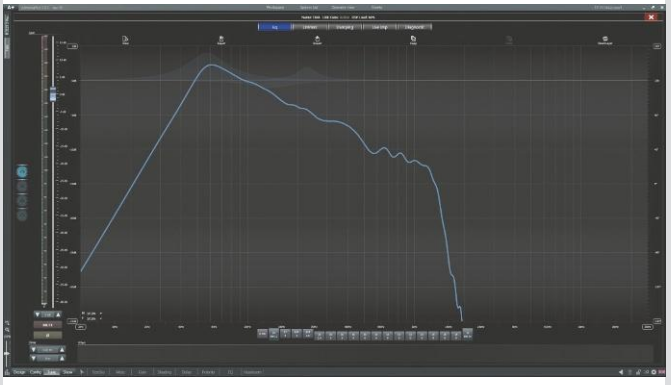


Das System Designer FIR-Filter Tool *importiert die Messdaten und berechnet dann nach den Vorgaben des Anwenders die Filter. Die weiße Kurve zeigt das Resultat. Neben den FIR-Filtern können auch noch unterstützende IIR-Filter einbezogen werden (Abb. 19)*

den Tieftöner eine Nahfeldmessung ergänzt. Die Trennung der beiden Wege soll bei 1300 Hz erfolgen.

Berechnet haben wir die Filter nun mit dem Four Audio System Designer als externem Filter Tool (da die Powersoft-Armonía-Software aktuell noch kein eigenes Tool zur Berechnung der Custom-FIR-Filter besitzt). Die einzige Voraussetzungen für den Import der Filter in die Armonía-Software als CSV-Datei sind eine maximale Länge von 2048 Taps und 48 kHz Samplerate. Das Filter-Gain wird nach dem Import in der Armonía-Software angezeigt und kann dann bei Bedarf noch korrigiert werden.

Das Filter-Tool erfordert neben der Trennfrequenz noch die Charakteristik der Trennung und die Steilheit der Hoch- und Tiefpässe für die Zielfunktionen. Die Einstellung erfolgte hier auf 1300 Hz mit Linkwitz-Riley-Charakteristik und 48 dB/Oct Steilheit. Für den Hochtöner wurde am oberen Ende des Übertragungsbereiches ergänzend noch ein Tiefpass bei 18 kHz gesetzt. Damit sind für beide Wege die Zielfunktionen definiert. Die Filterberechnung erfolgt danach mit dem Ziel, dass Hoch- und Tieftöner zusammen mit dem jeweiligen FIR-Filter ihren definierten Zielfunktionen möglichst nahe kommen. Dem sind jedoch durch die Filterlänge und Auflösung gewisse Grenzen gesetzt, die sich vor allem bei tiefen Frequenzen bemerkbar machen. Als weitere wichtige Einstellung kann der Anwender genau vorgeben, welche Latenz das FIR-Filter haben soll. Abhängig von diesem Wert versucht der Algorithmus zur Berechnung der FIR-Filter dann, den damit maximal möglichen linearphasigen Verlauf zu erreichen. Man kann damit zwischen der Grenzfrequenz, unterhalb der das Gesamtsystem aus Filter und Lautsprecher nicht mehr perfekt linearphasig ist, und der Latenz des Filters abwägen. Ist die Anwendung kritisch, z. B. bei einem Bühnenmonitor, dann würde man eine kurze Latenz von vielleicht 3 ms vorgeben. Ist der Wert, z. B. für eine große PA, eher unkritisch, dann würde man eventuell auch Latenzen von 10 ms oder mehr zulassen, wobei selbst 10 ms ja auch nur der Laufzeit für eine Distanz von 3,4 Meter entsprechen. Im hier gezeigten Beispiel wurde ein mittlerer Wert von 6 ms Latenz eingestellt entsprechend der Laufzeit für eine Distanz von 2 m. Das Programm berechnet darauf basierend die FIR-Filter für beide Wege. Abb. 19 zeigt im Filter-Tool die geladenen Messungen, die berechneten Filter und das Gesamtergebnis. Da das FIR-Filter für den Tieftöner noch keine Hochpassfunktion zum Schutz des Treibers im Bassreflexgehäuse enthält und auch noch einige kleine Korrekturen wünschenswert wären, können noch unterstützende IIR-Filter gesetzt werden. Den Unterschied zeigen die beiden Filterkurven in Abb. 19, für den Tieftöner gestrichelt nur für das FIR-Filter und durchgezogen mit zusätzlichen IIR-Filtern. Mit Aus-



FIR-Filter im CSV-Format *importiert die Armonía-Software mit 48 kHz Abtastrate und einer Länge bis zu 2048 Taps. Die Grafik zeigt das FIR-Filter für den Tieftöner zusammen mit einem Hochpass und drei Bell-Filtern, die als IIR-Filter umgesetzt werden (Abb. 20)*

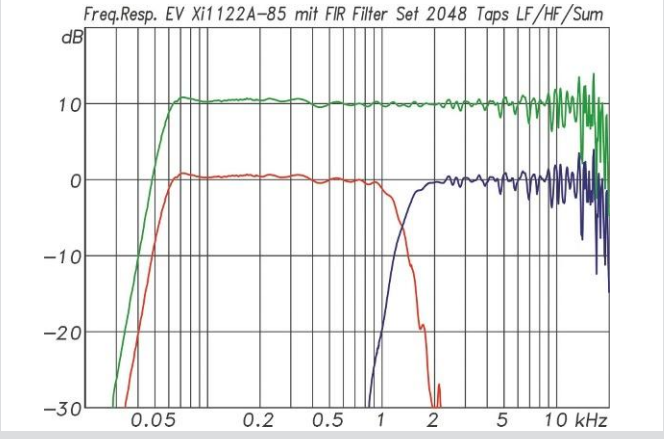
FIR-Filter *für den Hochtonweg (Abb. 21)*

Was bringt ein FIR mit 2048 Taps?!

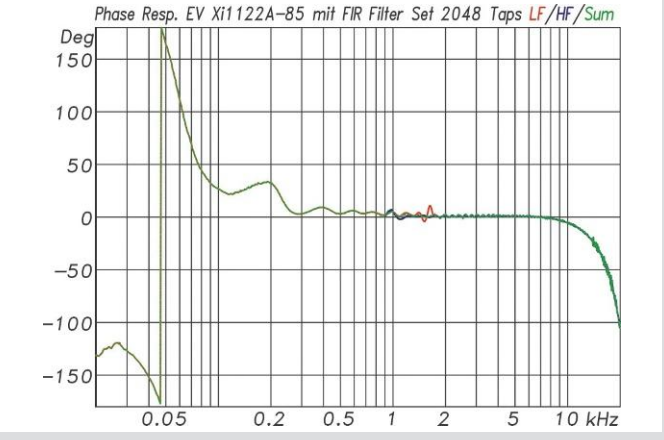
nahme des Hochpassfilters bei 50 Hz sind die Verbesserungen durch die drei zusätzlichen IIR-Bell-Filter eher kosmetischer Art, aber doch schön anzusehen.

Sobald die Berechnungen und Einstellungen für die Filter abgeschlossen sind, können FIR- und IIR-Filter in die Armonía-Software übertragen werden. Abb. 20 und 21 zeigen die finalen Filterkurven für den Tieftöner (blau) und für den Hochtöner (rot). Die anschließende Messung an der Endstufe (Abb. 22) bestätigt die korrekte Umsetzung der Filter. Filter und Lautsprecher zusammen liefern dann ein Ergebnis, wie es in Abb. 23 für die einzelnen Wege und deren Summenfunktion dargestellt ist. Die Amplitudenverläufe können bereits überzeugen, so dass nur noch die Frage nach dem Phasenverlauf des Gesamtsystems bleibt. Den Phasengang der Summenfunktion aus Hoch- und Tieftöner liefert dann abschließend noch Abb. 24. Der linearphasige Verlauf gelingt ab ca. 100 Hz aufwärts. Die kleine Welle im Phasengang bei 200 Hz ist der kurzen Latenz und den zusätzlichen IIR-Filtern geschuldet. Die oberhalb von 10 kHz zu erkennende Phasendrehung wird durch die Endstufe verursacht. Würde man diese mit in die Filterberechnung einbeziehen, dann könnte man die Auswirkungen auch noch entsprechend kompensieren. An diesem einfachen Beispiel ist bereits gut zu erkennen, welche zusätzlichen Möglichkeiten für den Lautsprecherentwickler durch die frei definierbaren FIR-Filter bestehen. 2048 Taps bieten dazu bereits fast alle Möglichkeiten, die man sich wünscht. Und wenn es nicht ganz reicht, dann gibt es immer noch die IIR-Filter zur Unterstützung.

Gemessene Frequenzgänge *der beiden Endstufenkanäle für die 2-Wege-Box mit FIR- und IIR-Filtern, HF (blau) und LF (rot). Gestrichelter Verlauf LF nur mit FIR-Filter (Abb. 22)*



Das Ergebnis *für Hoch- (blau) und Tieftöner (rot) sowie deren Summenfunktion (grün, Abb. 23)*



Phasengang *der so gefilterten 2-Wege-Box für Hoch- (blau) und Tieftöner (rot) sowie deren Summenfunktion (grün). Die Phasendrehung am unteren Ende entsteht durch das zusätzliche IIR-Hochpassfilter. Oberhalb von 10 kHz wird die Phasendrehung durch die Endstufe verursacht. Die Filterlatenz für diese Konstellation beträgt lediglich 6 ms (Abb. 24)*