

Audio-Optimum *NOS-DAC*



44,1kHz/16Bit Non Oversampling Digital to Analog Converter

Der **Audio-Optimum NOS-DAC** entstand als "Nebenprodukt" bei der Entwicklung der ersten phasenlinearen D'Appolito-Vollaktivsysteme **Sonus Fidelis 1** bis **4**, für deren adäquate Ansteuerung CD-Spieler mit Oversampling oder SACD-Spieler mit Delta-Sigma-Wandlern nicht ausreichen. Der innovative NOS-Wandler verbindet die Vorteile des Non Oversampling und Non Reclocking (optimale Impulswiedergabe, kein Pre-ringing, voller Dynamikumfang) erstmals mit einem linearen Audio-Frequenzgang bis 20kHz. Der im 44,1kHz-Betrieb prinzipbedingte Höhenabfall von bis zu minus 3,2dB wird durch ein spezielles analoges Rekonstruktionsfilter 3. Ordnung mit einer dazu spiegelbildlichen Übertragungsfunktion exakt kompensiert.

Waren bisherige NOS-DACs eher als "Bastelkram" zu bezeichnen, aber dennoch den "modernen" Delta-Sigma-Wandlern (deren unterste 8Bit von "24Bit" tatsächlich nur Rauschen produzieren) bereits klanglich überlegen, repräsentiert der puristische **Audio-Optimum NOS-DAC** mit einzigartigem Schaltungsdesign den wahren Stand der Technik und macht konventionelle Audio-CDs erstmals wirklich hörbar. Die Musik klingt nicht mehr "künstlich", sondern vollkommen analog! Es ist direkt das zu hören, was auf der CD aufgenommen wurde – sodass der NOS-Wandler auch Tonstudios zu empfehlen ist.

Im Folgenden wird ausführlich erklärt, wie das klangverfälschende Oversampling entstand, warum nie genutzte, echte Qualität von den Halbleiterherstellern nicht mehr produziert wird, und warum es bis heute auch in den Aufnahmestudios noch keine Tonaufzeichnung mit mehr als 16Bit Auflösung gibt – die erst mit dem NOS-Wandler gehört werden kann:

Es rauscht und knistert, die Stereokanaltrennung ist miserabel und nichtlineare Verzerrungen sind um mindestens eine Größenordnung (Faktor 10) höher als bei den billigsten CD-Spielern – dennoch klingt ein guter Analogplattenspieler noch immer musikalischer als die allermeisten CD-Spieler, unabhängig vom Preis!

Der "künstliche" Klang konventioneller CD-Spieler resultiert aus dem Oversampling. Dabei werden über ein digitales FIR-Tiefpassfilter höherer Ordnung aus den 44100 originalen Samples, die pro Sekunde und Stereokanal auf einer Audio-CD gespeichert sind, 176400 nicht mehr originale Samples erzeugt und in einen DA-Wandler gegeben, der mit 4-facher Frequenz getaktet wird. Einziger Zweck dieses Verfahrens ist es, Spiegelfrequenzen, die im Spektrum der Treppenspannung am Ausgang des DA-Wandlers oberhalb des Hörbereichs entstehen, vollständig (d. h. mit über 90dB Dämpfung) herauszufiltern, um das ursprüngliche Analogsignal zu "rekonstruieren".

In dem folgenden Beispiel ist das ursprüngliche Analogsignal V(a6-10db) eine Überlagerung von 6 Sinusschwingungen (1kHz / 1,5kHz / 2,2kHz / 3,3kHz / 4,7kHz / 6,8kHz) mit einem Pegel von jeweils -10dB. Die Graphik zeigt einen Zeitausschnitt von zwei Millisekunden:

[SaH_a6_4m-6m_plot](#)

Machen wir von der Treppenspannung V(44k1) eine Spektralanalyse, werden die sechs Sinusschwingungen korrekt reproduziert, aber die Treppenspannung beinhaltet außerdem ein breites Oberwellenspektrum:

[SaH_a6_44k1_fft](#)

Die erste Oberwelle ist $(44,1 - 6,8)\text{kHz} = 37,3\text{kHz}$, die zweite $(44,1 - 4,7)\text{kHz} = 39,4\text{kHz}$, usw. Die ursprünglichen sechs Sinusschwingungen werden also an der Samplingfrequenz "gespiegelt", deshalb nennt man sie "Spiegelfrequenzen". Um sie loszuwerden, bedarf es eines Tiefpassfilters, das bis 20kHz alles durchlässt und schon bei $(44,1 - 20)\text{kHz} = 24,1\text{kHz}$ eine Dämpfung von über 90dB aufweist. Soweit die (für Audio-Anwendung falsche) Theorie. In der Praxis müsste dafür ein Tschebyscheff-Tiefpass 22. Ordnung hinter den DA-Wandler gesetzt werden, wenn die Welligkeit im Durchlassbereich nicht größer sein soll als 0,03dB. Mit analoger Technik ist das unrealistisch, also wird ein digitales FIR-Tiefpassfilter vor den DA-Wandler gesetzt, in das 44100 Samples hineingetaktet und durch Algorithmen ermittelte 176400 Samples wieder herausgetaktet werden. Das Oberwellenspektrum am Ausgang des 4-fach schneller getakteten DA-Wandlers sieht dann so aus:

[SaH_a6_176k4_fft](#)

Das ursprüngliche Analogsignal ist jetzt an 176,4kHz gespiegelt, sodass die tiefste Spiegelfrequenz erst bei 156,4kHz entstehen kann, denn bei der Aufnahme der CD wird

immer eine Bandbegrenzung auf 20kHz durchgeführt. In der Regel wird dann ein analoges Bessel-Tiefpassfilter 3. Ordnung hinter den DA-Wandler gesetzt, das die tiefsten Spiegelfrequenzen noch immer nicht um 90dB, aber wenigstens um etwa 60dB dämpft:

[SaH_a6_176k4_f1_fft](#)

Wem das noch nicht reicht, kann es mit 8-fach Oversampling versuchen, damit die tiefste Spiegelfrequenz erst bei 332,8kHz entstehen kann und das analoge Bessel-Tiefpassfilter 3. Ordnung nun alle Spiegelfrequenzen um mehr als 90dB dämpft:

[SaH_a6_352k8_f1_fft](#)

Das digitale FIR-Tiefpassfilter vor dem DA-Wandler erzeugt keine harmonischen Oberwellen, sodass mit einer gewöhnlichen Klirrfaktor-Messung keine zusätzlichen nichtlinearen Verzerrungen festzustellen sind. Im Werbeprospekt für den CD-Spieler mit Oversampling ist alles in bester Ordnung. Dennoch verdirbt das FIR-Tiefpassfilter höherer Ordnung die Freude am Musikhören. Es entstehen Mikroechos im Musiksignal, auch bekannt als Pre-ringing. Die Detailauflösung geht verloren, s-Laute in Gesangsstimmen werden bis zur Unerträglichkeit verschärft und Einzelinstrumente im Orchester bis zur Unkenntlichkeit verwischt. Dies betrifft auch gut produzierte, unkomprimierte Aufnahmen und hat nichts mit der weit verbreiteten Unsitte in Tonstudios zu tun, fast jede kommerzielle Musikaufnahme mit Dynamikkompressoren "plattzubügeln". Auch dadurch werden s-Laute unerträglich.

Für "High-End"-CD-Spieler mit Oversampling, die etwas weniger unerträglich klingen, können in den schlimmsten Fällen über 20.000 € ausgegeben werden. Tatsache ist jedoch: Das absolut beste Rekonstruktionsfilter für die Treppenspannung am Ausgang eines DA-Wandlers (bzw. für die Treppenspannung am Ausgang des Strom/Spannungswandlers hinter dem DA-Wandler mit Stromausgang) ist das menschliche Ohr! Behauptungen – mit denen z. B. Hochtonlautsprecher, die bis weit über 20kHz arbeiten, auf unseriöse Weise beworben werden -, man könne noch oberhalb von 20kHz etwas hören, oder es gäbe in diesem Frequenzbereich irgendwelche "psychoakustischen Effekte", sind kompletter Unsinn. Die Spiegelfrequenzen müssen also nicht vollständig herausgefiltert werden und Oversampling bei der Wiedergabe ist mehr als überflüssig. Das "Rekonstruktionsfilter Ohr" muss nur durch ein analoges elektronisches Tiefpassfilter ergänzt werden, das erstens die nachfolgende Verstärkerelektronik ausreichend vor Hochfrequenz bzw. vor zu steilen Signalanstiegen schützt und zweitens den bei einer Samplingfrequenz von 44,1kHz prinzipbedingten Höhenabfall kompensiert. Dann wird die ganze auf einer Audio-CD gespeicherte Information hörbar. Die Musik klingt nicht mehr "künstlich", sondern vollkommen "analog". Genau das wird mit dem Audio-Optimum *NOS-DAC* erstmals erreicht.

Frequenzgang

Eine Samplingfrequenz von 44,1kHz ist ausreichend, um alles, was das menschliche Ohr hört, in digitalisierter Form abzuspeichern. Ein Oversampling bei der Wiedergabe führt immer zu einer Klangverschlechterung und nicht zu einer Klangverbesserung. Das war technisch auch nie beabsichtigt, wird aber von unseriöser Werbung noch immer behauptet und von vielen technisch weniger Interessierten geglaubt. Eine höhere Samplingfrequenz ist nur bei

der Aufnahme der CD wünschenswert, weil bei 44,1kHz keine höheren Signalfrequenzen als 22,05kHz in den AD-Wandler gelangen dürfen, damit keine Alias-Frequenzen im Hörbereich entstehen. Bei einer höheren Samplingfrequenz können weniger steiflankige Anti-Aliasing-Filter verwendet werden. Allein dadurch ist die Klangqualität zu verbessern, nicht durch die höhere Samplingfrequenz an sich! Bei der Wiedergabe der CD erfordert die Rekonstruktion des ursprünglichen Analogsignals kein extrem steiflankiges elektronisches Tiefpassfilter, denn das erledigt das menschliche Ohr! Es muss "nur" mit einer speziellen Filterfunktion der Audio-Frequenzgang korrigiert werden. Im nächsten Beispiel besteht das ursprüngliche Analogsignal aus 21 überlagerten Sinusschwingungen in logarithmischer Verteilung von 1kHz bis 20kHz. Das Zeitintervall von 4ms bis 6ms sieht dann so aus:

[SaH_a21_4m-6m_plot](#)

Die FFT-Analyse der Treppenspannung zeigt, dass der Frequenzgang nur bis 6,8kHz linear ist und danach bis auf -3,2dB bei 20kHz gegenüber dem Referenzpegel abfällt:

[SaH_a21_44k1_fft](#)

[SaH_a21_44k1_0k5-22k_fft](#)

Es wird kein Besselfilter (f_1) benötigt, das den Höhenabfall bis auf -4,5dB verschlimmert, sondern eine spezielle Tiefpassfunktion (f_2), die zuerst ansteigt und dann steiler abfällt:

[f1_f2_plot](#)

Die Filterfunktion f_2 ist kein klassischer Tschebyscheff-Tiefpass und kann nicht berechnet werden, sondern die Filterparameter sind nur durch schrittweise Approximation mit einem leistungsfähigen Computer-Simulationsprogramm zu ermitteln. Das Oberwellenspektrum der Treppenspannung ist durch f_2 (3. Ordnung) ausreichend bedämpft, sodass die nachfolgende Verstärkerelektronik nicht gestört wird, und der Audio-Frequenzgang ist bis 20kHz linear:

[SaH_a21_44k1_f2_fft](#)

[SaH_a21_44k1_0k5-22k_f2_fft](#)

Befürchtungen, die Hochtöner würden überlastet, wenn bei NOS die Spiegelfrequenzen nur mit einem Tiefpass 3. Ordnung bedämpft werden, sind unbegründet. Im Unterschied zum Testsignal a21 ist der Hochtönteil eines Musiksignals deutlich geringer, ansonsten würden die Hochtöner schon von den Signalen im Hörbereich zerstört. Der maximale Signalpegel tritt höchstens bis etwa 2kHz und dabei nur kurzzeitig auf. Die entsprechende Spiegelfrequenz von $(44,1 - 2)\text{kHz} = 42,1\text{kHz}$ ist aber bereits um -40dB gedämpft.

Betrachten wir das Testsignal a21 und die Treppenspannung mit den Funktionen f_1 und f_2 im Zeitraster von 25 μs , in dem das Ohr gerade noch eine Halbwelle erkennt:

[SaH_a21_25u_f1_f2_plot](#)

Die Besselfunktion f_1 "klebt" an der Treppenspannung und hat darum eine zu geringe Amplitude bei den höchsten Audiofrequenzen, während die korrekte Filterfunktion f_2 immer genau soweit über die Treppenspannung hinaus schwingt, dass das menschliche Ohr – mit

der Funktion eines natürlichen, extrem steiflankigen Tiefpassfilters bis 20kHz – das originale Analogsignal verfärbungsfrei mit linearem Frequenzgang hört!

Was dagegen absolut unhörbar bleibt – auch das muss noch erklärt werden-, ist die etwas größere Phasendrehung von f_2 (-90° bei 20kHz) gegenüber f_1 (-66° bei 20kHz), solange die Phasendrehung bei beiden Stereokanälen identisch ist. Das Ohr reagiert sehr empfindlich auf Phasendifferenzen (für die Ortung von Schallquellen im Raum), jedoch bleibt der absolute Phasenfrequenzgang unhörbar, solange er nicht "zu steil" verläuft. Ein Tschebyscheff-Tiefpass 22. Ordnung klingt wirklich scheußlich, so wie auch das digitale FIR-Tiefpassfilter höherer Ordnung scheußlich klingt, nur auf andere Weise. Das analoge Filter macht eine Phasendrehung, die "viel zu steil" verläuft, und Impulse schwingen zu lange nach, während das digitale Filter die Phase "auf der Nulllinie" hält, aber dafür eine Verzögerung und sowohl Nachschwingen als auch Vorschwingen (Pre-ringing) erzeugt.

Noch mal deutlich: Auch wenn die Funktion f_2 zunächst an eine Tschebyscheff-Funktion erinnert (aber keine ist) und negative Assoziationen wie "mieses Einschwingverhalten", "schlechte Impulswiedergabe", etc. weckt, bewirkt allein diese spezielle Filterfunktion hinter einem mit 44,1kHz getakteten DA-Wandler (NOS-DA-Wandler) das genaue Gegenteil, dass nämlich überhaupt erst die ganze Information auf einer Audio-CD hörbar wird, dass eine noch nie gehörte Feinzeichnung da ist, aber ohne eine Spur von Härte, dass Stimmen und Instrumente ganz ohne Schärfe so messerscharf in den Hörraum projiziert werden, dass man sich beim ersten Hören nicht vorstellen kann, wie eine "banale Höhenanhebung" diese unglaubliche Verwandlung bewirkt. Auch der allerletzte "Vorhang" ist weg und es ist direkt das zu hören, was der Toningenieur produziert hat.

Bei genauerer Betrachtung ist die "banale Höhenanhebung" alles andere als banal, denn das, was f_2 nach der DA-Wandlung im Audioband wieder addiert, ist genau das, was durch die Abtastung des ursprünglichen Analogsignals mit 44,1kHz zuvor von diesem subtrahiert und – an der Abtastfrequenz gespiegelt – über das Audioband hinaus in den unhörbaren Bereich geschoben wurde. Es ist keinesfalls möglich, einen auch nur annähernd ähnlichen Effekt mit einem Höhenregler (Shelving highpass) zu erzielen, sondern:

Allein mit einem NOS-DA-Wandler in Kombination mit einem analogen Tiefpass der speziellen Filterfunktion f_2 kann eine 44,1kHz-Audio-CD richtig gehört werden!

Warum wurden CD-Spieler nicht von Anfang an richtig konstruiert? Bekanntlich war die Entwicklung der Audio-CD ein Gemeinschaftsprojekt von Philips und Sony, die sich anfangs nicht auf ein gemeinsames Datenformat einigen konnten. Sony plädierte für 44,1kHz/16Bit und Philips wollte 44,1kHz/14Bit, weil erstens zu Anfang der 1980er Jahre eine höhere Genauigkeit technisch noch nicht möglich war und weil zweitens die Firma Philips einen 14Bit-DA-Wandler, den TDA1540, bereits entwickelt hatte und nun nicht gewillt war, diesen sogleich wieder einzustampfen. Schließlich einigte man sich doch auf 44,1kHz/16Bit, aber Philips wollte den 14Bit-Wandler nicht aufgeben und erfand stattdessen das Oversampling. Man setzte das Digitalfilter SAA7030 vor die TDA1540 (einen pro Stereokanal) und ließ diese mit der 4-fachen Taktfrequenz laufen. In der Werbung wurde dann behauptet, man würde durch "Oversampling" mit 14Bit-Wandlern eine "16Bit-Performance" erreichen. Das war technisch kompletter Unsinn, aber werbetechnisch so über die Maßen erfolgreich, dass

in der Folge der Oversampling-Unfug von allen Herstellern kopiert wurde, um die ganze halbwegs zivilisierte Menschheit mit schlechtem Klang zu beglücken.

Auflösung

Indem ein 14Bit-Wandler mit 4-facher Frequenz getaktet wird, erreicht er selbstverständlich keine 16Bit-Auflösung, sondern die beiden untersten Bits bleiben auf der Strecke. Es wird lediglich durch Noise Shaping eine graduelle Verbesserung des Rauschabstandes erreicht, was aber im Vergleich zur Klangverschlechterung durch das Digitalfilter völlig unbedeutend ist. Der praktische Beweis, dass ein guter 14Bit-Wandler ohne Oversampling unvergleichlich besser klingt als jeder "moderne" Wandler mit Oversampling/Upsampling-Unfug, lässt sich am einfachsten mit dem ersten professionellen CD-Spieler, dem Revox B225 (Baujahr 1981) durchführen. Dieser beinhaltet den ersten Philips-Chipsatz für die CD-Wiedergabe, ist aber nicht wie die ersten Philips-Geräte ein großserientechnischer "Katastrophenaufbau", sondern wurde nach dem damaligen Standard von den Schweizern ordentlich, übersichtlich und servicefreundlich konstruiert. Der B225 kann mit minimalem Arbeits- und Materialaufwand auf Non Oversampling Betrieb mit linearem Audio-Frequenzgang umgebaut werden:

Der SAA7030 wird ausgebaut und die Digitalsignale werden direkt zu den beiden TDA1540 durchgeleitet; am SAA7000 wird die Taktfrequenz von 176,4kHz auf 44,1kHz geändert; die beiden Doppel-OPs NE5532 (I/U-Wandler / Tiefpassfilter) werden gegen die für diese Anwendung optimalen LT1361 von Linear Technology ausgetauscht; optional sind die Gegenkopplungswiderstände der I/U-Wandler an die Stromsenken der beiden TDA1540 anzupassen, damit beide Stereokanäle einen Pegel von exakt +6dBu aufweisen; um die spezielle Filterfunktion f2 zu realisieren, sind pro Kanal drei Kondensatoren gegen genau berechnete und auf 1% Toleranz selektierte Folienkondensatoren auszutauschen; zur Bereinigung des Audio-Signalweges hinter den LT1361 bis zu den Cinch-Ausgangsbuchsen werden die 220µF-Elkos durch mindestens 22µF MKT (Epcos B3252...) ersetzt, einer der beiden 220Ω-Widerstände pro Kanal wird kurzgeschlossen und der zweite wird durch 47Ω ersetzt, alle 1nF-Kondensatoren gegen Masse werden entfernt. Fertig.

Alle "modernen" CD-Spieler mit Oversampling oder die noch "moderneren" Geräte mit Delta-Sigma-Wandlern, zusätzlichem Upsampling und vorgeblicher "24Bit"-Auflösung haben im Hörtest gegen den modifizierten Revox keine Chance!

Dass die untersten zwei Bits fehlen, wird überhaupt erst im direkten Vergleich mit dem Audio-Optimum *NOS-DAC* und an den *Sonus Fidelis* Vollaktivsystemen hörbar. Hinweis: Wenn eine SACD besser klingt als eine CD mit der "gleichen" Aufnahme, ist das nicht die gleiche Aufnahme, sondern die SACD wurde mit weniger Dynamikkompression aufgenommen. Das wäre technisch auch auf der CD möglich gewesen; wird aber allein aus marketingtechnischen Gründen nicht gemacht, weil die allermeisten CDs auf Billiganlagen oder Ghetto Blastern abgespielt werden, auf denen sich unkomprimierte Aufnahmen "zu leise" anhören.

Frequenzjitter

Bei einer Taktfrequenz von 44,1kHz beträgt die Pulsbreite 22,6757µs und 16 Bit Auflösung bedeuten $2^{16} = 65536$ verschiedene Spannungswerte. Damit das letzte Bit gerade noch reproduziert werden kann, darf die maximale Abweichung von der Pulsbreite (Frequenzjitter) nicht größer sein als $22,7\mu\text{s}/2^{17} = 173\text{ps}$. Mit einem guten Quartzgenerator, einem durchdachten Platinenlayout mit kurzen Signalwegen und optimaler Masse- und Signalführung sowie sauberen, stabilen und voneinander entkoppelten Betriebsspannungen für alle aktiven Schaltungsteile ist das technisch machbar. Um aber bei 4-fachem Oversampling die gleiche Genauigkeit zu erreichen, darf der Frequenzjitter nicht größer sein als 43,3ps und bei 8-fachem Oversampling nicht größer als 21,6ps!

CD-Spieler mit Oversampling erreichen nicht die 16Bit-Genauigkeit, sondern maximal eine 12Bit- bis 14Bit-Genauigkeit, und die Klangverschlechterung durch das Pre-ringing des digitalen FIR-Tiefpassfilters höherer Ordnung kommt noch hinzu.

Wandlerverfahren

Klassische DA-Wandler-ICs arbeiten mit präzisen R-2R-Leiternetzwerken und geschalteten Stromquellen, die ein 16Bit-Datenwort in einem Schritt in einen proportionalen Gesamtstrom umwandeln. Der Fertigungsprozess dieser ICs ist aufwändig und teuer, weil von der kleinsten Stromquelle für das niedrigstwertige Bit (LSB) bis zur Stromquelle für das höchstwertige Bit (MSB) stets ein exaktes Verhältnis der Ströme von 1:2 eingehalten werden muss und somit für die größte Stromquelle nur eine maximale relative Abweichung von plus minus 0,0015% zulässig ist. Als der Massenmarkt noch nicht gesättigt war, konnte man sich diesen Aufwand leisten. Heute ist der Massenmarkt mit Billig-CD- und Billig-DVD-Spielern gesättigt, die Gewinnmargen sind klein und von den relativ geringen Stückzahlen für den High-End Markt können die Halbleiterhersteller nicht existieren. Also wurde eine billigere Lösung gefunden, die sich zugleich an eine unkritische Kundschaft besser verkaufen lässt: der Delta-Sigma-Wandler. Dieser muss keine 65536 verschiedene Ausgangsstromwerte in einem Schritt liefern können, sondern braucht nur mit sehr hoher Frequenz zwischen Null und Eins hin und her zu schalten. Die rekonstruierte analoge Ausgangsspannung ergibt sich als Mittelwert aus sehr vielen Nullen und Einsen durch einfache Tiefpassfilterung. Im Prinzip ist das nichts anderes als ein Pulsbreitenmodulator, bei dem aber die Pulsbreite nicht kontinuierlich (analog), sondern diskret (digital) ist. Und weil die Pulsbreite diskret ist, muss ein Delta-Sigma-Wandler mit einer viel höheren Frequenz getaktet werden, um annähernd die Signalverarbeitungsqualität eines kontinuierlichen Pulsbreitenmodulators zu erreichen.

Für die grundsätzliche Beurteilung der SD(AD)-DS(DA)-Wandlung betrachten wir zunächst einen kontinuierlichen Closed-Loop-Pulsbreitenmodulator mit idealisierter, "unendlich schneller" Ausgangsstufe, der mit nur 44,1kHz schwingt:

[CL-PWM5_44k1_asc](#)

Nach etwa 50-minütiger Rechenarbeit des PCs ergibt sich das folgende Bild:

[CL-PWM5_44k1_fft](#)

Damit lässt sich schon Musik hören: 90dB Dynamik und $K_{ges} < 0,1\%$. Bei nur 44,1kHz braucht man es mit einem Sigma-Delta-Modulator aber gar nicht erst zu versuchen. Gehen wir auf die 8-fache Frequenz:

[CL-PWM5_353k_asc](#) [CL-PWM5_353k_2m5-3m5_plot](#) [CL-PWM5_353k_fft](#)

Über 120dB Dynamik und $K_{ges} < 0,009\%$. Das reicht. Jetzt der SD-Wandler:

[SD5_353k_asc](#) [SD5_353k_2m5-3m5_plot](#) [SD5_353k_fft](#)

An dieser Stelle ist schon zu erkennen, dass das Verfahren an sich für gehobene Ansprüche untauglich ist. Mindestens die 64-fache Frequenz (2,82MHz) ist nötig, um ein einigermaßen brauchbares Ergebnis zu erzielen:

[SD5_2M82_asc](#) [SD5_2M82_2m5-3m5_plot](#) [SD5_2M82_fft](#)

Wird die Frequenz weiter erhöht ($256 \times 44,1\text{kHz} = 11,3\text{MHz}$)...

[SD5_11M3_asc](#) [SD5_11M3_2m5-3m5_plot](#) [SD5_11M3_fft](#)

...und werden digitale Tiefpassfilter höherer Ordnung zugeschaltet, die das Noise Shaping weiter verbessern, den gemessenen statischen Klirrfaktor nicht erhöhen und "nur" die Klangqualität weiter verschlechtern, lassen sich zumindest bis 1kHz "mehr als brauchbare" Messwerte aus dem Hut zaubern und es kann mit flotten Werbesprüchen behauptet werden, es handele sich um eine "20Bit-Auflösung" oder gar um eine "24Bit-Auflösung", weil mit entsprechenden Encodern ein Delta-Sigma-Wandler unterschiedliche digitale Wortlängen verarbeiten kann. Tatsächlich vollführen die unteren 8 Bits aber nur irgendein Gezappel, das bei komplexeren Eingangssignalen auch auf die höheren Bits übergreift. Ein Sigma-Delta-Modulator hat im Unterschied zum kontinuierlichen Pulsbreitenmodulator keine DC-Stabilität, d. h. eine Eingangsgleichspannung ergibt keine stabile Ausgangsgleichspannung, sondern die Ausgangsgröße vollführt um den Sollwert herum eine Zappelbewegung mit einem komplexen Bewegungsmuster. Bei jeder DC-Eingangsspannung entsteht ein anderes komplexes Bewegungsmuster. Wird nun ein breitbandiges NF-Signal (Musiksignal) auf den Eingang gegeben, potenziert sich das Gezappel und die prinzipbedingt schlechtere Signalverarbeitungsqualität bei höherfrequenten Eingangssignalen überträgt sich beim Delta-Sigma-Wandler, der ja nur durch Noise Shaping einen akzeptablen Signal/Rauschabstand im NF-Bereich erhält, auch auf die niederfrequenten Eingangssignale.

Fazit: Ein 16Bit-NOS-Wandler mit präzisiertem R-2R-Leiternetzwerk liefert in jedem Zeitintervall von $22,7\mu\text{s}$ einen Ausgangsstrom, der jeweils 65536 diskrete Werte annehmen kann, während ein Delta-Sigma-Wandler (1Bit-Wandler) nur 2 diskrete Ausgangswerte liefert. Auch bei gerade noch technisch machbarer Zerstückelung des Zeitintervalls kann ein 1Bit-Wandler nicht die Klangqualität eines echten 16Bit-Wandlers erreichen. Nur wenn der 16Bit-Wandler unsinnigerweise mit Oversampling und Digitalfilter betrieben wird, kann ein Delta-Sigma-Wandler vergleichsweise etwas weniger unangenehm klingen. Neuerliche Versuche, Delta-Sigma-Wandler mit nicht nur 2, sondern mit 16 bis 256 diskreten Ausgangswerten zu bauen, führen auch nicht zum Ziel. Das nachzuweisen, würde an dieser Stelle zu weit gehen.

Schon der modifizierte Revox B225 im 14Bit-NOS-Betrieb übertrifft die DS-Wandler mit vorgeblicher "24Bit-Auflösung" im Hörtest deutlich.

TDA1540 / TDA1541 / TDA1543

In fast allen kommerziellen CD-Spielern (bis auf die Sony-Geräte) der 1980er und 1990er Jahre waren diese drei DA-Wandler-ICs verbaut und wurden nie richtig eingesetzt (bzw. immer mit Oversampling betrieben), bis die Produktion eingestellt wurde. In der Zwischenzeit überschwemmten die billigen Delta-Sigma-Wandler den Massenmarkt und die Entwicklung lief immer weiter in die falsche Richtung. Echte Multibit-DA-Wandler mit präzisiertem R-2R-Leiternetzwerk gibt es – bis auf ein paar Ausnahmen – heute nicht mehr für den Audio-Bereich, sondern nur noch für die professionelle Messtechnik. Nach dem derzeitigen Stand der Technik wird eine [echte 18Bit-Genauigkeit](#) erreicht. Alles, was angeblich darüber hinausgeht, wird nur von unseriösen Werbesprüchen behauptet, die sich solange verbreiten, wie sie geglaubt werden oder geglaubt werden wollen. Bis heute gibt es **keine** Musikaufnahme mit einer echten 18Bit-Auflösung, auch nicht in den Aufnahmestudios! Bis es soweit ist, kann das Motto nur lauten: Back to the roots!

Der Audio-Optimum *NOS-DAC* ist mit dem Philips TDA1543 aufgebaut, von dem es noch einige Lagerbestände gibt. Das ist die beste Lösung, die mit vertretbarem Aufwand zu realisieren war, um die *Sonus Fidelis* Vollaktivsysteme, die ein ganz neues Klangniveau erreichen, überhaupt mit einer adäquaten Signalquelle ansteuern zu können. Der TDA1543 wurde ab 1991 als "economy version" des TDA1541 (16Bit Stereo) produziert, der 1985 den TDA1540 (14Bit Mono) ablöste und der für viele Hifi-Enthusiasten als der beste DA-Wandler gilt, der je gebaut wurde. Die "economy version" im DIL8-Gehäuse sieht im Vergleich zum 28-poligen "großen Bruder" winzig aus, klingt aber noch besser – wenn der IC richtig eingesetzt wird! Zum einen arbeitet der TDA1543 bei Ansteuerung über ein I²S-Signal (das die Daten für den linken und den rechten Stereokanal abwechselnd enthält) von vornherein im zeitsynchronen Stereobetrieb, was der TDA1541 nicht kann (sodass ohne Korrektur ein Phasenversatz von bis zu 80° zwischen den beiden Stereokanälen entstand); zum anderen hat der TDA1543, auch wenn er nur acht Anschlussbeinchen hat, noch eines übrig, um von außen den DC-Offset abgleichen zu können. Damit ergibt sich die Möglichkeit, einen um die Analogmasse zentrierten, symmetrischen 16Bit-NOS-DA-Wandler aufzubauen, der bis zu den Cinch-Ausgangsbuchsen vollständig DC-gekoppelt ist.

Symmetrische DA-Wandlung

Der Ausgang eines DA-Wandler-ICs mit geschalteten Stromquellen ist eine Stromsenke zu dessen negativer Betriebsspannung, die in der Regel auf Masse liegt. Ein nachfolgender Operationsverstärker wandelt den Strom in eine proportionale Spannung und macht gleichzeitig eine Invertierung, sodass die in 65536 Stufen geschaltete Stromsenke zu einer positiven Ausgangsspannung wird, die aber nicht um die Signalmasse zentriert ist, sondern um die Hälfte der maximalen positiven Ausgangsspannung. Es entsteht also ein DC-Offset, der bei +6dBu = $2V_{\text{eff}}$ maximalem Ausgangspegel +2,83V beträgt. Die einfachste und häufigste, aber nicht immer die billigste Art, den Offset loszuwerden, ist ein Kondensator im Signalweg, der jedoch vermieden werden sollte. Besser ist eine aktive Offset-Kompensation

mit einem als Integrierer mit tiefer unterer Grenzfrequenz geschalteten Operationsverstärker über der Gegenkopplung des Strom/Spannungs-Wandlers. Dies wird in High-End-Geräten gemacht. Einen Offset von 2,83V auszuregeln, ist aber nicht unkritisch. Die aufwändigste Methode ist die Verwendung von zwei DA-Wandlern pro Stereokanal, die im Gegentakt arbeiten, um mit einem zusätzlichen Differenzverstärker zwei gleiche Offsetspannungen gegenseitig zu kompensieren. Dieser Aufwand ist aber nicht nötig.

Der TDA1543 beinhaltet – da muss ein Entwicklungsingenieur bei Philips eine Erleuchtung gehabt haben! – zwei zu den beiden Stromsenken komplementäre Gleichstromquellen, die (leider nur gemeinsam, weil nur noch ein Anschluss frei ist) von außen über einen Trimmwiderstand einstellbar sind. Im Audio-Optimum *NOS-DAC* wird der TDA1543 nicht wie in allen bisherigen Applikationen an einfachen +5V (maximal zulässig sind +8V) betrieben, sondern an symmetrischen plus minus 2,8V, stabilisiert über die besonders rauscharmen Flussspannungen blauer LEDs. Jetzt kann der DC-Offset mit dem Trimmwiderstand auf Null gestellt werden – bzw. nicht ganz auf Null, weil durch Fertigungstoleranzen beide Stereokanäle nicht immer identische Werte haben und der Abgleich nur für beide Kanäle gemeinsam möglich ist. Der verbliebene DC-Offset von $\pm 10\text{mV}$ bis $\pm 50\text{mV}$ wird von zwei aktiven Offset-Kompensationen (eine pro Stereokanal) mit rauscharmen Präzisions-OPs (LTC6240HV) auf weniger als $\pm 0,1\text{mV}$ reduziert und damit praktisch ganz beseitigt.

Die ganze Anordnung arbeitet so stabil, dass auf Kurzschlusschalter gegen Masse an den NF-Ausgängen verzichtet wurde. Beim Ein- und Ausschalten erzeugt der *NOS-DAC* ein sattes "Plopp", aber kein grässliches Krachen, das die Lautsprechermembranen aus den Körben fliegen lässt, wenn die Kurzschlusschalter in unsymmetrischen Applikationen fehlen. Selbstverständlich schaltet der aktive Musikhörer immer alle Geräte in der jeweils richtigen Reihenfolge ein und aus.

Der Strom/Spannungswandler

Der symmetrische Betrieb des TDA1543 hat einen weiteren Vorteil: Es kann der beste Strom/Spannungswandler verwendet werden. Bei einer asymmetrischen Schaltung ist allein für den positiven Aussteuerungsbereich ein Spannungshub von 5,66V erforderlich, wenn der Ausgangspegel +6dBu betragen soll. Dann kommen nur OPs der $\pm 15\text{V}$ -Kategorie für die Strom/Spannungswandler in Frage. Diese sind aber nicht gleichzeitig schnell und präzise und haben dabei auch noch eine hohe Leerlaufverstärkung und geringes Rauschen. Alle "hochgelobten" $\pm 15\text{V}$ -Typen taugen nur bedingt und der LT1360/61 ist noch die beste Wahl. Bei einer symmetrischen Schaltung ohne DC-Offset reicht ein Spannungshub von $\pm 2,83\text{V}$ für +6dBu, sodass ein schneller OP der $\pm 5\text{V}$ -Kategorie die schwierige Aufgabe, aus einem Treppenstrom eine proportionale Treppenspannung zu erzeugen, souverän erledigen kann.

Das Verstärkungs-Bandbreitenprodukt eines Operationsverstärkers kann, wie der Name schon sagt, auf eine höhere Leerlaufverstärkung mit geringerer Anstiegsgeschwindigkeit oder auf eine höhere Anstiegsgeschwindigkeit mit geringerer Leerlaufverstärkung aufgeteilt werden. Klassische Audio-Operationsverstärker, die mit $\pm 15\text{V}$ arbeiten, haben eine hohe Leerlaufverstärkung, damit die Gegenkopplung nichtlineare Verzerrungen auf ein besonders niedriges Maß reduzieren kann. Bis 20kHz Sinus kann ein guter Audio-Operationsverstärker das problemlos. Der Stromausgang eines DA-Wandlers produziert aber sehr viel steilere

Signale beim Umschalten von einer Treppenstufe zur nächsten, sodass bei einem OP mit zu geringer Anstiegsgeschwindigkeit die Gegenkopplungsschleife sozusagen abreißt und die Ausgangsspannung kurzzeitig aus dem Ruder läuft – und zwar umso mehr, je höher die Leerlaufverstärkung ist, die die Gegenkopplung nicht mehr kontrollieren kann! Will man beides, d. h. eine hohe Leerlaufverstärkung und eine noch höhere Anstiegsgeschwindigkeit, braucht der OP naturgemäß einen immer höheren Ruhestrom, und da stößt man bei 30V Betriebsspannung schnell an die Grenze, was an maximaler Wärmeverlustleistung noch zulässig ist. Jetzt kann man den OP in ein größeres Gehäuse setzen und für zusätzliche Kühlung sorgen oder ihn gleich diskret, d. h. mit Einzeltransistoren, aufbauen und insgesamt sehr viel großzügiger dimensionieren. In High-End-Geräten wird das auch so gemacht; der Aufwand steht aber in keinem Verhältnis zum Nutzen. Denn je "dicker" die Transistoren für die Ausgangsstufe des OPs werden, um die Verlustleistung zu verkraften, desto mehr verlieren sie an Geschwindigkeit und die Gesamtschaltung wird immer aufwändiger, um das wieder auszugleichen. Das Entscheidende ist: Die Spannungsverstärkung ist jetzt nicht mehr aus einer einzigen Verstärkerstufe herauszuholen (Single Gain Stage Amplifier), sodass die Gegenkopplung über mehrere Verstärkerstufen arbeiten muss und deshalb bei steilen Signalanstiegen am Verstärkereingang umso instabiler wird. Anstatt diesen Aufwand zu treiben, der am Ende die Gesamtperformance eines integrierten LT1360/61 doch nicht übertreffen kann, ist es besser, auf die $\pm 5V$ -Betriebsspannungsebene zu gehen, in der kleinere und damit schnellere integrierte Transistoren verwendet werden können.

Im Audio-Optimum *NOS-DAC* kommt der schnelle Rail-to-Rail-Operationsverstärker LT1806 (in der Doppelversion LT1807) als Strom/Spannungswandler zum Einsatz, der für diese Aufgabe die ideale interne Topologie aufweist: Die Eingangsstufe besteht aus zwei zueinander komplementären gefalteten Kaskoden, über die eine Gegentakt-Endstufe mit verbundenen Kollektoren angesteuert wird. TIM-Verzerrungen sind für diesen 325MHz-OP ein Fremdwort. Er kann steilste Signalanstiege verarbeiten, ohne dass die Gegenkopplung abreißt. Zum Vergleich: Der LT1806 hat eine Anstiegsgeschwindigkeit von "nur" 140V/ μ s, reagiert aber deutlich schneller auf Impulse als der 50MHz-OP LT1360/61 mit 800V/ μ s und nur unwesentlich langsamer als der ultraschnelle 400MHz-OP LT1818/19 mit 2500V/ μ s! Die Leerlaufverstärkung des LT1818/19 erreicht aber "nur" noch 6000 (und die des LT1360/61 "nur" noch 9000), während der LT1806/07 allen nichtlinearen Verzerrungen mit einer Leerlaufverstärkung von 300000 entgegen wirkt. Die Eingangs-Offsetspannung beträgt nur typ. 100 μ V und eine Eingangs-Rauschspannungsdichte von nur 3,5nV/Hz^{0.5} ist für einen so schnellen OP außergewöhnlich. Der Klang lässt sich mit Worten nicht mehr beschreiben. Während die verschiedenen $\pm 15V$ -Typen "spitz", "hell", "zischig", "ausgewogen", "bedeckt", "matt", "dumpf" klingen bzw. "sunden" (wohlgemerkt, diese OPs klingen in anderen Anwendungen hervorragend, nur nicht als Strom/Spannungswandler hinter einem DAC), verhält sich der LT1806/07 einfach nur neutral und reproduziert mühelos jedes Klangdetail.

Der zweite OP im LT1807 (ein Doppel-OP pro Stereokanal) treibt über 47 Ω den NF-Ausgang und ist mit zwei Folienkondensatoren und zwei Widerständen ein Sallen-Key-Tiefpass 2. Ordnung, der in Verbindung mit einem dritten Folienkondensator in der Gegenkopplung des Strom/Spannungswandlers die spezielle Filterfunktion 3. Ordnung (f2) bildet. Soweit nichts Besonderes. Im Audio-Optimum *NOS-DAC* werden jedoch die drei Folienkondensatoren und auch der Gegenkopplungswiderstand des Strom/Spannungswandlers von Hand selektiert und individuell an beide Stereokanäle jedes TDA1543 angepasst, um Fertigungstoleranzen

der beiden Stromsenken auszugleichen. Der AC-Ausgangspegel beträgt somit immer für beide Stereokanäle +6dBu ($\pm 0,09\text{dB}$) und die Filterfunktion f_2 wird exakt eingehalten.

Empfang des SPDIF-Signals

Der "Digitalausgang" eines CD-Spielers, das Sony Philips Digital Interface, liefert alle auf der CD gespeicherten Nullen und Einsen (für beide Stereokanäle abwechselnd hintereinander) als modulierte Rechtecksignale mit einer Datenrate von 2,8224MB/s. Dieses Signal kann "irgendwie" übertragen und dann der Versuch gestartet werden, es zu regenerieren, oder es wird sauber übertragen und insbesondere richtig empfangen. Alle Regenerationsversuche mit PLL-(Phase Locked Loop) Regelschleifen ohne Zwischenspeicherung der Daten können den durch eine schlechte Übertragung und/oder einen miserablen Empfang erzeugten Frequenzjitter nicht vollständig beseitigen und die PLL selbst erzeugt zusätzlichen Jitter bei tieferen Frequenzen. Mit Zwischenspeicherung der Daten gelingt die Regeneration, aber nur mit einer gewissen Verzögerung und großem schaltungstechnischem Aufwand. Bei sauberer Übertragung und korrektem Empfang ist eine zusätzliche Regeneration überflüssig! Zunächst einmal ist ein NOS-DAC, wie weiter oben bereits erklärt, vier- bis achtmal unempfindlicher gegenüber Frequenzjitter als ein externer DAC mit Oversampling-Unfug. Werden ein hochwertiges 75 Ω -Kabel (ist im Lieferumfang enthalten) und die richtige Empfangsschaltung verwendet, ist das Signal ausreichend regeneriert. Dazu muss man wissen, wie der Jitter bei der üblichen "0815"-Übertragung entsteht. Bei schlechten Kabeln deutlich und auch noch bei guten Kabeln auf einem Oszilloskop sichtbar, werden die Anstiegs- und Abfallflanken der Rechtecksignale auf dem Übertragungsweg mehr oder weniger abgeflacht. Die Empfängerschaltung muss die Signalfanken wieder aufsteilen. Entscheidend ist nun, dass die Aufsteilung immer an der richtigen Stelle erfolgt, und zwar exakt im Nulldurchgang der Flanken bzw. genau in der Mitte der absoluten Amplitude des gleichspannungsfreien Rechtecksignals. Dann ist das Signal sauber regeneriert.

Frequenzjitter entsteht, wenn – wie üblich – das SPDIF-Signal direkt auf den Eingang eines heute üblichen SPDIF-I²S-Decoders (mit I²S wird der DA-Wandler angesteuert) gelegt wird, der neben anderem überflüssigem Schnickschnack (Digitalfilter, etc.) auch gleich eine PLL integriert hat, um vorgeblich ausbügeln zu können, was er selbst verursacht. Im Datenblatt des CS8416, der auch im Audio-Optimum NOS-DAC verwendet wird, ist eine für HCMOS-Gatter übliche Eingangshysterese von 0,15V (Min) bis 1,0V (Max) angegeben. Ohne auf Details einzugehen, bedeutet dies, dass die Eingangsschaltung "nach Lust und Laune" die Signalfanken an einer beliebigen Stelle aufsteilt, aber garantiert nicht im Nulldurchgang. Wird im Nulldurchgang geschaltet, ist es bis zu einem gewissen Grad egal, wie stark die Signalfanke abgeflacht ist, weil der Nulldurchgang auch der Punkt ist, um den sich die Flankenabflachung gedreht hat. Wird aber nicht im Nulldurchgang geschaltet, wird die abgeflachte Signalfanke bei der Aufsteilung verschoben, und zwar umso mehr, je weiter der Umschaltzeitpunkt vom Nulldurchgang in positiver oder negativer Richtung entfernt und je stärker die Signalfanke abgeflacht ist. Genau das ist der Frequenzjitter.

Es ist der absolute Hohn, wenn sowohl die Hersteller der SPDIF-I²S-Decoder (die nur noch den überflüssigen Schnickschnack ihrer "tollen" ICs im Auge haben und die Grundfunktionen vernachlässigen) als auch die Gerätehersteller, die die "tollen" ICs verbauen und den

Schnickschnack anwenden, über die "schlechte Qualität" des Sony Philips Digital Interface schwadronieren und selber nicht in der Lage sind, das SPDIF-Signal richtig zu empfangen.

Warum wird der CS8416 verwendet? Weil alle anderen verfügbaren SPDIF-I²S-Decoder auch überflüssigen Schnickschnack integriert haben und ähnlich miserable Signaleingänge aufweisen. Beim CS8416 lässt sich der Schnickschnack wenigstens von außen abstellen und die Qualität des Signaleingangs spielt keine Rolle mehr, wenn dieser ein bereits zuvor richtig aufgestelltes SPDIF-Signal erhält. Im Audio-Optimum *NOS-DAC* übernimmt diese Aufgabe der beste professionelle Aufsteiler, der ultraschnelle Komparator LT1719 mit einer minimalen internen Hysterese von 3,5mV, die in der Mitte des SPDIF-Signals, das eine Signalamplitude von $\pm 500\text{mV}$ aufweist, zentriert ist. (Ein Präzisionskomparator ohne interne Hysterese wie der LT1713, der als Pulsbreitenmodulator in den **SINCOS**[®] TWM-Endstufen eingesetzt wird, wäre hier nicht geeignet; ganz ohne Hysterese geht es nicht, weil sonst instabile Zustände entstehen können.) Der Frequenzjitter ist jetzt mindestens um den Faktor 40 kleiner, als wenn das SPDIF-Signal direkt auf den Eingang des CS8416 gelegt würde, und damit praktisch nicht mehr vorhanden. Die "tolle" PLL-Regelschleife des CS8416 kann den vom eigenen Signaleingang erzeugten Frequenzjitter längst nicht um diesen Faktor reduzieren – ganz abgesehen davon, dass die PLL prinzipbedingt aus einem Teil des unterdrückten HF-Jitters eigenen NF-Jitter generiert.

Der LT1719 ist zugleich ein professioneller Level-Shifter für Digitalsignale mit separaten Betriebsspannungsanschlüssen für die symmetrische Eingangsstufe und für die Rail-to-Rail-Ausgangsstufe. Die Eingangsstufe wird mit symmetrischen $\pm 5\text{V}$ um Analogmasse und die Ausgangsstufe mit $+3,3\text{V}$ (zugleich die Betriebsspannung des CS8416) über Digitalmasse betrieben. Diese liegt an der negativen Betriebsspannung des TDA1543 und somit um $-2,8\text{V}$ unter Analogmasse. Auf dem doppelseitigen UltiBoard-Layout befinden sich oben alle Bauteile und die verbindenden Leiterbahnen und unten die geschlossenen Masseflächen. Die Digitalmassefläche unter dem TDA1543, dem CS8416 und der Hälfte des LT1719 bildet eine Insel innerhalb der umlaufenden Analogmassefläche unter allen anderen Bauteilen. Der Signaleingang des Digitalteils (CS8416_IN) liegt über 10nF (NP0 Keramik) am R-R-OUT des LT1719; die Signalausgänge des Digitalteils sind die beiden Stromsenken des TDA1543, direkt verbunden mit LT1807_E-, dessen E+ direkt an Analogmasse liegt, die nach außen hin ($L_{\text{OUT}} / \text{SPDIF_IN} / R_{\text{OUT}}$) das Nullpotential bildet. Soweit die Beschreibung des Signalweges.

Alle Bauteile sind mit maximaler Packungsdichte optimal platziert und die signalführenden Leiterbahnen nur wenige Millimeter lang. Alle Betriebsspannungen sind über dämpfende Ferritperlen gegenseitig entkoppelt und alle aktiven Bauteile werden mit hochkapazitiven X5R-Keramik-Vielschichtkondensatoren einzeln gepuffert (LT1719: $2 \times 22\mu\text{F} + 22\mu\text{F}$, CS8416: $3 \times 22\mu\text{F}$, TDA1543: $4 \times 47\mu\text{F} + 2 \times 100\mu\text{F}$, LT1807: $2 \times 22\mu\text{F}$, LTC6240HV: $2 \times 22\mu\text{F}$).

Spannungsversorgung

Der Audio-Optimum *NOS-DAC* wird nicht mehr nach der klassischen Methode "50Hz-Trafo / Gleichrichter / großer Elko / Längsregler / kleiner Elko" mit Spannung versorgt, sondern über einen modernen Miniatur-Schaltspannungswandler des Schweizer Herstellers TRACO. Darum befindet sich auf der nur $(51 \times 76)\text{mm}^2$ kleinen Platine des *NOS-DAC* kein einziger Elektrolytkondensator und – nicht nur – darum konnte eine so geringe Baugröße überhaupt

erreicht werden. Der Schaltspannungswandler TMR3-1221WI ist wie der ganze *NOS-DAC* ein absolutes Hightech-Produkt und im Einkauf teurer als alle Bauteile zusammen, die für die klassische Methode gebraucht würden. Die Firmenphilosophie von Audio-Optimum ist aber nicht, mit den billigsten Bauteilen ein akzeptables Ergebnis, sondern mit den besten Bauteilen, die der Elektronik-Markt hergibt, das absolut beste Ergebnis zu erzielen.

Der TMR3-1221WI ist kleiner als 2St. Würfelzucker, hat bei fast 90% Wirkungsgrad eine Ausgangsleistung bis 3W und wandelt eine unregelmäßige Eingangsspannung von 4,5V bis 18V in eine davon potentialgetrennte und stabilisierte symmetrische Ausgangsspannung von plus minus 5V. Dem Schaltspannungswandler, der durch Pulsweitenmodulation (keine Delta-Sigma-, sondern eine kontinuierliche PWM-Regelung) alle nieder- bis mittelfrequenten Spannungsschwankungen vollständig ausregelt, ist primärseitig ein symmetrisches π -Filter vor- und sekundärseitig ein um Analogmasse symmetrisches Tiefpassfilter 4. Ordnung nachgeschaltet. Die Kapazitäten der Filter sind X5R-Keramik-Vielschichtkondensatoren (2x22 μ F prim / 4x47 μ F sec) und die Induktivitäten keine Speicherdrosseln, sondern spezielle "Verlustdrosseln", die Gleichspannung durchlassen und hochfrequente Spannungsanteile (Ripple) in Wärme verwandeln. Eine bessere Spannungsversorgung gibt es nicht mehr! Das ist in der Praxis daran zu erkennen, dass der *NOS-DAC* mit jedem beliebigen Steckernetzteil (und wenn es "das Letzte" aus der Restekiste ist) nicht nur funktioniert, sondern auch vollkommen brumm-, zirp-, und rauschfrei funktioniert (solange 4,5V nicht unterschritten und 18V nicht überschritten werden). Selbstverständlich wird ein modernes 9V-Steckernetzteil mitgeliefert, das erstens so designed ist, dass es in Mehrfachsteckdosen nicht über einen Steckplatz hinausragt und somit die Steckplätze daneben nicht blockiert, und das zweitens über einen hochwertigen, vergoldeten Klinkenstecker einen sicheren elektrischen Kontakt zur vergoldeten Klinkenbuchse (vom gleichen Hersteller!) am *NOS-DAC* ermöglicht. Es ist auch der Betrieb über einen 6V-, 9V-, oder 12V-Akku oder eine Batterie möglich, wobei die Leistungsaufnahme noch unter 1,6 Watt bleibt. Eine Verbesserung der Klangqualität wird dadurch aber nicht mehr erreicht.

Hinter dem sekundären symmetrischen Tiefpass 4. Ordnung hat jedes aktive Bauelement in der Schaltung einen weiteren, eigenen Tiefpass 2. Ordnung zur Entkopplung und der TDA1543, der CS8416 sowie die Ausgangsstufe des LT1719 werden zusätzlich über Spannungsspiegel stabilisiert. Diese sehen ähnlich aus wie Stromspiegel, nur sind Emitter und Kollektor sowie die Polaritäten vertauscht. Für einen positiven Spannungsspiegel werden also nicht zwei PNP-, sondern zwei gepaarte NPN-Transistoren verwendet. Damit können die Sperrspannung einer 3,3V Zenerdiode oder die besonders rauscharme Flussspannung einer blauen Leuchtdiode (2,8V) vom Eingang des Spannungsspiegels 1:1 auf den Ausgang gespiegelt werden. Der Vorteil gegenüber einem integrierten Längsregler ist, dass sich ein Spannungsspiegel immer verhält wie ein "Unlimited Cap Load Amplifier" mit einer Spannungsverstärkung von eins, der aber nicht auf eine interne Gegenkopplung angewiesen ist, um bei Lastschwankungen die Ausgangsspannung zu stabilisieren, sondern allein auf die Gleichheit der Kennlinien der beiden gepaarten Transistoren.

Der TDA1543 wird zwischen +5V und -5V über zwei komplementäre Spannungsspiegel, die dauerhaft und ohne Eigenschwingungen auf +2,8V und -2,8V stabilisieren, massefrei aufgehängt und hochkapazitive X5R-Keramik-Vielschichtkondensatoren – die aufgrund ihres kaum vorhandenen Ersatzserienwiderstandes kurzfristige Stromspitzen sehr viel besser

abpuffern können als die dicksten Elektrolytkondensatoren – werden sowohl zwischen die beiden Betriebsspannungsanschlüsse des DA-Wandler-ICs geschaltet ($4 \times 47 \mu\text{F}$) als auch von +2,8V nach Analogmasse ($100 \mu\text{F}$) und von -2,8V nach Analogmasse ($100 \mu\text{F}$). Damit haben die beiden geschalteten Stromsenken im TDA1543 so stabile Arbeitsverhältnisse, wie es auch mit einer Akkumulator-Spannungsversorgung nicht besser hinzukriegen ist, nur mit dem Unterschied, dass man keine altersschwachen Akkus mehr wechseln muss. Der Audio-Optimum *NOS-DAC* ist tatsächlich für die Ewigkeit gebaut – solange es noch Audio-CDs im Format 44,1kHz/16Bit gibt.

Mechanischer Aufbau und Design

Nicht nur, damit der "Winzling" ein ordentliches Gewicht erhält und sicher steht, sondern auch, um mechanische Schwingungen von der Elektronik abzuhalten, die im schlimmsten Fall zu Mikrofonieeffekten in einigen sensiblen Bauteilen führen könnten, ist die präzise mit Radien umfräste Platine in einen umlaufend um 0,2mm weiter ausgefrästen, massiven Messingblock eingelassen und mit diesem über dämpfende Teflonbuchsen fest verschraubt.

Das Außengehäuse besteht aus semitransparentem Acrylglas mit einer Wandstärke von 6mm, das von außen schwarz erscheint und bei näherer Betrachtung einen scharfen Blick auf die gesamte Elektronik ermöglicht. Die beiden blauen LEDs, die die Betriebsspannung des TDA1543 stabilisieren, scheinen durch das Acrylglas hindurch und dienen gleichzeitig als Betriebsanzeige. Der Ein-Aus-Schalter (vertikaler Kipphebel) befindet sich auf der Rückseite, um das Frontdesign nicht zu stören. Vier mit der Bodenplatte verschraubte Gummifüße sorgen für einen sicheren, rutschfreien Stand. Das semitransparente Acrylglasgehäuse besteht aus dem gleichen Material wie bei den **SINCOS TWM250** Multikanalverstärkern der *Sonus Fidelis* Vollaktivsysteme und wird nach unseren Vorgaben in ausgesuchten deutschen Handwerksbetrieben auf höchstem Qualitätsstandard gefertigt (laserbeschriftete Front / umlaufende, polierte Fase / keine sichtbaren Klebkanten). Das Gehäuse gibt dem *NOS-DAC*, der erstmals die ganze auf einer Audio-CD gespeicherte Musik hörbar macht, ein unverwechselbares, einzigartiges Design, das die inneren Werte von außen erkennen lässt, ohne sie ganz zu verdecken.