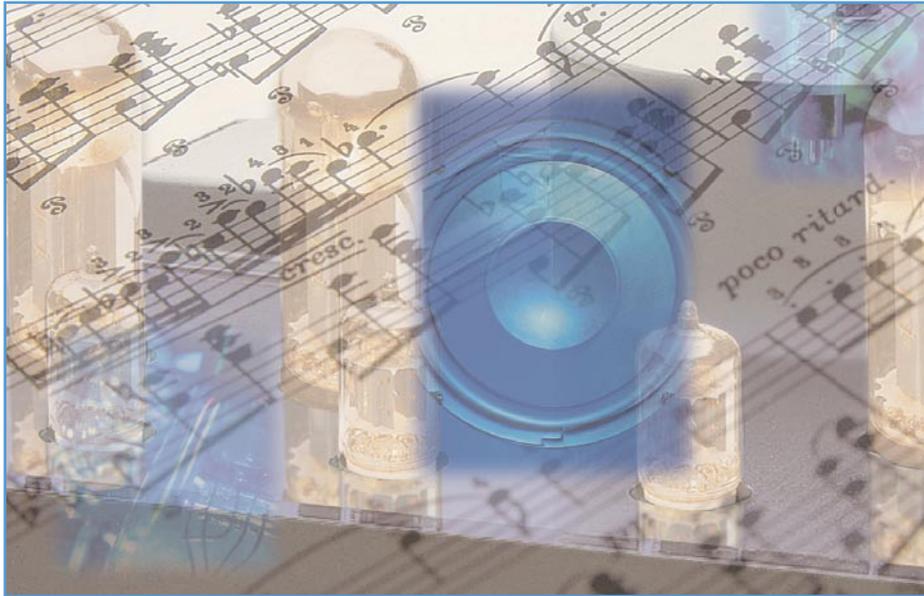


Verstärkertechnik in der Audiowelt



Teil 5: Sinn und Unsinn technischer Daten von Audio-Leistungsverstärkern

Die hochinteressanten Schaltungen und Bauteile von Audio-Leistungsverstärkern sowie deren Historie haben wir nun ausführlich erörtert und beschrieben.

Wir möchten uns nun einem sehr interessanten und dazu noch nervigen Thema widmen: den technischen Daten von Audio-Verstärkern. Was bedeutet Klirrfaktor, was ist THD, oder was interessiert mich der Frequenzgang über 20 kHz?

Was ist wirklich wichtig?

Bei Audiogeräten mit Leistungsverstärkern im Ausgang wird häufig im hart umkämpften Billigsektor mit wahnwitzigen technischen Daten geworben. Da gibt es kleine Computerlautsprecher mit eingebautem 120-W-Verstärker, Kompakt-Stereoanlagen mit 1200 W Musikleistung und Autoendstufen mit 2 kW und 0,00 – und ich weiß nicht wie wenig – Klirrfaktor. Es klirren Hi-Fi-Verstärker nur im hundertstel Promille-Bereich und haben Frequenzgänge bis in den Mittelwellenbereich – um

auch sämtliche Obertöne wiederzugeben – so wird einem gesagt.

Schauen wir uns die gängigen Angaben doch einmal genauer an:

Der Klirrfaktor

Die wohl am heißesten diskutierte Messgröße bei Audiogeräten ist der Klirrfaktor. Was verbirgt sich eigentlich dahinter?

Nun, es gibt unterschiedliche Arten von Störgrößen, die bei der Verstärkung oder der sonstigen Bearbeitung eines Audiosignals in der Elektronik oder im digitalen Verarbeitungsprozess auftreten können:

1. Einwirkung von Brummspannungen vom Netzteil
2. Reste von digitalen Takten
3. Nichtlinearitäten von Bauteilen (insbesondere von Transistoren)
4. Übersteuerung

Abgesehen von den Resten digitaler Takte sind alle anderen Effekte stark von der Signalgröße, der Signalfrequenz sowie vom Ausgangsstrom und der Lastimpedanz des zu messenden Gerätes abhängig.

Somit ist eine schlechte Angabe eines Klirrfaktors für ein Gerät nichts sagend.

Weiterhin gibt es unterschiedliche Arten von Verzerrungen. Die wohl bekannteste und meist angegebene Verzerrungsgröße ist die „harmonische Verzerrung“, auch THD (Total Harmonic Distortion) genannt. Messtechnisch wird diese Größe durch Messung der Oberwellen bei einer festen Frequenz ermittelt und in % auf die Signalgröße gerechnet. Das heißt, es wird ein Sinussignal an den Verstärker angelegt, dieser belastet und dessen Ausgangssignal bewertet.

Ja, wie eigentlich?

Genau, wie eigentlich!

Wir können zum einen nur mit einem Sinussignal einer festen Frequenz messen (meist wird 1 kHz verwendet), wir können natürlich auch über ein breites Frequenzband von 10 Hz bis 100 kHz messen. – Und wir werden sicher sehr unterschiedliche Mess-Ergebnisse erhalten, sprich: Es wird durchaus Geräte geben, die sich bei 20 Hz anders verhalten als bei 2 kHz. Denken wir nur einmal an einen Röhrenverstärker mit Ausgangsübertrager. Viele Übertrager zeigen sicherlich bei 20 Hz deutliche Verzerrungen durch die bei niedrigen Frequenzen auftretende Kernsättigung. Große hochwertige Kerne kosten viel Geld, deshalb wird hier gerne gespart, und das kann man sehr leicht messen.

Gut – die Frequenz spielt auch eine wichtige Rolle. Wie sieht es mit der Signalgröße aus? Nun, es ist ebenso eine sehr wichtige Größe, über welcher der Klirrfaktor variiert. Es spielt eine wesentliche Rolle, ob man einen Verstärker bei Vollpegel oder bei -20 dB betreibt.

Wir haben es mit unterschiedlichen Spannungs- und Stromverhältnissen in der Elektronik zu tun, je nachdem, wie hoch die Ausgangssignale sind. Und hier sind wir gleich bei der nächsten Größe, der Lastimpedanz. Es ist sicher ein gravierender Unterschied, ob wir bei einem konstanten Signal z. B. $10 V_{\text{eff}}$ an 2Ω Last oder an 16Ω Last messen. An 2Ω fließen $5 A_{\text{eff}}$, an 16Ω gerade mal $625 \text{ mA}_{\text{eff}}$.

Um das Thema auf die Spitze zu treiben, betrachten wir die Impedanz noch komplex. Ein Lautsprecher oder eine Übertragung über ein Kabel zu einem weiteren Gerät ist alles andere als eine resistive, also ohmsche

Belastung. Eine Verstärkerstufe verhält sich an einer Last mit kapazitivem oder induktivem Anteil mit Sicherheit anders als an einer ohmschen Last.

Fassen wir zusammen:

Der Klirrfaktor ist abhängig von der Frequenz und vom Pegel des Ausgangssignals und dazu noch von der Impedanz der am zu messenden Ausgang angeschlossenen elektrischen Belastung. Weiterhin spielt bei Leistungsverstärkern die Netzspannung eine entscheidende Rolle, da deren Höhe die maximale Ausgangsleistung beeinflusst.

Eine korrekte Klirrfaktorangabe eines Verstärkers muss also wie folgt aussehen:

Max. 0,1 % THD+N
bei 2 x 1000 W an 4 Ω reell,
beide Kanäle belastet 20 Hz...20 kHz
Netzspannung 230 V

Max. 0,005 % THD+N
bei 2 x 100 W an 4 Ω reell,
beide Kanäle belastet 1 kHz
Netzspannung 230 V

Unter THD+N (Total Harmonic Distortion plus Noise) versteht man die genaue Definition des Messwerts, wie er mit einem Standard-Klirrfaktormessgerät gemessen wird. Bei diesen Messgeräten wird nur die Messfrequenz, mit der das zu messende Gerät beaufschlagt wird, herausgefiltert, und es werden sämtliche gemessenen Restspannungen bewertet. Das heißt, Reste vom Netzbrumm sowie das Rauschen der Elektronik werden mit bewertet, deshalb +N (plus Geräusch). Ausschließlich THD wird selten angegeben und kann nur mit digitalen Audio-Analysern oder Spektrum-Analysern ermittelt werden.

Intermodulation

Die nächsten Störgrößen neben den harmonischen Verzerrungen sind die „Intermodulationsverzerrungen“ und die „transienten Intermodulationsverzerrungen“.

Unter den Intermodulationsverzerrungen versteht man Störspannungen, die bei der Verstärkung von mehreren Frequenzen entstehen. Sie entstehen zum Teil aus Frequenzgemischen von Grund- und Oberschwingungen und reihen sich nicht immer in das harmonische Raster der Oktaven ein.

Im Gegensatz zu den harmonischen Verzerrungen wird der Verstärker bei diesen Messungen mit 2 genau definierten Signalen mit 300 Hz bzw. 500 Hz sowie 19 kHz (Sinus) für die Messung nach SMPTE, 19 kHz sowie 20 kHz (Sinus) für die Messung nach CCIF oder mit einem Gemisch aus einem 15-kHz-Sinussignal mit

einem überlagerten 3-kHz-Rechtecksignal für die DIM-100- oder DIM-60-Messung angesteuert. Die Messungen nach SMPTE und CCIF sind Differenztonmessungen, also Messungen, um die Störsignale, die durch ein Frequenzgemisch hervorgerufen werden, zu bewerten.

Bei den DIM-Messungen steht 100 bzw. 60 für die nach oben begrenzte Bandbreite des Gesamtmeß-Signals in kHz. DIM/TIM steht für Dynamic/Transient Intermodulation Distortion. Hier wird das Zusammenspiel zwischen einer festen Frequenz (15 kHz) und Impulsen (3-kHz-Rechteck) getestet, bzw. es werden die dabei entstehenden Störspannungen bewertet.

Die DIM/TIM-Messung ist die härteste Bewertung für einen Verstärker, da es bei der Verarbeitung von diesem Frequenzgemisch auf die Dimensionierung jeder Stufe ankommt.

Wie kommt es zu den gefürchteten (transienten) Intermodulationen? Ein Leistungsverstärker besteht aus unterschiedlich schnellen Verstärkerstufen. Die schnellste ist die Eingangsstufe, gefolgt von der Spannungsverstärkerstufe, und das Schlusslicht bildet immer die Leistungsstufe. Mit den heute erhältlichen Audio-Leistungstransistoren ist das Verhältnis nicht mehr so krass wie in den 70ern, aber je nach Schaltungsauslegung kommen die Unterschiede doch deutlich zum Tragen.

Was passiert nun bei einem idealen Impuls? Die extrem schnelle Eingangsstufe lässt ihn mit leicht verringerter Flankensteilheit durch, die Spannungsverstärkerstufen und die nachfolgende Leistungsstufe verschleifen die Flanken des Impulses deutlich. Dies erkennt die sehr schnelle Eingangsstufe sofort über die Gegenkopplung und regelt nach, um das Verschleifen der Impulsflanken zu verhindern. Haben die vorgeschalteten Verstärkerstufen nicht genügend Aussteuerungsreserven, um diesen Ausregelvorgang durchzuführen, kommt es zum Übersteuern der Vorstufe(n).

Weiterhin kann das schnelle Reagieren der Verstärkerstufen und der Gegenkopplung Klingeleffekte in den langsamen Verstärkerstufen auslösen. Diese Effekte können durch die DIM/TIM-Messung aufgedeckt werden. Die Twin-Tone-Messungen SMPTE und CCIF bewerten vorwiegend die Seitenbänder, die durch Oberwellengemische der harmonischen Verzerrungen entstehen. Bei modernen Transistorverstärkern sind diese Messungen uninteressant, da diese Art der Verzerrung sehr gering ausfällt und keine Auswirkung auf den Klang eines Systems hat.

Die Intermodulationsverzerrungen werden über dem Pegel an einer bestimmten Last gemessen. Die korrekte Angabe der Intermodulationsverzerrungen könnte wie folgt aussehen:

Max. 0,03 % TID
bei 2 x 1000 W an 4 Ω reell,
beide Kanäle belastet DIM100
Netzspannung 230 V

Max. 0,001 % TID
bei 2 x 100 W an 4 Ω reell,
beide Kanäle belastet DIM100
Netzspannung 230 V

Die Ausgangsleistung

Die tollsten Leistungsangaben findet man bei Low-Cost-Produkten im Car- und Home-Entertainment sowie bei aktiven Computerlautsprechern. Da werden kleine Aktivboxen für den PC mit sagenhaften 120 W angeboten, die zusammen nicht einmal 1 kg wiegen und keine 20 Euro kosten. Ist das Betrug? – Tja, so darf man das nicht sehen. Wie kommen denn die 120 W zu Stande, sollte man fragen. In der Betriebsanleitung steht gelegentlich eine etwas genauere Angabe, die die Leistung etwas näher beschreibt:

2 x 5 W Sinus, 2 x 60 W Musik

Na ja, schon besser, aber was bedeutet „5 W Sinus“ und „60 W Musik“?

Lassen wir dieses Versteckspielchen.

Es gibt 2 aussagekräftige Leistungsangaben: die Dauerleistung und die Impuls- oder Musikleistung.

Die Dauerleistung ist die maximal abgegebene Leistung eines Verstärkers im eingeschwungenen Zustand unter Abgabe eines Sinussignals an eine definierte Last bei einer festen Netzspannung und einem maximal zulässigen Klirrfaktor, z. B. 1 %. Bei der Dauerleistung muss allerdings die maximal zulässige Abgabedauer für diese Leistungsangabe angegeben werden, um eine exakte Aussage zu treffen. Der Grund ist folgender:

Es gibt unterschiedliche Verstärker für unterschiedliche Belastungsarten, und diese sind sehr unterschiedlich dimensioniert, was das Netzteil, die Leistungsstufe und die Kühlung betrifft. So wird ein Großserien-Hi-Fi-Verstärker, unabhängig von seiner max. Ausgangsleistung, auf die Dauerleistung bei kräftiger Zimmerlautstärke an einem Standardlautsprecher ausgelegt. Das heißt auch noch, er muss nach DIN die maximal mögliche (abhängig von der max. Ausgangsspannung an der Nennlast) Dauerleistung nur 10 Minuten ohne Beschädigung und Abschaltung aushalten. Noch extremer sieht es bei den Hochleistungsverstärkern für die Großbeschallung aus. Manche dieser Geräte können einen Sinusdauernton bei Maximalleistung nur einige Sekunden abgeben bis die Überlastabschaltung oder

eine massive Leistungsreduzierung erfolgt. Ähnliches gilt für die Leistungsverstärker im Car-Hi-Fi-Bereich. Bei Car-Hi-Fi-Geräten wird vorwiegend aus Platzgründen auf eine für Dauerleistung notwendige Kühlung verzichtet. Die Geräte sind für ihre Abgabeleistungen sehr flach und kompakt gebaut. Ein Verstärker für Rufanlagen und Notfallwarnsysteme in Gebäuden muss dagegen auf die zeitlich unbegrenzte Abgabe der angegebenen Dauerleistung ausgelegt werden, um Warnsignale unbegrenzt und dauernd wiedergeben zu können.

Bei der Musikleistung macht man sich das dynamische Verhalten des Netzteils zu Nutze. Leistungsverstärker werden vorwiegend mit unstabilierten Standardnetzteilen mit Trafo, Gleichrichter und Siebelkos oder mit ungerelgten (frei laufenden) Schaltnetzteilen betrieben.

Diese stellen im Leerlauf eine höhere Betriebsspannung zur Verfügung als unter Voll-Last. Durch die meist sehr hohen Siebkapazitäten sind diese Netzteile aber in der Lage, kurzzeitig hohe Ströme mit der Leerlaufspannung abzugeben. Dadurch ist der Verstärker kurzzeitig in der Lage, eine in Bezug auf die Dauerleistung deutlich höhere Spitzenleistung abzugeben. Abhängig von der „Nachgiebigkeit“ des Netzteils in Bezug auf die Dauer des bewerteten Signals fällt diese Spitzenleistung unterschiedlich hoch aus. Da haben wir es!

Wir brauchen also nur ein weiches Netzteil und ein sehr kurzes Bewertungssignal, und schon bekommen wir bei einer geringen möglichen Dauerleistung eine hohe Musikleistung. Wenn wir diese dann noch bei Maximalverzerrung messen (also mit Rechtecksignalen am Ausgang), dann kommt ein richtig schöner, großer Wert für die Musikleistung zusammen.

Lachen Sie nicht, das wird leider in dieser Form praktiziert. Man kann es auch noch weiter treiben, indem man die Ausgangsspannung an 16 Ω misst und auf 4 Ω umrechnet. Ach ja, auch die Netzspannung ist natürlich noch eine Möglichkeit, den Messwert nach oben zu beeinflussen. Wie wir sehen, sind auch bei der Leistungsangabe die Möglichkeiten der Schönfärberei gigantisch. Wie aus den Klirrfaktorangaben schon ähnlich bekannt, sieht eine korrekte Leistungsangabe wie folgt aus:

2 x 1600 W Sinus
bei 1 % THD+N min. 1 Minute
an je 2 Ω reell,
beide Kanäle belastet 20 Hz...20 kHz
Netzspannung 230 V

2 x 1000 W Sinus
bei 1 % THD+N min. 10 Minuten
an je 4 Ω reell,
beide Kanäle belastet 20 Hz...20 kHz
Netzspannung 230 V

2 x 600 W Sinus
bei 1 % THD+N min. 60 Minuten
an je 8 Ω reell,
beide Kanäle belastet 20 Hz...20 kHz
Netzspannung 230 V

2 x 1800 W Impulsleistung (10 ms/1 s)
an je 4 Ω reell,
beide Kanäle belastet 1 kHz Burst
Netzspannung 230 V

2 x 2200 W Impulsleistung (10 ms/1 s)
an je 2 Ω reell,
beide Kanäle belastet 1 kHz Burst
Netzspannung 230 V

Der Frequenzbereich ist bei der Leistungsangabe von Verstärkern nicht mehr so wichtig, da der Frequenzgang moderner Geräte weit über den Hörbereich hinaus geht und die Ausgangsleistung über diesen Bereich konstant bleibt. Eine Ausnahme bilden hier eigentlich nur Röhrenverstärker und ELA-Verstärker für Rufanlagen und Notfallwarnsysteme, da diese Geräte meist einen Ausgangsübertrager besitzen.

Frequenzgang

Ein Kleinkind hört im Normalfall 20 Hz bis 20 kHz. Ein 40-jähriger Mensch vielleicht 30 Hz bis 15 kHz. Ein 60-jähriger...? Ein Verstärker muss also 20 Hz bis 20 kHz ohne Begrenzung oder Pegelabfall übertragen können, um Sprache und Musik realistisch über einen Lautsprecher wiedergeben zu können. Ja! Dieser Satz ist quasi Religion. Mehr als 20 kHz als Grund- oder Oberschwingung kann unser Gehör nicht wahrnehmen. Es gibt aber eine Ausnahme für die Notwendigkeit einer höheren Bandbreite:

Bei mehrkanalig aktiven PA-Systemen oder bei sonstigen aktiven Lautsprechern müssen zum Teil die Frequenzgänge von Hochtonhörnern mit Filtern korrigiert werden, die zur Korrektur Anhebungen im Frequenzbereich zwischen 20 kHz und 30 kHz benötigen.

Ein weiterer, provokativer Grund ist noch die vollständige elektronische Verstärkung von 24 Bit/192 kHz gesampelten „Audio-signalen“ mit 96 kHz. Für Messzwecke ist das vielleicht notwendig, für Musik und Sprache brauchen wir das eigentlich nicht, denn bei 20 kHz ist Schluss.

Mit den modernen Schaltungstechniken und Bauteilen lassen sich heute problemlos Verstärker mit Bandbreiten bis in den Megahertzbereich bauen. Um diese als besonders gut und hochwertig anzupreisen, sind die Marketingabteilungen sehr kreativ. Die praktische Notwendigkeit endet aber, wie schon gesagt, bei ca. 30 kHz.

Die Anstiegszeit oder Slewrate

Mit diesem Wert wird die maximal mögliche Flankensteilheit bei der Übertragung eines Rechtecksignals am Ausgang in V/ μ s angegeben. Dieser Wert ist eine reine Messgröße ohne direkte Bedeutung. Durch die Bandbreite eines Verstärkers ist eigentlich deutlich gesagt, ob er schnell oder langsam ist. Die Slewrate hängt logischerweise sowohl von der max. möglichen Ausgangsspannung als auch von der Bandbreite ab. Je höher die mögliche Ausgangsspannung z. B. bei 20 kHz ist, umso höher ist auch die Slewrate. Eine für die Bewertung eines Verstärkers unwichtige Größe.

Welche Angaben sind für mich wichtig?

Bei professionellen Verstärkern für PA- und Gebäudebeschallung steht immer die Leistung als Auswahlkriterium im Vordergrund. Bei ELA-Verstärkern sind Frequenzgänge von 50 Hz bis 15 kHz gefordert, bei PA-Anlagen sind es meist 30 Hz bis 30 kHz. In Kinos liegt die untere Grenze tiefer, um Explosionen und Erdbeben etc. besser wiedergeben zu können. Der Klirrfaktor sollte natürlich so niedrig wie möglich sein. 0,01 % bei Voll-Leistung über die komplette Bandbreite ist bei PA-Verstärkern schon Luxus und eigentlich nicht notwendig. Bei ELA-Verstärkern sind 1 % Klirrfaktor bei Nennleistung und 1 kHz Standard. Meist klirren die Geräte deutlich weniger.

Bei Hi-Fi-Verstärkern gestaltet sich die Sache etwas schwieriger. Bei Großserengeräten liegt die Leistung zwischen 50 und 200 W pro Kanal bei Klirrfaktoren zwischen 0,01 und 5 %, je nach Ausgangsleistung und Frequenz. Bei modernen Hi-Fi-Verstärkern geht man wieder weg von den extrem klirrarmen, stark gegengekoppelten Endstufen, um dem Klang mehr Charakter zu verleihen.

Bei High-End-Geräten sieht die Sache zum Teil noch extremer aus, da hier auch sehr spezielle Bedürfnisse befriedigt werden sollen. Bei Hi-Fi- und High-End-Anwendungen ist es am besten, die technischen Daten nicht zu beachten und die Kette in verschiedenen Konstellationen ausgiebig Probe zu hören. Sicher benötigen manche Lautsprecher mehr und manche weniger Leistung. Aber auf der anderen Seite vertragen sich nicht alle Extremwerte miteinander. Also, gut beraten lassen und ausprobieren. **ELV**

Quellen:

Audio Measurement Handbook
Audio Precision, Inc.
Bob Metzler