

Klirrfaktoren messen

Mit einem Oszilloskop kann man bestenfalls Verzerrungen im einstelligen Prozentbereich identifizieren, alles darunter schwimmt in der sehr begrenzten Vertikalauflösung. Wer es genauer wissen will, benötigt spezielle Meßgerätschaften. Früher war dies eine Domäne die ausschließlich den Profis vorbehalten blieb bei Anschaffungspreisen zwischen einem Mittelklassewagen und einem Eigenheim. Glücklicherweise kann man heutzutage mit eher bescheidenen Amateurmitteln in Dimensionen vorstoßen, die noch vor 20 Jahren undenkbar erschienen. Rauschabstände von 100dB und mehr sowie Klirrfaktoren weit unterhalb 0,01% lassen sich inzwischen mit Bordmitteln darstellen. Dazu braucht man einen PC, eine USB-Soundkarte und eine Software, z.B. ARTA. Die Soundkarte sollte mit 24-bit/192kHz, einem symmetrischen, hochohmigen Eingang und einem Dynamikumfang von >110dB daher kommen. Den symmetrischen Eingang benötigt man spätestens zur Messung von BTL-Ausgängen. Ein zwischen geschalteter symmetrischer Abschwächer von 30-40dB paßt das Lautsprechersignal an den Soundkarteneingang an. Dazu ein paar passende Kabel, und man kann Klirrfaktoren, Klirrspektren, Rauschspannungen und Frequenzgänge messen und anschließend die screenshots zur Dokumentation verwenden.

Klirrfaktor (THD) in Class-D-Verstärkern

Erste Verzerrungsmessungen an Prototypen liefern oft Werte weit oberhalb der Datenblatt-Spezifikationen oder der Erwartungswerte die von Spice-Simulationen geliefert werden. In solchen Fällen hat man es meist mit parasitären Effekten zu tun, die in den üblichen Schaltplänen nicht auftauchen und von Simulationen nicht ohne weiteres Zutun modelliert werden. Jede Nichtlinearität im Signalweg liefert ihren Beitrag zu harmonischen Verzerrungen. Die Klirrfaktormessung präsentiert dann die Summe des Ganzen, ohne aufzuschlüsseln wo die einzelnen Anteile eigentlich herkommen. So bleibt es dem Entwickler überlassen, die Störquellen im Einzelnen auf zu dröseln.

Eine erste Übersicht liefert die Messung des THD über der Aussteuerung. Im zweiten Schritt liefert die Spektralanalyse Aufschluß über die anteiligen Störkomponenten und erlaubt damit Rückschlüsse auf mögliche Ursachen.

K3-Verzerrungen

Bekannte Fehlerquellen sind

-MLCCs ohne Gleichvorspannung (DC-bias) die mit nennenswerter Audio-Wechselspannung beaufschlagt werden. Austauschen gegen COG- oder U2J- oder Film-Kondensatoren.

-Drosseln im LC-Ausgangfilter. Es gibt große Unterschiede zwischen verschiedenen Typen. Zudem können die Verzerrungen drastisch zunehmen bei erhöhter Signalfrequenz. Am besten sind Ferrit-Topfkerne mit großem Luftspalt / kleiner Induktivität. Hier gilt „viel hilft viel“, d.h. je massiver der Kern, desto geringer die Verzerrungen.

-Unzureichende Aussteuerbarkeit etwaiger OPV-Vorstufen.

K2-Verzerrungen

Ist der k_2 -Anteil deutlich über dem Erwartungswert, dann muss man nach einer unsymmetrischen Verzerrungsquelle suchen, denn nur diese produzieren Störanteile mit der doppelten Frequenz des Nutzsignales. Hinlänglich bekannte Kandidaten für diesen Typus wären:

-Die Versorgungsspannung eines Vollbrückenverstärkers. Mit jeder positiven oder negativen Halbwelle des Signales bricht die Betriebsspannung etwas ein, ein Effekt, der naturgemäß über der Aussteuerung zunimmt. Auf diese Weise wird der Betriebsgleichspannung eine Wechselfspannung der doppelten Signalfrequenz überlagert. Auch der dickste Elko kann dies nicht 100%-ig verhindern. Und da die Versorgungsspannungsunterdrückung eines Verstärkers nicht unendlich ist, addiert sich ein gewisser Bruchteil zum Nutzsignal. Dabei nimmt in den meisten Fällen die Versorgungsspannungsunterdrückung über der Frequenz ab, also ist der „worst case“ am oberen Ende des Übertragungsfrequenzbandes zu finden.

-Verseuchte Mittenspannung bei einfach versorgten OPVs. Diese wird aus der mehr oder weniger gestörten Betriebsspannung über Spannungsteiler und Tiefpass-Filterung erzeugt. Die Filterwirkung ist begrenzt, ausreichende Kapazitäten wären nicht nur voluminös sondern würden auch irgendwann die power-up-Prozedur beeinträchtigen. In solchen Fällen ist es unumgänglich, die Eingänge symmetrisch auszuführen. Sie müssen aber nicht von einer symmetrischen Quelle angesteuert werden. Es genügt die symmetrischen Eingangsleitungen direkt mit der (a-)symmetrischen Quelle zu verbinden.

-Magnetische Verkopplung. Durch den/die Stützkondensator/en fließt der Wechselstromanteil, den die Vollbrücke aufnimmt. Wobei sich dieser beim Class-D-Verstärker zusammensetzt aus Stromimpulsen bei Taktfrequenzen von mehreren 100kHz, die dann noch moduliert werden vom niederfrequenten Laststrom. So entsteht ein amplitudenmodulierter Hochfrequenzstrom durch den Stützkondensator, der magnetisch einkoppeln kann auf naheliegende Vorstufen. Auf der Sendeseite verläuft die Stromschleife also zwischen Stützkondensator und Versorgungsanschlüssen der PWM-Brücke. Das ausgestrahlte Magnetfeld hat jetzt eine hochfrequente Grundwelle von mehreren 100kHz, moduliert mit der 2.Oberwelle der Signalfrequenz, ist also vergleichbar einem AM-Sender im Mittelwellenbereich. Tückischerweise hat ein solches HF-Magnetfeld eine viel höhere Reichweite als eines, das von einer reinen NF-Quelle ausgesendet wird. Damit haben wir ein Problem, dass es so bei linearen Audio-Verstärkern gar nicht gibt.

Der zugehörige Empfänger und Demodulator findet sich dann z.B. in den OPVs auf der Eingangsseite. Die Stromschleife vom OPV-Ausgang durch den Eingang des Class-D-IC kann ausreichen, um genug HF einzukoppeln, so dass der OPV-Ausgang demoduliert und ein meßbares k_2 -Signal beiträgt. Abhilfe schafft hier ein möglichst kleinflächiges Layout der Sende- und Empfangstromschleife. Darüberhinaus ist die besänftigende Wirkung eines Dämpfungsferrites, eingefügt in die Empfangsschleife nahe dem OPV-Ausgang, immer wieder verblüffend. Ersatzweise tut es auch ein Widerstand zwischen 100 und 1000Ohm. Keine Abhilfe ist in diesem Umfeld zu erhoffen von speziellen Stützkondensatoren mit extrem niedrigem ESR, parallel geschalteten MLCCs oder Filmkondensatoren - der Strom durch der Sendeschleife bleibt derselbe.

-Zirkulierende Ströme erzeugen selbst in großen Kupferflächen Spannungsgefälle. Diese mögen weit unterhalb eines mV liegen, doch auch das kann schon ausreichen, um einen angepeilten Störabstand von 100dB oder mehr zu vereiteln. Von daher sind Erdschleifen unbedingt zu vermeiden, der Eingangsbereich sollte eine eigene GND-Fläche erhalten, die nur an einer Stelle mit der GND-Fläche des Leistungsteils verbunden wird.

-MLCCs mit Gleichvorspannung (DC-bias) und nennenswerter Audio-Wechselspannung. Austauschen gegen COG- oder U2J- oder Film-Kondensatoren.

-Zur Lokalisierung solcher Störungen ist es hilfreich, die Verzerrungen mit und ohne Lastwiderstand zu vergleichen, und zwar nicht nur am Ausgang des Verstärkers, sondern auch an etwaigen Eingangsstufen. Bei Steroverstärkern hat man außerdem die Möglichkeit, einen unbelasteten Kanal zu messen und dann den anderen Kanal wahlweise mit und ohne Last zu fahren. Dies sollte keine zusätzlichen Verzerrungen verursachen.

Andere Verzerrungen

THD-Messungen können auch verfälscht werden durch äußere Störungen. Das Klirrspektrum zeigt dann Frequenzen an, die nicht zum Obertonspektrum gehören, z.B. $k_1=100\text{Hz}$, $k_2=200\text{Hz}$, $k_3=300\text{Hz}$... $k_{20}=2000\text{Hz}$. K_{20} von 100Hz würde also als erhöhter K_2 von 1kHz dargestellt werden. Bei laufender Spektralanalyse sollte man diese Störungen minimieren. Folgendes hat sich bewährt:

- USB-Soundsystem betreiben mit Laptop, netzgetrennt*
- Oszilloskop und anderes netzversorgtes Messequipment trennen während der Messung*
- Audio-GND verbinden mit Schutzleiter (PE)*
- Versorgung über lineares Labornetzteil oder Akkus/Batterien*
- GND-lift-Schalter an der Soundkarte in die richtige Position bringen*
- in Härtefällen den ganzen Laboraufbau auf PE-geerdetem Alublech installieren*

Zusätzlich kann man die Signalfrequenz ein wenig verstimmen, so dass die Oberwellen sich nicht mit den externen Störungen überdecken.