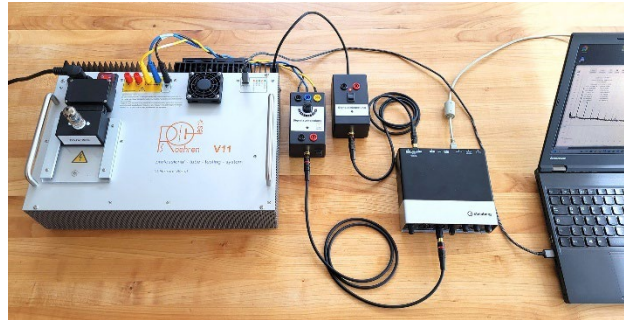


Verzerrungsmessungen mit dem Roetest

Teil 2: Messungen

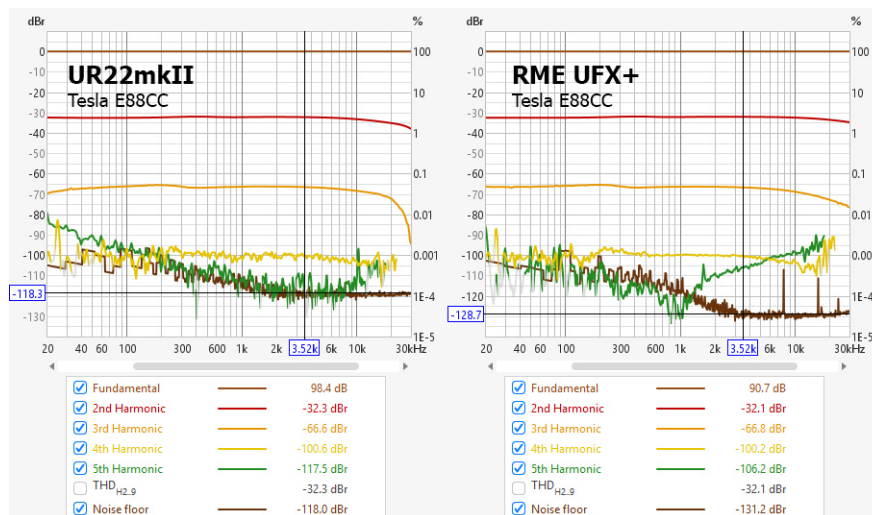
Andreas Gebert – Berlin, Mai 2026

Im ersten Teil dieses Berichts ist die Entwicklung von Schaltungen beschrieben, mit denen es möglich ist, Wechselspannungssignale in das Roetest-Gerät einzukoppeln, durch eine Elektronenröhre zu verstärken und wieder auszukoppeln. Im zweiten Teil soll an Beispielen aufgezeigt werden, welche Messmöglichkeiten sich damit eröffnen.



Vergleich mit einem professionellen Interface

Als zentrales Gerät zur Erzeugung von Testsignalen und zur Messung der erzeugten Wechselspannungen dient ein einfaches Audio-Interface, z.B. ein Steinberg UR22mkII. Es wird über USB 2.0 an einen PC angeschlossen und arbeitet als DA-Konverter, als Mikrofonverstärker und als AD-Konverter. Momentan ist es für 50–150 € erhältlich. Da ich auch ein professionelles Audio-Interface besitze, ein RME Fireface UFX+ für ehemals >2000€, habe ich die beiden Geräte unter identischen Bedingungen in meinem Messaufbau verglichen. Das Verzerrungsspektrum (links) zeigt,



das Profigerät einen um mindestens 10 dB besseren Rauschhintergrund (Noise floor) hat, der vor allem im Bereich > 2kHz erkennbar ist. Unterhalb von 1 kHz wird das Rauschen durch das Roetest-Gerät, die Röhre und wohl auch durch Störungen im

Netzstrom gebildet, so dass der Unterschied zwischen den Interfaces verdeckt wird. Entscheidend ist aber, dass die gemessenen Verzerrungen von K2 bis K4 praktisch identisch verlaufen.

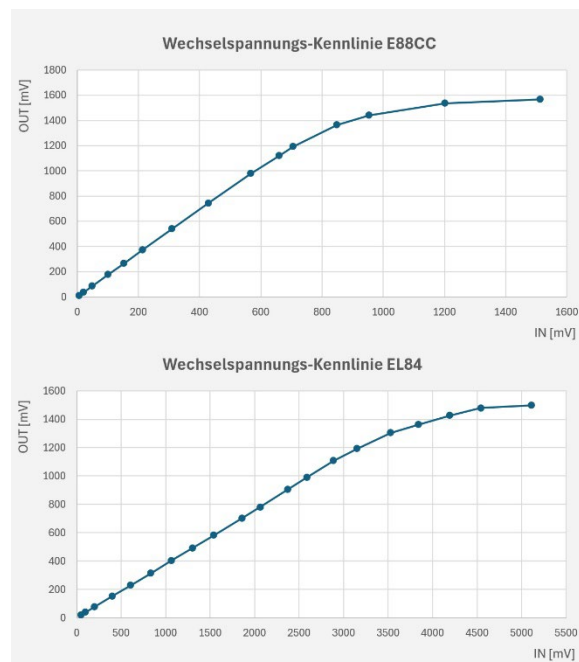
Im Frequenzgang (hier nicht gezeigt) hat das Profigerät einen minimal geringeren Abfall zu den tiefsten (20Hz) und höchsten Frequenzen (>20kHz) hin. Insgesamt halte ich das einfache Steinberg-Interface für diese Art von Messungen für vollkommen ausreichend. Der kleinere Dynamikbereich des einfachen Interfaces sollte aber durch optimale Wahl der Arbeitswiderstände in der Auskopplung so gut wie möglich genutzt werden. Für die Praxis bedeutet das

zum Beispiel, ein ausgekoppeltes Sinussignal möglichst auf etwa 10dB unter Maximalpegel (= -10dBFS) auszusteuern.

Zur Ansteuerung des Interface, zur Generierung der Testsignale und zur Analyse empfehle ich die freie, kostenlose Software REW. Nach vielen Jahren der Weiterentwicklung bietet REW mittlerweile fast alles an Messoptionen, was man sich wünschen kann. Die letzten Versionen sind sogar auf deutsche Sprache umschaltbar. REW läuft problemlos parallel zur Roetest-Software auf dem selben Laptop.

Wechselspannungs-Kennlinien

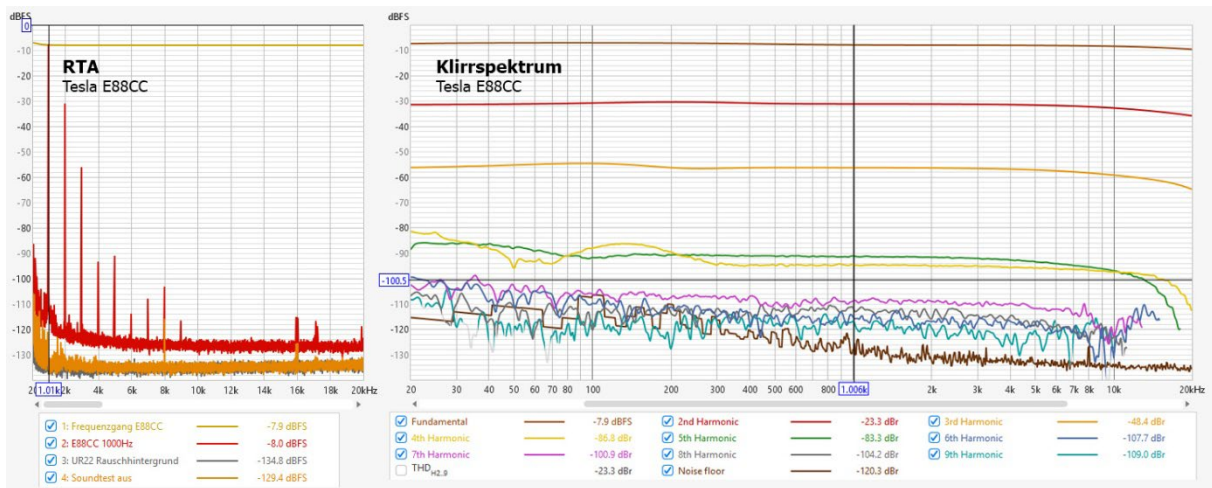
Im einfachsten Fall bildet die Kombination aus REW-Software und Audio-Interface einen beliebig einstellbaren Sinusgenerator. Mit ihm habe ich für verschiedene Röhren den Zusammenhang zwischen eingespeister und ausgekoppelter Spannung bestimmt, sozusagen die Wechselspannungs-Kennlinie. Die Eingangsspannung wurde mit einem Multimeter am rot-schwarzen Buchsenpaar der Einkopplungsbox abgegriffen. Die Ausgangsspannung könnte man mit einem zweiten Multimeter an der Auskopplungsbox messen; etwas einfacher ist es, die REW-Software auf Volt zu kalibrieren. Die abgelesenen Messwerte wurden in eine Excel-Tabelle eingetragen und damit auch die Diagramme erstellt. Es zeigt sich, dass die E88CC-Doppeltriode bis zu einem Eingangssignal von etwa 700mV linear verstärkt, die EL84-Pentode bleibt bis etwa 3V linear. Es muss aber darauf hingewiesen werden, dass es bei beiden Röhren im oberen linearen Bereich zu deutlichen Verzerrungen kommt, die sich nur nicht in der Kennlinie zeigen. Die maximale Ausgangsspannung von etwa 1,5V ist keine Eigenschaft der Röhren, sondern wurde von mir durch die Wahl des Arbeitswiderstands (plus -12dB-Schalter bei der EL84) so eingestellt, dass die maximale Eingangsspannung des Interface gerade unterschritten wird.



Harmonische Verzerrungen

Wird eine Röhre mit einer reinen Sinus-Wechselspannung von z.B. 1000Hz angesteuert, so verstärkt sie diese Frequenz, erzeugt aber zusätzlich Oberwellen. Die ganzzahligen Vielfachen werden als „Harmonische“ bezeichnet und sind wohl entscheidend für den subjektiven Klangeindruck von Röhrengeräten. Zur Messung der harmonischen Verzerrungen steht in der REW-Software ein „real time analyzer“ (RTA) zu Verfügung. Die Antwort auf ein per REW-Generator eingespeistes Signal wird in Echtzeit als Frequenzspektrum dargestellt.

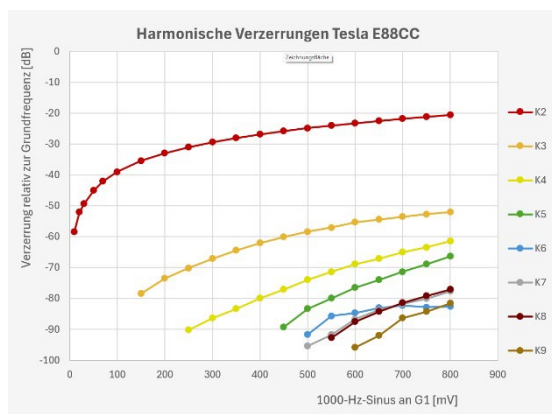
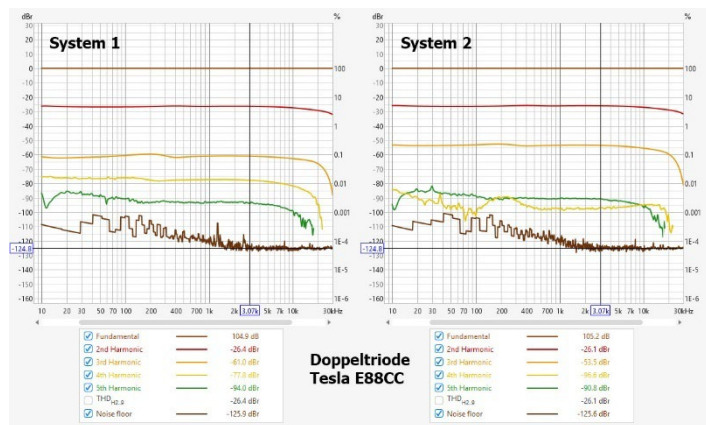
Im Beispiel unten ist dies für eine hoch ausgesteuerte Triode gezeigt. Neben der Grundfrequenz von 1000Hz bei -7,9dB (rot, linkes Diagramm) sind die Peaks der Harmonischen bei 2kHz, 3kHz usw. erkennbar. Das Hintergrundrauschen des Interface ist grau dargestellt, weitgehend überlagert vom Grundrauschen des Roetest-Geräts (orange).



Zur Messung des Frequenzgangs wird die eingespeiste Sinusfrequenz von der REW-Software von z.B. 10Hz bis 96kHz durchfahren und für jede Frequenz der Pegel dieser Grundfrequenz gemessen („Fundamental“) sowie die Pegel der Harmonischen und des Rauschens. In den neueren Versionen wird als Farbkodierung der Harmonischen von den REW-Entwicklern interessanterweise die übliche Widerstandskodierung der Elektronik verwendet.

Die Messanordnung erlaubt es, Harmonische bis zu K9 im Frequenzverlauf zu bestimmen (Klirrspektrum) und das Rauschen mindestens bis zu -120dB. Anzumerken ist, dass die Höhe der Harmonischen ganz wesentlich von der Aussteuerung der Röhre, aber auch vom Arbeitspunkt (Ruhestrom) und der Anodenspannung abhängt. Es ergibt sich ein weites Feld an Messmöglichkeiten, in dem es nach meiner Einschätzung vor allem wichtig ist, unter definierten, immer gleichen Bedingungen zu arbeiten.

Für meine Sammlung von Röhren der E88CC-Familie zeigte sich beispielsweise, dass jeder Röhrentyp und fast schon jedes Exemplar einen eigenen, charakteristischen Fingerabdruck im Klirrspektrum besitzt. Als Beispiel sei hier gezeigt, dass die beiden Trioden einer einzelnen Doppeltriode durchaus recht verschiedene Harmonische erzeugen können.

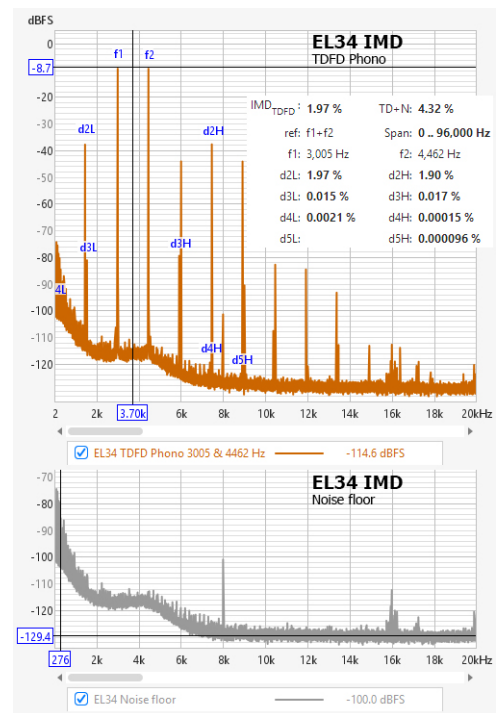


Bei ansteigendem Eingangssignal nimmt der Anteil an Harmonischen zu, die Röhre fängt immer stärker an zu „klirren“. Dieser signalabhängige Verlauf ist mit der REW-Software im Moment leider nicht automatisiert messbar, weshalb ich es exemplarisch für eine Röhre manuell gemacht habe (links). Die linken Enden der Kurven von K3 bis K9 verschwinden im Rauschen, diese Messpunkte habe ich deshalb im Diagramm weggelassen.

Intermodulationsverzerrungen

Speist man eine Röhre mit nicht nur einer, sondern mit 2 oder mehr Frequenzen gleichzeitig, so entstehen Überlagerungen, sogenannte Intermodulationen. Diese tragen wohl ebenso wie die harmonischen Verzerrungen zum „Röhrenklang“ bei.

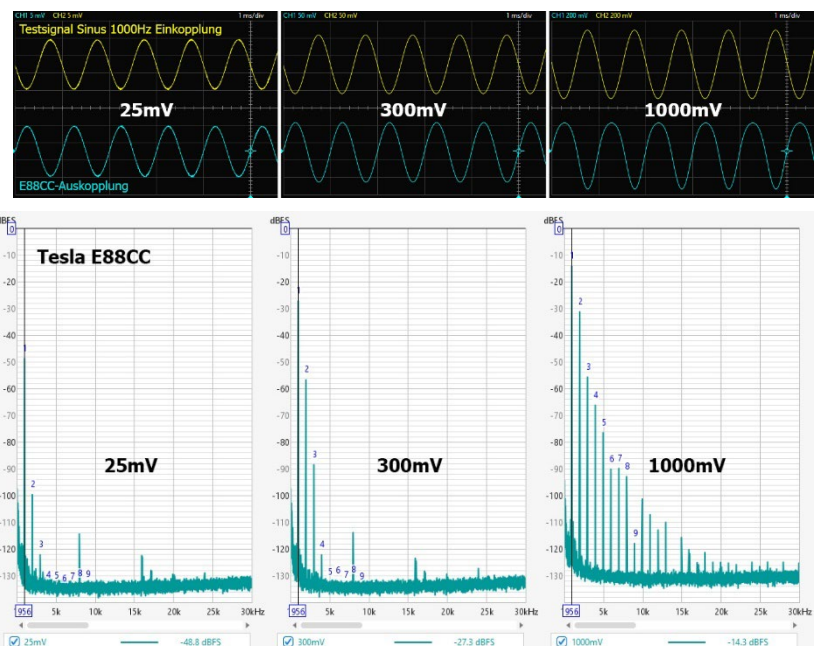
Die REW-Software bietet zahlreiche Möglichkeiten, Intermodulations-Verzerrungen (IMD) zu erzeugen und zu analysieren. Im Beispiel verstärkt eine EL34-Pentode die beiden Frequenzen f1 und f2 (3005 bzw. 4462Hz). Es entstehen zahlreiche Differenztöne (dnL, dnH), die nicht nur auf höheren, sondern auch auf tieferen Frequenzen liegen können. Die IM-Verzerrung wird von der REW-Software hier mit 2% berechnet. Bei abgeschaltetem Signalgenerator wird der Rauschhintergrund deutlich (grau). Er enthält viele niederfrequente Störungen aus den Netztrafos und Peaks bei 8 bzw. 16kHz, von denen ich nicht klären konnte, woher sie stammen.



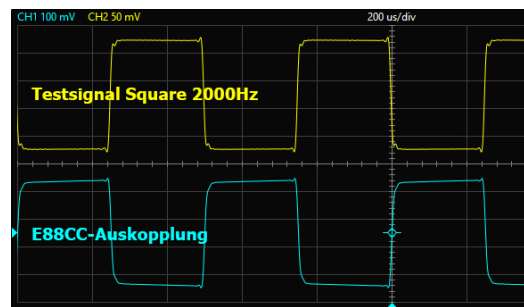
Scope

Verzerrungsdiagramme stellen ja eigentlich nur eine mathematische Analyse von Verformungen des Spannungsverlaufs dar, wie sie v.a. durch die nicht linearen Kennlinien der Röhren entstehen. Mit der (Oszillo-)Scope-Funktion der REW-Software kann der Spannungsverlauf direkt sichtbar gemacht und mit dem Originalsignal verglichen werden.

In diesem Beispiel habe ich das Testsignal direkt auf den 2. Eingang des Audio-Interface zurückgeleitet („Loopback“, gelb). Das ausgekoppelte Signal der E88CC-Röhre (blau) ist wie zu erwarten invertiert. Vor allem bei hoher Aussteuerung (1000mV) ist die Verformung des Sinus klar zu erkennen. Zum Vergleich ist darunter die zugehörige Real-time-Analyse für die 3 Signalstärken abgebildet.

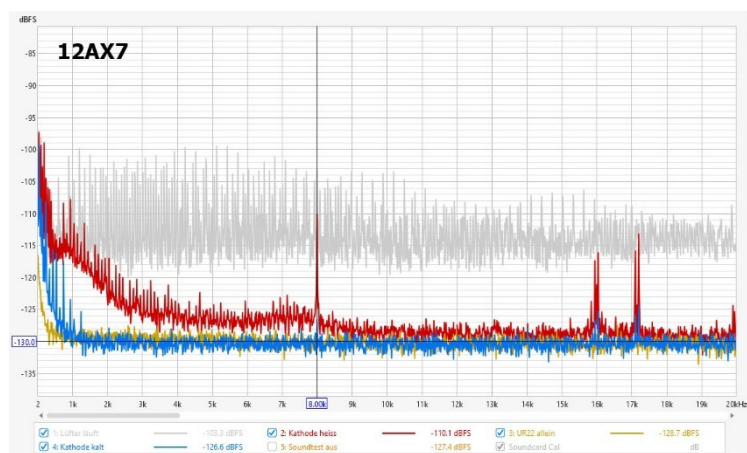


Besonders gut lassen sich Verzerrungen im Scope an einem Rechtecksignal erkennen, da die scharfen Ecken („Transienten“) viele hohe Frequenzen enthalten. Zu meiner Überraschung wurde das vom REW-Generator und dem Audio-Interface erzeugte Square-Signal nahezu perfekt von den Röhren verstärkt. Die meisten Überschwinger und Verrundungen sind bereits im Testsignal enthalten und werden von der Röhre nur präzise wieder gegeben. An Audioverstärkern habe ich da schon einige viel schlechtere Übertragungen gesehen.

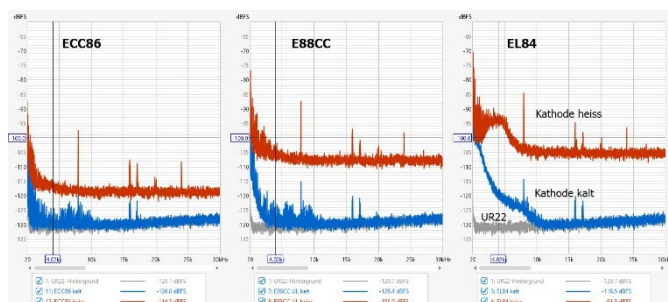


Rauschen

Das Rauschen im Signal der Auskopplung setzt sich aus dem Noise floor des Interface, den Netzteil- bzw. Netzstrom-Störungen des Roetest-Geräts und dem Eigenrauschen der gemessenen Röhre zusammen. Im Beispiel rechts habe ich zunächst nur das Interface mit der Einkopplungsbox verbunden, der Soundtest-Schalter in der Roetest-Software



war aus (orange). Nach dem Zuschalten der Auskopplung (Soundtest ein) steigt bei noch kalter Kathode das Rauschen unterhalb von 1kHz an (blau); es ist der Anteil aus dem Roetest-Gerät. Eine deutliche Zunahme des Rauschens ist dann nach Anheizen der Kathode erkennbar (rot). Die Differenz zwischen roter und blauer Kurve wäre das Eigenrauschen der Röhre, hier mit einem Maximum bei 1kHz und einem Plateau bis 8kHz. Die graue Kurve entsteht, wenn sich die Roetest-Lüfter einschalten – sie stören die Messungen stark.



Verschiedene Röhrentypen zeigen wie zu erwarten ein recht unterschiedliches Rauschverhalten. Es sei aber angemerkt, dass in der Praxis nicht allein das absolut gemessene Rauschen relevant ist, sondern der Signal-Rausch-Abstand.

Der wäre in diesem Beispiel bei der E88CC wesentlich größer als bei der ECC86, weil die E88CC überproportional mehr Signal erzeugt. Interessanterweise zeigt die EL84 bereits bei kalter Kathode ein deutliches Eigenrauschen unterhalb von 10kHz.

Frequenzgang und weitere Messoptionen

Bei der Entwicklung der Schaltungen für die Ein- und Auskopplung habe ich darauf geachtet, dass sich ein möglichst ebener Frequenzgang ergibt, also alle Frequenzen von 10Hz bis 96kHz

mit nahezu gleichem Pegel wiedergeben werden. Mit vielen Röhren liegt der Abfall bei 20Hz (im Vergleich zu 1000Hz) bei unter 1 dB, der Abfall bei 20kHz im Bereich einiger dB. Um einen stärkeren Abfall zu den höchsten Frequenzen hin zu vermeiden, sollte immer im „Hi-Z“-Modus (= Instrumenten-Modus) gemessen werden; dann arbeitet das UR22mkII-Interface mit sehr hohem Eingangswiderstand.

Ob eine Röhre einen wirklich ebenen Frequenzgang hat (wie ich es generell vermute), ist mit meiner Schaltung wohl nicht zu entscheiden – zu viele Faktoren beeinflussen ihn an unterschiedlichen Stellen, wie z.B. die Folien- und Elektrolyt-Kondensatoren. Für Vergleiche kann aber die „Soundcard calibration“ der REW-Software benutzt werden. Mit ihr kann für definierte Bedingungen ein völlig ebener Frequenzgang errechnet werden, in dem sich Unterschiede zwischen verschiedenen Röhren zeigen.

Weitere Funktionen der REW-Software bestehen in der Analyse des Phasengangs, der Impulsantwort, der Step-Response, der Gruppenlaufzeit und der Nachhallzeit RT60. Alle diese Optionen halte ich für wenig relevant bei der Messung von Elektronenröhren; sie sind eher für Lautsprecher und die Raumakustik wichtig.

Musikwiedergabe

Musik- und Sprachaufnahmen können in sehr guter Qualität durch die Messanordnung geleitet und wiedergegeben werden. Dazu wird das Audio-Interface als Ausgabegerät für eine beliebige Audio-Software ausgewählt oder es wird eine Audioquelle (Streamer, CD-Player, Plattenspieler etc.) per Cinchkabel angeschlossen. An die Auskopplungsbox wird z.B. ein Kopfhörerverstärker mit beiden Kanälen gehängt. Die Wiedergabe ist zwar nur Mono, erlaubt aber dennoch den Einfluss der Röhre zu beurteilen, insbesondere wenn man das Audiosignal über einen zweiten Eingang des Verstärkers zum Vergleich direkt von der Quelle zum Verstärker leitet und umschaltet. Auf diese Weise kann sozusagen in Echtzeit beurteilt werden, wie sich eine Variation von Röhren-Betriebsparametern (Arbeitspunkt, Anodenspannung, Aussteuerung etc.) auf den Klang auswirkt. Im Gegensatz zu kompletten Verstärkerschaltungen hört man dabei praktisch nur die Röhre und nicht auch noch den Einfluss von Schaltung, Gegenkopplung oder Übertrager.

Fazit

Der Aufwand, auf der Basis von Helmut Weigls Roetest die beschriebenen Schaltungen und Messanordnungen zu entwickeln, hat sich für mich mehr als gelohnt. Dass so saubere Messungen möglich sind, hatte ich am Anfang nicht erwartet. Ein großes Lob und Riesendank an Helmut Weigl, der ja mit dem Roetest nicht nur ein Super-Gerät entwickelt hat, sondern auch hervorragend rauscharme, hochkonstante Spannungsquellen gebaut hat, ohne die die hier vorgestellten Messungen nicht möglich wären. Wer Fragen oder Anregungen, Verbesserungen oder Kritik hat, kann sich an mich wenden unter Nachname Bindestrich Vorname Affenschwanz t Bindestrich online dot de.

