



ÜBERLEGUNGEN ZUM DESIGN DES ADICON



Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Welche Daten sollten betrachtet werden	2
1.1.1	Frequenzgang	2
1.1.2	Verzerrung.....	2
1.1.3	Rauschen	3
2	Schaltungsbeschreibung.....	5
2.1	Phonovorverstärker	5
2.1.1	Frequenzgang	6
2.1.2	Rauschen	8
2.2	Line-Eingänge.....	12
2.2.1	Volume Control (Lautstärke-Einstellung) gegenüber Gain Control (Verstärkungs-Einstellung).....	12
2.2.2	Empfindlichkeit und Verstärkungsbereich des Line-Eingangs, Signalaussteuerung ...	15
2.3	Kopfhörerausgang	16
2.4	ADC.....	16
2.5	Peak Program Meter	16
2.6	Stromversorgung	17
3	Gehäuse	18
3.1	Frontplatten	18
3.2	Innenansichten	19

1 Einleitung

Es gibt viele Gerüchte darüber, wie Anlogschaltungen für die Audio-Technik, z. B. Entzerrervorverstärker, ADCs, Kopfhörerverstärker usw. zu konstruieren sind. Viele davon sind möglicherweise Märchen, andere dagegen wahr. In diesem White Paper möchte ich gern erklären, warum das Design des ADICON so ist, wie es ist.

Es empfiehlt sich, den Text „[Uwes Ansicht über den Klang von elektronischen Bauteilen und Geräten](#)“ zu kennen, denn dann ist zu verstehen, warum ich mich nicht um besonders teure Widerstände oder Kondensatoren kümmere. Stattdessen stelle ich sicher, dass alle Komponenten ihre Anforderungen entweder praktisch ideal oder - bezogen auf ihre Kosten - angemessen erfüllen. Und Sie werden verstehen, dass ich auf technische Daten und nicht auf irgendeinen speziellen Sound achte, weil es keinen speziellen Sound geben darf. **Dieses Gerät muss neutral sein.**

1.1 Welche Daten sollten betrachtet werden

Technische Daten bedeuten überwiegend: Frequenzgang (bestehend aus Amplitudengang und Phasengang), Verzerrung und Rauschen. Es gibt noch mehr Daten, die gemessen und angegeben werden können, aber ich denke, dass sie für ein Gerät wie dieses in einem Maße vernachlässigbar sind, dass ihre Betrachtung den Rahmen dieses Artikels sprengen würde.

1.1.1 Frequenzgang

Beginnen wir mit dem Frequenzgang: Es ist ziemlich leicht, einen Amplitudengang und einen Phasengang zu erreichen, der weitaus linearer ist als das, was das menschliche Ohr von einem idealen Frequenzgang unterscheiden könnte. Mit einer kleinen Ausnahme: Ein Phonovorverstärker ist mit seinem Entzerrernetzwerk nicht so nah daran, praktisch ideal zu sein, aber darauf werde ich noch zurückkommen. In Zahlen ausgedrückt: Das menschliche Ohr kann ungefähr 20 Hz bis 20 kHz hören. Die Signalquellen, die wir benutzen, also Tonbandgeräte und Plattenspieler, liefern auch nicht mehr Bandbreite oder wenigstens nicht bedeutend mehr.

Der Vorgang des Umwandelns des analogen in ein digitales Signal bedeutet die Notwendigkeit, die Bandbreite wenigstens auf die halbe Abtastrate zu begrenzen, z.B., weniger als 100 kHz bei 192 kHz Samplerate. Andererseits können analoge Schaltkreise einfach und ohne zusätzliche Kosten Signale von 0,1 Hz oder sogar Gleichstrom bis zu mehreren 100 kHz hochlinear verarbeiten. Was wäre also der Vorteil einer Vergrößerung der Bandbreite verbunden mit erhöhten Kosten? Sie werden verstehen, dass ich überzeugt bin: Überhaupt keiner.

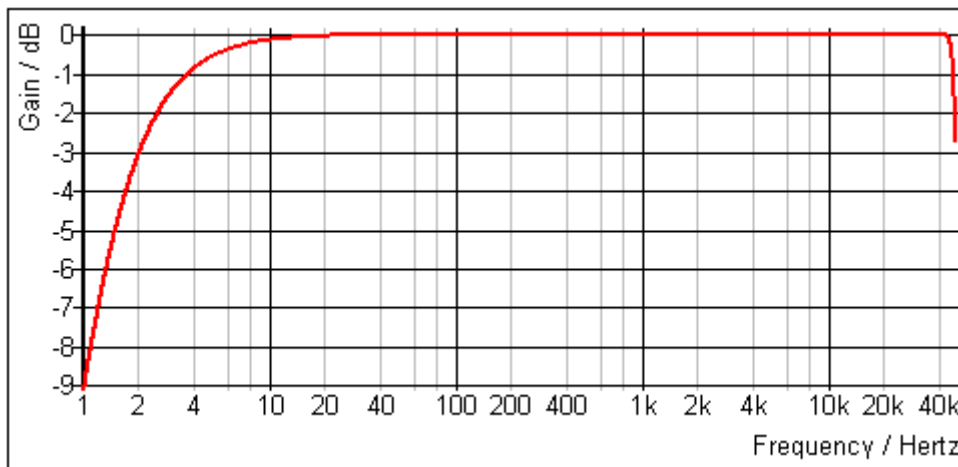


Bild: ADICON Amplitudengang vom Line-Eingang zum digitalen Ausgang @ 96 kHz Samplerate

1.1.2 Verzerrung

Das gleiche trifft auf die Verzerrung oder THD (Total Harmonic Distortion) zu. Das menschliche Ohr kann vielleicht ungefähr 1% Verzerrung in Sinussignalen hören. Unsere Quellen liefern manchmal mehr, manchmal weniger, aber keine ist auch nur im Entferntesten nahe an den 0,001% oder weniger, die ein durchschnittlicher analoger Schaltkreis oder ADC ohne zusätzliche Kosten leisten kann. Noch einmal: Was wäre also der Vorteil einer Verringerung der Verzerrung verbunden mit erhöhten Kosten? Es ist wohl verständlich, dass ich sicher bin: Überhaupt keiner.

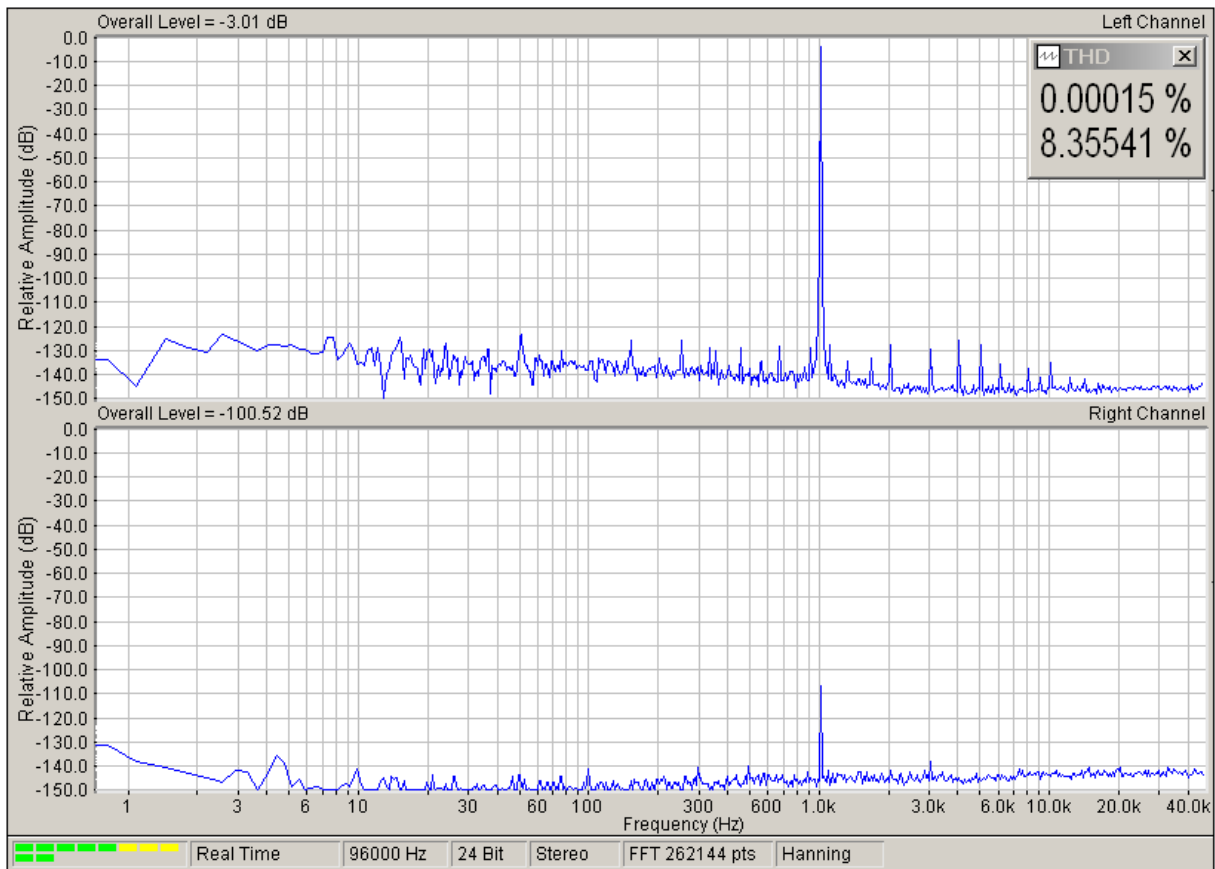


Bild: Klirrfaktor (Total Harmonic Distortion, THD) und Übersprechen vom Line-Eingang zum digitalen Ausgang @ 96 kHz Samplerate

1.1.3 Rauschen

Mit der Reduzierung des Rauschens verhält es sich ein bisschen anders. Das menschliche Ohr hat einen Dynamikbereich von etwa 140 dB. Das ist ein Faktor von 1 : 10.000.000 (10 Millionen!) und das ist mehr, als der beste Audio-ADC liefern kann. Deswegen erscheint es plausibel, einen möglichst großen Dynamikbereich zu fordern, um die Fähigkeiten des menschlichen Ohres auch diesbezüglich zu übertreffen. Unglücklicherweise liefern unsere guten alten Signalquellen wieder einmal nicht ansatzweise so viel. Vielleicht 60 dB, möglicherweise 70 dB, das ist gerade mal ein Faktor von 1 : 1000 bis 1 : 3000.

Der Dynamikbereich des ADICON liegt bei ca. 110 dB (1 : 300.000), wenn die Line-Eingänge verwendet werden. Das ist offensichtlich viel mehr als nötig. Aber mit einer entsprechend guten Signalquelle kann der Dynamikbereich der Signalkette so groß aufrechterhalten werden. Und doch ist dieser hohe Wert immer noch weniger, als das menschliche Ohr hören kann. Deswegen glaube ich, dass ein größerer Wert auf die Verringerung des Rauschens gelegt werden sollte, und ich gebe gerne zu, dass ich dies auch als sportliche Herausforderung betrachte.

Im folgenden Bild ist das auf den hörbaren Frequenzbereich von 20 Hz bis 20 kHz begrenzte Rauschspektrum des ADICON dargestellt. Die Eingänge sind für die Messung niederohmig abgeschlossen worden.

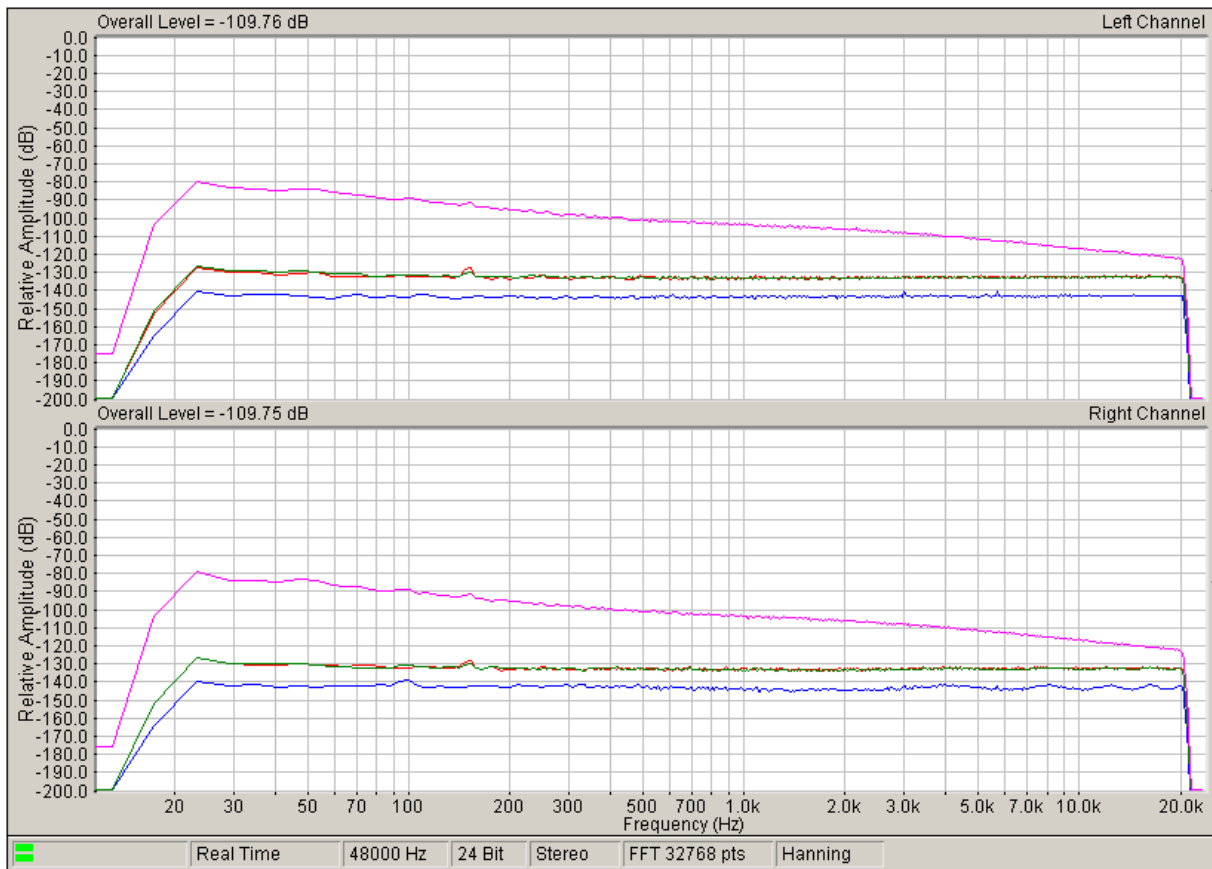


Bild: Dynamikbereich und Rauschspektrum des ADICON, auf 20 Hz bis 20 kHz begrenzt

- Die obere Linie zeigt das Rauschspektrum des MM (Moving Magnet) Phono-Eingangs bei voller Empfindlichkeit (Gain = +20 dB).
- Die beiden Linien darunter zeigen die Rauschspektren der beiden Line-Eingänge, ebenfalls bei voller Empfindlichkeit (Gain = +20 dB). Beide sind, wie zu erwarten, identisch.
- Die untere Linie zeigt das Rauschspektrum eines Line-Eingangs bei geringster Empfindlichkeit (Gain = -10 dB).

Die Angabe „Overall Level“ bezieht sich auf die untere Linie, also bei Gain = -10 dB, und bedeutet, dass der auf den Frequenzbereich von 20 Hz bis 20 kHz bezogene Dynamikbereich des ADICONs ca. 109,7 dB ist. Das ist nicht ganz so viel wie die 111 dB, die mit dem verwendeten ADC lt. dessen Datenblatt bestenfalls erreichbar wären, und liegt daran, dass die analoge Vorstufe und die Anti-Alias-Filterstufe ca. 1,5 dB zum Grundrauschen beiträgt. Bei 0 dB Gain reduziert sich der Dynamikbereich auf ca. 109,0 dB und bei Gain = +20 dB reduziert er sich um knapp 11 dB auf ca. 99 dB. Mehr dazu im Kapitel 2.2.1 „Volume Control (Lautstärke-Einstellung) gegenüber Gain Control (Verstärkungs-Einstellung)“.

Nebenbei gesagt, es ist nicht ganz trivial, Spektren zu erhalten, bei denen einzelne Störfrequenzen, z. B. vom Schaltregler und anderen möglicherweise störenden Schaltungsteilen, noch unterhalb der hier extrem niedrigen Nachweisgrenze liegen. Im Falle des MM-Eingangs mit zusätzlichen +20 dB Gain beträgt die Verstärkung zwischen fast 80 dB und ca. 40 dB und die Nachweisgrenze liegt dementsprechend zwischen -80 dB und -120 dB, so dass die potentiellen Störfrequenzen mehr als ca. 160 dB unter $2 V_{\text{eff}}$, also unter $20 nV_{\text{eff}}$ (0,000.000.02 V) liegen müssen. Im Fall der Line-Eingänge mit +20 dB Gain liegt die Nachweisgrenze bei -132 dB, so dass die Störfrequenzen mehr als 160 dB unter $2 V_{\text{eff}}$ liegen, also kleiner als $50 nV_{\text{eff}}$ sein müssen.

2 Schaltungsbeschreibung

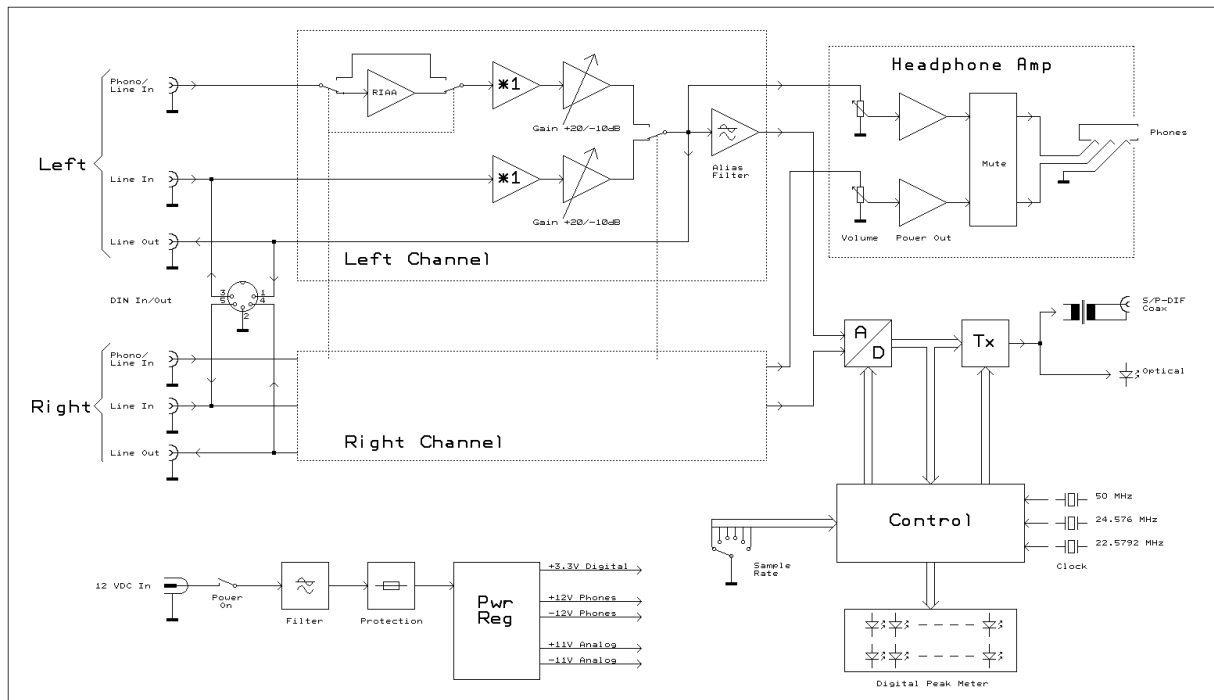


Bild: Blockschtung des ADICON

2.1 Phonovorverstärker

Der Phonovorverstärker, auch Entzerrer-Vorverstärker genannt, kann beim ADICON zu dem Signalpfad von Eingang 1 zugeschaltet werden. Er hat zwei Aufgaben: Er muss die niedrige vom Tonabnehmer kommende Ausgangsspannung verstärken und er muss den nicht-linearen Frequenzgang in einen linearen wandeln bzw. entzerren. Der Frequenzgang, der bei der Aufnahme einer Schallplatte angewendet wird, ist präzise durch die RIAA definiert. Er sorgt dafür, dass hohe Frequenzen sehr viel mehr verstärkt werden als niedrige. Deswegen müssen während der Wiedergabe niedrige Frequenzen sehr viel mehr verstärkt werden als hohe.

Später empfahl die EIA eine andere Entzerrer-Kurve für die Wiedergabe, die einen zusätzlichen 20 Hz Hochpassfilter vorsieht. Ihr Grundgedanke war, dass unter 20 Hz nur Rumpeln auftreten würde und es ratsamer wäre, dieses Rumpeln zu reduzieren, als strikt an der RIAA-Kurve festzuhalten. Aus nicht nur meiner Sicht ist das eine sehr gute Idee. Da ich aber unterstelle, dass der ADICON zusammen mit High-End-Plattenspielern betrieben werden wird, die bedeutend weniger Rumpeln erzeugen, halte ich es für angemessen, die Eckfrequenz des Hochpassfilters deutlich auf etwa 7 Hz zu senken.

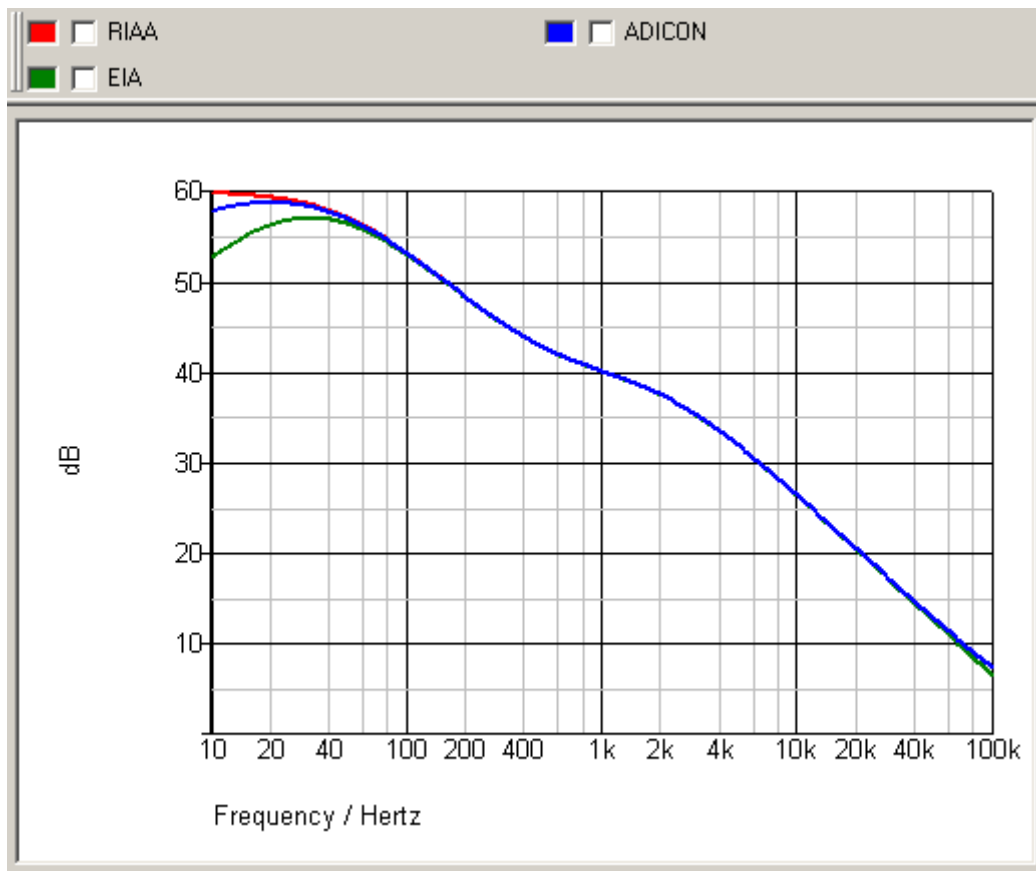


Bild: RIAA-Kurven

Rote Kurve: Der originale RIAA Entzerrungsfrequenzgang

Grüne Kurve: Die EIA Empfehlung (mit zusätzlichem 20 Hz Hochpassfilter)

Blaue Kurve: Der Frequenzgang des ADICON Vorverstärkers (7 Hz Hochpassfilter)

2.1.1 Frequenzgang

Der Phono­vor­ver­stär­ker im ADICON ist ein ein­stu­figer Ver­stär­ker mit Ent­zerr­er-Netz­werk in der Gegen­kop­plung. Dieses Ent­zerr­er-Netz­werk ist ge­nau­es­ten­st be­re­chnet. Der Effekt der Ab­wei­chung der Werte der Bauteile von den Nominalwerten kann einfach berechnet werden. Wegen der Genauigkeit von Metallfilmwiderständen und COG Kondensatoren kann garantiert werden, dass der Frequenzgang nicht mehr als +/- 0,5 dB innerhalb des hörbaren Bereichs (20 Hz bis 20 kHz) vom idealen Frequenzgang abweicht.

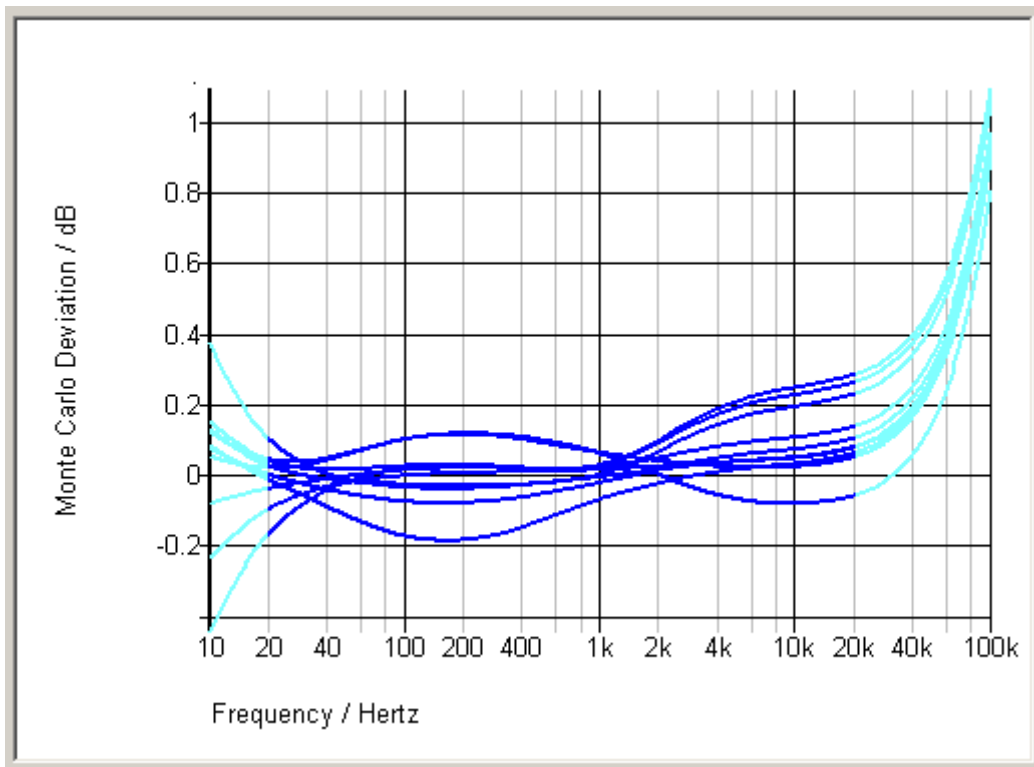


Bild: Abweichung vom angestrebten Frequenzgang bei 10 Durchläufen einer Monte Carlo Simulation mit 5% Kondensatoren und 1% Widerständen

Das Thema der kapazitiven Last: Die zuvor genannten Abweichungen sind klein und vernachlässigbar verglichen mit einem anderen Effekt, der bei Moving Magnet (MM-) Tonabnehmern auftritt. Aufgrund ihrer Eigeninduktivität und -kapazität zeigen diese Tonabnehmer auch eine bedeutsame Dämpfung der hohen Frequenzen und/oder Resonanz. Eine Simulation soll den Effekt erläutern.

Das folgende Schaltbild geht von einem Tonabnehmer mit 470 mH Induktivität und 1,6 k Ω Ohmschem Reihenwiderstand aus. Die kapazitive Last C2 ist die Summe der Windungs- und Kabelkapazität und einer externen Lastkapazität und wird in der Simulation variiert. R2 ist der normale Eingangswiderstand von Phonovorverstärkern.

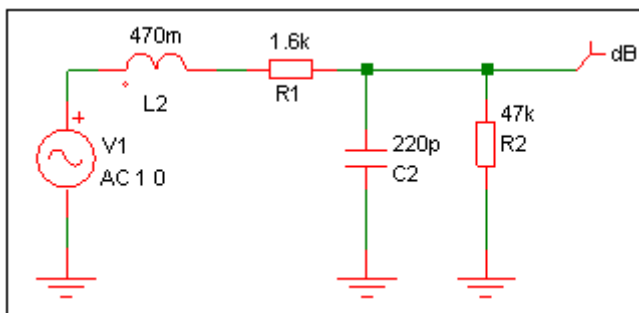


Bild: Äquivalentes Schaltbild für einen MM-Tonabnehmer. C2 setzt sich aus der Wicklungs-, Kabel- und externen Lastkapazität zusammen. R2 ist die Eingangsimpedanz des Vorverstärkers.

Man kann erkennen, dass der Frequenzgang durch C2 beeinflusst wird und optimiert werden kann:

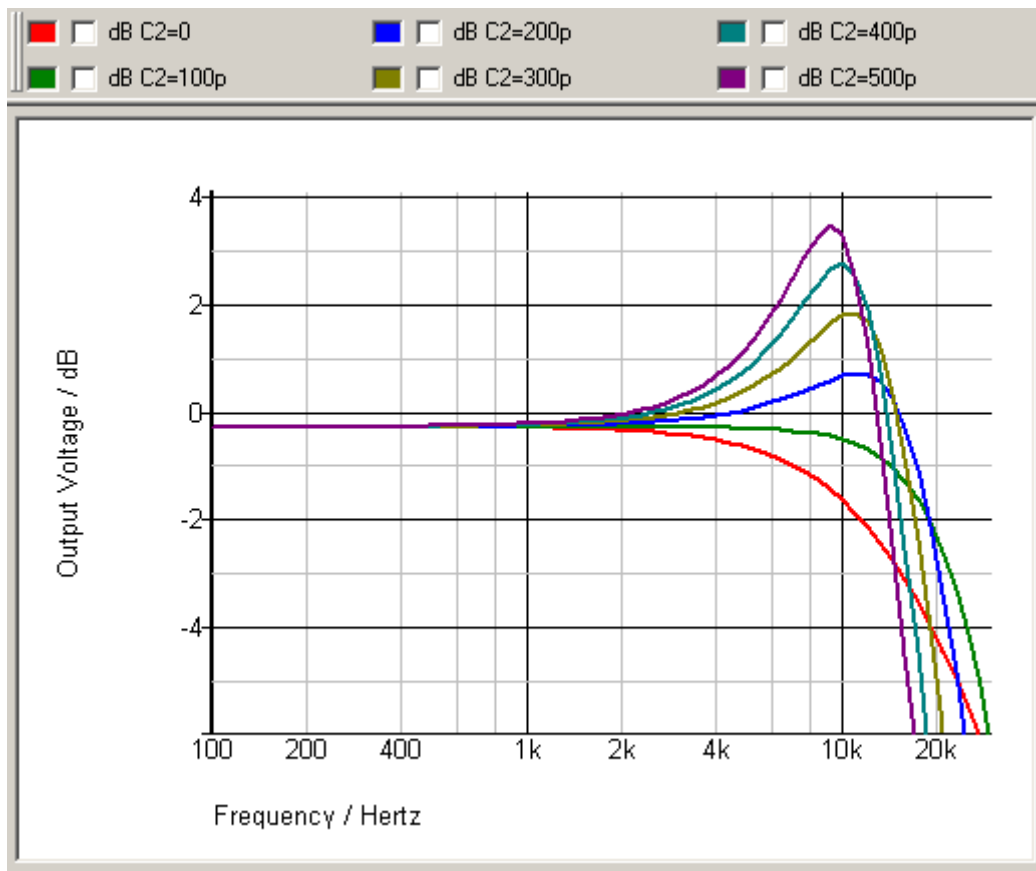


Bild: Unterschiedliche Frequenzgänge als Folge unterschiedlicher Lastkapazitäten

Aus diesem Grund empfehlen Hersteller von Tonabnehmern eine bestimmte externe Lastkapazität für einen optimalen Frequenzgang und aus diesem Grund bietet der MM-Vorverstärker des ADICON so eine einstellbare Lastkapazität.

Unglücklicherweise ist es selbst bei bekannter empfohlener Last nicht trivial, die korrekte Kapazitätseinstellung zu finden, weil a) die Kabelkapazität unbekannt ist und b) einige Plattenspieler bereits die empfohlenen Kapazitäten beinhalten.

Kabelkapazitäten variieren von weniger als 100 pF/m für Kabel mit niedriger Kapazität, die für MM-Tonabnehmer geeignet sind, bis zu mehr als 500 pF/m für einfache Cinch-Kabel. Wenn diese Kapazität unbekannt ist, kann man ohne spezielle Ausrüstung nicht ermitteln, welche externe Lastkapazität für ein optimales Ergebnis eingestellt werden muss.

Einzusehen ist daher auch, dass MM-Phonokabel niemals verlängert werden sollten.

2.1.2 Rauschen

Ich habe ein besonderes Augenmerk auf das Rauschverhalten des ADICON gelegt, weil dies eher kritisch werden kann als viele andere Aspekte im Design des ADICON.

Rauschen wird durch die nicht ideale Eingangsstufe des Vorverstärkers produziert und kann als eine bestimmte Spannung, die am Vorverstärkereingang mit einer angenommen idealen (d.h., rauschfreien) Eingangsstufe anliegt, charakterisiert werden. Deshalb wird es oft als "eingangsbezogenes Rauschen" bezeichnet.

Es scheint auf der Hand zu liegen, so einen Vorverstärker mit kleinstmöglichem Rauschen zu konstruieren. Aber so einfach ist es leider nicht.

Zunächst muss man berücksichtigen, dass nicht nur der Vorverstärker, sondern auch der Tonabnehmer selbst Rauschen produziert. Das liegt am ohmschen Widerstand der Wicklung des Tonabnehmers. Jeder ohmsche Widerstand produziert Rauschen, das sogenannte Wärme- oder Johnson-Rauschen.

Sofern die Eingangsstufe des Vorverstärkers mit bipolaren Transistoren arbeitet, muss man darüber hinaus auch berücksichtigen, dass das Rauschen des Vorverstärkers nicht nur durch die erwähnte Eingangs-Rauschspannung verursacht wird, sondern auch durch einen Eingangs-Rauschstrom, den die Eingangsstufe erzeugt. Wenn der Eingang an Masse angeschlossen wird, erzeugt dieser Strom kein Rauschen, aber wenn der Eingang mit irgendeiner Impedanz (ohmsch, induktiv oder kapazitiv) abgeschlossen wird, entsteht eine weitere Rauschspannung. Der Tonabnehmer, der an den Eingang angeschlossen ist, stellt so eine Impedanz dar.

Folglich ist das gesamte eingangsbezogene Rauschen die Summe

1. des Johnson-Rauschens des Tonabnehmers,
2. der Rauschspannung des Vorverstärkereingangs und
3. dem Rauschstrom des Vorverstärkereingangs multipliziert mit der Impedanz des Tonabnehmers.

Da wir gerade von der Summe sprechen: Wann immer Spannungen von unabhängigen Rauschquellen aufsummiert werden müssen, ist das nicht nur die einfache Summe aller Spannungen ($U_1 + U_2 + \dots + U_N$, genannt arithmetische Summe). Stattdessen ist es die Quadratwurzel der Summe der Quadrate aller Spannungen ($\text{SQRT}(U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_N^2)$), genannt geometrische Summe).

Schlussendlich wird das gesamte eingangsbezogene Rauschen

- a. bewertet durch die RIAA-Kurve des Vorverstärkers, d.h., niedrige Frequenzen werden viel mehr verstärkt als hohe Frequenzen, und
- b. bewertet durch die spektrale Empfindlichkeit des menschlichen Ohres, die für gewöhnlich durch die ANSI-A-Bewertungskurve dargestellt wird.

Als nächstes muss man auch zwischen MM- (Moving Magnet) und MC- (Moving Coil) Tonabnehmern unterscheiden.

Moving Magnet Tonabnehmer haben typischerweise einen Wicklungswiderstand, eine Induktivität und eine Kapazität von 1,5 k Ω , 500 mH und 100 pF, aber das kann stark variieren. In der Praxis spielen alle drei oben genannten Rauschquellen eine Rolle.

Die Spektren des Johnson-Rauschens des Tonabnehmers und der Eingangsrauschspannung des Vorverstärkers sind beide weiß. Aber das Spektrum der durch das Stromrauschen verursachten eingangsbezogenen Rauschspannung ist nicht weiß: Bei niedrigen Frequenzen wird es vom Wicklungswiderstand dominiert, bei hohen Frequenzen von der Wicklungsinduktivität.

Zusammenfassung:

- Man kann das Johnson-Rauschen des Tonabnehmers nicht durch die Schaltung des Vorverstärkers beeinflussen oder reduzieren.
- Man hat konstruktiv Einfluss auf die Rauschspannung und den Rauschstrom des Vorverstärkereingangs und dadurch Möglichkeiten zur Optimierung.
- Besonders wegen der geometrischen Summation ist es nur wenig sinnvoll, großen Aufwand zu betreiben, um das Eingangsrauschen des Vorverstärkers weit unter das Johnson-Rauschen des Tonabnehmers zu verringern.

In der Praxis ist es offensichtlich sinnvoll, einige Anstrengungen zur Verringerung des Rauschens zu unternehmen. Mit einer geeigneten Eingangsschaltung ist es möglich, das Rauschen des Vorverstärkers annehmbar unter dem Johnson-Rauschen des Tonabnehmers zu halten. Und, nicht zu vergessen, dies ist sehr weit unter dem Rauschen der Schallplatte selbst.

Oft wird der sehr rauscharme Op-Amp AD797 für diese Anwendung benutzt. Aber dieser teure Operationsverstärker ist für eine niedrige Eingangsrauschspannung optimiert, nicht für niedrigen Eingangsrauschstrom. Die Auswirkung ist kontraproduktiv, wie das folgende Diagramm zeigt:

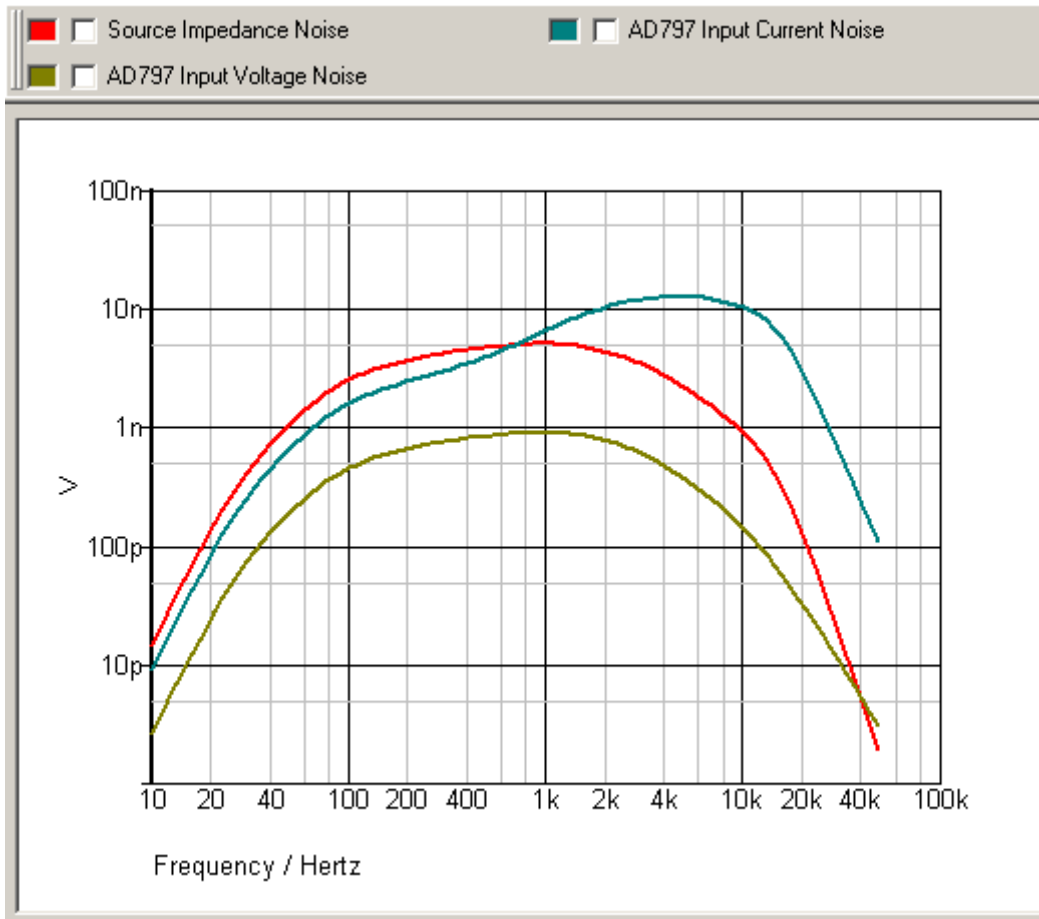


Bild: Drei Rauschquellen für das Beispiel eines AD797 kombiniert mit einem MM-Tonabnehmer, bewertet durch die RIAA-Kurve und die ANSI-A-Kurve

Die Eingangsrauschspannung des AD797 ist bedeutend niedriger als das Johnson-Rauschen des Tonabnehmers, aber das durch den Rauschstrom verursachte Rauschen ist erheblich höher, insbesondere im Bereich der höchsten Empfindlichkeit des Ohres.

Es ist ein technologisches Phänomen, dass rauschspannungsarme Operationsverstärker unter hohem Eingangsrauschstrom leiden. Deshalb ist es klug, einen Operationsverstärker mit dem optimalen Kompromiss zwischen beiden Rauscharten auszuwählen. Der OPA227 ist einer davon:

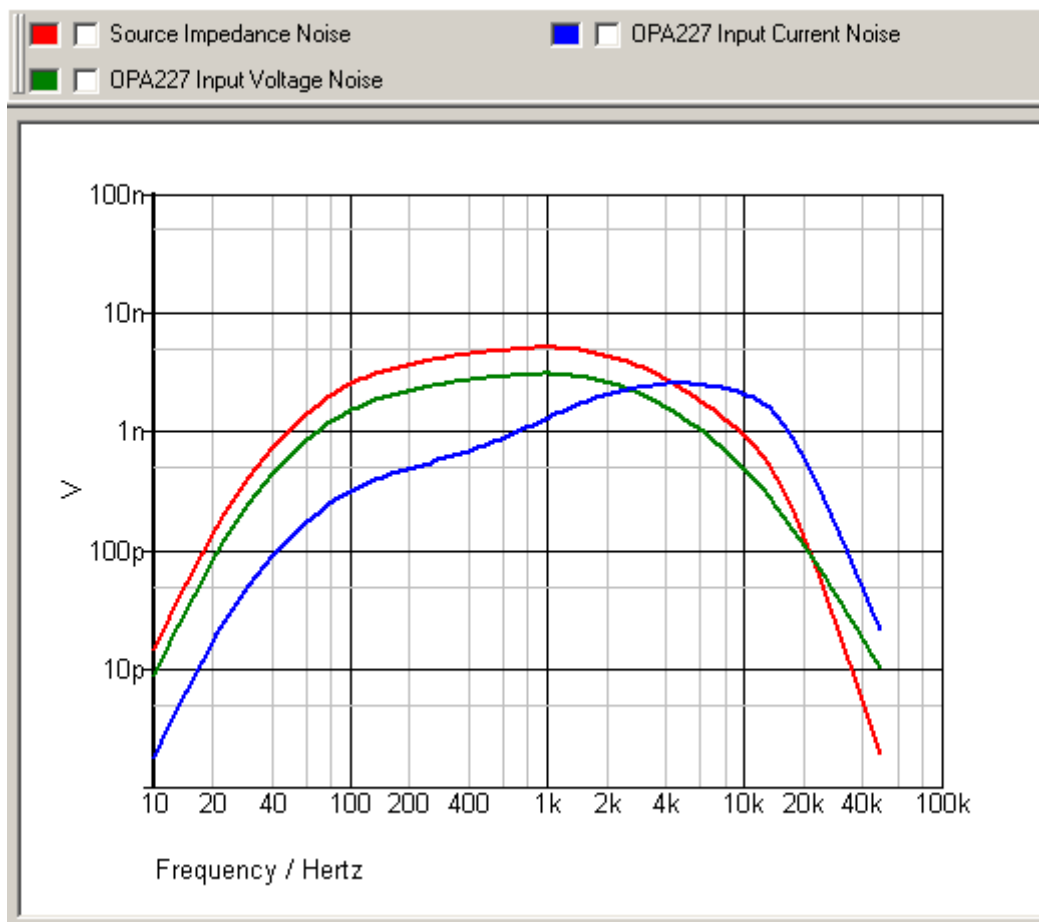


Bild: Drei Rauschquellen für das Beispiel eines OPA227 kombiniert mit einem MM-Tonabnehmer, bewertet durch die RIAA-Kurve und die ANSI-A-Kurve

Die Eingangsrauschspannung des OPA227 ist höher als die des AD797, aber immer noch niedriger als das Johnson-Rauschen des Tonabnehmers. Andererseits ist das durch den Rauschstrom verursachte Rauschen erheblich geringer, insbesondere in dem Bereich, in dem das menschliche Ohr besonders empfindlich ist.

Moving Coil Tonabnehmer haben typischerweise einen Wicklungswiderstand von wenigen Ohm und ihre Induktivität und Kapazität sind so niedrig, dass sie vernachlässigt werden können, wie das Diagramm unten zeigt. Deswegen ist in der Praxis nur die Eingangsrauschspannung des Vorverstärkers von Bedeutung.

In der Praxis spielt bei diesen Anwendungen noch eine andere Rauschquelle eine Rolle: Das Gegenkopplungsnetzwerk hat eine Ausgangsimpedanz, die auch nicht vernachlässigt werden darf. Wenn die Impedanz des Gegenkopplungsnetzwerks zum Beispiel gleich der Impedanz des Tonabnehmers ist, erzeugt sie genauso viel Rauschen wie der Tonabnehmer selbst.

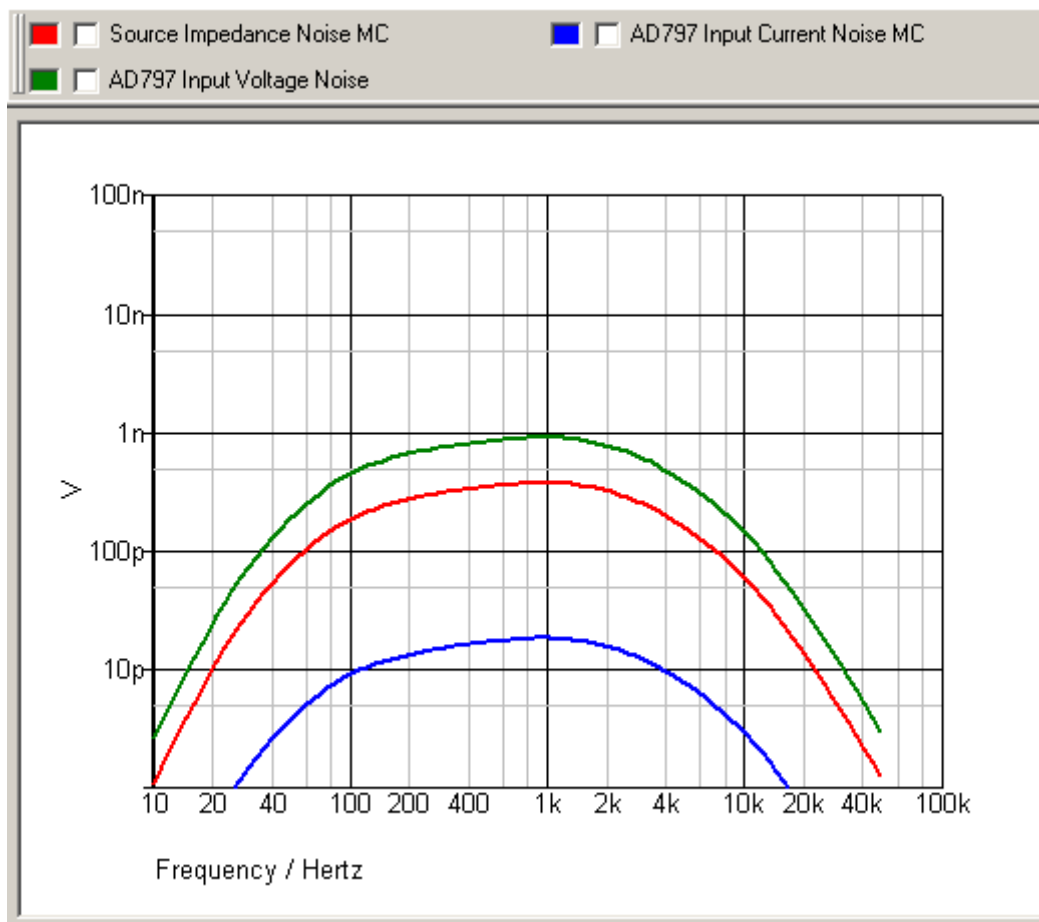


Bild: Drei Rauschquellen für das Beispiel eines AD797 kombiniert mit einem MC-Tonabnehmer, bewertet durch die RIAA-Kurve und die ANSI-A-Kurve

Der AD797 ist klar die beste Wahl in diesem Fall, obwohl sein Rauschen noch mehr als doppelt so stark wie das Rauschen des Tonabnehmers ist und immer noch stärker als das Rauschen des Tonabnehmers und das Rauschen des Gegenkopplungsnetzwerks zusammen.

Die beste, jedoch auch teuerste Lösung ist die Verwendung von Transformatoren, um die Impedanz und Ausgangsspannung des Tonabnehmers auf einen Wert zu wandeln, für den nachfolgende Verstärker einfach mit vernachlässigbarem Rauschen konstruiert werden können. Transformatoren bringen keine (nennenswerten) Störsignale ein, abgesehen von möglichem Brummen durch magnetische Felder in ihrer Umgebung. Die Ausgänge der Transformatoren können in der Regel direkt an die MM-Eingänge angeschlossen werden.

2.2 Line-Eingänge

Bei den Line-Eingängen werden FET-Audiooperationsverstärker vom Typ OPA2134 verwendet. Wieder ist die Leistung bezüglich Frequenzgang und Verzerrung dem menschlichen Ohr und auch dem ADC-IC weit überlegen. Und wieder sollte spezielles Augenmerk auf ein geringes Rauschen gelegt werden.

2.2.1 Volume Control (Lautstärke-Einstellung) gegenüber Gain Control (Verstärkungs-Einstellung)

Mit den Gain Control Potentiometern im ADICON ist es nicht möglich, das Eingangssignal auf Null herunterzuregeln. Stattdessen kann man das Eingangssignal nur um 10 dB verringern oder um

bis zu 20 dB verstärken, d. h., der gesamte Einstellbereich für die Verstärkung umfasst 30 dB. Das entspricht nicht dem, was Sie von Tonbandgeräten her kennen.

Volume Control: Ich nenne die Charakteristik der dort verwendeten Potentiometer "Volume Control", d. h., man kann das Eingangssignal vollständig ausblenden. Die Schaltung sieht folgendermaßen aus:

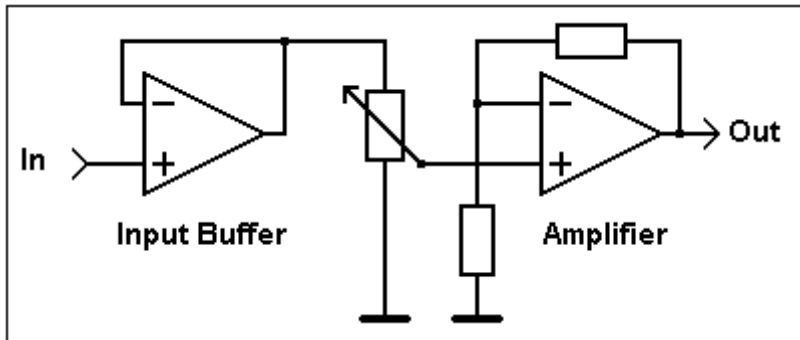


Bild: Volume Control Schaltung

In der Volume Control Schaltung werden zuerst alle Signale abgeschwächt und anschließend mit einem festen Verstärkungsfaktor verstärkt.

Würde ich eine solche Charakteristik auch im ADICON verwenden, wäre die Auswirkung auf sein Rauschverhalten eine Art Katastrophe, weil der notwendige Verstärkungsfaktor des Verstärkers zusammen mit seinem Eingangsrauschen das Eingangsrauschen des ADC-ICs erheblich übersteigen und so das Rauschverhalten oder den Dynamikbereich des Systems merklich verschlechtern würde.

Gain Control: Stattdessen verwende ich eine Schaltung, die ich "Gain Control" nenne:

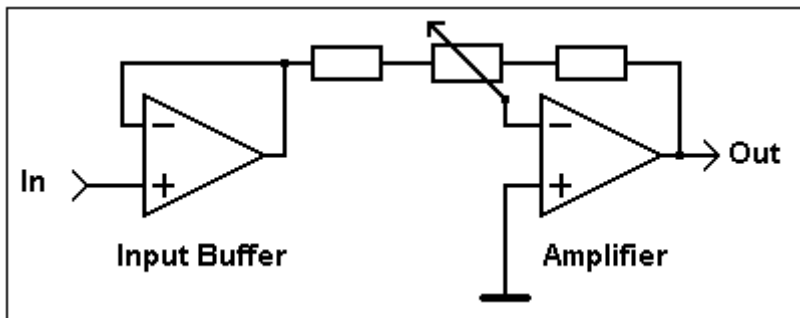


Bild: Gain Control Schaltung

In der Gain Control Schaltung ist der Verstärkungsfaktor des Verstärkers nicht fest und kann sogar kleiner als 1 sein. Das Rauschen, das diese Schaltung erzeugt, übersteigt das Rauschen des ADC-ICs nur bei hohen Verstärkungsfaktoren, was natürlich nicht vermieden werden kann.

Die Konsequenzen in der Praxis können dem folgenden Diagramm entnommen werden:

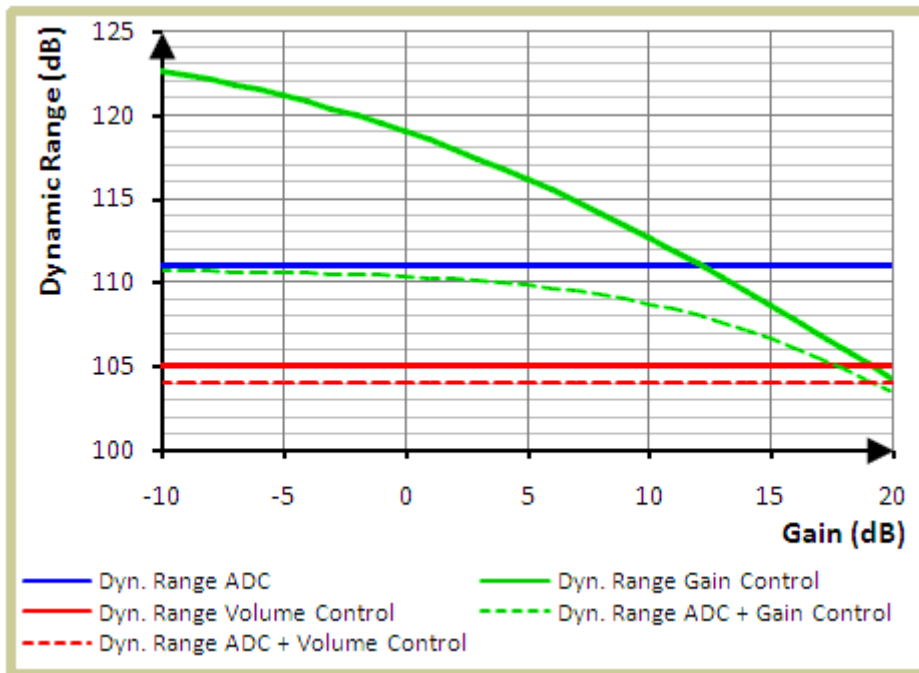


Bild: Unterschiedliches Rauschverhalten bei Verwendung von Volume und Gain Control

Die **blaue Kurve** zeigt den Dynamikbereich des ADCs von 111 dB (unbewertet). Dies ist der Flaschenhals des Systems, der nicht umgangen werden kann.

Die **grüne Kurve** markiert den Dynamikbereich des Eingangsverstärkers bezogen auf den 100% FS Eingangsspegel des ADC-ICs bei verschiedenen Einstellungen für den Verstärkungsfaktor, wenn die Gain Control Schaltung benutzt wird. Die grüne gestrichelte Linie stellt den sich ergebenden gesamten Dynamikbereich eines solchen Systems dar.

Die **rote Kurve** repräsentiert den Dynamikbereich des Eingangsverstärkers bezogen auf 100% FS Eingangsspegel des ADC-ICs bei verschiedenen Einstellungen für den Verstärkungsfaktor unter Verwendung der Volume Control Schaltung. Die rote gestrichelte Linie stellt den sich ergebenden gesamten Dynamikbereich eines solchen Systems dar.

Theorie und Praxis: Die obigen Kurven sind theoretisch berechnet. Allerdings erhöhen in der Praxis die analogen Vorstufen das Grundrauschen des ADCs um etwas mehr als ein dB, was in der obigen Rechnung nicht berücksichtigt wurde. Ansonsten decken sich die theoretischen Werte aber relativ gut mit den gemessenen Ergebnissen, die in Kapitel 1.1.3 „Rauschen“ gezeigt sind und dem linken und dem rechten Ende der grün gestrichelten Kurve entsprechen: Für die sich theoretisch ergebenden 110,9 dB wurden in der Praxis ca. 109,7 dB bei Gain = -10 dB erreicht. Auch bei Gain = 0 dB wurden die sich theoretisch ergebenden 0,7 dB weniger gemessen, nur bei Gain = +20 dB waren es mit 99 dB nicht nur die erwarteten 8 dB, sondern knapp 11 dB weniger.

Fazit: Das Eingangsrauschen des Vorverstärkers verschlechtert das Rauschverhalten bei hohen Verstärkungsfaktoren in beiden Fällen unvermeidbar, aber bei niedrigen Verstärkungsfaktoren ist das Rauschverhalten mit der Gain Control Schaltung deutlich besser.

Prinzipiell lässt sich mit einer Gain Control Schaltung bei Verwendung eines negativ logarithmischen Potentiometers ein auch weitgehend logarithmischer Einstellbereich von 0 bis 100% Verstärkung erreichen wie bei der obigen Volume Control Schaltung, aber ohne deren nachteilhaftes Rauschverhalten. Allerdings haben logarithmische Potentiometer einen deutlich schlechteren Gleichlauf als lineare, deshalb habe ich es vorgezogen, auf einen Einstellbereich bis herunter zu 0% Verstärkung zu Gunsten eines präziseren Gleichlaufs zu verzichten. Daher sieht die Verstär-

kungskennlinie (Verstärkung vs. Potentiometer Stellung) für die Gain Control Schaltung im ADICON folgendermaßen aus:

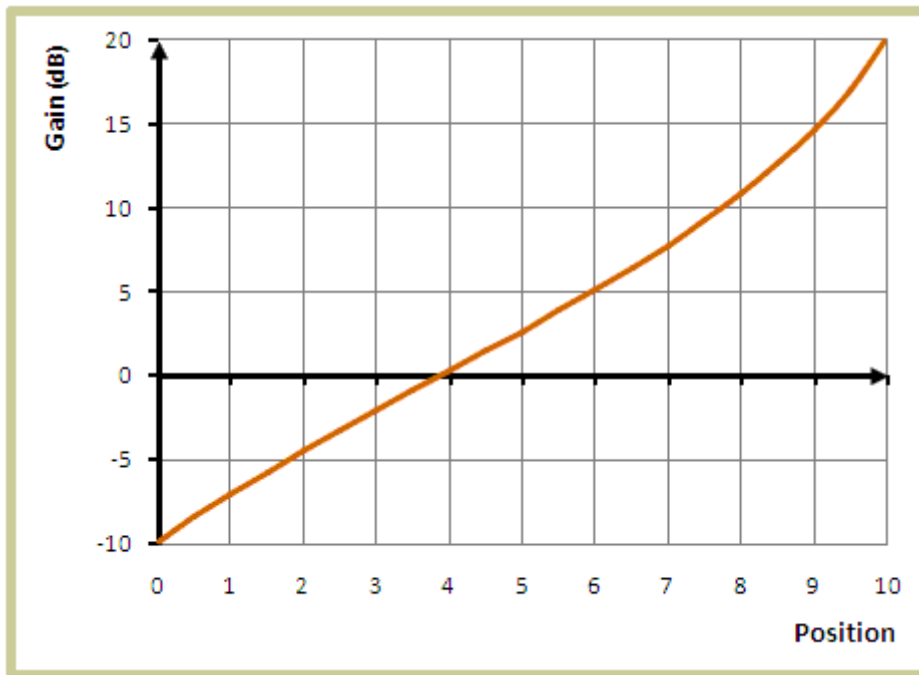


Bild: Die Verstärkungskennlinie der Potentiometer des ADICON

Ganz stimmt diese Kennlinie aber nicht, denn hier ist ein streng lineares Potentiometer angenommen. Ein reales lineares Potentiometer hat dagegen an den Enden einen leicht abgeflachten Verlauf.

2.2.2 Empfindlichkeit und Verstärkungsbereich des Line-Eingangs, Signal-aussteuerung

Cinch-Ausgänge: Die Ausgangsspannung der meisten CD- oder DVD-Player ist $2 V_{\text{eff}}$ für 100% FS (Full Scale, dem möglichen Maximalwert eines Digitalsignals). Deswegen ist die nominale Line-Eingangsempfindlichkeit des ADICON für 100% FS $2 V_{\text{eff}}$ und der Line-Ausgang liefert ebenfalls $2 V_{\text{eff}}$ bei 100% FS. Auf vielen CDs wird dieser Full-Scale-Bereich vollständig ausgenutzt, andere CDs verwenden einen beträchtlichen sogenannten Headroom, so dass sie erheblich leiser sind.

Tonbandgeräte können gewöhnlich in einem großen Bereich einschließlich $2 V_{\text{eff}}$ eingestellt werden. Die Ausgangsspannungen der Phonovorverstärker sind ähnlich, hängen jedoch zusätzlich von der Empfindlichkeit des Tonabnehmers und natürlich von der Aussteuerung der Schallplatte ab.

DIN-Ausgänge: Die Ausgangsspannung an DIN-Ausgängen ist gewöhnlich etwas niedriger, besonders bei sehr alten Geräten.

Wenn analoge Signale digitalisiert werden sollen, müssen sie sinnvoll ausgesteuert werden. Das bedeutet, dass beim ADC unter keinen Umständen Clipping, also ein Abschneiden der Signalspitzen, auftreten sollte. Andererseits sollten sie genauso laut „klingen“ wie andere durchschnittliche digitale Quellen, also sollte der digitale Pegel nicht zu niedrig sein.

Aus diesen Gründen muss der Verstärkungsfaktor für die Line- und Phonoeingänge einstellbar sein. Im ADICON steht ein Verstärkungsbereich von -10 dB bis +20 dB zur Verfügung, so dass Signale von $0.2 V_{\text{eff}}$ bis zu $6 V_{\text{eff}}$ zu 100% FS ausgesteuert werden können.

2.3 Kopfhörerausgang

Mit $7 V_{\text{eff}}$ bei 50Ω Ausgangsimpedanz ist die Kopfhörerausgangsleistung wesentlich größer als die, die man gewöhnlich in anderen HiFi-Geräten findet. Ein Relais schaltet den Ausgang beim Aus- und Einschalten stumm.

Der Kopfhörerverstärker besteht im Wesentlichen aus einem TPA6120, einem leistungsstarken Kopfhörerverstärker-IC. Dieses IC hat eine kleine Schwäche, nämlich sein Eingangsrauschen. Es ist ein bisschen zu groß, um das verfügbare Signal von $2 V_{\text{eff}}$ direkt zu verstärken, ohne dass das Rauschen zu deutlich hörbar wird. Deswegen wurde ein separater 10 dB Vorverstärker für den TPA6120 eingesetzt.

Die Verstärkung des Kopfhörerverstärkers wurde so gewählt, dass er so lange nicht übersteuert, wie die roten CLIP-LEDs nicht leuchten. Streng genommen gilt das nur für Kopfhörerimpedanzen, die größer als ca. 300 Ohm sind, wie man sie normalerweise bei Kopfhörern für HiFi-Anlagen findet. Kopfhörer für professionelle Anwendungen haben häufig deutlich niedrigere Impedanzen. Aber auch bei denen bleibt das Ausgangssignal bei Aussteuerungen bis ca. -1 dB immer unverzerrt.

2.4 ADC

ADC-Schaltungen habe ich im Laufe der letzten Jahre mehrere entwickelt und verfeinert. Die Schaltung des ADICON ist ein weiterer Ableger davon. Dieser ADC besitzt als Anti-Alias Filter einen symmetrierenden Butterworth Tiefpassfilter zweiter Ordnung mit einer Eckfrequenz von ungefähr 190 kHz, der mühelos alle Alias-Effekte unterdrückt. Der Cirrus Logic CS5361 ist ein qualitativ hochwertiger Delta-Sigma A/D-Konverter mit einem Dynamikbereich von 114 dB (A-bewertet). Der Takt des CS5361 wird aus zwei Quarzoszillatoren abgeleitet. Ein CPLD (Complex Programmable Logic Device) stellt die Steuersignale zur Verfügung und dient als Takteiler für den CS5361.

Der S/PDIF-Sender CS8406 wird ebenfalls durch das CPLD gesteuert. Er treibt einen optischen Toslink-kompatiblen Ausgang und einen koaxialen Cinch-Ausgang. Zur Verhinderung von Brummschleifen ist der Cinch-Ausgang transformatorgekoppelt.

2.5 Peak Program Meter

Der Pegel des digitalen Audiosignals muss deutlich angezeigt werden. Ein sogenanntes Stereo Sample Peak Program Meter (SPPM), angelehnt an die EBU-Empfehlungen, mit 2×10 LEDs ist dafür vorgesehen. Dieses SPPM ist vollständig digital im bereits erwähnten CPLD implementiert.



Die Helligkeit der Anzeige lässt sich mit zwei DIP-Schaltern auf der Rückseite in vier Stufen so einstellen, dass sie in der schwächsten Stufe auch bei sehr dezenter Raumbelichtung nicht stört und in der stärksten Stufe auch bei sehr heller Raumbelichtung sehr gut erkennbar ist.

Im Gegensatz zu Standard-PPMs, die eine Anstiegszeit von 10 ms haben, ist bei SPPMs die Anstiegszeit lediglich ein Sample. Dadurch lassen sich die Spitzenwerte des digitalen Ausgangssig-

nals exakt ermitteln. Die Abfallzeit von PPMs und SPPMs ist 20 dB in 1,5 s. Eine Peak-Hold-Funktion (Spitzenwert-Haltefunktion) mit Soft-Drop-Funktion und drei wählbaren Haltezeiten kann zum angezeigten Wert mit zwei DIP-Schaltern auf der Rückseite hinzu geschaltet werden. Für Hinweise zur korrekten Aussteuerung schauen Sie bitte in der Bedienungsanleitung nach.

Übrigens ist die Charakteristik von VU-Metern, wie sie üblicherweise in Tonbandgeräten eingesetzt werden, vollkommen anders als die von PPMs oder SPPMs. Ein solches VU-Meter wäre nicht sehr hilfreich für einen ADC, während umgekehrt ein PPM für ein Tonbandgerät nicht angemessen wäre.

2.6 Stromversorgung

Der ADICON wird mit 12 V DC betrieben. Ein normaler 5,5/2,1 mm-Stecker kann verwendet werden. Um versehentlicher Trennung vom Netz vorzubeugen kann der Bajonett-Stecker des Netzteils durch Drehen arretiert werden. Der Ein-/Ausschalter befindet sich auf der Rückseite. Ich hätte ihn lieber auf der Frontplatte gesehen, aber ich hatte nicht allein zu entscheiden. Die Frontplatte sollte vollständig symmetrisch gestaltet sein. Das wäre mit dem Schalter auf der Frontplatte nicht möglich gewesen. Deshalb haben wir uns entschieden, ihn auf die Rückseite zu verlegen. Wir hoffen auf Verständnis für diese Entscheidung.

Ein interner Überspannungsschutz schaltet den ADICON aus, wenn Versorgungsspannungen von mehr als 14 V zugeführt werden. Spannungen über 20 V müssen vermieden werden. Außerdem gibt es einen Verpolungsschutz für den Stromversorgungseingang.

Der interne 3,3 V Schaltregler für den Digitalteil ist von der restlichen Schaltung sauber getrennt, so dass keine Störsignale durch den Schaltregler im Spektrum sichtbar sind.

Die Erzeugung der negativen Betriebsspannung ist etwas ungewöhnlicher: Zwei Charge Pump-ICs arbeiten im Gegentakt für die negative Betriebsspannung des Analogteils. Dadurch wird der Ripplestrom der positiven Betriebsspannung und die Ripplespannung auf der negativen Betriebsspannung erheblich reduziert. Darüber hinaus werden beide ICs durch das CPLD angesteuert. Sie arbeiten synchron zu der Samplerate des ADCs. Dadurch würden restliche Störungen aus dem Übertragungsspektrum entfernt, sofern sie noch existieren würden. Weil sie das aber nicht tun, ist diese Maßnahme eigentlich überflüssig. Wie auch immer, zum einen war es eine Vorsichtsmaßnahme, denn diese Situation war nicht von Anfang an absehbar, und zum anderen kostet diese Maßnahme – außer der Zeit für die Entwicklung – fast nichts, und das ist es mir alle Mal wert.

3 Gehäuse

Das Gehäuse hat Sonny entworfen. Er ist von uns derjenige mit viel Erfahrung bei der Gestaltung von (meiner Meinung nach) exzellent aussehenden, sehr präzise gefertigten und wirtschaftlich herstellbaren Gehäusen. Er entschied sich für ein robustes Stahlblechgehäuse, das Magnetfelder deutlich besser als z.B. ein Aluminium-Gehäuse abschirmt.

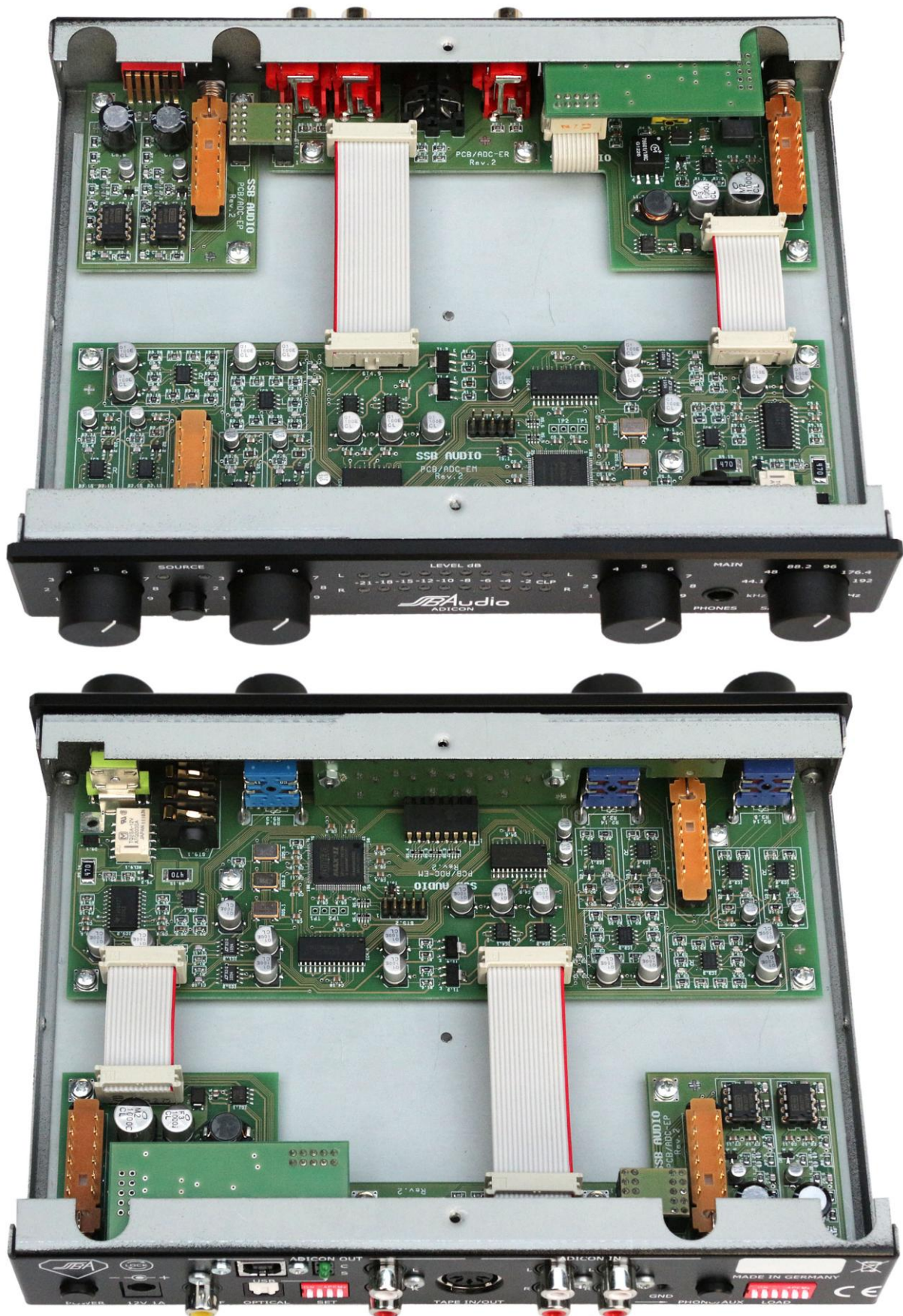
3.1 Frontplatten

Die 5 mm starke Aluminium-Frontplatte hat eine ganz besondere Oberfläche. Sie ist nicht nur einfach eloxiert, sie ist in besonderer Weise, die nur sehr wenige Hersteller mit zuverlässiger Qualität liefern können, behandelt. Weil wir nicht sicher sind, ob eine schwarze oder eine silberne Frontplatte mehr Anklang finden wird, haben wir uns entschlossen, beides anzubieten.



Bilder: Frontplatten in Silber und Schwarz

3.2 Innenansichten





SSB-AUDIO.COM



Uwe Beis, 2015-05-19