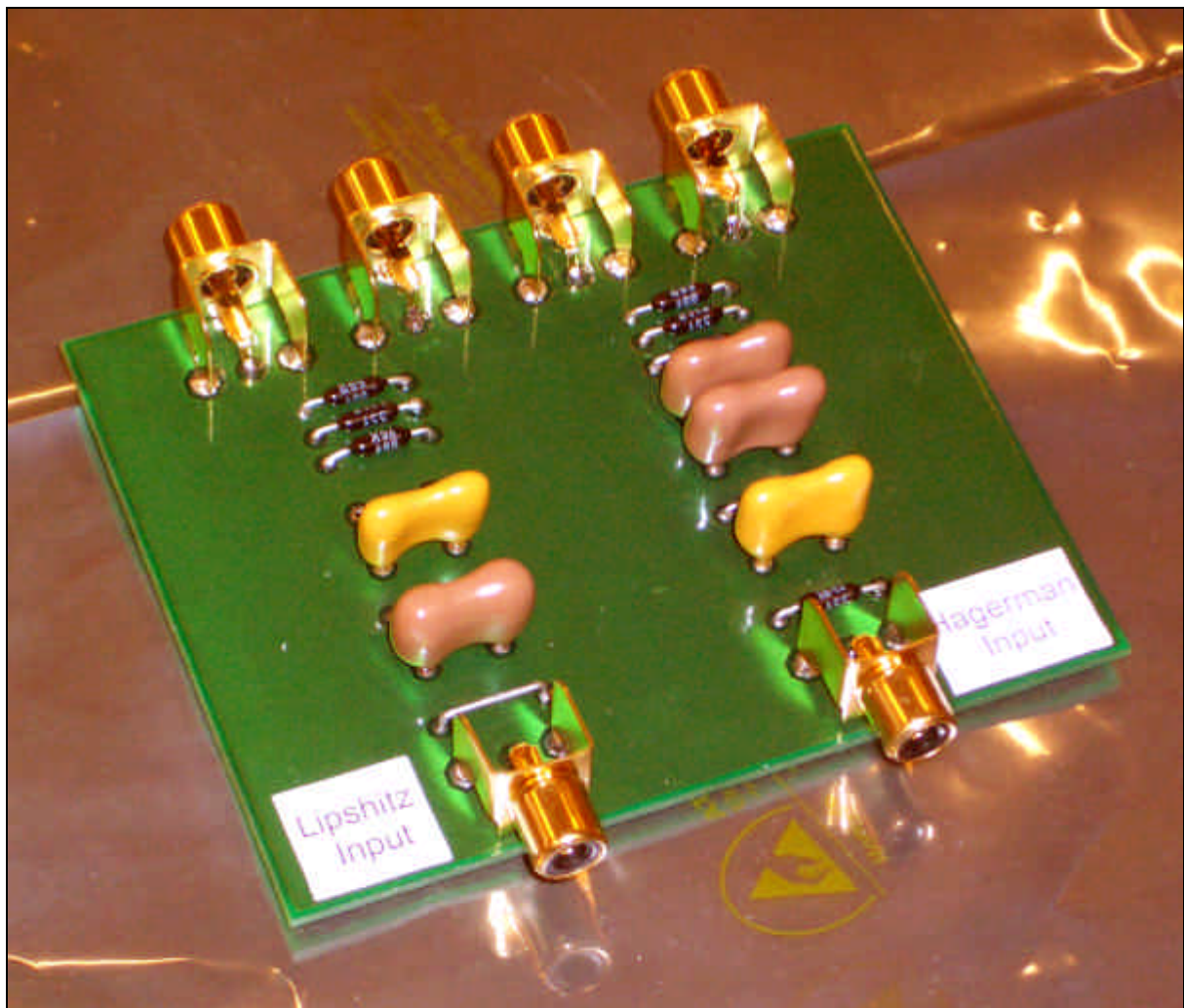


Untersuchung des Übertragungsverhaltens der Phono-Vorverstärker mittels eines passiven RIAA Vorverzerrers

Von Karsten Gänger



Ansicht des im Rahmen dieses Labors aufgebauten RIAA-Vorverzerrers

Allgemeines zu RIAA Vorverzerrern

Abspielgeräte von Schallplatten liefern das Audiosignal nicht mit einem linearen Frequenzgang. Das Audiosignal, welches auf eine Schallplatte gepresst werden soll, wird nach der Aufnahme verzerrt. Diese Verzerrung wird nach der 1955 genormten RIAA-Kennlinie (RIAA = Recording Industry Association of America) vorgenommen um technisch bedingte Verzerrungen der Tonabnehmer entgegenzuwirken. Die Höhen werden nicht zuletzt angehoben um ein besseres SNR zu erzielen, ähnlich wie es auch bei der Magnettonbandaufzeichnung benutzte Verfahren der Preemphasis verwendet wird. Desweiteren ist die Amplitude der niedrigen Frequenzen in Musiksignalen wesentlich größer als die der hohen Frequenzen. Da die Schwingungen „mechanisch“ auf der Schallplatte gespeichert sind, müsste auch dort die Amplitude dementsprechend groß sein, welches mit einer höheren Tiefe der Rillen korrespondieren würde. Abbildung 1 (Rillenschnitt) zeigt, dass die Rillentiefe durch eine begrenzte seitliche Rillensteilheit auch mit der Rillenbreite direkt in Verbindung steht. Um die Abspielzeit einer Langspielplatte erhöhen zu können, ist es also auch von Interesse die Amplituden der tiefen Frequenzen abzusenken.

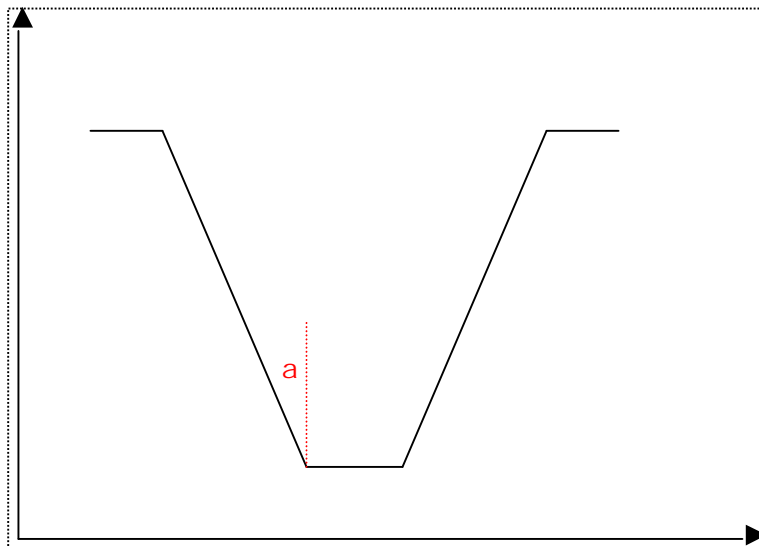


Abbildung 1: Rillenschnitt

Diese RIAA- und IEC- Kennlinie zum Entzerren des Signal svom Tonabnehmer zeigt Abbildung 2 auf der folgenden Seite. Die RIAA-Kennlinie besitzt zwei Knickfrequenzen. Das Filter zur Realisierung der Kennlinie benötigt mindestens drei Pole um auch den Mittelsonbereich sauber zu koppeln. Die Tiefen werden abgesenkt und die Höhen stark angehoben. Später wurde diese Kennlinie von der IEC im Sub-Bass-Bereich weiter modifiziert um Rumpel-Geräusche zu eliminieren.

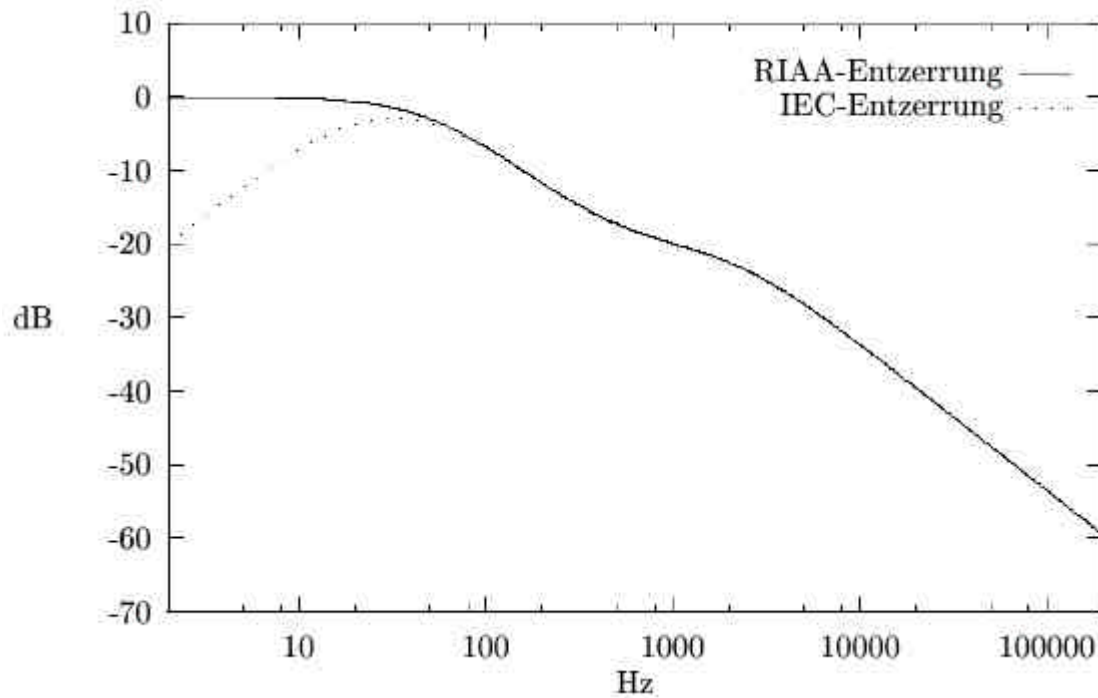


Abbildung 2: Kennlinie zum Entzerren

Man unterscheidet zwischen Moving-Coil ‚MC‘ und ‚normalen‘ Magnetsystemen mit Moving-Magnet ‚MM‘. Diese Tonabnehmersysteme können nur sehr kleine Spannung abgeben, so dass Schallplattenabspielgeräte Ausgangsspannung zwischen 20 bis 50 mV liefern (Moving-Coil-Systeme gar nur ein Zehntel bis Zwanzigstel davon).

Um Schallplattenspieler an Audioverstärker anzuschließen ist es notwendig einen speziellen Phonovorverstärkereingang zu benutzen, der genau diese Entzerrung des Frequenzgangs nach der RIAA-Kennlinie und eine Pegelanhebung für den internen Vor- bzw. Endverstärker vornimmt.

Die Schaltung eines inversen RIAA-Entzerrers, d.h. ein RIAA-Vorverzerrer ist dagegen eine eher selten zum Einsatz kommende Schaltung. Die Erstellung und Erläuterung dieser Schaltung wird im nächsten Abschnitt behandelt.

Schaltungsbeschreibung

Die Einsatzgebiete eines RIAA-Vorverzerrers sind die Verzerrung von Aufnahmen vor der Schallplattenpressung oder zur Anpassung eines ‚Line-Endgerätes‘ an einen Phonoeingang eines Audioverstärkers. Die hier vorliegende Schaltung soll aber einen anderen Nutzen haben. Der RIAA-Vorverzerrer im Rahmen des Projekts, High-End Audioverstärker in Röhrentechnik‘ soll zur objektiven Evaluierung von verschiedenen Phonoeingangsverstärkern dienen, die im Wintersemester 2003/4 aufgebaut wurden.

Ein RIAA-Vorverzerrer muss eine Dämpfung von -40dB bis -60dB haben. Aus diesem Grund ist ein passiver Filteransatz die beste Lösung. Mit aktiven Bauelementen, wie zum Beispiel Operationsverstärkern, handelt man sich immer Rauschen und eine Signalqualitätsverschlechterung ein. So kann man auch auf eine Spannungsquelle verzichten, die aufwändig entstört werden müsste.

Für die inverse RIAA-Verzerrung eines Frequenzgangs haben sich zwei grundsätzliche Schaltungstypen etabliert. Zum einen die Filterrealisierung nach Lipshitz und zum anderen die Realisierung nach dem Ansatz von Hagerman. Wobei sich der Hagerman-Ansatz als High-End-Referenzklasse herausgestellt hat. Um sich nicht auf einen Ansatz beschränken zu müssen, wurden für das Projekt beide Strategien verfolgt und beide Schaltungen parallel aufgebaut damit Vergleichsrückschlüsse gezogen werden können. Da beide Filter sehr ähnlich sind, wird in diesem Papier hauptsächlich auf den etwas aufwendigeren Hagerman Filter eingegangen.

Abbildung 3 zeigt die Schaltpläne der beiden Filter zum Verzerrern eines Frequenzgangs nach der RIAA-Kennlinie und deren Dämpfung auf -40dB bzw. -60dB.

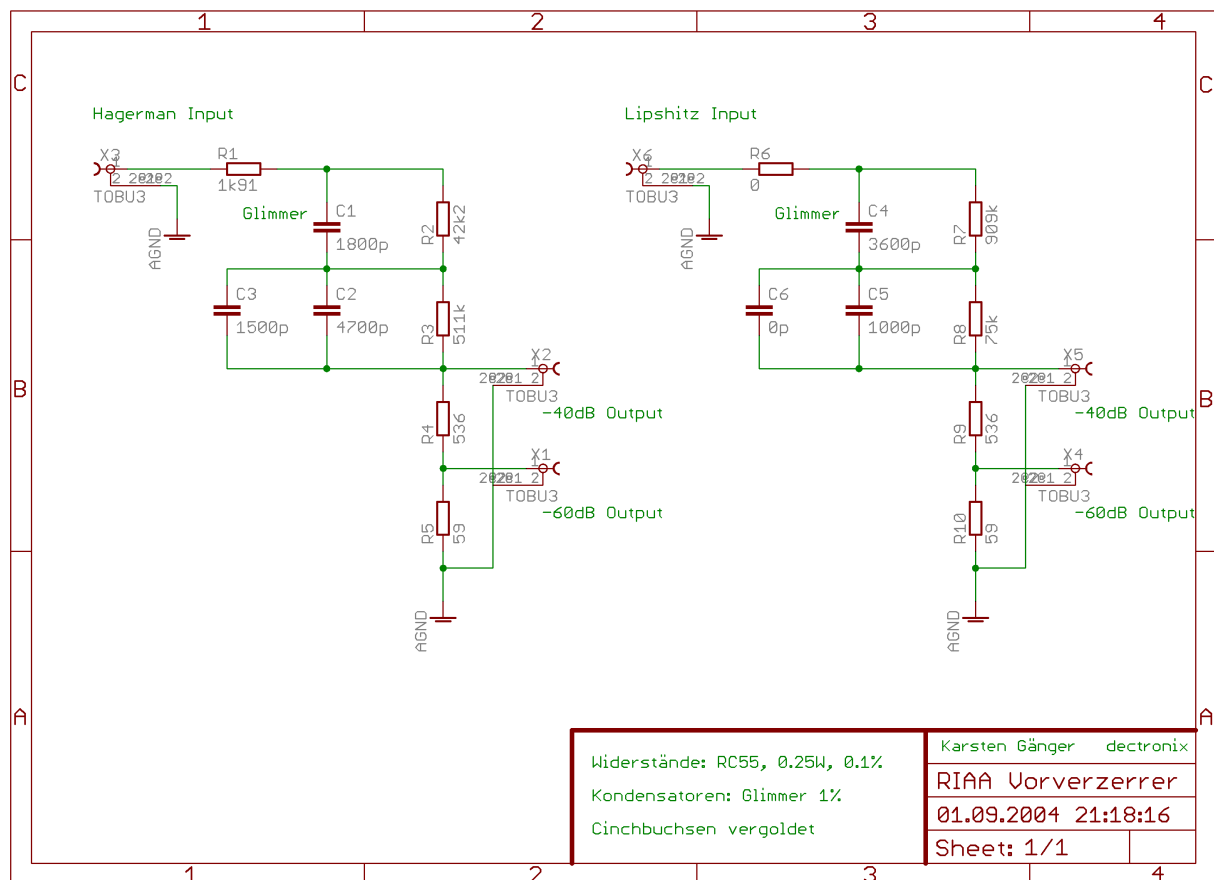


Abbildung 3: Schaltplan der Verzerrer

Die RIAA-Kennlinie hat folgende definierte Zeitkonstanten für die Pol- und Nullstellenpolynome:

Das untere Pol-/Nullstellenpaar liegt bei 3180µs and 318µs. Das obere Pol-/Nullstellenpaar liegt bei 3,18µs and 75µs. Die Polstelle bei 3,18µs ist die so genannte Neumann-Polstelle die hinzugefügt wurde, da eine ‚unendliche‘ Verstärkung sehr hoher Frequenzen technisch nicht realistisch ist. Dies entspricht einer Knickfrequenz von 314kHz.

Der Neumann-Pol wird mit der Zeitkonstante aus $R1 + R4 + R5$ und die Reihenschaltung aus $C1$ und $C2 + C3$:

$$\tau_{neumann} = \frac{C1 * (C2 + C3)}{C1 + C2 + C3} * (R1 + R4 + R5)$$

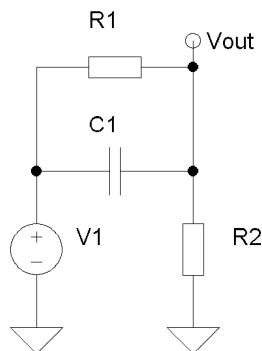
Die Übertragungsfunktion lautet:

$$H(j\omega) = \frac{(1 + j\omega\tau_{lo})(1 + j\omega\tau_{hi})}{(1 + j\omega\tau_{mid})}$$

Die entsprechenden Eckfrequenzen berechnen sich aus den obigen Zeitkonstanten mit:

$$\omega_x = \frac{1}{\tau_x} = R_y * C_y$$

Zur einfacheren Berechnung des Filters werden zwei Teilfilter berechnet und deren gemeinsame Optimierung mittels SPICE durchgeführt.



Die Übertragungsfunktion dieses Teilnetzes ist:

$$H(s) = \frac{s + \frac{1}{R1 * C1}}{s + \frac{1}{R1 * R2 * C1}}$$

Durch Einsetzen der Zeitkonstanten werden nun die Bauteile bestimmt. Für die vollständige Schaltung werden zwei dieser Teilnetze nacheinander geschaltet.

Beide Schaltungen sind für Generatoren mit 50 Ohm Impedanz ausgelegt.

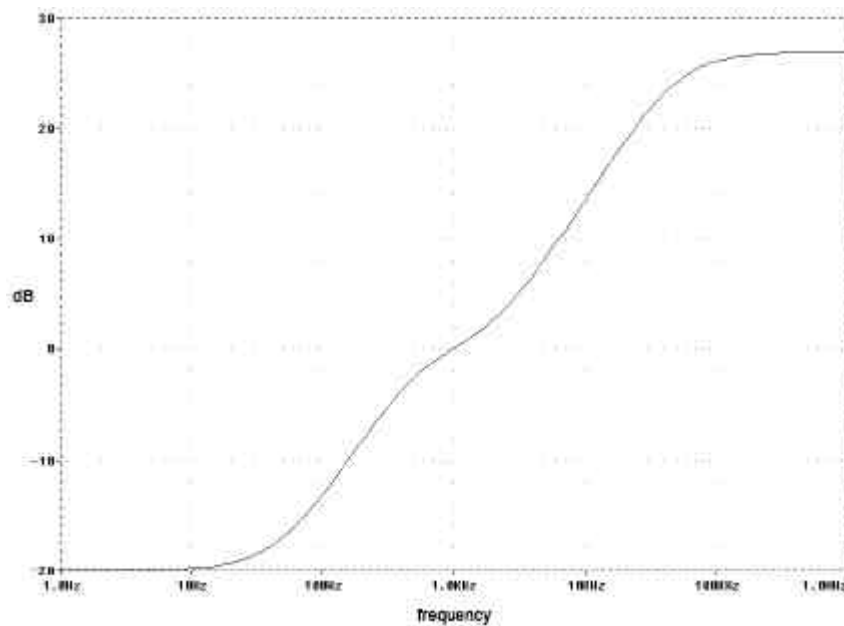


Abbildung 4: Frequenzgang des Hagermann-Vorverzerrers

Tabelle 1: Frequenzstützstellen der Hagermann-Schaltung

Frequency	dB	Frequency	dB	Frequency	dB
10.00	-19.74	223.9	-7.43	5012	8.18
11.22	-19.70	251.2	-6.64	5623	9.04
12.59	-19.64	281.8	-5.88	6310	9.92
14.13	-19.58	316.2	-5.15	7079	10.81
15.85	-19.50	354.8	-4.46	7943	11.72
17.78	-19.40	398.1	-3.81	8913	12.64
19.95	-19.27	446.7	-3.20	10000	13.56
22.39	-19.12	501.2	-2.63	11220	14.48
25.12	-18.94	562.3	-2.11	12590	15.40
28.18	-18.72	631.0	-1.63	14130	16.31
31.62	-18.46	707.9	-1.19	15850	17.23
35.48	-18.16	794.3	-0.77	17780	18.10
39.81	-17.80	891.3	-0.38	19950	18.96
44.67	-17.40	1000	0.00	22390	19.80
50.12	-16.93	1122	0.38	25120	20.61
56.23	-16.41	1259	0.77	28180	21.38
63.10	-15.84	1413	1.17	31620	22.11
70.79	-15.22	1585	1.60	35480	22.80
79.43	-14.55	1778	2.07	39810	23.44
89.13	-13.83	1995	2.57	44670	24.02
100.0	-13.09	2239	3.12	50120	24.54
112.2	-12.31	2512	3.72	56230	25.01
125.9	-11.51	2818	4.36	63100	25.43
141.3	-10.70	3162	5.05	70790	25.78
158.5	-9.88	3548	5.78	79430	26.09
177.8	-9.05	3981	6.55	89130	26.35
199.5	-8.23	4467	7.35	100000	26.57

Wahl der Bauteile und Erstellung des Layouts

Das Design der Schaltung soll High-End-Ansprüchen genügen, daher ist es sehr wichtig bei der Auswahl der Bauteile auf höchste Qualität zu achten und bei dem Layout auf die Vermeidung von parasitären Effekten, wie zum Beispiel Streu- und Koppelkapazitäten.

Die Bauteile sollen geringste mögliche Toleranzen besitzen, um die theoretisch errechneten Eigenschaften des Filters nicht zu verfälschen. Es zeigte sich in der Simulation der Schaltung, dass selbst geringe Toleranzen der Bauteile zu einem stark veränderten Frequenzgang führen.

Die Widerstände müssen rauscharme Metallschichtwiderstände sein. Kohleschichtwiderstände sind für HiFi High-End Zwecke nicht geeignet. Daher wurden Präzisions-Metallfilmwiderstände des Typs RC55 mit einer Toleranz von $\pm 0,1\%$ des Herstellers Welwyn Components ausgewählt.

Besonderes Augenmerk ist auf die Kondensatoren zu legen. Die Kondensatoren sollen ebenfalls sehr enge Toleranzen aufweisen. Ferner sind auch deren Wechselstromeigenschaften von großem Interesse. Dielektrische Verluste sind durch geeignete Wahl des Isolationsmediums möglichst gering zu halten. Die für diese Schaltung gewählten Glimmer-Kondensatoren weisen sehr gute dielektrische Eigenschaften und nur $\pm 1\%$ Kapazitätstoleranz auf.

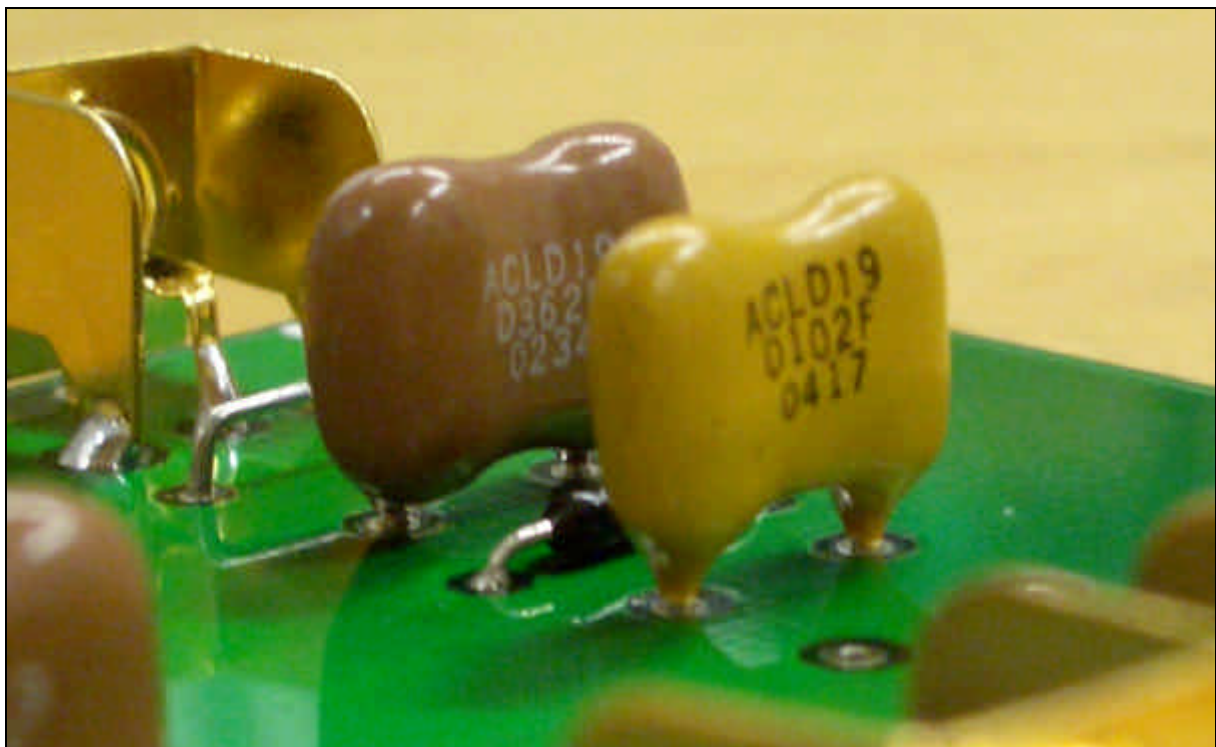


Abbildung 4A: Glimmerkondensatoren

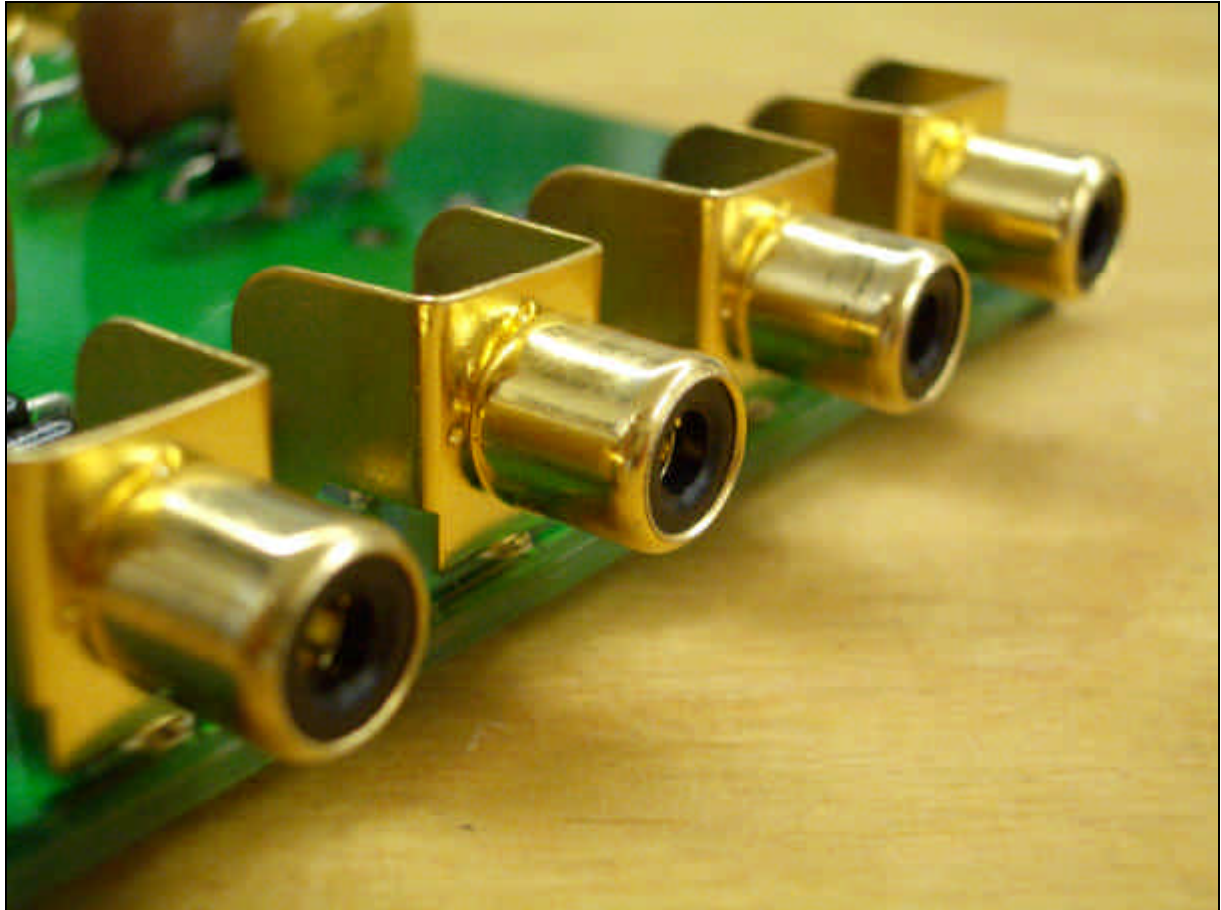


Abbildung 4B: vergoldete Anschlußbuchsen

Die Cinch-Buchsen wurden als Printmontageversion gewählt. Um möglichst geringe Kontaktwiderstände zu verursachen sind alle Cinch-Buchen vergoldet. Dies ist besonders bei den kleinen Signalspannungen von nur ein einigen wenigen Millivolt von Vorteil.

Das Layout wurde so entworfen, dass beide Filtertypen auf einer Platine Platz finden. Weiterhin ist das Layout so gestaltet, dass für den Lipshitz Filter, als auch für den Hagerman Filter, das gleich Layout benutzt werden kann. Für den Lipshitz Filter muss lediglich eine Drahtbrücke eingelötet werden und ein Kondensator wird nicht bestückt. Das wird in der Abbildung 3 (Schaltplan) durch die Dimensionierung von R6 mit Null Ohm und C6 mit Null Farad zum Ausdruck gebracht. Dies führt dazu, dass das Layout auch für den Aufbau von zwei gleichartigen Filtern benutzt werden kann. Somit ist auch der Stereo-Betrieb möglich, mit dem zum Beispiel ein CD-Player an einen Phonoeingang angeschlossen werden kann.

Zur Vermeidung von Streu- und Koppelkapazitäten zwischen benachbarten Signalleitungen, ist die Oberseite der Platine mit einer vollen Massefläche ausgestattet. Die Abbildung 5 (Layout der Platine) zeigt ein Bild der Platine, bei dem alle Layer und Bauteile abgebildet sind. Man sieht die Platine von oben, daher sind die Beschriftungen der Unterseite spiegelvehrt.

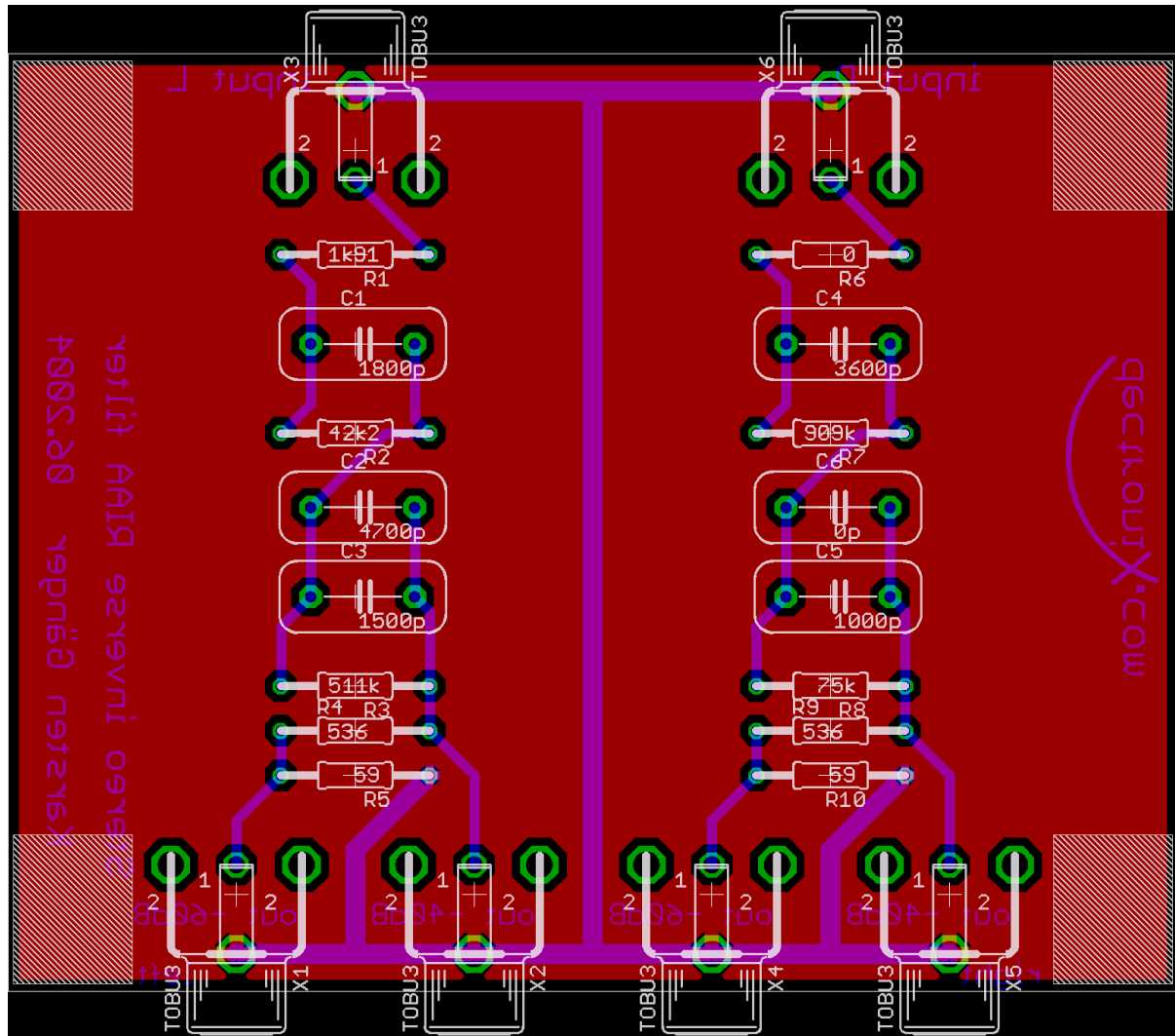


Abbildung 5: Layout der Platine

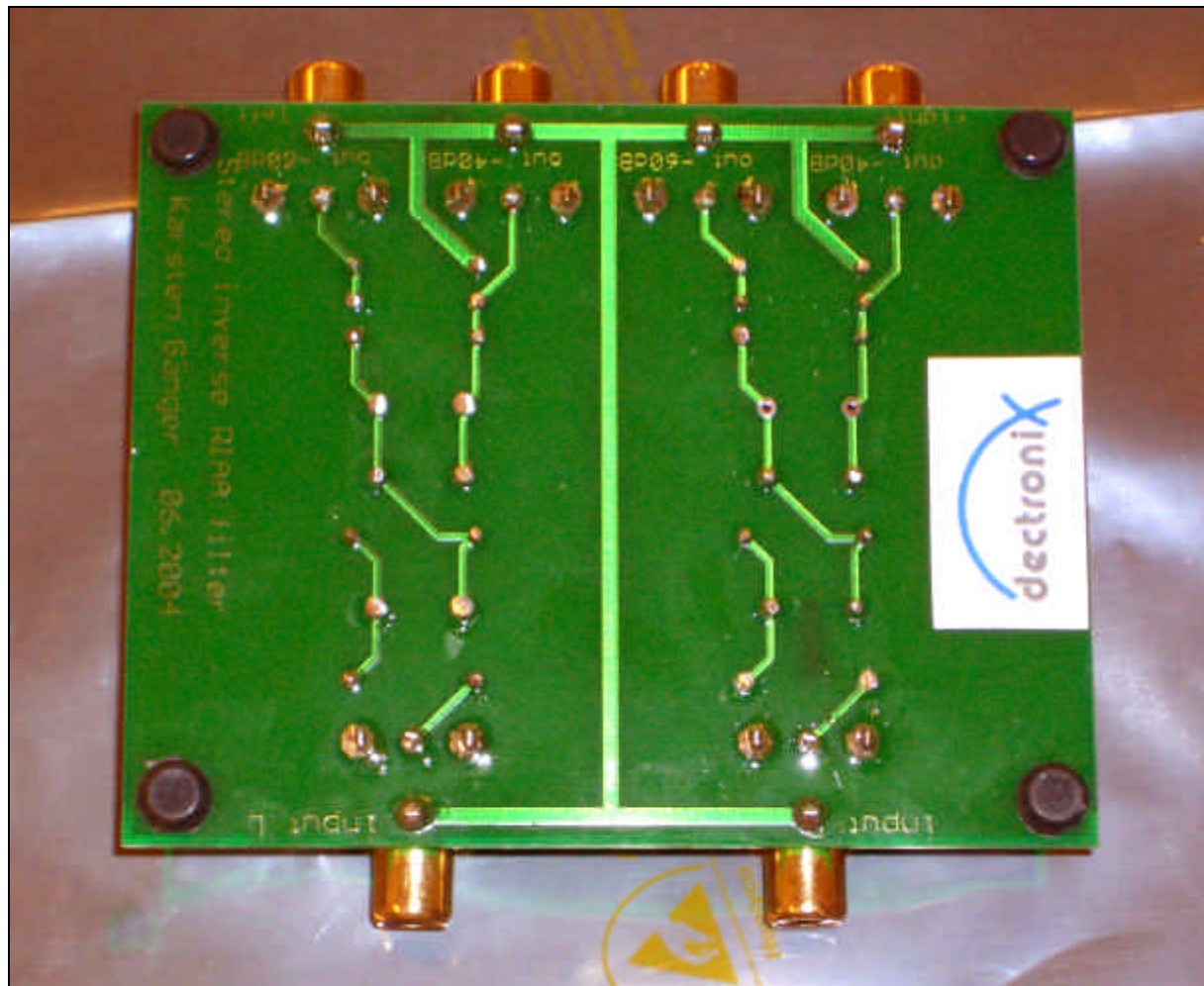


Abbildung 5A: Blick auf die Unterseite der Leiterplatte

Inbetriebnahme der Filterbaugruppe

Um für die erste Inbetriebnahme die grundlegende Funktionalität zu testen wurde die Amplitude im Frequenzbereich von 20Hz bis 20kHz gemessen. Hierzu wurden folgenden Parameter beim verwendeten Wobbelgenerator eingestellt:

- ? Sweep time: 47ms
- ? Sweep range: 20Hz – 20 kHz
- ? Amplitude: 19,6 Vpp

Die Einstellungen des Oszilloskops zeigt Abbildung 6 (Einstellungen am Oszilloskop).



Abbildung 6: Einstellungen am Oszilloskop

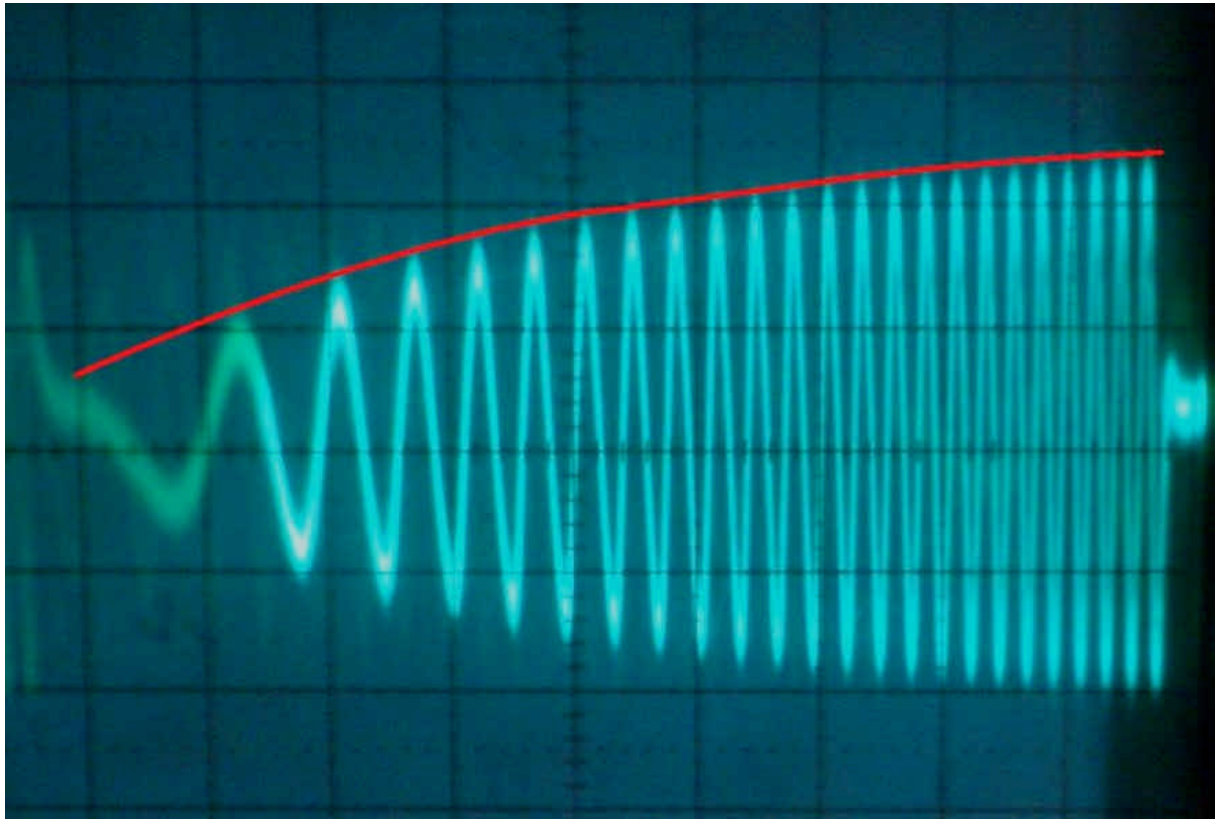


Abbildung 7: Frequenzantwort des Hagerman-Filters

Die Abbildung 7 (Frequenzantwort des Hagerman-Filters) zeigt den Ausgang des Hagerman-Filters bei der Speisung durch den Wobbelgenerator. Die rote Linie zeigt die halbseitige Hüllkurve des Ausgangssignals, welches dem gewünschten Bodediagramm ähneln sollte. Diese Methode der Frequenzgangsbestimmung kann jedoch nicht benutzt werden um genaue Rückschlüsse über das Frequenzverhalten der Schaltung zu ziehen, da durch die Sweep-Geschwindigkeit Modulationsfrequenzen entstehen. Um eine grobe Bewertung treffen zu können genügt dieser Test jedoch.

Die Auswertung der Frequenzantwort mittels des Wobbelgenerators zeigt, dass die Schaltung das gewünschte Verhalten aufweist.

Die Schaltung soll der objektiven Einschätzung von Phonoeingangsverstärkern dienen. Die Abbildung 8 (schematischer Versuchsaufbau) auf der folgenden Seite zeigt eine abstrakte Illustration des von uns realisierten Versuchsaufbaus.

Test des inversen RIAA-Filters mit den unterschiedlichen Phono-Vorstufen

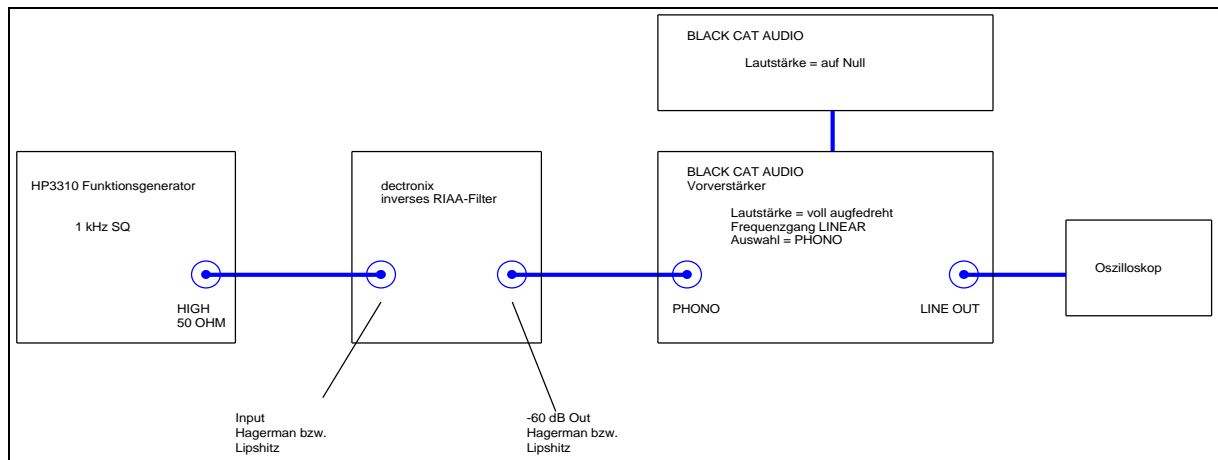


Abbildung 8: Blockschaltbild des Versuchsaufbaus

Die Ausgangsspannung des Funktionsgenerators wurde auf ca. 15Vpp eingestellt. Im Einzelfall wurde diese Amplitude jedoch so in Abhängigkeit der Spannungsverstärkung der Phono-Stufen variiert, dass eine gute Aussteuerung, ca. 1Vpp, des Ausgangssignals erreicht wurde, aber Großsignaleffekte sicher ausgeschlossen werden konnten.

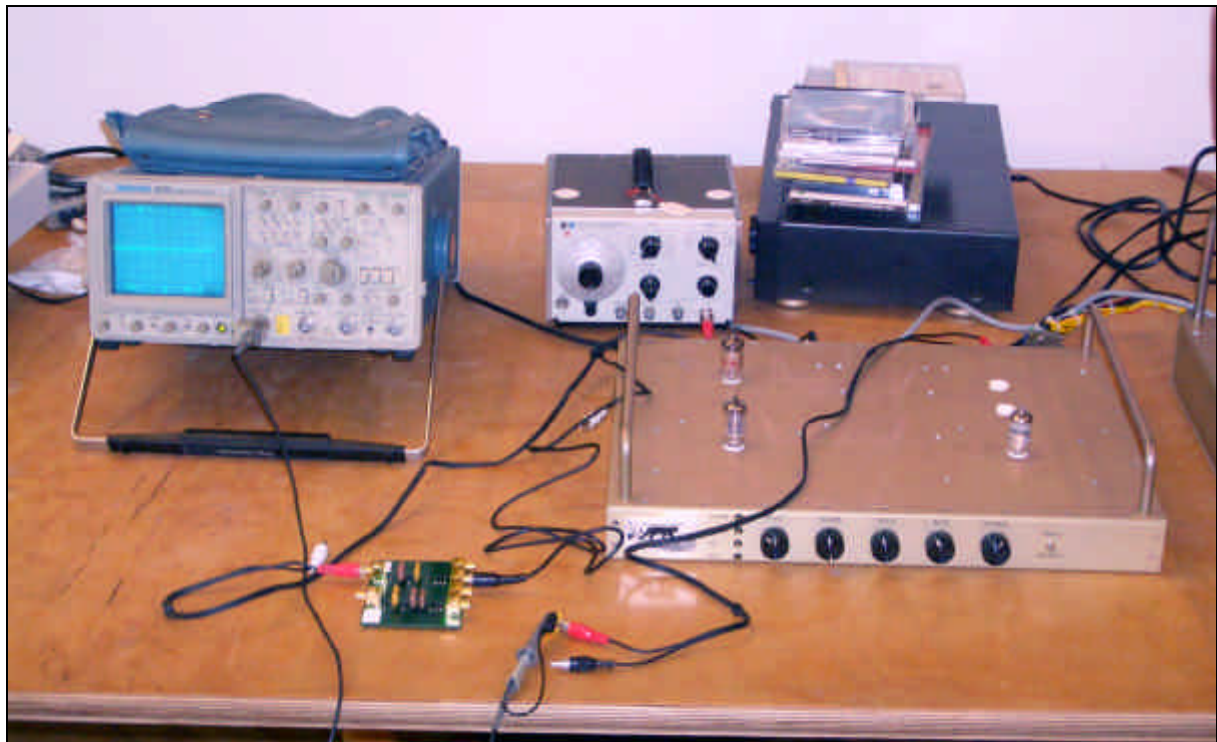
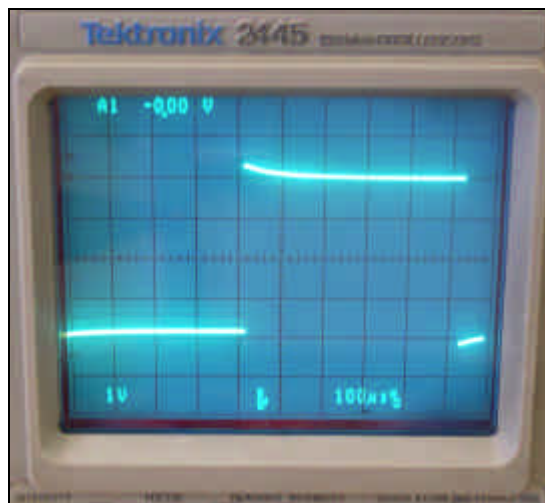


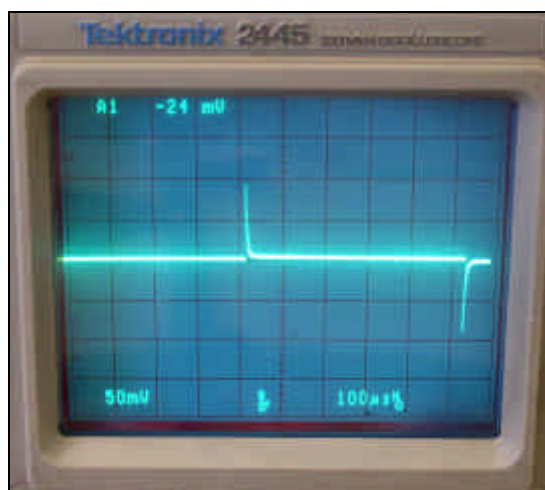
Abbildung 8A: Ansicht des Versuchsaufbaus

Die folgenden Bilder zeigen die Signalformen vor dem Eingang des inversen RIAA-Filters und nach der Filterung durch das Hagerman- bzw. Lipshitz-Netzwerk. Zur Speisung des Aufbaus wurde ein Rechtecksignal gewählt. Nach der inversen RIAA-Filterung sind nur noch die steilen Flanken als dünne ‚Nadeln‘ auf dem Oszilloskop zu sehen. Nach der RIAA-Filterung in den Phonovorstufen ist an deren Ausgang wieder ein rekonstruiertes Rechtecksignal zu messen. Die Güte dieses Rechtecksignals am

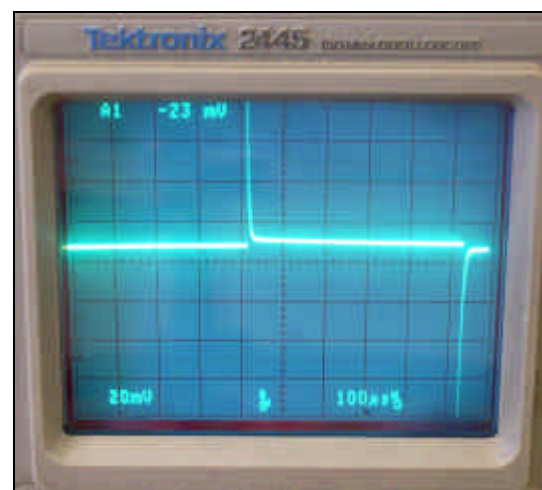
Ausgang der Phono-Stufen ist, wie sich im Laufe dieser Arbeiten herausgestellt hat, ein objektives Bemessungskriterium für die Qualität der Phono-Stufen.



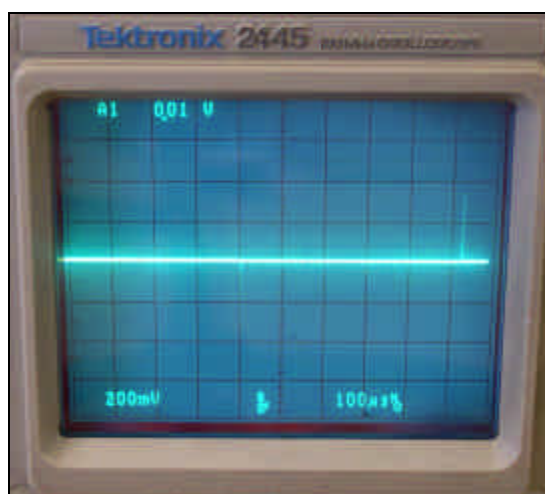
Kurvenform am Filtereingang



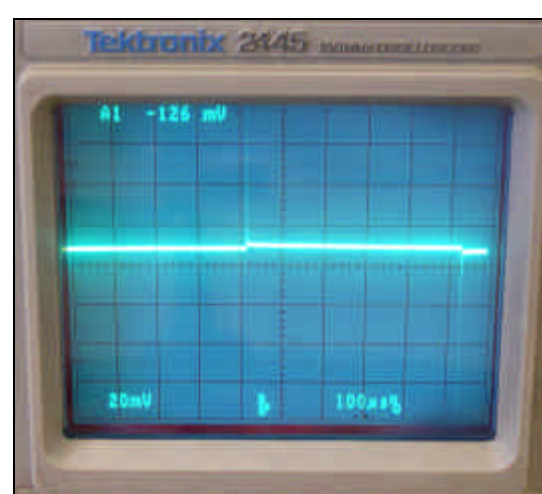
Kurvenform am Ausgang „Hagerman -60dB“



Kurvenform am Ausgang „Hagerman -60dB“
in anderer Skalierung



Kurvenform am Ausgang „Lipshitz -60dB“



Kurvenform am Ausgang „Lipshitz -60dB“
in anderer Skalierung

Gegenüberstellung von Höreindrücken und gemessenem Übertragungsverhalten

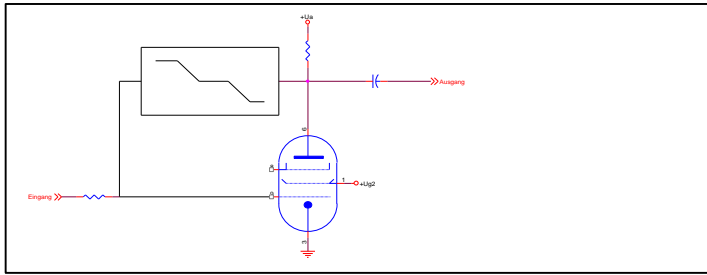
Es wurden die 5 verschiedenen, im Rahmen dieses Projekts realisierten Phono-Vorverstärker gegeneinander getestet.

Auf den Folgeseiten sind die mit dem RIAA-Vorverzerrer gewonnen Testergebnisse mit den bei den Hörtests im Wintersemester 2003/4 gewonnen subjektiven Beurteilungen gegenübergestellt.

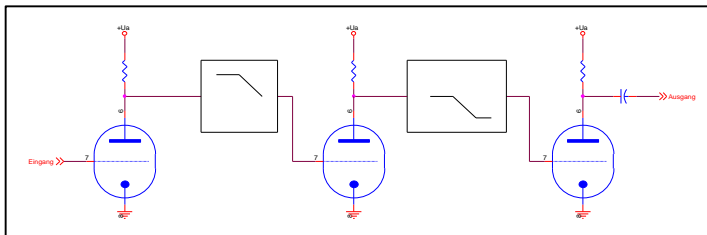
Die Ergebnisse sind nach der bei den Hörtests ermittelten Rangfolge der einzelnen Phono-Vorverstärker geordnet.

„Spitzengruppe“, der Klang dieser Verstärker unterscheidet sich nur unwesentlich voneinander

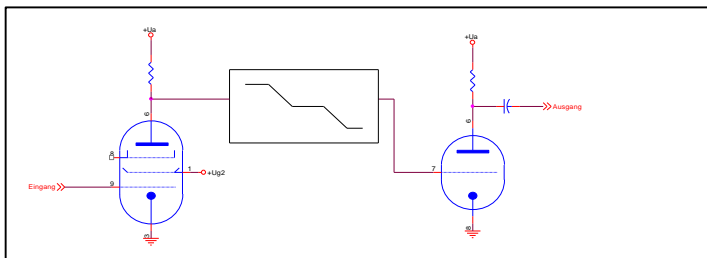
Platz 1: „EF86 mit Gegenkopplungsnetzwerk nach Elektor“



Platz 2: „Triodenbasis mit geteiltem Netzwerk nach Jones“



sowie gleichrangig „EF86 mit passivem Entzerrernetzwerk“



Verbale Beschreibung der Höreindrücke:

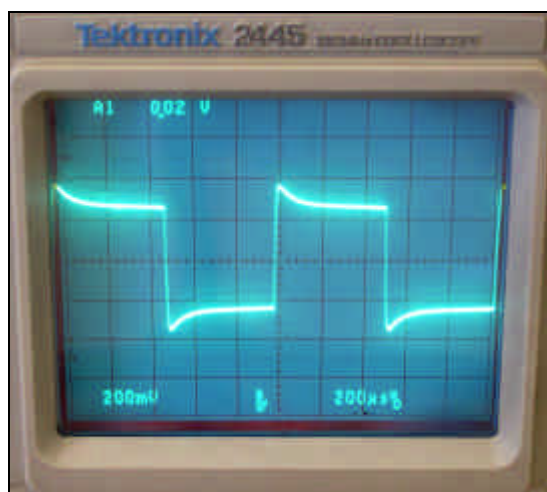
- ? Transparenz
- ? intensiv aber nicht bedrängend
- ? Instrumente räumlich gut zu orten
- ? Leichtigkeit
- ? Man hört sofort gerne zu und hat Freude dabei

Visuelle Empfindung eines Höres beim Zuhören:



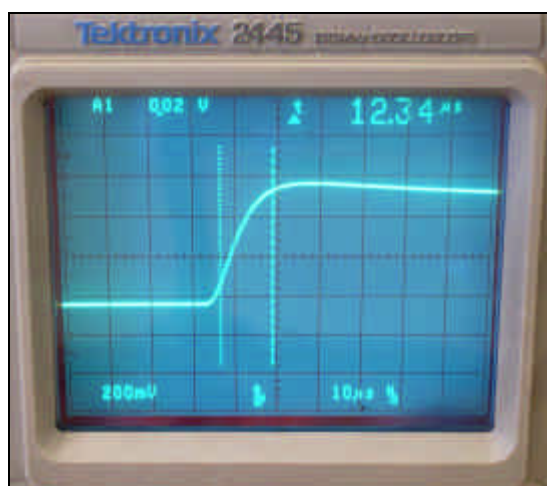
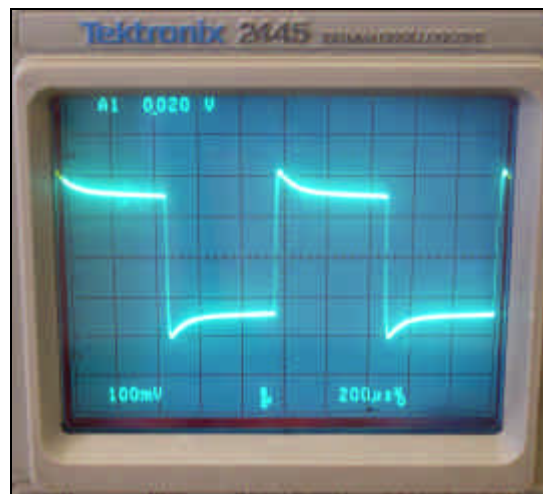
Rechteckantworten Phonostufe „EF86 Elektor“ (Platz 1)

Mit Hagerman-Filter:

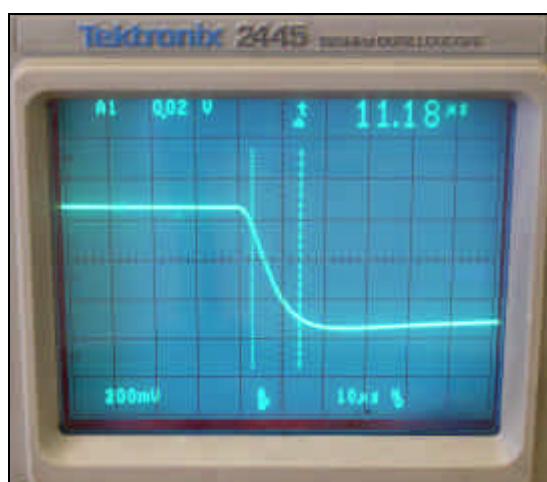
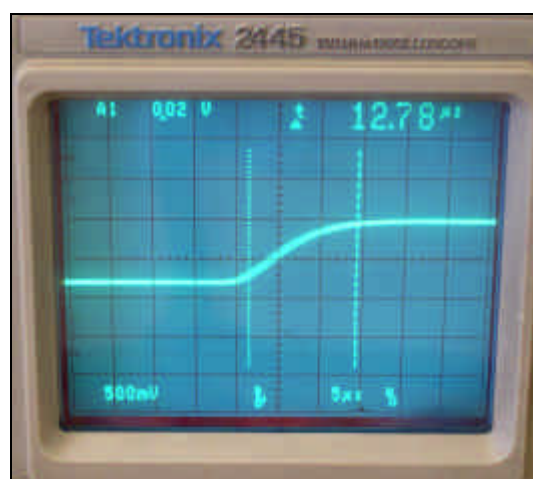


Ausgangssignal gesamt

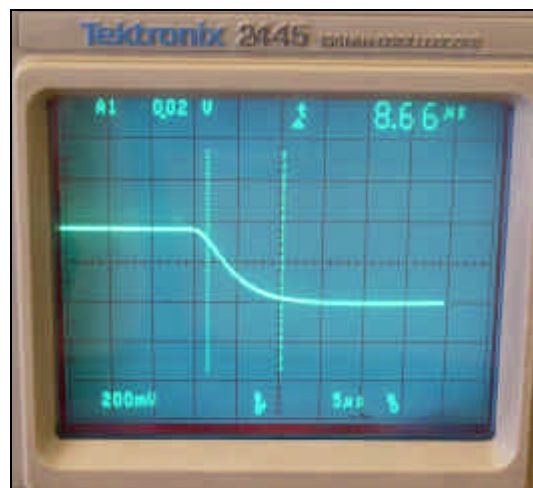
Mit Lipshitz-Filter:



ansteigende Flanke

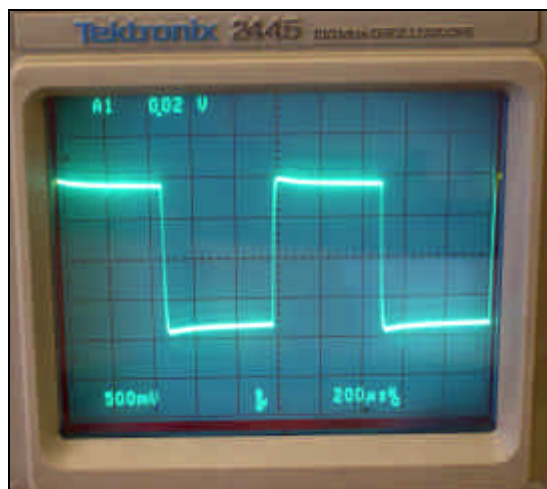


abfallende Flanke



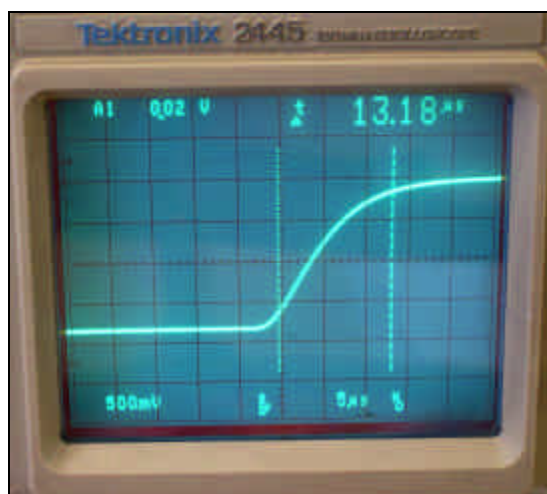
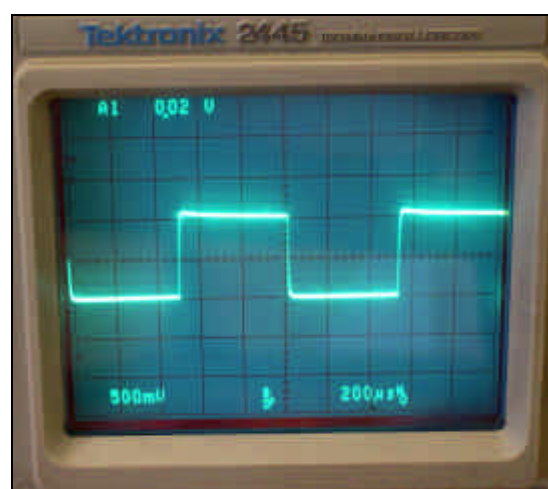
Rechteckantworten Phonostufe „Jones“ (Platz 2)

Mit Hagerman-Filter:

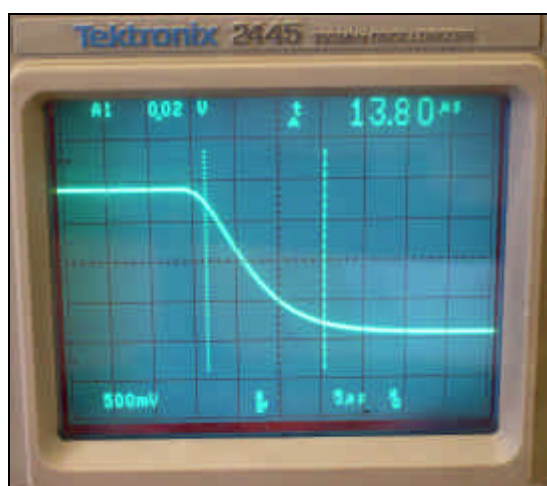
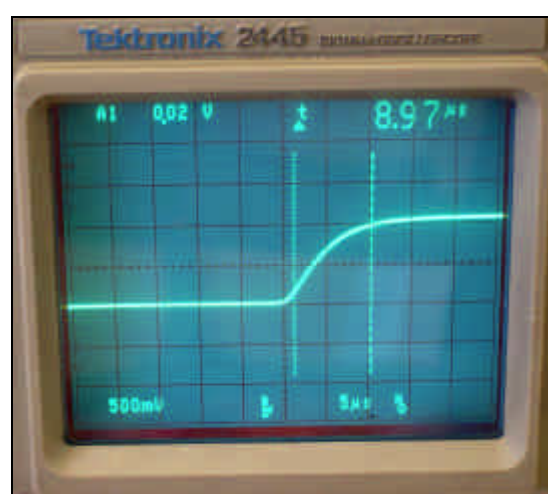


Ausgangssignal gesamt

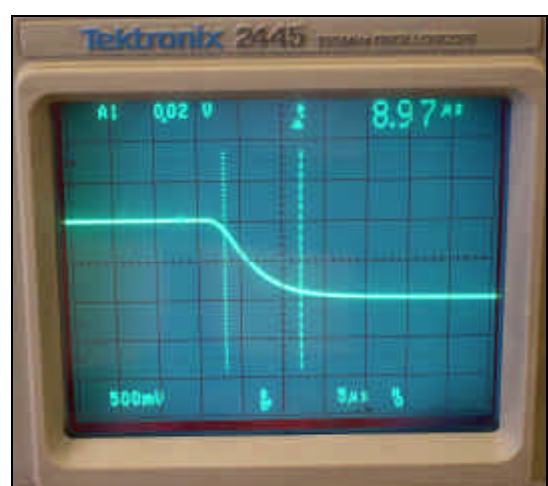
Mit Lipshitz-Filter:



abfallende Flanke

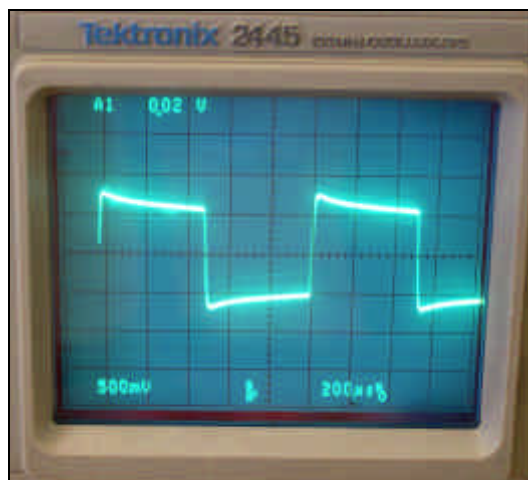


ansteigende Flanke



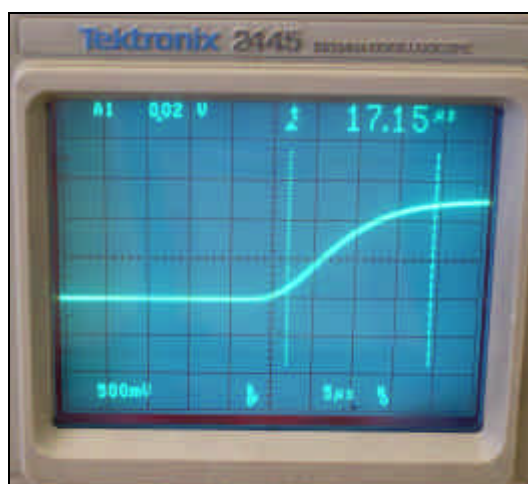
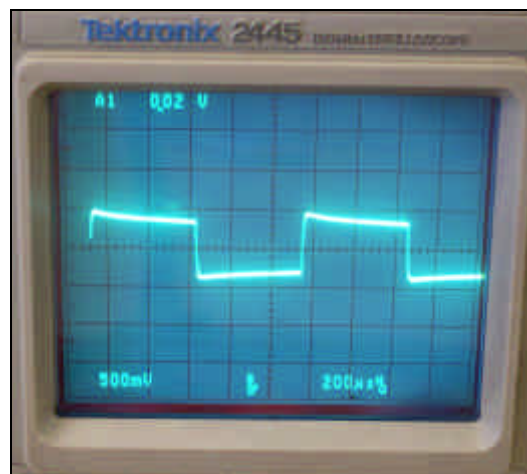
Rechteckantworten Phonostufe „EF86 passiv“ (Platz 2)

Mit Hagerman-Filter:

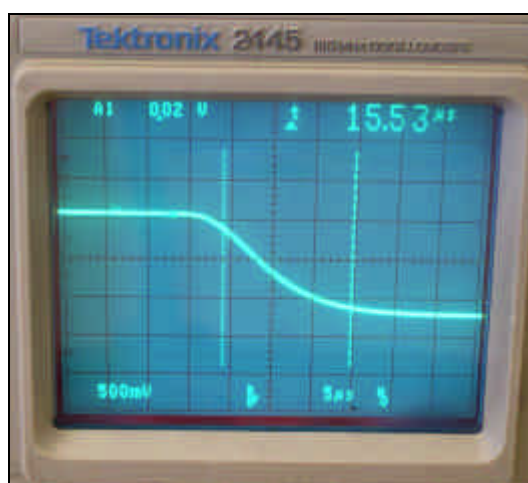


Ausgangssignal gesamt

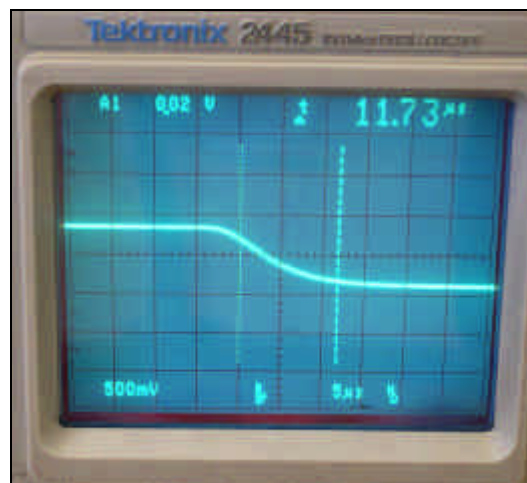
Mit Lipshitz-Filter:



ansteigende Flanke

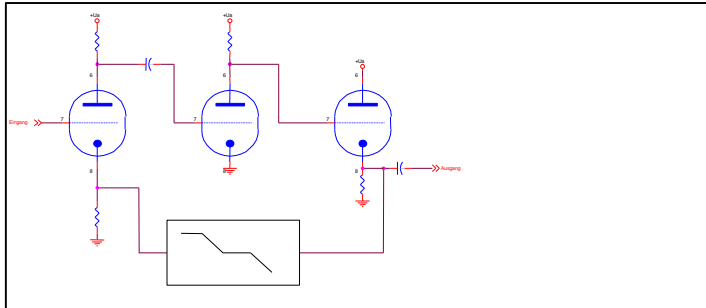


abfallende Flanke



„Mittelmäßig“

Platz 3: „Anlehnung an Marantz 7c“



Verbale Beschreibung der Höreindrücke:

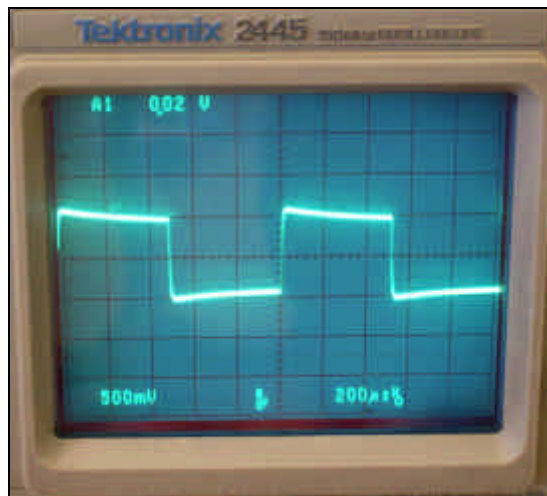
- ? Angenehm warm und weich
- ? Intensität fehlt

Visuelle Empfindung eines Hörers beim Zuhören:



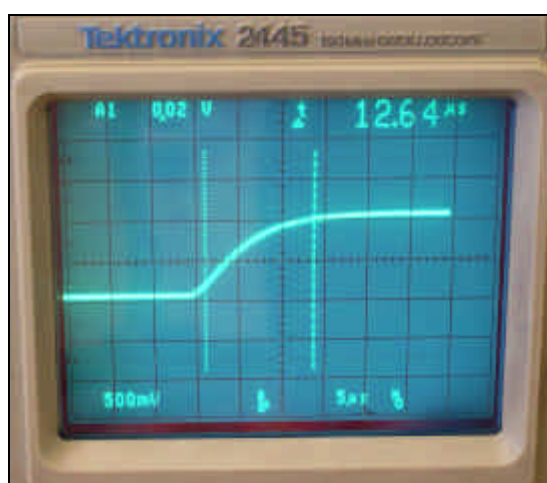
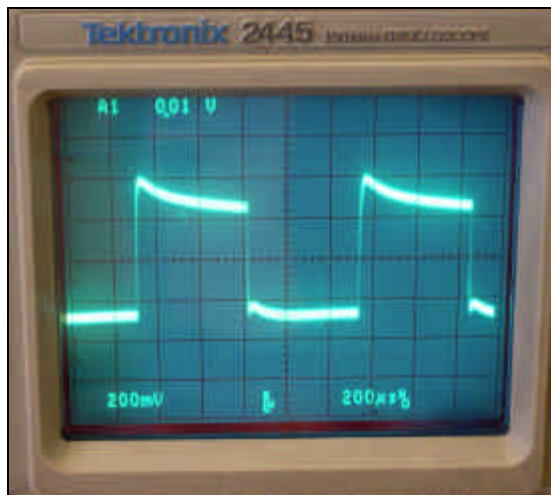
Rechteckantworten Phonostufe „Marantz“ (Platz 3)

Mit Hagerman-Filter:

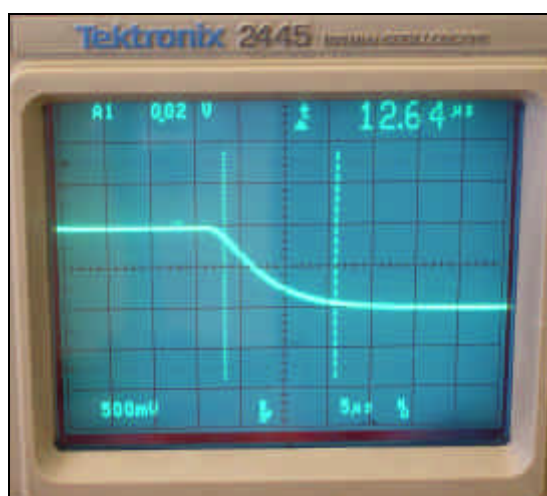
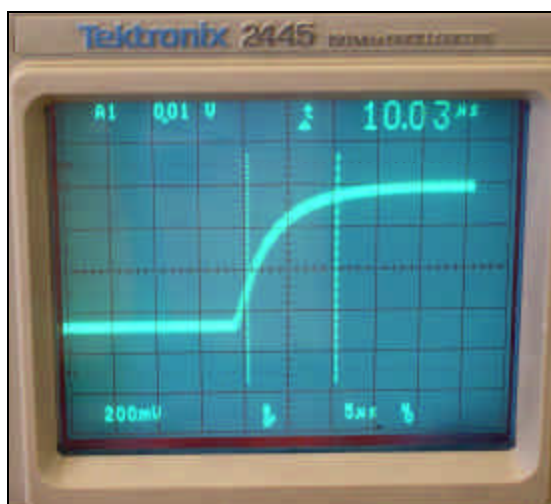


Ausgangssignal gesamt

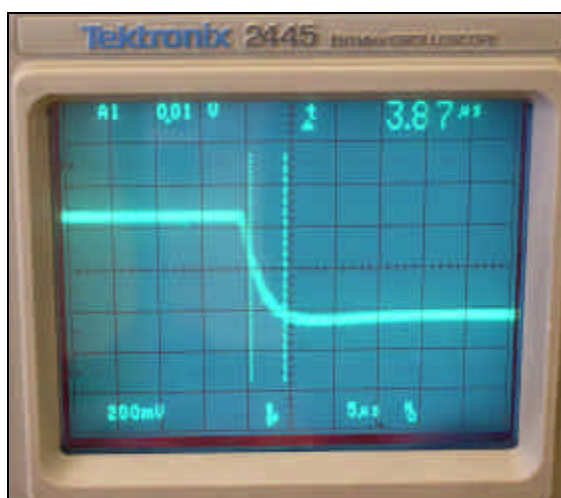
Mit Lipshitz-Filter:



ansteigende Flanke

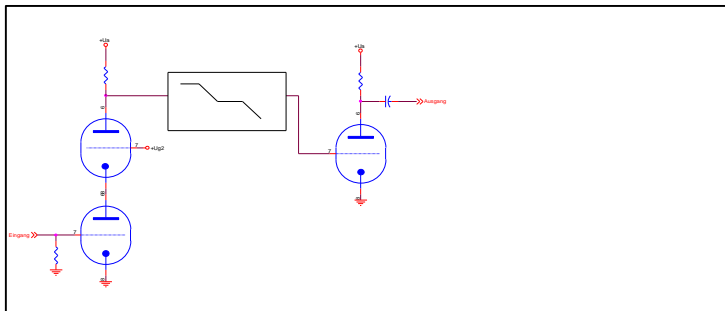


abfallende Flanke



„Nicht zufriedenstellend“

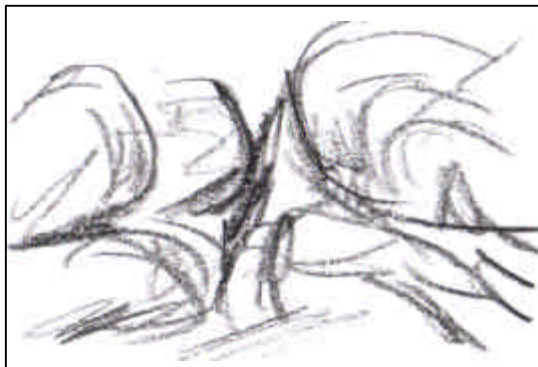
Platz 4 „Kaskode“



Verbale Beschreibung der Höreindrücke:

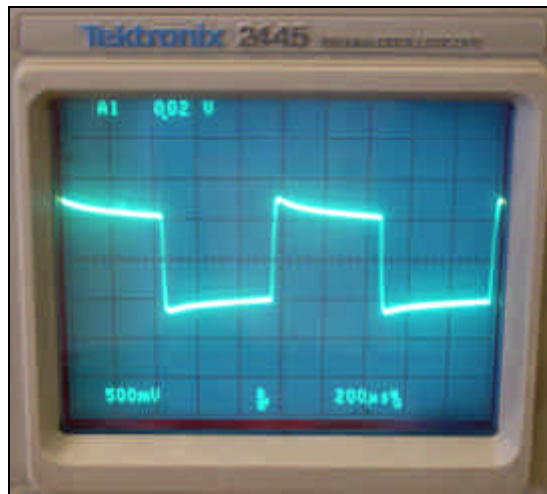
- ? Es liegt ein Nebelschleier vor der Musik, sie wirkt wie verdeckt
- ? Bei Erhöhung der Lautstärke schon bedrängend, wenn noch nicht intensiv
- ? Instrumente räumlich schlecht zu orten
- ? Schwer, bedrängend, breiig, bedrohlich

Visuelle Empfindung eines Hörers beim Zuhören:



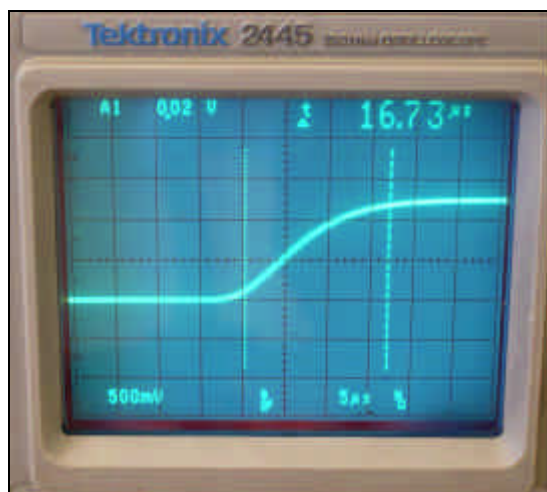
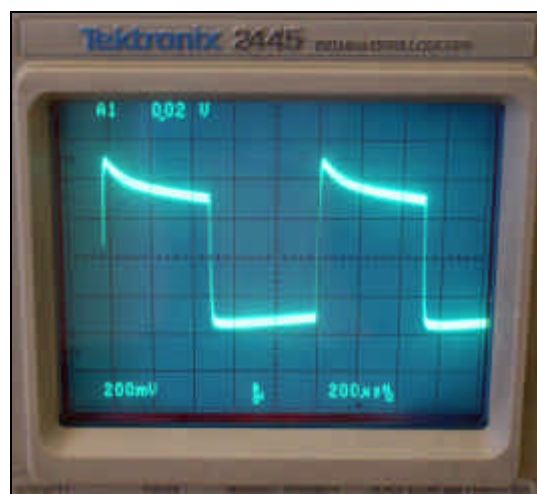
Rechteckantworten Phonostufe „Kaskode“ (Platz 4)

Mit Hagerman-Filter:

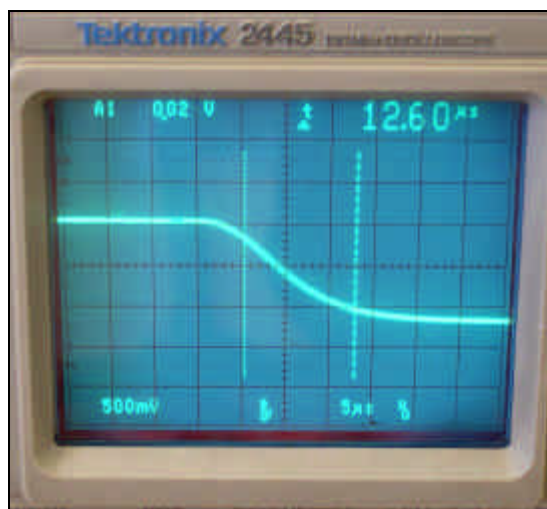
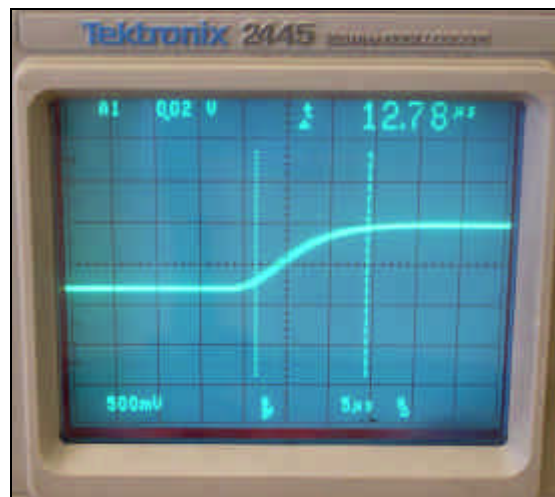


Ausgangssignal gesamt

Mit Lipshitz-Filter:



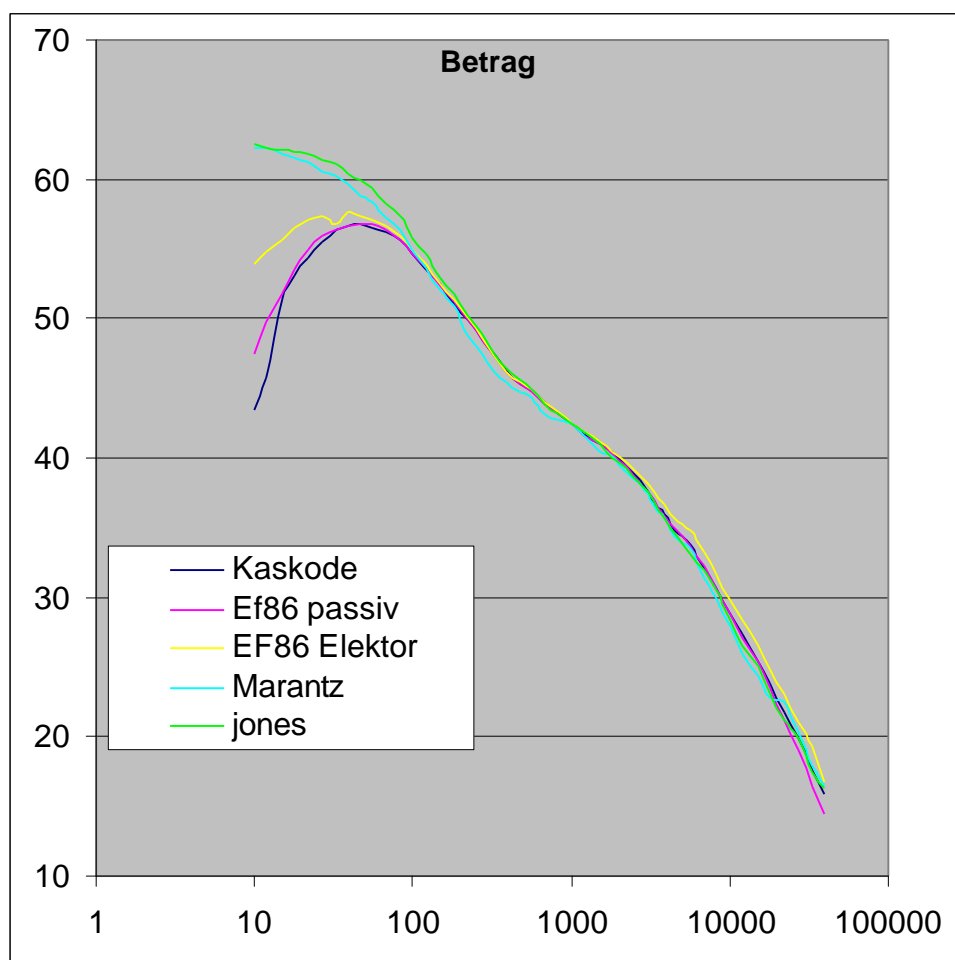
ansteigende Flanke



abfallende Flanke

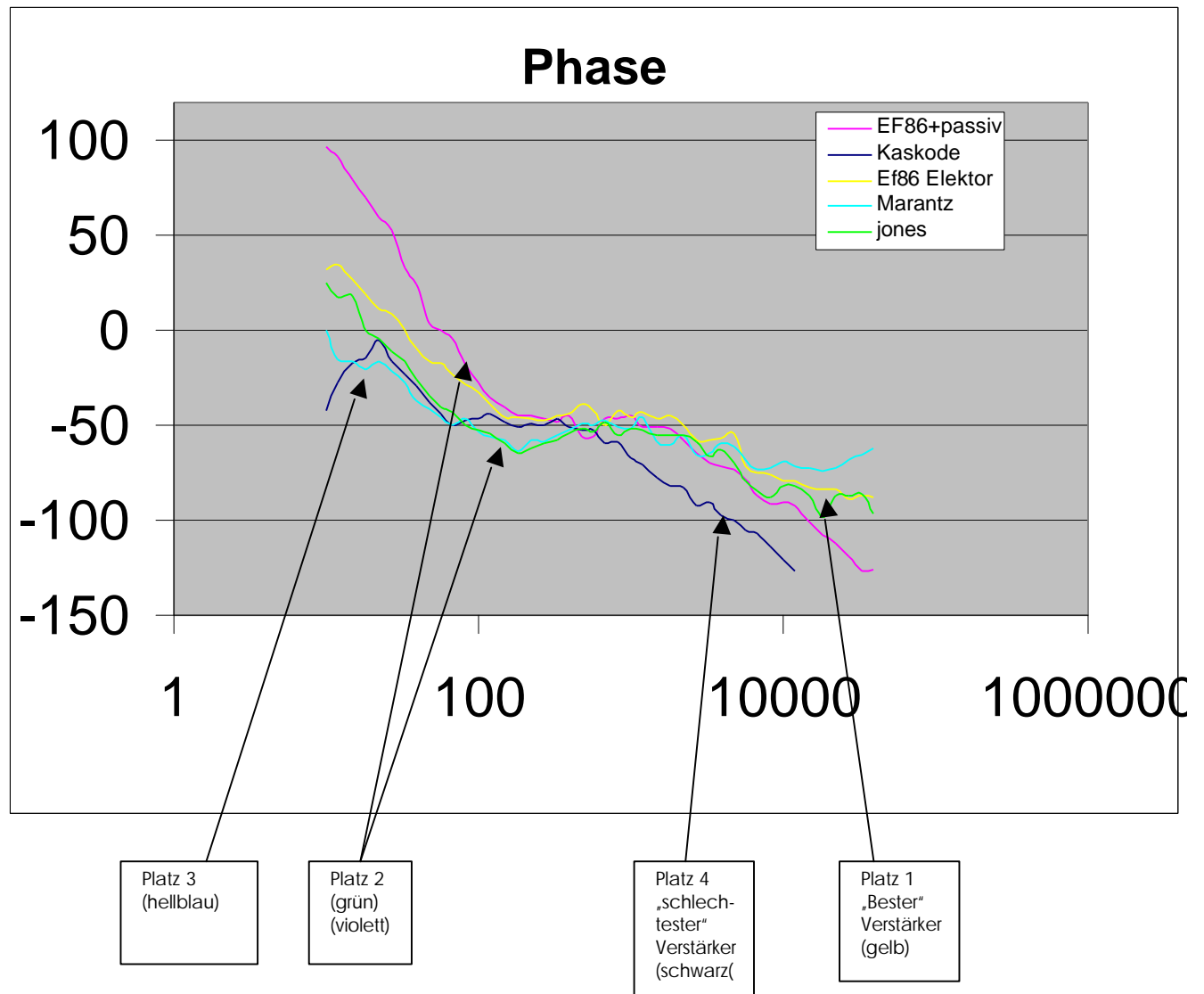


Überraschend war, daß die meßtechnisch aufgenommenen Frequenzgänge der einzelnen Verstärker keinerlei Korrelation zu den Hörempfindungen zeigten:



Die Betragsfrequenzgänge sind nahezu identisch, wenn man vom eher unwesentlichen Tiefstfrequenzbereich absieht.

Die Phasenfrequenzgänge lieferten ebenfalls keinen befriedigenden Erklärungsansatz:



Die durchgeführten Tests mit dem RIAA-Inversfilter zeigten dagegen jedoch eine eindeutige Übereinstimmung zwischen Meßwerten und Höreindruck.

Zusammenfassung und Interpretation der Ergebnisse

Die durchgeführte Testreihe mit dem RIAA-Inversfilter führte zu einer eindeutigen Korrespondenz zwischen der Qualität der am Oszilloskop sichtbaren Rechteckwiedergabe und den zuvor gewonnenen Höreindrücken. Daher kann die Qualität der Rechteckwiedergabe in der beschriebenen Testanordnung als Beurteilungskriterium für die zu erwartende subjektive Wahrnehmung der Klangqualität verwendet werden. Betrags- und Phasenfrequenzgänge, zumindest im Rahmen der im Rahmen dieses Labors bei Ihrer Messung erzielten Genauigkeit, haben sich dagegen als hierfür unbrauchbar erwiesen.

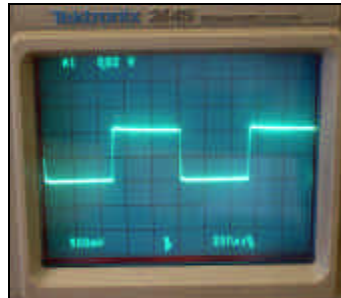
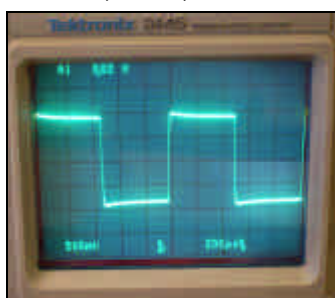
Die Ergebnisse werden auf der Folgeseite noch einmal zusammengefaßt dargestellt:

Mit Hagerman-Filter:

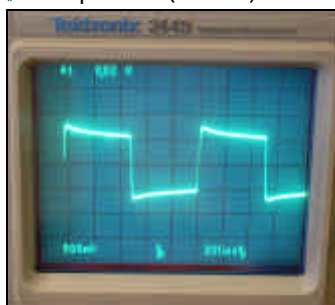
„EF86 Elektor“ (Platz 1)

Mit Lipshitz-Filter:

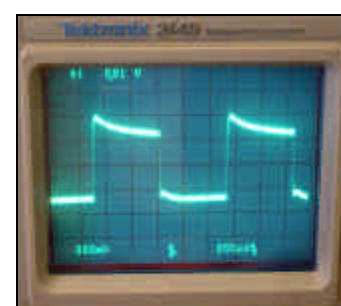
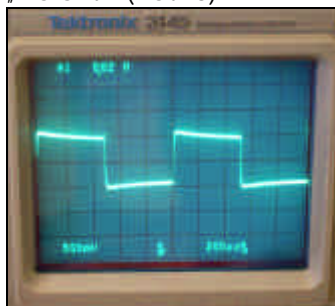
„Jones“ (Platz 2)



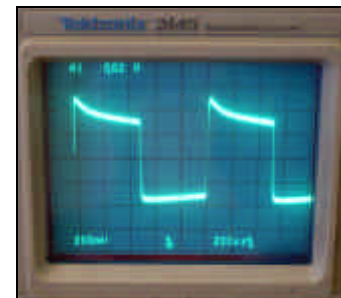
„EF86 passiv“ (Platz 2)



„Marantz“ (Platz 3)



„Kaskode“ (Platz 4)



Bei der Interpretation der Ergebnisse fallen drei Dinge besonders auf:

Die Verwendung der Lipshitz- Filterfunktion hat eine deutlich größere Aussagekraft als es bei Verwendung der Hagerman-Filterfunktion der Fall ist. Dies ist wahrscheinlich dadurch zu erklären, daß das Ausgangssignal des Lipshitz-Filters deutlich mehr höchstfrequente Anteile hat, visuell erkennbar am eher „abrupten“ Ausklingen der am Filterausgang sichtbaren Impulsnadeln, währen diese beim Hagerman-Filter praktisch exponentiell (VZ1-Tiefpaßcharakteristik) ausklingen.

Man würde eigentlich erwarten, daß der hier auf Platz 2 beurteilte Verstärker nach Jones den besten Höreindruck ergeben müßte. Auch wenn die Unterschiede in der Klangempfindung zwischen „EF86-Elektor“ und „Jones“ von den Hörern als fast nicht merklich bezeichnet wurden, kann eine Erklärung hierfür gefunden werden: Bei der Optimierung der Einstellung der Gegenkopplung der Endstufe nach EICO wurde ebenfalls beobachtet, daß ein (dosiertes) Überschwingen der Rechteckkurve mit dem optimalen Klangeindruck in Bezug auf Räumlichkeit des Klangbilds und Trennbarkeit der Instrumente korrelierte. Da der Lautsprecher keine rein reelle Last darstellt, sondern einen induktiven Anteil hat, bedeutet ein Überschwingen des Rechtecks in Bezug auf die Spannung, daß der Stromfluß durch den Lautsprecher dann tatsächlich dem idealen Rechteck nahekommt. Ein spannungsmäßig ideales Rechteck führt jedoch zu einem rampenförmigen Stromanstieg. Im Rahmen dieses Labors durchgeführte Messungen des Stromflusses durch den Lautsprecher haben diesen Gedankengang bestätigt. Der akustische Effekt wird jedoch durch die Zeitableitung des Stromflusses durch den Lautsprecher generiert, die Spannung ist hier nur eine Hilfsgröße.

Die Phonostufen „Marantz“ und „Kaskode“, die nicht so gut abgeschnitten haben, zeigen ein deutlich unsymmetrisches und verzerrtes Rechtecksignal. Man hat es hier offensichtlich nicht nur mit Phasenfehlern , sondern auch mit Nichtlinearitäten zu tun. Man kann die Auswirkungen der beobachteten Verzerrungen im Frequenzbeeich als vom Verstärker zum Signal hinzuaddierte, im ursprünglichen Signal also nicht vorkommende, Frequenzkomponenten interpretieren. Es erscheint intuitiv plausibel, daß diese vom Hörer als Unschärfe oder als sich vor die Musik legender Schleier wahrgenommen werden.

Quellen

<http://www.huennebeck-online.de/papers/phonoentzerrung/phonoentzerrung.pdf>

<http://www.heise.de/ct/02/13/224/>

http://www.siteswithstyle.com/VoltSecond/Inverse_RIAA/Inverse_RIAA.html

http://www.euronet.nl/~mgw/background/riaa/uk_riaa_background_1.html

<http://www.vacutrace.com/pdf/iraa.pdf>