

AH PRE-1 Hifi-Vorverstärker

Entwicklungsdokumentation

Andreas Hünnebeck
ah@despammed.com

13. Januar 2005

Vorwort

Lohnt sich der Selbstbau von Hifigeräten?

Wie die meisten Fragen läßt sich auch diese Frage nicht eindeutig beantworten. Betrachtet man Komponenten der untersten Preisklasse, beispielsweise eine moderne Kompakt- oder Minianlage mit Tuner, CD-Spieler, Doppelkassetdeck und Verstärker zum Preis von DM 1000,- oder darunter, dann kann man diese Frage nur strikt verneinen; ein Selbstbau wäre bei weitem teurer, da solche in großen Stückzahlen auf den Markt geworfenen Geräte extrem billig produziert werden.

Interessant wird Selbstbau bei Hifi-Komponenten, die nur in sehr geringen Stückzahlen produziert werden und bei denen deshalb der endgültige Kundenverkaufspreis den Bauteilewert bei weitem übertrifft. Das betrifft insbesondere die sogenannten "High-End"-Geräte, wo der Bauteilewert oft gerade mal 10 % des Kundenverkaufspreis beträgt (man schaue mal in einen High-End Vorverstärker hinein und rechne den Wert der wenigen Bauteile zusammen). Hinzu kommt, daß diese Edelkomponenten in der Regel auch nur mit edler Optik angeboten werden, was die Produktionskosten weiter anhebt und worauf der Selbstbauer verzichten kann — im 19-Zoll Gehäuse von der Stange klingt ein Vorverstärker auch nicht schlechter als im Platingehäuse mit zentimeterdicker vergoldeter Frontplatte. Man kann also mit wenig finanziellem Aufwand sehr hochwertige Geräte selbst bauen, sofern Zeit kein Geld kostet.

Weiterhin hat der Selbstbau von Hifigeräten den Vorteil, daß man durch Hörtests mit verschiedenen Schaltungen schlußendlich den Klang bekommen kann, der einem am besten gefällt¹, und man nach einigen Jahren nicht wieder was neues kaufen muß, sondern durch das gezielten Auswechseln alter durch bessere Komponenten (die es z.B. beim Bau des Gerätes noch nicht gab) den Klang verbessern und damit auf den aktuellen Stand bringen kann.

Selbstbau von Vorverstärkern

Vorverstärker sind besonders dankbare Selbstbauprojekte, weil man

- nicht viel ausgeben muß,
- hohe Qualität erreichen kann,
- nicht viel falschmachen kann,
- und man, wenn doch mal was schiefgeht, nicht viel kaputtmachen kann (im Gegensatz z.B. zu einem Endverstärker).

Weiterhin ist der Vorverstärker gleichzeitig das Steuergerät der gesamten Anlage, und der Selbstbauer kann soviel (oder sowenig) Kontrollelemente einbauen wie er benötigt. Gerade in der "High-End" Szene gilt

¹Im Gegensatz zur sogenannten "wahren Hifi lehre", die den neutralen Klang (Draht mit Verstärkung) theoretisiert, bin ich der Meinung, daß dieses Ziel bisher noch nicht erreicht worden ist und wohl auch nicht erreichbar ist. Zu groß sind bisher die Klangunterschiede selbst teuerster Verstärker, von Plattenspielern oder gar Lautsprechern gar nicht zu reden. Jeder Musikliebhaber muß für sich selbst herausfinden, mit welchem Klangbild er am besten und längsten leben kann.

ja zur Zeit der Minimalismus², was dazu führt, daß selbst (oder gerade) teuerste Komponenten gerade mal vier Hochpegeleingänge haben (kein Phono), aus klanglichen Gründen auf den Monitorschalter verzichten, und von Kopfhörern scheinen die Entwickler auch noch nie gehört zu haben (und der alternative externe Kopfhörerverstärker läßt sich mangels Ausgang nicht anschließen).

Warum habe ich einen Vorverstärker selbst gebaut?

Bei mir führten mehrere Gründe dazu, einen Vorverstärker selbst zu bauen:

- Mein alter Vorverstärker hatte keinen Kopfhörerausgang.
- Er hatte keine getrennten Quellenwahlschalter für Hören und Aufnehmen.
- Beim Tuning des alten Vorverstärkers hatte ich die Grenzen des bestehenden Designs erreicht; mehr war nicht drin, ohne eine neue Schaltung zu entwickeln.
- Erfahrungen beim Tuning des alten Vorverstärkers ließen bei mir die Erkenntnis reifen: "Das kannst Du besser machen".
- Das "Studium" an offenen Vorverstärkern (z.B. Bryston 25BP) ließen bei mir zwei Erkenntnisse reifen:
 1. "Für sowenig Inhalt gibst Du nicht soviel Geld aus".
 2. "Sowas kannst Du auch machen".

Danksagung

Mein Dank geht an Thomas Magin, der die Schaltpläne in computerlesbare Form gebracht hat. Weiterhin danke ich meiner Freundin, die an vielen Abenden und Wochenenden auf mich verzichtete und stattdessen undankbarerweise unzählige Hörtests ertragen mußte.

²Diesen Minimalismus gibt es mittlerweile auch in der Schaltungstechnik, beispielsweise bei Nelson Pass, Greenwall oder auch Brain-Audio. Diese rühmen sich, mit teilweise mal gerade einem einzigen Verstärkungsbauteil (meist einem Mosfet) und nur wenigen anderen Bauteilen auszukommen. Man fragt sich dann natürlich, warum die Geräte genauso teuer sind wie z.B. die Bauteilgräber von Mark Levinson.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	2
Abbildungsverzeichnis	5
1 Vorgaben und Aufbau	7
1.1 Vorgaben	7
1.2 Aufbau	8
2 Der Phonovorverstärker	9
2.1 Aufbau	9
2.1.1 Die erste Verstärkerstufe	9
2.1.2 Der passive Tiefpaß	10
2.1.3 Die zweite Verstärker- und Filterstufe	11
2.1.4 Die Offsetkompensationsschaltung	13
3 Die Hochpegelausgangsstufe	17
4 Die Spannungsversorgung	19
4.1 Das externe Netzteil	19
4.2 Die lokale Spannungsregelung	19
5 Mechanischer Aufbau	21
5.1 Das Gehäuse	21
5.2 Die Platinen	22
6 Fazit	23
6.1 Klangqualität	23
6.2 Aufwand	23
Literaturverzeichnis	23
Weiterführende Literatur	24

<i>INHALTSVERZEICHNIS</i>	5
A Meßwerte	25
A.1 Frequenzgangmessungen	25
A.1.1 Frequenzgang der Hochpegelstufe	25
A.1.2 Frequenzgang der Phonovorstufe	25
A.2 Störsignalmessungen	26
A.2.1 Störsignalmessungen der Phonovorstufe	26
B Korrekturen und Änderungsvorschläge	28
B.1 Korrekturen	28
B.2 Verbesserungen	28
B.3 Vereinfachungen	29
B.4 Andere Modifikationen	29
C Häufig gestellte Fragen (FAQ)	31
C.1 Allgemeine Fragen	31
C.2 Fragen zur Phonovorstufe	32
D Erfahrungen anderer Anwender	34
D.1 Anwender und ihre Kommentare	34
E Bauteile	35
E.1 Stückliste der Spezialbauteile	35
E.2 Hinweise zur Beschaffung von Bauteilen	36
F Über dieses Dokument	37

Abbildungsverzeichnis

2.1	Schaltplan des Phonovorverstärkers	15
2.2	Foto der Phonoplatine	16
3.1	Schaltplan der Hochpegelausgangsstufe	18
3.2	Foto der Hochpegelplatine	18
4.1	Schaltplan der Spannungsregelung	20
5.1	Foto der Vorstufe von vorne	21
5.2	Foto der Vorstufe von oben	22
A.1	Frequenzgang der Hochpegelstufe	26
A.2	Frequenzgang der MC Phonovorstufe	27
A.3	Störsignalspektrum der MC Phonovorstufe	27

Kapitel 1

Vorgaben und Aufbau

1.1 Vorgaben

Der Vorverstärker sollte folgende Vorgaben erfüllen:

- Eingänge
 - 5 unsymmetrische Hochpegeleingänge normaler Empfindlichkeit
 - ein unsymmetrischer MC-Phonoeingang mit $150\ \mu\text{V}$ Empfindlichkeit
- Ausgänge
 - ein Tonbandausgang
 - ein Endstufenausgang
 - ein Kopfhörerausgang, der einen Kopfhörer mittlerer Empfindlichkeit und Impedanz treiben kann
- Kontrollelemente
 - getrennte Quellschalter für Hören und Aufnehmen
 - keine Klangsteller
 - kein Balancesteller
 - Schalter zur Umschaltung zwischen Endstufen- und Kopfhörerausgang
- Klangbestimmende Vorgaben
 - externes Netzteil
 - keine Koppelkondensatoren
 - keine DC-Offsetregelung, um Pumpen zu verhindern
 - Frequenzgang ab DC, soweit technisch machbar
 - Relaissteuerung *vor Ort*
 - simple Schaltungstechnik mit möglichst wenig vom Signal durchlaufenen Bauteilen
 - kanalgetrennte Spannungsregelung für jede Baugruppe *vor Ort*

1.2 Aufbau

Der Vorverstärker besteht insgesamt aus zwei Verstärkerstufen:

- einem Phonovorverstärker auf einer eigenen Platine, der das Ausgangssignal eines Low-Output MC-Tonabnehmers auf Hochpegel verstärkt, und
- einem an das Lautstärkepotentiometer angeschlossenen Hochpegelverstärker auf einer eigenen Platine, der das Ausgangssignal von Hochpegelquellen puffert und leicht verstärkt, um damit einen Endverstärker betreiben zu können.

Einen Impedanzwandler vor dem Lautstärkepotentiometer gibt es nicht, weil er unnötig ist und nur zusätzliche Verzerrungen erzeugt. Das gleiche gilt für einen Impedanzwandler vor dem Tonbandausgang (zum Aufnehmen); auch diesen gibt es nicht.

Vor dem Lautstärkepotentiometer befindet sich ein 1 x 6 Quellenumschalter, mit dem man auswählt, welche Quelle man hören möchte. Der Ausgang des Phonovorverstärkers ist an einem der Kontakte angeschlossen. Der Quellenwahlschalter ist von billiger Machart, weil er nur (hochwertige) Relais betreibt.

Vor dem Tonbandausgang befindet sich ein 1 x 5 Quellenumschalter, mit dem man auswählt, welche Quelle man aufnehmen möchte. Der Ausgang des Phonovorverstärkers ist an einem der Kontakte angeschlossen. Der Quellenwahlschalter ist von billiger Machart, weil er nur (hochwertige) Relais betreibt.

Kapitel 2

Der Phonovorverstärker

2.1 Aufbau

Der Phonovorverstärker verstärkt das Signal eines MC-Tonabnehmersystems mit $150\mu\text{V}$ Empfindlichkeit auf Hochpegel und entzerrt es gleichzeitig nach der von der RIAA festgelegten Entzerrkurve (siehe [H"u97]). Die IEC-Entzerrung kommt nicht in Frage, da der Plattenspieler nicht rumpelt und die nachfolgende Elektronik in der Lage ist, alle vom MC-System kommenden Signale zu verarbeiten. Normalerweise gibt es auch irgendwo in der Kette zwischen Tonabnehmersystem und Lautsprecher mindestens einen Hochpaß, der Infrschallsignale ausreichend dämpft.

Der Vorverstärker besteht aus mehreren gekoppelten Einzelstufen (siehe Schaltplan in Abbildung 2.1 auf Seite 15):

1. einer extrem rauscharmen linearen Verstärkerstufe mit 40 dB Verstärkung,
2. einem passiven Tiefpaß von 2122 Hz ($75\ \mu\text{s}$),
3. einer zweiten Verstärkerstufe, die gleichzeitig als aktives Filter für die beiden Pole $3180\ \mu\text{s}$ und $318\ \mu\text{s}$ dient,
4. und schließlich einer Offsetkompensationsschaltung, die den Offset der ersten Verstärkerstufe eliminiert.

Die Aufteilung in zwei Verstärkerstufen ist notwendig, weil eine Gesamtverstärkung von 64 dB bei 1kHz (84 dB bei 20 Hz!) mit einer einzigen Stufe nicht mehr in hoher Qualität machbar ist; der Klirrfaktor wäre zu hoch, weil bei einer einzelnen Stufe nicht genügend Schleifenverstärkung zur Reduzierung der Verzerrungen vorhanden ist.

Die Wahl zweier getrennter Filter statt eines einzigen Kompositfilters zur RIAA-Entzerrung hat seine Ursache darin, daß ein Kompositfilter für alle drei Pole ist nur sehr kompliziert zu berechnen ist, weil die Pole recht nah beieinanderliegen und sich gegenseitig beeinflussen. Wer die sehr ausführlichen Berechnungsgrundlagen in [Lip79] begutachtet hat, versteht das schnell.

Weitere Designgründe finden sich in den folgenden Beschreibungen der einzelnen Stufen.

2.1.1 Die erste Verstärkerstufe

Es gibt mittlerweile extrem rauscharme Operationsverstärker, die auch preislich mit gepaarten rauscharmen Transistorpärchen durchaus vergleichbar sind, aber leichter erhältlich als diese. Ausserdem macht ein

Transistorpaar allein noch keinen Verstärker und erfordert wesentlich mehr Aufwand bei der Regelung der Versorgungsspannung und sehr hohe Präzision der verstärkungsbestimmenden Widerstände. Beispiele für in Frage kommende Operationsverstärker sind der LT1028 von Linear Technology und der AD797 von Analog Devices.

Ein nichtinvertierender Verstärker von ca. 40 dB Verstärkung wird mit Hilfe eines Gegenkopplungsnetzwerks zweier Widerstände von $R_8 = 1k\Omega$ und $R_{12} = 10\Omega$ aufgebaut¹. Ich tendiere zwar normalerweise nicht zu solch niedrigen Gegenkopplungswiderständen, um den Ausgang des Operationsverstärkers nicht unnötig zu belasten (aus Wärme- und klanglichen Gründen), in diesem Fall müssen wir aber eine Ausnahme machen, da R_{12} vom Eingangsrauschstrom durchflossen wird. Er sollte deshalb so klein gehalten werden sollte, daß sein Beitrag zum Rauschen des Verstärkers vernachlässigbar wird.

Der Eingangswiderstand wird mit dem Widerstand R_2 parallel zum Eingang realisiert, der passend zum MC-System gewählt wird. Bei Low-Output MC-Systemen sind das 100-150 Ω , bei High-Output MC-Systemen kann man bis zu 1000 Ω gehen (Herstellerausgabe beachten). Ich habe hier $R_2 = 100\Omega$ gewählt.

Das führt jetzt dazu, daß wir am nichtinvertierenden Eingang einen Quellwiderstand von $100\Omega \parallel 6\Omega$ und am invertierenden Eingang von $1000\Omega \parallel 10\Omega$ haben. Dieses Ungleichgewicht führt dazu, daß der Eingangstrom (der bei den genannten Operationsverstärkern ziemlich hoch ist), der durch beide Quellwiderstände fließt, eine zusätzliche Offsetspannung hervorruft, die dann um 40 dB verstärkt wird. Normalerweise wird zur Reduzierung dieser zusätzlichen Offsetspannung ein kleiner Widerstand vor den invertierenden Eingang geschaltet, der das Ungleichgewicht kompensiert. Da dieser Zusatzwiderstand aber auch vom Rauschstrom durchflossen wird, habe ich ihn hier weggelassen. Der Offset wird dann später von der Offsetkompensation eliminiert.

Später habe ich dann noch in einem Kanal R_8 durch die Serienschaltung eines 750 Ω Widerstands und eines 500 Ω Trimmers ersetzt, um eventuelle Kanalunterschiede des Tonabnehmersystems ausgleichen zu können.

2.1.2 Der passive Tiefpaß

Für den 75 μ s Tiefpaß habe ich aus folgenden Gründen ein passives Filter gewählt:

1. Der 75 μ s Tiefpaß muß als erstes Filter kommen, weil sonst die Gefahr besteht, daß die nachfolgenden Verstärkerstufen im Hochtonbereich übersteuert werden.
2. Die erste Verstärkerstufe kann nicht mit einem invertierenden Verstärker realisiert werden, aufgrund des stark erhöhten Rauschens des Eingangswiderstands. Zu den geschätzten 6 Ω Generatorwiderstand meines MC-Systems kämen nochmals 100 Ω Eingangswiderstand in Serie dazu, die dann eine um

$$\sqrt{\frac{100\Omega + 6\Omega}{6\Omega}} = 4.2 = 12.5dB$$

höhere Eingangsrauschspannung zur Folge hätten. Das ist nicht akzeptabel.

3. Der 75 μ s Tiefpass ist als aktives Filter bei Verwendung nichtinvertierender Verstärkerstufen nicht exakt nachbildbar, weil damit Verstärkungen von unter 0 dB nicht möglich sind und dadurch ein zweiter unerwünschter Pol entsteht. Eine exakte Filterung ist nur möglich, wenn ein zusätzliches passives Filter an das aktive Filter angekoppelt wird, welches den unerwünschten Pol kompensiert. Da dieser Pol aber abhängig von der Verstärkung ist, kann die Verstärkung nicht mehr variiert werden, da die Kompensation dann auch geändert werden müsste. Dies ist bei MC-Systemen aber wünschenswert, weil diese in Ausgangsspannung (50 μ V bis 2 mV) und Quellimpedanz sehr viel stärker variieren als MM-Systeme.

¹Die Verstärkung berechnet sich nach der Formel

$$V = 1 + \frac{R_8}{R_{12}}$$

Der passive Tiefpaß besteht aus einem simplen RC-Filter. Zur Berechnung geht man wie folgt vor:

$$\text{Aus } \omega = \frac{1}{2\pi f_g} \quad \text{und} \quad f_g = \frac{1}{2\pi R_{20} C_{35}} \quad \text{folgt:}$$

$$\omega = R_{20} C_{35} \quad \text{also} \quad C_{35} = \frac{\omega}{R_{20}} \quad \text{bzw.} \quad R_{20} = \frac{\omega}{C_{35}} \quad (2.1)$$

Der Kondensator muß von sehr hoher Qualität bezüglich Toleranz und Klang sein. Es kommen eigentlich nur Styroflexkondensatoren in Frage, weil sie in 1% Genauigkeit erhältlich sind. Es gibt sie allerdings nur bis maximal 15nF. Ich habe hier $C_{35} = 10\text{nF}$ gewählt, weil sich dann der zugehörige Widerstand nach Gleichung 2.1 zu $R_{20} = 7,5\text{k}\Omega$ ergibt, und dieser Wert ist mit 1% Genauigkeit erhältlich. Ich habe dabei aus einer größeren Menge mit Hilfe eines Kapazitätsmeßgerätes zwei Kondensatoren selektiert, die die gleiche Kapazität haben und möglichst nah am Sollwert liegen. Auch die $7,5\text{k}\Omega$ Widerstände wurden mit Hilfe eines Widerstandsmeßgerätes auf exakte Gleichheit selektiert.

2.1.3 Die zweite Verstärker- und Filterstufe

Die zweite Verstärkerstufe ist zugleich das Filter für die beiden Pole $318\mu\text{s}$ und $3180\mu\text{s}$. Ein passives Filter ist zwar möglich, macht aber wenig Sinn, weil man dann das Signal viel mehr verstärken müsste. Das wiederum erhöht den Klirrfaktor, und das wollen wir nicht.

Wir brauchen also ein Filter, welches bei DC mit voller Verstärkung arbeitet, dann bei 50,05 Hz mit 6 dB/Oktave abfällt und bei 500,5 Hz wieder in einen geraden Frequenzgang übergeht. Das lässt sich einfach dadurch erreichen, daß man dem Widerstand R_{26} im Gegenkopplungsnetzwerk eine Serienschaltung aus dem Widerstand R_{24} und dem Kondensator C_{36} parallel schaltet. Bei sehr niedrigen Frequenzen wirkt C_{36} als Unterbrechung, so daß die Verstärkung nur von R_{26} abhängt. Bei sehr hohen Frequenzen wirkt C_{36} als Kurzschluß, so daß die Verstärkung von $R_{26}||R_{24}$ abhängt.

Zur genauen Berechnung muß man die Formeln der Übertragungsgleichung der Filterschaltung herleiten und dann einen Koeffizientenvergleich mit der gewünschten Filterformel machen. Wir wollen das unter Annahme eines idealen Operationsverstärkers (unendliche Differenzverstärkung, unendliche Eingangsimpedanz, keine Ausgangsimpedanz) durchrechnen².

Die Übertragungsgleichung der Filterschaltung ist:

$$A_s = 1 + \frac{R_{26} || (R_{24} + C_{36})}{R_3}$$

Nach Ausrechnung des Bruches ergibt sich das zu:

$$A_s = 1 + \frac{1 + j\omega C_{36} R_{24}}{1 + j\omega C_{36} (R_{26} + R_{24})} * \frac{R_{26}}{R_{22}}$$

Dies müssen wir jetzt konjugiert komplex erweitern

$$A_s = \frac{1 + j\omega C_{36} (R_{26} + R_{24})}{1 + j\omega C_{36} (R_{26} + R_{24})} * \frac{R_{22}}{R_{22}} + \frac{1 + j\omega C_{36} R_{24}}{1 + j\omega C_{36} (R_{26} + R_{24})} * \frac{R_{26}}{R_{22}}$$

und ausrechnen:

$$A_s = \frac{R_{26} + R_{22}}{R_{22}} * \frac{1 + j\omega C_{36} \frac{(R_{26} + R_{24}) R_{22} + R_{26} R_{24}}{R_{26} + R_{22}}}{1 + j\omega C_{36} (R_{26} + R_{24})} \quad (2.2)$$

²Eine vergleichbare Anleitung findet sich in [Skr88] auf Seite 141f.

Die Übertragungsgleichung der beiden Pole $318\mu\text{s}$ und $3180\mu\text{s}$ ergibt sich aus der Kombination der zugehörigen Gleichungen (siehe [H"u97, Formeln (3) und (4)]). und einem Verstärkungsfaktor k zu:

$$A_f = k * \frac{1 + j\omega 318\mu\text{s}}{1 + j\omega 3180\mu\text{s}} \quad (2.3)$$

Der Koeffizientenvergleich der beiden Gleichungen (2.2) und (2.3) ergibt dann das lineare Gleichungssystem:

$$k = \frac{R_{26} + R_{22}}{R_{22}} = 1 + \frac{R_{26}}{R_{22}} = \text{DC-Verstärkung} \quad (2.4)$$

$$318\mu\text{s} = C_{36} \frac{(R_{26} + R_{24})R_{22} + R_{26}R_{24}}{R_{26} + R_{22}} \quad (2.5)$$

$$3180\mu\text{s} = C_{36}(R_{26} + R_{24}) \quad (2.6)$$

Wenn man C_{36} und k als bekannt (bzw. gewünscht) voraussetzt, kann man dieses lineare Gleichungssystem so auflösen, daß man die Berechnungsformeln der Widerstände R_{26} , R_{24} und R_{22} bekommt³:

$$R_{26} = \frac{3180\mu\text{s}}{\frac{10C_{36}}{9}(1 - \frac{1}{k})} \quad (2.10)$$

$$R_{24} = \frac{R_{26}}{9}(1 - \frac{10}{k}) \quad (2.11)$$

$$R_{22} = \frac{R_{26}}{k-1} \quad (2.12)$$

Ich habe hier wiederum aus Qualitätsgründen für C_{36} einen 10nF Styroflexkondensator eingesetzt und als DC-Verstärkung $k = 171$ gewählt. Dann berechnen sich die Widerstände zu:

$$R_{26} = 287883\Omega$$

$$R_{24} = 30116\Omega$$

$$R_{22} = 1693\Omega$$

Für den Kondensator und die Widerstände gilt das in 2.1.2 auf Seite 11 Gesagte.

Hörversuche im Vergleich zu meinem alten Vorverstärker⁴ mit Auskopplung des Signals vom Ausgang von U_1 ergaben, daß die neue Phonostufe zwar sauberer klang, wesentlich mehr Auflösung hatte und auch in den Frequenzextremen weiterreichte, aber gleichzeitig auch kühler, steriler und metallischer und insgesamt weniger musikalisch klang. Erst nach vielen Versuchen fand ich eine Lösung, die der neuen Phonostufe die vermissten Eigenschaften brachte: eine in die Gegenkopplung einbezogene Klasse-A Ausgangstufe mit einem Leistungsmosfet (Dank an Nelson Pass).

Q_1 wird mit dem Sourcewiderstand $R_{28} + R_{29}$ als Sourcefolger betrieben. Der Ruhestrom durch Q_1 berechnet sich nach der Formel

$$I_r = \frac{-(-U_B)}{R_{28} + R_{29}}$$

³Für den Spezialfall $k = 10$ vereinfachen sich die Gleichungen zu

$$R_{26} = \frac{3180\mu\text{s}}{C_{36}} \quad (2.7)$$

$$R_{24} = 0 \quad (2.8)$$

$$R_{22} = \frac{R_{26}}{9} \quad (2.9)$$

so daß man sogar einen Präzisionswiderstand einspart.

⁴Audioplan Homogen von 1986

zu 22,7 mA. Q_1 muß dabei eine Verlustleistung von

$$P_{tot} = (+U_B)I_r$$

gleich 340 mW abführen, R_{28} und R_{29} jeweils die Hälfte, also 170 mW. Q_1 muß deshalb mit einem Fingerkühlkörper versehen werden, ohne diesen wird er sehr heiß⁵.

Die Auskopplung zum Hochpegelvorverstärker und zum Tonbandausgang erfolgt jeweils über einen Serienwiderstand von 50Ω , da ich sowohl intern wie extern 50Ω Koaxkabel verwende (RG58 bzw. RG214U) und der Serienwiderstand eventuell auftretende Reflektionen⁶ vernichtet.

2.1.4 Die Offsetkompensationsschaltung

Die beiden Stufen des Phonovorverstärkers haben zusammen eine Gleichspannungsverstärkung von ca. 85dB.

Kurz gesagt, ist es mit der gegenwärtigen Fertigungstechnik von Operationsverstärkern praktisch nicht möglich, hier tatsächlich auch Gleichspannung zu verstärken – und es ist auch nicht sinnvoll. Es gibt mehrere Möglichkeiten, die Gleichspannungsverstärkung zu verringern bzw. auszuschalten:

1. Es bietet sich natürlich an, einfach am Ausgang kapazitiv auszukoppeln. Das hat jedoch den Nachteil, daß die Grenzfrequenz des entstehenden Hochpaß abhängig ist vom Eingangswiderstand der angeschlossenen Stufen (wobei ein eventuelles Aufnahmegerät nicht vergessen werden darf, es sei denn, man puffert es mit einem Impedanzwandler ab). Will man sichergehen, daß auch bei niedrigen Eingangsimpedanzen die Grenzfrequenz nicht zu hoch wird, muß man einen großen Kondensator einsetzen, und diese sind häufig klanglich nicht zu empfehlen.
2. Man kann auch zwischen der ersten und der zweiten Stufe kapazitiv koppeln. Man muß dann jedoch parallel zu C_{35} einen Widerstand schalten, der den Eingangsruhestrom von U_1 gegen Masse ableitet. Dieser Widerstand muß sehr viel größer als R_{20} sein, um das Filter nicht zu beeinflussen, und sorgt deshalb für eine höhere Ausgangsoffsetspannung von U_1 .
3. Man kann die DC-Verstärkung der zweiten Stufe auf 0 dB reduzieren, indem man zu R_{22} einen Kondensator in Reihe schaltet. Es tritt dann praktisch nur noch der DC-Offset der ersten Stufe am Ausgang auf.

Für eine untere Grenzfrequenz von unter 20 Hz muß der Kondensator dann eine Kapazität von $4,7\ \mu\text{F}$ haben. Hörtests mit einem $6,8\ \mu\text{F}$ Kondensator (entsprechend 13 Hz untere Grenzfrequenz) gaben mir allerdings den Eindruck einer reduzierten Tiefendynamik (Wucht) gegenüber der "offenen" Version mit voller DC-Verstärkung. Will man deshalb beispielsweise auf eine untere Grenzfrequenz von 1 Hz gehen, dann benötigt man einen Kondensator von $82\ \mu\text{F}$, und der ist als Folientyp sehr groß und teuer. Ein Elko kommt nicht in Frage, weil keine nennenswerte Gleichspannung an ihm anliegt und er deshalb hohe Verzerrungen erzeugt.

4. Man kann den DC-Offset der ersten Stufe kompensieren, so daß nur noch der DC-Offset der zweiten Stufe am Ausgang anliegt. Dies kann man dadurch erreichen, daß man den Gleichspannungsanteil des Ausgangssignals der ersten Stufe auf den invertierenden Eingang des Operationsverstärkers der zweiten Stufe führt. Praktisch geschieht dies so, daß man zunächst das Ausgangssignal der ersten Stufe mit einem Tiefpaß filtert, dann mit einem Präzisionsoperationsverstärker verstärkt und das Resultat über einen hochohmigen Widerstand auf den Gegenkopplungswiderstand des Operationsverstärkers der zweiten Stufe führt. Dieser so entstandene Spannungsteiler muß genausoviel dämpfen, wie der Präzisionsoperationsverstärker verstärkt; dann ist die Kompensation perfekt.

⁵Die Spannungsregler für die Phonovorstufe müssen ebenfalls mit Fingerkühlkörpern versehen werden.

⁶Es ist fraglich, ob Überlegungen bezüglich Reflektionen im Audiobereich überhaupt eine Rolle spielen. Aber schaden tut's jedenfalls auch nicht.

Ich habe mich für die in Punkt 4 aufgeführte Lösung entschieden. R_{14} und C_{33} bilden einen Tiefpaß von etwa 1 Hz Grenzfrequenz. Der Präzisionsoperationsverstärker U_5 hat entsprechend der Formel

$$A = 1 + \frac{RVAR_1 + R_{18}}{R_{16}}$$

einen Verstärkungsfaktor von 119..128 (41,5 .. 42,1 dB), je nach der Stellung des Trimmers $RVAR_1$ ($1k\Omega$). R_{36} bildet zusammen mit R_{22} einen Spannungsteiler, dessen Dämpfung sich nach der Formel

$$A = \frac{R_{22} || R_{26}}{(R_{22} || R_{26}) + R_{36}}$$

in etwa zu 122,6 (41,8 dB) errechnet. Man sieht, daß Verstärkung und Dämpfung praktisch gleich sind, und das Trimpoti $RVAR_1$ dient dazu, diese im realen Betrieb auf exakt gleiche Beträge abzugleichen.

Ein Bild der bestückten Platine findet sich in Abbildung 2.2 auf Seite 16.

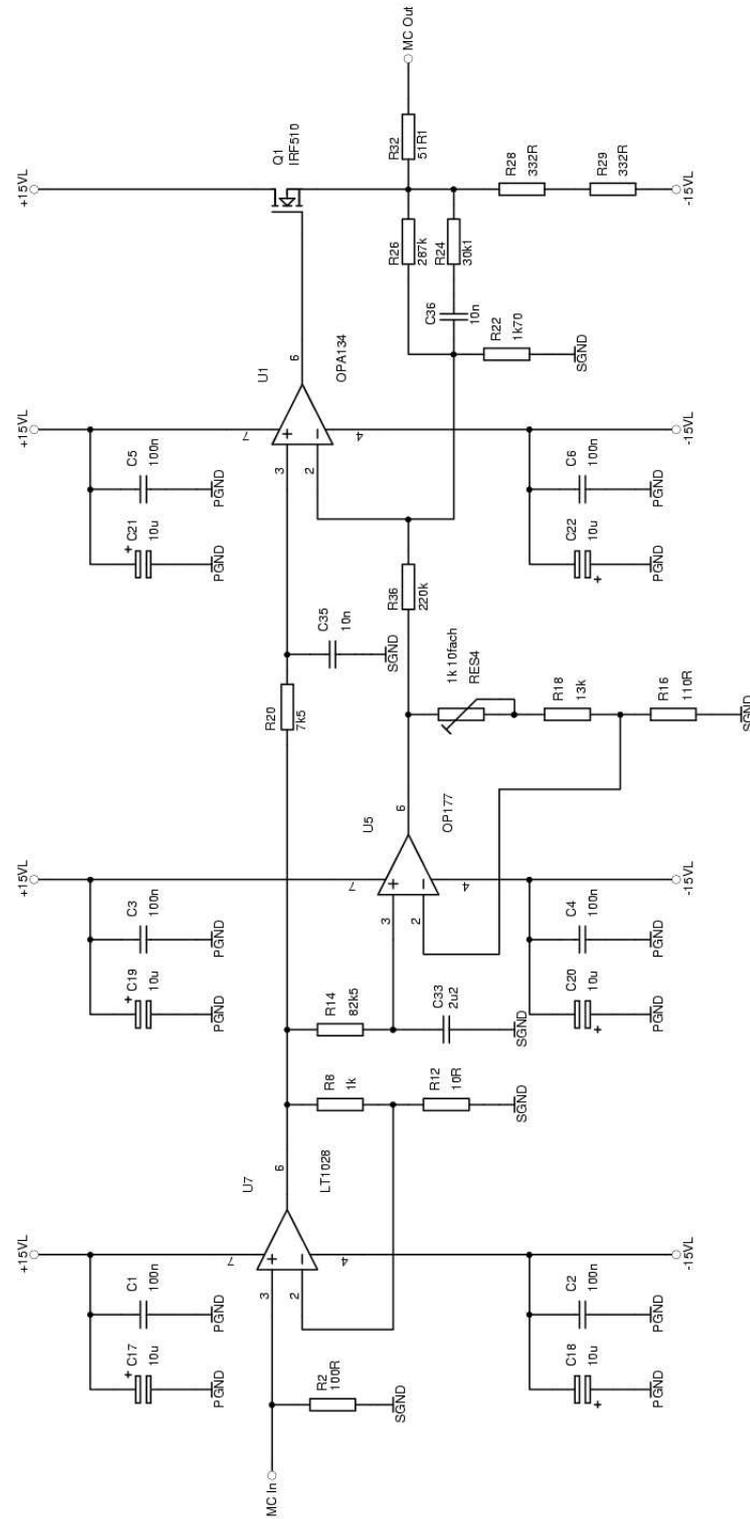


Abbildung 2.1: Schaltplan des Phono-Verstärkers

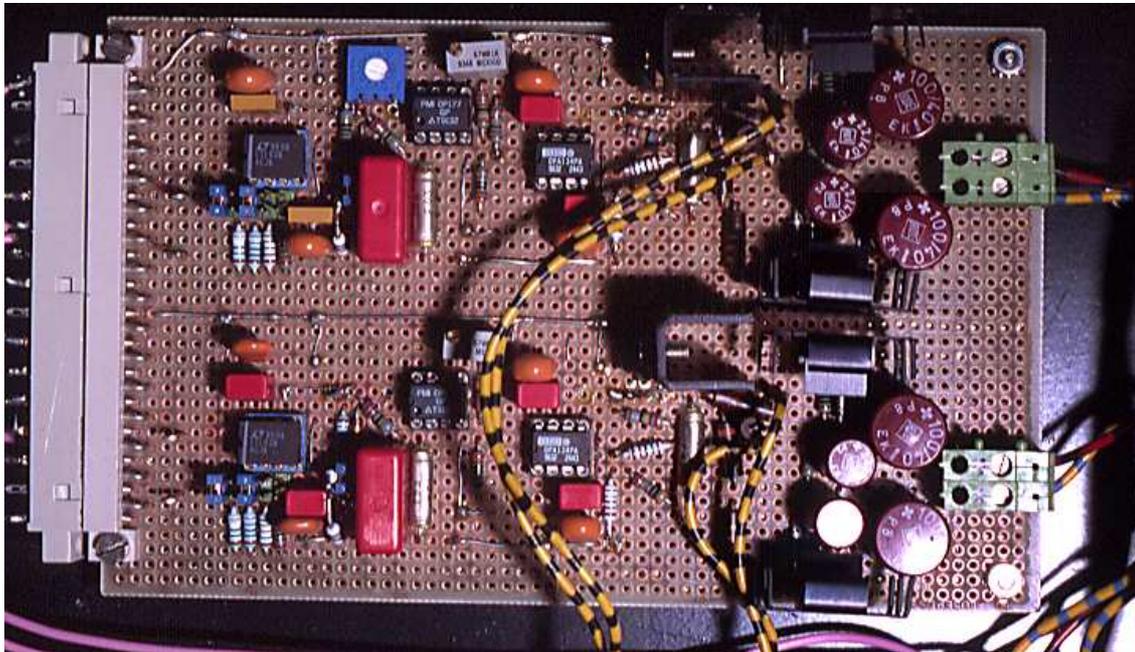


Abbildung 2.2: Foto der Phonoplatine

Kapitel 3

Die Hochpegelausgangsstufe

Die positiven Erfahrungen mit der Single Ended Class-A Ausgangsstufe des Phonovorverstärkers ließen erst gar nicht den Wunsch aufkommen, für die Hochpegelausgangsstufe nochmals verschiedene Varianten zu testen. Ich habe daher einfach die Schaltung der zweiten Stufe des Phonovorverstärkers genommen und folgende Anpassungen vorgenommen (siehe Schaltplan in Abbildung 3.1 auf Seite 18):

1. Anstelle der aktiven Filterung wird eine lineare Verstärkung von ca. 10 dB mit Hilfe der Widerstände R_{45} und R_{11} eingestellt¹. Der verwendete Operationsverstärker muß für eine Verstärkung von 1 kompensiert (bzw. kompensierbar) sein, da die effektive Eingangskapazität des Mosfet zusammen mit der Open-Loop Ausgangsimpedanz des Operationsverstärkers einen Tiefpaß bilden, der die Phase zusätzlich dreht und damit den Phasenrand verringert. Ich habe mich aus guter Erfahrung für den OPA134 entschieden — er klingt gut und hat FET-Eingänge, deren geringe Eingangsruhestrome die Verwendung eines hochohmigen Potentiometers erlaubt.
2. Der Ruhestrom durch den Mosfet wird von 22,7 mA auf 45,5 mA erhöht, um den Kopfhörer treiben zu können. Die Verlustleistung für Q_4 und R_{43} beträgt dann jeweils 680 mW.
3. Die Kühlkörper für den Mosfet und die Spannungsregler werden wegen der größeren Verlustleistung vergrößert.
4. Der Kopfhörer wird direkt angeschlossen, während der Endstufenausgang weiterhin über eine Serienimpedanz von 50 Ω angeschlossen wird.
5. Ein hochwertiges Potentiometer wird am Eingang der Stufe angeschlossen.

Ein Bild der bestückten Platine findet sich in Abbildung 3.2 auf Seite 18.

¹Die Verstärkung berechnet sich nach der Formel

$$V = 1 + \frac{R_{45}}{R_{11}}$$

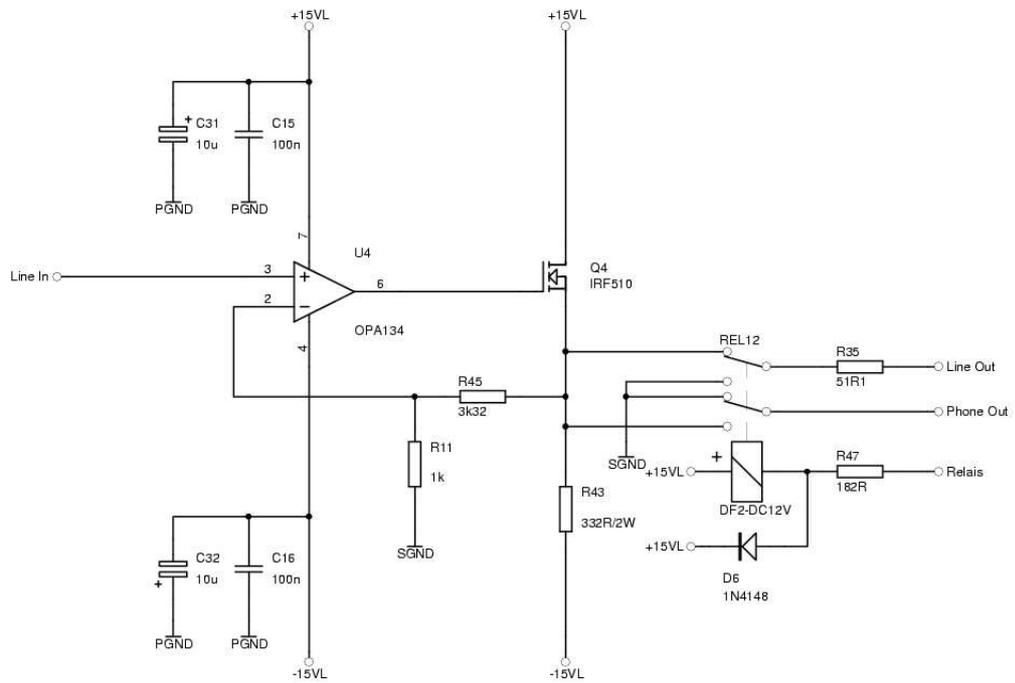


Abbildung 3.1: Schaltplan der Hochpegelausgangsstufe

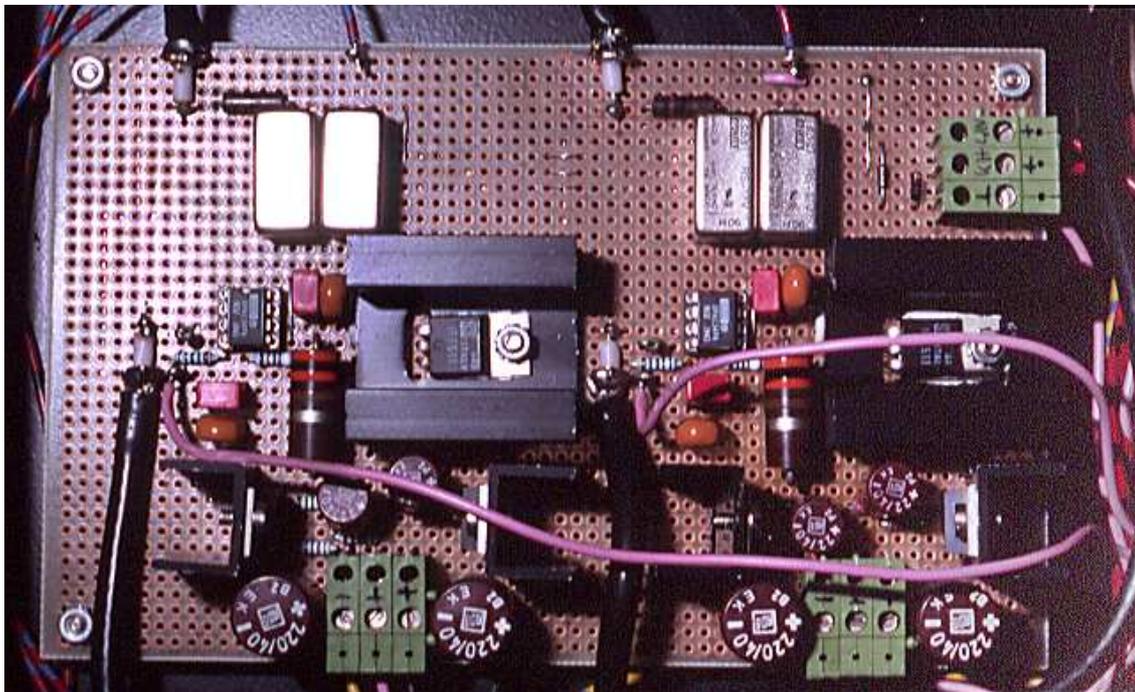


Abbildung 3.2: Foto der Hochpegelplatine

Kapitel 4

Die Spannungsversorgung

Ein mechanisch brummender und magnetische Streufelder erzeugender Netztrafo hat in der Nähe eines Phonovorverstärkers nichts verloren. Das Netzteil muß deshalb mit einem eigenen Gehäuse vorliebnehmen und sollte dann natürlich auch räumlich getrennt vom Vorverstärker aufgestellt werden. Die Spannungsregelung dagegen sollte so nah wie möglich am Verbraucher stattfinden. Lange Entfernungen¹ sollten strikt vermieden werden.

Ich habe mich daher entschlossen, den Netztrafo und die erste Siebung durch große Elkos in ein externes Gehäuse zu packen, die Spannungsregelung dagegen kanalgetrennt direkt an Phonostufe und Hochpegelstufe zu plazieren. Die $\pm 15V$ Spannungsregelung muß also insgesamt viermal aufgebaut werden.

4.1 Das externe Netzteil

Ein 120 VA Ringkerntrafo speist über eine 25 A Gleichrichterbrücke zwei Elkos zu je 15 mF. Den vier Dioden der Gleichrichterbrücke werden 100 nF Kondensatoren parallelgeschaltet, um schnelle Transienten wegzufiltern. Aus demselben Grund werden den 15 mF Elkos 6.8 μF Folienkondensatoren parallelgeschaltet.

4.2 Die lokale Spannungsregelung

Eine hochwertige Spannungsregelung erfordert hochwertige Bauteile. Allerdings ist es nicht notwendig, diese diskret aufzubauen, weil es mittlerweile gute integrierte Spannungsregler gibt. Ich habe mich für die einstellbaren Spannungsregler LT1085 (positiv) und LT1033 (negativ) entschieden; diese sind kompatibel zu LM317/LM337. Die Standardfestspannungsregler aus der Reihe 78xx und 79xx rauschen stärker und regeln schlechter, obwohl man sie auch in Highendvorverstärkern findet (Bryston 25 BP).

Durch R_4 und R_{38} wird die positive Ausgangsspannung eingestellt, mit R_5 und R_{39} die negative. C_{39} (bzw. C_{40}) legt den Justierungseingang des Spannungsreglers wechselstrommäßig auf Masse und verbessert dadurch die Brummunterdrückung um gut 20 dB. D_{13} (bzw. D_{14}) ist notwendig, um im Fall eines Kurzschluß am Ausgang zu verhindern, daß sich C_{39} (bzw. C_{40}) über den Justierungseingang des Spannungsreglers entlädt und diesen dadurch schädigt oder zerstört.

¹Ein Gegenbeispiel ist die Philosophie von Naim: dort befindet sich die Spannungsregelung der Vorverstärker entweder in einfacher Form in der Endstufe oder in verbesserter Form in einem externen Netzteil (Flatcap, Hicap, Supercap). Das erlaubt es, durch den Anschluß des Vorverstärkers an verschiedene teure Netzteile verschiedene Qualitätsstufen der Wiedergabe zu erreichen. Würde die Spannungsregelung von vorneherein gleich in den Vorverstärker eingebaut werden, dann könnte man vermutlich auch mit der billigen Lösung (Spannungsversorgung von Naim-Endstufe) schon eine deutlich höhere Wiedergabequalität erreichen —aber dann würde Naim wohl nicht mehr so viele externe Netzteile verkaufen.

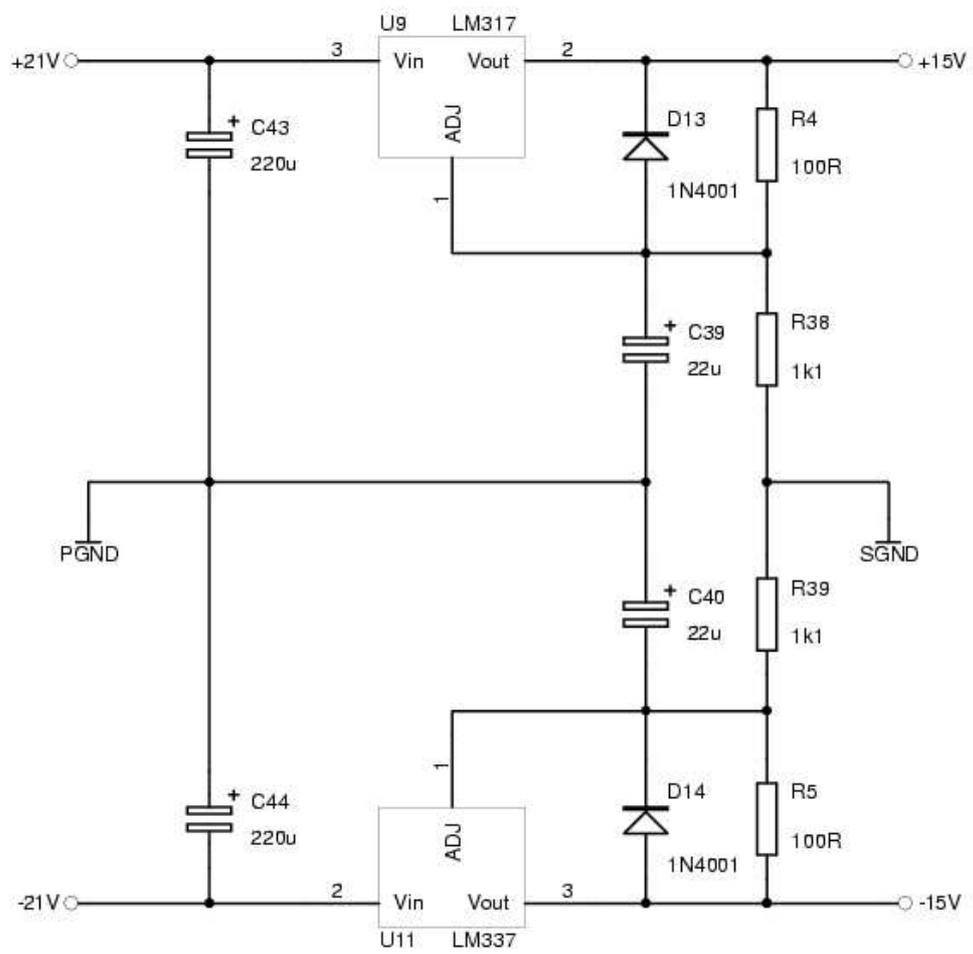


Abbildung 4.1: Schaltplan der Spannungsregelung

Kapitel 5

Mechanischer Aufbau

5.1 Das Gehäuse

Das verwendete Gehäuse ist ein 19-Zoll Gehäuse mit einer Höheneinheit (44 mm hoch) und 280 mm Tiefe. Bezogen habe ich es von Meyer-Elektronik (siehe Anhang E.2 auf Seite 36). Bis auf die 3 mm dicke Alu-Frontplatte besteht das gesamte Gehäuse aus Stahlblech.

Bestückt wurde das Gehäuse mit vergoldeten und isoliert montierten Cinch-Buchsen besserer Qualität (Stückpreis DM 5,-), wobei ich die Anschlüsse für einen Hochpegeleingang auf die Frontplatte gelegt habe. Damit erspart man sich die blinde Kramerei hinter der Anlage, wenn man mal schnell eine externe Quelle anschließen will.

Ein Bild der Vorstufe von vorne findet sich in Abbildung 5.1 auf Seite 21. Dort sieht man folgende Bedie-

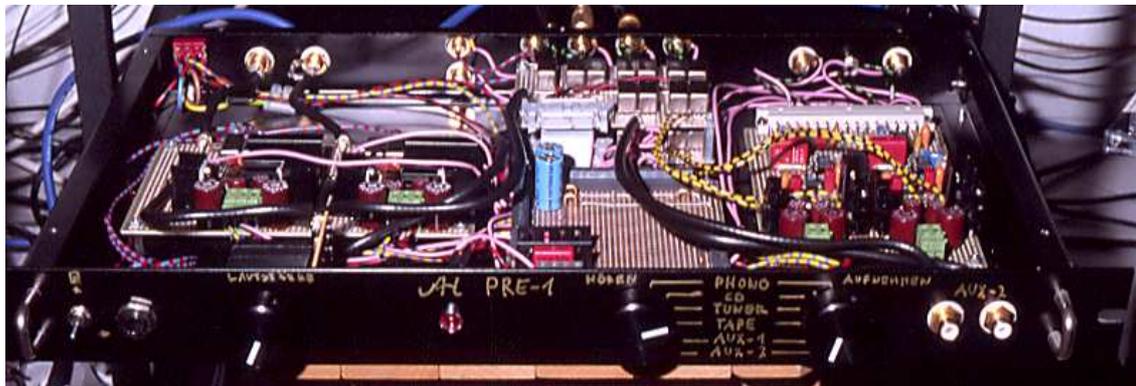


Abbildung 5.1: Foto der Vorstufe von vorne

nungselemente (von links nach rechts):

- den Umschalter zwischen Lautsprecher (d.h. Endstufe) und Kopfhörer
- den Kopfhörerausgang
- den Lautstärkereglern
- den Quellenwahlschalter zum Hören

- den Quellenwahlschalter zum Aufnehmen
- den Aux-2 Eingang

5.2 Die Platinen

Ich habe doppelseitig mit nicht durchkontaktierten Lötunkten kaschierte Experimentier-Punktrasterplatinen im Europaformat verwendet. Die beiden Kanäle der Hochpegelstufe passten bequem auf eine Platine, bei den beiden Kanälen des Phonovorverstärkers wurde es etwas enger, aber es ging noch. Die "Leiterbahnen" wurden von Hand in Form eines dünnen Drahts auf die Lötunkte gelegt und angelötet. Für die Masseleitungen wurde 1 mm dicker versilberter Draht verwendet.

Alle Masseleitungen wurden an einem zentralen Punkt auf einer eigenen kleinen Platine zusammengeführt. Insbesondere wurden für Signalmasse (SGND) und Spannungsversorgungsmasse (PGND) getrennte Leitungen benutzt — schließlich sollen Spikes auf der Spannungsversorgungsmasse nicht als Signal verstärkt werden (das ist besonders für den Phonovorverstärker zu beachten).

Ein Bild der Vorstufe von oben findet sich in Abbildung 5.2 auf Seite 22. Dort sieht man links die Hochpegelplatine und rechts die Phonoplatine. In der Mitte sieht man die Masseplatine mit der 12V Spannungsversorgung für die darüberliegende doppelstöckige Platine mit den Eingangsrelais.

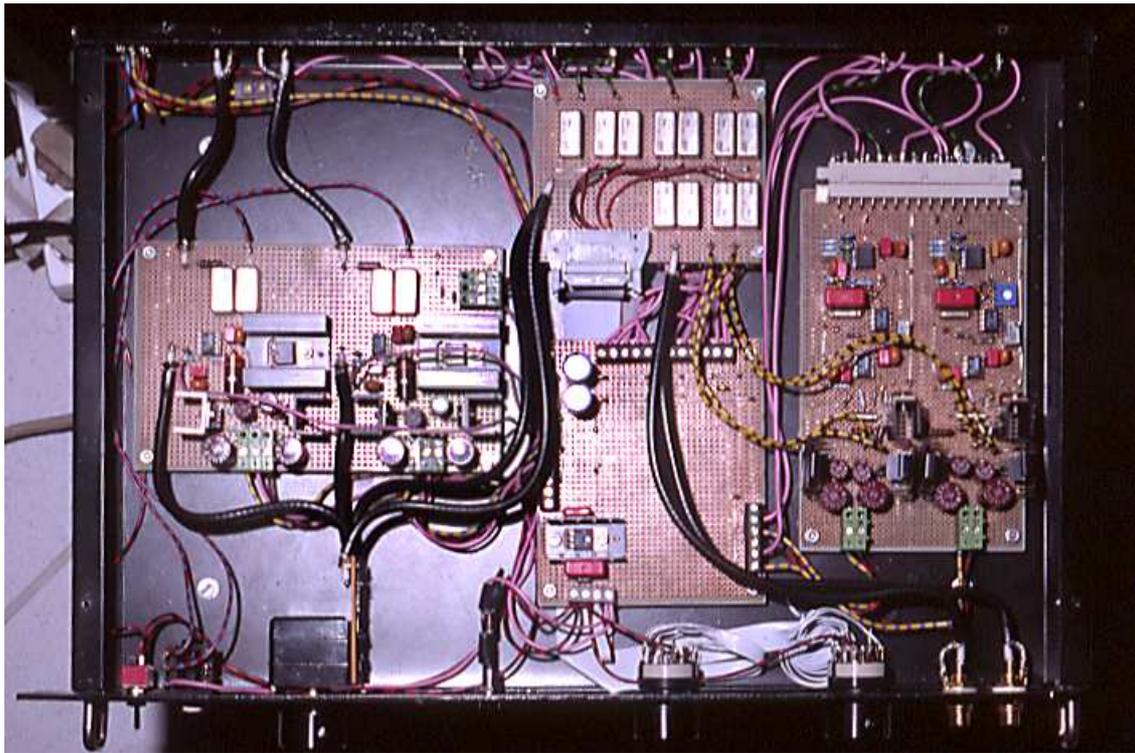


Abbildung 5.2: Foto der Vorstufe von oben

Kapitel 6

Fazit

6.1 Klangqualität

Zur Klangqualität kann ich soweit folgendes sagen:

- Der Phonovorverstärker ist nach meinen subjektiven Eindrücken deutlich besser als der aus meinem alten Vorverstärker, und zwar in Auflösung, Rauschen, Dynamik, Baß- und Höhenwiedergabe.
- Der Hochpegelverstärker ist nach meinen subjektiven Eindrücken ebenfalls deutlich besser als der aus meinem alten Vorverstärker, und zwar in Auflösung, Dynamik, Baß- und Höhenwiedergabe. Allerdings zeigt er (leider) auch die Grenzen der angeschlossenen Quellen auf, insbesondere die von CD-Spielern (Rauhigkeit)¹.

Ein Hörvergleich des Hochpegelvorverstärkes mit einem Linn Wakonda Vorverstärker (DM 2000,-) bei meinem Händler zeigte deutlich die Grenzen des Linn auf, insbesondere in Dynamik, Durchsichtigkeit, Räumlichkeit und an den Frequenzextremen. Der Händler und ich waren beide der Meinung, daß sich mein (Hochpegel-) Vorverstärker irgendwo in der Qualitätsstufe zwischen einem Naim 72 und 82 (jeweils mit Hicap) befindet — immerhin also im Preisbereich zwischen DM 4000,- und 8000,- und das für einen finanziellen Aufwand von ca. DM 750,-.

6.2 Aufwand

Ich muß ganz ehrlich gestehen, daß ich den Zeitaufwand zur Fertigstellung der Vorverstärkers weit unterschätzt habe. Dies einmal deswegen, weil viele Schaltungsmodifikationen nötig waren, jeweils gefolgt von ausführlichen Hörversuchen und -vergleichen mit meinem alten Vorverstärker, um den Klang zu finden, den ich haben wollte, und zweitens, weil das Vorbereiten des Gehäuses und das Anfertigen der Platinen (siehe 5.2 auf Seite 22) sehr viel Zeit in Anspruch nimmt — ich bin mechanisch nicht so begabt und wollte ausnahmsweise mal was richtig Gutes bauen, schließlich muß ich den Vorverstärker jeden Tag anschauen.

¹Erstaunlicherweise hat sich die Rauhigkeit deutlich verringert, seit der Vorverstärker eine bessere Endstufe treibt!

Literaturverzeichnis

- [H"u97] Andreas C. M. H"unnebeck. Zur Theorie der Schallplattenentzerrung nach RIAA und IEC. *Andreas Hünnebeck's Hifi-Seite*, December 1997.
- [Lip79] Stanley P. Lipshitz. On RIAA Equalization Networks. *Journal of the Audio Engineering Society*, 27(6), June 1979.
- [PH89] Winfield Hill Paul Horowitz. *The Art of Electronics*. Cambridge University Press, Cambridge/New York/Melbourne, 2. edition, 1989. ISBN 0-521-37095-7.
- [Skr88] Paul Skritek. *Handbuch der Audio-Schaltungstechnik*. Franzis-Verlag, München, 1988. ISBN 3-7723-8731-4.
- [UT93] Christoph Schenk Ulrich Tietze. *Halbleiter-Schaltungstechnik*. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg/New York, 10. edition, 1993. ISBN 3-540-56184-6.

Weiterführende Literatur

Für denjenigen, der die bestehende Schaltung modifizieren (oder auch eine eigene Schaltung entwickeln) möchte, kann ich folgende Literatur empfehlen:

- [PH89] enthält sehr gute Erklärungen ohne allzuvielen Formeln und sehr viele Praxishinweise.
- [UT93] enthält viele der in [PH89] vernachlässigten Formeln und geht insgesamt den Dingen mehr auf den Grund; es ist allerdings ein gewisses Vorwissen hilfreich.
- [Skr88] ist ein Eldorado der Audioschaltungstechnik, erfordert aber ebenfalls zum vollen Verständnis etwas an Vorkenntnissen.

Anhang A

Meßwerte

A.1 Frequenzgangmessungen

Die Frequenzgangmessungen wurden im Rahmen des zweiten Treffens der Newsgruppe de.rec.musik.hifi gemacht. Dazu hat Patrick auf seinem Laptop einen Frequenzsweep von 0,2 Hz bis 20 kHz erzeugt, der an seinen USB-DAC geschickt wurde. Daran wurde (bei Phono über einen Abschwächer von 60 dB) der Eingang der Vorstufe angeschlossen. Der Ausgang der Vorstufe wurde an einen Tascam CDRW-700 CD-Recorder angeschlossen, der den Sweep auf eine CDRW aufnahm. Diese CD habe ich auf den PC gerippt und die WAVs mit *ft*¹ und *gnuplot* zu Frequenzgängen weiterverarbeitet:

- Mit Hilfe einer FFT wird ein Frequenzspektrum erzeugt.
- Das Spektrum wird mit der Leistungsdichte des Sweeps korrigiert.
- Im Fall einer Phonovorstufe wird das Spektrum mit dem Spektrum der RIAA Preemphase verrechnet, um die Abweichung zur RIAA Deemphase zu bekommen.
- Als letztes wird das Spektrum mit dem Spektrum der Meßkette² (USB-DAC - Tascam CDRW-700) verrechnet, um den Einfluß von DAC und ADC zu kompensieren.

A.1.1 Frequenzgang der Hochpegelstufe

Der Frequenzgang der Hochpegelstufe (siehe Seite 26) ist perfekt — wie es sich gehört, und was auch zu erwarten war. Die Abweichungen sind wohl nicht mehr weit von dem Grenzwert entfernt, den man mit 16 Bit Auflösung sinnvoll erfassen kann.

A.1.2 Frequenzgang der Phonovorstufe

Der Frequenzgang der Phonovorstufe (siehe Seite 27) ist schon mehr als perfekt: Abweichungen von 0.03 dB sind fast nicht zu glauben. Hieran sieht man, daß sich das exakte Ausrechnen der RIAA-Entzerrung und das Ausmessen der Widerstände und Kondensatoren lohnt hat.

Das deckt sich mit dem Hörerlebnis: rein tonal sind gut gepresste Schallplatten und gut gemasterte CDs der selben Aufnahme kaum zu unterscheiden.

¹*ft* ist ein Programm zum Berechnen von Spektren. Es macht eine FFT von WAV-Dateien und speichert diese als Textdatei so ab, daß sie direkt von *gnuplot* verwendet wern kann.

ft ist hier erhältlich: <http://www.huenebeck-online.de/software/index.html>

²Die Meßkette besteht aus USB-DAC und Tascam CDRW-700. Der USB-DAC wurde direkt an den Tascam angeschlossen und der Sweep aufgenommen. Das Spektrum dieses Sweep ist die Referenz, auf die sich die Messungen der Vorstufe beziehen.

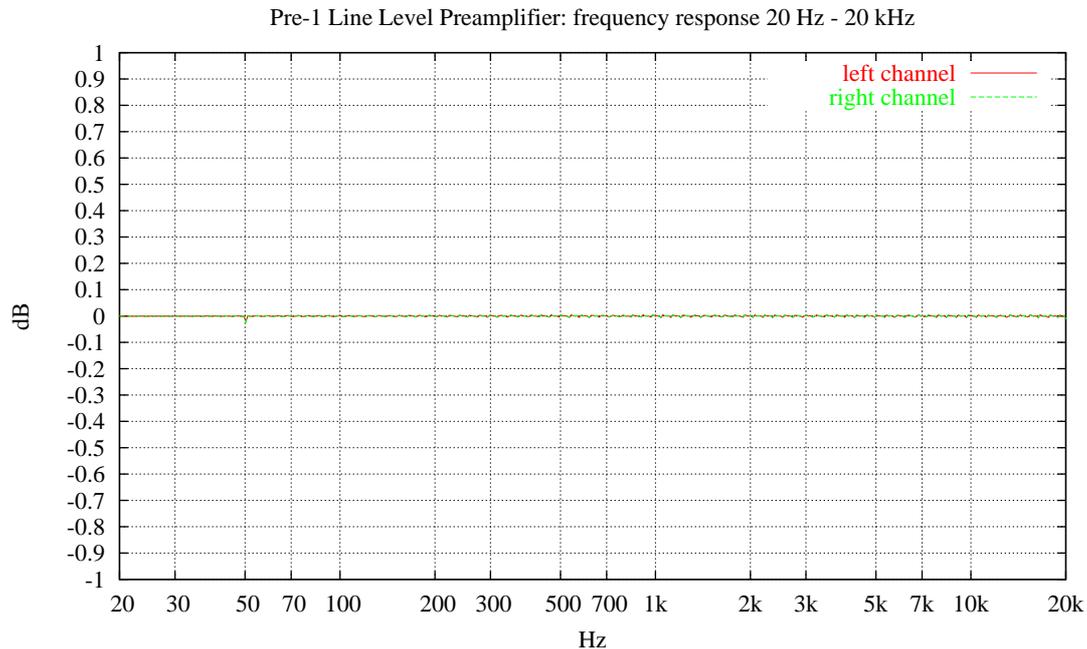


Abbildung A.1: Frequenzgang der Hochpegelstufe

A.2 Störsignalmessungen

Die Störsignalmessungen habe ich mit Hilfe eines Behringer Ultracurve DEQ2496 gemacht. Das ist ein digitaler Equalizer mit 24 Bit / 96 kHz AD- und DA-Wandlern. Neben diversen Equalizern enthält er einen Pegelmesser mit Peak und RMS-Anzeige und einen Spektrumanalysator. Für die Messungen wurde der AD-Wandler auf 96 kHz Abtastrate und 24 Bit Auflösung eingestellt.

A.2.1 Störsignalmessungen der Phonovorstufe

Zunächst habe ich den Störpegel N bei angeschlossenem, aber abgeschaltetem³ Plattenspieler gemessen. Dann habe ich die Tracks 1 und 2 der dhfi Hörtest und Meßschallplatte Nr. 2 abgespielt, diese enthalten jeweils einen 1 kHz Ton mit 0 dB Referenzpegel (entsprechend einer Schnelle von 8 cm/s). Der gemessenen Signalpegel ist dann $S + N$. Das tatsächlich gemessene Signalrauschverhältnis ist dann $S + N/N$. Man kann aber ohne Verlust an Genauigkeit $S = S + N$ annehmen, so daß sich das Signalrauschverhältnis zu S/N ergibt, d.h. in dB ist das dann einfach $S - N$:

Kanal	Störsignal N	Referenzpegel S	S/N
Links	-77 dB RMS	-11 dB RMS	66 dB
Rechts	-76 dB RMS	-10 dB RMS	66 dB

Den Spektrumanalysator des DEQ2496 habe ich dann auf *Mitteln* gestellt, und im Störsignalspektrum (siehe Seite 27) sieht man, daß die Hauptkomponenten des Störsignals bei 50 und 150 Hz liegen, jeweils mit einem Pegel von -80 dB. Weitere Störkomponenten sieht man bei 200 Hz und 250 Hz. Das eigentliche Rauschen liegt immer unter der -100 dB Linie.

Diese Werte decken sich auch mit dem Hörerlebnis. Dreht man den Lautstärkereger so weit auf, daß man etwas hört, so hört man zuerst nur ein typisches Brummen mit höheren Oberwellen, und dahinter ein ganz feines Rauschen. Senkt man dann den Tonarm auf eine absolut sauber, hochwertige gepresste

³Bei eingeschaltetem externen Netzteil erhöht sich das Störsignal um 1 dB, bei laufendem Teller nochmals um weitere 5 dB.

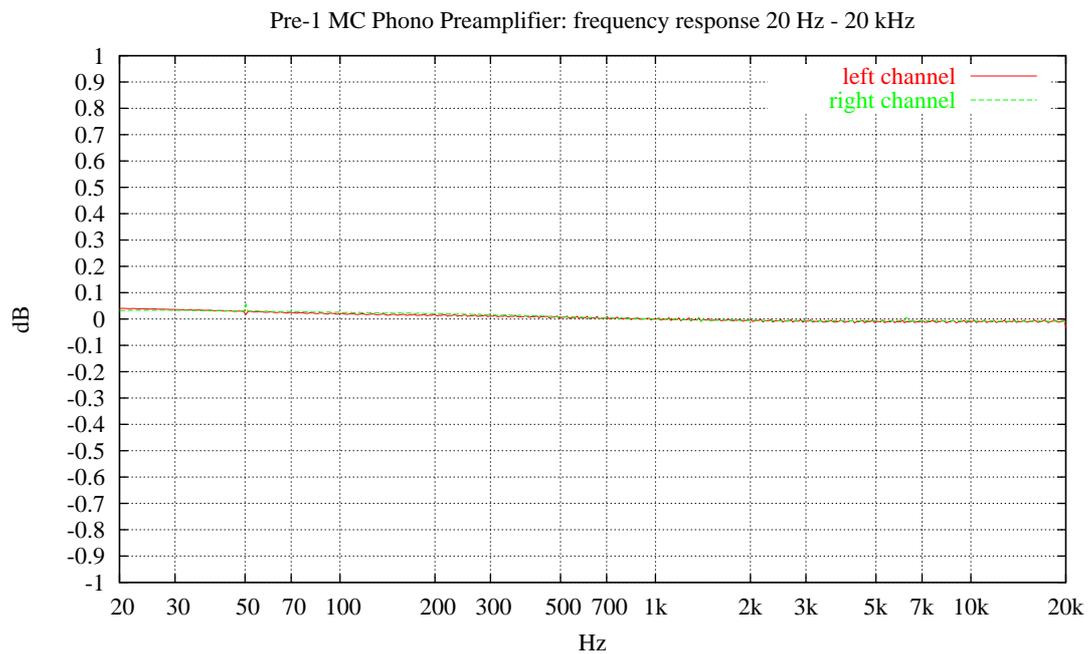


Abbildung A.2: Frequenzgang der MC Phonovorstufe

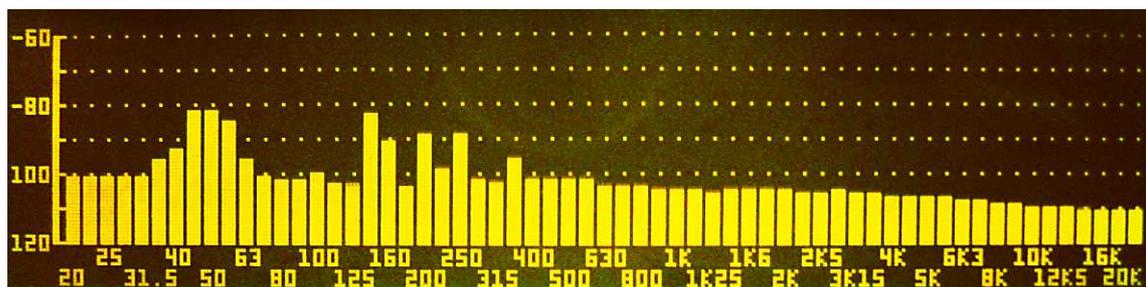


Abbildung A.3: Störsignalspektrum der MC Phonovorstufe

Schallplatte, reißt es einem fast die Ohren ab. Das Laufgeräusch ist mindestens 25 dB lauter. Dreht man den Lautstärkereglern nur so weit auf, dass man die Musik noch ertragen kann, ist bei abgehobenem Arm absolut nichts zu hören.

Anhang B

Korrekturen und Änderungsvorschläge

B.1 Korrekturen

Im Schaltplan war R22 mit einem Wert von 1.82 k Ω angegeben, obwohl er im Text zu 1,69 k Ω berechnet wurde. Die Parallelschaltung von R22 und R36 sollte 1,69 k Ω ergeben. Wenn man R36 mit 22 k Ω annimmt, stimmt das auch; R36 hat aber 220 k Ω . Da habe ich mich vermutlich beim Rechnen vertippt. Deshalb sollte R22 richtigerweise 1.70 k Ω haben. Das ist jetzt im Schaltplan korrigiert worden.

B.2 Verbesserungen

Hier nun einige Vorschläge, wie man den Vorverstärker verbessern könnte; mangels eigener Tests allerdings ohne Garantie auf verbesserte Klangeigenschaften:

- Verringern der Störempfindlichkeit des Phonovorverstärkers (Staubkörner, HF-Einstreuungen) durch einen Tiefpass von 50 kHz Grenzfrequenz (oder höher) in Form eines Kondensators parallel zu R_8 .
- Das Eingangsruschen von U_5 geht mit voller Verstärkung in das Signal ein. Da U_5 aber nur Gleichspannung verstärken soll, kann man durch eine Parallelschaltung eines Kondensators zu R_{VAR1} und R_{18} die Verstärkung im Hörbereich auf 0 dB reduzieren. Dazu dazu notwendige Kapazität berechnet sich dann nach der Formel

$$C = \frac{1}{2\pi R_{16} f_u}$$

in etwa zu $C = 68\mu F$ bei $f_u = 21Hz$ ¹.

- Verbesserungen der Spannungsversorgung:
 - Zusätzliche Siebung oder Regelung der Versorgungsspannung für die erste Verstärkerstufe des Phonovorverstärkers.
 - Kanalgetrennte Netztrafos und Siebung.

Es ist allerdings fraglich, ob sich ein höherer Aufwand rechtfertigt, weil die PSRR²-Werte der verwendeten Operationsverstärker recht gut sind. Bei diskret aufgebauten Schaltungen ist das sicher wichtiger als hier.

¹das ist nicht die untere Grenzfrequenz des entstehenden Tiefpaß, sondern die Frequenz, bei der die Verstärkung auf +3 dB absolut abgesunken ist.

²Power Supply Rejection Ratio

B.3 Vereinfachungen

Man kann die Schaltungen aber auch vereinfachen und damit verbilligen, allerdings natürlich verbunden mit Klangeinbußen:

- Eliminierung der Offsetkompensation des Phonovorverstärkers:
 Hierzu muß eine der in 2.1.4 (s. S. 13) aufgeführten Alternativlösungen gewählt werden. Ich würde mich für die unter Punkt 3 gezeigte Variante entscheiden.
 Ich bin allerdings mittlerweile (2004) etwas praktischer gesinnt und würde bei einem Neubau ein richtiges Rumpelfilter (15 Hz, 4. Ordnung) an den Ausgang hängen. Seit ich gesehen habe, was fuer Hübe ein normaler Baßlautsprecher macht, wenn er CD's abspielt, die von meinem Plattenspieler stammen (verwellte Platten), sehe ich das Rumpelfilter nicht mehr so schief an. Dann wäre die aufwendige Offsetkompensation nicht mehr nötig.
- Eliminierung der Klasse-A Ausgangsstufen bei Phono- und/oder Hochpegelvorverstärker:
 Hierzu lässt man einfach den FET und den Source-Widerstand (der zur negativen Spannungsversorgung führt) weg. Es wird sich jedoch ein kühler, steriler und etwas langweiligerer Klang ergeben; und im Falle der Hochpegelstufe kann man vermutlich keinen Kopfhörer mehr betreiben. Es sollte dann ein Operationsverstärker mit niedrigem Ausgangswiderstand und hohem Ausgangskurzschlußstrom gewählt werden (z.B. OPA604).
- Einsatz eines billigeren Potentiometers.
- Vereinfachung der Spannungsversorgung:
 - Gemeinsame Versorgung von Phono- und Hochpegelverstärker.
 - Keine kanalgetrennte Spannungsversorgung.
 - billigere Spannungsregler (7815/7915).
 - kleinerer und billigerer Netztrafo.
 - kleinere und billigere Siebelkos.

B.4 Andere Modifikationen

Es können ebenfalls folgende Modifikationen vorgenommen werden, die klangbestimmende Änderungen zur Folge haben — ich bezeichne das mal als die individuelle Feinabstimmung:

- Änderung des Ruhestroms der Klasse-A Ausgangsstufen bei Phono- und Hochpegelvorverstärker durch Einsatz anderer Source-Widerstände. Mit steigendem Ruhestrom verringert sich der Klirrfaktor der Ausgangstreiberstufe (der allerdings durch die Gegenkopplung sowieso schon stark reduziert ist).
- Ersetzen des FETs durch bipolare Kleinleistungstransistoren (z.B. BD135).
- Ersetzen der Klasse-A Single-Ended Ausgangsstufe durch eine Klasse A Push-Pull Ausgangsstufe.
- Ersetzen der Klasse-A Single-Ended Ausgangsstufe durch eine Klasse-AB Ausgangsstufe. Anstelle einer diskreten Lösung können auch integrierte Puffer eingesetzt werden (z.B. LT1010, BUF04, LH0033 o.ä.). Dies kann für die Hochpegelstufe interessant sein, wenn man niederohmige Kopfhörer betreiben möchte, ohne deshalb hohe Ruhestrome fließen zu lassen.
- Einsatz anderer Operationsverstärker:

- Für den Hochpegelvorverstärker und die zweite Stufe des Phonovorverstärkers können prinzipiell beliebige Operationsverstärker eingesetzt werden. Zumindest für den Hochpegelvorverstärker sollte jedoch ein Operationsverstärker mit FET-Eingang (wegen des niedrigen Offseitingangsstroms) gewählt werden. In der Phonovorstufe habe ich den OP37 erfolgreich in der zweiten Stufe eingesetzt. In der Hochpegelstufe können allerdings nur für Verstärkungen von 1 kompensierte oder kompensierbare Operationsverstärker eingesetzt werden. Eine teure Alternative wäre der OPA627, optimal wäre sicher der OPA604.
- Für die erste Stufe des Phonovorverstärkers bieten sich nach meinen Erkenntnissen nur noch der AD797 und der LT1115 an, da hier eine sehr niedrige Eingangsrauschspannung wichtig ist. Allerdings hat der AD797 einen deutlich höheren Eingangsruhestrom, der das angeschlossene MC-Tonabnehmersystem unnötig belastet. Ich habe erfolgreich auch den OP37 oder den AD846 (Current Feedback Verstärker!) eingesetzt, aber das Rauschen ist schon höher — wenn auch nur dann wirklich hörbar, wenn die Nadel nicht abgesenkt ist, da in der Regel die Schallplatten mehr rauschen als der Verstärker. Auch der OPA637 wäre eine — allerdings teure — Alternative.

Anhang C

Häufig gestellte Fragen (FAQ)

C.1 Allgemeine Fragen

Was für ein Potentiometer kann ich für die Lautstärkeinstellung nehmen?

Es kann jedes Potentiometer zwischen 10 k Ω und 100 k Ω verwendet werden. Ein Wert von 50 k Ω ist ein guter Kompromiss zwischen Störanfälligkeit und Quellenbelastung. An der Schaltung sind dafür keine Änderungen notwendig.

Wo wird das Potentiometer für die Lautstärkeinstellung angeschlossen?

Das Potentiometer wird an den Eingang der Hochpegelstufe angeschlossen.

Was für Relais soll ich nehmen?

Ich empfehle Dual-in-Line Relais, müsste es von der Firma Omron geben, habe ich im Reichelt-Katalog gesehen. Mark-Levinson verbaut auch nur DIL-Relais. Damit es beim Schalten der Relais nicht knackt, müssen Freilaufdioden eingebaut werden (Diode antiparallel zur Spule des Relais).

Ich habe Restbestände guter geschirmter Relais von SDS aus der Bastelkiste aufgebraucht.

Was sind SGND und PGND, und wie werden sie angeschlossen?

SGND ist der Signal Ground, also die Masse, auf die sich das Signal bezieht. PGND ist der Power Ground, also die Masse, auf die sich die Stromversorgung bezieht. Beide Massen müssen am zentralen Punkt der Schaltung (bei mir ist das auf der zentralen Platine in der Mitte des Gehäuses) zusammengeführt werden!

Die Trennung von SGND und PGND verhindert, daß Ströme, die durch die Stromversorgungsleitungen fließen, sich in den SGND hineinmogeln, dort als vermeintliches Audiosignal mitverstärkt werden und schlußendlich als Störsignal am Ausgang auftreten.

Wie hoch ist der Strombedarf?

Die Phonovorstufe braucht etwa 70 mA für beide Kanäle. Die Hochpegelstufe braucht etwa 100 mA für beide Kanäle. Ein Batterie- oder Akkubetrieb ist daher nicht sinnvoll.

Der Strombedarf wird hauptsächlich vom Ruhestrom durch die MosFets bestimmt. Wenn man also den Ruhestrom reduziert, verringert sich auch der Strombedarf. Allerdings kann man dann an der Hochpegelstufe keinen Kopfhörer mehr betreiben.

Warum kracht es in den Lautsprechern wenn ich den Vorverstärker einschalte?

Es ist keine Einschaltverzögerung eingebaut. Deswegen muß man erst den Vorverstärker einschalten und danach die Endstufe. Beim Ausschalten muß dann zuerst die Endstufe ausschalten und danach den Vorverstärker.

Ich habe einen Umschalter mit Mittelstellung am Ausgang der Vorstufe, der das Ausgangssignal auf die Endstufe oder den Kopfhörer schaltet. In der Mittelstellung geht das Signal nicht heraus. Beim Einschalten halte ich den Schalter immer in der Mittelstellung.

Brauche ich Koppelkondensatoren am Eingang der Hochpegelstufe?

Ja, wenn Sie Quellen anschließen, die einen DC von mehr als 10 mV am Ausgang haben. In Frage kommen folgende Typen: FKP, MKP, MKS, MKT (alles Folien). Der Wert hängt vom Widerstand des Potentiometers ab — der aus Potentiometer und Kondensator gebildete Hochpass sollte eine Grenzfrequenz f_g von deutlich unter 20 Hz haben, z.B. 5 Hz. Die Formel lautet:

$$C = 1 / (2\pi R_{poti} f_g)$$

Bei 10 k Ω Potentiometer und 5 Hz wären das etwa 3,3 μ F.

Warum ist der Klang dünn und kraftlos, wenn ein Kopfhörer angeschlossen ist?

Die Hochpegelstufe ist nur für Kopfhörer mit minimal 150 Ω Lastimpedanz ausgelegt. Vermutlich hat der angeschlossene Kopfhörer eine deutlich kleinere Impedanz.

Wenn der angeschlossenen Kopfhörer eine geringere Impedanz hat, muß man die Schaltung anpassen:

- Ist die Impedanz nur etwas geringer (100 Ω), kann man den Ruhestrom durch Q4 erhöhen, indem man R43 verkleinert. Man muß dann aber den Kühlkörper für Q4 vergrößern, eventuell auch die Kühlkörper der Spannungsregler, und R43 muß auch mehr Leistung haben.
- Ist die Impedanz sehr viel kleiner, könnte man zur Not einen Serienwiderstand von 100 Ω zwischen Ausgang der Stufe und Kopfhörer schalten. Die Ausgangsspannung wird dann aber geringer, und der Frequenzgang wird nicht mehr linear sein.

C.2 Fragen zur Phonovorstufe

Wie stelle ich die Offsetkompensation ein?

1. Eingang offen lassen (so daß er nur mit R2 abgeschlossen ist), DC-Offset am Ausgang messen (ca. 10 Sekunden warten, bis sich die Spannung stabilisiert hat)
2. Eingang kurzschliessen, DC-Offset am Ausgang messen (ca. 10 Sekunden warten, bis sich die Spannung stabilisiert hat)

Normalerweise wird man zwei unterschiedliche Spannungen messen. Das Trimpoti RES4 muß so eingestellt werden, daß beim kurzgeschlossenen Eingang die selbe Spannung gemessen wird wie beim offenen Eingang. Damit ist der DC-Offset der ersten Stufe kompensiert. RES4 sollte unbedingt ein 10fach-Trimmer sein, da die Einstellung recht sensibel ist.

Gleichzeitig sollte dann der DC-Offset am Ausgang nicht mehr als 5-10 mV betragen. Bei mir war am Anfang einer der Ausgänge bei 50 mV, das war aber die Schuld des OP177. Nachdem ich den getauscht hatte, war der DC-Offset ok.

Wie kann ich die Verstärkung der Phonovorstufe an mein Tonabnehmersystem anpassen?

Durch Variation von R12 läßt sich die Verstärkung der ersten Stufe einstellen. Allerdings sollte man nicht unter eine Verstärkung von 10 dB gehen.

Kann ich die Phonovorstufe auch für einen MM-Tonabnehmer verwenden?

Nur durch Änderungen an der Schaltung:

- Eingangsimpedanz anpassen: $R2 = 47 \text{ k}\Omega$
- U7 sollte ein OP37 oder OPA37 oder NE5534A sein, also ein bipolarer OP, dessen Rauschen für mittlere Quellwiderstände optimiert ist.
- Die Verstärkung der ersten Stufe auf etwa 20 dB stellen: $R12 = 110 \Omega$
- Die Verstärkung der zweiten Stufe auf etwa 20 dB bei 1 kHz stellen: $R26 = 318 \text{ k}\Omega$, $R24 = 0$, $R22 = 35,3 \text{ k}\Omega$
- Die zum Tonabnehmersystem passende Lastkapazität ermitteln (siehe unten) und parallel zur R2 schalten.
- Die DC-Offsetkompensationsschaltung kann weggelassen werden, wenn man eine Folienkondensator von mindestens $1 \mu\text{F}$ in den Ausgang einschleift. Auf der offenen Seite sollte dieser Koppelkondensator mit $100 \text{ k}\Omega$ an den SGND verbunden werden.

Wie berechne ich die Lastkapazität für einen MM-Tonabnehmer?

1. Ermittle die Kapazität C_{kabel} des Phonokabels (vom Plattenspieler zum Vorverstärker):
 - in den technischen Daten nachschauen
 - mit einem Kapazitätsmeßgerät messen. Das Kabel muß auf beiden Seiten abgeklemmt werden, also auch die kleinen Käbelchen am Tonabnehmer abziehen.
2. Entnehme die optimale Lastkapazität C_{last} des Tonabnehmers aus der Betriebsanleitung.
3. Die Eingangskapazität C_{in} des Vorverstärkers berechnet sich zu:

$$C_{in} = C_{last} - C_{kabel}$$

Wenn C_{in} negativ ist, hat man Pech gehabt: die Lastkapazität des Kabels ist dann zu groß für diesen Tonabnehmer. Man kann dann nur das Kabel kürzen, und/oder durch ein niederkapazitiveres ersetzen und/oder ein anderes Tonabnehmersystem mit höherer Lastkapazität verwenden.

Anhang D

Erfahrungen anderer Anwender

D.1 Anwender und ihre Kommentare

Unbekannt: *I have built the AH Line Preamp that you put on your web-site and I am very pleased with the sound. Before building it, I used a home-made amplifier with SGS-TDA7294 and the ALPS 10k potmeter at the front. The sound was satisfactory, but there was an annoying dip in the midrange, and bass was not so deep. After connecting the AH Line Preamp, the difference was quite unbelievable — bass and midrange was a valve-like and there was no hiss at all in the treble region.*

Robert Lackner: *Der Klang ist auch schon so super. Ich habe einen Vollverstärker Yamaha AX-592. In einigen Tests von Stereoplay, Audio wurde dort geschrieben, daß dieser einen guten Phonoeingang besitzt. Ihr Selbstbau klingt um Welten besser.*

Adam Kaczorowski (Polen): *I have seen your phono preamplifier. Your design is very interesting. I have made one. It sounds very good.*

In my preamplifier I have LT 1115 in the first stage, and OPA 627 in second stage. For now I have changed the amplification in the first stage. 7,5 k / 750 OHM. The sound is super. I have made the try with the OP 37. I haven't heard the difference.

Denny: *Hochpegelverstärker geht jetzt und klingt ziemlich gut.*

Weitere Nachbauer sind: Paul Preuß, Jacek Nowak, Christian Kandzia, Edwin, Feriandas Greblikas (Litauen), Christian Lohrey

Andere Aspiranten sind: Jan Kahl, Dr. Mats Erik Andersson (Schweden), Günther Neuhofer, Michael Berger, Tom Krug, Lutz Heischkel, Martin Häusler, Philippe (Frankreich), Stefan B., Stefan van der Ven, Friedrich Rolle (Schweiz), Lutz Grebenstein, Alain Liebundguth (Frankreich), Mathias Pätzold, Pascal, Bernhard Zagar (Österreich), Phillippe Renault (Frankreich), Torsten Kötting

Anhang E

Bauteile

E.1 Stückliste der Spezialbauteile

Teil	Wert	Typ	Maße/mm	RM	Hersteller	Bezug
C _{35/36}	10nF/63V	Styroflex	Ø5x15	20	Philips	RS
C	100nF/100V	MKS2	7,2x4,5x9,5	5	Wima	RS
C ₃₃	2,2µF/63V	MKS4	8x15x18	15	Wima	RS
C	10µF/25V	Tantal E2	8x5x13	5	Philips	Mütron
C _{39/40}	22µF/40V	Elko P2 EK	Ø9x13	5	ROE	
C _{44/45}	220µF/40V	Elko B2 EK	Ø13x21	5	ROE	
D	B80C25000	Brücke	29x29x8			Meyer
U ₁₀	LM317	U-Regler	TO220		Nat. Semiconductor	überall
U ₁₂	LM337	U-Regler	TO220		Nat. Semiconductor	überall
U ₁₂	LT1033	U-Regler	TO220		Linear Technology	
U ₇	LT1028A	OP-Amp	DIL8		Linear Technology	
U ₁₀	LT1085	U-Regler	TO220		Linear Technology	
U _{1/3}	OPA134PA	OP-Amp	DIL8		Burr-Brown	RutronikFenner
U ₅	OP177GP	OP-Amp	DIL8		PMI	Reichelt
P	50kΩ log.	RK40312	40x33,4x34	10/7,5	Alps	Conrad
Rv	500Ω	3386P	10x10x5	2,5	Bourns	RS
Rv	1kΩ 25-Gang	3296W	10x10x5	2,5	Bourns	RS
Q _{1/3}	IRF510	Mosfet	TO220		Int. Rectifiers	Reichelt
Tr	2x15V/120VA	Ringkern	Ø110x37			Meyer

Tabelle E.1: Spezialbauteile

E.2 Hinweise zur Beschaffung von Bauteilen

Distributor	Adresse	Telekom/Internet	
Conrad-Elektronik	Klaus-Conrad-Str. 1 92240 Hirschau	Tel: Fax: WWW:	0180/531-2111 0180/531-2110 www.conrad.de
Meyer-Elektronik	Postfach 110158 76487 Baden-Baden	Tel: Fax:	07223/52055 07223/52777
Mükra-Electronic	Postfach 847 73008 Göppingen	Tel: Fax:	07161/70031-33 07161/71929
Mütron	Postfach 103067 28030 Bremen	Tel: Fax:	0421/3056-0 0421/3056-146
Neumüller-Fenner	Raiffeisenallee 10 82041 Oberhaching	Tel: Fax: WWW:	089/613795-0 089/613795-80 http://www.fenner.ch
Reichelt-Elektronik	Elektronik-Ring 1 26452 Sande	Tel: Fax: email: WWW:	04422/955-0 04422/955-111 Reichelt@Post.de www.reichelt.de
RS-Elektronik	Hessenring 13b 64546 Mörfelden-Walldorf	Tel: Fax: email:	06105/401-234 06105/401-100 rs-gmbh@rs-components.com

Tabelle E.2: Anschriften der Distributoren

Anhang F

Über dieses Dokument

Dieses Dokument entstand auf einem Linux-Rechner (SuSE 9.0):

- Es wurde mit *LyX-1.3.2* erstellt und nach *TeX* exportiert. *LyX* ist ein graphisches Frontend zu *L^AT_EX*. *L^AT_EX* ist ein professionelles Buchsatzprogramm. Im Gegensatz zu üblichen Textverarbeitungsprogrammen ist *L^AT_EX* anerkanntermaßen fehlerfrei, der letzte Bug wurde vor ein paar Jahren gefunden und behoben (und dieses honoriert). Die Schaltpläne wurden mit Hilfe des *epsf*-Pakets (`\usepackage{epsf}`) eingebunden.
- *TeX* wurde mit *BT_EX-2e* in *dvi*, dieses mit *dvips-5.92b* in *Postscript*, dieses schließlich mit *ps2pdf* (GNU Ghostscript 7.07.1) in *PDF* verwandelt. *dvips* ist der Postscript-Druckertreiber von *L^AT_EX*. Ghostscript ist ein Druckertreiber für Drucker, die nicht Postscript-fähig sind. *PDF* (Portable Document Format) ist ein proprietäres Dateiformat der Firma Adobe.
- *TeX* wurde mit *latex2html-2002-2-1* nach *HTML* verwandelt. Die nicht automatisch erstellten Verweise wurden mit Hilfe des *html*-Pakets (`\usepackage{html}`) erzeugt. *latex2html* ist ein *Perl*-Script, welches eine *TeX*-Datei liest und *HTML*-Seiten erzeugt. *Perl* ist eine mächtige betriebssystemunabhängige Interpretersprache und ersetzt die betriebssystemabhängigen Shellsprachen.
- Die Schaltpläne wurden mit *ps2pdf* (s.o.) von *Postscript* nach *PDF* verwandelt.
- Die gesamte Konvertierung und die Installation auf meiner Homepage wurden von *GNU make-3.80* mit Hilfe eines *makefile* automatisch erledigt. *make* ist ein Hilfsprogramm zum automatischen Bau von Projekten jeglicher Machart, die aus mehreren voneinander abhängigen Dateien bestehen und mit Hilfe von nicht-interaktiven Programmen erzeugt werden.
- Alle Quelldateien befinden sich unter der Kontrolle von *CVS-1.11.6*. *CVS* (Concurrent Versions System) ist ein Quellcodeverwaltungssystem.
- Sämtliche verwendeten Programme sind freie Software und unterliegen der *GPL* (GNU Public License) oder einer ähnlich lautenden Lizenz für nichtkommerziellen Gebrauch. Die Quellen liegen offen und können auf den meisten Unix-Systemen zum Laufen gebracht werden.