

# Verstärker – was da noch so geht!

## 1.0 Einleitung

Diese technische Beschreibung eines qualitativ hochwertigen NF-Verstärkers soll einige Merkmale an interessierte HiFi-Enthusiasten liefern, die Elektronik nicht als Fremdwort kennen.

Nach vielen Jahren in der Elektronik-Entwicklung und elf Jahren Selbständigkeit im HiFi-Sektor habe ich mich 2009 vom Berufsleben verabschiedet. In meinem sehr gut ausgestatteten Elektroniklabor konnte ich mich seitdem ohne jeglichen Zeitdruck der Untersuchung von Schaltungen widmen. Und siehe da, es gibt erheblichen Korrekturbedarf. Nur ein Beispiel vorweg: die RIAA-Entzerrung macht unterhalb von 50 Hz unerwünschte Phasendrehung, zumindest jede, die ich getestet habe. Das ergibt eine nicht korrekte räumliche Wiedergabe eines größeren Musikgeschehens.

Ich favorisiere eine passive RIAA-Entzerrung, bei der sich obige unerwünschte Phasendrehung mit zwei zusätzlichen RC-Gliedern korrigieren lässt. Dazu später.

Da ich an einer Vermarktung meines Verstärkers nicht interessiert bin, möchte ich alle Erkenntnisse und Ideen einfach nur weitergeben, damit sie nicht umsonst waren. Es mag Bekanntes dabei sein, aber garantiert einige umgesetzte Ideen, die auch alte Hasen neugierig machen. Versprochen.

## 1.1 Konzept

Zum Erreichen des Zieles, einen äußerst brumm- und rauscharmen Verstärker zu schaffen, um auch feinste Musikdetails wiedergeben zu können, ist an vielen Stellen große Sorgfalt geboten.

Wie bei meinen Verstärkerentwicklungen in den 90er Jahren verzichte ich auf Klangregler, weil die nicht dem HiFi-Gedanken entsprechen. Lautsprecher sollten schon imstande sein, bei einem vernünftigen Wirkungsgrad um die 90dB/1W/1m einen ausgeglichenen Frequenzgang zu liefern. Wenn zudem keine extrem ausgefallenen Phasen- oder Impedanzverläufe das Hörgeschehen eintrüben, steht einem erfreulichen Musikerlebnis nichts im Wege. Das setzt natürlich auch möglichst hochwertige Quellen voraus.

Bei diesem beschriebenen Verstärker soll der Komfort nicht zu kurz kommen. So gibt es eine Fernbedienung, die sowohl den Verstärker ein- und ausschaltet, die Eingänge umschalten kann, Mute-Funktion, und die Lautstärke über ein Motorpotentiometer im Verstärker verstellen kann. Beim Prototypen habe ich noch die Möglichkeit realisiert, den Phonobereich über Röhren oder Transistoren schalten zu können. Das hat zwar Spaß gemacht, weil die Röhrenschaltung diesen schönen Sound brachte. Doch der hohe Aufwand hat mich veranlasst, nur die exaktere Transistorentzerrung beizubehalten. In meinen Gitarre-Verstärkern ist der Sound erwünscht, da gibt es ja auch Klangsteller.

Das Aluminiumgehäuse dieses HiFi-Verstärkers stellt 2/3 seines Volumens den Steuerplatinen, RIAA-Entzerrung und Endstufen bereit. Zwei dicke Kühlbleche trennen den Stromversorgungsteil davon. Über Gummidurchführungen im unteren Teil der Kühlbleche werden die Leitungen geführt, die den Steuer- und Verstärkerplatinen nur noch äußerst saubere Gleichspannung zur Verfügung stellen. Drei dieser Geräte habe ich mit Sensortasten ausgestattet, wie ich sie in den 70er Jahren für Prüfgeräte entwickelt habe. Auch die werden später im Schaltbild gezeigt. Einen habe ich reduziert auf einen Eingangswahlschalter und Netzschalter am Gerät. Bei dem ist auch die Fernbedienung auf Lautstärke- und Mute-Funktion abgemagert. Ein Umschaltvergleich der Quellen ist damit vom Hörplatz nicht möglich, es sei denn, der Verstärker wird dort installiert. Diese Direktvergleiche interessieren eigentlich nur wenige Enthusiasten.

Bei Ringkerntransformatoren kann ein mechanischer Brumm infolge von kleinstem Gleichspannungsanteil in der Netzspannung auftreten. Das passiert schon bei Lichterketten, die mit einer Halbwelle betrieben werden. Dimmer oder Föhne mit Diodensparschaltung können das auch verursachen, fast immer nur bis 0,7V. Die können mit einem DC-Filter aus zwei antiparallelen Elektrolytkondensatoren (Elkos) und Dioden vom Trafo ferngehalten werden. Inzwischen tummelt sich digitale Hochfrequenz im Stromnetz, die unterbindet ein Hochfrequenzfilter. Als Blitzschutz dient ein VDR-Widerstand, der im Ernstfall auf 250V begrenzt und so das Gerät schützt. Den restlichen mechanischen Brumm des Transformators möchte ich auch nicht haben. Dafür wird er mit seinen Gummilappen auf ein 6mm dickes quadratisches Alu-Teil geschraubt. An dessen Ecken gibt es vier Senkungen, 4mm tief, 12mm Durchmesser von oben, darin Bohrungen 10mm, in die Gummidurchführungen gequetscht werden. Die gesamte Einheit wird mit M4-Senkschrauben, Scheiben und selbstsichernden Muttern auf die Bodenplatte geschraubt. Damit wird der Trafo so gut wie nicht mehr hörbar, weil er über die Gummis körperschallentkoppelt wird.

Lautsprecherleitungen sind, natürlich unerwünscht, Antennen für Hochfrequenz (HF). Das stört den Lautsprecher nicht, weil die Energie äußerst gering ist. Im Verstärker gibt es eine Drossel am Endstufenausgang, die HF fernhalten soll. Gibt es dort jedoch eine aktive Gegenkopplung auf den Endstufeneingang, besteht die Gefahr, dass kleinste HF-Reste verstärkt zum Feedback addiert werden. Wenn es sehr stört, kann man die Lautsprecherleitungen schirmen: mit einem Schlauchgeflecht oder notfalls Alufolie, die mit Schutzkontakt oder Erdverbindung eines Heizkörpers verbunden werden sollte. Mit den Leitungen im Lautsprechergehäuse wird das natürlich etwas schwieriger. Meine Schaltungen enthalten keine Gegenkopplung vom Lautsprecherausgang, sondern nur in den einzelnen Verstärkerstufen. Das soll auf keinen Fall Kritik an Gegenkopplungen vom Lautsprecherausgang her sein, sie erfüllen ja den Zweck, Verzerrungen zu minimieren.

In der Firma, in der ich die letzten neun Jahre tätig war, habe ich unter anderem für ein aufwändiges Messsystem einen breitbandigen ( $f_g > 2\text{MHz}$ ) Verstärker entwickelt, der sowohl über eine Gegen- als auch eine Mitkopplung verfügt, die ihn schnell und linear werden lässt. Integrierte NF-Verstärker konnte ich nicht einsetzen, weil deren Grenzfrequenz bei 100kHz ist (oder war). Meine spätere Idee, ein Signal durchweg aktiv zu verstärken, veranlasste mich, diesen Spannungsverstärker für nur eine Halbwelle einzusetzen, während derselbe mit Komplementärtransistoren die entgegengesetzte Halbwelle aktiv verstärkt.

In üblichen Schaltungen, auch symmetrischen, bedient immer ein aktives Element eine Halbwelle, ein Widerstand die entgegengesetzte. Wenn dabei relativ hohe Ströme fließen, gibt es auch brauchbare Ergebnisse.

Mit meiner Schaltung, in der mithilfe einer zweiten Mitkopplung die Transistorkennlinien weitgehend linearisiert werden, erziele ich eine sehr schnelle und verzerrungsarme Verstärkung. Mit doppeltem Aufwand. Der erste Aufbau mit je drei solcher Stufen in einer RIAA-Entzerrung hat mich dermaßen überrascht, dass ich später ein gleiches Konzept in der Endstufe mit den dort erforderlichen Daten realisiert habe.

### **1.1.2 Mechanik**

Das Grundgehäuse ist aus 2mm dickem halbharten Alublech. Auf die Bodenplatte sind von unten mit M3-Senkschrauben Distanzbuchsen mit Innengewinde geschraubt, auf denen die Leiterplatten befestigt werden. Die Buchsen haben für die Netzteile 8mm, für Verstärker 5mm Länge. In die Bodenplatten-Vorderseite habe ich für die Belüftung neben den Kühlblechen je 20 Löcher mit 3mm Durchmesser gebohrt, quer 5, längs 4. Dieselbe Anordnung wird oben an der Rückwand neben den Kühlern ausgeführt. Alle Bleche, Deckel, Boden, Front- und Rückwand sowie die Seitenwände verschraube ich mit rechteckigen Gewindeblöcken. Mit einer guten Abkantbank könnte man sich da einige Verschraubungen sparen.

Für die Frontplatte nehme ich eine 4mm dicke Acrylglasplatte, weil die Sensortasten gegen die Alu-Frontplatte isoliert sein müssen. Das dunkelgraue Acryl ist auch für Infrarot durchlässig und lässt sich gut mit weißen Abreibebuchstaben beschriften. Die Sensortasten hatte ich zuerst aus U-Scheiben und Rohr selbst angefertigt. Dann fand ich käufliche metallene Leuchtdiodenhalter, die ich mit grünen LEDs bestücke, für die Mute-Taste rot. Das motorbetriebene Alps-Poti befestige ich mit einer großen hochglanzpolierten Unterlegscheibe, die unten ein 3mm Loch bekommt. Da hinein kommt von innen eine ultrahelle grüne LED. Der Drehknopf aus Edelstahl ist bis auf die Achsbefestigung innen ausgedreht und erhält eine 2mm Bohrung. Das reflektierte Licht der vom Hilfsnetzteil gespeisten LED zeigt im ausgeschalteten Zustand die Stellung des Lautstärkestellers. So gibt es auch bei Dunkelheit beim Einschalten keine Überraschung, falls die Lautstärke zuletzt einmal laut aufgedreht war. Auch der Netztaster hat eine Beleuchtung, die im Bereitschaftsmodus (Standby) nur schwach glimmt, als Ring im Edelstahlgehäuse. So ein Teil kann man fertig kaufen, es nennt sich „vandalismusgeschützt“.

Auf der Rückwand sind im Bereich des Netzteils eine Kaltgerätesteckdose mit Schutzkontakt und der Netzsicherungshalter untergebracht. Gern hätte ich hier noch eine Steckdose für Flachstecker angeordnet, zum Beispiel für einen CD-Spieler, der dann über die Fernbedienung mit eingeschaltet werden kann. Leider habe ich keinen Hersteller solch kleiner Einbausteckdosen gefunden.

Die Lautsprecherklemmen sind gut isoliert. Da gibt es von mir den Hinweis, dass der Minus DC führt und deswegen nicht als Masseklemme dienen kann. Diese ist neben dem Phono-Eingang zu finden.

Für die vom Chassis isolierten Cinchbuchsen habe ich mich für die relativ neuen von WBT entschieden, weil die Hörerergebnisse damit positiv waren. Ja, sie sind teuer.

Die zwei 6mm dicken Kühlbleche bekommen alle 3mm-Gewindebohrungen zur Aufnahme der Leistungs-, Treiber- und Sensortransistoren, welche die Konstantspannung für den Ruhestrom halten. Die Transistoren werden mit Isolierscheiben für die Schrauben und Isolierplättchen befestigt. Für die Befestigung der Kühlbleche an Front-, Rück- und Bodenplatte gibt es 4mm-Gewinde. Sämtliche Befestigungsschrauben, die vom Gehäuse-Äußeren kommen, sind Senkkopf-Typen.

Meine Verstärker verschwinden dann in einem Holzgehäuse aus Buche-Leimholzplatten, das unten noch eine großzügige Öffnung im Bereich der Lüftungslöcher erhält. Weitere zwei 4,5mm-Bohrungen sind für die Befestigungsschrauben des gesamten Einschubs, für die im Verstärkergehäuse 4mm-Gewindeblöcke vorgesehen sind. Dann gibt es noch vier 6mm-Innengewinde im Holzgehäuse zur Aufnahme meiner aus Bucheplatten geschnittenen Gerätefüße. Es geht natürlich auch mit drei gut verteilten Füßen, standfest.

Für die Lackierung des Holzgehäuses und der mit einem Kreisschneider hergestellten Füße verwende ich einen >Schöner Wohnen<-Klarlack seidenmatt vom Bauhaus. Die Leimholzplatten gibt es in Baumärkten, auch das Acrylglas. Distanzbuchsen und Gewindeblöcke ordere ich bei Bürklin, wie auch größere Stückzahlen Elektronikteile. Dafür gibt es auch noch Conrad, Reichelt und andere, die auch IC-Fassungen, Lautsprecherklemmen, Cinchbuchsen oder Edelstahlknöpfe und -taster führen.

Das Holzgehäuse ist Geschmacksache, damit werden natürlich übliche HiFi-Gerätemaße überschritten. Ich möchte allerdings auch nicht empfehlen, solch ein Teil in ein Rack zu stopfen.



## 1.2 Schaltungen

Zum guten Verständnis beschreibe ich zuerst nur Schaltungsauszüge, später die Gesamtschaltungen der Baugruppen. Dabei kann sich schon mal der Wortlaut aus der Konzeptbeschreibung wiederholen.

### 1.2.1 Netzteil, Wechselspannungsseite

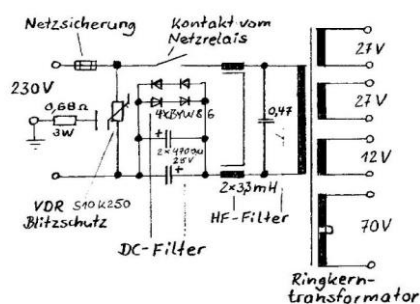
Der Widerstand vom Schutzkontakt zur Gehäusemasse unterbindet unerwünschten Brumm durch Potentialunterschiede. Diese können sich ergeben, wenn am Verstärker ein Gerät (oder mehrere) angeschlossen ist, das seinen Strom von einer weiter entfernten Steckdose bezieht.

Ein 500W-Ringkerntransformator hat genügend Reserven, um Endstufen mit je 50Wsin an 8Ohm zu betreiben. Wenn das Netzteil und die Endstufen stromkompetent genug sind, werden sie auch Lautsprecher mit 4Ω Impedanz und darunter betreiben. Wegen der Emitterwiderstände der Darlington-Ausgangsstufe wird sich die Leistung an 4Ω nicht ganz auf den doppelten Wert erhöhen.

Ich hatte anfangs die Sekundärspannungen vom handelsüblichen Trafo von 45 auf 70V mit entsprechenden Wicklungen erhöht, um getrennte Netzteile einsetzen zu können. Da an fast allen Hochpegelquellen an ihren Ausgängen die Masse von links und rechts verbunden ist, bringt dieser Aufwand so gut wie keinen Vorteil. So kann ich beruhigt einen Trafo mit 2x35V einsetzen, dessen Wicklungen ich in Serie schalte (Polarität beachten). Damit betreibe ich ein Hauptnetzteil, von dem die auf den Endstufenplatinen angeordneten Einzelnetzteile gespeist werden.

Der Ringkerntrafo bekommt dennoch Zusatzwicklungen. Zwei 27V-Wicklungen mit 0,4er CuL-Draht, der vorher auf ein Schiffchen aufgewickelt wird. Mit dessen Hilfe werden die einzelnen Wicklungen straff auf den vorhandenen Trafo gebracht (Einzelheiten unter 1.2.5). Die beiden 27V-Wicklungen sind für die Phono-Netzteile, bei denen die Trennung noch Sinn macht. Deren Massen werden erst an den Hochpegeleingängen vereint. Dann ist noch eine 12V-Wicklung für die Empfangseinheit mit der Steuerung der Eingangsrelais erforderlich. Aus diesen 12V mit etwa 100mA werden mit kleinem Netzteil noch 5V DC für den Potentiometer-Motor abgezweigt, der von der Fernsteuerung gesteuert werden kann. Die zusätzlichen Wicklungen sollten jeweils über den gesamten Kern gewickelt und zuletzt isoliert werden. Der vom Trafo nicht bewickelte kleine Spalt soll frei bleiben.

So sieht dann der Wechselspannungsteil aus:



1.2.1 Netzteil, Wechselspannungsseite

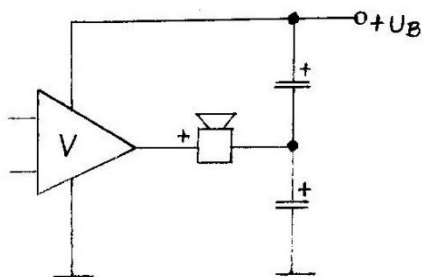
Schnittband-, M- und Ringkerntransformatoren liefern im Betrieb ein elektrisches Feld. Das Minimum dieses Feldes lässt sich beim Ringkerntrafo mit einem Oszillograf ermitteln: 30 Windungen 0,8er Kupferlackdraht, 1m lang auf eine 50mm lange M10- oder M12-Stahlschraube (magnetisch) mit den abisolierten Enden an die Messspitze und Masseklemme, Oszi-Bereich 5mV/Div und 20ms/Div. Mit dieser Spule kann man am leicht belasteten Trafo das Minimum ermitteln. Der Trafo wird so gedreht, dass die Stelle mit dem Minimum in Richtung des empfindlichen Phono-Eingangs zeigt, auch wenn dazwischen die dicken Kühlplatten der Leistungstristoren sind.

Die Trafodrähte werden bis zu den Netzteilanschlüssen paarweise verdreht, damit werden die sonst unter Stromfluss auftretenden Felder vermieden. Auf der Netzteilplatine sind die Bahnen zu den Gleichrichtern eng zu halten. Und jetzt das A und O, das Laien so gern falsch machen: Der Minus des Brückengleichrichters muss so kurz wie möglich und dick zum Lade-Elko geführt werden. Dies ist der spätere Masse-Sternpunkt, der über den Rest-Brumm im Lautsprecher entscheidet. Das gilt sowohl für die Endstufen- als auch für die Phonostufen-Versorgung.

Für meine Brückengleichrichter nehme ich Einzeldioden und selektiere je 4 mit etwa gleicher Schwellwertspannung. Das ist ebenso akademisch zu sehen wie ein kleiner Kondensator parallel zum Lade-Elko. Immerhin sind damit die Umladespitzen der Dioden gleich groß und lassen sich so besser vom Lade-Elko abfangen. Dabei hat auch der kleine Kondensator seine Arbeit.

### 1.2.2 Netzteil, Gleichspannungserzeugung

In den 60er Jahren hatte ich ein Buch von Georg Rose über Verstärkerschaltungen. Es gab da eine Lautsprecherankopplung vom Verstärkerausgang auf die Mitte zweier in Serie geschalteter Elkos, die an + und – der Versorgungsspannung hängen.



1.2 mögliche Lautsprecherankopplung

Zu der Zeit war die Restwelligkeit (Ripple) bei Netzteilen etwa 2,5mV, davon also die Hälfte am Lautsprecher. Die Idee fand ich aber sehr gut, weil der Lautsprecher bei intakten Elkos immer vor Gleichspannung geschützt ist. Die Elkos tragen zusätzlich auch noch zur Glättung der Gleichspannung bei. Jeder Elko muss aber eine höhere Prüfspannung als die Betriebsspannung vertragen können (hier 100V DC).

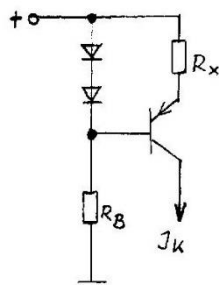
Vor einigen Jahren habe ich mich mit der Erzeugung einer sauberen Gleichspannung befasst. Es hat gedauert, aber dann kam diese Idee mit der Konstantstromquelle, die ihren Steuerstrom aus der gesiebten Zenerspannung bezieht, die sie versorgen soll. Das ist so ähnlich wie die Rückführung vom Gleichstromausgang eines Netztesiles auf den Regeltransistor, der die Darlingtonschaltung steuert.

Mit einem hochohmigen Widerstand wird meine Schaltung gestartet und ist nach ein paar Pulsen sauber. Die Restwelligkeit dieses Netztesiles ist bei ohmscher Volllast kleiner als 10µV. Das kommt meiner Endstufenschaltung zugute, die unipolar, heißt mit nur einer Spannung, betrieben wird. Damit muss sie keinerlei Nulldurchgänge passieren. An der Stelle gibt es bekanntlich ungeliebte Verzerrungen, wenn die Endstufe nicht im stromintensiven Class A-Bereich betrieben wird.

Mit dem erzielten Ripple dank meiner oben grob beschriebenen Konstantstromquelle kann ich beruhigt die Lautsprecherankopplung aus der alten Applikation des Herrn Rose anwenden.



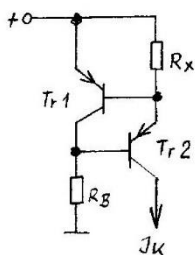
Zurück zur Konstantstromquelle:



So wurde sie in frühen Zeiten aufgebaut.  
Der Strom  $J_k$  ergibt sich aus der Flussspannung einer Diode (etwa 0,6V)  $= R_x$ .

Bei  $R_x = 1k\Omega$  also etwa 0,6 mA.

## 1.2 Netzteil, Beispiel Konstantstromquelle



Gleiche Rechnung für  $J_k$  wie bei der Schaltung mit Dioden.  
Der Vorteil ist aber, dass der Konstantstrom weniger temperaturabhängig ist, wegen gleicher Kennlinien der beiden Transistoren. T1 hat hier noch Regelfunktion.

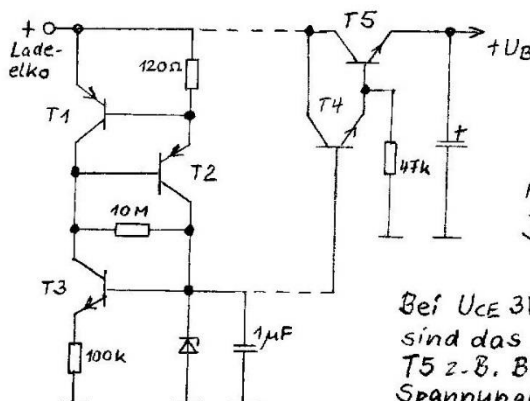
## 1.2 Netzteil, jüngerer Beispiel Konstantstromquelle

Diese Schaltung nannte ein lieber Kollege Krautner-Schaltung, ich kenne sie aus Arcam-Amps.

Mit einem Konstantstrom kann eine Zenerdiode gespeist werden. ZPD-Typen sind bei 5mA im relativ linearen Bereich. Dazu wird R bestimmt, und immer wieder kommt das Ohmsche Gesetz zum Tragen:

$$R = \frac{U}{I}, \text{ hier } \frac{0,6V}{5mA} = 120\Omega.$$

Der Basiswiderstand ist bei obigen Schaltungen je nach Versorgungsspannung meist oberhalb von 50k $\Omega$  zur Basis-Stromerzeugung. In meiner Schaltung kommt an diese Stelle eine Konstantstromquelle, deren Basisstrom aus der Zenerspannung geholt wird. Die Schaltung braucht noch den 10M $\Omega$  „Anlaufwiderstand“, weil sonst gar kein Strom zustande kommt.



Für Spannungen am Ladeelko unter 60V können T1 und T2 = BC556B, T3 und T4 = BC546B sein.

Für T5 gilt, dass  $U_{CE} > 3V$  ist. Je höher  $U_{CE}$  wird, desto mehr ist an Verlustwärme abzuführen.

Bei  $U_{CE} 3V$  und 100mA Stromentnahme sind das 0,3W für einen kleinen Kühler. T5 z.B. BD139 oder MJE340 für höhere Spannungen. Letzterer dann auch für T3, T4. T1 und T2 können MJE350 sein.

## 1.2.2 Netzteil, Gleichspannungserzeugung

Wenn keine besondere Spannungsstabilität erforderlich ist, kann ein Emitterfolger direkt an die Zenerdiode angekoppelt werden. Die Ausgangsspannung entspricht dann der Zenerdioden-Spannung abzüglich etwa 1,4V der beiden Basis-Emitter-Spannungen. Die Basis-Emitter-Spannung ist wegen des höheren Stroms 0,7V je Transistor. So eine Schaltung reicht aus, wenn die Stromentnahme in etwa konstant bleibt. Das geht aber nicht besonders gut bei Endstufen, die in Abhängigkeit von der Lautstärke sehr unterschiedliche Ströme ziehen.

Für digitale C-MOS-Schaltungen und zum Schalten von Relais reicht die Spannungsstabilität allemal aus, da geht es um weniger als 100mA Strombedarf. Der ferngesteuerte Motor zur Lautstärkeverstellung ist auch genügsam. Für ihn wird aus den 12V für Relais eine Spannung von 5V zur Verfügung gestellt.

Für die Versorgung der Endstufen wird das erheblich mehr Aufwand. Eine Rückführung (Feedback) vom Ausgang steuert einen Regeltransistor, der in der Abhängigkeit des Ausgangstroms am Längsregler (Darlington-Schaltung) entsprechende Korrektur vornimmt. Am Emitter des Regeltransistors bildet eine grüne Leuchtdiode anstatt einer Zenerdiode die Referenzspannung. Bei 5mA steht an dieser LED eine sehr konstante Spannung von etwa 2,0V. Das Eigenrauschen der LED unterdrückt der 1µF-Kondensator. Die LED wirkt gleichzeitig als Funktionskontrolle. Der Aufwand erhöht sich jetzt noch weiter mit einer elektronischen Überstromsicherung, die im Fehlerfall, auch bei Kurzschluss, anspricht. Das kann bei unsachgemäßer Aufstellung des Verstärkers durch Überhitzen passieren, die Endstufen sollen damit geschützt werden. Eine rote LED zeigt den Fehlerfall an, allerdings nicht nach außen. Sie hilft lediglich beim Auffinden des Fehlers.

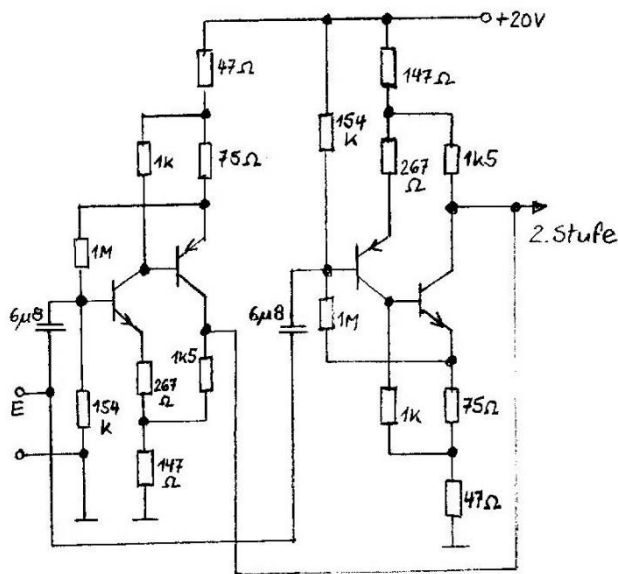
Die eben beschriebene Schaltung befindet sich auf den Leiterplatten der Endstufen. Die aus dem Netzteil gelieferte Spannung wird hier um 3V reduziert und über den Feedback konstant gehalten. Und hier ist die elektronische Sicherung untergebracht. Dieser hohe Aufwand mit zwei seriellen Spannungskonstantern verspricht den Komfort, den sonst nur eine exzellente Batterie liefern könnte. Die ersten der zwei jeweils hintereinander angeordneten Gleichspannungs-Netzteile werden in dem Raum untergebracht, in dem sich der Ringkerntransformator befindet, auch das Hilfsnetzteil. Das wird im Standby-Modus gebraucht, um den Verstärker mit der Fernbedienung einschalten zu können und um den zuletzt geschalteten Eingang zu speichern.

Die Stromversorgung für die RIAA-Entzerrung (Phonovorstufen) ist mit dem Endstufen-Netzteil nahezu identisch. Bei dem weit geringeren Strombedarf sind die Transistortypen der Längsregler wesentlich kleiner. Sie benötigen auch wegen der viel geringeren Verlustleistung nicht den hohen Kühlbedarf. Auf die Überstromsicherung kann verzichtet werden, weil bei dem geringen Stromverbrauch der jeweils drei Spannungsverstärker kaum Wärme entsteht.

### **1.2.3 Phonovorstufe mit RIAA-Entzerrung**

Die erste Verstärkerstufe, an deren Eingang 47kΩ für Magnet-Tonabnehmersysteme realisiert werden, zeigt die im Konzept beschriebene „Doppel-Aktivschaltung“. Die passive RIAA-Entzerrung enthält die zusätzlichen zwei RC-Glieder zur Vermeidung weiterer Phasendrehung unterhalb 50Hz. Diese Phasendrehung lässt sich am besten mit einem Speicheroszillograf darstellen. Der von den zusätzlichen RC-Gliedern geringfügige Spannungsverlust im Bereich unter 50Hz fällt überhaupt nicht ins Gewicht, weil durch die Phasentreue ein wesentlich genauerer Bassbereich einen sehr guten Eindruck hinterlässt.

Hier ein musikalisches Beispiel: Auf der ECM-Platte „Making Music“ von Zakir Hussain gibt es auf Seite 2 das Stück >Sunjog<. Das macht mit der Korrektur einen faszinierenden räumlichen Eindruck, speziell von der Größenabbildung, weil die Hüllkurve im tieffrequenten Bereich nun zum Rest stimmt.



### 1.2.3 Phono, Eingangsverstärker

Auf einen Moving Coil-Vorverstärker habe ich verzichtet. Die wahlweise Möglichkeit des Betriebes mit solchem Tonabnehmer erfordert Schalter oder ein Steckmodul. Falls ich mal ein MC-System verwenden möchte, habe ich dafür einen externen batteriebetriebenen Verstärker. Den hatte ich in den 90er Jahren entwickelt, mit ähnlich guten Ergebnissen wie ein teurer Übertrager.

### 1.2.4 Endstufe

Bis zur Idee der vollaktiven Halbwellenbearbeitung mit doppeltem Aufwand hatte ich sehr gute Erfolge mit der einfachen Variante, die schon Gegenkopplung (Spannung), Mitkopplung (Strom) und Linearisierung enthielt. Der zusätzliche Gewinn an Hörqualität mit dem geschilderten Aufwand ließ mir keine Ruhe, das auch in meiner Endstufe zu realisieren.

Positive Eigenschaften stellten sich auch ein, nachdem ich in meinen Class A-amps Ableitwiderstände in die Darlington-Ausgangsschaltung eingefügt habe. Nicht meine Idee, das hatte Jean Hiraga schon in den 80er Jahren publiziert. Diese Widerstände sperren eindeutig den zugeordneten Transistor, sobald er seinen Aktivbereich verlässt. Dann gibt es noch eine Veröffentlichung im >Engineering Reports< von Malcolm Hawksford von der University of Essex, 1982. Seine Ruhestromstabilisierung mit komplementärer Anordnung auf dem Kühlkörper war zu der Zeit recht neu. Wie einige andere habe ich das gern auch umgesetzt. Ziel dabei ist, dass bei Erwärmung der Leistungstransistoren auch diese Konstantspannungskomponente mit erwärmt wird und damit ihre Kollektor-Emitter-Spannung fällt. Das vermindert die Basisspannungen der Darlington-Ausgangsstufe und stabilisiert damit den Ruhestrom. Kompensation also durch gegenläufige Kennlinien, wobei berücksichtigt ist, dass die Ausgangsstufe auch mit Komplementär-(pnp und npn-) Transistoren aufgebaut ist. Früher hat man sie mangels spannungsfester pnp-Transistoren mit npn-Typen gebaut. Da wurden dann Halbleiter zur Wärmekompensation eingesetzt.



## Bauteile

Die parallelsymmetrische Drossel des Hochfrequenzfilters auf der Netzseite des Trafos kann man fertig kaufen, z.B. Epcos B82726S, Wert  $2 \times 3,3 \text{ mH}$ . Ich nehme den Kern Epcos B64290L618X35, da kommen zwei Wicklungen mit je 20 Windungen CuL-Draht 0,8 Durchmesser gespiegelt drauf. Ein passend zurechtgesägtes Stück Epoxyd-Leiterplatte ohne Kupfer wird in die Mitte der beiden Wickel als Isolierung gesteckt und verklebt.

Vor dem Bewickeln des Ringkerntrafos wird der äußere Isolierwickel entfernt und beiseite gelegt. Nach dem Bewickeln (Schraubstock mit Alu-Backen ist hilfreich) wird die Isolierung straff wieder aufgebracht. Das Typenschild kann man selbst zeichnen. Es erhält ja auch die zusätzlichen Spannungen.

Ringkerntransformator erweitern: Um jetzt weitere Wickel aufzubringen muss ich wissen, wie viele Windungen pro Volt notwendig sind. Dazu zähle ich die Anzahl der vorhandenen Windungen. Ist die Angabe z.B.  $2 \times 35 \text{ V}$  und ich zähle gesamt (Beispiel) 216 Windungen, so sind das 108 Windungen für 35V. Diese 108 geteilt durch 35 ergeben 3,08. Brauche ich 12V, so muss ich dafür  $12 \times 3,08 = 37$  Windungen aufbringen. Für einen Strom von 100mA würde eine Drahtdicke von 0,2mm reichen. Ich würde da aber CuL-Draht mit 0,4mm Durchmesser nehmen, der lässt sich besser wickeln. Vorher brauche ich noch die Länge einer Windung. Bei z.B. 16cm für eine Windung ist eine Länge von  $37 \times 16 = 5,92 \text{ m}$  und zusätzlich etwa 30cm für die äußeren Zuführungsdrähte erforderlich. Der abgemessene CuL-Draht wird auf ein „Schiffchen“ gewickelt. Das ist ein Sperrholzbrettchen, 4mm dick, 25mm breit, 310mm lang. Die Enden werden je 5mm tief eingesägt auf eine Breite von etwa 20mm. Mit dem hier aufgewickelten Draht lässt sich das Schiffchen durch die Trafomitte stecken und so der Trafo straff bewickeln. Die Enden werden mit Isolierschlauch versehen und mit Tesa am Trafo verklebt. Die 37 Windungen werden so gut es geht über den Trafokreis verteilt. Mit den 27V-Wickeln wird genauso verfahren.

Die Drosseln auf der Endstufe lassen sich leicht mit 0,8er CuL-Draht auf die Klinge eines ca. 6mm dicken Kreuzschlitzschraubendrehers wickeln. 10 Windungen, Enden abisolieren und verzinnen.

Wenn es Schwierigkeiten bei der Beschaffung der 1%igen Metallfilmwiderstände (0,6W-Typen) gibt, funktioniert auch der vom Wert benachbarte Typ aus der E12-Reihe. Die  $5 \text{ k}\Omega$ -Trimpotis sollten schon 10-Gang-Typen sein, die vor dem Einbau etwa auf Mitte gedreht werden.

Bei der ersten Inbetriebnahme empfiehlt sich immer, statt Lautsprecher einen  $8 \Omega$ -Hochlastwiderstand anzuschließen. Vor der Ruhestromeinstellung müssen die Leistungstransistoren schon isoliert auf den Kühlblechen (-körpern) verschraubt sein. Wer sich vor der ersten Inbetriebnahme nicht ganz sicher ist, sollte auf jeden Fall jemand zu Rate ziehen, der damit schon Erfahrung hat, speziell auch mit Netzspannung. Auf jeden Fall wird jede Baugruppe erst einmal für sich geprüft, dann werden nach und nach die Baugruppen miteinander verbunden.

Garantien kann ich selbstverständlich nicht übernehmen, versichere aber, dass nirgendwo vorsätzlich ein Schaltungsfehler eingebaut ist. Im Übrigen erhebe ich ja nicht den Anspruch, in allen Belangen vornan zu sein, schon gar nicht bei der Ausgangsleistung der Endstufen. Da bin ich lieber auf der sicheren Seite.

### 1.3 Funktionsbeschreibungen

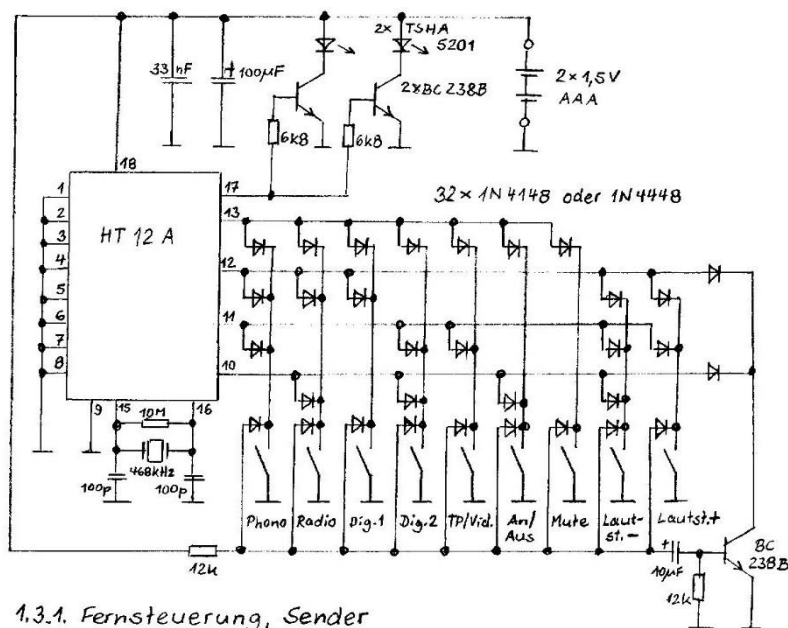
Ich kann nicht jedes Detail beschreiben. Ein gewisses Verständnis muss da schon vorausgesetzt werden, sonst würde das eine nahezu unendliche Geschichte werden.

### 1.3.1 Fernsteuerung, Sender

Den gibt es mit einem einfachen Empfänger z.B. bei Conrad preiswert als Bausatz. Fast alle Bauteile kann ich für meine Zwecke benutzen, die mitgelieferten Leiterplatten nicht. Der Bausatz ist eigentlich zum ferngesteuerten Schalten von Lämpchen gedacht.

Der Decoder HT12A aktiviert bei jedem Tastendruck seinen Generator mit 468kHz. Daraus werden die Sendefrequenzen gebildet, welche der Empfänger im Verstärker erkennt. So wird im Empfänger keine andere Fernbedienung akzeptiert.

Jede der Tasten gibt dem Sendedecoder einen BCD-Code parallel vor, der seriell an die beiden Transistoren gegeben wird. Diese schalten die beiden Infrarotdioden im gleichen Takt. Zwei schaffen mehr als eine, die Reichweite ist etwa 4m. Mit einer Konkavlinse vor der Empfangsdiode könnte man das etwas empfindlicher hinbekommen, für die Praxis ist das so aber allemal hinreichend.



### 1.3.1. Fernsteuerung, Sender

