

Chassis, Verkabelung und Signalqualität

Von Karsten Gänger und Henry Westphal



Detailansicht des in diesem Labor entstandenen Endstufenchassis

Grundsätzliche Konzeption des Gerätebaus im Sinne der Synthese von traditioneller Aufbautechnik und zeitgemäßer Leiterplattentechnik

Von Anfang an stand als Zielvorstellung fest, daß das Erscheinungsbild des in diesem Labor zu bauenden Verstärkers sich an der Beibehaltung des traditionellen optischen Erscheinungsbilds von Röhrenverstärker orientieren sollte.

Als besonderes beeindruckendes Beispiel dieser Technik ist hier eine Röhrenendstufe des amerikanischen Herstellers Heathkit aus den mittleren 50-er Jahren abgebildet:



Röhrenendstufe von Heathkit aus dem mittleren 50-er Jahren

Diese Aufbautechnik hat einen besonderen ästhetischen Reiz, da man die glühenden Heizfäden der nicht durch Gehäuseaufbauten verdeckten Röhren deutlich erkennen kann. Daher wird sie von den meisten Herstellern, die Geräte für den Zielmarkt „High-End-Audio“ anbieten auch heute noch bewußt gewählt. Nicht zuletzt ist für die erfolgreiche Vermarktung eines solchen Produkts vorteilhaft, daß das Gerät von jedem Betrachter sofort als Röhrengerät erkannt wird und damit als hochwertig und exklusiv eingestuft wird. Der Besitzer hat damit neben dem eigenen Hörgenuß und dem eigenen optischen Genuß den nicht unwesentlichen Mehrwert eines gesteigerten Sozialprestiges.

Die folgende Abbildung zeigt ein aktuelles Gerät eines chinesischen Herstellers.



Heutige Röhrenendstufe aus China

Interessant ist hierbei, die fast schon karikierende, plakative Ausführung des Prinzips, die im völligen Gegensatz zur rationalen, nüchternen (und gerade daraus seine zeitlose Schönheit gewinnende) Ausführung des auf der vorigen Seite zu sehenden Heathkit-Verstärkers steht.

Es fällt auf, daß zugunsten der (vordergründigen) Ästhetik technische Gegebenheiten zurückgestellt wurden, so sind etwa wärmeempfindliche Elektrolytkondensatoren direkt neben wärmeabgebenden Röhren platziert.

Die traditionelle Chssismontage bietet jedoch auch handfeste technische Vorteile:

- Ein Audio-Verstärker in Röhrentechnik benötigt immer auch große und schwere Bauteile. Diese sind unter anderem der Netztransformator und die Ausgangsübertrager für die Anpassung der Lautsprecherkreise. Ein solide aufgebaute Metallchassis bietet einen sicheren Halt für diese Bauteile.
- Die in den Röhren entstehende Verlustwärme kann durch die offene Bauweise optimal durch natürliche Konvektionskühlung abgeführt werden. Es ist sofort offensichtlich, daß eine geräuschartig wirkende Lüfterkühlung bei einem Audiogerät nicht sinnvoll wäre.
- Die Wärmeabstrahlung der auf der Oberseite befindlichen Röhren wird durch das Chassis von den auf der Unterseite befindlichen Bauelementen abgehalten. Damit wird deren Lebensdauer erhöht.
- Die direkte Verschraubung der Transformatoren und Drosseln mit dem Chassis aus Metall führt zu einer Kühlung dieser Komponenten durch Wärmeableitung.

- Das Chassis stellt eine sehr wirkungsvolle elektrische Abschirmung dar, die einer Störung der empfindlichen Audiosignale durch Einstreuungen von Netzbrumm oder Rundfunksendern entgegenwirkt.
- Die unmittelbare Zugänglichkeit der Röhren hat den Vorteil, dass diese sehr leicht ausgetauscht werden können.
- Letztendlich bietet das Chassis des Verstärkers einen effektiven Berührungsschutz. Der Berührungsschutz ist bei Röhrengeräten durch die hohen Anodenspannungen der Röhren (typischerweise 800V Spitzenwert bei voller Aussteuerung) ganz besonders wichtig.

Die traditionelle Aufbautechnik von Röhrengeräten beinhaltete jedoch auch die freie Verdrahtung der Bauelemente. Diese wurden von Hand an Lötstützpunkten befestigt. Verbindungen wurden durch die Anschlußdrähte der Bauelemente selbst oder durch das Verlegen isolierter Leitungsdrähte realisiert.

Diese Methode hat, gegenüber der heute üblichen Verwendung von Leiterplatten, mehrere Nachteile:

- Freie Verdrahtung ist bereits für eine Einzelstückfertigung sehr zeitaufwendig und dazuhin fehleranfällig
- Die Masseführung ist nicht vollständig frei gestaltbar
- Die Konsistenz zwischen Schaltplan und tatsächlicher Ausführung der Verbindungen ist nicht sichergestellt, im Gegensatz zu einem CAD-Layout, bei dem diese Konsistenz systembedingt garantiert ist.
- Eine automatisierte Fertigung ist nicht möglich. Unter den Bedingungen hiesiger Lohnkosten (und vor allem der hiesigen einseitigen Belastung von Arbeitslohn mit Abgaben) wären auf diese Weise hergestellte Produkte unverkäuflich.

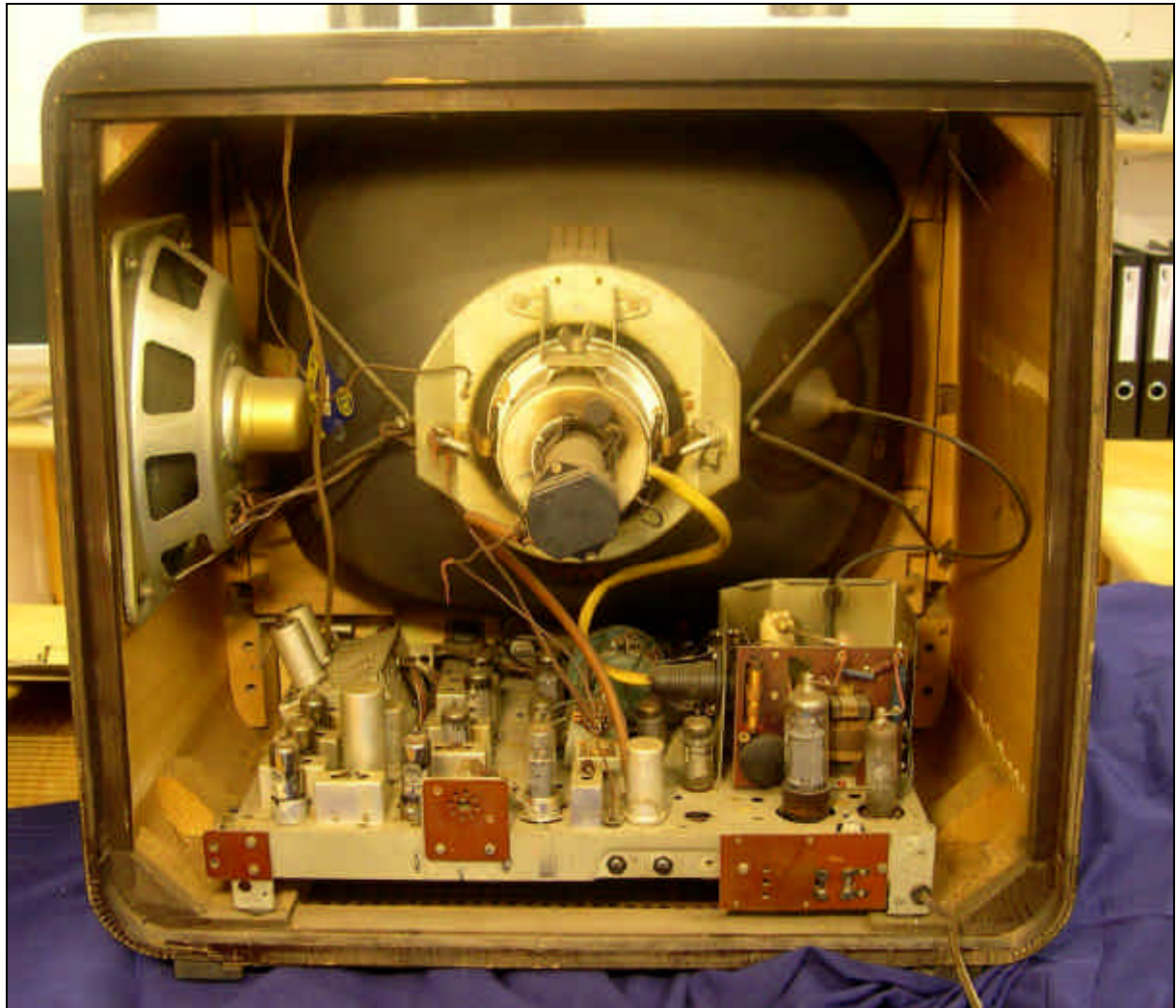
Aus diesen Gründen wurde in der ersten Hälfte der 60-er Jahre die bis dahin übliche freie Verdrahtung nahezu vollständig durch Leiterplattentechnik ersetzt. Hierbei wurden zunächst einzelne Teilbereiche der Geräte in Leiterplattentechnik realisiert, die dann, wie ein großes Bauelement, in einen Ausbruch eines konventionellen Chassis mit ansonsten freier Verdrahtung gesetzt wurden. Die erste in Großserie hergestellte Leiterplatte war ein NF-Röhrenverstärkermodul für ein Radiogerät aus dem Jahre 1956, die einseitig kupferkaschierte Leiterplatte aus Harpapier wurde von der auch heute noch existenten Firma RUWEL hergestellt. Der Fernseher OPTALUX des schon damals besonders innovativen Herstellers LOEWE-OPTA hatte bereits 1958 einige Leiterplattenmodule, die in ein ansonsten frei verdrahtetes traditionelles Chassis eingebaut waren. LOEWE ist übrigens der einzige heute noch existierende und in Deutschland produzierende Hersteller von Fernsehgeräten.

Es ist wenig bekannt, daß die ersten Leiterplatten nicht, wie oft zu lesen, in den 50-er Jahren in den USA hergestellt wurde, das geschah überraschenderweise bereits 1948 in der schon damals unter Arbeitskräftemangel leidenden DDR, in den keramischen Werken Hermsdorf. Als Basismaterial wurde Keramik verwendet, die Leiterbahnen bestanden aus Silber und wurden in die Oberfläche des Keramiksubstrats eingebrannt. Diese Technik wird auch heute noch in weiterentwickelter Form zur Herstellung hochwertiger Hybridschaltkreise für den Militär- und Luftfahrtbereich verwendet.

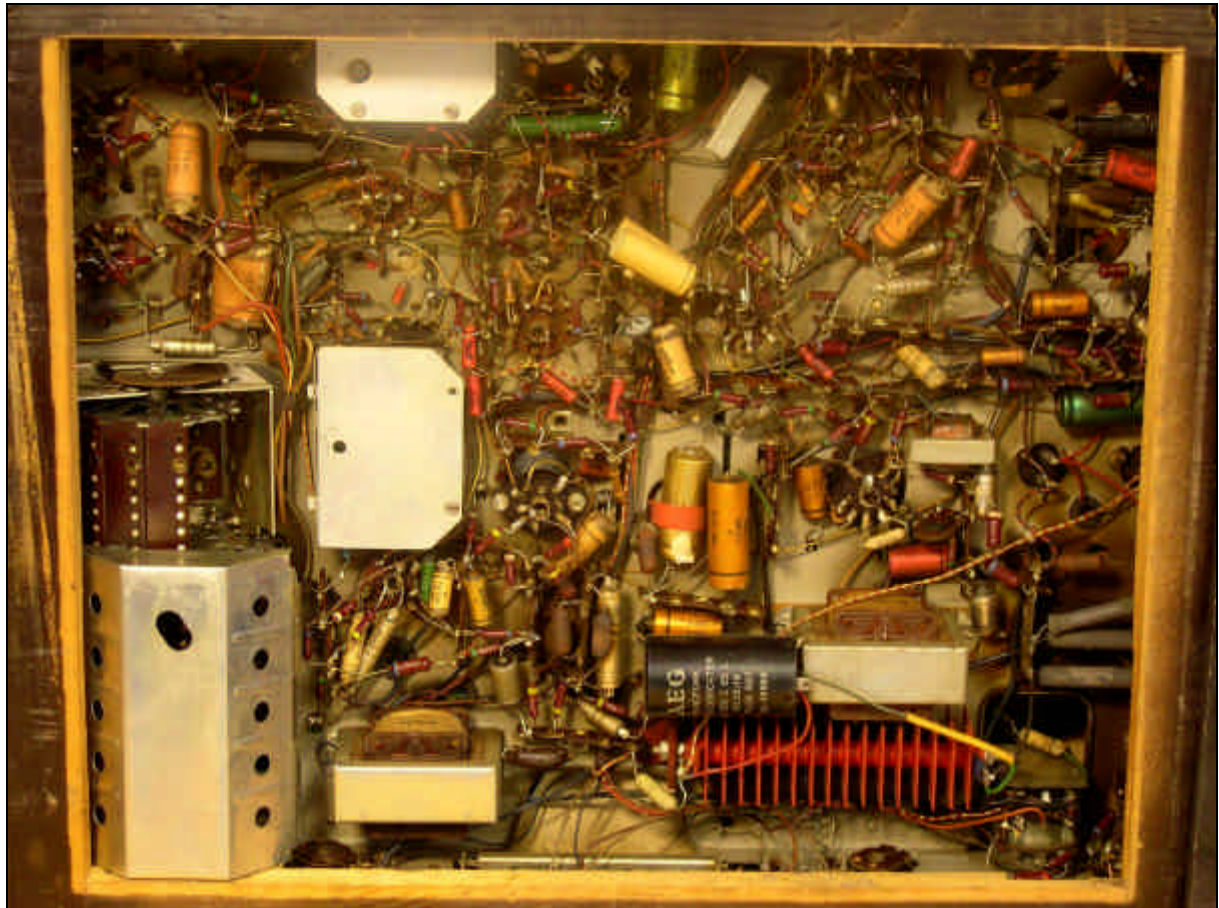
Auch komplexere Geräte wie Computer oder Oszilloskope wurden zunächst in freier Verdrahtung hergestellt. Im folgenden werden Abbildungen einiger charakteristische historischer Geräte gezeigt, um die spannende Entwicklung der elektronischen Aufbautechnik zu illustrieren.



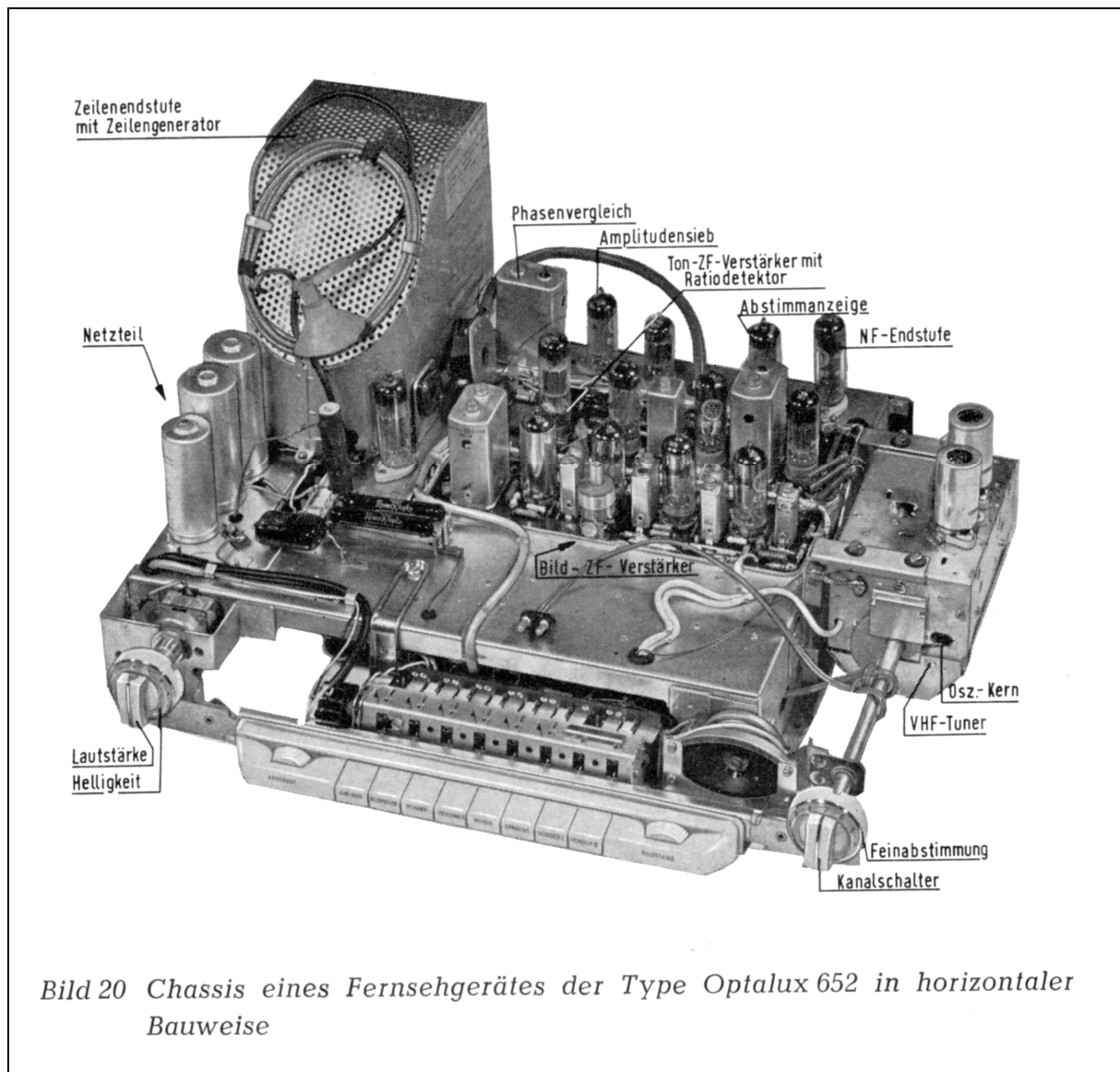
Radio „Meteor“ von Loewe-Opta aus dem Jahr 1953. Die außergewöhnliche goldene Farbgebung des Chassis dieses Gerätes war ein inspirierender Einfluß für die Gestaltung des optischen Erscheinungsbild des in diesem Labor realisierten Verstärkers



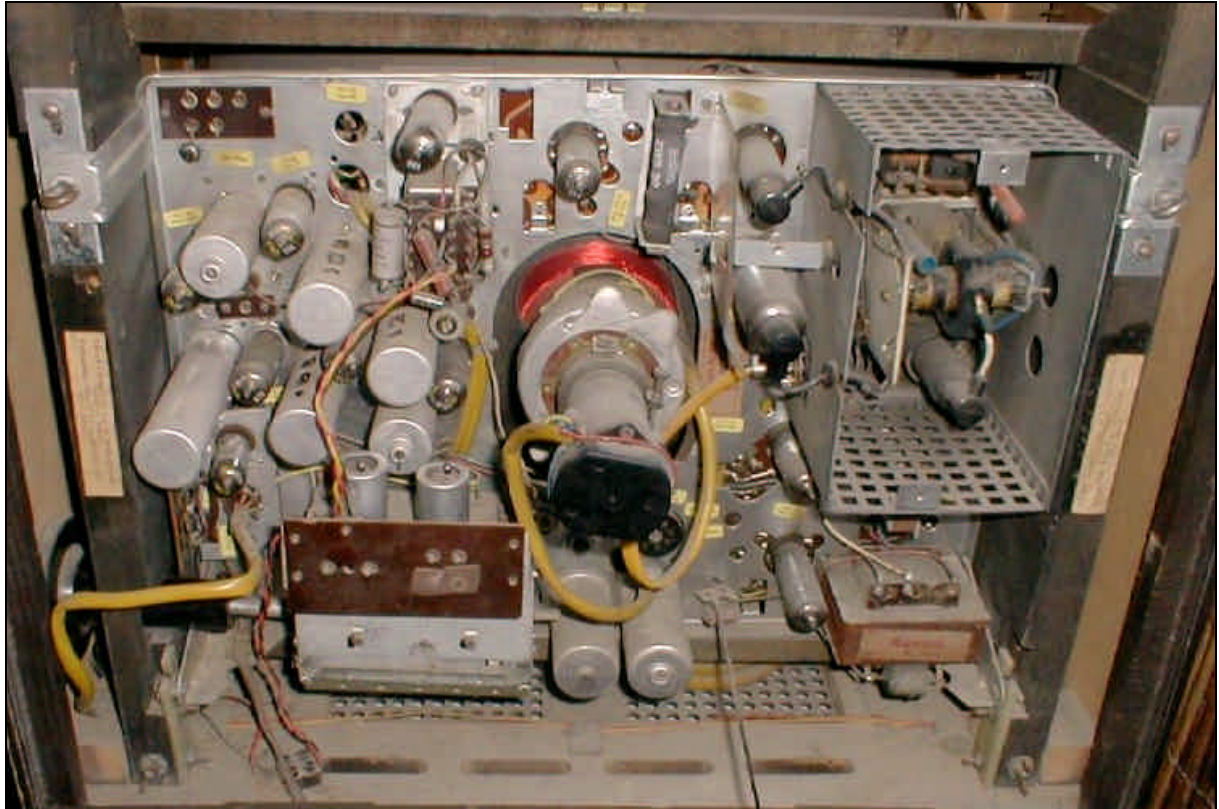
Fernseher „Burggraf“ von Graetz, Mitte der 50-er Jahre, mit klassischem, freiverdrahten Chassisaufbau.



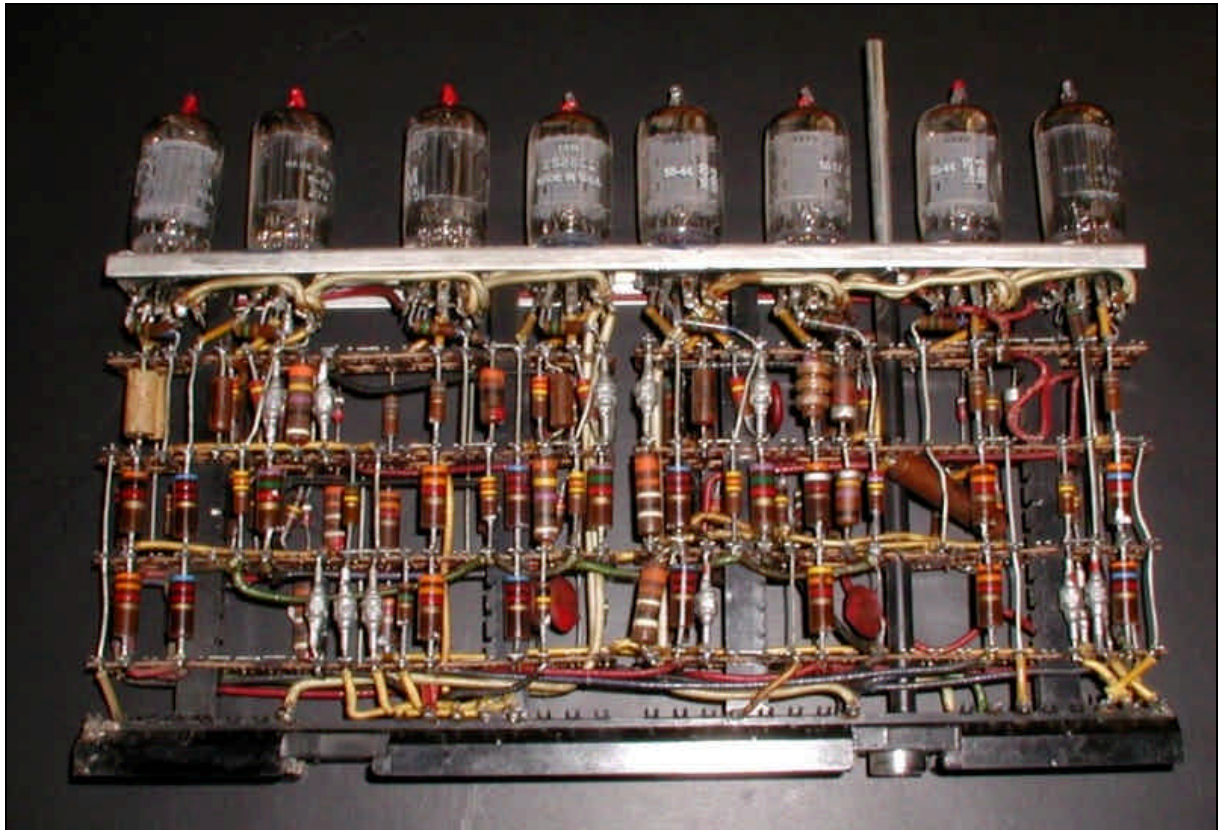
Fernseher „Burggraf“ von Graetz, Blick auf die Unterseite des Chassis. Man hat hier sogar einen praktisch dreidimensionalen Aufbau der Schaltung vor sich.



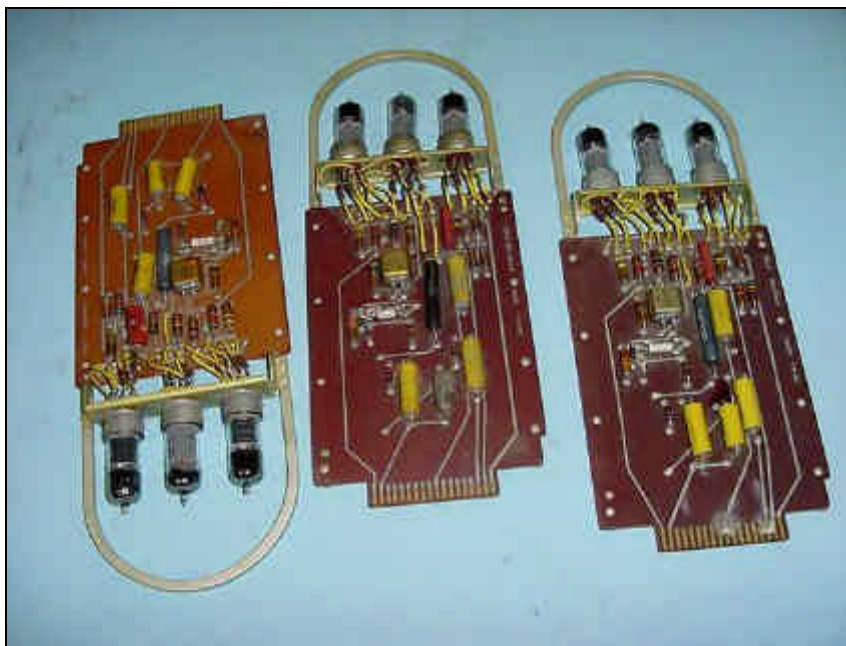
Chassis eines Optalux-Fernsehers von Loewe-Opta aus den frühen 60-er Jahren. Die mehreren kleinen Leiterplatten der vorherigen Gerätegeneration wurden bereits zu eine reinzigen, großen Leiterplatte zusammengefaßt, die aber nach wie vor in einem konventionellen Chassis montiert ist, das ansonsten frei verdrahtet wurde.



Bei diesem Fernseher von Nordmende aus den frühen 60-er Jahren sind mehrere, den einzelnen Funktionseinheiten entsprechende, Leiterplatten in einem senkrechtstehendes Metallchassis montiert. Die Röhren und die Kleinteile sind, wie bei freier Verdrahtung, auf entgegengesetzten Seiten des Chassis plaziert. Diese Aufbautechnik wurde auch bei dem im Rahmen dieses Labors realisierten Verstärker eingesetzt.



Modul aus einem Röhrencomputer von IBM aus den frühen 50-er Jahren. Man erkennt hier bereits eine regelmäßige, ins zweidimensionale führende Gruppierung der Bauelemente, der erste Schritt hin zur rein zweidimensionalen Leiterplatte. Dieses Modul ist auch in sofern wegweisend, daß es schon das auch heute noch verwendete Prinzip der Einschubkarte mit rückwärtigem, hochpoligen Anschlußstecker, vorwegnimmt.



Module aus einem amerikanischen Röhrencomputer aus den 50-er Jahren, man erkennt die Beibehaltung der von IBM bekannten Anordnung der Röhren, die mittels freier Verdrahtung an eine die Kleinteile aufnehmende Leiterplatte angeschlossen sind. Der vergoldete Einschubstecker ist gut zu erkennen.

Hier sind noch einmal drei typische klassische Röhrenverstärker aus den USA gezeigt, die die weite Verbreitung und, trotz einer gewissen Variationsbreite der konkreten Realisierung doch immer zu erkennende, einheitliche Struktur dieses Aufbauprinzips zeigen sollen:



Verstärker von Bell (USA) aus den frühen 50-er oder späten 40-er Jahren



Verstärker von Scott (USA) aus den frühen 60-er oder späten 50-er Jahren



Verstärker HK-250 von Harman-Kardon von 1959, der im Rahmen dieses Labors als Referenzgerät genutzt wurde.

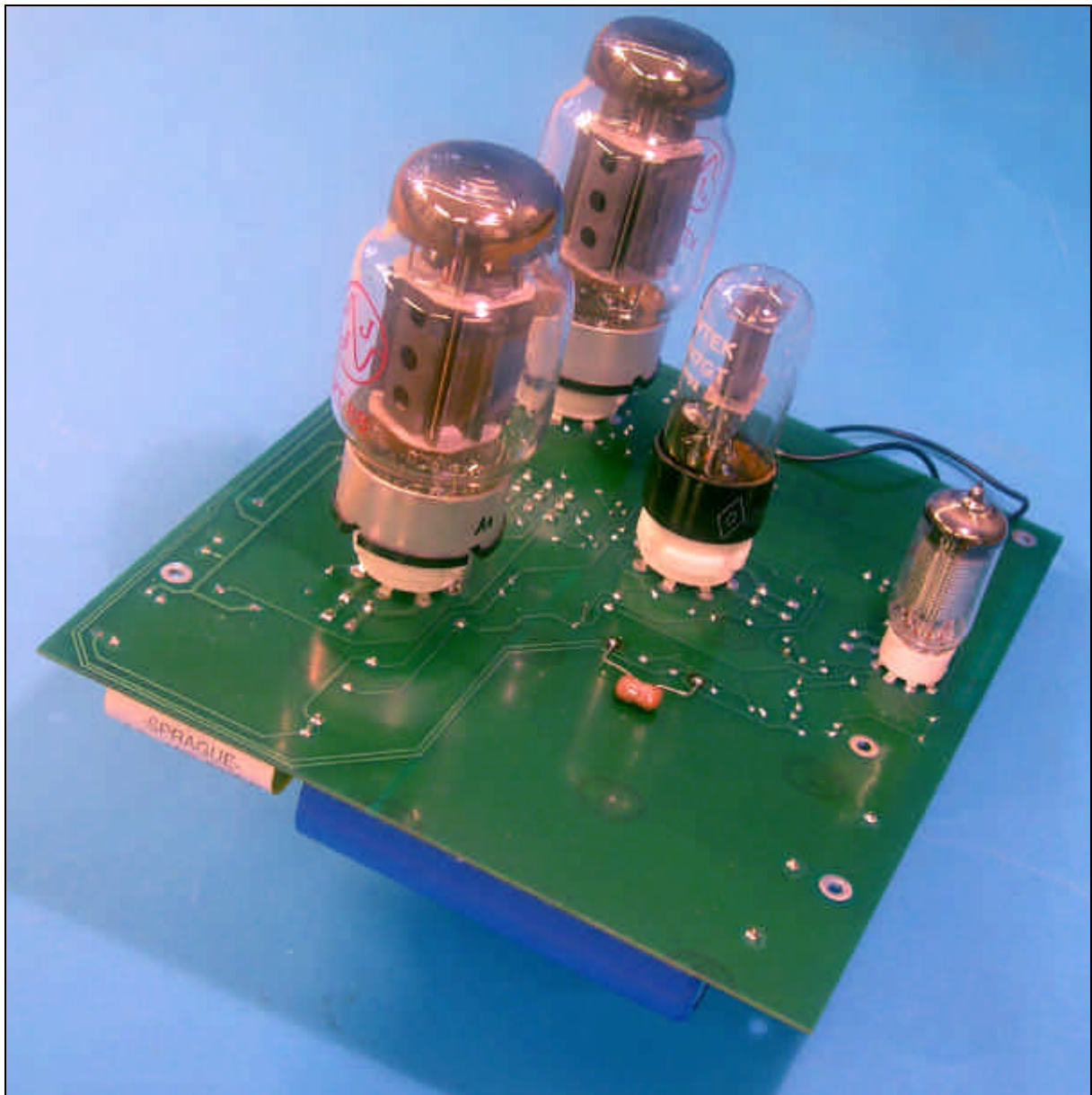
Die Anordnung der Komponenten wird zum einen durch den Signalfuß (Separierung von Ein- und Ausgangssignalen), die größtmögliche räumliche Trennung von Netz- und Ausgangstrafo zur Vermeidung von magnetischer Brummeinstreuung und der räumlichen Trennung von wärmeabgebenden und wärmeempfindlichen Bauteilen bestimmt. Man beachte die sorgfältige möglichst weitgehende Separierung von wärmeempfindlichen Elektrolytkondensatoren und wärmeabgebenden Röhren, die sich bei allen drei Verstärkern deutlich zeigt.



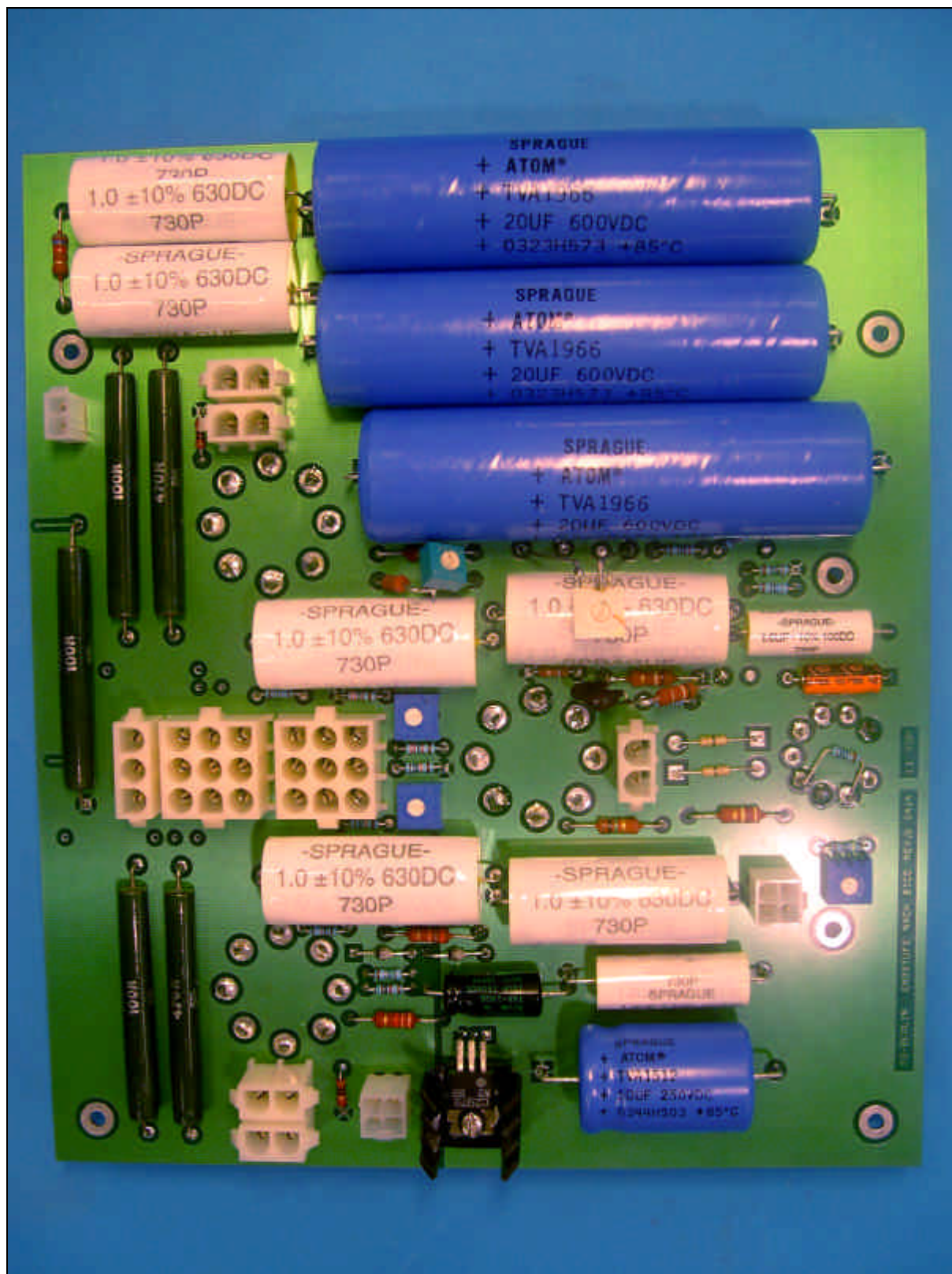
Blick auf die Unterseite des Chassis des bereits abgebildeten Heathkit-Verstärkers von Mitte der 50-er Jahre

Für den im Rahmen dieses Labors realisierten Verstärker wurde eine Synthese aus der traditionellen Aufbautechnik mit ihren technischen und ästhetischen Vorteilen mit zeitgemäßer Leiterplattentechnik gesucht und gefunden. Man kann somit alle Vorteile der traditionellen Aufbautechnik nutzen, ohne aber die Nachteile der freien Verdrahtung hinnehmen zu müssen.

Hierfür wurden die einzelnen Schaltungsteile auf Leiterplatten aufgebaut, die über beidseitig steckbare Kabelbäume miteinander verbunden werden. Die Leiterplatten sind so konstruiert, daß die Röhren auf der Oberseite der Leiterplatte bestückt sind während sich alle anderen Bauteile auf der Unterseite der Leiterplatte befinden. Die Lage der Bauelemente relativ zum Chassis entspricht daher dem von der freien Verdrahtung her bekannten Prinzip. Diese Leiterplatten werden in ein konventionelles Chassis montiert.



Ansicht einer der im Rahmen dieses Labors realisierten Endstufenleiterplatte von oben



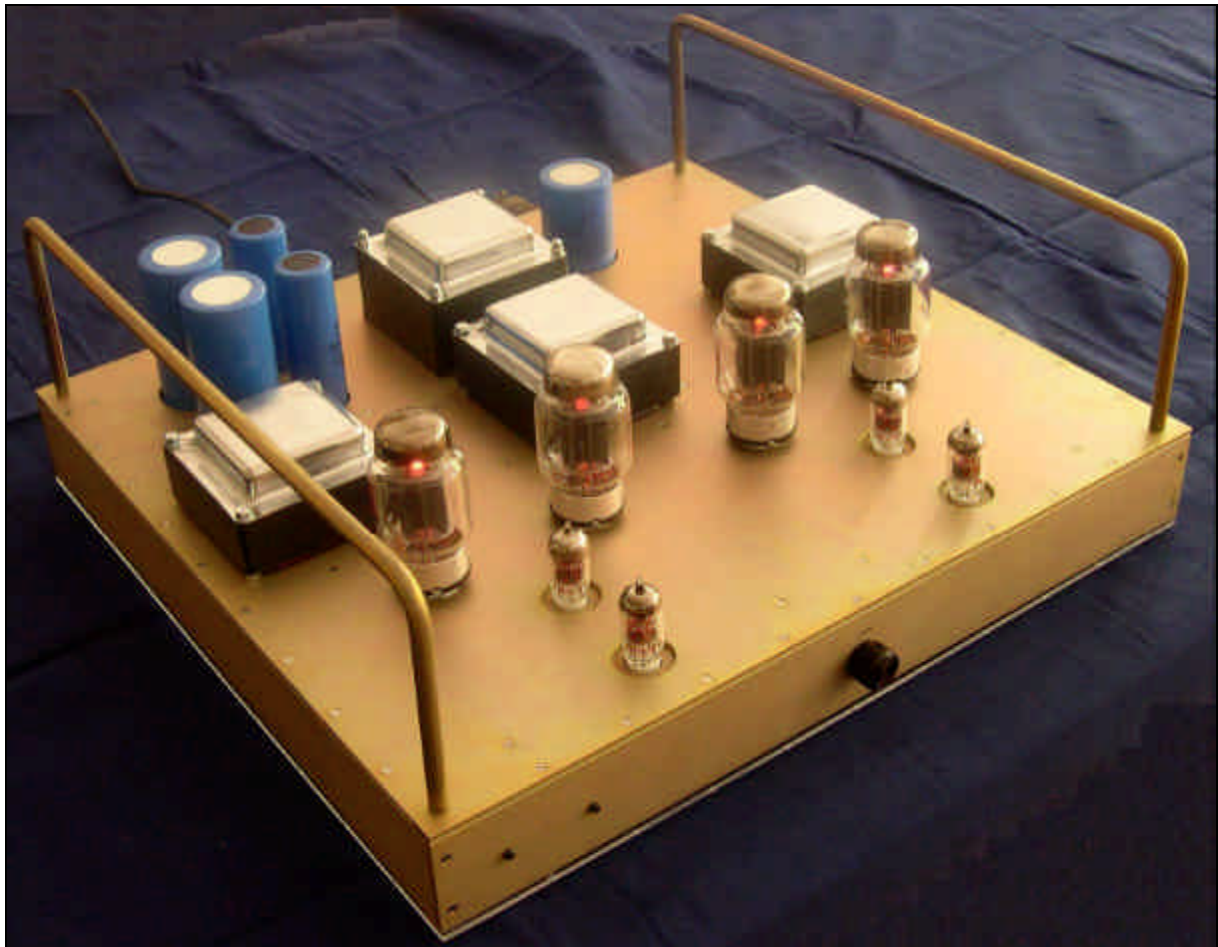
Ansicht der auf der vorigen Seite gezeigten Leiterplatte von unten



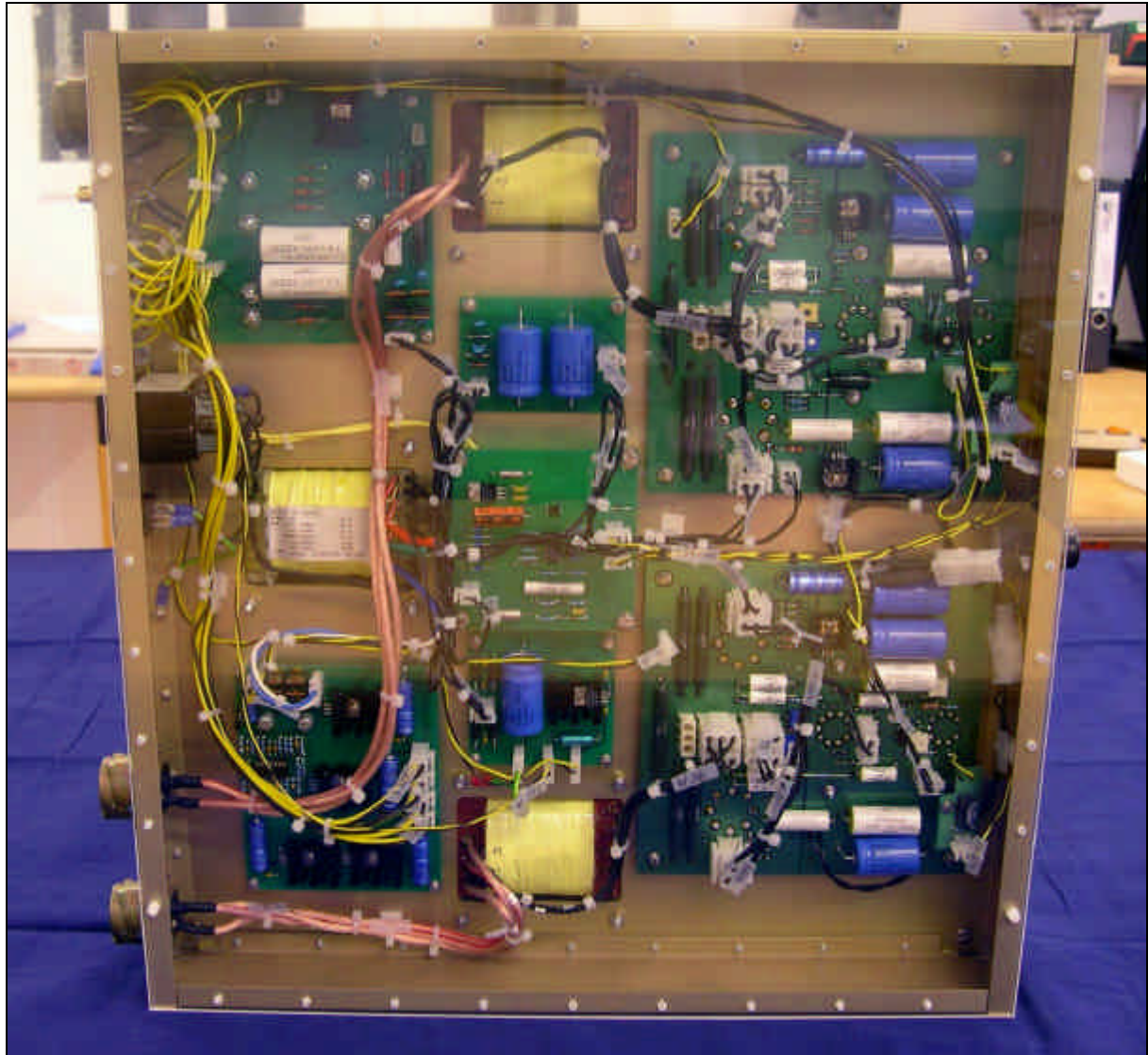
Blick von der Oberseite des Chassis auf eine montierte Endstufenleiterplatte, man erkennt, daß das traditionelle optische Erscheinungsbild ohne Abstriche erreicht wird.

Es wurde bewußt ein modularer Aufbau des Verstärkers realisiert: Jede Funktionseinheit befindet sich auf einer separaten Leiterplatte. Alle elektrischen Anschlüsse der Leiterplatten sind steckbar ausgeführt. Mittels dieser Konzeption konnten verschiedene Schaltungskonzepte miteinander verglichen werden. Im Rahmen dieses Labors wurden 5 verschiedene Phono-Vorstufen und 3 verschiedene Endstufen aufgebaut. Die Leiterplatten hatten jeweils einheitliche elektrische und mechanische Schnittstellen. Damit konnten sie in Minutenschnelle im Chassis montiert und verkabelt werden. Beim Layout der verschiedenen Leiterplatten war somit darauf zu achten, daß Befestigungsbohrungen, Röhren und Steckverbinder bei allen Versionen immer an den gleichen Stellen platziert sind.

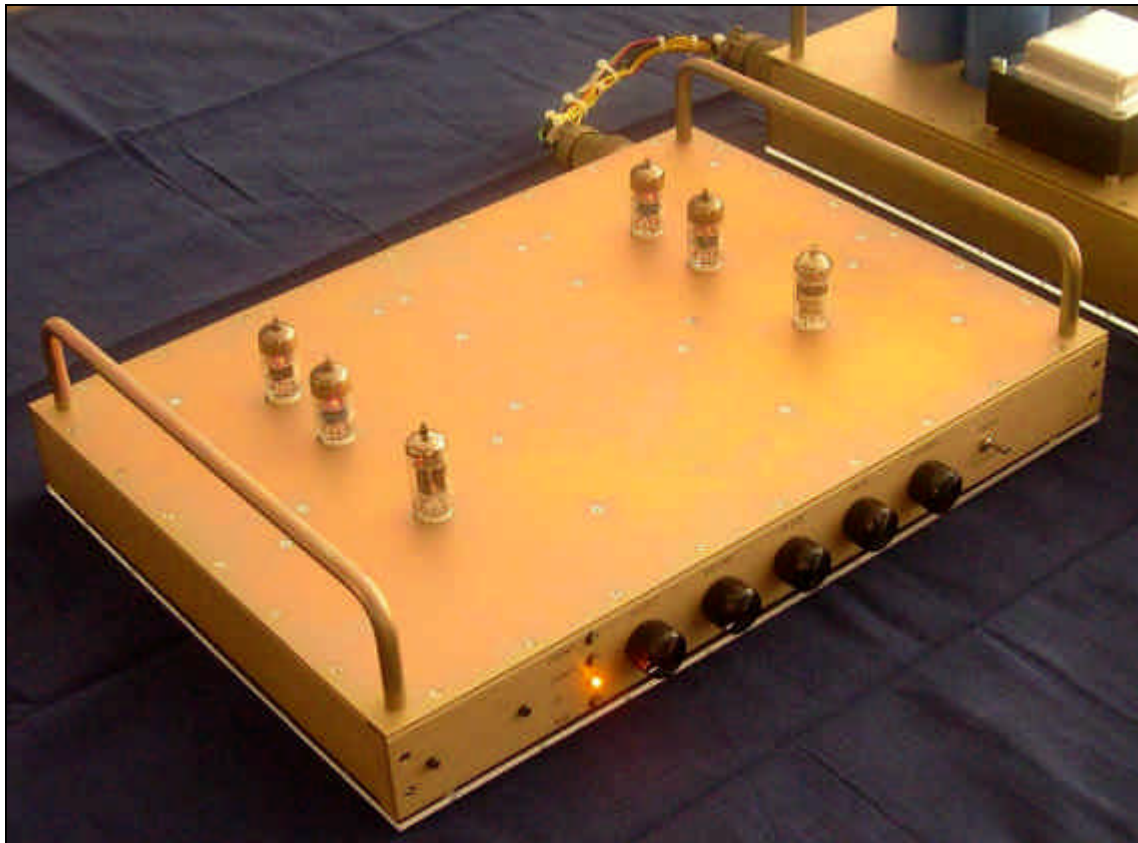
Es wurde entschieden, den ursprünglich als Kombigerät geplanten Verstärker in zwei voneinander getrennte Chassis für Vor- und Endstufe aufzuteilen, da ein gemeinsames Chassis unhandliche Ausmaße angenommen hätte. Die Vorstufe wird jedoch vom Netzteil der Endstufe versorgt, ein Konzept das bereits in den 50-er Jahren allgemein üblich war und die Überkopplungen von Netzbrumm und netzgebundenen Störungen in die empfindliche Vorstufe minimiert. Die Endstufe kann auch ohne Vorstufe, als Stand-alone-Gerät eingesetzt werden, da der von der Vorstufe abgegebene Signalpegel in etwa dem Ausgangssignal eines typischen CD-Players (1V eff bei Vollaussteuerung) entspricht.



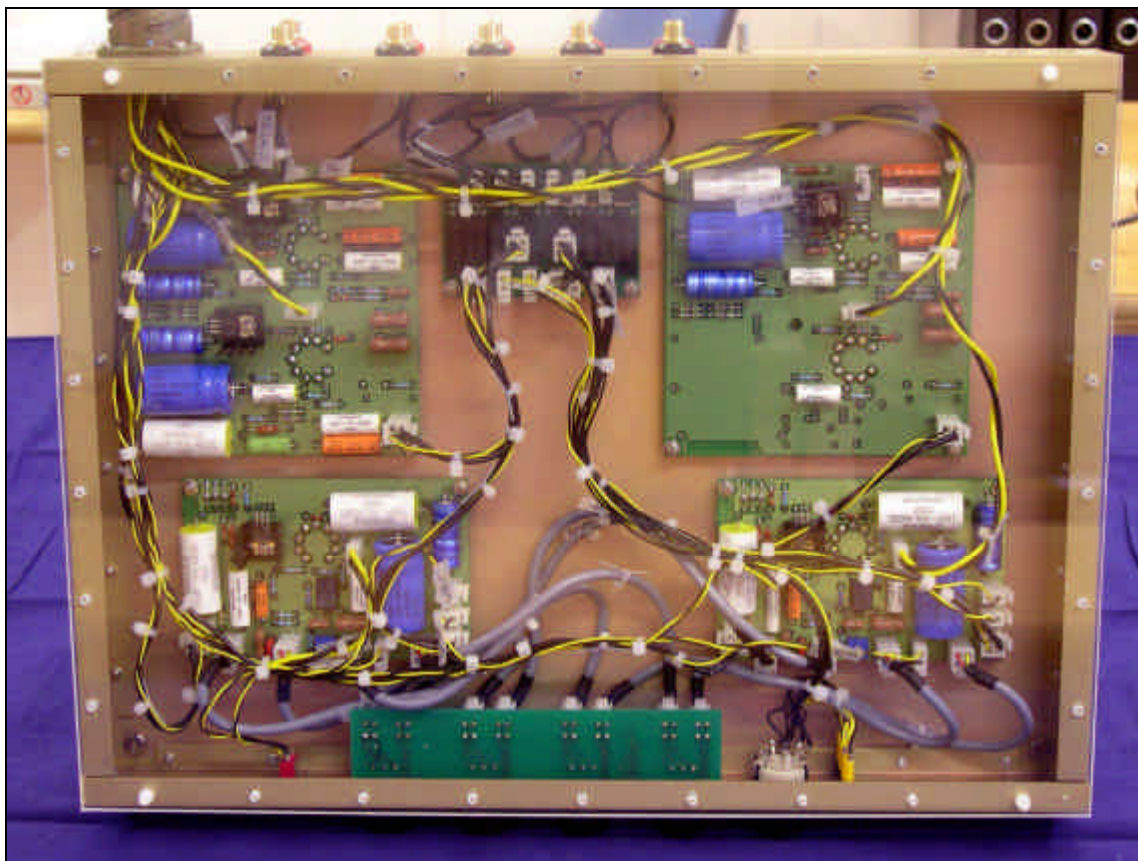
Ansicht des Endstufenchassis von oben



Ansicht des Endstufenchassis von unten



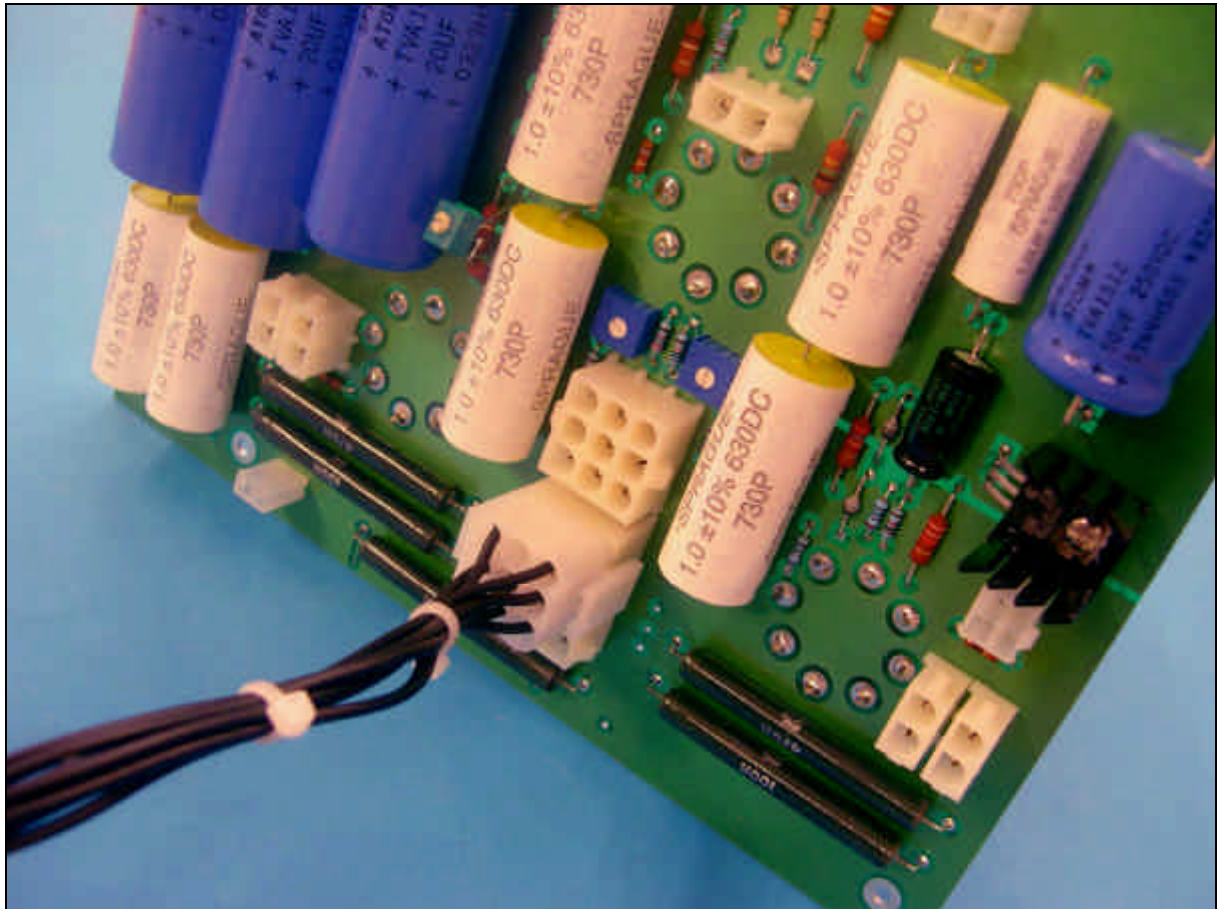
Ansicht des Vorstufenchassis von oben



Ansicht des Vorstufenchassis von unten

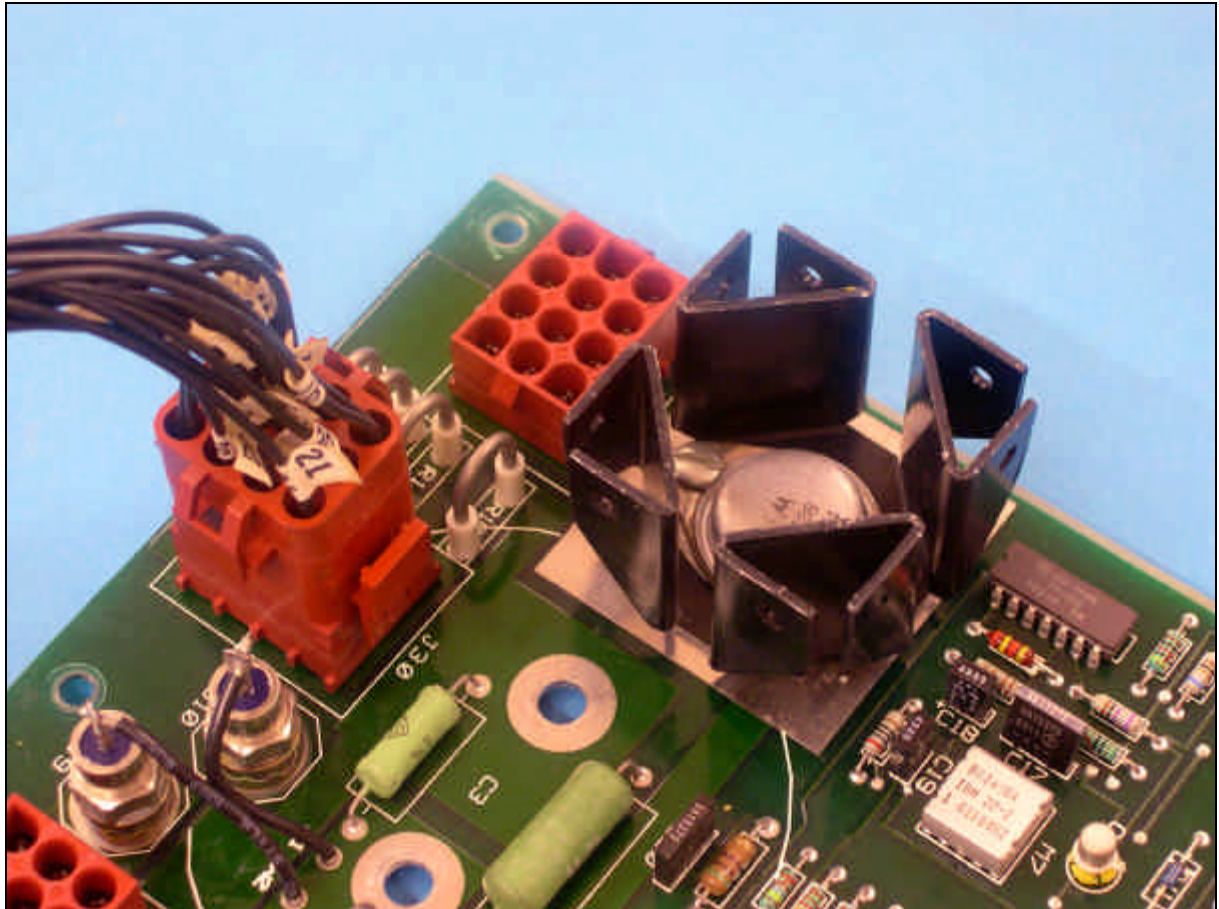
Effiziente Verdrahtung durch steckbare und vorgefertigte Kabelbäume

Die Verbindungen zwischen den Leiterplatten wurden durch vormontierte und vorgeprüfte Kabelbäume vorgenommen. Hierbei kamen Steckverbinder mit ausreichender Spannungs- und Strombelastbarkeit zum Einsatz, aus der Serie Mate-N-Lok von AMP und aus der Serie Mini-Fit von Molex. Die verwendeten Steckverbinder sind verpolungssicher.

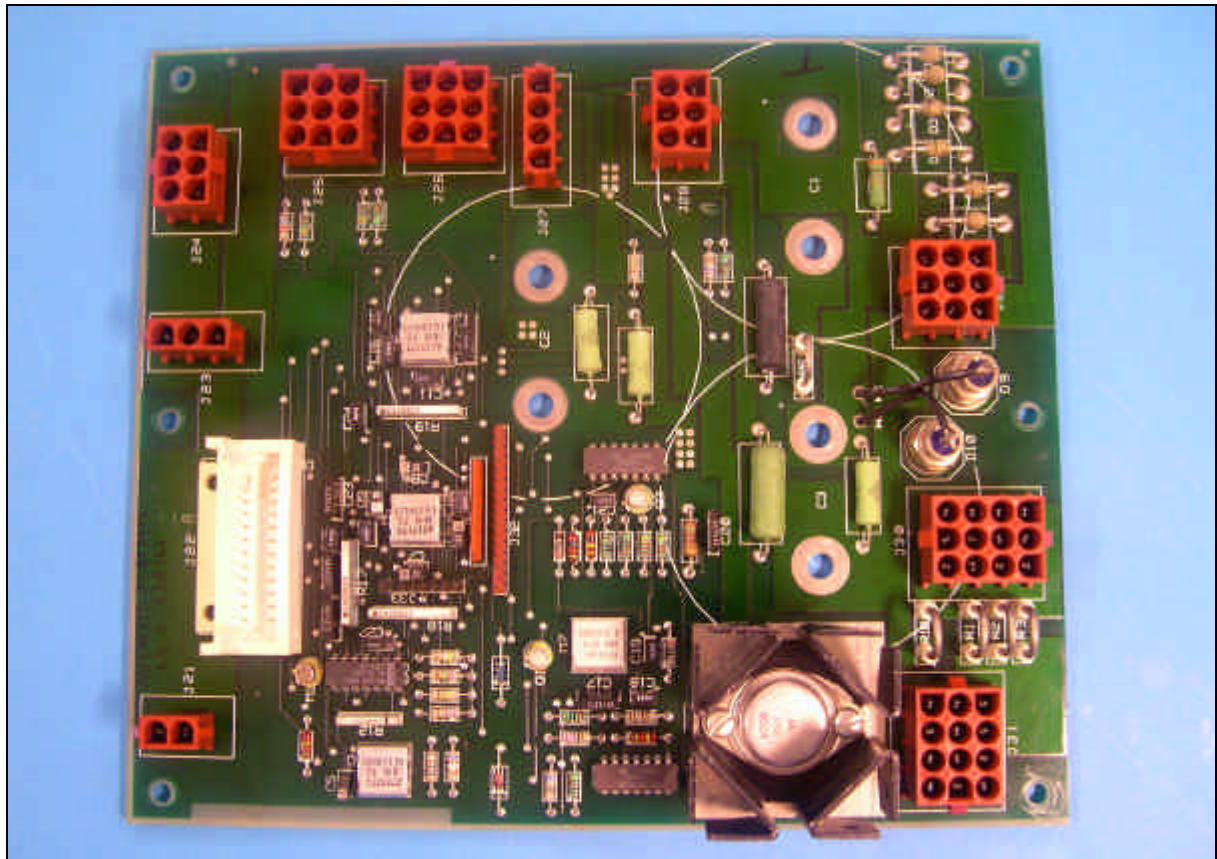


Anschluß des Ausgangsübertragers über Kabelbaum und Mate-N-Lok Steckverbinder

Als Vorbild dienten hierbei unter anderem die konsequent in Kabelbaumtechnik ausgeführten Verdrahtungen in den IBM-Großcomputern der 80-er Jahre:



Baugruppe aus dem Netzteil eines IBM-Großcomputers aus den 80-er Jahren mit angeschlossenem Kabelbaum



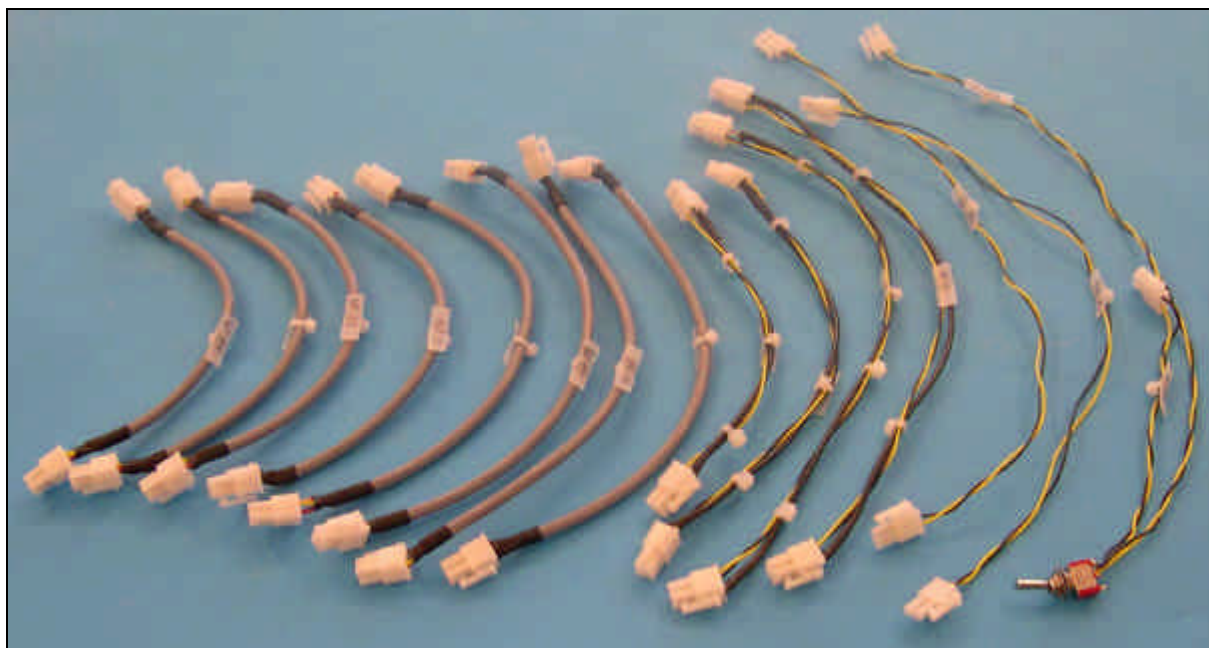
Die Gesamtansicht der Baugruppe zeigt die konsequente Anwendung des Kabelbaumprinzips, es gibt nur steckbare Verbindungen zwischen der Baugruppe und ihrer Außenwelt.

Die Verwendung vorgefertigter Kabelbäume brachte erhebliche Vorteile:

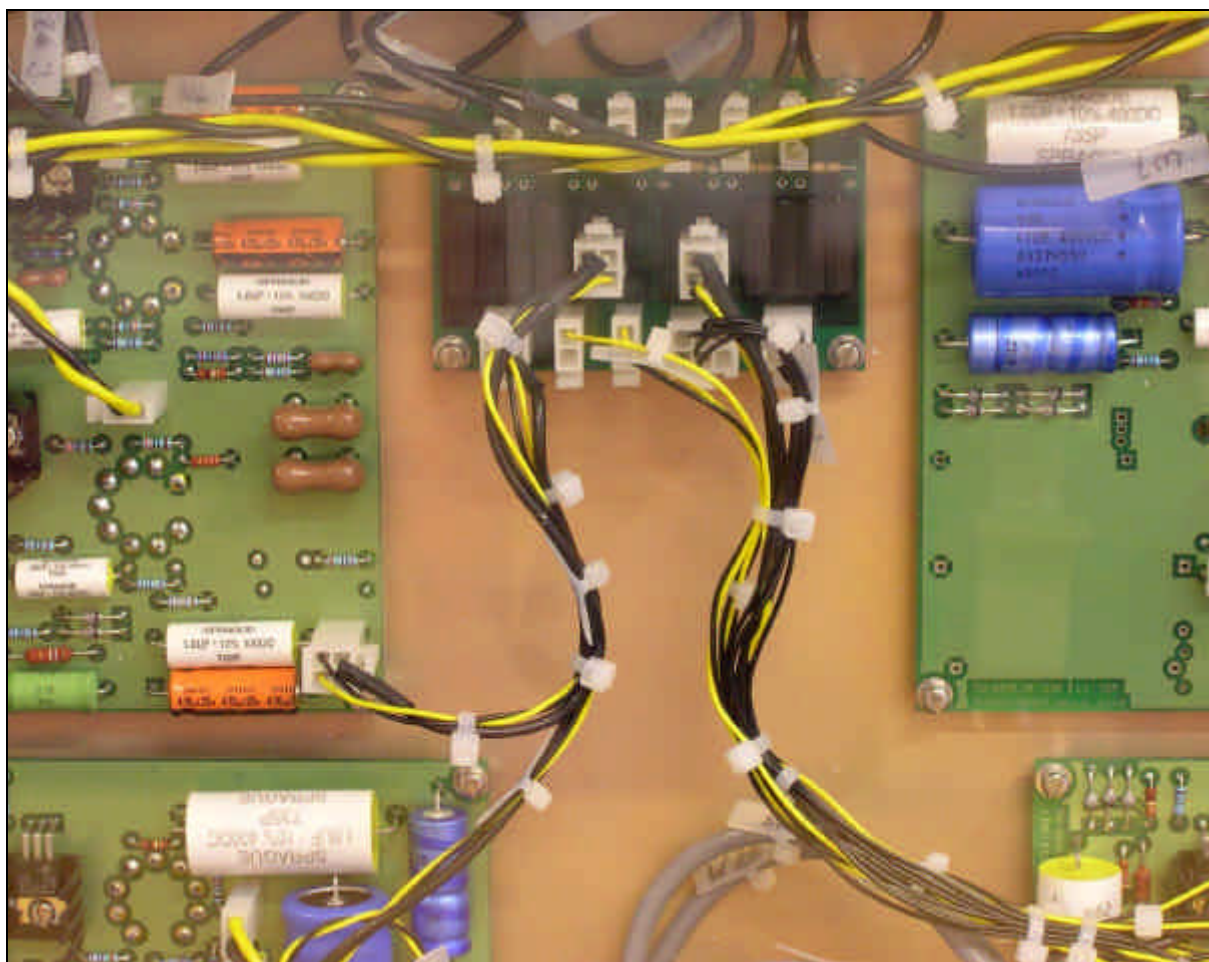
- Es konnte eine erhebliche Zeitersparnis bei der Endmontage erzielt werden, beide Chassis waren nach nur etwa 20 Stunden Arbeitszeit montiert und erfolgreich in Betrieb genommen.
- Die Kabelbäume konnten zeitparallel zum Chassis gefertigt werden.
- Da die Kabelbäume bereits vorgeprüft wurden, war das Risiko von Zerstörungen durch Fehlverdrahtung bei der Inbetriebnahme deutlich verringert
- Die Kennzeichnung der Kabelbäume verhinderte Fehlmontagen

Mit Hilfe dieser Technik war es möglich, den Verstärker pünktlich zum Semesterende Mitte Juli 2004 fertigzustellen, obwohl hierfür nur ein recht enger Zeitrahmen zu Verfügung stand:

Mit dem Entwurf der Endstufenschaltungen wurde zu Beginn der vorlesungsfreien Zeit, im Februar 2004 begonnen. Im April 2004 lagen die Leiterplatten vor. Ende Mai war die Inbetriebnahme aller Leiterplatten erfolgreich abgeschlossen. Im Mai wurde zeitparallel dazu das Chassis konstruiert, dessen Zeichnungssatz dann, auf den Tag genau dem Terminplan entsprechend, am 1. Juni, der Mechanikfirma übergeben wurde. Während die Mechanikfirma an dem Chassis arbeitete, wurden zeitparallel dazu die Kabelbäume entworfen, gefertigt und geprüft, es wurde zudem ein detaillierter Montageplan erstellt. Zum letzten Juniwochenende standen dann (eine Woche vor vereinbartem Liefertermin) Chassis und Kabelbäume zur Verfügung, an diesem Wochenende wurde der Verstärker dann auch bereits fertiggestellt. Es zeigten sich dann noch Probleme im Zusammenspiel von Vor- und Endstufe, die dann am ersten Juliwochenende gelöst werden konnten. Das letzte, uns dann noch vom Vorführtermin trennende, Reservewochenende mußte glücklicherweise nicht mehr genutzt werden.

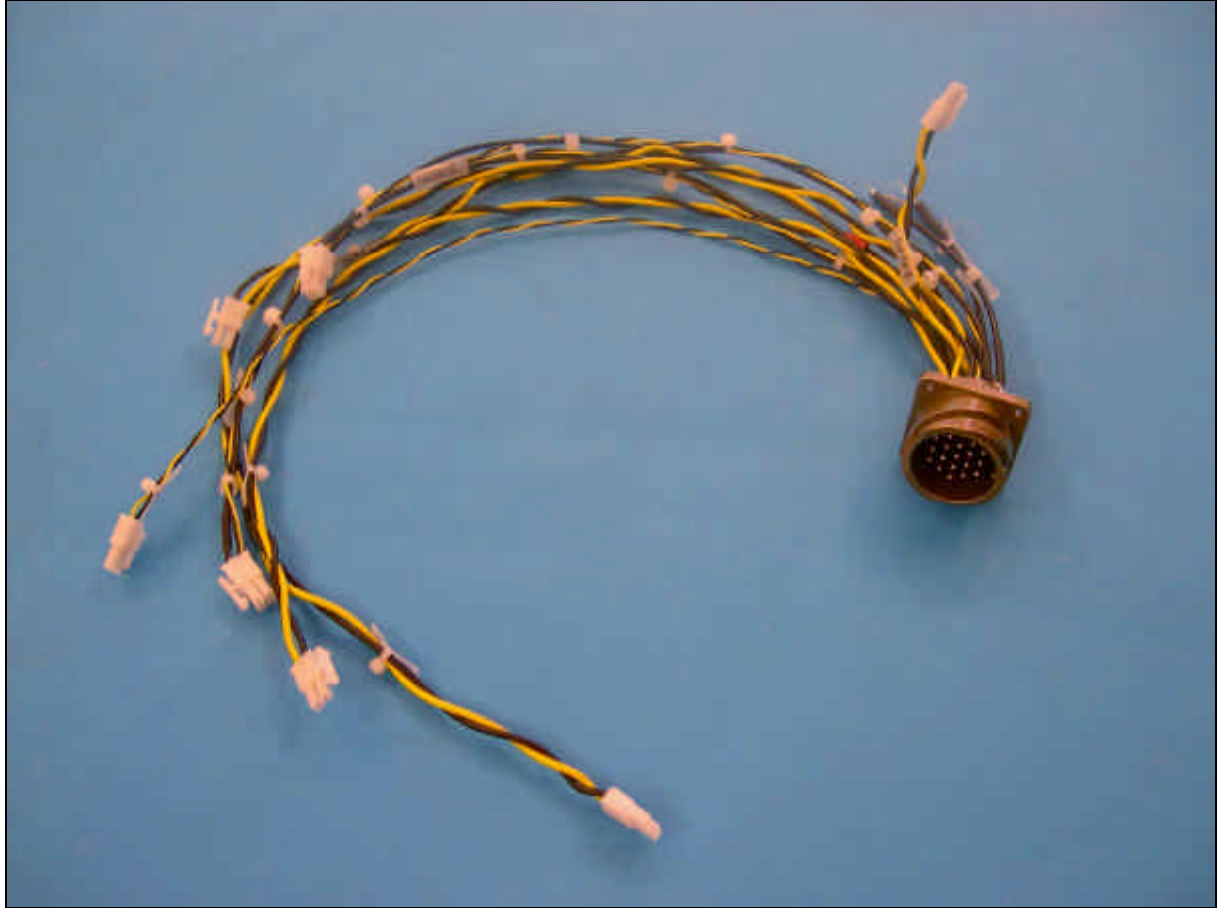


Vorgefertigte Kabelbäume vor der Montage

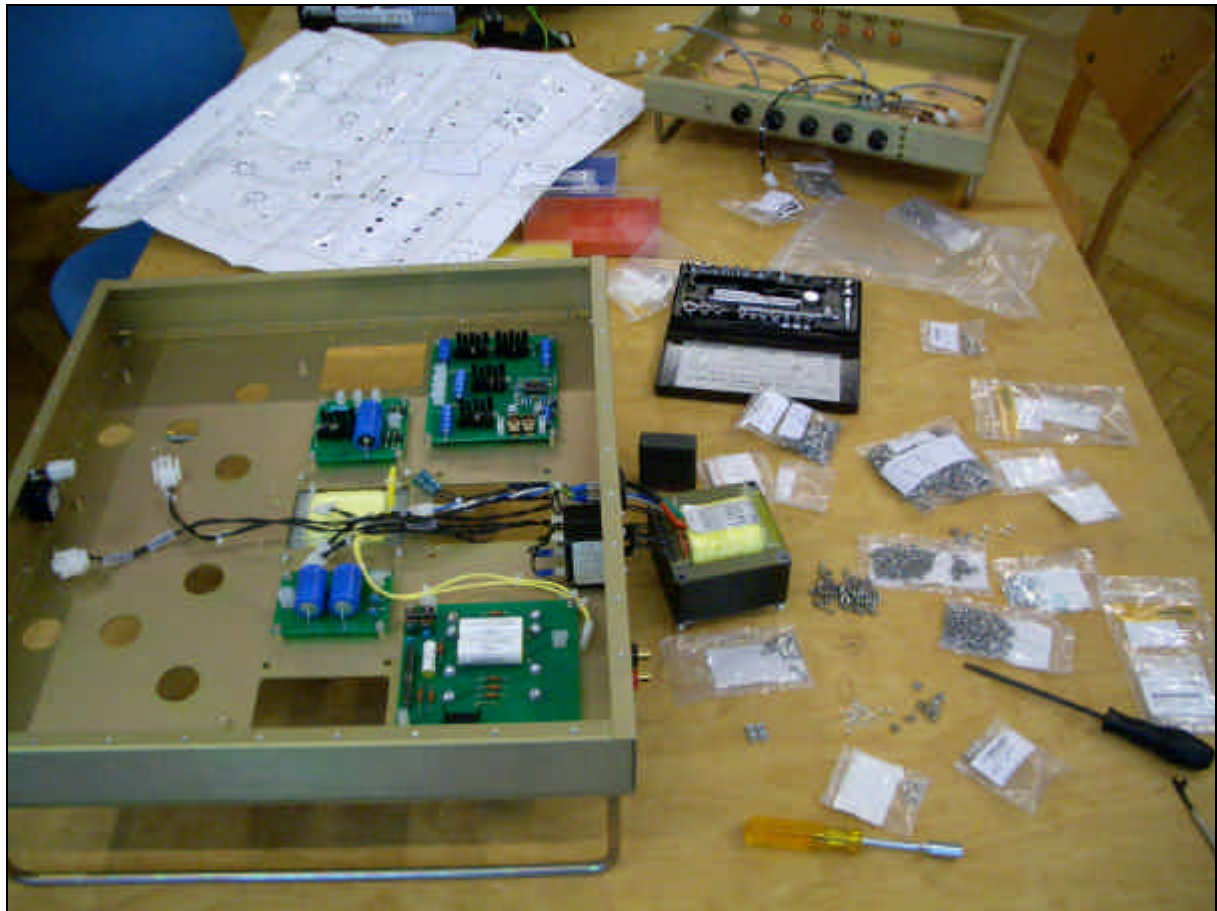


Ein Teil der in der obigen Abbildung zu sehenden Kabelbäume, fertig eingebaut im Vorverstärker-Chassis.

Das folgende Bild zeigt, daß durchaus auch komplexere Verdrahtungsstrukturen bei entsprechend sorgfältiger Planung vorgefertigt werden können:



Vorgefertigter Kabelbaum mit komplexerer Struktur



Teilmontierte Chassis

Konstruktive Details

Risikominimierung

Die Chassis stellten die zeitlich und kostenmäßig kritischsten Bauteile des Projekts dar. Da sie von Hand als Einzelanfertigung gebaut wurden, kosteten beide Chassis zusammen ca. 2.700 EUR. Die typische Lieferzeit für solche Einzelanfertigungen liegt bei 4 bis 6 Wochen. Nachträgliche Änderungen an den Chassis sind praktisch nicht mehr möglich, da diese direkt sichtbar sind und das gewünschte, hochwertige Erscheinungsbild des Verstärkers zerstören würden.

Die Chassis benötigen also einen großen Teil der Projektlaufzeit zu ihrer Fertigstellung, benötigen den größten Teil des Projektetats und können nachträglich nicht mehr modifiziert werden. Ein Totalverlust der Chassis durch sich nachträglich ergebende Änderungsnotwendigkeiten hätte dieses Projekt sowohl terminlich als auch finanziell zum Scheitern gebracht.

Daher wurden, schon weit im Vorfeld der Konstruktionsphase beginnende, vielfältige Maßnahmen ergriffen, um das Risiko eines Totalverlusts zu minimieren:

- Die Chassiskonstruktion wurde erst nach erfolgreichem Test aller Einzelkomponenten begonnen. Damit konnte das Risiko von nachträglich hinzukommenden großen Bauelementen oder der Veränderung der Abmessungen von direkt am Chassis montierten Bauelementen praktisch eliminiert werden.
- Die Chassis wurden nicht aus einem Stück, sondern aus Einzelteilen gefertigt. Damit besteht die Möglichkeit, einzelne Bauteile, wie etwa die besonders fehleranfällige Montageplatte, verändert nachzufertigen und nachträglich auszutauschen. Die Einzelteile wurden mit einer Vielzahl von Schrauben miteinander verbunden, um diese auch für Hochfrequenz flächig und niederimpedant miteinander zu verbinden. Bei der Konstruktion wurde darauf geachtet, daß die Montageplatte, bei der die Fehlerwahrscheinlichkeit am höchsten ist, rein zweidimensional ist und sich die Notwendigkeit von Biege- und Einpressarbeiten auf die relativ kleinen und einfachen Seitenteile beschränkt.
- Die fertiggestellten Konstruktionszeichnungen wurden von einer Person, die nicht am Entwurf beteiligt war, mit äußerster Gründlichkeit geprüft. Hierbei wurde auch eine „Probemontage“ mit den tatsächlichen Komponenten auf einer im Maßstab 1 zu 1 ausgedruckten Konstruktionszeichnung vorgenommen. Hierbei wurden etwa noch 20 Fehler entdeckt.
- Die ausführende Feinmechanikfirma Willi Müller nahm einen weiteren Plausibilitätscheck auf das Zusammenpassen der Einzelteile vor und entdeckte noch einen letzten Fehler

Beide Chassis wurden vorfristig geliefert und waren zu 100% fehlerfrei.

Zugänglichkeit der Komponenten

Für einen Verstärker, der auch als experimentelle Plattform für den Vergleich und die Weiterentwicklung verschiedener Schaltungskonzepte genutzt werden soll, ist die bequeme Zugänglichkeit aller Komponenten für Meßzwecke von entscheidender Bedeutung.

Zu diesem Zweck wurden beide Chassis mit seitlichen Bügeln ausgestattet, die es erlauben, die Geräte „über Kopf“ zu betreiben.



„Über Kopf“-Betrieb des Verstärkers zum bequemen Zugang zu allen Meßpunkten

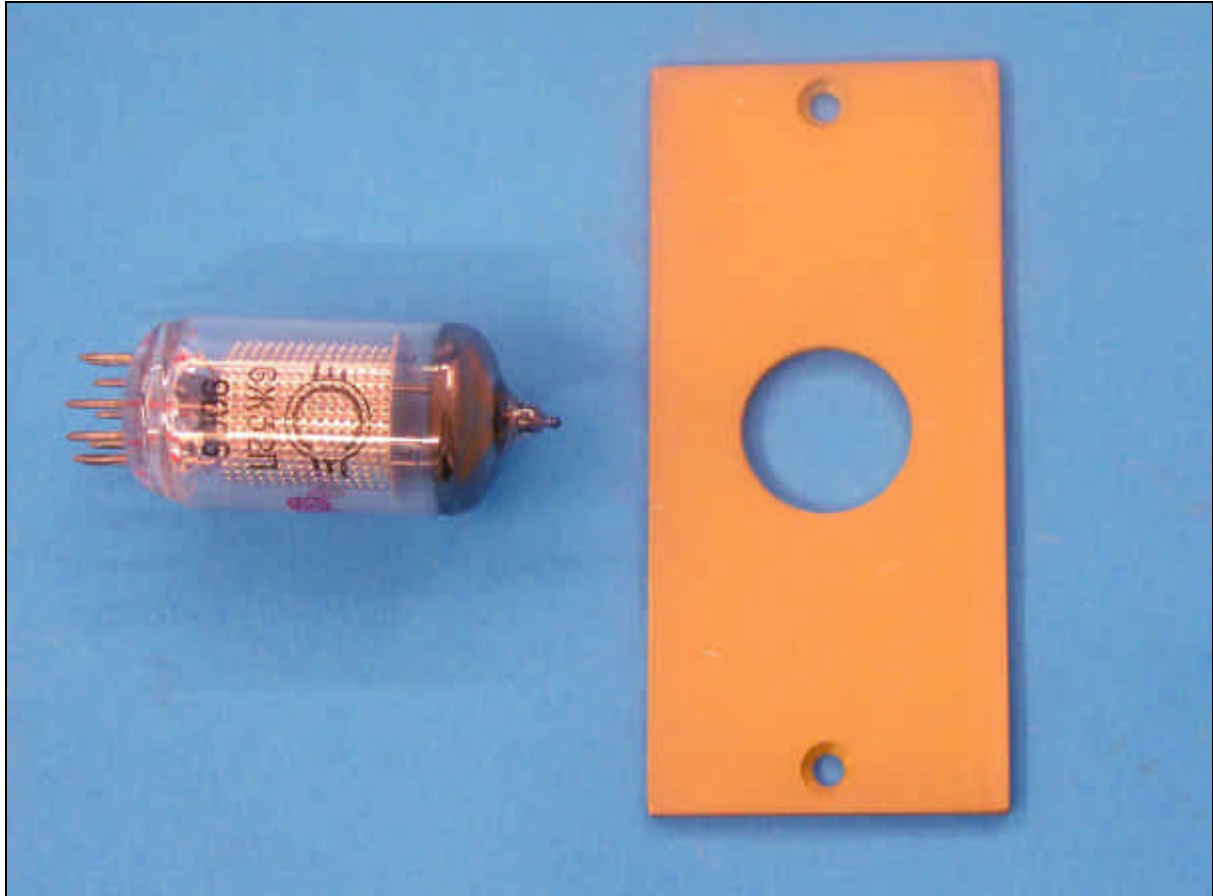
Mechanische Kompatibilität bei unterschiedlichen Röhrenbauformen und Röhrenanzahlen

Für die Eingangs- und Treiberröhren der verschiedenen Endstufen wurden sowohl Novalröhren der Serie ECC8.. als auch ältere und größere Oktalröhren der Serie 6SN... eingesetzt. Um hier mechanische Kompatibilität zu erreichen, wurde wie folgt vorgegangen:

Im Chassis wird die (größere der beiden) Bohrungen für die Bauform „Oktal“ vorgesehen. Wenn eine Röhre der Serie „Noval“ verwendet wird, wird auf der Leiterplatte eine entsprechende Blende montiert. Diese Blende ist aus dem gleichen Material wie das Chassis hergestellt und fällt daher erst bei genuem Hinsehen auf:

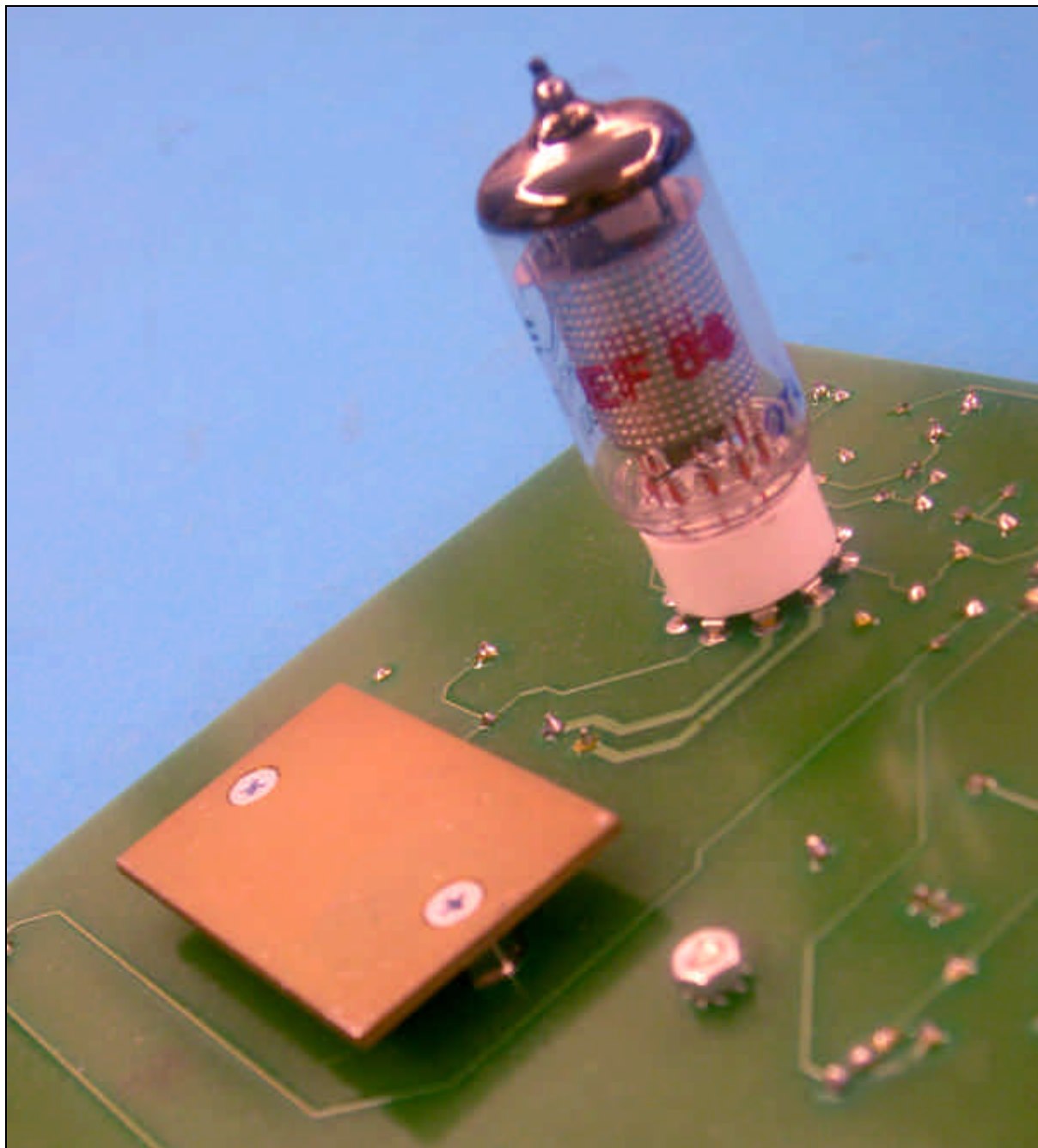


Novalröhre mit Sichtblende im montiertem Zustand



Sichtblende im noch unmontiertem Zustand

Sichtblenden wurden auch verwendet, um bei einer Version des Phono-Vorverstärkers, die nur eine einzige Röhre benötigt, für eine unauffällige Abdeckung der im Chassis vorhandenen Öffnung für die bei anderen Baugruppen benötigte zweite Röhre zu sorgen:



Sichtblende zur Abdeckung der Montagefläche einer nicht vorhandenen Röhre

Durchsichtige Bodenplatten

Im Laufe des Testbetriebs zeigte es sich, daß die Kombination der Abschirmwirkung der Montageplatte des Chassis und der durchgehenden Masseflächen auf den Leiterplatten bereits für eine vollständige Abschirmung des Verstärkers ausreichte. Dies eröffnete die Möglichkeit, anstelle der ursprünglich vorgesehenen Bodenplatten aus Aluminium durchsichtige Bodenplatten aus Plexiglas zu verwenden. Es zeigte sich überraschenderweise, daß die Möglichkeit des Einblicks in das Verstärkerinnere auch bei sehr vielen „Nichttechnikern“ große Begeisterung auslöste.

Signalquellenanzeige

Die Umschaltung der Signalquellen erfolgt nicht direkt mit dem frontseitig angebrachten Stufenschalter, sondern mit einem aus Reedrelais aufgebautem Multiplexer, der sich in der Nachbarschaft der Eingangsbuchsen befindet. Damit wird eine für die Einkopplung von Störungen anfällige, sowie aufwendig zu fertigende und sperrige, platzraubende und durch das gesamte Gerät führende Verdrahtung der zu schaltenden Signale mit abgeschirmtem Kabel vermieden. Der Stufenschalter schaltet nur die Spulenspannung der Reedrelais um.

Es wäre zunächst naheliegend gewesen, die Frontplatte so gravieren zu lassen, daß man neben dem Schalter eine Art Skala anordnet, die dann entsprechend dem Schaltwinkel positioniert, die Abkürzung der gewählten Signalquelle zeigt. Angesichts der Terminknappheit schien uns diese Vorgehensweise zu fehleranfällig und damit zu riskant, denn eine Gravierung ist irreversibel. Wenn die tatsächlichen Schaltwinkel des Schalters und die Skala nichtzusammengepaßt hätten, hätte die gesamte Frontpartie noch einmal gefertigt, oberflächenbehandelt und erneut graviert werden müssen. Dann wäre der geplante Fertigstellungstermin um ca. 4 Wochen verfehlt worden.

Daher wurde auf eine „fehlertolerante“ indirekte Schaltzustandsanzeige mit LEDs zurückgegriffen, die parallel zu den Spulen der Relais des Signalmultiplexers geschaltet wurden. Hierfür wurden hochwertige LED-Module mit bereits integriertem Vorwiderstand ausgesucht, deren Erscheinungsbild sich dank schwarz und glänzend chromatierter Aluminiumeinfassung sehr gut in das gewünschte Design des Verstärkers einfügt.



Indirekte Anzeige der gewählten Signalquelle mit LEDs

Signalqualität im Lautsprecherkreis

Schon beim Probetrieb der Endstufen stellte sich heraus, daß bereits kleinste Übergangswiderstände im Lautsprecherkreis dem Klangbild jede Brillanz und die Räumlichkeit nehmen. Ein versuchsweise eingefügter 100mOhm-Widerstand zerstörte den Klangeindruck vollständig. Als sehr störanfällig erweis sich auch die für Lautsprecherboxen übliche Anschlußtechnik durch Klemmung. Ein Herausnehmen und Wiedereinsetzen des Lautsprecherkabels in die Klemmen führte oft zu einer drastischen Veränderung des Klangeindrucks.

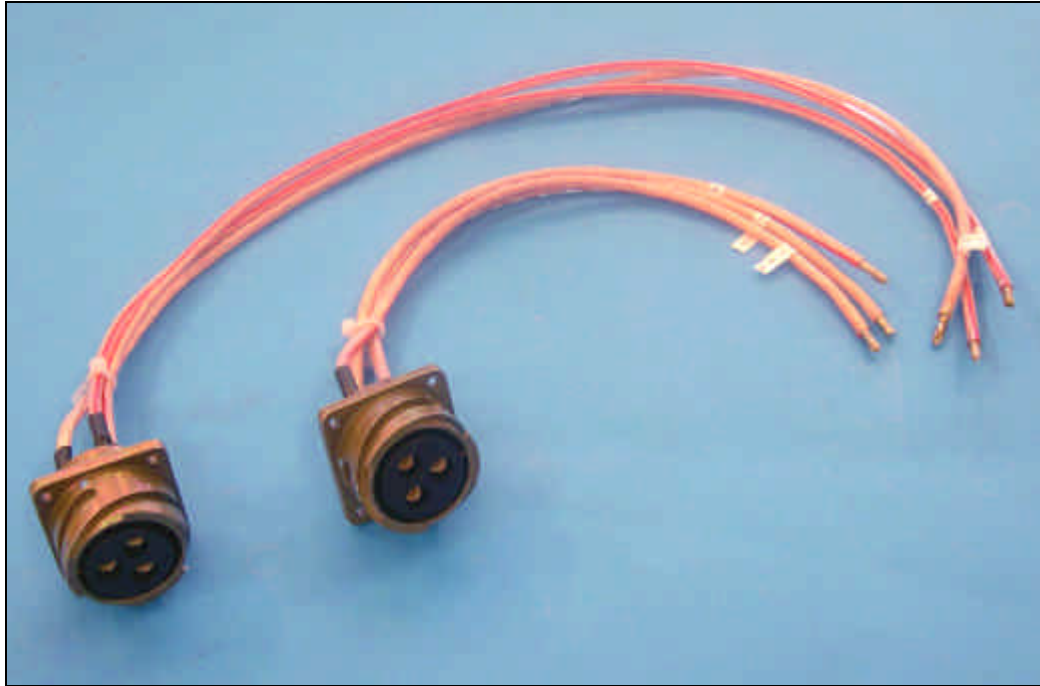
Diese Beobachtungen verwundern zunächst, wenn man die Dicke eines üblichen Lautsprecherkabels mit dem dazu vergleichsweise dünnen Draht der Sekundärwicklung des Ausgangsübertragers vergleicht. Man muß jedoch bedenken, daß die Wirkung des ohmschen Widerstands dieser Wicklung zu einem guten Teil durch die Gegenkopplung kompensiert wird und daß diese Kompensation für den restlichen Lautsprecherkreis jedoch nicht wirksam ist.

Daher wurden die Klemmen durch spezielle Steckverbinder aus dem Militär/Luftfahrtbereich ersetzt, die sehr großflächige und massive Kontakte haben, an die das übliche Lautsprecherkabel trotz seiner großen Dicke direkt angelötet werden kann. Es wird von den großen Lötkelchen der Kontakte problemlos aufgenommen.



Spezialsteckverbinder für den Lautsprecheranschluß

Ein weiterer Vorteil der verwendeten Steckverbinder ist deren sichere Verriegelung mit einem Bayonettverschluß. Damit wird ein versehentliches Lösen der Lautsprecherverbindung ausgeschlossen, das bei Röhrengeräten zur Zerstörung der Endstufen führen kann.



Spezialsteckverbinder für den Lautsprecheranschluß mit direkt angelötetem Lautsprecherkabel, vor der Montage.

Die dreipolige Ausführung der Steckverbinder erlaubt es, sowohl 8 Ohm- als auch 4 Ohm-Lautsprecher an den Verstärker anzuschließen. Nicht zuletzt demonstriert die Verwendung dieses optisch auffälligen, sich aber gut in das Gesamtbild der Konstruktion einfügenden, Steckertyps dem fachkundigen Betrachter die Hochwertigkeit und den technischen Anspruch unseres Verstärkers.

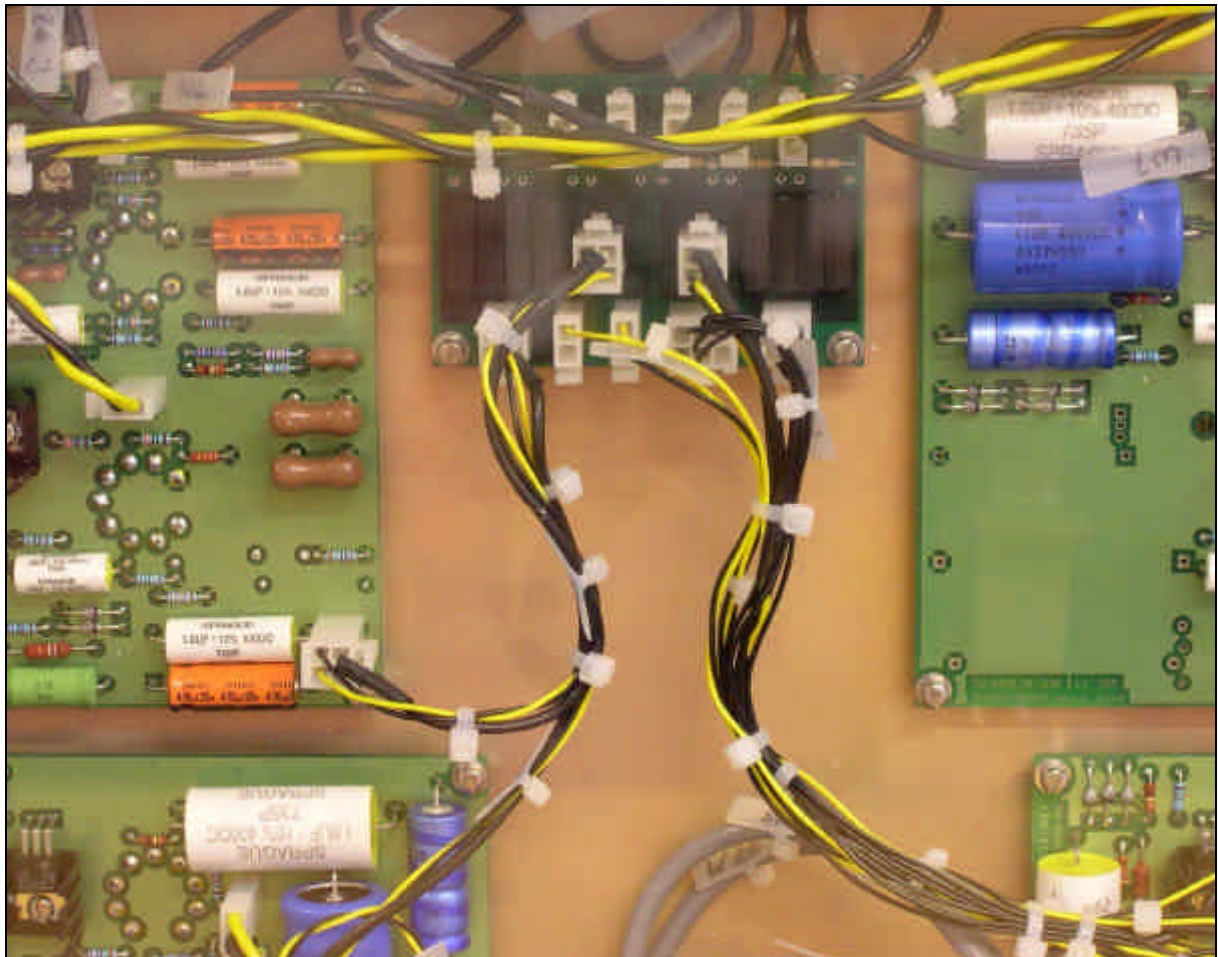


Gegenstecker mitangeschlossenem Lautsprecherkabel

Signalqualität in den Vorverstärkerstufen

Die Gewährleistung einer guten Signalqualität in den Vorstufen bedurfte der besonderen Aufmerksamkeit und Planung, da hier zum Teil Audio-Signalpegel im einstelligen mV-Bereich zu verarbeiten sind. Störspannungen im einstelligen μ V-Bereich führen daher bereits zur Beeinträchtigung des Hörerlebnisses.

An erster Stelle wurde auf eine allseitige Abschirmung aller Verbindungen geachtet, die Audiosignale führen. Dies geschieht zum einen durch die Montageplatte des Chassis und zum anderen durch die, bewußt auf der Unterseite der Leiterplatten liegenden, durchgehenden Masseflächen der Leiterplatten. Damit sind die signalführenden Leiterbahnen beidseitig durch geerdete Metallflächen eingeschlossen. Immer dann, wenn Audio-Signale außerhalb von Leiterplatten geführt werden, wurde hierfür hochwertiges, besonders kapazitätsarmes Koaxialkabel verwendet. Die Richtigkeit dieser Gedankengänge wurde dadurch bestätigt, daß die ursprünglich vorgesehene metallene Bodenplatte nicht zu Abschirmzwecken benötigt wird und daher durch eine durchsichtige Plexiglasplatte ersetzt werden konnte, die einen Blick in das Innere des Gerätes freigibt.



Detailansicht der Vorstufe, man erkennt die abschirmenden Masseflächen auf den Leiterplatten und die Verkabelung der Audio-Signalleitungen mit Koaxialkabel.

Die Röhren in der Vorstufenbaugruppe werden mit Gleichspannung geheizt. Das die Vorstufe mitversorgende Netzteil befindet sich in der Endstufenbaugruppe. Damit befinden sich, außer den Audio-Signalkreisen, nur Gleichspannungskreise in der Vorstufenbaugruppe.

Die Masseführung folgt streng dem Signalfuß. Dieses besondere Konzept wurde bereits im Abschlußbericht des Wintersemesters 2003/4 ausführlich beschrieben.

Durch die Kombination dieser Maßnahmen ist selbst bei völliger Stille im Hörraum und auf Maximallautstärke eingestelltem Verstärker kein Brummen oder Rauschen wahrnehmbar.

Interessant und überraschend ist, daß es ausreicht, die Verbindung des Chassis selbst und den Massekreisen des Verstärkers nur in der Endstufenbaugruppe vorzunehmen. In der Vorstufenbaugruppe selbst gibt es keine Verbindung von Chassis und Verstärkermasse. Beide Chassis sind über eine Leitungsader elektrisch miteinander verbunden. Es wäre durchaus zu erwarten gewesen, daß in der Vorstufenbaugruppe eine hochfrequenzmäßige Verbindung von Verstärkermasse und Chassis, über einen Koppelkondensator von z.B. 100pF, notwendig gewesen wäre, um hochfrequente Störungen abzuwehren.

Signalqualität in den Endstufen

Auch wenn man es hier bereits mit Signalpegeln im Voltbereich zu tun hat, ist eine sorgfältige Planung der Anordnung der Komponenten notwendig, um einen störungsfreien Betrieb der Endstufe sicherzustellen.

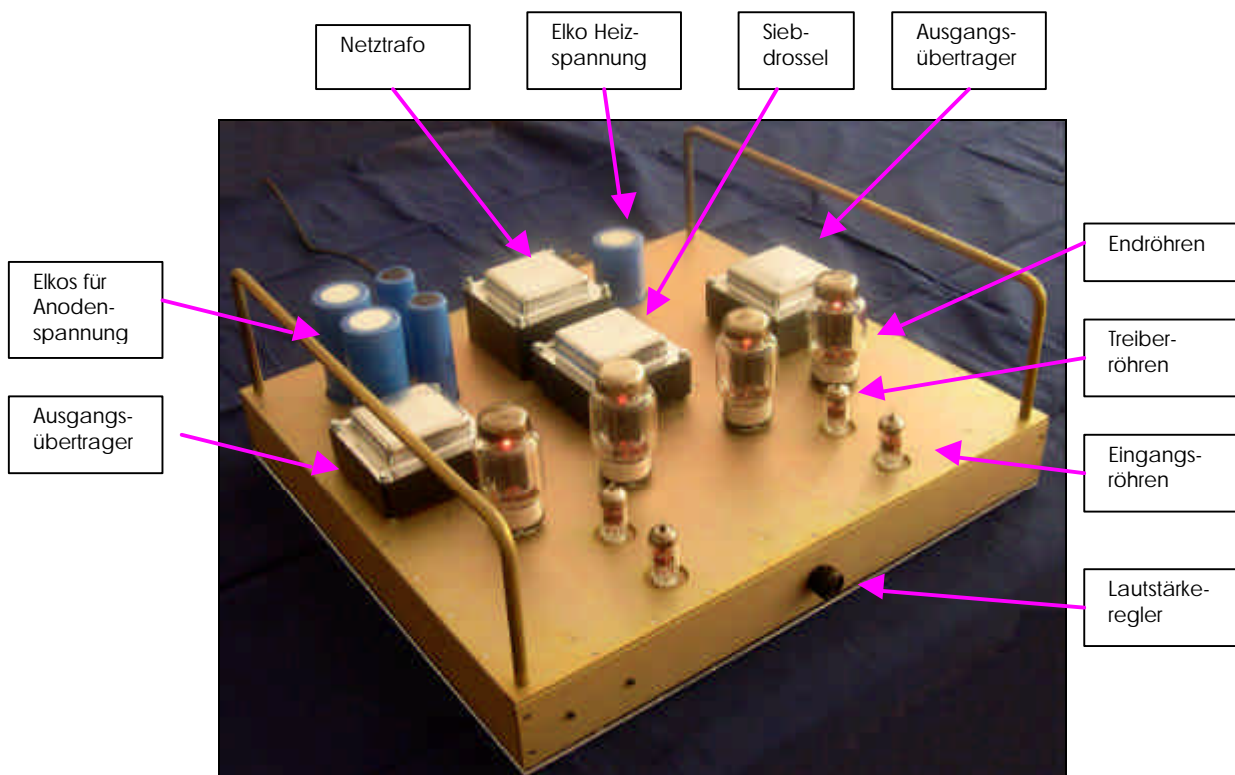
Zunächst ist auf einen möglichst großen Abstand der Ausgangstrafo vom Netztransformator und vom Ausgangstrafo des jeweils anderen Kanals geachtet worden, um jede magnetische Brummeinstreuung sowie ein durch magnetische Kopplung bewirktes Übersprechen zwischen den Kanälen auszuschließen.

Weiterhin wurde auf eine möglichst große Entfernung der Eingangsstufen der Endstufenbaugruppen vom Netztransformator und vom Netzeingang geachtet. Aus diesem Grund wurde der Netzschalter bewußt an der Rückwand des Geräts platziert. Es ist entscheidend, die räumliche Ausdehnung aller Stromkreise, die hohe Wechselspannungen führen, wie die Netzspannung oder auch die höheren Sekundärspannungen des Trafos, so gering wie nur irgend möglich zu halten, um die Abstrahlung dieser Kreise in das Gerät hinein zu begrenzen.

Die Eingangssignale müssen unvermeidlicherweise von der Rückwand des Gerätes aus eingespeist werden. Sie werden mittels hochwertigem, kapazitätsarmen (60 pF/m) Koaxialkabel an den, direkt an der Frontplatte befestigten, Lautstärkereger geführt. Dieser liegt unmittelbar neben den Signaleingängen der Endstufenleiterplatten.

Von diesem Punkt an bis zu den Lautsprecheranschlüssen folgt die Anordnung der Komponenten unmittelbar dem Signalfluß.

Bei der Anordnung der Komponenten wurde auch darauf geachtet, daß die wärmeempfindlichen Elektrolytkondensatoren möglichst weit von den wärmeabstrahlenden Endröhren entfernt sind.



Anordnung der Komponenten auf dem Chassis der Endstufenbaugruppe

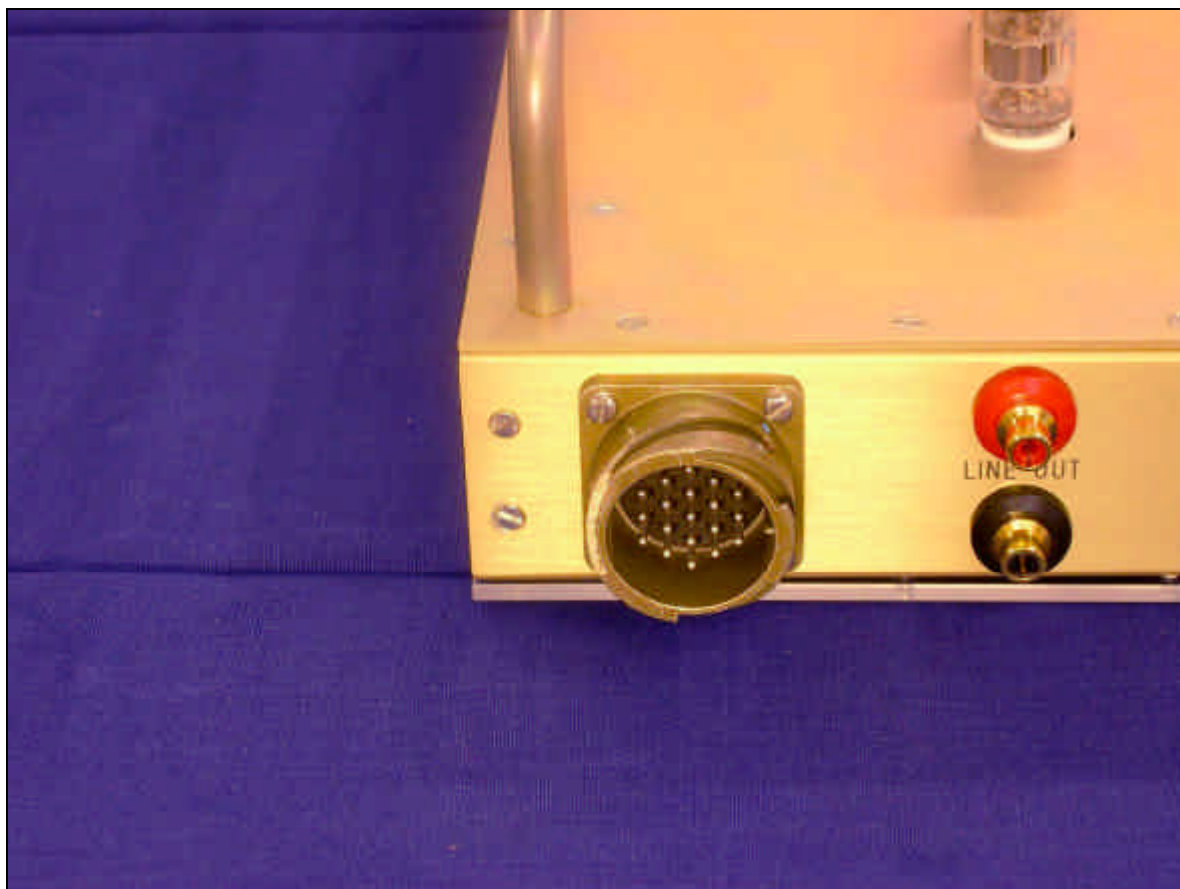
Verbindung von Vor- und Endstufenchassis

Die Verbindung der beiden Chassis erfolgt über ein Multicore-Kabel. Die Auslegung dieser Verbindung mußte sehr genau durchdacht werden, da durch diese bei fehlerhafter Auslegung erhebliche Beeinträchtigungen der Signalqualität möglich sind.

Die Audio-Signale wurden über besonders kapazitätsarmes (60pF/m) Koaxkabel geführt. Die Länge des Kabels wurde zudem auf das unbedingt nötige Minimum reduziert. Wäre das Projekt von Anfang an auf zwei getrennte Chassis hin konzipiert gewesen, dann hätte man den Ausgang der Line-Stufe als Kathodenfolger mit sehr niedrigem Ausgangswiderstand konzipiert. Nun war aber eine übliche Kathodenbasisstufe mit relativ hochohmigen Ausgang vorhanden. Diese Entscheidung konnte zum Zeitpunkt des Erkennens des Problems nicht mehr revidiert werden. Glücklicherweise waren aber erhebliche Verstärkungsreserven in der Line-Stufe vorhanden, die dann dazu genutzt wurden, den Ausgangswiderstand und damit die Zeitkonstante aus Ausgangswiderstand und Kabelkapazität durch Belastung der Stufe mit einem 10 kOhm-Widerstand (in Form des Lautstärkereglers der Endstufenbaugruppe) zu reduzieren. Es wurde eine Grenzfrequenz der Gesamtanordnung von etwa 100 kHz erreicht, nachdem die Kabelkapazität durch Reduzierung der Kabellängen auf das absolute Minimum und den Wechsel zu besonders kapazitätsarmen Kabel reduziert werden konnte)

Außer den Audiosignalen werden nur Gleichspannungen bzw. –Ströme über das Kabel übertragen. Damit ist einer Einkopplung von Störungen in die Audiosignale vorgebeugt.

Der Steckverbinder für diese Verbindung muß sowohl für hohe Spannungen (Anodenspannung bis zu 450V) als auch für hohe Ströme (Heizkreise) ausgelegt sein. Weiterhin ist aus Sicherheitsgründen auch eine voreilende Erdkontaktierung vorteilhaft. Da sich auf der Verbindungsleitung auch lebensgefährliche Spannungen befinden, muß hier ein Steckverbinder gewählt werden, der nicht allgemein gebräuchlich ist, um Personenschäden durch Fehllanschlüsse zu vermeiden. Um alle diese Forderungen zu erfüllen wurde hier ein 19-poliger Spezialsteckverbinder aus dem Militär/Luftfahrtbereich eingesetzt. Auch der Design-Aspekt spielte bei der Auswahl eine Rolle: Die Verwendung dieses optisch auffälligen, sich aber gut in das Gesamtbild der Konstruktion einfügenden, Steckertyps zeigt dem fachkundigen Betrachter die Hochwertigkeit und den technischen Anspruch unseres Verstärkers.



Anschlußbuchsen für das Verbindungskabel an den Vor- und Endstufenbaugruppen. Die selektive Verwendung von Stift- und Buchsenkontakten sichert spannungsführende Anschlüsse vor Berührung.



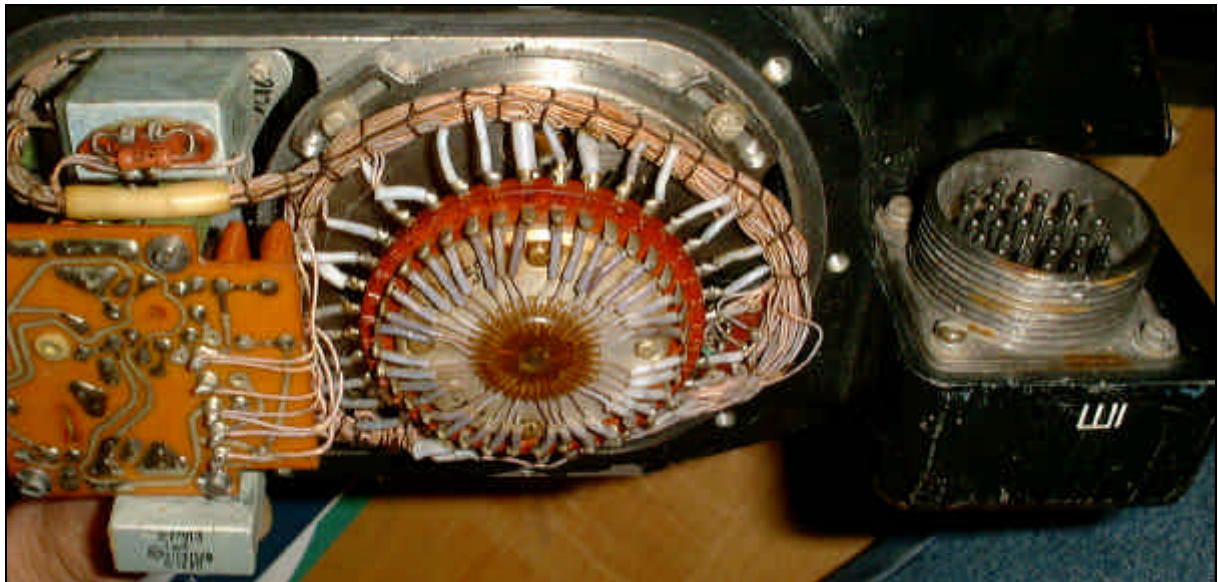
Verbindungskabel zwischen Vor- und Endstufenchassis



Zum Vergleich ein Originalkabel aus einem Airbus-Verkehrsflugzeug, das diese Lösung mit inspiriert hat.

In diesem Zusammenhang ist interessant, daß diese Steckerfamilie (die als „Serie MS“ {= „military standard“} in den 40-er Jahren in den USA entwickelt wurde), ebenso wie einige der in diesem Verstärker verwendeten Röhrentypen, zu den nur ganz wenigen elektronischen Bauteilen gehören, die bereits seit über 60 Jahren (!) unverändert in Serienproduktion gefertigt werden. Das ist absolut ungewöhnlich. Es gibt ansonsten nur ganz wenige andere vergleichsweise langlebige Bauteile, wie z.B. axiale Tantalkondensatoren, die seit Beginn der 60-er Jahre unverändert gefertigt werden. Hier macht der Vergleich mit der Produktlebensdauer heutiger Schaltkreise von oft nur wenigen Jahren doch etwas nachdenklich.

Die absolut robuste und zuverlässige Konstruktion der „Serie MS“ wurde im Laufe der Jahrzehnte vielfach variiert und weiterentwickelt. Sie wurde sogar vom „Erzfeind“ Sowjetunion für deren Waffensysteme unverändert übernommen, wie man anhand des vielfach in den Wendejahren herumliegenden sowjetischen Waffenschrotts häufig feststellen konnte. Die sich jahrzehntelang im Rahmen des „kalten Krieges“ gegenüberstehenden Waffensysteme, deren Entfesselung unsere Welt in den Abgrund geführt hätte, waren also tröstlicherweise wenigstens direkt miteinander steckkompatibel.



Nachbau eines „Serie MS“-Steckverbinders im Navigationskopf einer russischen Rakete, die zu unser aller Glück, nie zum Einsatz gekommen ist.

Es ist so gesehen eine erfreuliche, fast nicht zu erwarten gewesene Entwicklung, die es uns heute erlaubt, eine Technik, die zu ganz anderer Zeit zu ganz anderen Zwecken entwickelt wurde, nun für so harmlose und nebensächliche Dinge wie die Suche nach dem perfekten Musikgenuß einzusetzen. Diese Betrachtung gilt gleichermaßen und unabgeschwächt für die meisten unserer Halbleiter und Röhren, auch wenn man diesen ihren ursprünglich vorgesehenen Verwendungszweck nicht so unmittelbar ansieht. Ein wenig bekanntes, aber spektakuläres Beispiel: Die in vielen Fender-Gitarrenverstärkern eingesetzte und damit von vielen tausenden Musikern über Jahrzehnte benutzte Endröhre 5881 / 6L6VGB war ursprünglich eine besonders robuste Spezialentwicklung für die Servoantriebe des B-52-Bombers.