

# Layouterstellung und Layoutprogramm

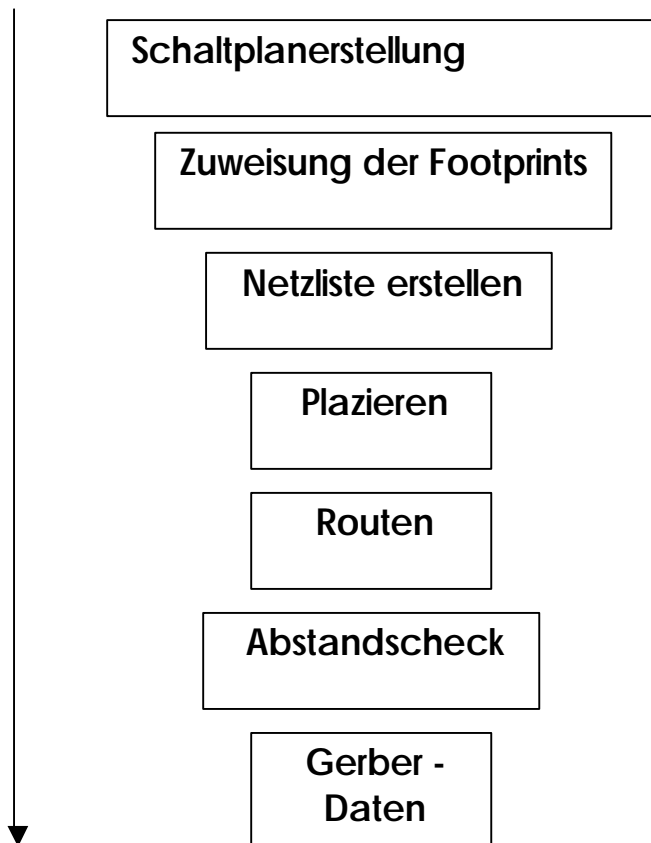
Von Daniel Tomecki

## **Allgemeines:**

Zur Erstellung der Schaltpläne und der Layouts für unseren Verstärker haben wir das Programmpaket ORCAD verwendet. Die Schaltplaneingabe erfolgte mit dem Programm ORCAD-Capture, die Layouterstellung wurde mit „ORCAD-Layout“ vorgenommen. Abschließend wurden die mit „ORCAD Layout“ generierten Fabrikationsdaten für die Leiterplatten, die sogenannten „Gerber-Daten“ per E-Mail an den Leiterplattenhersteller Würth-Elektronik übergeben, der dann die Leiterplatten nach diesen Daten anfertigte.

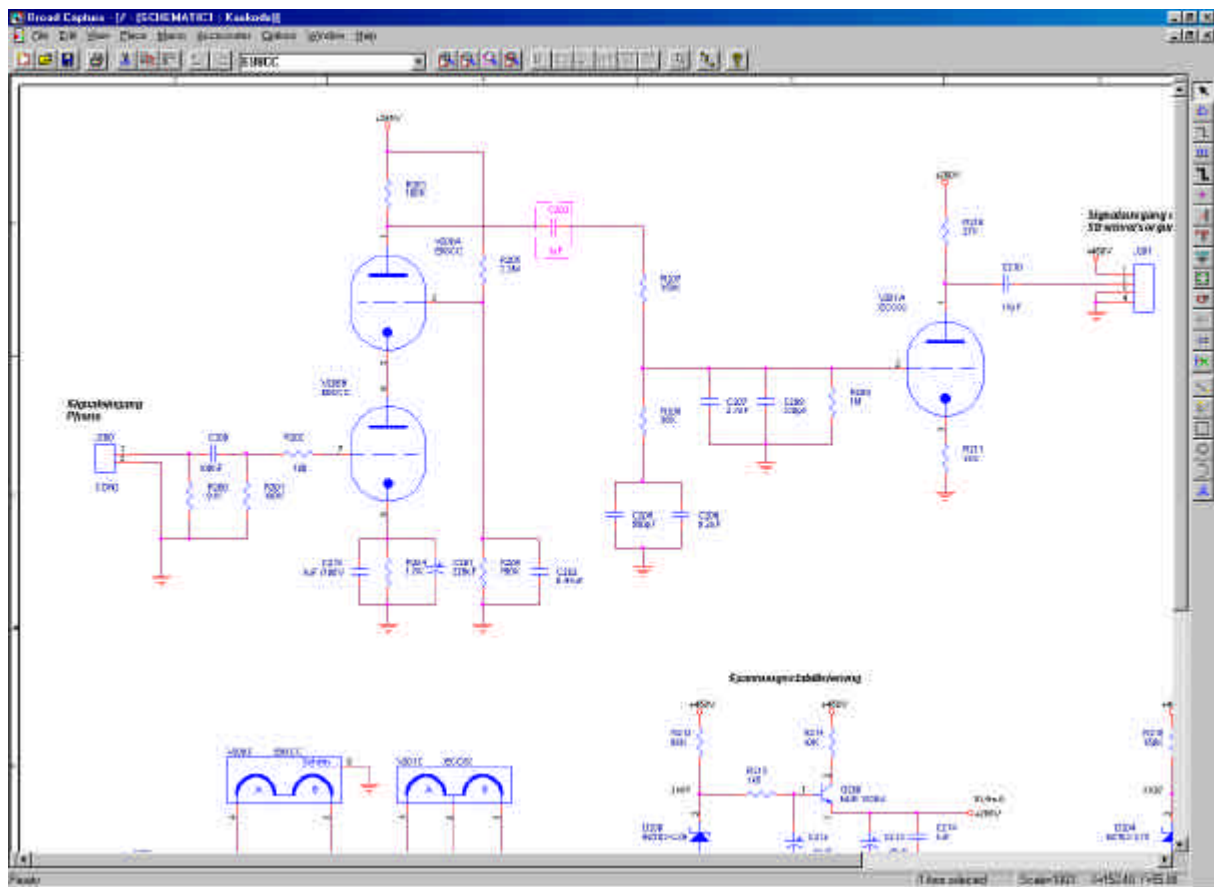
## **Vorgehensweise bei unserem Projekt:**

Im folgenden wird die von uns bei diesem Projekt angewendete Vorgehensweise beschrieben:

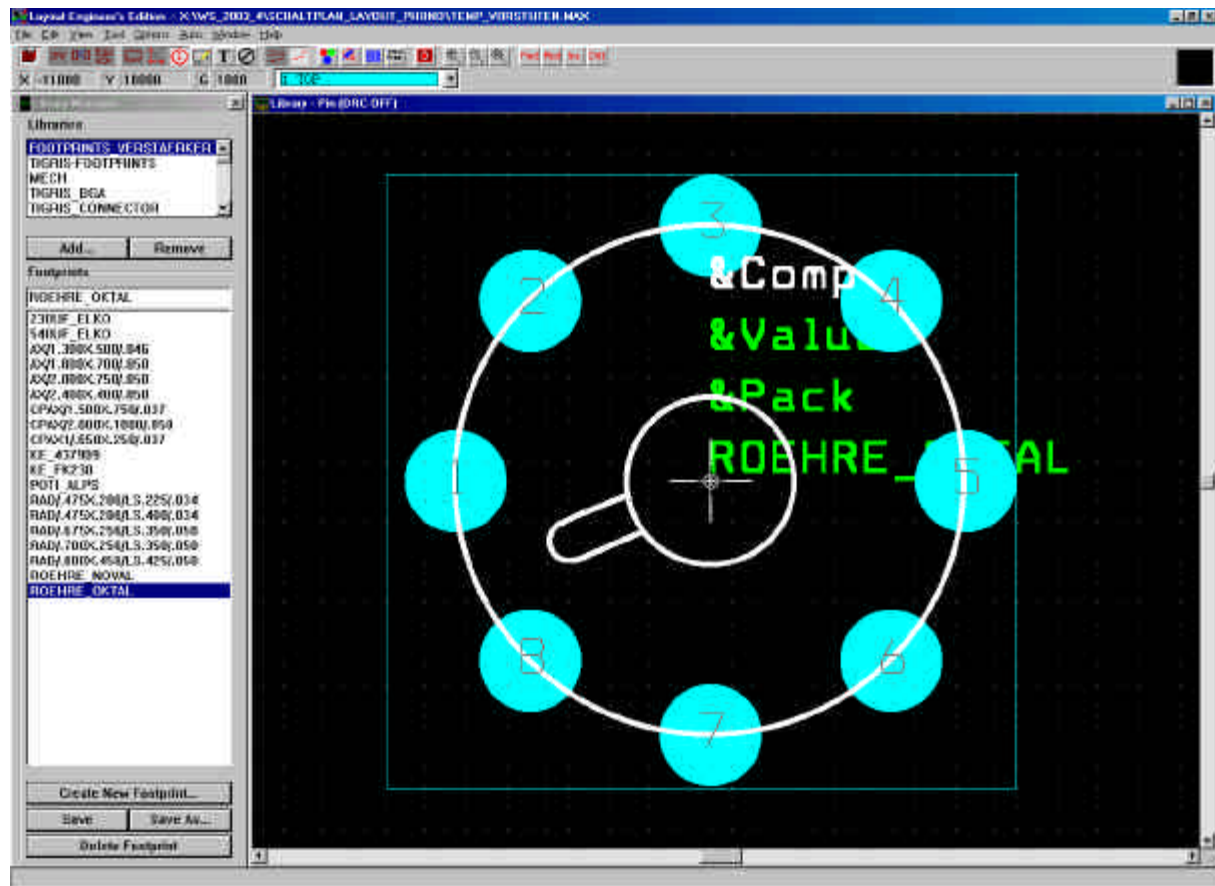


*Grundsätzlicher Ablauf der Layouterstellung*

Nach Abschluß der Schaltplanerstellung lag ein vollständiger Schaltplan vor, der alle Bauelemente und alle Verbindungen zwischen diesen enthielt. Um aus diesem ein Layout zu erstellen, müssen dem Layoutsystem zusätzlich dazu die vorgesehenen mechanischen Ausführungen der Bauelemente übermittelt werden. Das Layoutsystem verfügt über eine sogenannte Bauteilebibliothek (Library), in der die Lage und Form der Bauelementeanschlüsse sowie die Außenabmessungen der Bauelemente hinterlegt sind. Dieser Datensatz wird im allgemeinen mit dem Begriff „Footprint“ bezeichnet. Jeder Footprint hat einen Eigennamen („Footprint Name“, über den er aus der Bibliothek heraus aufgerufen werden kann. Dieser Eigenname, im allgemeinen ebenfalls abkürzend mit „Footprint“ bezeichnet, wurde innerhalb des Schaltplanerstellungsprogramms mit dem dazugehörigen Bauelement verknüpft. Durch einen Doppelclick auf das Bauelement öffnete sich das zu ihm gehörende Eigenschaftenfenster, dort wurde dann der „Footprint“ eingetragen. Noch nicht in der Bibliothek befindliche Footprints, wie zum Beispiel für Röhrensockel, wurden eigens für dieses Projekt erstellt und in die Bibliothek eingepflegt.



Bearbeiten des Schaltplans mit „Orcad-Capture“. Der Kondensator in der Bildmitte wurde soeben markiert, um ihm einen Footprint zuzuweisen.



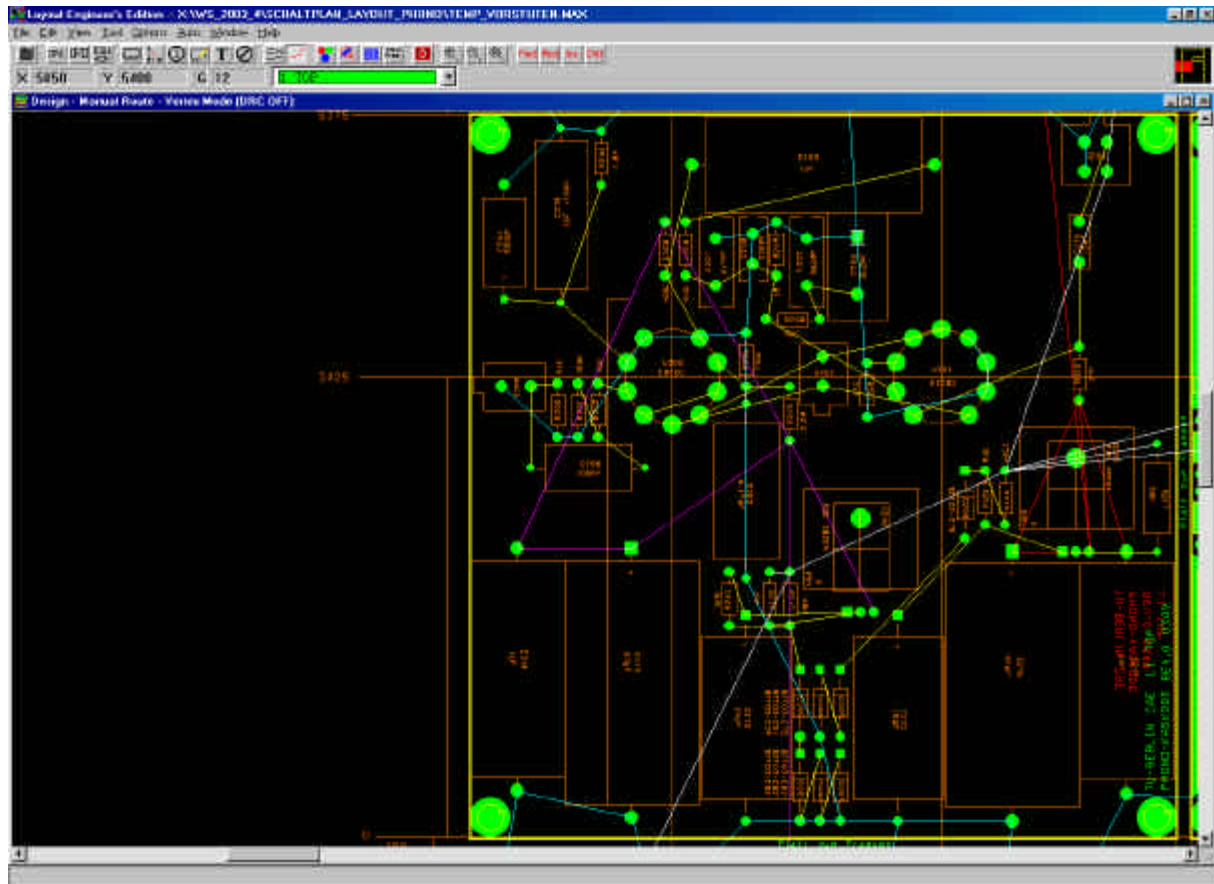
Zugriff auf die eigens für dieses Projekt erstellten Footprints für die verwendeten Röhren mit dem „Library-Manager“ des Layoutprogramms.

Aus dem so vorbereiteten Schaltplan wurde dann die Netzliste erstellt, die alle im Schaltplan vorhandenen Bauelemente und ihre Verbindungen untereinander auflistet und jedem Bauelement einen Footprint zuordnet. Diese Netzliste wurde direkt in das Layoutprogramm überspielt. Im Bildschirmfenster des Layoutprogramms erhielt man dann die, zunächst wahllos platzierten, Bauelemente und die, als Luftlinien angezeigten, Verbindungen („Connections“).

Nun begann das Layouten:

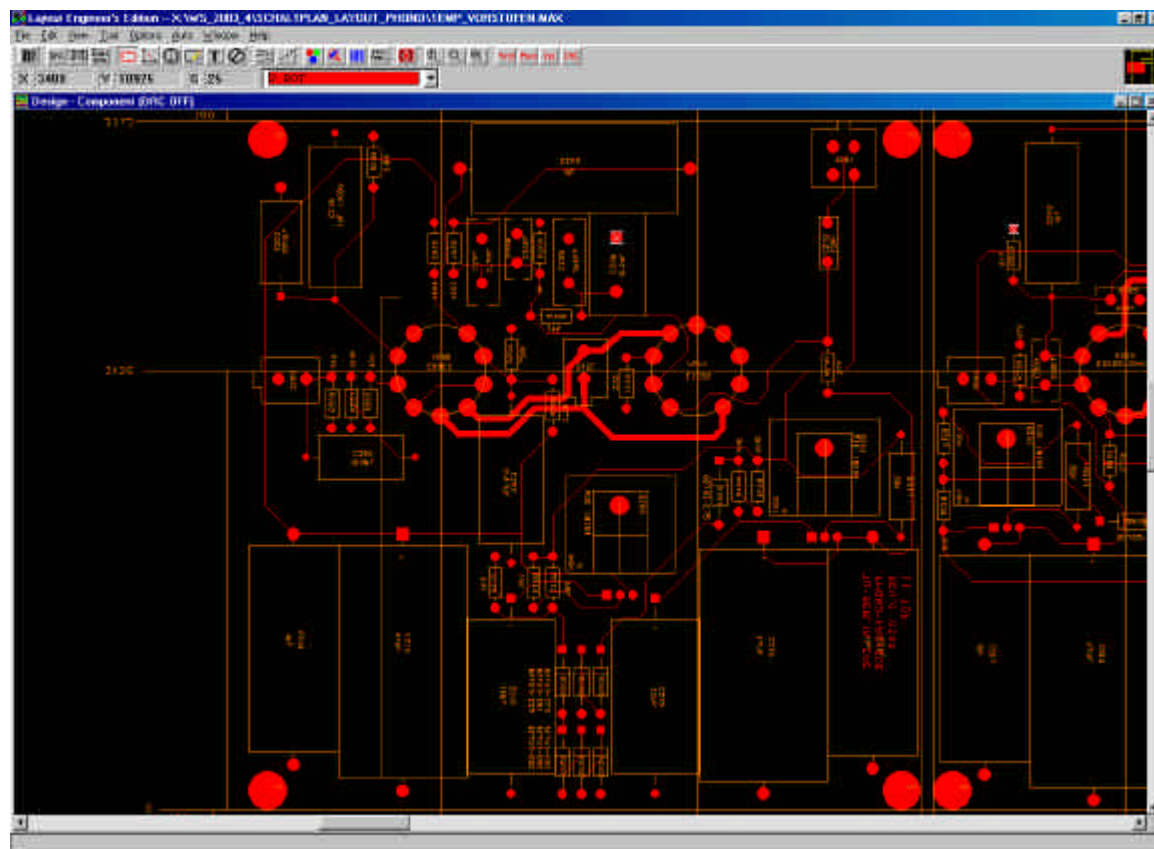
Zunächst wurde der Umriss der Leiterplatte gezeichnet. Bei unserem Projekt wurden mehrere Leiterplatten auf einem gemeinsamen Fertigungsnutzen in einem Arbeitsgang hergestellt, so daß hier auch schon die Nutzaufteilung beachtet werden mußte. Dieser Arbeitsgang erfolgte in mehreren Iterationen mit dem späteren Detailentwurf des Layouts, da die Abmessungen der Leiterplatten entsprechend dem tatsächlichen Platzbedarf der Baugruppen minimiert wurden.

Die mechanische Kompatibilität der untereinander austauschbaren Baugruppen wurde gesichert, indem zuerst die Bauteile, die Chassisdurchbrüche nach sich ziehen unter Verwendung von Hilfslinien platziert wurden. In diesem Arbeitsgang wurden auch die Befestigungsbohrungen als „nichtelektrische Bauteile“ hinzugefügt. Die Steckverbinder wurden ebenfalls bei allen miteinander austauschbaren Baugruppen an den gleichen Stellen platziert. Anschließend wurden die zum Signalpfad gehörenden Bauelemente platziert. Hierbei wurde auf eine optimale Ausrichtung der Bauteile im Sinne möglichst kurzer Signalverbindungen und möglichst weiträumiger Trennung der ein- und Ausgangskreise der Verstärkerstufen geachtet. Wenn möglich wurden auf konstantem Potential befindliche Bauelemente zwischen diese platziert, um deren abschirmende Wirkung auszunutzen.

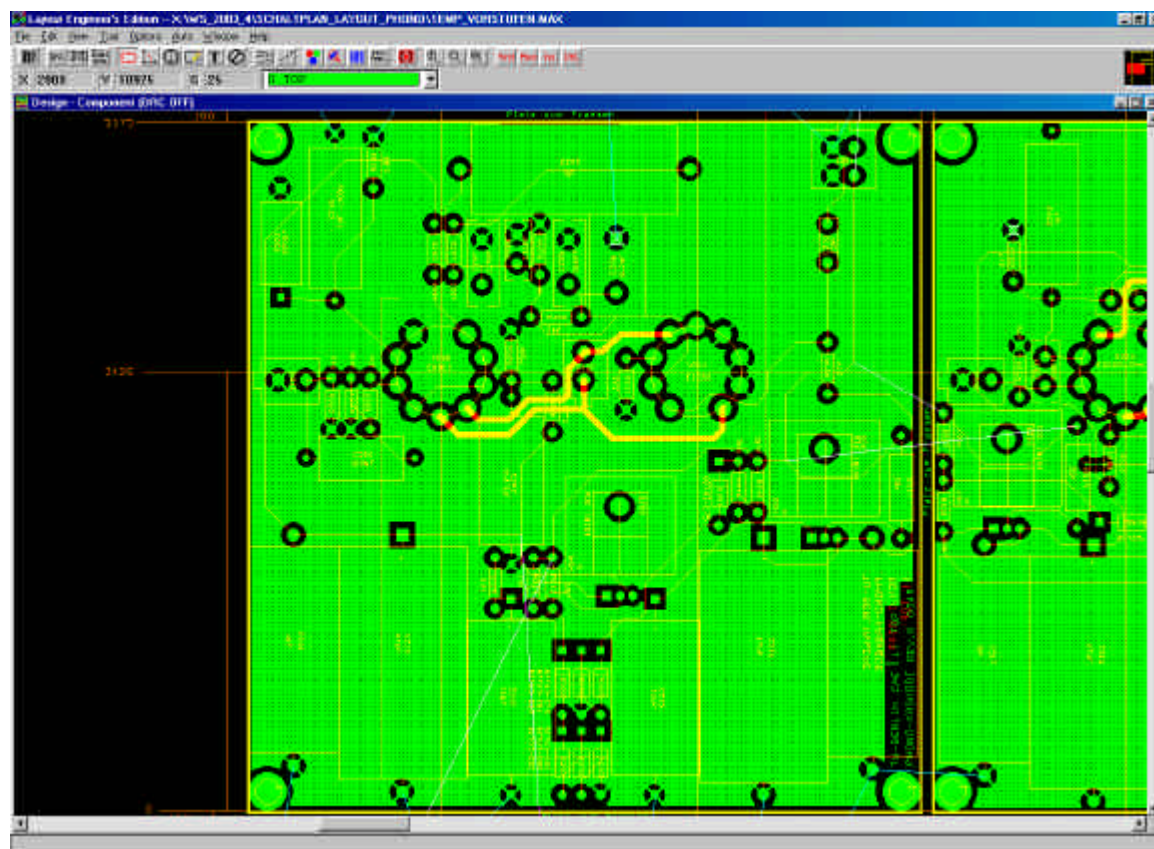


Layout mit bereits platzierten Bauelemente, die noch nicht gerouteten Verbindungen sind als „Luftlinien“ zu sehen.

Anschließend wurden die Leiterbahnen manuell verlegt. Das Plazieren und Verlegen wurde in mehreren Iterationen fortgeführt, bis ein signaltechnisch brauchbares Ergebnis auf einer möglichst kleinen Leiterplattenfläche erzielt werden konnte. Hierbei dienten die viel Platz einnehmenden, aber von der Leitungsführung her unkritischen, Spannungsregler als „Manövriermasse“. Die Leiterbahnen, mit Ausnahme der Masseverbindung, wurden so verlegt, daß sie ausschließlich auf der Unterseite der Leiterplatte verlaufen. Kreuzungen wurden wenn immer möglich vermieden oder, wenn unumgänglich, mit einem möglichst kurzen Leiterbahnstück auf der Oberseite über Durchkontaktierungen realisiert. Die Masseverbindung wurde dann abschließend als eine, nahezu die ganze Oberseite der Leiterplatte ausfüllende, Kupferfläche realisiert.



Layout mit bereits auf der Unterseite verlegten Leiterbahnen

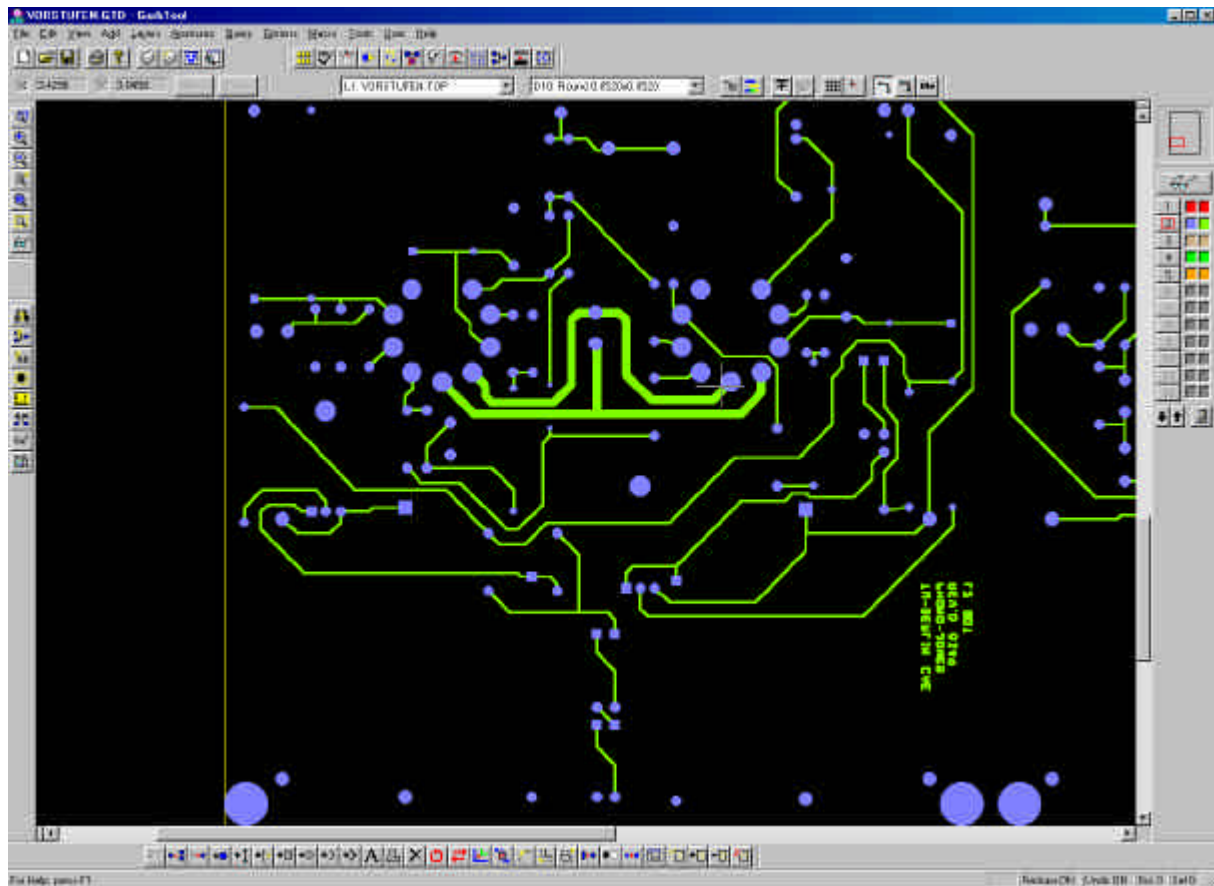


Massefläche auf der Oberseite

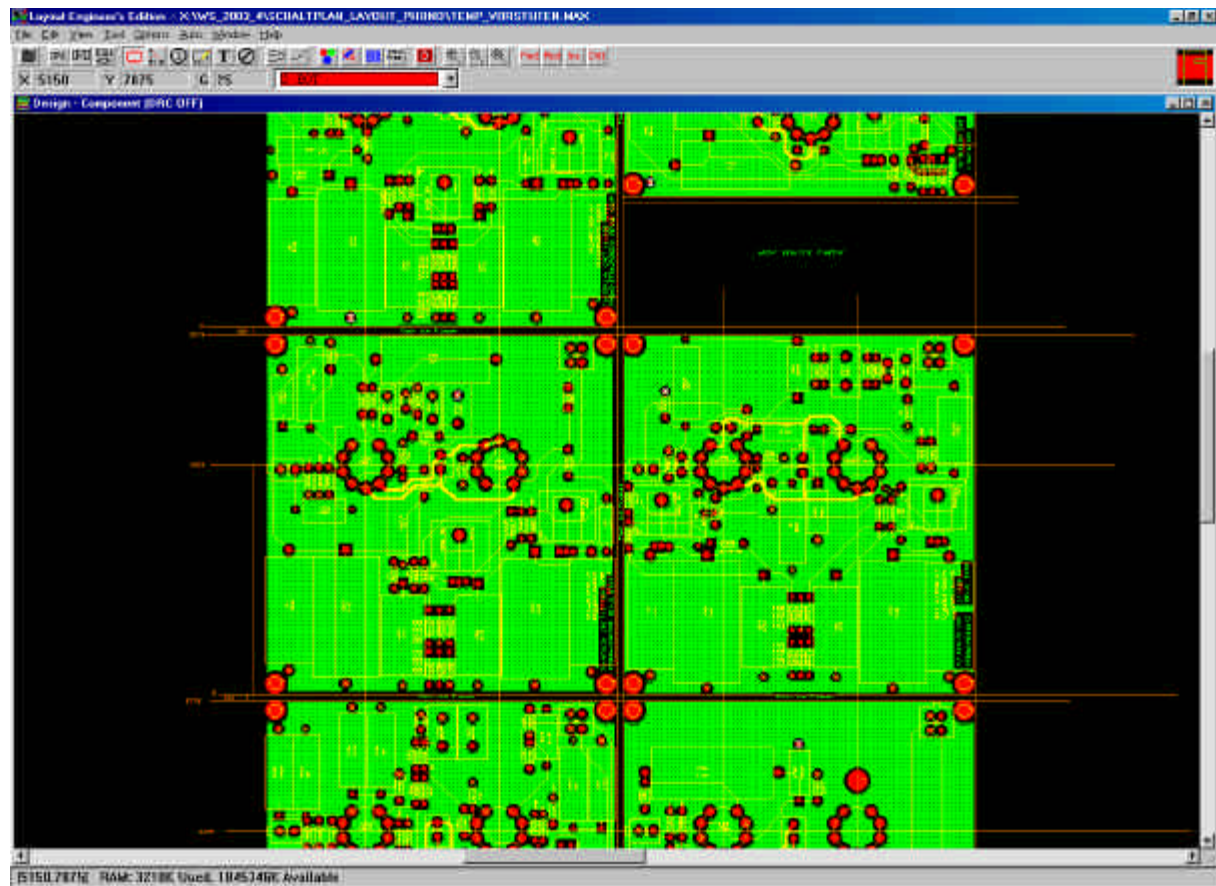


Nach vollständigem Verlegen aller Bahnen wurde ein sogenannter „Abstandscheck“ durchgeführt, um zu geringe Abstände oder Kurzschlüsse zwischen benachbarten Leiterbahnen erkennen und beseitigen zu können. Aufgefundene Fehler wurden korrigiert. Abschließend wurden Kennzeichnungstexte in das Leiterbild eingefügt, aus denen die Baugruppenbezeichnung, die Versionsnummer und die Lagenkennzeichnung zu ersehen ist. Damit lag das Layout als Quelldatensatz vollständig vor.

Aus diesen Quelldaten wurden anschließend Herstellungsdaten, die sogenannten Gerber-Daten, erzeugt. Dieser Vorgang wird „Postprocessing“ genannt. Die Gerber-Daten sind weltweit genormt. Deren Informationsgehalt ist auf die Geometrie des Leiterbilds, die Lage der Bohrungen und die Bohrdurchmesser reduziert. Als letzter Arbeitsgang folgte die visuelle Kontrolle der Gerber-Daten mit dem zum ORCAD-Lieferumfang gehörenden Programm „Gerb-Tool“. Die kontrollierten Gerber-Daten wurden dann per E-Mail an den Leiterplattenhersteller zur Fertigung übergeben.



Abschließende Kontrolle der Gerber-Daten mit „Gerb-Tool“



*Mehrere unterschiedliche Leiterplatten wurden zu dem von Würth-Elektronik gesponsorten Fertigungsnutzen zusammengefaßt.*

## **Ausführung des Layouts unter besonderer Beachtung der Signalintegrität:**

### **Allgemeines:**

Die von uns verwendeten Leiterplatten sind doppelseitig durchkontaktierte Leiterplatten. Hierbei befinden sich auf beiden Außenflächen der Leiterplatte Leiterbahnen. Diese werden über durchmetallisierte Bohrungen miteinander verbunden. Bohrungen, die keine Bauteile aufnehmen, sondern nur zur elektrischen Verbindung auf verschiedenen Seiten liegenden Leiterbahnen dienen werden Durchkontaktierungen oder Vias genannt.

Bei Schaltungen ohne besondere Ansprüche an die Signalqualität verfährt man im allgemeinen Fall wie folgt: Um Überkreuzungen zu vermeiden, werden waagrecht führende Leiterbahnen vorzugsweise auf der Oberseite der Leiterplatte verlegt. Senkrecht führende Leiterbahnen werden dagegen vorzugsweise auf der Unterseite der Leiterplatte verlegt. Die Platzierung der Bauelemente erfolgt so, daß diagonal führende Leiterbahnen möglichst vermieden werden. Die verbliebenen diagonal führenden Leiterbahnen werden in eine waagrechte und eine senkrechte Teilleiterbahn aufgeteilt, die dann, über eine Durchkontaktierung miteinander verbunden, auf den gegenüberliegenden Seiten der Leiterplatte geführt werden. Man ist stets bestrebt, die Zahl der Durchkontaktierungen klein zu halten, da diese im Verhältnis zu den Leiterbahnen sehr viel Platz benötigen.

Weiterhin ist man bestrebt, von hohen Strömen durchflossene Leitungen möglichst ganz ohne Durchkontaktierungen auszuführen, da diese den Widerstand der Leitungsverbindung erhöhen und gleichzeitig die Strombelastbarkeit vermindern.

Diese Strategie wurde bei allen Leiterplatten für die Stromversorgung des Röhrenverstärkers angewandt. Für das Layout der Verstärkerbaugruppen selbst wurde dagegen ein anderer Weg gewählt. Alle Leiterbahnen, mit Ausnahme der Masseverbindungen, wurden auf der Unterseite der Leiterplatte verlegt. Eine geschickte Platzierung der Bauelemente vermied hierbei Kreuzungspunkte. Die Masseverbindung wurde als zusammenhängende Fläche auf der Oberseite der Leiterplatte ausgeführt, die diese vollständig ausfüllt. Damit wird eine Abschirmwirkung erzielt. Streukapazitäten zwischen Leitungsnetzen werden deutlich verkleinert. Durch den geringen Kupferwiderstand und die geringe Induktivität einer solchen Anordnung ist auf der gesamten Leiterplatte ein einheitliches Massepotential vorhanden, womit Verkopplungen zwischen einzelnen Schaltungsteilen vermieden werden.

### **Phono-Vorstufe in Kaskodenschaltung als Beispiel:**

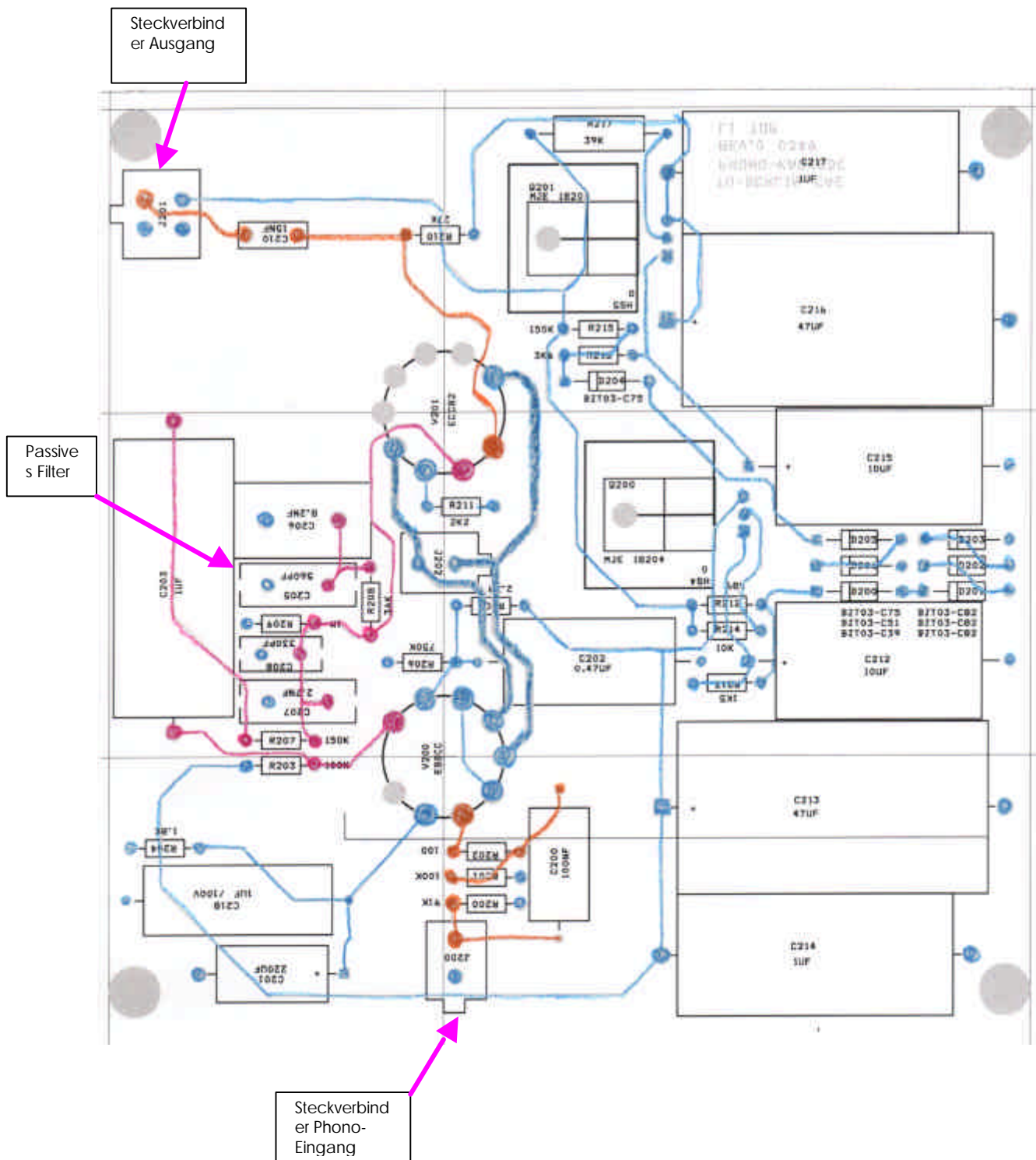
In dem folgenden Schaltplan, der eine Phono-Vorstufe in Kaskodenschaltung zeigt, sind die Leitungsnetze blau eingefärbt, die auf zeitlich konstantem Potential liegen. Das sind zum einen die Masseleitungen, aber auch alle anderen Leitungsnetze, wie etwa Versorgungsspannungen oder fest vorgespannte Gitterkreise, deren Potential über nach Masse führende Blockkondensatoren zeitlich konstant gehalten wird.

Die Leitungsnetze, die Wechselspannung führen, sind rot und orange gekennzeichnet. Diese können in drei Hauptgruppen eingeteilt werden: (von links nach rechts) Den, besonders empfindlichen, Eingangskreis, das zwischen beiden Verstärkertrioden liegende passive Filter und den Ausgangskreis. Zunächst ist der Eingangskreis mit möglichst geringer Fläche und Leitungslänge zu verlegen, um ihn so weit wie möglich gegen Einstrahlung aus anderen, wechselspannung führenden, Leitungsnetzen zu schützen. Die, rot gekennzeichneten, in der Mitte des Schaltplans befindlichen Leitungsnetze des passiven Filters können bei ungünstiger Anordnung sowohl den Eingangskreis stören als auch selbst durch den Ausgangskreis gestört werden. Daher sind auch sie möglichst kompakt zu platzieren und

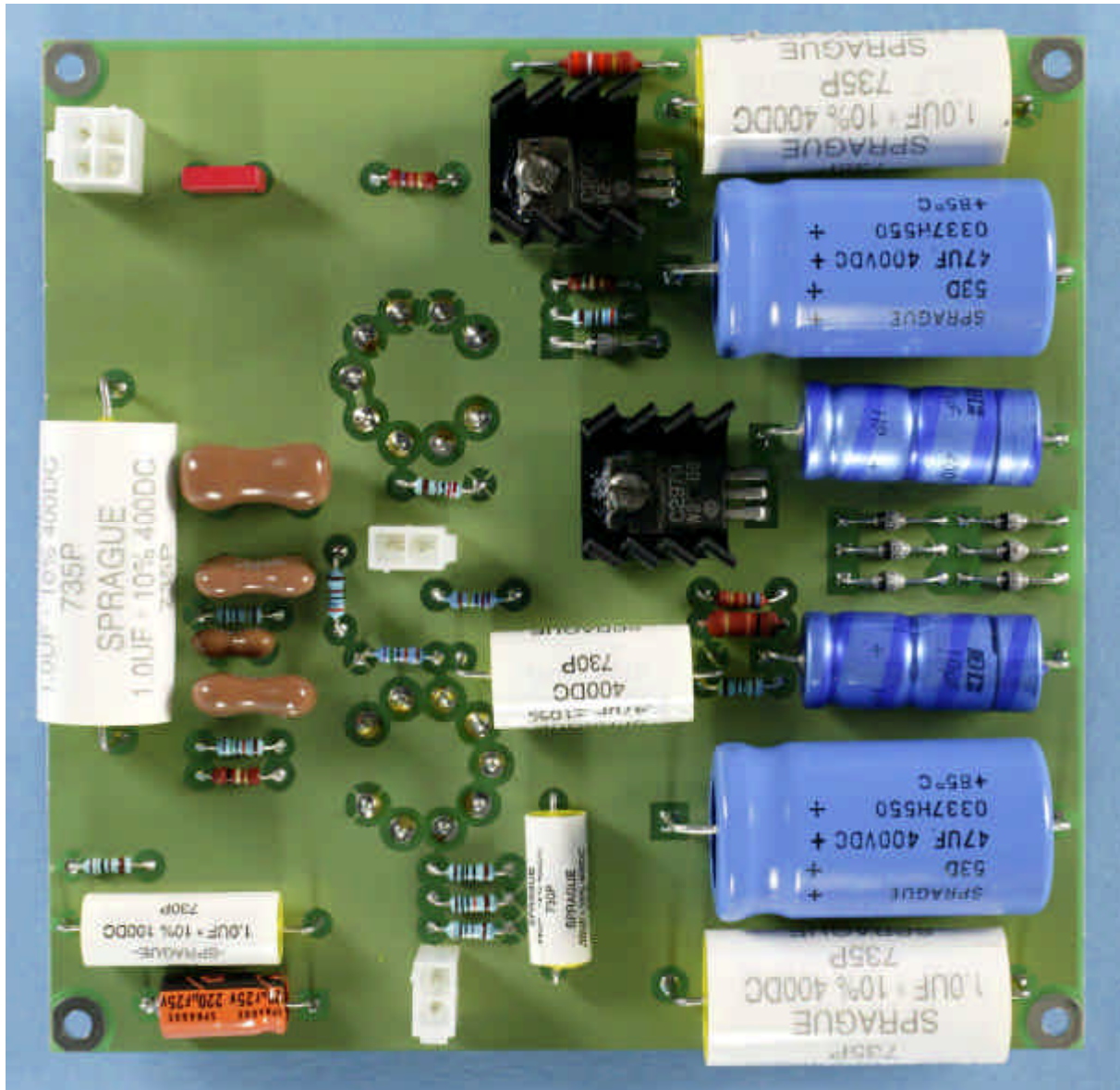




In der folgende Skizze wird die Umsetzung des obenstehenden Schaltplans in ein geeignetes Layout gezeigt:



Layout zum obenstehenden Schaltplan mit gekennzeichneten Leitungsnetzgruppen



*Blick auf die fertig bestückte Baugruppe, die durchgehende Massefläche ist deutlich zu erkennen*

Die Masseverbindungen sind auf der Skizze des Leiterbilds nicht sichtbar, sie befinden sich in Form einer durchgehenden Fläche auf der gegenüberliegenden Seite der Leiterplatte. Deutlich ist die Trennung der drei kritischen Leitungsnetzgruppen zu erkennen. Zwischen den Eingangskreis und den Bereich des passiven Filters wurde der Kathodenkreis der Kaskodenstufe platziert, der durch sein zeitlich konstantes Potential eine abschirmende Wirkung hat. Die Gitter- und Anodenkreise der zweiten Verstärkerröhre wurden mit maximal möglichem Abstand verlegt. In diesem Zusammenhang ist zu beachten, daß die Wirkung der rückwärtigen Massefläche die Schaltkapazitäten zwischen benachbarten Leiterbahnen erheblich reduziert. Bei der akustischen und meßtechnischen Überprüfung wurde die Eignung des gewählten Layouts bestätigt.

Im Rahmen dieses Verstärkerprojekts wurden mehrere, in ihren elektrischen und mechanischen Schnittstellen kompatible Vorverstärkerbaugruppen realisiert, um eine vergleichende Untersuchung verschiedener Schaltungskonzepte zu ermöglichen. Daher war beim Layouten darauf zu achten, alle Röhren, Befestigungsbohrungen und Steckverbinder bei allen Versionen des Vorverstärkers exakt an der gleichen Stelle zu platzieren, die mit den entsprechenden Durchbrüchen und Gewinden im Chassis korrespondieren.

Da auf den hier layouteten Leiterplatten Spannungen von bis zu 450V anliegen, war auf ausreichende Abstände zwischen Leiterbahnen und auch Bauteilgehäusen zu achten. Bei der Auslegung der Heizkreise wurde eine der der Belastung durch den Heizstrom entsprechende Leiterbahndicke gewählt. Nicht zuletzt wurden die Leiterplatten auch nach ästhetischen Kriterien im Sinne einer strukturierten und ausgeglichenen Anordnung der Bauelemente optimiert, da das optische Erscheinungsbild eines Röhrenverstärkers im typischen Fall einen erheblichen emotionalen Mehrwert für seinen Nutzer darstellt.

### ***Einige wichtige Funktionen des Layout Programms, die wir bei der Erstellung unserer Layouts benutzt haben***

- ✍ Durch die Integration von Schaltplanerstellung und Layout in einem einzigen Programmpaket ( ORCAD Capture und ORCAD Layout) ergab sich ein reibungsloser Übergang vom fertigen Schaltplan zum Layout. Die von ORCAD-Capture erzeugte Netzliste enthält die Bauelementeanschlüsse und ihrer Verbindungen untereinander und die Zuordnung zwischen den einzelnen Bauelementen und den Bibliothekselementen des Layoutprogramms. Diese Netzliste wird dann als Eingangsdatei für das Programm „ORCAD Layout“ verwendet. Auch nachträgliche Änderungen am Schaltplan können mit der Funktion „Run ECO to Layout“ direkt vom Schaltplan in das Layout übertragen werden.
- ✍ Alle Leiterbahnen wurden von Hand verlegt, da die Leiterbahnführung mit großer Sorgfalt nach signaltechnischen Gegebenheiten erfolgen musste. Hierbei wurde die Funktion „gridded Manual Route without shove“ verwendet. Die Leiterbahnbreite kann für jedes Segment, jede Verbindung oder jedes Netz individuell eingestellt werden.
- ✍ Die Masseverbindungen auf der oberen Leiterplattenseite der Vorverstärkerstufen wurden als Kupferflächen ausgeführt. Für deren Erstellung wurde die Funktion „Copper Pour“ verwendet. Diese Funktion gestaltet die Kupferfläche so, daß alle nicht mit dieser elektrisch zu verbindenden Elemente, wie etwa Anschlußpads, Durchkontaktierungen oder Leiterbahnen, automatisch aus dieser ausgespart werden. Kupferflächen werden zum einen dazu verwendet, um großflächige Verbindungen mit hoher Strombelastbarkeit und kleinem ohmschen Widerstand sowie kleiner Induktivität zu realisieren. Zum anderen wird die abschirmende Wirkung einer Kupferfläche gegen hoch- und niederfrequente Störfelder genutzt.
- ✍ Abstandskontrolle: Wir haben die Funktion „Board Space Check“ benutzt, um zu geringe Abstände oder Kurzschlüsse zwischen Leiterbahnen automatisch zu erkennen. Hierbei haben wir, entsprechend der gewählten Leiterplattentechnologie, einen Mindestabstand von 0,3mm vorgegeben. Es zeigte sich jedoch, daß diese Kontrolle nicht lückenlos war, eine nicht vorgesehene Verbindung der Massefläche der Line-Stufe zu einer, die +12V Hilfsspannung führenden, Leiterbahn wurde nicht erkannt.
- ✍ Mit der Funktion „Post Processing“ werden aus den Layout-Quelldaten die sogenannten Gerber-Daten erzeugt. Diese sind weltweit einheitlich genormt und enthalten nur noch die rein geometrische Information zur Leiterplattenherstellung, also das Leiterbild und die Lage und den Durchmesser der Bohrungen. Mit dem im Orcad-Lieferumfang enthaltenen Prigramm „Gerb-Tool“ ist es möglich, die Gerber-Daten auf dem Bildschirm anzuzeigen. Dies wird für eine abschließende visuelle Kontrolle vor dem Absenden der Gerber-Daten an den Leiterplattenhersteller genutzt.

Für die Realisierung dieses Projekts wurde nur ein kleiner Bruchteil der zur Verfügung stehenden Funktionen des Programms „ORCAD Layout“ benötigt und verwendet, da eine lediglich zweiseitige Leiterplatte vollständig manuell erstellt wurde. Für andere Aufgabenstellungen stehen auch Funktionen mit höherem Automatisierungsgrad, etwa der ebenfalls zum ORCAD-Programmpaket

gehörende Autorouter „Specctra“ zur Verfügung. Die Anwendung automatisierter Verfahren hätte hier jedoch keinerlei Vorteil gebracht, da die Formulierung der äußerst diffizilen Vorgaben für die signalgerechte Anordnung der Leiterbahnen und der Bauelemente, falls überhaupt möglich, ein vielfaches der Zeit des hier durchgeführten manuellen Entwurfs gebraucht hätte.