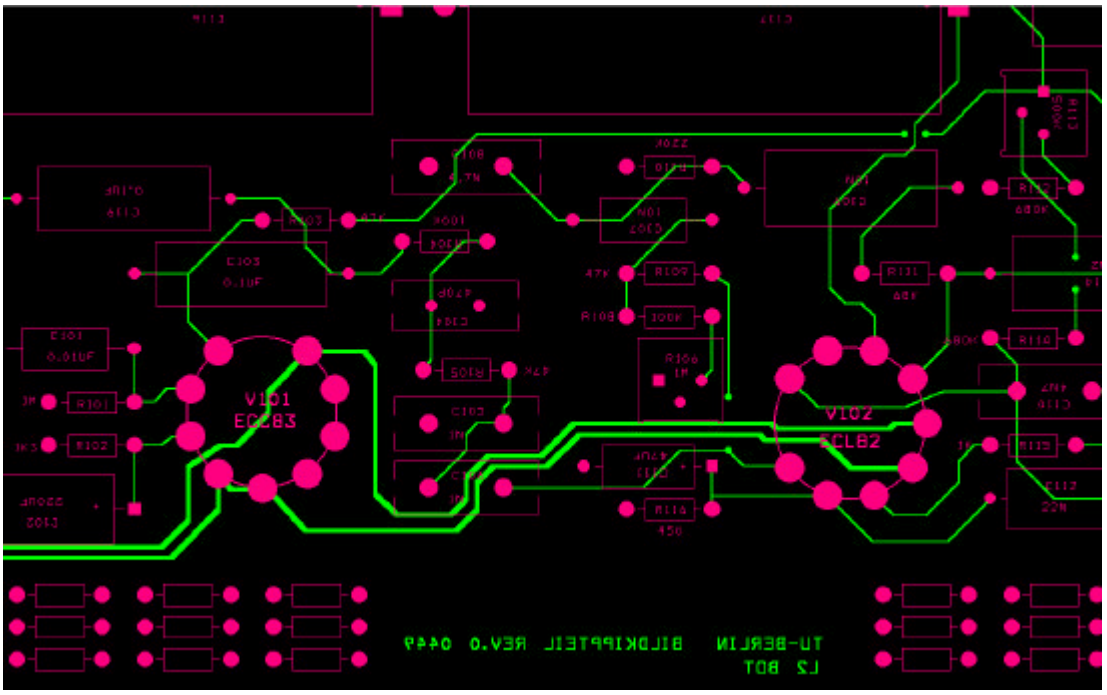
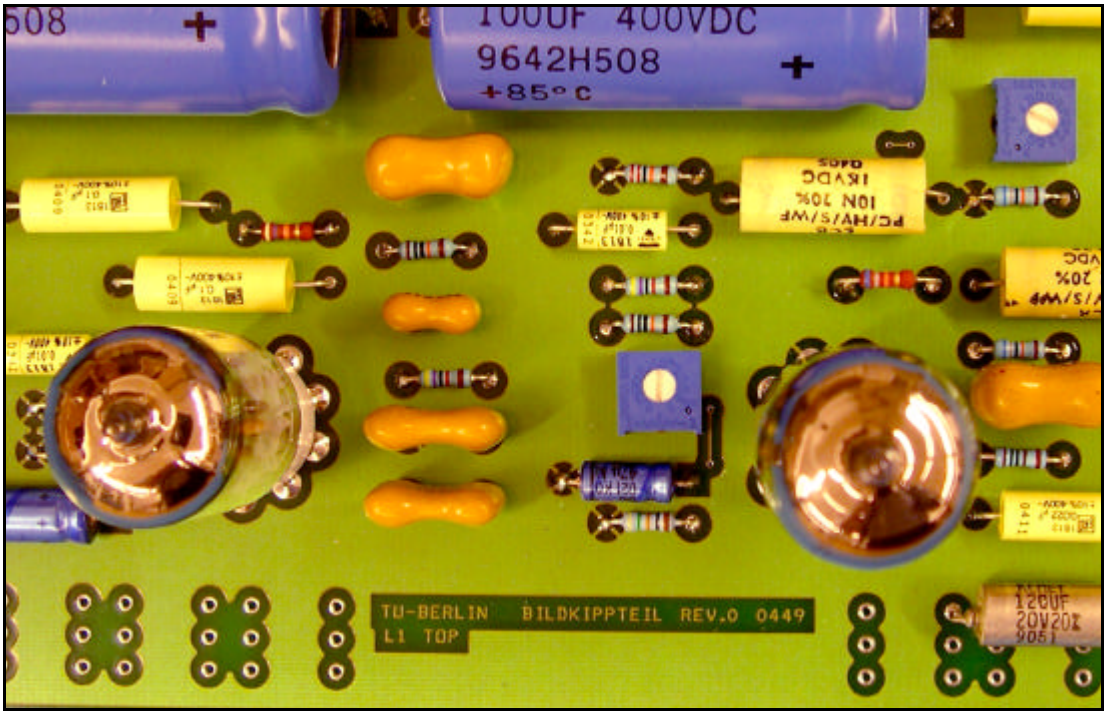
Layout

Von Dan Eichel



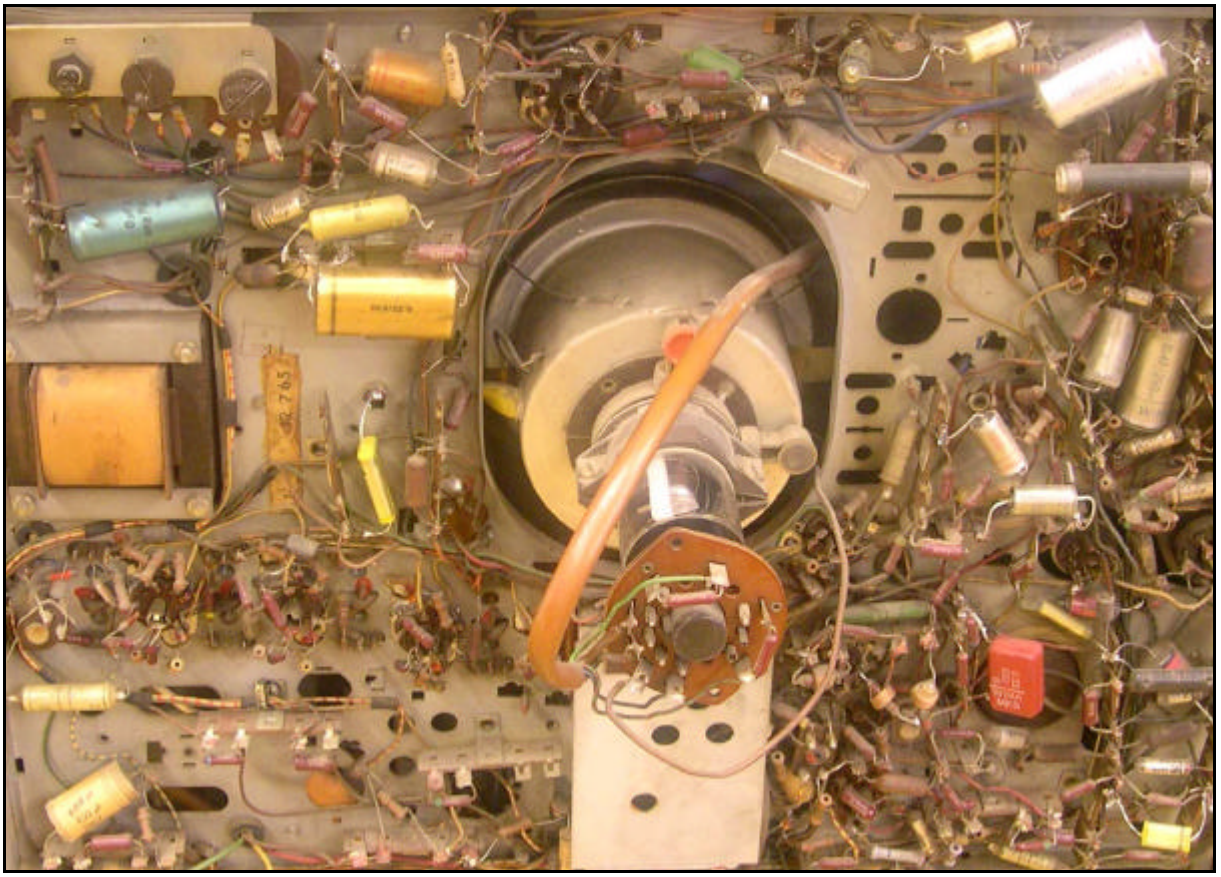


Layoutausschnitt in Darstellung am CAD-System und in der Wirklichkeit

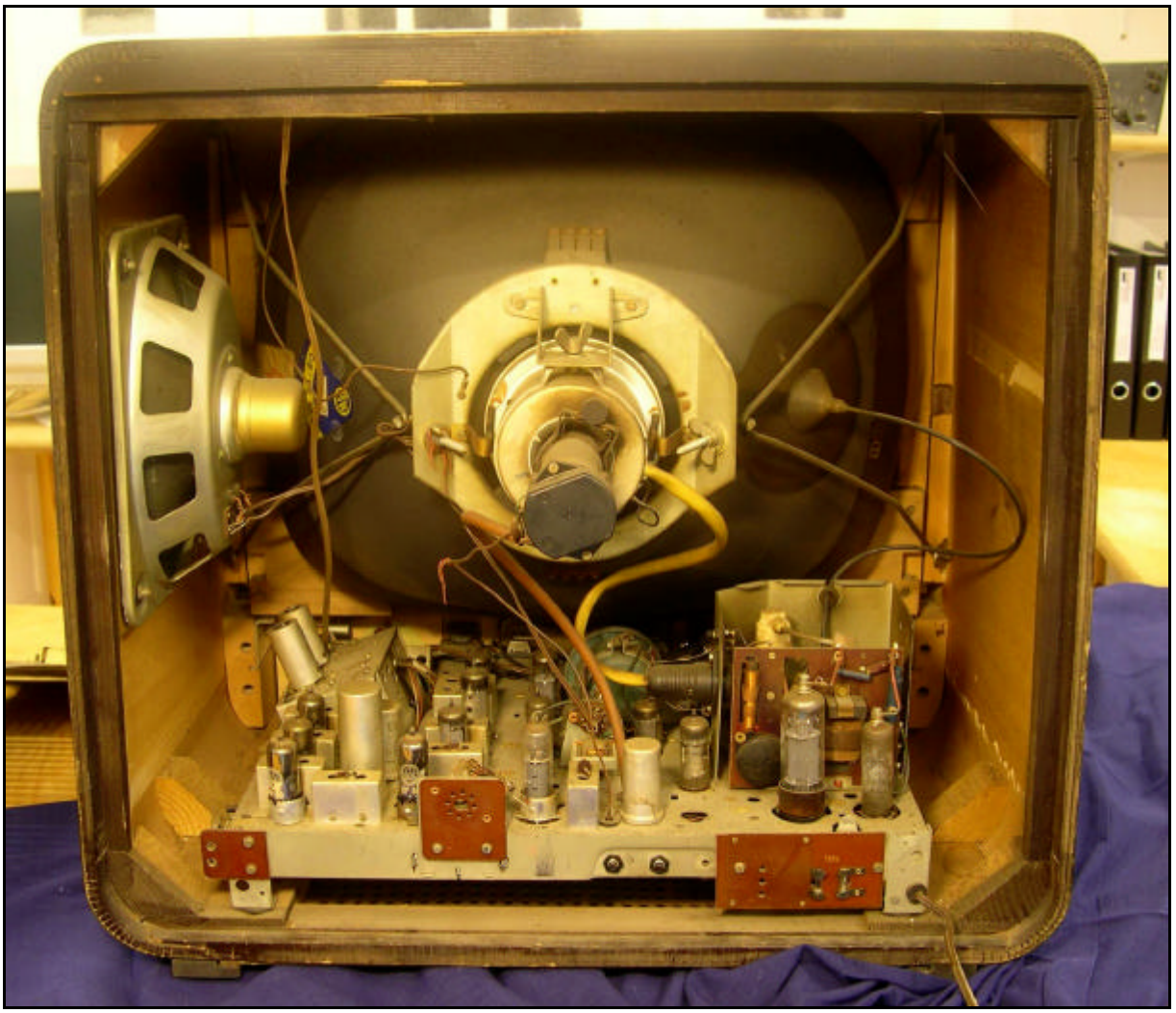
Prinzipielles und Geschichtliches zur Leiterplatte

In der Anfangszeit der Elektronik und auch der Fernsehtechnik wurden elektronische Schaltungen in freier Verdrahtung aufgebaut. Hierbei wurden die elektrischen Verbindungen durch die Anschlüsse der Bauelemente selbst sowie durch Verbindungskabel realisiert. Als tragendes Element wurde eine Blechkonstruktion, das Chassis, verwendet. Große uns schwere Bauelemente wurden am Chassis verschraubt, kleine und leichte Bauelemente wurden durch ihre Anschlüsse gehalten, die dann ihrerseits durch am Chassis befestigte Lötstützpunkte gehalten wurden.

Hierbei mussten alle Bauelemente und Verbindungskabel mühsam von Hand montiert werden, es bestand zudem die Möglichkeit von Fehlverdrahtungen, da ein derartiger Aufbau meist schnell unübersichtlich wird.



Blick in die freie Verdrahtung des Fernsehers „Reichsgraf“ von Graetz aus dem Jahr 1959

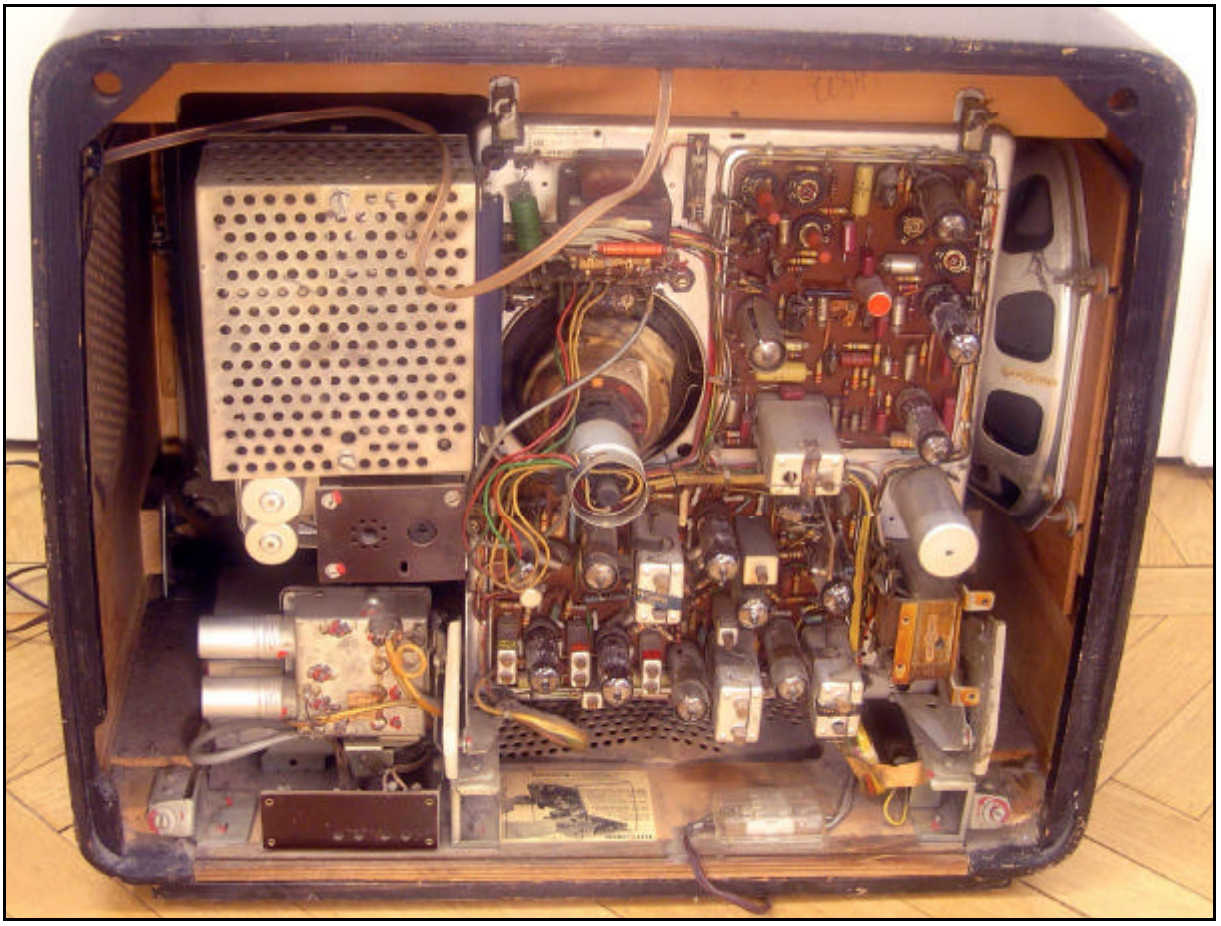


Fernseher „Burggraf“ von Graetz, Mitte der 50-er Jahre, mit klassischem, freiverdrahtetem Chassisaufbau. man erkennt die auf der Oberseite montierten großen und schweren Bauelemente und Röhren

In den späten 50-er Jahren wurde daher dazu übergegangen, die freie Verdrahtung durch Leiterplatten zu ersetzen. Dies war der erste grundlegende Wandel in der Elektronikbranche, der nicht aus dem Wunsch nach Erhöhung der technischen Leistungsdaten, sondern aus der Notwendigkeit, die Produktion zu rationalisieren, stattgefunden hat.

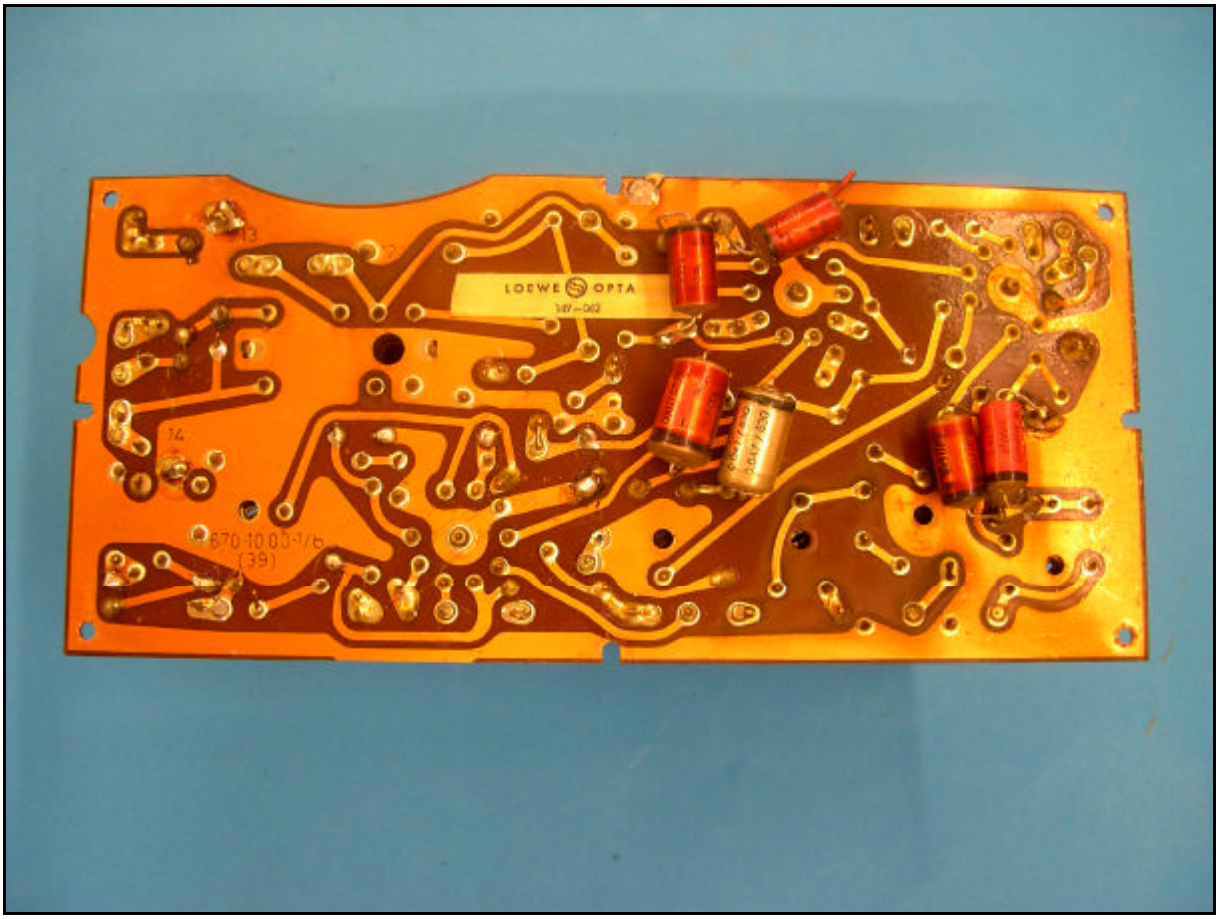
Wie einem Artikel der Zeitung „Funk-Technik Nr. 9/1959“ zu entnehmen ist, war der Anstoß für die Rationalisierungsbemühungen jedoch nicht die damit beabsichtigte „Freisetzung“ von Arbeitskräften wie es heute der Fall ist, sondern es ging darum, den wachsenden Konsumbedarf der Bevölkerung bei gleichzeitigem Arbeitskräftemangel befriedigen zu können. (Das klingt aus der Sicht des Jahres 2004 wirklich paradiesisch...)

Die Leiterplatte ist sowohl mechanisch tragendes als auch elektrisch verbindendes Element. Der ursprünglich dreidimensionale Aufbau der Schaltung wird auf einen zweidimensionalen Aufbau reduziert. Alle Lötstellen liegen auf einer Ebene und können daher im Lötbad automatisch gelötet werden. Da die elektrischen Verbindungen in Form von Leiterbahnen fester Bestandteil der Leiterplatte sind, sind Fehlverdrahtungen prinzipbedingt nicht mehr möglich.



Mit Leiterplatten aufgebautes Chassis des Fernsehers „Ariadne“ von Loewe-Opta aus den frühen 60-er Jahren.

Der zweidimensionale Aufbau mit fest definierter Lage der Bauelemente hat technisch den Vorteil, daß die Lage der Bauelemente und die Länge sowie der Abstand der Verbindungsleitungen prinzipbedingt festliegt, womit sich auch bei großen Serien stets ein reproduzierbares Verhalten der Schaltung ergibt. Die Reduktion des Schaltungsaufbaus auf zwei Dimensionen und bei gleichzeitigem Wegfall des Blechchassis führt jedoch auch zu vormals unbekannten Problemen durch Verkopplungen, fehlende Wärmeableitung und fehlende Abschirmung.

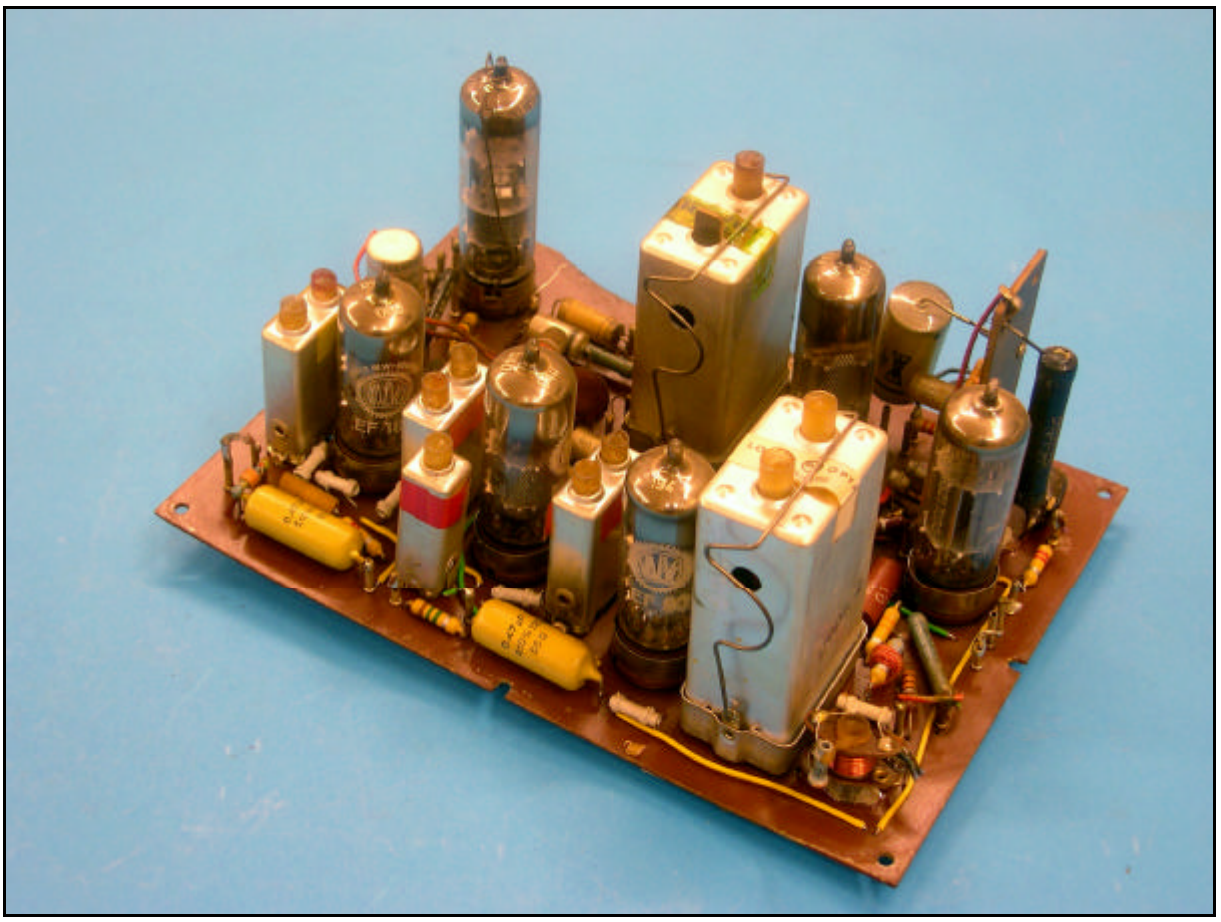


Kippteilplatte aus dem Fernseher „Magier“ von Loewe-Opta von Beginn der 60-er Jahre im Blick auf die Leiterbahnseite, als typisches Beispiel einer einseitig kaschierten Leiterplatte. Man beachte die ausgedehnten Masseflächen.

(Die hier sichtbaren Kondensatoren waren an dieser Stelle ursprünglich nicht vorgesehen, sie sind bei einer Reparatur in den 70-er Jahren als Ersatzteile eingebaut worden.)

Um diese unerwünschten Effekte sicher auszuschließen muß das Layout einer Leiterplatte mit größter Sorgfalt geschehen. Hierbei müssen die elektrischen Eigenschaften der Leiterbahnen selbst und die mögliche Verkopplung von Signalen zwischen benachbarten Stromkreisen betrachtet werden, die beim Schaltplanentwurf übliche Abstrahierung von Verbindungen als „elektrisch eigenschaftslos“ muß verlassen werden. In der neueren Zeit hat sich jedoch die Multilayer-Leiterplatte mit 4 oder mehr Verdrahtungsebenen durchgesetzt, bei der dann die, meist im Inneren der Leiterplatte eingebettete, durchgehende Masselage wieder die elektrische Funktion des früheren Blechchassis übernimmt.

Die hohe Anschlußzahl und die feinen Anschlußraster der heute üblichen Bauelemente lassen für den Schaltungsaufbau gar keine andere Wahl mehr als die Verwendung von Leiterplattentechnologie.

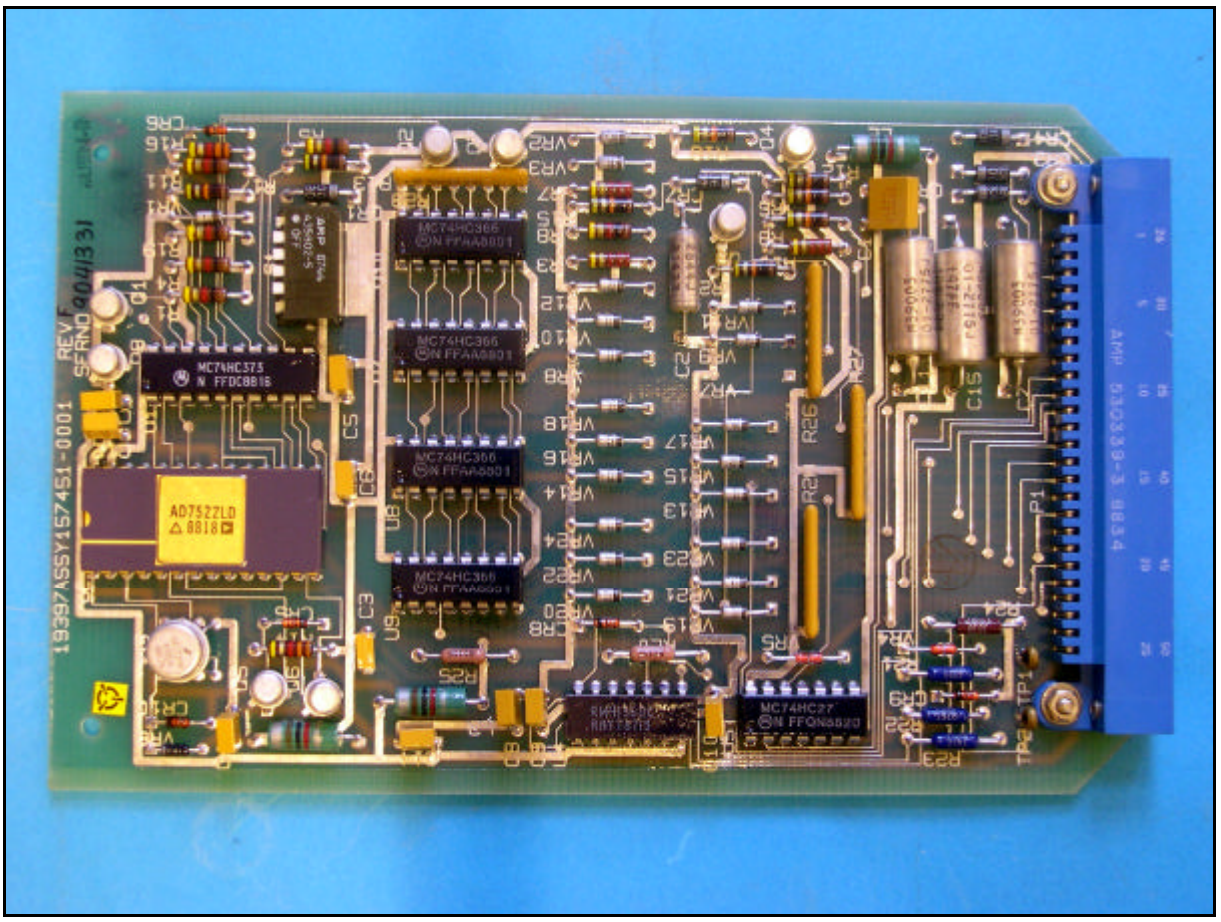


ZF / Videoplatte aus dem Fernseher „Magier“ von Loewe-Opta von Beginn der 60-er Jahre im Blick auf die Bauteilseite

Die Herstellung von Leiterplatten geschieht nach dem folgenden Prinzip, das zunächst am Beispiel einer einfachen, einseitig kaschierten Leiterplatte beschrieben wird, wie sie früher in Fernsehgeräten eingesetzt wurde:

Das Basismaterial, heute glasfaserverstärktes Epoxydharz, früher Hartpapier, ist einseitig mit einer Kupferschicht versehen. Diese Kupferschicht wird mit einem zunächst ätzmittelresistenten, fotosensitiven Lack überzogen. Das gewünschte Leiterbild wird mittels Belichtung auf diesen Lack aufgebracht. Das später benötigte Leiterbild ist hierbei auf dem zur Belichtung verwendeten Film schwarz. Anschließend durchläuft die Platte ein Entwicklerbad, an den vorher belichteten Stellen löst sich die Lackschicht ab, das Kupfer liegt frei. In dem anschließenden Ätzprozess wird das freiliegende Kupfer abgelöst, das Leiterbild liegt nun vor. Abschließend wird der Schutzlack von den Leiterbahnen entfernt und es werden die Bohrungen gebohrt.

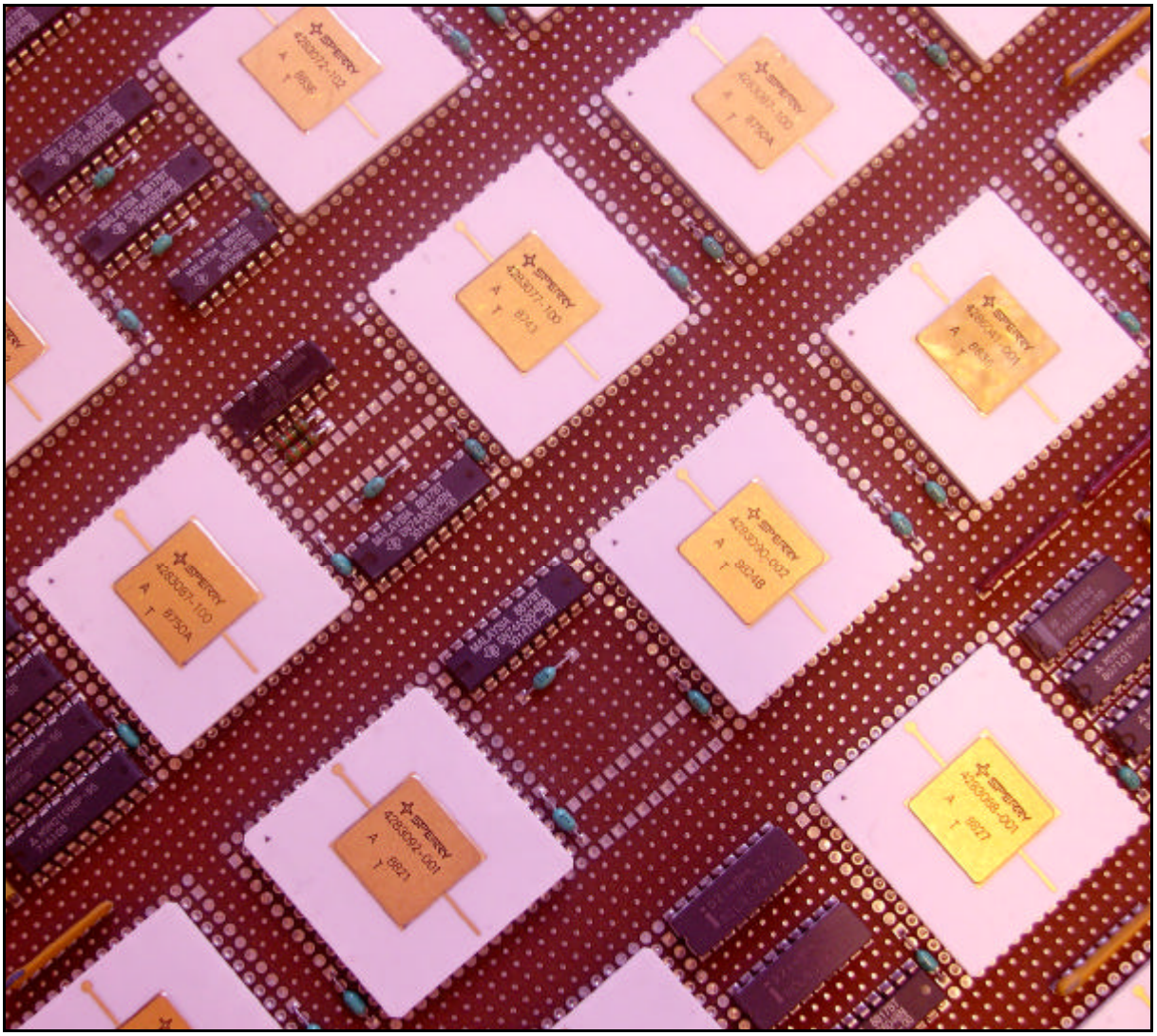
Mit dem Übergang zu doppelseitigen Leiterplatten wurde das Herstellungsverfahren dahingehend verändert, daß man die Bohrungen durchmetallisiert, so daß sie als Verbindungselemente zwischen beiden Verdrahtungsebenen der Leiterplatte dienen. Das ermöglicht es, Bohrungen im Layout vorzusehen, die nicht zur Aufnahme von Bauelementen dienen, sondern ausschließlich für den „Ebenenwechsel“ vorgesehen sind. Damit wurde es möglich, auch „Kreuzungen“ layouttechnisch zu bewältigen, womit auch die Realisierung komplexerer Schaltungen möglich wurde. Bei der Herstellung doppelseitiger Leiterplatten werden im ersten Schritt in eine doppelseitig kupferkaschierte Platte die Bohrungen eingebracht. Anschließend wird die Platte galvanisiert, wobei sich dann eine Kupferschicht in den Bohrungen ausbildet und die bereits vorhandene Kupferschicht auf den Außenflächen wächst. Hierbei werden meist die Bereiche, die später kupferfrei sein sollen, abgedeckt, so daß auf diese kein zusätzlicher Kupferauftrag erfolgt.



Doppelseitig durchkontaktierte Leiterplatte aus dem Navigationscomputer eines Verkehrsflugzeugs aus den späten 80-er Jahren

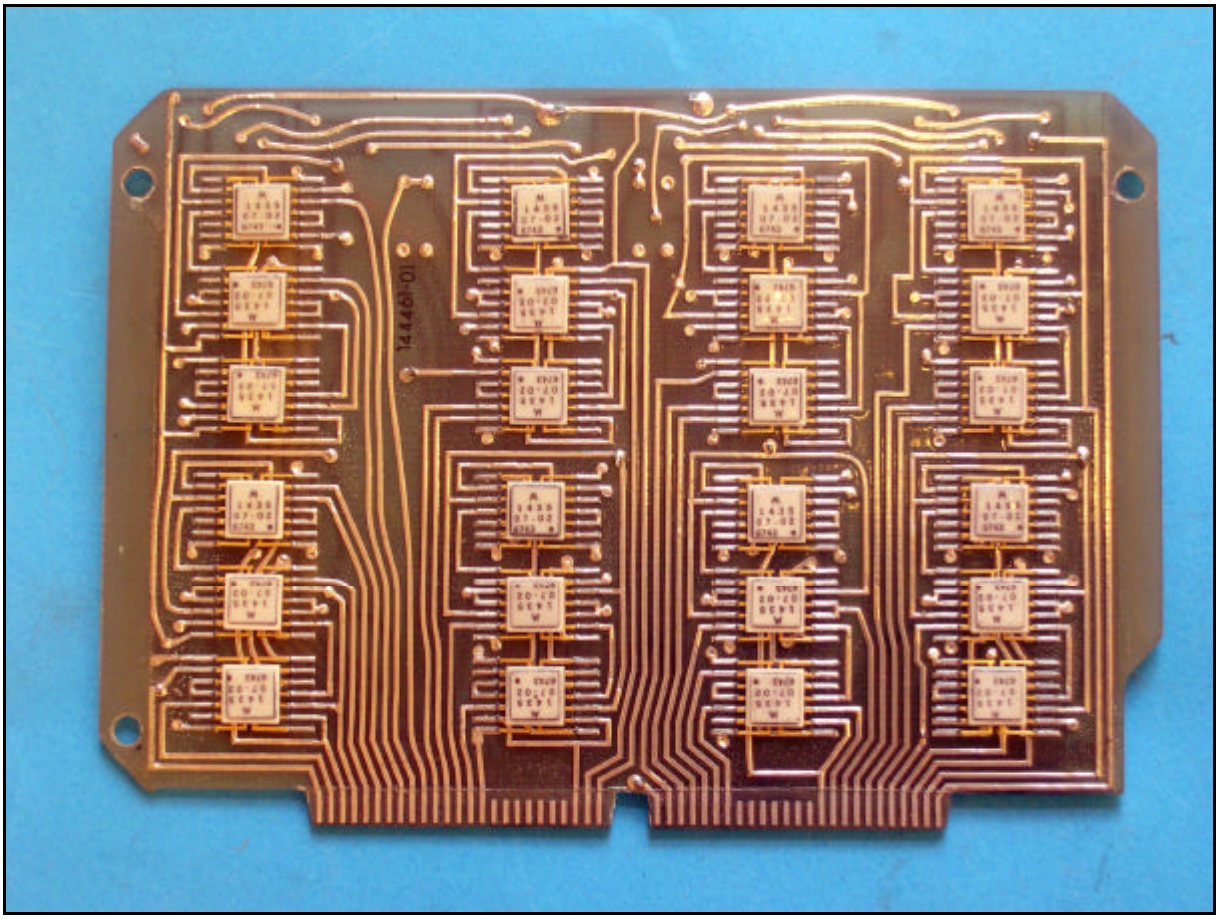
Mit dem Übergang zu Multilayer-Leiterplatten mit inneren Verdrahtungsebenen wurde der Herstellungsprozess für diese noch einmal modifiziert: Die einzelnen Lagen werden zunächst separat geätzt, dann miteinander bei gleichzeitiger Anwendung von Hitze und Druck verbacken. Abschließend wird die Platte gebohrt und aufgalvanisiert, womit dann über die damit durchkontaktierten Bohrungen die elektrische Verbindung zwischen den verschiedenen Verdrahtungsebenen hergestellt wird.

In der Praxis werden üblicherweise Multilayer-Leiterplatten mit 4 bis 12 Ebenen eingesetzt, für besondere Anwendungen (z.B. Großrechner) kommen aber auch bis zu 42 Ebenen zum Einsatz.

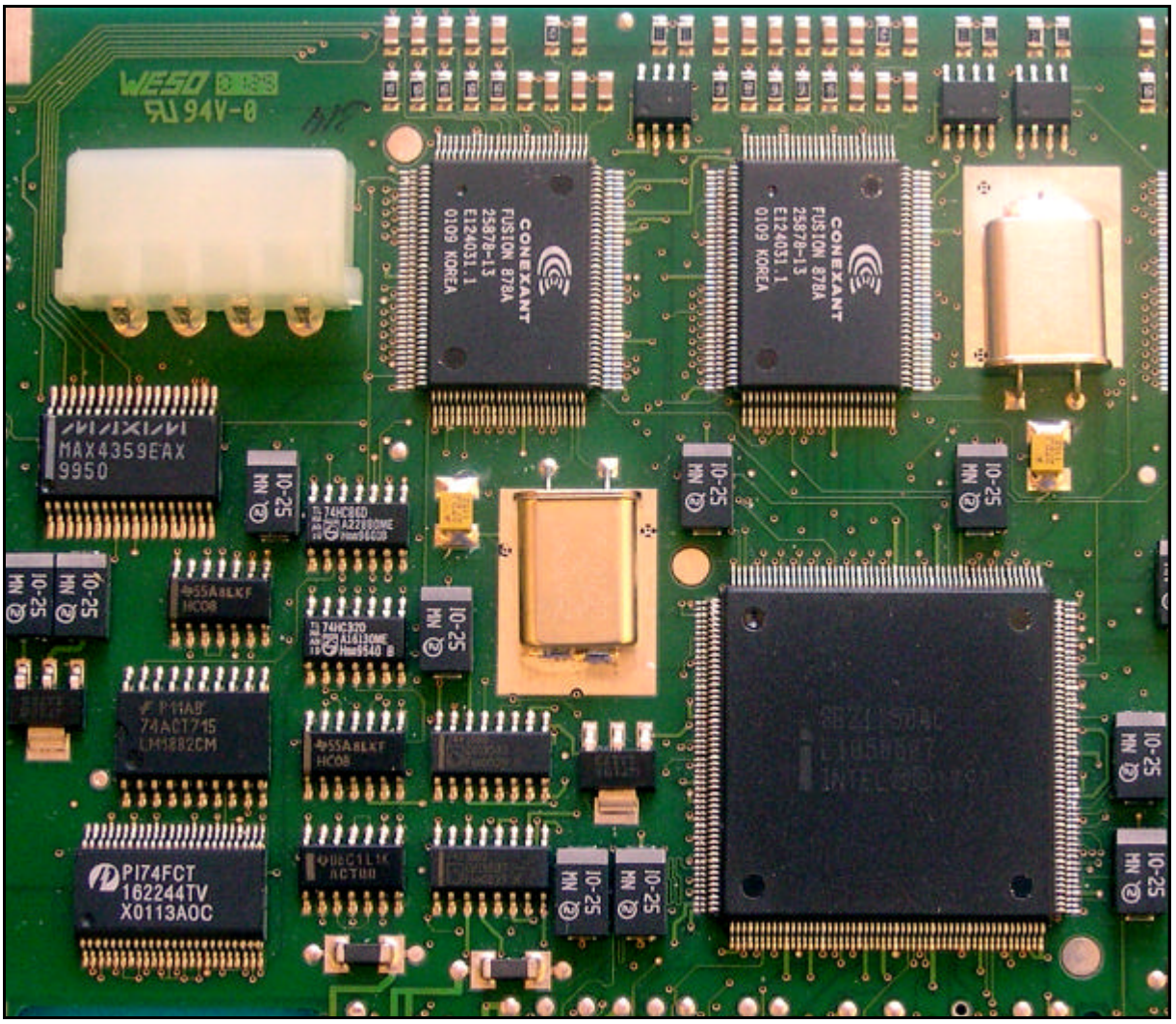


Ausschnitt aus einer CPU-Baugruppe in Multilayertechnik aus einem Sperry-Univac Großrechner von 1988. Die Leiterbahnen verlaufen aus Gründen der hochfrequenten Abschirmung im Inneren der Leiterplatte und sind daher nicht sichtbar.

Ein weiterer, bedeutender Schritt in Richtung Rationalisierung und Miniaturisierung ist die weitgehend in den 90-er Jahren erfolgte Ablösung der mit Anschlußdrähten versehenen Bauelemente, die in Bohrungen auf der Leiterplatte montiert werden durch Bauelemente mit flächigen Anschlüssen, die auf nur eine Seite der Leiterplatte gelötet werden. Diese, oberflächenmontierten, Bauelemente werden SMD-Bauelemente genannt. Mit der Verwendung von SMD-Bauelementen wurde die vollautomatische und praktisch fehlerfreie Fertigung von elektronischen Baugruppen möglich. Der Verzicht auf Montagebohrungen erlaubt die Nutzung beider Leiterplattenseiten für die Bestückung. Der Ersatz des Wellenlötverfahrens durch das Aufschmelz- oder Reflowverfahren, bei dem eine vor dem Lötvorgang auf die Leiterplatte aufgedruckte Lötpaste meist mittels Infrarotstrahlung aufgeschmolzen wird, erlaubte eine erhebliche Miniaturisierung der Anschlußgeometrien der Bauelemente.



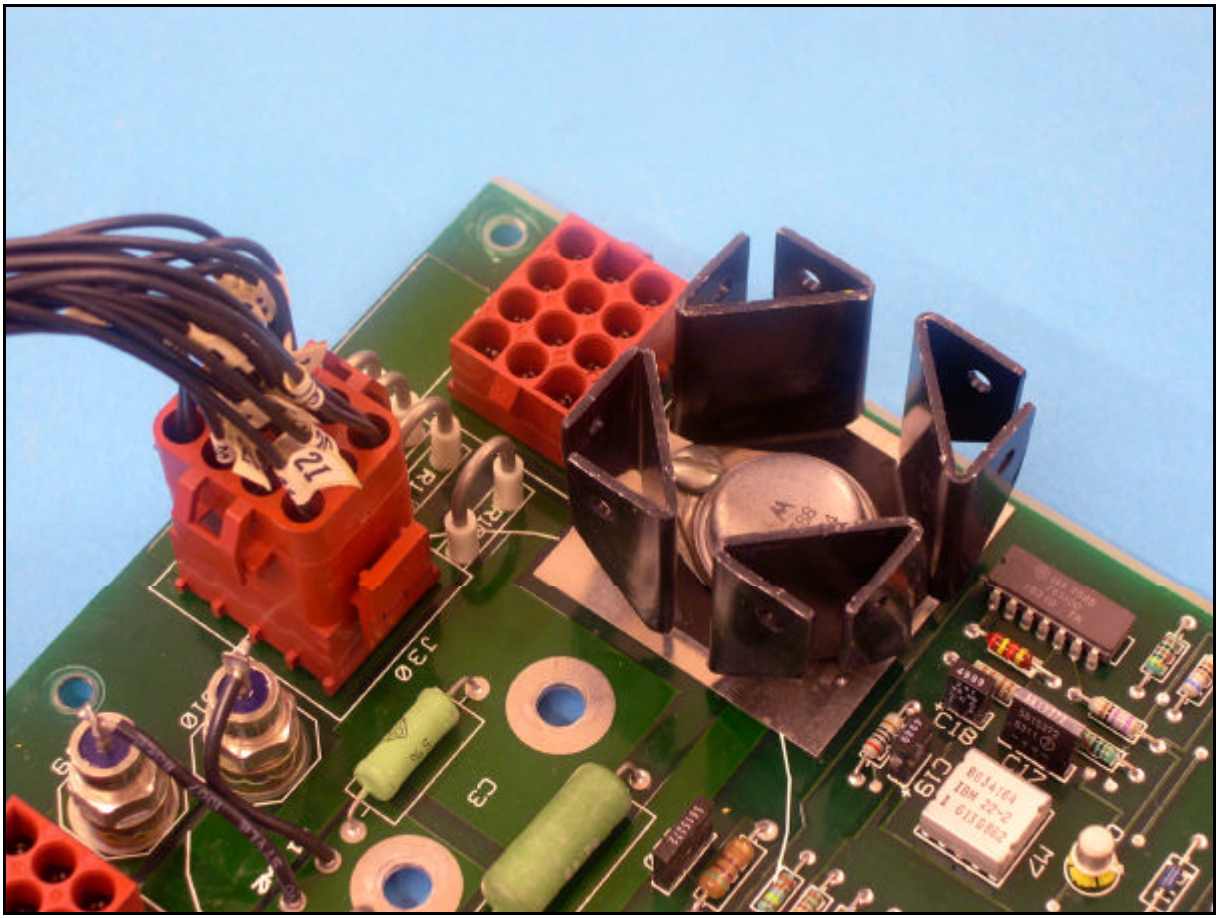
Eine der weltweit ersten SMD-Leiterplatten aus dem Jahr 1967, aus dem Navigationssystem eines amerikanischen Militärflugzeugs.



Ausschnitt aus einer heutigen SMD-Leiterplatte (8 Lagen) mit den heute üblichen feinen Anschlußrastern. Es handelt sich um eine Bilderfassungskarte aus der laufenden Produktion von Tigris-Elektronik, die Leiterplatte selbst ist von Würth-Elektronik

Da nachträgliche, manuelle Änderungen an einer SMD-bestückten Schaltung nur noch unter großen Schwierigkeiten möglich sind, wurden die Leiterplatten für dieses Labor jedoch bewußt in klassischer, bedrahteter Technik entworfen.

Noch ein Wort zur Anschlußtechnik der externen Verkabelung an die Leiterplatte. Zu Beginn des Einsatzes von Leiterplatten wurden die Anschlüsse an diese meist mit Einzeldrähten angelötet. Damit war eine nachträgliche Trennung von Leiterplatte und übrigem Geräteaufbau nicht mehr möglich. Praktischer ist jedoch der heute übliche Anschluß externer Komponenten über mehrpolige Steckverbinder und Kabelbäume, da dieser ein rasches und sicheres Austauschen der Leiterplatte ermöglicht.



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

Layoutentwurf der Leiterplatten für unser Monitorprojekt

Der erste Schritt des Layoutentwurfs bestand in der Zuweisung bzw. Erstellung der sogenannten „Footprints“ zu den einzelnen Bauelementen im Schaltplan. Ein „Footprint“ ist die Abbildung der geometrischen Eigenschaften eines Bauelements, bestehend aus Anschlußflächen und –Bohrungen und der Außenkontur. Die dem Layoutprogramm zur Verfügung stehenden Footprints sind in einer Bibliothek abgelegt. Da wir bei diesem Projekt einige unübliche, bisher bei Tigris-Elektronik noch nicht verwendete, Bauelemente einsetzten, mußten für diese zunächst Footprints erstellt und in die Bibliothek eingebunden werden. Hierbei handelte es sich insbesondere um Drosseln, Transformatoren, große Kondensatoren und Kühlelemente.

Im nächsten Schritt wurde über die grundsätzliche Auslegung der beiden benötigten Leiterplatten, die Leiterplatte des „Mainstream“-Monitors und der des Bildkippteils in Röhrentechnik, nachgedacht.

Es wurde, wie bereits erwähnt, schon im Vorfeld entschieden, beide Leiterplatten in bedrahteter Technik auszuführen, um die Bestückung, die Inbetriebnahme und spätere, sicher zu erwartende nachträgliche Schaltungsänderungen zu vereinfachen. Nahezu alle benötigten Bauelemente waren in bedrahteter Form erhältlich, einige wenige Bauelemente, bei denen das nicht der Fall war wurden als SMD-Versionen vorgesehen.

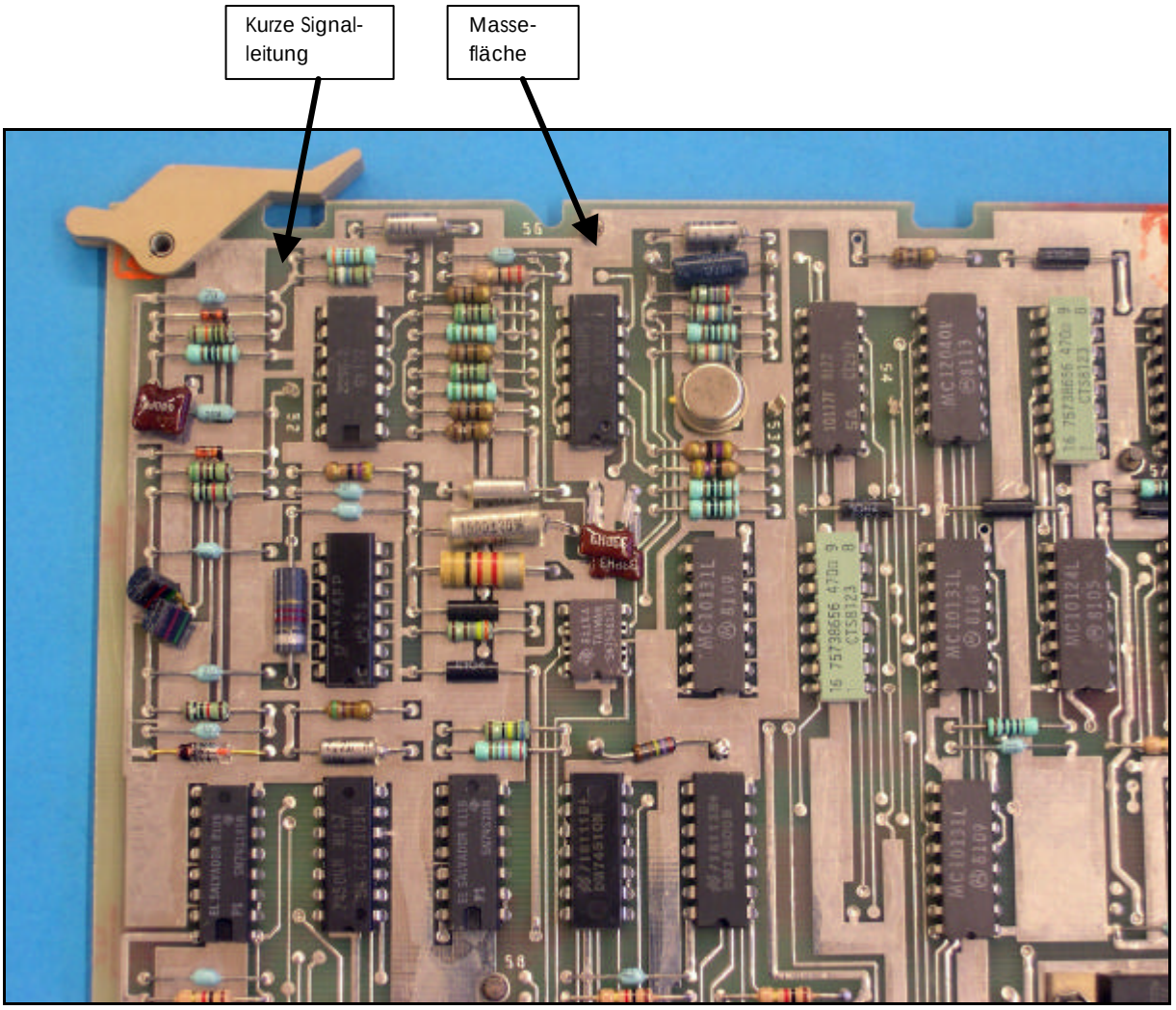
Weiterhin wurde entschieden, wenn irgend möglich beide Leiterplatten nicht als Multilayer, sondern als zweiseitige Leiterplatte mit einer möglichst flächendeckenden Masselage, zu realisieren, um Mehrkosten durch eine unnötig hohe Lagenanzahl zu vermeiden. Weiterhin wurde angestrebt, ebenfalls aus Gründen der Kostenreduktion, die Fläche beider Leiterplatten möglichst klein zu halten.

Anschließend wurde über ein hochfrequenzgerechtes und störsicheres Layout nachgedacht.

Hierbei wurden auch die folgenden, allgemeingültigen, „Goldenen Kochbuchregeln“ beachtet:

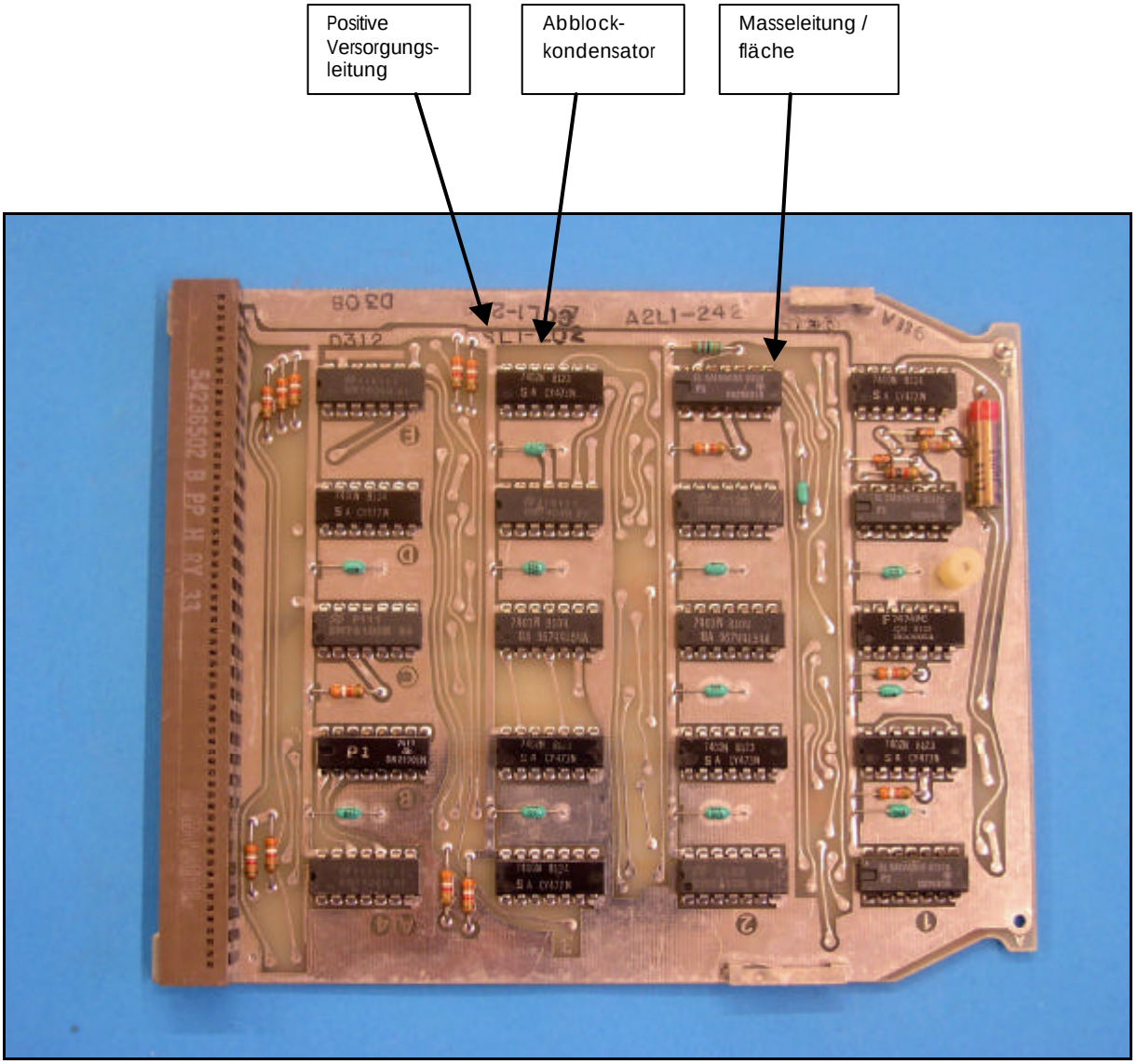
- Mindestens eine zweilagige Platine mit Massefläche verwenden
- Platine in Funktionsblöcke einteilen
- Platzieren der Bauteile gemäß dem Signalfluss
- Platziere zuerst die Bauteile im Funktionsblock, bevor Verbindungen geroutet werden
- Halte alle Schleifenflächen so klein wie möglich
- Sternförmige Masseführung zur Vermeidung von Verkopplungen
- Platziere die Bauteile so, dass die Längen von hochfrequenten bzw. analogen Signalleitungen gering bleiben
- Betriebsspannungen durch Kondensatoren abblocken
- Unbenutzte Pins von Logic-Gates müssen mit GND oder VCC verbunden sein (Ausnahme: Schmittrigger-Eingänge)
- Leitungen in benachbarten Layern sollten rechtwinklig zueinander verlaufen
- Leitungen sollten nicht eine Unterbrechung in der Masse-Lage kreuzen

Wir orientierten uns zudem an zur Verfügung stehenden Leiterplatten, auf denen die Maßnahmen zum Erreichen eines hochfrequenzgeeigneten Layouts deutlich sichtbar sind:



Hochfrequente PLL-Schaltung auf einer zweiseitigen Leiterplatte, Ausschnitt aus einer Baugruppe aus einem Wechselplattenspeicher von ControlData von 1981.

Bei dem hier gezeigten Beispiel ist deutlich die auf möglichst vollständige Abdeckung zielende Ausführung der Masseflächе, insbesondere im links oben auf dem Bild sichtbaren Analogteil zu erkennen. Weiterhin erkennt man bei Betrachtung des links oben liegenden Analogteils, daß die geschickte Plazierung der Bauteile hier zu möglichst kurzen Signalverbindungen führt.

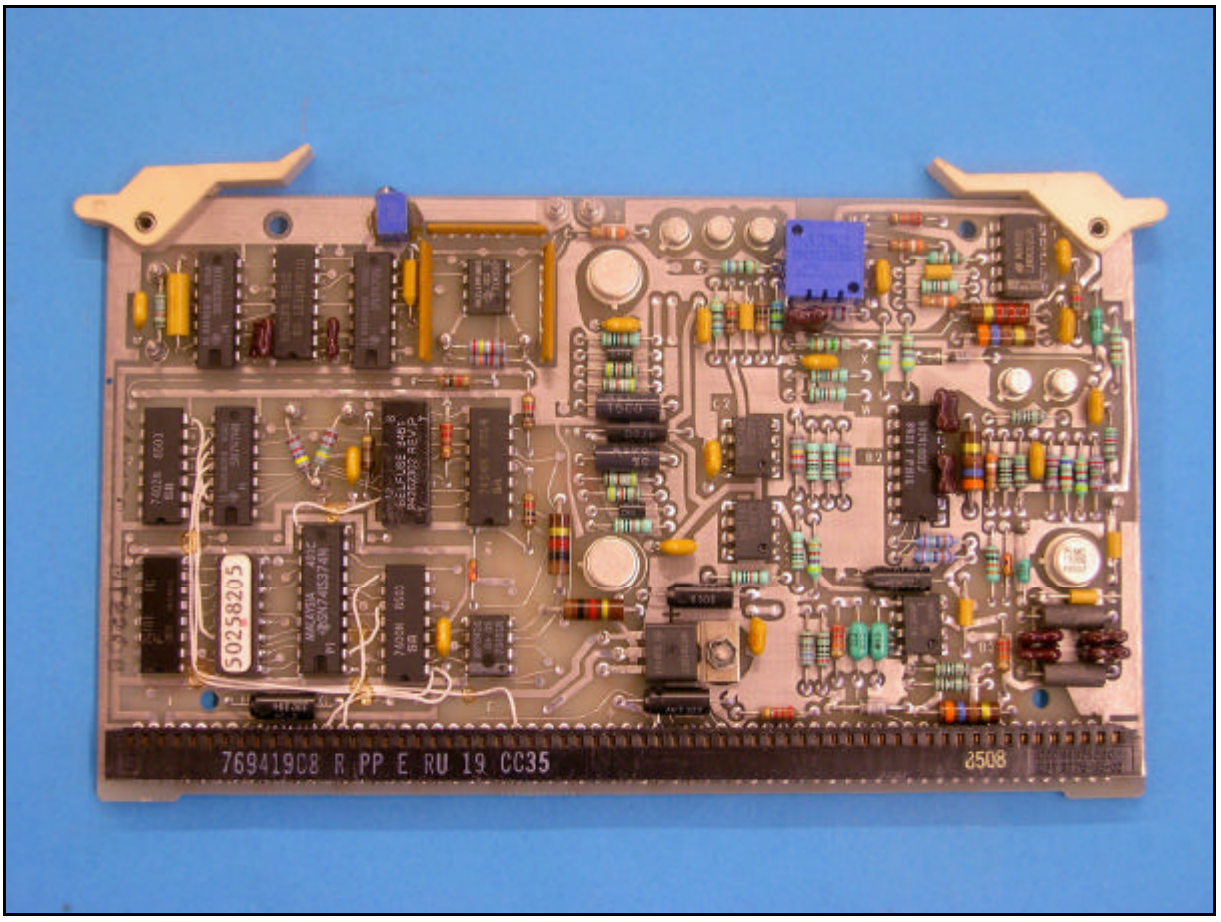


Zweiseitig ausgeführte Digitalbaugruppe aus einem Wechselplattenspeicher von Control Data aus den frühen 80-er Jahren.

Man erkennt hier deutlich die regelmäßige Struktur aus positiver Versorgungsleitung, Abblockkondensatoren und der flächig ausgeführten Masseleitung. Die bei nahezu allen Logikbausteinen einheitliche Belegung der „Eckanschlüsse“ mit Masse- und Versorgungsspannung erleichtert die Realisierung dieser regelmäßigen Struktur

Digitalteil

Analogteil

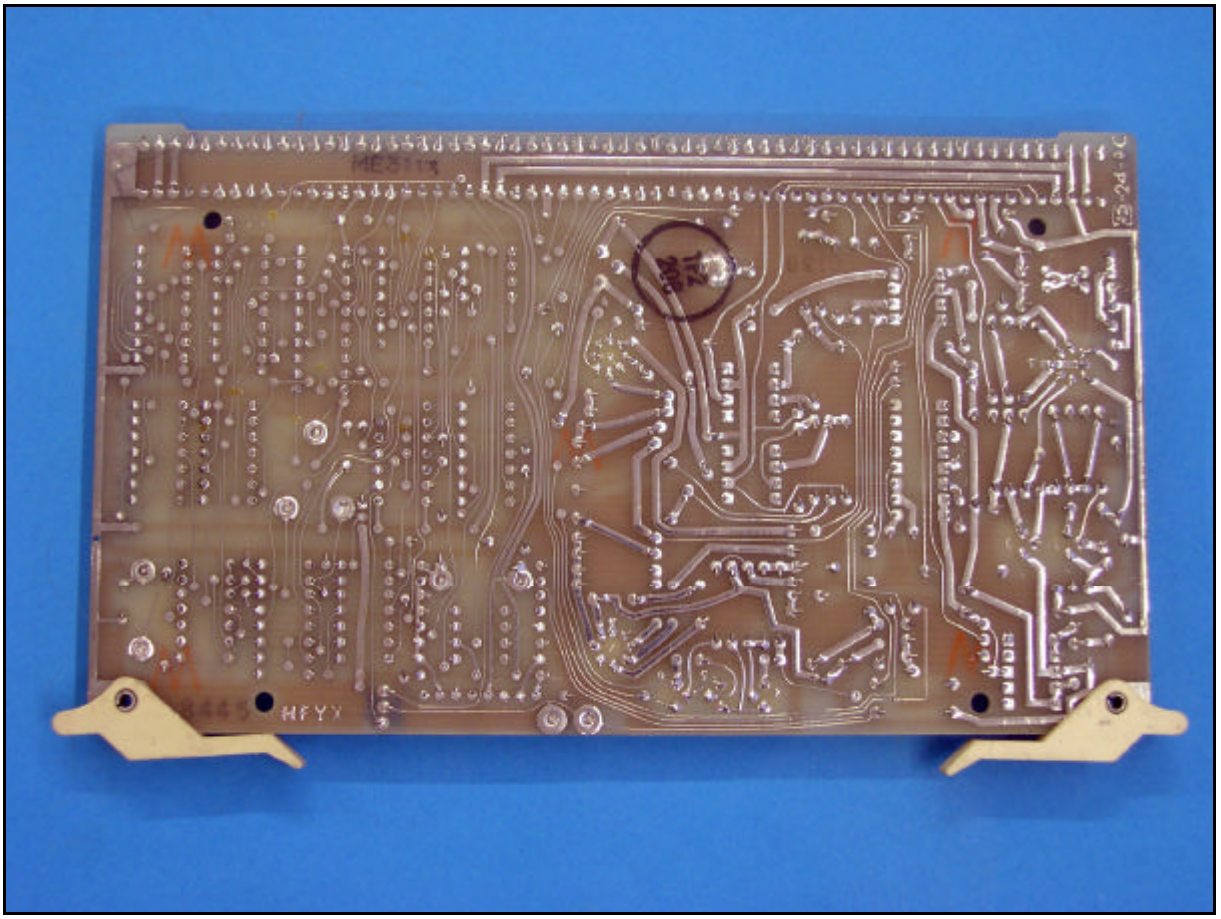


Zweiseitig ausgeführte, aus analogen und digitalen Schaltungsteilen bestehende, Baugruppe aus einem Wechselplattenspeicher von Control Data aus den frühen 80-er Jahren.

Man erkennt hier deutlich die unterschiedliche layouttechnische Ausführung des Analogteils mit großen Masseflächen und einer, durch die auf kurze Signalleitungslängen optimierte Bauelementeplazierung unregelmäßigen Struktur, und den in regelmäßiger Struktur ausgeführten Digitalteil mit seinen an die Eckanschlüsse der Bausteine führenden Versorgungs- und Masseleitungen

Digitalteil

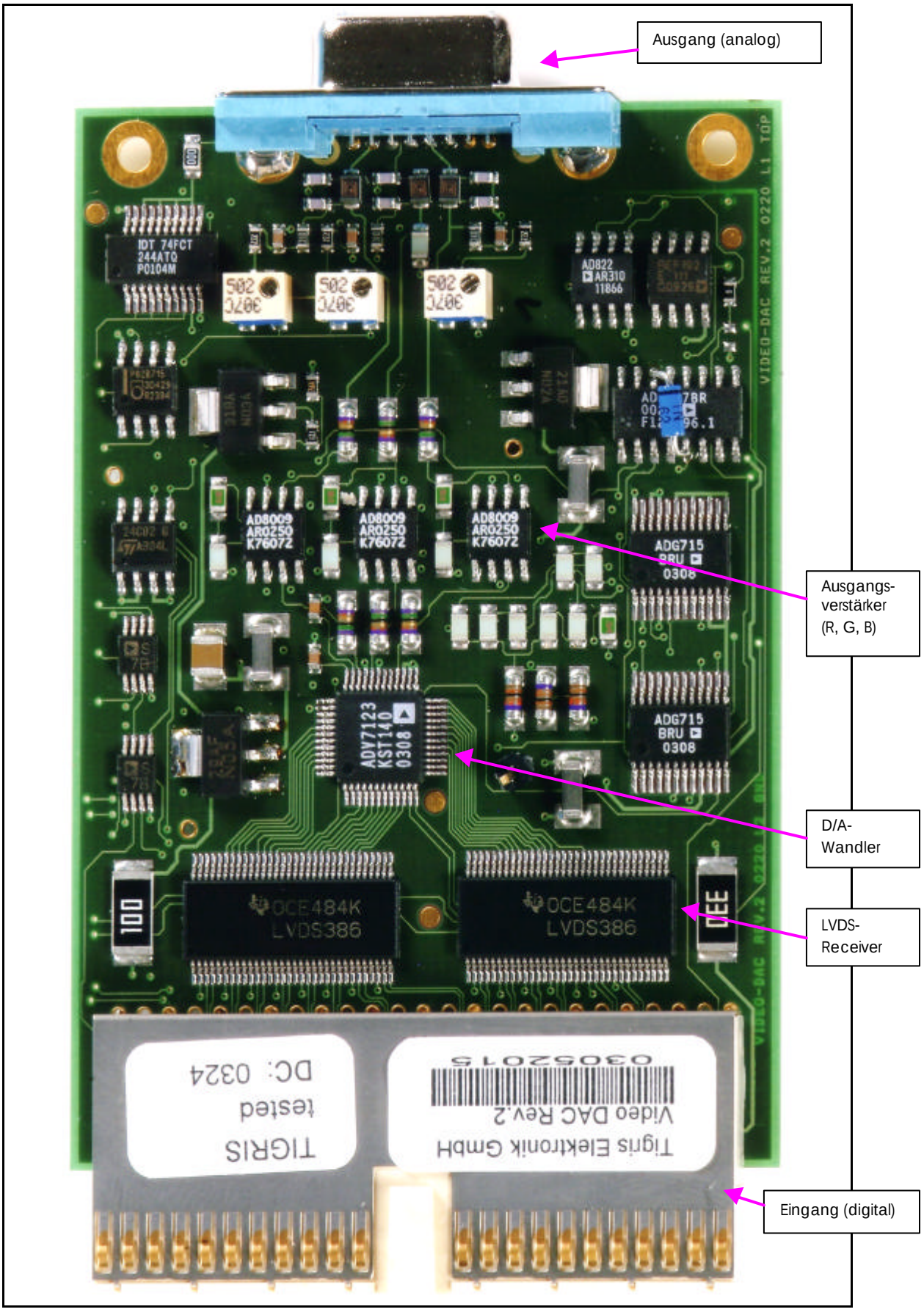
Analogteil



Zweiseitig ausgeführte, aus analogen und digitalen Schaltungsteilen bestehende, Baugruppe aus einem Wechselplattenspeicher von Control Data aus den frühen 80-er Jahren, Ansicht von der Unterseite.

Man erkennt deutlich die gegenüber dem Digitalteil völlig abweichende Art der Leitungsführung des Analogteils, die auf möglichst geringe Länge von Signalleitungen hin optimiert ist.

Auf der Folgeseite ist eine Video-Ausgabebaugruppe von Tigris-Elektronik aus dem Jahr 2002 abgebildet. Hier ist die bereits angesprochene Plazierung der Bauelemente im Sinne des Signalflusses deutlich zu erkennen.



Video-Ausgangsbaugruppe von Tigris-Elektronik (4-Lagen Multilayer) mit Plazierung der Komponenten im Sinne des Signalflusses

Als erstes erstellten wir das Layout der Röhren-Bildkippstufe.

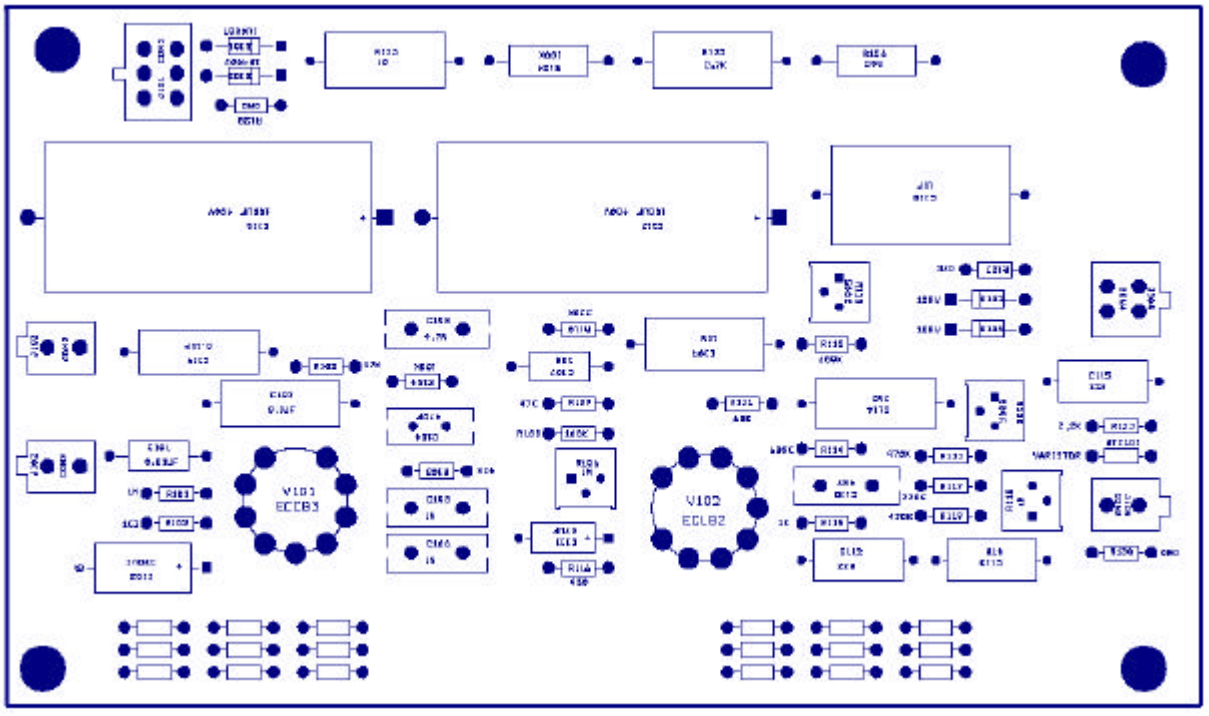
Dabei entschieden wir uns für eine zweilagige Platine, wobei der Top-Layer als durchgängige Masseflächeausgeführt wurde.

Auf den folgenden Bildern kann man sehr gut die kurzen Leiterbahnen und die dem Signalfluß folgende Anordnung der Bauelemente, erkennen.

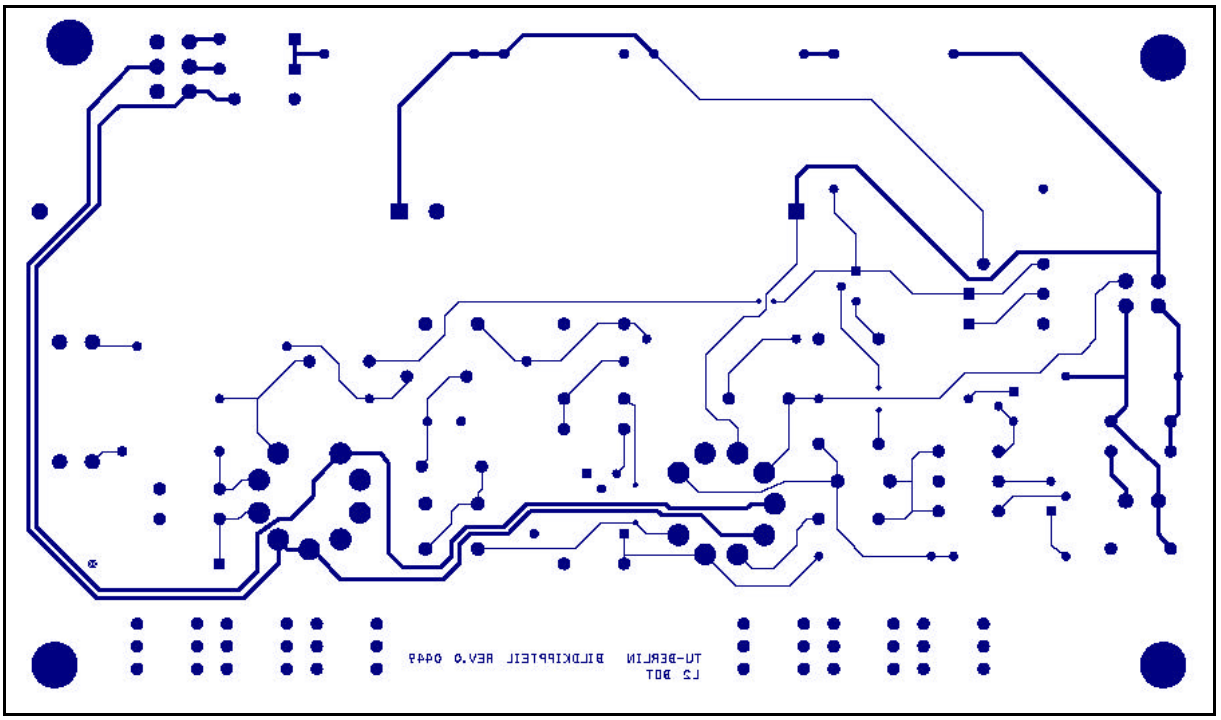
Im linken und unteren Bereich fallen außerdem zwei starke parallele Leitungen auf, die den Heizstrom führen. Die gewählte Stärke der Leiterbahnen ergibt sich aus der relativ hohen Strombelastung von ca. 600mA.
Da die Heizung mit Wechselstrom erfolgt, wurde die Hin- und Rückleitung bewusst parallel ausgeführt, damit sich die von ihnen ausgehenden Magnetfelder weitgehend kompensieren.

Nach der, die meiste Zeit in Anspruch nehmenden, Plazierung der Bauelemente, di e zum einen so erfolgen mußte, daß empfindliche Signalleitungen möglichst kurz sind, aber auch sich gegenseitig störende Schaltungsteile möglichst weit voneinander entfernt liegen und weiterhin Kreuzungen von Leiterbahnen möglichst vermieden werden war die Verlegung der Signal- und Versorgungsleiterbahnen vergleichsweise einfach. Lediglich die parallele Verlegung der breiten Heizkreisleiterbahnen erforderte einige Mühe.

Hierbei konnte ich erste praktische Erfahrungen sammeln.



Anordnung der Bauelemente der Röhrenbildkippstufe



Leiterseite der Röhrenbildkippstufe

Beim Layout der Mainstreamplatine, angespornt durch die schnelle Fertigstellung der Röhrenplatine, strebten wir auch hier ein 2-Layer-Board an. Jedoch die Umsetzung gestaltete sich hier wesentlich schwieriger.

Da hier sehr viele unterschiedliche Versorgungsspannungen nötig waren, unter anderem auch +750V, mussten hier unter anderem große Isolationsabstände eingehalten werden. Zum Teil mussten beim Routen Umwege oder Durchkontaktierungen in Kauf genommen werden, um kritische Funktionsgruppen nicht mit diese störenden Signalen zu durchdringen.
Einen nicht unerheblichen Anteil an der Gesamtfläche hat das Netzteil, da es viele Glättungskondensatoren mit großen Kapazitäten und damit großen Abmessungen beinhaltet.

Wenn man sich aber an die oben aufgeführten „Goldenen Regeln" hält und systematisch vorgeht ist auch solch eine große Platine zu bewältigen.

Als erstes haben wir uns auf einem Blatt Papier ein Grundgerüst gebaut und Grundsätzliche Überlegungen angestellt, wo z.B. Bedienelemente und Steckverbindungen am besten untergebracht werden. Natürlich wurde der Signalfluss dabei ebenso berücksichtigt, wie die Sicherheit der Laborteilnehmer bei der späteren Inbetriebnahme und Messung der Schaltung. Hierzu wurden alle Bereich mit Spannungen größer 50V räumlich zusammengefaßt und von den anderen Bereichen separiert.

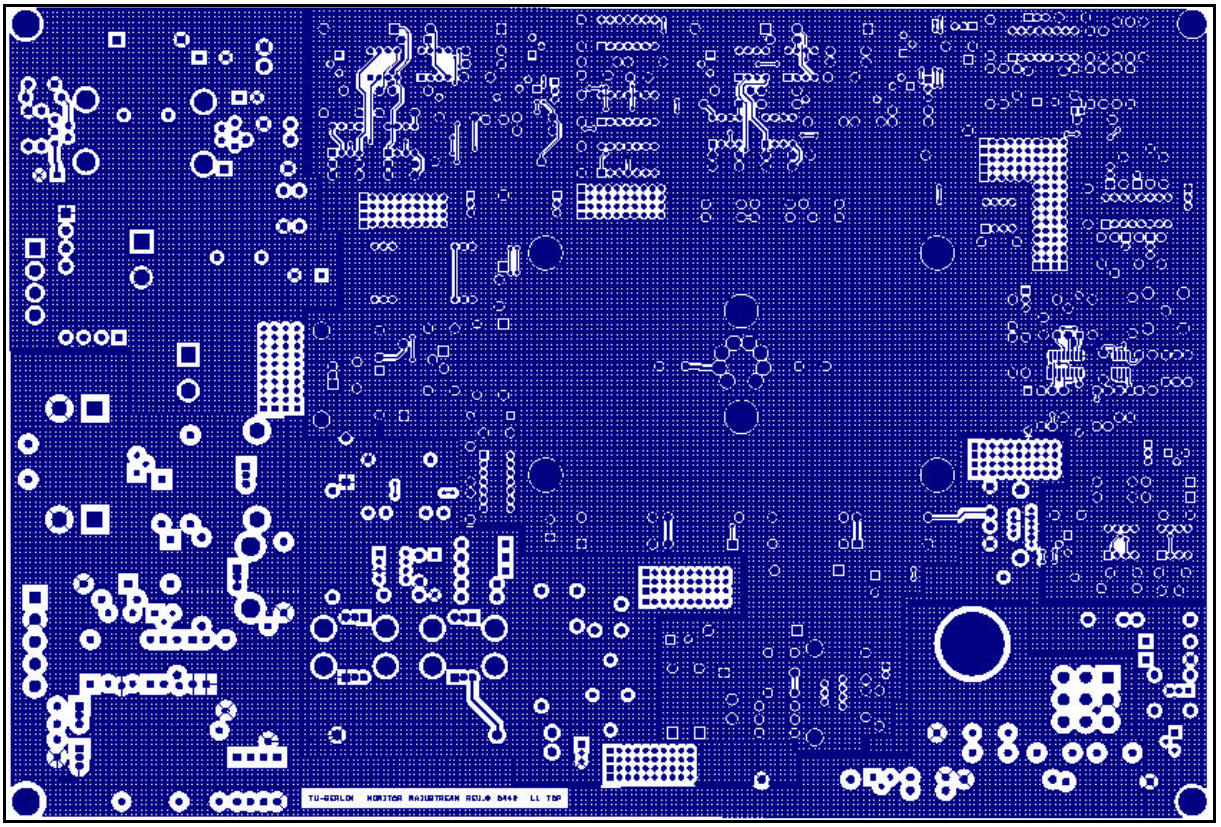
Der ganze linke Teil der Platine wird vom Netzteil dominiert, oben finden sich von links nach rechts der Vertikal- und Horizontal-Generator gefolgt von der PLL. Auf der rechten Seite sind von oben nach unten (entsprechend dem Signalfluss) der Sync-Separator, die Schwarzwertklemmung und der Videoverstärker untergebracht.
Die Mitte des Boards wird durch den Horizontalverstärker und die Unterseite durch den Vertikalverstärker bestimmt.

Nachdem die Grobplazierung der Bauelemente abgeschlossen war, versuchten wir durch Umplazieren einzelner Bauteile die Länge der Signalwege in den einzelnen Funktionsgruppen so gering wie möglich halten.

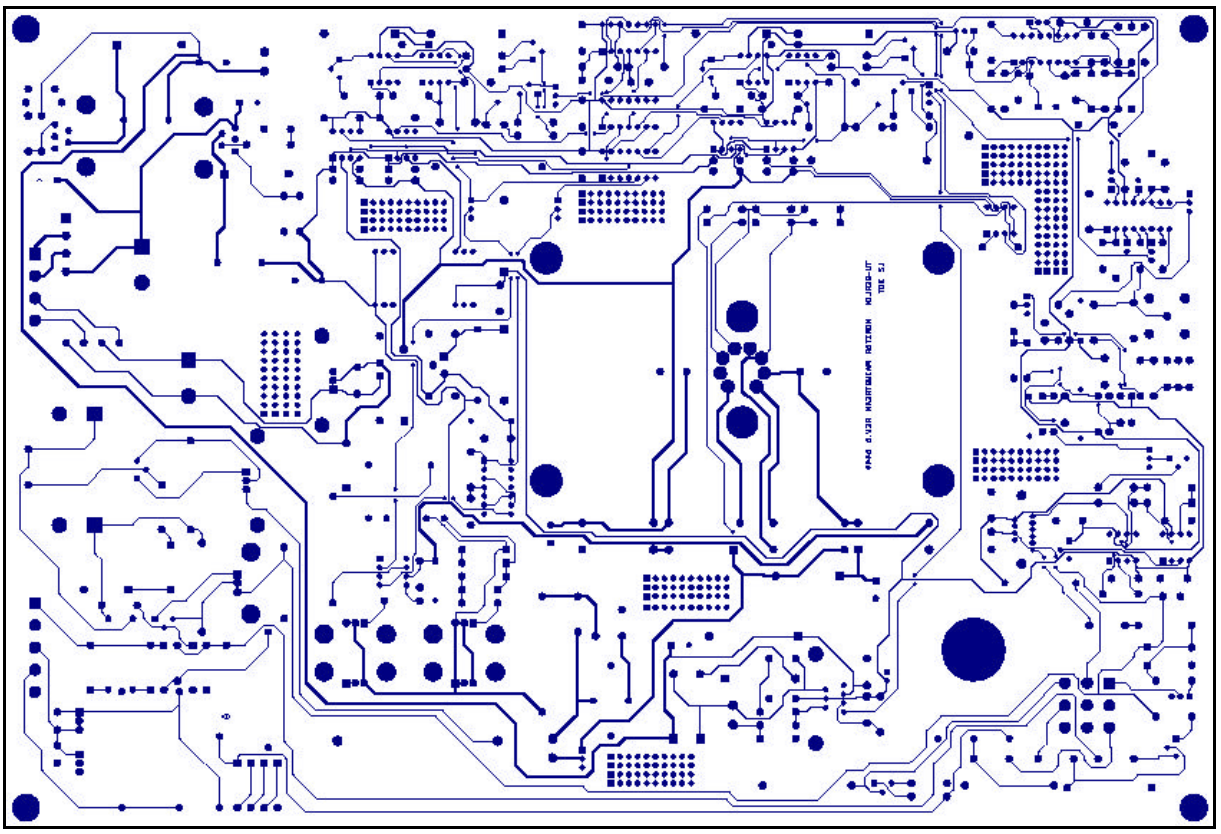
Nach dem Routen der Funktionsgruppen ging es daran die Verbindungen zwischen den Gruppen herzustellen, hierzu war es teilweise nötig auf die Masseseite durchzukontaktieren und die Verbindung auf dem Toplayer auszuführen, wobei jedoch immer versucht wurde die Unterbrechung in der Massefläche so gering wie möglich zu halten.

Nachdem das Bottomlayer fertig geroutet war und wir überprüft hatten, dass die vorgesehenen Isolationsabstände und Leiterbahnbreiten eingehalten wurden, konnten wir mit der Verlegung der Massefläche auf dem Top-Layer beginnen.

Um einwandfreie Funktion zu gewährleisten wurde die Massefläche in drei Teilbereiche, welche sich durch unterschiedliche Isolationsabstände zu den Lötaugen unterschieden, eingeteilt.
Diese Bereiche sind auf dem Bild relativ gut auszumachen.
Der erste dieser Bereiche ist rechts oben und nimmt rund die Hälfte der Gesamtfläche ein. Hier ist kein großer Abstand nötig, da die hier vorhandenen Spannungen 50V nicht überschreiten.
Im nächsten Bereich, welcher sich direkt an den ersten anschließt, sind größere Abstände auszumachen, die daherrühren, dass hier größere Spannungen bis zu 250V vorkommen.
Im dritten Abschnitt, welcher sich links und unten auf der Platine befindet, sind die Abstände am größten. In diesem Bereich sind Spannungen bis zu 1200V vorhanden.



Top-Layer der Monitorplatine



Bottom-Layer der Monitorplatine