

1kW LDMOS Endstufe für Kurzwelle

Autor: Kurt Moraw, DJ0ABR

Bezugsquelle: www.helitron.de

Einleitung:

Die grundsätzlichen Überlegungen welche zur Entwicklung dieser Platine geführt haben findet man auf www.dj0abr.de im Kapitel „KW LDMOS PA“.

Dort kann man auch das komplette **Schaltbild**, den **Bestückungsplan** und die **Stückliste** herunterladen.

Sowohl Schaltbild als auch Platine sind in „Eingangsteil“ und „Ausgangsteil“ aufgeteilt. Die Platine wird aber als Einzelstück gefertigt, weil das kostengünstiger ist und wird daher nach dem Bestücken der SMD Bauteile getrennt.

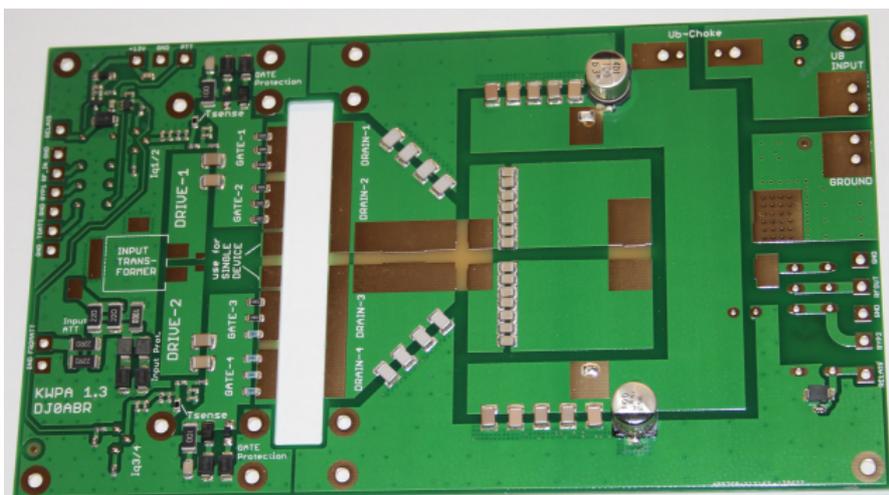
Dieses Dokument ist ebenfalls als pdf herunterzuladen, das ist dann mit Farbfotos besser als der Papierausdruck.

Video zum Aufbau der Platine: bitte dem Link im Bereich KW LDMOS PA auf www.dj0abr.de folgen. Er führt zu Youtube. Dort bitte das Video „2x BLF188XR Amp with WATERCOOLING (Part-2)“ ansehen, es zeigt den Aufbau der Platine.

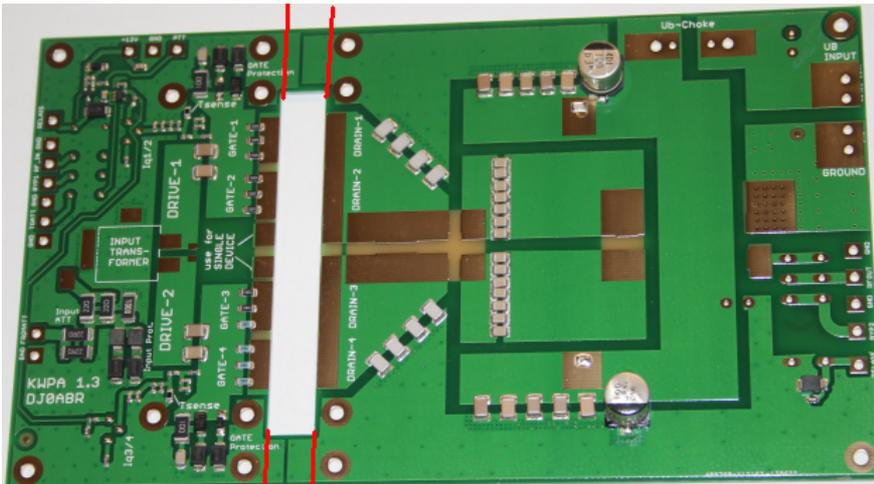
SMD Bestückung:

falls sie eine Platine ohne SMD-Vorbestückung bezogen haben werden als erstes sämtliche SMD Bauteile aufgelötet.

Danach sieht die Platine so aus:



Jetzt ist es Zeit den Ein- und Ausgangsteil zu trennen. Dazu sägt man mit einer Bügelsäge die Platine an den rot gekennzeichneten Stellen auseinander (4 Schnitte).



Reihenfolge des Aufbaus:

bewährt hat sich folgende Reihenfolge:

1. Planung der Kupferplatte (Heatspreader, siehe unten) anhand der fast leeren Platine mit Hilfe des Maßbildes im Anhang
2. Bestückung der bedrahteten Bauteile (noch keine Ringkerne)
3. Fertigung der Kupferplatte
4. Auflöten des LDMOS Transistors (oder von 2 Stk)
5. Montage der Platinen
6. Herstellung und Auflöten der Ringkerne
7. Verdrahtung und Inbetriebnahme

Bestückung der bedrahteten Bauteile:

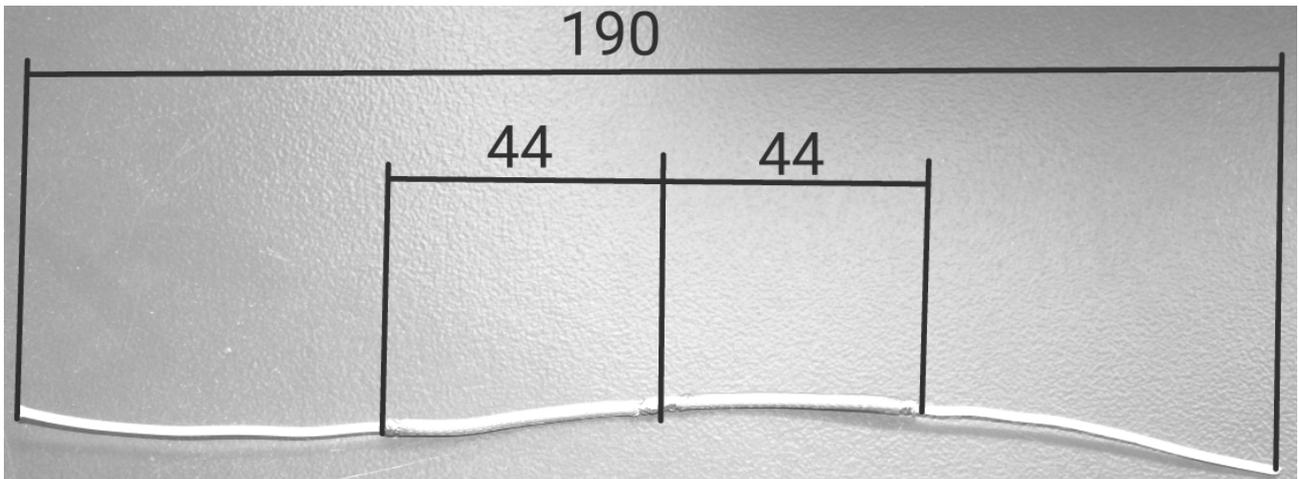
es wird bestückt, siehe auch Stückliste:

2 Relais, zwei Trimmer 250 Ohm, zwei 470uF/63V Elkos und verschiedene Ferrite, welche im folgenden separat beschrieben sind.

Eingangs-Ringkern:

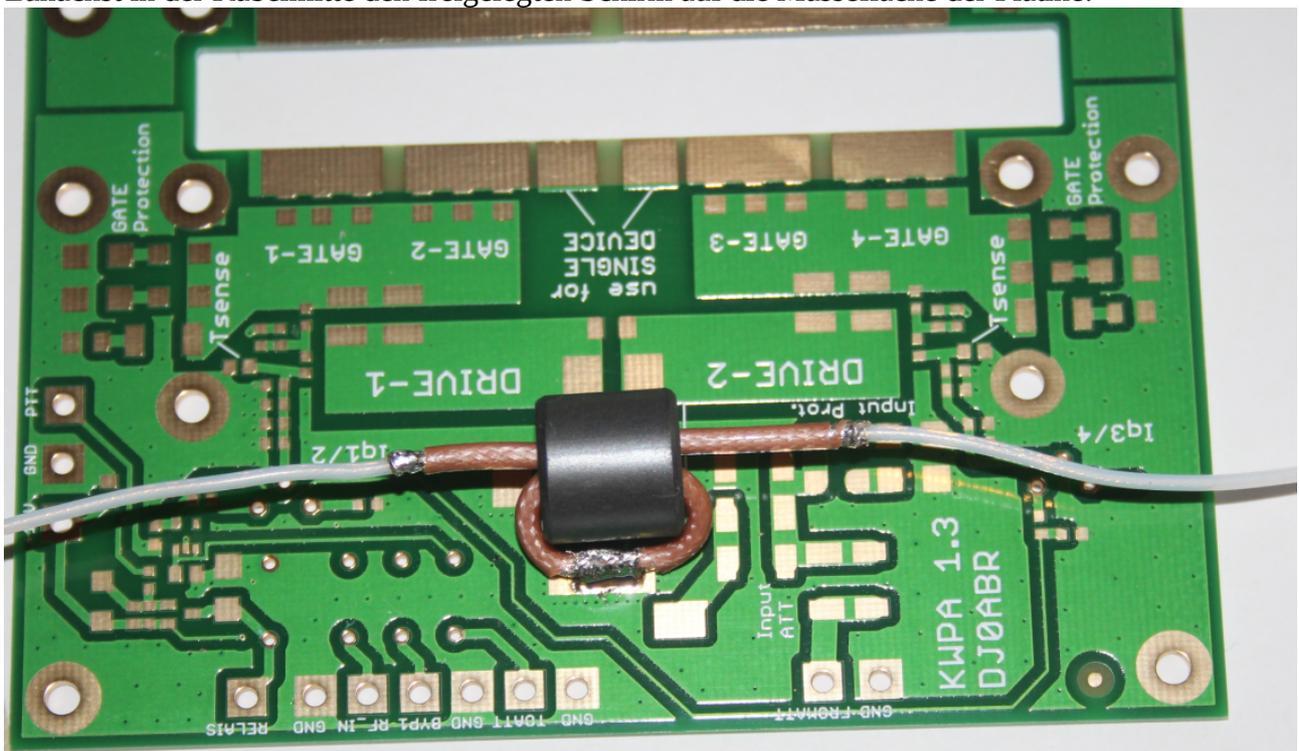
dieser Kern ist ein 4:1 Übertrager, dessen Aufbau etwas ungewohnt sein kann, daher hier detaillierte Bilder vom Aufbau. Meist muss man das Kabel 2x anfertigen bis es richtig passt, das ist normal und passiert fast jedem bei diesem Kern.

Man nimmt den Ferrit: Laird 28B0562-100 sowie ein Stück RG-316 Koaxkabel. Das Koaxkabel wird mit folgenden Längen vorbereitet:

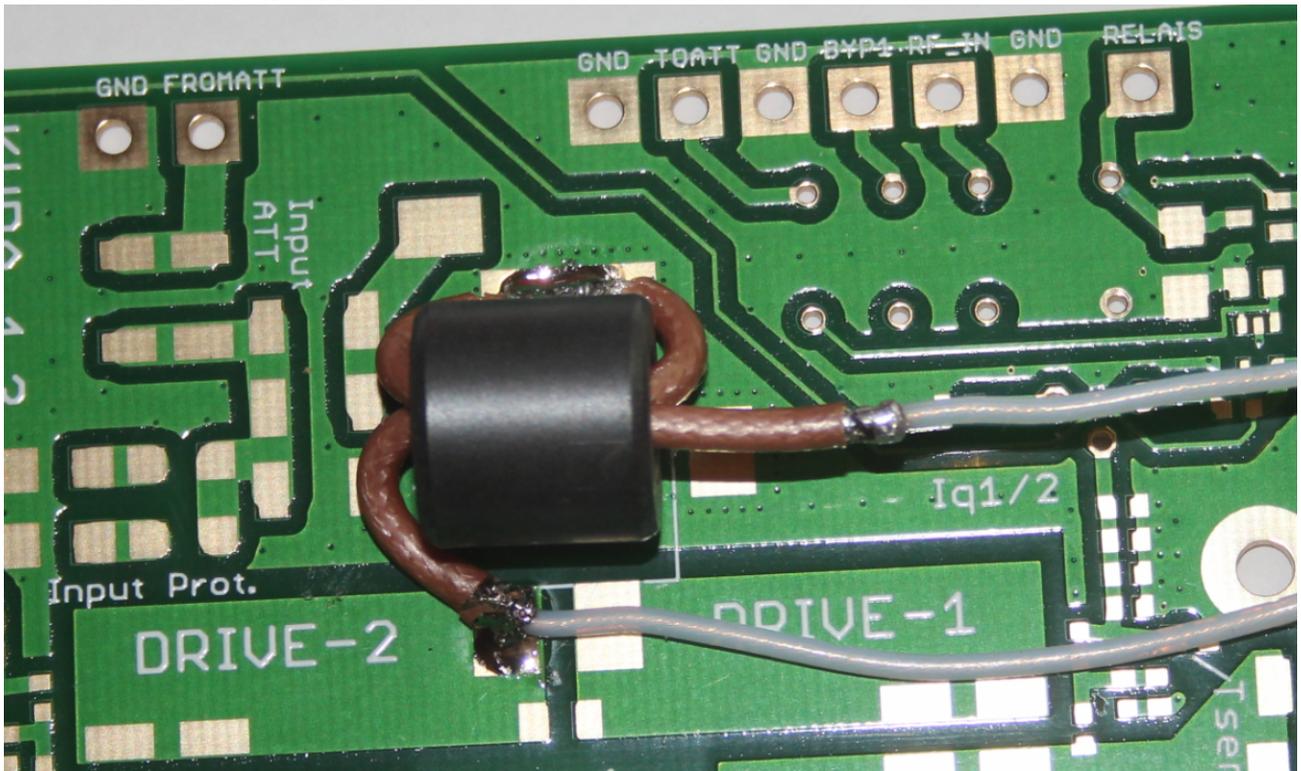


- * ein 190mm langes Kabelstück
- * genau in der Mitte 5mm des Mantels entfernen und den Schirm verzinnen
- * rechts und links, 44mm von der Mitte, den Mantel sowie den Schirm entfernen
- * den Mantel dann noch um noch 3mm mehr entfernen, und das kurze Stück des Schirms verzinnen.

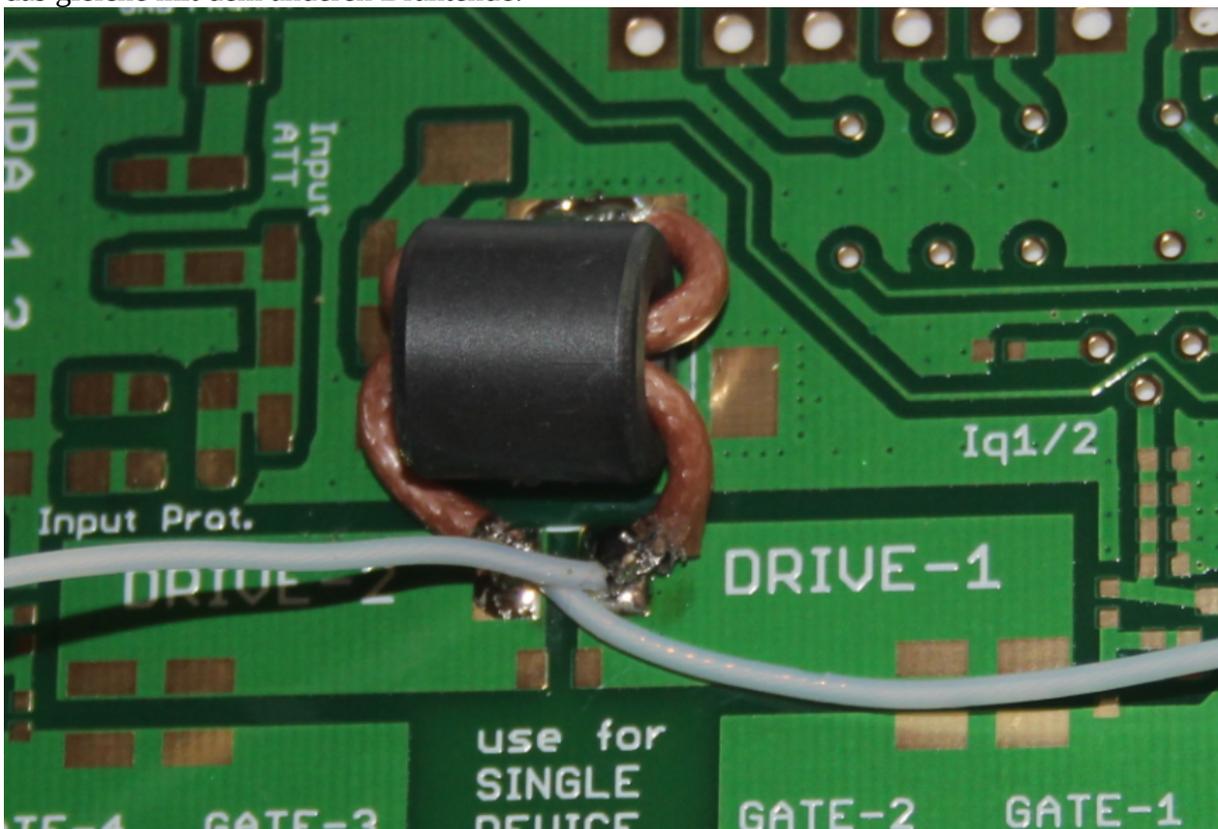
Danach wird das Kabel so durch den Kern geschlungen und an der Platine angelötet.
Zunächst in der Kabelmitte den freigelegten Schirm auf die Massefläche der Platine:



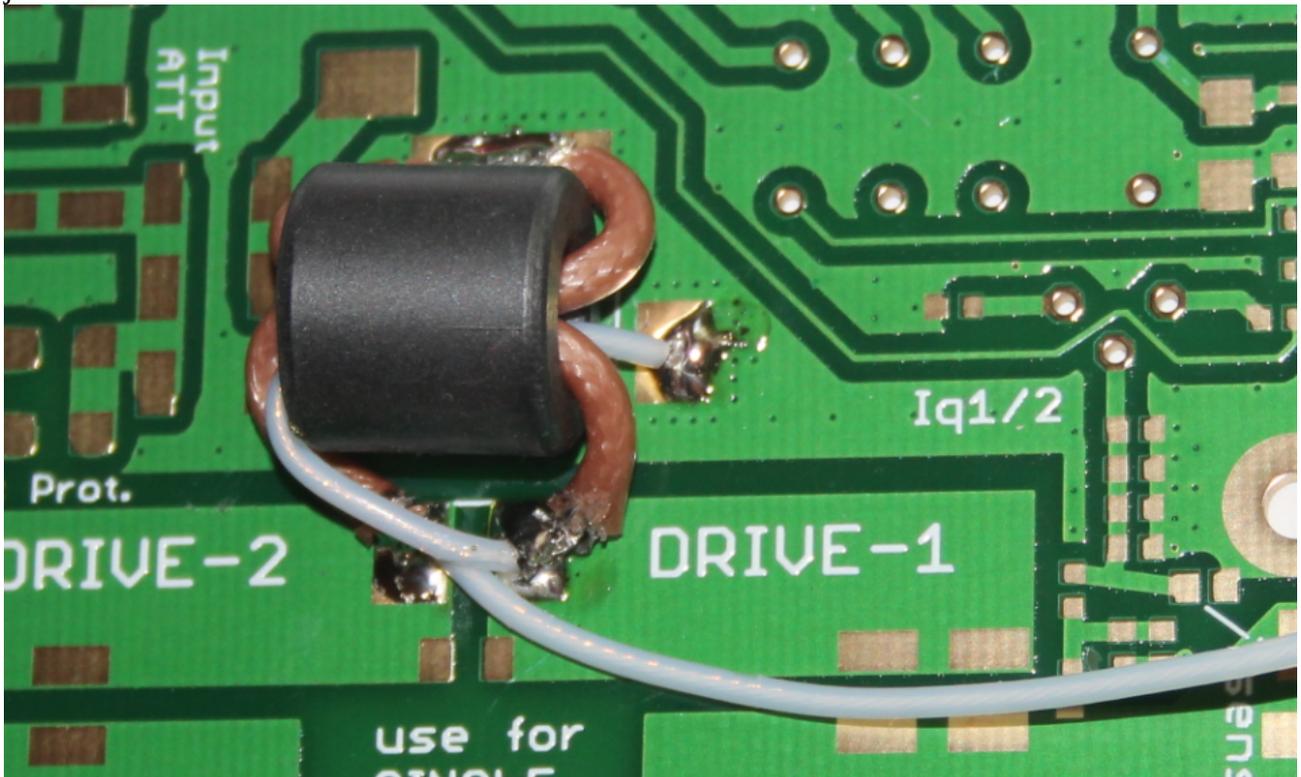
Dann das eine Drahtende auf die andere Seite umknicken und so den Schirm anlöten:



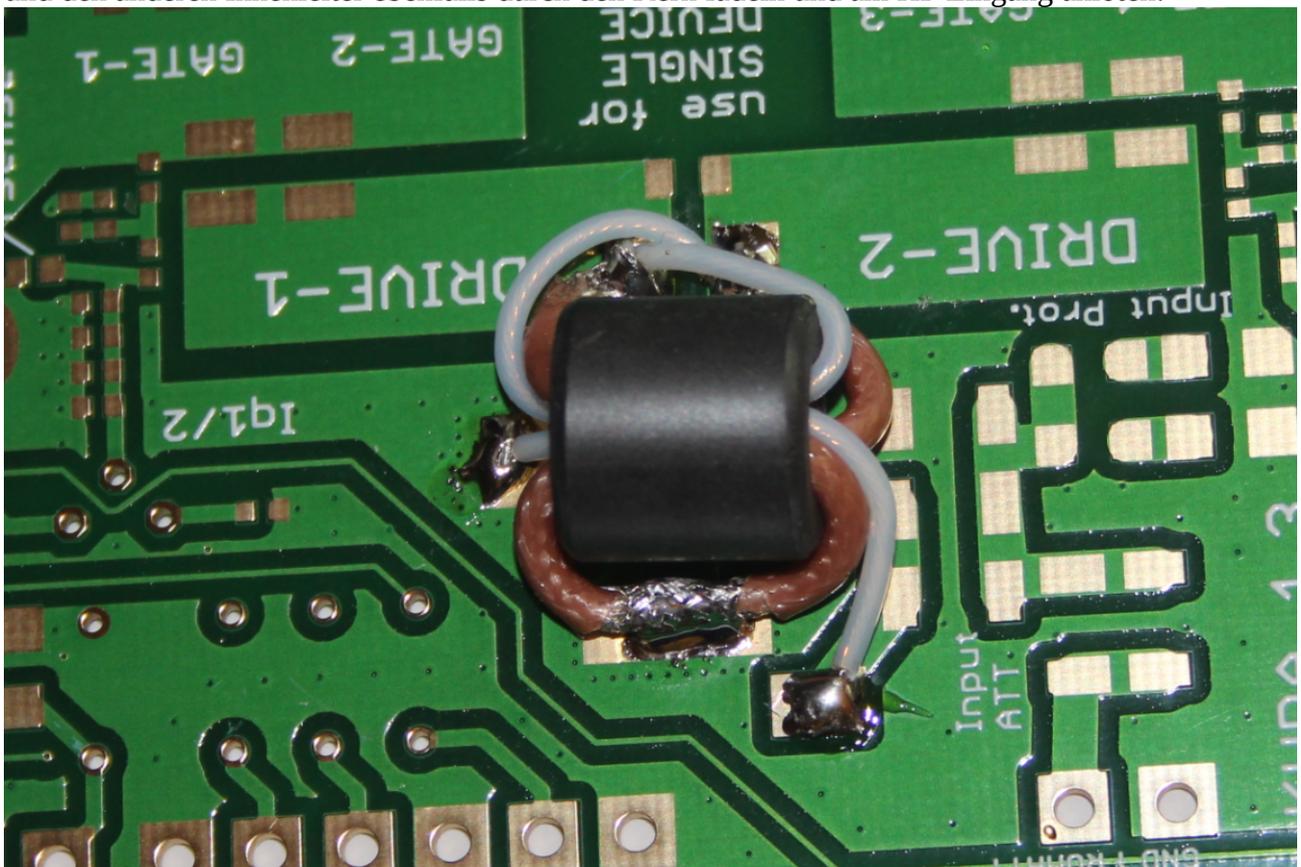
das gleiche mit dem anderen Drahtende:



jetzt den einen Innenleiter nochmals durch den Kern fädeln und an der Massefläche anlöten:



und den anderen Innenleiter ebenfalls durch den Kern fädeln und am HF Eingang anlöten:



der Kern ist jetzt fertig montiert.

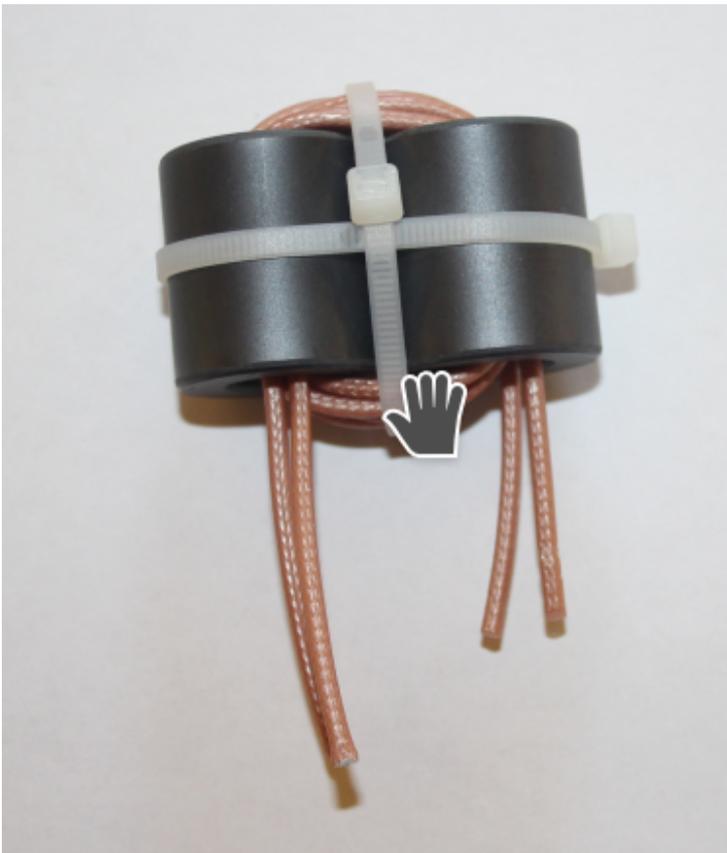
zwei Ausgangs-Transformatoren:

Man kann einen oder auch zwei Ferrite benutzen, ich habe beide Versionen getestet. Für eine Ausgangsleistung bis 750 W reicht ein Ferrit gut aus. Da die Ferrite aber recht preiswert sind kann man genauso je zwei nehmen und muss sich dann um die Kern-Temperatur keine Gedanken mehr machen.

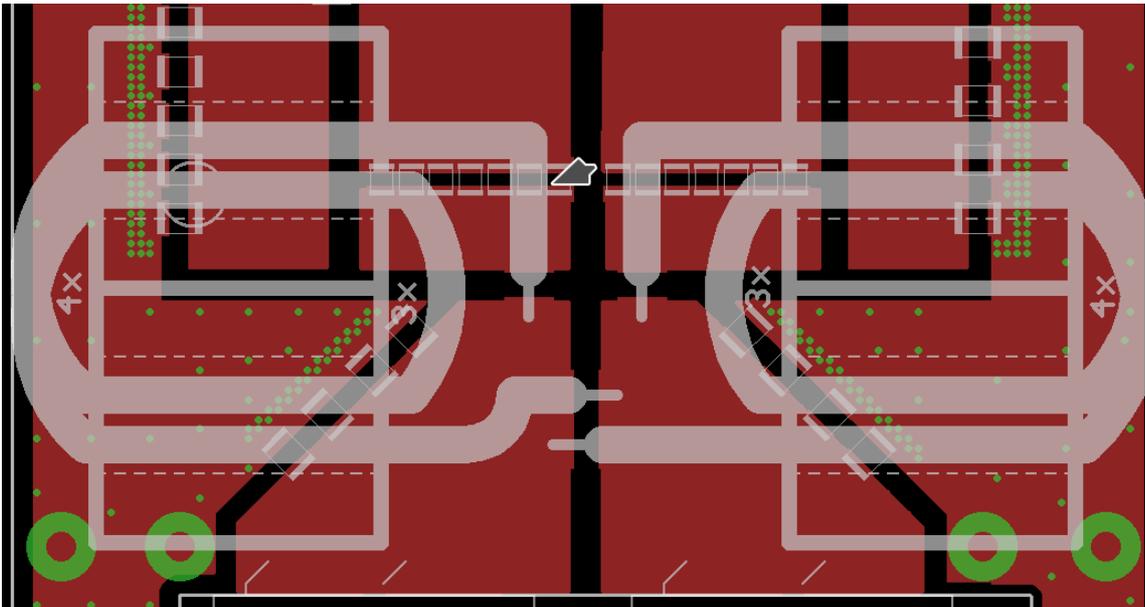
Das Bild zeigt das Wickelschema auf den Laird 28B1020-100 Ferriten. Man nimmt dazu je zwei Stück RG-316 parallel um eine Kabelimpedanz von 25 Ohm zu erhalten (Länge ca. 50cm):



Man bindet zuerst die beiden Kerne mit Kabelbinder zusammen. Dann steckt man das (doppelte) RG-316 durch den Kern.



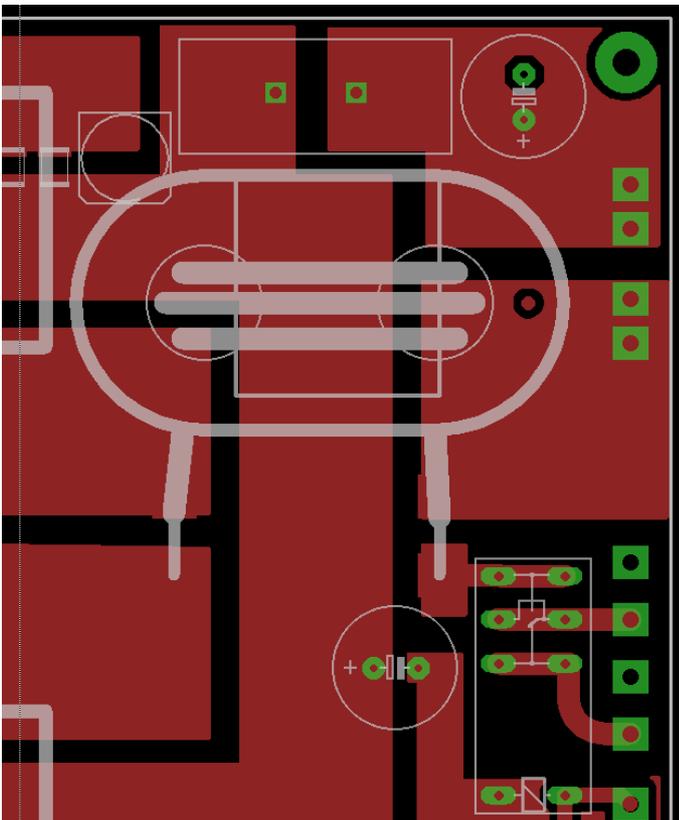
das Kabel schlingt man so oft durch die Kerne bis es oben 4x liegt und unten 3x liegt.



dieses Bild zeigt wie das Koaxkabel an der Platine angeschlossen wird. Bitte beachte: die Koaxkabel sind immer doppelt vorhanden und anzuschließen. Diese Zeichnung zeigt zur besseren Übersicht nur ein Kabel. Sowohl Innenleiter als auch Schirm sind satt anzulöten.

Ausgangs-Balun:

man wickelt 4 Windungen RG-316 auf die beiden Ferrite. Dieses Koaxkabel kann sich bei höherer Ausgangsleistung erwärmen. Daher habe ich es auch mit RG-214 versucht, dieses bleibt kalt, allerdings ist es sehr starr und das Wickeln mühsam. Wirklich kritisch ist es aber nicht, mit dem dünneren RG-316 lässt sich auch mit 750 Watt problemlos arbeiten. Sowohl Schirm als auch Innenleiter sind so anzulöten:



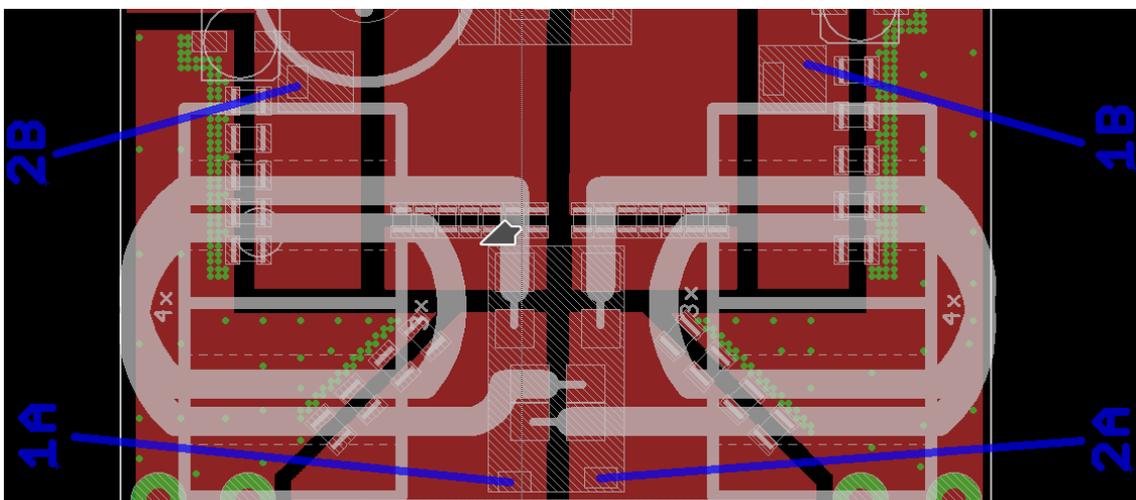
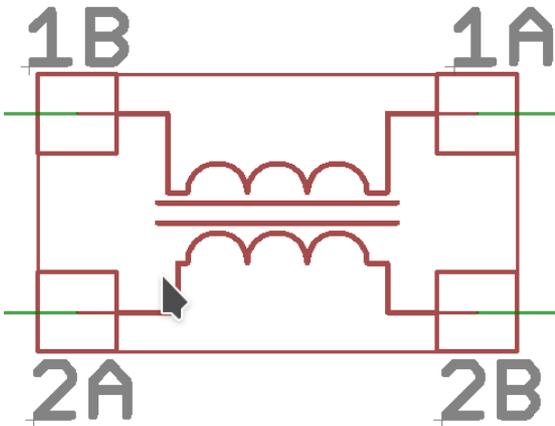
Speisedrossel:

auch diese wird auf Laird 28B1020-100 Ferrite gewickelt, wie im Schema gezeigt. Man kann Kupferlackdraht benutzen (1,5 oder 2mm Durchmesser) muss dabei aber aufpassen dass man den Lack nicht beschädigt und evt. den Kern vorher mit Teflonband schützen. Man wickelt soviel auf bis der Kern voll ist, das sind meist ca. 2x 4 Wdg., die genaue Windungsanzahl ist aber egal.



Einfacher geht es mit versilbertem PTFE-Kabel welches beispielsweise bei www.amidon.de oder bei www.dxwire.de erhältlich ist.

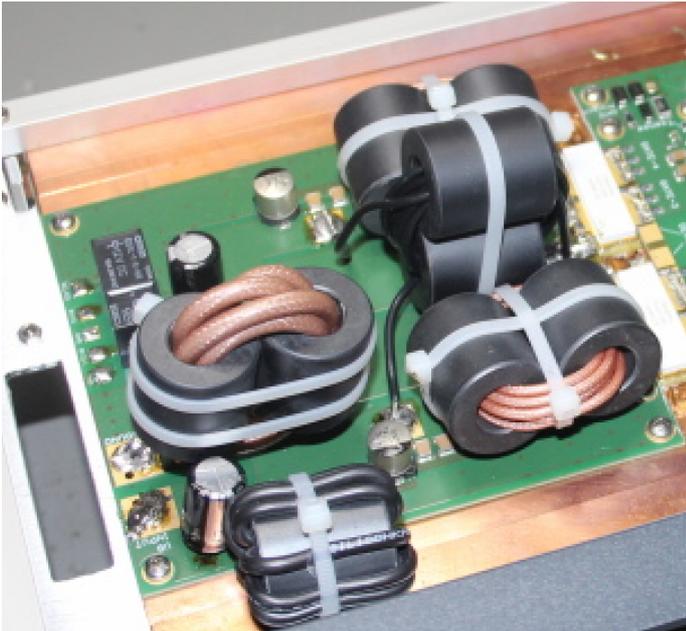
Man wickelt 2 Stück Kabel gleichzeitig auf (bifilar) und schließt deren Enden so an:



Versorgungs-Drossel (im Bild ganz unten):

hier wird einfach Kabel um einen Ringkern gewickelt bis dieser voll ist. Eine besondere Wickelvorschrift gibt es hier nicht. Man kann dazu auch Ferrit-Ringkerne aus der Bastelkiste nehmen falls dieser groß genug ist und auf die Platine passt. Das Kabel sollte mindesten 1,5mm² haben, besser mehr.

Sind alle Kerne montiert, dann sieht es so aus:

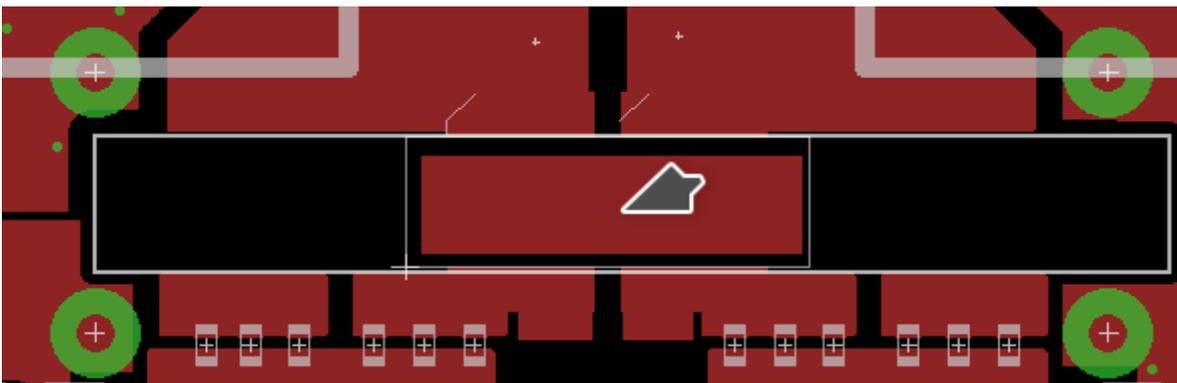


Ein oder zwei Transistoren:

die Platine ist für die Montage von einem LDMOS Transistor oder von zwei Stück ausgelegt. Zwei Transistoren erzeugen nur wenig mehr Leistung, da diese hauptsächlich von den Trafos bestimmt wird (mit einem LDMOS bis 1000 Watt, mit 2 LDMOS bis 1200 Watt). Sie sind allerdings robuster und haben einen etwas besseren IM3 als ein einzelner Transistor. Aber auch mit einem Transistor sind 750 Watt leicht erreichbar bei gutem Sendesignal.

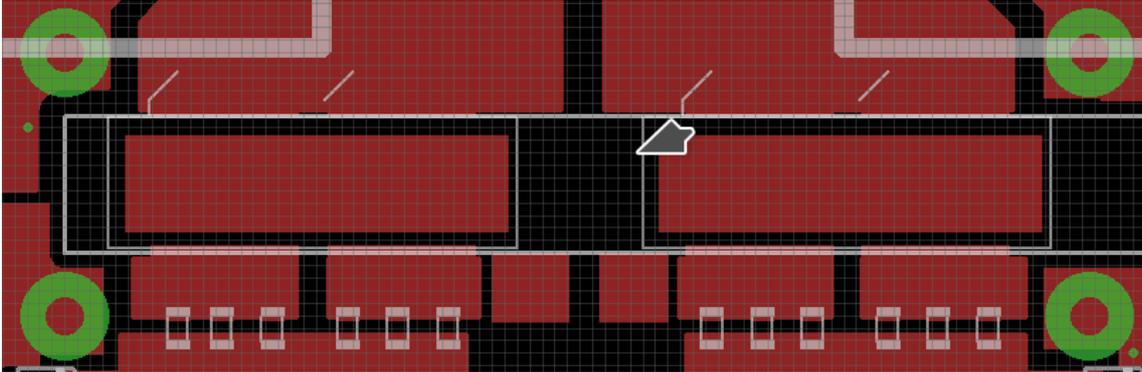
Ein Stück LDMOS:

dieser wird in der Mitte montiert. Ein LDMOS Transistor enthält ja zwei Transistoren in einem Gehäuse. Durch die Montage in der Mitte ist er automatisch richtig angeschlossen.



Zwei Stück LDMOS:

die beiden, in einem LDMOS enthaltenen, Transistoren werden parallel geschaltet. Der Drain-Anschluss direkt, die Gate-Anschlüsse sind mit Widerständen entkoppelt. Beim folgenden Montagertyp sind sie automatisch richtig angeschlossen.



Kühlung und LDMOS Transistor:

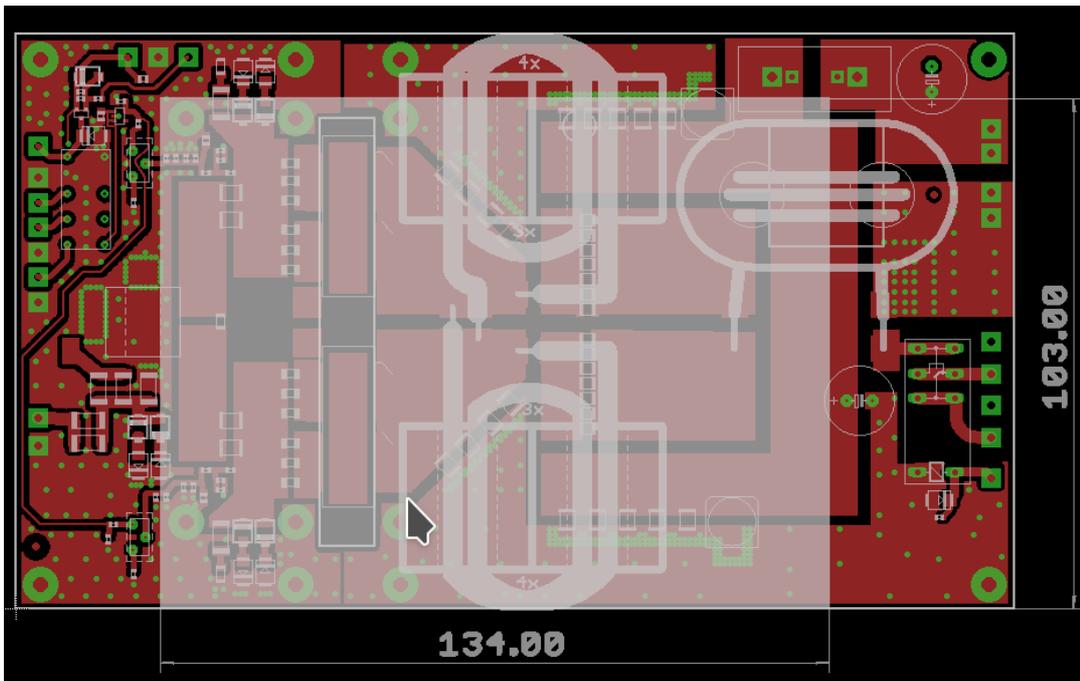
um die hohe Verlustleistung vom LDMOS Transistor abführen zu können ist ein Heatspreader unbedingt erforderlich. Das Aufschauben des Transistors auf einen Kühlkörper reicht NICHT und würde zur schnellen Zerstörung des Transistors führen !

Ein Heatspreader ist eine Kupferplatte (min. 10mm dick) auf welche der LDMOS aufgelötet wird, was z.B. am Küchenherd recht gut geht.

Es gibt auf YouTube viele Videos die das Auflöten des Transistors zeigen.

Die Platine liegt direkt auf dieser Kupferplatte auf. Man macht sie daher so groß, dass sie die bedrahteten Bauteile und Anschlusslöcher nicht berührt. Falls man eine Fräse hat kann man diese Bereiche auch freistellen und die Kupferplatte genauso groß wie die Platine machen. Das folgende Bild zeigt die Maximalgröße die ohne Fräsen möglich ist (nach unten kann die Kupferplatte natürlich beliebig weit herausstehen).

Beispiel: Kupferplatte 134x103mm



Zwei Befestigungslöcher auf der Platine sind mit „Tsense“ gekennzeichnet. Direkt neben diesen Löchern befinden sich die NTCs zur Temperaturstabilisierung. Diese beiden Löcher sollten also zur Befestigung am Kupfer benutzt werden damit die Kühler Temperatur gut zu den NTCs kommt.

Es gibt natürlich noch viele andere Möglichkeiten die Kupferplatte zu machen, das war nur ein Beispiel.

Die Unterseite der Kupferplatte sollte plangefräst oder geschliffen sein. Man befestigt diese an einem größeren Alu-Kühlkörper und muss da natürlich einen guten thermischen Kontakt haben. Wer will kann auch eine Wasserkühlung bauen, ich habe das ausprobiert und bin von der Kühlwirkung begeistert. Kühlbauteile aus dem PC Bereich eignen sich gut.

Die Platine kann man dann unter die Anschlussfahnen der aufgelöteten LDMOS Transistoren schieben.

Fertigstellung und Optionen:

Jetzt ist die Platine komplett bestückt und wir kümmern uns um ein paar kleine aber wichtige Details:

Eingangs-Dämpfungsglied:

auf der Platine befindet sich bereits ein Eingangs-Dämpfungsglied aus R1/R2/R3/R19/R20 welches zusätzlich Schutzdioden hat.

In vielen Fällen reicht das aber noch nicht um die Empfindlichkeit der PA auf eine normales Maß zu drücken. In aller Regel wird man dem Eingang noch ein weiteres 10dB Dämpfungsglied vorschalten wollen. Damit erreicht die PA dann Vollaussteuerung bei ca. 10 Watt Eingangsleistung.

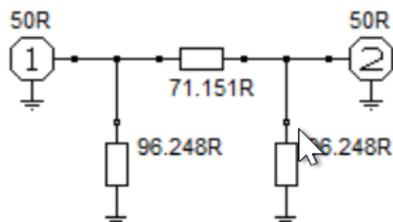
Da sich ein 10dB Eingangs-Dämpfungsglied natürlich erwärmt wird es extern aufgebaut. Die Platine hat die dazu passenden Anschlüsse:

An RF_IN schließt man den Transceiver an.

Am Anschluss TO_ATT kommt die HF (beim Senden) wieder heraus, von hier geht man also zum externen Dämpfungsglied.

Der Ausgang des externen Dämpfungsglieds geht dann an Anschluss FROM_ATT.

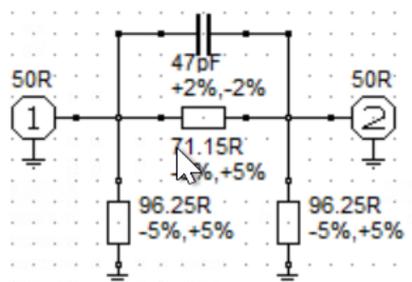
Schaltungsvorschlag für das Dämpfungsglied mit 2 Watt Kohleschichtwiderständen:



da es hier nur auf eine ungefähre Dämpfung ankommt, werden die idealen Werte angepasst. Statt 96,248 Ohm nimmt man 100 Ohm Widerstände und statt 71,151 Ohm nimmt man 68 Ohm (oder 2 in Reihe geschaltete 33 Ohm) Widerstände.

Normale 2W Kohleschichtwiderstände sind gut, aber es gibt auch hochwertige HF-Metallfilmwiderstände, was aber kaum Vorteile bringt.

Beim Betrieb der PA wird man merken, dass die Empfindlichkeit auf 10m und vor allem 6m deutlich abnimmt. Um eine einigermaßen gleichmäßige Empfindlichkeit zu haben kann man in diesem Dämpfungsglied die höheren Bänder anheben:



den genauen Wert des Kondensators muss man an der fertigen PA ermitteln.

RX-Bypass:

Damit der Transceiver im Empfangsbetrieb mit der Antenne verbunden ist muss noch eine Koax-Kabelverbindung hergestellt werden und zwar zwischen Anschluss RX_BYP1 (Eingangsteil) und RXBYP-2 (Ausgangsteil).

Relaisleitung:

Auf der Platine befinden sich zwei Pins „Relais“. Diese einfach mit einem Stück Draht verbinden.

Stromversorgung:

Die Platine benötigt zwei Spannungen:

12V (13,8V) ... für die Relais und die Vorspannungserzeugung. Man kann hier die 12V des üblichen Stationsnetzteils benutzen.

50V (30 bis 50V) ... für die Leistungsendstufe. Hierfür gibt es Netzgeräte von Meanwell (Reichelt) oder die bekannten HP-Servernetzteile (ebay).

Inbetriebnahme:

Ist die Kühlung aufgebaut und die Platine verdrahtet beginnt die Inbetriebnahme.
Um den teuren LDMOS Transistor zu schützen ist das ein mehrstufiger Prozess:

1. die 250 Ohm Potis so drehen, dass der Schleifer so nah wie möglich an Masse liegt, also die geringste Spannung aus dem Poti herauskommt. Dadurch ist der Ruhestrom der Transistoren Null.
2. Ausreichend große 50 Ohm Dummyload an den Ausgang anschließen.
3. Transceiver an den Eingang anschließen, 40m Band, FM und kleinst mögliche Leistung einstellen, noch nicht senden.
4. 12V anschließen
5. Anschluss „PTT“ (gleich neben dem 12V Anschluss) mit einem Stück Draht mit GND verbinden, die Relais ziehen jetzt an.
6. noch KEINE 50V anschließen, wir gehen erstmal sehr langsam vor: zunächst versorgen wir die PA aus einem kleinen Labornetzteil mit ca. 20 bis 30V und einer Strombegrenzung von ca. 3 bis 5A.
7. Ruhestrom einstellen. Es wird kein Strom fließen, da die Potis auf 0 gedreht sind. Fließt trotzdem ein Strom, so stimmt etwas nicht und man muss den Fehler suchen.
Jetzt stellen wir einen Ruhestrom von 0,5A pro Hälfte ein. Also ein Poti auf 500mA aufdrehen und danach mit dem zweiten Poti auf 1A drehen.
8. Wir entfernen die PTT Leitung von der Masse und verbinden sie jetzt mit dem PTT Ausgang des Funkgeräts.
9. An den Ausgang, parallel zur Dummyload, ein Oszilloskop anschließen um die Ausgangsleistung abschätzen zu können. (Ausgangsleistung $P = U_{eff}^2 / 50$)
10. Jetzt mit dem Transceiver mit minimaler Leistung (!!! Ausgangsleistung auf Minimum drehen !!! nur zu leicht übersieht man das !!!) auf ca. 7MHz senden. An der Dummyload muss eine Ausgangsleistung zu sehen sein. Das 3A Netzgerät geht möglicherweise schon in die Strombegrenzung und regelt die Spannung herunter, was aber kein Problem ist. Es kommt nur darauf an, dass wir ein wenig Ausgangsleistung sehen können. Mehr als 10 oder 20 Watt werden kaum herauskommen.
11. Ist der Test mit der 3 oder 5A Strombegrenzung erfolgreich verlaufen und es war eine Ausgangsleistung zu sehen, dann kommt jetzt Schritt 2: der Anschluss eines 50V Netzteils über einen Vorwiderstand. Man nimmt also das kräftige 50V Netzgerät (24 bis 30V würden für diesen Test auch reichen) und fügt in die Plus-Leitung einen Leistungswiderstand von ca. 3,9 Ohm ein. Der Widerstand sollte mindestens 10 Watt aushalten, aber egal, er wird bei

diesen Tests vermutlich sowieso sehr heiß werden und evt kaputt gehen. Der Widerstand ist nur eine Sicherheitsmaßnahme für den Fall dass die PA einen Kurzschluss macht. Bei 50V und 3,9 Ohm kann maximal 12A fließen was dem LDMOS Transistor noch nichts anhaben kann.

Wenn man mit dem Transceiver jetzt sendet, sollte schon eine gute Ausgangsleistung von über 50 Watt zu sehen sein. Bitte nur kurz Senden, sonst raucht der 3,9 Ohm Schutzwiderstand.

12. Ist obiger Test erfolgreich verlaufen, so ist die PA vermutlich in Ordnung und kann jetzt ohne Vorwiderstand versorgt werden um die volle Leistung abzugeben.

Ab hier ist es erforderlich ein passendes Tiefpassfilter zwischen PA und Antenne anzuschließen !

Ruhestrom:

bei obiger Inbetriebnahme haben wir den Ruhestrom auf 0,5A pro Hälfte eingestellt. Wenn alles gut läuft können wir ihn erhöhen auf 2A pro Hälfte, dadurch wird die Linearität besser.

Der Ruhestrom fließt übrigens nur beim Senden, im Empfangsbetrieb ist die Vorspannung ausgeschaltet.

Für OMs die über einen Spektrumanalyser verfügen:

Man schaut sich das Spektrum am Ausgang der PA an, vor allem die erste Oberwelle, also die doppelte Sendefrequenz. Wenn man jetzt an einem der Vorspannungs-Potis ein wenig dreht, so kann man sehen wie diese erste Oberwelle größer oder kleiner wird. Durch entsprechende Einstellung kann man sie fast komplett entfernen.

Bitte „vorsichtig“ nur wenig drehen und den Ruhestrom nicht ins unendliche hochjagen, das könnte den LDMOS überlasten !

Sicherheitsmaßnahmen:

Eine Stromversorgung von 50 Volt und über 30A ist ein kräftiges Teil und im Fehlerfall gefährlich.

Man muss zwei Dinge beachten:

1. Brandschutz im Fehlerfall
2. Schutz des teuren LDMOS Transistors

um diese beiden Dinge abzudecken habe ich eine einfache Schutzschaltung entwickelt. Die Schaltung befindet sich hier:

http://dj0abr.de/german/technik/kwpa/kwpa_isafe.htm

entweder man baut diese Schaltung auf oder man sorgt mit anderen Maßnahmen für eine Abschaltung im Fehlerfall.

Sicherheitshinweis zum LDMOS Transistor:

dieser ist sehr robust, aber nur am Ausgang. Am Eingang (Gate) ist er extrem empfindlich. Bei der Arbeit daher auf statische Aufladungen achten solange er noch nicht eingelötet ist.

Die Platine bitte nicht mit einer Gegenkopplung versehen, diese ist nicht notwendig und gefährdet den Transistor.

Auf geringe Steuerleistung achten. Die Platine enthält eine 2-stufige Schutzschaltung. Sendet man mit zu viel Steuerleistung, so wird als erstes die Diode am Eingangsdämpfungsglied rauchen, das ist immerhin viel billiger als der Transistor.

Ein LDMOS verträgt ein schlechtes SWR, aber nur kurz. Bei hohem SWR bitte mit einer geeigneten Schutzschaltung die PA abschalten. Abgesehen von schlechten Antennen ist der übliche Grund für ein schlechtes Ausgangs-SWR ein falsch geschaltetes Tiefpassfilter.

Diese Probleme werden vom LDMOS-PA-Controller erkannt und behandelt. Ein Aufbau dieser Zusatzplatine ist empfehlenswert.

Wie macht man einen LDMOS Transistor kaputt ?

Ich habe mal recherchiert und die üblichen Fehler von vielen OMs zusammengeschrieben. Mir selbst ist noch kein Transistor kaputt gegangen, dank der vielen Schutzmaßnahmen. Hier also die Zerstörungsliste:

- auf Schutzmaßnahmen am Eingang verzichten und irrtümlich mit 100W Steuerleistung in die PA hineinfahren.
- Eine Gegenkopplung einbauen mit dem Ziel die (sowieso gute) Linearität zu erhöhen. Überspannungen vom Ausgang (zB Antenne defekt) koppeln so aufs empfindliche Gate zurück
- Irrtümlich das falsche Tiefpassfilter gewählt. Der Transistor geht nicht sofort kaputt. Eine Schutzschaltung mit einer Reaktionszeit von ein paar 100ms reicht normal aus.
- Bei der Arbeit an der PA mit der Mess-Spitze abgerutscht und einen Kurzschluss gemacht.
- Zu schwache Dummyload brennt durch und es gibt keine Schutzschaltung für hohes SWR
- durch HF-Einstrahlung regelt das Netzteil über 50V hoch
- den Ruhestrom irrtümlich so hoch einstellen dass der LDMOS überlastet wird
- eine Kühlkörpertemperatur über 60 Grad zulassen

Anhang: Anschlusspins (wie auf der Platine beschriftet):

BYP1	Mit BYP2 verbinden (mit RG316)	Zum Durchschleifen des Empfangssignal
RF IN	Eingang vom Transceiver	
TO ATT	Ausgang zu einem ext. Dämpfungsglied	Wenn keines benutzt wird, dann direkt mit FROM_ATT verbinden
FROM ATT	Eingang von einem ext. Dämpfungsglied	
+12V	Versorgung für Relais und Vorspannung	+12 bis +14V
PTT	PTT Eingang	Zum Senden auf Masse legen
RELAIS	Die beiden Pins „RELAIS“ miteinander verbinden.	Schaltleitung der Relais
RF OUT	HF Ausgang zu einem Tiefpassfilter.	Ausreichend dicke Koaxkabel benutzen. RG316 geht gerade so, RG214 ist besser.
BYP2	Mit BYP1 verbinden (mit RG316)	Zum Durchschleifen des Empfangssignal
UB INPUT und GROUND	Anschluss für ein Netzgerät 50V min. 30A	10mm ² Kabel benutzen.

Anhang: Befestigungslöcher Maßbild:

