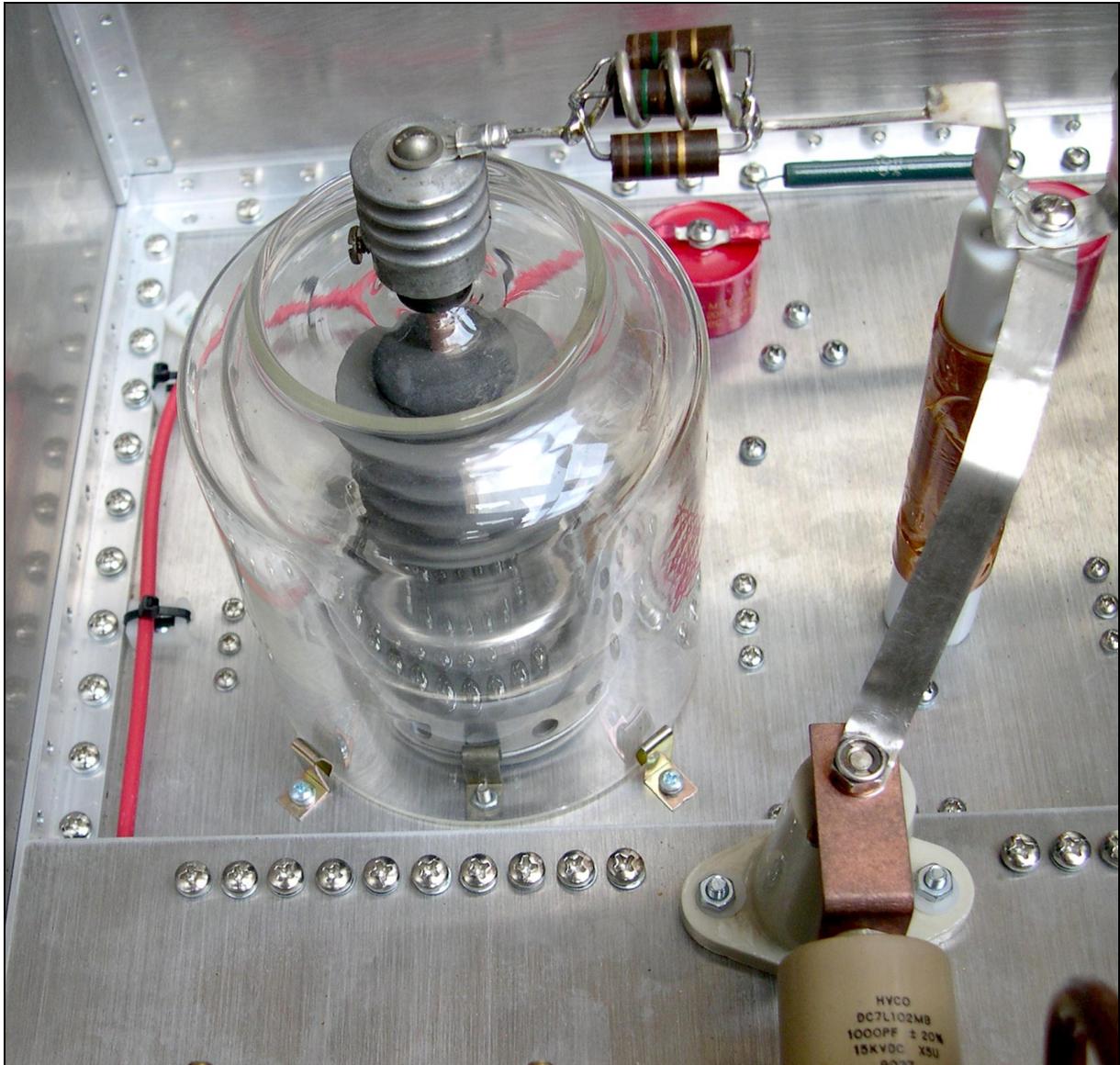
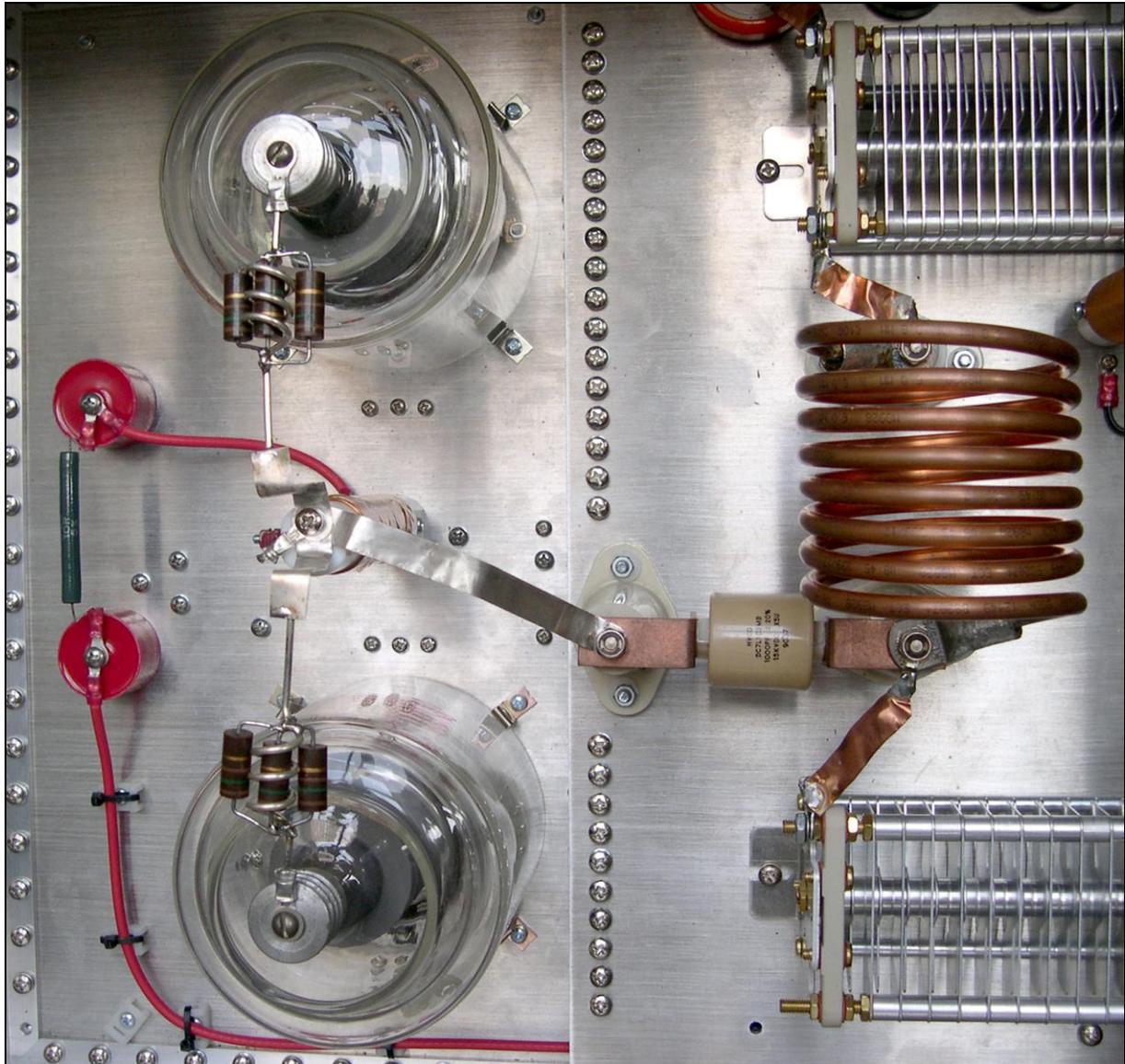


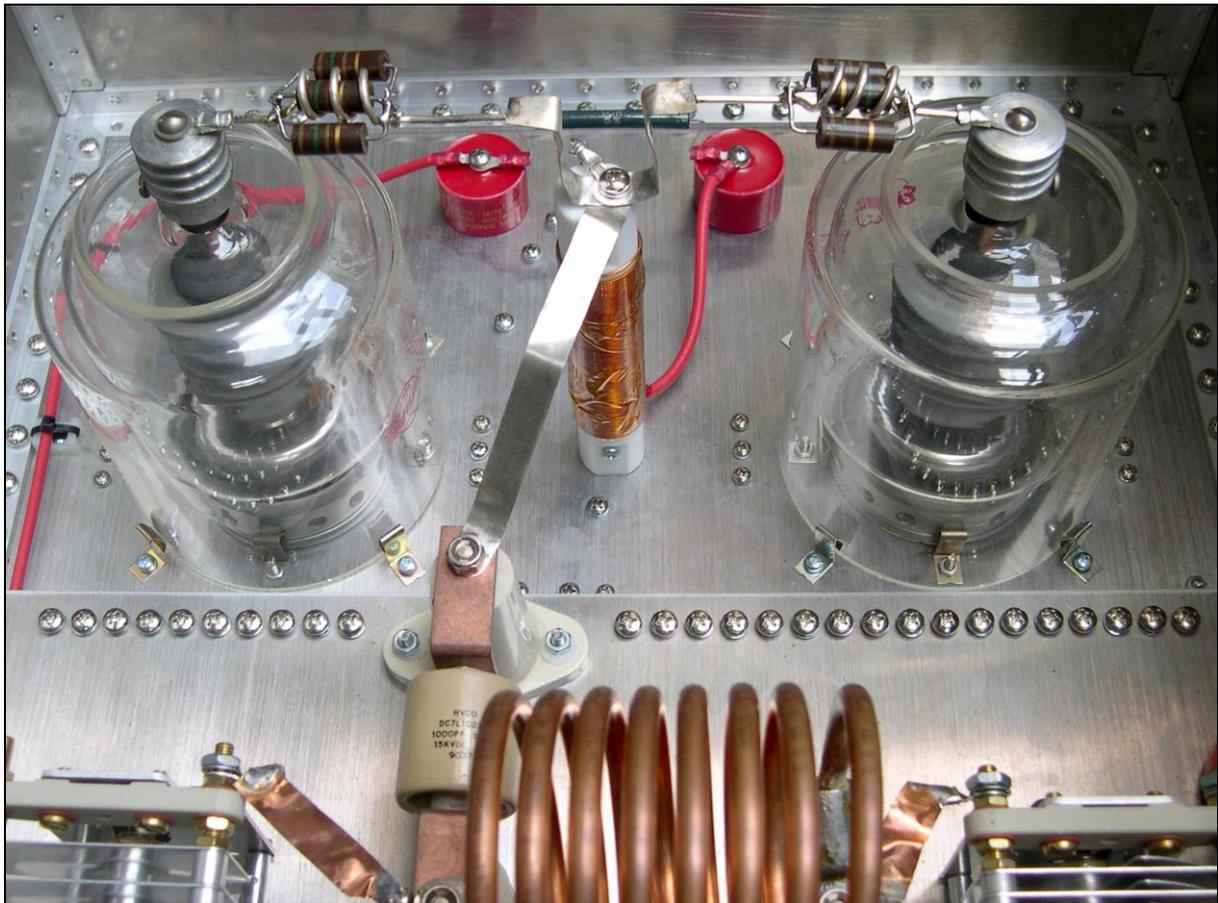
Die Masseverbindung der Gitter g1 und g2 und die Anbindung des Kathodenkreises



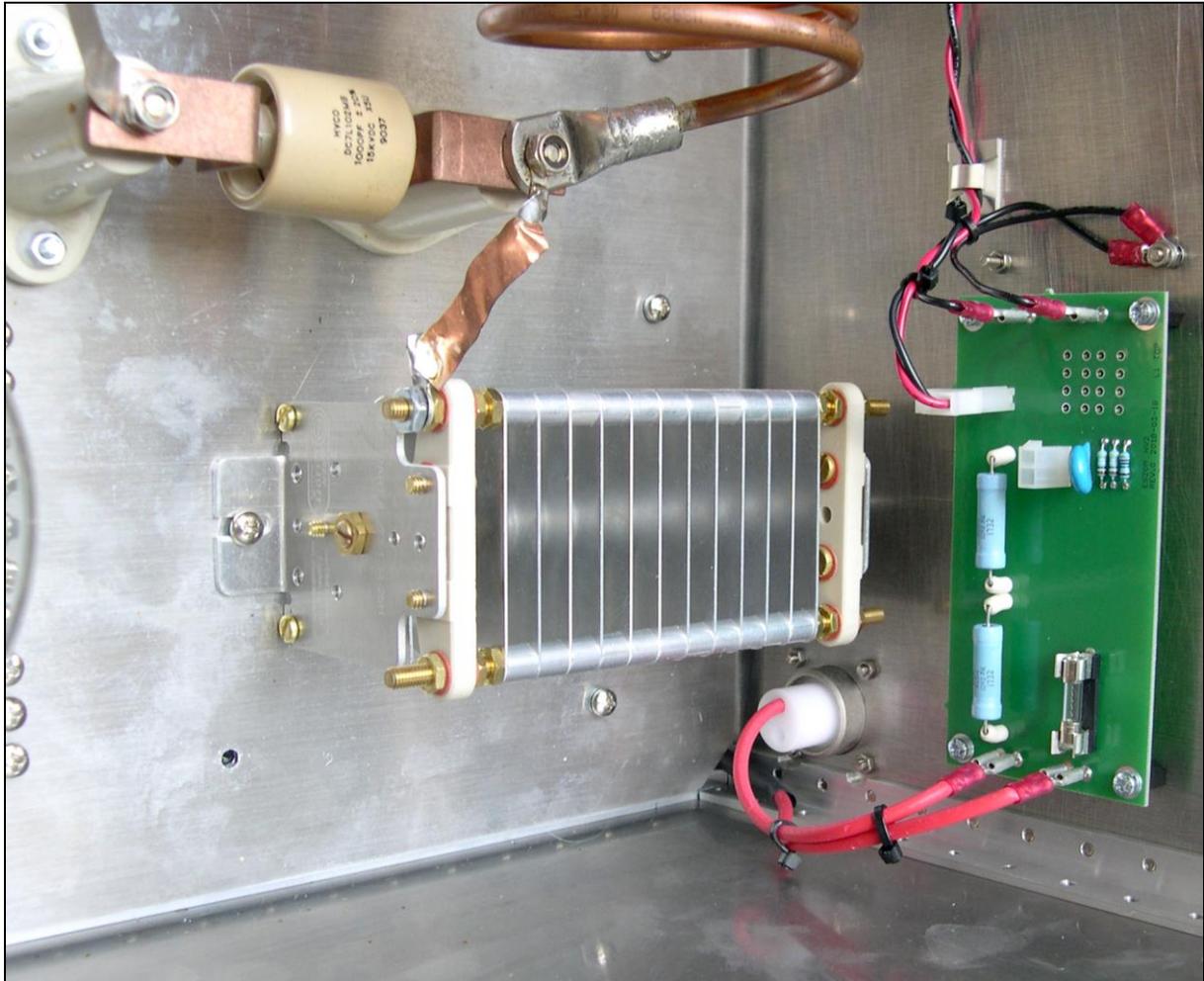
Die Befestigung des Glaskamins und das VHF-Dämpfungsglied



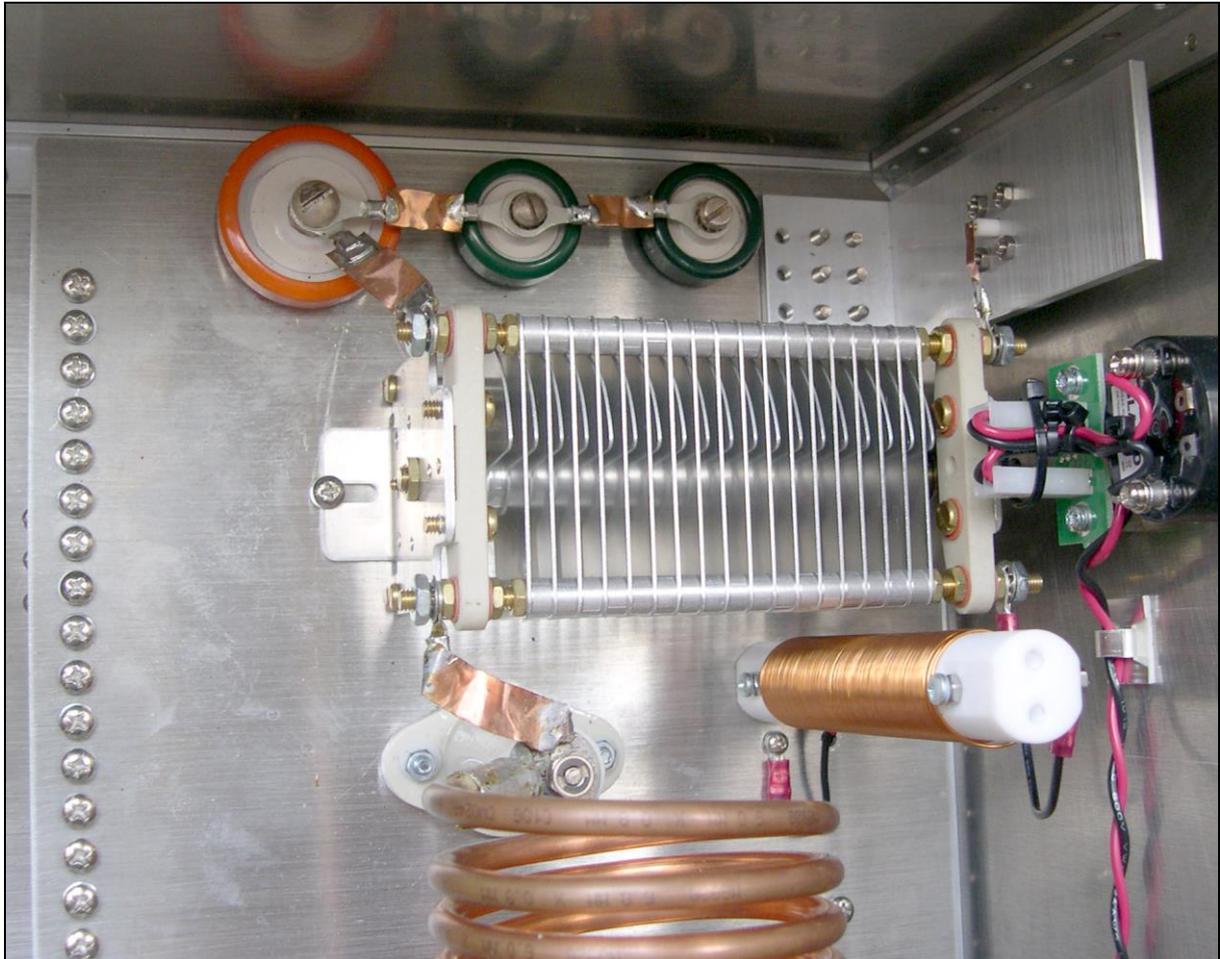
Die Anbindung des Pi-Filters an die Anoden und die Anordnung der VHF-Dämpfungsglieder



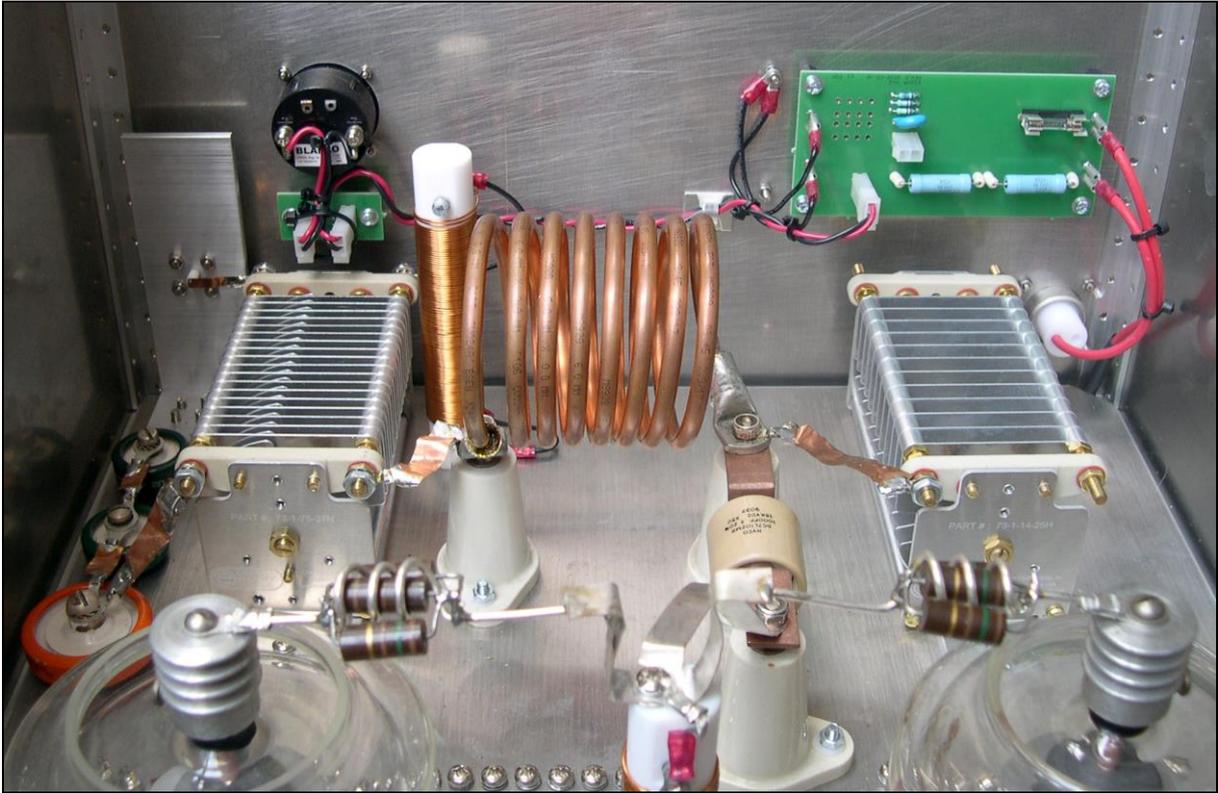
Die Anbindung des Pi-Filters an die Anoden und die Anordnung der VHF-Dämpfungsglieder aus anderer Perspektive



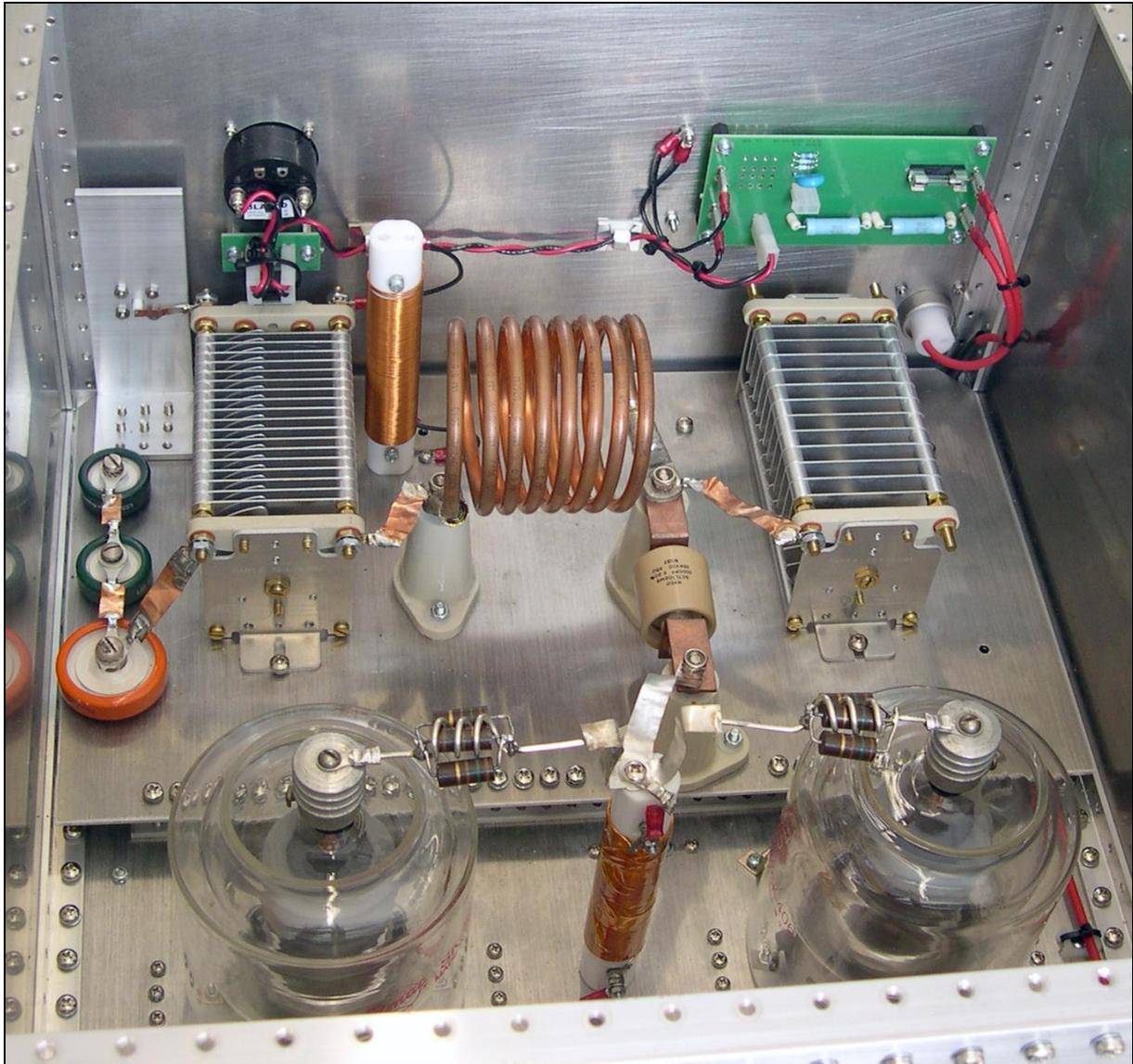
Der anodenseitige Drehko des Pi-Filters und die Leiterplatte mit dem HV-Teiler



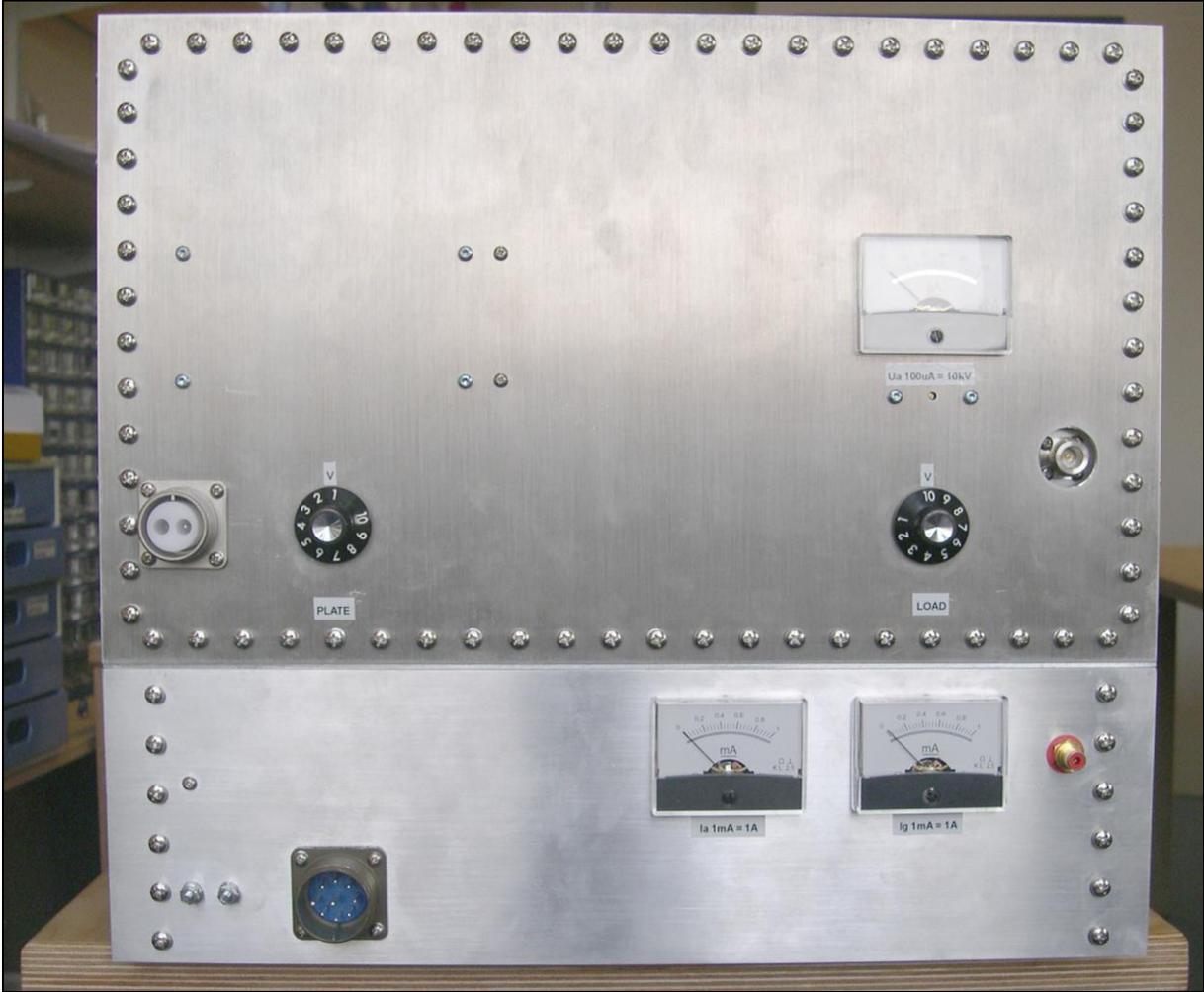
Der antennenseitige Drehko des Pi-Filters und die nachträglich hinzugefügte Parallelkapazität



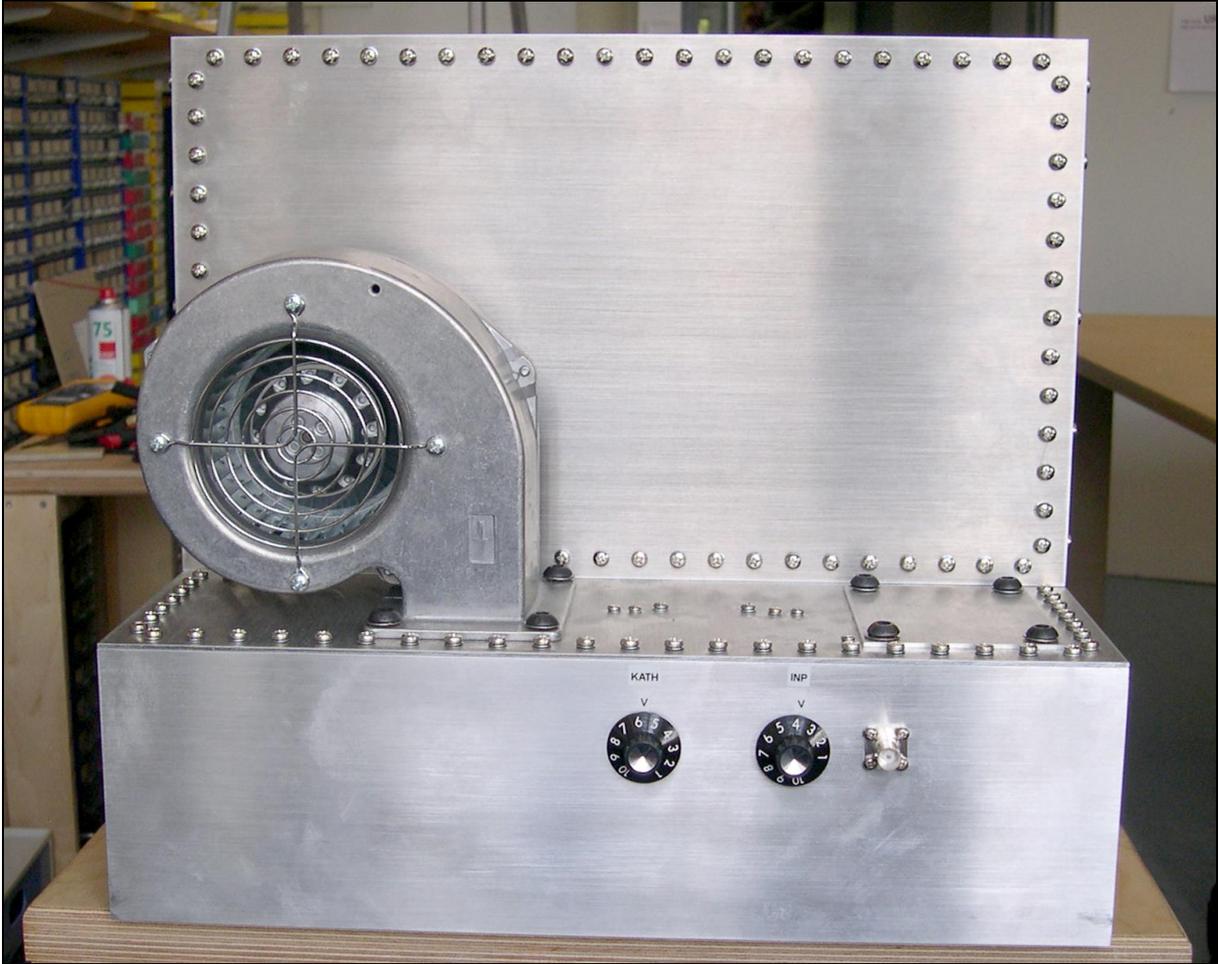
Das Pi-Filter in seitlicher Ansicht



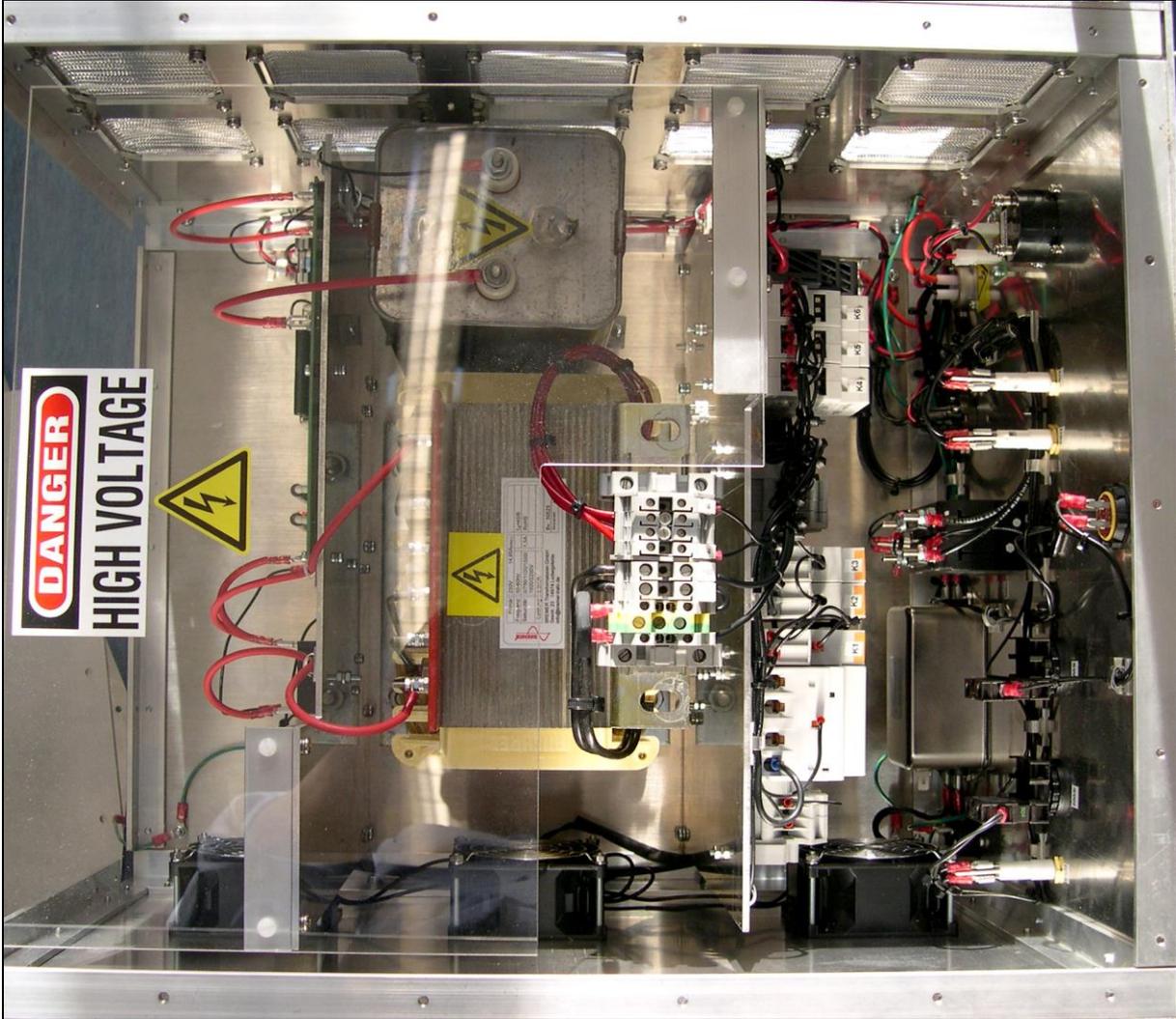
Blick in die Endstufe von oben seitlich



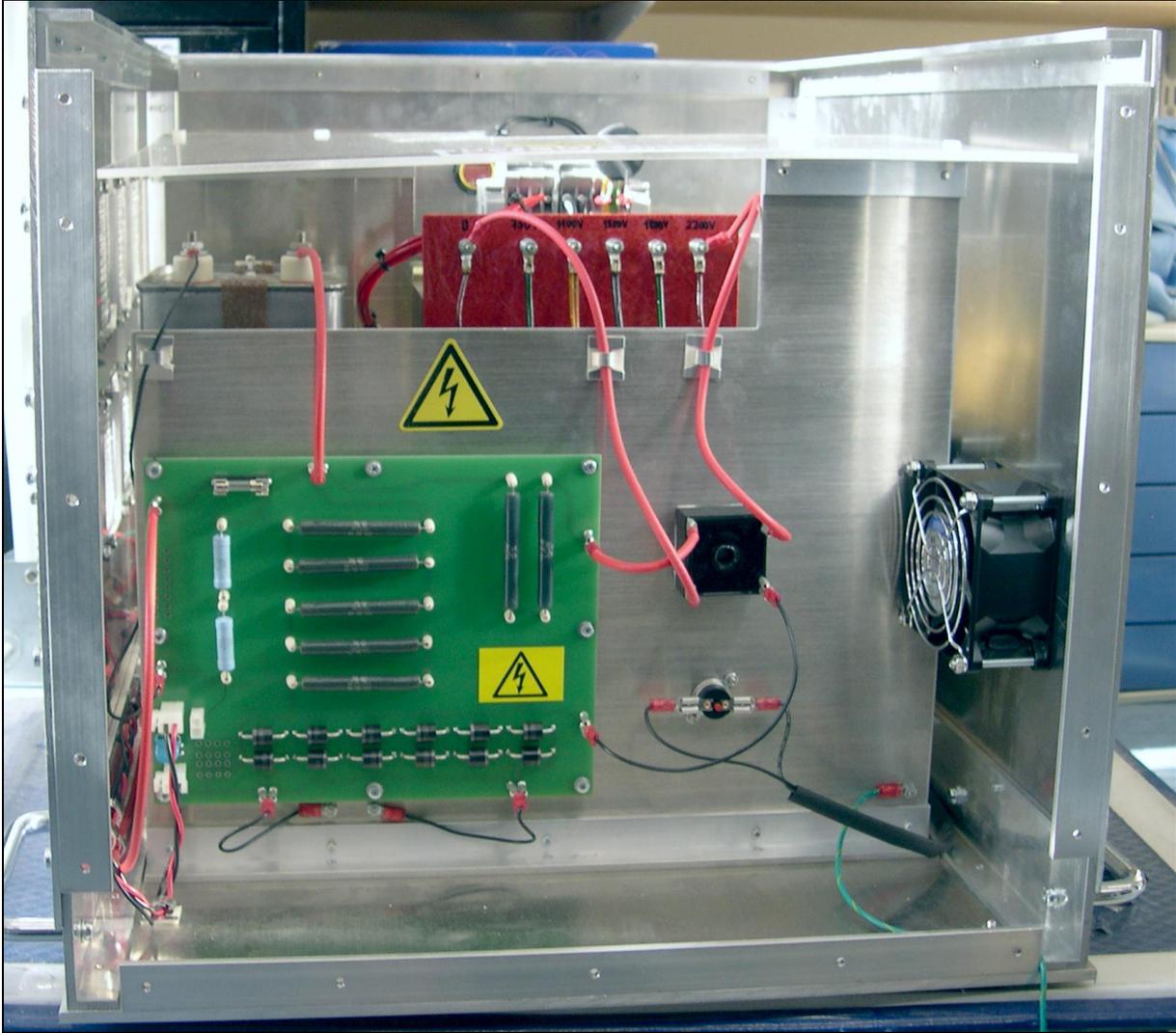
Ansicht der Endstufe von vorne



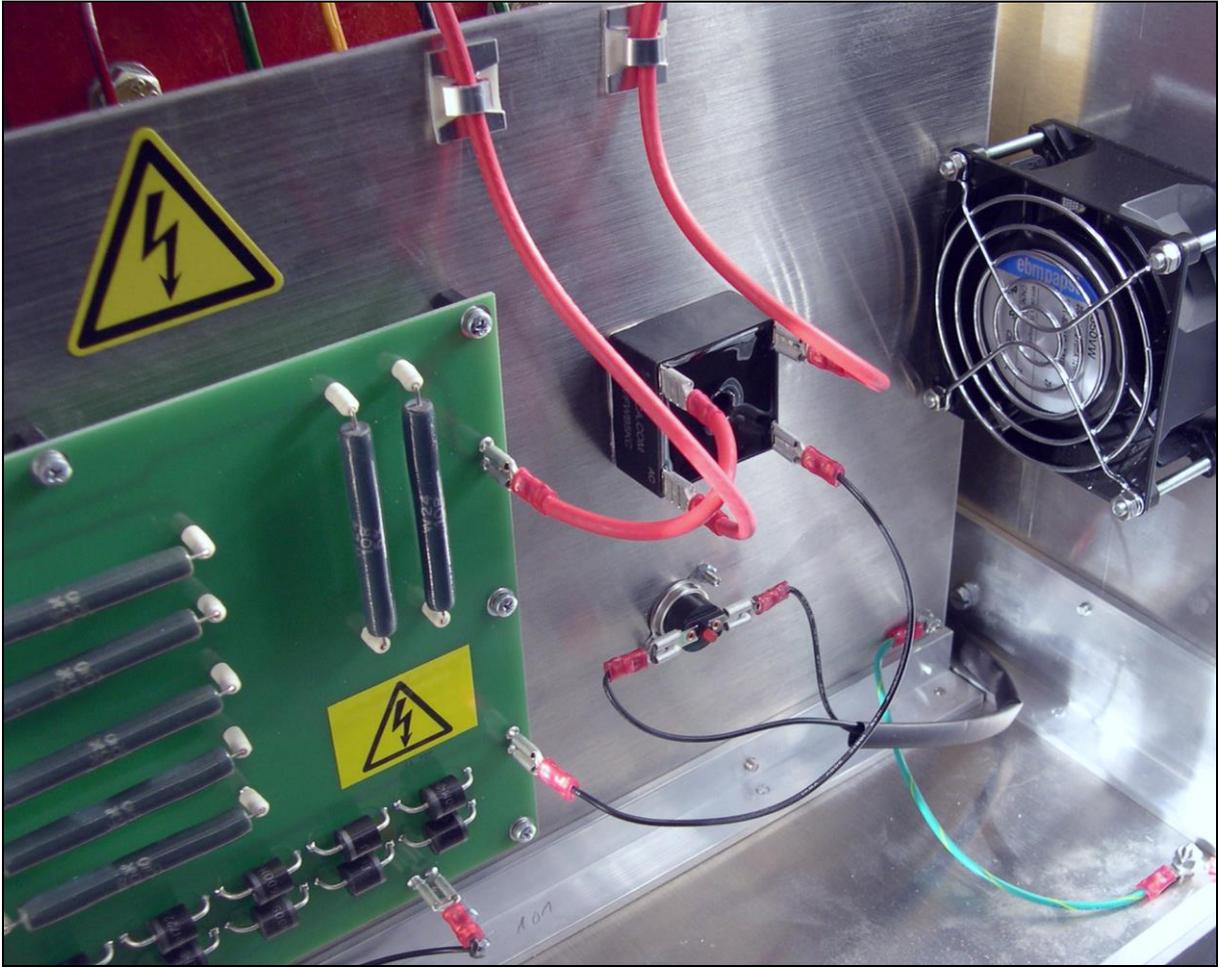
Ansicht der Endstufe von hinten



Blick in das Innere des Netzteils



HV-Gleichrichter und HV-Leiterplatte



Detailansicht des HV-Gleichrichters



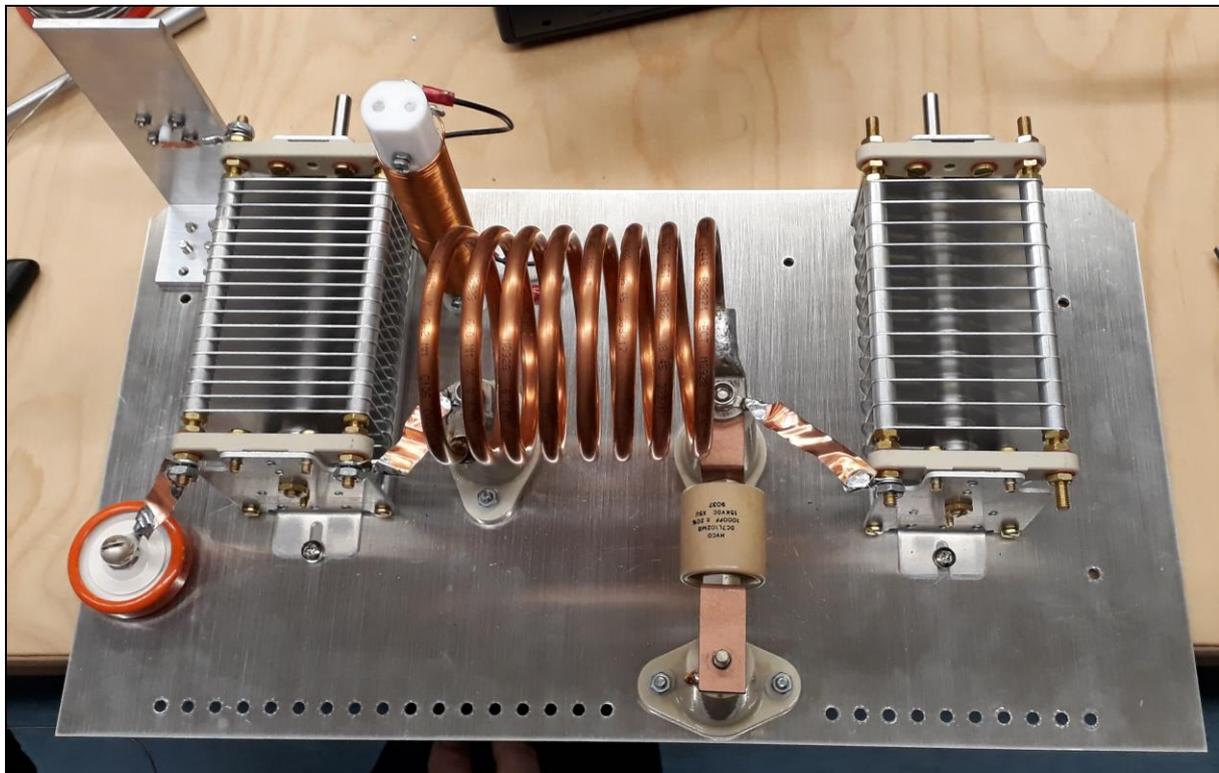
Detailansicht des Amphenol- und des GES-Steckverbinders

Die separate Masseplatte für den Ausgangskreis

Der Ausgangskreis der Endstufe wurde nicht direkt auf das Chassis gesetzt, sondern auf einer separaten Alu-Platte untergebracht, die isoliert auf dem Chassis montiert ist. Diese Alu-Platte ist an einer einzigen Kante über einen U-förmigen Winkel und ca. 30 Messingschrauben elektrisch mit dem Chassis verbunden. Diese Verbindung liegt in unmittelbarer Nähe der Kathodenanschlüsse der Röhren. Die ausgangsseitige N-Buchse ist über einen flächigen Alu-Winkel mit der den Ausgangskreis tragenden Alu-Platte verbunden, jedoch ebenfalls gegenüber dem sonstigen Chassis und der Frontplatte isoliert.

Damit wird erreicht, dass die erheblichen Resonanzströme, die im Ausgangskreis fließen nicht durch das Chassis fließen und damit in den Eingangskreis einkoppeln, womit dann Stabilitätsprobleme auftreten könnten.

Diese Konstruktionsweise wurde nicht in der Literatur vorgefunden. Sie wurde gewählt, da bei dem im Rahmen dieses Projekts zuvor aufgebauten UKW-Empfangsteil zunächst erhebliche Probleme durch über das Chassis fließende Resonanzströme verursacht wurden, die durch eine separate Masseverbindung für diese Ströme dann erfolgreich gelöst wurden.



Die separate Masseplatte mit dem Ausgangskreis

Die Inbetriebnahme

Die Inbetriebnahme des Netzteils am 14.4.2018

Abschnitt 1:

Netz Eingang bis DS2/Lüfter

Die folgenden Funktionen wurden erfolgreich geprüft:

- Ein/Aus-Taster
- Not-Aus
- TH offen (TH Anodentrafo abklemmen) => kein Einschalten möglich
- Wenn ein, dann Lüfter, DS2, Warnlampe an.

Abschnitt 2:

12V-Versorgung

Wenn das Gerät eingeschaltet wird, dann ist die Spannung am 12V-Ausgang vorhanden.

Abschnitt 3:

Primärseitiger Heizkreis Ausgang

Die Sicherungen am Heizkreis Ausgang wurden eingesetzt.

Als Last wurde eine Glühlampe 230V/60W an die frontseitige MIL-Buchse angeschlossen.

Beim Einschalten zeigte sich die Wirkung des nach einer Verzögerungszeit überbrückten Vorwiderstandes.

Abschnitt 4:

Primärseitiger Anodenkreis Ausgang

Anstelle des Anodentrafos wurde eine Glühlampe 230V/60W angeschlossen.

Beim Einschalten zeigte sich die Wirkung des nach einer Verzögerungszeit überbrückten Vorwiderstandes.

Abschnitt 5:

Vorkalibrieren des Messinstruments mit externer Spannung aus Labor-NT über Vorwiderstand und Kalibrierstecker

Hierbei wurde festgestellt, dass R12 von 9K1 auf 8K2 verringert werden muss, da der Innenwiderstand des Messwerkes mit 900 Ohm größer ist, als es zuvor eingeschätzt wurde.

Der Minuspol von J109 ist durch einen Zeichenfehler nicht an HV- sondern an Erde. Daher muss zur Kalibrierung HV- über ein Kabel mit Krokodilklemmen am Diodenstring mit Erde verbunden werden.

Abschnitt 6:

Erzeugung der Anodenspannung

Das Gehäuse wurde an den Zentralerder angeschlossen.

Der Anodentrafo wurde primärseitig direkt über einen Stelltrafo aus dem Netz betrieben.

Der Kaltgerätestecker wurde direkt mit der Primärwicklung des Trafos, womit die interne Steuerung überbrückt ist. Damit kann der HV-Trafo auch schon mit sehr kleinen Primärspannungen betrieben werden, so dass sich mögliche Fehler bereits bei Energieniveaus zeigen, bei denen noch keine Zerstörungen auftreten.

Als Abschaltvorrichtung wurde der Ein/Aus-Schalter an der verwendeten Steckdosenleiste genutzt.

Die Primärspannung wurde langsam hochgefahren. Die Ausgangsspannung wurde mit einem HV-Tastkopf auf dem Oszilloskop beobachtet. Gleichzeitig wurde das Anzeigeinstrument beobachtet. Die Anzeige des Instruments stimmte mit der Anzeige des Oszilloskops überein.

Es folgte ein Betrieb über 20min. bei voller Ausgangsspannung 3kV bei 230V Eingangsspannung im Leerlauf. Nach 20min zeigte sich keine signifikante Erwärmung von Bauteilen außer an den Entladewiderständen. Die Erwärmung der Entladewiderstände entsprach dem Erwarteten.

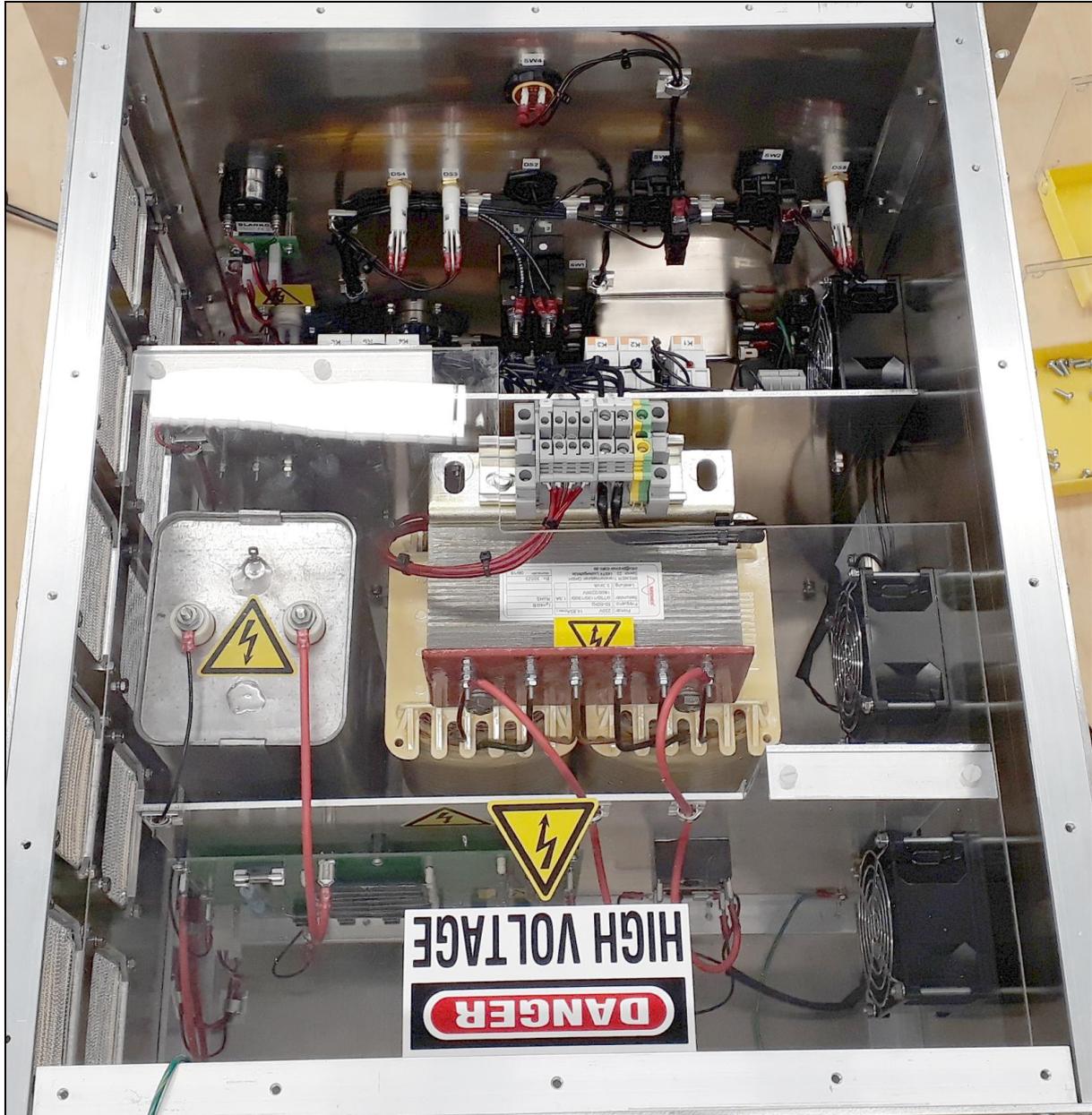
Abschnitt 7:

Zusammenspiel von Steuerung und Anodenspannungserzeugung

Die Steuerung und der HV-Trafo wurden im Zusammenspiel betrieben. Hierbei wurde festgestellt, dass die Zeitverzögerungen der Zeitrelais von 1s auf 2s verlängert werden müssen, da ansonsten der Glättungskondensator des HV-Ausgangs beim Überbrücken der Vorwiderstände noch nicht hinreichend geladen ist.



Das fertiggestellte Netzteil



Blick in das Innere des Netzteils

Die Vorbereitungen für die Inbetriebnahme der Endstufe am 1.5.2018 und am 6.5.2018

Bau und Überprüfung der Anodendrossel L5 (1.5.2018/6.5.2018)

Der zur Verfügung stehende Wickelraum wurde vollständig einlagig mit CuL 0,75mm bewickelt. Der Durchmesser des Spulenkörpers beträgt 20mm. Die Länge des Wickelraums beträgt 100mm womit sich ca. 133 Windungen ergeben.

Die Induktivität wurde gemessen, es ergab sich ein Wert von 42,5uH.

Dies entspricht einem Scheinwiderstand von 3,8kOhm bei 14MHz.

Bei der Vorbetrachtung wurde ein Wert von 57uH abgeschätzt, die Abweichung ist jedoch unkritisch.

Die Parallelresonanzfrequenz der in die Schaltung (mit bestückten Röhren) eingebauten Anodendrossel betrug ca. 39MHz. (Messung mit Grid-Dipper LDM-815)

Die Serienresonanz der kurzgeschlossenen, aber in der Schaltung belassenen Anodendrossel betrug 38MHz (Messung mit Grid-Dipper LDM-815)

Bau und Überprüfung der Sicherheitsdrossel L7 (1.5.2018/6.5.2018)

Die Sicherheitsdrossel wurde exakt baugleich zur Anodendrossel ausgeführt. Es wurde ebenfalls eine Induktivität von ca. 42uH gemessen. Die Resonanzen wurden nicht noch einmal überprüft.

Bau und Überprüfung der Heizkreisdrossel L2 und des Heizkreises (1.5.2018/6.5.2018/10.5.2018)

Der Ferritstab wurde vollständig mit CuL2,0mm bewickelt. Vor dem Aufbringen der Wicklung wurde der Ferritstab zweilagig mit 100um-Kaptonband bewickelt, um eine definierte elektrische Isolation zwischen Kern und Wicklung sicherzustellen. Wicklung und Kern wurden abschließende mit Kaptonband an den Enden der Spule aneinander fixiert.

Die Induktivität der Spule wurde mit 22,4uH gemessen, was sehr nahe am berechneten Wert von 22,7uH liegt. Die Parallelresonanzfrequenz der in die Schaltung eingebauten Spule wurde mit dem Grid-Dipper gemessen, sie beträgt ungefähr 4MHz.

Die Verdrahtung des Heiz- und Kathodenkreises wurde mit sehr niederohmiger Kupferlitze AWG10 ausgeführt.

Der Heiztrafo wurde primärseitig mit den Anschlüssen 0V und 230V an das Netz geschaltet. Die Heizspannung wurde direkt an den Kontaktfedern der (mit Röhren bestückten) Röhrensockel gemessen. An beiden Röhren wurde eine Spannung von 5,05V eff. gemessen, die praktisch ideal dem Sollwert 5,00V entspricht. Die an der Trafo-Sekundärwicklung anliegende Spannung war 5,45V.

Bau und Überprüfung der Spule für das Eingangsseitige Pi-Filter L1 (1.5.2018/6.5.2018)

Es wurden 8 Windungen CuL2,0mm auf einen Wickelkörper mit 22mm Durchmesser gewickelt.

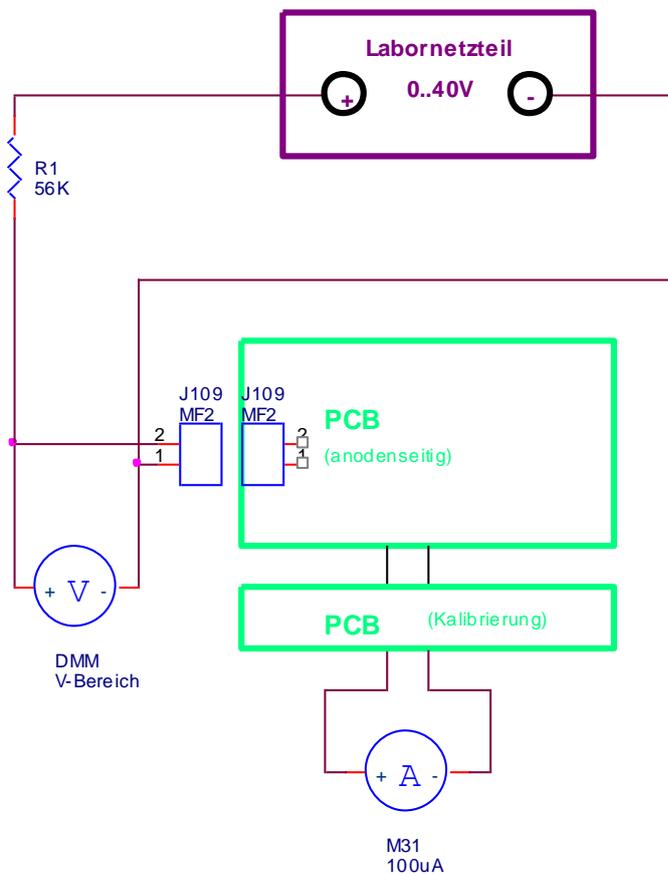
Für die Kalibrierung des Messwerkes für den Gitterstrom wurden sinngemäß vorgegangen. Der Minuspol des Labornetzgerätes wurde dafür von J102/4 gelöst und an J102/2 angeschlossen.

Für die Kalibrierung des Messwerkes für die Anodenspannung wurde wie folgt vorgegangen:

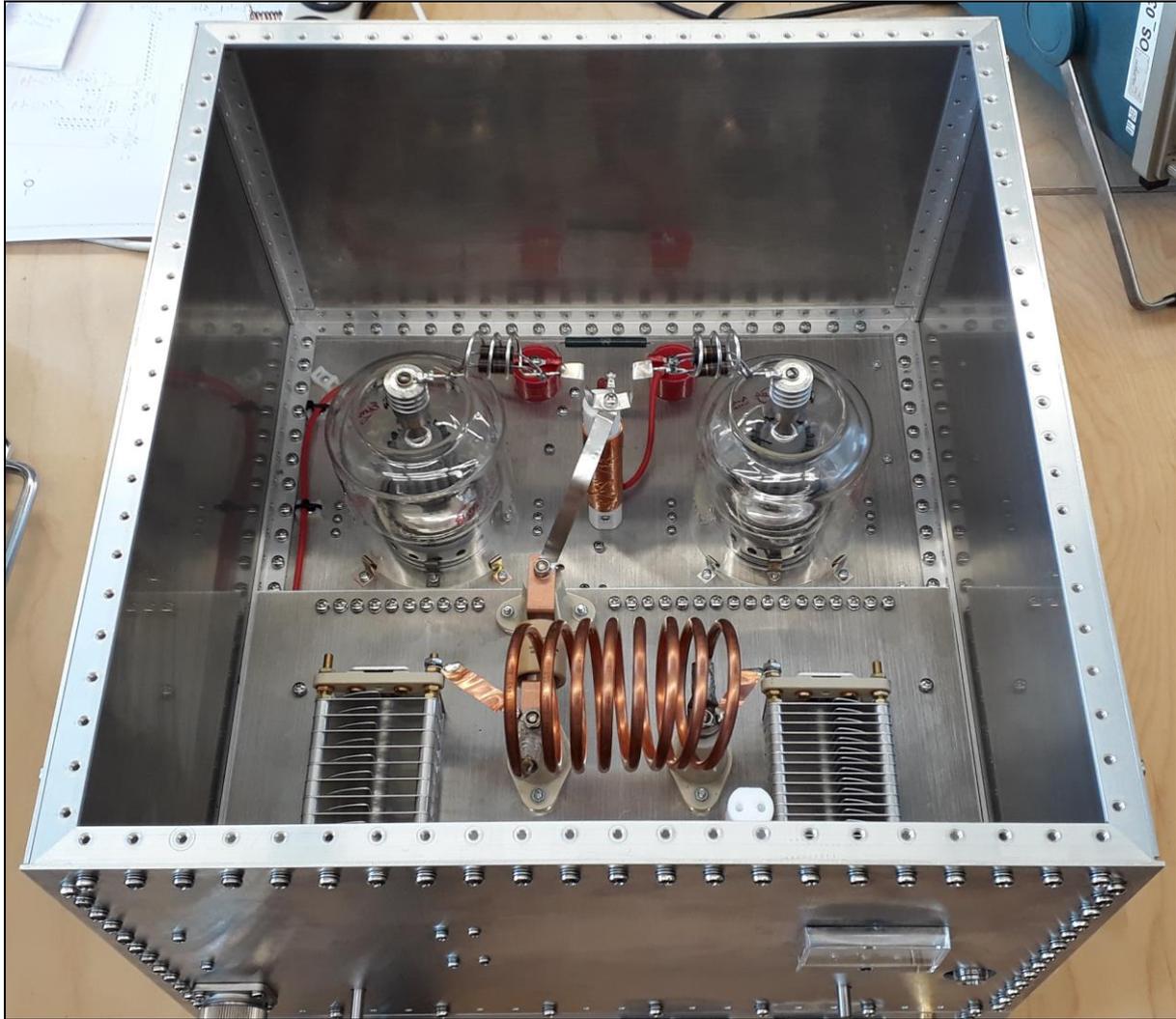
Zunächst wird der mechanische Nullpunkt des Messwerkes eingestellt.

Über den Kalibrierstecker J109 wird über einen Vorwiderstand ein aus einem Labornetzgerät kommender Strom eingespeist. Der hohe Vorwiderstand erleichtert hierbei die Einstellung. Die Einstellung am Labornetzgerät wird so vorgenommen, dass sich über J102 eine Spannung von 1,00V ergibt. Das Trimpoti P31 (von der Frontplatte aus zugänglich) wird so eingestellt, dass das Messwerk 100uA anzeigt.

Die folgende Skizze zeigt den Schaltungsaufbau.



Abschließend wurde die Anzeige des Messwerkes bei tatsächlich anliegender Anodenspannung von 3kV gegen eine oszilloskopische Messung mit einem 1/1000 Tastkopf TEKTRONIX P6015 überprüft.



Die fertig aufgebaute Endstufe (noch vor Modifikation der Dämpfungsglieder an der Anode)

Die Inbetriebnahme am 10.5.2018 und am 11.5. 2018.

Beschreibung des Versuchsaufbaus für den Funktionstest. (10. und 11.5.2018)

Für die im Folgenden beschriebenen Versuche wurde die Endstufe mit einer 50-Ohm-Dummy-Load des Typs MFJ-265 betrieben (Hinweis: Adapter PL zu N von RS-Components Bestellnummer 546-2655)
Zwischen Endstufe und Dummy-Load wurde ein HF-Leistungsmesser DAIWA CN-801 geschaltet. Als HF-Quelle wurde ein Transceiver ICOM IC-7100 mit einer Ausgangsleistung von bis zu 100W verwendet. Der IC-7011 zeigt das SWR an seinem Ausgang an, so dass mit Hilfe dieser Anzeige das Eingangsfilter der Endstufe eingestellt werden konnte.

Unterdrückung einer Eigenschwingung der Endstufe bei ca. 200MHz (10.5.2018)

Bei der ersten Inbetriebnahme der Endstufe zeigte sich ein starkes Schwingen der Endstufe bei ca. 200MHz. Diese Schwingung fiel zunächst dadurch auf, dass der Ruhestrom der Endröhren schwankte und zeitweise recht

hohe Werte von nahe 200mA annahm, während gleichzeitig (ohne Eingangssignal) etwa 40mA Gitterstrom floss. (Werte für die Parallelschaltung beider Röhren)

Die Schwingung wurde dann direkt mit einer mit dem Oszilloskopeingang verbundenen Leiterschleife nachgewiesen, hierbei zeigte sich das Maximum der Feldstärke im Bereich der Anodendrosseln L3 und L4.

Diese Leiterschleife hat einen Durchmesser von ca. 5cm und wurde aus Sicherheitsgründen mit einem PTFE-isoliertem Hochspannungskabel (von Telemeter-Elektronik) für den Spannungsbereich 20kV ausgeführt. (andere Isoliermaterialien sind für HF „durchlässig“ und schmelzen bei Kontakt mit HF-führenden Leitern) Ein Ende der Schleife wurde über eine AWG-18-Litze direkt mit dem (mit dem Zentralerder verbundenen) Gehäuse der Endstufe verbunden.

Diese Schwingung entsteht dadurch, dass die Verbindungsleitung zwischen den Kalthoden der Endröhren als Lecherkreis wirkt. Die Verbindung zwischen den Anoden der Endröhre wirkt ebenfalls als Lecherkreis. Die Schwingungserregung findet durch die verbleibende kapazitive Kopplung zwischen den Anoden und der Kathode statt. Im WS2013/14 wurde ein nach diesem Prinzip arbeitender 70cm-Sender gebaut, bei dem die soeben beschriebene Struktur absichtlich zur Schwingungserzeugung genutzt wurde.

Bei unserer Endstufe liegen die Röhren etwas weiter auseinander als bei anderen ähnlichen Endstufen, von denen Abbildungen im Netz zu sehen sind. Daher ist bei unserer Endstufe die Frequenz der Schwingung geringer und die Güte der Kreise höher, womit die Dämpfung der Schwingung schwieriger ist.

Zur Dämpfung der Schwingung wurden bereits im ersten Aufbau die L/R-Parallelschaltungen R2/L3 sowie R3/L4 vorgesehen. R3 und R4 sind als Parallelschaltung von jeweils drei Kohlemassewiderständen 150 Ohm/2W (Allen Bradley) ausgeführt. L3 und L4 waren zunächst so ausgeführt, dass die Spulen einen Durchmesser von ca. 20mm hatten und die drei parallel geschalteten Widerstände sich im Innenbereich der Spule befanden. Die Spule wurde aus versilbertem Kupferdraht mit einem Durchmesser von 2,0mm (Amidon) gewickelt. Die Windungszahl war 3.

Es zeigte sich nach einigen Versuchen, dass die Wirksamkeit der Dämpfung mit sinkendem Spulendurchmesser deutlich besser ist. Die Spule wurde durch Umwickeln eines einzelnen 150-Ohm-Widerstandes mit 3 Windungen CuAg 2,0mm hergestellt. Mit dieser Kombination zeigte sich nur noch ein seltener Schwingungseinsatz mit dann nur noch sehr geringer Amplitude.

Durch Parallelschalten von zwei weiteren 150 Ohm-Widerständen zu dieser R/L-Kombination ergab sich dann eine ausreichende Dämpfung. Bei der abschließend gewählten Arbeitspunkteinstellung tritt die Schwingung nicht mehr auf. Bei einer zuvor gewählten unrichtigen Arbeitspunkteinstellung ($U_k = 0V$) konnte die Schwingung noch temporär mit einer sehr geringen Amplitude von ca. 1/100 des ursprünglichen Wertes (ca. 10mVpp an der Schleife in der Nähe der Anoden, bei unveränderter Frequenz von ca. 200MHz, dies zeigt die Abhängigkeit der Frequenz von der Geometrie des Kathodenkreises) beobachtet werden.

Das versuchsweise Einschleifen von Ferriten in Serie mit der Heizkreisdrossel und der Anodendrossel brachte keinerlei Veränderung der zu diesem Zeitpunkt noch anliegenden Schwingung.



Beobachtung der parasitären Schwingung mit Leiterschleife aus Teflon-Hochspannungskabel und Oszilloskop

Fehlerbehebung im Netzteil (11.5.2018)

Der Kontakt des Zeitrelais K5 verschweißte beim Überbrücken des Strombegrenzungswiderstandes R21. Der Grund dafür liegt darin, dass die Anodenspannung solange R21 im Stromkreis liegt nur auf 2kV hochläuft. Durch den weiteren Hochlauf auf 3kV nach Überbrückung des Widerstandes tritt im Moment des Schließens des Kontakts von K5 ein nahezu unbegrenzter Stromimpuls auf.

Daher wurde ein NTC-Einschaltstrombegrenzer des Typs AMETEHM MS32-5R020 direkt in Serie mit der Primärwicklung des Anodentrafos geschaltet. Dieser NTC hat einen Kaltwiderstand von 5 Ohm und einen Nennstrom von 20A. Bei Erhitzung sinkt der Widerstand auf 0,1 Ohm (bei 10A) ab.

Die reflektierte Primärspannung des Trafos hat bei einer Anodenspannung von 2kV ungefähr eine Höhe von 200Vp.

Beim Einschalten im ungünstigsten Moment zum Scheitelpunkt der Netzspannung ergibt sich dann eine Spannungsdifferenz von $320Vp - 200Vp = 120Vp$. Damit ist der Einschaltstromimpuls durch den NTC auf $120V/5 \text{ Ohm}$ begrenzt. Der Kontakt des Zeitrelais ist jedoch nur für 15A spezifiziert. Daher wurde die Schaltung dahingehend geändert, dass das Zeitrelais ein Installationsschutz ABB ESB 40-40 mit einer Kontaktbelastbarkeit von 40A ansteuert, mit dessen Kontakt dann R21 kurzgeschlossen wird.

Veränderung am Eingangs-Pi-Filter (11.5.2018)

Es zeigte sich, dass das einstellbare Optimum des SWR dann erreicht wurde, wenn C1 bereits auf maximale Kapazität gestellt wurde. Daher wurde zu C1 ein Glimmerkondensator mit einer Kapazität von 330pF und einer Nennspannung von 500V geschaltet. Damit konnte dann das SWR auf nahe 1 gestellt werden, wobei dann C1 beim Optimum nicht voll hineingedreht war.

Veränderungen am Ausgangs-Pi-Filter und an der Bias-Einstellung (11.5.2018)

Zunächst wurde die Schaltung mit 13 Dioden (ca. -9V Bias in Bezug auf g1) betrieben. Hierbei zeigte sich ein geringerer Idle-Strom als zunächst erwartet. (Nach EIMAC Amateur Service Newsletter W6SAI, Juni 1983 wurde zunächst 70mA pro Röhre erwartet) Daher wurde, in Anlehnung an andere Veröffentlichungen (z.B. <http://wb0nni.dakotamade.com/ggbasic.html>) die Kathoden (über verschiedene Widerstände zwischen 1 Ohm und 25 Ohm) an Masse gelegt. Damit ergab sich dann ein Ruhestrom von 40mA / Röhre, was mit der Angabe der zuvor genannten Quelle korrespondiert. In einer anderen Quelle (ARRL-Handbook 1987, Seite 30-41) wird ein Bias von 8,2V angegeben, jedoch bei $U_a = 3,4kV$ anstelle von 3,0kV.

Beim Betrieb mit ohne Dioden über Widerstände an Masse gelegter Kathode zeigte sich (allerdings bei gleichzeitig noch aufgrund eines anderen Fehlers nicht korrekt abgestimmten Ausgangs-Pi-Filters) ein instabiles Verhalten der Endstufe: Der Anodenstrom ist für die angegebene Ausgangsleistung zu hoch. Sobald man eine Ausgangsleistung von ca. 500W überschreitet, nimmt der Anodenstrom selbsttätig immer weiter zu. Nach dem Wegnehmen des Eingangssignals nimmt der Anodenstrom nur langsam ab, um dann erst nach einigen Sekunden wieder den Ruhewert einzunehmen. Die Anoden der Röhren glühen. Beim Versuch, eine Leistung von 700W abzugeben stieg der Strom so rasch an, dass der Ausschalter nicht mehr rechtzeitig erreicht wurde. Daraufhin brannten die beiden flinken 1A-Sicherungen in der Anodenzuleitungen durch. (Auch wenn es 250V-ACSicherungen waren haben sie den 3kV-DC-Stromkreis einwandfrei getrennt, wobei eine starke Lichtbogenbildung in den Sicherungen zu beobachten war. Nach Austausch der Sicherungen arbeitete die Endstufe wie zuvor, die Sicherungen haben also ihren Zweck erfüllt und Schäden an Röhren und HV-Gleichrichter vermieden.

Es sollte ausgeschlossen werden, dass das beobachtete Verhalten die Auswirkung möglicherweise beschädigter Röhren ist. Daher wurden die Röhren getauscht. Mit den neu eingesetzten Röhren zeigte sich exakt das gleiche Verhalten, wobei selbstverständlich nur das Verhalten bei sehr kleinen, noch „ungefährlichen“ Leistungen getestet wurde.

Es zeigte sich, dass die optimale Einstellung des „Load“-Drehkos des ausgangsseitigen Pi-Filters bei vollständig hereingedrehtem Drehko lag. Daraufhin wurden die Komponenten des ausgangsseitigen Pi-Filters mit einem L/C-Meter noch einmal einzeln überprüft. Hierbei zeigte sich, dass der ausgangsseitige Drehko nur einen Einstellbereich bis 240pF hatte, während im Entwurf 1nF Einstellbereich vorgesehen war. Hier wurde versehentlich der falsche Drehko-Typ bestellt/geliefert. Durch das Parallelschalten von Festkondensatoren wurde der Einstellbereich dann angepasst. Hierbei wurden hochbelastbare „Doorknob“-Keramikkondensatoren und ebenfalls hochbelastbare Rohrkondensatoren verwendet.

Nach dieser Modifikation wurde dann das erwartete Verhalten des Pi-Filters vorgefunden. Mit dem „Plate“-Kondensator konnte ein scharf eingegrenztes Minimum des Anodenstroms eingestellt werden. Mit dem „Load“-Kondensator konnte anschließend die Ausgangsleistung maximiert werden.

Es zeigte sich, dass der Wirkungsgrad deutlich unterhalb des erwarteten Wertes von 60% (ohne Berücksichtigung der HF-Eingangsleistung) lag. Ebenso ließ die Stabilität noch zu wünschen übrig.

Daher wurde die Entscheidung getroffen, sich an der Quelle ARRL-Handbook 1987, Seite 30-41 zu orientieren, und die Kathode wieder über die Diodenkette aus D1..D13 anzuschließen. (Und dies ohne zusätzlichen Widerstand im Kathodenkreis).

Hierbei zeigte sich bis zu einer Ausgangsleistung von 250W das erwartete Verhalten der Endstufe, und das auch in absolut stabiler und reproduzierbarer Form. Bei einer weiteren Erhöhung der HF-Eingangsleistung zeigte sich dann jedoch keine signifikante Erhöhung der HF-Ausgangsleistung mehr. Stattdessen zeigte sich ein überproportionales Ansteigen des Gitterstroms.

Es wurde eine Diode der Kette kurzgeschlossen. Damit zeigte sich die zuvor beschriebene Grenze der Ausgangsleistung nicht mehr bei ca. 250W, sondern bei ca. 350W, mit dort identischem Verhalten.

Die Zahl der wirksamen Dioden in der Kette wurde dann so lange durch Kurzschließen von Dioden reduziert, bis sich die zuvor beobachtete „Leistungsgrenze“ auf über 1kW nach oben verschob. Dies war mit 6 noch wirksamen Dioden, entsprechend einer Biasspannung von ca. -4V bezogen auf g1 der Fall. Mit 6 wirksamen Dioden zeigte sich auch bei Leistungen etwas über 1kW ein absolut stabiler Betrieb. Nach Wegnahme des Eingangssignals sinkt der Anodenstrom augenblicklich auf den Ruhewert ab.

Es wurden folgende Messwerte (bei schlechter Ablesegenauigkeit an den Drehspulmesswerken) aufgenommen:

Pin: 90W

Pout: 1100W

Ua: 2,8kV

Ia: 0,64A

Ig: 0,38A

Damit ist dann der Wirkungsgrad (ohne Berücksichtigung der HF-Eingangsleistung) 61%.

Der theoretisch unter Idealbedingungen zu erwartende Wert ist 60%, er wird im Rahmen der Ablesegenauigkeit hinreichend angenähert.

Im Zuge der Verringerung der Zahl der Dioden veränderte sich auch der Ausgangswiderstand der Endstufe, was sich daran bemerkbar machte, dass die Parallelkapazität zum „LOAD“-Drehkondensator immer weiter reduziert werden musste, um noch das Optimum der Ausgangsleistung einstellen zu können. Abschließend war eine Parallelkapazität von 230pF wirksam.

Weiterhin wurde beobachtet, dass der optimale Punkt der Einstellung des „PLATE“-Drehkondensators sich mit der Aussteuerung nur fast unmerklich gering ändert, während die Kapazität des „LOAD“-Drehkondensators für den optimalen Abgleichpunkt mit maximaler Ausgangsleistung mit steigender Ausgangsleistung deutlich kleiner wird.

Es zeigte sich, dass der in der Literatur angegebene Wirkungsgrad von 60% (ohne HF-Eingangsleistung) im Rahmen der Ablesegenauigkeiten erreicht wurde.

Es wurde die Entscheidung getroffen, die Zahl der wirksamen Dioden nicht weiter zu reduzieren, da das Ziel „Ausgangsleistung 1kW“ erreicht wurde und der Abstand zum potentiell instabilen Betrieb so groß wie möglich bleiben soll.

Man erkennt, dass die nun gefundene Lösung einer Gittervorspannung von -4V auf der Mitte zwischen den beiden sich widersprechenden vorgenannten Quellen (8,2V und 0V) liegt. Für den Verfasser war es absolut überraschend, dass derart geringe Änderungen der Gittervorspannung einen unerwartet großen Einfluss (schon qualitativer Größenordnung) auf die Arbeitsweise der Endstufe haben.

Abschließender Test (11.5.2018)

Es waren die folgenden Einstellungen wirksam

Lage der Drehknöpfe: „1“ bei minimaler Kapazität der Drehkos.

Eingangs-Pi-Filter:

Parallelkapazität zu C1: 330pF
 C1 „INP“ „3,8“
 C2 „CATH“ „5,5“

Ausgangs-Pi-Filter:

Parallelkapazität zu C14 (LOAD): 230pF
 C13 „PLATE“ „2,0“
 C14 „LOAD“ „10,2“

Bias:

6 wirksame Dioden

Das Ausgangs-Pi-Filter wurde bei (nach Abgleich) 1100W auf maximale Ausgangsleistung abgeglichen. Anschließend wurden die folgenden Messwerte (bezogen auf die Parallelschaltung beider Röhren) aufgenommen:

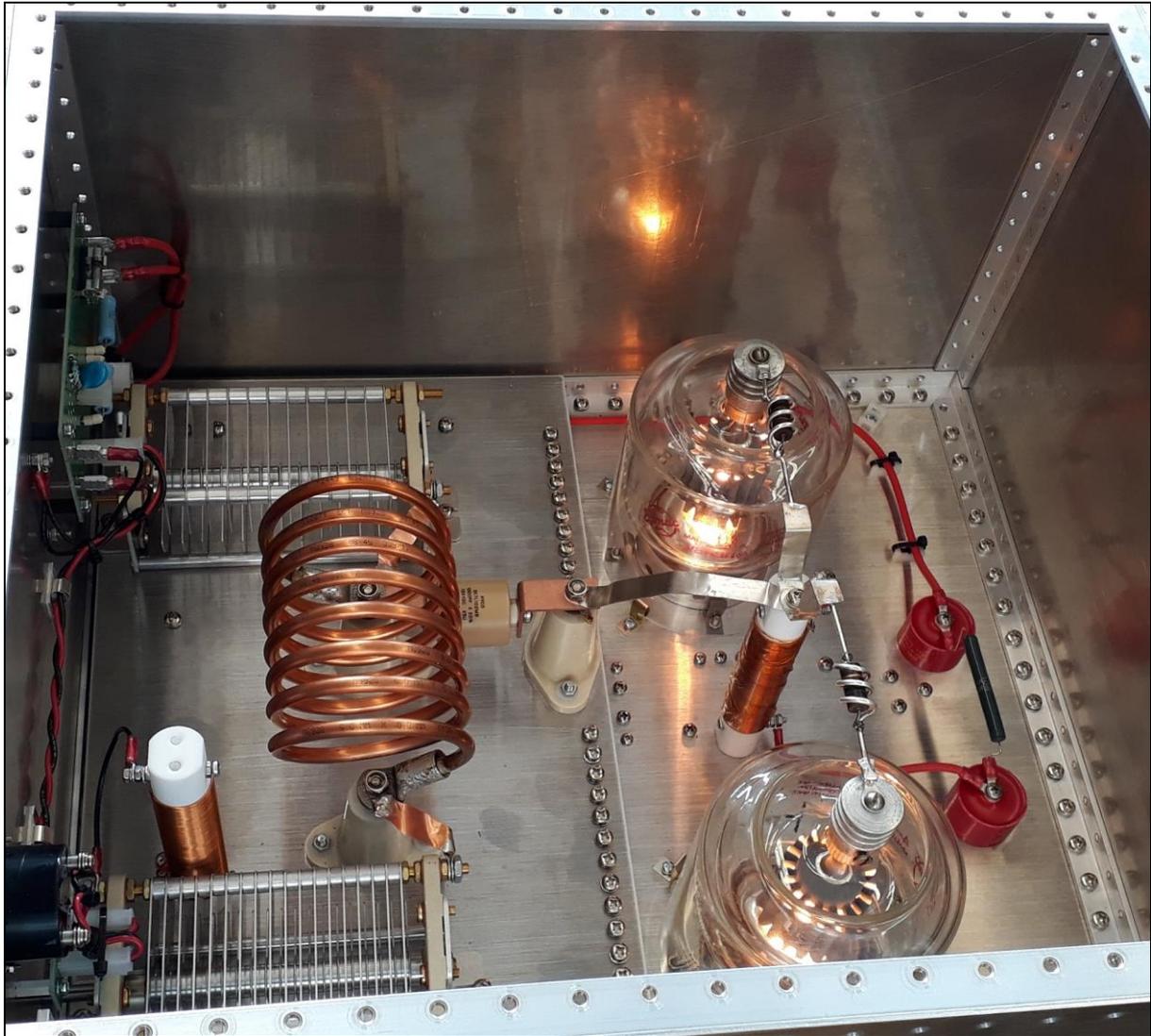
<i>P in</i>	<i>P aus</i>	<i>Ia</i>	<i>Ig</i>	<i>Ua</i>	<i>P supply</i>	<i>Wirkungsgrad (ohne HF- Eingangsleistung)</i>
95W	1250W	0,64A*	0,40A	2,8kV	1792W	70%*
90W	1000W	0,64A	0,38A	2,8kV	1792W	56%
80W	950W	0,60A	0,35A	2,8kV	1680W	57%
70W	880W	0,58A	0,28A	2,8kV	1624W	54%
60W	775W	0,55A	0,24A	2,8kV	1540W	50%
50W	675W	0,52A	0,21A	2,8kV	1456W	46%
40W	525W	0,42A	0,16A	2,8kV	1176W	45%
30W	390W	0,38A	0,12A	2,8kV	1064W	37%
20W	250W	0,32A	0,09A	2,85kV	912W	27%
10W	150W	0,24A	0,06A	2,85kV	684W	22%
5W	70W	0,20A	0,04A	2,9kV	580W	12%
0W	0W	0,08A	0,00A	3,0kV	240W	-

(*wahrscheinlich hier großer Ablesefehler)

Bei Beurteilung dieser Messwerte ist die Ablesegenauigkeit an den Drehspulmesswerken zu berücksichtigen.

Man erkennt, dass in der Umgebung des Abgleichpunktes der theoretisch zu erwartende Wirkungsgrad von 60% im Rahmen der Ablesegenauigkeit beinahe erreicht wird. Naturgemäß geht der Wirkungsgrad bei geringeren Leistungen damit zurück, da der Ausgangswiderstand der Endstufe von ihrer Aussteuerung abhängt.

Der Gitterstrom ist mit 190mA pro Röhre bei 1kW höher als die Literaturangaben, die sich meist im Bereich um 100mA pro Röhre bewegen.



Die Endstufe im Probebetrieb



Das Team nach erfolgreichem Abschluss der Tests

Der Anwendungstest

Die grundsätzliche Planung

Dieser Test wurde am 12.05.2018 durchgeführt

Wir trafen uns um 13:00 Lokalzeit im DK0TU-Shack mit dem Vorhaben mindestens ein SSB Funkgespräch mit einer Amateurfunkstation aus Amerika zu führen. Der Treffzeitpunkt wurde bewusst am Mittag/Nachmittag gewählt, da dann die besten Funkbedingungen auf 20m im Richtung Amerika gegeben sind.

Der Funk-Setup

Als Transmitter wurde ein Flex 6700 genutzt. Er hat eine maximale Ausgangsleistung von 100W. Hinter der Endstufe wurden verschiedene Filter genutzt, welche gemeinsam eine Signaldämpfung von über 80 dB auf allen Frequenzen Außerhalb des 20m Bandes brachten. Als Sendeantenne wurde eine 20m 4-Element-Fullsize Yagi verwendet. Sie ist nach dem Design von G0KSC gebaut: [<http://g0ksc.co.uk/14mhz-4el-owa-yagi.html>]

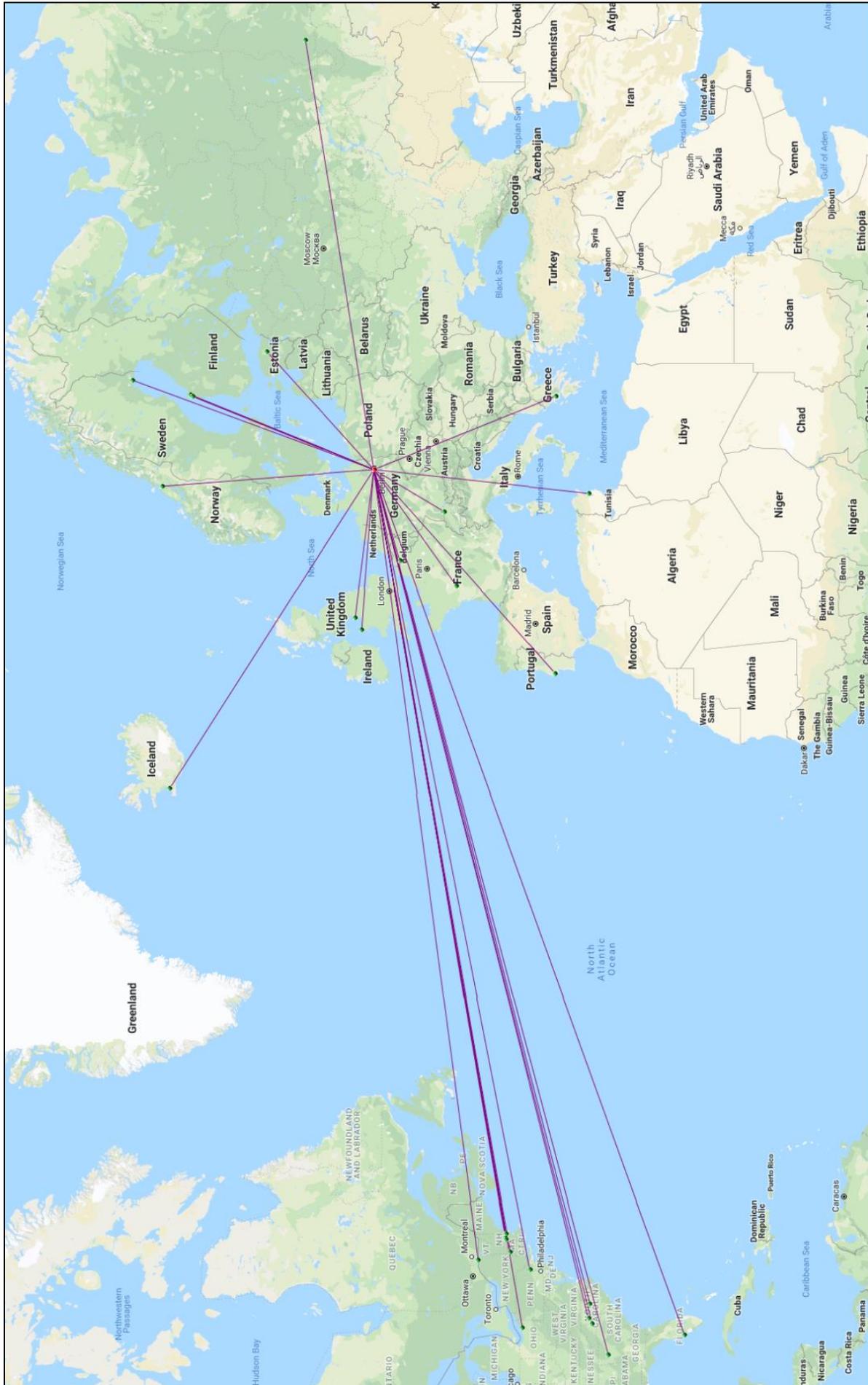
Der Tuning-Test

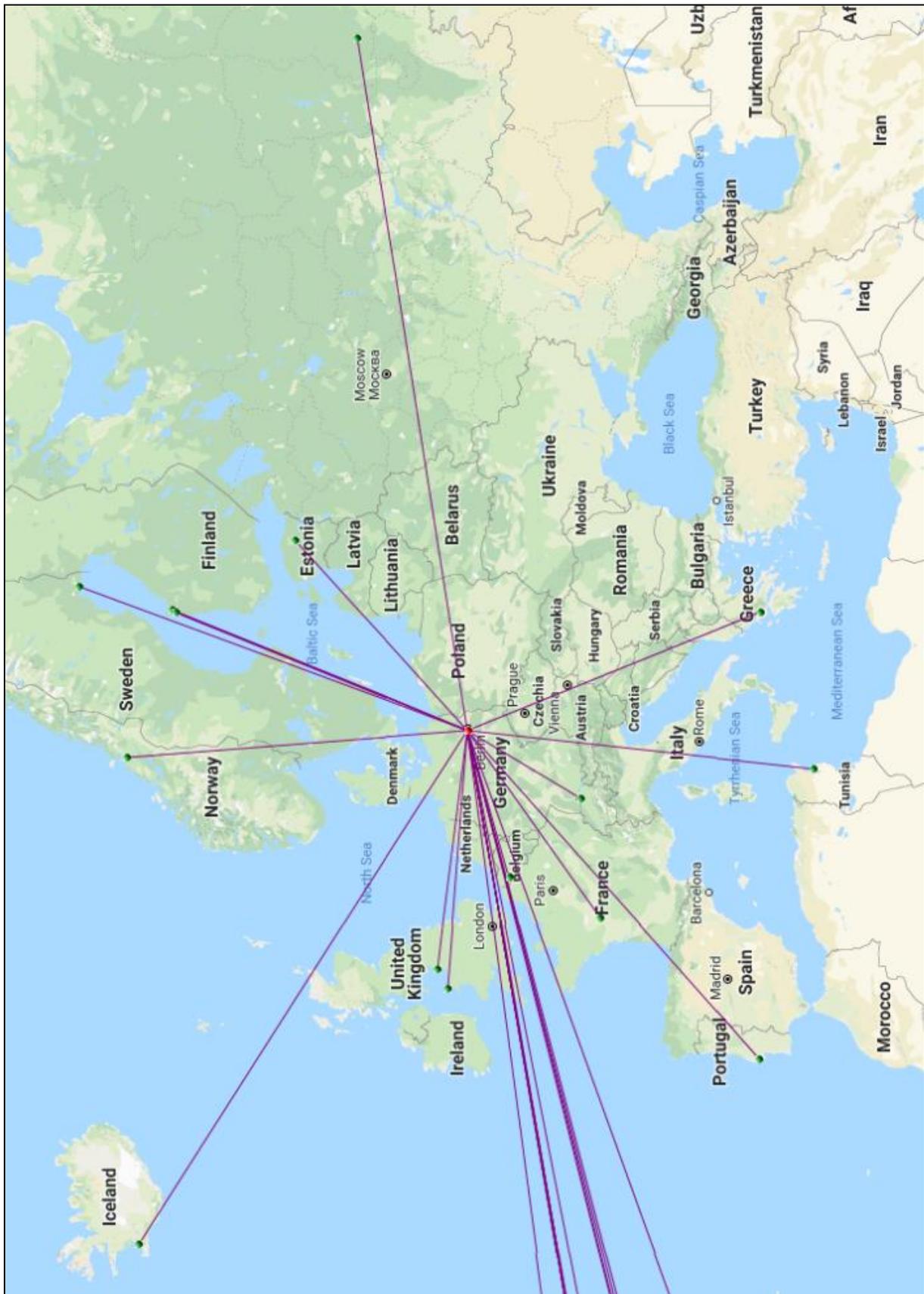
Es wurden die Ergebnisse von Vortag mit dem bei DK0TU vorhandenen Setup verifiziert. Dafür wurde die selbe Frequenz (14.200 MHz) wie in den vorherigen Tagen genutzt. Es wurde die maximal erlaubte Ausgangsleistung von 750W bei einer Eingangsleistung von 65W erreicht und somit die Ergebnisse des Vortags bestätigt.

Der Morse-Test:

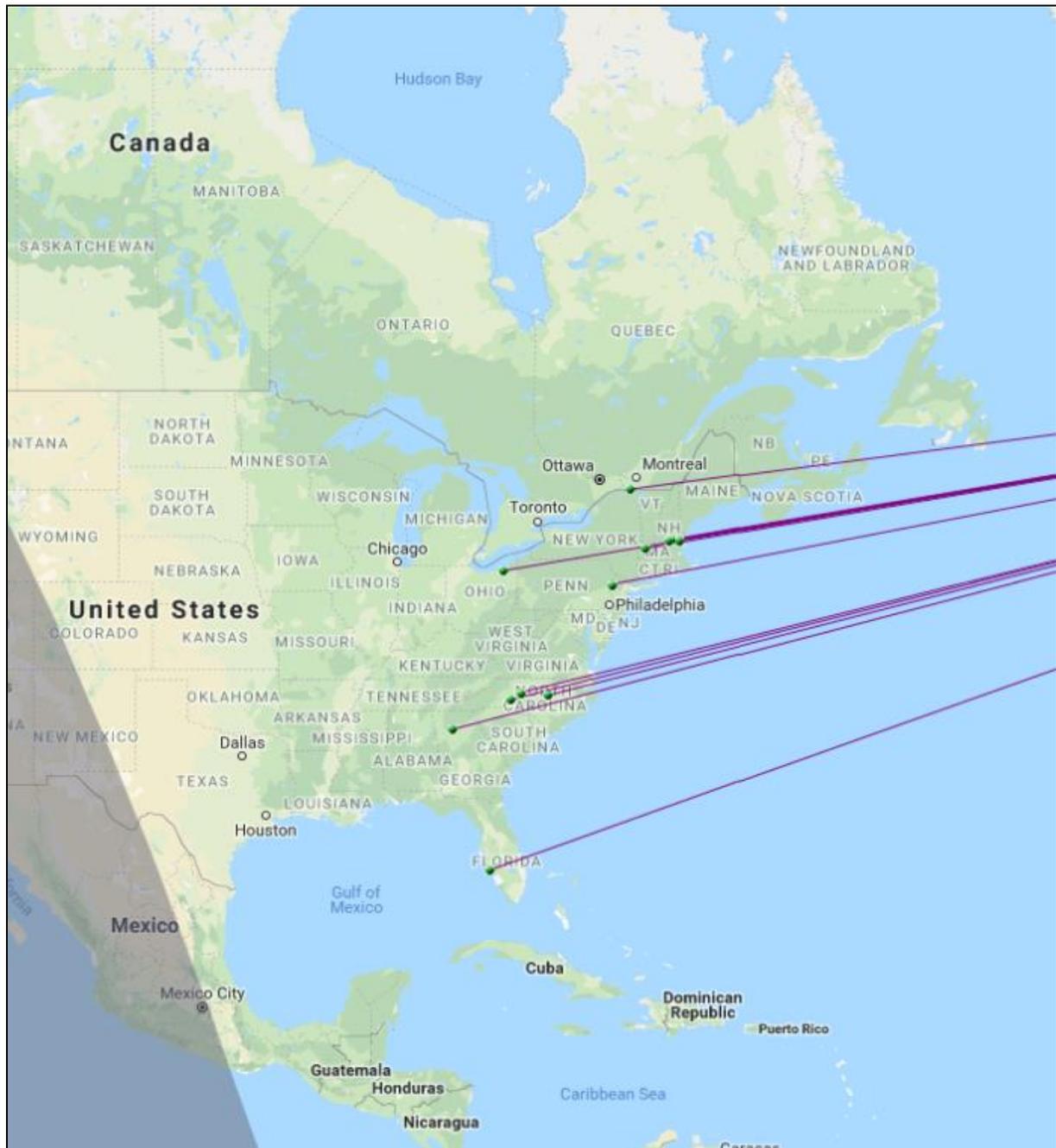
Die Antenne wurde auf 310 Grad gedreht. Dies ist von Deutschland aus in Richtung Nordamerika. Dann morsten wir mit 750W Ausgangsleistung eine kurze Testnachricht. Diese wurde von einigen automatisch dekodierenden Stationen empfangen. Auf der Website [reversebeaconnetwork](http://www.reversebeacon.net/) [<http://www.reversebeacon.net/>] ließ sich einsehen wo wir empfangen wurden. Wir wurden dabei von vielen Stationen in Europa, aber auch einige an der Ostküste Amerikas und sogar einer Station aus Kanada empfangen.

Die Ergebnisse dieses Tests sind auf den Folgeseiten dargestellt.





Lage der Stationen in Europa, Asien und Afrika, die automatisch unsere Morsesendung aufgenommen haben



Lage der Stationen in Nordamerika, die automatisch unsere Morsesendung aufgenommen haben

Der SSB Audio-Test:

Als nächstes sollte die Audioqualität der Aussendung in SSB geprüft werden um damit Rückschlüsse auf die Linearität der Endstufe zu ziehen. Dazu wurde sich zunächst mit einem Web-SDR in der Schweiz verbunden. [<http://kiwisdr.hamspirit.de:8073/>] Als Ausgangsleistung wurde wieder 750W verwendet. Das in der Schweiz empfangene Funksignal klang gut, die Endstufe scheint also gut linear zu arbeiten.

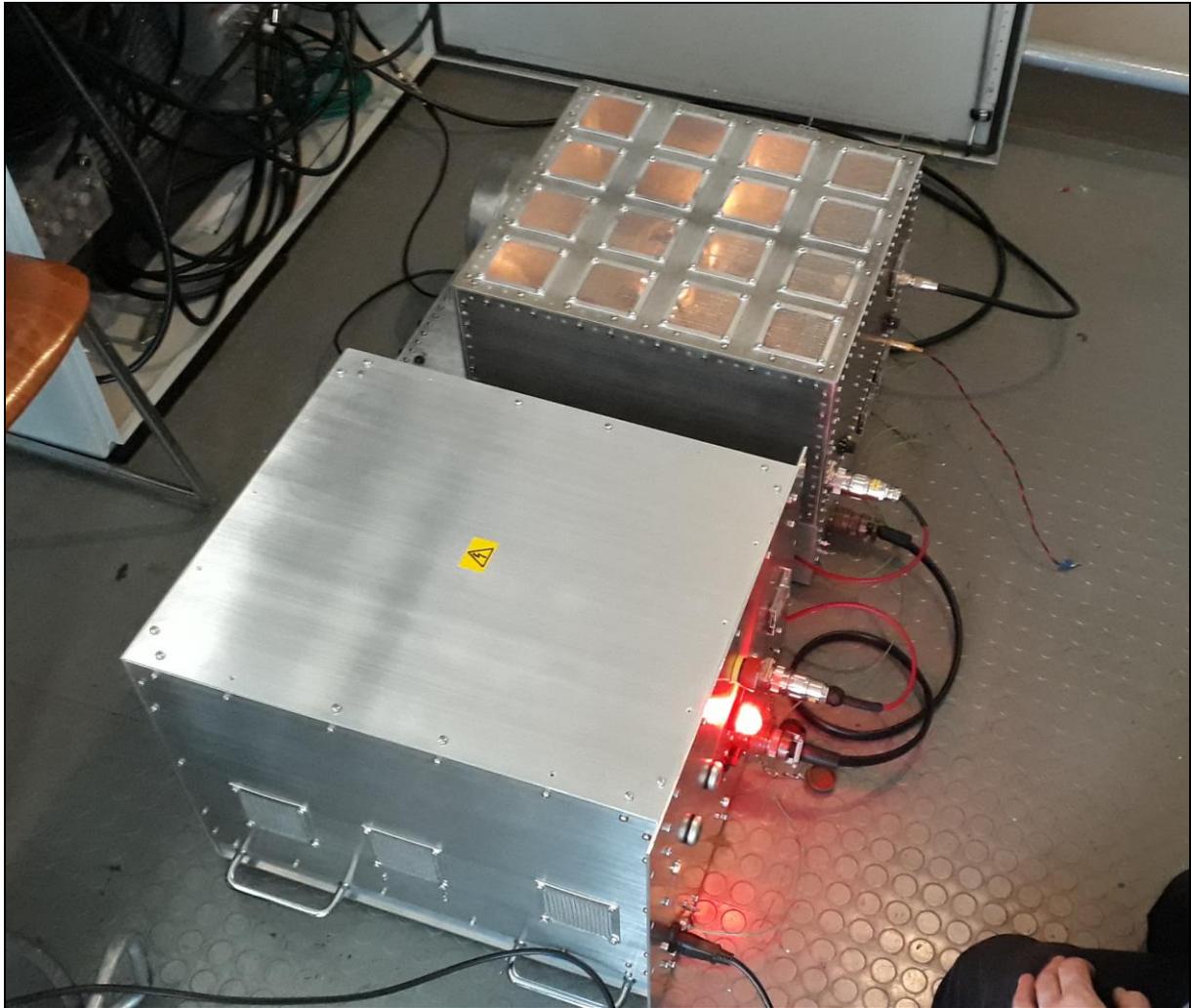
Das erste QSO

Zuletzt riefen wir mit 750W Sendeleistung in SSB CQ. Die Antenne richteten wir wieder nach Nordamerika. Nach kurzen Rufen antwortete Len K8GM auf unseren CQ-Ruf. Len's Funkstation liegt in Alden, Michigan. Die Entfernung von DK0TU beträgt 6704.6 km. Er gab uns den Signalrapport 57. Also bestmögliche Audioqualität (5 von 5) und ein Signalpegel von 7 (0 ist das natürliche Hintergrundrauschen und 9 der höchstmögliche Pegel). Als Antenne nutzte er eine 6-Element Yagi für 20m. Er lobte unser Audiosignal und fragte einige Fragen über unsere PA, da er früher auch eine PA mit zwei 4-400A Röhren gebaut hatte.

Das zweite QSO

Als zweites funkten wir kurz mit Horace W3AE aus Philadelphia, Pennsylvania. Entfernung aus Berlin: 6511.3km. Horace gab uns als Empfangsbericht eine 59 und lobte auch unser schönes Signal. Es sei zu dem Zeitpunkt eines der Lautesten aus Europa.

Während aller Funkverbindungen und Tests hielten wir die Anzeigeeinstrumente der Endstufe immer im Auge um notfalls eingreifen zu können. Die Endstufe lief durchgehend fehlerfrei.



Die im Dachgeschoss des TU-Hauptgebäudes aufgebaute Endstufe



Die zum Test verwendete Yagi-Antenne von DK0TU auf dem Dach des Hauptgebäudes der TU-Berlin



Das Team nach erfolgreichem Abschluss des Anwendungstests

Danksagung

Dieses Projekt war nur mit vielfältiger Unterstützung möglich:

Thomas Bremer von Bremer Transformatoren GmbH fertigte uns die benötigten Netztrafos zu einem symbolischen Preis.

Günter Reichl von Reichl-EMV stellte uns hochbelastbare Keramikcondensatoren extrem kurzfristig als Leihgabe zur Durchführung von Messungen zur Verfügung. Herr Reichl stellte uns auch das „ARRL-Handbook 1987“ zur Verfügung, in dem ausführlich Gitterbasis-Endstufen mit der 4-400A beschrieben wurden.

Martin Nissen von Tigris-Elektronik GmbH stellte die komplette Sammlung der DARC-Zeitschriften DL-QTC bzw. CQ-DL von 1949 bis 2003 aus dem Nachlass seines Großvaters zur Verfügung. Diese Zeitschriften enthalten eine unschätzbare Fülle an praxisorientierten und gleichzeitig theoretisch fundierten Artikeln. Nicht zuletzt lässt sich diesen Artikeln unendlich wertvolles Erfahrungswissen entnehmen, das in keinem Lehrbuch zu finden ist.

Felix Baum von DKOTU brachte sein erhebliches amateurfunktechnisches Wissen ein ermöglichte uns die Nutzung der Antenne und weiteren Infrastruktur der Funkstation DKOTU. Als lizenzierter Funkamateurl konnte Herr Baum auch den Funkverkehr bei unserem Anwendungstest durchführen.

Dale Smith in Kanada beschaffte uns die schwer erhältlichen Glaskamine, Sockel und Befestigungsclips für die 4-400A sowie noch ungebrauchte 4-400A aus den 1990-er Jahren zu einem fairen Preis.

Die Firma Müller-Spulen fertigte uns mit großem Engagement die Kupferrohr-Spule für das Pi-Filter als Einzelstück.

Die Firmen Feinmechanik Willi Müller GmbH und Gravieranstalt Jegel fertigten uns die umfangreichen und komplizierten mechanischen Aufbauten engagiert und präzise und in kurzer Zeit.