

Erfahrungen beim Bau einer 137kHz PA

Inhaltsverzeichnis

1. Wie es dazu kam.....	3
2. Voraussetzungen.....	3
3. Realisierungsmöglichkeiten.....	3
4. Aufbau mit Hilfe des Messsenders	3
5. Erfahrungen mit der linearen Struktur.....	6
6. Ein neuer Ansatz.....	8
7. Das neue Konzept.....	8
8. Andy Talbots Lösung und Unterschiede zur eigenen Realisierung.....	16
9. Eigene Erfahrungen.....	17
9.1 Die Ansteuerung der Transistoren.....	17
9.2 Der Schwingkreiskondensator.....	18
9.3 Die Schutzwicklung.....	19
9.4 Die Dämpfungswiderstände.....	19
9.4 Die Schutzdioden.....	20
9.5 Der Ausgangsübertrager.....	20
9.6 Die Schwingkreissspule.....	21
9.7 Die Antennenspule.....	24
10. Was noch eingebaut wurde.....	26
10.1 Steuerung.....	26
10.2 Messung.....	26
11. Tests für den Betrieb auf 477kHz.....	26
12. Gesamtansicht der PA.....	27

1. Wie es dazu kam

Der Auslöser für den Bau eines 137kHz Sender war eine Vortragsreihe von Gerhard Beckmann (DK6NI) über WSPR und Langwelle. Dadurch kam der Wunsch auf, es auch auf diesen Frequenzen QRV zu werden um zu sehen, wie das Ausbreitungsverhalten auf diesen niedrigen Frequenzen ist.

2. Voraussetzungen

Wichtigste Voraussetzung für die ersten Versuche war eine funktionierende WSPR-Kodierung. Die ersten Programmierversuche auf einem Linux System waren schon nach zwei Tagen erfolgreich. Die Tonfolge konnte über die Soundkarte ausgegeben werden und schon beim ersten Sendeversuch auf 14 MHz kamen Reporte zurück.

3. Realisierungsmöglichkeiten

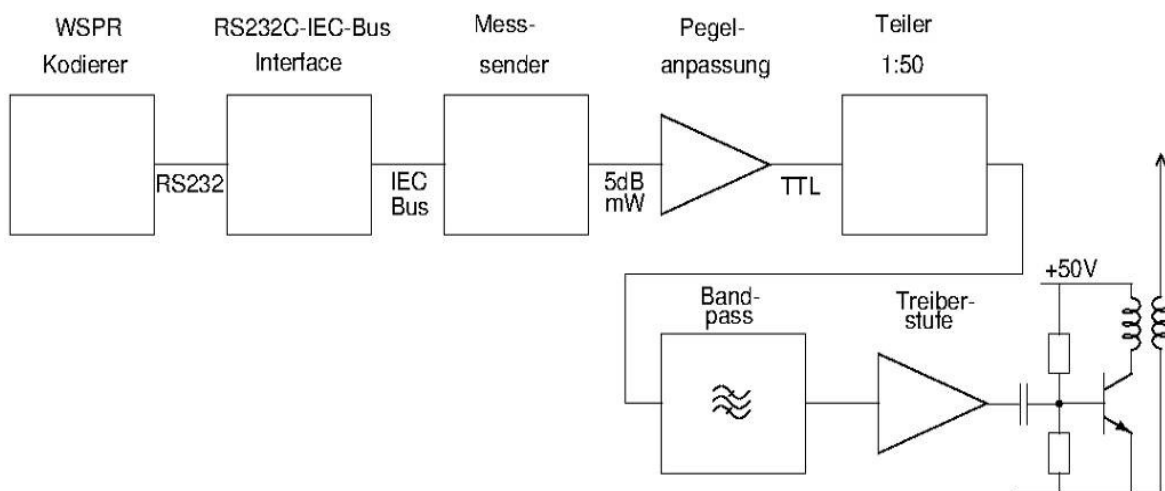
Um einen Langwellensender mit einen WSPR-Signal bauen zu können waren drei unterschiedliche Realisierungsmöglichkeiten denkbar:

- Heruntermischen eines Kurzwellen-WSPR-Signals.
Bei der genaueren Betrachtung zeigte sich, dass dieses Verfahren einige gravierende Nachteile hat. So müssen während der Sendung ein PC, eine Kurzwellentransceiver und der eigentliche Langwellensender laufen. Neben dem Mischer ist ein brauchbares Filter zu bauen. Beim mischen auf so tiefe Frequenzen erschien mir die Gefahr sehr hoch dass unerwünschte Mischprodukte in die Kurve des Bandfilters fallen.
Aus allen diesen Gründen wurde dieses Verfahren nicht weiter untersucht.
- Betrieb eines Quarzoszillators, der im Takt der WSPR-Kodierung „gezogen“ wird.
Dazu braucht es ein Gerät, das im WSPR-Takt jeweils einen von vier Ausgängen setzt. Mit jedem dieser Ausgänge kann der Quarz dann auf eine der um jeweils 1,464129Hz verschobenen Frequenzen gezogen werden. Nachteil dieses Verfahrens ist, dass man mit der Quarzfrequenz auf eine Frequenz festgelegt ist. Außerdem muss ein solcher Quarz erst beschafft werden.
- Steuerung eines Messenders
Im Shack steht ein Messender der sich von 9kHz bis 2400MHz in 1Hz-Schritten einstellen lässt. Dieses Einstellen geht entweder von Hand oder über eine IEC-Bus-Schnittstelle. Um diesen Messender einsetzen zu können musste ein Gerät gebaut werden, das die Senderkommandos so absetzt, dass das Ausgangssignal des Messenders schon die WSPR-Information enthält.

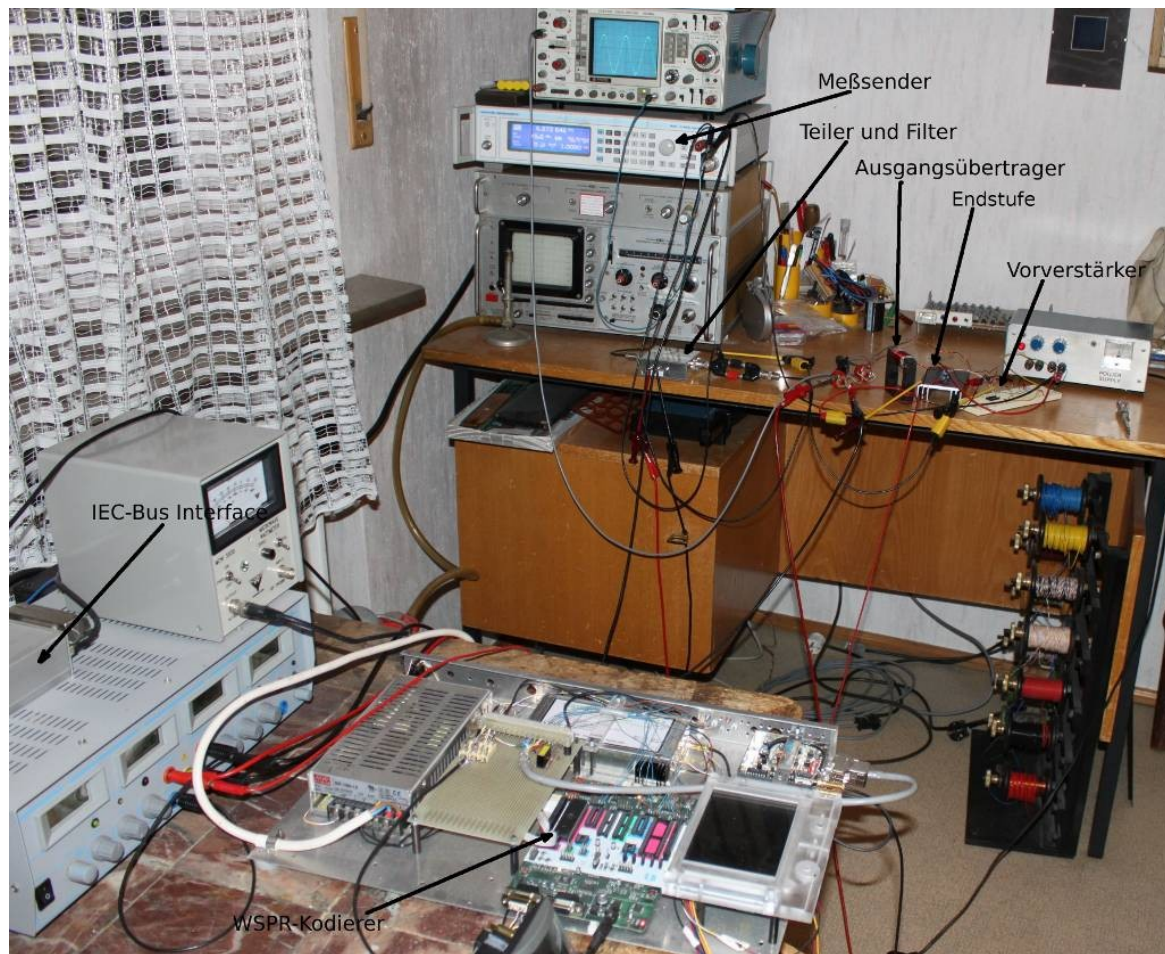
4. Aufbau mit Hilfe des Messenders

Damit der Aufbau zusammen mit dem Messender funktioniert wurde für einen kleinen Atmel-Prozessor programmiert, der im richtigen Takt die Senderkommandos auf einer seriellen

Schnittstelle ausgibt. Diese seriellen Signale wurden dann mit einem – ebenfalls mit einem Atmel-Prozessor realisierten – IEC-Bus-Interface an den Messender übertragen. Dabei ergab sich allerdings das Problem, dass der Sender „nur“ in 1Hz-Schritten abgestimmt werden konnte, die 1,464...Hz waren so nicht erreichbar. Die Lösung war, den Messender auf der 50-fachen Frequenz laufen zu lassen und dessen Signal mit einem einfachen TTL-Gatter durch 50 zu teilen. Das resultierende TTL-Ausgangssignal konnte mit einem aktiven 3-poligen Tiefpass (realisiert mit Operationsverstärkern) sehr einfach gefiltert werden weil die erste Oberwelle des Rechtecksignals bei über 400kHz liegt. Das Ausgangssignal dieses Filters wurde nach einer Verstärkung mit einem ein-Transistor-Stromverstärker auf den Endtransistor gegeben. Der Endtransistor – in Emitter-Basis-Schaltung – wurde im Arbeitspunkt so eingestellt, dass er bei 50V Kollektorspannung einen Strom von 1,5A hatte. In der Kollektorleitung war eine Spule angebracht, die das Langwellensignal auf die Anpaßspule der Antenne einkoppelte.



Blockschaltbild des „linearen“ Langwellensenders



Erster „fliegender“ Testaufbau

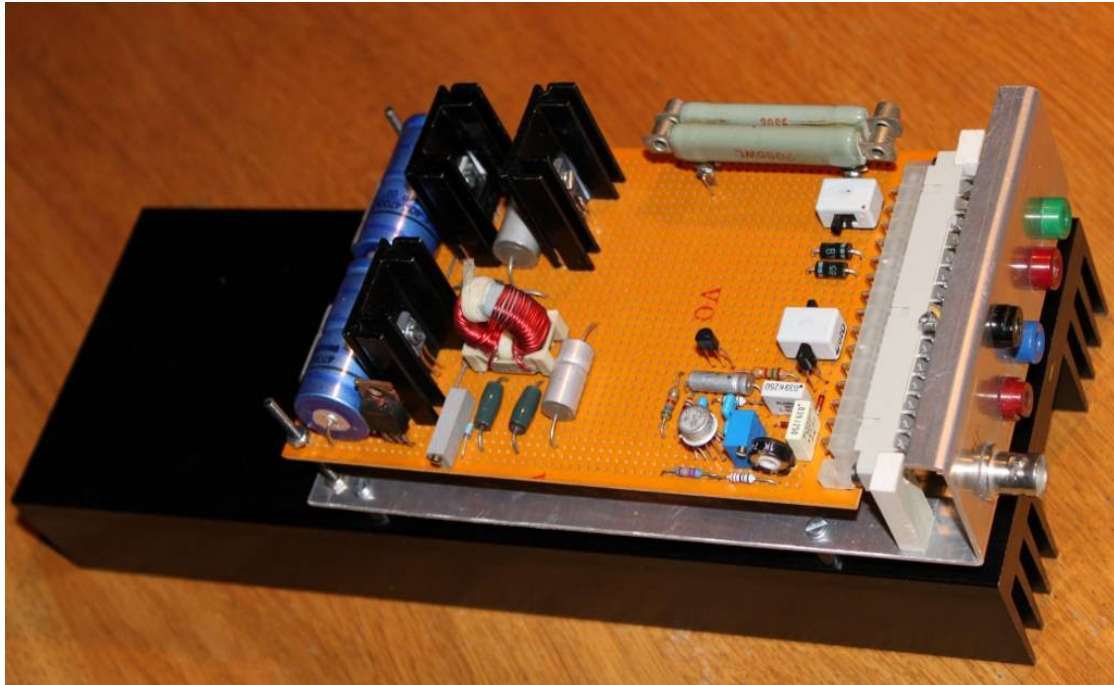
5. Erfahrungen mit der linearen Struktur

Das Signal konnte bei DK6NI in ca. 2km Entfernung empfangen werden wenn auch noch nicht allzu stark. Um die Verluste nach dem Endtransistor zu minimieren wurde der aus einem Ferritkern eines alten Zeilentrafos bestehende Ausgangsübertrager durch eine Luftspule ersetzt. Bei der Luftspule war zudem eine Feinabstimmung möglich indem ein Ferritstab an einer Schnur befestigt in die Spule getaucht wurde. Am Antennenanschluss konnten mit dieser Konstruktion einige kV erreicht werden (ein Spannungsprüferschraubenzieher begann in ca. 1m Entfernung zu leuchten). Es gab eine Reihe von Reporten von Stationen im Umkreis von ca. 40km sowie einen aus einer Entfernung von 250km. Trotz tagelanger Sendungen kamen aber leider keine weiteren Reporte mehr hinzu.

Spule zur Anpassung der Langwellenantenne. Oben ist der Ferritkern zur Feinabstimmung zu erkennen. Die blaue Wicklung ist die Primärwicklung, der obere Anschluß ist der für die Langwellenantenne



Mit einer Reihe von Maßnahmen wurde nun versucht das Ausgangssignal noch weiter zu verstärken. Dazu wurden Spannung und Strom der Endstufe erhöht. Der gesamte Aufbau auf einer Platine zusammengefasst und ein weiterer Vorverstärker für die Ansteuerung des Endtransistors eingebaut (einziger Effekt: Der Endtransistor haucht sein Leben aus).



Stabiler Aufbau von Vorverstärker und Endstufe.

Ein weiterer Effekt störte bei den Versuchen die Leistung weiter zu erhöhen: Es traten Rückkopplungseffekte auf die das Ausgangssignal extrem verschlechtert haben.

Nachdem alle Versuche das Ausgangssignal deutlich zu verbessern nichts mehr erbracht haben, wurde die Versuche mit dieser Struktur eingestellt.

6. Ein neuer Ansatz

Während der Suche nach Verbesserungen der oben beschriebenen Struktur tauchte ein Artikel von Andy Talbot (G4JNT) „A 700W Switch Mode Transmitter for 137kHz“ auf. In diesem Artikel beschreibt Andy Talbot recht anschaulich wie er diese Endstufe zum Laufen bekommen hat und was ihm auf dem Weg dorthin alles widerfahren ist. Das Konzept ist vollkommen anders als das bisher verfolgte und hat mich irgendwie fasziniert.

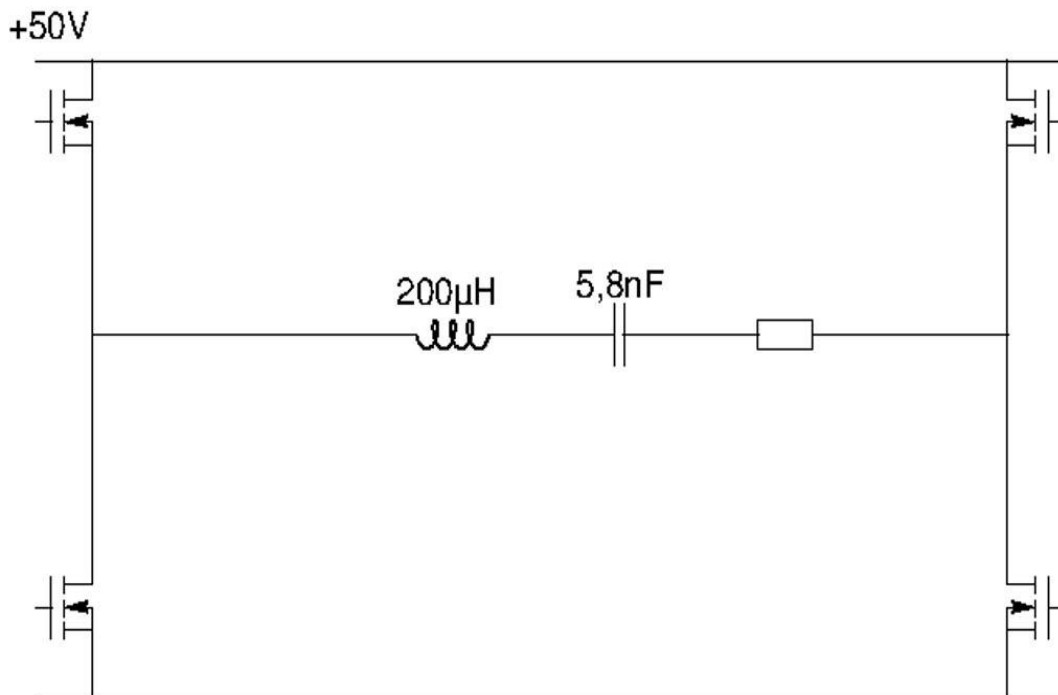
7. Das neue Konzept

Das neue Konzept ist von den Decca-Sendern abgeschaut. Decca war ein Navigationssystem bei dem auf Langwelle (75kHz bis 100kHz) Sender betrieben wurden die Dauerstrich (mit etwas CW-Tastung) sendeten. Die Leistung pro Sender lag bei ca. 1200W. Für die Navigation wurden die Phasendifferenzen zwischen den Signalen gemessen. Dazu gab es Karten in denen diese

Differenzen als Gitternetz eingetragen waren. Mit den gemessenen Phasendifferenzen konnte man so in den Decca-Karten die eigene Position ablesen. Diese Sender mussten eine Reihe von Voraussetzungen erfüllen:

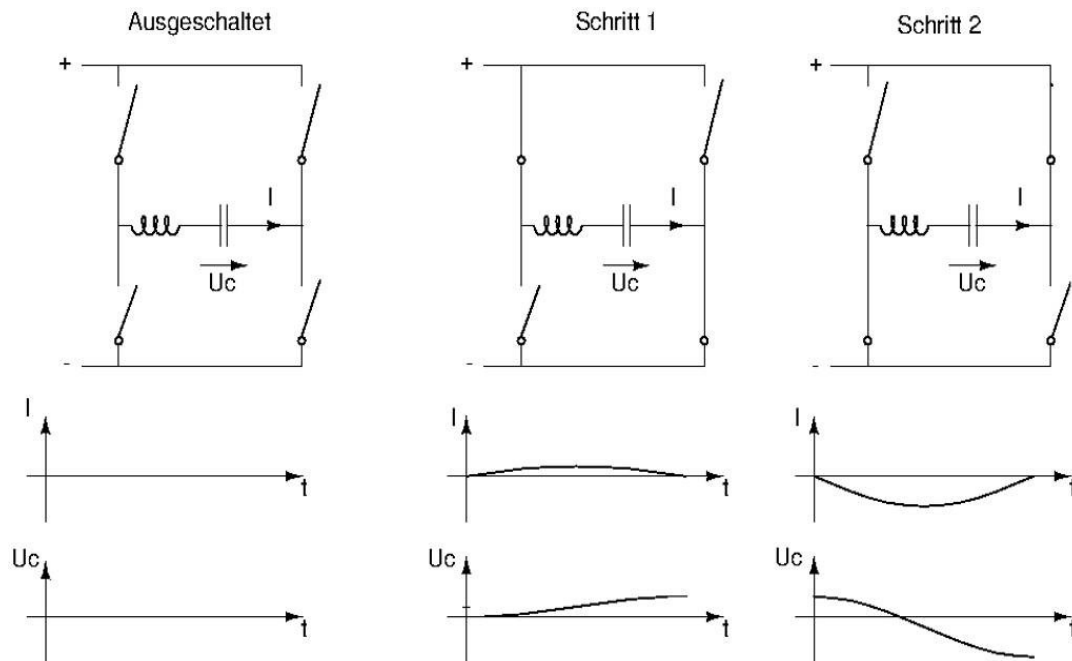
- Die Schaltung musste stabil sein d.h. sie musste bauteileschonend sein um unerwartete Ausfälle so weit wie möglich minimieren zu können
- Die Schaltung musste einen hohen Wirkungsgrad besitzen um die Stromkosten beim Dauerbetrieb gering zu halten und keinen zusätzlichen Kühlaufwand betreiben zu müssen.
- Die Schaltung musste oberwellenarme Signale produzieren

Der Kern eines solchen Senders besteht aus einer Brücke aus vier MOS-FETS. In der Diagonale der Brücke liegt ein Schwingkreis der auf der Sendefrequenz in Resonanz ist. In Serie zu diesem Schwingkreis liegt der „Verbraucher“. Im Schaltbild ist er als Widerstand gezeichnet. In Wirklichkeit sitzt dort ein Übertrager, der die Sendeleistung auskoppelt. In den Decca-Sendern wird mit einer solchen Brücke eine Sendeleistung von 400W erzielt. Jeder Sender hat drei davon was zu einer Gesamtleistung von 1200W führt.



Prinzipschaltbild der MOS-FET-Brücke mit dem Serienresonanzkreis und dem „Verbraucher“

In dieser Schaltung arbeiten die MOS-FETS wie Schalter. Sie sind entweder ganz geschlossen oder ganz offen. Das Schaltungsprinzip lässt sich deshalb an einem Schaltermodell gut zeigen. In dem hier gezeigten Schaltermodell ist der „Verbraucher“ vorerst einmal weggelassen.



Wirkungsprinzip der Schaltung

Im ausgeschalteten Zustand sind alle Transistoren offen. Damit fließt kein Strom, der Sender ist aus.

Im Schritt 1 sind zwei diagonal liegende Schalter geschlossen, damit liegt die Spulenseite an der positiven Seite der Stromversorgung, die Kondensatorseite an der negativen. In diesem Zustand wird nun ein Strom durch die Spule getrieben, der den Kondensator lädt. Er erreicht sein Maximum wenn Kondensatorspannung und Stromversorgungsspannung betragsmäßig gleich sind. Danach treibt die Spule den Strom weiter bis die Kondensatorspannung doppelt so hoch ist wie die Spannung der Stromversorgung. Der Strom hat während dieser Zeit einen sinusförmigen Verlauf.

Im Schritt 2 werden nun zum Zeitpunkt des Stromnulldurchgangs die zwei bisher geschlossenen Schalter geöffnet und die anderen beiden geschlossen. Jetzt addieren sich die Kondensatorspannung und die der Stromversorgung. Damit wird in diesem Schritt der Schwingkreis mit der 3-fachen Spannung „angeschoben“ was zu 3-fachem Strom und schließlich zur 4-fachen Kondensatorspannung führt.

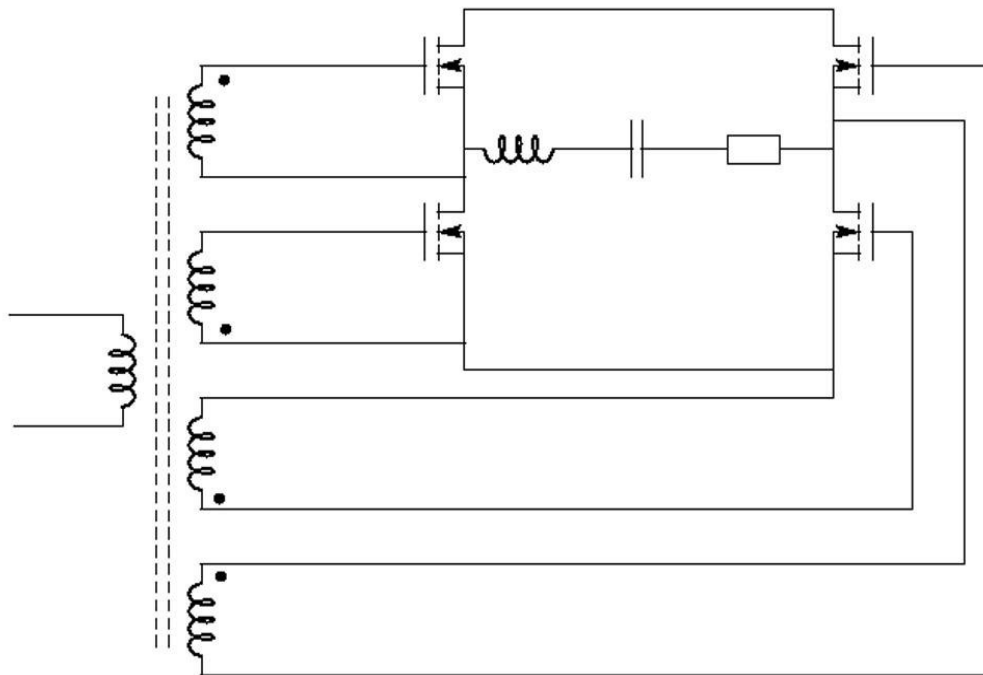
Im nächsten Schritt werden die Schalter wieder wie in Schritt 1 gestellt. Jetzt wird der Schwingkreis schon mit der 5-fachen Spannung „angeschoben“.

In dem hier gezeigten Prinzipschaltbild würde sich der Schwingkreis beliebig hoch aufschaukeln. In der realen Welt wird das Ganze ein Ende haben wenn das schwächste Glied in der Kette ausfällt also z.B. der Kondensator durchschlägt oder einer der MOS-FETs abraucht. Fügt man in Serie zu dem Schwingkreis einen Widerstand als Verbraucher ein, so schaukelt sich das System soweit hoch bis die Leistung, die die Stromversorgung bei gegebener Spannung nachliefern kann der entspricht, die an dem Widerstand abfällt. Mit der Größe des Widerstandes kann man damit die umgesetzte Leistung in einem sehr weiten Bereich einstellen.

So bestechend das Ganze auch aussieht – leider gibt es bei dieser Schaltung auch einige „Fußangeln“, die bei Andy Talbot zu einigen recht spektakulären mit Stichflamme und Knall begleiteten Ereignissen geführt haben müssen.

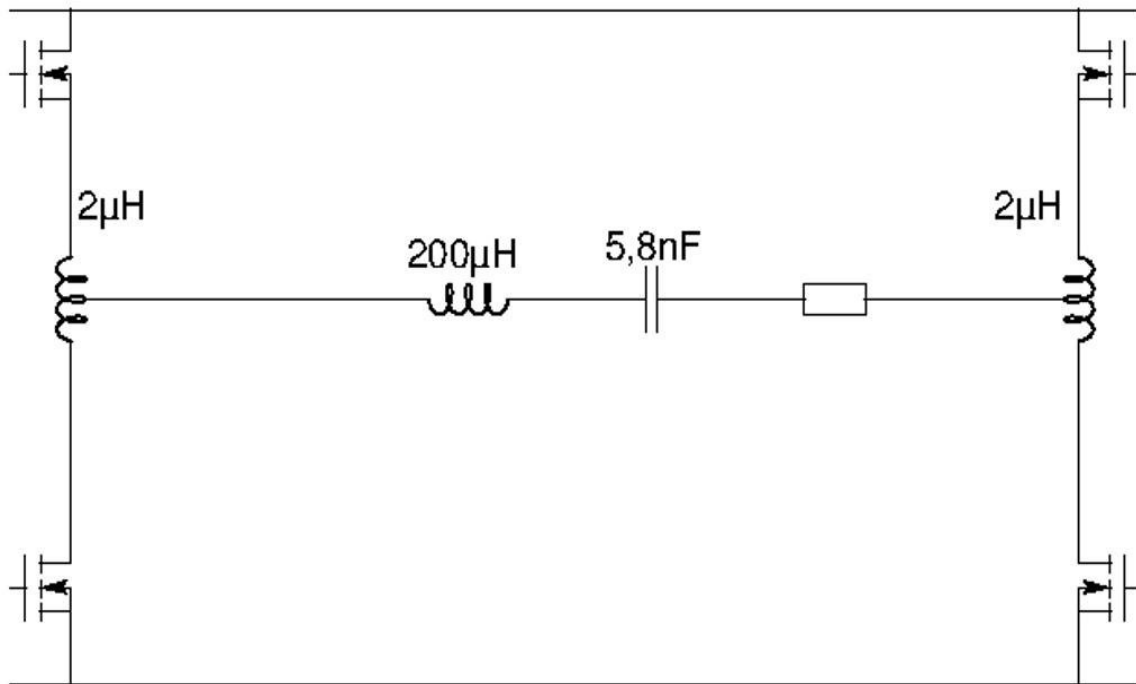
Das erste Problem liegt in der Ansteuerung der Transistoren. Um die Schaltung einfach zu halten, werden alle Gates zum gleichen Zeitpunkt „umgeschaltet“

Ansteuerung der MOS-FETs



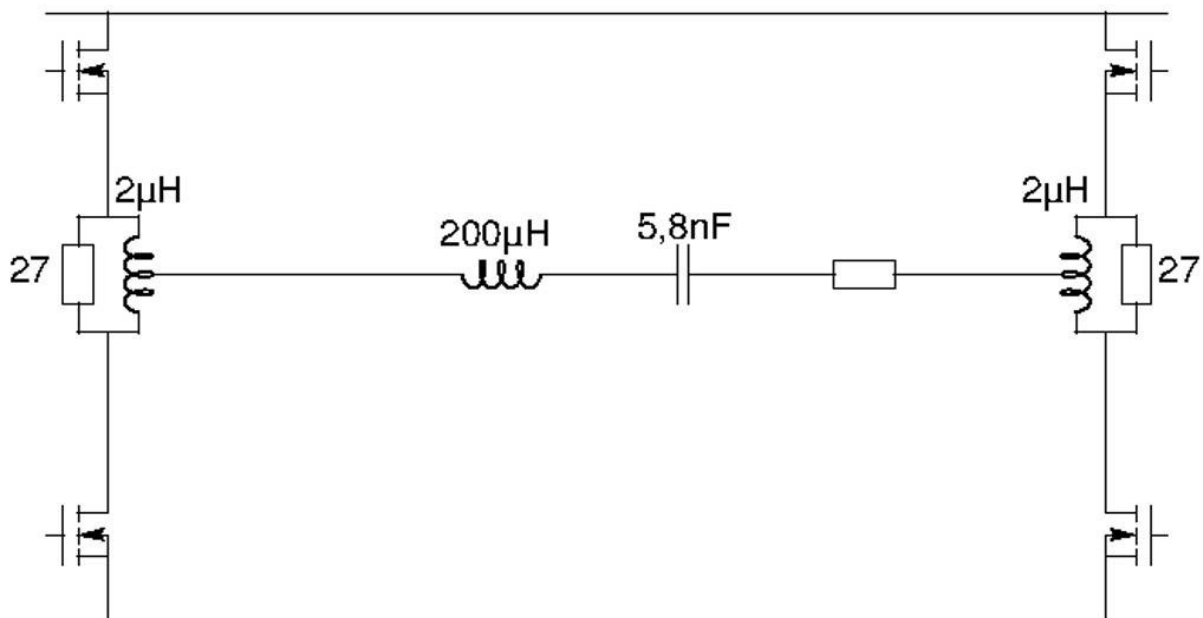
Ansteuerung der MOS-FETs über einen gemeinsamen Übertrager.

Bei dieser Art die FETs anzusteuern tritt der unangenehme Effekt auf, dass die FETs etwas schneller schließen als sie öffnen. Damit sind zu jedem Umschaltzeitpunkt alle FETs gleichzeitig geschlossen. Auch wenn es sich dabei nur um Nanosekunden handelt reicht der Strom aus die Transistoren zu zerstören. Abhilfe lässt sich durch Serieninduktivitäten schaffen, die den Stromanstieg begrenzen.



Strombegrenzung durch zusätzliche Induktivitäten

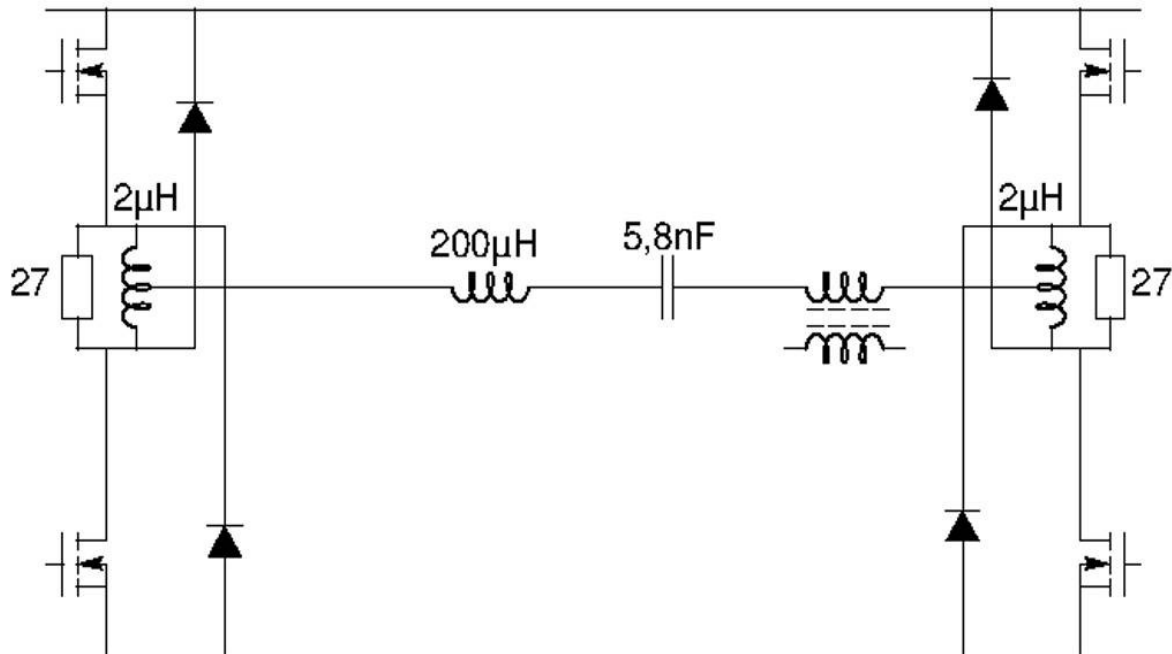
Jetzt wird der Strom zwar begrenzt. Öffnen die FETs aber, dann treiben die Spulen den Strom weiter was zu Spannungsspitzen führt, die die Transistoren jetzt durch Überspannung zerstören. Abhilfe schafft hier ein Dämpfungswiderstand der den Spulenstrom bei geöffnetem FET übernimmt.



Vermeidung von Spannungsspitzen durch Dämpfungswiderstände

Leider ergibt sich aber auch hier wieder ein Problem. Macht man die Widerstände so klein, dass die

Spannungsspitzen in einem ungefährlichen Bereich bleiben, dann sind die Ströme zum Zeitpunkt der geschlossenen FETS wiederum zu hoch weil die Widerstände die Spulen dann kurzschließen. Mit Dioden zur gegenüberliegenden Stromversorgungsschiene lassen sich solche Spannungsspitzen auf die Höhe der Versorgungsspannung begrenzen und werden damit für die Transistoren ungefährlich.

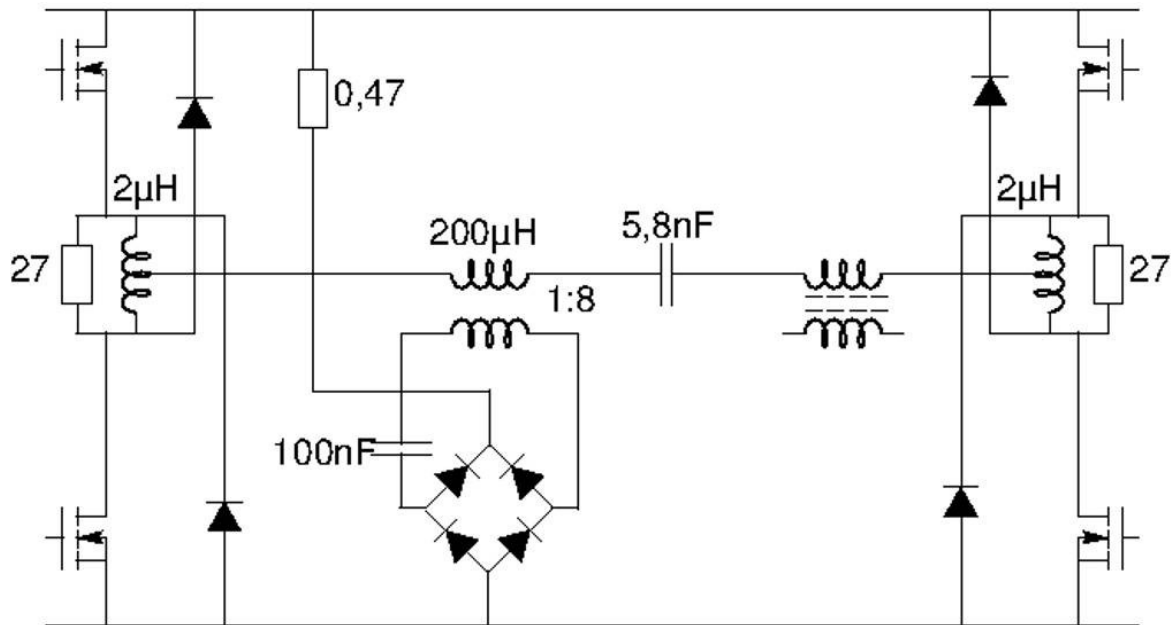


Begrenzung der Spannungsspitzen auf die Höhe der Versorgungsspannung

Ein Problem bleibt noch bestehen das nach Beschreibung von Andy Talbot zu einer Zerstörung der Transistoren geführt hat: Die Stromversorgung muss hochfrequenzmäßig mit Kondensatoren „kurzgeschlossen werden, damit die durch die Dioden eingespeisten Stromspitzen auch abgefedert werden können. (Im Bild nicht dargestellt)

In dem Bild wurde der Widerstand durch einen Übertrager ersetzt, der die Sendeleistung auskoppelt.

Solange der Widerstand des Verbrauchers (also der Antenne) konstant bleibt, arbeitet die Schaltung so recht stabil. Kurzschlüsse an der Antenne oder beim Umschalten irgendwelcher Anzapfungen des Ausgangsübertragers führen zum Hochschaukeln des Schwingkreises und damit zur Zerstörung der Transistoren. Gegen diese Art von Fehlern ist ein weiterer Schutz erforderlich, dessen Wirkungsprinzip sich auf den ersten Blick nur schwer erkennen lässt.



Strombegrenzung durch eine magnetische Auskopplung überschüssiger Sendeleistung

Für diesen Schutz wird auf die Schwingkreisspule eine weitere Wicklung gelegt die an die Wechselstromseite einer Graetz-Brücke angeschlossen wird. Die Gleichstromseite geht auf die Stromversorgungsschienen.

Im Normalfall ist die in dieser Zusatzwicklung induzierte Spannung kleiner als die Versorgungsspannung. In diesem Fall hat die Schaltung keine Wirkung. Steigt der Spulenstrom aber zu hoch an, übersteigt die induzierte Spannung die der Stromversorgung. Dadurch entsteht ein Strom, der dem Schwingkreis Energie entzieht und in die Stromversorgung zurückspeist. Das hat dann die Wirkung, dass sich unterhalb eines bestimmten Verbraucherwiderstandes ein Konstantstrom einstellt. Die aufgenommene und die abgegebene Leistung steigt nicht mehr weiter an.

8. Andy Talbots Lösung und Unterschiede zur eigenen Realisierung

Andy Talbot wollte eine PA mit einer Leistung von mehreren 100W bauen. Eine Transistorbrücke – wie oben beschrieben soll bei den Decca-Systemen bei einer Versorgungsspannung von 50V eine Leistung 400W liefern können (wie ist mir bei meinen derzeitigen Erfahrungen noch unklar). Das Hauptproblem für den privaten Bastler ist bei dieser Konstruktion ist das 50V-Netzteil. Andy Talbots Idee war deshalb, die Brücke nicht mit 50V sondern mit einer direkt aus dem Hausnetz gleichgerichteten Spannung von 300V zu betreiben. Bei unveränderter Dimensionierung würde das bei der 6-fachen Spannung zur 36-fachen Leistung, also ca. 14kW führen – also eine Größenordnung zu hoch. Lässt man aber eine Hälfte der Brücke weg, kommt man auf eine effektive Spannungserhöhung von Faktor 3, was zu einer Ausgangsleistung von maximal 3,6kW führen könnte. Zum Einen lassen sich bei mit eigenen Mitteln aufgebauten Brücken bei 50V nur Leistungen von 100W bis 200W erreichen, zum Anderen lässt sich die tatsächlich ausgekoppelte Leistung durch das Wicklungsverhältnis des Ausgangsübertragers in sehr weiten Bereichen steuern.

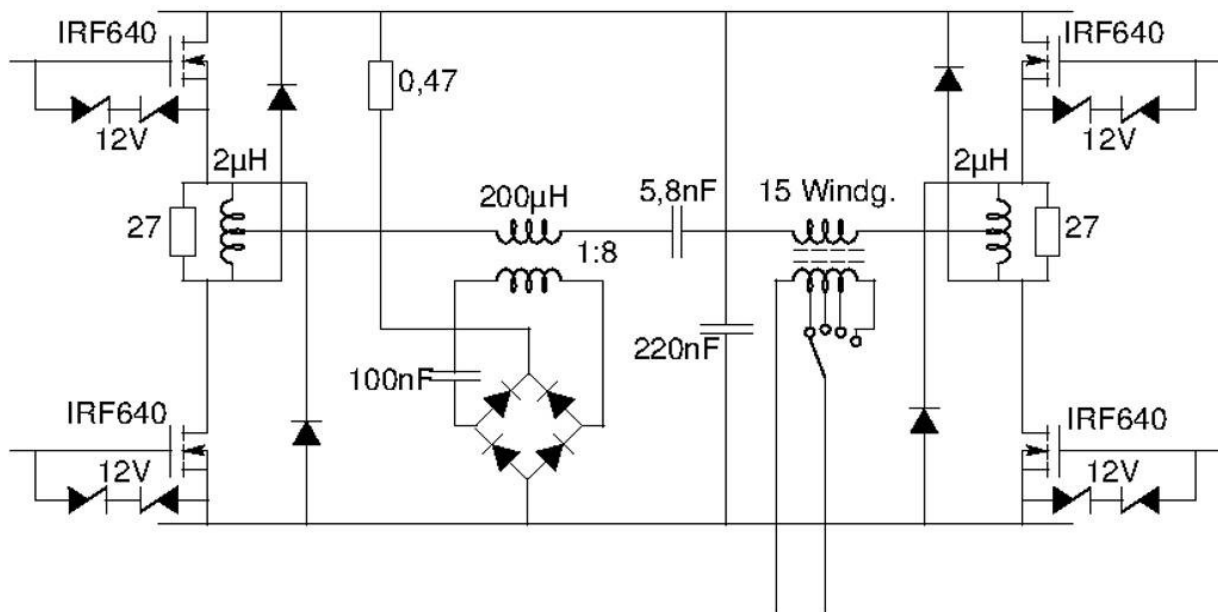
Leistungen von etwa 700W sind mit seiner Lösung deshalb problemlos erreichbar. Nicht gerade ungefährlich ist dabei allerdings der direkte Betrieb aus dem Netz. Außerdem führen auch nur kleine Fehler in der Schaltungsdimensionierung zu recht spektakulären Fehlerreaktionen.

Die von Andy Talbot beschriebene Lösung erschien mir persönlich zu gefährlich. Ich wollte mir bei meinen Aufbauten „den Luxus leisten“ nichts zu zerstören sondern mit einem regelbaren Labornetzteil (mit einstellbarer Strombegrenzung) eine komplette Brücke betreiben, die Versorgungsspannung langsam erhöhen und mit einem Infrarotthermometer nachmessen ob irgendwo ungewöhnlich hohe Temperaturen entstehen. Im Falle von Übertemperaturen sollte die jeweilige Ursache gesucht und behoben werden.

9. Eigene Erfahrungen

9.1 Die Ansteuerung der Transistoren

Wie im Abschnitt 7 beschrieben, werden die Gates der Transistoren induktiv über einen gemeinsamen Übertrager angesteuert. Auf der Primärseite wird ein Rechtecksignal mit der Sendefrequenz eingespeist. Erste Messungen mit dem Oszilloskop zeigten auch an den Sekundärwicklungen schöne Rechtecksignale – solange keine MOS-FETs angeschlossen waren. MOS-FETs zeigen zwischen Gate und Source Kapazitäten die bis in den Nanofarad-Bereich gehen können. Diese Kapazitäten führten im Zusammenhang mit den Induktivitäten des Übertragers zu Überschwüngen, die fast das doppelte der Rechteckspannung erreichten und auf der anderen Seite während der Zeiten zu denen die Transistoren geschlossen sein sollten fast die Gatespannung 0 erreichten. Die einzige Abhilfe war die Überschwinger mit Zenerioden zu kappen. Durch das Kappen der Überspannungen wird gleichzeitig die Energie für die „Unterschwinger“ vernichtet und das Signal erhält wieder die gewünschte Rechteckform. Die Dioden mussten an jedem der Gates angebracht werden.



Vermeidung von Überschwüngen durch Zenerdioden an den Gates

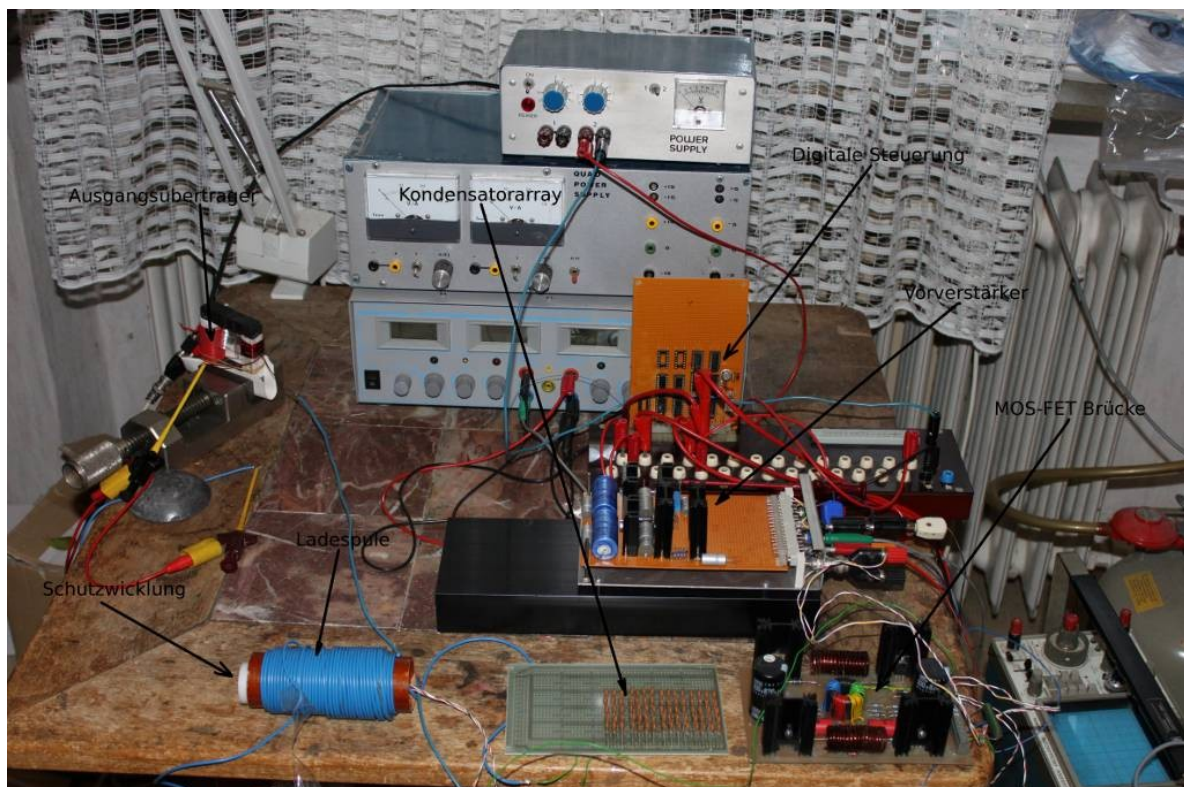
9.2 Der Schwingkreiskondensator

Andy Talbot hatte den Schwingkreiskondensator als Array von einigen keramischen Hochspannungsfesten Kondensatoren realisiert. Bei der ersten Suche brachte die eigene Bastelkiste aber nur eine Reihe von Folienkondensatoren hervor. Damit wurde ein Array gebaut das aus zwei parallelen Strängen mit je 10 Kondensatoren in Reihe bestanden hat. So wurde eine Kapazität von ungefähr 6nF bei einer Spannungsfestigkeit von etwa 2kV erreicht.

Beim ersten Test wurde die Spannung der Brücke langsam auf 40V erhöht, es stellte sich ein Strom von etwa 1A ein. Alle Transistoren und Dioden blieben kalt. Trotzdem begann es nach einigen Minuten nach überhitzten Bauelementen zu stinken. Als Ursache stellten sich die Kondensatoren heraus, die auf einer eigenen Platine montiert waren und bei der Temperaturüberwachung schlicht vergessen wurden. Sie zeigten nach ca. 5 Minuten Betrieb und einem Strom von 0,5A eine Oberflächentemperatur von über 80°.

Für den nächsten Test wurden keramische 2,2nF/ 1kV Kondensatoren besorgt und damit ein Array von 75 Stück zusammengelötet. Bei dem nächsten Test dauerte es einige Zeit bis die Resonanzfrequenz der Spulen-Kondensator-Kombination durch auf- und abwickeln der Spule im laufenden Betrieb gefunden war. War die Resonanzfrequenz gefunden hat sie sich aber sofort wieder verstellt. Als Ursache hat sich die temperaturabhängige Kapazität dieser Kondensatoren herausgestellt, die zudem offensichtlich einen noch schlechteren Wirkungsgrad hatten als die Folienkondensatoren. Von 100W Gleichstromleistung wurden etwa 20W in diesen Kondensatoren „verbraten“.

Eine Suche im Internet ergab, dass man für Schwingkreiskondensatoren „Klasse 1“ Kondensatoren nehmen müsse die außer einer temperaturunabhängigen Kapazität auch einen geringen Verlustfaktor hätten.



Eine intensivere Suche in der Bastelkiste förderte dann doch einige „Klasse 1“ Kondensatoren zutage 5,8nF / 1,5kV. Ein Versuch mit nur einem Kondensator zeigte, dass sich bei 1A Strom weder die Kapazität noch die Oberflächentemperatur merklich veränderte.

9.3 Die Schutzwicklung

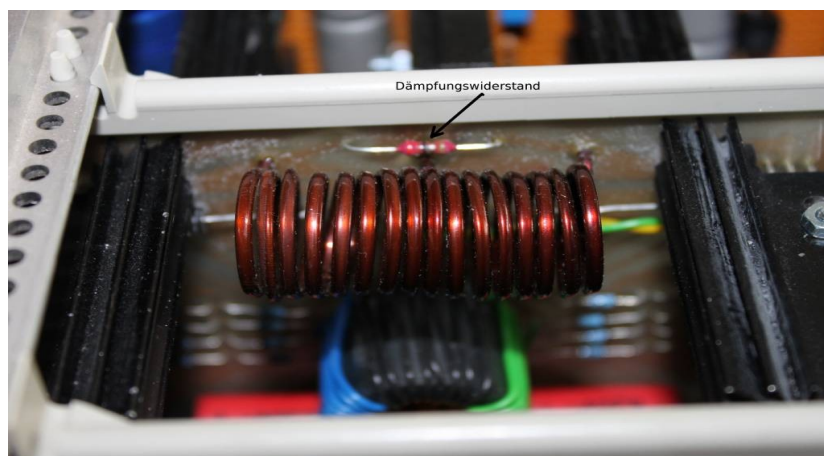
Mit diesen Erkenntnissen wurden die Platinen für die Sendersteuerung, der Vorverstärker für die Transistorbrücke und die Transistorbrücke selbst in einen 19“-Rahmen eingebaut. Nachdem die Elektronik auch 2A ohne merkliche Erwärmung verkraftet hatte, waren ja keine thermischen Überraschungen mehr zu erwarten. Temperaturmessungen mit dem Infrarotthermometer waren in dem recht gedrängten Aufbau kaum mehr möglich. Für die weiteren Tests wurde ein schweres Trafonetzteil auf 70V / 5A umgebaut das als neue Stromversorgung dienen sollte. Um Schäden an der Elektronik zu vermeiden wurde (nach Andy Talbots Angaben) eine Schutzwicklung mit dem Wicklungsverhältnis 1:4 auf einen Spulenkörper aufgewickelt der in die Ladespule eingeschoben werden konnte. Beim ersten einschalten mit herausgezogener Schutzspule stellte sich bei 70V ein Strom von 4A ein der mir für den ersten Test doch zu hoch erschien. Schnelles einschieben der Schutzspule in die Schwingkreisspule brachte den Strom schlagartig auf 1A zurück – gleichzeitig schoß eine Qualmwolke aus dem inzwischen rechten engen und deshalb sehr unübersichtlichen 19“-Rahmen.

Ursache für die Qualmwolke waren die vier Dioden der Graetz-Brücke, die die überschüssige Schwingkreisenergie in die Stromversorgung zurückspeisen sollten. Die Dimensionierung der Spule (Wicklungsverhältnis 1:4) stimmte nur für die bei Andy Talbot eingesetzte Halbbrücke, bei der Vollbrücke war das Verhältnis 1:8 zu nehmen. Zusätzlich wurden die 1,3A Dioden durch 10A Typen ersetzt und ein Meßwiderstand eingebaut mit dem sich der Diodenstrom überwachen lässt.

9.4 Die Dämpfungswiderstände

Nach dem „Erlebnis“ mit der Schutzwicklung wurde anstatt der kräftigen 70V Stromversorgung wieder als Labornetzgerät angeschlossen und der Sender bei 70V mit knapp über 1A betrieben. Nach ca. 10 Minuten Betrieb wurde im Gegenlicht ein ganz feines Rauchfädchen sichtbar das aus dem Gerät stieg. Es kam von einem der Dämpfungswiderstände. Bei der ersten eigenen Abschätzung kam ich auf einen Wert von ca. $\frac{1}{4}$ W – offensichtlich aber doch zu klein. Andy Talbot hatte in seinem Aufbau an dieser Stelle 4W-Typen eingebaut. Daraufhin wurden die kleinen Widerstände gegen größere getauscht.

Überhitzter
Dämpfungswiderstand



9.4 Die Schutzdioden

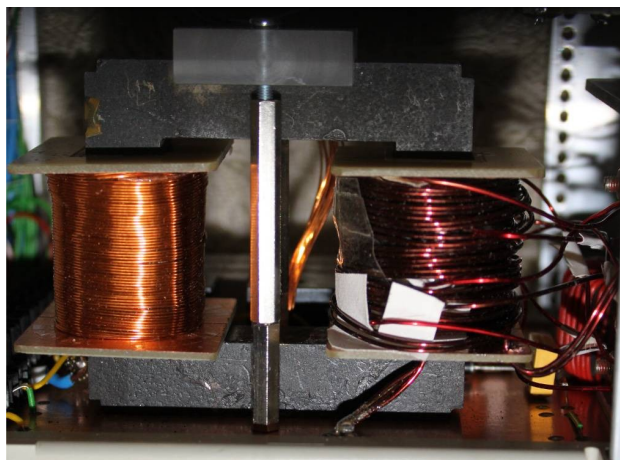
Nach dem Tausch der Dämpfungswiderstände wurde ein weiterer Test mit dem Labornetzteil gestartet. Dabei wurde der Strom bei 60V etwa auf 1,6A eingestellt. Die Dämpfungswiderstände wurde auch nach 10 Minuten Dauerbetrieb nicht übermäßig warm. Nach etwa 15 Minuten stieg der Strom schlagartig an, die 2A-Begrenzung im Netzteil sprach an und aus der Elektronik ertönte ein kleiner Knall gefolgt von einem Rauchwölkchen. Wegen des sehr gedrängten Aufbaus war der Verursacher nicht zu erkennen. Bei den Messungen sah es so aus, als würde einer der Transistoren einen Kurzschluss verursachen. Letztendlich war es aber eine der Dioden, die die Überspannung aus den 2uH-Spulen ableiten sollten. Einen Grund dafür konnte ich nicht finden. Nach dem Tausch dieser Diode wurde ein neuer Test gestartet. Leider mit ähnlichem Ergebnis – nach einigen Minuten Betrieb mit 1,6A stieg der Strom plötzlich an – diesmal konnten weitere Schäden durch schnelles abschalten vermieden werden. Die Tests sollten am nächsten Tag fortgesetzt werden.

Am nächsten Tag zeigte sich, dass von der Schwingkreisspule unbemerkt einige Windungen abgegangen waren und der Schwingkreis damit am Vortag weit außer der Resonanzfrequenz betrieben worden war. Nach dem Aufwickeln bis zur exakten Resonanz trat das Problem vom Vortag nicht mehr auf.

Es ist zu vermuten, dass das abrauchen der Dämpfungswiderstände und die Zerstörung einer der Schutzdioden durch den Betrieb außerhalb der Resonanz verursacht wurden, wirklich erklärbar erschien es mir aber nicht.

9.5 Der Ausgangsübertrager

Für den Ausgangsübertrager wurde ein Kern eines Zeilentransfos aus einem alten Röhrenfernsehgerät verwendet. Dazu wurde die alte Wicklung entfernt, aus Platinenmaterial neue Spulenkörper gebaut und die für die Auskopplung nötigen Wicklungen aufgebracht. Ein Test zeigte, dass 15 Windungen auf der Primärseite das Optimum sind. In der ersten Aufbaustufe wurden 5x0,4mmCuL nebeneinander aufgewickelt. Während der Kern recht kühl blieb hat sich die Primärwicklung dann doch recht kräftig erwärmt und bei einer Dauerausgangsleistung von 100W so langsam bis etwa 65° aufgeheizt. Aufwickeln von zusätzlichen 15x0,5mmCuL hat dieses Problem vollkommen beseitigt.



Der Ausgangsübertrager

9.6 Die Schwingkreisspule

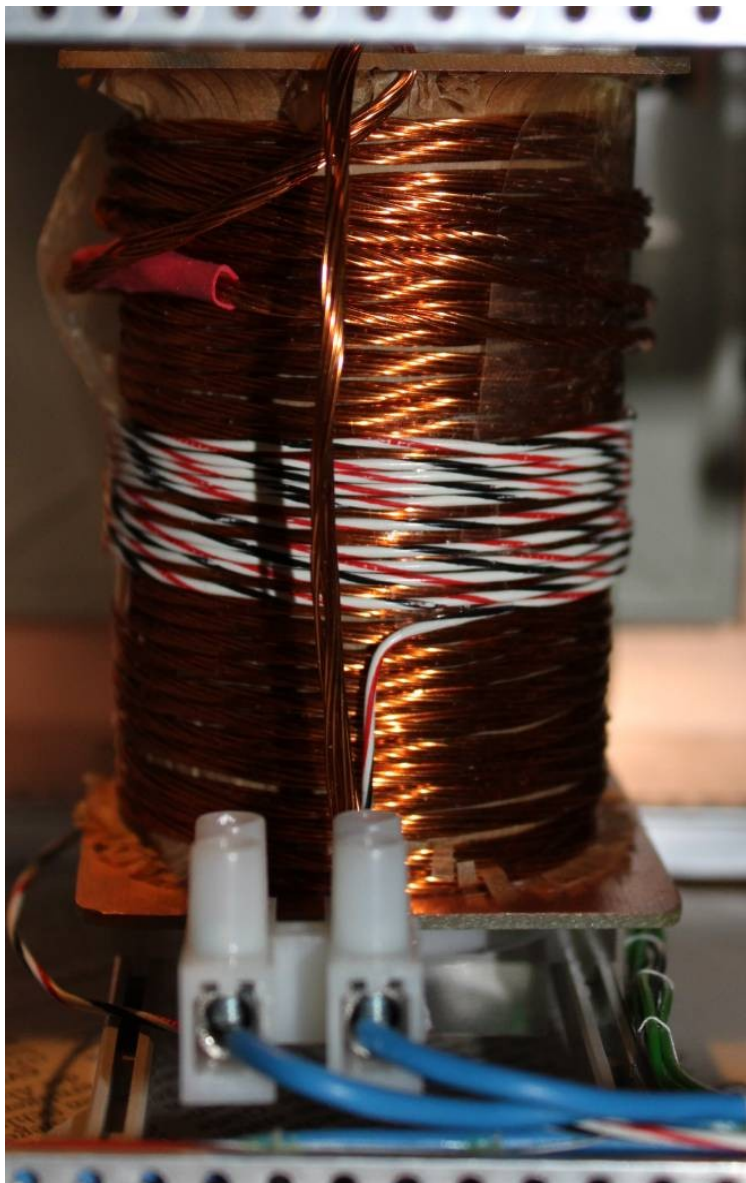
Als letztes wurde die Schwingkreisspule noch untersucht. Sie war das letzte Bauelement gewesen das sich bei einem Strom von 2A noch merklich erwärmt hat. Problematisch war dabei allerdings dass sich von der Oberflächentemperatur von maximal 50° schlecht auf die Innentemperatur des Kupferleiters schließen lässt. Anstatt dieser Spule wurde eine andere mit 10x0,5mmCuL gewickelt wobei die 10 Drähte exakt nebeneinander aufgewickelt wurden. Es hat sich dabei als sehr schwierig erwiesen die 90 Windungen auf diese Weise auf die Spule zu bekommen. Anschließend wurde alle Komponenten fest in den 19“-Rahmen eingebaut. Das Ergebnis beim ersten Test war ernüchternd. Die Spule wurde auch schon bei geringeren Leistungen sehr heiß, das Ausgangssignal war stark verzerrt und kaum mehr als Sinussignal zu bezeichnen. Eine Suche nach den möglichen Ursachen ergab, dass Streufelder in Luftspulen dafür sorgen, dass bei nebeneinanderliegenden Leitern durch das inhomogene unterschiedliche Spannungen induzieren. Das führt dann zu Kreisströmen die für hohe Verluste sorgen.



Spule mit 10x0,5mmCuL „flach“ gewickelt.

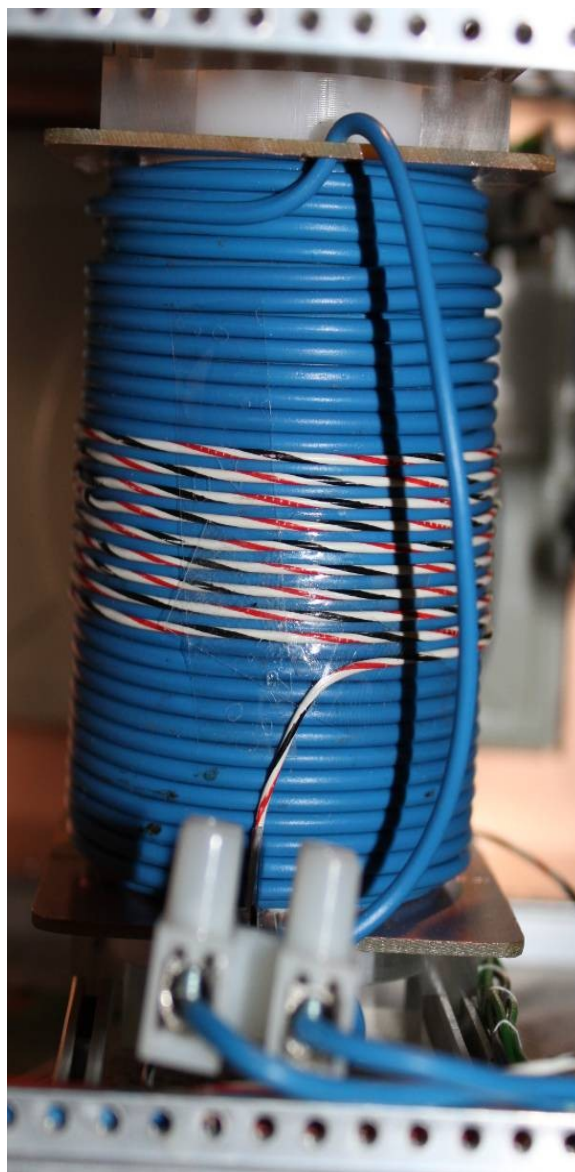
Das stark verzerrte Signal ließ sich dadurch erklären dass die flache Wicklung für hohe Kapazitäten in der Spule sorgt die man auch als Parallelkapazität zur Spule sehen kann, über die die hochfrequenten Teile des Rechtecksignals der Brücke direkt zum Ausgangsübertrager gelangen.

Im Internet waren zu dem Thema einige Artikel zu finden. In einem dieser Artikel wurde beschrieben, dass sich dieser Effekt vermeiden lässt wenn man anstatt dieser Art zu wickeln HF-Litze einsetzt. Echte HF-Litze zeichnet sich dadurch aus, dass in einem Bündel von Drähten innerhalb einer bestimmten Strecke jeder Draht einmal auf jeder Position im Bündel zu liegen kommt. Eine solche Forderung lässt sich mit den Mitteln eines normalen Bastlers kaum erfüllen. In einem weiteren Artikel stand, dass sich in dem Fall von Luftspulen „falsche“ HF-Litze, also einfach verdrehte Drähte genauso gut eignen sollen. Daraufhin wurde die Spule abgewickelt, das Drahtbündel verdreht und wieder aufgewickelt. Das Signal sah jetzt zwar wieder wie ein Sinussignal mit nur leichten Verzerrungen aus, die Spule wurde aber immer noch so warm, dass sie im Dauerbetrieb mit einem Ventilator gekühlt werden musste.



Spule mit 10x0,5mmCuL, verdreht.

Nach dieser vermuteten Pleite sollte die alte Spule aus 0,75qmm isoliertem Draht mit der neuen (verdrihte 10x0.5mmCuL) verglichen werden. Dazu wurde der Wirkungsgrad bei verschiedenen Ausgangsleistungen bestimmt. Nachdem das HF-Leistungsmessgerät auf halber Strecke ausgefallen ist, konnte die Ausgangsleistung nur noch über die Spannungsmessung an der Dummy-Load mit Hilfe eines Oszilloskops bestimmt werden. Trotz der Tatsache dass die Spannung in die Leistungsberechnung quadratisch eingeht und damit recht ungenau wird, waren ermittelten Wirkungsgrade sehr eindeutig. Die alte Spule aus dem kunststoffisolierten 0,75qmm-Draht brachte Wirkungsgrade zwischen 91% und 100% wobei der Wirkungsgrad mit steigendem Strom erwartungsgemäß etwas abnahm. Der Wirkungsgrad der Spule aus 10x0,5mmCuL erreichte nur Werte zwischen 70% und 80%. Aufgrund dieser Ergebnisse wurde beschlossen, die Spule aus dem isolierten 0,75qmm Draht zu wickeln und den Sender vorerst nicht mit Strömen größer 2A zu betreiben. Bei einer Versorgungsspannung von 70V sind das immerhin noch 140WDauerstrich ohne aktive Kühlung.



Schwingkreisspule aus 0,75qmm kunststoffisolierten Litze

9.7 Die Antennenspule

Bei der Antennenspule die in den ersten Versuchen zusammen mit der „linearen“ Lösung verwendet wurde taten sich mit größer werdender Antenne und damit höheren Antennenkapazitäten zwei Probleme auf:

- Von der Wicklung wurde ein immer kleinerer Teil benutzt weil immer höher liegende Spulenzapfungen verwendet werden mussten um in Resonanz zu bleiben. Der nicht mehr verwendete Teil der Spule lief damit „leer“ mit und verursachte unnötige Zusatzverluste.
- Die Primärwicklung war am unteren Teil des Spulenkörpers aufgewickelt während der aktiv benutzte Spulenteil am oberen Ende des Wickelkörpers befand. Die Kopplung wurde damit immer loser.

Um diese Probleme zu umgehen wurde eine zweite Antennenspule gewickelt, die sekundärseitig aus 250 Windungen 0,4mm CuL bestand und primärseitig aus einem in der Höhe verstellbaren Innenzylinder mit der Primärwicklung. Sonderbarerweise brachte diese neue Spule verglichen mit der alten aber keine erkennbaren Verbesserungen.

Antennenspule mit 250 Windungen 0,4mm CuL und innenliegender Primärwicklung. Die Feinabstimmung wurde mit einem von oben eingehängten Ferritstäbchen gemacht die ursprünglich als Ferritantenne eines Mittelwellenempfängers gedient hatte.



Diese Antennenspule wurde bei den ersten Sendeversuchen mit einer Leistung von 100W benutzt. Nach wenigen Minuten Betrieb stieg Qualm aus der Spule: Der Ferritstab für die Abstimmung war dabei sich von der haltenden Schnur zu brennen. Nach dem Tausch gegen einen Ferritkern aus anderem Material war auch dieses Problem behoben. Weitere Temperaturmessungen während des

laufenden Betriebs zeigten allerdings noch ein anderes Problem: Die Sekundärwicklung erwärmte sich nach 2 Minuten Betrieb auf über 40 Grad. Eine Messung mit Gleichstrom zeigte dass sich die Spule mit derselben Rate erwärmt, wenn die Gleichstromleistung bei 30W liegt. Der bei 137kHz gemessene Spulenstrom liegt bei 0,15A. Um bei diesem Strom 30W zu verheizen braucht es einen Ohmschen Anteil von 1300 Ohm. Das führt zu dem verblüffenden Ergebnis, dass eine auf diese Weise gewickelte Spule mit einem Gleichstromwiderstand von 16 Ohm bei 137kHz einen ohmschen Widerstand von 1300 Ohm hat. Erklären lässt sich das nur durch eine gegenseitige Stromverdrängung in benachbarten Leitern (Proximity-Effekt). Um dem abzuhelfen wurde die Spule neu gewickelt – diesmal mit 0,6mm Schaltdraht mit einer Kunststoffisolation, die die Leiter auf Abstand hält. Wegen der jetzt anderen Spulengeometrie waren jetzt aber über 400 Windungen anstatt der 250 der alten Spule nötig.

Bei den WSPR-Sendungen in den üblichen 2-Minuten Intervallen konnte jetzt keine merkliche Erwärmung mehr festgestellt werden.



Antennenspule gewickelt mit 0.6mm Schaltdraht mit Kunststoffisolierung.

10. Was noch eingebaut wurde

10.1 Steuerung

Um den Sender besser testen zu können wurde zusätzlich zu dem Pegelwandler und dem zugehörigen 1:50 – Teiler ein Quarzoszillator eingebaut mit dem sich anstatt der vom Messsender gesteuerten Frequenz eine Festfrequenz von 137,5kHz erzeugen lässt. Für zukünftige Versuche wurde ein Teiler 1:30 und ein weiterer Quarzoszillator eingebaut, der ein Signal von 477kHz für zukünftige MW-Tests erzeugt. Alle diese Signale sind mit einer anschließbaren Morsetaste tastbar.

10.2 Messung

Um Versorgungsspannung, Versorgungsstrom, Ausgangsspannung, Ausgangsstrom und Schutzstrom kontinuierlich messen zu können wurde ein Zeigerinstrument eingebaut und die Messstellen über Messverstärker an das Zeigerinstrument angepasst. Für die Bestimmung von daraus abgeleiteten Werten wie Leistungen oder Ausgangsimpedanz oder für das Auslösen von Schutzabschaltungen ist noch der Einsatz eines Mikroprozessors geplant.

11. Tests für den Betrieb auf 477kHz

Die für 137kHz aufgebaute Elektronik zeigte auch bei 477kHz an den Anschlusspunkten für den Serienschwingkreis ein sehr sauberes Rechtecksignal. Deshalb erschien der Versuch mit einem Schwingkreis auf 477kHz vielversprechend. Erste Versuche brachten aber nur sehr schlechte Ergebnisse. Nach dem Tausch des Ausgangsübertragers gegen einen für 500kHz Schaltnetzteile vorgesehenen Übertrager und einer Primärwicklung von nur 3 Windungen stellte sich bei einer Versorgungsspannung von 10V bereits ein Strom von über 0,6A ein. Hochgerechnet auf 70V ließe sich damit auch eine Leistung zwischen 100W und 150W erwarten.

Weiterführende Tests zeigten aber auch bei dieser Frequenz ähnliche „Probleme“ mit den passiven Elementen. Bei 10W im Dauerbetrieb erhitze sich die Schwingkreispule auf über 100 Grad, die Kondensatoren eines Kondensatorarrays aus keramischen Kondensatoren des Typs NPO auf über 50 Grad. In den nächsten Tests sollen statt dessen eigenbau-Kondensatoren mit Teflondielektrikum zum Einsatz kommen.

12. Gesamtansicht der PA

