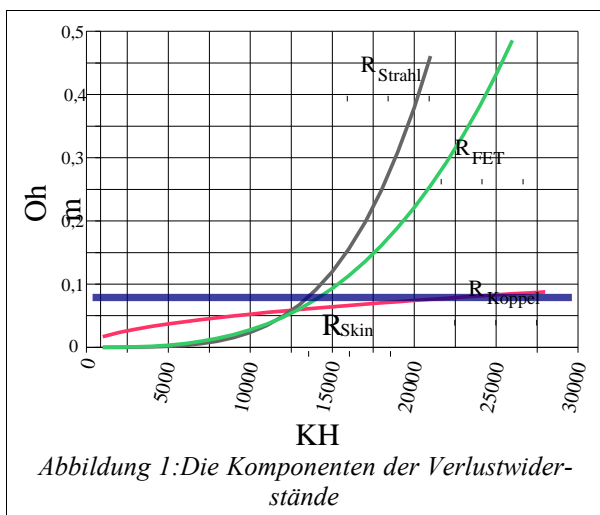


Aktive magnetische Schleifenantenne für den Empfang

Eine Empfangsantenne kommt immer die Aufgabe zu elektromagnetische Wellen in elektrische Signale umzuwandeln. Realisiert werden magnetische Antennen durch eine Spule, denn an den Anschlüssen einer Spule wird eine Spannung induziert die der Änderungsgeschwindigkeit des Magnetfelds proportional ist. Da nun diese nach dem Induktionsgesetz induzierte Spannung äußerst klein ist wird die Spule mit einem Kondensator zu einem Schwingkreis ausgebaut. Damit verbunden ist eine sehr hohe Selektivität, also schmalbandigkeit. Besonders beim CW-Empfang und anderen schmalbandigen Modulationsarten kann die Bandbreite kaum schmal genug sein. Soweit das Prinzip einer Schleifenantenne. Es vergrößert sich die Spannung an den Klemmen der Spule um die Güte



$$Q = \frac{\omega L}{\sum R}$$
 wobei die Summe aller Widerstände der

Spule und des Kondensators eingehen, auch der Auskoppelwiderstand und der Strahlungswiderstand. Optimierung der Güte bedeutet also minimierung dieser Summe. Wie aus Abbildung 1 ersichtlich ist, ist die Minimierung von Schleifenwiderstand und Koppelwiderstand unterhalb einer bestimmten Frequenz sinnvoll. Besonders bei niedrigen Frequenzen wird der Vorteil einer Pufferauskopplung statt Koppelschleife augenscheinlich.

Die wohl üblichste Methode zur Auskopplung bei einer Loopantenne ist eine Koppelschleife. Die Koppelschleife wird nun durch den Empfängereingang mit einer reellen Last von Z (50 Ohm) belastet. Diese Last wirkt durch die Kopplung zurück auf den Antennenschwingkreis als wäre sie dort ein transformierter Widerstand, der eine Dämpfung des Antennenschwingkreises bewirkt. Dabei wird der Widerstand wie folgt transformiert: $R_{koppel} = Z k^2$ k ist dabei der Koppelfaktor zwischen der Koppelspule und der Loop, und entspricht in grober Näherung dem Flächenverhältnis der beiden. Ausgehend von einem Flächenverhältnis von 1/25 entspricht einer Abschlußimpedanz von 50 Ohm ein Serienwiderstand von 80 mOhm. Man kann alternativ zu einer solchen transformatorischen Auskopplung auch die Spannung direkt am Kondensator abgreifen. Diese ist nicht um den Koppelfaktor der Koppelschleife gemindert, also beträchtlich größer. Leider ist der Quellwiderstand an dieser Stelle aber extrem hoch. Man braucht also einen sehr guten Puffer mit extrem hochohmigen Eingang und 50 Ohm Ausgang, der im folgenden vorgestellt werden soll. Damit konnte ich die Güte einer Kurzwellenloop mit 16 mm Rohrdurchmesser gegenüber einer Schleifenauskopplung verdoppeln, was in etwa der Verdoppelung des Rohrdurchmessers gleich kommen dürfte.

Entwicklungsziele

Eine Batteriespeisung zur Vermeidung von Masseprobleme mit einer geforderte Betriebsdauer von min. 100 h. Verstärkung ca. 1. Minimale Eingangskapazität bei maximalem Realteil des Eingangswiderstands. Ausgangswiderstand 50 Ohm. Einfacher nachbausicherer Aufbau für eine Kurzwellenloop (ca. 3..30MHz).

Die Schaltung

Grundlage des Puffers sind zwei JFET-Bipolar-Kaskodenstufe in Differenzschaltung. Die Kaskode bewirkt eine hohe Bandbreite und große Phasentreue. Der entscheidende Vorteil ist allerdings, daß man eine äußerst geringe Rückwirkung vom Ausgang hat. Dadurch bleibt der Realanteil der Eingangsimpedanz auch bei höheren Frequenzen groß und die Eingangskapazität über die Frequenz sehr konstant. Dies ist nicht selbstverständlich. Schaltungen mit einfachen Sourcefolgern, wie sie durchaus immer wieder gerne in Veröffentlichungen auftauchen, zeigen ein deutlich schlechteres Verhalten. Die bloße Verwendung selbst eines hochwertigen FET oder MOSFET in der Eingangsstufe ist eben noch lange kein Garant für brauchba-

Aktive magnetische Schleifenantenne für den Empfang

re Daten. Ein Eingangs-FET in einer Kaskodenstufe hat Source sowie Drain wechselstrommäßig auf Masse liegen. Daher kommt die geringe Rückwirkung da die Millerkapazität nur gegen Masse liegt. Die Millerkapazität liegt zwischen Gate und Drain und ist in einer Sourceschaltung deswegen besonders schädlich da die Signale dort gephasig sind.

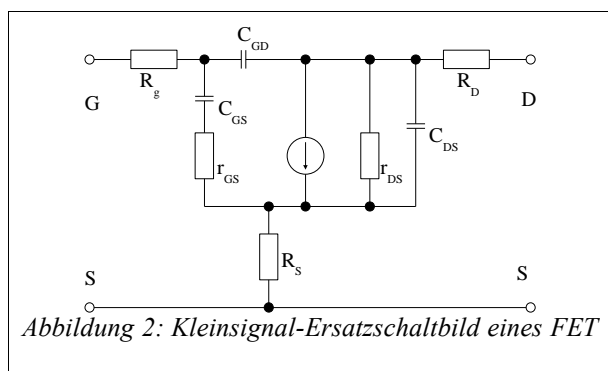
Die Schleife wird genau in der Mitte auf Masse des Puffers gelegt. Der Widerstand R 19 hat die Funktion den Strom durch die Kaskoden einzustellen. Durch die Induktivität in Reihe mit R 19 ergibt sich wenigstens für höhere Frequenzen eine hohe Impedanz. Bei dieser Spule muß berücksichtigt werden, daß diese mit Gleichstrom belastet ist und das Kernmaterial auch für die entsprechenden Frequenzen passen muß. Ca 20 Windungen in einer Lage auf einen R12,5 Ringkern sollten genügen.

Der Ausgangswiderstand des Kleinsignaltransistors der Kaskodenstufe liegt im Kiloohmbereich. Deshalb kommt hier für die Anpassung an 50 Ohm ein untersetzender Übertrager (L1, L2, L3) zum Einsatz. Der Ausgangsübertrager erledigt auch die Asymmetrierung für Koaxanschluss. Er wird auf einem kleinen Ringkern R12,5 mit wenigen Windungen HF-Litze gewickelt. Das Material muß für den vorgesehenen Frequenzbereich unbedingt geeignet sein. Durch die komplementären Primärwicklungen wird der Übertrager ohne Gleichstromanteil betrieben. Deshalb kann man hier ruhig einen Ringkern ohne Luftspalt anwenden.

An den in Durchlaß betriebenen Dioden D1..D6 fällt eine Gleichspannung mit ca. 4 V ab, die mit einem großzügigen keramischen Vielschichtkondensator abgeblockt wird. Die Verwendung einer Z-Diode ist hier nicht ratsam, weil diese deutlich stärker rauscht und zwar recht niederohmig, was deutlich aufwendigere Abblockmaßnahmen erfordern würde. Man kann allerdings auch LEDs verwenden, die auch gleich den Betriebszustand anzeigen. Erfahrungsgemäß kommt man hier nicht umhin die LEDs zu selektieren, denn deren Kennlinie weisen in der Steilheit starke Schwankungen auf. Der Anstieg der Kennlinie muß möglichst steil sein, damit die erzeugte Spannung niederohmig und stabil ist.

Simulation

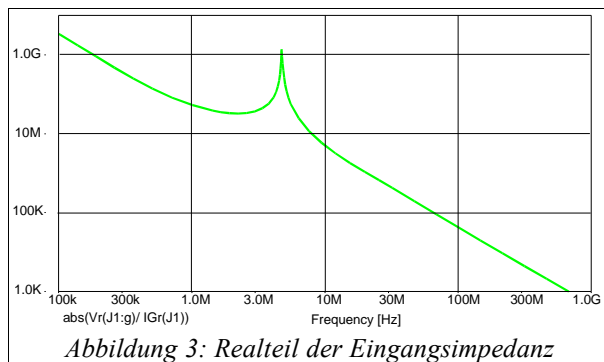
Bei einer Schaltungsentwicklung ist ein modernes Simulationsprogramm sehr zeitsparend. Auch gestattet dieses Tool selbst Werte zu bestimmen die man nicht ohne erheblichen (finanziellen) Aufwand an Meßgeräten messen kann, wie zum Beispiel die hohen komplexen Eingangsimpedanz im Gigaohmbereich! Ich habe alle Schaltungen vor dem Aufbau mit PSPICE simuliert. Der Schaltplan Abbildung 6 ist aus diesem Programm zur Simulation. Der Ausgangsübertrager wird aus L1..L3 gebildet. Der gezeigte Widerstand R_{Last} stellt den Eingang des Empfängers dar. Für alle Bauteile, auch für die Übertrager stehen Modelle der Hersteller zur Verfügung. Hier nun die Ergebnisse:



Die Eingangskapazität berechnet sich zu 3,2 pF Eingang gegen Eingang, unabhängig von der Frequenz. Der Eingangswiderstand ist auch bei einem FET nicht zwangsläufig rein kapazitiv. Betrachtet man das Vierpol-Ersatzschaltbild eines FET so kann man erkennen, daß die Widerstände R_g , R_{GS} und r_s sich bei Wechselspannungen bemerkbar machen müssen. Die Eingangsimpedanz ist also komplex, besitzt also Real- und Imaginärteil. Für die Belastung der Empfangsschleife ist der Realanteil alleine maßgebend, denn der Imaginäranteil verschiebt lediglich die Resonanzfrequenz ohne die Dämpfung zu beeinträchtigen.

Dieser Realanteil der Eingangsimpedanz ist also leider nicht unendlich, aber im interessanten Frequenzbereich recht hoch. Der klar erkennbare Pol mitten im interessanten Frequenzbereich kommt der Forderung nach hoher Impedanz sehr entgegen.

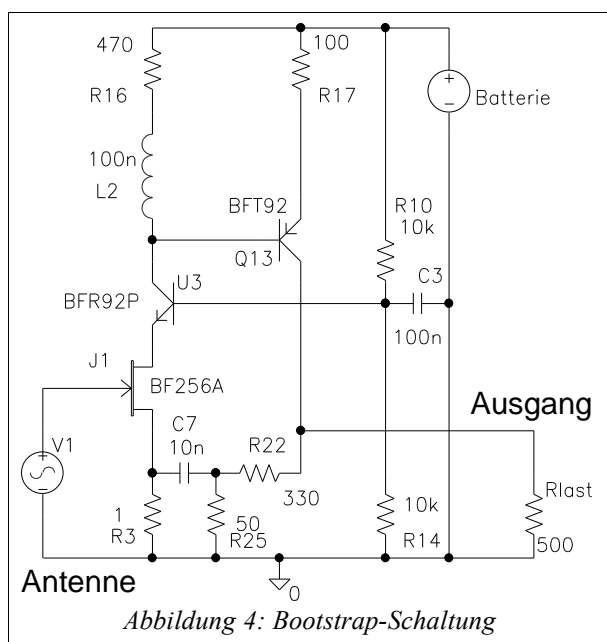
Aktive magnetische Schleifenantenne für den Empfang



Die Verstärkung ist 0,89 an 50 Ohm über einen Frequenzbereich von 1 MHz bis ca. 100 MHz. Q1 und Q2 sind Mikrowellentransistoren mit einer Transitfrequenz von 5 GHz. Setzt man aber für Q1 und Q2 schlichtere Typen ein so wird die Bandbreite sinken, allerdings verschlechtert sich dadurch auch die Eingangsimpedanz erheblich. Viel Geld ist hier ohnehin nicht zu sparen! Mit einem Paar Ga-As MESFET (z.B. CFY 10) wären noch bessere Eingangseigenschaften erreichbar. Die Eingangskapazitäten liegen deutlich unter denen des BF 256 und vergleichbarer Si-FETs aber die Schaltung müßte wegen der verschiedenen Parameter der Transistoren völlig anders dimensioniert werden. MESFET sind außerdem etwas teurer und schwerer beschaffbar, weshalb ich von deren Verwendung abgesehen habe. Der Stromverbrauch ist mit ca. 2,8 mA @9 V gemessen wie berechnet. Mit einer Batterie (6F33) mit 310 mAh ergibt sich also ca. 110 Stunden Betrieb.

Varianten

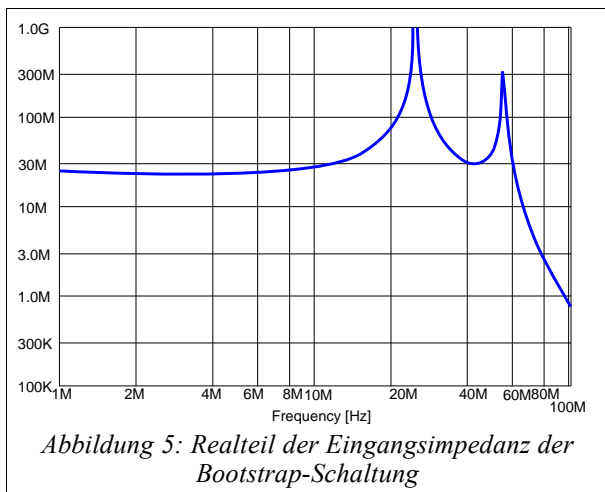
Eine weitere Möglichkeit die Eingangsimpedanz hoch zu treiben ist die Bootstrap-Schaltung. Dies ist im



Prinzip eine Rückkopplung des Ausgangssignals auf den Eingang. So einfach wie immer wieder in Prinzipschaltung gezeigt geht es leider nicht, Verbesserung erhält man nur bei Frequenzen deutlich unterhalb 1 MHz. Eine entsprechende Entzerrung kann nur mit einem komplexen Netzwerk geschehen. Bei der gezeigten Schaltung hat außerdem die Belastung des Ausgangs starken Einfluß auf die Eingangsimpedanz, eben weil es sich um eine Rückkopplung handelt. Eine Ausgereiftere Schaltung zeigt Abbildung 4. Das Rückkopplungsnetzwerk aus R3, R25, R22 und C7 sorgen für eine optimale Eingangsimpedanz und für zwei Pole in deren Verlauf. Leider ist die Lage und Höhe dieser Pole stark von parasitären Kapazitäten und der Belastung am Ausgang ab, also vom tatsächlichen Aufbau. Wenige pF hier und da können das Bild stark verändern, wodurch die Nachbausicherheit dieser Schaltung nicht gegeben ist. Unvermeidlich ist auch bei dieser Schaltung, daß die Ausgangsimpedanz recht hochohmig ist und somit mit einem Übertrager angepaßt werden muß.

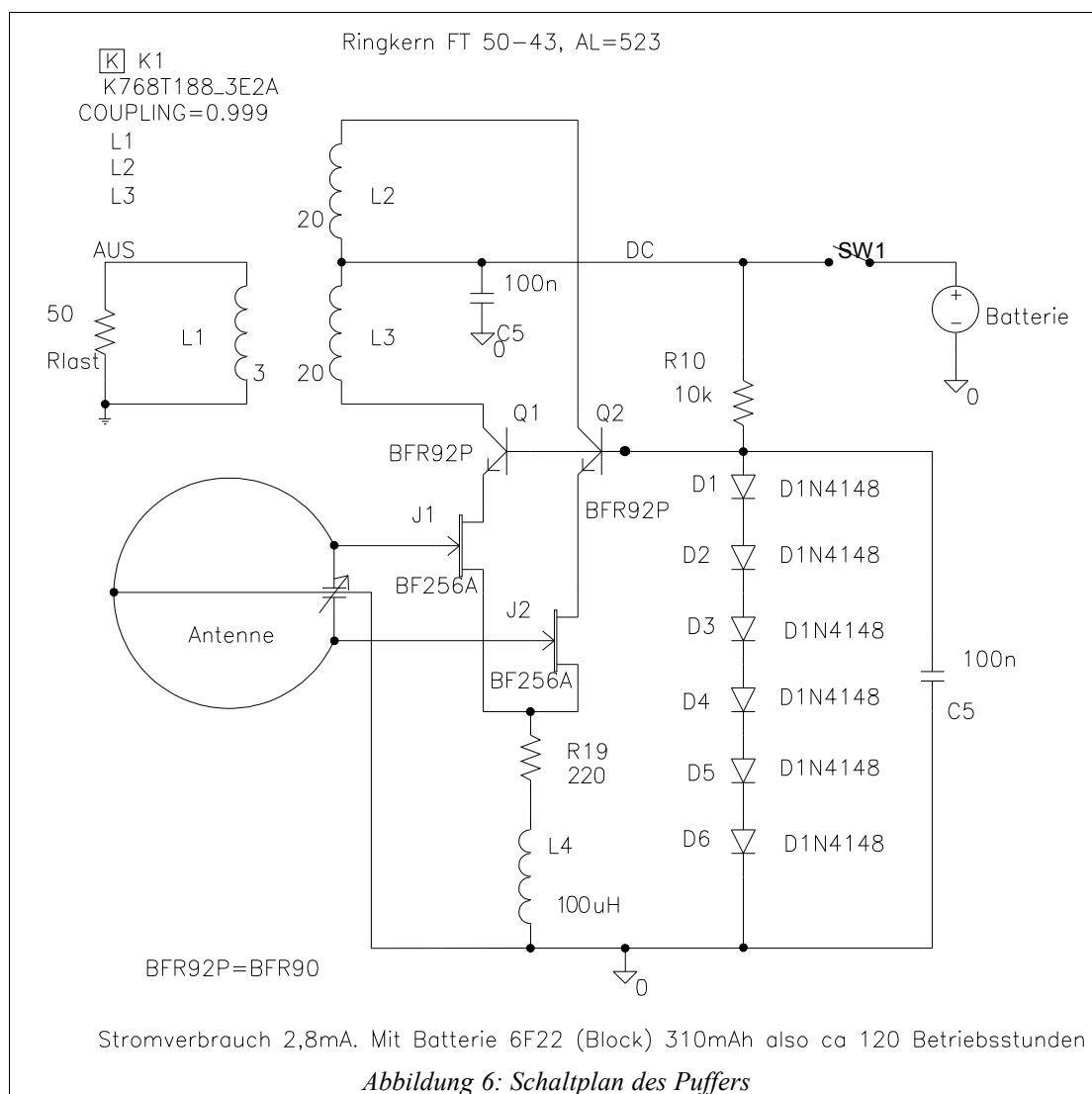
Das Ergebnis dieser Schaltungskniffe kann sich aber sehen lassen, denn der Realteil der Eingangsimpedanz liegt bis über 60 MHz deutlich über 10 MOhm. Zum Vergleich: mit den oft gezeigten einfachen Sourcefolgern erreicht man kaum Werte von 100 KOhm bis 10 MHz. Die Verstärkung dieser Schaltung ist mit einem 3:1 Übertrager am Ausgang bis zu 300 MHz nahe an 1.

Aktive magnetische Schleifenantenne für den Empfang



Ich habe auch Versuche unternommen die Verluste vollständig zu kompensieren. Dies geht theoretisch dadurch, daß man das Empfangene Signal mit der richtigen Phasenlage zurückkoppelt. Dies gelang mit auch mit einer 1 cm Koppelschleife, die das Ausgangssignal transformatorisch in die Loop zurückspeist. Durch drehen dieser mini-Schleife konnte ich tatsächlich die Güte stufenlos bis auf mehrere hunderttausend steigern, und leider auch bis zur Schwingung. Auch mußte diese sehr kritische Abstimmung für jede Frequenzeinstellung immer wieder neu vorgenommen werden, weshalb ich diese Methode verworfen habe.

Eingangskapazität



Der Puffer hat eine, wenn auch kleine, Eingangskapazität. Mit meiner Antennenschleife betrug die maximale Frequenz ohne Puffer 28.980 KHz und mit Puffer nur 27.220 KHz. Das entspricht mit der Rechnerischen Induktivität berechnet einer Eingangskapazität von 1,5 pF. Berechnet habe ich hier 3,2 pF, was nicht dramatisch abweicht, denn auch die Kenndaten speziell von FETs streuen beträchtlich. Wie auch

Aktive magnetische Schleifenantenne für den Empfang

immer, jedenfalls wird mit dem Puffer die oberste abstimmbare Nutzfrequenz der Antenne leicht vermindert.

Antennengewinn

Der Pegel mit dem Puffer ist um ca. 36 dB größer als mit Koppelschleife. Damit lassen sich wirklich auch äußerst schwache Signale auffangen. Auch läßt die Richtwirkung in Verbindung mit der guten Störunterdrückung ein CW-Zeichenempfang schwacher Signale in wenigen Metern Entfernung vom Computer zu. Der Pegel am Antennenausgang ist sehr groß, speziell im 49 m Rundfunk-Band ist mein Scanner hoffnungslos übersteuert. Über die gesamte Spektrumanzeige war die Pegelanzeige am Anschlag. Auf einen Oszilloskop sind Spitzenspannungen bis 0,5 V zu sehen. Damit ist natürlich keine Abstimmung der Antenne mehr möglich, und nahezu jeder Empfänger überfordert. Deshalb verwende ich einen schaltbaren Abschwächer der bis 70 dB abschwächt. Das genügt immer. Die Abstimmung der Antenne nach dem S-Meter ist nur möglich, wenn der Eingangspegel niedrig ist, so daß der Eingangsbegrenzer des Empfängers noch nicht arbeitet. Dann sieht man einen deutlichen Peak beim Durchstimmen des Drehkondensators. Nach dem Abstimmen der Antenne kann man die Abschwächung zurücknehmen, damit der Eingangsbegrenzer Empfangsschwankungen ausregeln kann.

Bei sehr schwachen Sendern war der Unterschied sehr deutlich. Unter den Seefunksignalen knapp oberhalb von 3 MHz fand ich einige sehr schwache Signale. Mit der Pufferauskopplung waren diese wahrnehmbar - nicht so mit der Schleifenauskopplung. Verzerrungen sind für eine FET-Schaltung sehr gering. Vor allem wird durch die symmetrische Differenzschaltung Verzerrungen gerader Ordnung erheblich unter-

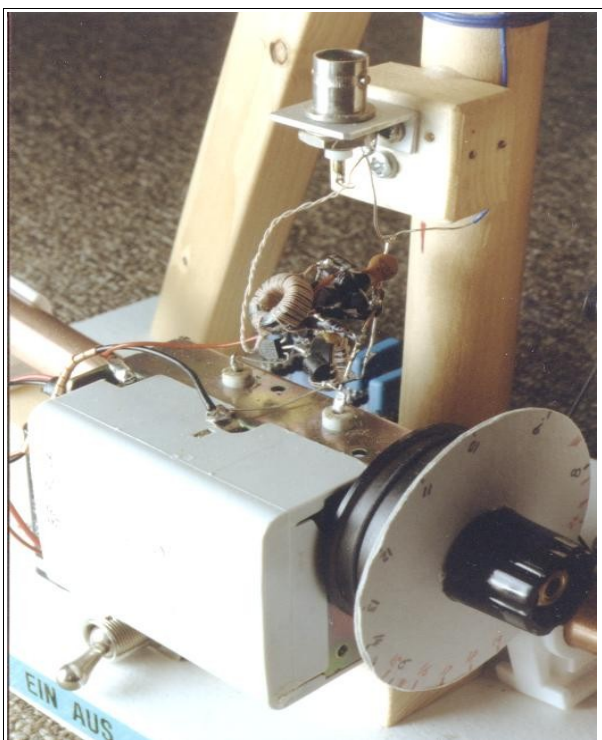


Abbildung 7: Drehkondensator mit angeschlossenen Puffer und BNC-Ausgangsbuchse

drückt. Dies hat zur Folge, daß die dadurch entstehenden Intermodulationsprodukte 2. Ordnung (f_2) gering sind, und deshalb auch die IM-Produkte 3. Ordnung (f_3), denn diese sind ja durch Mischung mit f_2 entstanden. Leider haben FETs starke Kennlinienstreuungen, so daß paarweise selektierte FETs optimal sind. Die hohe Selektivität entschärft aber das IM-Problem ohnehin etwas, da bei einer Betriebsgüte von 1000 bei 6 MHz benachbarte Signale schon gut unterdrückt werden. Die Aussteuerbarkeit ist mit 12 V Versorgung bei +119 dB μ V (0,9 V) entsprechend deutlich höher als mit 9 V: +114 dB μ V (ca. 0,5 V).

Aufbau

Beim Aufbau macht sich nachlässige Ausführung schnell bemerkbar. Ich habe einen Drehkondensator mit zwei Plattenpaketen verwendet, die ich zuerst parallel geschaltet habe, um die Summe der beiden Pakete zu nutzen. So habe ich zunächst den Kondensator über die Lötösen angeschlossen und mich dann über die im Vergleich zu den Berechnungen schlechte Güte gewundert. Die Erklärung ist, daß die Lötösen mit kurzen aber dünnen Drähten angeschlossen sind und somit einen hohen Serienwiderstand in den Schwingkreis bringen. Dazu kommt auch noch, daß das Rotorplattenpaket über Schleifer kontaktiert ist, was einen noch viel schlechteren Übergangswiderstand bietet. Dies kann man nur umgehen wenn beide Plattenpakete in Reihe angeschlossen werden, dann fließt der Strom von einem Rotorplattenpaket über die Welle auf das zweite Rotorplattenpaket ohne über Schleifkontakte zu müssen.

Die Schleifenantenne habe ich aus 16 mm Kupferrohr auf einen Kreisdurchmesser von 1 m gebogen. Zum direkten Vergleichen habe ich eine Koppelspule mit 22 cm Durchmesser abnehmbar angebracht. Die Schaltung habe ich ohne Leiterplatte aufgebaut (eine Freude für alle Lötakrobaten). Der Ausgangsübertrager wird mit einer Lage auf einen R12,5 gewickelt. Primär mit 40 Windungen HF-Litze mit Mittelanzapfung und Sekundär mit mindestens 1 mm Abstand zur Primärwicklung 3 Windungen HF-Litze.

Literatur:

Lehrbuch der Hochfrequenztechnik, Zinke; Brunswig, Springer Verlag, 1986.

Halbleiter-Schaltungstechnik, U. Tietze, Ch Schenk, Springer-Verlag, 1990

Werkstoffe der Elektrotechnik, W. von Münch, Teubner Verlag 1985

Rothammels Antennenbuch, A. Krischke, Franckh-Kosmos 1995

Software:

Magnetic Design Tool, Version 2 3/97, Siemens Matsushita GmbH & Co KG

erstellt auf StarOffice 5.0 für Linux, © 1999 Dipl.-Ing (FH) Joachim Schwender



Abbildung 8: Die Antenne mit einem Besenstiel als »Mast« und einer Schnurskala