

Bild 4.27: Balancemischer mit HCMOS-Schalter-IC

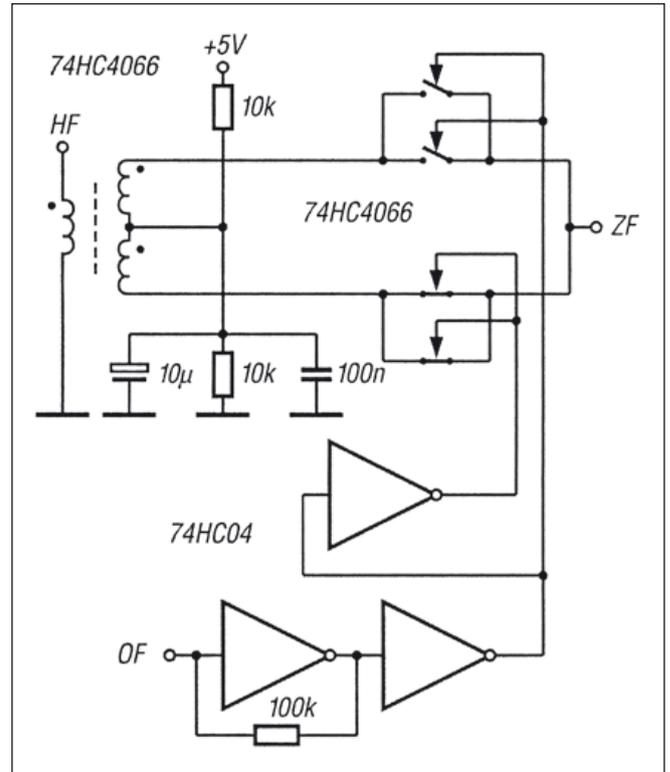


Bild 4.28: Praktisch günstige Parallelschaltung zweier Schalter

4.6 Mischer mit elektronischen Schaltern

Moderne ICs mit elektronischen Schaltern erlauben einen weitgehenden Ersatz der Dioden im Einfach- oder Doppel-Balancemischer bei verbesserten Daten. Diese schnellen CMOS-Schalter arbeiten mit Frequenzen im KW-Bereich und besitzen ausreichend geringe Ein-Widerstände. Es ergeben sich gegenüber Diodenmischern folgende Vorteile:

- Balancemischer ohne Ausgangstransformator möglich
- Lastwiderstand weniger kritisch (kann deutlich höher als Signalquellen-Innenwiderstand sein)
- minimale Oszillatorleistung
- geringere Einfügedämpfung möglich
- hohe, von der Oszillatorleistung unabhängige IM-Festigkeit
- AM-Durchschlag praktisch unmöglich
- einfacher Aufbau, geringe Kosten

4.6.1 HF-Balancemischer

Die in Bild 4.27 gezeigte Schaltung kann ihre Ähnlichkeit mit dem Dioden-Balancemischer nicht verhehlen. Sie funktioniert im HF- und OF-Bereich bis etwa 20 MHz gut. Auch hier könnte man einen elektronischen Umschalter (74HC4053) benutzen. Doch dass dabei nur ein einziges Oszillatorsignal erforderlich wäre, ist nur ein scheinbarer Vorteil, denn da solche Schalter von einem Digital-IC angesteuert werden, steht auch ein invertierendes Gatter bereit.

Das Großsignalverhalten eines so aufgebauten Direktmischempfängers ist beeindruckend.

Es ist sinnvoll, zwei dieser CMOS-Schalter parallel zu legen, denn ihr Ein-Widerstand beträgt typisch 80 Ohm. Wie das beim Typ 4066 praktisch vorteilhaft erfolgen kann, zeigt Bild 4.28. Durch die Parallelschaltung sinkt auch die Wahrscheinlichkeit der Unbalance infolge von Toleranzen.

P. J. Coetzee hat einen solchen Balancemischer mit par-

| HF | OF | ZF | D_m | 1-dB-KP | P_{of} am HF-Port |
|----------|----------|----------|--------|---------|---------------------|
| 3,5 MHz | 5,5 MHz | 9 MHz | 7 dB | 15 dBm | -32 dBm |
| 14,5 MHz | 5,5 MHz | 9 MHz | 6,5 dB | 15 dBm | -32 dBm |
| 20 MHz | 30,7 MHz | 10,7 MHz | 6,5 dB | 15 dBm | -20 dBm |
| 30 MHz | 40,7 MHz | 10,7 MHz | 7,5 dB | 9 dBm | -17 dBm |

Tabelle 1

Mischer mit elektronischen Schaltern

| HF ₁ | HF ₂ | 2 HF ₁ - HF ₂ | HF ₁ - 2 HF ₂ | IP3 |
|-----------------|-----------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------|
| 3,6 MHz | 3,7 MHz | 3,5 MHz | 3,8 MHz | 29 dBm |
| 14,6 MHz | 14,7 MHz | 14,5 MHz | 14,8 MHz | 31 dBm |
| 20,1 MHz | 20,2 MHz | 20 MHz | 20,3 MHz | 29 dBm |
| 30,1 MHz | 30,2 MHz | 30 MHz | 30,3 MHz | 19 dBm |

Tabelle 2

allel geschalteten Schaltern im 4066 eingehend untersucht und damit einen 40-m-Direktmischempfänger aufgebaut, der bei 2,4 kHz Bandbreite ein Eigenrauschen (äquivalente Eingangsrauschleistung) von -128 dBm und einen intermodulationsfreien Dynamikbereich von 105 dB besitzt. Die Empfindlichkeit liegt hier um 100 nV.

Tabelle 1 (vorherige Seite) bringt die gemessenen Einton-Daten des Mixers bei einem 50-Ohm-Abschluss. Der Oszillatordurchschlag entsteht vor allem durch die parasitäre Schaltkreis Kapazität zwischen den Steuerpins und dem Schalter.

Tabelle 2 (oben) betrifft das Intermodulationsverhalten der Schaltung bei Abschluss mit 50 Ohm:

4.6.2 Doppel-Balancemischer

Mit Vierfach-CMOS-Schaltern kann man Doppel-Balancemischer aufbauen. Diese eignen sich besonders für Super und Sender, weil sie im Gegensatz zu Einfach-Balancemischern die Oszillatorfrequenz und ihre Harmonischen unterdrücken.

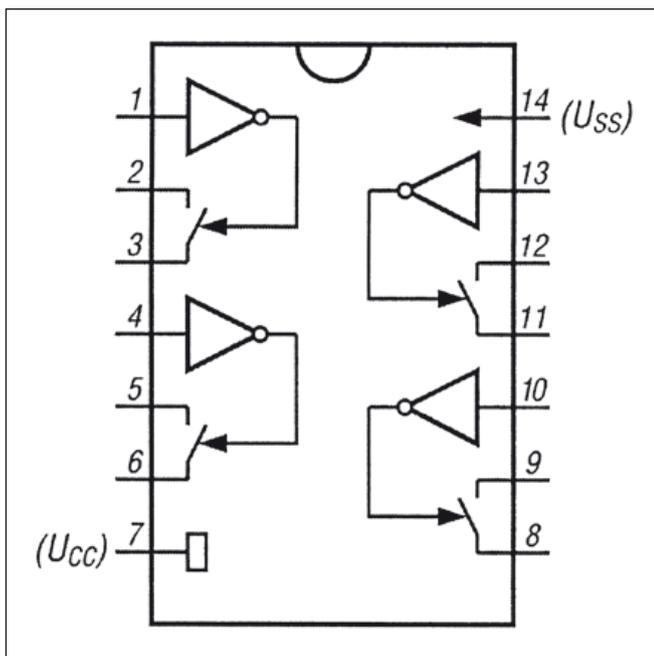


Bild 4.29: Innenaufbau des schnellen Schalter-ICs FST 3125M

Die Einfügedämpfung eines Doppel-Balancemischers ist größer als die eines Einfach-Balancemischers, da zwei in Reihe liegende Schalter überwunden werden müssen. Es ist daher oft sinnvoll, einen IC mit besonders niederohmigen Schaltern auszuwählen. In Bild 4.29 ist die Struktur eines solchen Schalter-ICs von Fairchild gezeigt. Er wird im SMD-Gehäuse geliefert und benötigt nominell 5 V Betriebsspannung. Bill, W7AAZ, und Colin, G3SBI, haben damit gemäß Bild 4.30 einen Mischer aufgebaut und diesen näher untersucht. Es zeigten sich folgende Ergebnisse:

- Einfügedämpfung mit Selbstbau-Transformatoren (je 3x6 Wdg., je 0,25 dB Dämpfung) bei HF = 14 MHz, OF = 18,9 MHz und ZF = 4,9 MHz: 4,85 dB
- Unbalance bei symmetrischem Layout und 6% Induktivitätstoleranz der Transformatoren: 45 dB
- OF-Dämpfung am ZF-Port: 42 dB
- IP3 mit HF₁ = 14 MHz und HF₂ = 14,2 MHz: 44 dBm

Es wird darauf verwiesen, dass eine gute Balance auch durch symmetrisches Layout mit kurzen Verbindungen zu den Transformatoren gesichert werden muss. Für beste Eigenschaften werden Transformatoren von Mini-Circuits vom Typ TT4-1A, Größe X65 im 6-Pin-DIP empfohlen.

Es geht aber auch ohne Vorspannung und Bifilarwicklung. In den gezeigten Mischerschaltungen mit elektronischen Schaltern erhalten diese die halbe Betriebsspannung als Vorspannung. Somit kann die maximale Eingangsspannung innerhalb der Betriebsspannungsgrenzen verarbeitet werden. Für Eingangsspannungen außerhalb dieser Grenzen ist die Funktion der Schalter vom Hersteller nicht definiert. Es fallen die großen Abbockkapazitäten auf. Ihr Grund: Wenn der Mischer mit Vorspannung arbeitet, leidet die Stabilität eines Direktmischempfängers. Die NF-Verstärkung muss ja beim Schaltmischer besonders hoch sein. Ist der NF-Teil diskret aufgebaut, ist seine Betriebsspannungs-Unterdrückung gering.

Ha-Jo, DJ1ZB, löste das Problem in echter Amateur-Mannier: „Die Mittenspannung ist ... bei Eingangsspannungen unter 500 mV, wie sie im praktischen Empfangsbetrieb vorkommen, nicht erforderlich. Das vereinfacht die Schaltung wesentlich und befreit sie vor allem von einem Problem, das gerade bei Direktüberlagerungsempfängern sehr unangenehm sein kann. Denn bei diesen Empfängern ist die NF-Verstärkung oft sehr hoch, und wenn diese Mit-

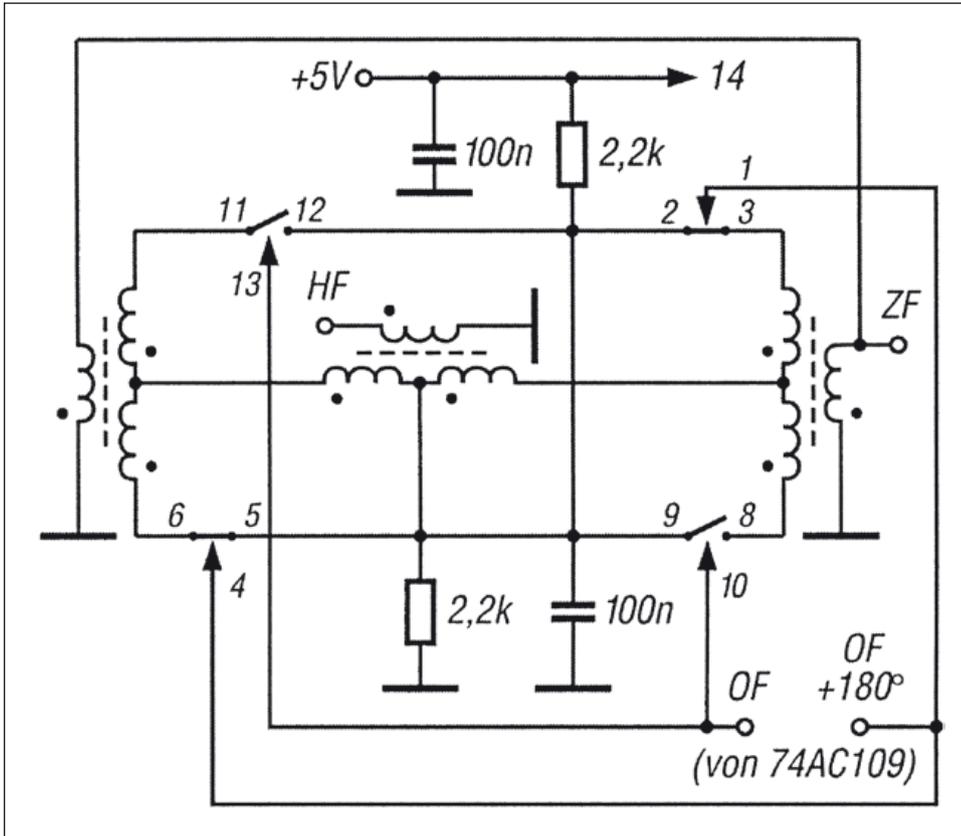


Bild 4.30: Doppel-Balancemischer mit FST 3125M und drei identischen Transformatoren (z.B. je 3x6 Wdg. 0,4-mm-CuL-Draht auf Ferritringkern)

tenspannung nicht äußerst stabil und rückwirkungsfrei erzeugt wird, können niederfrequente Instabilitäten (Motor Boating) auftreten.“

Diodenmischer benötigen bifilare Wicklungen zum Anschluss der Oszillatorspannung. Verwendet man Schalter statt Dioden, kann ein Balancemischer jedoch mit nur einem einfachen Transformator aufgebaut werden. Wie beim Doppel-Balancemischer müssen dabei zwei Schalter

vom Signal durchlaufen werden. Auch die Schalter sind ringförmig verbunden, sodass der Name Ringmischer gerechtfertigt ist, und trotzdem handelt es sich um einen einfachen Balancemischer.

Bild 4.31 zeigt das Eingangsteil eines nach diesem Konzept von DJ1ZB aufgebauten Empfängers. Die Antennenimpedanz von 50 Ohm wird dabei kapazitiv an den Vorkreis gekoppelt und mit dem Faktor $([560 \text{ pF} + 39 \text{ pF}] / 39 \text{ pF})^2$

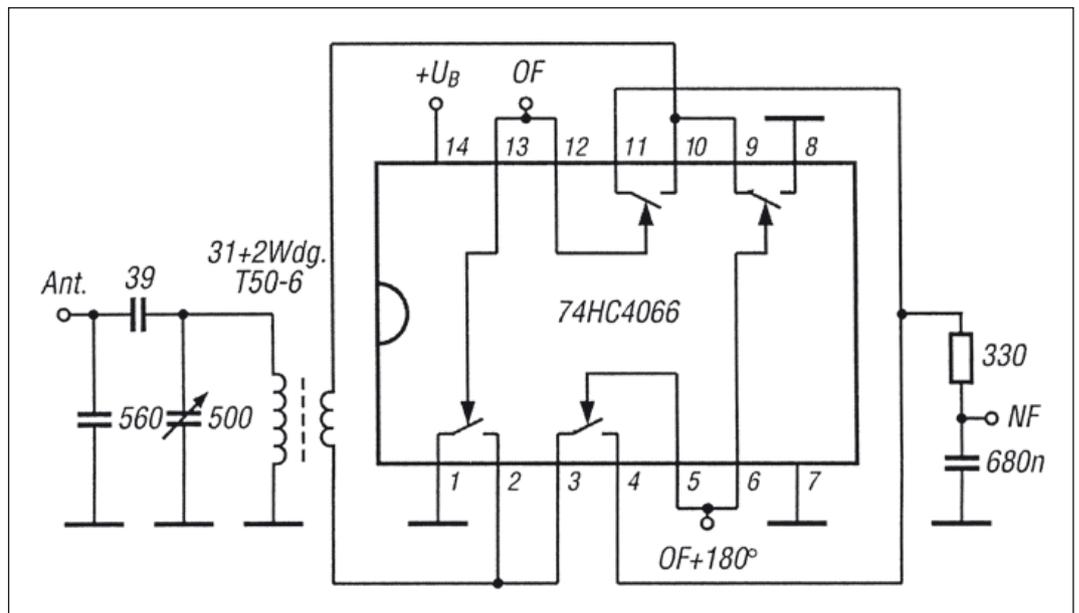


Bild 4.31: Frontend des Direktmischers „Pottenstein-RX“ für 3,5, 7 und 10 MHz

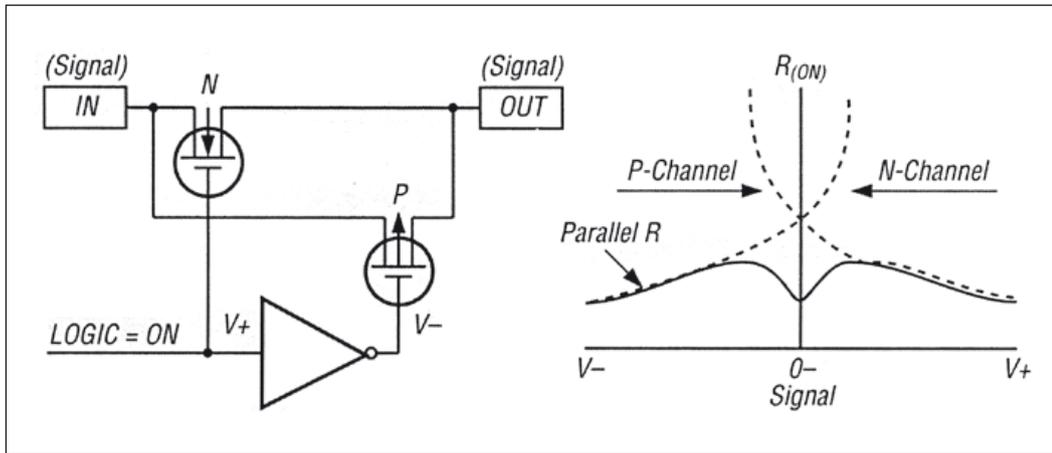


Bild 4.32: Der Ein-Widerstand eines CMOS-Schalters ergibt sich aus der Parallelschaltung der Kanalwiderstände, die stark von der Signalspannung abhängig sind.

= 236 zum Hochpunkt transformiert. Das führt dort zu rund 12 kOhm Lastwiderstandsanteil seitens der Antenne. „Da der Einschaltwiderstand (On-Resistance) dieser FET-Schalter typisch 80 Ohm beträgt, ist es nicht sinnvoll, den Mischer wie bei üblichen Dioden-Ringmischern mit einer Impedanz von 50 Ohm zu betreiben. Ein bewährter Wert ist 330 Ohm. Dieser Arbeitswiderstand von 330 Ohm braucht nicht immer gleichstrommäßig angeschlossen zu sein. Er kann daher bei Direktüberlagerungsempfängern gleichzeitig als erster Widerstand eines RC-Gliedes dienen.“ So Ha-Jo, DJ1ZB.

Somit sieht die Koppelwicklung mehr als $330 \text{ Ohm} + 2 \times 80 \text{ Ohm} = 490 \text{ Ohm}$. Zum Hochpunkt transformiert wird mit dem Faktor $(31 \text{ Wdg.}/2 \text{ Wdg.})^2 = 240$, sodass dort seitens des beschalteten Mixers über 120 kOhm erscheinen. Obwohl der Eingangskreis somit weit von Optimalanpassung entfernt ist, funktioniert der Empfänger sehr gut.

Ich erachte den Preis der Reihenschaltung der Schalter für den einfachen Übertrager als zu hoch. Eine ausreichend symmetrische Bifilarwicklung kann leicht hergestellt werden und ermöglicht es, zwei Schalter parallel zu betreiben. Das senkt den Gesamtwiderstand gegenüber der Reihenschaltung auf ein Viertel und verbessert somit die Einfügedämpfung entscheidend. Da das Rauschmaß nur geringfügig höher ist als diese, erreicht man so entweder entsprechend höhere Empfindlichkeit oder – in Verbindung mit einem Dämpfungsglied – einen höheren IP3 bei Empfängern.

Zum Thema „Vorspannung“ sei Folgendes festgestellt: Ingenieurmäßig ist es nicht vertretbar, unter Bedingungen zu arbeiten, die der Hersteller nicht zulässt. Der vielfach nachgebaute „Pottenstein-RX“ hat aber bewiesen, dass man bei einem Amateur-Selbstbauempfänger auf die Vorspannung verzichten kann. Eine Vorspannung in Höhe der halben Betriebsspannung scheint, wie Bild 4.32 demonstriert, am ungünstigsten zu sein, denn in diesem Fall ist die Abhängigkeit des Ein-Widerstands von der Signalspannung am größten. Das bedeutet höchste Nichtlinearität. Jedoch zeigen Schalter in T-Konfiguration, wie die Typen MAX 4546/4547, genau entgegengesetztes Verhalten: Hier ist

der Verlauf des Ein-Widerstands über der Vorspannung bei Mittenspannung am flachsten.

Wird der NF-Verstärker gemäß Stand der Technik mit Operationsverstärkern realisiert, dürfte sich das Motor-Boating-Problem entschärfen, da diese Bausteine eine sehr hohe Betriebsspannungs-Unterdrückung besitzen.

4.6.3 Hinweise zu ICs

Folgende Schaltkreise kommen für den Amateur u.a. in Betracht (Bezug z.B. von RS Electronic oder box 73):

- MAX 312/313/314CPE/CSE: vier Schließer mit 10 Ohm Ein-Widerstand und typ. 70 ns Schaltzeit für 4,5...30 V im DIL-16- oder SO-16-Gehäuse
- DG 611DY: vier Schließer mit 18 Ohm Ein-Widerstand, typ. 12 ns Schaltzeit und 500 MHz Bandbreite im SO-16-Gehäuse von Siliconix
- DG 601DY: vier Schließer mit 20 Ohm Ein-Widerstand und typ. 30 ns Schaltzeit im SO-16-Gehäuse von Siliconix
- DG 412DJ: vier Schließer mit 25 Ohm Ein-Widerstand und typ. 100 ns Ein- bzw. 60 ns Aus-Schaltzeit im DIL-16-Gehäuse von Siliconix
- DG 412DJ: vier Öffner mit 25 Ohm Ein-Widerstand und typ. 100 ns Ein- bzw. 60 ns Aus-Schaltzeit im DIL-16-Gehäuse von Siliconix
- DG 413DJ: zwei Öffner und zwei Schließer mit 25 Ohm Ein-Widerstand und 100 ns Ein- bzw. 60 ns Aus-Schaltzeit im DIL-16-Gehäuse von Siliconix
- MAX 4066ACPD/ACSD: vier Schließer mit 45 Ohm Ein-Widerstand und typ. 25 ns Ein- bzw. 15 ns Aus-Schaltzeit für 2...16 V im DIL-14- oder SO-14-Gehäuse
- MAX 4614/15/16: vier Schließer mit typ. 8 Ohm Ein-Widerstand und max. 10/12 ns Schaltzeit für 5 V im SOIC-, TSSOP- oder DIP-16-Gehäuse

Bei der Auswahl scheinen die Schaltzeiten wichtiger zu sein als die Ein-Widerstände. Es kommt auf kurze und möglichst gleiche Ein- und Ausschaltzeit an.

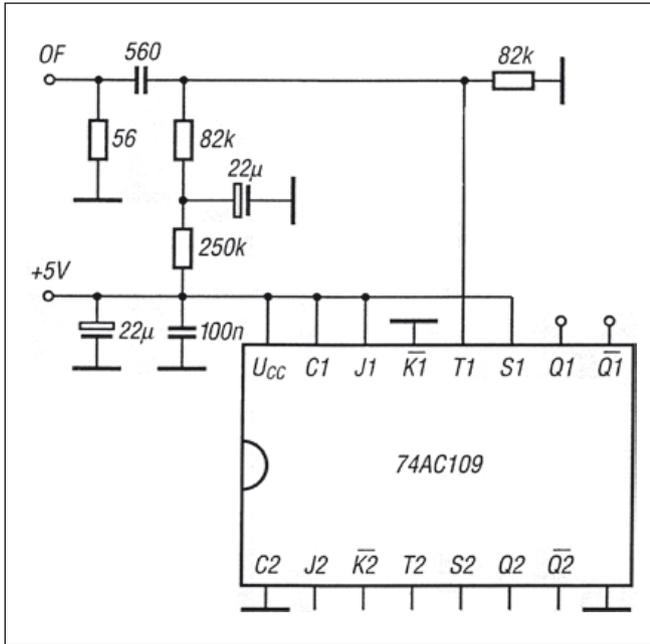


Bild 4.33: Oszillatorspannungs-Aufbereitung für doppelte Eingangsfrequenz

4.6.4 Oszillatorspannungs-Aufbereitung

Ein Nachteil von Schaltmischern mit Digital-ICs besteht darin, dass in der Oszillatorschaltung ein weiterer digitaler

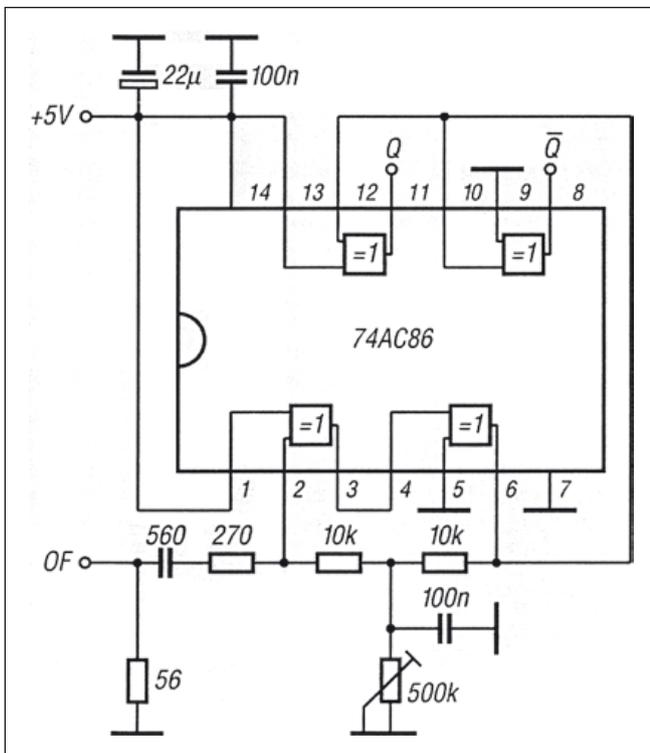


Bild 4.34: Oszillatorspannungs-Aufbereitung ohne Frequenzteilung

IC praktisch kaum vermeidbar ist. Es erfordert einen gewissen Aufwand, die Oszillatorspannung auf den erforderlichen Pegel zu bringen.

Eine bewährte Schaltung für niedrige Frequenzen zeigt Bild 4.33. Sie kann von einem 10-dBm-Sinussignal sicher gespeist werden. Der 74AC109 beherbergt zwei JK-Flip-Flops, von denen eins zum Teilen der Frequenz bei Erhalt eines Tastverhältnisses von 0,5 benutzt wird.

Die Schaltung nach Bild 4.34 teilt die Eingangsfrequenz nicht. Die Ansteuerleistung sollte -10 bis 10 dBm betragen. Im letzten Fall ist der Stromverbrauch minimal. Der 270-Ohm-Widerstand ist für stabile Arbeitsweise notwendig. Mit dem Einstellwiderstand sorgt man für minimalen Oszillator-ZF-Port-Durchschlag, indem man die Oszillatorfrequenz dort misst und minimiert. Damit ist auch die Balance maximal.

Der komplette Oszillatorteil für einen solchen schaltenden Mischer sollte auf einer zweiseitig kaschierten Platine in der üblichen HF-technisch günstigen Weise aufgebaut werden (obere Cu-Fläche maximal lassen und als Masse benutzen). Die 56-Ohm-Widerstände in den Eingängen sind bei kurzer Verbindung zum Oszillator entbehrlich. Durch ihren Wegfall vermindert sich die Oszillatorleistung erheblich. Es genügt eine Eingangsspannung von ganz ungefähr 500 mV.

4.6.5 H-Mode-Mischer

Dieser Mischer erhielt seinen Namen wegen seiner Aufbaustruktur, die einem H ähnelt – siehe Bild 4.35. Erfinder dieses Mixers ist der Engländer Colin Horrabin.

Dieser schaltende Doppel-Balancemischer ist zwar etwas aufwändig, bietet aber den Vorteil, dass alle Schalter an Masse liegen. Das bedeutet praktisch stabilen Betrieb und hohe Isolation. Nicht nur den Eingang, auch den Ausgang kann man symmetrisch oder unsymmetrisch auslegen.

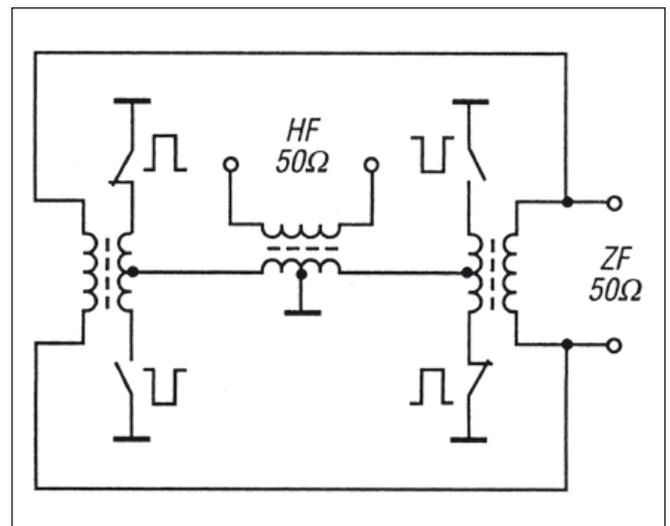


Bild 4.35: Schaltung des H-Mode-Mixers

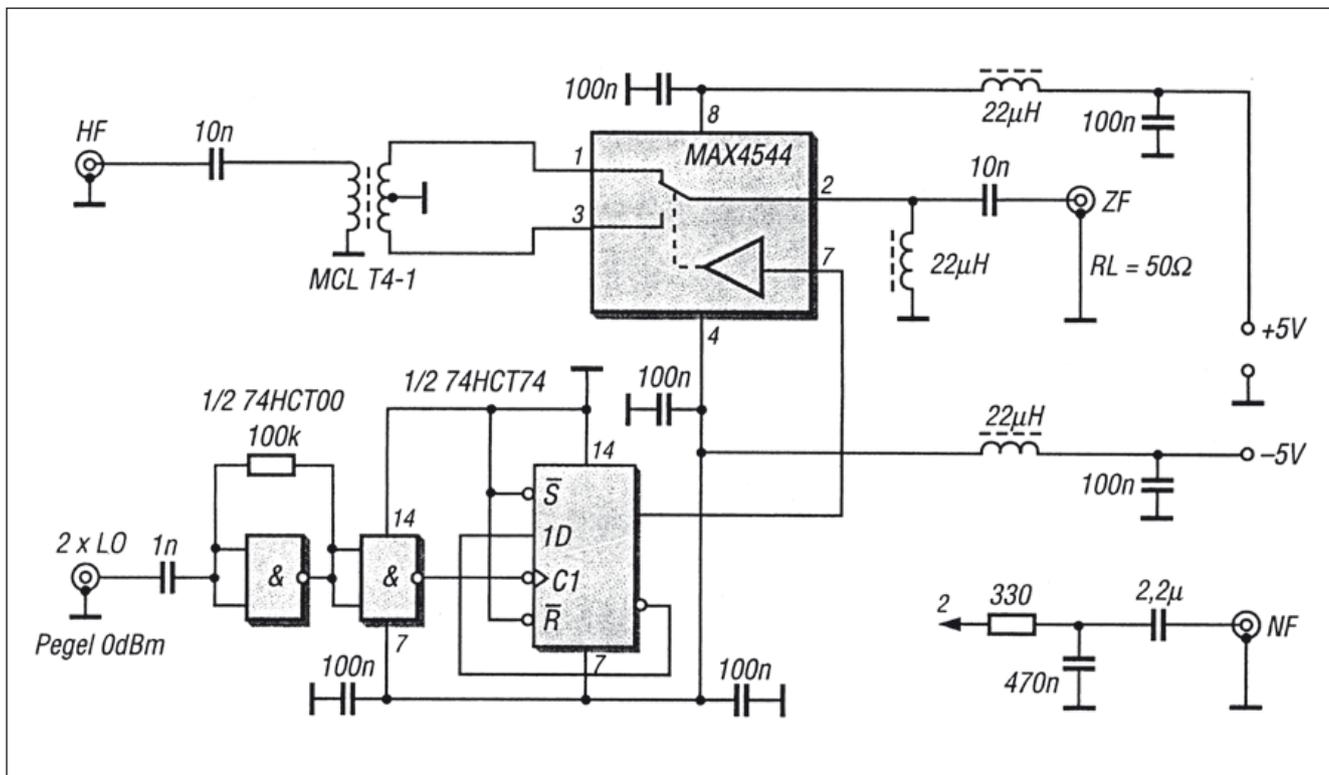


Bild 4.36: Einfacher Doppel-Balancemischer mit Umschalter-IC MAX 4544

Sergio Cartoceti, IK4AUY, hat qualifizierte Aufbauten gemacht und das Verhalten sorgfältig untersucht. Ein IP3 von 40 dBm ist möglich. Es wurde ein konventioneller Squarer-IC 74HC86 und einer mit SMD-Squarer 74AC86 erprobt. Die Durchgangsdämpfung ist mit 5 dB beachtlich. Hier die Isolationswerte:

| Aufbau | RF/IF | LO/IF | LO/RF |
|---------------|------------|------------|------------|
| konventionell | 26...38 dB | 33...46 dB | 27...41 dB |
| SMT | 39...66 dB | 37...48 dB | 38...48 dB |

4.6.6 Vorschlag für eine Standardschaltung

Bild 4.36 zeigt eine Einsatzschaltung von Arndt Haselhoff, DL1DH, die universell als Sendemischer, Produkt-detektor oder Mischer in einem Super geeignet ist. Mit dieser Schaltung wurde ein IP3 von über 35 dBm erzielt. Das ist für Schaltmischer nicht ungewöhnlich, erfreut aber angesichts des recht einfachen Aufbaus besonders.

Die Mischerdämpfung wurde mit 7,6 dB gemessen. Das sollte nicht besonders verwundern, denn der Ein-Widerstand ist doch recht hoch. Eine Verbesserung scheint durch Parallelschaltung eines weiteren MAX 4544 möglich. Versuche in dieser Richtung zeigten jedoch nicht den erhofften Erfolg. Die Dämpfung geht kaum zurück, dafür jedoch der IP3 beträchtlich.

4.6.7 Mischer- und Multiplizierer-ICs

Aktive Doppelbalance-Mischer stehen dem Amateur auch in Form von Schaltkreisen zur Verfügung. Recht gut erhältlich sind die Typen in der Tabelle auf der folgenden Seite.

Die mit * gekennzeichneten ICs haben noch andere Baugruppen an Bord, daher ist der Mischer nur mehr oder weniger gut direkt zugänglich. In den Datenblättern findet man zumeist typische Einsatzschaltungen, die eine gute Basis für eigene Anwendungen sind.

Auch ein schneller Vierquadranten-Multiplizierer kann als Mischer verwendet werden. Besonders bietet sich der AD 835 an. Arndt Haselhoff, DL1DH, hat sich damit näher beschäftigt.

Die einfachste Beschaltung für je 50 Ohm Eingangswiderstand bringt Bild 4.37. Der AD 835 lässt sich bereits in dieser Konfiguration vielseitig einsetzen. Bei der Anwendung als Empfängermischer sollte man beachten, dass das Rauschen bis 10 MHz mit 50 nV/Hz nicht sehr niedrig ist.

Die Einfügedämpfung mit 50 Ohm Last wurde zu 8,7 dB ermittelt, der IP3 mit 7,1/7,15 MHz (je 0 dBm) und 11 MHz LO (10 dBm) lag über 35 dBm. Bei der Schaltung in Bild 4.38 wurde die Einfügedämpfung durch drei Transformatoren auf 2,2 dB deutlich verbessert. Übrigens: Mit 16 nV/Hz hat der AD 831 ein dreimal geringeres Eigenrauschen und ist somit als Empfängermischer besser geeignet.