

Dimensionierung von Duplex-Weichen und Filtern bei Relaisstationen

Funkverbindungen über Relais erfreuen sich nach wie vor großer Beliebtheit, da mit sehr kleinen Sendeleistungen, insbesondere von Hand- oder Mobilgeräten, sichere Verbindungen in einem relativ großen Einzugsgebiet möglich sind. Voraussetzung sind jedoch geeignete Standorte für das Relais in exponierter Lage, z.B. auf Hochhäusern oder Funktürmen. Diese sind nur in begrenzter Anzahl vorhanden und dadurch sehr begehrt. Meist werden sie mit zahlreichen anderen Funkdiensten wie Mobilfunk, BOS-Funk, Bündelfunk sowie mit leistungsstarken Rundfunk- und Fernsehsendern geteilt.

Um eine gegenseitige Beeinträchtigung zu vermeiden, müssen technische Maßnahmen ergriffen werden. Nebenlinien und Seitenbandrauschen der eigenen Sendeeinrichtungen können den Empfang der anderen Funkdienste, insbesondere aber den Empfang des eigenen Relais, empfindlich stören. Durch Intermodulation verschiedener Sendesignale oder deren Oberwellen entstehen durch Nichtlinearitäten an Leistungsverstärkern oder Empfängereingängen sogar Störprodukte mit ganz neuen Frequenzen. Mit einer geeigneten Duplex-Weiche oder einer Entkopplung zwischen Sende- und Empfangsantenne und evtl. zusätzlichen Filtern oder einem Zirkulator bzw. Isolator ist es möglich, das eigene Relais mit maximal möglicher Empfängerempfindlichkeit zu betreiben und das friedliche Zusammenleben mit anderen Funkdiensten, die zum Teil auch lebensrettende Aufgaben erfüllen, ohne gegenseitige Störbeeinflussung sicherzustellen.

Für die richtige Dimensionierung der erforderlichen Filter und Weichen ist die Kenntnis der Sender- und Empfängereigenschaften des eigenen Relais, sowie der am Standort befindlichen Sende- und Empfangsfrequenzen anderer funktechnischer Einrichtungen eine wichtige Voraussetzung.

Folgende Abschnitte geben einen Leitfaden, welche kritischen Parameter beachtet werden sollten, wie die Sender- und Empfängereigenschaften ermittelt werden können und wie eine erforderliche Entkopplung des Sende- und Empfangssignals mittels einer Duplex-Weiche realisiert werden kann.

1 Wichtige Sender- und Empfängereigenschaften

Im Folgenden werden die speziellen Eigenschaften der Sende- und Empfangsanlage beschrieben, die beim gleichzeitigen Betrieb von Sender und Empfänger an einem Standort, insbesondere bei Betrieb an einer gemeinsamen Antenne, Beachtung finden sollten.

Auch wenn die Ursachen der gegenseitigen Beeinflussung sehr vielfältig sein können, das Ergebnis ist letztlich immer das Gleiche: eine starke Minderung der Empfängerempfindlichkeit. Nur die Abhilfe fällt unterschiedlich aus: im einen Fall ist es erforderlich, das Sendesignal von Rauschen und Nebenlinien zu befreien, damit die eigene Empfangsfrequenz sauber bleibt. Im anderen Fall darf der Empfänger nicht zu viel von der eigenen Sendeleistung abbekommen. Ein Empfangsfilter schützt in diesem Fall den Empfänger vor

Überlastung durch Signale, die abseits der Empfangsfrequenz liegen. Zum Schutz vor Intermodulation helfen ebenfalls Filter oder ein Zirkulator an der richtigen Stelle, sofern erforderlich.

1.1 Seitenbandrauschen des Senders

Als die Kenngröße mit der größten Bedeutung für die gegenseitige Beeinflussung von Sender und Empfänger kann in der Regel das Seitenbandrauschen des Senders angenommen werden. Jeder Oszillator erzeugt abseits der gewünschten Frequenz ein Seitenbandrauschen, also ein Phasenrauschen unter- und oberhalb der Oszillatorfrequenz, das typisch mit zunehmenden Frequenzabstand abnimmt und einem breitbandigen Rauschflur überlagert ist. Dafür verantwortlich ist zum einen der Oszillator selbst, aber auch die Eigenschaften einer PLL tragen sowohl im positiven wie auch im negativen Sinn dazu bei. Eine nachfolgende Leistungsverstärkung führt zu einer weiteren Verschlechterung des Seitenbandrauschens. Datenblattangaben von Funkgeräten beziehen sich meist nur auf das trägernähe Rauschen, da hier die unmittelbaren Eigenschaften des Senders bezüglich Modulation oder Nachbarkanalleistung angesprochen werden. Angaben über das Rauschen weitab der Sendefrequenz sind in den meisten Datenblättern jedoch nicht zu finden.

Für den Betrieb an einer Relaisstation ist aber genau das Rauschen entscheidend, das auf der Empfangsfrequenz erzeugt wird, also der Sendefrequenz abzüglich der Relaisablage. Ohne geeignete Maßnahme würde der Empfänger dann nur noch das Rauschen des eigenen Senders "hören", aber keine Funksignale mehr aufnehmen können.

Das Seitenbandrauschen wird relativ, also bezogen auf die Trägerleistung, angegeben. Weiterhin wird es, wie bei Rauschsignalen üblich, auf 1Hz Bandbreite bezogen. Die Angabe erfolgt daher in dBc/Hz (c =carrier). Als Daumenwert werden oft -150dBc/Hz in großem Abstand zum Träger angenommen. Dass dieser Wert keine physikalische Konstante ist und Spielraum für Ausreißer in beide Richtungen zulässt, wird aus den später folgenden Messungen ersichtlich. In dieser Größenordnung wird man in den meisten Fällen jedoch mit seinem Sender liegen, sofern kein grundlegendes Problem vorliegt. Mit entsprechend üppiger Reserve bei der Unterdrückung lässt sich eine genaue Messung dann auch mal umgehen.

Neben dem Seitenbandrauschen kann der Sender jedoch auch diskrete Nebenlinien erzeugen, die z.B. durch die Frequenzaufbereitung entstehen. Der Abstand diskreter Nebenlinien wird ebenfalls in dBc, also bezogen auf die Sendeleistung, angegeben. Der relative Bezug auf 1Hz Bandbreite entfällt jedoch, da die Leistung einer diskreten Nebenlinie unabhängig von der ZF-Bandbreite des Empfängers ist. Auf diesen Zusammenhang wird in Kapitel 4 anhand eines Fallbeispiels noch genauer eingegangen, siehe dazu auch Bild 15.

Bild 1 zeigt das Phasenrauschen eines einfachen Signalgenerators älterer Bauart. Das Phasenrauschen nimmt bei einer Frequenzablage bis 10kHz zunächst stark ab und bleibt bis 100kHz auf konstanter Höhe. Anschließend erfolgt eine weitere Abnahme bis ca. 2MHz Abstand zum Träger. Ab dann stellt sich ein konstanter Rauschflur von ca. -148dBc/Hz ein, der auch noch weit über den dargestellten Bereich von 30MHz abseits der Trägerfrequenz vorhanden ist. Dieser Signalgenerator hält sich also ganz gut an den genannten Daumen-

wert von -150dBc/Hz, allerdings nur bei der großen Relaisablage von -7.6MHz im 70cm-Bereich. In dem Diagramm sind auch einige diskrete Nebenlinien gut erkennbar.

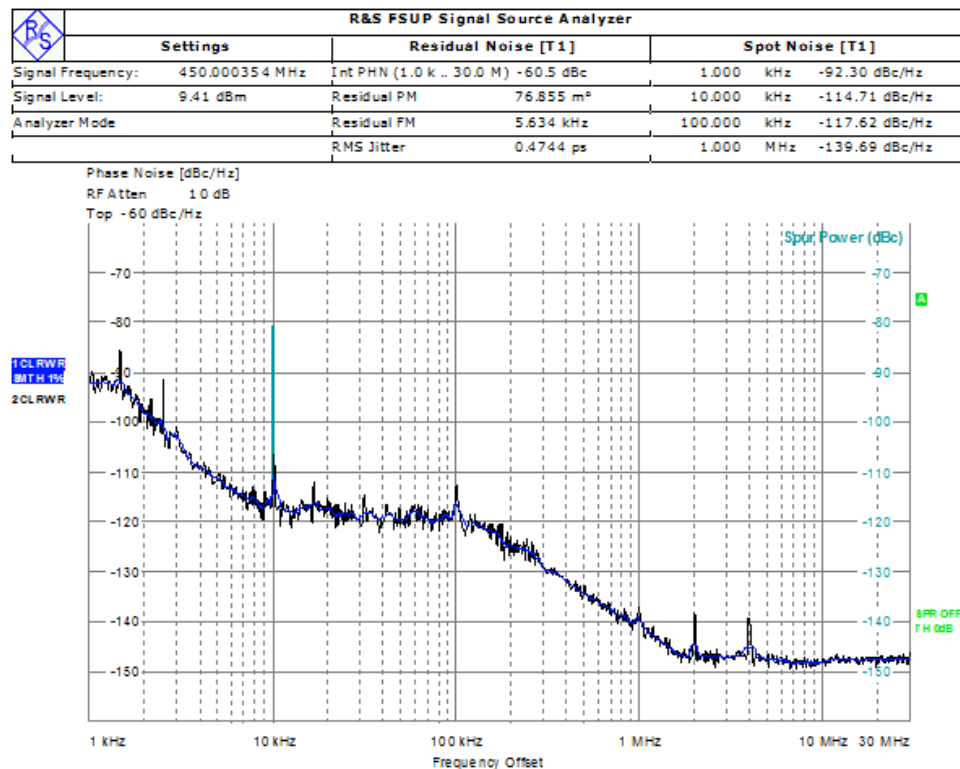


Bild 1: Phasenrauschen eines einfachen Signalgenerators

Die wirkungsvollste Methode, das Seitenbandrauschen oder die Nebenlinien auf einen erträglichen Wert zu reduzieren, besteht darin, das Signal unmittelbar am Senderausgang zu filtern. Das bedeutet, dass auf der Empfangsfrequenz eine ausreichende Dämpfung eingebracht wird. Im einfachsten Fall kann dies durch ein sehr schmalbandiges Notch-Filter erreicht werden, bei dem nur die Empfangsfrequenz des Relais-Empfängers unterdrückt wird.

In diesem Zusammenhang möchte ich wie bereits in der Einleitung darauf hinweisen, dass sich auch andere Empfangstationen am gleichen Standort befinden können, die u.a. auch lebensrettende Aufgaben erfüllen müssen. So befinden sich z.B. analoge Bündelfunk- und TETRA-Frequenzen in unmittelbarer Nachbarschaft im 70cm-Band. Das Seitenbandrauschen wird dann nur durch die Antennenisolation zu den anderen Stationen verringert. Im Sinne einer friedlichen und störungsfreien Koexistenz sollte daher das Sendesignal über ein Bandfilter selektiert werden, das nur den wirklich erforderlichen Frequenzbereich durchlässt. Je weniger man über die Frequenzen der anderen Stationen in Erfahrung bringen kann, desto besser sollte gefiltert werden.

Mit zunehmender Selektion eines Filters steigt jedoch auch die Durchgangsdämpfung. Hier ist ein sinnvoller Kompromiss zwischen Selektion und Durchgangsdämpfung zu finden, um nicht die teuer erzeugte HF-Leistung nutzlos in Wärme umzuwandeln. Durch eine entsprechend hohe Kreisgüte kann der Dämpfung entgegengewirkt werden. Insbesondere im 2m-Band mit der sehr geringen Relaisablage von gerade mal -0.6MHz und der großen

Wellenlänge können Filter erforderlich sein, die beachtliche mechanische Dimensionen annehmen.

Welche Unterdrückung des Seitenbandrauschens ist nun aber erforderlich, damit der eigene Empfänger nicht in seiner Empfindlichkeit beeinträchtigt wird?

Im Folgenden wird von einem idealen Empfänger ausgegangen. Damit ist gemeint, dass bei der Betrachtung die Rauschzahl zu 0dB angenommen wird. Das thermische Rauschen am Empfängereingang beträgt dann -174dBm/Hz bei Raumtemperatur. Liegt das vom Sender erzeugte Rauschen in der gleichen Höhe am Empfängereingang an, verschlechtert sich die Rauschzahl bzw. der Signal-Rauschabstand bereits um 3dB. Damit der Einfluss auf die Rauschzahl vernachlässigbar gering wird, sollte das Sender-Seitenbandrauschen am Empfängereingang ca. 10dB tiefer liegen, was im Folgenden als Zusatzdämpfung bezeichnet wird. Dann beträgt die Verschlechterung der Rauschzahl nur noch 0.4dB. Sollte der Einfluss noch geringer sein, ist die Zusatzdämpfung entsprechend höher zu wählen. Bei einer Zusatzdämpfung von 20dB beträgt die Verschlechterung nur noch 0.04dB.

Die erforderliche Filterdämpfung lässt sich, allgemein ausgedrückt, nach folgender Formel berechnen: Sendepiegel - Empfängereingangsrauschpegel + Störabstand + Zusatzdämpfung. Der Störabstand ist dabei das Seitenbandrauschen in dBc/Hz oder der Nebenlinienabstand.

Für die Berechnung der Filterdämpfung mit bekanntem Nebenlinienabstand in dBc muss zuerst noch eine Korrektur erfolgen, wenn - wie hier - der Empfängereingangsrauschpegel in dBc/Hz, also auf 1Hz Bandbreite bezogen ist. Dazu wird die ZF-Bandbreite B_{ZF} des Empfängers benötigt. Es besteht dann folgender Zusammenhang:

$$a_{i_TX-Filter} [dB] \geq L_{TX} [dBm] + 174dBm/Hz + a_{Stör} [dBc] - 10 \cdot \lg\left(\frac{B_{ZF}}{1Hz}\right) dB + a_{Zusatz} [dB] \quad [1]$$

Für die Berechnung der Filterdämpfung mit bekanntem Seitenbandrauschen in dBc/Hz ist die ZF-Bandbreite nicht erforderlich, wenn sowohl der Störabstand als auch der Eingangsrauschpegel des Empfängers auf 1Hz Bandbreite bezogen sind. Es besteht dann folgender Zusammenhang:

$$a_{i_TX-Filter} [dB] \geq L_{TX} [dBm] + 174dBm/Hz + a_{Stör} [dBc/Hz] + a_{Zusatz} [dB] \quad [2]$$

Beispiel: das Seitenbandrauschen des Senders beträgt -150dBc/Hz, die Sendeleistung 10W, also +40dBm: Die erforderliche Filterdämpfung beträgt dann +40dBm - (-174dBm/Hz) + (-150dBc/Hz) + 10dB = 74dB. Bei der Relaisablage sollte die Unterdrückung also mindestens 74dB betragen.

Die so ermittelte erforderliche Isolation zwischen Senderausgang und Empfängereingang kann bei getrennter Sende- und Empfangsantenne zum Teil auch durch die Antennenisolation erreicht werden. Für den Differenzbetrag ist dann noch ein zusätzliches Sendefilter erforderlich. Bei Nutzung einer gemeinsamen Sende- und Empfangsantenne kann die erforderliche Isolation bzw. Dämpfung durch eine geeignete Duplex-Weiche alleine erreicht werden, wie später noch beschrieben wird.

1.2 Desensibilisierung des Empfängers

Die Aufgabe eines Empfängers besteht darin, aus dem vorhandenen Frequenzspektrum genau den gewünschten meist wenige kHz breiten Frequenzbereich herauszufiltern und alle anderen Signale zu unterdrücken. Das hört sich einfach an. Jedoch liegt der Unterschied zwischen dem kleinsten Empfangspegel von ca. $0.15\mu\text{V}$ und der Sendeleistung von z.B. 10W bei ganzen 164dB. Das entspricht einem Faktor von 25.000.000.000.000 (25 Billionen) zwischen Sende- und Empfangsleistung in einem relativ geringen Frequenzabstand (Relaisablage). Selbst ein sehr guter Empfänger ist damit in erheblichen Maße überfordert. Die Dynamik üblicher Empfänger liegt im Bereich von etwas über 100dB. Aufgrund der begrenzten Dynamik eines Empfängers funktioniert das "Herausfiltern" nur bis zu bestimmten Summenpegeln am Empfängereingang zufriedenstellend.

Werden die Signale neben der Empfangsfrequenz zu dominant, können insbesondere zwei Effekte die Empfindlichkeit des Empfängers beeinträchtigen: Blocking und reziprokes Mischen. Beim Blocking ("Zustopfen") wird der Empfänger durch benachbarte Signale stark übersteuert, d.h. einige Verstärkerstufen werden in der Kompression betrieben. Ein Rückgang der Verstärkung für alle Signale, also auch der des Nutzsignals, ist die Folge. Das Ergebnis ist Empfindlichkeitsverlust bzw. eine erhöhte Rauschzahl. Beim reziproken Mischen werden durch die starken Störsignale die Rauschseitenbänder des Empfänger-oszillators auf die ZF gemischt. Das Ergebnis ist auch eine erhöhte Rauschzahl.

Beide Effekte lassen sich schwer trennen, wenn nicht der ZF-Pegel des Empfängers z.B. über das S-Meter erfasst wird. Das spielt letztlich auch keine entscheidende Rolle, denn sowohl die Ursache als auch das Ergebnis sind in beiden Fällen gleich: Empfindlichkeitsverlust des Empfängers durch Signale, die außerhalb der Empfangsfrequenz liegen. In beiden Fällen spricht man von Desensibilisierung des Empfängers.

Bei einer Relaisstation ist der Hauptverursacher für diese Desensibilisierung in der Regel der eigene Sender. Gemeint ist hier nicht das Seitenbandrauschen, sondern das Trägersignal selbst. Aber auch die Sender benachbarter Stationen können diesen Effekt hervorrufen, wenn die Antennenisolation zu gering ist. Die wirkungsvollste Methode, das eigene Sendesignal zu unterdrücken, ist ein Filter vor den Empfängereingang zu schalten, mit dem die Sendefrequenz im erforderlichen Maß unterdrückt wird.

Auch hier würde ein schmalbandiges auf die Sendefrequenz abgestimmtes Notchfilter im Prinzip ausreichen. Um den Empfänger zusätzlich gegenüber anderen benachbarten Signalen zu immunisieren, ist es zweckmäßig, mit einem Bandpassfilter nur den erforderlichen Frequenzbereich zum Empfänger durchzulassen. Es ist auch hier der richtige Kompromiss zwischen Selektion und Durchgangsdämpfung zu finden. Schließlich wird die Rauschzahl des Empfängers um den Wert der Durchgangsdämpfung erhöht. Falls ein Vorverstärker erforderlich ist, sollte dieser zur Vermeidung von Intermodulationseffekten nach dem Filter, also zwischen Empfänger und Filter liegen.

Zur Ermittlung der erforderlichen Filterdämpfung ist es erforderlich, den Eingangspegel $L_{\text{RX_Desens}}$ des Empfängers zu kennen, ab dem eine Desensibilisierung stattfindet, insbesondere bei Signalen im Abstand der Relaisablage.

Es besteht dann folgender Zusammenhang:

$$a_{i_RX-Filter} [dB] \geq L_{TX} [dBm] - L_{RX_Desens} [dBm] + a_{Zusatz} [dB] \quad [3]$$

Die Zusatzdämpfung a_{Zusatz} wird nur benötigt, wenn ein normgerecht gemessener Wert der Desensibilisierung aus einem Datenblatt übernommen wird. Da dieser Wert typisch bei höheren Eingangspegeln mit bereits gutem Signal-Rauschabstand bestimmt wird, kann bei einem auf Empfindlichkeit getrimmten Empfänger bereits bei den angegebenen Werten ein Empfindlichkeitsverlust auftreten. Eine Dämpfungsreserve von einigen dB wirkt dem Effekt dann entgegen. Bei dem später beschriebenen Messverfahren braucht prinzipiell zwar keine Zusatzdämpfung berücksichtigt zu werden. Aus Gründen der Reserve und da die Isolation bei Duplex-Weichen auch von der Antennenanpassung abhängig ist, empfiehlt es sich dennoch, einen ca. 5dB...10dB höheren Wert anzustreben.

Beispiel: die Empfänger-Desensibilisierung wird mit nachfolgender Messung zu -17dBm ermittelt, der Sender liefert 10W, also +40dBm. Die erforderliche Filterdämpfung beträgt dann +40dBm - (-17dBm) = 57dB. Bei der Sendefrequenz sollte die Unterdrückung also mindestens 57dB betragen. Ein sinnvoller Dämpfungswert mit Reserve wäre dann ca. 65dB.

1.3 Intermodulation am Sender

Intermodulation tritt auf, wenn zwei oder mehrere gleichzeitig anliegende Signale an einer nichtlinearen Kennlinie verzerrt werden. Die Folge sind Signale mit neuen Frequenzen, die aus den Summen und Differenzen der anliegenden Signale sowie deren Vielfachen entstehen. Diese werden als Intermodulationsprodukte (IM-Produkte) bezeichnet.

$$f_{IM} = m \cdot f_1 \pm n \cdot f_2 \pm p \cdot f_3 \pm \dots \quad [4]$$

mit $m, n, p, \dots$: ganzzahlige Multiplikatoren

Intermodulation an einer Senderendstufe entsteht typisch durch amplitudenmodulierte Signale oder Mehrträgersignale. Wir gehen bei Relaisstationen im Allgemeinen jedoch von einem einzelnen FM-Signal, also einem Einträgersignal mit konstanter Hüllkurve aus, bei dem zunächst keine Intermodulation entstehen kann. Dennoch besteht die Gefahr von Intermodulation an der Senderendstufe. Gelangt ein Signal z.B. von einem benachbarten Sender über die Antenne zur Endstufe, kann es sich dort mit dem Sendesignal des Relais mischen. Die entstandenen Frequenzprodukte werden dann zusammen mit dem gewünschten Sendesignal von der Antenne abgestrahlt. Treffen die entstandenen Frequenzprodukte auf die Empfangsfrequenz der eigenen oder einer benachbarten Empfangseinrichtung, kann diese erheblich gestört werden.

Diese Rückwärtsintermodulation oder auch "Backdoor-Intermodulation" kann durch ein schmales Sendefilter verhindert werden, welches das unerwünschte Signal durch entsprechende Unterdrückung daran hindert, zur Endstufe zu gelangen. Schwierig wird dies insbesondere bei sehr dicht neben der Sendefrequenz liegenden Signalen mit wenigen 100kHz Abstand. Ein derart schmalbandiges Sendefilter lässt sich dann kaum noch dämpfungsarm realisieren.

In diesem Fall hilft ein Zirkulator bzw. ein Isolator, der von der Antenne zur Senderendstufe fließende Signale in einen Absorberwiderstand leitet. Bei einem Isolator ist der Absorberwiderstand bereits fest eingebaut und daher meist nur für eine geringe Leistung ausgelegt. Ein praktischer Nebeneffekt eines Zirkulators ist, dass auch reflektierte Signale, z.B. durch eine stark fehlangepasste Antenne, in den Absorberwiderstand geleitet werden. Die Senderendstufe "sieht" also immer gute Anpassung, auch wenn die Antenne mal vereist ist.

Die Isolation eines Zirkulators liegt je nach Bauform in der Größenordnung von 20dB bis 30dB. Sollte dies nicht ausreichend sein, gibt es auch Doppelzirkulatoren mit entsprechend doppelter Dämpfung. Es sollte nicht verschwiegen werden, dass auch ein Zirkulator eine Durchgangsdämpfung in Vorwärtsrichtung aufweist, die im Bereich von ca. 0.2dB bis 1dB liegen kann.

Beispiel: An einem exponierten Standort arbeiten sowohl ein Sprechfunk-Relais auf 439.075MHz (TX1), als auch eine EchoLink-Station auf der Frequenz 439.325MHz (TX2). Die Antennen beider Stationen sind nur wenige Meter voneinander entfernt. Durch den sehr geringen Frequenzabstand von gerade mal 250kHz erfolgt keine Selektion durch die Duplex-Weiche. Ein Teil der Sendeleistung gelangt, um die Antennenisolation gemindert, zum Sender der jeweils anderen Station. Sobald beide Sender gleichzeitig in Betrieb gehen, entstehen Intermodulationsprodukte 3. Ordnung um 250kHz versetzt zu den beiden Sendefrequenzen, also bei 438.825MHz und bei 439.575MHz. Weiterhin entstehen Intermodulationsprodukte 5. Ordnung um 500kHz versetzt zu den Sendefrequenzen, also bei 438.575MHz und bei 439.825MHz. Wer im Umkreis zu diesem Standort z.B. eines der beiden entfernten Relais bei 438.575MHz oder 438.825MHz arbeiten will, kann mit erheblichen Empfangsstörungen rechnen, sofern keine geeignete Maßnahme durch den Einbau von Zirkulatoren nach den beiden Sendern getroffen wurde.

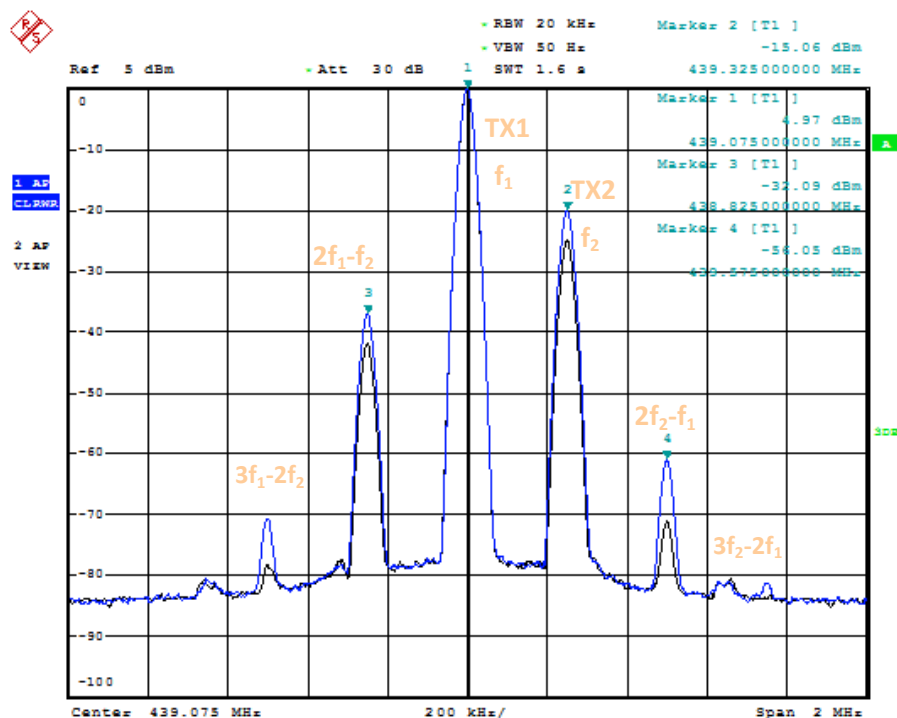


Bild 2: "Backdoor - Intermodulation" am Sender

Ein Vorteil bei Intermodulationsprodukten höherer Ordnung liegt darin, dass eine kleine Abschwächung des Signals bereits einen starken Rückgang des Störproduktes bedeuten kann. Intermodulationsprodukte dritter Ordnung haben z.B. eine Steilheit von 3dB pro dB, wenn beide Signale im gleichen Maß verändert werden. Bei einer Reduzierung der Signale um 1dB verringert sich ein Störprodukt dritter Ordnung um ganze 3dB. Das bedeutet eine Verringerung des Intermodulationsabstandes um 2dB, wenn die Signale nur um 1dB abgesenkt werden.

Im Fall der Rückwärtsintermodulation ergibt sich eine etwas andere Situation. Die Amplitude des Sendesignals (f_1) kann als konstant angenommen werden. In Abhängigkeit der Antennenisolation und der Filterdämpfung gelangt das störende Signal (f_2) gedämpft zur Endstufe. Als kritisch erweist sich dabei das Intermodulationsprodukt $2f_1-f_2$, das auf der anderen Seite des Sendesignals als stärkstes Intermodulationsprodukt auftritt, siehe Bild 2. Da nur das Störsignal durch Filter bzw. einen Zirkulator in der Amplitude beeinflusst werden kann, ergibt sich bei diesem Intermodulationsprodukt eine Steilheit von 1dB pro dB. Es verringert sich also linear mit dem Störsignal. Im Gegensatz dazu weist das Intermodulationsprodukt 3. Ordnung $2f_2-f_1$ neben der Störfrequenz (f_2) die Steilheit von 2dB pro dB auf. Es ist jedoch von vorneherein niedriger als das erstgenannte. In Bild 2 wird dieser Zusammenhang verdeutlicht, in dem zwei Kurven überlagert dargestellt sind. Der Abstand des Störsignals zum Sendesignal beträgt dabei 20dB (blaue Kurve) und 25dB (schwarze Kurve). Aus dem Abstand beider Kurven ist die Steilheit der Intermodulationsprodukte ersichtlich. Es ist das Spektrum dargestellt, wie es am Senderausgang des Senders TX1 mit der Frequenz f_1 anliegt.

Alle möglichen Störprodukte können durch die Formel [4] ermittelt werden. Bei vielen Sendefrequenzen kann das jedoch mitunter zu einem sehr zeitaufwändigen Unterfangen werden. Hierzu gibt es verschiedene Programme oder Kalkulationstabellen, die einem Erleichterung verschaffen.

1.4 Intermodulation am Empfänger

Intermodulation kann auch unmittelbar am Empfänger auftreten. Treffen mehrere starke Eingangssignale auf die nichtlinearen Komponenten des Empfängers können Frequenzprodukte entstehen, die genau auf der Empfangsfrequenz liegen und den eigenen Empfang stören. Hier hilft nur, die Signale, die für die Intermodulation verantwortlich sind, mittels Filter zu unterdrücken, also erst gar nicht bis zum Empfängereingang durchzulassen.

Besser man verzichtet mit einer guten Vorselektion auf ein paar zehntel dB Rauschzahl zu Gunsten einer guten Großsignalfestigkeit. Der Empfänger sollte schließlich nur für das Nutzsignal empfänglich, aber nicht störempfindlich sein.

1.5 Passive Intermodulation

Nicht nur an den nichtlinearen Kennlinien in den aktiven Schaltungsteilen von Sender und Empfänger entstehen Intermodulationsprodukte. Auch passive Teile oder Materialien, bei denen man es eher nicht vermuten würde, können eine nichtlineare Kennlinie aufweisen. Übergänge von schlecht angezogenen oder korrodierten HF-Steckern gehören genauso

dazu wie z.B. Materialien mit ferromagnetischen Eigenschaften, zu denen auch Nickel oder rostfreier Stahl gehört. Wenn Übergänge zu diesen Materialien von einem HF-Strom durchflossen werden, kann es zu Intermodulationseffekten kommen. Man bezeichnet diese als passive Intermodulation (PIM). Sendeantennen sowie deren Zuleitung mit Steckern sind diesbezüglich besonders kritisch zu betrachten, da hier unmittelbar ein kräftiger HF-Strom fließt.

Aber auch Teile in der Umgebung der Sendeanlage können problematisch sein. Dabei muss noch nicht einmal eine elektrisch leitende Verbindung zur Sendeanlage bestehen. Ein unter dem Namen "rusty bolt effect" bekanntes Phänomen kann an Standorten mit mehreren Sendefrequenzen vorkommen. Dabei entsteht durch eine nichtlineare Kennlinie an rostigen Schraubverbindungen am Sendemast, an Metallträgern oder an korrodierten Blechverkleidungen passive Intermodulation. Elektrisch leitende Teile, die damit verbunden sind, dienen dabei quasi als Empfangs- und Sendeantennen.

An dieser Stelle versagen alle bekannten Methoden zur Filterung der Signale, da das Störprodukt durch die gewünscht abgestrahlten Sendefrequenzen unmittelbar an dem elektrischen Übergang entsteht. Ein so erzeugtes Intermodulationsprodukt lässt sich nur unterdrücken, in dem die Problemstelle selbst lokalisiert und beseitigt wird. Falls die ursächliche Schwachstelle nicht gefunden oder beseitigt werden kann, hilft nur noch eine saubere Frequenzplanung, bei der störenden Intermodulationsprodukte erst gar nicht auf die Empfangsfrequenzen fallen können. Im ungünstigsten Fall kann auch ein Standortwechsel erforderlich sein.



Bild 3: "rusty bolt effect" an angerosteten Schraubverbindungen

1.6 Isolation zwischen Sender und Empfänger

In den vorigen Kapiteln wurden die Übertragungswege über die Antenne bzw. über die Duplex-Weiche erläutert. Bei dem genannten Pegelunterschied von ca. 165dB zwischen Sender und Empfänger sind aber auch alle anderen möglichen Übertragungswege zu berücksichtigen. So sollte auf eine räumliche Trennung und eine gute Abschirmung des Sende- und Empfangsteils genauso geachtet werden, wie auf eine akribische Filterung der Versorgungs- und Steuerleitungen.

2 Aufbau der Relaisstation

Bild 4 zeigt den grundsätzlichen Aufbau einer Relaisstation bei Verwendung einer Duplex-Weiche. Abhängig von den Umgebungsbedingungen, der Sender- und Empfängereigenschaften und der Selektion der Duplex-Weiche ist der Einsatz verschiedener Optionen zweckmäßig, die im Folgenden beschrieben sind.

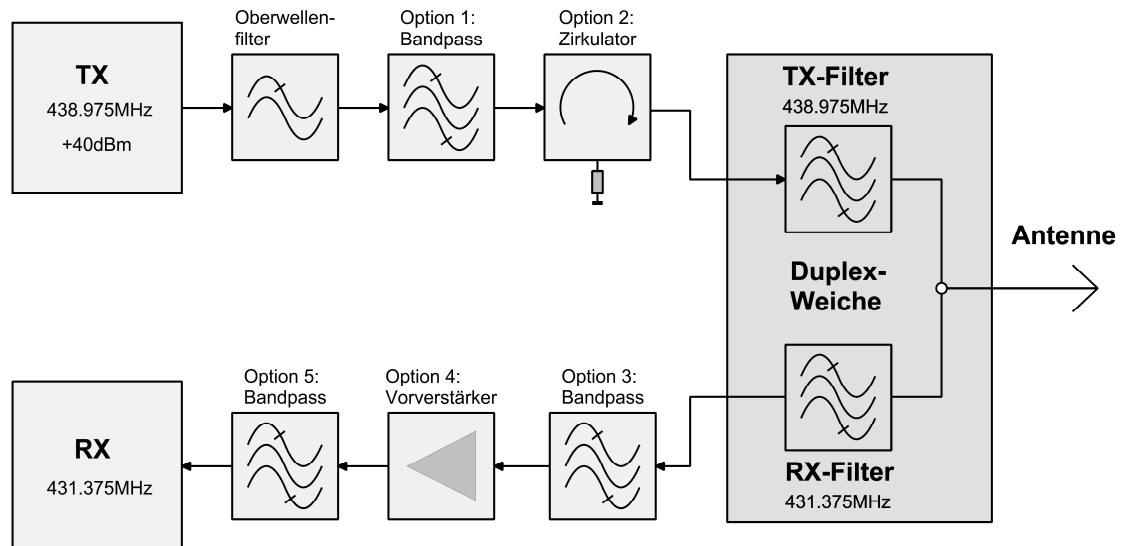


Bild 4: Aufbau einer Relaisstation mit mehreren möglichen Optionen

Option 1: zusätzliches Sendefilter

- Zur zusätzlichen Unterdrückung auf der eigenen oder einer anderen Empfangsfrequenz, falls die Rauschunterdrückung der Duplex-Weiche nicht ausreichend ist und der Empfang durch Nebenlinien oder das Seitenbandrauschen des Senders beeinträchtigt ist. Zusammen mit Option 2 (Zirkulator) ergibt sich eine gute Entkopplung zwischen Duplex-Weiche und Bandpass. Es kann auch ein Notch-Filter verwendet werden.
- Zur Vermeidung von Rückwärts-Intermodulation, wenn die Selektivität der Duplex-Weiche unzureichend ist.

Option 2: Zirkulator

- Zur Vermeidung von Rückwärts-Intermodulation, wenn weitere Sendefrequenzen im Durchlassbereich der Duplex-Weiche liegen.
- Zum Schutz der Endstufe vor Fehlanpassung (die Rücklaufleistung wird im Abschlusswiderstand absorbiert).

Option 3: zusätzliches Empfangsfilter

- Zur zusätzlichen Unterdrückung auf der Sendefrequenz, falls die Dämpfung der Duplex-Weiche nicht ausreichend ist und der Empfang aufgrund von Blocking oder reziprokem Mischen durch das Sendesignal beeinträchtigt ist.
- Zur Vermeidung von Empfänger-Intermodulation, wenn die Selektivität der Duplex-Weiche unzureichend ist.

Option 4: Vorverstärker

- Wenn der Empfängereingang eine unzureichende Empfindlichkeit aufweist. Die Verstärkung sollte so moderat wie möglich gehalten werden, da ansonsten die Großsignaleigenschaften leiden. Der Vorverstärker kann in diesem Fall nicht wie gewohnt eingesetzt werden, um die Kabeldämpfung zur Antenne zu kompensieren. In diesem Fall müsste er unmittelbar an der Antenne angebracht werden, was aber durch das Schaltungsprinzip ausgeschlossen ist.
- Zu beachten ist dabei, dass sich die Desensibilisierung des Empfangssystems verschlechtert.
- Bei zusätzlicher Option 3 (zusätzliches Empfangsfilter) sollte der Vorverstärker aus Gründen der Großsignalfestigkeit, wie dargestellt, zwischen Empfänger und Empfangsfilter positioniert sein.

Option 5: Bandpassfilter zwischen Vorverstärker und Empfänger

- Aus den gleichen Gründen wie bei Option 3, wenn die Entkopplung zwischen Duplex-Weiche und zusätzlichem Bandpassfilter unzureichend ist.
- Es ist auch hilfreich gegen Störsignale wie z.B. das Rauschen des Vorverstärkers auf der Spiegelfrequenz des Empfängers.
- Der Vorverstärker sollte dann entsprechend großsignalfest ausgeführt sein, um nicht selbst zur Schwachstelle zu werden.

3 Messung der Sender- und Empfängereigenschaften

3.1 Messung des Seitenbandrauschens des Senders

Bei dieser anspruchsvollen Messung soll die geringe Rauschleistung ermittelt werden, die ein Sender im Abstand der Relaisablage erzeugt. Ohne geeigneten Messaufbau stellt das eine hohe Anforderung an ein Messgerät dar. Denn es muss in der Lage sein, auch gleichzeitig mit dem wesentlich höheren Sendepiegel zurechtzukommen, der als Bezugswert dient. Hier zeigt sich schnell, dass bei diesen extremen Dynamikanforderungen selbst die "High-End" Spektrum-Analysatoren an ihre Grenzen kommen. Bei ca. -170dBc/Hz bis -180dBc/Hz ist auch bei diesen Geräten die Grenze des Möglichen erreicht. Das sollte zwar für die Messung der meisten Sender ausreichen, da diese meist geringere Werte aufweisen. In den seltensten Fällen dürfte jedoch solch ein hochwertiger Analysator zur Verfügung stehen. Geschickter ist es, für diese Messung eine Duplex-Weiche oder ein Notch-Filter zu

verwenden, um das Sendesignal auf der Sendefrequenz bei der Messung am Analysator weitgehend zu unterdrücken. Die Einfügedämpfung auf der Messfrequenz (z.B. -7.6MHz) sollte bekannt sein und ist bei der Messung zu berücksichtigen.

Bei einer Unterdrückung im Bereich von ca. 80dB ist dann nur noch die Empfindlichkeit, jedoch nicht mehr die Dynamik eine Anforderung an das Messgerät. Selbst einfachere Messempfänger können dann verwendet werden. Einige Analysatoren haben eine Marker-Funktion, mit der unmittelbar der absolute Rauschpegel in dBm/Hz gemessen werden kann. Andernfalls muss der gemessene Wert mit der 6dB-Bandbreite bzw. der Rauschbandbreite des Auflösefilters (RES_BW) in den auf 1Hz bezogenen Rauschpegel [dBm/Hz] umgerechnet werden:

$$L_{RX}[\text{dBm/Hz}] = L_{RX}[\text{dBm}] - 10 \cdot \lg\left(\frac{RES_BW}{1\text{Hz}}\right) \text{dB} \quad [5]$$

Je nach Analysator ist wegen der Filterfunktion und der Charakteristik des Detektors noch ein Korrekturfaktor erforderlich, um aus dem Anzeigewert den genauen Rauschpegel zu erhalten. Dieser ist aus dem Handbuch des Analysators zu entnehmen. Der Unterschied liegt jedoch in der Größenordnung von 1..2dB, so dass für diese Messung auch ohne Korrektur ein ausreichend genaues Messergebnis vorhanden sein sollte.

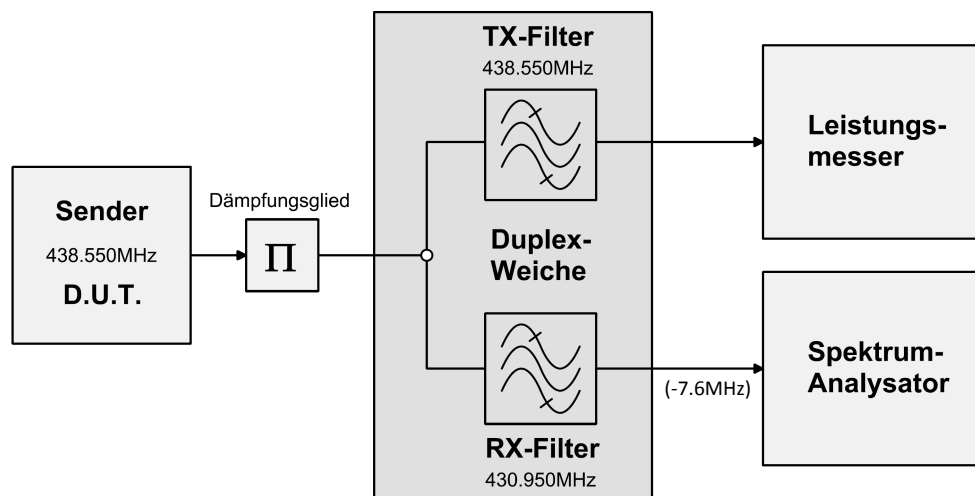


Bild 5: Anordnung zur Messung des Seitenbandrauschens des Senders

Bild 5 zeigt die Anordnung zur Messung des Seitenbandrauschens des Senders mit beispielhaften Frequenzangaben. Dem Testobjekt (Sender) ist noch ein Leistungsdämpfungsglied nachgeschaltet, um den Spektrumanalysator bei versehentlich falsch eingestellter Sendefrequenz vor Zerstörung zu bewahren. Dieses sollte einerseits so viel Dämpfung aufweisen, dass die verbleibende Leistung für das Messgerät noch unschädlich ist. Zugleich sollte sich das Rauschen des Senders etwa 10dB oder mehr vom Eigenrauschen des Analysators hervorheben, um den Messfehler gering zu halten.

Am Ausgang des TX-Filters wird die TX-Leistung als Bezugswert gemessen. Wenn das RX- und das TX-Filter etwa die gleiche Dämpfung auf der Durchlassfrequenz aufweisen, kann

der Rauschabstand L_c unmittelbar aus dem Verhältnis zwischen dem Seitenbandrauschen L_{RX} und dem gemessenen Trägerpegel L_{TX} nach der Duplex-Weiche gebildet werden:

$$L_c[\text{dBc/Hz}] = L_{RX}[\text{dBm/Hz}] - L_{TX}[\text{dBm}] \quad [6]$$

Sollte der Messwert nur geringfügig höher liegen als das Grundrauschen des Analysators, ist eine Korrektur erforderlich, siehe Tabelle 1. Durch die Summe der zu messenden Rauschleistung und der Rauschleistung des Analysators ergibt sich ein zu hoher Anzeigewert, der Korrekturwert wird also vom Messwert abgezogen.

Rauschanzeige in dB über dem Eigenrauschen	Korrektur in dB
1	6.87
2	4.32
3	3.02
4	2.20
5	1.65
6	1.26
7	0.97
8	0.75
9	0.58
10	0.46

Tabelle 1: Korrektur für den Rauschabstand bei geringen Messpegeln

Bild 6 zeigt als Beispiel die Messung des Betriebsfunkgeräts MC micro von Motorola. Der breite Rauschsockel, der die Selektionskurve des RX-Filters wiedergibt, ist deutlich sichtbar. Dieser hebt sich um ca. 23dB sehr stark vom Grundrauschen des Analysators (ca. -110dBm) ab. Das ist eine gute Voraussetzung, um den Messfehler gering zu halten.

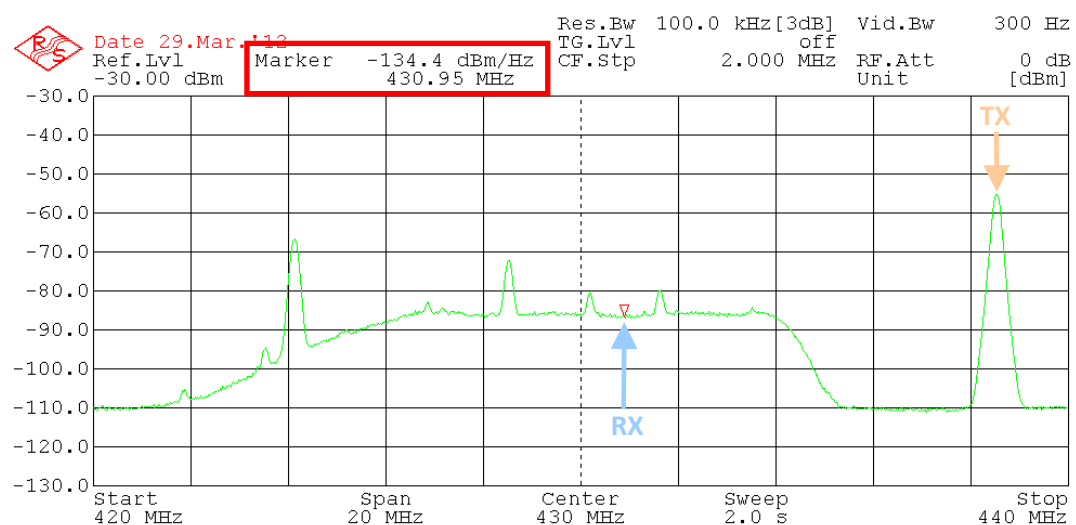


Bild 6: Seitenbandrauschen des Motorola MC-Micro bezogen auf 1.75W Sendeleistung

Rechts bei 438.55MHz ist noch der Restträger des Sendesignals, trotz der hohen Unterdrückung von fast 90dB, deutlich erkennbar. Gut sichtbar sind auch einige Nebenlinien des

Sendesignals. Diese sollten, wenn möglich, nicht direkt auf der Empfangsfrequenz liegen. Der Marker bei -7.6 MHz Relaisablage zeigt den absoluten Pegel des Seitenbandrauschens (-134.4dBm) an. Als Bezugswert wird die Sendeleistung nach der Weiche mit 1.75W, entsprechend +32.4dBm ermittelt. Das Seitenbandrauschen beträgt dann nach Formel [6]: $-134.4\text{dBm/Hz} - 32.4\text{dBm} = -166.8\text{dBc/Hz}$. Eine Korrektur des Messwertes nach Tabelle 1 ist nicht erforderlich, da der Signal-Rauschabstand ausreichend groß ist.

In Tabelle 2 sind einige gemessene Rauschabstände von Sendern im 70cm-Bereich aufgeführt. Die Tabelle soll ein Gefühl vermitteln, welche Seitenbandrauschwerte in der Praxis typisch vorkommen.

Sender	TX Frequenz	Ablage (Seitenbandrauschen)	Seitenbandrauschen
FT470 Handfunkgerät	438.550MHz	-7.6MHz	-160dBc/Hz
Motorola MC micro Betriebsfunkgerät (70cm Umbau)	438.550MHz	-7.6MHz	-167dBc/Hz
Yaesu FT-7200	438.55MHz	-7.6MHz	-158dBc/Hz
Einfacher Messsender	438.550MHz	-7.6MHz	-152dBc/Hz
Einfacher Messsender mit breitbandiger 100W-Endstufe	438.550MHz	-7.6MHz	-134dBc/Hz

Tabelle 2: Seitenbandrauschen verschiedener Sender

Aus diesen Messwerten lässt sich nach Formel [2] schließen, dass eine Unterdrückung des Seitenbandrauschens bei 10W Sendeleistung von ca. 55dB bis 90dB erforderlich ist, um die Empfindlichkeit des Empfängers nicht zu beeinträchtigen.

3.2 Messung der Desensibilisierung von Empfängern

Bei der Messung der Desensibilisierung eines Empfängers wird mittels eines Störsignals der Pegel ermittelt, ab dem ein sehr schwaches Empfangssignal vom Störsignal beeinträchtigt wird. Das Störsignal entspricht im Fall einer Relaisstation dem Sendesignal.

Ein Bandpassfilter soll bei der Messung verhindern, dass das Seitenbandrauschen der Störsignalquelle die Empfangsfrequenz selbst verrauscht und dadurch Empfindlichkeitsverlust vortäuscht. Das ist dann der Fall, wenn das Seitenbandrauschen der Störsignalquelle im Bereich des Seitenbandrauschens des Empfängeroszillators oder darüber liegt. Dann wird der Effekt des reziproken Mischens durch das Seitenbandrauschen des Störsignals überdeckt, was zu falschen Messergebnissen führt. Da das Störsignal und das Empfangssignal vor dem Empfängereingang zusammengeführt werden muss, eignet sich auch bei dieser Messung eine Duplex-Weiche vorzüglich.

Es soll nun die Höhe des Pegels ermittelt werden, ab der ein um die Relaisablage versetzter Störpegel zu einem Empfindlichkeitsverlust führt. Bild 7 zeigt die Anordnung zur Messung der Empfänger-Desensibilisierung mit beispielhaften Frequenzangaben. Statt der Duplex-

Weiche kann auch ein Bandpassfilter mit ausreichender Unterdrückung für das Seitenbandrauschen des Messsenders 1 verwendet werden. Allerdings wird dann noch ein zusätzlicher Leistungsaddierer (Combiner) benötigt, der beide Signale zusammenführt.

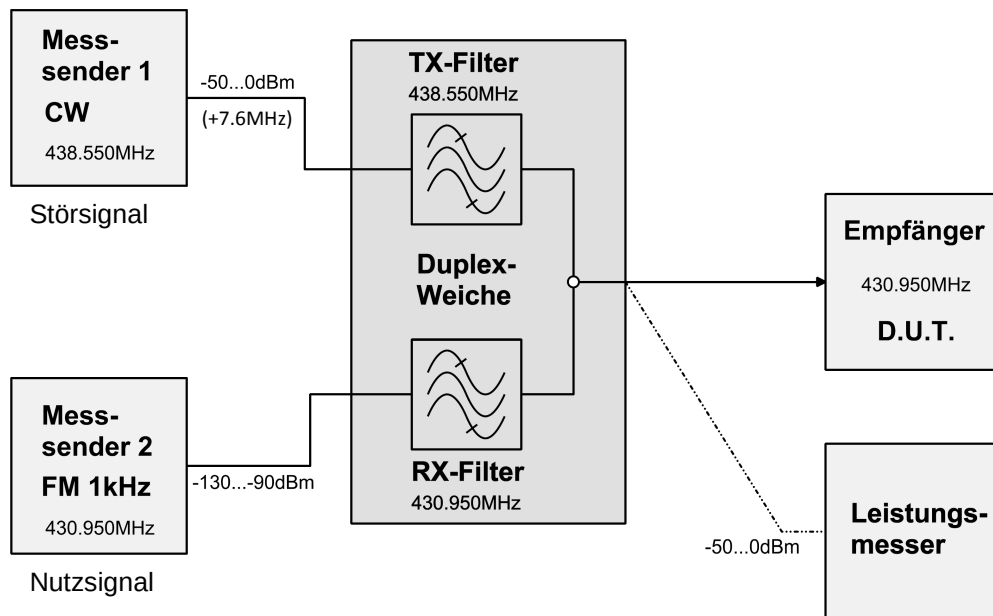


Bild 7: Anordnung zur Messung der RX-Desensibilisierung

Bei der Messung wird ein Signal, das mit einem 1kHz-Ton FM-moduliert ist (Messsender 2), mit einem geringen Pegel auf der Empfangsfrequenz so eingestellt, dass der 1kHz-Ton vom Empfänger gerade noch aus dem Rauschen heraus wahrgenommen werden kann. Als nächstes wird das Störsignal (Messsender 1) mit einem zunächst geringen Pegel zugeschaltet. Der Pegel wird dann schrittweise solange erhöht, bis der 1kHz-Ton gerade merklich schlechter hörbar wird. Durch Zu- und Abschalten des Messsenders 1 kann der Unterschied leichter wahrgenommen und so der Pegel genauer bestimmt werden.

Der am Empfängereingang anliegende Pegel L_{RX_Desens} kann nun mit einem empfindlichen Leistungsmesser ermittelt werden. Dazu wird einfach die Zuleitung vom Empfänger abgesteckt und mit dem Leistungsmesser verbunden. Der Anteil des Empfangspegels kann dabei vernachlässigt werden, da dieser um Größenordnungen geringer ist.

Der ermittelte Pegel ist der Wert, der bei der Duplex-Weiche maximal vom Sender zum Empfängereingang gelangen darf (TX-RX-Isolation), ohne die Empfindlichkeit des Empfängers durch das eigene Sendesignal zu verringern. Für diese Unterdrückung ist der Frequenzgang des Empfangsfilters bestimmend. In der Praxis schadet es nicht, noch einmal 5..10dB Dämpfung als Sicherheit hinzuzufügen, da die Filter gewissen Temperaturschwankungen und Alterungserscheinungen ausgesetzt sind. Auch ist die Isolation etwas abhängig von der Antennenanpassung.

Bei einer Sendeleistung von 10W (+40dBm) und einem ermittelten Blocking-Pegel von -27dBm bedeutet das nach Formel [3] eine erforderliche Unterdrückung des Sendesignals am Empfängereingang von 67dB zuzüglich Reserve. Mit Reserve sollte die Duplex-Weiche in

diesem Beispiel also eine Isolation von ca. 75dB zwischen Sendereingang und Empfänger-ausgang aufweisen. Das entspricht der Dämpfung des RX-Filters auf der Sendefrequenz.

Diese Messung entspricht zwar keiner Norm, führt aber zu genau dem gewünschten Ergebnis: ab welchem Pegel ein gerade noch wahrnehmbarer Empfindlichkeitsverlust stattfindet. Schließlich wollen wir Funkamateure ja bekanntlich das Gras wachsen hören und nicht erst bei sicheren Signal-Rauschabständen Funkbetrieb durchführen. In der professionellen Technik wird die Blocking-Messung bei deutlich höheren Eingangspegeln (2µV) durchgeführt.

Um ein Gefühl für realistische Werte zu bekommen, wurde exemplarisch die Messung an sehr unterschiedlichen Empfängern im 70cm-Band durchgeführt, siehe Tabelle 3. Das Handfunkgerät FT470 wurde herangezogen, um das Spektrum möglicher Werte nach unten hin abzugrenzen. Für die Verwendung als Relaisempfänger ist auch ein hochwertiges Handfunkgerät sicherlich nicht die erste Wahl.

Empfänger	RX Frequenz	Ablage (Störfrequenz)	RX-Pegel	Desensibilisierungs-Pegel
Yaesu FT470 Handfunkgerät	430.950MHz	7.6MHz	-127dBm (0.1µV)	-32dBm
Motorola MC micro Betriebsfunkgerät (70cm Umbau)	430.950MHz	7.6MHz	-106dBm* (1.1µV)	-3dBm
Alinco DR-620	431.375MHz	7.6MHz	-128dBm (0.09µV)	-32.3dBm
Alinco DR-620	431.375MHz	7.6MHz	-101dBm (2µV)	-26.3dBm
Yaesu FT-7200	431.375MHz	7.6MHz	-125dBm (0.13µV)	-20.2dBm
Yaesu FT-7200	431.375MHz	7.6MHz	-101dBm (2µV)	-19.2dBm
Messempfänger	430.950MHz	7.6MHz	-122dBm (0.18µV)	-21.5dBm

* erforderlich wegen fest eingestellter Rauschsperr

Tabelle 3: Desensibilisierung verschiedener Empfänger

Aus diesen Messwerten lässt sich nach Formel [3] schließen, dass eine Unterdrückung des Sendesignals am Empfängereingang von ca. 40dB bis 75dB erforderlich ist, um Desensibilisierungs-Effekte zu unterbinden. Aus dem Vergleich mit den Messwerten beim Seitenbandrauschen ergibt sich beim Empfangsfilter eine um typisch 15dB geringere Dämpfungsforderung als beim Sendefilter. Individuell betrachtet kann sich aber auch eine umgekehrte Situation ergeben.

3.3 Prüfung des Relais auf Störbeeinflussung

Vor dem Einsatz am späteren Standort ist es sinnvoll, eine Störbeeinflussung vom Sender auf den Empfänger beim vollständig zusammengebauten Relais zu prüfen. Falls Probleme mit der Duplex-Weiche oder der Abschirmung auftreten, gestaltet sich die Fehlersuche am Standort meist deutlich komplizierter, zumal noch weitere Störfaktoren hinzukommen.

Wenn eine zweite Duplex-Weiche zu Verfügung steht, eignet sich der Aufbau nach Bild 8 dazu. Die zusätzliche Weiche ermöglicht es, ein definiertes schwaches Empfangssignal einzuspeisen und gleichzeitig den Messsender vor der hohen Sendeleistung zu schützen. Das Relais wird bei der Prüfung ausschließlich manuell aufgetastet und mit offener Rauschsperrung betrieben. Über den Messsender wird, wie bei der Messung der RX-Desensibilisierung, ein sehr geringer, mit 1kHz FM-modulierter Pegel auf der Empfangsfrequenz eingespeist. Der Pegel wird so eingestellt, dass der 1kHz-Ton am NF-Ausgang des Empfängers gerade noch wahrgenommen werden kann.

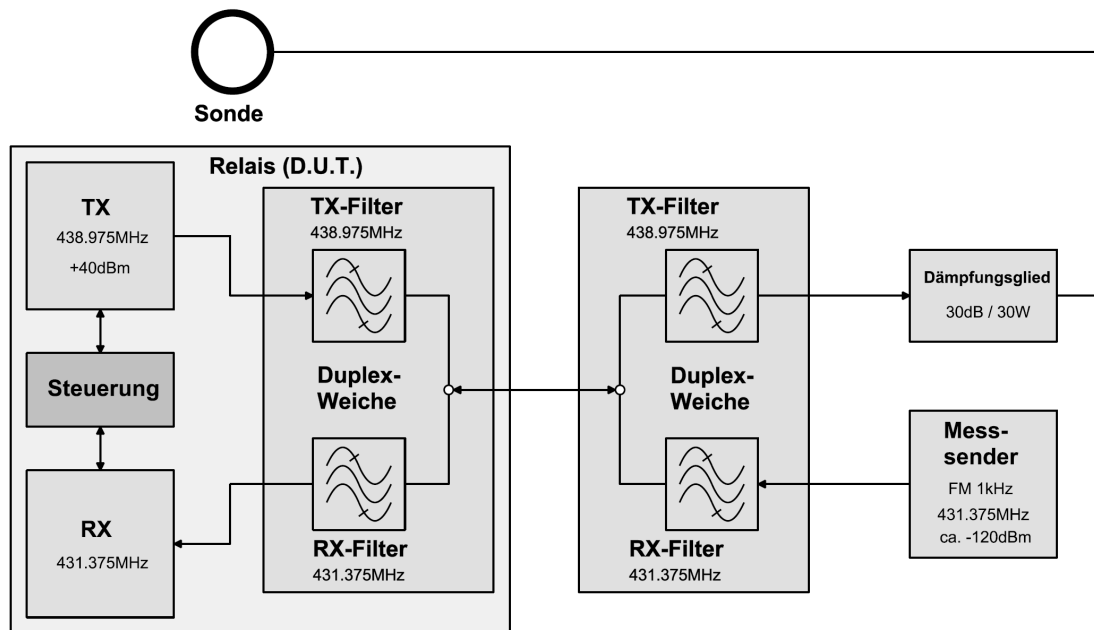


Bild 8: Anordnung zur Messung der Störbeeinflussung

Beim manuellen Auftasten des Senders sollte keine Empfangsbeeinträchtigung festgestellt werden können. Mit diesem Test kann bereits ausgeschlossen werden, dass ein unmittelbares Übersprechen vom Sender auf den Empfänger über die Weiche, aber auch über die Steuerleitungen oder durch mangelnde Abschirmung stattfindet. Durch Wackeln an Steckern und Leitungen wird dieser Test noch vertieft.

Am späteren Standort kann eine Einstrahlung durch das über die Antenne abgestrahlte Sendesignal oder durch Mantelwellen erfolgen. Mit einem weiteren Test ist es einfach möglich, die Einstrahlungsfestigkeit von außen zu simulieren. Dazu wird ein geringer Teil des Sendesignals über das Leistungsdämpfungsglied ausgekoppelt. Mittels einer kleinen HF-Sonde wird versucht, das Sendesignal in die Steuerung oder den Empfänger einzukoppeln. Auch hier sollte sich keine Beeinträchtigung des Empfangssignals (1kHz-Ton) bemerkbar machen, wenn der Sender aufgetastet ist.

4 Aufbau und Funktion einer Duplex-Weiche

Eine Duplex-Weiche ermöglicht den Betrieb einer separaten Sende- und Empfangseinheit an einer gemeinsamen Antenne, wie dies bei Relais-Stationen üblich ist. Eine sehr ver-

breitete Form dieser selektiven Aufteilung bzw. Zusammenführung beider Zweige ist die Sternpunktweiche, bei der die beiden Zuleitungen von Sender und Empfänger zur Antenne, an einem genau definierten Punkt, nach einer Selektion (Bandpassfilter) einfach parallel geschaltet werden, siehe Bild 9.

Was auf den ersten Blick wie ein HF-mäßiger Fauxpas aussieht, ist bei näherer Betrachtung eine einfache und wirkungsvolle Lösung: während bei der Empfangsfrequenz das Empfangsfilter (RX -Filter) eine Impedanz von etwa 50Ω reell aufweist, reflektiert das Sendefilter (TX-Filter) die gesamte HF-Empfangsleistung. Mit der richtigen Anschlusslänge hat das Sendefilter eine nahezu unendlich hohe Impedanz (Leerlauf), die dann problemlos im Sternpunkt parallel geschaltet werden kann. D.h. die gute Anpassung des Empfangsfilters bleibt bei der Empfangsfrequenz unbeeinflusst von der Parallelschaltung des Sendefilters. Genauso verhält es sich bei der Sendefrequenz mit der Parallelschaltung des Empfangsfilters. Es wird dann die gesamte Sendeleistung am Empfangsfilter reflektiert. Entscheidend ist, dass die beiden Zuleitungen l_1 und l_2 vom Sternpunkt zum Empfangs- und Sendefilter genau die richtige Länge aufweisen.

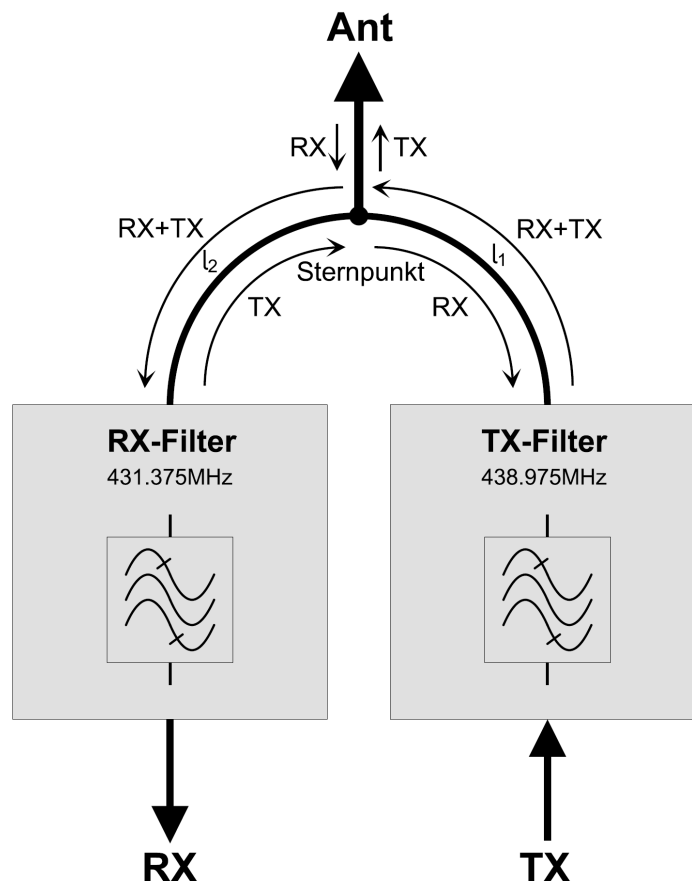


Bild 9: Prinzip einer Sternpunkt-Weiche

In der Praxis lässt sich eine Sternpunktweiche relativ einfach verwirklichen, indem zwei Bandpässe mit geeigneter Selektion über richtig dimensionierte Zuleitungen in einem Sternpunkt zusammengeführt werden. Dazu werden die beiden Filter erst mal einzeln richtig abgeglichen. Das Sendefilter sollte bei der Sendefrequenz eine möglichst gute Anpassung (= geringe Dämpfung) und gleichzeitig bei der Sendefrequenz eine bestmögliche Unterdrückung aufweisen.

Analog dazu wird das Empfangsfilter abgeglichen. Dieses soll bei der Empfangsfrequenz eine gute Anpassung und bei der Sendefrequenz eine gute Unterdrückung aufweisen.

Nach erfolgreichem Abgleich wird mit einem vektoriellen Netzwerkanalysator (VNA) die Phase des Reflexionsfaktors an der Anschlussbuchse der Filter ermittelt. Wichtig ist eine sorgsam durchgeführte S_{11} -Kalibrierung mit bekannter Referenzebene, z.B. auf N-Stecker.

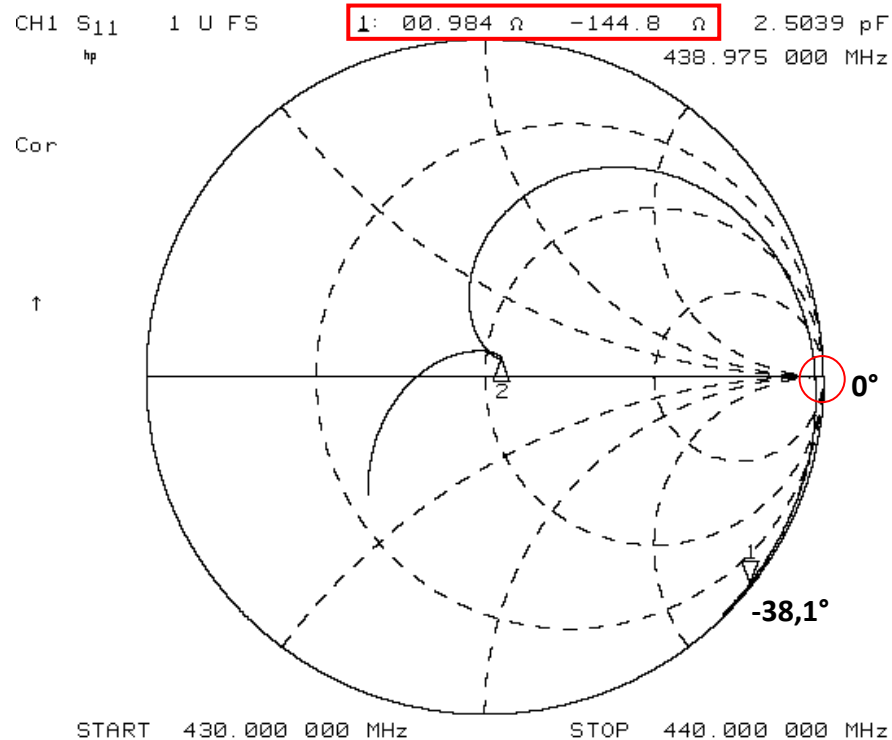


Bild 10: Impedanzverlauf des Empfangsfilters von 430MHz bis 440MHz

Bild 10 zeigt den Impedanzverlauf des Empfangsfilters im Smith-Diagramm von 430MHz bis 440MHz, wie es von einem VNA angezeigt wird. Das Filter wurde zuvor auf eine Durchlassfrequenz von 431.375 MHz abgeglichen. Auf dieser Frequenz befindet sich der Marker 2, der nahe des 50 Ω -Punktes in der Mitte des Diagramms, also bei guter Anpassung liegt. Der Marker 1 zeigt eine Impedanz von $(0.984 - j 144,8)\Omega$ auf der Sendefrequenz von 438.975MHz an. Anders ausgedrückt ist das im 50 Ω System ein Reflexionsfaktor von 0.996 mit einer Phase von $-38,1^\circ$. Die Phase kann am VNA direkt angezeigt oder aus der komplexen Impedanz ermittelt werden.

Mit einer impedanzrichtigen Zuleitung mit einem Wellenwiderstand von 50 Ω kann dieser Punkt im Smith-Diagramm solange im Uhrzeigersinn um den Mittelpunkt des Diagramms gedreht werden, bis dieser den ganz rechten Punkt bei 0° erreicht, siehe Bild 10. Das entspricht der höchst möglichen Impedanz bzw. einem Leerlauf. Eine vollständige Kreisdrehung entspricht dabei einer halben Wellenlänge.

Die benötigte Phasenlänge lässt sich jetzt einfach berechnen. Es muss nur die erforderliche Phasenverschiebung ermittelt und in eine mechanische Länge umgerechnet werden. In diesem Fall wird von $-38,1^\circ$ auf 0° bzw. auf -360° gedreht. Das entspricht einer

Phasenverschiebung von $-360^\circ - (-38.1^\circ) = -321.9^\circ$. Die elektrische Länge entspricht dann $(321.9^\circ/360^\circ) \cdot \lambda_g/2 = 0.447\lambda_g$.

Bei 438.975MHz ergibt sich daraus eine elektrische Länge von $(c/f) \cdot 0.447 = 305.3\text{mm}$ ($c = 299792458 \text{ m/s}$, $f = \text{Frequenz}$). Diese Leitungstransformation lässt sich z.B. sehr schön mit dem Programm "Smith" von Prof. Fritz Dellsperger der Universität Bern anschaulich nachvollziehen, siehe Bild 11. Hier verläuft die Transformation von TP1 nahe dem Aussenkreis mit dem Reflexionsfaktor $r = 1$ zum Leerlauf (TP2).

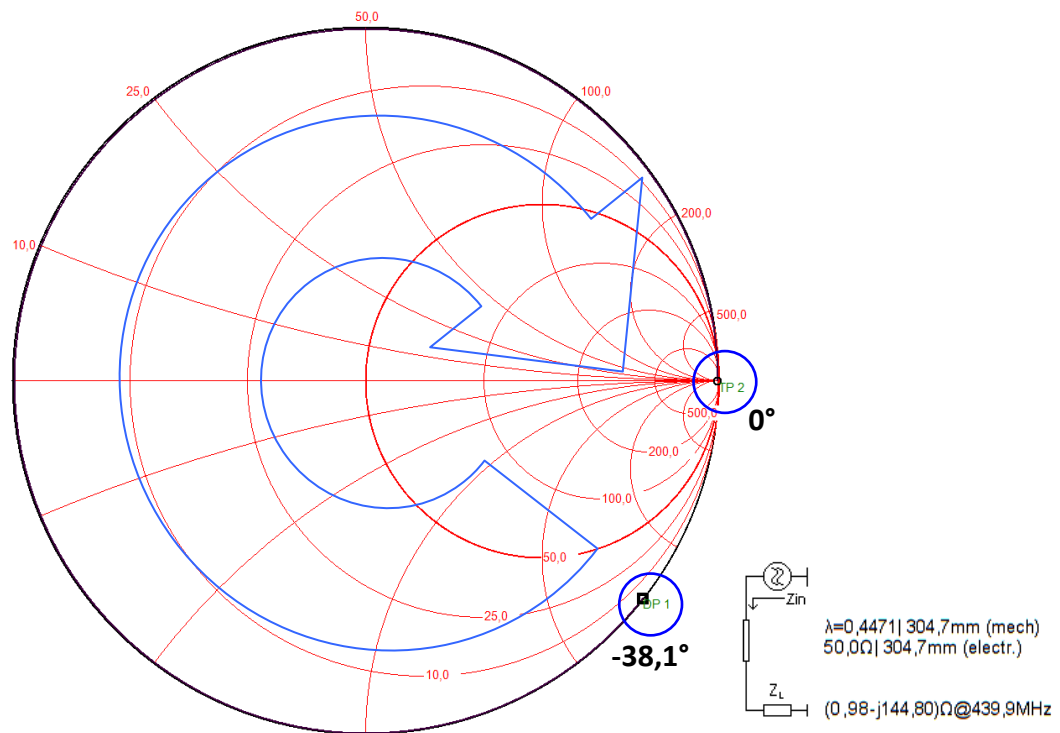


Bild 11: Leitungstransformation mit dem Programm Smith

Zur Berechnung der mechanischen Länge muss jetzt nur noch der Verkürzungsfaktor der verwendeten HF-Leitung berücksichtigt werden. Bei RG214 ist das der Faktor 0.66, mit dem die elektrische Länge multipliziert wird. Die mechanische Länge der Zuleitung vom Sternpunkt bis zur gemessenen Referenzebene am Filter beträgt in diesem Beispiel also $305.3\text{mm} \cdot 0.66 = 202\text{mm}$. Falls aus konstruktiver Sicht die Länge bis zum Sternpunkt nicht ausreichen sollte, können im Smith-Diagramm auch noch weitere ganze "Ehrenrunden" gedreht werden, also $\lambda/2$ - Längen hinzu addiert werden. Dies hat natürlich den Nachteil einer durch die Kabellänge verursachten höheren Dämpfung und einer geringeren Bandbreite.

Analog dazu verhält es sich mit der Dimensionierung der Zuleitung zum Sendefilter, weshalb hier nicht weiter darauf eingegangen wird.

Wenn sich nach der Zusammenschaltung beider Bandpässe über den Sternpunkt keine erkennbare Beeinflussung der zuvor abgeglichenen Filterverläufe ergibt, hat man gute Arbeit geleistet. Eine Überprüfung und gegebenenfalls eine geringe Korrektur des Abgleichs sollte auf jeden Fall an der fertiggestellten Duplex-Weiche durchgeführt werden.

Entsprechend breitbandige Filter lassen sich auch über einen ganzen Frequenzbereich (=Schaltbandbreite) abstimmen, der z.B. den gesamten Relais-Sende- und Empfangsfrequenzbereich vollständig abdeckt. Ein Neuabgleich bei Kanalwechsel ist dann nicht erforderlich. Die Filter benötigen jedoch einen deutlich steileren Verlauf, der sich nur durch eine höhere Ordnung, d.h. mehrere Kreise, erreichen lässt. Bei gleicher Kreisgüte erhöht sich dadurch die Durchgangsdämpfung.

Für ein Relaisprojekt im 70cm-Band wurde eine Duplex-Weiche unter Verwendung zweier baugleicher Vierkreis-Bandpässe (Bild 12) von Telefunken (Typ 430 F1/Fi) in Form einer Sternpunkt-Weiche realisiert. Die Vorgehensweise der Zusammenschaltung wird in folgendem Fallbeispiel kurz erläutert.

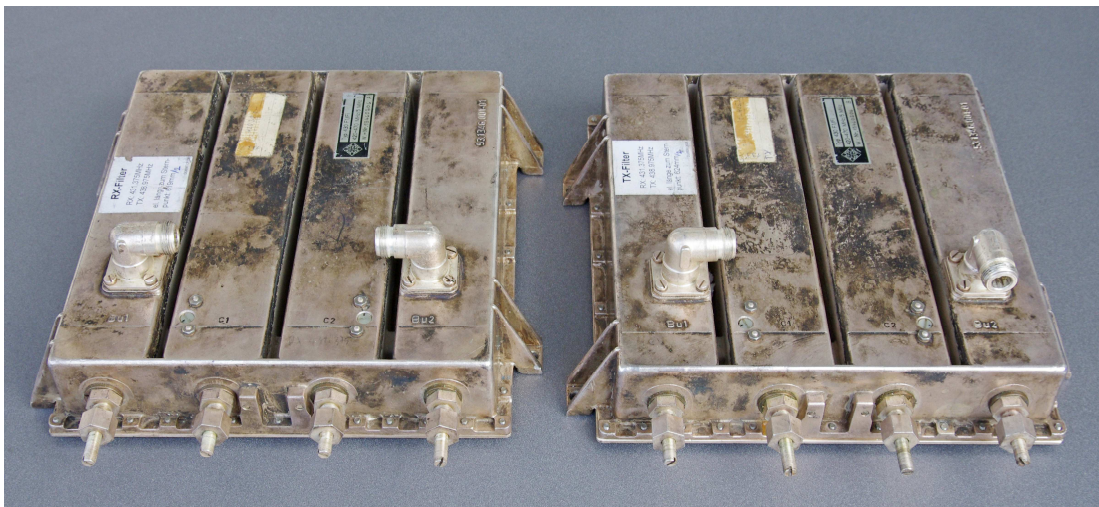


Bild 12: Vierkreis-Bandpässe von Telefunken

Auf Ebene der angebrachten N-Buchsen erfolgt zuerst die Kalibrierung des VNA. Die genaue mechanische Länge der beiden Phasenausgleichsleitungen wird ermittelt, in dem die beiden Leitungen zunächst etwas länger abgeschnitten werden, als aus den Messwerten berechnet. Auf einer Seite befindet sich bereits der N-Stecker. Es wird die genaue elektrische Länge der Leitung gemessen und die Differenz zum Sollwert ermittelt. Durch die Messung am N-Stecker der Leitung wird die gleiche Referenzebene wie am Filter herangezogen und der Messfehler dadurch sehr klein gehalten. Aus der Differenz ergibt sich die Länge, um welche der Schirm abgelängt werden muss.



Bild 13: Sternpunktschaltung mit Phasenausgleichsleitungen

Die beiden offenen Enden der Phasenausgleichsleitungen werden nun mit einer N-Buchse verlötet. Wichtig ist dabei eine gute Masseverbindungen zwischen den beiden Leitungsenden und der N-Buchse. Auch sollten die beiden Innenleiter so kurz wie möglich mit dem Innenleiter der N-Buchse verbunden werden, um Fehlanpassungen zu vermeiden. Bild 13 zeigt den Aufbau mit den beiden Phasenausgleichsleitungen und der Sternpunktschaltung.

Nach der Zusammenschaltung der beiden Filter mit den Phasenausgleichsleitungen wird die Durchlasskurve des Sende- und Empfangszweiges gemessen. Diese ist in Bild 14 dargestellt. Die Durchgangsdämpfung im Sendezweig bei 438.975 MHz beträgt knapp 0.9dB (Marker 2). Die Sperrdämpfung bei -7.6MHz, also der Relaisablage im 70cm-Bereich, weist einen Wert von knapp 90dB auf (Marker 1). Folglich wird das Rauschseitenband des Senders am Empfänger um ca. 90dB unterdrückt.

Bei 10W Sendeleistung (+40dBm) sollte das Seitenbandrauschen des Senders bei kleiner -174dBm/Hz (thermisches Rauschen) - 40dBm (Sendepiegel) + 90dB (Unterdrückung) = -124dBc/Hz liegen. Damit es zu keiner Beeinträchtigung der Empfindlichkeit kommt, sollte das Seitenbandrauschen noch 10dB geringer, d.h. bei ca. -134dBc/Hz liegen.

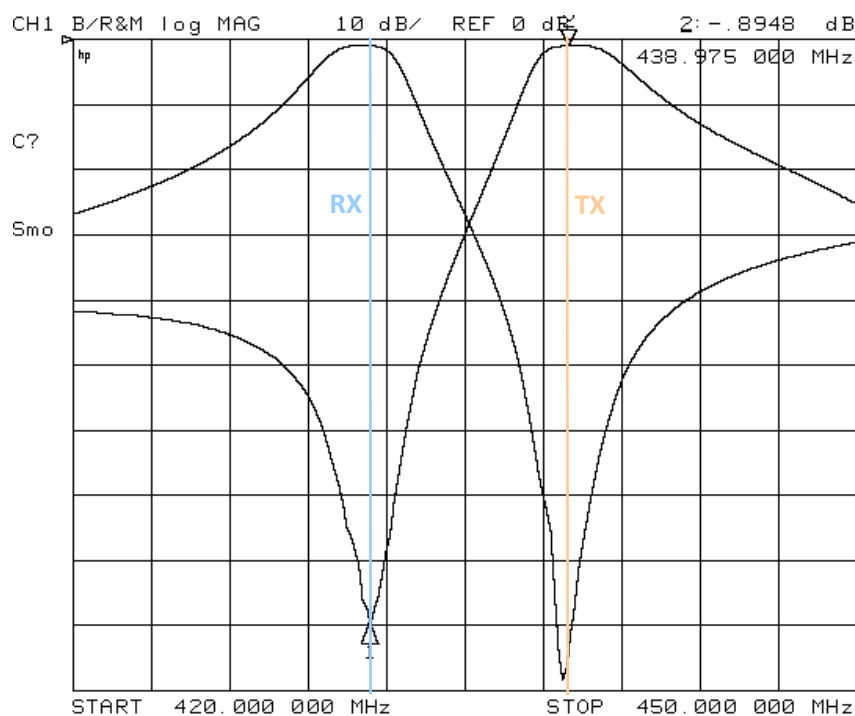


Bild 14: Frequenzgang des Sende- und Empfangszweiges

Genauso kritisch wie das Seitenbandrauschen wirken sich diskrete Nebenlinien aus. Da bei der vorangehenden Betrachtung sowohl das thermische Rauschen, als auch der Seitenbandrauschabstand auf 1Hz Bandbreite bezogen sind, reduziert sich bei diskreten Nebenlinien der Mindestabstand zur Trägerleistung (dBc) um das Verhältnis der ZF-Bandbreite / 1Hz, also um $10 \cdot \lg(f_{ZF}/1\text{Hz})\text{dB}$. Es wird der Abstand der Rauschleistungsdichte zum Träger (dBc/Hz) in den Abstand einer Leistung zum Träger (dBc) bei bekannter Bandbreite umgerechnet. Die zulässige Leistung nach dem ZF-Filter ist im Fall der diskreten Nebenlinie, wie auch beim Rauschsignal die gleiche, siehe Bild 15.

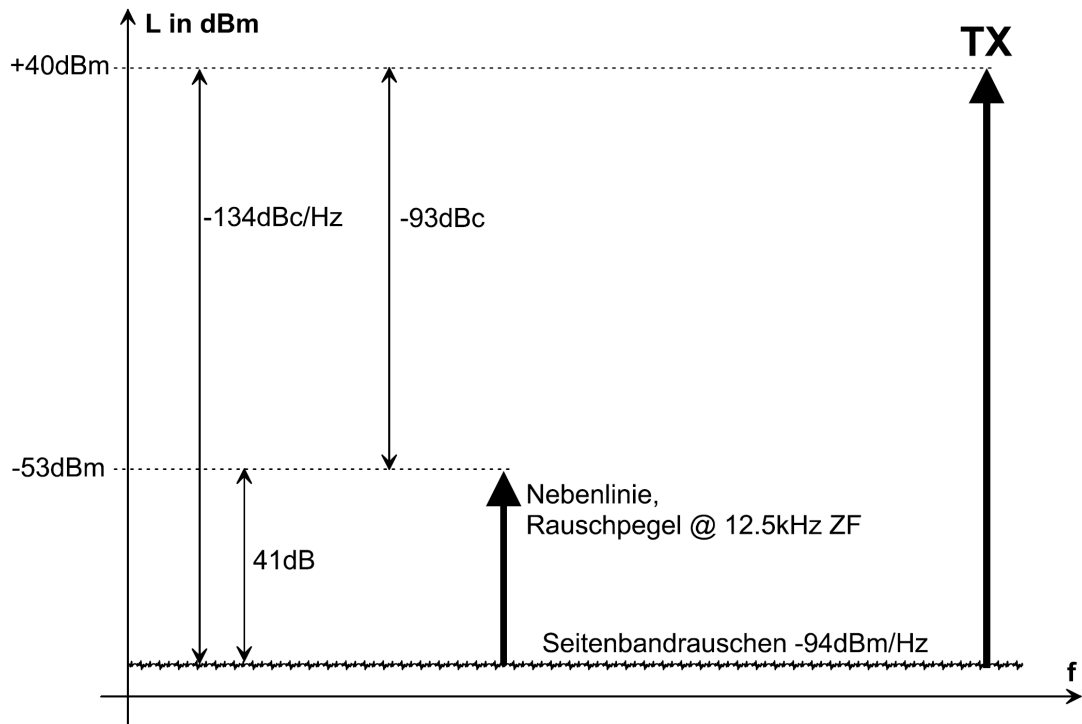


Bild 15: Diskrete Nebenlinie bzw. Rauschpegel bei 12.5kHz Bandbreite

Bei einer ZF-Bandbreite von 12.5kHz ergibt sich dann ein Mindestabstand von $-134\text{dBc/Hz} + 10 \cdot \lg(12.5\text{kHz}/1\text{Hz})\text{dB} = -134\text{dBc/Hz} + 41\text{dB} = -93\text{dBc}$. Die Empfängerrauschzahl wurde bei dieser Betrachtung vernachlässigt, da diese sehr gering ausfallen sollte und zusätzlich "Reserve" bringt.

Das Empfangsfilter liefert vergleichbare Werte. Die Durchgangsdämpfung vergrößert die Rauschzahl um ca. 1dB, das Sendesignal am Empfängereingang ist um ca. 90dB unterdrückt (Marker hier nicht dargestellt). Bei 10W Sendeleistung sollte der Empfänger eine Leistung von $+40\text{dBm} - 90\text{dB} = -50\text{dBm}$ (mit Reserve -40dBm) im Abstand von +7.6MHz zur Empfangsfrequenz ohne Desensibilisierungs-Effekte gut verkraften können. Brauchbare Empfänger weisen in der Regel erheblich bessere Werte auf. Hier ist also eine entsprechend große Reserve vorhanden.

Nicht zu vergessen ist die Anpassung der Filter, die alleine zum Erreichen einer geringen Durchgangsdämpfung schon gute Werte aufweisen sollte. Nach Möglichkeit sollte eine Rückflusddämpfung von $\geq 20\text{dB}$ ($s=1.22$) erreicht werden.

Die beschriebene Zusammenführung in Form eines Sternpunktes ist auch bei kommerziell erhältlichen Weichen sehr verbreitet. Ein Beispiel ist die Duplex-Weiche von Aerial Facilities Limited (AFL), die in einigen Amateurfunk-Relais eingesetzt ist, siehe Bild 16. Sie besteht aus zwei Sechskreis-Bandpässen, die über einen Sternpunkt zusammengeschaltet sind. Ursprünglich wurde die Weiche für TETRA entwickelt. Sie lässt sich jedoch ohne Modifikation auf den 70cm-Amateurfunkbereich umstimmen. Der kitzlige Abgleich verlangt jedoch ein hohes Maß an Geduld.

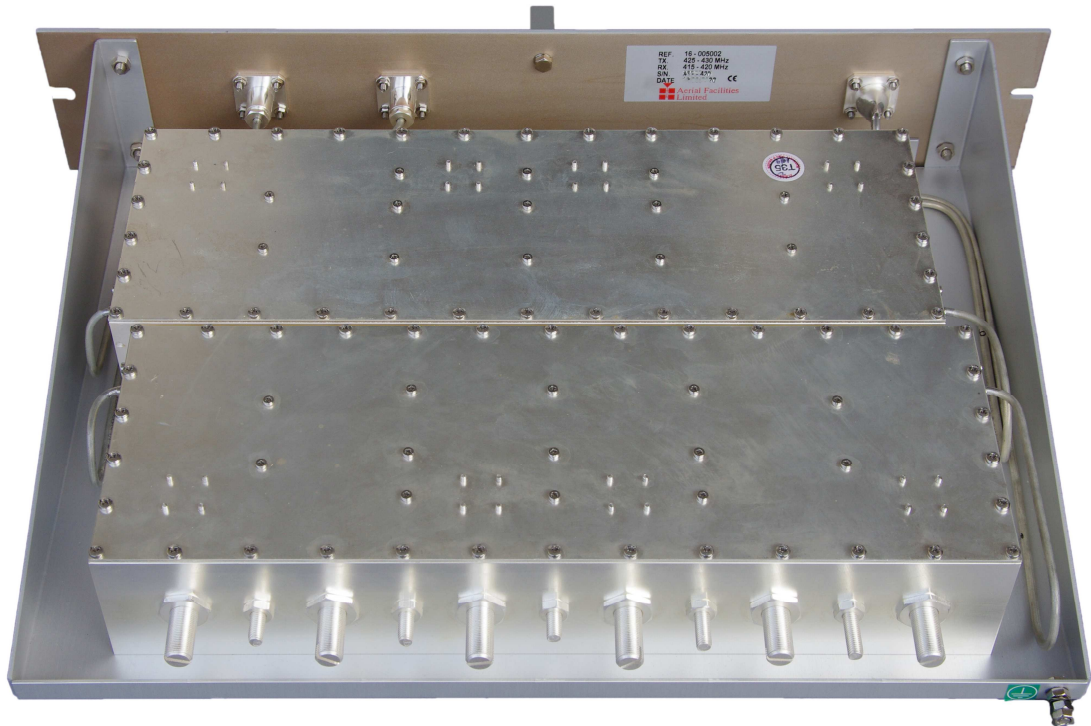


Bild 16: Duplex-Weiche von Aerial Facilities Limited (AFL) für TETRA (415-430MHz)

Die Schaltbandbreite der Filter erlaubt einen Abgleich, der für den gesamten Relaisbereich eine gute Anpassung und eine Sperrdämpfung $\geq 80\text{dB}$ ermöglicht. Ein Frequenzwechsel ist damit ohne Neuabgleich jederzeit möglich. Die Zusammenführung als Sternpunkt erfolgt über eingebaute Zuleitungen geeigneter Länge unmittelbar an der gemeinsamen Antennenbuchse, siehe Bild 17.



Bild 17: Ausführung des Sternpunktes bei der AFL-Duplex-Weiche

Bei einer weiteren Bauform erfolgt die Zusammenführung beider Signale über eine entsprechende Verkopplung der Resonatoren innerhalb der Weiche. Nach diesem Prinzip ist die ebenfalls in Amateurfunk-Relais eingesetzte Duplex-Weiche der Firma Huber + Suhner vom Typ 2500.00.0012 aufgebaut, siehe Bild 18.

Sie besteht, wie die AFL-Weiche, aus zwei Sechskreis-Bandpässen, die jedoch intern gekoppelt sind. Auch diese Weiche wurde ursprünglich für TETRA entwickelt. Wichtig ist die Endung "2" bei der Typenbezeichnung, damit ein Abgleich auf den 70cm-Amateurfunkbereich möglich ist. Auch unter der gleichen Produktnummer gibt es geringfügig unter-

schiedliche Versionen. Zum Abgleich müssen bei einer Version nur die sechs Abstimm-schrauben des Sendezweiges gekürzt werden. Bei einer anderen Version müssen alle 12 Abgleichschrauben gekürzt werden. Die Abgleichschrauben können ohne Öffnen des Filters herausgedreht werden, wenn die Kontermuttern gelöst sind.

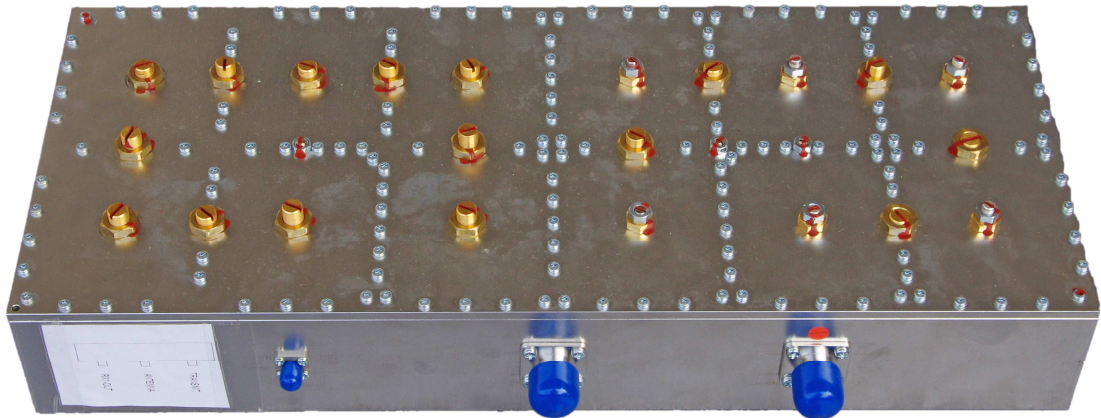


Bild 18: Duplex-Weiche von Huber + Suhner

Auch bei dieser Duplex-Weiche ist ein breitbandiger Abgleich für das gesamte Relaisband mit einer Sperrdämpfung $\geq 80\text{dB}$ möglich. Die Durchgangsdämpfung ist jedoch mit ca. $0.65\ldots 0.8\text{dB}$ deutlich geringer wie bei der AFL-Weiche mit ca. 1.1dB . In Bild 19 ist die Durchlasskurve des RX- und des TX-Zweiges dargestellt.

Die Marker befinden sich dabei auf folgenden Frequenzen:

Marker 1: 430.000 MHz, Marker 2: 431.825 MHz,
Marker 3: 438.550 MHz, Marker 4: 440.000 MHz.

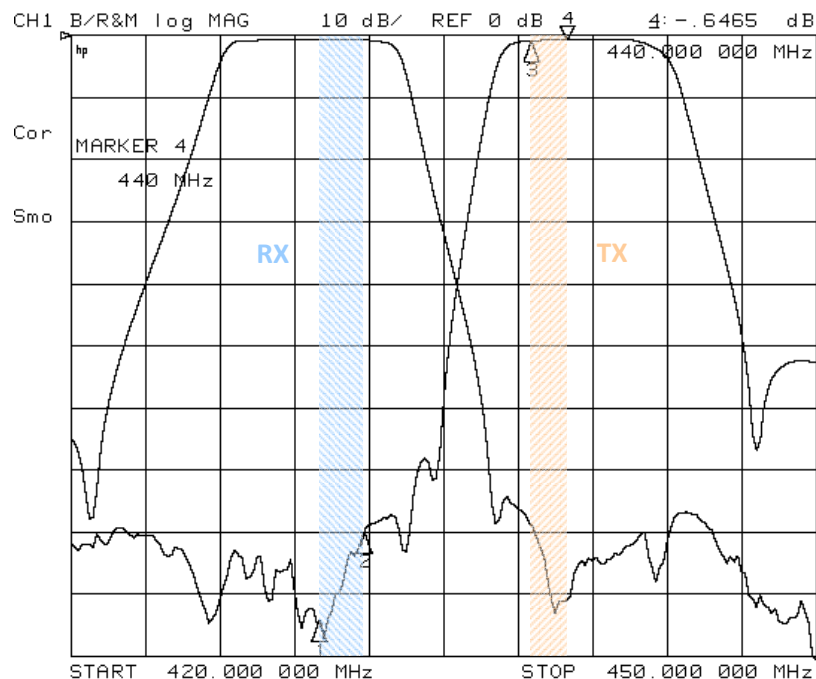


Bild 19: Frequenzgang der Huber + Suhner Weiche vom RX- und TX-Zweig

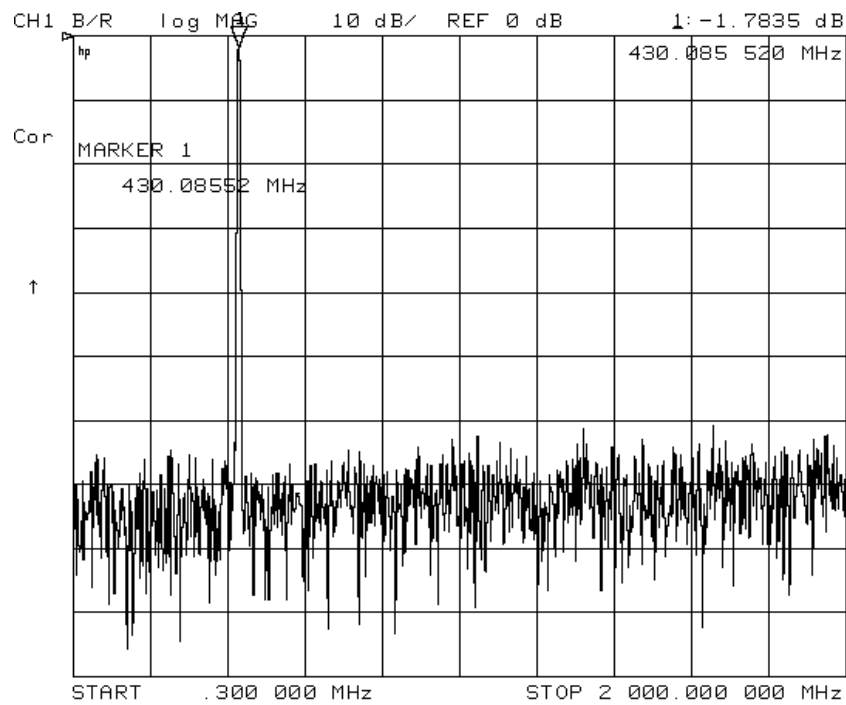


Bild 20: RX-Zweig in einem weiten Frequenzbereich

In Bild 20 ist der RX-Zweig in einem weiten Frequenzbereich dargestellt. Hier zeigt sich, dass im gesamten Frequenzbereich bis 2GHz keinerlei Nebenresonanzen in Erscheinung treten. Beim TX-Zweig sieht der Frequenzgang vergleichbar aus. Diese Duplex-Weiche ist damit vorzüglich für den Einsatz in einem 70cm-Amateurfunk-Relais geeignet. Intermodulation an Sender oder Empfänger kann dann nur noch durch Signale auftreten, die innerhalb der wenigen Megahertz breiten Durchlassbereiche der Filter liegen.



Bild 21: Duplex-Weiche DPF 70/6 von PROCOM

Weitere Duplex-Weichen, die unmittelbar für 2m- oder 70cm-Relais geeignet sind, bietet z.B. die Firma PROCOM aus Dänemark an. Diese Weichen haben ebenfalls in einigen Amateurfunk-Relais Verbreitung gefunden. Bild 21 zeigt den Typ DPF 70/6, der aus zwei Dreikreisfiltern besteht. Diese Weiche eignet sich für einen kanalspezifischen Abgleich mit einer Sperrdämpfung $\geq 85\text{dB}$.

5 Zusatzfilter und Zirkulatoren

In manchen Fällen kann es erforderlich sein, trotz einer guten Duplex-Weiche das Sende- oder Empfangssignal zusätzlich zu filtern. Dies ist der Fall, wenn z.B. die Nebenwellen- oder Rauschunterdrückung des Senders unzureichend ist. Eine zusätzliche Selektion kann auch erforderlich sein, wenn sehr dicht neben der Empfangsfrequenz liegende Signale den Empfang stören. Mit Filtern sehr hoher Güte ist es möglich, solche Signale zu unterdrücken.

Bild 22 zeigt ein Bandpassfilter aus einer abgebauten C-Netz Basisstation in der Größe eines kleinen Bierfasses. Aus dem Frequenzgang in Bild 23 ist ersichtlich, dass Signale, die 3MHz abseits der Durchlassfrequenz liegen, bereits um mehr als 60dB unterdrückt werden. Bei der im Beispiel eingestellten Kopplung beträgt die 3dB-Bandbreite gerade mal 150kHz im 70cm-Band! Der Wehrmutstropfen ist eine Durchgangsdämpfung von 2.6dB. Mit solch einem Filter kann dafür auch sehr hartnäckigen Intermodulationsproblemen entgegengetreten werden, die allemal kritischer zu betrachten sind als etwas weniger Empfindlichkeit.



Bild 22: Bandpassfilter aus einer C-Netz Basisstation

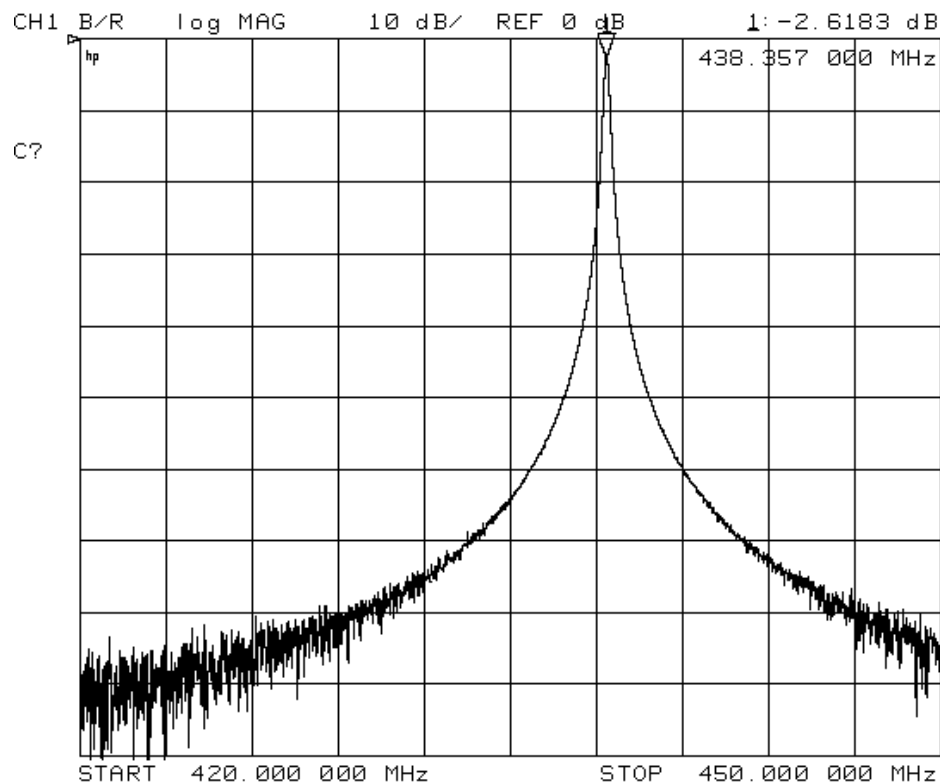


Bild 23: Frequenzgang des Bandpassfilters aus Bild 22

Bild 24 zeigt einen Doppel-Zirkulator für den 70cm-Bereich. Links befindet sich der Eingang, der vom Sender gespeist wird und rechts der Ausgang, an dem die Duplex-Weiche bzw. die Antenne angeschlossen ist. Die Sendeleistung wird mit nur 0.47dB Verlust zum Ausgang übertragen (obere Messkurve, Bild 25). In umgekehrter Richtung, also von der Antenne zum Sender, beträgt die Dämpfung über 50dB (untere Messkurve). Das entspricht der Isolation des Zirkulators.

Am unteren Anschluss wird ein 50Ω-Absorberwiderstand mit guter Anpassung angeschlossen. Dieser sollte für die maximale Sendeleistung dimensioniert sein. Bei einem Kurzschluss an der Antenne wird die gesamte HF-Leistung reflektiert und über den Zirkulator in den Absorberwiderstand geführt. Der Sender würde davon nichts mitbekommen und weiterhin einen guten Abschlusswiderstand "sehen". Das gleiche geschieht im Normalbetrieb mit allen anderen von der Antenne empfangenen Signalen, die über die Duplex-Weiche zum Zirkulator gelangen: diese werden ebenfalls in den Absorberwiderstand geleitet. Eine störende Rückwärtsintermodulation im Sender dürfte bei dieser Dämpfung nahezu ausgeschlossen sein.



Bild 24: Doppelzirkulator für 70cm der Fa. Allgon

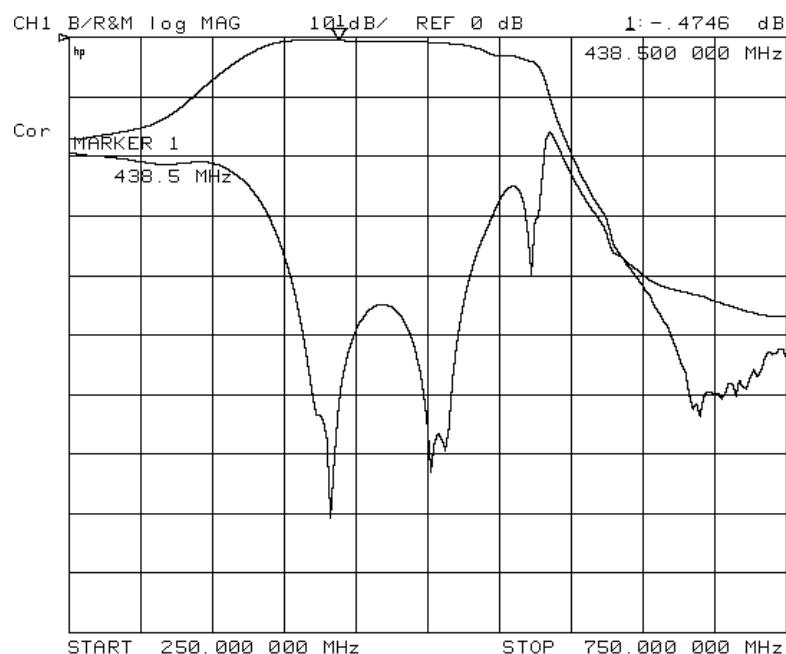


Bild 25: Durchgangsdämpfung und Isolation des Zirkulators

6 Zusammenfassung

Mit einer Duplex-Weiche erfolgt nicht nur die dämpfungsarme Aufteilung der gemeinsamen Antennenleitung auf Sende- und Empfangszweig. Mit ihrer Selektion wird der Entstehung von Intermodulationsprodukten entgegengewirkt, in dem störende Signale von Sender und Empfänger ferngehalten werden. Bereits im Vorfeld kann mit ihrer Unterstützung das Seitenbandrauschen des Senders genauso wie die Desensibilisierung des Empfängers ermittelt werden. Mit diesen Werten kann festgestellt werden, ob die Duplex-Weiche bereits ausreichende Dämpfungswerte aufweist oder ob zusätzliche Filter erforderlich sind.

Duplex-Weichen sind als kommerzielle Produkte einsatzbereit verfügbar. Aber auch mit zwei Bandpassfiltern, die mittels einer selbst dimensionierten Sternpunktschaltung zu-

sammengeschaltet werden, ist der Aufbau einer relaistauglichen Duplex-Weiche möglich. Je nach Standort können die Großsignaleigenschaften eines Relais noch verbessert werden, in dem die Duplex-Weiche noch um weitere Filter oder einen Zirkulator erweitert wird. Dieser Bericht soll helfen, eine geeignete Dimensionierung für einen störungsfreien Empfang bei größtmöglicher Empfindlichkeit zu finden und zu verhindern, selbst zum Störenfried für andere Stationen zu werden. Ein besonderer Dank für ergänzende Hinweise geht an Harald Wickenhäuser, DK1OP und Hans Gall, DK3YD.

7 Literatur

- [1] Harald Wickenhäuser, DK1OP, Unterlagen zum Thema Kollokation
- [2] Prof. Fritz Dellsperger, Skriptum Intermodulation, Dynamik
http://www.fritz.dellsperger.net/Downloads/eq_IM.pdf
- [3] Ulrich Graf, DK4SX, Hans-Hellmuth Cuno, DL2CH, Messung von FM-Geräten, CQ-DL 7/2000
- [4] Meinke, Gundlach, Taschenbuch der Hochfrequenztechnik, Fünfte Auflage, Springer-Verlag
- [5] Sabin, Schoenike, Single Sideband Systems & Circuits, McGraw-Hill 1995
- [6] Josef Wolf, Messung des Phasenrauschens mit den Spektrumanalysatoren der FSE-Familie, Application Note 1EPAN 16D, Rohde & Schwarz 1995
- [7] Programm Smith, Prof. Fritz Dellsperger,
<http://www.fritz.dellsperger.net/downloads.htm>
- [8] Wikipedia

Über Hinweise und Ergänzungen an DL6MFI"at"DARC.de würde ich mich freuen.