Modifikation von Zirkulatoren

Wolf-Henning Rech, DF9IC, Eisinger Str. 36/2, 75245 Neulingen,
mailto: whrech@web.de

1 Grundlagen

1.1 Nichtreziproke Bauelemente

Die meisten bekannten passiven und linearen Bauelemente sind in ihren Übertragungseigenschaften umkehrbar (reziprok) - vertauscht man bei gleichem Quelleninnen- und Lastwiderstand Ein- und Ausgang, so behalten sie die identische Übertragunsgfunktion, egal ob vorwärts oder rückwärts betrieben[1]. Jedes Filter, jedes Dämpfungs- oder Anpaßglied hat diese Eigenschaft. Abweichende Meßwerte für unterschiedliche Übertragunsgrichtungen sind nur die Folge von Meßfehlern.

Für nichtlineare, insbesondere aktive Bauelemente gilt das im allgemeinen nicht - nahezu jeder Verstärker verstärkt in Vorwärtsrichtung und dämpft in Rückwärtsrichtung.

Im folgenden werden aber nur passive lineare Netzwerke betrachtet. Deren Reziprozität ist eine so grundlegende Eigenschaft, weil sie aus den elektrischen Eigenschaften der zum Aufbau verwendeten Materialien, namentlich Leitfähigkeit, Permeabilität und Permittivität, abgeleitet werden kann. Verhalten die sich „normal“ (isotrop) - das bedeutet, daß der Strom dort in Richtung der Spannung fließt, die magnetische Flußdichte in Richtung des magnetischen Feldes zeigt und die elektrische Verschiebungsdichte in Richtung der elektrischen Feldstärke - dann kann man den Zusammenhang jeweils durch eine einzige Konstante beschreiben. Gilt hingegen eine Richtungsabhängigkeit, dann erfordert der Zusammenhang eine 3x3-Matrix. Solange diese Matrix noch symmetrisch ist, bleibt aber auch dann die Reziprozität erhalten.

Interessant wird es, wenn es gelingt, eine solche Matrix unsymmetrisch zu machen. Das ist gar nicht so einfach - die wesentliche technisch genutze Möglichkeit besteht in einer Wirkung der Elektronenspinpräzession in einem durch ein starkes Gleichfeld vormagnetisiertem Material. Dadurch beeinflußt das Material die magnetische Flußdichte je nach Drehrichtung eines magnetischen Drehfeldes unterschiedlich. Für die Realisierung von Zirkulatoren eignen sich Ferrite; für die auf dem gleichen Prinzip beruhenden YIG-Resonatoren eben YIG-Kristalle, und auch optische Farady-Rotatoren nutzen YIG (Yttrium-Eisen-Granat) oder TGG (Terbium-Gallium-Granat). Ebenso begegnet den EME-Freunden der dort störende Farady-Effekt im Plasma der Ionosphäre in Verbindung mit dem irdischen Magnetfeld.

Je nach Dämpfung dieser Spinpräzession kann die Wirkung sich auf einen sehr schmalen Frequenzbereich (geringe Dämpfung/hohe Güte) beschränken - das erlaubt die Realisierung sehr schmalbandiger Resonatoren in YIG-Oszillatoren und -filtern, für die die Nichtreziprozität des Effekts keine Rolle spielt, sondern nur die hohe Güte und Abstimmbarkeit - oder

---

1. Das gilt nicht für das Reflexionsverhalten; der Reflexionsfaktor / das VSWR können sich an unterschiedlichen Toren natürlich voneinander unterscheiden.

bei höherer Dämpfung (Ferrit) die Realisierung von breitbandigeren Zirkulatoren, die die Nichtreziprozität maximal zu nutzen versuchen. Deren Arbeitfrequenzbereich liegt entweder etwas unterhalb oder etwas oberhalb der Resonanzfrequenz.

In beiden Fällen ist die Resonanzfrequenz der Präzession - nach Joseph Larmor als Larmorfrequenz bezeichnet - bei weichmagnetischen Materialien genau proportional zur Stärke der Vormagnetisierung. Das erlaubt beim YIG-Resonator dessen Abstimmung über das Magnetfeld und damit den Strom eines Elektromagneten, und bei Zirkulatoren in ebensolcher Weise dessen optimale Auslegung, wobei dafür Dauermagnete verwendet werden und die Abstimmung durch Veränderung eines Luftspalts im magnetischen Kreis erfolgen kann.

1.2 Eigenschaften und Anwendung von Zirkulatoren

Der gängige Dreitorzirkulator [1][2] sollte im Idealfall bei der Nennfrequenz reflexionsfrei sein, eine verschwindende Einfügungsdämpfung in Vorwärtsrichtung (Tor 1=>2, Tor 2=>3 und Tor 3=>1) besitzen sowie eine unendlich hohe Isolation in Rückwärtsrichtung (Tor 2=>1, Tor 3=>2 und Tor 1=>3). Reale Zirkulatoren erreichen eine Einfügungsdämpfung im Zehntel-dB-Bereich, eine Reflexionsdämpfung von 20...30 dB und Isolation von 20-35 dB (je nach Bandbreite). Für höhere Isolation werden teilweise auch zwei Zirkulatoren kaskadiert.

Im Einsatzfeld des Amateurfunks kommen hauptsächlich zwei Anwendungen in Frage

- Ausgangsseitiger Schutz von Leistungsverstärkung gegen Fehlanpassung
- Rückwirkungsfreie Entkopplung z. B. bei Leistungsteilern

In beiden Fällen wird der Zirkulator an Tor 3 mit einem ausreichend dimensionierten Abschlußwiderstand versehen, sofern dieser nicht ohnehin schon integriert ist, und dann als Isolator (Einwegleitung) genutzt.

Für den Schutz von Leistungsverstärkern steht die ausreichende Belastbarkeit an erster Stelle. An die Isolation werden keine so hohen Anforderungen gestellt, allerdings sollten die Verluste gering sein, auch schon wegen der dadurch im Isolator entstehenden Verlustleistung. Im Bereich bis 50 oder 100 W Übertragungsleistung findet sich ein breites Surplus-Angebot, für deutlich höhere Leistungen wird die Beschaffung aber schwieriger oder teurer.

Rückwirkungsarme Entkopplung kann dann wichtig sein, wenn z. B. mehrere Leistungsverstärker über einen Splitter aus einem gemeinsamen Treiber versorgt werden sollen und dabei einer der Verstärker im Test- oder Fehlerfall abgeschaltet oder gar ausgesteckt werden soll, ohne daß sich die Steuerleistung der anderen verändert. Auch wenn der Splitter selbst perfekt isoliert, so hat der Treiber keine perfekte Ausgangsanpassung und reflektiert daher die von dem unbenutzten Ausgang kommende Leistung zurück. Daher sollte zwischen Treiber und Splitter noch ein Isolator eingefügt werden, der eine gute Anpassung erreicht. Wahlweise kann statt dessen auch an jedem Ausgang des Splitters je ein Isolator eingefügt werden; der muß dann vor allen eine gute Isolation aufweisen.

1.3 Beschaffung von Zirkulatoren für Amateurfunkfrequenzen

In Baugruppen der professionellen Nachrichtentechnik werden Zirkulatoren sehr viel häufiger eingesetzt als in Amateurfunkanlagen. Sie ermöglichen dort ebenso geringe Rückwir-

kungen zwischen Verstärkern, Schutz von Leistungsverstärkern und außerdem Entkopplung zwischen mehreren Sendern an der gleichen oder dicht benachbarten Antennen.

Dadurch kommen auch zahlreiche Zirkulatoren über ausgemusterte Baugruppen (manchmal) preiswert auf den Gebrauchtmarkt. Entsprechend den im Originaleinsatz verwendeten Frequenzbereichen waren das in der früheren Vergangenheit vor allen solche für die klassischen Richtfunkbänder (S- oder C-Band, auch X-Band) und gelegentlich für 4-m, 2-m- und 70-cm-Frequenzen aus Betriebs-/BOS-Funk. Manche davon sind direkt verwendbar - z. B. die des 5,9-6,4-GHz-Richtfunkbandes sind auch bei 5,76 GHz noch sehr gut - oder einfach über ohnehin vorhandene Trimmkondensatoren leicht neu abzustimmen (z. B. für 144 MHz). Die für das 70-cm-Band sind dagegen oft ohne zugängliche Abgleichelemente ausgeführt und nicht immer optimal bei 432 MHz zu verwenden.

Neuere Baugruppen finden sich natürlich für die Mobilfunkbereiche (900 und 1800 MHz, 2100 MHz), teilweise auch für 2300 MHz und 3400 MHz (WiMAX). Die 900- und 1800-MHz-Zirkulatoren sind leider nicht so gut für Amateurfunkzwecke verwendbar; für 2300 MHz gibt es brauchbare Angebote, die direkt genutzt werden können.

Allerdings fehlt eine preiswerte Beschaffungsquelle für Zirkulatoren für das 23-cm-Band. Auch für das 70-cm-Band wären Zirkulatoren für höhere Leistungen im Bereich 500 W und mehr, wie sie heute mit den 50-V-FETs relativ preiswert erzeugt werden können, wünschenswert. Dafür kommen nur Bauelemente in Frage, die in Rundfunksendern eingesetzt wurden.

Das dem 23-cm-Band am nächsten liegende Rundfunkband ist das in der Vergangenheit für DAB genutze L-Band zwischen 1450...1500 MHz, das uns auch schon nutzbare Leistungstransistoren beschert hat. Durch Rückbau der dort mit wenig Erfolg betriebenen Senderketten gelangen die dafür ausgelegten Isolatoren auch auf den Gebrauchtmarkt; sie könenn aber nicht unmodifiziert genutzt werden.

Ähnliches gilt für die ältere UHF-Fernsehsendertechnik. Das Band IV reicht von 470...600 MHz; die dafür ausgelegten Zirkulatoren, die ja für den Nennfrequenzbereich schon eine relativ große Bandbreite erreichen müssen und daher eine Bandpaßauslegung haben, sind bei 432 MHz unverändert leider nur mit Einschränkungen nutzbar.

Deshalb wird die Modifikation solcher Surplus-Zirkulatoren zur Optimierung für das 70-cm- und 23-cm-Amateurfunkband beschrieben und die Ergebnisse meßtechnisch untersucht.

2 Vorgehensweise zum Neuabgleich

Der Neuabgleich umfaßt zwei Schritte:

- Veränderung des Magnetfelds,
- Nachstimmen der Anpaßschaltung der Tore.

Sie werden sinnvollerweise in dieser Reihenfolge durchgeführt, da die richtige Larmorfrequenz auch bei noch nicht optimaler Anpassung gut erkennbar ist. Weil sich die Einstellungen gegenseitig beeinflussen, müssen die Abgleichschritte ggf. mehrfach in einer Schleife durchlaufen werden. Wenn nur eine geringe Verstimmung erforderlich ist, genügt für nicht-optimale, aber verwendbare Ergebnisse auch nur eine der beiden Maßnahmen.

Für den ersten Schritt ist es günstig, wenn die Originalfrequenz höher liegt als die neu abzustimmende - dann muß das Magnetfeld nur geschwächt werden, was durch einen zusätzli-

chen Luftspalt im magnetischen Kreis oft einfach möglich ist. Die Abstimmung erfolgt bei Messung der Isolation durch Zwischenlegen von nichtmagnetischen Plättchen; optimiert wird so, daß die frequenzabhängige Isolation bei der neuen Frequenz ihr Maximum hat. Ist die richtige Dicke bestimmt, kann es sinnvoll sein, die zur Abstimmung benutzten Plättchen oder Folien (z. B. aus Kunststoff, Papier, ...) durch metallene mit möglichst guter Wärmeleitfähigkeit zu ersetzen. In Frage kommen Kupfer, Aluminium oder Messing; wenn die richtige Dicke nicht vorhanden ist, lassen sich vielleicht zwei Plättchen kombinieren.

Im zweiten Schritt muß dann die Anpaßschaltung neu optimiert werden; sie besteht im einfachsten Fall aus je einem Kondensator parallel zum Port, der für die niedrigere Frequenz vergrößert werden muß. Manchmal sind diese Kondensatoren schon herstellerseitig einstellbar ausgelegt; dann reicht u. U. ein Abgleich daran. Möglicherweise muß auch ein zusätzliches Fest-C parallelgeschaltet werden, oder die Cs sind bei hohen Frequenzen als Mikrosteifenleitungs-Stubs ausgelegt, deren Fläche dann per Kupferfolie vergrößert werden muß.

Solange die geforderte Bandbreite nur gering ist, kann grundsätzlich diese Anpassung auch durch zusätzliche externe Elemente außen am Zirkulator erfolgen; eine interne Anordnung ist aber zu bevorzugen.

Die Optimierung der Anpassung am Isolationstor erhöht auch die erreichte Isolation beträchtlich, da der am dritten Tor angeschlossene Abschluß erst dann richtig angepaßt ist. Zur Optimierung können also drei Kriterien - minimale Einfügungsdämpfung, geringste Reflexion und höchste Isolation - herangezogen werden; entweder variiert man die Elemente an allen drei Toren parallel (z. B. bei der Abstimmung durch Auflegen von Folie) oder einzeln nacheinander (bei Trimmkondensatoren).

3 Leistungszirkulator für das 70-cm-Band

Ausgangspunkt war die Beschaffbarkeit eines Band-IV-Zirkulators des Typs VAF163A (Typnummer 2722 162 01632) von Valvo/Philips. Er ist spezifiziert [4] mit 0,35 dB Einfügungsdämpfung, 20 dB Isolation und VSWR 1,25 (19 dB Reflexionsdämpfung) sowie 300 W Belastbarkeit bis 60 °C Umgebungstemperatur. Mit 7/16-Buchsen ausgerüstet macht er einen sehr soliden Eindruck. Einsatzzweck ist der Schutz einer 432-MHz-FET-PA gegen Fehlanpassung am Ausgang.

Die Nenndaten waren in der Messung reproduzierbar, mit 0,27 dB Einfügunsgdämpfung bei 600 MHz und nur 0,13 db bei 470 MHz; die 20 dB Isolation wurden knapp erreicht. Allerdings steigt die Einfügungsdämpfung bei 432 MHz auf 0,7 dB an, bei nur noch 10 dB Reflexionsdämpfung; das ist für eine Nutzung nicht akzeptabel, und auch die verbleibenden 11 dB Isolation sind nicht schön.

Bei dieser Bauform dienen die vernickelten Stahlblechplatten der Ober- und Unterseite und die Winkel an den Seitenwänden gleichzeitig als magnetischer Kreis. Nach Lösen der beiden Deckelschrauben läßt sich der Deckel mit genügend Kraft verschieben und dann abheben; dadurch ändern sich die Eingeschaften des Zirkulators vollkommen.

Durch Beilage einer Unterlegplatte und Wiederaufsetzen des Deckels kann nun das Magnetfeld gezielt reduziert werden; mit ca. 0,3...0,4 mm wird das richtige Maß der Verschiebung der Larmorfrequenz nach unten erzielt. Im ersten Schritt wurde mit Kunststoffplättchen und Papierblättern gearbeitet, dann ein 0,3-mm-Ms-Blech passend angefertigt. Dessen Dicke war

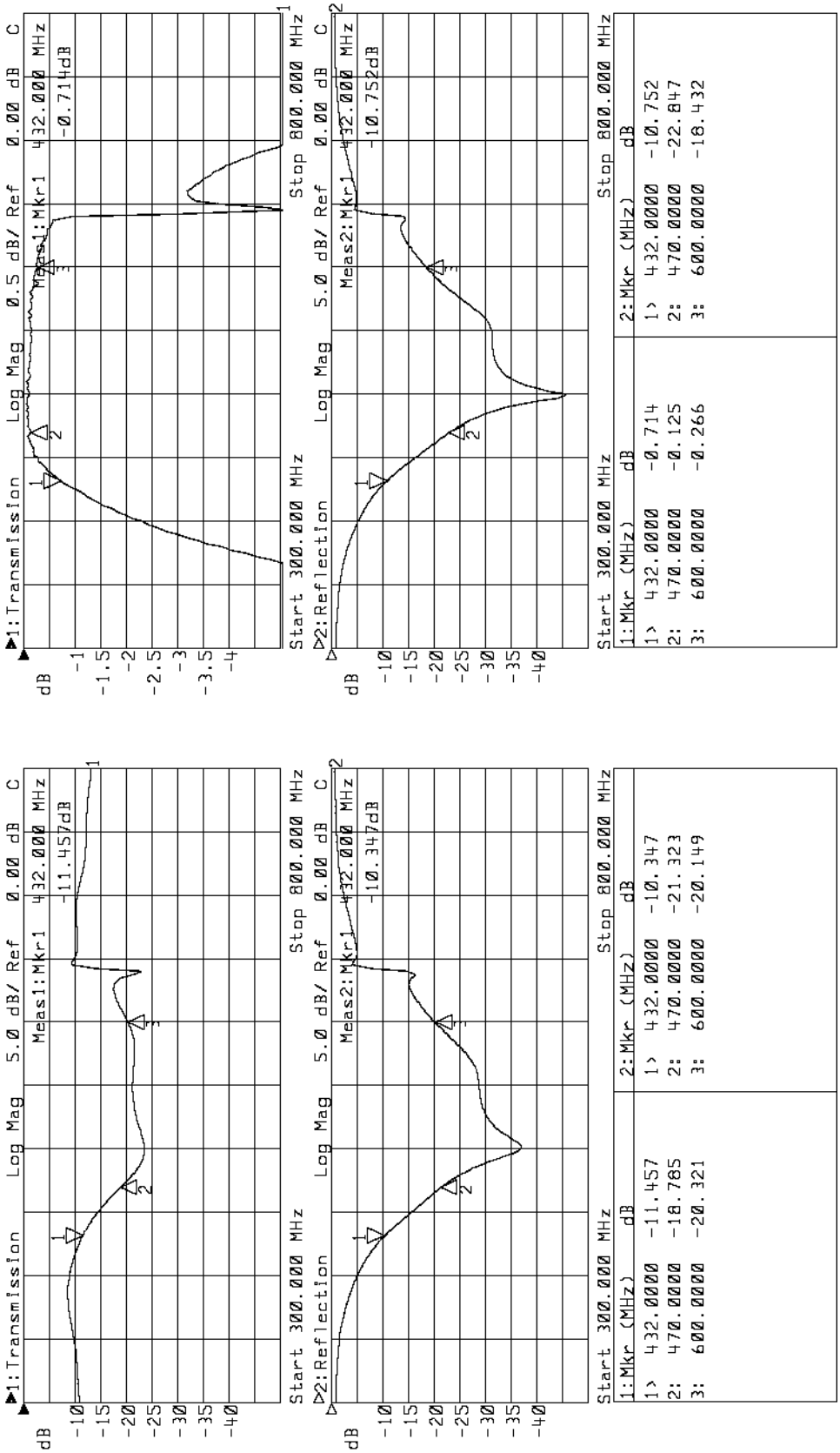

Bild 1 Band-IV-Zirkulator im Originalzustand; oben: vorwärts; unten: rückwärts.

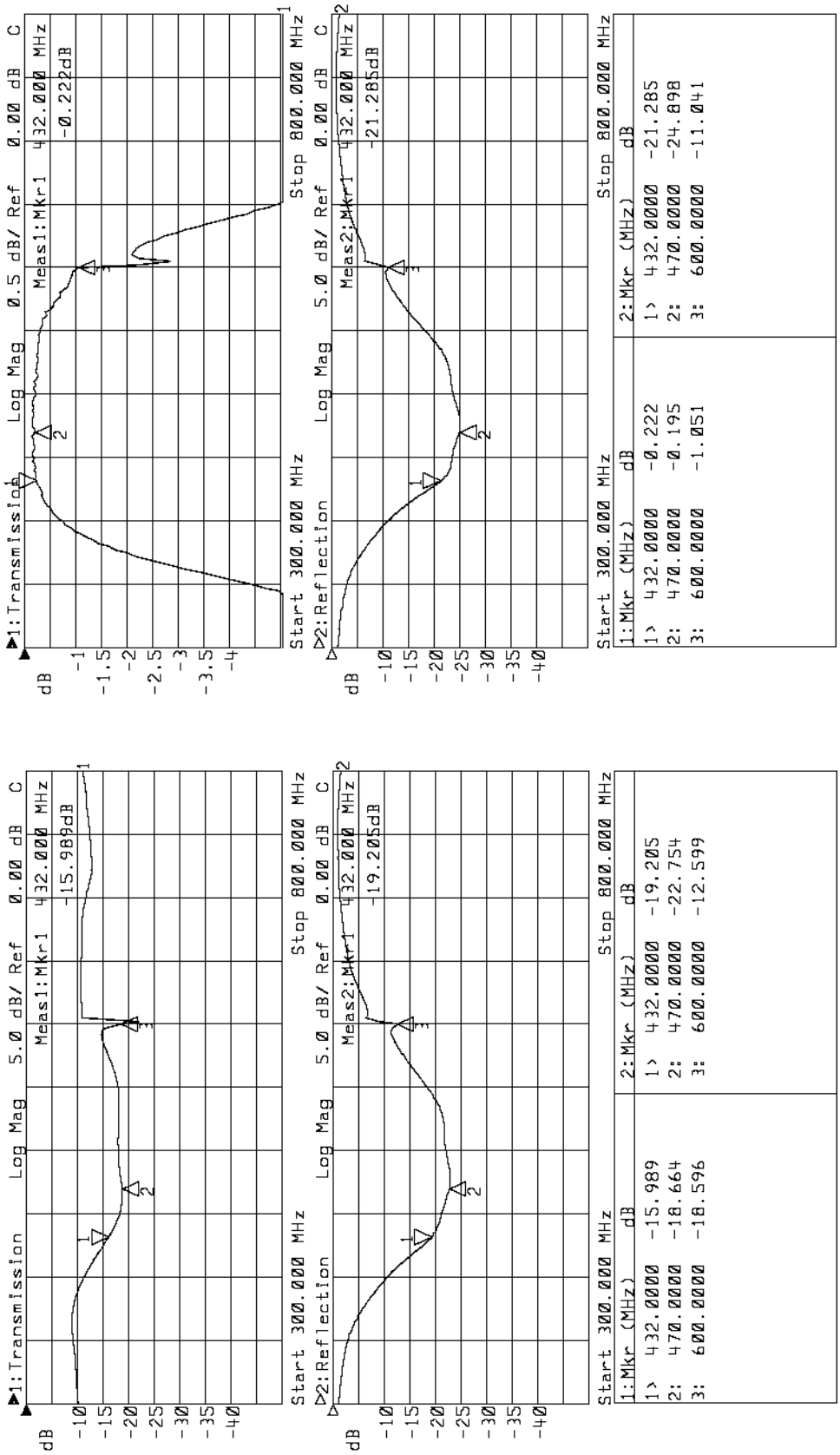

Bild 2 Band-IV-Zirkulator nach Neuabgleich; oben: vorwärts; unten: rückwärts.

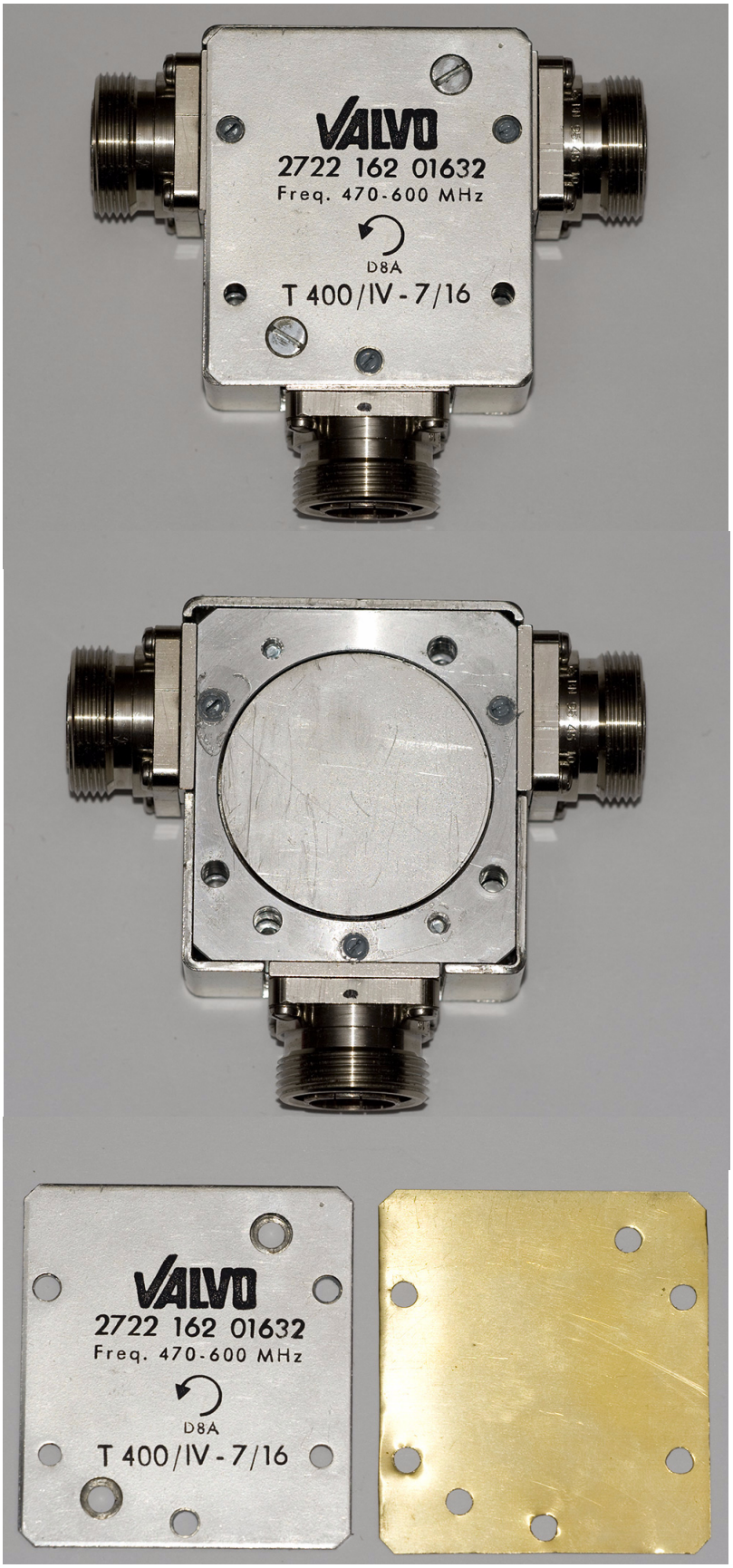

Bild 3 Band-IV-Zirkulator: mit und ohne Deckel, und Zusatzblech.

noch etwas zu klein, so daß für den Rest einige Lagen von Haushalts-Aluminiumfolie zum Auffüttern verwendet wurden.

Erreicht werden so 0,22 dB Einfügungsdämpfung und 16 dB Isolation; das ist eine deutliche Verbesserung, läßt aber im Vergleich mit den Werten bei 470 MHz noch Optimierungspotential erkennen. Mehr als 20 dB Reflexionsdämpfung (VSWR<1,2) gehen in Ordnung.

Zur Wertung der Einfügungsdämpfung ist eine Ursachenbetrachtung sinnvoll:

- 16...17 dB Isolation bedeuten 2...2,5% (0,1 dB) Verlust durch Übertragung dieser Leistung zum Abschluß am dritten Tor;
- 20...22 dB Reflexionsdämpfung bedeuten 0,8...1% (0,04 dB) Verlust durch Reflexion;
- somit beschränken sich die internen Verluste auf weniger als 0,1 dB - das wäre also auch die bei optimaler Auslegung der Anpaßschaltungen an den Toren erreichbare Einfügungsdämpfung.

An jeder der drei Buchsen befindet sich auf jeder Seite ein Abstimmelement in Form einer Parallelkapazität, die vergrößert werden müßte; leider sind diese so konsequent durch Sicherungslack fixiert, daß ein Neuabgleich schwierig erscheint. Um eine mögliche Zerstörung des Zirkulators zu vermeiden, wurde darauf verzichtet, den Lack zu entfernen oder den Zirkulator weiter zu zerlegen. Es handelt sich auch nur um einfache Schrauben ohne Zusatzkapazität, so daß deren Wirkung voraussichtlich ohnehin sehr gering wäre.

Die etwas niedrige Isolation ließe sich extern durch gezielte leichte Fehlanpassung am jeweiligen Tor verbessern; um dadurch die Einfügungsdämpfung zu reduzieren, muß insbesondere am Ausgang des Zirkulators eine solche Transformationsschaltung eingefügt werden. Denkbare Wege dorthin wären die Zwischenschaltung einer Lambda/4-Leitung (unter Berücksichtigung der internen Leitungen des Zirkulators und der Buchse) und dann einer Serieninduktivität - sprich: einer kleinen Schleife des Innenleiters des Koaxkabels; oder einer Lambda/2-Leitung und Parallelschaltung einer kleinen Kapazität, die ausreichend verlustarm und spannungsfest sein muß - am besten als Stub.

Die Belastbarkeit des Zirkulators ist vermutlich ziemlich konservativ angegeben. Ein Test mit 400 W bei 432 MHz aus einer GS35B-PA erhöht die Oberflächentemperatur nach einer Stunde Key-down um nur 20°C gegenüber der Umgebungstemperatur. Mit den errechneten 0,1 dB internem Verlust entspricht das einer Verlustleistung in dem Elementen des Zirkulators von weniger als 10 W. Wirklich heiß wurde bei diesem Test nur der Steuersender, der die 25 W Steuerleistung erbringen mußte, und auch der 600-W-Dummyload war deutlich wärmer als der Zirkulator. Insofern ist anzunehmen, daß unter typischen Amateurfunkbedingungen und bei leichter Kühlung des Zirkulators eine Übertragungsleistung bis 1 kW möglich sein sollte.

Der Aufbau ist thermisch günstig in dem Sinne, daß das Alu-Frästeil, das Ferrit und Magnet trägt, direkt auf dem Stahlblechboden aufliegt und somit die Wärme gut dorthin transportiert. Deshalb wurde das Zusatzblech für den Luftspalt auch oben montiert, um den Wärmefluß zum Boden, der voraussichtlich auf eine Kühlfläche montiert wird, nicht zu stören.

Die Bezeichnung T400/IV-7/16 deutet schließlich auch auf eine vorgesehene Übertragungsleistung von 400 W in der Nennanwendung hin. Eine ältere Bauform im einem nochmals größeren grauen runden Gehäuse mit der Bezeichnung Y200/IV-6/16 (noch aus der 60-Ohm-Zeit) wurde auch kurz untersucht; hier scheint das verwendete Ferritmaterial aber deutlich mehr Verluste zu besitzen.

4 Zirkulator für das 23-cm-Band

Ein anderer, sehr ähnlich aufgebauter Typ von Philips, nämlich VAO 1001 (Typnummer 2722 162 10011), ist in der Originalanwendung für das DAB-L-Band 1450-1500 MHz vorgesehen und erreicht dort gemäß Spezifikation [4] 0,25 dB Einfügungsdämpfung, 23 dB Isolation und ein VSWR besser 1,15 (ca. 25 dB Reflexionsdämpfung). Er ist mit 3 N-Buchsen bestückt und für 130 W Übertragungsleistung im Temperaturbereich bis 50 °C vorgesehen.

Bild 4 L-Band-Zirkulatoren.

Dieser Zirkulator wird derzeit regelmäßig auf Funkflohmärkten angeboten und hat dadurch ein gewisses Interesse bei Nutzern von 23-cm-PAs erregt.

Wieder wurden zunächst die Daten im Originalzustand verifiziert. Bild 5 zeigt ein typisches Ergebnis, das im wesentlichen die Angaben des Datenblatts bestätigt; die um 0,03 dB höher gemessene Einfügungsdämpfung kann der Meßgenauigkeit geschuldet sein, an die bei solchen Messungen recht hohe Anforderungen zu stellen sind. Es wurde ein HP8714ET verwendet, der nur ein Reflection-/Transmission-Testset besitzt, aber mit zusätzlichem 10-dB-Dämpfungsglied am Kabelanschluß zum Transmissionsport versehen wurde, so daß dort die Reflexionsdämpfung deutlich über 30 dB (gemessen) lag, um Fehler durch Reflexion aus dem Meßgerät und Kabel zu minimieren; außerdem wurde für die Messung der Einfügungsdämpfung Mittelung verwendet und häufig auf direkte Verbindung umgesteckt und darauf neu normalisiert. Die angegeben Meßwerte beinhalten außerdem die Dämpfung eines zusätzlichen Nm-Nm-Verbinders.

Die Meßwerte bei 1296 MHz sind durchweg unbefriedigend: weder 0,7 dB Einfügungsdämpfung noch 12 dB Reflexionsdämpfung sind für eine Nutzung hinter einem Leistungsverstärker ausreichend. Der Zirkulator muß also modifiziert werden.

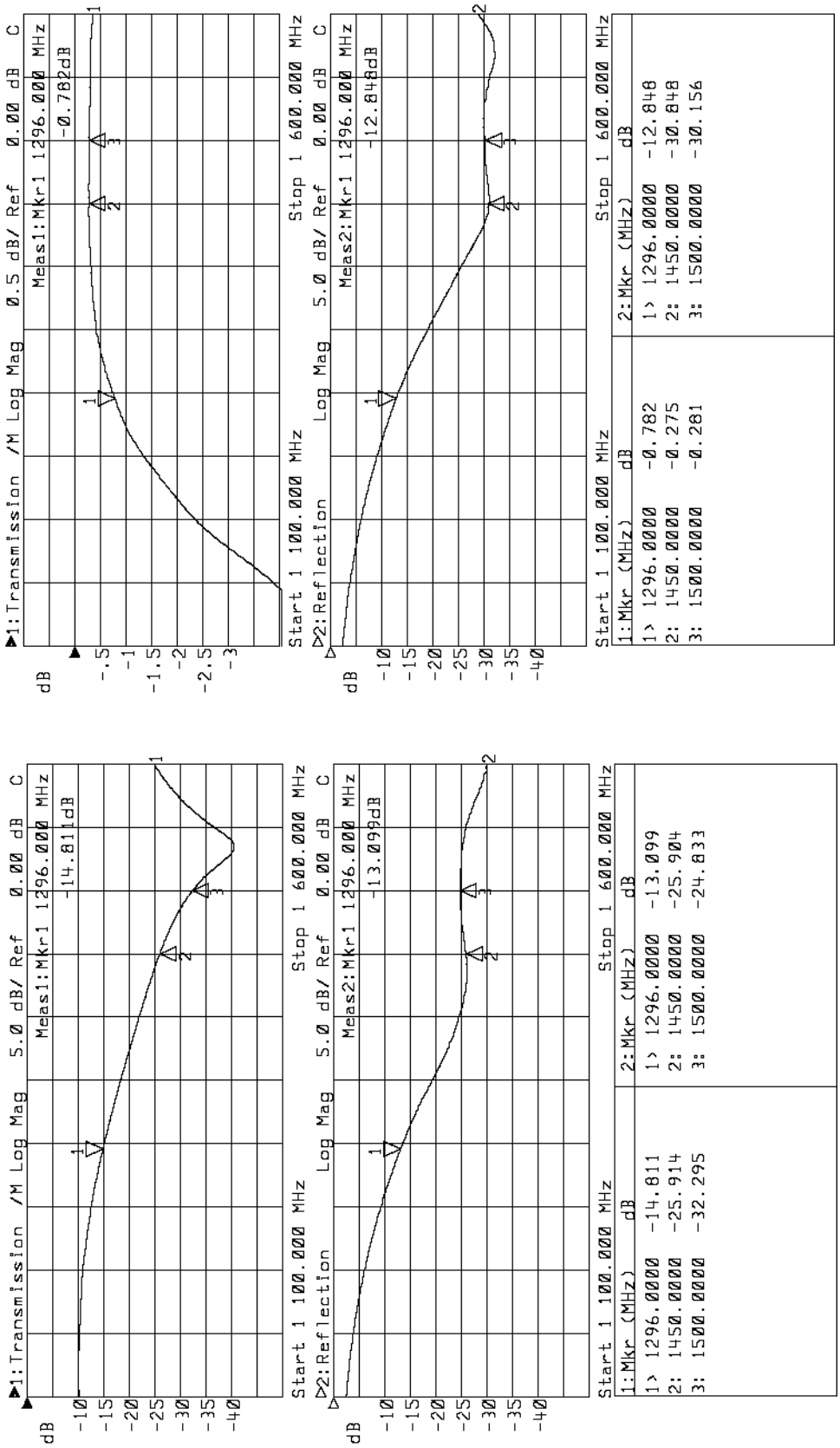

Bild 5 L-Band-Zirkulator im Originalzustand; oben: vorwärts; unten: rückwärts.

Zunächst wurden an einem Einzelexemplar verschiedene Versuche gemacht, um die Umbaumöglichkeiten auszuloten. Diese verliefen erfolgreich, wurden aber nicht im Detail dokumentiert. Erst sehr viel später - nämlich zur Vorbereitung dieses Tagungsbeitrags - wurde das ganze Verfahren systematisch wiederholt und versucht, daraus eine Umbauanleitung zu entwickeln.

Der Zirkulator ist grundsätzlich genauso aufgebaut wie der vorige; zwei gleiche Hälften, bestehend aus je einem Alu-Frästeil, tragen den in Bild 6 erkennbaren Magneten und die darunter befindliche Ferritplatte; bei diesem Typ kommt dann ein PTFE-Substrat mit 1,5 mm Dicke, in das die Ferritplatte eingebettet ist. Zwischen den Substraten der oberen und unteren Hälfte liegt dann die aus versilbertem Blech mit 0,2 mm Dicke bestehende Streifenleitung. Beim Band-IV-Zirkulator besteht hingegen die Streifenleitung aus einem FR4-Substrat mit beidseitig genau gleich strukturierten und miteinander verbundenen Leiterbahnen - das FR4 dazwischen ist feldfrei und dient nur als Träger - während zu den oberhalb und unterhalb in Form einer Aluminiumfolie angebrachten Massenflächen ein Luftdielektrikum verwendet wird.

Bild 6 L-Band-Zirkulator mit geöffnetem Deckel.

In beiden Fällen dienen die Gehäuseteile als magnetischer Leiter; zwei Winkel zwischen den N-Buchsen, gegenüber die flache Seitenwnd, und Boden und Deckel, allesamt aus vernickeltem Stahlblech.

Ein weiterer Unterschied liegt darin, daß beim Band-IV-Zirkulator Alu-Frästeil und Magnet eine plane Oberfläche bilden, auf der Deckel bzw. Boden direkt aufliegen; beim L-Band-Zir-

kulator ist an dieser Stelle hingegen ein auch in Bild 6 erkennbarer Luftspalt. Dadurch ist die Wärmeableitung dort schlechter.

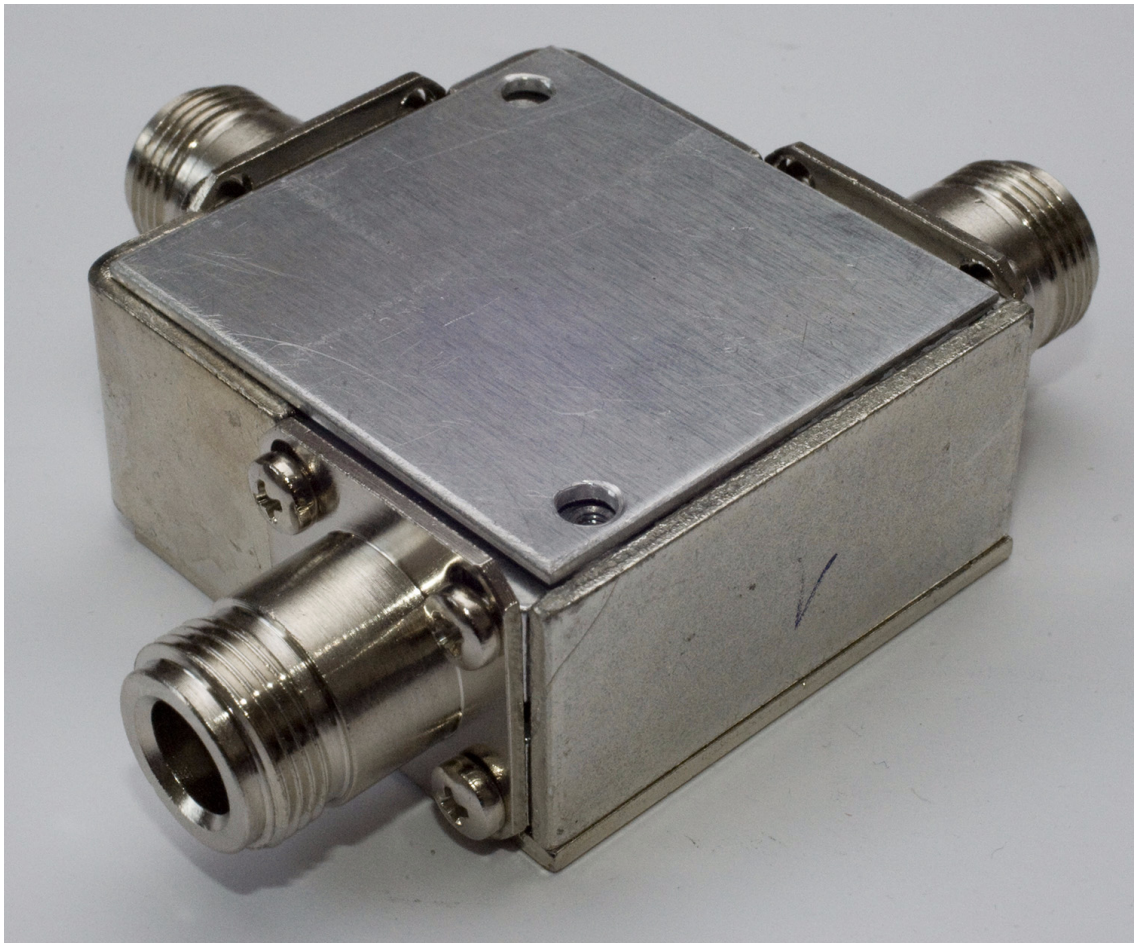

Bild 7 L-Band-Zirkulator mit zusätzlicher Abstandsplatte zur Vergrößerung des Luftspalts.

Der Ansatz zum magnetischen Umbau sollte die Wärmeableitung möglichst verbessern; daher wurde auf der Unterseite eine Aluminiumplatte eingefügt, die zwischen Magnet und Bodenblech klemmt und so wenigstens den unteren Magneten kühlt. Eine Dicke von 1,5 mm erwies sich als geeignet zur richtigen Feldschwächung. Sicherlich wäre eine etwas dickere Platte mit einer Ausfräsung für den Magneten, die dann auf dem originalen Alu-Frästeil aufliegt und dieses kühlt, noch effizienter; wegen des höheren Aufwands wurde aber darauf verzichtet

Das Bodenblech wird nun wieder angeschraubt; dadurch entsteht ein doppelter Luftspalt (zum Magneten und zu den Seitenblechen). Die Schrauben, im Original Senkschrauben M3x4, sollten gegen M3x5 oder besser M3x6 getauscht werden.

Vor dem Zusammenbau werden alle 12 Befestigungsschrauben der N-Buchsen etwas gelokkert; diese N-Buchsen haben Langlöcher und können vertikal verschoben werden. Dann werden die beiden Befestigungsschrauben des Bodens vorsichtig und gleichmäßig, aber durchaus fest angezogen, die des Deckels ggf. nachgezogen, und schließlich nach etwas Wackeln an den Buchsen zur spannungsfreien Einstellung der Mittellage auch deren Befestigungsschrauben wieder fixiert.

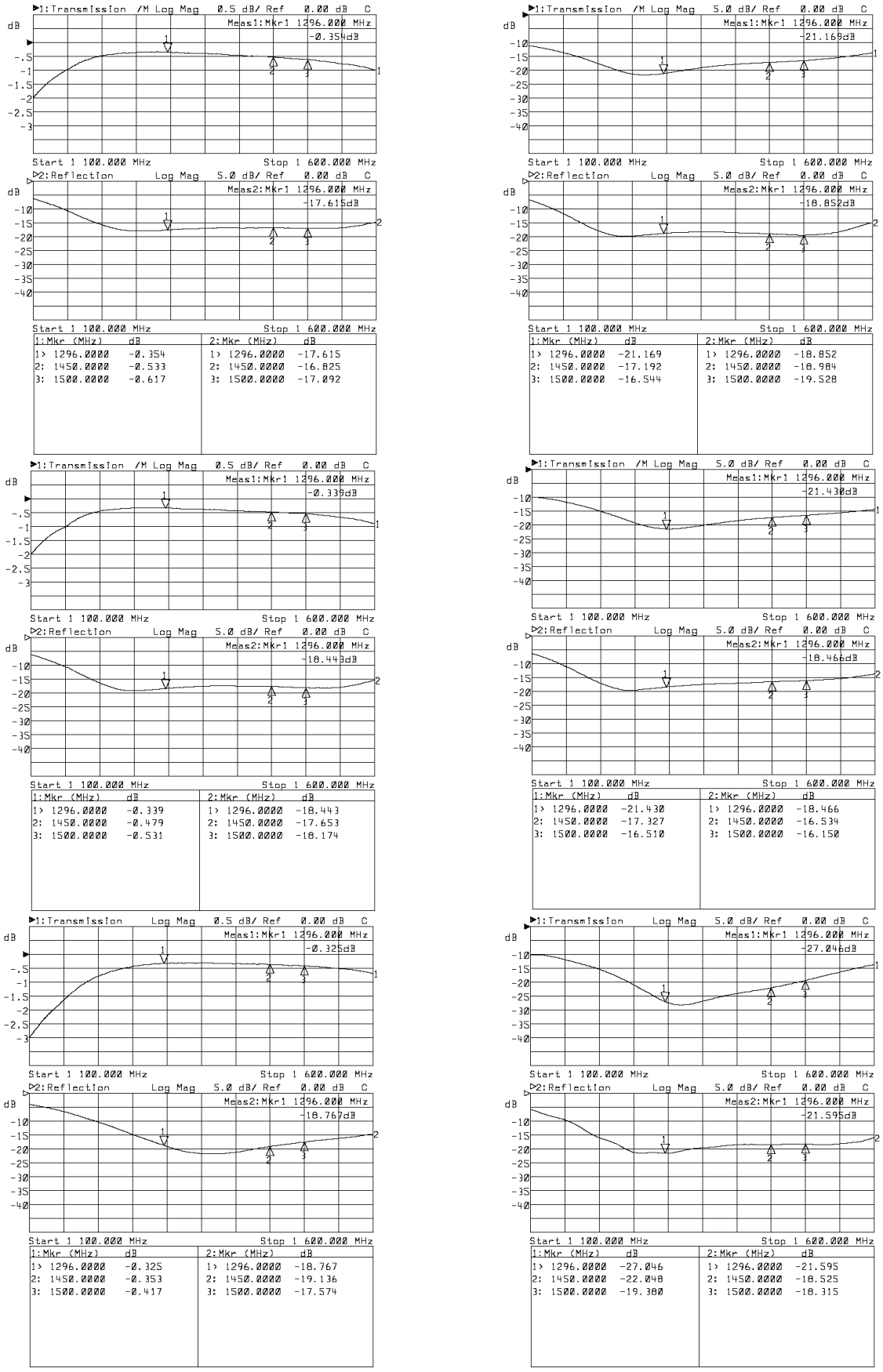

Bild 8 L-Band-Zirkulatoren 1, 2 und 3 nach Umbau; links: vorwärts; rechts: rückwärts.

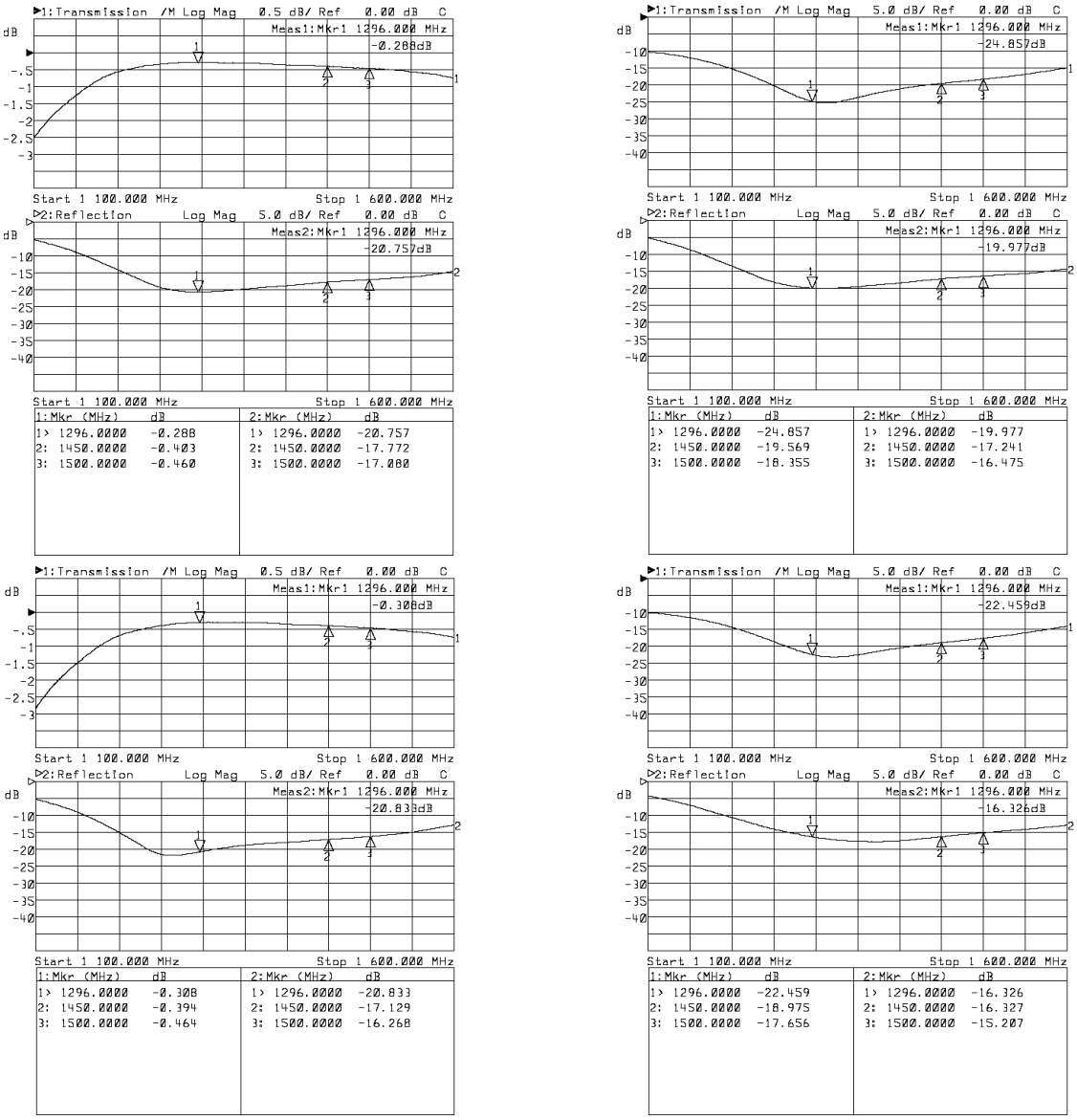

Bild 9 L-Band-Zirkulatoren 4 und 5 nach Umbau; links: vorwärts; rechts: rückwärts.

Das ist die Einfachversion des Umbaus. Sie liefert keine optimalen Ergebnisse, aber hat ohne individuellen Abgleich an 5 Mustern zu brauchbaren Eigenschaften bei 1296 MHz geführt. Die Einfügungsdämpfung lag zwischen 0,29 dB und 0,36 dB, die Isolation zwischen 21 dB und 27 dB, und die Reflexionsdämpfungen vorwärts und rückwärts zwischen 16 dB und 22 dB.

Zur weiteren Verbesserung muß insbesondere das Anpaßnetzwerk der drei Tore verändert werden. Dazu wird der Zirkulator weiter zerlegt. Bild 10 zeigt den Aufbau der Streifenleitung; die Kapazität zur Toranpassung in Form von zwei parallelgeschalteten kurzen offenen Stichleitungen ist gut erkennbar. Hier muß nun ein Abgleich erfolgen, der naturgemäß mühsam ist, da zu jeder Veränderung der Zirkulator komplett auseinander- und wieder zusammengebaut werden muß, um dann gemessen werden zu können. Dabei muß sorgfältig gearbeitet werden, da eine leicht abweichende Montage z. B. den Magnetkreis verändern kann und dadurch zusätzliche Abweichungen im Verhalten bewirkt, die die eigentliche Veränderung der Anpaßschaltung überlagern. Bild 11 zeigt Zusatzkapazitäten aus Kupferfolie, die einfach mit eingeklemmt werden; im Ergebnis wurden dazu Folienabschnitte mit etwa

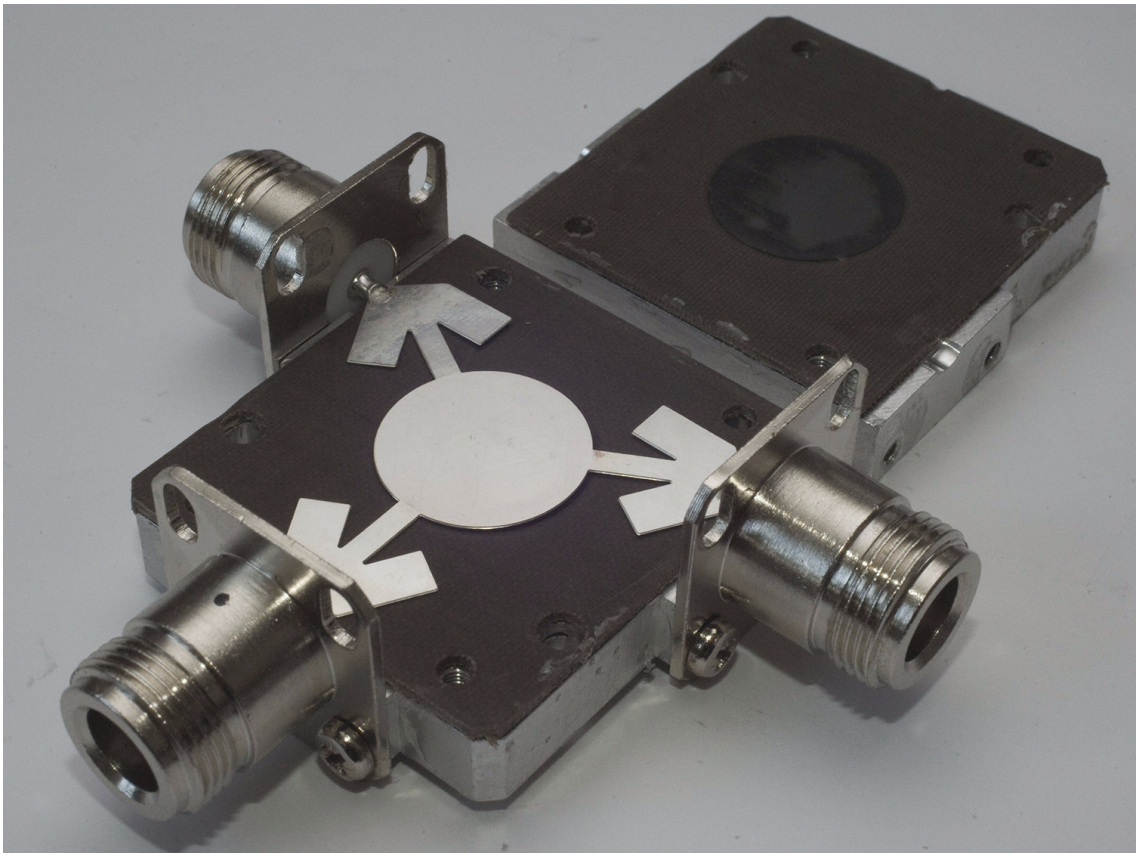

Bild 10 L-Band-Zirkulator zerlegt.

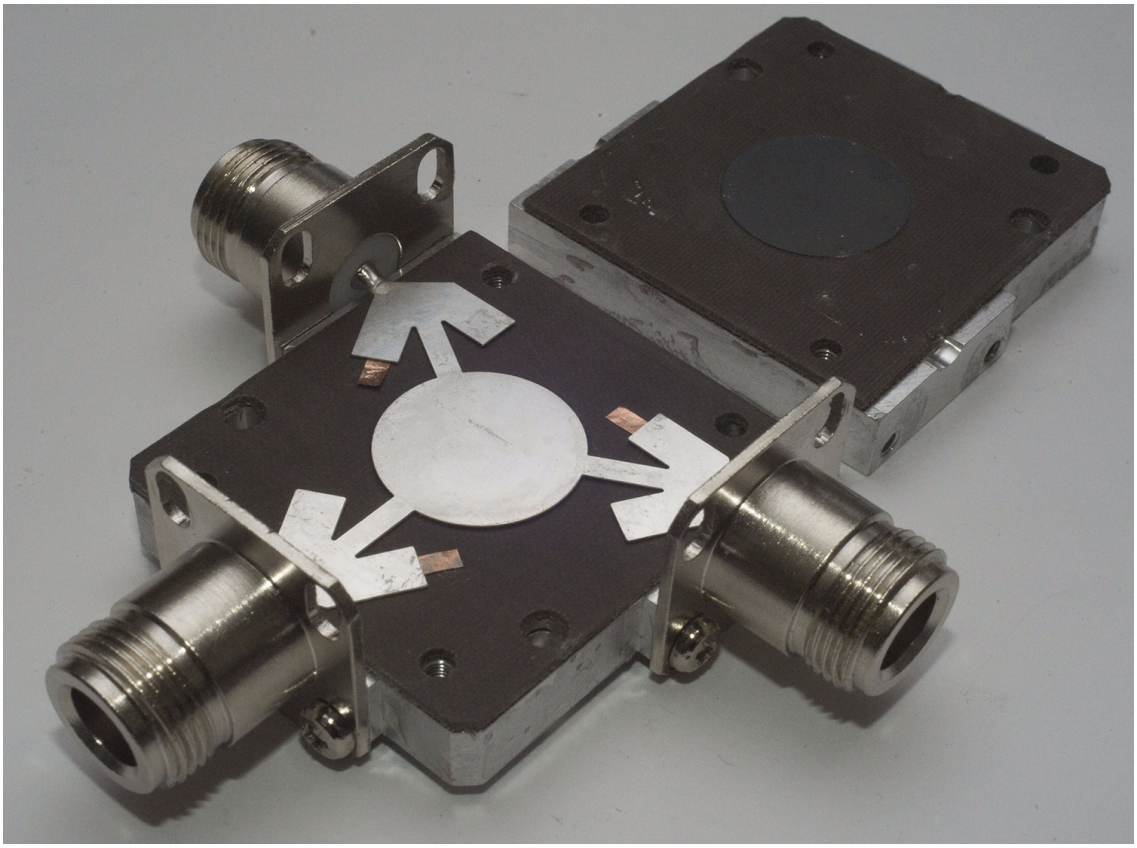

Bild 11 L-Band-Zirkulator mit verlängerten kapazitiven Stichleitungen.

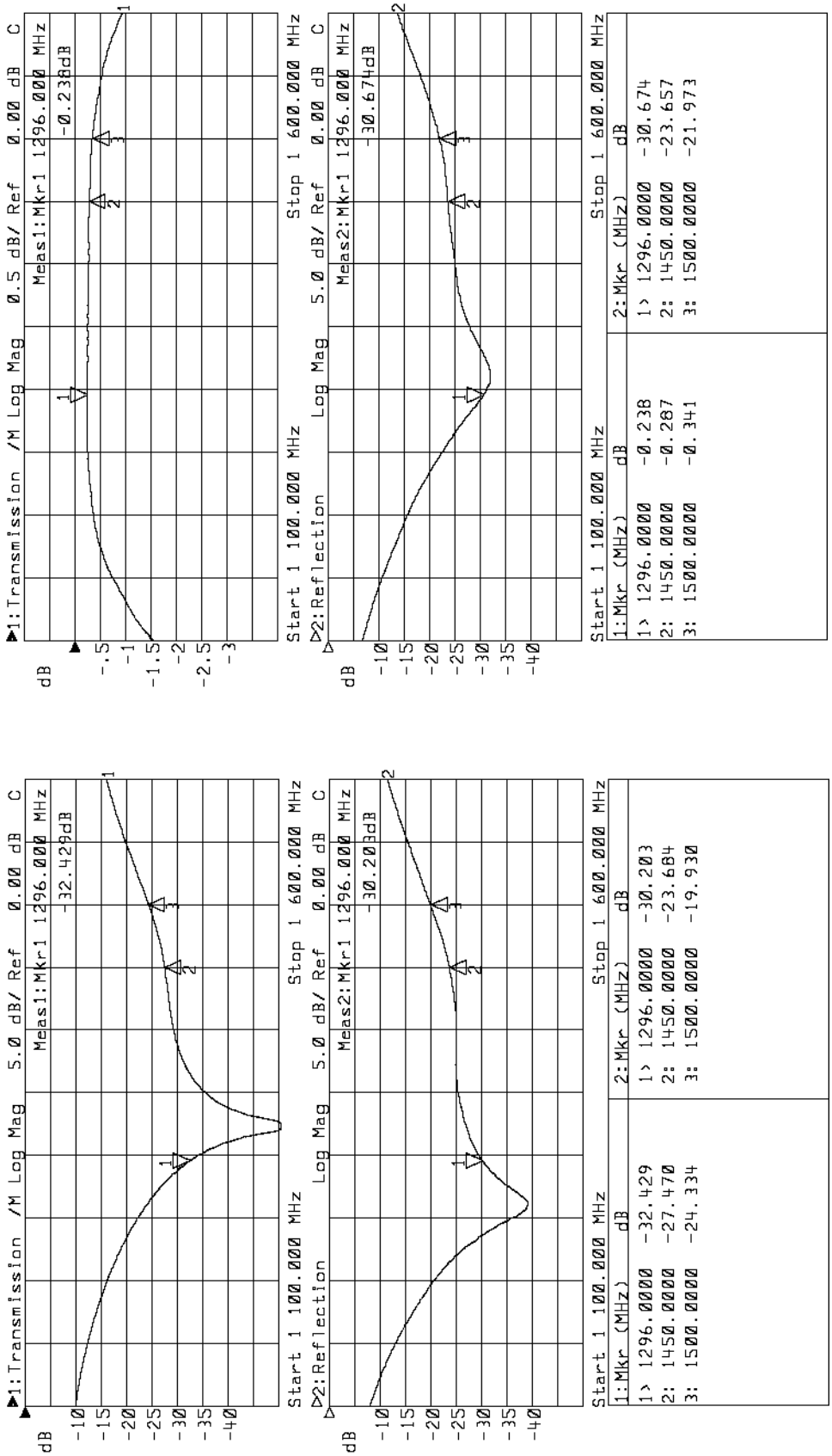

Bild 12 L-Band-Zirkulator 3 nach aufwendiger Optimierung; oben: vorwärts; unten: rückwärts.

4 mm x 4 mm Zusatzfläche verwendet; im Bild ist eine etwas kleinere Anordnung dargestellt. Der Einfachheit halber wird jeweils nur eine der beiden Stichleitungen verändert.

Die neue Anpaßschaltung bedingt auch eine nochmalige Änderung des Magnetfelds. Für die Modfikation wurde das Exemplar 3 ausgewählt und außer den Zusatzkapazitäten auf der Deckelseite noch ein Ms-Blech mit 0,3 mm Dicke zwischen Deckel und Magnet eingefügt. Zum Test kann statt dessen auch die flache Seitenwand verschoben und damit das Magnetfeld verändert werden. Als Ergebnis - nach längeren Versuchen - konnte die Einfügungsdämpfung auf 0,25 dB reduziert werden, in erster Linie durch die bessere Isolation von mehr als 30 dB und die ebenso hohen Reflexionsdämpfungen (Bild 12). Die verbleibenden Verluste werden also voraussichtlich tatsächlich im Zirkulator selbst in Wärme umgesetzt.

Auch hier wurde abschließend ein Belastungstest vorgenommen. Dazu wurde eine TH308-PA mit 400 W Ausgangsleistung bei 1296 MHz mit CW-Punkten angesteuert, so daß sich eine mittlere Leistung von 200 W ergibt. Damit wurde der Isolator für 30 Minuten beaufschlagt; er war währenddessen mit seinem Bodenblech auf eine 2-mm-Aluplatte montiert. Die Aluplatte hat zum Ende des Tests etwa 20°C Temperaturerhöhung gegenüber der Umgebungstemperatur erreicht, der Deckel des Isolators etwa 25°C. Unmittelbar nach dem Test wurde die Einfügungsdämpfung gemessen; sie lag um 0,04 dB höher als im Kaltzustand.

Bei adäquater kühlender Montage sollten also 200-300 W Sendeleistung für diesen Isolator bei üblicher Nutzung noch kein Problem darstellen; wenn das Einschaltverhältnis, das auch bei CW-Dauerschleifen im Kontest 50% nicht überschreitet, tatsächlich begrenzt werden kann, auch noch etwas mehr.

5 Zusammenfassung

Für zwei Typen von Zirkulatoren wurde beschrieben, wie der Nutzfrequenzbereich jeweils in ein Amateurfunkband verschoben werden kann. Beide Typen eignen sich dann als Ausgangsisolator für Leistungsverstärker zum Schutz gegen Fehlanpassung; das wurde zusätzlich durch einen Belastungstest verifiziert.

Die Vorgehensweise und die Hinweise zum Umbau können auch auf andere Ausführungsformen von Zirkulatoren übertragen werden.

6 Referenzen

[1] Meinke, H., Gundlach, F. W.: Taschenbuch der Hochfrequenztechnik (Band 2). Berlin/ Heidelberg: Springer-Verlag 1992, Abschnitt L38.

[2] Pozar, D. M.: Microwave Engineering. Wiley 2005, S. 476 ff.

[3] Philips Semiconductors, AN98035 „Circulators and Isolators, unique passive devices“.

[4] *http://www.megatron.ch/downloads/pdf/mikro/circdat97.pdf*