

Selbstbau eines symmetrischen Antennenkopplers für 1 kW (1)

NORBERT GRAUBNER – DL1SNG

Für die Anpassung nicht-resonanter, symmetrischer Antennen benötigt man einen symmetrischen Antennenkoppler. Neben der hier geforderten Belastbarkeit von bis zu 1000 W PEP – selbstverständlich bei gutem Wirkungsgrad – stellt auch die meist erforderliche Fernbedienung eine große Herausforderung für eine Eigenentwicklung dar. Der folgende Beitrag schildert Hintergründe, Probleme und Lösungen. Wenn sich genügend ernsthafte Interessenten beim FA-Leserservice melden, wäre es möglich, dass eine Bausatzserie aufgelegt wird.

Nur ganz selten hat eine Sendeantenne den gewünschten Anschlusswiderstand von realen 50 Ω, sie hat vielmehr eine hiervon abweichende komplexe Impedanz. Hierunter versteht man die Reihenschaltung eines ohmschen Widerstands (R) mit einem rein induktiven oder rein kapazitiv gedachten Widerstand (X). Im Allgemeinen ändert

die Möglichkeiten der meisten Funkamateure weit überschreiten.

Eine wesentlich flexiblere und raumsparendere Möglichkeit besteht darin, die nicht passenden mechanischen Abmessungen einer Antenne mithilfe eines sogenannten Antennenkopplers auf elektrischem Weg zu kompensieren. Das ist durchaus legitim und steht der natürlichen Eigenresonanz einer Antenne in keiner Weise nach; es wird lediglich die Wirkung der jeweils fehlenden Drahtabschnitte auf elektrische Weise simuliert oder die Wirkung zu langer Abschnitte kompensiert. Genauso machen das auch die kommerziellen Stationen. Der Vorteil ist, dass auch stark verkürzte Antennen verwendet werden können. Lediglich die Abstrahlbedingungen solcher verkürzten Antennen lassen sich mit einem Koppler nicht ändern. Dies äußert sich in einem verringerten Strahlungswiderstand und in einem entsprechend kleinen Wirkwiderstand – was jedoch kein Problem ist, denn mit einem Koppler kann man nicht nur Blindwiderstände kompensieren, sondern auch Wirkwiderstände transformieren.

Da für die unteren Bänder die Realisierung von vertikalen, verkürzten Antennen durch Funkamateure wegen schwierig erfüllbarer Ansprüche an die Erdung kaum zu realisieren sind, bleiben Loop-Antennen oder mittengespeiste, horizontal aufgespannte verkürzte Dipole. Auch Dipole mit elektrisch dicken Strahlern, z. B. zylindrische oder kegelförmige Reusenformen kommen infrage und bieten hinsichtlich ihrer Impedanz – und damit im Wirkungsgrad – gewisse Vorteile [1]. All diese Antennenformen benötigen eine symme-

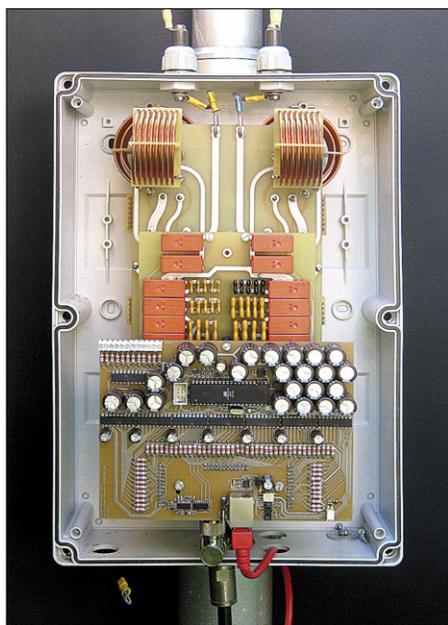


Bild 1: Antennenkoppler im geöffneten Gehäuse mit Steuerplatine (vorn) und Kondensator- und Spulenplatine (hinten)

sich diese Impedanz mit der Frequenz. Manche Funkamateure versuchen, mithilfe spezieller Abmessungen (G5RV, ZS6BKW), mit Sperrkreisen (W3DZZ, Kelemen-Dipole) oder mit sogenannten offenen Mehrfachdipolen (mehrere Banddipole fächerartig angeordnet und gemeinsam gespeist, engl. *fan dipole*), ihre Antennen so hinzutrimmen, dass sie von Natur aus wenigstens in die Nähe von 50 Ω kommen – und das meist noch auf mehreren Bändern. Aber Antennen mit den oft auch als „Meisenringe“ verspotteten Sperrkreisen sind nicht gerade unauffällig und andere Antennen mit „Naturresonanz“ auf den unteren Bändern haben Abmessungen, welche

Technische Daten des Antennenkopplers

Frequenzbereich: 1,8 MHz bis 30 MHz
HF-Eingangleistung: ≤1000 W PEP oder ≤500 W Dauerstrich (bei geringer Transformation auch mehr)
HF-Eingangsimpedanz: 50 Ω, unsymmetrisch
Ausgang: symmetrisch, Anschluss für Zweidrahtleitung über Messing-Schraubbolzen
Ausgangsimpedanz, Realteil: 5 Ω bis 2,2 kΩ bei 1000 W (unter Berücksichtigung der Spannungsbelastbarkeit)
Dipol-Mindestlänge: 2 × 10 m an 10 m Zweidrahtleitung
HF-Ausgangsspannung: ≤8 kV bei Abwärts-Transformation, ≤1,5 kV bei Aufwärtstransformation
Abstimmkonzept: Zwei gleiche L-Dekaden aus Luftspulen und eine C-Dekade aus Glimmerkondensatoren werden mit bistabilen Relais geschaltet
Steuerung: Manuelle Fernsteuerung mittels PC und grafischer Bedienoberfläche über serielle, störsteife RS485-Schnittstelle; Rückmeldung und Anzeige der wichtigsten Abstimmparameter; 900 Speicherplätze
Stromversorgung: 13,8 V Gleichspannung über Standard-Netzwerkleitung mit max. 100 m Länge, Stromaufnahme ≤ 270 mA (0 mA bei abgestimmtem HF-Teil)
Aufbau: wetterfestes Gehäuse für Außenmontage, 370 mm × 250 mm × 193 mm (B × H × T)
Masse: etwa 4 kg

trische Speisung und haben praktisch nie den gewünschten realen Eingangswiderstand von 50 Ω. Es gilt also, einen von Natur aus nicht resonanten Dipol so anzu-steuern, dass die vorhandenen Drähte (bzw. Drahtenden) trotz fehlender Resonanz die eingespeiste HF-Leistung genauso abstrahlen wie eine in natürlicher Resonanz befindliche Antenne. Zusätzlich soll der Koppler die Impedanz der symmetrischen Antenne möglichst verlustarm in einen erdbezogenen Eingangswiderstand von realen 50 Ω transformieren.

■ Konzept und Konstruktion Schaltungsprinzip

Rein theoretisch braucht man für diese Aufgabe (neben einem *Balun*) nichts weiter als eine variable Spule und einen variablen Kondensator [2]. Einer von beiden wird in Längsrichtung geschaltet, der andere quer dazu. Um die Spannung über dem Balun möglichst gering zu halten, wird das Längsglied in zwei Hälften aufgeteilt. Gegen Ende dieses Beitrags werden wir sehen, dass man mit diesem sogenannten L-Glied theoretisch alle denkbaren Impedanzen erreichen kann, egal ob die reelle Komponente der Antennenimpedanz kleiner oder größer als 50 Ω ist und egal ob die Antenne positive oder negative Blindwiderstände hat. Je nachdem, ob die Querimpedanz eingangs- oder ausgangsseitig angelegt wird (Bild 2), erreicht man – ausgehend von 50 Ω – kleinere oder größere Wirkwiderstände. Alle anderen Möglichkeiten,

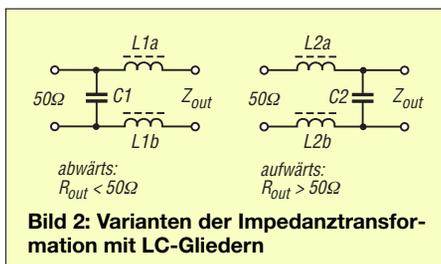
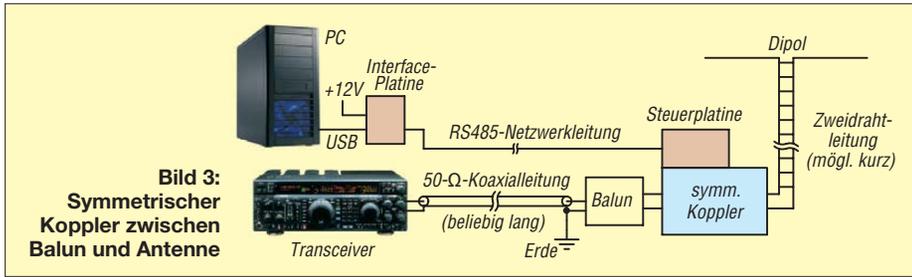


Bild 2: Varianten der Impedanztransformation mit LC-Gliedern



z. B. Pi-Filter oder Z-Match, arbeiten mehrdeutig; sie haben höhere Betriebsgüten und daher auch höhere Verluste. Doch trotz der Einfachheit eines L-Gliedes stößt man bei der Realisierung auf mindestens fünf schwerwiegende Probleme:

- Die zu handhabende Blindleistung, d. h. das Produkt aus den Beträgen von Strom und Spannung, kann trotz der geringstmöglichen Betriebsgüte einer L-Schaltung bis zu hundertmal größer als die zu übertragende Wirkleistung sein. Dies erfordert entsprechend große und möglichst verlustarme Bauteile. Dieses Problem betrifft Pi-Filter und Z-Match allerdings noch schärfer.
- Da unter Amateurbedingungen ein Dipol für das 160-m-Band wohl niemals ausreichend hoch gehängt werden kann und dadurch die Abstrahlbedingungen für DX-Verkehr sehr ungünstig sind, wird der Wunsch nach mehr Sendeleistung aufkommen. Im Hinblick auf den gesetzlich vorgeschriebenen Rahmen (in Deutschland 750 W an einer rein ohmschen Schnittstelle, 1 kW in der Schweiz und bei österreichischen Klubstationen) sollte der Koppler – insbesondere bei sehr kurzen Antennen – Eingangsleistungen von bis zu 1000 W PEP vertragen.
- Wegen der geforderten Belastbarkeit bekommen Abstimmspule und Abstimmkondensator mechanische Abmessungen, die eine erhebliche Mindestinduktivität und Restkapazität mit sich bringen. Insbesondere auf den oberen Bändern wird hierdurch der erreichbare Impedanzbereich eingeschränkt. Erst mit einer Pi-Struktur gelingt es, auf diesen Bändern wenigstens zu einem Kompromiss zu kommen. Insofern ist also eine L-Struktur doch nicht immer optimal.
- Wegen Spannungsproblemen, hoher Leitungsverluste und Transformationsverlusten und weil ein geeigneter Breitband-Balun eine groteske Größe erreichen würde, wäre es unvorteilhaft, eine elektrisch kurze, symmetrische Antenne bei hohen Leistungen über einen Balun direkt an eine Koaxialleitung anzuschließen (mit dem Ziel, im Shack einen gängigen, unsymmetrischen Koppler zu installieren). Vielmehr muss der Koppler zwischen Balun und Antenne

sitzen und deshalb symmetrisch aufgebaut sein (Bild 3).

- Da nicht alle Funkamateure die symmetrische Speiseleitung ihres Dipols (*Hühnerleiter*) direkt bis ins Shack legen können, muss der Koppler gegebenenfalls abgesetzt d.h., im Freien betrieben werden können. Er braucht deshalb ein wetterfestes Gehäuse und eine Fernbedienung, vorzugsweise mit Rückmeldung.

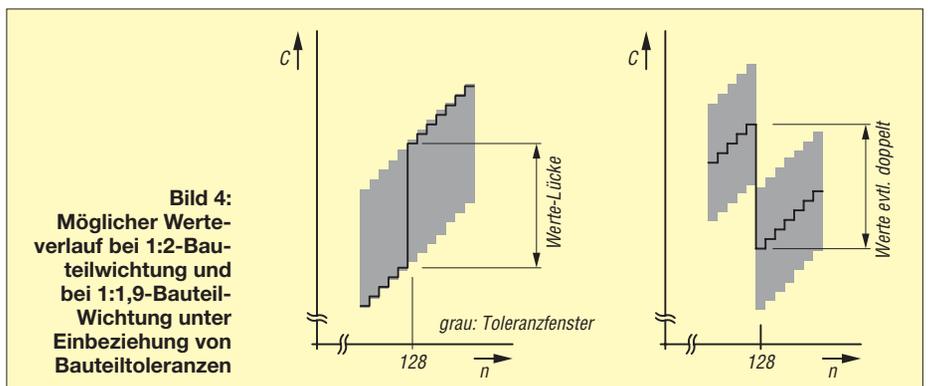
Rollspulen und Drehkos oder Relais?

Viele Koppler arbeiten analog, z. B. mit Rollspulen und Drehkondensatoren. Diese könnte man zur Not auch fernsteuern, z. B. mit Schrittmotoren (manche Funkamateure verwenden sogar Grillmotoren). Aber wenn es sich nicht gerade um Einzelstücke vom Flohmarkt handelt, sind Rollspulen und spannungsfeste Drehkondensatoren teuer und schwer zu beschaffen, sie haben den Nachteil aufwendiger, störanfälliger, raumgreifender Mechanik (nebst zugehöriger Schaltkapazität), die nicht gerade leicht in einer servicefreundlichen Konstruktion unterzubringen ist und sie haben überdies kaum das für einen Frequenzbereich von 1,8 MHz bis 30 MHz notwendige Variationsverhältnis. Preiswerter, raumsparender und zuverlässiger geht es mit binär gestaffelten „Dekaden“, die mithilfe von Relais geschaltet werden. So überstreicht die in diesem Koppler mit Relais realisierte Kondensator-Dekade bei einer Schrittweite von 2,4 pF (Auflösung 12 Bit) einen Stellbereich von 32 pF bis 7,5 nF, die beiden Spulen-Dekaden gehen zusammen von 390 nH bis 65,8 μ H und haben bei 11 Bit Auflösung eine Schrittweite von 40 nH.

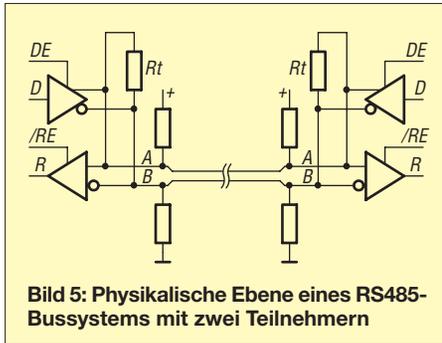
Aufgrund von Bauteiltoleranzen ergibt sich bei relaisgeschalteten Dekaden ein zusätzliches Problem. Schon bei einer Auflösung von nur 8 Bit können bei reiner 1-2-4-8-Wichtung der Bauteile beim Übergang auf die höheren Bits, z. B. von 127 auf 128, Lücken entstehen, die ein Vielfaches der Einzelschrittweite betragen. Dies geschieht immer dann, wenn der Wert des Bauteils für das nächsthöherwertige Bit aufgrund seiner Toleranz einen größeren Wert hat als die Summe der darunter liegenden Bauteile. Eine Auflösung, die feiner ist als dieser größtmögliche toleranzbedingte Schritt, wäre dann sinnlos. Schon bei einer Bauteiltoleranz von 5 % käme man auf nur 5 Bit – eine untragbar grobe Unterteilung. Um feinere Teilungen zu realisieren, wählt man die Schrittweite der höheren Bits etwas kleiner als im Verhältnis 1:2, z. B. 1:1,9. Die dadurch verursachte Überlappung beim Umschalten der höheren Bits stört beim Abstimmen nicht (Bild 4).

Konzept der Kommunikation

Selbstredend wäre ein vollautomatisch arbeitender Koppler eine feine Sache. Dann bräuhete man theoretisch überhaupt keine Fernbedienung – praktisch aber doch, weil die Ansteuerleistung beim Abstimmen zu reduzieren ist und eine Rückmeldung wünschenswert erscheint. Aber erstens war ich mir nicht sicher, ob meine Programmierkenntnisse dafür ausreichen würden und zweitens sollte es für den Fall, dass es die Automatik gelegentlich nicht schafft, eine Möglichkeit geben, das Gerät auch manuell zu bedienen. Der Koppler sollte also eine Fernbedienung bzw. eine bidirektionale Kommunikation bekommen. Bei der Recherche im Internet stieß ich mehrfach auf Lösungen mit einem 25-poligen Kabel und einer direkten, passiven Steuerung der beiden Dekaden [4], [5], die sich in einem abgesetzten Steuerkasten befindet. Eine parallele Verdrahtung über eine Distanz von vielleicht 50 m hinweg fand ich nicht gerade zeitgemäß. Obendrein hätten 25 Adern für meinen Koppler gar nicht



ausgereicht. Denn schon in einem ersten Versuchsaufbau zeigte sich – speziell im 160-m- und 10-m-Band –, dass eine Auflösung von nur 8 Bit pro Dekade nach meinem Empfinden zu rustikal gewesen wäre. Hinzu kamen mindestens drei verschiedene Schaltarten des Kopplers und dazu auch noch der Wunsch nach Rückmeldung einiger analoger Signale; ich hätte ein ziemlich teures Steuerkabel mit deutlich mehr Adern benötigt.



Als Alternative bieten sich sowohl Funk- (z. B. im 868-MHz-Bereich) als auch seriell arbeitende drahtgebundene Lösungen an. Zuerst hatte ich mit einer selbstgebauten UHF-Funklösung experimentiert, musste jedoch feststellen, dass der erforderliche Programmieraufwand meinen verfügbaren Zeitfond weit übersteigt. Berichte über serielle RS232-Verbindungen, die unter der HF des eigenen Senders versagen, fand ich sogar mehrfach im Internet. Gleiches gilt für Drahtlösungen auf Ethernet-Basis, wobei hier ebenfalls das Problem der HF-Einstrahlungsfestigkeit besteht.

Andererseits gibt es in den Fabrikhallen der Industrie, z. B. bei den Autoherstellern, kilometerlange, seriell arbeitende Feldbusse, die eine Vielzahl von Funktionen steuern können und die trotz massivster Störungen durch Punktschweißern, riesige Motoren und getaktete Stromversorgungen sicher arbeiten lassen. Warum sollte das an einem Antennenkoppler nicht auch möglich sein? Der zugrunde liegende RS485-Standard bietet eine solide Grundlage: Die physikalische Ebene besteht aus

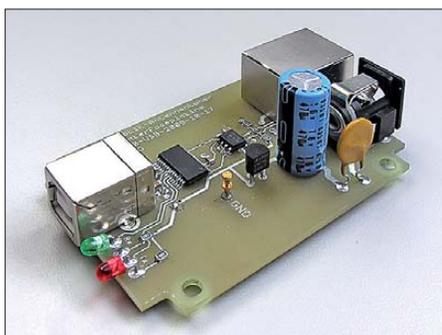


Bild 6: Ansicht der Interfaceplatine (Prototyp); sie passt in ein KEMO-Kunststoff-Kleingehäuse G027. Fotos: DL1SNG

einem einzigen, abgeschirmten Leitungspaar, welches stets im Gegentakt betrieben und nur differenziell ausgewertet wird (Bild 5). Dadurch ist die Verbindung extrem störfest und obendrein noch schnell (ich verwende 57 600 Baud). So wie z. B. auch beim normalen Funkbetrieb, arbeitet der RS485-Bus im Halb-Duplex-Verfahren. Das heißt, es darf immer nur eine Station senden, alle anderen Teilnehmer (sofern es mehrere sind) hören zu. Für den physikalischen Übergang des Busses zur seriellen Schnittstelle eines Mikrocontrollers stehen sehr preiswerte ICs zur Verfügung (z. B. SN75176).

Der RS485-Bus lässt sich mithilfe gängiger, fertig konfektionierter und sehr preiswerter achtpoliger Netzwerkkabel, sogenannter *Patch-Kabel Cat. 5*, z. B. von [3], realisieren. Sie sind wesentlich billiger als zwei Funk-Links und die verschweißten Steckverbinder ersparen viel Arbeit bzw. so manchen Anschlussfehler. Es gibt sie in allen möglichen Längen bis hin zu 30 m. Mithilfe von Kopplungselementen kann man die Leitung fast beliebig verlängern. In meiner Station ist diese Datenleitung mit zahlreichen Kabelbindern ganz einfach am 40 m lange Koaxialkabel zum Koppler befestigt, allerdings ist der Schirm des Koaxialkabels kopplerseitig an einen Tiefenerdter angeschlossen (vgl. Bild 3). Auch bei testweise erzeugter Senderausgangsleistung von 1000 W habe ich nie HF-bedingte Kommunikationsstörungen beobachtet.

Bedienung

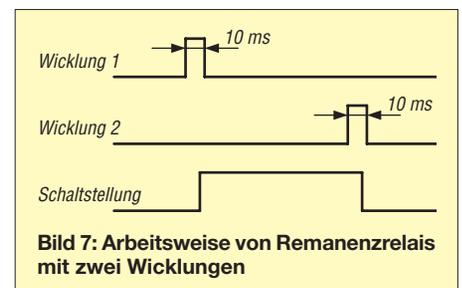
Aber wie sollte denn nun die zugehörige Bedieneinheit im Shack aussehen? Musste es ein Kasten mit aufwendiger Mechanik, krachenden Potenziometern und teuren Displays sein? Die bessere Lösung: Das macht ein PC-Programm – wozu hat man schließlich diesen phantastischen Farbmonitor, dazu ein multitaskingfähiges Betriebssystem und die Fülle der virtuellen Bedienelemente, die eine Programmierumgebung wie *Visual Basic.NET* kostenlos liefert? Um diese Ressourcen nutzen zu können, fehlte nur noch eine winzige Schnittstellenplatine für den Übergang des RS485-Formats auf USB (Bild 6). Zwei LEDs auf dieser Platine zeigen die ein- und ausgehende Kommunikation.

Stromversorgung

Wenn schon ein Steuerkabel sein musste, dann sollte dieses auch zur Stromversorgung dienen! Aber die geplante Schaltung enthielt (anfangs) nicht weniger als 46 Relais. Bei 360 Ω pro Spule hätte das eine Stromaufnahme von 1,5 A bedeutet. Die einzelnen Adern in dem dünnen Patchkabel haben aber nur einen Querschnitt von AWG

26, also 0,128 mm². In einem 50 m langen Netzwerkkabel hätte dies trotz Parallelschalten aller drei noch verfügbaren Adernpaare einen Innenwiderstand von 4,5 Ω bedeutet und die Spannung im Koppler wäre unzulässig stark zusammengebrochen.

Die Lösung: bistabile Relais (*Remanenzrelais*). Diese haben zwei Wicklungen, die je nach gewünschter Schaltrichtung jeweils nur kurz mit Strom versorgt werden müssen; dank eines eingebauten Permanentmagneten verharrt der Anker in seiner neuen Position (Bild 7). Dem ohnehin vorhandenen Mikrocontroller bereitet die Ansteuerung solcher Relais keine Probleme. Elektrolytkondensatoren puffern die kurzen Stromstöße. Der einzige Nachteil: Wegen der zwei Wicklungen pro Relais braucht man auch doppelt so viele Treiber-ICs.



Bistabile Relais haben sogar noch den Vorteil, dass man die Stromversorgung des Kopplers nach einem Abstimmvorgang komplett abschalten könnte. Da dann keine Kommunikation mehr existiert, sind auch keine Störungen derselben zu befürchten. Obendrein kann dann auch nicht der Empfang durch den Takt des Mikrocontrollers im Koppler gestört werden. Zum Glück erwiesen sich in der Praxis beide Befürchtungen als überflüssig. Lediglich die Quarzfrequenz bei 14,7456 MHz und deren 2. Harmonische – die mit 29,4912 MHz in einen nicht allzu spannenden Teil des 10-m-Bandes fällt – sind im Transceiver etwa mit S8 zu hören. Die Wahl dieser Frequenz ist allerdings kein Zufall, sondern optimal für einen 0-%-Timingfehler bei der seriellen Kommunikation mit 57 600 Baud; den Quarz gibts als Standardbauteil. (wird fortgesetzt)

norbert.graubner@freenet.de

Literatur und Bezugsquellen

- [1] Graubner, N., DL1SNG: Breitband-Kegelreusendipol als Multibandlösung für KW; FUNK-AMATEUR 57 (2008) H. 10, S. 1085–1089
- [2] Graubner, N. DL1SNG: Transformation mit LC-Gliedern – Funktion von Antennenkopplern; FUNKAMATEUR 57 (2008) H. 3, S. 273–276
- [3] Reichelt Elektronik, GmbH & Co. KG, Elektronikring 1, 26452 Sande, Tel. (0 44 22) 9 55-3 33; www.reichelt.de
- [4] Thum, W., DC4JG: Dokumentation des Christiankopplers von Christian Krebs, DL3LAC. www.dc4jg.de/html/sym_koppler.html
- [5] Fleischmann, M., DL1OBU: Christian-Antennenkoppler. funk 29 (2005) H.6, S.20–27