

# Funktion und Anwendung von Richtkopplern

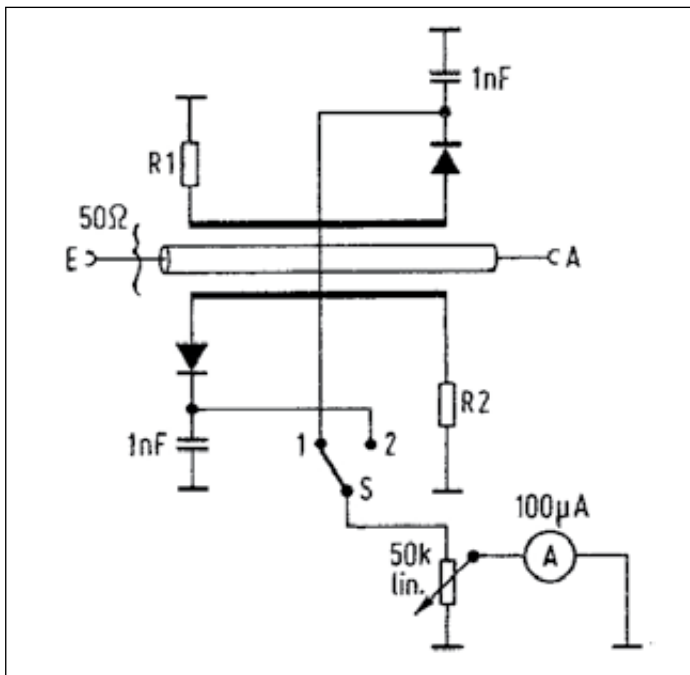


Bild 1: Grundaufbau eines Koaxkopplers

Erfolgt auf einer HF-Leitung eine Reflexion, dann entsteht darauf neben der (zum Ende) hineilenden Welle eine (in Richtung Generator) zurückeilende Welle. Alle mit gewöhnlichen Messgeräten, wie Oszilloskop, HF-Millivoltmeter oder HF-Strommesser, erfassbaren Spannungen und Ströme auf der Leitung und im Generatorkreis sind dann Gesamtgrößen. Daher erweisen sich einfache Spannungs- und/oder Strommessungen als nicht mehr aussagekräftig genug. Mithilfe eines Richtkopplers (Direction Coupler) kann man jedoch die hineilende und die rückeilende Leistung einzeln detektieren. Man spricht dabei von Vorlauf (V) und Rücklauf (R).

## Zwei populäre Typen

Richtkoppler können sich verschiedene Tatsachen zunutze machen, um ihre Aufgabe zu erfüllen. Die verbreitetsten Richtkopplertypen arbeiten nach zwei ganz verschiedenen Prinzipien: Einmal wird tatsächlich die Tatsache genutzt, dass die zu trennenden Wellen aus entgegengesetzten Richtungen kommen,

man könnte diesen Typ „Wellenfänger“ nennen. Zum Anderen gibt es den Transformatorkoppler, der es sich zunutze macht, dass bei der rücklaufenden Welle Strom und Spannung extrem außer Phase liegen.

## Der Koaxialkoppler

Dieser Koppler vom Typ „Wellenfänger“ benötigt eine Raumdimension. Für HF-Anwendungen beruht er in der Regel auf einem Stück Koaxkabel mit dem Wellenwiderstand des Leitungssystem, in welchem gemessen wird. In dieses Kabel sind zwei gegenüberliegende Koppeldrähte eingebracht. Sie werden an entgegengesetzten Seiten mit einem mittelohmigen Widerstand (gegen Masse bzw. Schirmgeflecht) abgeschlossen. An den anderen Seiten kann man zu den Spannungen bzw. Strömen der beiden Wellen proportionale Spannungen abgreifen. Diese Größen sind ja über den Wellenwiderstand verknüpft. Bild 1 zeigt die Struktur dieses Kopplers.

Die Höhen der ausgekoppelten Spannungen hängen von

weiteren Faktoren ab, nämlich Länge der Koppeldrähte, Abstand der Koppeldrähte vom Innenleiter, Signalfrequenz und Größe der Abschlusswiderstände. Hier muss man einen Kompromiss zwischen Empfindlichkeit und Isolation gegenüber der unerwünschten Welle eingehen. Ein üblicher Wert ist 100 Ohm.

Um auf die absoluten Werte der Spannungen der hin- und der rückeilenden Welle schließen zu können, muss man einen solchen Koppler also für bestimmte Frequenzen kalibrieren. Das ist leicht möglich mit einer korrekt abgeschlossenen Leitung. Dort existiert nur hinlaufende Leistung, deren Spannung der Spannung an Generatorseite des Kabels und Last entspricht. Man kann übrigens auf die Leitung auch glatt verzichten und den Koppler einfach zwischen Generator und leistungsangepasste Last schalten. Die ausgekoppelte Spannung entspricht dann der halben Leerlaufspannung des Generators.

## Der Transformatorkoppler

Dieser Koppler benötigt keine räumliche Dimension. Er koppelt an einem einzigen Punkt der Leitung die Gesamtspannung und den Gesamtstrom aus. Wie schafft er es trotzdem, die gewünschten Ergebnisse zu bringen? Das Geheimnis: Der Transformatorkoppler überlagert den ausgekoppelten Strom zweimal mit der ausgekoppelten Spannung, und zwar mit 180° Phasenunterschied. In Bild 2 wird dafür eine technische Möglichkeit gezeigt. Die über C1 und C2 abgeleiteten Teilspannungen sind praktisch im Wert und in der Phasenlage gleich. Der Abstand zwischen den Auskoppelpunkten auf der Leitung ist ja vernachlässigbar gering. In die Verbindungspunkte von C1 mit R1 bzw. C2 mit R2 wird nun noch der ausgekoppelte Strom eingespeist. Er liegt einmal mit der Spannung in Phase und ist am anderen Punkt zur Spannung phaseninvers. Die Bauelemente sind so bemessen, dass der Strom bei Leistungsanpassung (nur V) an R1 eine der dort bereits

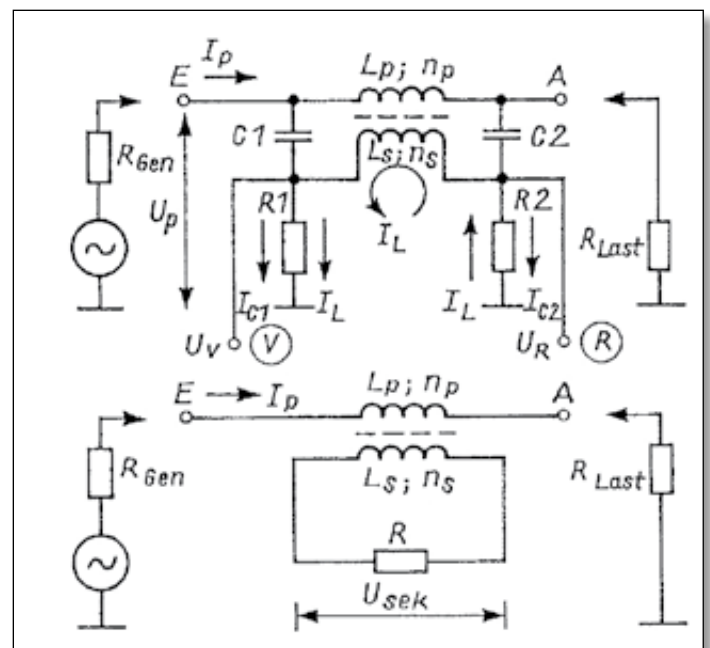


Bild 2: Grundaufbau eines schmalbandigen Transformatorkopplers. Die Pfeile informieren über die Phasenlage.

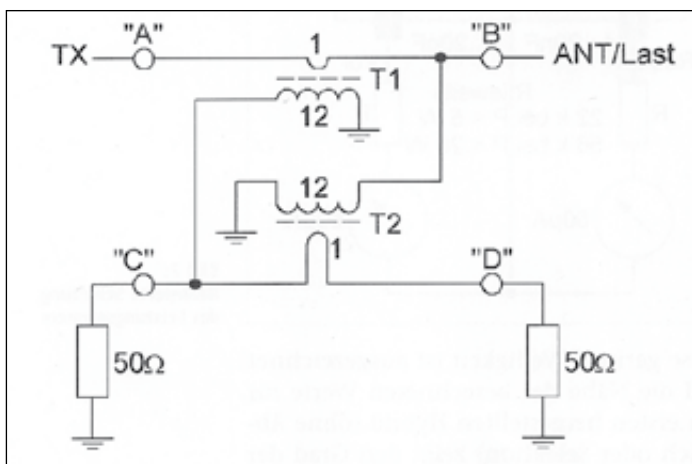


Bild 3: Möglicher Aufbau eines breitbandigen Richtkopplers. An C und D stehen die Signale V bzw. R an.

anliegenden Spannung in Wert und Phasenlage gleiche Spannung erzeugt.

Das bedeutet, dass dann an R2 eine der ausgekoppelten Spannung ebenfalls gleiche, aber phaseninverse Spannung erzeugt wird – die Gesamtspannung ist hier null. Kommt es zur Reflexion, ändern sich diese Verhältnisse: Die Spannung bei R ist dann nicht mehr null, sondern

nimmt mit der Fehlanpassung zu. Bei Totalreflexion sind V und R gleich groß. Man kann folgende Grundgleichungen formulieren:

$$V = U_{ges} + I_{ges} \times R1$$

$$R = U_{ges} - I_{ges} \times R2$$

Wir können  $U_{ges}$ ,  $I_{ges} \times R1$  und  $I_{ges} \times R2$  bei Leistungsanpassung auf 1 normieren (z. B. je 1 V). Dann erhalten wir:

$$V = 1 + 1 = 2$$

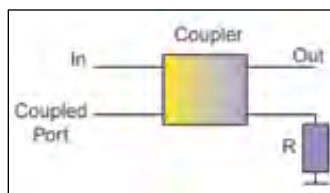


Bild 4: Die Richtkoppler von Mini-Circuits sind einfachst aufgebaut.

$$R = 1 - 1 = 0$$

Nun stellen wir uns eine offene Viertelwellenleitung vor. Sie wirkt auf den Generator wie ein Kurzschluss (dort  $U_{ges}$  null, doppelter Strom wie bei Leistungsanpassung). Der Koppler sei zwischen Generator und Kabel geschaltet. Es folgt:

$$V = 0 + 2 \times 1 = 2$$

$$R = 0 - 2 \times 1 = -2$$

Das Minuszeichen stört nicht, es kommt auf die Beträge an.

Für eine kurzgeschlossene Viertelwellenleitung, die am Generator Gesamtgrößen wie bei Leerlauf produziert, würde gelten:

$$V = 2 \times 1 + 0 = 2$$



Bild 5: Ansicht eines Richtkopplers der Serie TCD

$$R = 2 \times 1 - 0 = 2$$

Also auch hier Betragsgleichheit von V und R als Kennzeichen der Totalreflexion.

### Die Koppler im Vergleich

Beim Koaxkoppler steigt die ausgekoppelte Spannung mit der Frequenz; im Kurzwellenbereich erzielt man hier meist zu wenig, sodass sich dieser Koppler im VHF/UHF-Bereich etabliert hat. Dabei zeigt sich dieser Koppler oft als „Steifenleitungskoppler“ auf einer Platine.

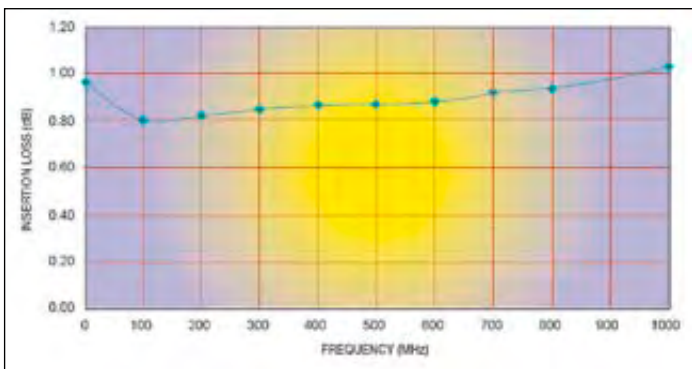


Bild 6: TCD-13-4-75, Einfügedämpfung über der Frequenz

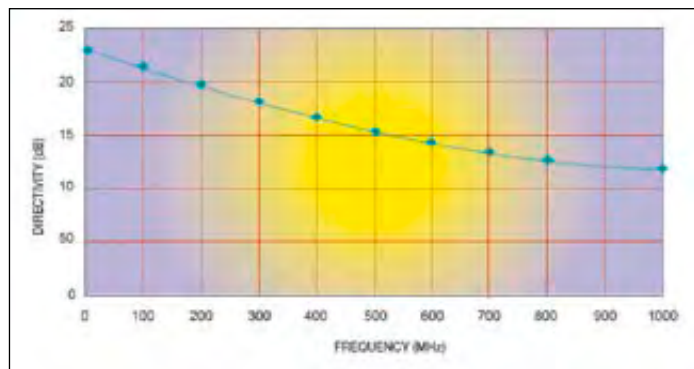


Bild 7: TCD-13-4-75, Richtschärfe über der Frequenz

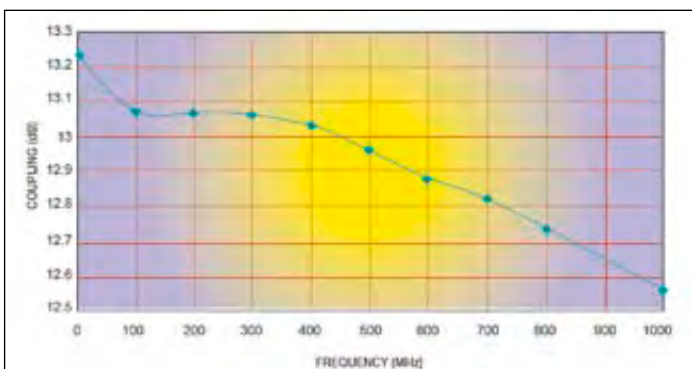


Bild 8: TCD-13-4-75, Koppelfaktor über der Frequenz

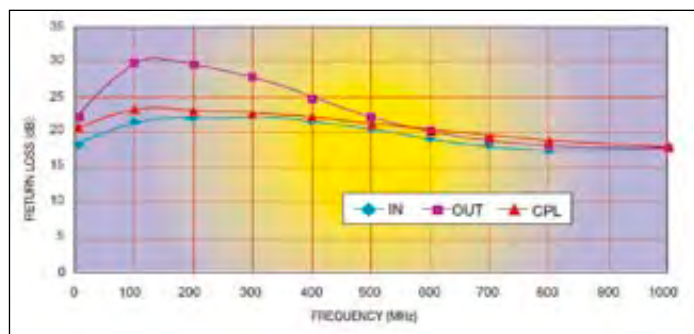


Bild 9: TCD-13-4-75, Anpassungsdämpfung für Eingang, Ausgang und Coupling Port

MODEL NO.	FREQ. RANGE (MHz) $f_L$ - $f_U$	COUPLING (dB)		MAINLINE LOSS (dB)						DIRECTIVITY (dB)				RESISTOR, R1	VSWR (-1)	POWER INPUT, W		CASE STYLE	Price Seq. Qty. (25-49)		
		Norm.	Flatness	L	M	U	L	M	U	L	M	U	Typ.			L	MU				
TCD-9-1W	5-750	8.9±0.5	±0.5	1.2	2.1	1.2	1.8	1.5	1.9	21	17	17	10	15	-	50	1.30	0.5	1	DB714	1.49
■ TCD-9-1W-75	5-500	8.9±0.5	±0.5	1.3	2.1	1.2	1.8	1.3	1.9	21	17	17	10	12	-	75	1.30	0.5	1	DB714	1.49
TCD-10-1W	10-750	10.3±0.5	±0.8	1.3	2.1	1.2	1.6	1.4	2.0	22	17	18	14	15	-	50	1.30	0.6	1	DB714	1.49
■ TCD-10-1W-75	10-750	10.5±0.5	±0.7	1.6	2.1	1.4	1.9	1.5	2.0	22	17	18	14	14	-	75	1.30	0.6	1	DB714	1.49
TCD-13-4	5-1000	13.0±0.5	±0.6	0.7	1.3	0.7	1.3	0.8	1.5	21	17	18	12	15	-	50	1.20	0.5	1	DB714	1.49
■ TCD-13-4-75	5-1000	13.0±0.5	±0.9	1.0	1.8	0.8	1.3	1.1	1.5	22	17	15	-	12	-	75	1.20	0.5	1	DB714	1.49
TCD-18-4	5-1000	17.9±0.5	±0.6	0.7	1.3	0.7	1.1	1.0	1.4	22	11	20	15	18	-	50	1.20	1	1	DB714	1.49
■ TCD-18-4-75	10-1000	18.0±0.5	±0.9	0.9	1.3	0.7	1.2	0.8	1.3	20	15	22	15	18	-	75	1.20	1	1	DB714	1.49
TCD-20-4	5-1000	20.0±0.5	±0.8	0.3	0.9	0.4	0.8	0.7	1.1	20	11	21	15	15	-	50	1.20	1	1	DB714	1.49

■ Denotes 75 ohm model      L=low range [ $f_L$  to  $10f_L$ ]      M=mid range [ $10f_L$  to  $f_U/2$ ]      U=upper range [ $f_U/2$  to  $f_U$ ]

Tabelle 1: Die TCD-Richtkoppler und ihre Eigenschaften

Beim Transformatorkoppler ist man flexibel, was die ausgekoppelten Größen angeht. Ein Hauptproblem ist hier die Frequenzunabhängigkeit: Das Verhältnis von ausgekoppelter Spannung und ausgekoppeltem Strom sollte für die möglichst vielseitige Anwendung eines solchen Kopplers in einem weiten Frequenzbereich konstant bleiben. Mit der vorgestellten C-R-Auskopplung ist das natürlich nicht möglich, dieses Konzept ist schmalbandig. Für Breitbandigkeit setzt man auch bei der Spannungsauskopplung auf einen Transformator (Bild 3). Ringkerne aus Nickelzinkkobalt (Ferroxcube 4) oder aus Manganzink (Ferroxcube 3) haben sich bewährt.

**Anforderungen**

Es gibt eine ganze Reihe von Anforderungen an einen guten Richtkoppler:

- Koppelfaktor/Koppeldämpfung (Coupling) 10...30 dB, je nach Leistung
- Breitbandigkeit, z.B. Einsatzfrequenzbereich 1...50 MHz
- geringe Ausgangsabweichung (Tracking, Output Difference), z. B. max. 0,3 dB
- hohe Belastbarkeit (z.B. 500 W Dauerstrich)
- geringes Eigen-SWR (z.B. max. 1,1) bzw. hohe Reflexionsdämpfung (Return Loss)
- geringe Eigenverluste (Bridge Loss), z.B. max. 0,1 dB

Frequency (MHz)	Insertion					
	Loss (dB)	CPL (dB)	DIRECTIVITY (dB)	RL-IN (dB)	RL-OUT (dB)	RL-CPL (dB)
5	0.96	13.23	22.93	18.39	22.11	20.63
100	0.8	13.07	21.46	21.56	29.75	23.23
200	0.82	13.07	19.9	22.09	29.67	22.99
300	0.84	13.06	18.25	22.15	27.88	22.67
400	0.86	13.03	16.68	21.58	24.86	22.04
500	0.86	12.96	15.34	20.44	22.11	21.08
600	0.87	12.88	14.27	19.08	19.99	20.15
700	0.91	12.82	13.42	17.97	18.61	19.42
800	0.93	12.73	12.75	17.33	17.64	18.67
1000	1.02	12.56	11.88	17.83	17.63	17.78

Tabelle 2: Typische Eigenschaften des TCD-13-4-75

- hohe Richtschärfe (Directivity, Isolation gegenüber der unerwünschten Welle), z.B. min. 20 dB
- geringe Anzeigetoleranz (z.B. max. 5%)
- geringe Einfügedämpfung (Mainline Loss, z.B. max. 1 dB)

**Koppler von Mini-Circuits**

Die Aufstellung der möglichen Anforderungen zeigt, dass die Verwendung eines kommerziell hergestellten Richtkopplers nicht nur eine gute Idee, sondern oft zwingend erforderlich ist, um Qualitätsstandards und Effizienz bei der Schaltungsentwicklung zu sichern.

Die Richtkoppler der Serie TCD von Mini-Circuits nutzen

einen Magnetkernübertrager und haben sehr geringe Abmessungen. Sie stellen Richtkoppler in der Minimalvariante dar, denn ihre Fähigkeit beschränkt sich darauf, ein Signal richtungsabhängig auszukoppeln (Bild 4). Handelt es sich dabei um den Rückfluss, liegt bereits eine wichtige Information vor. Will man auch noch das V-Signal, muss man einen zweiten Koppler einsetzen.

Bild 5 zeigt einen solchen Koppler. Die Grundfläche misst nur 0,15x0,16“. Der Träger ist aus Plastik und besitzt sechs Anschlüsse: Input, Output, Coupled, GND, Terminationswiderstand. Die Terminationswiderstände von 50 oder 75 Ohm müssen allerdings extern hinzugefügt werden.

Um den Frequenzbereich von 5 bis 1000 MHz zu erfassen, hat Mini-Circuits neun Koppler entwickelt (Tabelle 1). Beispielsweise ist der TCD-13-4 ein 13-dB-Koppler für 50 Ohm und der TCD-13-4-75 ein 13-dB-Koppler für 75 Ohm. Aus Tabelle 2 sind die typischen Spezifikationen der 75-Ohm-Exemplare ersichtlich.

Die Eigenschaften sind mehr oder weniger frequenzabhängig. Für den TCD-13-4-75 zeigt Bild 6 den Verlauf der Einfügedämpfung, Bild 7 den Verlauf der Richtschärfe, Bild 8 die Frequenzabhängigkeit des Koppelfaktors und Bild 9 die Anpassungsdämpfung (Return Loss) für Eingang, Ausgang und Coupling Port.

FS