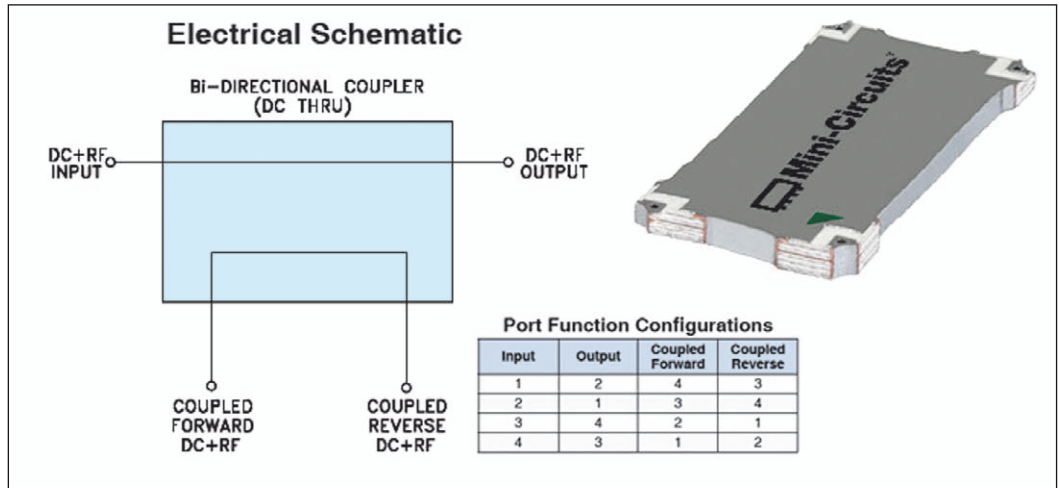


# Kenngrößen und Auswahl eines Richtkopplers

Für Richtkoppler (Directional Coupler) gibt es verschiedene Aufbaukonzepte, wie Leitungskoppler, Lochkoppler oder Transformatorkoppler. Stets ist zu unterscheiden, ob der Koppler unidirektional arbeitet (Einrichtungskoppler) oder bidirektional eingesetzt werden kann (gleichzeitige Erfassung von Vor- und Rücklauf). Da es sich im letzten Fall prinzipiell um zwei gegeneinander geschaltete unidirektionale Koppler handelt, beziehen sich die folgenden Betrachtungen auf den Einrichtungskoppler.



Richtkoppler-Kenngrößen kann man dem Datenblatt entnehmen (Tabelle 1) oder etwa nach [1] qualifiziert mit einem (vektoriellen) Netzwerkanalysator messen (Tabelle 2). Sie bedingen sich teils gegenseitig und sind physikalisch bedingt eventuell relativ weit vom Idealwert entfernt. Dies ist bei einer fairen Beurteilung zwecks Auswahl zu berücksichtigen. Weiterhin darf man die Frequenzabhängigkeit nicht außer Acht lassen.

**Neben den vier Anschlüssen Input/Output und Coupled Reverse & Forward hat der BDCH-25-272 noch einen Masseanschluss zwecks Eindämmung von Störemission**

## Kenngrößen verstehen und bewerten

Die elektrischen Kenngrößen eines Richtkopplers sind:

- Eingangsimpedanz bei korrektem Abschluss der Ausgänge (Main Line und Kopplpfad)

Diese kann direkt durch einen komplexen Widerstand oder

indirekt durch einen Reflexionsfaktor (Return Loss) oder ein SWR beschrieben werden. Letzteres ist oft der Fall.

- Ausgangsimpedanz der Main-Linie bei korrekter Impedanz der Quelle

Aus diese kann direkt durch einen komplexen Widerstand oder indirekt durch einen Refle-

xionsfaktor oder ein SWR beschrieben werden. Letzteres ist wiederum oft der Fall.

Da die Main Line ein einfaches Gebilde (kurze Leitung) zwischen Ein- und Ausgang ist, sind diese beiden Eingangsimpedanzen theoretisch identisch und weichen praktisch kaum vom Ideal ab.

Typical Performance Data \*

FREQUENCY (MHz)	Insertion Loss (dB)			Coupling (dB)		Directivity (dB)						Return Loss (dB)			
	In - Out			In - Cpl Fwd	Out - Cpl Rev	In - Cpl Rev			Out - Cpl Fwd			In	Out	Cpl Fwd	Cpl Rev
	-55°C	+25°C	+105°C			-55°C	+25°C	+105°C	-55°C	+25°C	+105°C				
700.0	0.09	0.09	0.11	26.78	26.73	27.29	26.75	27.51	27.78	25.81	26.66	28.25	28.34	28.34	28.29
800.0	0.09	0.09	0.11	26.32	26.26	26.39	26.50	26.10	26.38	25.57	25.32	29.92	29.79	30.87	30.76
900.0	0.10	0.10	0.12	26.07	26.01	27.12	26.62	25.68	26.37	25.19	24.70	32.83	32.71	35.08	34.95
1000.0	0.10	0.10	0.13	26.01	25.95	25.86	26.57	25.99	25.49	25.05	24.73	38.44	36.38	40.05	41.88
1100.0	0.11	0.11	0.13	26.10	26.04	26.01	27.00	24.75	24.78	25.11	23.44	46.58	38.71	36.13	38.02
1200.0	0.11	0.12	0.14	26.30	26.24	26.99	26.88	25.81	25.00	24.99	24.26	37.74	35.06	31.61	32.54
1300.0	0.12	0.13	0.14	26.56	26.49	28.56	26.72	23.58	27.42	24.62	22.43	32.73	31.59	28.89	29.60
1400.0	0.13	0.14	0.16	26.81	26.72	27.30	27.34	26.05	26.38	26.09	25.28	29.99	29.47	27.43	27.86
1500.0	0.14	0.14	0.16	26.98	26.88	23.50	24.27	22.50	22.81	24.08	22.50	28.38	27.90	26.71	27.13
1600.0	0.15	0.15	0.18	27.03	26.91	23.82	22.36	21.60	22.61	21.67	21.44	27.43	27.08	26.72	27.04
1700.0	0.15	0.16	0.18	26.94	26.80	20.52	19.74	19.12	21.07	19.85	19.41	27.02	26.72	27.27	27.46
1800.0	0.16	0.17	0.19	26.74	26.58	19.50	19.23	18.21	19.13	18.76	17.65	27.25	26.83	28.55	28.79
1900.0	0.16	0.17	0.20	26.46	26.30	18.68	18.35	17.65	18.31	18.04	17.31	27.82	27.32	30.43	30.53
2000.0	0.17	0.18	0.20	26.20	26.04	17.46	17.45	15.83	17.29	16.97	15.51	29.04	28.33	33.18	33.55
2100.0	0.17	0.18	0.20	25.99	25.83	16.77	16.97	16.35	16.33	16.23	15.97	30.79	29.89	37.30	38.33
2200.0	0.17	0.19	0.21	25.89	25.73	17.11	16.65	15.95	16.43	15.60	14.90	33.74	32.51	41.97	46.68
2300.0	0.18	0.19	0.21	25.94	25.78	17.25	16.54	15.77	15.90	15.16	14.28	38.49	36.30	39.82	43.08
2400.0	0.18	0.20	0.21	26.16	26.01	16.34	15.83	15.34	14.96	14.51	13.63	42.51	40.28	35.42	36.25
2500.0	0.18	0.20	0.22	26.60	26.46	16.07	15.14	14.86	14.68	13.83	13.58	35.26	35.40	31.78	32.22
2600.0	0.19	0.21	0.23	27.28	27.14	16.02	14.54	13.95	13.33	13.14	12.11	30.38	30.56	29.12	29.34
2700.0	0.20	0.22	0.23	28.24	28.13	15.39	14.09	13.97	12.16	12.11	11.51	27.15	27.24	27.10	27.19

\* Data at +25°C unless specified otherwise.

Tabelle 1: Kennwerte des High-Power-Richtkopplers BDCH-25-272 von Mini-Circuits

Kenngröße	f = 1,8 MHz	f = 30 MHz
Koppeldämpfung in dB	33,86	34,57
Isolationsdämpfung in dB	73,52	51,93
Richtdämpfung in dB	39,66	17,36
Einfügedämpfung in dB	0,01	0,04
Eingangsreflexionsdämpfung in dB	52,05	35,32
Eingangsreflexionsdämpfung in dB	1,01	1,03

**Tabelle 2: Mit dem VNWA von DF1RN ermittelte Messwerte des Richtkopplers (Quelle: CQ DL)**

**• Ausgangsimpedanz des Koppelpfads**

Auch diese ist wenig kritisch, auch, weil eine nennenswerte Koppeldämpfung besteht. Hinweis: Es erfolgt zwar ein wellenwiderstandsrichtiger Abschluss mit z.B. 50 Ohm, damit es im Koppelpfad zu keiner Reflexion kommt, jedoch wird hier meist eine Spannung (also hochohmig) gemessen.

Zur Charakterisierung der genannten drei Impedanzen dient oft die Nennung eines „Return Loss for all Ports“. Dabei sind Werte um 30 dB üblich entsprechend 0,1% nicht angenommener Leistung.

**• Einfügedämpfung (Insertion Loss, Main Line Loss), auch Durchgangsdämpfung**

Diese Dämpfung des Signals in der Main Line wird weniger von der Qualität der Main Line (Länge, Material, Durchmesser des Leiters, eventuelles Dielektrikum) bestimmt als vielmehr von der relativen Größe der ausgekoppelten Leistung, im Wesentlichen beschrieben durch den Koppelfaktor, also die gewünschte Auskopplung eines Teils der Leistung in der Main Line. Idealerweise wirkt also nur der Koppelfaktor, sodass sich die Einfügedämpfung über diesen definiert. In den Datenblättern wird in aller Regel dieser aber bereits berücksichtigt (abgezogen), was im Sinne hoher Transparenz auch zu begrüßen ist. Anzutreffen sind dann Angaben um 0,2 dB etwa mit dem Hinweis „Does not include theoretical loss“. Etwa für einen Koppler mit einem Koppelfaktor von typisch 26,4 dB wird theoretischer Nennwert von 0,01 dB angegeben. Ein noch geringerer und somit vernachlässigbarer Anteil von Einfügedämpfung

entsteht durch die endliche Isolation.

Aus den Leistungen, die an den vier Ports auftreten, lassen sich die wichtigsten Kenngrößen ableiten:

**• Koppelfaktor (Coupling Factor), auch Koppeldämpfung (Coupling Loss)**

Diesen kann man auf zwei Arten definieren: 1) Verhältnis der Leistung in den Forward-Abschlusswiderstand zur vorlaufenden Leistung. Diese entspricht (nur) bei korrekten Impedanzverhältnissen am Eingang (Input) der eingespeisten Leistung (dann keine Reflexion einer eventuellen rücklaufenden Welle am Eingang des Kopplers, wobei sich der am Eingang reflektierte Anteil zu bereits vorhandenen vorlaufenden Welle addieren würde). 2) Verhältnis der Leistung in den Reverse-Abschlusswiderstand zur rücklaufenden Leistung. Da diese nur bei Reflexion auftritt und oft klein ist, hat diese Definitionsmöglichkeit nur theoretische Bedeutung.

Der Koppelfaktor ist die wohl wichtigste Spezifikation eines Richtkopplers. Dies vor allem auch deshalb, weil er im Wesentlichen die Einfügedämpfung bestimmt. Die Koppeldämpfung hat oft Nennwerte von 20 dB oder 30 dB entsprechend 1% oder 0,1% ausgekoppelter Leistung. Je höher die durchgeleitete Leistung, umso höher kann die Koppeldämpfung gewählt und der Koppler damit idealen Verhältnissen angenähert werden. Allerdings sollte man nicht vergessen, dass bei nicht korrektem Abschluss des Leitungssystems nicht nur hinlaufende, sondern auch rücklaufende Leistung ausgekoppelt wird, da beide Coupled-Ports wellenwiderstandsrichtig abgeschlossen sein müssen.



**Theoretische Main-Line-Einfügedämpfung eines einfachen Kopplers und Koppelfaktor. Für bidirektionale Koppler sind die Angaben zu verdoppeln, vgl. [2] (Quelle: Wikipedia)**

**• Frequenzabhängigkeit des Koppelfaktors (Coupling Flatness)**

Diese ist beim Leitungs- und Lochkoppler bereits prinzipiell gegeben und entsteht beim Transformatorkoppler durch verschiedene Effekte, wie die Frequenztauglichkeit des Kernmaterials, das Ansteigen der Verluste in den Wicklungen mit der Frequenz infolge Skin-Effekt oder die parasitären Querkopplungen (insbesondere kapazitiv). Je nachdem, in welchem Frequenzbereich der Koppler arbeiten soll, muss man also den passenden Grundtyp wählen und immer die Frequenzabhängigkeit im Betriebsfrequenzbereich beachten. Bei dem Wunsch, ein möglichst ideales Frequenzverhalten im gewünschten Frequenzbereich zu erreichen, sind Kompromisse meist nicht vermeidbar.

**• Isolationsdämpfung (Isolation)**

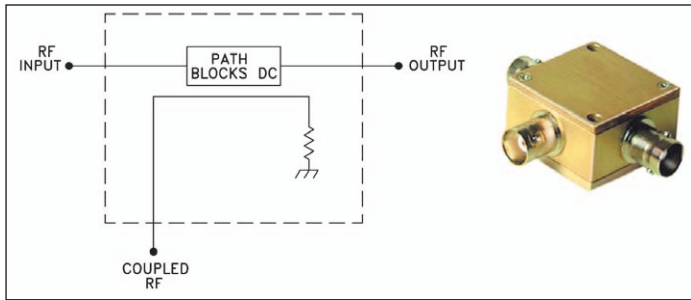
Diese lässt sich auf zwei Arten definieren: 1) Verhältnis der Leistung in den Reverse-Abschlusswiderstand zur vorlaufenden Leistung. Diese entspricht bei korrekten Impedanzverhältnissen am Eingang der eingespeisten Leistung. 2) Verhältnis der Leistung in den Forward-Abschlusswiderstand zur rücklaufenden

Leistung. Da diese nur bei Reflexion auftritt und oft klein ist, hat diese Definitionsmöglichkeit nur theoretische Bedeutung.

Idealerweise sollte eine unendlich hohe Isolation bestehen, jedoch verhindern dies parasitäre Querspfade.

**• Richtschärfe (Directivity), auch (irreführend) Richtdämpfung**

Eine niedrige (hohe) Koppeldämpfung zieht praktisch eine niedrige (hohe) Isolation mit sich. Die Isolation sollte also unter Berücksichtigung der Koppeldämpfung beurteilt werden. Am besten und einfachsten geschieht dies anhand des Unterschieds zwischen Isolationsdämpfung und Koppeldämpfung. Diesen nennt man Richtdämpfung, er stellt also keine neue Information dar, sondern ist gewissermaßen ein komfortables Qualitätskennzeichen. Ein Koppler mit 45 dB (55) Isolation und 20 (30) dB Isolation hat z.B. 25 (25) dB Richtschärfe. Die Richtschärfe ist ein Maß dafür, wie gut der Koppler die vorlaufende und die eventuelle rücklaufende Welle trennen kann. Eine hohe Richtschärfe bedeutet, dass die ausgekoppelte Leistung vorzugsweise in den dafür vorgesehenen Abschlusswiderstand fließt. Gute Werte liegen um



Wie bei vielen anderen Richtkopplern, wurde auch beim ZFDC-20-5 ein Abschlusswiderstand bereits im Gehäuse integriert, sodass der entsprechenden Anschluss entfällt

40 dB. Möglicherweise wichtig: Die Richtschärfe ist in aller Regel stärker frequenzabhängig als die Koppeldämpfung.

### Einsatzfrequenzbereich (Frequency Range)

Aus den genannten Frequenzabhängigkeiten folgt ein Nenn-Einsatzfrequenzbereich des Richtkopplers.

### Eingangsleistung (Input Power)

Jeder Richtkoppler ist durch eine begrenzte Leistungsbelastung gekennzeichnet, welche oft von der Spannungsfestigkeit bestimmt wird. Zu beachten ist hier eventuell eine Reduktion der maximalen HF-Leistung bei gleichzeitigem Gleichstrom (DC).

### Worauf es noch ankommen kann

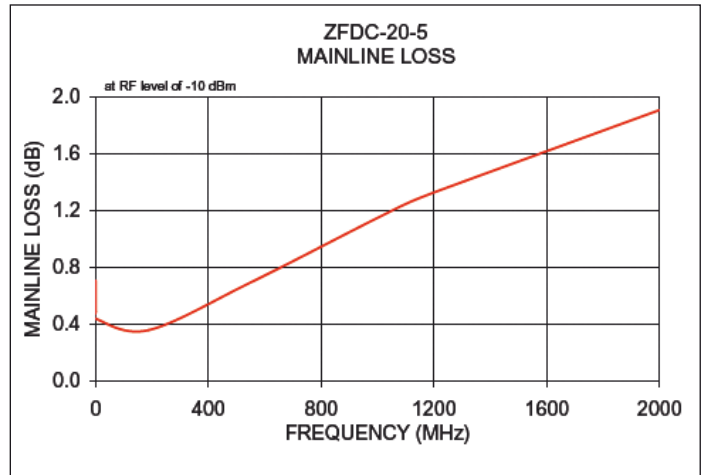
Richtkoppler werden von verschiedenen Firmen angeboten, wie Mini-Circuits, Macom, Bonn-Elektronik, Tacom oder Neosid. Das Ingenieurbüro Hutter, welches Richtkoppler auf Kundenwunsch entwirft und fertigt, nennt folgende notwendigen Daten zur Spezifikation eines Richtkopplers:

- Festfrequenz oder Frequenzbereich
- maximale Leistung (CW)
- gegebenenfalls maximale Pulsleistung (Pulslänge, Wiederholfrequenz)
- Koppelfaktor mit Genauigkeitsanforderung, ggf. maximale Variation über Frequenzbereich

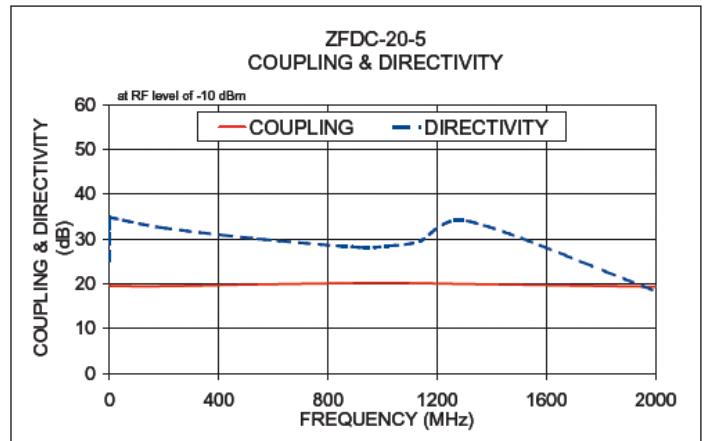
- Richtschärfe mit Genauigkeitsanforderung (Empfehlung >30 dB, besser >35...40 dB)
- Leitungssystem Hauptleitung, Stecker und/oder Buchsen
- Eingangsanpassung Hauptleitung
- Durchgangsdämpfung Hauptleitung
- Eingangsimpedanz Koppelleitungen (evtl. nötig bei Breitbandkopplern)
- Anzahl der Koppelsonden
- Norm und Art der Auskopplungen (Buchsen, Stecker, N, BNC etc.)
- Material Außenleiter Hauptleitung inklusive Oberflächenbehandlung
- Material Stecker/Buchsen Hauptleitung inklusive Oberflächenbehandlung
- Material Stecker/Buchsen Auskopplungen inklusive Oberflächenbehandlung
- Material Innenleiter inklusive Oberflächenbehandlung
- Material Isolatoren der Hauptleitung und der Auskopplungen (z.B. ist Teflon verboten in Bereichen hoher Röntgenstrahlen an Beschleunigern)
- wenn kritisch: maximale Abmessungen und Gewicht

### Weiterführende Literatur:

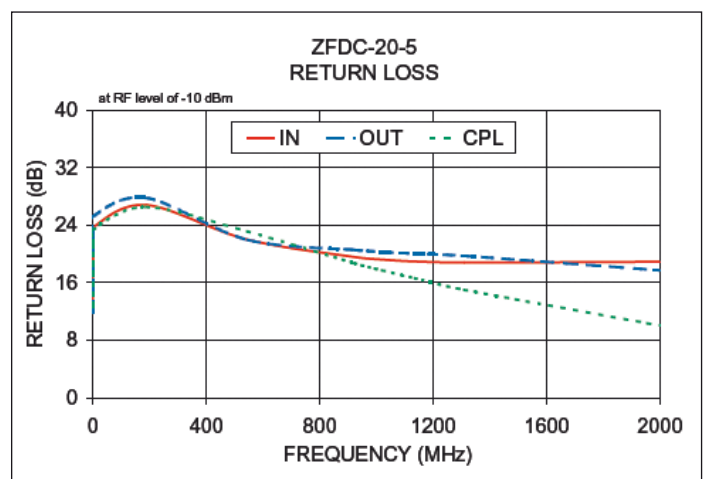
[1] Praktikum Hochfrequenztechnik, Teil 1, Richtkoppler, SoSe 2017, pdf, Internet



Erhebliche Frequenzabhängigkeit des Einfügeverlusts beim ZFDC-20-5



Koppelfaktor und Richtschärfe über der Frequenz beim ZFDC-20-5



Trotz deutlicher Frequenzabhängigkeit ist der Return Loss beim ZFDC-20-5 meist zu vernachlässigen

[2] Macom: How to Specify the Best Directional Coupler for Your Critical Application,

pdf, Internet, Übersetzung in hf-praxis 1/2016 FS