

Ergänzung 04/2021: Messung der Richtschärfe mit dem VNWA (Abb. 5)

In einem Richtkoppler (Directional Coupler) wird ein Teil der HF-Energie abhängig von der Richtung der elektromagnetischen Welle für Messzwecke ausgekoppelt. Spezielle Richtkoppler zur Aufteilung oder Zusammenführung von HF-Energie (Power Splitter /Combiner) sollen uns hier nicht interessieren. Sie arbeiten aber prinzipiell gleich, wobei beträchtliche Energieanteile, z.B. 50% für einen 3 dB-Splitter/Combiner ausgekoppelt werden.

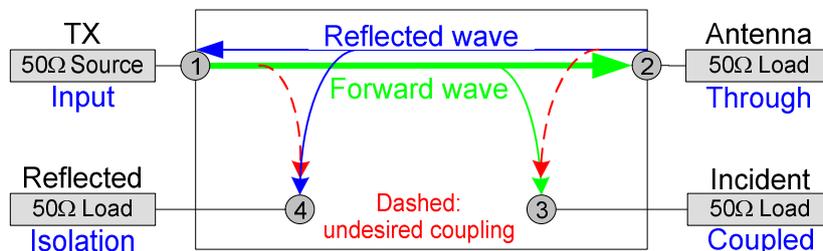


Abb. 1: Die 4 Ports eines Richtkopplers.

Üblicherweise ist die Anordnung von Port 3 und Port 4 bei kommerziellen Richtkopplern umgedreht, d.h. der Coupled Port (Port 3) befindet sich auf der Seite des Input-Ports (in Abb. 1 links) und der Isolation Port (Port 4), wenn er denn überhaupt von außen zugänglich ist, entsprechend rechts auf der Seite des Through-Ports. Diese Anordnung wurde gewählt, um die Konsistenz mit dem in Abb. 2 gezeigten Tandem Match Coupler zu bewahren.

Die Energieübertragung erfolgt von Port 1 (Input) nach Port 2 (Through). Für Messzwecke ausgekoppelte Signale stehen an den Ports 3 (Coupled) und 4 (Isolation) zur Verfügung – an Port 3 proportional zu der in Port 1 eingespeisten Leistung und an Port 4 entsprechend für die gegebenenfalls an Port 2 reflektierte Leistung bei nicht perfektem Abschluss. Die in der englischsprachigen Literatur gängig verwendeten Bezeichnungen sind blau angegeben, die für unseren Power-/SWR-Koppler gebrauchten Bezeichnungen in schwarz.

Alle vier Ports sind mit 50Ω abgeschlossen. Port 3 koppelt einen festgelegten kleinen Teil der vorlaufenden Welle (grün) für unsere Messzwecke aus. Dieser Anteil wird durch die Koppeldämpfung (Coupling factor/-coefficient) charakterisiert. Aus Port 2 fließt also die um diesen kleinen Anteil verminderte HF-Energie, wenn keine sonstigen Verluste auftreten.

Prinzipiell ist solch ein Koppler symmetrisch, es sind also alle Ports vertauschbar. Beschränken wir uns dabei auf die in der Regel auf den Leistungstransport ausgelegte obere Hälfte, ist die Anordnung spiegelsymmetrisch, d.h. die Ports 1 und 2 können ihre Plätze wechseln, mit ihnen die Ports 3 und 4.

Weiterhin wäre idealerweise bei einem sauberem 50Ω-Abschluss an Port 2 die reflektierte Welle (blau) gleich Null und somit Port 4 (Isolation) ohne Signal. Eine letzte Idealisierung würde es wünschenswert machen, dass die Ports 3 und 4 vollkommen isoliert voneinander wären. In der Realität ist das nun nicht ganz so. Es gibt, wenn möglicherweise auch kleine, Reflexionen an Port 2 und unerwünschte Querverkopplungen (rot gestrichelt).

Ziel ist ein optimal angepasster (ohne Reflexionen) und verlustloser Koppler mit einer möglichst hohen Unterscheidbarkeit der Messsignale an den Ports 3 und 4, das sich in einer großen Richtschärfe ausdrückt. Damit, so wünschen wir es uns, sollen die HF-Leistung über einen weiten Frequenzbereich genau messbar und ein VSWR möglichst in der Nähe von 1,0 bestimmbar sein.

Die für den Kurzwellenbereich gewählte Bauform als Stockton/Tandem match coupler sieht dann mit den Portbezeichnungen aus Abb. 1 so aus:

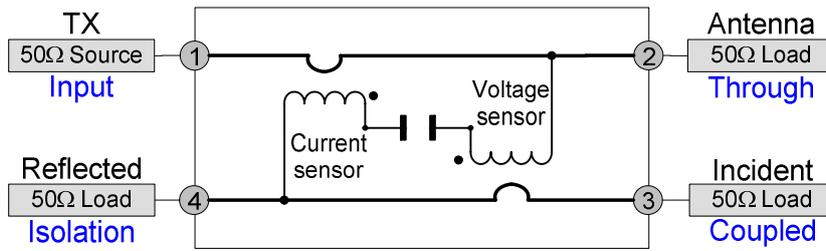


Abb. 2: Stockton/Tandem Match Coupler.

Die Anordnung von Port 3 (Coupled) und Port 4 (Isolation) wurde hier so gewählt wie im 750W-Koppler von DG1KPN (Abb. 6.12) in

<https://dl6gl.de/digitales-swr-power-meter/6-messbruecken.html>

Mit Vertauschen der Polung, z.B. des Voltage Sensors (Punkt ● von links nach rechts in Abb. 2), vertauschen auch die Ports 3 und 4. Das ergäbe den in Abb. 6.0 gezeigten Koppler mit "Forward" (Coupled) links und "Reverse" (Isolation) rechts.

Aus den Leistungen, die an den vier Ports auftreten, lassen sich Kenngrößen ableiten, die die Eigenschaften eines Richtkopplers charakterisieren. Bisweilen werden die nachfolgenden Größen mit positivem Vorzeichen und umgedrehten Leistungsverhältnissen im Argument des LOG angegeben, so in [1].

1. Koppeldämpfung (Coupling factor)

gibt das Verhältnis der Leistung an Port 3 (Coupled) zur eingespeisten Leistung an Port 1 (Input) an. Das ist die eigentliche Spezifikation des Kopplers.

$$C (\text{Port1} \Rightarrow \text{Port 3}) = - 10 \text{ LOG}(P3 / P1) \text{ [dB]}$$

Etwas verwirrend, aber es ist so: Je größer die Koppeldämpfung, je geringer ist die ausgekoppelte Leistung. Die ausgekoppelte Leistung ist $P1 / 10^{(C/10)}$, Beispiele

Koppeldämpfung	Leistungsauskopplung
3 dB	50%
6 dB	25%
10 dB	10%
20 dB	1,0%
30 dB	0,1%

Das trifft für beide Ports P3 und P4 zu. Bei einer Koppeldämpfung von 30 dB produzieren 100W an Port 1 100 mW an Port 3, 10W an Port 2 entsprechend 10 mW an Port 4. Zumindest theoretisch ohne die unerwünschten Querkopplungen (rot in Abb. 1).

Natürlich ist diese Größe frequenzabhängig. Aufgabe ist, für die jeweilige Anwendung ein möglichst flaches Frequenzverhalten im gewünschten Frequenzbereich zu erreichen.

2. Einfügedämpfung (Main line loss und Coupling loss)

Die Einfügedämpfung setzt sich aus zwei Größen zusammen:

(1) Kopplungsverlust (Coupling loss)

$$L (\text{Port 1} \Rightarrow \text{Port 3}) = - 10 \text{ LOG} (1 - P3 / P1) \text{ [dB]}$$

Das ist der Leistungsanteil, der durch die gewünschte Auskopplung von Port 1 nach Port 3 (s.o. Koppeldämpfung) von der eingespeisten Leistung P1 abgezweigt wird.

(2) Leitungsverlust (Main line loss)

$$L (\text{Port 1} \Rightarrow \text{Port 2}) = -10 \text{ LOG}(P2 / P1) [\text{dB}]$$

Das ist der Leistungsanteil, der durch unerwünschte Verluste (ohmsche Leitungsverluste, Verluste im Dielektrikum, Reflexionen durch Fehlanpassungen) entsteht.

Idealerweise wirkt nur der vorgesehene Kopplungsverlust, Beispiele:

Koppeldämpfung	Kopplungsverlust
3 dB	3 dB
6 dB	1,25 dB
10 dB	0,458 dB
20 dB	0,0436 dB
30 dB	0,00435 dB

3. Isolation

Die Isolation gibt das Verhältnis der Leistungen an den beiden Ports P1 (Input) und P4 (Isolated) bei korrektem Abschluss der beiden anderen Ports an.

$$I (\text{Port 1} \Rightarrow \text{Port 4}) = -10 \text{ LOG}(P4 / P1) [\text{dB}]$$

Idealerweise sollte an Port 4 (Isolation) keine Leistung übertragen werden, also hohe Isolation gegeben sein, bedingt durch fehlende Reflexionen im Koppler und ohne die in Abb. 1 rot angedeuteten "Dreckeffekte".

4. Richtschärfe (Directivity)

Die Richtschärfe gibt das Verhältnis der ausgekoppelten Leistungen an den beiden Ports P3 (Coupled) und P4 (Isolated) an.

$$D (\text{Port 3} \Rightarrow \text{Port 4}) = -10 \text{ LOG}(P4 / P3) [\text{dB}].$$

Sie ist ein Maß, wie gut der Koppler die zwei Signale an den Mess-Ports 3 aus der vorlaufenden und Port 4 aus der reflektierten Welle trennen kann. Eine hohe Richtschärfe zeigt an, dass die Leistung vorzugsweise in den gewünschten Port 3 (Coupled) ausgekoppelt wird, wenig durch Streueffekte in den Port 4, s.o. Abb. 1.

Mit Abb. 1 wird deutlich, dass die Richtschärfe maßgebend ist für die Unterscheidung der vorlaufenden Leistung zur reflektierten, also des VSWR, bei nicht idealem Abschluss am Ausgangsport 2.

Die Richtschärfe ist stärker frequenzabhängig als die Koppeldämpfung. Gute Werte liegen um die 40 dB und höher.

In der tatsächlichen Anwendung eines Richtkopplers messen wir nicht Leistungen, sondern Spannungsabfälle an 50Ω-Lastwiderständen. Über $P = U^2 / R = I^2 * R$ werden also statt Leistungen Spannungen in den LOG-Argumenten ins Verhältnis gesetzt. Aus dem Vorfaktor 10 wird infolge des Quadrats von U bzw. I eine 20.

Wenn wir uns den Tandem match-Richtkoppler ansehen, ist sofort ersichtlich, dass Strom- und Spannungskoppler über das Windungsverhältnis 1 (Koax-Kabel) zu N Windungen auf dem Ringkern eine Koppeldämpfung $C = -20 \text{ LOG}(N)$ als reine Rechengröße ergeben. Die Frage ist nur, ob wir die an den Ports 3 und 4 tatsächlich vorfinden und welchen Frequenzgang sie hat.

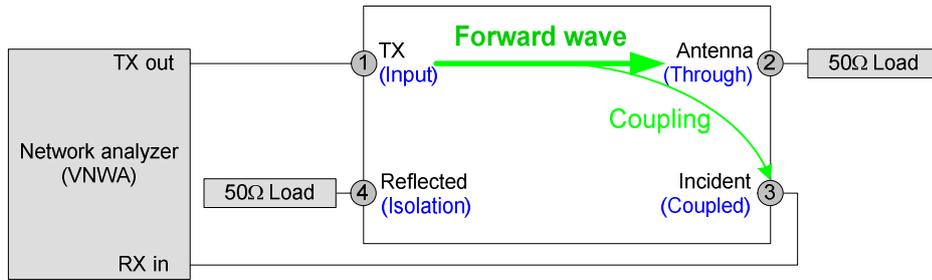


Abb. 3: Messanordnung zur Bestimmung der Koppeldämpfung (Coupling factor).

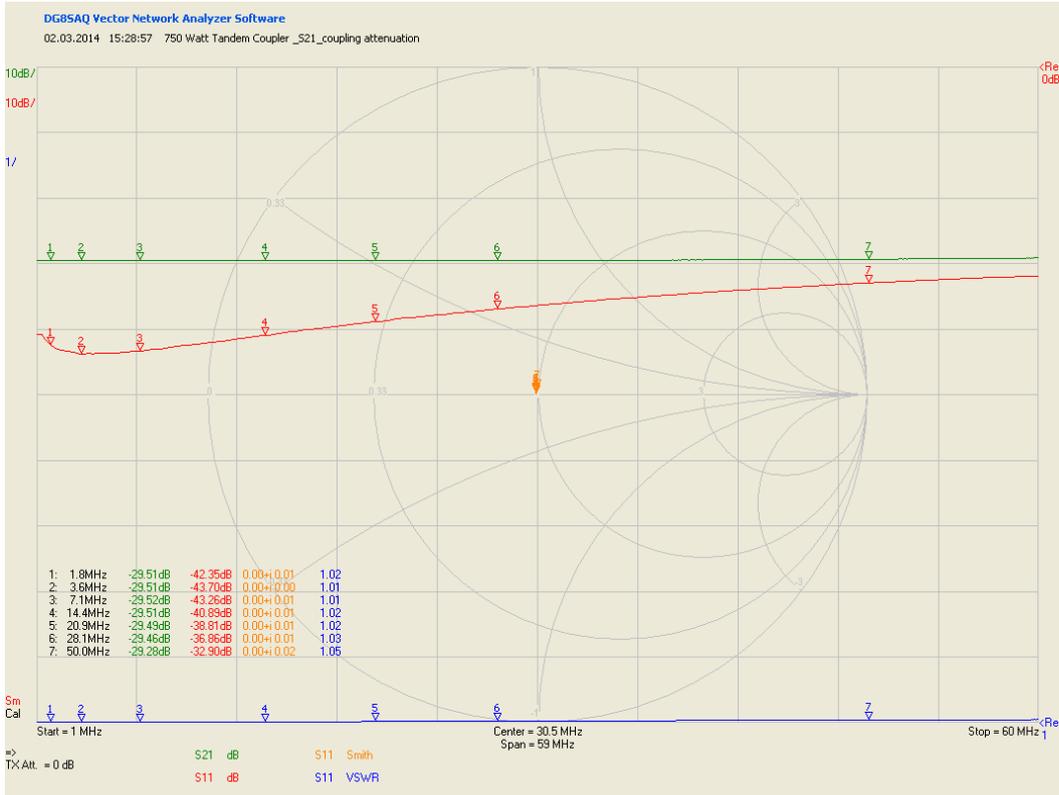


Abb. 4: Messergebnis zu Abb. 3, Kopplungsdämpfung vorlaufende Welle.

Mit dem Windungsverhältnis 1:30 ergibt sich rechnerisch eine Koppeldämpfung von -29,54 dB. Diese ist tatsächlich zwischen 1,8 und 28 MHz mit -29,46 bis -29,52 dB sehr gut getroffen, bei 50 MHz "nur" noch -29,28 dB.

Die Gegenprobe dazu, Messung in der gespiegelten Anordnung (TX out an Antenna (Port 2) und RX in an Port 4, Abschlusswiderstände ebenfalls vertauscht), misst die Verhältnisse für die gegenlaufende Welle Port 2 nach Port 1 mit Auskopplung nach Port 4. Die Ergebnisse waren für den untersuchten 750W-Koppler identisch.

Bleibt noch die Messung der Richtschärfe über einen Umweg, sie ist nämlich wie oben in der Definitionsformel $D = -10 \text{ LOG}(P4 / P3)$ an den Ports 3 und 4 nicht direkt zu messen, sondern aus der Isolation und der Koppeldämpfung:

$$\begin{aligned}
 D \text{ (Directivity)} &= -10 \text{ LOG}(P4 / P3) \\
 &= -10 \text{ LOG}([P1 P4] / [P1 P3]) \quad \text{identisch erweitert mit } P1/P1 \\
 &= -10 \text{ LOG}([P4 / P1] / [P3 / P1]) \\
 &= -10 \text{ LOG}(P4 / P1) + 10 \text{ LOG}(P3 / P1) \\
 &= \text{Isolation} - \text{Coupling factor}
 \end{aligned}$$

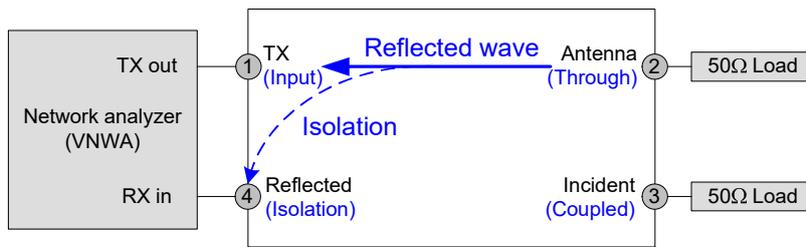


Abb. 5: Messanordnung zur Bestimmung der Richtschärfe (Directivity).

Gemessen wird an Port 4 (Reflected/Isolation), also $\text{Isolation} = \text{Directivity} + \text{Coupling factor}$. Der Coupling factor ergäbe sich nach Abb. 3 aus seiner Messung an Port 3 (Incident/Coupled) mit 50Ω-Abschluss an Port 4 (Reflected/Isolation).

Mit dem VNWA kann der Coupling factor herausgerechnet werden, Anordnung wie in Abb. 5:

1. Zunächst ohne 50Ω-Abschluss an Port 3 (Incident/Coupled) eine THRU-Kalibrierung (mit Totalreflexion am Port 3) durchführen. Damit ist der Coupling factor eliminiert (= 0 dB).
2. Nachfolgende Messung mit 50Ω-Abschluss an Port 3 (Reflected/Isolation) wie in Abb. 5, ergibt $\text{Directivity} = \text{Isolation} - 0\text{dB}$.



Abb. 6: Messergebnis zu Abb. 5, S21 Richtschärfe.

Die Messergebnisse werden in hohem Maße durch die Güte der 50Ω-Abschlüsse beeinflusst. Möglicherweise ergeben verschiedene Abschlüsse verschiedene Ergebnisse. Da wir es hier aber nur mit einem Koppler zur Beurteilung von Sendeleistung und Antennenanpassung zu tun haben, stehen Präzisionsmessungen weniger im Vordergrund.

Ergänzung 23.04.2021: Eine exakte Messung der Richtschärfe mit dem VNWA, die eine "**12 Term Correction**" der S-Parameter aus insgesamt vier Messungen durchführt, ist in <https://dl6gl.de/messungen-an-richtkopplern-mit-dem-vnwa.html> beschrieben.

Die Messungen sind auch mit einem skalaren Netzwerkanalysator, z.B. FA-NWT, machbar. Ein Test mit einem NWT7 ergab allerdings, dass die Richtschärfe gegenüber der in Abb. 6 gezeigten

etwas überschätzt wird. Nachfolgend die den Abb. 4 und 6 entsprechenden Messungen mit einem NWT7.

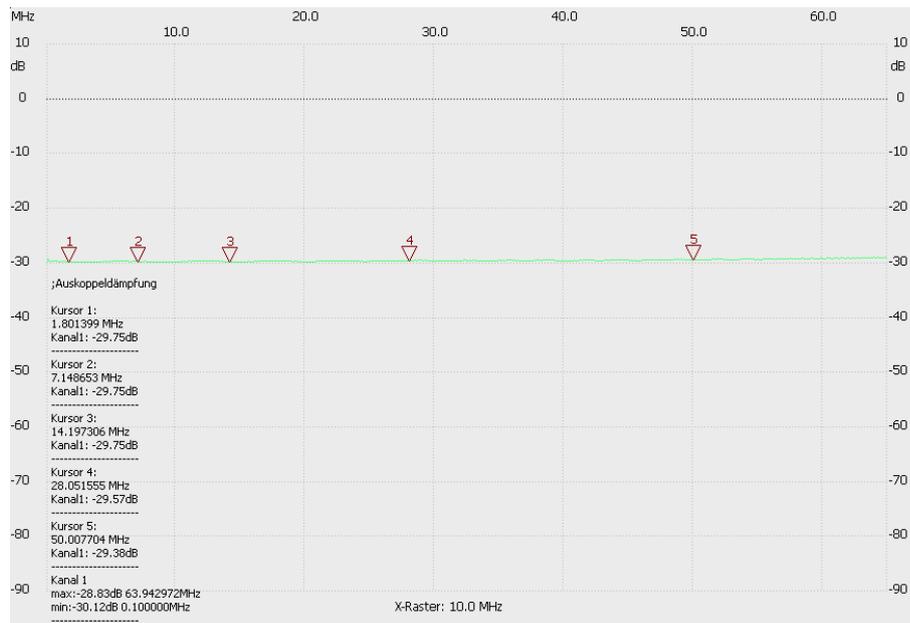


Abb. 7: Kopplungsdämpfung vorlaufende Welle (NWT7).

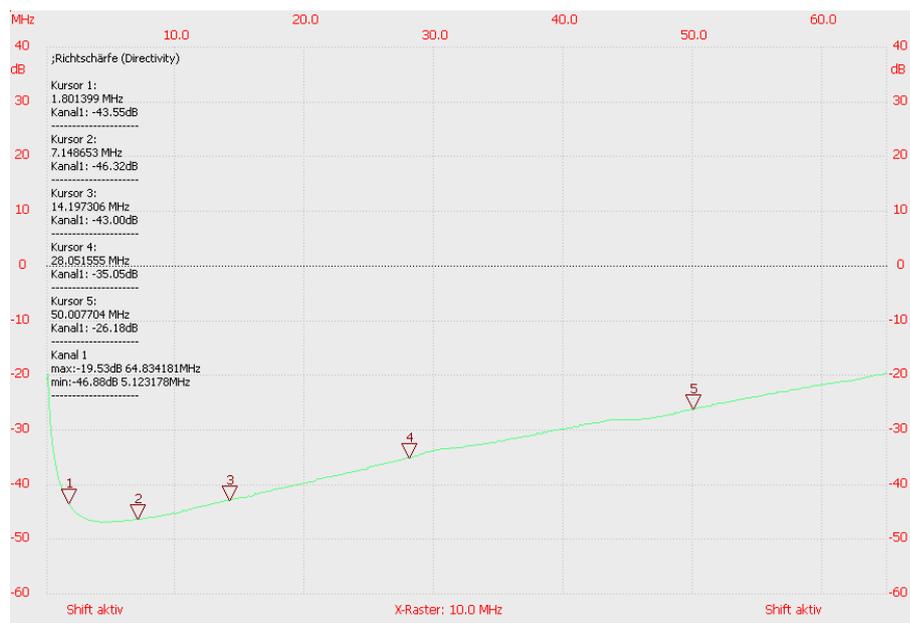


Abb. 8: Richtschärfe (NWT7).

Messungen: DG1KPN.

Literatur z.B.

- [1] <http://www.itc.ku.edu/~jstiles/723/handouts/The%20Directional%20Coupler.pdf>
- [2] http://en.wikipedia.org/wiki/Power_dividers_and_directional_couplers