

Richtkoppler und ihre Messfehler

Die Charakterisierung von Mikrowellenetzen erfordert die Unterscheidung zwischen vorwärts- und rückwärtslaufenden Wellen. Wir zeigen, wie bei Messungen der Rückflussdämpfung und des SWRs Fehler in Abhängigkeit von der Richtschärfe, der Rückflussdämpfung und der Reflexionsphase entstehen können.

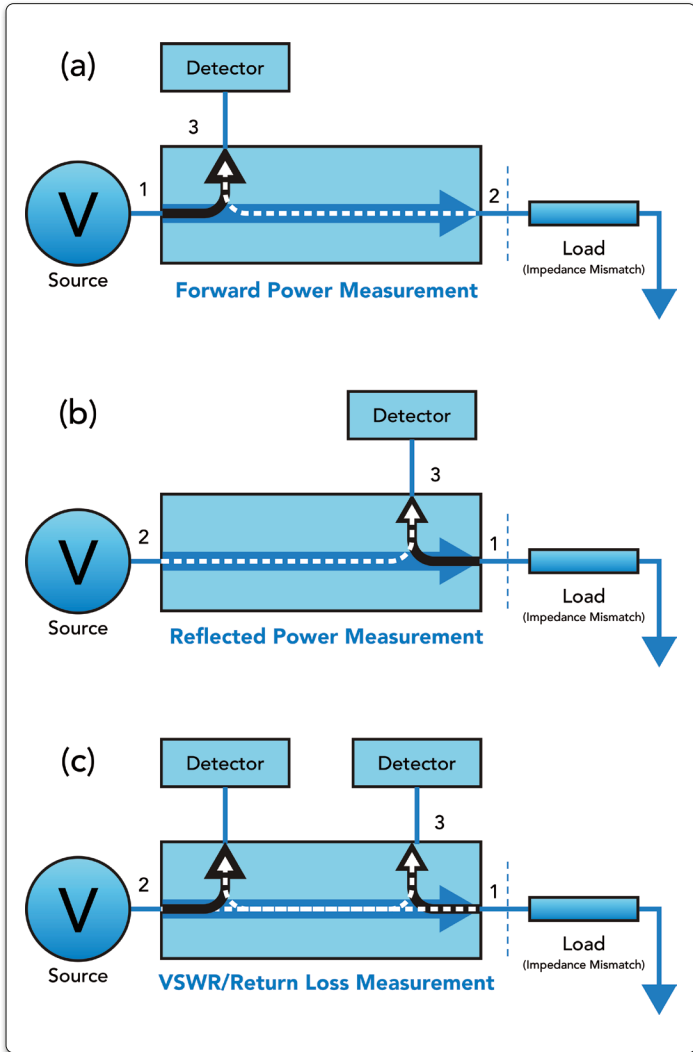


Bild 1: Einsatz eines Richtkopplers zur Messung von (a) Vorwärtsleistung, (b) Rückwärtsleistung und (c) SWR/Return Loss. Der große blaue Pfeil steht für die Eingangsleistung, der schwarze Pfeil für die Leistung, die wir messen möchten, und der rote Pfeil steht für den Störfaktor, der durch die begrenzte Richtschärfe entsteht

Quelle:
Directivity and VSWR Measurements, Understanding Return Loss Measurements,
 Doug Jorgesen and Christopher Marki
 Marki Microwave, Inc.,
 www.markimicrowave.com
 frei übersetzt und gekürzt
 von FS

Die einzige genaue und bequeme Art, die Rückflussdämpfung zu messen, ist ein gut angepasster Richtkoppler oder eine gut angepasste Brücke. Hier erfahren Sie, was darüber hinaus zu beachten ist und warum.

SWR und Rückflussdämpfung

Wichtig für jedes Mikrowellen- oder HF-Netzwerk ist, wie gut die Impedanz der Last zur

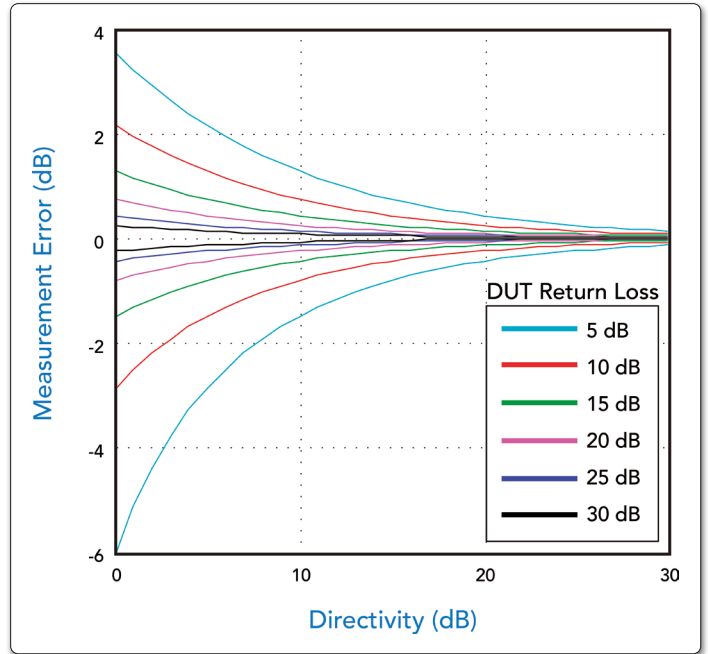


Bild 2: Fehler bei der Messung der Vorwärtsleistung als Funktion der Richtwirkung für verschiedene Werte der Lastrückflussdämpfung bei einer Einfügungsdämpfung von 1 dB

Impedanz der Quelle passt. Diese Anpassung bestimmt, wieviel Leistung abgegeben werden kann bei gegebener Leistung der Quelle. In Mikrowellen- oder HF-Netzwerken stimmt die Impedanz der Quelle mit dem Wellenwiderstand der HF-Leitung überein, was die Betrachtung vereinfacht: Die HF-Leitung führt gewissermaßen die Impedanz der Quelle an die Last heran, daher ist nur dort eine Reflexion möglich.

Wieviel Leistung zurück zum Sender reflektiert und dort absorbiert wird, lässt sich ausdrücken durch die Rückflussdämpfung (Return Loss) oder das SWR, jeweils basierend auf dem Verhältnis der reflektierten Leistung zur in Richtung Last übertragenen Leistung. Traditionell ist das VSWR das Verhältnis von maximaler zu minimaler Spannung der stehenden Welle auf der Leitung. Dieses war einst am leichtesten zu messen, denn

man benutzte nicht isolierte Parallelrahtleitungen und benötigte keinen Richtkoppler. Heute ist die sogenannte Rückflussdämpfung populär, da Netzwerkanalysatoren üblich wurden.

Diese beiden Parameter beantworten die gleiche Frage: Wie stehen hin- und rücklaufende Leistung im Verhältnis? Daraus lässt sich schließen, wieviel Leistung an die Last gelangt.

Um bei der heute üblichen koaxialen Leitung die von einem Prüfling reflektierte Leistung zu messen, ist eine Trennung von vorwärts- und rückwärtslaufenden Wellen erforderlich. Das ermöglicht ein Richtkoppler. In der Praxis ist es das Ziel des Kopplerentwicklers, eine hohe Isolation zwischen den Auskopplerschläüssen zu erreichen. Die entsprechende Leistungskennzahl, die angibt, wie gut ein Koppler zwischen Vorwärts- und Rückwärtswellen unterscheidet,

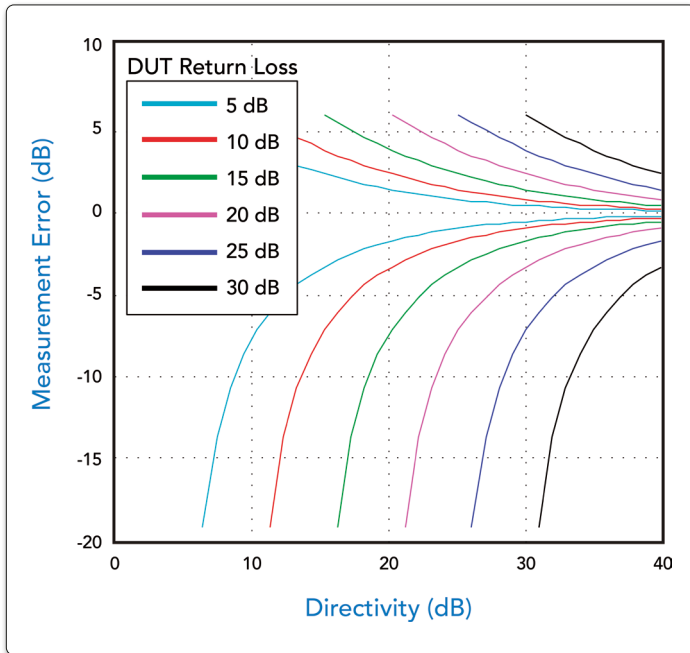


Bild 3: Fehler bei der Messung der reflektierten Leistung in Abhängigkeit von der Richtwirkung

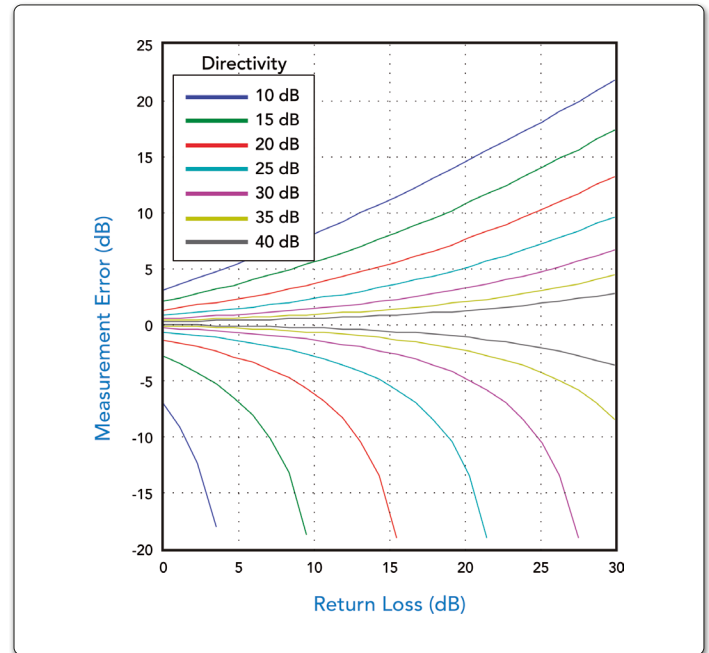


Bild 4: Fehler bei der Messung der reflektierten Leistung aufgrund von Lastfehlanpassungen für verschiedene Werte der Koppler/Brücken-Richtschärfe

nennt man Richtschärfe (Directivity). Eine Formel für die Richtschärfe D lautet:

$$D = S_{31} + S_{21} - S_{32}$$

S31 ... Kopplungsverhältnis/Koppelgrad

S21 ... Einfügungsdämpfung

S32 ... Isolierung

Beachten Sie, dass alle Begriffe negativ in dB zu definieren sind.

Die Einfügungsdämpfung des Kopplers wird in Datenblättern oft nicht berücksichtigt. Daher ist diese Definition nicht so aussagekräftig wie eine Kennzahl für die Messung der Rückleistung, allerdings gültig, wenn es um Vorwärtsleistungsmessungen geht und wird daher in der Industrie häufig verwendet.

Die Bedeutung der Richtschärfe wird im folgenden Beispiel verdeutlicht. Wir wollen die Leistung ermitteln, die an die Last mit einer unbekanntem Impedanz geht und nutzen den Aufbau lt. Aufmachergrafik. Mit dem Koppler können wir einen Teil der hinlaufenden Leistung auskoppeln und mit einem Detektor messen. Wenn die Impedanz des Prüflings perfekt an die Übertragungsleitung angepasst ist, wird keine Reflexion erzeugt und daher wird unabhängig davon, ob der Koppler eine gute oder schlechte Richtschärfe hat, die richtige Leistung gemessen. Nehmen wir nun an,

der Prüfling ist nicht ideal und erzeugt eine Reflexion. Ein Teil der reflektierten Welle wird sich nun aufgrund endlicher Directivity in den Auskoppelpfad einschleichen und sich der dort bereits vorhandenen Spannung überlagern.

Doch wie groß ist der verursachte Fehler? Das liegt nicht nur an der Richtschärfe und somit am Betrag der unerwünschten eingeschleusten Spannung, sondern auch an deren Phasenlage bezüglich der bereits vorhandenen ausgekoppelten Spannung proportional zur Spannung der vorlaufenden Welle. Somit ist eine Vergrößerung wie auch Verminderung der Messspannung möglich und bei einer bestimmten Phasenlage ändert sich diese gar nicht.

Übrigens: Bei einem Leitungs-Richtkoppler, wie hier skizziert, befindet sich der Anschluss für die vorlaufende Leistung auf der gleichen Seite wie der Eingangsanschluss, da es sich um einen Rückwärtswellenkoppler handelt. Dies steht im Gegensatz zu Bethe-Loch-Kopplern und Glasfaserkopplern, die Leistung in Vorwärtsrichtung einkoppeln.

Wie wir in dieser Arbeit zeigen, ist die Wahl eines hochwertigen Kopplers mit hoher Richtschärfe entscheidend für die exakte Messung der HF-Leistung auf einer Übertragungsleitung. Wir leiten Ausdrücke zur Vorhersage von

Vorwärts- und Rückwärtsleistung her und geben Faustregeln zur Begrenzung des Messfehlers. Als allgemeine Tendenz zeigen wir, dass Vorwärtsleistungsmessungen weniger empfindlich auf die Richtschärfe des Kopplers reagieren als Messungen der Rückwärtsleistung.

Messung der Vorwärtsleistung

Bei der Messung der Vorwärtsleistung (Bild 1a) ist die Situation wie bereits gezeigt und an der Schnittstelle ist bei Reflexion und endlicher Directivity die Summe zweier Wellen zu erwarten: die volle vorwärtslaufende Welle, reduziert um den Koppelgrad und die in der Regel störende rückwärtslaufende Welle, die vom Prüfling kommt. Wenn zwei Wellen mit der gleichen Frequenz zusammenkommen, ist die resultierende Welle die vektorielle Addition der Spannungen. Das bedeutet, dass die reflektierte Welle einen variablen Einfluss auf die gemessene Leistung hat, auch abhängig von der Phasendrehung.

Mithilfe der Definition von Richtschärfe und Vektorspannung können wir zeigen, dass die obere und untere Grenze des Fehlers für eine Vorwärtsleistungsmessung gegeben ist durch:

$$P_{eF} = 10 \cdot \log_{10} \left(10^{\frac{-IL - RL - D}{10}} + 1 \pm 2 \cdot 10^{\frac{-IL - RL - D}{20}} \right)$$

Dabei ist P_{eF} der Leistungsfehler, IL und RL sind die positiv definierten Einfüge- und Rückflussdämpfungen in dB und D die ohne S_{21} definierte Richtwirkung ist. Bild 2 lässt erkennen, dass der Fehler bei Richtschärfewerten über 20 dB und bei Return-Loss-Werten unter 20 dB klein bleibt. Die vorwärtsgekoppelten und rückwärtsisolierten Wellen addieren sich als Spannungsvektoren mit unbekannter Phase. Zwei zu einem Szenario gehörende Kurven markieren daher jeweils den negativ oder positiv ausfallenden maximalen Fehler. Vektor-Netzwerkanalysatoren (VNAs) verwenden die Phaseninformation der erfassten Signale in Verbindung mit Kalibrierungsroutinen, um Reflexionen und Unvollkommenheiten der Messgeräte zu korrigieren.

Diese Darstellung zeigt Folgendes:

- Die reflektierte Leistung verursacht erhebliche Leistungsfehler, wenn ein schlechter Koppler verwendet wird.
- Der Fehler kann in einem weiten Bereich liegen, abhängig von der Phase des reflektierten Signals.
- Ein Gerät mit einer Richtschärfe von 15 dB oder besser wird im Allgemeinen den Fehler bei der Messung der Vorwärtsleistung unter 1 dB halten.

• Ein Richtkoppler sollte daher eine Directivity von mindestens 15 dB haben, damit er für Vorwärtsleistungsmessungen geeignet ist.

Messung der reflektierten Leistung

Die Herausforderung besteht hier darin, dass der Koppler zwischen einem Signal mit hoher Vorwärtsleistung und einem viel schwächeren reflektierten Signal unterscheiden muss (Bild 1b). Daher benötigt man gegenüber der Vorwärtsleistungsmessung eine höhere Richtschärfe, um die gleiche Messsicherheit zu erreichen. Wie im Anhang der Originalveröffentlichung abgeleitet, errechnen sich die Messfehlergrenzen der reflektierten Leistung wie folgt:

$$P_{eR} = RL + IL + 10 \cdot \log_{10} \left(10^{-\frac{IL-RL}{10}} + 10^{\frac{D}{10}} \pm 2 \cdot 10^{-\frac{IL-RL-D}{20}} \right)$$

Der Messfehler in Abhängigkeit von der Rückflussdämpfung des Prüflings ist in Bild 3 dargestellt, wiederum für ein Gerät mit einer Einfügedämpfung von 1 dB. Aus dieser Darstellung geht nun hervor:

- Die Messung der reflektierten Leistung ist dramatisch empfindlicher bezüglich der Richtschärfe als bei Vorwärtsleistungsmessungen.
- Wenn die Richtschärfe (abzüglich der Einfügedämpfung) gleich der Rückflussdämpfung ist, ist das Durchlasssignal gleich dem gewünschten gekoppelten reflektierten Signal, was zu einer potenziell vollständigen Auslöschung und einem unendlichen Fehler führen kann.

• Eine Richtschärfe von ~15 dB besser als die Rückflussdämpfung des Prüflings ist erforderlich, um den Fehler in der Größenordnung von maximal ~1 dB zu halten.

• Eine Richtschärfe von ~5 dB besser als die Rückflussdämpfung führt zu Fehlern von maximal ~5 dB.

Um also die reflektierte Leistung genau zu messen bei einer Rückflussdämpfung von weniger als 15 dB, ist eine Richtschärfe von 30 dB oder besser erforderlich. Dies ist deutlich höher als die typischen 15...20 dB der meisten Koppler.

SWR/Return-Loss-Messungen

Eine SWR-Messung (Bild 1c) erfordert sowohl eine Messung der voreilenden als auch der reflektierten Leistung zwecks anschließender mathematischer Verknüpfung. Daher werden die Fehler aus beiden Messungen kombiniert. Treten jeweils die ungünstigsten maximalen Fehler auf, dann führen sie zu einem maximalen Gesamtfehler. Die Rückflussdämpfung erhält man mit den Leistungen und der Einfügedämpfung des Kopplers zu:

$$RL_m = P_{mF} - IL - P_{mR}$$

Wenn die vorwärts- und rückwärtsgekoppelten Anschlüsse die gleiche Richtschärfe haben, können wir die Rückflussdämpfung unter Verwendung der bereits vorgetragenen Gleichungen so ermitteln:

$$RL_m = RL + IL + 10 \cdot \log_{10} \left(10^{-\frac{IL-RL}{10}} + 10^{\frac{D}{10}} + 2 \cdot 10^{-\frac{IL-RL-D}{20}} \cos\theta \right) - 10 \cdot \log_{10} \left(10^{-\frac{IL-RL-D}{10}} + 1 + 2 \cdot 10^{-\frac{IL-RL-D}{20}} \cos\theta \right)$$

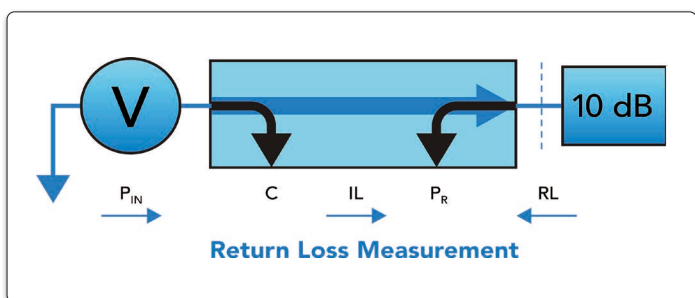


Bild 5: Aufbauzeichnung für das Beispiel

Device	Directivity (dB)	Insertion Loss (dB)	Calculated High Error (dB)	Calculated Low Error (dB)	Measured Return Loss (dB)	Measured Return Loss Error (dB)
Competitor Directional Coupler	19.3	0.2	6.5	-19.2	14.0	6.0
Airline Coupler	23.0	0.1	4.7	-10.9	17.5	2.5
Directional Coupler	30.1	0.5	2.4	-3.3	20.9	-0.9
Directional Bridge	37.3	1.9	1.4	-1.6	19.3	0.7

Tabelle 1: Gemessene Rückflussdämpfungswerte und Fehlerwerte bei verschiedenen Messungen

Der Fehler für die Rückflussdämpfung ist in Bild 4 für verschiedene Richtschärfen und Rückflussdämpfungswerte dargestellt. Man beachte, dass der Messfehler der Rückflussdämpfung fast vollständig von der Messung der reflektierten Leistung dominiert wird, außer bei sehr hohen Werten der Rückflussdämpfung (größer als 5 dB). Aus diesen Verläufen geht hervor, dass eine Richtschärfe von mindestens 10 dB und idealerweise 15...20 dB besser als die Rückflussdämpfung für genaue Messungen erforderlich ist.

SWR-Messbrücke vs. Richtkoppler

Ein Leitungsrichtungskoppler verwendet eine gekoppelte Leitung mit Wellenunterdrückung, um gerichtete Leistungsmessungen durchzuführen. Eine SWR-Messbrücke verwendet eine Wheatstone-Brücke mit breitbandigen Baluns, um eine deutlich höhere Richtschärfe und eine größere Bandbreite (mehrere Dekaden) als ein Leitungsrichtungskoppler zu erzielen. Ihr Nachteil

ist die höhere Einfügedämpfung und eine geringere Durchflussleistung. Dies, da es sich bei der Wheatstone-Brücke um eine Widerstandsschaltung handelt. Beispielsweise hat eine Wheatstone-Brücke, die auf 16 dB Kopplung abgestimmt ist, eine nominale Einfügedämpfung von 1,6 dB. Da die meiste Leistung in den Widerständen verbraucht wird, können SWR-Messbrücken in der Regel nicht mehr als ~1 W Eingangsleistung verarbeiten. Doch mit Richt-

schärfen besser als 30 dB von 200 kHz bis mehr als 10 GHz sind sie für Breitbandmessungen unverzichtbar und vereinfachen den Messaufbau erheblich.

Bidirektionale Stripline-Koppler nutzen die Nahfeldkopplung, um mäßige Richtschärfen (15...25 dB) über mehrere Oktaven bis hin zu sehr hohen Frequenzen (65 GHz) zu erreichen. Sie haben eine geringere Einfügedämpfung und bieten sowohl einen Anschluss für Vor- als auch für Rücklauf.

Für Anwendungen mit hoher Leistung und geringen Verlusten bieten Airline-Koppler vergleichbare Richtschärfen (15...25 dB) mit einem Verlust von weniger als 0,5 dB und einer Belastbarkeit von bis zu 200 W bei einigen Produkten. Der Nachteil ist ein nicht flaches Kopplungsverhältnis, das auskalibriert werden muss.

Beispiel für die Messung der Rückflussdämpfung

Um die Kompromisse bei der Auswahl eines Richtkopplers zu verstehen, ist es lehrreich, die Fehlerquellen zu betrachten, die bei einer tatsächlichen Messung der Rückflussdämpfung auftreten können. Als Beispiel messen wir die Rückflussdämpfung eines 10-dB-Dämpfungsglieds, das in einem einfachen Stromkreis angeschlossen ist (Bild 5). Unter der Annahme, dass der Stromkreis breitbandig ist, sollte die Rückflussdämpfung dieses Bauteils bei 20 dB liegen. Tabelle 1 bringt die gemessenen Rückflussdämpfungswerte und die Fehlerwerte bei verschiedenen Messungen. ◀