

# 10 Messpraxis mit dem Tracking-Generator

Dieses Kapitel widmet sich einem Thema, das nichts mit der Spektrumanalyse zu tun hat. Es lässt sich eher der Netzwerkanalyse zuordnen, genauer der „skalaren Netzwerkanalyse“. Auch wenn das Thema zu einem anderen Fachgebiet der Messtechnik gehört, lohnt es sich, die oft stiefmütterlich behandelte Zusatzfunktionalität vieler Spektrumanalysatoren etwas näher ins Blickfeld zu rücken. Die Funktion wird meist als Option angeboten und bereits bei einer Neuanschaffung oft aus Kostengründen abgewählt. Das ist schade, denn der Tracking-Generator bietet einen Mehrwert zu einem, unterm Strich betrachtet, unschlagbaren Preis. Es gibt nur ein Argument die Option nicht zu ziehen, nämlich das, wenn man bereits einen Netzwerkanalyzer besitzt. Und selbst dann sind die vergleichsweise niedrigen Mehrkosten der Option durchaus lohnend, besonders dann, wenn der Spektrumanalyzer Frequenzen, die über 3 GHz liegen, verarbeiten kann. Der Tracking-Generator bietet dann die Möglichkeit zu einem günstigen PreisLeistungsverhältnis skalare Netzwerkanalyse auch in höheren Frequenzbereichen zu betreiben.

Ist das Gerät mit dieser leistungsfähigen Option bestückt, dann wird man auf der Frontplatte eine zusätzliche Buchse mit der Beschriftung „Ausgang“ vorfinden. Zunächst schauen wir uns an, was sich dahinter verbirgt.

## Hintergrundwissen Tracking-Generator

Der Begriff „Tracking“ bedeutet Nachführen oder Mitziehen, also ein Generator der einer anderen Größe nachgeführt wird. Diese Größe stellt im übertragenen Sinne

den Frequenzsweep des Analyzers dar. Technisch realisiert wird dies, indem der Sweep des LO's verwendet wird.

Ziel ist es, eine Frequenz zu erzeugen, die dem Sweep des internen LO's exakt synchron folgt und dabei den eingestellten Eingangsfrequenzbereich (Start-/Stopffrequenz) überstreicht. Um den Aufwand relativ gering zu halten, wird nicht ein weiterer LO gebaut, der vom gleichen Sweep-Generator angesteuert wird, sondern die Frequenz des LO's wird auf den Bereich der Eingangsfrequenz gemischt. Bild 10.1 zeigt einen Ausschnitt des bekannten Blockschaltbildes, die zum Tracking-Generator zugehörigen Anteile sind orange unterlegt. Man benötigt einen Mischer und einen stabilen Oszillator der auf der Mittenfrequenz der 1.ZF schwingt, im Beispiel bei 3.5 GHz. Dadurch wird die Frequenz des LO's auf die Eingangsfrequenz gemischt, man spricht auch von Rückmischung. Durch dieses trickreiche Schaltungskonzept wird automatisch erreicht, dass die Tracking-Frequenz tatsächlich synchron mitläuft, jede mögliche Einstellung der Start- Stopffrequenzen und der Sweepgeschwindigkeiten werden ohne weiteren Schaltungsaufwand vom Tracking-Generator übernommen.

Eine weitere Reduzierung des Schaltungsaufwands wird erreicht, wenn die Oszillatorfrequenz (im Beispiel 3.5 GHz) vom bereits vorhandenen 2. Oszillator der 2.ZF-Stufe abgeleitet wird. Diese wird mit einem Oszillator gemischt, dessen Frequenz der 2.ZF entspricht, im Beispiel 400 MHz. In diesem Frequenzbereich lässt sich mit relativ wenig Aufwand ein stabiler Oszillator aufbauen, in Bild 10.1 ist die Schaltungsvariante in einem orange gestrichelten Kasten dargestellt.

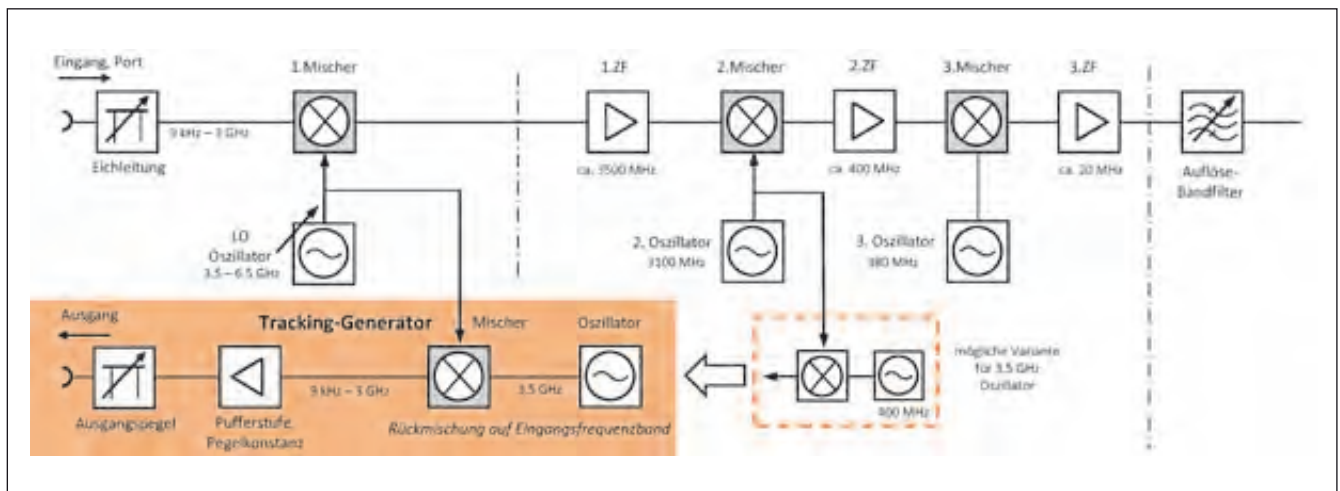


Bild 10.1 Blockschaltbild-Ausschnitt mit Tracking-Generator

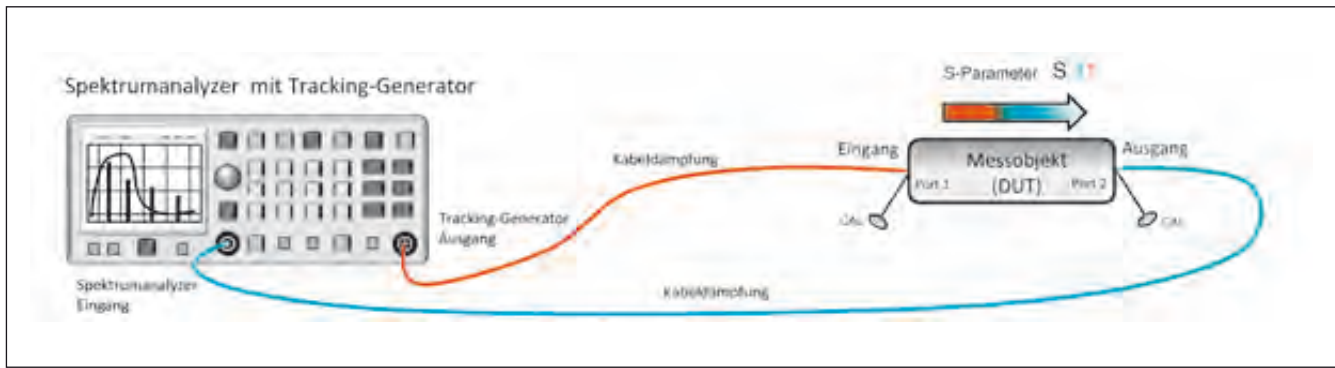


Bild 10.2 Messaufbau für die Untersuchung eines Messobjekts mit dem Tracking-Generator

Die vom LO zurückgemischte Frequenz wird einem Pufferverstärker zugeführt und anschließend über ein schaltbares Dämpfungsglied auf die Ausgangsbuchse gelegt. Der Ausgang liefert ein über den gesamten Frequenzbereich pegelstabiles Ausgangssignal, in weiten Grenzen durch das Dämpfungsglied einstellbar. Der maximale Pegel liegt meist bei 0 dBm.

Heute sind die Komponenten des Tracking-Generators (Mischer, Oszillator, Verstärker) direkt im Spektrumanalyzer eingebaut. Frühere Varianten wurden im separaten Gehäuse aufgebaut, die LO-Frequenz wurde dabei über den für Oberwellenmischung sowieso vorhandenen Ausgang am Analyzer abgenommen.

Damit ist das Ziel, eine dem Sweepvorgang des Analyzers synchron folgende Frequenz, die dem Wert der Eingangsfrequenz entspricht, zu erzeugen, umgesetzt. Nun ist zu klären, wo der Nutzen dieses Aufbaus liegt.

## Hintergrundwissen skalare Netzwerkanalyse

Die skalare Netzwerkanalyse dient zur Untersuchung von Bauteilen (Vierpolen) bzgl. ihres Verhaltens über einen bestimmten Frequenzbereich. So ist es z.B. interessant, den frequenzabhängigen Pegelverlauf eines Filters aufzunehmen. Das kann sehr einfach, wenn auch unkomfortabel, mit einem Generator und einem HF-Millivoltmeter oder HF-Leistungsmesser erfolgen. Dabei werden händisch unterschiedliche Frequenzen am Generator eingestellt und am Filtereingang vorgegeben. Am Filterausgang wird die Stärke des durchgeleiteten Signals gemessen und dokumentiert. Man erhält eine Durchlasskurve.

Komfortabler lässt sich dies mit einem Sweep-Generator und einem Oszilloskop umsetzen. Dabei steuert der Sweep-Ausgang (Sägezahnspannung) des Generators die Horizontalablenkung des Oszilloskops. Dieses Konzept wurde und wird immer noch als kompaktes Gerät angeboten, den sogenannten skalaren Netzwerkanalyzer.

Die Detektion des Signals am Messobjekt erfolgt dabei in der Regel breitbandig. Das hat entscheidende Nachteile.

Bei einer breitbandigen Messung schlagen auch Signalanteile zu Buche, die gar nicht vom Sweep-Generator stammen.

Das können z.B. Oberwellen oder sonstige fremde Frequenzanteile sein, die im Messobjekt entstehen oder von der Umgebung eingestreut werden. Sie verfälschen die aufgenommene Ganglinie des Messobjekts.

Ein weiterer Punkt ist die Dynamik. Breitbandige Messungen sind bis zu Pegel von etwa -60 dBm möglich. Für die Aufnahme einer Durchgangskennlinie wird die Handhabung unter -45 dBm schon schwierig.

Beide Nachteile können durch den Einsatz eines Spektrumanalyzers mit Tracking-Generator beseitigt werden. Der Spektrumanalyzer misst selektiv. Er wird nur das Tracking-Signal aufnehmen, denn seine Selektion läuft ja synchron mit dem Generatorausgang mit (rein schaltungstechnisch ist der Ablauf umgekehrt – der Generator läuft der Selektion hinterher). Dabei kann die Selektions-Bandbreite (RBW) je nach Wunsch eingestellt werden. Durch die Selektivität steht auch eine höhere Dynamik zur Verfügung, nämlich die des Analyzers, oft mehr als 100 dB. Eventuelle Oberwellen des Generators haben keinen Einfluss auf das Messergebnis. Die Sweepgeschwindigkeit kann nach den Erfordernissen des Messobjekts angepasst werden.

Hier werden nun die klaren Vorteile für den Spektrumanalyzer mit Tracking-Generator deutlich sichtbar. Professionelle Netzwerkanalyzer (vektorielle Netzwerkanalyzer) arbeiten selektiv.

Den grundsätzlichen Messaufbau für eine skalare Netzwerkanalyse zeigt Bild 10.2.

Bevor mit den Messungen begonnen wird ist eine Kalibrierung des Messaufbaus durchzuführen. An den Messleitungen (blau und orange) auf Bild 10.2 steht „Kabeldämpfung“ angeschrieben. Diese Kabeldämpfungen und alle weiteren Zubehörteile wie z.B. Adapter usw. gehen in das Messergebnis ein und verfälschen es. Das kann vermieden werden, wenn anstatt des Messobjekts zunächst eine „Durchverbindung“ hergestellt wird.

Anschließend wird der Analyzer auf den Kalibriermodus geschaltet. In manchen Geräten wird die Funktion auch als Normalisierung bezeichnet.

Wird der Vorgang gestartet, erfolgt ein Sweep entsprechend der eingestellten Frequenzspanne. Die so aufgenom-

menen Messwerte werden in einen Speicher geschrieben, aus welchem dann die nachfolgenden Messungen korrigiert werden. Es ist zu beachten, dass bei Veränderung der eingestellten Frequenzspanne die Kalibrierung ungültig wird, meist weist ein Symbol auf dem Display auf diesen Betriebszustand hin.

Ist der Messaufbau kalibriert bzw. normiert, zwei symbolische Stecknadeln mit der Bezeichnung „CAL“ illustrieren die abgesteckten Grenzen, kann das Messobjekt angeschlossen werden. Der Eingang des Messobjekts wird mit dem Tracking-Generator verbunden, Leitung orange. Der Ausgang des Messobjekts wird auf den Spektrumanalyzer Eingang gelegt (blaue Leitung).

Eine Umkehr der „Messrichtung“ wäre ebenfalls denkbar, denn es könnte ja, je nach Art des Messobjekts, von Interesse sein, wie gut oder wie schlecht die Dämpfung in der umgekehrten Richtung (Ausgang zu Eingang) ist. In der Netzwerkanalyse bedient man sich der S-Parameter, sie bieten eine genaue Definition, was und in welche Richtung gemessen wird. Es würde deutlich den Rahmen sprengen, die Hintergründe der S-Parameter zu beschreiben, deshalb nur eine kurze Erläuterung zum Aufbau der Nummerierung. Die S-Parameter setzen auf eine Port-Nummerierung auf, man spricht auch von Toren. In Bild 10.2 wurde der Eingang mit Port 1 und der Ausgang mit Port 2 bezeichnet. Messobjekte, die mehrere Anschlüsse besitzen, wie z.B. ein Power-Splitter, erhalten dann weiterführende Nummern. Im aufgezeigten Messaufbau wird der S-Parameter S 21 gemessen (Vorwärtsübertragungsfaktor). Die erste Zahl steht für die Port-Nummer, an welchem das Signal (Welle) das Messobjekt verlässt. Hier wird der Detektor angeschlossen. Die zweite Zahl verkörpert den Port, an welchem ein Signal eingespeist wird. Im Beispiel also Port 1. Die Zuordnungen wurden entsprechend farblich hinterlegt.

Würde man die angesprochene umgekehrte Richtung betrachten wollen, dann sprechen wir vom S-Parameter S12 (Rückwärtsübertragungsfaktor). Für die Netzwerkanalyse ist damit genau definiert, was zu tun ist. Was bedeutet dann der S-Parameter S 11?

Man speist in Port 1 ein und misst mit dem Detektor gleichzeitig an Port1. Macht das Sinn?

Durchaus, denn so kann die Reflexion dieses Ports gemessen werden (Eingangsreflexionsfaktor). Allerdings muss messtechnisch zwischen vorlaufender und reflektierter Energie unterschieden werden. Diese Trennung erfolgt durch ein direktives Element, z.B. einer VSWR-Brücke. Wir sehen hierzu noch ein Messbeispiel. Die S-Parameter setzen auf Daten auf, die den Betrag (Magnitude) und die Phasenlage beinhalten. Für die skalare Netzwerkanalyse bleibt die Phasenlage außen vor.

Nachdem die Kalibrierung erfolgt ist und die Messrichtung für das Messobjekt festgelegt wurde, sollte noch Raum zu Überlegungen bzgl. der auftretenden Pegel sein. Solange nur passive Messobjekte untersucht werden, ist die

Wahl des Ausgangspegels am Analyzer unkritisch. Übliche Werte liegen zwischen -20 dBm und 0 dBm. Änderungen des Ausgangspegels führen in der Regel nicht zum Verlust der Kalibrierung. Trotzdem sei ein Blick ins Handbuch des verwendeten Analyzers empfohlen, um im Detail zu wissen, mit welchen Aktionen die Kalibrierung verfällt.

Bei aktiven Komponenten ist auf den Eingangsbereich zu achten. Das Messobjekt darf nicht übersteuert werden, außer man möchte genau dieses Verhalten bewusst herbeiführen. Natürlich darf analog dazu der Ausgangspegel den Analyzer-Eingang nicht übersteuern oder gar gefährden. Zu hohe Pegel müssen über ein externes Dämpfungsglied mit entsprechender Leistungsaufnahme abgebaut werden. Die Eichleitung ist dafür ungeeignet, ihre maximale Leistung liegt bei 2 Watt. Wird das vorgeschaltete Dämpfungsglied nicht mit in die Kalibrierung mit einbezogen, kann es als Offset im Analyzer berücksichtigt werden.

## Messaufbau Transfermessung S-Parameter S21

Der Messaufbau orientiert sich im Wesentlichen nach Bild 10.2. Sollten aktive Komponenten gemessen werden, dann sind entsprechende Dämpfungsglieder vorzusehen. Weiterhin ist es sinnvoll, einen DC-Block vorzuschalten, um den Mischer vor eventuell vorhandenen Gleichspannungen (z.B. bei Zuführung der Hilfsenergie über das Koaxkabel - BIAS) abzusichern.

Wir beginnen mit einem einfachen Messobjekt, im Beispiel ca. 20 m Kabel Typ RG58. Nach einer Kalibrierung wird das Kabel angeschlossen, und wir erhalten eine Kurve (blau), wie im Bild 10.3, linker Plot, dargestellt.

Der Kurvenverlauf entspricht den Erwartungen, ein mit steigender Frequenz gleichmäßiges Anwachsen der Dämpfung. Die leichte Welligkeit rührt von Inhomogenitäten der Kabelstrecke und deren geringen Fehlanpassungen her.

Sinn dieser Messung:

Der Dämpfungsverlauf der Kabelstrecke wird dokumentiert, um spätere Veränderungen erkennen zu können oder eventuell können gespeicherte Daten für die nachfolgende Weiterverarbeitung, z.B. Offseteinstellung, verwendet werden.

Die zweite Kurve (orange) des linken Plot's zielt auf eine spätere Veränderung der Verhältnisse hin. Es handelt sich um die gleiche Kabelstrecke, allerdings wurde eine fehlerhafte Steckverbindung eingefügt. Bei relativ niedrigen Frequenzen ist die Dämpfung erheblich, bei hohen Frequenzen dagegen nehmen die Dämpfungsunterschiede gegenüber der intakten Verbindung ab.

Das Beispiel zeigt, dass eine schlechte Kontaktierung im Stecker nicht unbedingt mit einer hohen Dämpfung einhergehen muss. Bei hohen Frequenzen können z.B. kapazitive Effekte das dargestellte Fehlerbild abschwächen. Die Aufnahme des Dämpfungsverlaufs über einen brei-



# Messpraxis mit dem Tracking-Generator

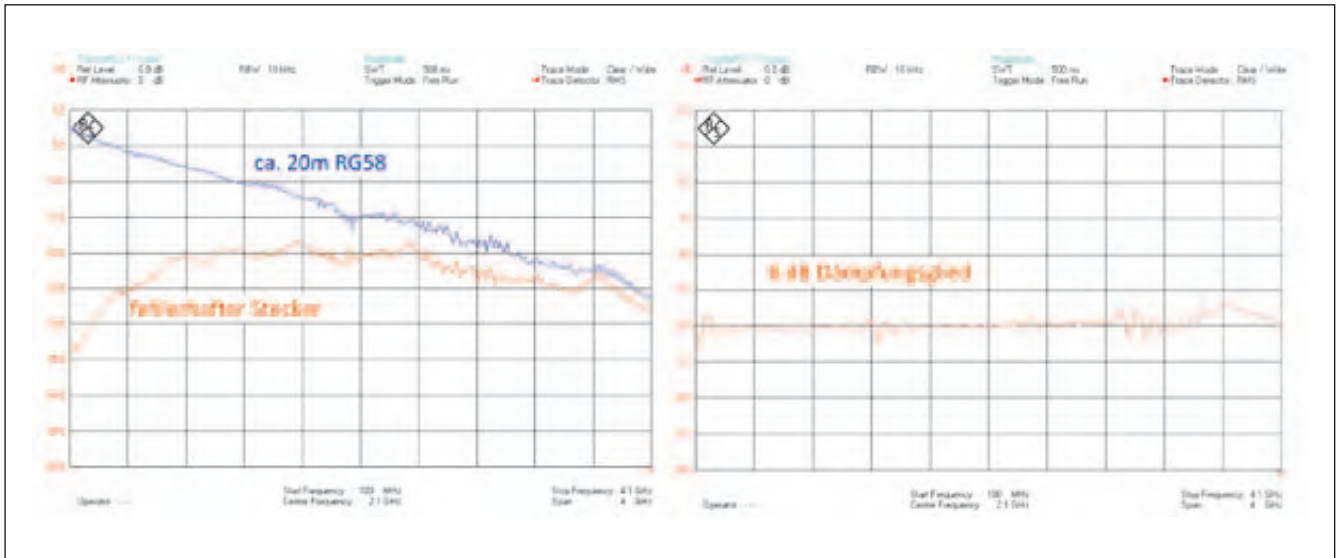


Bild 10.3 Aufnahme von verschiedenen Dämpfungsverläufen

ten Frequenzbereich verschafft hier eher Klarheit zu möglichen Fehlerstellen.

Der rechte Plot in Bild 10.3 zeigt die Aufnahme eines 6-dB-Festdämpfungsglieds. Hier erwartet man einen über die Frequenz konstanten Wert der Dämpfung. Das Bauteil ist spezifiziert bis 1 GHz, die Messung zeigt, dass es auch noch weit über seine Nennparameter hinaus betrieben werden kann.

Interessant ist die Untersuchung von Bauteilen und Komponenten mit Frequenzabhängigkeit. Stellvertretend wurden im Bild 10.4 ein Hoch- und Tiefpassfilter herangezogen. Der linke Plot zeigt den Verlauf des Tiefpass-Filters (blaue Kurve) sowie des Hochpass-Filters (Kurve orange).

gen bei 800 MHz und 1000 MHz. Schaltet man die beiden Filter zusammen, dann erhalten wir einen Bandpass (rechter Plot), der den Frequenzbereich des Mobilfunks durchlässt, allerdings mit einer Durchgangsdämpfung von ca. 12 dB. Diese Durchgangsdämpfung könnte sicherlich durch Optimierung noch reduziert werden, was anhand der kontinuierlichen Messung während des Abgleichs gut gelingen sollte.

Das Einsatzgebiet der Dämpfungsmessung ist vielseitig, so können auch Quarze und Quarzfilter auf ihre korrekte Funktion geprüft werden. Die Beschaltung von Quarzen und Quarzfiltern erfordern allerdings ein speziell zugeschnittenes Anpassnetzwerk, welches z.B. nach DIN 45105 ausgelegt werden kann.

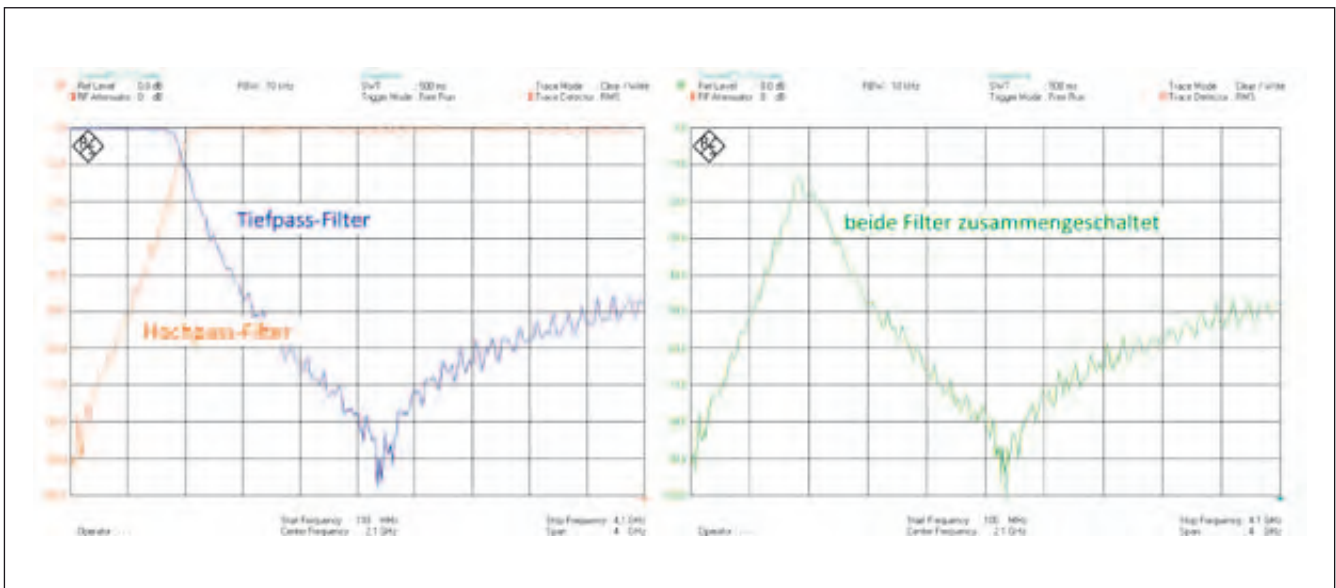


Bild 10.4 Aufnahme von Filterkurven

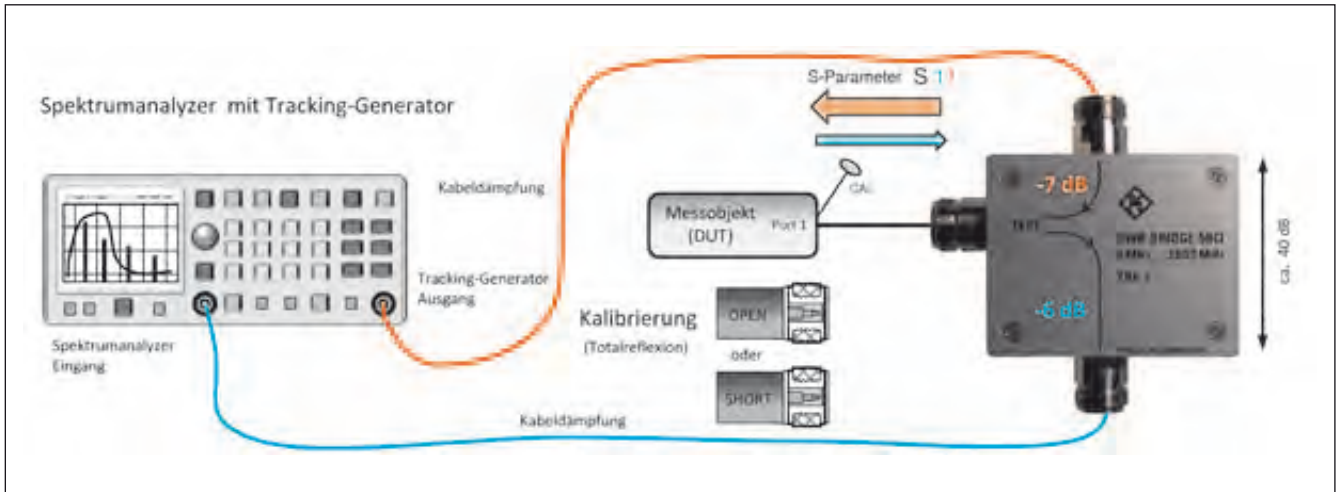


Bild 10.5 Messaufbau zur Reflexionsmessung

## Messaufbau Reflexionsmessung S-Parameter S<sub>11</sub>

Erweitert man den Messaufbau um ein weiteres Zubehör, nämlich der Reflexionsmessbrücke oder VSWR-Brücke, lassen sich weitere interessante Parameter ermitteln. Den dazu notwendigen Messaufbau zeigt Bild 10.5.

Wie bereits angedeutet, wird zur Reflexionsmessung ein direktives Element benötigt, das die Signale in vorlaufende und rücklaufende Richtung trennt. Im Beispiel kommt eine Präzisions-SWR-Brücke mit dem Frequenzbereich von 5 MHz bis 3 GHz zur Anwendung.

Das Messobjekt wird mit dem „Testanschluss“ der SWR-Brücke verbunden. Das Signal des Tracking-Generators (orange) durchläuft die Brücke vom oberen Anschluss zum Testanschluss und weiter zum Messobjekt. Herrscht dort

optimale Anpassung erfolgt am Messobjekt keine Reflexion. Somit wird keine Energie zur Brücke zurückgespiegelt.

Ist das Messobjekt nicht optimal angepasst, dann wird ein Teil der Energie reflektiert, sie läuft zurück zur Brücke (blauer) Pfeil. Die Aufgabe der Brücke ist, den reflektierten Anteil nun nicht zum Generator zurückzuschicken, sondern auf den unteren Ausgang, an welchem der Eingang des Spektrumanalyzers angeschlossen ist. Dieser erhält exklusiv nur die reflektierte Energie, die wir nun selektiv auswerten können.

Zunächst muss der Messaufbau wieder kalibriert werden, wobei sich die Prozedur gegenüber der Transfermessung wesentlich unterscheidet. Da wir reflektierte Signale erfassen wollen, gilt es, einen anderen Ansatz zu verfolgen. Normiert bzw. kalibriert wird auf den Zustand, dass 100% der Energie am Messobjekt reflektiert wird und dem Eingang

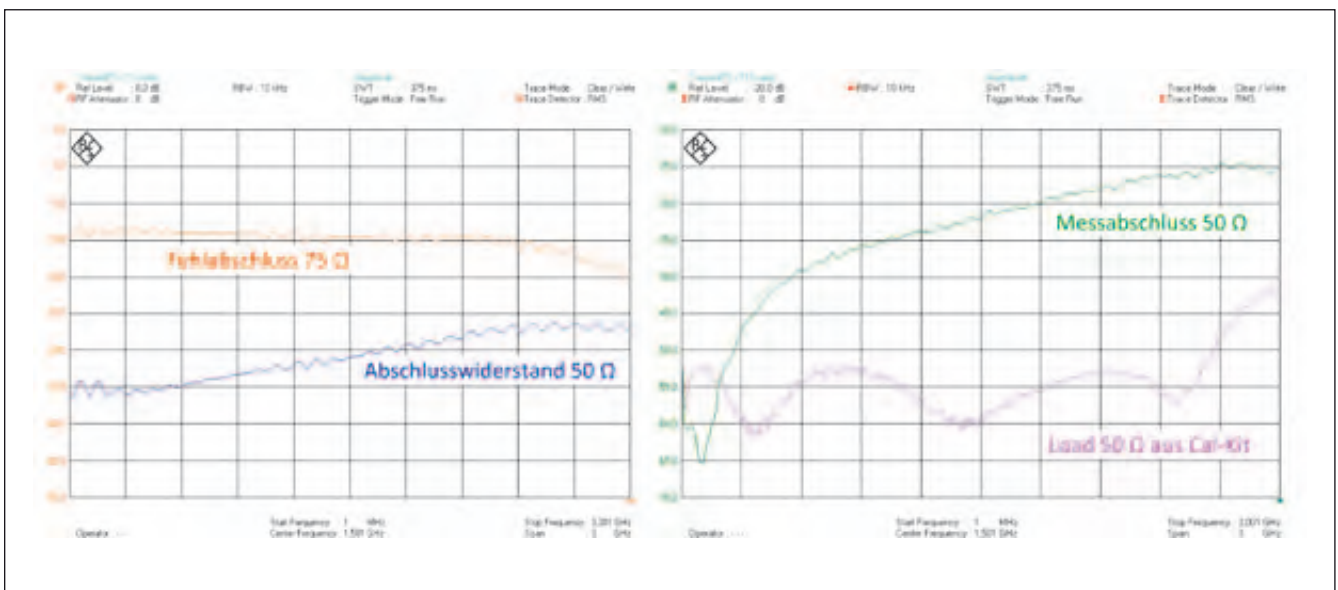


Bild 10.6 Untersuchung der Anpassung verschiedener Abschlusswiderstände

des Analyzers zur Verfügung gestellt wird. Das erreichen wir durch Totalreflexion, die wir durch ein offenes oder kurzgeschlossenes Ende provozieren. Innerhalb der Brücke entstehende Verluste im Zweig vom Generator zum Testobjekt und wiederum vom Testobjekt zum Brückenausgang (in Summe 13 dB). Sie werden dabei genauso berücksichtigt wie die Dämpfungen der Anschlussleitungen.

Zur Herstellung der Totalreflexion am Messkabelanschluss wird ein OPEN bzw. SHORT aus einem Kalibrierkit angeschraubt. Einer ordentlichen Netzwerkanalyse unwürdig ist das einfache „Offenlassen“ des Messkabels während der Kalibrierung, diese Vorgehensweise stellt allerdings die gängige Praxis dar.

Ist die Kalibrierung abgeschlossen, können erste Versuchsobjekte auf ihre Anpassung untersucht werden.

Zur Darstellung der Zusammenhänge verwenden wir zunächst Bauteile aus dem Labor, deren Verhalten bekannt ist und damit nachvollziehbare Ergebnisse abliefern müssten. Der erste Kandidat, ein 50-Ohm-Abschlusswiderstand, liefert die blaue Kurve im linken Plot von Bild 10.6. Ein 50-Ohm-Abschluss dürfte der Theorie zur Folge überhaupt keine Reflexion verursachen. Das ist richtig, allerdings wird man in der Praxis niemals hundertprozentige Verhältnisse erreichen. Schauen wir etwas genauer auf die Werte: Die blaue Kurve liegt in einem Bereich von ca. -35 dB bis -26 dB Rückflussdämpfung. Was bedeutet das?

Zunächst zum Begriff der Rückflussdämpfung, der eigentlich zunächst etwas unlogisch erscheint:

Die Rückflussdämpfung gibt an, wie stark ein Bauteil den Rückfluss von Energie dämpft. Schickt ein Bauteil nur wenig Energie zurück, dann weist es im übertragenen Sinn eine hohe Rückflussdämpfung auf, es ist also sehr gut angepasst, fast die gesamte Energie wird im Bauteil „genutzt“. Folglich ist der Wert der Rückflussdämpfung (in dB) hoch. Im Umkehrschluss bedeutet ein geringer dB-Wert, dass vom Bauteil der Rückfluss nicht stark „bedämpft“ wird, die Anpassung ist schlechter.

Wie ist nun die angezeigte Rückflussdämpfung zu bewerten? Im Beispiel des Abschlusswiderstandes erhalten wir im Mittel eine Rückflussdämpfung von ca. -30 dB.

Laut dB-Rechnung verbirgt sich hinter diesem Wert ein Tausendstel der Leistung. Die reflektierte Energie ist also sehr gering, die Anpassung des Abschlusswiderstandes gibt, je nach Anwendungsfall, kaum Anlass zur Verbesserung.

Die Klassifizierung der Anpassung über die Rückflussdämpfung ist vielleicht für den einen oder anderen ungewohnt und er möchte doch lieber Angaben als VSWR erhalten. Hier die Formeln zur Umrechnung in andere Formen der Angaben:

$$|r| = 10^{\frac{a_r [\text{in-dB}]}{20}}$$

$|r|$  Betrag des Reflexionsfaktors  
 $a_r$  Rückflussdämpfung in dB

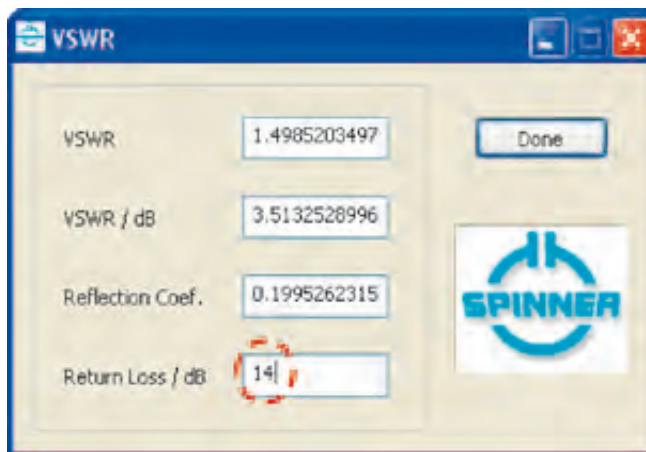


Bild 10.7 Tool zur Umrechnung auf verschiedene Größen

$$s = \frac{1 + |r|}{1 - |r|}$$

$|r|$  Betrag des Reflexionsfaktors  
 $s$  Stehwellenverhältnis, VSWR

Die Berechnung des VSWR erfolgt mit einem Zwischenschritt über den Reflexionsfaktor.

Im Internet findet man eine Vielzahl diverser Tools, welche die Rechenarbeit übernehmen, hier ein Beispiel (Bild 10.7) der Firma Spinner:

Dieses kleine Tool bietet für diesen Fall sofort und ohne Einarbeitung alle notwendigen Umrechnungen, als Ausgangspunkt kann jedes Feld als Eingabefeld hergenommen werden.

Gehen wir weiter und schauen wieder auf den linken Plot von Bild 10.6: Die zweite Kurve zeigt einen Abschlusswiderstand von 75 Ohm, der natürlich für ein 50-Ohm-System einen Fehlabschluss darstellt. Die Rückflussdämpfung beträgt -14 dB. Zu höheren Frequenzen hin knickt die Kurve etwas ab.

Schauen Sie auf Bild 10.7, hier wurde der Wert von 14 dB eingegeben, das Tool rechnet ein VSWR von 1.5 aus.

Im rechten Plot wurden die Experimente mit dem Labormaterial fortgesetzt. Die grüne Kurve zeigt den Verlauf der Rückflussdämpfung für einen 50-Ohm Messabschluss, seine Rückflussdämpfung liegt etwa zwischen -40 dB und -25 dB. Er ist also etwas besser als der zuvor untersuchte Abschlusswiderstand. Die zweite Kurve (magenta) des Plot's zeigt die Ergebnisse bei Verwendung eines Präzisionsabschlusses aus einem Kalibrierkit. Hier liegen wir nun in einem Grenzbereich, die Kurve zeigt hier eher die Anpassung bzw. Direktivität der verwendeten Messbrücke an.

Das zeigt wiederum, dass die Messgrenzen wesentlich durch die Parameter der verwendeten Messbrücke bestimmt werden. Die Kurve bleibt fast im gesamten Verlauf unter -50 dB Rückflussdämpfung, erst ab einer Frequenz von 2.7 GHz steigt die Kurve an. Das System der Messbrücke er-



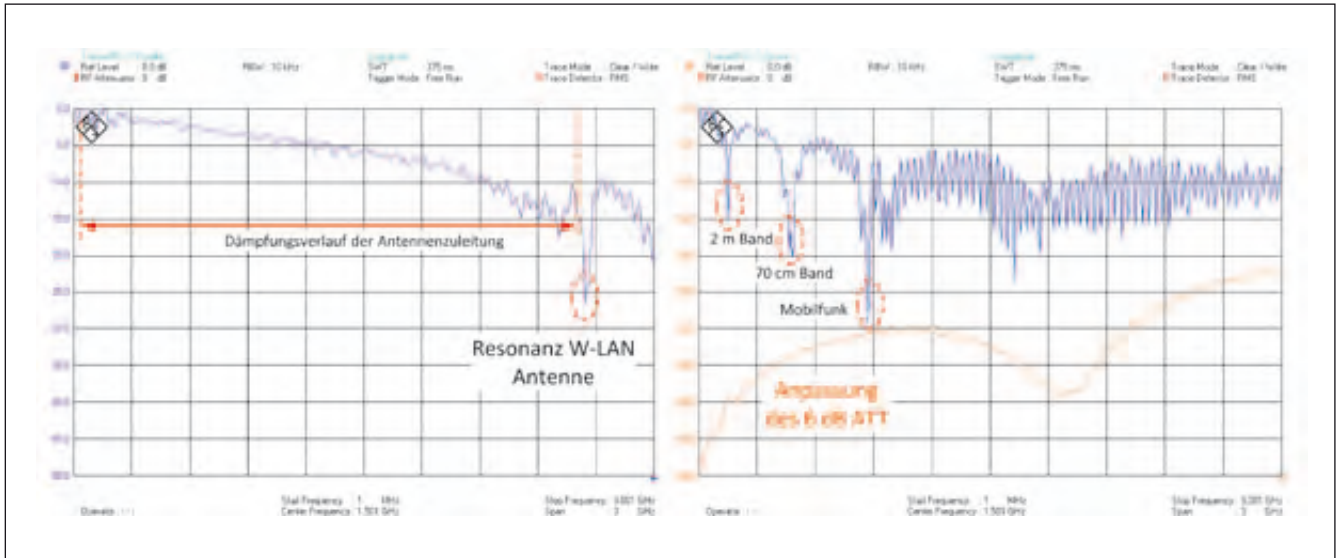


Bild 10.8 Bestimmung der Resonanz und Anpassung von Antennen

reicht hier Grenzen, für höhere Frequenzen wird als direktes Element ein Richtkoppler eingesetzt.

Die vorgestellte Messung kann für die Untersuchung, und letztendlich zur Beurteilung der vorliegenden Messgrenzen, herangezogen werden, benötigt wird dazu ein Präzisionsabschluss z.B. aus einem Kalibrierkit.

Als nächstes Messobjekt dient eine W-LAN-Antenne. Beim Anschluss der Antenne ist darauf zu achten, dass deren Zuleitung mit in die Kalibrierung einbezogen wird. Leider geht das nicht immer, so auch im Beispiel, Bild 10.8. Der linke Plot zeigt den Kurvenverlauf (violett), die Rückflussdämpfung steigt kontinuierlich an, bei etwa 2.4 GHz erfolgt ein starker Abfall auf unter -25 dB. An dieser Stelle, es handelt sich um die bekannte W-LAN-Frequenz, hat die Antenne ihre Resonanz und damit eine gute Anpassung.

Der kontinuierliche Abfall von der Startfrequenz bis zur Resonanz beruht auf der Dämpfung der Zuleitung, die leider nicht in die Kalibrierung einbezogen werden konnte, weil sie fest an der Antenne montiert ist. Die Leitungsdämpfung geht somit in das Ergebnis der Bestimmung der Rückflussdämpfung bei Resonanz mit ein. Es wird eine bessere Anpassung vorgetäuscht als tatsächlich gegeben ist. Die Leitungsdämpfung schlägt mit immerhin ca. 15 dB zu Buche.

Das ergibt einen erheblichen Unterschied zur tatsächlich Impedanz der Antenne, berechnen Sie mal den Unterschied des VSWR anhand der Formeln oder mit dem Tool aus Bild 10.7. Die Messung zeigt deutlich den Unsinn der VSWR-Messung an einer Antenne am unteren Kabelende auf. Ist die Dämpfung groß genug, spricht das Kabel genügend lang, wird eine noch so schlecht angepasste Antenne immer ein gutes VSWR aufweisen.

Der rechte Plot zeigt eine weitere Antenne. Auch hier wieder mit fest angebrachter Leitung, allerdings mit geringerer Länge. Es handelt sich um eine 3-Band-Mobil-

antenne, ihre drei Resonanzstellen sind deutlich sichtbar.

Die zweite Kurve (orange) zeigt stellvertretend nochmal die Untersuchung der Anpassung eines Bauteils. In diesem Fall wurde das bereits zu Beginn verwendete 6-dB-Dämpfungsglied vermessen, seine Rückflussdämpfung liegt unter -30 dB, was für den spezifizierten Bereich zu Datenblattangaben passt.

Hiermit wird das vom Buchthema eigentlich abweichende Kapitel der skalaren Netzwerkanalyse abgeschlossen. Sie stimmen mir sicherlich zu, dass diese leistungsfähige Option in keinem Spektrumanalyzer außen vor bleiben sollte.

## Weiterführende Informationen

Das Thema der Netzwerkanalyse ist recht komplex und kann nicht in einem einzelnen Kapitel behandelt werden.

Sollten Sie Appetit bekommen haben und sich tiefer in diese Materie einarbeiten wollen, dann möchte ich hiermit den Hinweis los werden und auf mein im selben Verlag erschienen Buch „Praxiseinstieg in die vektorielle Netzwerkanalyse“ aufmerksam machen.

Dort werden in der gleichen Aufmachung u.a. die S-Parameter, verschiedene Verfahren der Kalibrierung, Antennenmessungen und vieles mehr im Detail besprochen.