

10 Leitungseinflüsse kompensiert durch Kalibrierung

Kann man über eine „längere“ Leitung deren Leitungsabschluss, z.B. Antenne, am Ende bestimmen und mit welcher Sicherheit? Wie wirken sich Stoßstellen auf dieser Leitung auf das Messergebnis aus? Können diese Einflüsse der Leitung durch Kalibrierung eliminiert werden? All diese Fragen wollen wir durch praktische Versuche beantworten.

Untersuchung des Leitungsabschlusses durch Messung am Leitungsanfang

Ein typischer Anwendungsfall: Eine Antenne ist über ein beliebig langes Koaxkabel mit dem Transceiver verbunden. Interessant ist nun die Anpassung der Antenne. Wir un-

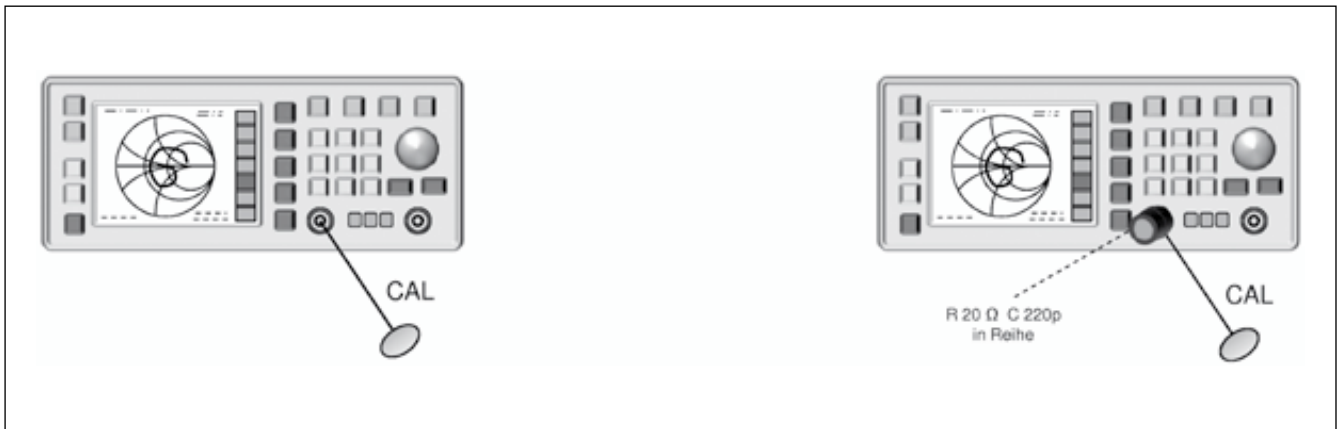


Bild 10.1 Anschluss des Mismatches zur Bestimmung seiner Daten direkt am Analyzer

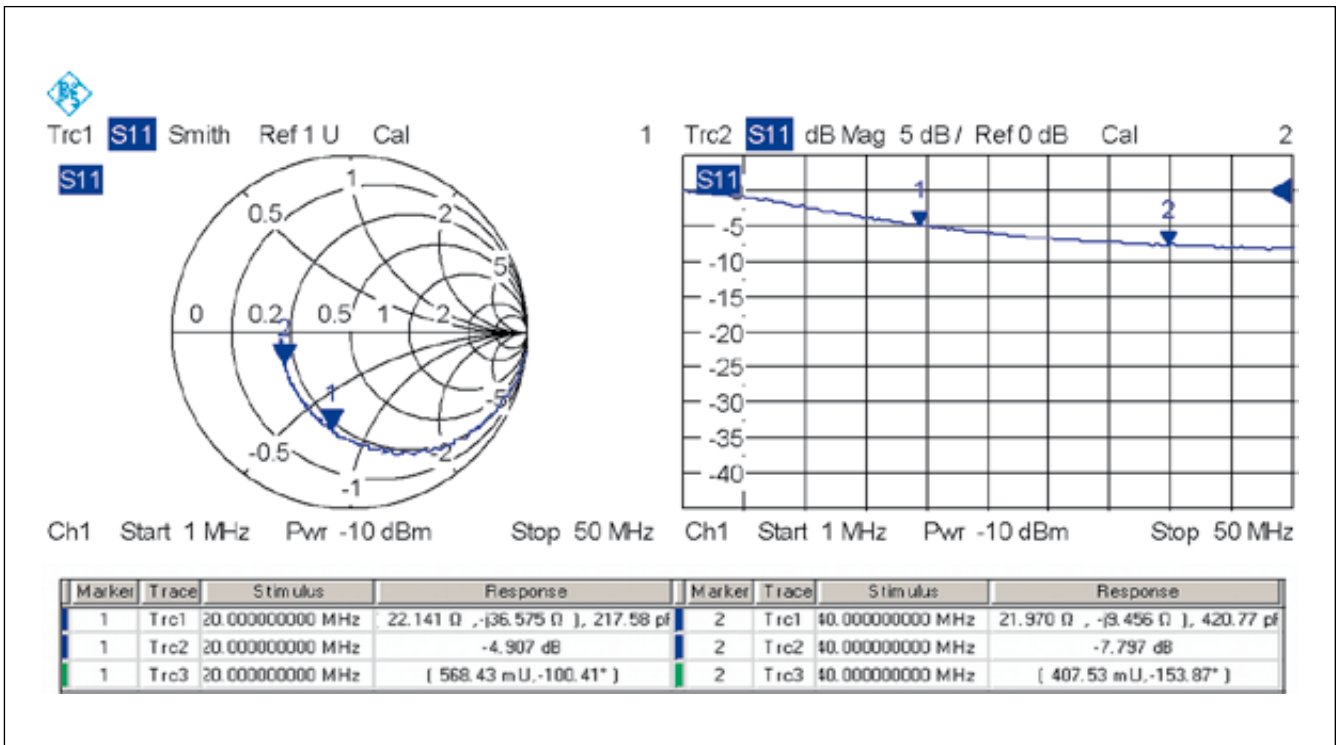


Bild 10.2 Aufnahme der Diagramme für den Mismatch im Frequenzbereich 1 – 50 MHz

Leitungseinflüsse kompensiert durch Kalibrierung

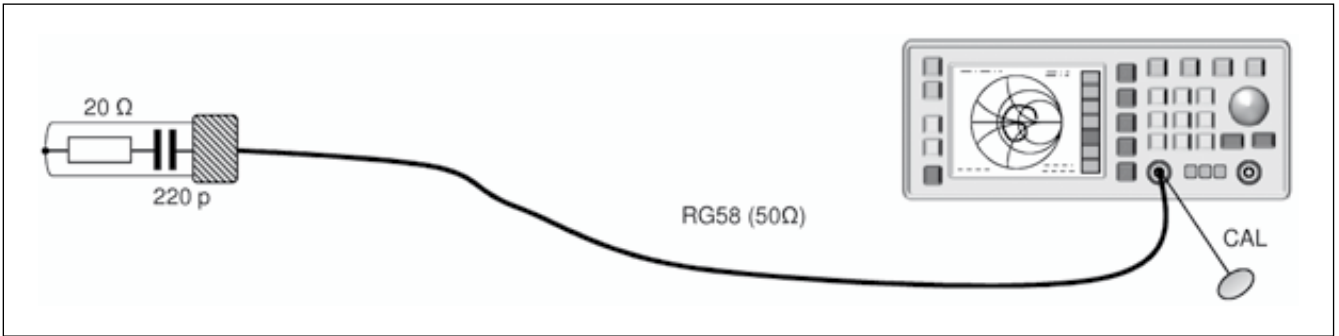


Bild 10.3 Anschluss des Mismatch über ein 4.6 m langes RG58 Kabel, CAL-Punkt bleibt am Analyzer

erstellen, das Ende der Leitung samt Antenne sei einigermaßen zugänglich, der Stecker kann an der Antenne abgeschraubt werden, jedoch das Anschließen eines Messgerätes gestaltet sich eher schwierig, weil es vielleicht frei in der Luft hängen würde. Praktikabler und bequemer ist eine Messung ausgehend vom Leitungsanfang z.B. am Aufstellungsort des Transceivers. Sind die von dort gemessenen Werte repräsentativ? Für den Kabelanfang selbst trifft das zu, wir erhalten die Messwerte, die direkt der Sendendstufe bzw. dem Empfängereingang angeboten werden.

Das lässt die Beurteilung zu, ob die Endstufe in einen ungünstigen Betriebszustand ist und eventuell „Überlastgefährdung“ besteht. Zur Anpassung der Antenne am gegenüberliegenden Ende ist allerdings vom Kabelanfang aus keine sichere Aussage möglich. Dieser Themenkomplex stellte sich allerdings bereits in der Vergangenheit unter

der Anwendung von Stehwellenmessgeräten, Messbrücken, Dipmeter usw. dar, ist also nicht neu. Mit der vektoriellen Netzwerkanalyse eröffnet sich nun erstmals die Chance, die Vorgänge in anschaulicher Form aufzuarbeiten.

Am dargestellten Versuchsaufbau (Bild 10.1) spielen wir nun unterschiedliche Szenarien durch.

Der Analyzer wird zunächst kalibriert, die Bezugsebene liegt direkt auf dem Geräteanschluss, die Stecknadel „CAL“ deutet diesen Punkt an. Der definierte Leitungsendabschluss (Mismatch) wird anschließend direkt auf den Geräteanschluss gesteckt und die Messung des S-Parameters S_{11} angestoßen.

Das Bild 10.2 zeigt die gemessenen Parameter eines Mismatches als skalare Kurve und in Smith-Darstellung.

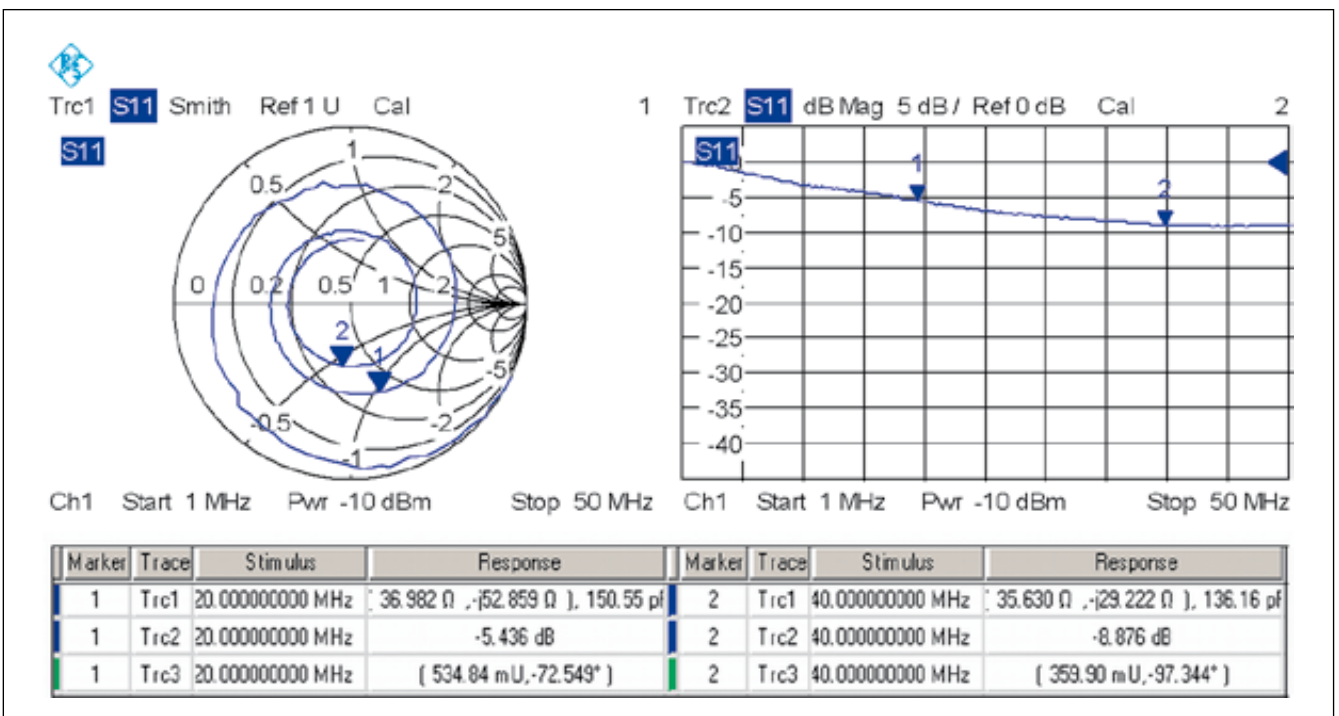


Bild 10.4 Diagramme für den Mismatch, gemessen über eine 4.6 m lange Koaxleitung

Leitungseinflüsse kompensiert durch Kalibrierung

Damit ist das Verhalten des Leitungsabschlusses im Detail bekannt, die gewonnenen Diagramme werden für die nachfolgenden Messungen als Referenz dienen.

Zusätzlich enthält die Markertabelle Daten unter der als Platzhalter ausgeblendeten Kurve 3 (Trc3), es handelt sich um den Reflexionsfaktor in der Einheit mU (milli-Unit) und dessen Winkel in Grad. Bei 20 MHz beträgt der Reflexionsfaktor 568.43 mU, alternativ in einem

anderen Format und aufgerundet dargestellt $r = 0.57 - 100.41^\circ$.

Der nächste Schritt: Wir schließen den Mismatch über ein 4,6 m langes Koaxkabel RG58 am Analyzer an, wie im Bild 10.3 dargestellt. Die Bezugsebene verbleibt am Geräteanschluss.

Durch das Kabel erfolgt eine Transformation der Verhältnisse am Leitungsende zurück auf den Kabelanfang, die Plots zeigen, dass sich die Werte zur vorherigen Messung stark verändert haben. Das VSWR bzw. der Reflexionsfaktor fällt etwas niedriger aus, es hat scheinbar eine Verbesserung stattgefunden.

Die vektorielle Betrachtung durch das Smithdiagramm zeigt uns, dass der Leitungsabschluss bei bestimmten Frequenzen in ein induktives Verhalten wechselt. Wir sind uns aber sicher, dass im Mismatch ein Kondensator eingebaut ist, die ursprüngliche Referenzmessung bestätigt das. Der Wirkwiderstand erscheint verändert, er beträgt bei der markierten Frequenz nun ca. 36 Ohm. Die vektorielle Betrachtung zeigt, dass das angeschlossene Gerät ein Leitungsende mit ganz anderen Werten „sieht“ als tatsächlich in der Ferne existent sind. Ursache ist die Leitungstransformation durch das Koaxkabel. Der Effekt der Transformation ist abhängig von der Leitungslänge und damit auch von der Frequenz bzw. dem Frequenzbereich, den wir für die Untersuchungen verwenden. In der skalaren Darstellung ist vom Effekt der Transformation nichts zu erkennen, der Vergleich zur Referenz ergibt, dass die Rückflussdämpfung über das Kabel, besonders in die Richtung höherer Frequenzen, ansteigt.

Warum „sieht“ ein angeschlossenes Gerät das Leitungs-

ende nicht? Betrachten wir dazu die Grundzüge der Leitungstheorie: Die von z.B. einer Endstufe vorlaufende Welle kann zum Zeitpunkt des Übergangs auf ein Kabel das Leitungsende noch gar nicht sehen. Der Grund: Das Kabel weist eine Laufzeit auf. Für die abgegebene Energie der Endstufe herrscht zur Zeit des Kabelübergangs optimale Anpassung an das Kabel mit dessen Wellenwiderstand von 50 Ohm! Erst an der nächsten Übergangsstelle am Leitungsende (z.B. Kabel / Antenne) wird eine Stoßstelle für die vorlaufende Welle relevant – die Folge ist eine Reflexion. Aus Sicht der Antenne wirkt das Kabelende wie eine Spannungsquelle mit $R_i = 50 \text{ Ohm}$. Nehmen wir an, die Antenne hätte einen etwas höheren Widerstand, dann kann die Spannungsquelle, also das Kabel, die Energie nicht vollständig abgeben. Die „übrige“ Energie muss also wieder zurück.

Die reflektierte Welle läuft auf dem Kabel zurück und trifft nach entsprechender Laufzeit am Übergang Kabel / Endstufe dort ein. Hier befindet sich momentan auch unser Messort. Von beiden Wellen, vorlaufender und rücklaufender, addieren sich an jedem Punkt entlang der Leitung die Spannungen und auch die Ströme vektoriell. Die Endstufe sieht also kein Leitungsende sondern, wird mit der rücklaufenden Welle konfrontiert, deren Energie im Innenwiderstand wieder umgesetzt werden muss.

Weiterhin stellten wir fest, dass sich der Reflexionsfaktor zur ursprünglichen Referenz verändert hat. Bei 20 MHz von 0.57 nach 0.53 und bei 40 MHz von 0,41 nach 0.36. Warum erscheint der Reflexionsfaktor verbessert? Ich betone „erscheint besser“, denn am Leitungsabschluss selbst wurde seither nichts geändert. Die vorlaufende und die rücklaufende Leistung werden am Leitungsanfang gemessen und ins Verhältnis gesetzt. Die rücklaufende Welle hat zweimal den Weg über das Kabel genommen, zuerst in ihrer Gesamtheit als vorlaufende Welle – kommt gedämpft am Leitungsende an, ein Teil wird dort reflektiert. Der reflektierte Anteil läuft als rücklaufende Welle auf dem Kabel zurück – wird dabei erneut gedämpft. Am Leitungsanfang sieht das Messgerät einen zweimal gedämpften Anteil von reflektierter Leistung – somit ist der Reflexionsfaktor kleiner, also erscheint die Anpass-Situation als besser. Wenn

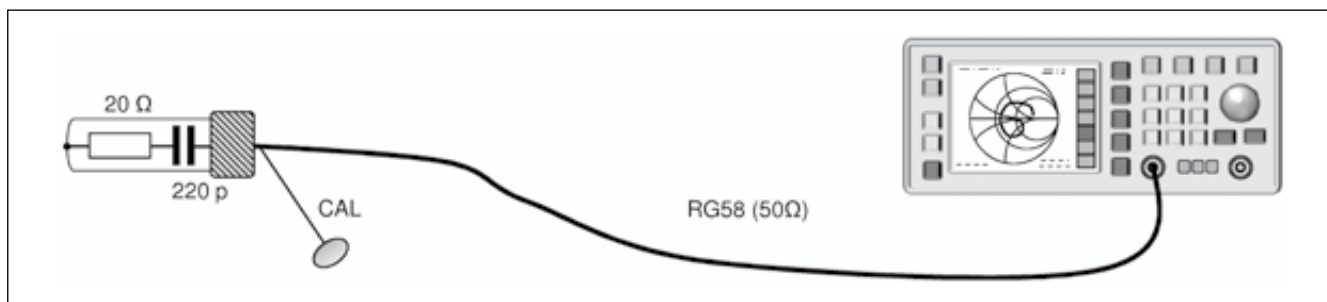


Bild 10.5 Anschluss des Mismatch über ein 4,6 m langes RG58-Kabel, CAL-Punkt am Ende

Leitungseinflüsse kompensiert durch Kalibrierung

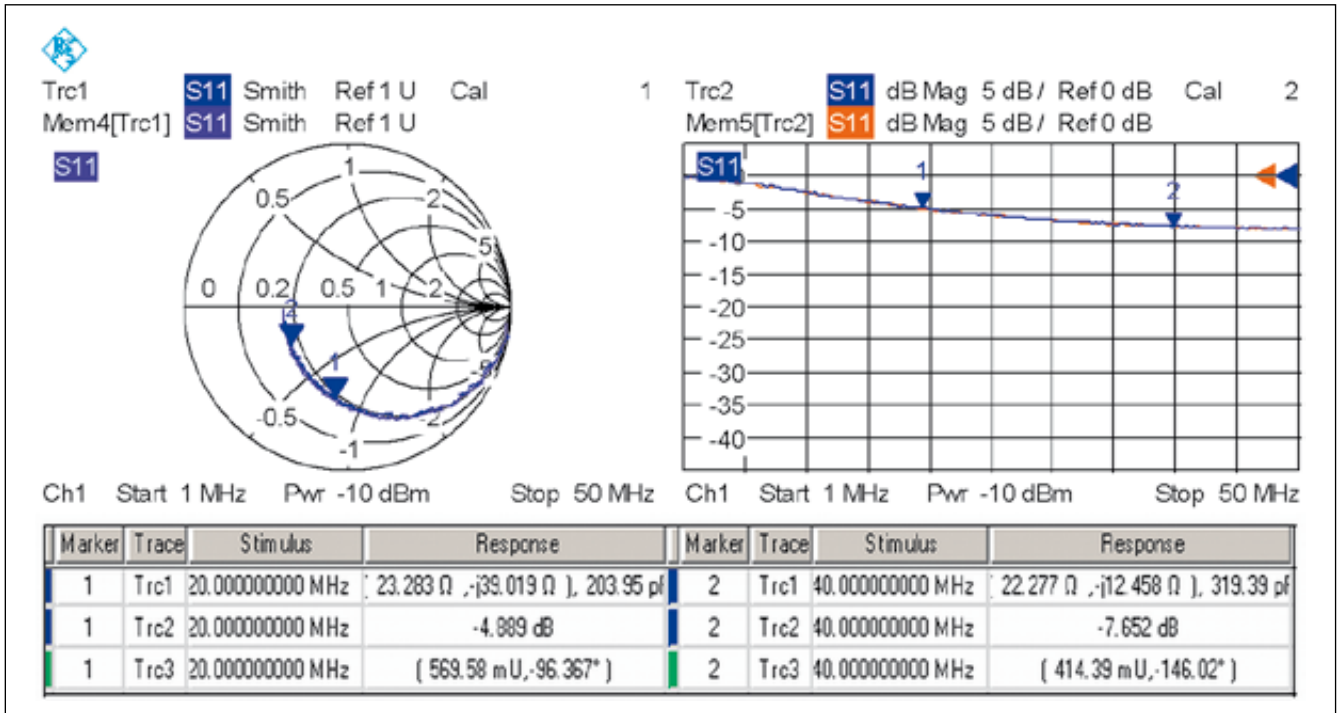


Bild 10.6 Diagramme für den Mismatch, gemessen über eine 4.6 m lange Koaxleitung, CAL am Leitungsende

das Kabel nur lang genug ist und die Verluste damit entsprechend höher werden, erscheint die Anpassung irgendwann als optimal. Auch diese Tatsache ist nicht neu, bei den seitherigen Messverfahren genauso existent. Der Vektoranalyzer bietet aufgrund seiner Kalibrierfunktion einen Ausweg, sofern das andere Ende zugänglich ist, was wir zuvor schon unterstellt haben.

Wir verlegen die Bezugsebene durch erneutes Kalibrieren nun an das Leitungsende wie die Stecknadel „CAL“ zeigt.

Der Vergleich der jetzt gewonnenen Messergebnisse zeigt eine Übereinstimmung mit der Ausgangssituation in Bild 10.2, blaue und violette Kurve sind deckungsgleich.

Durch das Kalibrieren wurden der transformatorische

Einfluss der Leitung und die Leitungsdämpfung herausgerechnet.

Das Verlagern der Bezugsebene durch den Kalibriervorgang hilft, den Effekt der Leitungstransformation bei Messungen zu kompensieren. Falls das verwendete Gerät das Speichern von verschiedenen Kalibrierungen ermöglicht, könnte man in Betracht ziehen, diese Möglichkeit zu nutzen. Sehr oft ist das Leitungsende nicht zugänglich, auch nicht, um nur mal die Kalibriernormale anzuschrauben. Irgendwann wird eine Antenne errichtet, somit ist das Ende zumindest bei dieser Aktion noch zugänglich, z.B. solange der Mast noch nicht ausgefahren oder aufgerichtet ist. Zu diesem Zeitpunkt führt man mit der kompletten späteren Zuleitung incl. aller Stecker, Umschalter, Blitzschutz usw.

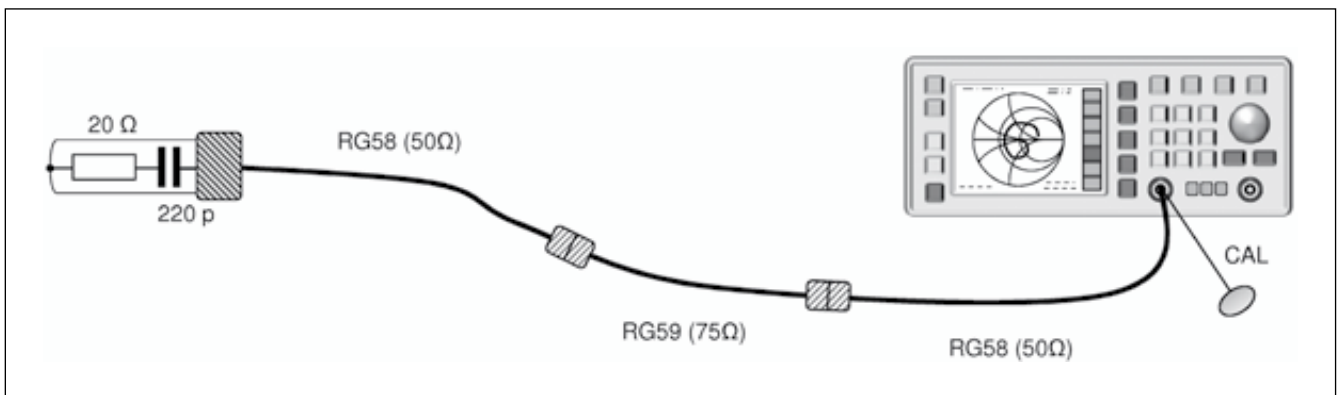


Bild 10.7 Provozierte Stoßstelle durch Einfügen eines Stück 75-Ohm-Kabel, CAL-Punkt am Analyzer

Leitungseinflüsse kompensiert durch Kalibrierung

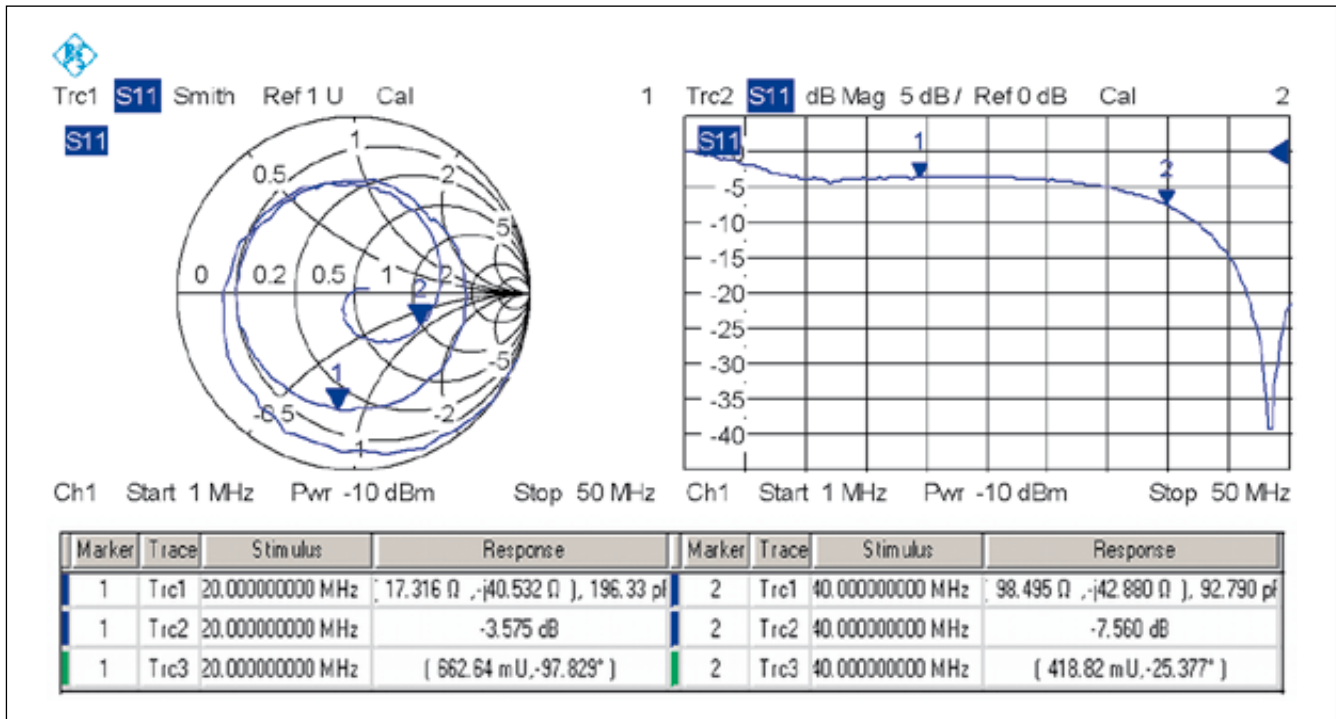


Bild 10.8 Diagramme für den Mismatch, verbunden über Koaxleitungen mit unterschiedlichen Wellenwiderständen, CAL am Analyzer

eine Kalibrierung durch und speichert diese ab. Möchte man danach die Anpassung der Antenne kontrollieren, müsste die damals gespeicherte Kalibrierinformation wieder geladen werden. Dieses Verfahren birgt jedoch erhebliche Schwachstellen, wie bereits im Kapitel 8 angeführt, hier wurde die Speicherung der Daten als S2P-Datei in Erwägung gezogen. Der Messaufbau muss genau gleich ausgeführt werden, mit allen Adaptern und ursprünglich verwendeten Messleitungen. Steckt man ein zusätzliches Stück Messleitung hinzu, weil vielleicht der damals verwendete Adapter gerade nicht auffindbar ist, wird die Messung unbrauchbar sein, auf diese Weise verlängerte oder auch verkürzte Leitungen transformieren natürlich und beeinflussen die Ergebnisse entscheidend.

Dem „Dilemma“ des unzugänglichen Leitungsendes kann durch die ebenfalls in Kapitel 8 beschriebene Methode der Längenmessung im DTF-Verfahren begegnet werden.

Provozierte Stoßstellen durch unterschiedlichen Wellenwiderstand

In welchem Bereich funktioniert die Kalibrierung verlässlich? Was passiert, wenn eine Leitung mehrerer Stoßstellen aufweist?

Wir provozieren den Fall, indem wir zwischen das RG58-Kabel ein Stück vom Typ RG59, dessen Wellenwiderstand

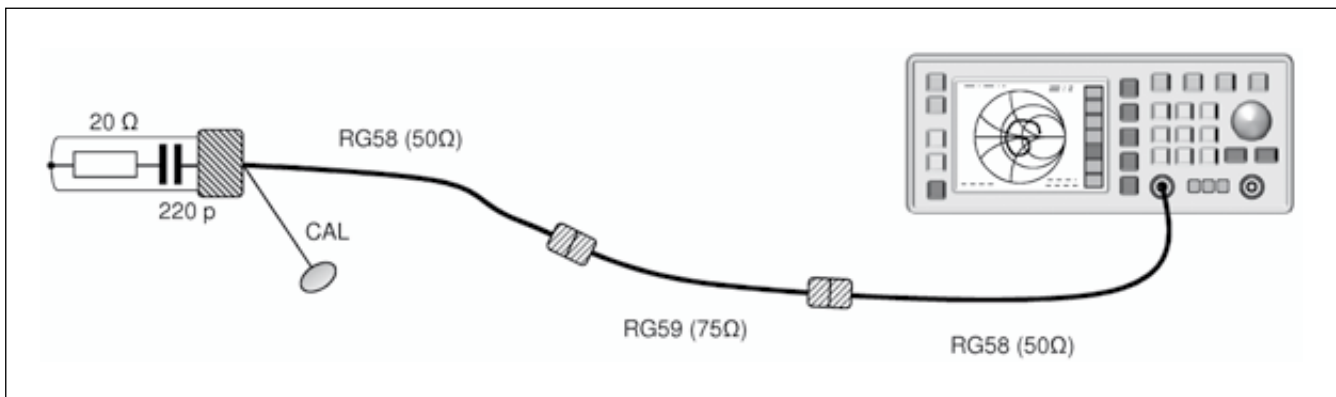


Bild 10.9 Provozierte Stoßstelle durch Einfügen eines Stück 75-Ohm-Kabel, CAL-Punkt am Leitungsende

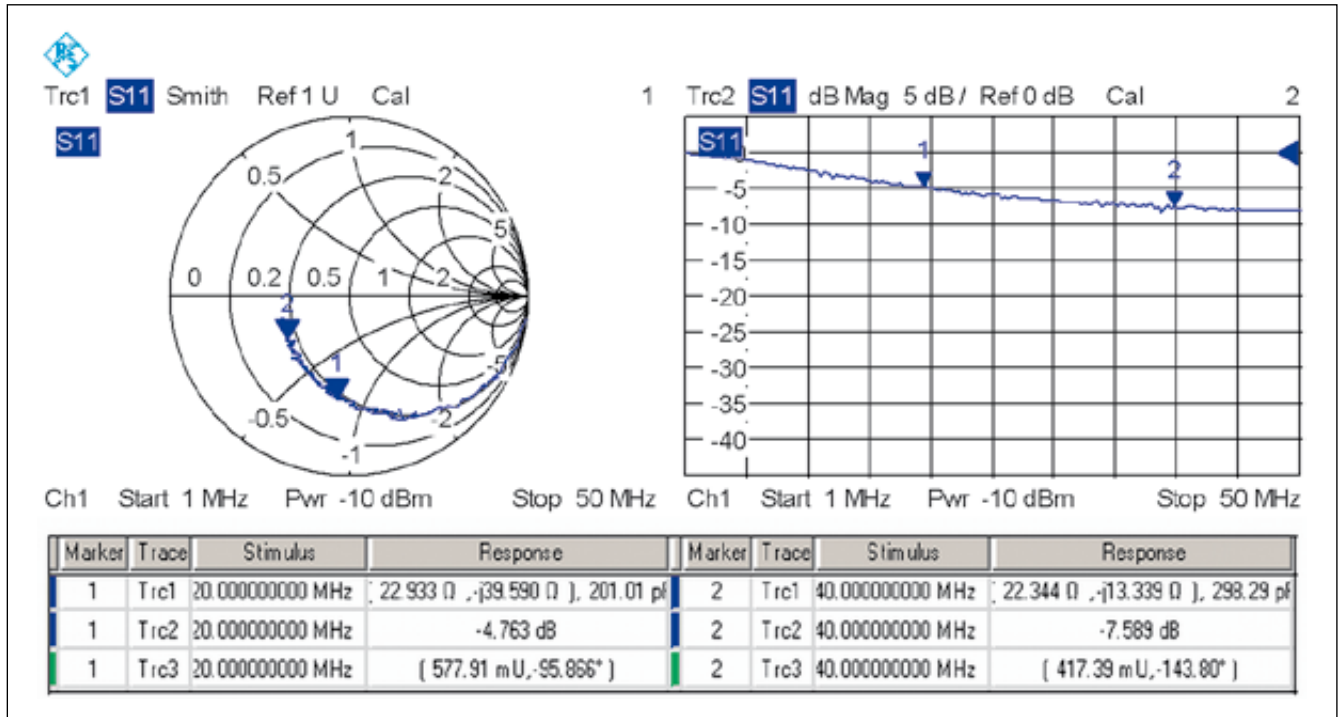


Bild 10.10 Diagramme für den Mismatch, verbunden über Koaxleitungen mit unterschiedlichen Wellenwiderständen, CAL am Leitungsende

75 Ohm beträgt, einfügen – siehe Bild 10.7. Die Bezugsebene wird durch Kalibrierung wieder an den Geräteanschluss gelegt, siehe Stecknadel „CAL“. Die Konfiguration weist nun drei Stoßstellen auf: Übergang RG58-RG59 dann zurück von RG59 auf RG58 und am Leitungsende der Mismatch. Die Diagramme in Bild 10.8 zeigen die Messergebnisse.

Es wird deutlich, wir befinden uns weit weg von der Realität, was sich nun wirklich am Leitungsende befindet. Das Smithdiagramm und die skalare Darstellung zeigen bei ca. 46 MHz eine optimale Anpassung zu 50 Ohm bzw. eine Resonanzstelle an. Das ist nicht etwa eine Fehlmessung, die Anordnung aus Leitungsabschluss und der Stückelung unterschiedlicher Kabelimpedanzen verhält sich aus Sicht des Kabelanfanges tatsächlich so. Wäre das Kabelende eine Antenne, so kann man sich nicht sicher sein, ob die angezeigte Resonanzstelle tatsächlich zur Antenne gehört, sie ist entstanden aus dem Zusammenwirken aller beteiligten Teilkomponenten. Unser Messort wird von drei reflektierten Wellen konfrontiert, diese addieren sich vektoriell und geben genau für diesen Punkt des Systems, bestehend aus Generator – unserem Analyzer -, Übertragungsleitungen und Leitungsabschluss, die Werte der Anpassung am Messort bekannt.

Diese Konstellation ist nicht ungewöhnlich, eine Zuleitung zu einer Antenne kann durchaus mehrere Stecker und

eventuell noch andere Komponenten enthalten, die Stoßstellen produzieren. Die Frage ist, kann durch Kalibrierung dieser Einfluss auf die Messung reduziert bzw. ganz eliminiert werden? Wir führen erneut eine Kalibrierung durch, verlegen die Bezugsebene an das Leitungsende, wie die Stecknadel „CAL“ im Bild 10.9 illustriert.

Die Ergebnisse der angestoßenen Messungen zeigt Bild 10.10, woraus wir folgende Schlüsse ziehen: Die Diagramme sind mit der Referenz Bild 10.2 identisch, sie entsprechen den bekannten Werten des verwendeten Mismatch. Durch den Kalibriervorgang und der damit verbundenen Verlagerung zum Leitungsende werden die provozierten Stoßstellen herausgerechnet, man erhält also die tatsächlichen Werte des angeschlossenen „Netzwerks“ aus Sicht der Bezugsebene. Die Anwendung der Kalibrierung sollte aber nicht zu der Meinung führen, dass man der Qualität der „Hilfsmessleitung“ keine Bedeutung mehr zumisst und dem Glauben verfällt, man könnte zum Messen eine feuchte Wäscheleine verwenden, denn deren Unzulänglichkeiten könnte man ja herauskalibrieren.

Was ist eine ordentliche (Mess)leitung? Diese Frage bringt uns zu einem weiteren Themenschwerpunkt, der näher betrachtet und mit Versuchsmessungen untermauert werden soll. Kapitel 11 geht auf die Qualität von Leitungen und, speziell bei Messleitungen, auf deren notwendige Phasenstabilität ein.