

Kapitel 1

Streuparameter (S-Parameter)

Die Vektor-Netzwerkanalyse eröffnet völlig neue Sichtweisen in der Messtechnik, welche dem Benutzer eines skalaren Netzwerkanalysers verschlossen bleiben. Jener muss sich ausschließlich mit der Messung des Betrags eines Signals (*Magnitude*) an einem Messobjekt (*device under test [DUT]*) begnügen. Demgegenüber gibt ihm die vektorielle Netzwerkanalyse einen zusätzlich weiten Einblick in das frequenzabhängige Widerstands- und Phasenverhalten. Grundlage ist die Anwendung der so genannten S-Parameter (Streuparameter; engl.: *Scatter Parameter*). Die nachfolgenden Zusammenhänge sind teilweise vereinfacht dargestellt.

Der Vektornetzwerkanalyser (VNWA) sendet eine ihm in der *Magnitude* bekannte Welle in den Eingang des Messobjekts (*DUT*). Im Fall einer vorliegenden Fehlanpassung (auf 50 Ohm bezogen) wird ein Teil der *Magnitude* zum VNWA reflektiert und von ihm gemessen; außerdem die Phasenverschiebung zwischen der ausgesendeten und der reflektierten Welle (**Bild 1.1**). Insgesamt handelt es sich um eine Reflexionsmessung (S-Parameter: S_{11}).

Besitzt das Messobjekt (*DUT*) nur einen einzigen Anschluss (Beispiel: Antenne), so spricht man von einem 1-Tor (*1-Port*). An einem 1-Tor ist ausschließlich eine Reflexionsmessung möglich! Sie stellt die klassische Anpassungsmessung dar.

Sofern das Messobjekt (*DUT*) über einen Eingang und weiterhin über einen Ausgang verfügt (Beispiele: Verstärker, Filter, Phasenleitung), so spricht man von einem 2-Tor (*2-Port*). Oft interessiert an einem 2-Tor zunächst, wie groß die *Magnitude* des Ausgangssignals gegenüber der des Eingangssignals ist - also der Verstärkungsgrad beziehungsweise eine bestimmte erwünschte Dämpfung.

In anderen Fällen möchte man auch die Phasenverschiebung des Ausgangssignals gegenüber dem Eingangssignal wissen - wie etwa beim Bemessen einer phasenverschiebenden Leitung oder zum Anfertigen von zwei elektrisch exakt gleich langen Leitungen. Das alles geschieht mit einer so genannten Durchgangs- (*Transmissions*-) Messung (S-Parameter: S_{21}). **Bild 1.2** stellt die Messung des S-Parameters S_{21} idealisiert dar!

Doch auch der umgekehrte Fall ist möglich: Der VNWA speist eine Welle in den Messobjekt-Ausgang und misst, welcher Teil der *Magnitude* noch am Eingang an kommt. Diese Messung stellt die Rückwirkung des Ausgangs durch die Messobjekt-Schaltung auf den Eingang fest (S-Parameter: S_{12}); **Bild 1.4**.

An einem 2-Tor sind ebenfalls Reflexionsmessungen möglich. Sie stellen die vorhandene Anpassung (bezogen auf 50 Ohm) jeweils am Eingang (S-Parameter: S_{11}) und am Ausgang (S-Parameter: S_{22}) des Messobjekts fest (vgl. Bild 1.4). Dabei ist es wichtig, das dabei unbenutzte Tor (*Port*) impedanzrichtig, d.h. mit der Referenzimpedanz / Bezugsimpedanz abzuschließen. Üblicherweise sind es 50 Ohm.

Weiterhin können Messobjekte einen Eingang und zwei Ausgänge oder auch zwei Eingänge und einen Ausgang besitzen (Beispiele: Leistungsteiler, Leistungsaddierer, Antennenweiche). Hier handelt es sich um ein 3-Tor (*3-Port*) - **Bild 1.5** und **Bild 1.6** (aus Übersichtsgründen ist eine zweiteilige Darstellung gewählt). Wie bereits für das 2-Tor (*2-Port*) angemerkt, müssen auch am 3-Tor (*3-Port*) alle unbenutzten Tore (*Ports*) immer impedanzrichtig abgeschlossen sein!

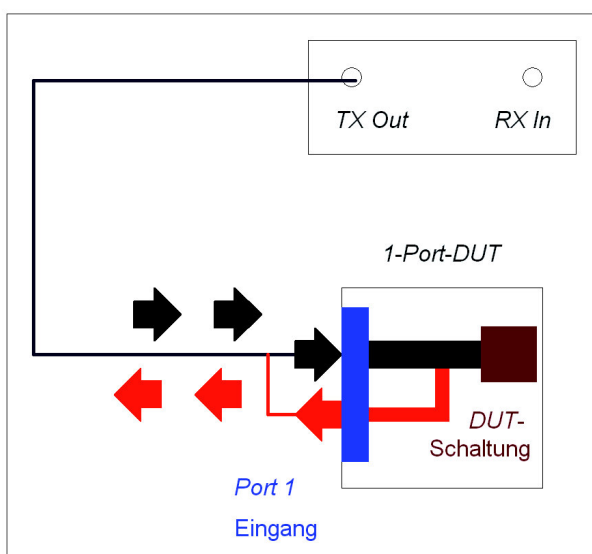


Bild 1.1: Reflexionsmessung an einem 1-Tor (1-Port); die klassische Anpassungsmessung.

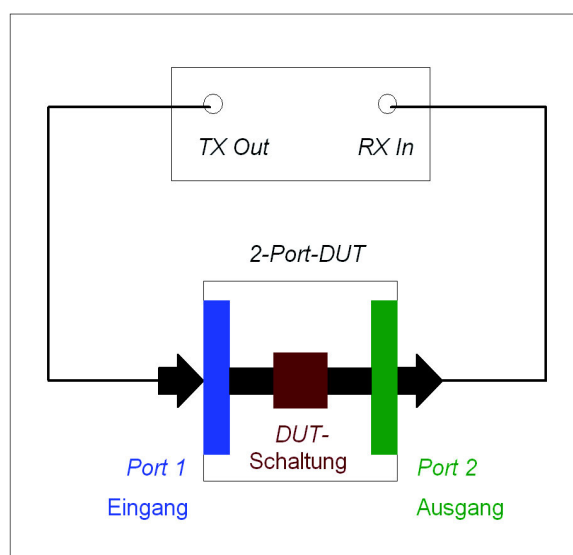


Bild 1.2: Mit einer Durchgangs- (Transmissions-) Messung erfolgen Verstärkungs-/Dämpfungs- und Phasenmessungen.

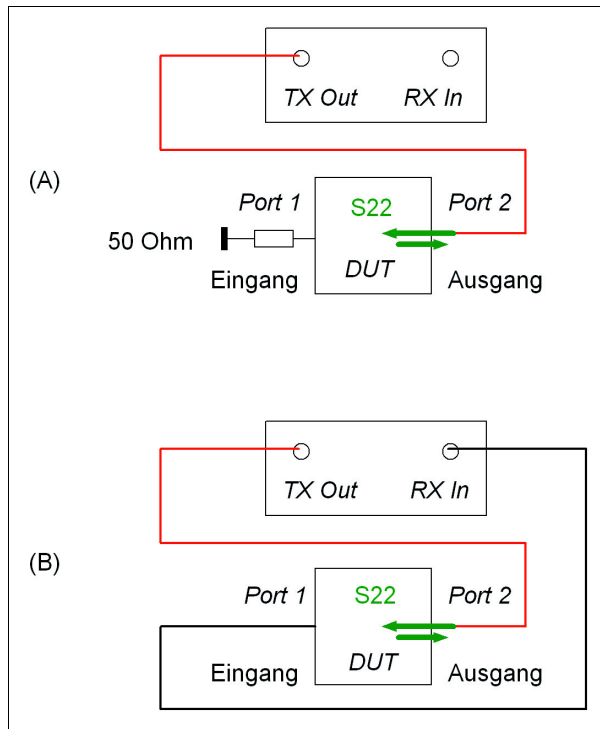


Bild 5.2: Verlauf des Messsignals und erforderliche Anschlüsse bei einer S_{22} -Messung an einem 2-Tor-Messobjekt (2-Port-DUT).

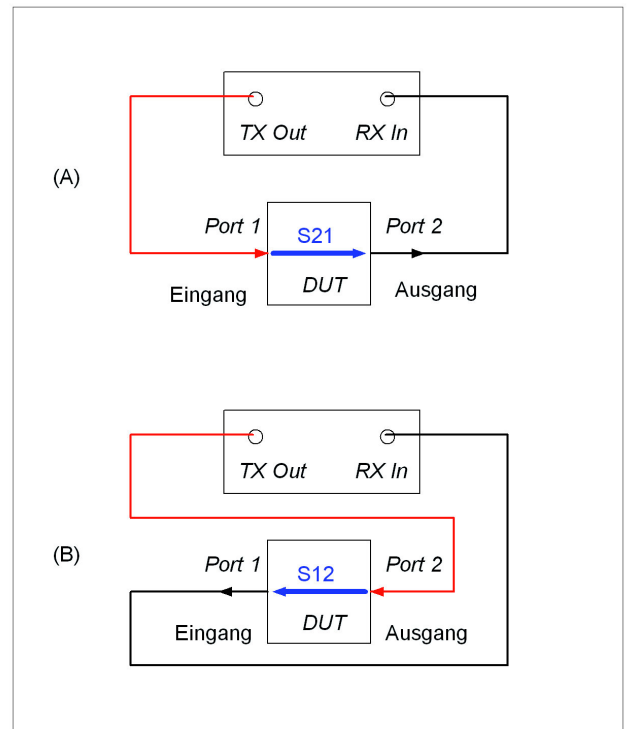


Bild 5.3 Verlauf des Messsignals und erforderliche Anschlüsse bei einer S_{21} -Messung (A) und bei einer S_{12} -Messung (B).

Fazit: Das Messsignal kommt bei jeder (!) S-Parameter-Messung immer von der *TX-Out*-Buchse, die es dann – entsprechend der jeweiligen Anforderung an die durchzuführende S-Parameter-Messung – an das Tor 1 (*Port 1*) oder an das Tor 2 (*Port 2*) des Messobjekts (*DUT*) zu legen gilt. Dies erfordert bei jedem Messaufbau ein Überdenken der Anschlussart und

birgt von daher - neben den anderen zu beachtenden Einstellungen - ein gewisses Bedienfehler-Risiko in sich.

S-Parameter Test Set

Ein S-Parameter *Test Set* bringt dem gegenüber Vereinfachungen mit sich, in dem der Benutzer jetzt nur noch „Port-mäßig“ denkt. Statt den VNWA2/VNWA3 mit seinen *TX-Out*- und *RX-In*-Messleitungen vor Augen zu haben, befindet sich der Netzwerkanalyser zusammen mit einer Relais-Umschaltung in einer *Black Box* (**Bild 5.4**). Sie verfügt über zwei Messbuchsen; die linke ist immer mit dem Tor 1 (*Port 1*) des Messobjekts (*DUT*) zu verbinden und die rechte mit seinem Tor 2 (*Port 2*). Alles weitere läuft durch die Softwaresteuerung automatisch ab.

Die folgenden Bilder geben einen zusammenfassenden Überblick über den Verlauf des Messsignals und die Anschlussarten zum Messen der S-Parameter S_{11} -, S_{22} -, S_{21} - und S_{12} .

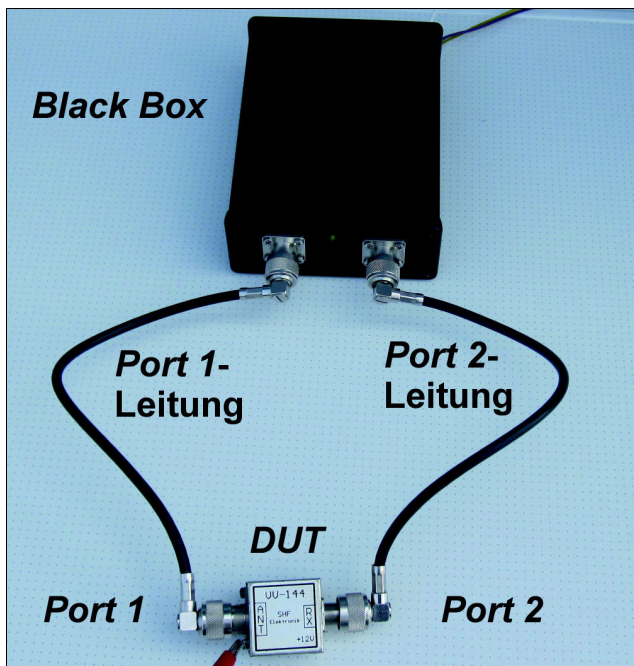


Bild 5.4: Die *Black Box* beinhaltet den VNWA3 und das S-Parameter *Test Set*. Der linke Anschluss gehört an das Tor 1 (*Port 1*) vom Messobjekt (*DUT*), der rechte Anschluss an das Tor 2 (*Port 2*) des Messobjekts (*DUT*)! Alles weitere steuert die VNWA-Software.

- S_{11} -Messung an einem 1-Tor-Messobjekt (1-Port-DUT), **Bild 5.5 (A)**.
- S_{11} -Messung an einem 2-Tor-Messobjekt (2-Port-DUT), **Bild 5.5 (B)/(C)**.
- S_{22} -Messung an einem 2-Tor-Messobjekt (2-Port-DUT), **Bild 5.6 (A)/(B)**.
- S_{21} -Messung **Bild 5.7 (A)**.
- S_{12} -Messung **Bild 5.7 (B)**.

- Zum gemeinsamen Messen aller vier S-Parameter (S_{11} , S_{21} , S_{22} , S_{12}) sind natürlich beide Tore (*Ports*) gemäß Bild 5.7 anzuschließen. Die dabei stattfindenden Einzelmessungen

14.2 Phasenwinkelmessung einer $\lambda/2$ -Umwegleitung für 435 MHz

In der folgenden Messung wird eine angefertigte 180° phasendrehende Halbwellenumwegleitung für 435 MHz nachgemessen, wie man sie beispielsweise zum Anschluss eines 50-Ohm-Koaxialkabels an einen Halbwellen-Faltdipol benötigt.

Bild 14.2.1 stellt den skizzierten Messaufbau vor. Die beiden Messleitungen an *TX Out (Port 1)* und *RX In (Port 2)* enden in kurzen Semi-Rigid-Koaxialkabelstücken, aus jedem ragt der Innenleiter (Schwarz) 3 mm heraus. Bei der zu messenden Halbwellenumwegleitung ragt ihr Innenleiter an jedem Ende (Blau) ebenfalls mit einer Länge von 3 mm heraus, so dass sie zum Messen verlötet werden kann.

Außer den drei folgend genannten Einstellungen werden alle aus Kapitel 14.1 (1. Messbeispiel) übernommen und deshalb hier nicht weiter kommentiert.

(D) Tastatur „f“=>Input: Start- und Stoppfrequenz

400 MHz / 500 MHz

Hier ist der neue Frequenzbereich einzutragen.

(E) Tastatur „s“=> VNWA Sweep Settings:

- Anzahl Datenpunkte eingeben **200**
- Mit Schieber die Zeit pro Durchlauf (*time per sweep*) und die Zeit pro Datenpunkt (*time per data point*) einstellen; beide sind von der ausgewählten Anzahl Datenpunkte abhängig!
- *time per sweep* **20 s**
(Es muss die später benutzte längste [!] Zeit gewählt werden)
- *time per data point* **100 ms**

Die Anzahl der Datenpunkte (*number of data points*) ist auf 200 reduziert, womit man über diesen Frequenzbereich normalerweise gut zurecht kommt. Für eine dabei erzielbare höchste Genauigkeit bleibt die Zeit für einen Datenpunkt (*time per data point*) weiterhin auf 100 ms eingestellt.

(G) Tastatur „k“=>Simple OSL Model Settings=>OSL Calibration Standard Setup: Je nach gewünschter Kalibrierbezugsebene und Art/Ausführung der Kalibrierelemente die jeweilige Kalibrationsdatei mit *load settings* laden oder die Werte per Hand eingeben:

- Kalibrierbezugsebene **Center of Thru**
- Thru: Transmission Faktor **1**
- Thru: Transmission Delay **19,8 ps**

Die Lötanschlüsse der $\lambda/2$ -Umwegleitung stellen eine Besonderheit für die erforderliche Durchgangskalibrierung dar. Sie sollten genauso an die beiden Messleitungen gelötet werden, wie es auch im späteren Einsatzfall geplant ist. Hier mag man jedoch schnell an seine Grenzen stoßen, denn jeder Millimeter Längenänderung (in Luft) ergibt an der 435-MHz-Halbwellenumwegleitung eine Phasenwinkeländerung von bereits rund $0,5^\circ$! Deshalb sind auch Anschlusstechniken mit Lötösen bei derartigen Vorhaben abzulehnen – es sei denn, man bezieht sie in die Messung mit ein.

Im hier vorliegenden Fall wurden die für das Kalibrieren und für das nachfolgende Messen zu verbindenden Innenleiter mit

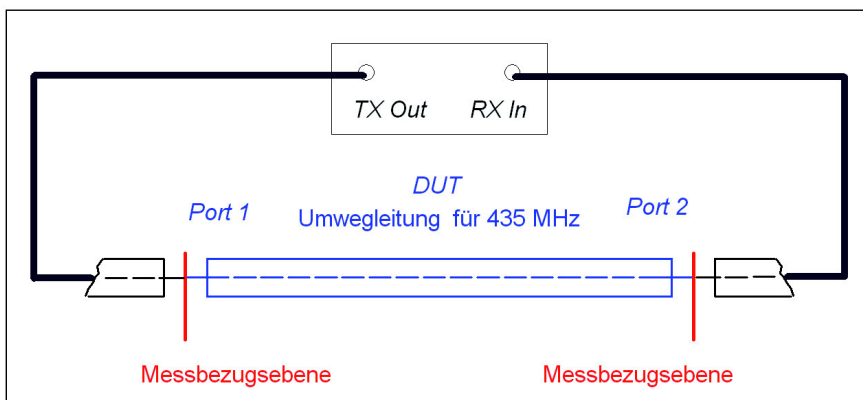


Bild 14.2.1: Zum späteren zweckbestimmten Einbau verfügt die Halbwellenumwegleitung nur über Lötanschlüsse, so dass sie zum Messen dementsprechend an die Messleitungen angelötet werden muss. Die beiden Lötverbindungspositionen müssen die Messbezugsebenen sein!

Kapitel 15

Messen des Wellenwiderstandes (S_{11})

Die Kenntnis des Wellenwiderstandes einer Leitung sowie der ihrer angeschlossenen Komponenten ist zur impedanzrichtigen Anpassung wichtig. Ansonsten geht zusätzlich noch mehr Signalpegel verloren, als es allein schon durch die Leitungsdämpfung geschieht.

Das klassische Beispiel ist bei Amateurfunkstationen natürlich die koaxiale Antennenleitung zwischen der Antenne und dem Transceiver mit dem heute üblichen 50 Ohm Wellenwiderstand. Neben einigen „Exoten“ gibt es sie auch mit 25 Ohm, 35 Ohm, 75 Ohm oder 93 Ohm Wellenwiderstand; ebenso symmetrische Kabel mit 240 Ohm, 300 Ohm und 450 Ohm Wellenwiderstand. Somit kann es schnell passieren, dass man in der Bastelkiste plötzlich ein Kabel ohne Kennzeichnung vorfindet. Hier hilft nur noch das Messen des Wellenwiderstandes.

Ebenso wie bei der Längenmessung, so führt der VNWA2/VNWA3 auch im Fall einer Wellenwiderstandsmessung zunächst eine Breitband-Frequenzmessung durch und wertet dabei die so genannte Sprungantwort nach einer (mathematischen) inversen Fourier-Transformation aus. Dabei steht die Sprunghöhe in Relation zur jeweiligen Kabelimpedanz.

15.1 Messen des Wellenwiderstandes eines Koaxialkabels

Im vorliegenden Messbeispiel soll der vom Hersteller veröffentlichte Wellenwiderstand 93 Ohm des Koaxialkabeltyps RG62 nachgemessen werden. Dazu steht ein Leitungsstück mit einer Länge von rund 2,83 m zur Verfügung, welches am Ende offen ist.

VNWA-Betriebsart (Operation Mode) *Options => Operation Mode => VNWA*

(A) Messaufbau

Bild 15.1.1 zeigt den Messaufbau als Schaltungsskizze: Das Koaxialkabelstück steckt in einem SMA-Verbinder (SMA *Thru*), der mit dem SMA-Stecker (SMA *male*) am Ende der *Port-I-* (*TX-Out-*) Messleitung verschraubt ist. Die praktische Ausführung verdeutlicht **Bild 15.1.2**, allerdings wurde die Krokodilklemme zum Festklemmen des Abschirmgeflechts am Durchverbinder (*Thru*) für das Foto entfernt.

Es werden folgende Kalibrierelemente (*Cal Standards*) benutzt:

Art der *Cal Standards*

- | | |
|--|--------------------|
| - Hersteller | Rosenberger |
| - Norm | SMA |
| - weibl./männl. (<i>male/female</i>) | female |

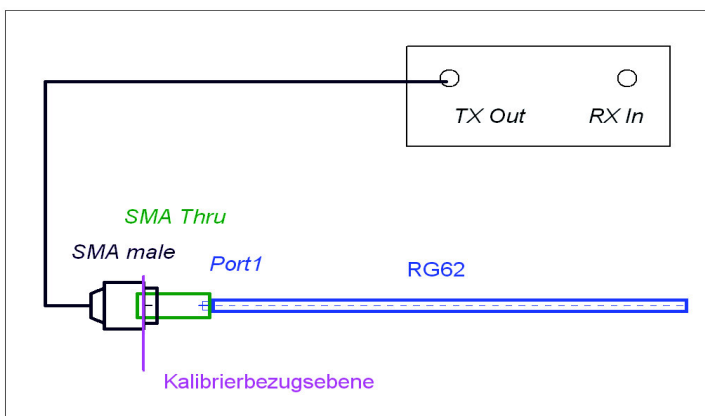


Bild 15.1.1: Schaltungsskizze zum Messen des Wellenwiderstandes vom 93-Ohm-Koaxialkabel RG62.

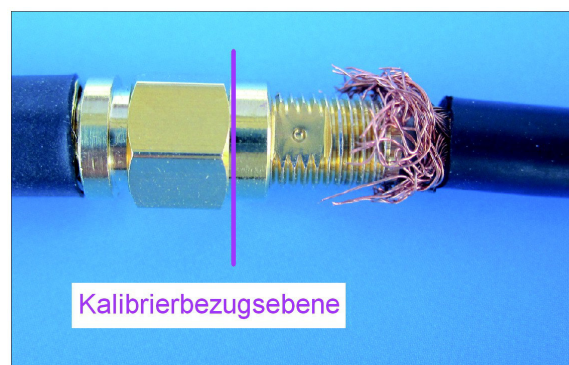


Bild 15.1.2: Der eingesteckte RG62-Innenleiter stößt mit seiner Isolierung an diejenige im Inneren des SMA-Verbinders. Eine Krokodilklemme (nicht im Bild) sorgt bei der Messung für den Kontakt des Abschirmgeflechts.

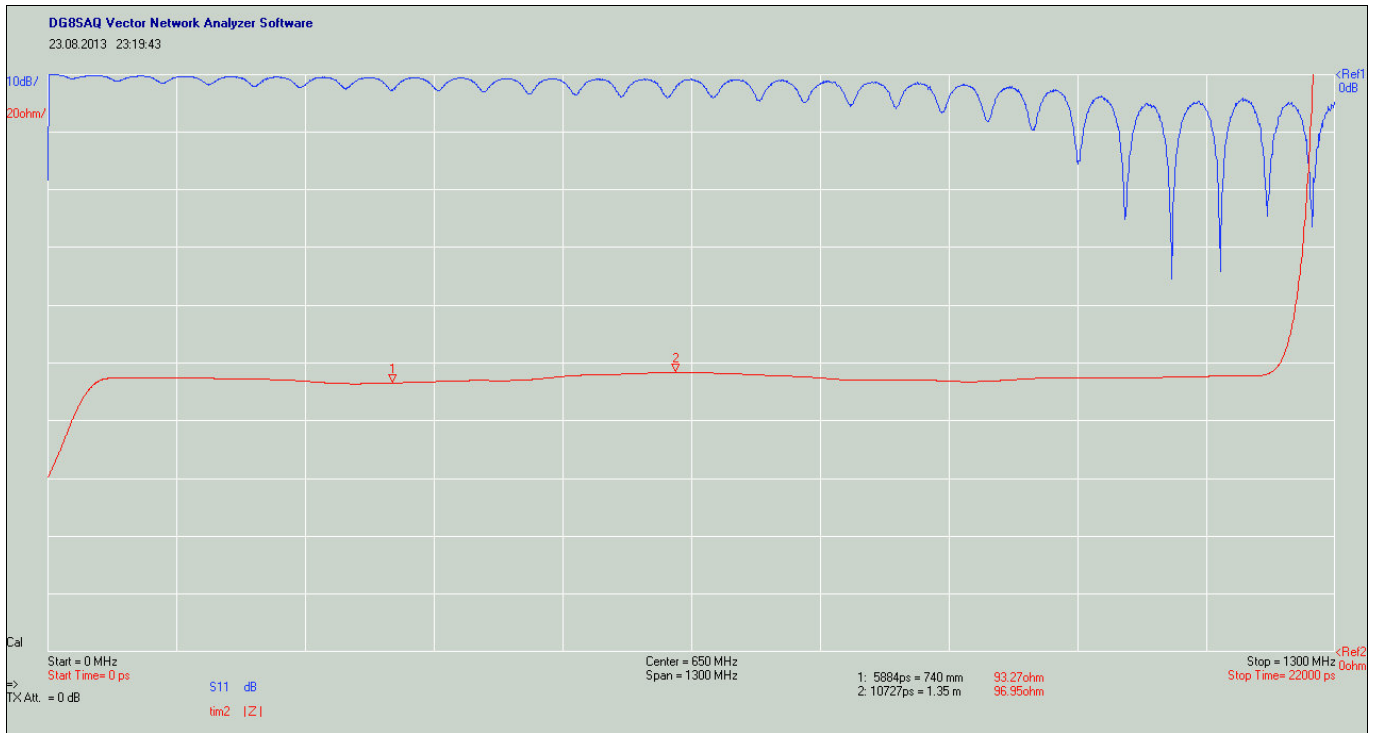


Bild 15.1.4: Die Anzeige der Zahlenergebnisse erfolgt durch das Setzen von *Time Markern*.

(H) Eingabe: *Measure* => *Calibrate*: **Kalibrierung mit *Short*, *Open* und *Load* durchführen**

(I) Tastatur „p“ => *Port Extensions*: Je nach gewünschter Messbezugsebene jetzt die Kalibrierbezugsebene verschieben:

- Messbezugsebene = **Kalibrierbezugsebene (*Male Reference Plane*)**

Um ausschließlich den Wellenwiderstand des RG-62-Koaxialkabels zu messen und angezeigt zu bekommen, müsste in Bild 14.1.1 die Messbezugsebene auf der rechten genormten Bezugsebene des zur Verbindung benutzten weiblichen SMA-Verbinders (*SMA Thru*; Grün) liegen. Wie gleich in der Messgrafik zu sehen sein wird, kann man aber zur allgemeinen Wellenwiderstandsbestimmung des Koaxialkabels darauf verzichten, indem man die Messergebnisse dieses kleinen Bereichs (am Anfang der Messkurve) nicht in die Auswertung mit hinein nimmt.

Messdurchführung und Ergebnisbetrachtung

Bild 15.1.4: Der Mausklick auf *Single Sweep* – oder Tastatur „Leertaste“ - setzt die Messung in Gang. Nach erfolgtem Durchlauf (*Sweep*) von S_{11}/dB erscheint schlagartig die rote *tim2/|Z|*-Messkurve.

Zu ihrer etwas genaueren Darstellung ist die Auflösung auf 20 Ohm gesetzt. Dazu klickt man mit der linken Maustaste entweder am Hauptbildschirm links oben *ohm/* oder an seiner rechten Seite *<Ref2 0 Ohm* an. Daraufhin öffnet sich das Fenster *Input: Trace 2 (Bild 15.1.5)*, in welchem links oben der Wert „20“ einzugeben ist; die zugehörige Maßeinheit *ohm/Div* wird im Pulldownmenü rechts daneben ausgewählt.

Der Blick auf die rote Messkurve verrät einen nicht vollkommen steten Verlauf des Wellenwiderstandes. Um einige Zahlenwerte zu erhalten, setzen wir zwei *Time Marker* (weil wir das Messergebnis über die *Time*-Funktion bekommen): Zunächst fährt man den Mauszeiger auf den Hauptbildschirm der Messgrafik und klickt die rechte Maustaste. Daraufhin öffnet sich das in Bild 15.1.6 linke, größere Fenster. Mit dem Setzen des Mauszeigers auf *Add Time Marker* erscheint dann rechts davon zusätzlich ein kleineres Fenster. Dort wird mit der linken Maustaste *Add normal Time Marker* angeklickt. Nun kann man den erzeugten *Marker1* entlang der roten Messkurve bewegen (dazu den Mauszeiger auf *Marker1* setzen und beim Bewegen die linke Maustaste gedrückt halten) und im Anzeigetext zu *Marker 1* den Wellenwiderstand ablesen. Hier lautet der Anzeigetext: *Marker1: 5884 ps = 740 mm 93,27 ohm*; für den auf die gleiche Weise erzeugten zweiten: *Marker: 2 10727 ps = 1,35 m 96,95 ohm*.

Offset-Werte von Eigenbau-Kalibrierstandards der Serie N						
	Short	Open	Short	Open	Thru	Thru
	male	male	female	female	male-male	female-female
1	Rosenberger Flansch plan		-86,88 ps	-91,72 ps		
2	UG 58 TG hohl		-118,81 ps	-119,43 ps +16,69 ps		
3	UG 58 KF		-110,78 ps	-86,28 ps		
4	Radiall R161444037	-158,34 ps -159,22 ps				
5	UG 59 STG	-152,86 ps -168,53 ps				
6	UG 129 TA					-79,40 ps
7	UG 29 TA					-80,84 ps
8	UG 57 TA				-140,34 ps	

Tabelle 7.1: Allen Messungen liegt ein semiprofessioneller Kalibriersatz zu Grunde.

Zu 1) Fabrikat Rosenberger, Typ unbekannt. Wie in Abschnitt *N-Eigenbau-Kalibrierstandard* „Kurzschluss“ (*Short*) und „Leerlauf“ (*Open*) mit weiblichem Anschluss (*female*) beschrieben, siehe Bild 7.4; Bezugsquellen: Flohmarkt, Internet.

Zu 2) *Open*: Der auf der Flanschrückseite hervorstehende Lötanschluss wird zunächst abgeschnitten und dann auf das Niveau der kreisrunden Verpressung gefeilt (ähnlich wie in Bild 7.4, Mitte).

Open "hohl": Die PTFE-Isolierung und der Innenleiter lassen sich mit zwei kräftigen LötKolben oder mit einer Heißluftpistole nach einem geduldigen Erhitzen des Metallgehäuses entfernen. Vorsicht: Sehr heiß! Verletzungsgefahr!

Short: Ein gebohrtes und über den Lötanschluss geschobenes kleines Kupferblech erzeugt den Kurzschluss, in dem es mit der kreisrunden Verpressung und mit dem Lötanschluss verlötet wird (ähnlich wie in Bild 7.4, links); Bezugsquelle [7.5].

Zu 3) *Open*: Der auf der Flanschrückseite hervorstehende Lötanschluss wird abgeschnitten und auf das Niveau der kreisrunden Massefläche gefeilt; Bezugsquelle [7.5].

Short: Über den von der PTFE-Isolierung befreiten Lötanschluss eine Messing-Unterlegscheibe schieben und zusammen mit der kreisrunden Massefläche verlöten. Bezugsquelle [7.5].

Zu 4) Siehe *N-Eigenbau-Kalibrierstandard* „Kurzschluss“ (*Short*) und „Leerlauf“ (*Open*) mit männlichem Anschluss (*male*) und Bild 7.6; Bezugsquelle Internet.

Zu 5) Anfertigung ähnlich 4).

Open: Der Lötanschluss auf der Flanschrückseite ist abzuschneiden und auf das Niveau der kreisrunden Massefläche zu feilen.

Short: Ein gebohrtes und über den Lötanschluss geschobenes kleines Kupferblech erzeugt den Kurzschluss, in dem man es am Lötanschluss und mit der umgebenden Massefläche verlötet; Bezugsquelle [7.5].

Zu 6) Bild 7.9; Bezugsquelle [7.5].

Zu 7) Bild 7.8; Bezugsquelle [7.5].

Zu 8) Bild 7.10; Bezugsquelle [7.5].