



NACHRICHTENTECHNIK

S-Parameter

Vorbereitung und Versuchsauswertung

Autoren: Sebastian PRÜTER
Richard GRÜNERT

12.6.2020

1 Vorbereitungsaufgaben

1.1 Netzwerkanalysator

Ein Netzwerkanalysator misst die Netzwerkparameter elektrischer Netzwerke, insbesondere Vierpoleigenschaften, wie

- Impedanz,
- Reflexionsfaktor,
- Transmission (Übertragungsfunktion),

deren Werte als Frequenzgänge auf einem Bildschirm dargestellt werden.

Ein skalarer Netzwerkanalysator (SNA) misst nur die Beträge der entsprechenden Größen, ein vektorieller Netzwerkanalysator (VNA) hingegen misst Beträge **und** Phasen, also *komplexe* Werte (der Begriff *vektoriell* ist daher etwas irreführend).

1.2 Kalibrierung und -standards

Bei einer Messung treten gewöhnlicherweise systematische Fehler auf. Diese sind durch die Messeinrichtung bedingt und müssen vor der Messung erfasst und korrigiert werden, um möglichst genaue Messergebnisse erzielen zu können. Diese Störeinflüsse treten z.B. durch die ungewollten Eigenschaften von Messleitungen auf, da sie eigene Übertragungsfunktionen und Reflexionsfaktoren besitzen, welche das Messergebnis verfälschen.

Bei der *Kalibrierung* wird die Abweichung der Messeinrichtung mit einem Referenzobjekt (Standard, Normal) verglichen. Beim Netzwerkanalysator ist dies typischerweise ein „Short, Open, Load“(SOL) bzw. „Short, Open, Load, Through“(SOLT), welches die Messleitung (Kabel, Verbindungen) mit den jeweiligen Impedanzen abschließt (Mech-Cal).

Diese werden nacheinander mit den verwendeten Ports des NWAs verbunden. Die Kalibrierung kann ebenfalls mit einem automatischen Kalibrierungsmodul (eCal) durchgeführt werden, welches für jeden Port die entsprechenden Kalibrierungsbedingungen automatisch bereitstellt. Diese Methode verringert die mechanische Belastung der Verbindungen und ist, gerade bei 4-Port-Kalibrierung, schneller.

Vor der Kalibrierung des NWAs muss der zu messende Frequenzbereich eingestellt werden (start & stop frequency). Bei einer Umstellung des Frequenzbereiches muss erneut kalibriert werden.

1.3 Parameter

1.3.1 Einfügedämpfung

Die Einfügedämpfung ist das Verhältnis der Leistung, die an einer Last über z.B. eine Leitung umgesetzt wird, zu der Leistung, die *direkt* an der Last umgesetzt werden würde (ohne die Leitung). Sie gibt also den Leistungsverlust bzw. die Dämpfung an, die das Signal durch das *Einfügen* der Leitung in den Signalweg erfährt.

1.3.2 Verstärkung

Die Verstärkung ist allgemein das Verhältnis von Ausgangs- zu Eingangsgröße, also z.B. Aus- zu Eingangsspannung. Ist die Verstärkung kleiner eins, handelt es sich um eine Dämpfung. Logarithmisch/im Dezibel-Maß kann sie abhängig von der betrachteten Größe dargestellt werden durch

$$V = 10 \cdot \log_{10} \frac{P_2}{P_1}$$

wenn es sich um eine Leistung handelt oder

$$V = 20 \cdot \log_{10} \frac{U_2}{U_1}$$

wenn es sich um eine Spannung handelt.

1.3.3 Reflexionsdämpfung

Die Reflexionsdämpfung R ist die Dämpfung der reflektierten Welle.

$$R = \frac{P_{\text{reflektiert}}}{P_{\text{ein}}}$$

Sie entspricht dem inversen Reflexionsfaktor.

1.3.4 S-Parameter

Die S(treu)-Parameter (vom engl. *Scattering-Parameter*) sind eine Reihe an komplexwertigen Parametern (Betrag + Phase) zur Charakterisierung von n-Toren, in der Regel Vierpole.

Bei der Berechnung der S-Parameter bezieht man sich auf ein Vierpolmodell, bei welchem a_1 und a_2 die auf das jeweilige Tor zulaufenden und b_1 und b_2 die vom jeweiligen Tor ablaufenden Wellengrößen sind (Tor 1/Tor 2).

Bei einem Vierpolnetzwerk existieren die folgenden S-Parameter:

S_{11} , **der Reflexionskoeffizient, primärseitig**, beschreibt das Reflexions- zu-Transmissions-Verhältnis von Spannungs- bzw. Stromwellen.

$$S_{11} = \frac{b_1}{a_1}$$

S_{21} , **der Transmissionskoeffizient, primärseitig**, beschreibt das Verhältnis der am Tor 2 auslaufenden Welle zur am Tor 1 einlaufenden Welle. Über der Frequenz also die Übertragungsfunktion. („Ausgang zu Eingang“)

$$S_{21} = \frac{b_2}{a_1}$$

S_{22} , **der Reflexionskoeffizient, sekundärseitig** Wie S_{11} nur vom anderen Tor blickend.

$$S_{22} = \frac{b_2}{a_2}$$

S_{12} , **der Transmissionskoeffizient, sekundärseitig** Wie S_{21} nur vom anderen Tor blickend.

$$S_{12} = \frac{b_1}{a_2}$$

Der erste Index steht jeweils für den Wirkungsort, der zweite für die Ursache.

1.4 Elektrische Länge

Zur Bestimmung der elektrischen Länge wird die Phasenlage des Signals benötigt. Mit einem zeitlichen Delay/Korrekturparameter kann dann die Laufzeit bestimmen (Phasenlage = 0), woraus sich mit dem Verkürzungsfaktor die physikalische Länge berechnen lässt.

1.5 Stecker- und Messadapternormen

Typ	Frequenzbereich
BNC	< 4 GHz
SMC	< 12 GHz
TNC	< 12 GHz
N(eill)	< 12 GHz
SMA	< 18 GHz
C	< 11 GHz
2.94 mm	< 40 GHz
2.4 mm	< 50 GHz
1.85 mm	< 67 GHz
1 mm	< 110 GHz

Tabelle 1: Einige Verbindungstypen und deren Einsatz-Frequenzbereiche

1.6 Verkürzungsfaktor

Im freien Raum breiten sich elektromagnetische Wellen mit der Lichtgeschwindigkeit

$$c_0 \approx 3 \cdot 10^8$$

aus, welche die maximale Ausbreitungsgeschwindigkeit für Energie und Information darstellt. In Leitungen ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit c von Spannungs- und Stromwellen jedoch geringer. Dadurch erscheint die Wellenlänge λ auf der Leitung gegenüber der Wellenlänge im Vakuum λ_0 verkürzt. Das Verhältnis ist der Verkürzungsfaktor.

$$\frac{\lambda}{\lambda_0} = VK$$

Für die Wellenlänge auf der Leitung ergibt sich damit

$$\lambda = \frac{c}{f} = VK \cdot \frac{c_0}{f}$$

Der konkrete Wert des Verkürzungsfaktors ist von der Bauart der Leitung abhängig. Für eine koaxiale Leitung ergibt sich beispielsweise

$$VK = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

Für ein Koaxialkabel mit einem Dielektrikum aus Polyethylen ($\epsilon_r = 2.25$) erhält man somit einen Verkürzungsfaktor von (näherungsweise) $VK = 0.667$.

2 Versuchsaufgaben

2.1 Kalibrierung

Die menügesteuerte Kalibrierung des Netzwerkanalysators erfolgte in einem Frequenzbereich von 10 MHz bis 6 GHz mithilfe des elektronischen Kalibrierungskits an allen vier Ports.

2.2 S11-Messung

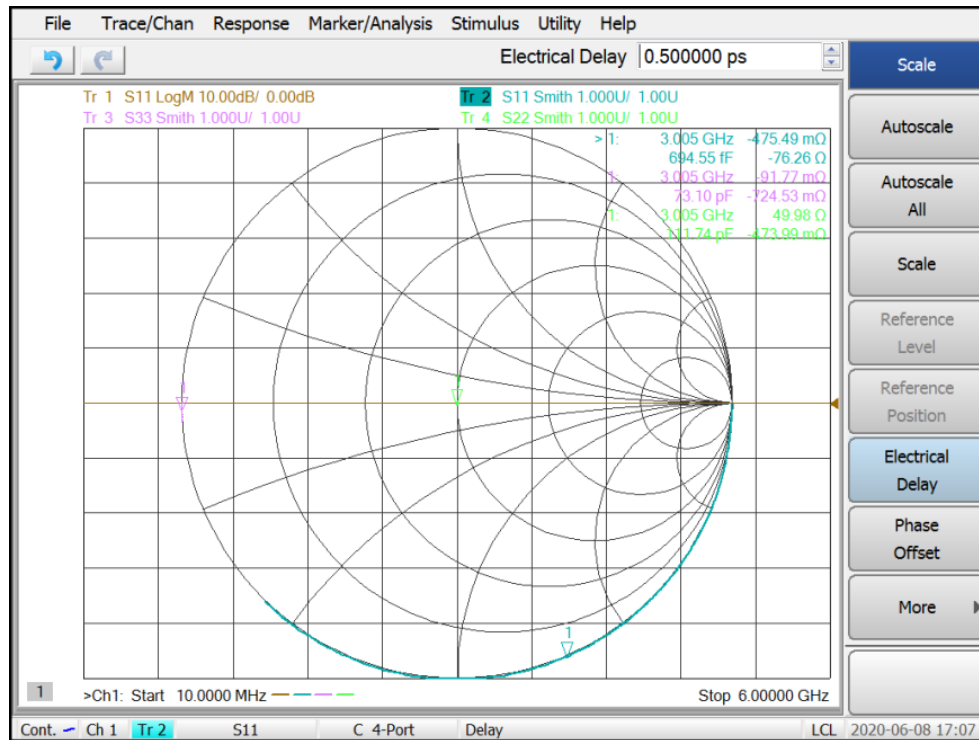


Abbildung 1: Smithdiagramm der S11-Messung, im Trace 2 ist ein Kapazitiver Anteil bei offenem Abschluss erkennbar

Mithilfe eines mechanischen Standards wurde das DUT, ein Koaxialkabel, jeweils mit Short, Open und Load abgeschlossen und der S11-Parameter mit dem Netzwerkanalysator als Frequenzgang bestimmt. Vorher musste noch der kapazitive Anteil des S11 mithilfe eines *Electrical Delays* in der Software des Netzwerkanalysators kompensiert werden (Abb. 1).

Daraufhin wurde die S11-Parameter Leitung bei den entsprechenden Abschlüssen gemessen und unter Umständen mit einem Electrical Delay beaufschlagt. Im Ergebniss erkennt man die S11-Positionen im Smithdiagramm bei Short am linken Rand mit Phase -180° (0 auf der reellen Achse), also Totalreflexion, bei Open am rechten Rand mit Phase 0° (∞ auf der reellen Achse), auch Totalreflexion, und bei Load in der Mitte (1 auf der reellen Achse). Das Smithdiagramm zeigt die erwarteten Ergeb-

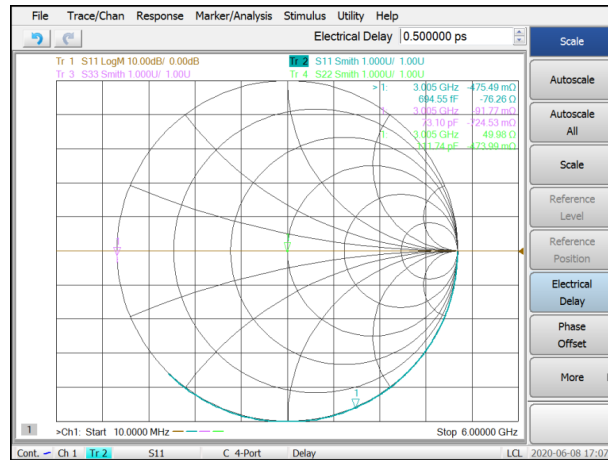


Abbildung 2: Smithdiagramm der S11-Messung, mit Korrekturparameter, Türkis: Open, Grün: Load, Pink: Short

nisse (Abb. 2).

Über der Frequenz waren die Reflexionsfaktoren bei Short sowie Open entsprechend 0 dB und bei Load (Anpassung) bei einem sehr geringen Wert, was ebenfalls zu erwarten war.

2.3 Dämpfungsglied

Im Versuch wurde zuerst der S11-Parameter eines Dämpfungsgliedes bestimmt. Das Ergebnis im Smith-Format ist in Abb. 4 zu sehen.

Der Reflexionsfaktor zeigt eine Frequenzabhängigkeit, welche sich im Smithdiagramm durch den kreisförmigen Verlauf (Abb. 4 türkis) äußert.

Mit einer Messung der Transmission/Einfügedämpfung und dafür notwendiger vorheriger Verbindung eines zweiten Ports ergab sich die Übertragungsfunktion des Dämpfungsgliedes. Die Einfügedämpfung ist in Abb. 5 zu sehen. Man erkennt die konstante Dämpfung von etwa -5.96 dB über den betrachteten Frequenzbereich.

Die ausschlaggebende Größe für die Bestimmung der elektrischen

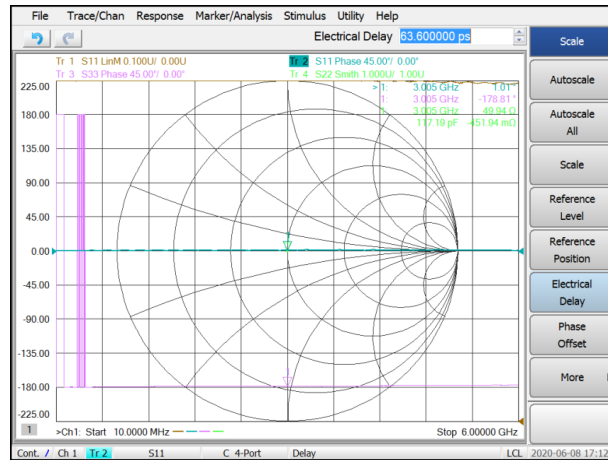


Abbildung 3: Phasen der S11-Messung, Farben entsprechen Abb. 2

bzw. physikalischen Länge ist die Phase des Dämpfungsgliedes. Diese wurde gemessen und das Electrical Delay angepasst, bis der Phasenverlauf in etwa 0° im Frequenzgang entspricht. Über den voreingestellten Verkürzungsfaktor im Fenster *Electrical Delay* errechnete das Programm die physikalische Länge des DUT (Abb. 6, *Distance*), welche mit der Messung durch ein Lineal positiv überprüft werden konnte.

2.4 Untersuchung an Koaxialkabeln

Im Versuch wurden S11 Messungen von einem BNC- und einem SMA-Kabel durchgeführt sowie deren Verkürzungsfaktor bestimmt.

Qualitativ kann aus dem Smithdiagramm Abb. 7 erkannt werden, dass der Reflexionsfaktor des BNC-Kabels deutlich frequenzabhängiger ist, als der des SMA-Kabels.

Bei der Transmissionsmessung über S31 bzw. S42 wurde der zweite Port verbunden und somit die Leitung abgeschlossen, die Auswirkung auf den Reflexionsfaktor sieht man in Abb. 9. Das BNC-Kabel weist auch hier noch einen sehr frequenzabhängigen und hohen Reflexionsfaktor im gemessenen Frequenzbereich auf. Die Messung der Transmission ergab Abb.

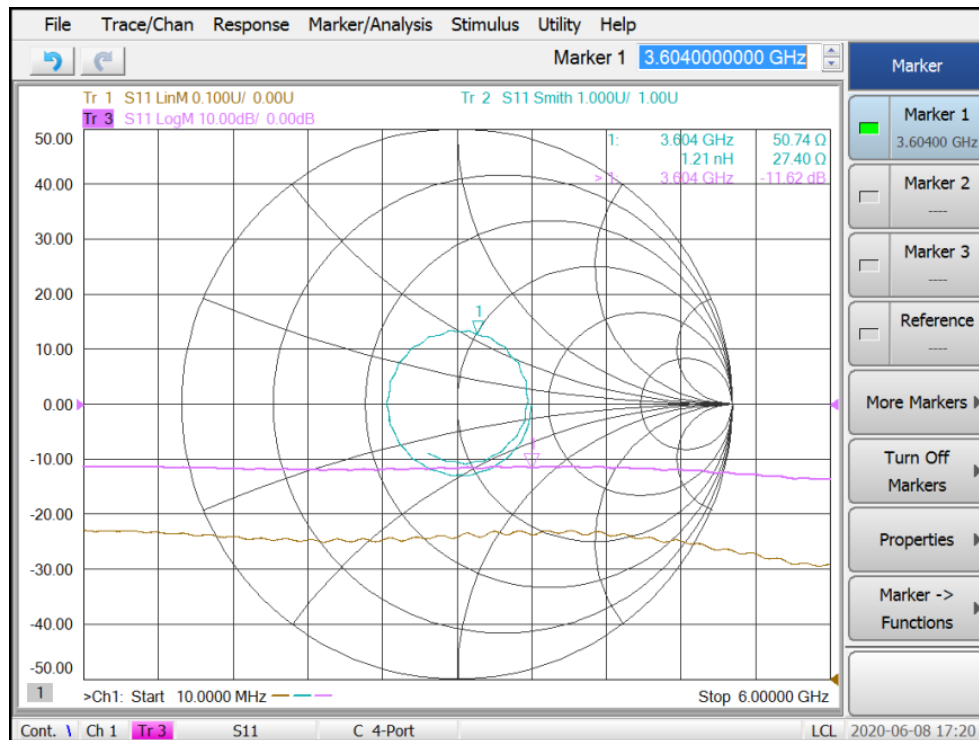


Abbildung 4: Smithdiagramm der S11-Messung des Dämpfungsgliedes

???. Auch bei der Transmission (Übertragungsfunktion) erkennt man einen weniger linearen Verlauf des BNC-Kabels, was in Bezug auf die Güte einen Nachteil gegenüber der SMA-Leitung darstellt, was in Bezug auf die Güte einen Nachteil gegenüber der SMA-Leitung darstellt.

Die Bestimmung des Verkürzungsfaktors der Leitungen erfolgte mithilfe der Softwarelösung des Netzwerkanalysators, ähnlich zu der Methode aus der vorherigen Aufgabe beim Dämpfungsglied. Das Electrical Delay wurde solange angepasst, bis die Phase den Wert 0 annahm. Da die Länge der Leitungen bekannt war (jeweils 1 m) konnte das Ergebnis für den Verkürzungsfaktor überprüft werden.

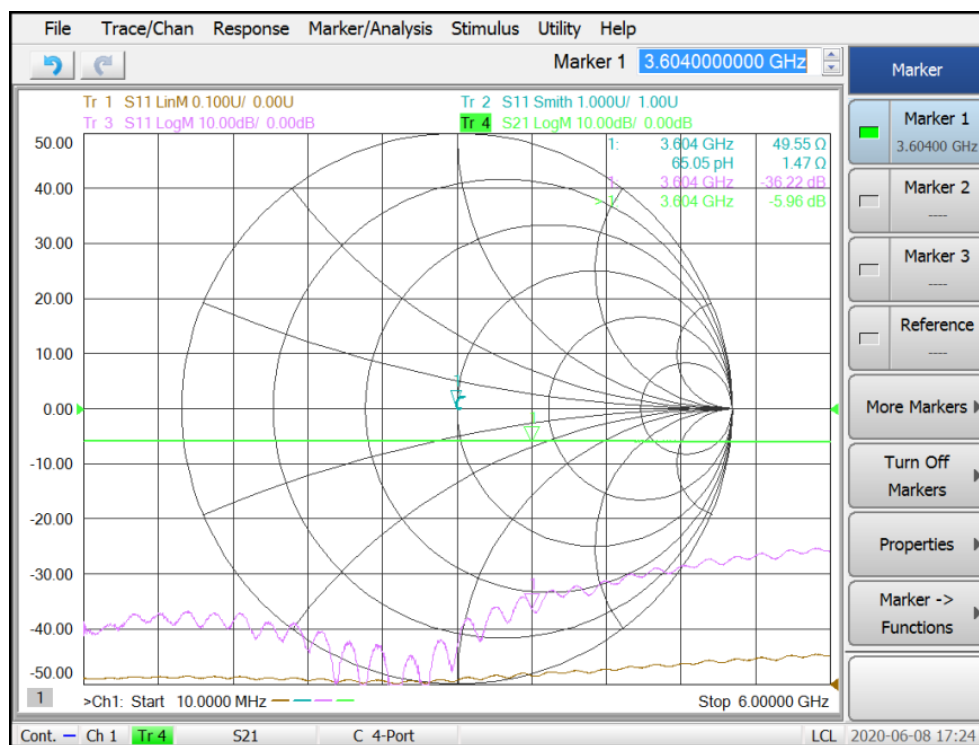


Abbildung 5: Messung der Einfügedämpfung des Dämpfungsgliedes (grün)

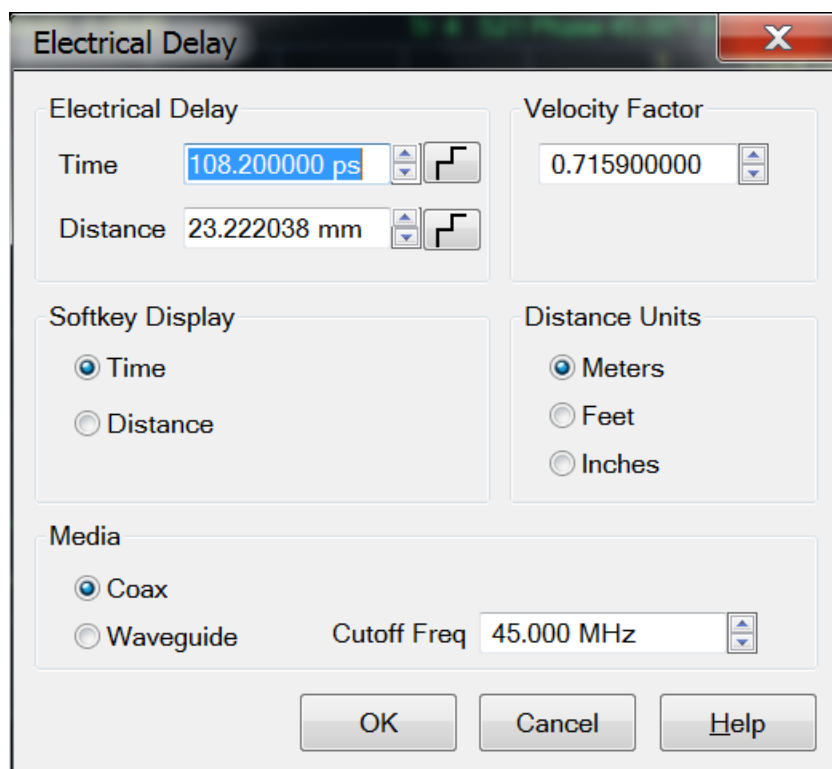


Abbildung 6: Bestimmung der physikalischen Länge mithilfe des Electrical Delays

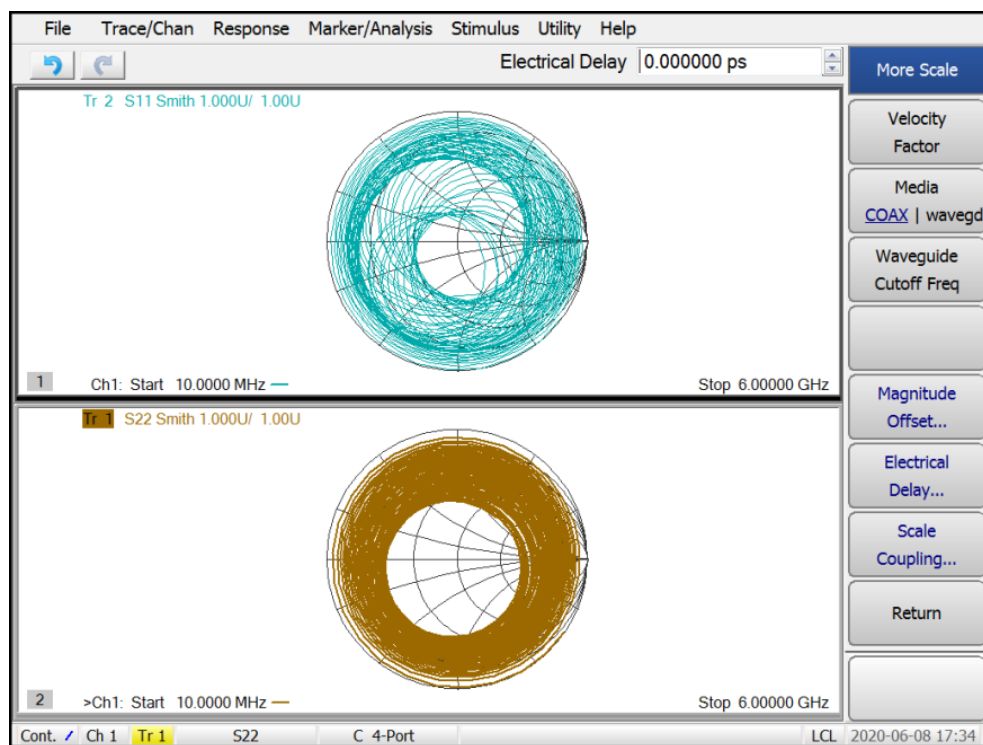


Abbildung 7: S11/S22 Messung von BNC (S11, blau) und SMA (S22, braun) im Smithdiagramm, offener Abschluss

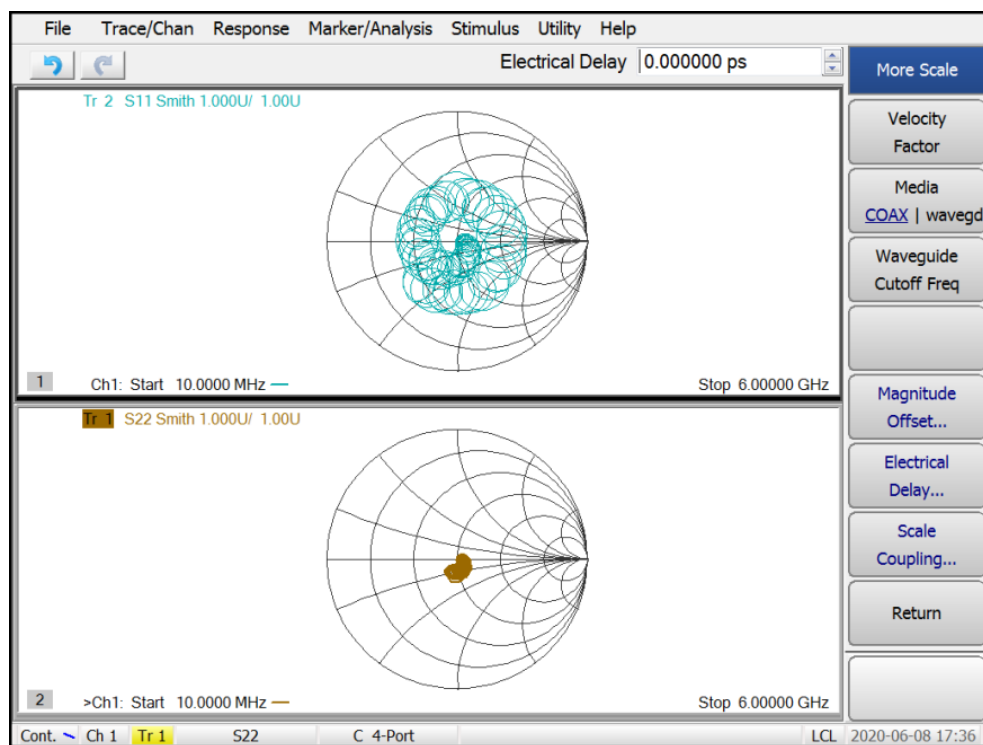


Abbildung 8: S11/S22 Messung von BNC (S11, blau) und SMA (S22, braun) im Smithdiagramm, Abschluss

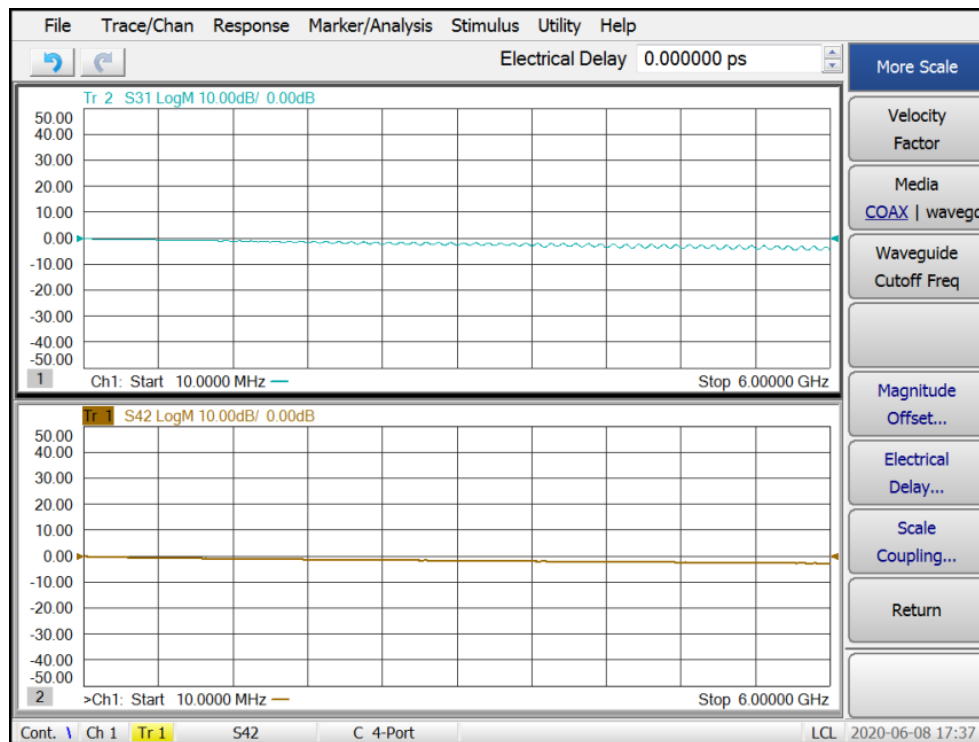


Abbildung 9: Transmissionmessung von SMA und BNC

Abbildung 10: Bestimmung des BNC-Verkürzungsfaktors

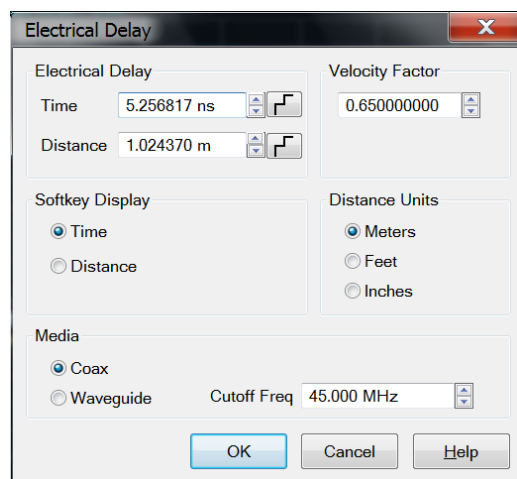


Abbildung 11: Bestimmung des SMA-Verkürzungsfaktors