

Einfache Methode zur Plausibilitätskontrolle bei VNA-Messungen

Für den Servicetechniker vor Ort stellt sich immer wieder die Notwendigkeit, Fehlmessungen bei der vektoriiellen Netzwerkanalyse aufzudecken. Beschrieben wird eine einfache Methode zur Plausibilitätskontrolle des Messaufbaus, die sich mit einfachen Mitteln durchführen lässt.

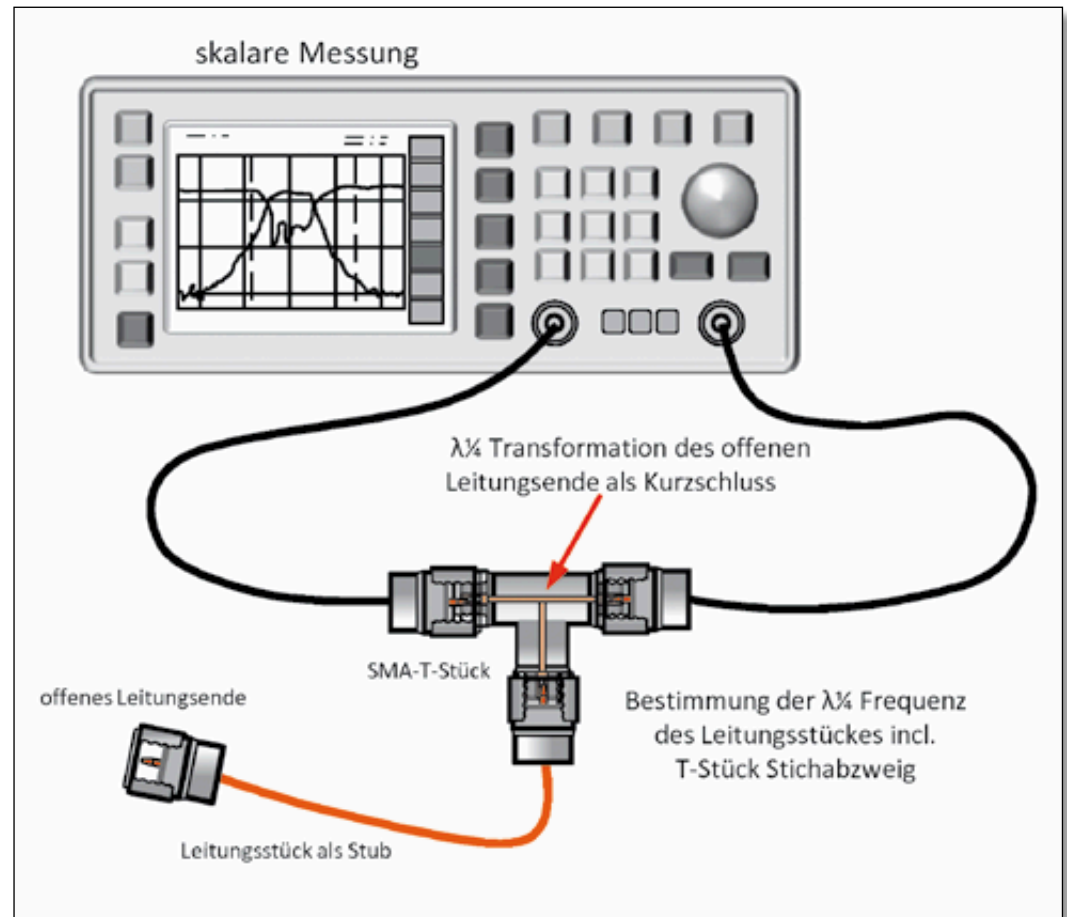


Bild 1: Messaufbau zur Bestimmung der Viertelwellen-Frequenz des Stubs

Ein häufig anzutreffendes Szenario: Bei der Messung mit einem vektoriiellen Netzwerkanalyzator (VNA), z.B. an einer Antenne, entsprechen die ermittelten Werte ganz und gar nicht den Erwartungen. Am Messobjekt selbst sind jedoch keine Ursachen für die danebenliegenden Werte zu erkennen. Nun entstehen Zweifel an der korrekten Funktion des Messgeräts. Eine Reaktion, die nicht unbedingt nur für den Bereich der VNA-Messungen typisch ist. Jeder Servicetechniker kennt den Zweifel an vorliegenden Messergebnissen aus seiner täglichen Praxis.

Die vektorielle Netzwerkanalyse ist ein recht komplexes Thema, entsprechend vielfältig sind die Ursachen zu Fehlmessungen und deren Aufdeckung. Ein nur

geringer Anteil der Fehler liegt in Defekten und Unzulänglichkeiten bei den Messgeräten begründet. Dagegen nimmt einen hohen Stellenwert die Kalibrierung bzw. Festlegung der Messbezugsebene und die damit zusammenhängenden Funktionen, wie Offseteinstellungen und Embedding bzw. Deembedding, ein. Oft sind notwendige Bauteildaten nur unzureichend genau bekannt, oder man hat sich bei der Wahl des Vorzeichens zum Offset einfach vertan. Die darin begründeten Messabweichungen können beachtliche Ausmaße annehmen, der Wunsch nach einer einfachen Plausibilitätskontrolle, welche die Fehlersuche unterstützt, rückt in den Vordergrund.

Ein ganz triviales Beispiel aus dem Bereich der „elektrisch kurzen Welt“ der Elektrotechnik: Liegt der mit einem Ohmmeter gemessene Widerstandswert weit ab vom erwarteten Ergebnis, wird man instinktiv zunächst den Nullabgleich des Gerätes erneut durchführen. Ist dieser in Ordnung, greift man zu einem bekannten Widerstand aus dem Kleinteilemagazin, der Widerstandswert steht ja aufgedruckt, ist also somit über jedem Zweifel erhaben und schließt diesen an das Messgerät an. Eine klassische, schulbuchmäßige Anwendung der Vergleichsmessung.

Wir wollen an dieser Stelle den Fortgang der Aktion nicht weiterverfolgen, jedenfalls ist sichergestellt, dass man irgendeine Erkenntnis gewinnt, welche

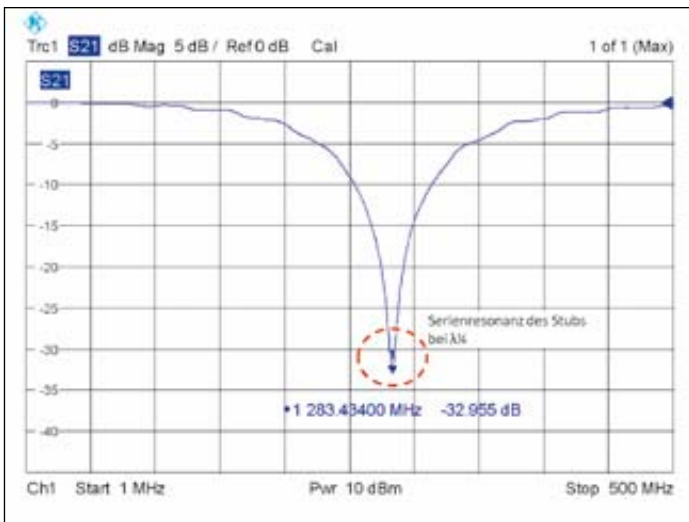


Bild 2: Plot-skalare Messung, Bestimmung der Serienresonanzfrequenz

auch immer. Der wesentliche Punkt ist, es wurde ein definitiv bekanntes Bauteil zur Plausibilitätskontrolle herangezogen. Dieses Bauteil ist in der Regel schnell verfügbar und ergibt für den Zweck eine genügende Genauigkeit.

Bei der vektoriellen Netzwerkanalyse sind die Verhältnisse etwas komplexer. Das „einfache Bauteil“ für die angestrebte Vergleichsmessung ist nicht so ohne Weiteres greifbar. Im Labor steht unmittelbar ein Teakholzkästchen zur Verfügung, in welchem, außer der üblichen Kalibriernormale, vielleicht auch ein definiertes Mismatch vorhanden ist, das man zur Kontrollmessung anschließen könnte. Gehen wir jedoch davon aus, dass wir als Servicetechniker im Einsatz sind und der Zugriff auf das Labor in weiter Ferne liegt. Die mitgeführte Ausrüstung besteht aus dem Analyzer, und einer gut bestückten Sammlung von ordentlichen Steckadaptern und div. konfektionierter Koaxkabel unterschiedlichster Längen.

Mit dieser Ausrüstung gilt es nun, ein „Bauteil zu konstruieren“, das für eine Vergleichsmessung zur Plausibilitätskontrolle taugt und folgende Ansprüche erfüllen soll:

- Fest definierter Wert einer Fehlanpassung

- Ausreichende Genauigkeit für eine Plausibilitätskontrolle
- Einfacher und stabiler, reproduzierbarer Aufbau
- In allen gängigen Steckernormen verfügbar
- Vergleichs(mess)werte direkt ohne Umrechnungen ablesbar

Die Anforderungen an das Bauteil erscheinen recht anspruchsvoll, sind jedoch durchaus gerechtfertigt, denn die Plausibilitätskontrolle muss rasch und nachvollziehbar ausgeführt wer-

den können, ähnlich dem dargestellten Szenario zur Kontrolle einer Widerstandsmessung mit dem Ohmmeter. Zugegeben, ein bisschen mehr Aufwand ist bei der vektoriellen Netzwerkanalyse dann doch notwendig, berücksichtigt man hierbei den meist einmaligen Aufwand für die Bestimmung des Wertes der fixen Fehlanpassung.

Die Konstruktion des „Bauteils“ basiert auf der Leitungstransformation einer Fehlanpassung. Genauer ausgedrückt: Wir verwenden die $\lambda/4$ Wellenlängentransformation eines Leitungsstückes (Stub), das am Leitungsende fehlabgeschlossen ist. Die mechanische Länge des benötigten Leitungsstückes orientiert sich dabei am Frequenzbereich, in dem die Plausibilitätskontrolle durchgeführt werden soll. Wir legen willkürlich den Arbeitsbereich bei einer Frequenz von 300 MHz fest. Das ergibt eine Wellenlänge $\lambda = 1$ m, womit sich die $\lambda/4$ Wellenlänge leicht auf 0,25 m errechnen lässt. Die notwendige mechanische Länge des Kabels ergibt sich, bei einem angenommen Verkürzungsfaktor von 0,7 dann zu 0,175 m.

Eine weitere Bedingung für das Leitungsstück gibt die Steck-

verbindung vor. Es sollte den gleichen Stecker oder die gleiche Buchse wie das Messobjekt, dessen Werte in Zweifel stehen, aufweisen, hier im Beispiel ein SMA-Stecker.

Fassen wir zusammen: Für unser Beispiel suchen wir, bzw. notfalls fertigen wir uns ein Leitungsstück, das eine mechanische Länge im Bereich von 15 cm bis 20 cm aufweist und für diesen Anwendungsfall beidseitig mit SMA-Steckern bestückt ist. Natürlich sind auch andere Konstellationen für die angebrachten Steckverbindungen möglich, diese ergeben sich aus dem jeweiligen Messaufbau, der ja variieren kann. Das Stubende darf auch Adapter enthalten, sofern sichergestellt ist, dass diese am Messaufbau verbleiben, denn deren Länge bzw. Laufzeit geht in die $\lambda/4$ Frequenz mit ein.

Als nächster Schritt folgt nun die exakte Bestimmung der elektrischen Länge bzw. der $\lambda/4$ Wellenlänge und deren Frequenz des Kabelstückes incl. des am anderen Ende angebrachten Fehlabschlusses. Bei einem 50 Ohm Kabel könnte man einen 75 Ohm Präzisionsabschluss als definierte Fehlanpassung anstecken. Zur Längenmessung unseres „Bauteils“, bestehend aus Kabel,

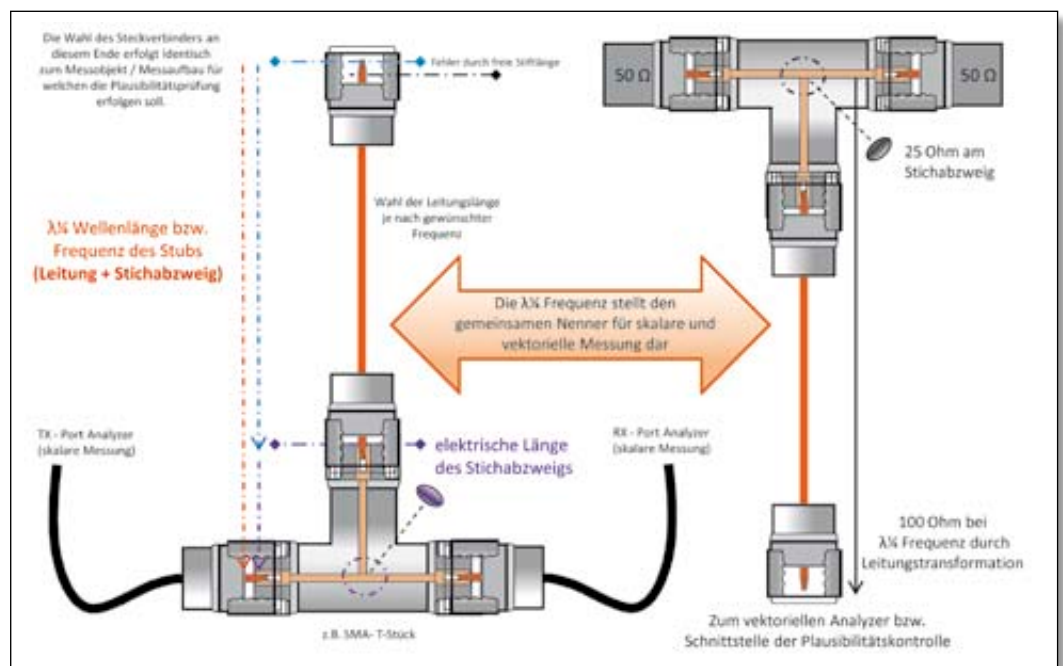


Bild 3: Darstellung der Verhältnisse am T-Stück im Detail

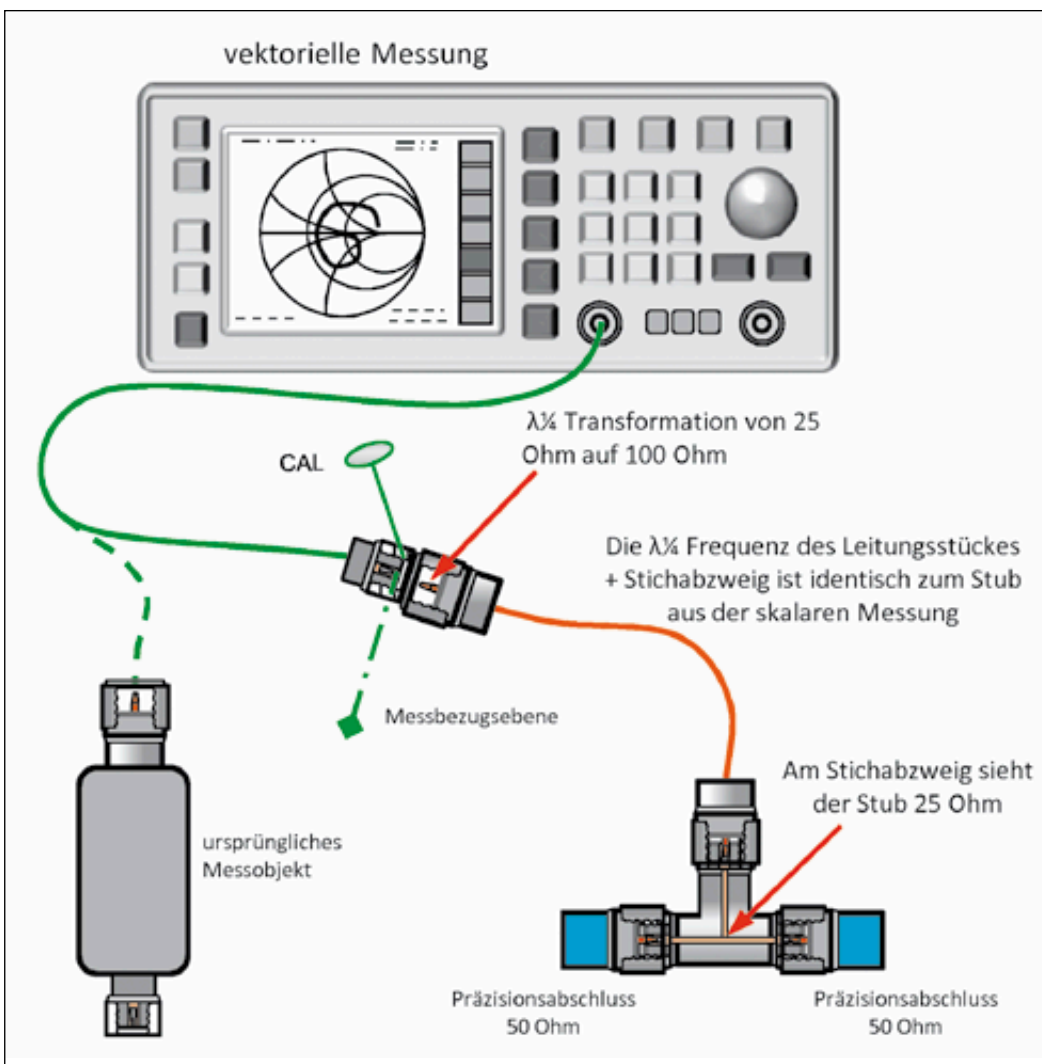


Bild 4: Die Plausibilitätskontrolle, verkörpert durch die vektorielle Messung

Stecker und (Fehl)abschlusswiderstand, stehen mehrere Methoden zur Verfügung.

Wir können die mechanische Länge mit einem Lineal messen und über den Verkürzungsfaktor des verwendeten Kabels (Katalogwert) die elektrische Länge bestimmen. Abgesehen davon, dass das nicht gerade eine elegante Lösung darstellt, ist sie viel zu ungenau. Der Verkürzungsfaktor weist erhebliche Toleranzen auf, die Laufzeiten der Stecker und des Leitungsabschlusses sind in der Regel unbekannt, mit den so ermittelten Daten wird man nicht viel Freude haben, die ursprünglich angestrebte Plausibilitätskontrolle wird zum Scheitern verurteilt sein.

Viele moderne Analyzer bieten heute Funktionen zur Längenmessung an, z.B. als TDR oder DTF-Verfahren. Grundsätzlich könnten diese verwendet werden, sie bergen in diesem Fall jedoch einige Nachteile. Für das DTF-Verfahren muss der Analyzer kalibriert werden. Verwendet man die gleichen Normale und Geräte wie für den aktuell angezeigten Messaufbau, so besteht die Gefahr, dass ungenaue Normale oder sonstige versteckte Defekte auch diese Messung nachteilig beeinflussen und somit auch die Grundlage zur Plausibilitätsprüfung in Frage stellen.

Beim TDR-Verfahren fällt der reflektierte Impuls an der Fehlanpassung 50 Ohm zu 75 Ohm relativ schwach aus, die Auswertung wird dadurch etwas mühselig.

Beide Längenmessverfahren würden zum Wert einer elektrischen Länge führen, die anschließend in die $\lambda/4$ Wellenlänge und deren Frequenz umgerechnet werden muss. Das entspricht nicht unbedingt dem zuvor aufgestellten Anspruch: „Vergleichs(mess)werte direkt ohne Umrechnungen ablesbar“.

Weiterhin entfallen beide Verfahren, wenn von einem älteren Analyzer weder das Eine noch das Andere unterstützt wird. Suchen wir also nach einem völlig anderen Lösungsansatz. Das erklärte Ziel soll sein: Die $\lambda/4$ Frequenz für das „Bauteil“ in einem Messvorgang direkt bestimmen und ablesen zu können.

Das gelingt recht einfach, wenn das Leitungsstück als Stub

betrachtet wird. Wir verwenden ein zu der eingesetzten Steckernorm passendes T-Stück und schrauben die für den gewünschten Frequenzbereich ausgewählte $\lambda/4$ Leitung (Stub) an den Stichabzweig an, siehe Bild 1. Die sich gegenüberliegenden durchgehenden Anschlüsse des T-Stückes werden mit dem Analyzer verbunden. Das offene (hochohmige) Leitungsende des Stubs wird bei der $\lambda/4$ Frequenz als Kurzschluss auf den T-Abgang transformiert, sichtbar als Serienresonanzfrequenz, Bild 2. Der Analyzer arbeitet hier skalar, die Bestimmung der $\lambda/4$ Frequenz kann somit auch durch einen reinen skalaren Netzwerkanalyzer erfolgen. Wichtig ist eine exakte Frequenzanzeige und gute Frequenzstabilität des Gerätes.

Eine Kalibrierung ist nicht erforderlich, nicht einmal die Korrektur der Durchgangsdämpfung der Anschlussleitungen und eventuell darin verwendeten Adapter ist notwendig, der Peak nach unten, sein Minimum ist entscheidend, nicht der absolute dB-Wert der Amplitude. Entscheidend ist die Frequenz im Minimum, diese lesen wir ab und halten sie fest. Im vorliegenden Beispiel beträgt sie 283,4 MHz.

Die Leitung (Stub) incl. Länge des Stichabzweigs am T-Stück selbst weist also eine $\lambda/4$ Frequenz von 283,4 MHz auf. Die Betonung liegt auf „incl. Länge des Stichabzweigs“. Wir erhalten also nicht exklusiv die $\lambda/4$ Frequenz des Leitungsstückes mit seinen angebrachten Steckern und eventuell aufgesteckten Adaptern, sondern zusätzlich eine Mehrlänge, bedingt durch den Stichabzweig des T-Stückes. Man könnte nun versuchen, das Zuviel an Länge herauszurechnen oder es gar zu ignorieren. Beides wird nicht funktionieren. Da der absolute Wert der Frequenz hier nicht kritisch ist, wir liegen noch gut in unserem willkürlich gewählten Arbeitsbereich, beschreiten wir einen viel einfacheren und eleganteren Weg. Das T-Stück bleibt Bestandteil unseres „Bauteils“. Es wird integriert als „Träger“

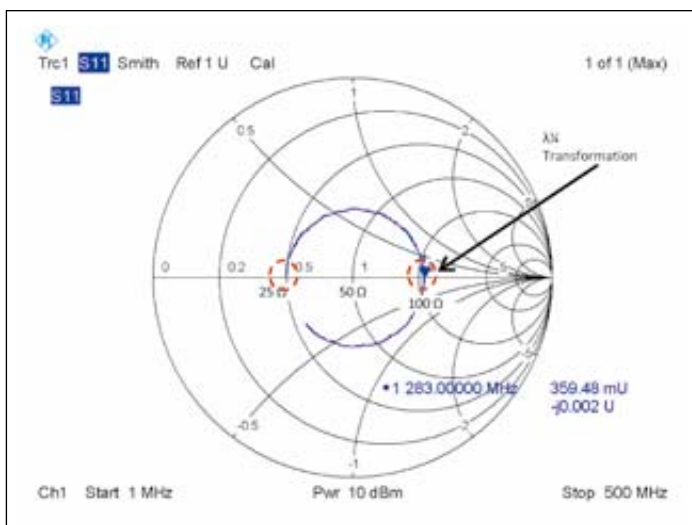


Bild 5: Plot der vektoriellen Messung, Viertelwellen-Transformation unter der zuvor skalar ermittelten Frequenz von 283 MHz

der definierten Fehlanpassung. Hierfür schrauben wir an die beiden gegenüberliegenden Anschlüsse des T-Stücks nun jeweils einen 50 Ohm Präzisionsabschluss, das Leitungstück (Stub) verbleibt dabei am Stichabzweig. Der Trick: Beide 50 Ohm Widerstände halbieren sich auf 25 Ohm, und zwar direkt an der Abzweigstelle im Zentrum des T-Stücks.

Damit haben wir exakt eine Fehlanpassung von 25 Ohm an die Stelle, die zuvor bei der skalaren Messung das eine Ende des Stubs gebildet hat, angelegt. Es ist tatsächlich unerheblich, ob beide Widerstände mechanisch symmetrisch am T-Stück platziert werden, am Stichabzweig herrschen lageunabhängig 25 Ohm. Die gefertigten Schraubanschlüsse des T-Stückes basieren auf einem Wellenwiderstand von 50 Ohm. Da an den T-Anschlüssen wiederum 50 Ohm Widerstände angeschraubt sind, herrscht innerhalb des T-Durchganges optimale Anpassung. Folglich kann dort auch nichts transformiert werden. Entscheidend ist der Stichabgriff, ab hier sieht der Stub 25 Ohm. Die Details sind im Bild 3 zusammengefasst.

Für die nachfolgende Plausibilitätsprüfung bildet jetzt der Stichabgriff am T-Durchgang das Ende des Stubs. Der reelle Widerstand von 25 Ohm wird ab

hier durch die $\lambda/4$ Leitungstransformation zum freien Ende auf 100 Ohm transformiert. Die Formel für diesen Sonderfall lautet:

$$Z_{\lambda/4 \text{ Transf.}} = Z_{\text{Leitung}}^2 / Z_{\text{Abschluss}}$$

$$Z_{\text{Abschluss}} = \text{Fehlabschluss am Stub (T-Stück)}$$

$$Z_{\lambda/4 \text{ Transf.}} = \text{transformierter Widerstand nach } 1/4 \text{ Wellenlänge}$$

$$Z_{\text{Leitung}} = \text{Wellenwiderstand der Leitung (Stub)}$$

Diese Formel gilt im Sonderfall der $\lambda/4$ -Transformation auf die reelle Achse im Smithdiagramm!

Der tatsächliche Wert der $\lambda/4$ -Frequenz wurde durch den vorangegangenen skalaren Messvorgang bestimmt. Damit ist unser „Bauteil“ charakterisiert, für das Beispiel gilt:

Bei $\lambda/4 = 283,4$ MHz errechnet sich für das gegenüberliegende Leitungsende ein transformierter ohmscher Widerstand von 100 Ohm.

Unterzieht man nun dieses „Bauteil“, bestehend aus dem Stück Leitung, einem T-Stück und zwei parallelen 50 Ohm Präzisionsabschlüssen einer vektoriellen Messung, sind wir bereits bei der Plausibilitätskontrolle angelangt, den Messaufbau zeigt Bild 4.

Das zuvor mit Zweifeln belegte ursprüngliche Messobjekt wird direkt gegen unser „Bauteil“ getauscht. Wichtig: Nachträg-

lich dürfen am Stub keine Adapter zwischengeschaltet werden! Die Verhältnisse würden dadurch entscheidend verändert. Im Bild 5 ist deutlich die kreisförmige Ortslinie der Leitungstransformation im Smithdiagramm zu erkennen. Eine halbe Umdrehung im Smithdiagramm entspricht $\lambda/4$ -Leitungslänge. Der Schnittpunkt auf der realen Achse (100 Ω) muss bei der zuvor durch skalare Messung ermittelten Frequenz liegen, im Beispiel sind das 283 MHz. Ausgegeben wird die Frequenz durch einen Marker der so eingestellt wird, das die imaginären Anteile um Null bzw. geringfügig zwischen positiven und negativen Werten springen. Der reale Anteil sollte sehr nahe an dem transformierten Wert von 100 Ω liegen. Hohe Abweichung zum transformierten Widerstandswert deuten auf ein fehlerhaftes Kalibriernormal hin.

Weicht die ausgegebene Frequenz am Schnittpunkt erheblich ab, liegt mit großer Wahrscheinlichkeit ein Versatz der Messbezugsebene vor. Wenige Millimeter elektrischer Länge oder Laufzeiten im Picosekundenbereich verursachen bereits starke Abweichungen. Diese können bei der Kalibrierung, z.B. durch die fehlerhafte Auswahl von Calkit-Daten im Kalibriermenü oder durch Toleranzen in Datenblattangaben der eingesetzten Verkürzungsfaktoren für die Offseteinstellung entstehen. Die Lage der Messbezugsebene ist hier der entscheidende Ansatz zur Fehlersuche.

Der Aufbau der beschriebenen Vergleichsmessung zur Plausibilitätskontrolle kann relativ problemlos auch auf einer Baustelle, z.B. während einer Inbetriebnahme erfolgen. Die notwendigen Teile wie Kabel, T-Stücke, Präzisionsabschlüsse sind in der Regel im Messkoffer verfügbar. Eventuell ist das Anfertigen eines kurzen Stück Kabel, passend zum gewünschten Frequenzbereich, notwendig.

Da zur Bestimmung der $\lambda/4$ Frequenz auf ein anderes Messprinzip (skalar) zurückgegrif-

fen wird, ist die Gefahr einem systematischen Fehler aufzusitzen umgangen. Dennoch besteht beim beschriebenen Verfahren eine geringe Ungenauigkeit: Die $\lambda/4$ Frequenz des Stubs wird auf ein offenes Stecker- oder Buchsenende gemessen. Die Länge eines offenen Steckerstifts stellt, je nach verwendeter Steckernorm, eine mehr oder weniger zu Buche schlagende „Verlängerung“ des Stubs dar, die später im angeschraubten Zustand entfällt, siehe Bild 3, Fehler durch freie Stiftlänge. Die ermittelte $\lambda/4$ Frequenz erhält dadurch einen geringfügig niedrigeren Wert. Unterhalb 1 GHz wird diese Ungenauigkeit noch tolerierbar sein, zumal das Verfahren lediglich als Plausibilitätskontrolle dienen soll.

Die Grenze im Verfahren und dessen Frequenzbereich stellt das T-Stück durch seine mechanischen Maße dar. Erreicht die $\lambda/4$ Wellenlänge Ausmaße, die unter die Länge des Stichabzweiges des eingesetzten T-Stückes fallen, ist Schluss. Die zugehörige $\lambda/4$ Frequenz liegt, je nach T-Stück, bei 3 bis 4 GHz. Weiterhin beginnt das offene Leitungsende mit steigender Frequenz durch Auswirkung von Streukapazitäten die Verhältnisse zu verschieben.

Die beschriebene Vorgehensweise ist auch für die 75 Ohm-Technik anwendbar, lediglich die Widerstandswerte ändern sich. Die beiden 75 Ohm Abschlüsse halbieren sich im T-Stück auf 37,5 Ohm und werden durch den Stub (75 Ohm-Leitung) auf 150 Ohm transformiert.

Literatur

Praxiseinstieg in die vektorielle Netzwerkanalyse von Joachim Müller, beam-Verlag 2011

Smith-Diagramm – Einführung und Praxisleitfaden von Joachim Müller, beam-Verlag 2009.

Bestellungen an: beam-Verlag, Postfach 1148, 35001 Marburg, info@beam-verlag.de

Firmen und Institute werden gegen Rechnung beliefert