

Komplexe Messungen mit einem Vektor-Netzwerkanalysator

Die VNA-Lösung von Rigol in Form der Geräteserien RSA5000N und RSA3000N ermöglicht Reflexions-, Transmissions- und Distance-to-Fault-Messungen in verschiedener Darstellung.



wicklungen sind genaue Phaseninformationen erforderlich. Ein Vektor-Netzwerkanalysator (VNA) ermöglicht in solchen Fällen die Messung von Amplitude und Phase über einen bestimmten Frequenzbereich, sprich die Messung des komplexen Streuparameters eines zu testenden Bauteils/Geräts über einen bestimmten Frequenzbereich und ermöglicht somit die Charakterisierung einer Streumatrix mit Reflexions- (S11) und Transmissionsfaktoren (S21). Diese Parameter sind erforderlich, um z.B. eine Anpassungsschaltung für einen Verstärker zu entwickeln. Mit Phaseninformationen ist es auch möglich, den Zeitbereich zur Analyse weiterer Fehler an verschiedenen Positionen zu berechnen.

Aufgrund der komplexen (Vektor-)Charakteristik lässt sich mit Kalibrierungsroutinen eine genaue Korrektur vornehmen.

In der heutigen Welt der drahtlosen Kommunikation und Datenübertragung sind HF-Komponententests einer der Schlüsselfaktoren, um ein Produkt auf den Markt zu bringen. Die Geräte werden immer kleiner und bestehen aus immer komplexeren Komponenten. Es ist ein Muss, Kenntnisse über komplexe Impedanz- (oder Admittanz-) und Reflexions-/Transmissionsparameter zu haben, um die bestmögliche Funktionalität des HF-Gerätes zu erzielen.

Qualität und Leistung

HF-Komponenten wie Filter, Resonatoren usw. können anhand der Kapazität und der induktiven Werte berechnet werden. Software-Simulatoren können diese Werte übernehmen und bei der Feinabstimmung des Designs helfen. Aber am Ende des Tages müssen Qualität und Leistung gemessen werden.

Für viele Anwendungen reicht ein skalarer Netzwerkanalysator aus, aber für spezielle Ent-

Rigol-Serie für drei verschiedene Messungen

Die VNA-Lösung von Rigol stellen die Geräteserien RSA5000N und RSA3000N (RSAxN) dar, die drei verschiedene Messungen ermöglichen: Reflexions- (S11), Transmissions- (S21) und Distance-to-Fault-Messung (DTF). Alle drei Messungen haben verschiedene Darstellungen, mit denen Ingenieure den Frequenzgang, die Phase,



Autor:
Boris Adlung
Rigol Technologies
E-Mail:
boris_adlung@rigol.com
Rigol Technologies Europe
GmbH
www.rigol.eu

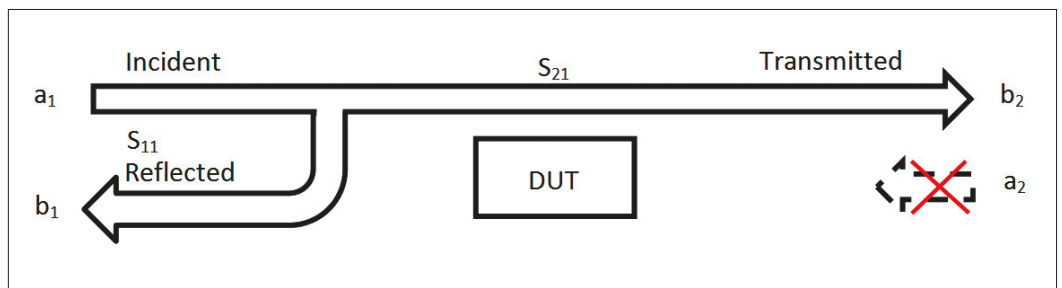


Bild 1: Das Prinzip der S-Parameter-Messung in einem Netzwerk

$$b_1 = S_{11} * a_1 + S_{12} * a_2$$

$$b_2 = S_{21} * a_1 + S_{22} * a_2$$

$$S_{11} = \frac{\text{Reflected}}{\text{Incident}} = \frac{b_1}{a_1} \quad \text{with } a_2 = 0$$

$$S_{21} = \frac{\text{Transmitted}}{\text{Incident}} = \frac{b_2}{a_1} \quad \text{with } a_2 = 0$$

Formel 1

das SWR, die Smith-Charts und die Polar-Plane-Messungen eines Prüflings leicht bestimmen können.

Bild 1 zeigt das Prinzip der S-Parameter-Messung. Diese Parameter lassen sich mit den komplexen Faktoren a_x und b_x berechnen. Beispielsweise bezieht sich a_1 auf die am Prüfling einfallende Welle und b_1 auf die reflektierte Welle. Der übertragene Faktor nach dem Prüfling bezieht sich auf b_2 . In der RSAxN-Version kann eine einfallende Welle nur von Port 1 erzeugt werden. Daher ist a_2 gleich 0 (Formel 1).

S11-Messungen

Die Reflexionsmessung ist eine Schlüsselfunktion zum Spezifizieren der Leistung eines komplexen Systems, wie z.B. eines drahtlosen Kommunikationssystems. Der Reflexionsfaktor r beschreibt das Verhältnis von einfallender und reflektierter Welle. Es gibt verschiedene Tools, mit denen diese Messung durchgeführt werden kann. Eines der nützlichsten Tools ist jedoch das Smith-Diagramm, da es die meisten Informationen enthält, wie z.B.:

- komplexe Impedanz und Werkzeuge zur Bestimmung der Kompensationsanpassung der induktiven/kapazitiven Reaktanz
- komplexer Reflexionsfaktor
- Einfluss von reellen Impedanzen, Kapazitäten oder Induktivitäten

- Einfluss des Frequenzbereichs und Anzeige des Frequenzgangs
- Güte von HF-Komponenten
- Einfluss der Kabellänge
- Bestimmung des Kabelverlusts (siehe Formel 1)

In der Geräteserie RSAxN kann das Smith-Diagramm die Impedanz (Ω , Komponenten in Reihe) oder den Admittanzbereich [$1/\Omega$, Parallelschaltung von Komponenten) anzeigen. „Universell“ bedeutet, dass es für jede Systemimpedanz verwendet werden kann. In diesem Beispiel wird eine 50- Ω -Referenz verwendet (die auf eine andere Impedanz geändert werden kann,

$$Z = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C} = R + j\omega L - j * \frac{1}{\omega C}$$

Formel 2

z.B. 75 Ω , falls erforderlich). Diese Referenz wird verwendet, um das Diagramm zur besseren Visualisierung zu zentrieren. Eine komplexe Impedanz von $Z = 50 \Omega + j25 \Omega$ wird mit dieser Referenz in $1 + j0,5$ umgewandelt, um manuelle Berechnungen zu vereinfachen. Nach der Anpassung der Schaltung wird der Referenzwert wieder in die reale komplexe Impedanz umgerechnet. Im RSAxN ist es möglich, die transformierten Werte über einen Marker zu messen und den Impedanzwert anzuzeigen (im obigen Beispiel 50 $\Omega + j25 \Omega$).

Unter Berücksichtigung einer Reihenschaltung von Impedanz, Kapazität und Induktivität wird die Impedanz wie in Formel 2 berechnet:

In dieser Formel zeigt sich, dass die induktive Imaginär-Komponente positiv und die kapazitive Imaginär-Komponente negativ ist. Die untere Hälfte des Smith-Diagramms ist negativ und bezieht sich deshalb auf den kapazitären und die obere, posi-

tive Hälfte auf den induktiven Anteil. Auf dem Außenkreis des Smith-Diagramms wird die Länge der Leitung angezeigt, die sich auf die Wellenlänge bezieht. Auf dem Smith-Diagramm ist ersichtlich, dass eine Drehung um 360° zu $0,5 \times 1/\lambda$ führt, d.h. eine komplette Umdrehung bezieht sich auf die halbe Wellenlänge der Frequenz.

Der zweite Wert, der am Außenkreis angezeigt ist, ist der Winkel φ eines komplexen Reflexionsfaktors r . Es gibt eine 100 %ige Reflexion der einfallenden Welle mit entweder einem offenen Abschluss (Leerlauf, rechte Seite des Diagramms, wenn die realen und imaginären Impedanzen nahe bei unendlich Ω liegen) oder mit einem kurzgeschlossenen Abschluss (linke Seite des Diagramms, Abschlussimpedanz entspricht 0 Ω).

In der Mitte des Smith-Diagramms ist die reale Impedanz von 50 Ω sichtbar, die auch einer optimalen Anpassung entspricht. Es ist möglich, den komplexen Reflexionsfaktor im Smith Chart



Bild 2: Zur Messung der Kapazität in Reihe mit einem Widerstand bei 541 MHz



Bild 3: Frequenzgangkurve; die Frequenz steigt im Uhrzeigersinn an



Bild 4: Verschiedene Fenster der S11-Parameter wie Smith und Polarebene, Rückflussdämpfung in dB und SWR

zu messen, aber es ist einfacher, den Marker in der Polarebene im RSAXN zu verwenden, um diesen Wert zu erhalten.

Das Smith-Diagramm und die Polarebene sind nützliche Werkzeuge zur Analyse komplexer Impedanz- und Reflexionsfaktoren in einem Netzwerk für einen bestimmten Frequenzbereich zu vermessen. In Bild 2 wurde die Kapazität in Reihe mit einem Widerstand bei 541 MHz gemessen. Die gleiche Konfigu-

ration wurde erneut mit einem Kabel von ca. 16 cm gemessen. In diesem Beispiel ist ersichtlich, dass sich die Impedanz (und somit die Position im Smith-Diagramm) bei einer bestimmten Frequenz ändert, wenn ein zusätzliches Kabel verwendet wird. Der Reflexionsfaktor bleibt sehr nahe am Ursprungspunkt (das Kabel hat eine Dämpfung, die einen sehr geringen Einfluss auf diese Messung hat. Je höher die Kabeldämpfung ist, desto

stärker ist ihr Einfluss auf den Wert des Reflexionsfaktors).

Der Marker auf dem Smith-Diagramm berechnet die korrekte Impedanz unter Verwendung der Referenz von 50 Ω. Dann wurde dieselbe Konfiguration erneut ohne das zusätzliche Kabel über einen anderen Frequenzbereich getestet (s. Bild 3).

Bei dieser Messung ist der Frequenzgang für den eingestellten Frequenzbereich dargestellt. Mit dem Marker ist sichtbar, dass sich die Kurve mit zunehmender Frequenz im Uhrzeigersinn bewegt. Im RSAXN können verschiedene ZF-Bandbreiten zum Testen verwendet werden (1 kHz bis 10 MHz in 1-3-1 Schritten), um die Frequenzauflösung nach Bedarf zu realisieren.

Für komplexe Netzwerke

ist eine der Hauptanwendungen die Impedanz Anpassung (als typisches Beispiel: um 50 Ω am Netzwerkeingang zu realisieren) bei der erforderlichen Mittenfrequenz durchzuführen. Es können verschiedene Möglichkeiten genutzt werden, die das Smith-Diagramm anzeigt. In Bild 4 sind diese erkennbar.

Zunächst kann eine Serienimpedanz von 20 auf 50 Ω eingestellt werden. Als nächster Schritt könnte man eine induktive Komponente in Reihe schalten, um den Impedanzpegel ohne imaginär-Komponente auf reelle 50 Ω zu bringen. Das Problem bei dieser Idee ist, dass die induktive Komponente (in diesem Fall: 67 pH) sehr klein und schwer zu realisieren ist. Diskrete induktive oder kapa-

$$s = (V)SWR = \frac{U_{max}}{U_{min}} = \frac{1 + |r|}{1 - |r|}$$

Formel 3

$$a_{r,dB} = 10 \log \frac{P_{ref}}{P_{inc}} = 20 \log \frac{U_{ref}}{U_{inc}} = 20 \log |r|$$

Formel 4

zitive Elemente kann man nur für eine maximale Frequenz von mehreren 100 MHz verwenden. Für höhere Frequenzbereiche müssen andere Verfahren (z.B. Design mit Mikrostreifenleiter) zur Realisierung kommen. Einer der Ansätze könnte darin bestehen, einen seriellen 50-Ω-Stichleitung zu verwenden, um $-j27 \Omega$ zu kompensieren (Länge der Stichleitung mit Kurzschluss: $l = 0,078 \lambda$, mit Leerlauf: $l = 0,328 \lambda$). Für die Stichleitung ist die Dielektrizitätskonstante des Kabels erforderlich, um die richtige Wellenlänge zu berechnen.

Für S11 ist es auch möglich, die Rückflussdämpfung und das SWR über den Frequenzbereich anzuzeigen. Es bezieht sich auf die maximalen und minimalen Spannungswerte, die man auf der Leitung messen kann. Der Unterschied zum Reflexionsfaktor besteht darin, dass keine Beziehung zur Phase besteht (Formel 3).

Für eine tiefere Analyse ist es häufig erforderlich, logarithmische Werte zu nutzen, um eine tiefere Sicht auf kleinere Modifikationen im Vergleich zu größeren Werten zu erhalten. Im RSAXN ist es möglich, den Rückflussdämpfungswert a_{rdB} in einer logarithmischen Skala über den Frequenzbereich anzuzeigen. (Formel 4).

Lineare Verzerrungen treten in allen linearen Netzwerken und Komponenten auf. Eine lineare Verzerrung kann eine Abwei-



Bild 5: S11-Messung, logarithmische Größen vom Betrag r , Phasengang, SWR und Gruppenverzögerung über der Frequenz

chung in der Phase, in der Amplitude und/oder in einer konstanten Gruppenverzögerung zur Folge haben. Bei der Messung eines Filters mit dem RSAXN ist es möglich, die Amplitudenabweichung, die Abweichung in der Phase und die Gruppenlaufzeit zu messen (die Gruppenlaufzeit ist eine Abweichung von der linearen Phase).

Dabei wird im VNA der gemessene Phasenverlauf mit einem positiv konstant ansteigenden Phasenverlauf über der Frequenz überlagert. Die Differenz beider Ergebnisse ist die Phasenabweichung über der Frequenz und die Gruppenverzögerung, welche wie folgt berechnet wird:

$$\tau_{Group} = - \frac{d\phi}{df}$$

Formel 5

Jedes Signal wird bei der Übertragung über Komponenten wie Filter, Verstärker usw. verzögert. Eine unterschiedliche Gruppenlaufzeit führt zu einer nichtlinearen Verzögerung von Signalen bei unterschiedlichen Frequenzkomponenten und verzerrt das Signal, was nicht ideal und nicht erwünscht ist. Wenn die Gruppenlaufzeit über den Frequenzbereich konstant ist, haben alle Frequenzkomponenten die gleiche Verschiebung, und in diesem Fall wäre das ideale Sys-

tem frei von Verzerrungen und die Gruppenverzögerung wäre ein konstanter Wert. Die Öffnungs-Schrittbreite (df) kann im RSAXN nach Bedarf eingestellt werden. Bei der S11- (und S21-) Messung des RSAXN wird die Phasen- und Gruppenverzögerung gemessen und über den gewünschten Frequenzbereich dargestellt, s. Bild 5.

S21-Messungen

Der Parameter S21 definiert die komplexe Durchgangsdämpfung über einen bestimmten Frequenzbereich, der nach der Kalibrierroutine mit hoher Genauigkeit gemessen werden kann. Die Messung des Frequenzgangs bietet z.B. die Möglichkeit, die 3-dB-Bandbreite



Bild 6: S11-Messung (li.) und Messung von S21 (Durchgangsdämpfung) in dB (re.)

eines Bandpassfilters zu messen (s. Bild 6) oder um einen Verstärker zu charakterisieren. Ähnlich wie bei der S11-Messung zeigt die Messung hier die Phase über den Frequenzbereich und die Gruppenlaufzeit mit dem RSAxN an (s. Bild 7).

Messungen des Abstand-zu-Fehler-Parameters

Bei der HF-Messung wird normalerweise der Frequenzbereich ausgewählt, da er für die Charakterisierung in diesem Bereich eine größere Bedeutung hat. Beispielsweise wird ein Filter im Frequenzbereich charakterisiert. In einigen Fällen ist es jedoch sehr nützlich, einen besonderen Blick in den Zeitbereich zu werfen, um die Impulsantwort eines Prüflings zu bewerten.

Wenn die Phaseninformation verfügbar ist, besteht der große Vorteil, dass der Frequenzbereich (über die inverse schnelle Fourier-Transformation, IFFT) in eine Zeitdarstellung umgewandelt werden kann. Die Zeitansicht (Distance-to-Fault, DTF) hat verschiedene Vorteile. Sie kann dazu dienen, entweder einen Defekt an Kabeln aufgrund der Messung der Impulsantwort zu lokalisieren oder um eine Charakterisierung von Diskontinuitäten einer HF Schaltung oder einer besseren Ansicht der physikalischen Eigenschaften eines Prüflings darzustellen. In der folgenden Grafik/Formel ist ersichtlich, dass S11(t) die Impulsantwort des Reflexionsfaktors S11(ω) ist:



Bild 7: S21-Messung mit Durchgangsdämpfung (grün), Phase (blau) und Gruppenlaufzeit (pink)

$$b_1(\omega) = S_{11}(\omega) * a_1(\omega)$$



$$b_1(t) = S_{11}(t) * a_1(t)$$

Formel 6

Bild 8 zeigt den Frequenzbereich (S11) und die DTF-Messung eines Prüflings (zwei Kabel mit dazwischen liegenden Anschlüssen und einem 50-Ω-Abschluss am Ende). Der Frequenzbereich erfasst die Diskontinuitäten nur summarisch. In DTF sind die Reflexionspunkte jedoch leicht sichtbar und der genaue Abstand der Reflexionspunkte (z.B. aufgrund von Verbindern oder Kabel Fehlern) wird mit einem Marker gemessen. Es ist erforderlich, die gleiche Kalibrierung wie bei der S11-Messung durchzuführen.

Kalibrierung

Ein wichtiger Bestandteil genauer Messungen ist das Kalibrierungsverfahren. Jede Messung enthält unterschiedliche Fehlermechanismen. Mit Kalibrierungsroutinen können diese minimiert und die Qualität der Messgenauigkeit erhöht werden.

S11/DTF-Kalibrierung:

D = Richtdämpfung, kommt von einer unvollständigen Signalaufteilung des Kopplers.

MS = Source-Match-Fehler, kommt von einer unvollständigen Anpassung des Generators des VNA

TR = Tracking-Fehler, kommt vom Frequenzgang der für die Signalaufteilung verwendeten Komponenten (wie Richtkoppler) sowie des Mischers und des internen Detektors

$$S_{11M} = D + \frac{(1 + T_R) * S_{11A}}{1 - M_S * S_{11A}}$$

Formel 7

In Bild 9 ist ein Fehlermodell für eine Ein-Port-Messung skizziert.

Load-Kalibrierung:

Bei Verwendung einer Impedanz von 50 Ω (Last) ist S11_A = 0 und S11_M = D (Richtschärfe vom Richtkoppler wird gemessen). Der VNA minimiert jetzt den Richtdämpfungsfehler über den eingestellten Frequenzbereich. Nach dieser Kalibrierung beträgt die Richtschärfe des RSA5000N ca. 40 dB.

Short/Open-Kalibrierung:

Aus Sicht des Prüflings besteht eine Nichtübereinstimmung der Quelle (MS), wodurch eine Reflexionsschleife zwischen dem Prüfling und dem Sys-

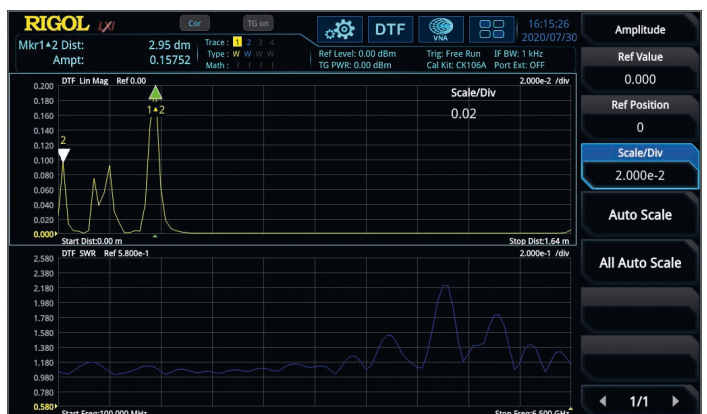


Bild 8: S11 logarithmisch (li.) und DTF-Zeitansicht der identischen Komponente (re.)

tem entsteht. Dieser Fehler ist sichtbar, wenn der Prüfling eine Nichtübereinstimmung anzeigt. Zusätzlich treten die Frequenzgangfehler (TR) aufgrund von Anschlüssen, Kabeln, internen Kopplern und Detektoren auf. Bei Open- (Leerlauf, $S_{11A} = 1$) und Short- (Kurzschluss, $S_{11A} = -1$) Kalibrierung gibt es zwei Gleichungen mit zwei Faktoren MS und TR, und der VNA kennt diese Werte.

Die Kalibrierungsstandards Open/Load/Short und Through sollten sich ideal eignen, um z.B. mit Short $r = -1$ zu erreichen, aber das ist nicht der Fall. Beispielsweise enthält Open Streukapazität oder Short enthält Induktivität. Dies ist kein Problem, wenn das nicht ideale Verhalten von den Kalibrierstandards bekannt ist. Für das Rigol-Kalibrierkit CK106A (DC bis 6,5 GHz) und das CK106E (DC bis 1,5 GHz) sind die Parameter bekannt und bereits in die RSAxN-Versionen integriert. In Bezug auf diese Werte ist nun eine genaue Kalibrierung möglich. Wenn ein zusätzliches Kalibrierkit verwendet wird, müssen diese Parameter gemäß diesem Kit im RSAxN angepasst sein.

Für die DTF-Messung müssen der Verkürzungsfaktor des Kabels (z.B. 0,7) und die Kabeldämpfung integriert werden, um die Genauigkeit der Messung zu erhöhen. Beide Werte sind in der Spezifikation des Kabels definiert.

S21-Kalibrierung

Für die S21-Messung (Übertragungsfaktor) ist eine Through-Kalibrierung (Durchgangsnor-



Bild 10: S11-Messung eines Bandpassfilters vor (dünne Linie) und nach (dicke Linie) Kalibrierung eines Ports

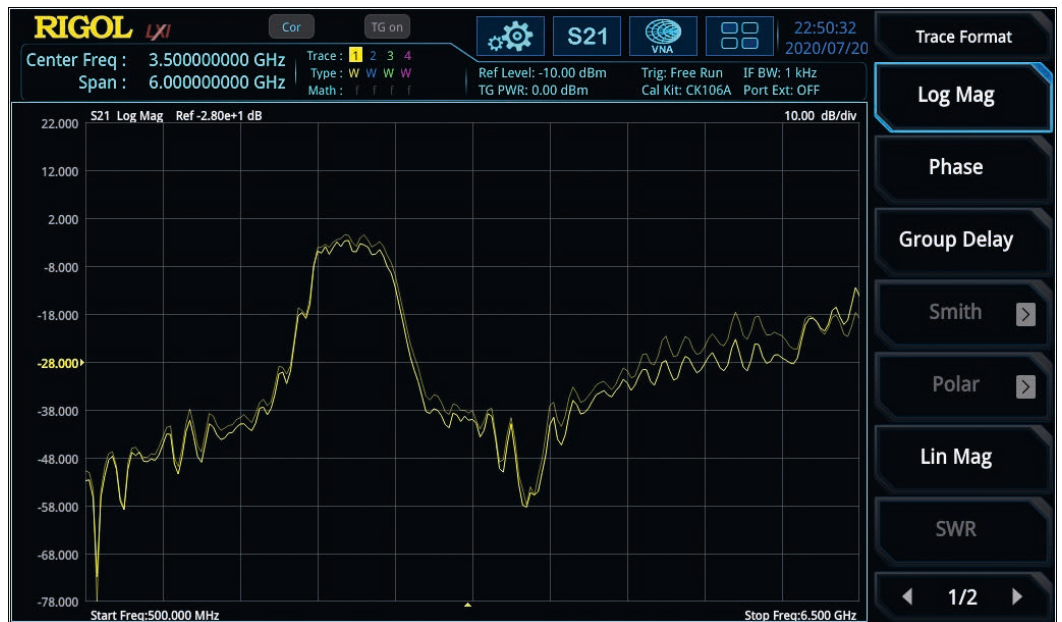


Bild 11: S21-Messung eines Bandpassfilters vor (dünne Linie) und nach (dicke Linie) der Through-Kalibrierung

mal zwischen Kanal 1 und 2) erforderlich, um den Frequenzgangfehler zwischen der VNA-Quelle zum VNA-Eingang, der durch die Messkabel und die Steck-Verbindung entsteht, zu verringern. Bild 11 zeigt die

Kurve vor und nach der Through-Kalibrierung.

Die Serien RSA5000N und RSA3000N verfügen neben der neuen VNA-Funktion über vier zusätzliche Anwendungs-

modi. Diese vier Modi umfassen RTSA (Echtzeit-Spektrumanalysator bis zu einer maximalen Bandbreite von 40 MHz), GPSA (sweep-basierter Spektrumanalysator mit hervorragender Leistung), EMI (EMV-Vorabkonformitätstests gemäß CISPR-Spezifikationen) und VSA (Vektorsignalanalyse) für unterschiedliche digitale Demodulation und Bitfehlermessung nur RSA5000N).

Mit dem zusätzlichen VNA-Anwendungsmodus gehören die Serien RSA5000N und RSA3000N zu den vollständigsten HF-Testplattformen auf dem Markt. ◀

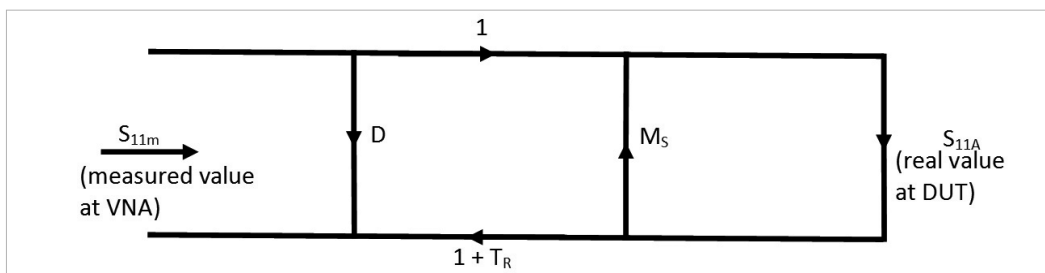


Bild 9: Fehlermodell einer Ein-Port-Messung