

Einfluss der unkorrigierten Messtoranpassung eines VNA auf die Unsicherheit von Transmissionsmessungen

Thomas Reichel

thomas.m.reichel@online.de

Inhalt

- **Einleitung**
- **Einfache Analyse**
- **Vollständiges Ergebnis**
- **Messunsicherheit**
- **Zusammenfassung**

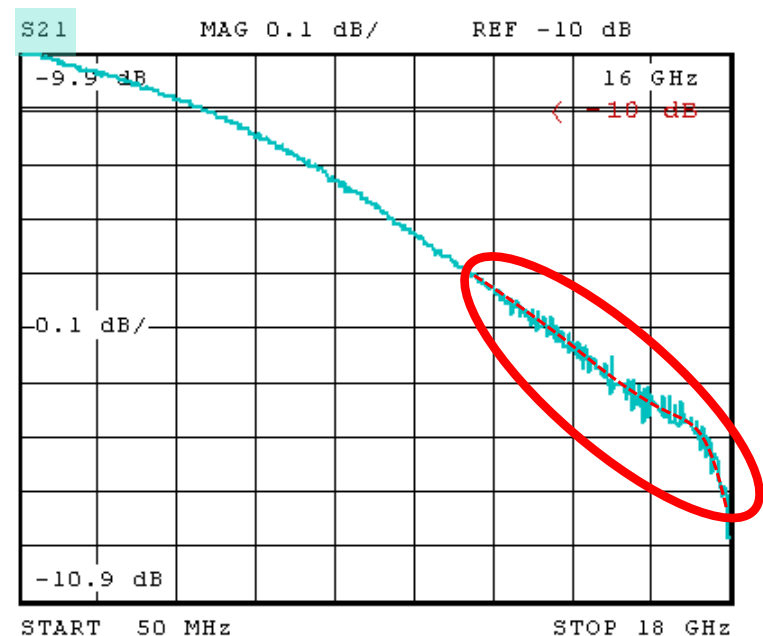
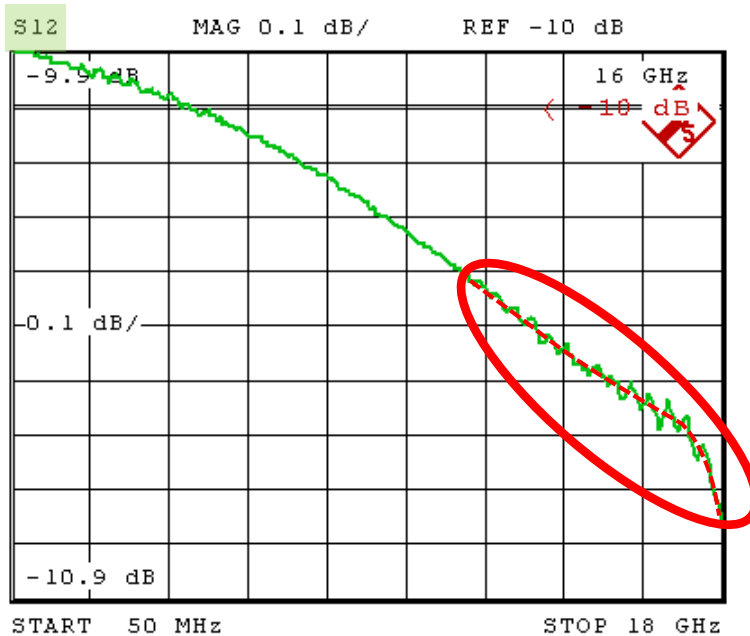
Hardware-Einfluss

"A common misconception is that calibration removes all the hardware errors, and therefore the raw uncorrected performance of the ANA is not important."

Unfortunately this is not true..."

[1] Estin, Juroshek, Marks et al (1992), **"Basic RF and Microwave Measurements..."** Kapitel 1.4, Seite 138, Absatz 2.

Lasttor-Effekt bei SOLT



Dämpfung eines 10 dB Fstdämpfungsglieds mit N-Konnektoren

Messtor 2 über Kabel mit dem VNA verbunden

Messtoranpassung (1)

"The raw port impedance mismatch causes an error in the error-corrected transmission tracking. This is true even if the port impedance match is stable..."

From Equation 15, the error in the transmission tracking term is $M_1 \mu_2 + M_2 \mu_1$."

M_1 : uncorr. Quelltoranpassung

M_2 : uncorr. Lasttoranpassung

μ_1, μ_2 : Residuals der Messtoranpassungen

[2] Rytting (1991), *Effects of Uncorrected RF Performance in a Vector Network Analyzer*.

Messtoranpassung (2)

"The expressions (i.e. the sensitivity coefficients) are free of raw values and error terms except the load match."

$$\delta \mathbf{S}_{ij} = \sum \alpha_{ij}^k \Delta \Gamma_k \quad \alpha_{ij}^k = f(\dots, E_L, E_L')$$

$\delta \mathbf{S}_{ij}$ Messabweichung α_{ij}^k Sensitivitätskoeffizient $\Delta \Gamma_k$ Abweichungen der Eintor-Kalibrierstandards von den Definitionen

[3] U. Stumper (2003), ***Uncertainty of VNA S-parameter measurement due to nonideal TMSO or LMSO calibration standards.***

Messtoranpassung (3)

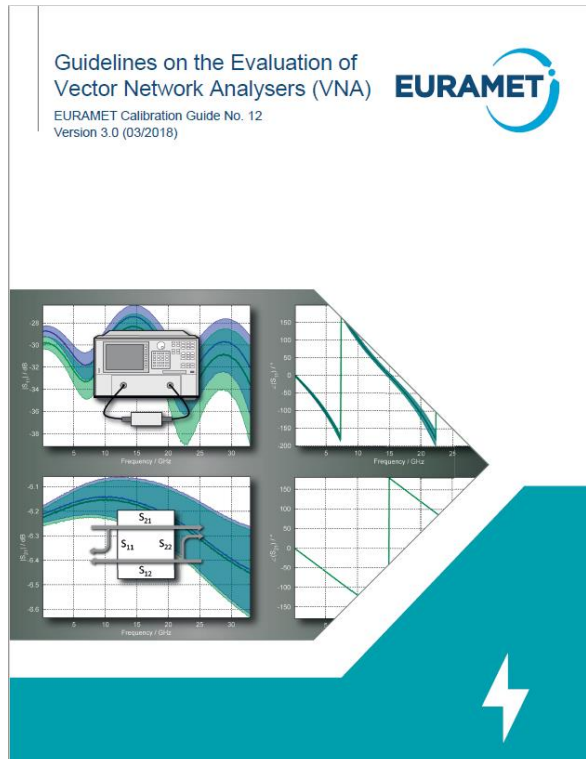
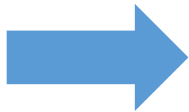
"These simulations show that the propagation of the residual error terms through the SOLT calibration is sensitive to nonideal values of E_{LF} and E_{LR} , this needs further study"

E_{LF} , E_{LR} : unkorrigierte Lasttoranpassungen der beiden Messtore

[5] Stenarson, Yhland (2007), ***Residual error models for the SOLT and SOLR VNA calibration algorithms.***

EURAMET cg-12 Version 3.0

03/2018



- Rigorose Unsicherheits-Propagation

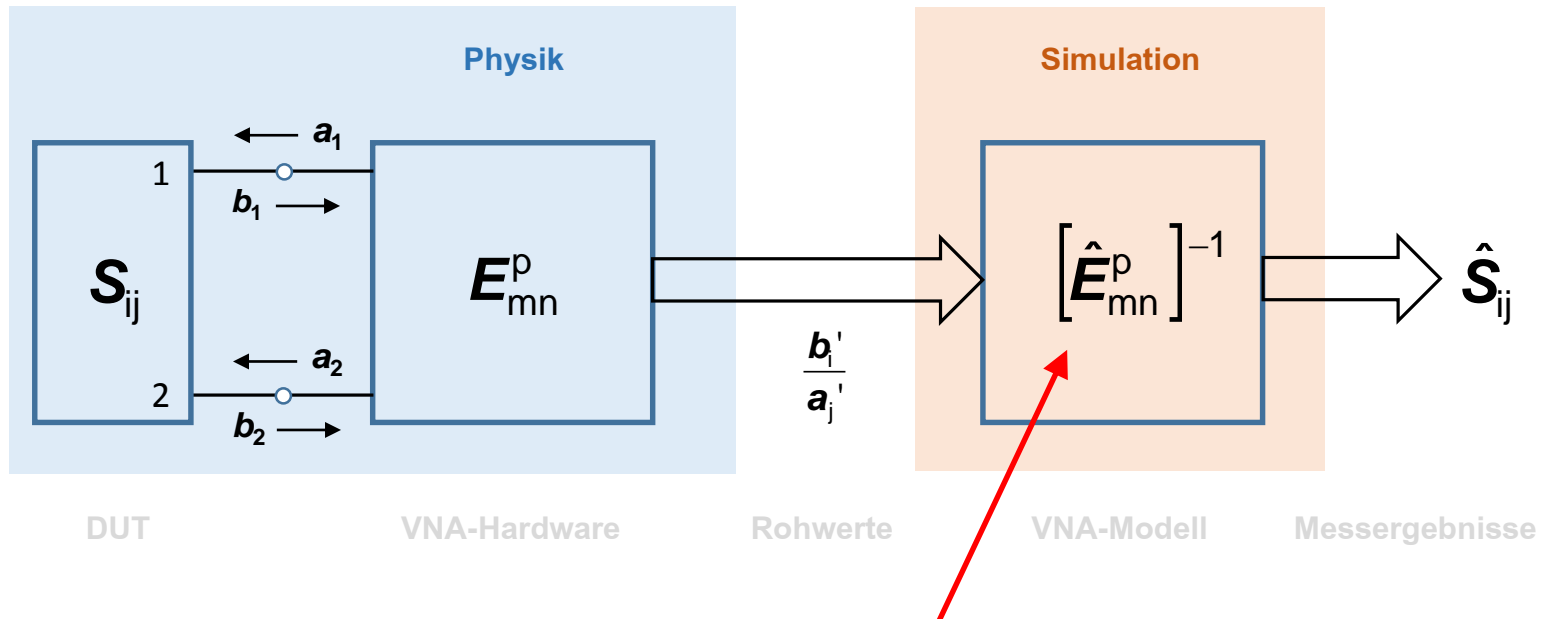


- Ripple-Methode (mit Residuals) zur Unsicherheits-Abschätzung

Messunsicherheitsberechnung völlig überarbeitet

Messtoreinfluss als Funktion der Residuals hinzu

Messung mit kalibriertem VNA

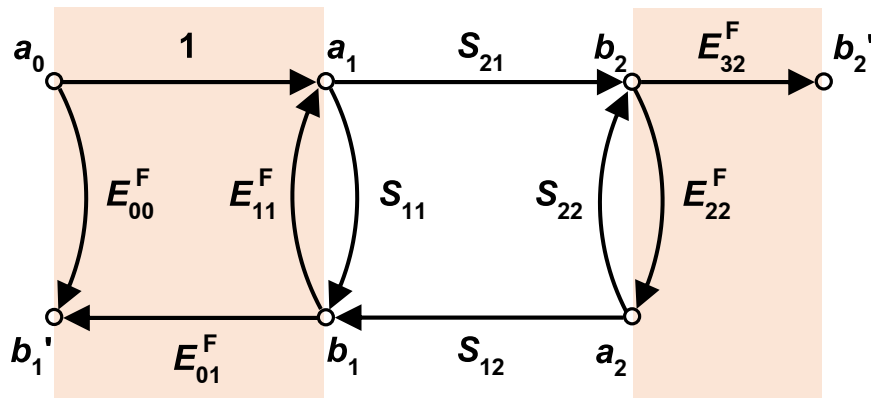


Geschätzte Fehlerterme von der Kalibrierung des VNA

$$\hat{E}_{mn}^p = E_{mn}^p + \Delta E_{mn}^p$$

$$\hat{S}_{mn}^p = S_{mn}^p + \Delta S_{mn}^p$$

10-Term-Modell



Messrichtung 1 → 2 (Forward)

E_{00}^F Direktivität

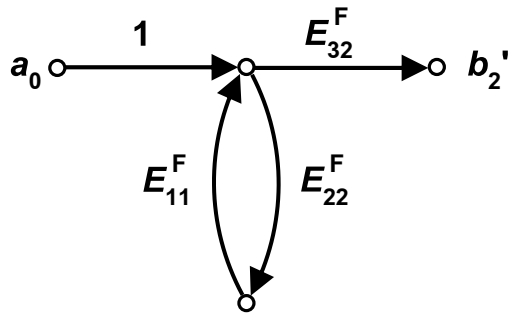
E_{01}^F Reflexionsgleichlauf

E_{11}^F Quelltoranpassung

E_{32}^F Transmissions-Gleichlauf

E_{22}^F Lasttoranpassung

Kalibrierung der Durchverbindung



$$\frac{b_2'}{a_0} = \frac{E_{32}^F}{1 - E_{11}^F E_{22}^F}$$

$$E_{32}^F = \frac{b_2'}{a_0} (1 - E_{11}^F E_{22}^F)$$

Hardware

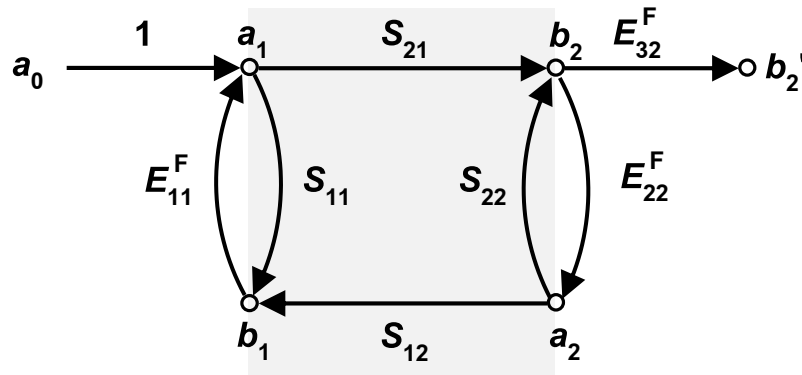
$$\hat{E}_{32}^F = \frac{b_2'}{a_0} (1 - \hat{E}_{11}^F \hat{E}_{22}^F)$$

Modell

$$\frac{\hat{E}_{32}^F}{E_{32}^F} \approx 1 - \left(E_{11}^F \Delta E_{22}^F + E_{22}^F \Delta E_{11}^F \right)$$

Rytting-
Term

Messobjekt



$$S_{21} \approx \frac{b_2'}{a_0} \cdot \frac{1 - E_{11}^F S_{11} - E_{22}^F S_{22}}{E_{32}^F} \quad \text{Hardware}$$

$$\hat{S}_{21} \approx \frac{b_2'}{a_0} \cdot \frac{1 - \hat{E}_{11}^F \hat{S}_{11} - \hat{E}_{22}^F \hat{S}_{22}}{\hat{E}_{32}^F} \quad \text{Modell}$$

$$\frac{b_2'}{a_0} \approx S_{21} \cdot \frac{E_{32}^F}{1 - E_{11}^F S_{11} - E_{22}^F S_{22}}$$

$$\frac{\hat{S}_{21}}{S_{21}} \approx \frac{E_{32}^F}{\hat{E}_{32}^F} \left(1 - E_{11}^F \Delta S_{11} - E_{22}^F \Delta S_{22} - S_{11} \Delta E_{11}^F - S_{22} \Delta E_{22}^F \right)$$

Näherungen gültig für: $|S_{11}| \ll 1$, $|S_{22}| \ll 1$ und $|S_{21} S_{12}| \ll 1$

Auswertung

$$\frac{\hat{S}_{21}}{S_{21}} \approx 1 + E_{11}^F \Delta E_{22}^F + E_{22}^F \Delta E_{11}^F - E_{11}^F \Delta S_{11} - E_{22}^F \Delta S_{22} - S_{11} \Delta E_{11}^F - S_{22} \Delta E_{22}^F$$

$$\Delta E_{22}^F \approx \delta E_{00}^F \quad \Delta E_{11}^F \approx -\delta E_{11}^F \quad \Delta S_{11} \approx \delta E_{00}^F \quad \Delta S_{22} \approx \delta E_{33}^R \quad \text{Eintor-Residuals}$$

Kompensation Quellforeinfluss (ohne Direktivitäts-Drift)

$$\frac{\hat{S}_{21}}{S_{21}} \approx 1 + \cancel{E_{11}^F \delta E_{00}^F} - E_{22}^F \delta E_{11}^F - \cancel{E_{11}^F \delta E_{00}^F} - E_{22}^F \delta E_{33}^R + S_{11} \delta E_{11}^F - S_{22} \delta E_{00}^F$$

$$\frac{\hat{S}_{21}}{S_{21}} \approx 1 - E_{22}^F \left(\delta E_{11}^F + \delta E_{33}^R \right) + \underbrace{S_{11} \delta E_{11}^F - S_{22} \delta E_{00}^F}_{\text{Bekannte Mismatch-Terme}}$$

Eff. Quelltoranpassung Tor 1

Eff. Direktivität Tor 1

Eff. Direktivität Tor 2

Rohe Lasttoranpassung für Messrichtung 1 → 2

Exakte Analyse [8]

$$\frac{\hat{S}_{21}}{S_{21}} \approx 1 - E_{22}^F (1 - S_{12} S_{21}) (\delta E_{11}^F + \delta E_{33}^R) + S_{11} \delta E_{11}^F + S_{22} \delta E_{22}^F$$

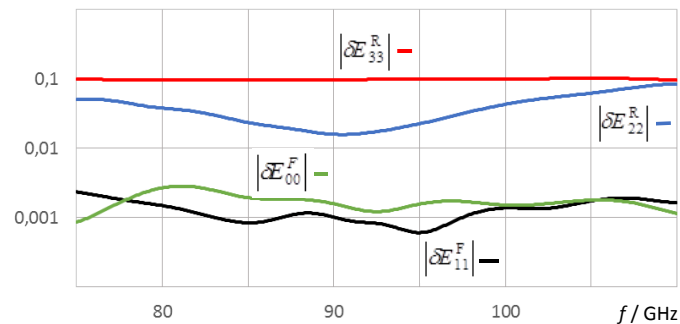
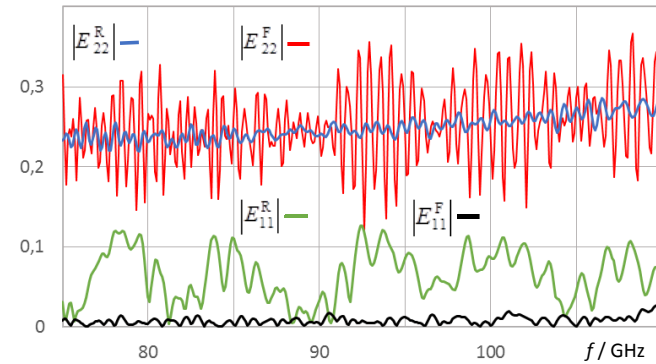
$$\frac{\hat{S}_{12}}{S_{12}} \approx 1 - E_{11}^R (1 - S_{12} S_{21}) (\delta E_{22}^R + \delta E_{00}^F) + S_{11} \delta E_{11}^R + S_{22} \delta E_{22}^R$$

- Abgeleitet aus den Sensitivitätskoeffizienten nach [3], aber mit Bezug auf die Eintor-Residuals. Die Durchverbindung ("Thru") wird als ideal angenommen.
- Der VNA wird zwischen Kalibrierung und Messung als drifffrei betrachtet.

Experimentelle Verifikation

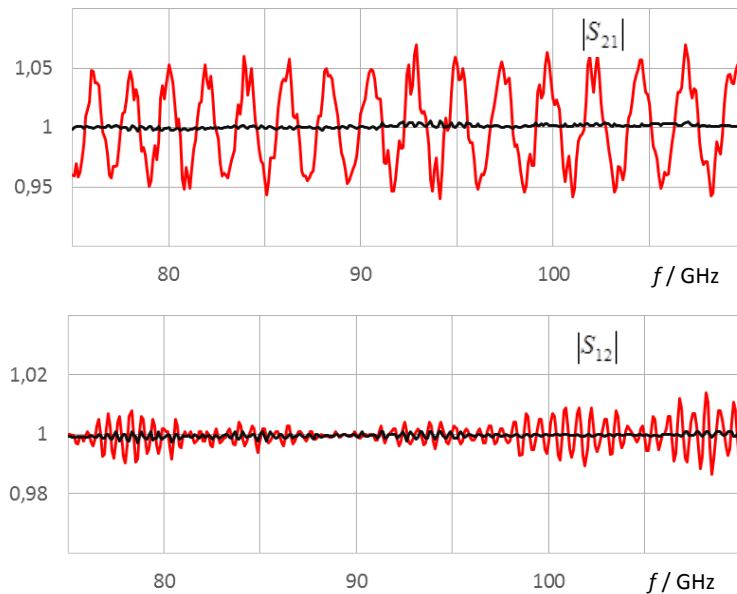


*Residuals über variable Definitionen einstellbar



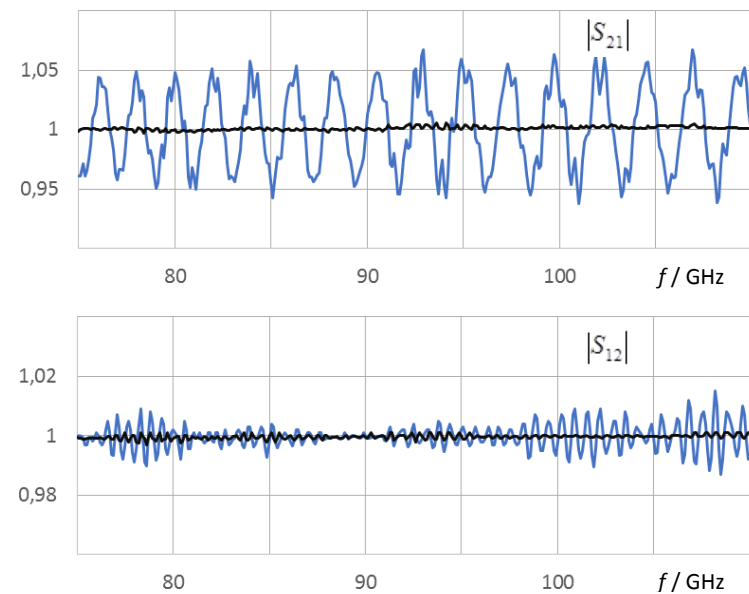
Ergebnis für $\lambda/4$ -Leitung

Messung



Messwerte für die Transmissionskoeffizienten
 — : TRL — : SOLT

Simulation



Berechnete Transmissionskoeffizienten
 — : SOLT (mit Gleichungen von Folie 14)

Andere Kalibrierverfahren

- Kein Messtoreinfluss* bei TRL
- Wahrscheinlich kein Einfluss bei SOLR (Unknown Thru).

*) in erster Näherung

SOLR: Erheblicher Einfluss des Reflexionsgleichlaufs auf die Transmissionsparameter vorhanden !
Im neuen cg-12 Guide noch nicht berücksichtigt.

$$\frac{\hat{S}_{21}}{S_{21}} \approx 1 + \frac{\delta E_{01} + \delta E_{32} \delta E_{23}}{2} + S_{11} \delta E_{11} + S_{22} \delta E_{22} \quad \text{siehe z.B. [5] Gl. (18) und [6] Gl. (22)}$$

Messunsicherheitsbudget

Rigoreuse Analyse

Vollständiges VNA-Modell für
Kalibrierung und Messung als
Grundlage.



Lastoreinfluss wird auto-
matisch berücksichtigt.



Ripple Analyse / Residuals

Residual-Modell erfasst nicht
alle Effekte.



Lastoreinfluss hinzufügen



Unsicherheitsberechnung cg-12 (3.0) / Gleichung H.4a

$$\begin{aligned}
 & \underbrace{\left[u(\hat{\mathbf{S}}_{21}) \right]^2}_{\text{Standard-Unsicherheit } S_{21}} = \underbrace{\left[\left| \hat{\mathbf{S}}_{11}^c \hat{\mathbf{S}}_{21}^c \right| u(\delta \hat{\mathbf{E}}_{11}^F) \right]^2 + \left[\left| \hat{\mathbf{S}}_{22}^c \hat{\mathbf{S}}_{21}^c \right| u(\delta \hat{\mathbf{E}}_{22}^F) \right]^2}_{\text{Bekannte Mismatch-Terme}} + \left[\left| \hat{\mathbf{S}}_{21}^c \right| u(\delta \hat{\mathbf{E}}_{32}^F) \right]^2 + \\
 & \left[u(\delta \hat{\mathbf{E}}_{30}^F) \right]^2 + \left[\left| \hat{\mathbf{S}}_{21}^c \right| u(\hat{\mathbf{L}}) \right]^2 + \left[\left| \hat{\mathbf{S}}_{21}^c \right| u(\hat{\mathbf{C}}_{32}) \right]^2 + \\
 & \left[\left| \hat{\mathbf{S}}_{21}^c \hat{\mathbf{S}}_{22}^c \right| u(\hat{\mathbf{C}}_{22}) \right]^2 + \left[u(\hat{\mathbf{R}}_{S21}) \right]^2 + \\
 & \underbrace{\left| \hat{\mathbf{S}}_{21}^c \hat{\mathbf{E}}_{22}^F (1 - \hat{\mathbf{S}}_{21}^c \hat{\mathbf{S}}_{12}^c) \right|^2}_{\text{Lasttoranpassung}} \left(\underbrace{\left[u(\delta \hat{\mathbf{E}}_{33}^R) \right]^2}_{\text{Standard-Unsicherheit eff. Quelltoranpassung}} + \underbrace{\left[u(\delta \hat{\mathbf{E}}_{11}^F) \right]^2}_{\text{Standard-Unsicherheit eff. Direktivität}} \right)
 \end{aligned}$$

Beispiel (N bis 18 GHz)

1 dB Dämpfungsglied

$$|1 - \mathbf{S}_{12} \mathbf{S}_{21}| = 0,2 \dots 1,8$$

$$|\mathbf{E}_{22}^F| = 0,25 \quad (-12 \text{ dB})$$

$$u(\mathbf{E}_{11}^F) = 0,012 \quad (-38 \text{ dB})$$

$$u(\mathbf{E}_{33}^F) = 0,008 \quad (-42 \text{ dB})$$

$$\frac{U(\hat{\mathbf{S}}_{21})}{|\hat{\mathbf{S}}_{21}|} < 0,013 \quad (0,112 \text{ dB})$$

20 dB Dämpfungsglied

$$|1 - \mathbf{S}_{12} \mathbf{S}_{21}| \approx 1$$

$$|\mathbf{E}_{22}^F| = 0,05 \quad (-26 \text{ dB}) \quad \text{sehr gut angepasstes Lasttor}$$

$$u(\mathbf{E}_{11}^F) = 0,006 \quad (-44 \text{ dB})$$

$$u(\mathbf{E}_{33}^F) = 0,004 \quad (-48 \text{ dB})$$

} sehr gutes Kalibrierkit,
sehr stabiler VNA

$$\frac{U(\hat{\mathbf{S}}_{21})}{|\hat{\mathbf{S}}_{21}|} \approx 0,0007 \quad (0,006 \text{ dB})$$

In den Beispielen des Guide (Anhang J) wird ein sehr geringer Reflexionsfaktor der Last von 0,03 angenommen, so dass der Einfluss dort nur eine untergeordnete Rolle spielt.

Zusammenfassung

- Stark fehlangepasste Messtore können die Messung der Transmissionsparameter beim 10(12)-Term-Kalibrierverfahren SOLT beeinflussen.
- Der Einfluss ist relevant für Messungen geringer Unsicherheit an gut angepassten Messobjekten.
- Durch genaue Kalibrierstandards und Verbesserung der Anpassung kann der Effekt reduziert werden.
- Bei Anwendung der Ripple-Methode ist der Einfluss im Unsicherheitsbudget zu ergänzen, beim rigorosem Ansatz ist er bereits darin enthalten.
- Die Höhe der Unsicherheit lässt sich aus den Residuals von Direktivität und Quelltoranpassung berechnen.

Danksagung

Harald Jäger, Rohde & Schwarz

Dr. Rolf Judaschke, PTB

Florian Rausche, PTB

Dr. Thorsten Schrader, PTB

Für die Anregung, sich dieses Themas anzunehmen, die Durchsicht der theoretischen Ableitungen und insbesondere die umfangreiche experimentelle Verifikation.

Referenzen

- [1] A. J. Estin, J. R. Juroshek, R. B. Marks et al. Basic RF and Microwave Measurements: a Review of Selected Programs. *Metrologia* 1992, 29, page 135 – 151.
- [2] D. Rytting. Effects of Uncorrected RF Performance in a Vector Network Analyzer. *Microwave Journal*, pp. 106-117, April 1991.
- [3] U. Stumper. Uncertainty of VNA S-parameter measurement due to nonideal TMSO or LMSO calibration standards. *Advances in Radio Science*, pp. 1–8, 2003.
- [4] U. Stumper. Influence of TMSO Calibration Standards Uncertainties on VNA S-Parameter Measurements. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 52, no. 2, pp. 311-315, Feb. 2003.
- [5] J. Stenarson, K. Yhland. Residual error models for the SOLT and SOLR VNA calibration algorithms. 69th ARFTG Conference Digest, pp. 133–139, 2007.
- [6] U. Stumper. Influence of Nonideal Calibration Items on S-Parameter Uncertainties Applying the SOLR Calibration Method. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 58, no. 4, pp. 1158-1163, April 2009.
- [7] EURAMET Calibration Guide No. 12. Guidelines on the Evaluation of Vector Network Analysers (VNA). Version 3.0 (03/2018). European Association of National Metrology Institutes.
- [8] EURAMET T. Reichel, R. H. Judaschke, and F. Rausche. Effect of Uncorrected Test Port Match of a Vector Network Analyzer on the Transmission Coefficient Gained after SOLT Calibration. Accepted by CPEM conference, 2018.