



Rückführbarkeit von Messungen mit Netzwerkanalysatoren (NWA) in STS-Stellen

Version: v1.1 / 04.04.2014

1. Geltungsbereich

Diese Empfehlungen gelten in erster Linie für „laborinterne Kalibrierungen“¹ mittels NWA bei STS-Stellen mit entsprechender Kompetenz (Infrastruktur und Fachkenntnisse). Die Rückführbarkeit kann aber auch mit anderen Methoden gesichert werden.

Im Vordergrund steht der allgemeine Fall, d.h. die Messung mit dem **Vektor-Netzwerkanalysator (VNA)**, der die komplexen S-Parameter erfasst. Der **Skalare NWA (SNA)** misst nur Betrag, er wird in einer späteren Dokumentversion als Anhang B behandelt.

2. Hintergrund der VNA-Rückführbarkeit

Die Rückführbarkeit sowie die Qualität der Messergebnisse bei Messungen mit einem VNA werden durch folgende Mittel und Massnahmen gesichert:

- a) VNA-Hardware (Elektronik und Messbrücken). Die hinreichende Hardwarequalität (Spezifikation) ist eine Voraussetzung, dass die vom Hersteller spezifizierte Messgenauigkeit nach der VNA-Kalibrierung gemäss Punkt (c) erreicht werden kann.
- b) VNA-Kalibriersatz („calibration kit“): ein Satz von Transfornormalen („transfer standards“) für die VNA-Kalibrierung.
- c) „VNA-Kalibrierung“: Diese erfolgt vor der Messung des EUT im Messlabor. Dabei werden die nichtidealen Hardwareeigenschaften des VNA mit einem Kalibriersatz ermittelt. Die so erhaltenen Parameter dienen anschliessend zur mathematisch aufwendigen Korrektur der EUT-Messwerte. Wegen der mechanisch heiklen Komponenten und wegen ihrer Komplexität verlangt die VNA-Kalibrierung Aufmerksamkeit, Sorgfalt und Präzision.

Bemerkung: Die Bezeichnung „VNA-Kalibrierung“, welche wir auch weiter verwenden, ist nicht eine Kalibrierung im Sinne der Metrologiesprache (VIM, siehe unten), ist aber historisch und fest eingebürgert obwohl nicht ganz richtig. Der erst vereinzelt anzutreffende Ausdruck „VNA-Korrektur“ würde besser zutreffen.

Definition der Kalibrierung nach VIM (JCGM 200:2008): Tätigkeit, die unter festgelegten Bedingungen in einem ersten Schritt eine Beziehung zwischen den durch Normale zur Verfügung gestellten Größenwerten mit ihren Messunsicherheiten und den entsprechenden Anzeigen mit ihren beigeordneten Messunsicherheiten herstellt und in einem zweiten Schritt diese Information verwendet, um eine Beziehung herzustellen, mit deren Hilfe ein Messergebnis aus einer Anzeige erhalten wird.

- d) VNA-Verifikationssatz („verification kit“): ein vom Kalibriersatz unabhängiger Satz von Referenzkomponenten, eigentlich Transfornormalen. Mit diesem Satz, als EUT gemessen, wird die korrekte VNA-Kalibrierung verifiziert. Begründung: Drift des VNA, schlechte Kontakte, Fehlmanipulationen an Hardware und Software während der Kalibrierprozedur, veränderte Normale, etc. können leicht zu einer fehlerbehafteten VNA-Kalibrierung (Korrektur) führen. Erst mit dieser Verifikation kann also die Kette aller vier Punkte, a) bis d), für ihre Korrektheit beurteilt werden.

¹ laborinterne Kalibrierung: rückführbare Kalibrierung der eigenen Messmittel in der Prüfstelle, z.B. Dämpfung von Kabeln, Verifikation von Impedanzen usw., s.a. SK-ET, [2]. Für die akkreditierte Messung von S-Parametern für Kunden (in der Regel als Kalibrierung durch SCS-Stellen angeboten) gelten erhöhte Anforderungen.



SAS / SK_ET: Rückführbarkeit von Messungen mit Netzwerkanalysatoren (NWA) in STS-Stellen

3. Mögliche Sicherung der VNA-Rückführbarkeit bei STS-Stellen

3.1. Grundsätze

- Vor dem ersten Einsatz in der Stelle werden Kalibrier- und Verifikationssatz rückführbar kalibriert.
- In der Folge wird die Rückführbarkeit der VNA-Messergebnisse mit einem periodisch rückführbar kalibrierten Verifikationssatz überwacht.

3.2. Kalibrierung des Verifikationssatzes

- Der Verifikationssatz wird regelmässig kalibriert.
- Als Kalibrierintervall für den Verifikationssatz wird zunächst ein Jahr empfohlen. Anschliessend kann die Stelle das Intervall optimieren (SK-ET und ILAC: [2] und [3]). Wegen der mechanischen Beanspruchung der Komponenten sei ein längeres Intervall als drei Jahre nicht empfohlen.
- Wegen dieser Beanspruchung ist auch, im eigenen Interesse der Stelle, eine periodische mechanische Kontrolle der Verifikationssätze sinnvoll, um eine Beschädigung von VNA bzw. EUT zu vermeiden.

3.3. Kalibrierung des Kalibriersatzes und Massnahmen beim Fehlschlag der Verifikation

- Der Kalibriersatz muss nicht unbedingt kalibriert werden (ausser beim Ersten Einsatz). Falls die Verifikation gemäss Abs.3.5 fehlschlägt, muss die Stelle das Problem analysieren und beheben. Dies kann eine oder mehrere der folgenden Massnahmen beinhalten: Neudefinition der MU, Neuverifikation, Neukalibrierung, Revision von VNA-Hardware, Kalibriersatz oder Verifikationssatz.

3.4. Anforderungen an den Verifikationssatz

- Die Stelle kann den, vom Kalibriersatz unterschiedlichen, Verifikationssatz selber definieren. Dabei müssen die S-Parameter des Verifikationssatzes die zu messenden S-Parameterbereiche der EUTs hinreichend abdecken:
 - Linearität: Abschwächer, die in ca. 20 dB Schritten, aber über 50 dB in 10 dB Schritten, den zu messenden Dämpfungsbereich abgrenzend abdecken (d.h. auch für die höchste zu messende Dämpfung ist ein Verifikations-Abschwächer verfügbar, evtl. als Kombination von mehreren Abschwächern, z.B. mit 10 dB, 20 dB, und 30 dB, oder „Stepattenuator“).
 - Reflexion: minimale und maximale Reflexion, d.h. Abschluss (load), sowie Kurzschluss (short) und Leerlauf (open).
- Der Verifikationssatz muss ein Satz von mechanisch robusten und elektrisch stabilen Komponenten sein. Er muss kein handelsüblicher Verifikations- oder Kalibriersatz sein. Insbesondere sind empfindliche Komponenten zu vermeiden, wie Leitungen und Stecker mit heikler Montageprozedur.



3.5. VNA-Verifikation

- Zur Überprüfung der korrekten „VNA-Kalibrierung“ wird der Verifikationssatz mit dem kalibrierten VNA ausgemessen, siehe Abs. 1d). Zu berücksichtigen ist, dass der VNA mit unterschiedlichen Signalpegeln und evtl. auch mit verschiedenen Einstellungen (z.B. „IF-bandwidth“) arbeiten kann. Es ist somit darauf zu achten, dass Kalibrierung, Verifikation und Messung immer mit den gleichen Einstellungen erfolgen.
- Die so erhaltenen Messwerte werden mit den Kalibrierwerten aus dem Kalibrierzertifikat des Verifikationssatzes verglichen, und zwar wie folgt:

- Für die Reflexion wird der Betrag der Differenz der komplexen Werte gebildet, z.B. Verifikation mit Leerlauf am Tor 1:

$$|\Delta_{Open,1}(f)| = |S_{11,Open,gemessen}(f) - S_{11,Open,Kalibrierzertifikat}(f)| \quad (1)$$

oder mit Abschluss am Tor 1:

$$|\Delta_{Load,1}(f)| = |S_{11,Load,1,gemessen}(f) - S_{11,Load,1,Kalibrierzertifikat}(f)| \quad (2)$$

- Für die Dämpfung (Transmission) wird die Differenz der Werte in dB gebildet, z.B.

$$|\Delta_{20dB}^{dB}(f)| = |S_{21,20dB,gemessen}^{dB}(f) - S_{21,20dB,Kalibrierzertifikat}^{dB}(f)| \quad (3)$$

- Die Verifikation gilt als erfolgreich, wenn die so ermittelten Differenzen Δ die von der Stelle für ihre eigenen Bedürfnisse *im Voraus definierten*, notwendigen und realistischen Toleranzwerte

$T_{low-reflect}(f)$, $T_{high-reflect}(f)$ und $T_{xxdB}(f)$ nicht überschreiten:

$$\left. \begin{aligned} |\Delta_{Open,1}(f)| &< T_{high-reflect}(f) \\ |\Delta_{Open,2}(f)| &< T_{high-reflect}(f) \\ |\Delta_{Short,1}(f)| &< T_{high-reflect}(f) \\ |\Delta_{Short,2}(f)| &< T_{high-reflect}(f) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} |\Delta_{Load,1}(f)| &< T_{low-reflect}(f) \\ |\Delta_{Load,2}(f)| &< T_{low-reflect}(f) \\ |\Delta_{xxdB}^{dB}(f)| &< T_{xxdB}(f) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Bemerkung: Verifikations-Leerlauf und -Kurzschluss als hohe Reflexion (open & short: $\Gamma \rightarrow 1$, *high-reflect*) haben normalerweise eine grössere Unsicherheit als der Verifikations-Abschluss (load: $\Gamma \rightarrow 0$, *low-reflect*). Will man die zu ermittelnde Messunsicherheit für den VNA minimal halten, so ist es sinnvoll zwischen *high-reflect* und *low-reflect* zu unterscheiden, wie oben angegeben. Will man jedoch die Berechnung einfacher halten, bei etwas höherer Messunsicherheit, so kann man mit der höheren Unsicherheit der Verifikationskomponenten arbeiten, d.h. nur mit *einem* $T_{reflect}(f)$.



SAS / SK_ET: Rückführbarkeit von Messungen mit Netzwerkanalysatoren (NWA) in STS-Stellen

3.6. Verifikationsintervalle

- Vollverifikation, mit allen Verifikationskomponenten, üblichen maximalen und minimalen Generatorpegeln sowie dazugehörigen Mittelungs- und Glättungsfunktionen. Ziel ist die Verifikation der VNA-Hardware und des Kalibriersatzes sowie die Bestimmung bzw. Bestätigung der MU. Die Vollverifikation sollte periodisch auch zwischen den Kalibrierintervallen des Verifikationssatzes durchgeführt werden. Man kann hierfür zunächst z.B. eine vierteljährliche Periode festlegen und später die Periode aufgrund der Erfahrung optimieren.
- Teilverifikation, mit reduzierter Anzahl Komponenten und nur einem Generatorpegel. Ziel ist die Bestätigung, dass eine durchgeführte VNA-Kalibrierung korrekt ist. Die Teilverifikation ist zumindest nach jeder VNA-Kalibrierung durchzuführen. Für eine Teilverifikation können z.B. folgende Komponenten genügen:
 - Eintormessung: ein Abschluss, ein Leerlauf und ein Kurzschluss
 - Zweitormessung: ein Abschwächer (mit Vorteil einer, dessen Dämpfung in der Nähe der maximal zu messenden Dämpfung liegt) und ein Kurzschluss oder Leerlauf

3.7. VNA- Messunsicherheit

- Die Messunsicherheit kann auf verschiedenen Wegen bestimmt werden. In keinem Fall darf Sie kleiner oder gleich sein wie die Unsicherheiten des Verifikationssatzes. Siehe Anhang A als Vorschlag für eine robuste Bestimmung der Unsicherheiten.

4. Referenzen

- [1] *Guidelines on the Evaluation of Vector Network Analysers (VNA)*, EURAMET cg-12, Version 2.0 (03/2011), www.euramet.org, (technisch identisch mit EA-10/12, May 2000)
- [2] *Welche Zertifikate sind für die Rückverfolgbarkeit von Messwerten anzuwenden und welche Kalibrierperiodizität ist zu wählen?* (Sektorkomitee EMV: Kalibrierzertifikate Periodizitäten), www.seco.admin.ch/sas/emv/index.html?lang=de
- [3] *Guidelines for the determination of calibration intervals of measuring instruments*, ILAC G24, http://www.ilac.org/documents/ILAC_G24_2007.pdf

5. Abkürzungen

EUT equipment under test

GUM *Guide to the expression of uncertainty in measurement*, ISO, 1995

MU Messunsicherheit

SAS Schweizerische Akkreditierungsstelle

SCS Schweizerischer Kalibrierdienst (Swiss Calibration Service)

SK-ET Sektorkomitee Elektrotechnik (früher SK-EMV)

STS Schweizerischer Prüfstellendienst (Swiss Testing Service)

NWA Netzwerkanalysator

S_{ik} S-parameter des EUT (falls nicht mit ^{dB} indiziert, dann immer linear, dimensionslos, komplex)



SAS / SK_ET: Rückführbarkeit von Messungen mit Netzwerkanalysatoren (NWA) in STS-Stellen

SNA Skalar-Netzwerkanalysator

VNA Vektor-Netzwerkanalysator

Γ_i Reflexionsfaktor des NWA-Tors, auf welches die Messung bezogen wird
(engl. auch „port match“ bezeichnet)

Anhang A: Bestimmung der MU bei VNA

Dieser Anhang präsentiert einen robusten Vorschlag für die Bestimmung der Unsicherheiten.

A.1. Hilfsgrössen

2. Folgende Hilfsgrössen seien definiert:

- a) die kombinierten Unsicherheiten aus der Kalibrierunsicherheit des Verifikationssatzes und aus der zulässigen Abweichungstoleranz T , gemäss Abs. 3.5:

$$u_{\text{Port1,low-reflect}}(f) = u_{\text{Port2,low-reflect}}(f) = \sqrt{(u_{\text{Load}}(f))^2 + \left(\frac{T_{\text{low-reflect}}(f)}{\sqrt{2}}\right)^2} \quad (6)$$

$$u_{\text{Port1,high-reflect}}(f) = u_{\text{Port2,high-reflect}}(f) = \sqrt{(\max(u_{\text{Open}}(f), u_{\text{Short}}(f)))^2 + \left(\frac{T_{\text{high-reflect}}(f)}{\sqrt{2}}\right)^2} \quad (7)$$

$$u_{\text{Tracking-linearität, xdB}}^{\text{dB}}(f) = \sqrt{(u_{\text{xxdB}}^{\text{dB}}(f))^2 + \left(\frac{T_{\text{xxdB}}^{\text{dB}}(f)}{\sqrt{3}}\right)^2} \quad (8)$$

- b) sowie ein linearer Übergang zwischen den *low-reflect* und *high-reflect* MU:

$$u_{\text{Port1}}(f) = (1 - |S_{11}|) \cdot u_{\text{Port1,low-reflect}}(f) + |S_{11}| \cdot u_{\text{Port1,high-reflect}}(f) \quad (9)$$

$$u_{\text{Port2}}(f) = (1 - |S_{22}|) \cdot u_{\text{Port2,low-reflect}}(f) + |S_{22}| \cdot u_{\text{Port2,high-reflect}}(f) \quad (10)$$

Bemerkung: Falls einfachheitshalber kein separater *low-* und *high-reflect* definiert wird, sondern nur ein gemeinsamer *reflect*, mit der maximalen Unsicherheit, dann lautet die Gleichung, anstelle der obigen Gleichungen für $u_{\text{port...}}$

$$u_{\text{Port1}}(f) = u_{\text{Port2}}(f) = \sqrt{(\max(u_{\text{Open}}(f), u_{\text{Short}}(f), u_{\text{Load}}(f)))^2 + \left(\frac{T_{\text{reflect}}(f)}{\sqrt{2}}\right)^2} \quad (11)$$

Dabei sind:

$u_{\text{Open}}(f), u_{\text{Short}}(f),$ $u_{\text{Load}}(f)$	Unsicherheit (k=1) des Betrages der Reflexionskoeffizienten der Komponenten des Reflexions-Verifikationskits, gemäss Kalibrierzertifikat (aber auf k = 1 umgerechnet). Diese Unsicherheit ist dimensionslos und nicht in dB auszudrücken. (szb: alles aufgeführt)
$T_{\text{high-reflect}}(f), T_{\text{low-reflect}}(f),$ oder nur $T_{\text{reflect}}(f),$	Vom Labor selbst vorgegebene Toleranzwerte, bei Reflexionen.



$u_{xxdB}^{dB}(f), u_{40dB}^{dB}(f), \dots$	<p>Unsicherheit (k=1) der Dämpfung der Komponenten des Dämpfungs-Verifikationskits (in dB), gemäss Kalibrierzertifikat (aber auf k = 1 umgerechnet). xx ist typisch z.B. 10 dB, 20 dB, 30 dB, 40 dB ... Achtung: werden mehrere Dämpfungsglieder in Kette geschaltet, so muss die kombinierte Unsicherheit eingesetzt werden (Wurzel-Quadratsummenregel). <i>Bemerkung:</i> Mehrere Dämpfungsglieder haben ferner den Nachteil mehrerer mechanisch heikler Schnittstellen. Andererseits weisen Dämpfungsglieder mit hoher Dämpfung gelegentlich instabile Dämpfungswerte auf.</p>
$T_{xxdB}^{dB}(f), \dots$	Vom Labor selbst vorgegebene Toleranzwerte bei Dämpfungen.
S_{ik}	S-Parameter des EUT

Das Maximum ist über alle Elemente des Verifikationssatzes und für alle Frequenzen zu bilden. Damit man nicht zu pessimistische Werte erhält, darf der Gesamtfrequenzbereich auch in Teilbereiche unterteilt werden, mit den dazu gehörigen unterschiedlichen Unsicherheiten und Differenzen.

A.1. Unsicherheit der S-Parameter

$$u_{S11} = \sqrt{(u_{Port1})^2 + (|S_{21}| \cdot |S_{12}| \cdot u_{Port2})^2 + (s_{Wiederholpräzision, S_{11}})^2} \quad (12)$$

$$u_{S22} = \sqrt{(u_{Port2})^2 + (|S_{21}| \cdot |S_{12}| \cdot u_{Port1})^2 + (s_{Wiederholpräzision, S_{22}})^2} \quad (13)$$

$$(u_{S12}^{dB})^2 = (u_{S21}^{dB})^2 = (u_{Tracking-linearität, xxdB}^{dB})^2 \quad (14)$$

$$\begin{aligned}
& + \left(20 * \log_{10} \left(\left| \frac{1}{1 - |S_{11}| \cdot u_{Port1}} \right| \right) / \sqrt{2} \right)^2 \\
& + \left(20 * \log_{10} \left(\left| \frac{1}{1 - |S_{22}| \cdot u_{Port2}} \right| \right) / \sqrt{2} \right)^2 \\
& + \left(20 * \log_{10} \left(\left| \frac{1}{1 - |S_{21}| \cdot |S_{12}| \cdot u_{Port1} \cdot u_{Port2}} \right| \right) / \sqrt{2} \right)^2 \\
& + (s_{Wiederholpräzision, S_{12}}^{dB})^2
\end{aligned}$$

Wobei „xx dB“ eine Dämpfung ist, die grösser oder gleich ist wie die gemessene Dämpfung S_{21} in dB. Beispiel: bei einer gemessenen Dämpfung von 43 dB \rightarrow xx dB= 50 dB.

Die Wiederholpräzision ist jene des Labors. Sie hängt von vielen Faktoren ab, wie z.B. Modell und Einstellungen des VNA, Qualität und Zustand aller Komponenten (Stecker, Adapter, Kabel, insbesondere auch die variablen Torsionen und Krümmungsradien der Kabel), EUT, usw.

Die Terme mit $|S_{ik}|$ repräsentieren zusätzliche Fehlanpassungsbeiträge („mismatch“).



SAS / SK_ET: Rückführbarkeit von Messungen mit Netzwerkanalysatoren (NWA) in STS-Stellen

Anhang B: Bestimmung der MU bei SNA

In Bearbeitung

Änderungsnachweis

Version/Datum	Bemerkung	Freigabe
s.a. Fusszeile auf erster Seite		
v.1.0 / 21.03.2012	Erstausgabe	D. Kaiser 22.03.12
v. 1.1 / 04.04.2014	– Gleichungen nummeriert – Einige Erklärungen eingefügt – Redaktionelle Änderungen	D. Kaiser 04.04.2014
	–	