

# Softwareunterstützte Messunsicherheitsberechnung in der Vektornetzwerkanalyse

## METAS-Projekt VNA Tools II

Dr. M. Zeier, Bundesamt für Metrologie, METAS, Bern-Wabern, Schweiz

### Kurzfassung

Aufgrund mehrstufiger Messvorgänge und mehrdimensionaler Messgrößen ist die Messunsicherheitsberechnung in der Vektornetzwerkanalyse komplex und aufwändig. Die heutige Situation ist selbst auf Staatslaborstufe unbefriedigend. Im vorliegenden Bericht wird das Software-Projekt *VNA Tools II* vorgestellt, welches sich zum Ziel gesetzt hat einen Messunsicherheitsrechner für die Vektornetzwerkanalyse zu schaffen, der sich nach den Vorgaben des ISO-GUM [1] richtet.

### Abstract

Due to multi-step measurement procedures and multidimensional measurement quantities the evaluation of measurement uncertainties in the field of vector network analysis is complex and tedious. The current situation is unsatisfactory even at the level of national metrology institutes. This report introduces the software project *VNA Tools II*, which aims at developing an ISO-GUM [1] compliant uncertainty calculator for measurements in vector network analysis.

### 1. Einleitung

In der linearen Vektornetzwerkanalyse werden fundamentale Größen der elektrischen Hochfrequenz gemessen. Dabei handelt es sich um Reflexion und Transmission, welche unter dem Begriff Streuparameter zusammengefasst werden. Reflexions- und Transmissionsverhalten eines Prüflings werden durch eine Streumatrix charakterisiert. Die Grösse dieser Matrix hängt von der Anzahl Messtoren ab. So wird beispielsweise ein zweitoriges Dämpfungsglied durch eine 2x2-Matrix und ein 3-toriger Splitter durch eine 3x3-Matrix charakterisiert. Die Elemente der Streumatrix sind vektorielle Größen, die durch Amplitude und Phase oder durch Real- und Imaginärteil charakterisiert sind. Die Messung von Streuparametern wird mittels eines Vektornetzwerkanalysators (VNA) durchgeführt. Diese Geräte messen sehr präzise aber ungenau, d.h. die Wiederholbarkeit der Messungen ist gut, aber die Werte sind falsch. Verantwortlich dafür sind systematische Effekte, die dieser Art von Messsystem inhärent sind. Vor der eigentlichen Messung des

Prüflings wird deshalb eine Fehlerkorrektur des Gerätes durchgeführt, indem bekannte Standards angeschlossen und gemessen werden. Damit werden Korrekturterme bestimmt, mit denen die Rohdaten einer Messung des Prüflings korrigiert werden. Es gibt eine Vielzahl von Fehlerkorrektur-Algorithmen (oft auch als Kalibrieralgorithmen bezeichnet), denen verschiedene Fehlermodelle zugrunde liegen und bei denen unterschiedliche Referenzstandards eingesetzt werden.

Die Bestimmung der Messunsicherheit bei dieser Art von Messungen ist nicht trivial. Das liegt einerseits daran, dass dem eben beschriebenen Messvorgang ein mehrstufiges Messmodell zugrunde liegt und dass sämtliche involvierten Grössen (auch die Korrekturterme) mehrdimensional sind. Ausserdem produzieren VNA-Messungen für metrologische Verhältnisse grosse Datenmengen, da normalerweise über einen weiten Frequenzbereich gemessen wird.

Die heutige vorherrschende Praxis der Messunsicherheitsbewertung bei VNA-Messungen beruht auf einem Dokument der EA [2], in dem eine heuristische Methode angewandt wird, die es erlaubt nach erfolgter Fehlerkorrektur verschiedene Unsicherheitsbeiträge zu bestimmen. Dies geschieht entweder durch zusätzliche Messungen oder durch Verwendung von Herstellerspezifikationen. Diese Vorgehensweise ist nicht in Übereinstimmung mit den Prinzipien des ISO-GUM [1].

Selbst auf Staatslaborstufe ist die Situation unbefriedigend. Illustrieren lässt sich dies anhand von Resultaten in Messvergleichen (Abb. 1).

## **2. Korrekte Behandlung nach ISO-GUM**

Zentrale Aspekte der Methode nach ISO-GUM sind:

1. Die Modellierung des Messvorgangs, bei der Eingangsgrössen über das Messmodell mit Ausgangsgrössen verknüpft werden.
2. Die Bestimmung der Messunsicherheit der Eingangsgrössen mittels Typ A oder Typ B.
3. Die Fortpflanzung der Messunsicherheit durch das Messmodell hindurch zur Bestimmung der Messunsicherheit der Ausgangsgrössen.

Mehrdimensionale Messgrössen werden im ISO-GUM nur sehr eingeschränkt behandelt. Jedoch ist ein Ergänzungsdokument (GUM-S2) [3] in Vorbereitung, das die Prinzipien des ISO-GUM vor allem auf der formalen Ebene erweitert. Eine wichtige Rolle spielen dabei Vektor- und Matrizenformalismus, die es erlauben die multivariate Behandlung der Messunsicherheit auf sehr kompakte Art und Weise darzustellen. Obwohl GUM-S2 noch

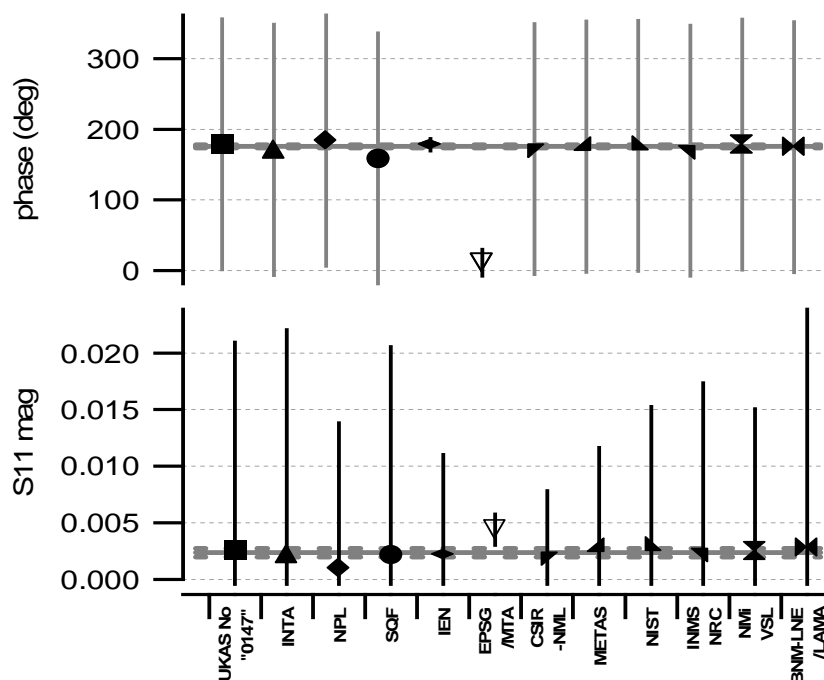


Abbildung 1: Resultate des Messvergleichs EUROMET.EM.RF-S16 (Streuparameter bis 50 GHz). Abgebildet sind die Messungen von Amplitude (unten) und Phase (oben) des Reflexionsfaktors S11 und die zugehörigen Referenzwerte (graue horizontale Linien). Es fällt auf, dass im Vergleich zur Streuung der Resultate die Messunsicherheit in den meisten Fällen überschätzt wird. Diese konservative Haltung ist Ausdruck für die unbefriedigende Situation bei der Messunsicherheitsbewertung dieser Art von Messungen.

nicht veröffentlicht ist, werden die zu erwartenden Erweiterungen in der Literatur (z.B. [4-6]) bereits seit einigen Jahren diskutiert und sind weitgehend bekannt.

Die multivariate Behandlung der Messunsicherheit ist rechnerisch aufwändig und lässt sich von Hand oder auch mittels eines Tabellenkalkulationsprogramms kaum bewältigen. Jedoch bietet gerade der Matrizenformalismus die Möglichkeit einer effizienten Implementierung in Software.

Das Hochfrequenzlabor am METAS arbeitet schon seit einiger Zeit an der Erweiterung der existierenden Metrologie-Software *VNA Tools* [7]. Seit Anfang dieses Jahres wurden diese Aktivitäten in den Status eines offiziellen Projekts erhoben, das unter dem Namen *VNA Tools II* durchgeführt wird.

### 3. Projekt *VNA Tools II*

Primäres Ziel des Projekts *VNA Tools II* ist die Bereitstellung von Software für die ISO-GUM-konforme Berechnung der Messunsicherheit in der Netzwerkanalyse. Vorstudien haben gezeigt, dass die benötigten Änderungen an der existierenden LabView-Software *VNA Tools* so fundamental sind, dass auf ein Upgrade verzichtet wird und stattdessen ein neues Tool in einer Programmiersprache, die den Anforderungen gewachsen ist, erzeugt wird. Dabei werden moderne Programmier Techniken verwendet.

Nebst den Software-technischen Aspekten, wie Programmiersprache, Datenformat, Archivierung und Performance sind vor allem die Modellierung des Messvorgangs, die Fortpflanzung der Messunsicherheit und die Interaktion mit dem Benutzer (Graphisches Interface, Unterstützung des Messablaufs, Gerätesteuerung) von Bedeutung.

Im Bereich der Modellierung und bei der Bestimmung der Messunsicherheiten der Eingangsgrößen arbeitet METAS mit der Firma Agilent Technologies zusammen, die als einer der führenden Hersteller von VNAs und VNA-Kalibrierstandards über spezifische Kenntnisse in diesen Bereichen verfügt. Bei den Einflussgrößen kann man unterscheiden zwischen Geräteparametern (Linearität, Rauschen, Drift etc), Referenzstandards und Messvorgang. Bei den Geräteparametern geht es darum entweder Messunsicherheiten aus Herstellerspezifikationen abzuleiten oder Messvorschriften zu definieren, die es erlauben entsprechende Beiträge selber zu bestimmen. Die Referenzstandards sind oft der dominante Beitrag zur Messunsicherheit. Ihre Charakterisierung beruht entweder auf geometrischen oder elektrischen Messungen. Zur Kategorie Messvorgang gehören Effekte, die spezifisch für den jeweiligen Kalibrier- und Messvorgang sind, z.B. Kabel- und Verbindereffekte. Mit der Quantifizierung der Einflussgrößen allein ist es jedoch noch nicht getan. Diese müssen in einem Messmodell untereinander in Beziehung gesetzt werden. Als Basis dienen die bereits erwähnten Modelle, die den verschiedenen Fehlerkorrekturalgorithmen zugrunde liegen. Damit lassen sich die Referenzstandards als Einflussgrößen erfassen. Zusätzlich müssen jetzt aber auch noch die restlichen Einflussgrößen erfasst werden. Grundsätzlich führt dies zu komplizierten Gleichungssystemen. Diese lassen sich dann nur mittels Näherungen oder mittels numerischer Methoden lösen. Eine der grossen Herausforderungen dieses Projekt liegt deshalb in der Modellierung und deren Implementierung in die Software. Dabei sollen in einem ersten Schritt die gängigen Fehlerkorrekturverfahren berücksichtigt werden. Wünschenswert ist jedoch eine Schnittstelle, die es erlaubt Erweiterungen und neue Verfahren in einer standardisierten Art und Weise zu implementieren. Für die lineare Fortpflanzung der Messunsicherheit durch das Messmodell hindurch wird auf eine Technik zurückgegriffen, die unter der Bezeichnung *GUM Tree* [8] von Blair Hall vom

Neuseeländischen Staatslabor IRL/MSL entwickelt wurde. Diese Technik beruht auf der automatischen Differentiation zur Bestimmung von Sensitivitätskoeffizienten und auf einer objektorientierten Implementierung. Dabei wird eine unsicherheitsbehaftete Grösse als abstrakter Datentyp definiert und die Rechenoperationen für diesen Datentyp neu definiert (Operator Overloading). Damit lässt sich die lineare Fortpflanzung der Messunsicherheit unabhängig von der Komplexität des Messmodells sehr elegant und automatisch im Hintergrund ausführen. Erwägt wird auch eine Implementierung der Monte Carlo-Methode gemäss [9], dies allerdings vor allem zu Validierungszwecken.

Die Benutzeroberfläche soll auf flexible Art und Weise unterschiedliche Messszenarien unterstützen. Dazu sollen Gerätesteuerung, grafische Darstellung, Datenexport und eine projektorientierte Ablage dem Benutzer einen gewissen Komfort bieten. Primäres Ziel bei dieser Entwicklung ist jedoch nicht die Benutzerfreundlichkeit sondern Flexibilität, Modularität und Transparenz. Angestrebt wird ein metrologisches Expertentool, das für Messungen, bei denen höchste Genauigkeit gefordert ist, eingesetzt werden kann.

Für METAS spielt diese Software auch eine wichtige Rolle bei der Frequenzerweiterung des Dienstleistungsangebots bis 67 GHz, welche durch ein weiteres Projekt [10] begleitet wird, in dem Verbindereffekte, die bei hohen Frequenzen zunehmend eine Rolle spielen, charakterisiert werden. Dank *VNA Tools II* wird es möglich sein diese Resultate effizient in die metrologische Praxis umzusetzen.

Nach Vollendung der Basisentwicklung von *VNA Tools II* (ca. Anfang 2010) ist geplant die Software gratis zur Verfügung zu stellen. Für den Unterhalt und für die Implementierung erweiterter Funktionalität ist eine Entwicklergruppe auf Staatslaborstufe vorgesehen.

## Literaturhinweise

- [1] BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP and OIML, *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*, International Organisation for Standardization (ISO), 1995.
- [2] EA Guidelines on the Evaluation of Vector Network Analysers (VNA), EA-10/12, 2000
- [3] BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP and OIML, *Supplement 2 to the "Guide to the expression of uncertainty in measurement" – Models with any numbers of output quantities*, in Vorbereitung
- [4] DIN 1319-4, *Grundlagen der Messtechnik, Teil 4: Auswertung von Messungen, Messunsicherheit* 1999
- [5] N.M. Ridler and M.J. Salter, *An approach to the treatment of uncertainty in complex S-parameter measurements*, metrologia 39, p295-302, 2002

- [6] R. Willink and B.D. Hall, *A classical method for uncertainty analysis with multidimensional data*, metrologia 39, p361-369, 2002
- [7] Informationen zu *VNA Tools* unter <http://www.metas.ch/HF>
- [8] weitere Informationen unter <http://mst.irl.cri.nz/>
- [9] BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP and OIML, *Supplement 1 to the "Guide to the expression of uncertainty in measurement" - Propagation of distributions using a Monte Carlo method*, JCGM 101, 2008
- [10] F&E Projekt *Como70*, Connector Modelling up to 70 GHz,  
[http://www.ifh.ee.ethz.ch/~hoffmanj/project\\_hp/](http://www.ifh.ee.ethz.ch/~hoffmanj/project_hp/)