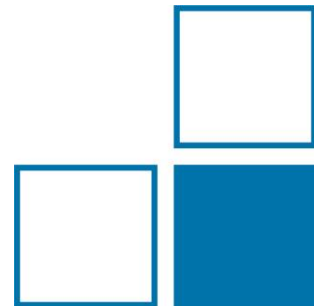


Frequenzumsetzende Messungen

Dion Timmermann (QTZ, zuvor 2.24)



- Grundlagen zur Messung der Streuparameter von frequenzumsetzenden Prüflingen
- Without Thru Kalibrierung
- Systemfehlerkorrektur und Unsicherheiten bei Messungen von frequenzumsetzenden Prüflingen

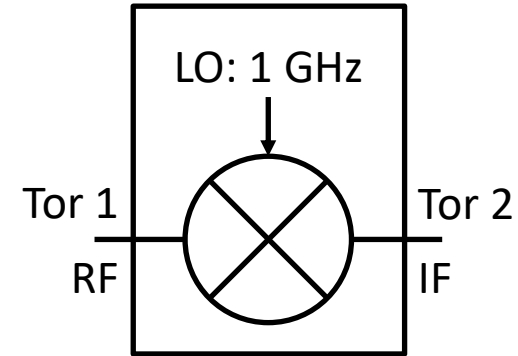
Beispiel hier: Mischer als 2-Tor

Nachteil

- Einfluss des LO vermutlich relevant

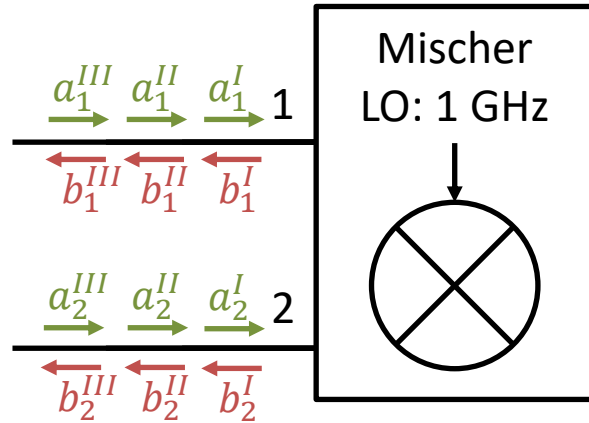
Vorteile

- Einfacheres Beispiel
- Auf mehrere Tore übertragbar

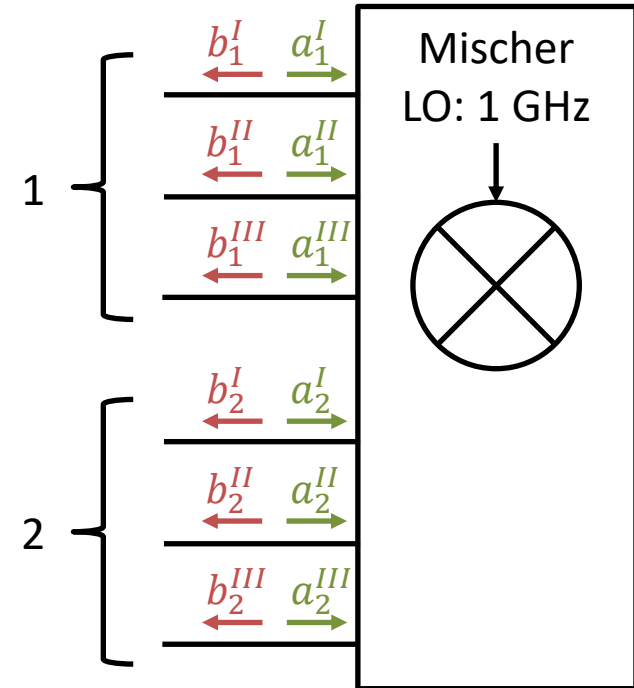


Physische und logische Tore

Physisches n-Tor
mit m Frequenzen



Logisches m·n-Tor



Mischprodukte bei:

$$f' = p \cdot f_{LO} \pm q \cdot f$$

Definition der Frequenzumsetzungen

Gewünscht: Messung über Frequenzbereich

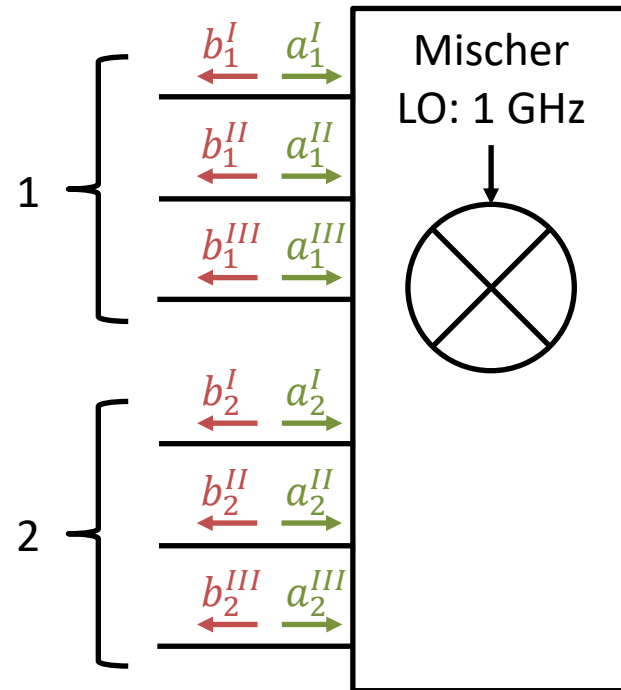
$$f_b = (300 \text{ MHz}, 500 \text{ MHz})$$

Frequenzumsetzung als Funktion

$$f_C(f_b) = \frac{n}{d} f_b + o, \quad \text{with } n, d \in \mathbb{Z}, o \in \mathbb{R}$$

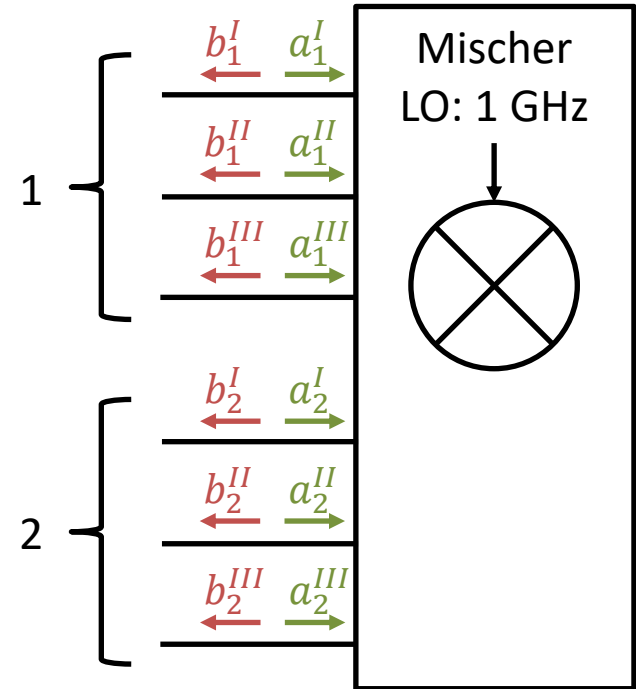
Tore im Beispiel

Port	Physical Port	Frequency Conversion	Port Frequency
1	1	$1 \cdot f$	300 MHz ... 500 MHz
2	1	$1 \cdot f + 1 \text{ GHz}$	1300 MHz ... 500 MHz
3	1	$-1 \cdot f + 1 \text{ GHz}$	700 MHz ... 500 MHz
4	2	$1 \cdot f$	300 MHz ... 500 MHz
5	2	$1 \cdot f + 1 \text{ GHz}$	1300 MHz ... 500 MHz
6	2	$-1 \cdot f + 1 \text{ GHz}$	700 MHz ... 500 MHz



Gesucht: Frequenzumsetzende Streuparameter

$$\text{z.B.: } S_{2,1}^{II,I} = \frac{b_2^{II}}{a_1^I} \quad \left| \quad \text{alle anderen a-Wellen gleich 0} \right.$$



Reflexion an VNA Toren

Prinzipskizze
eines VNA Tors

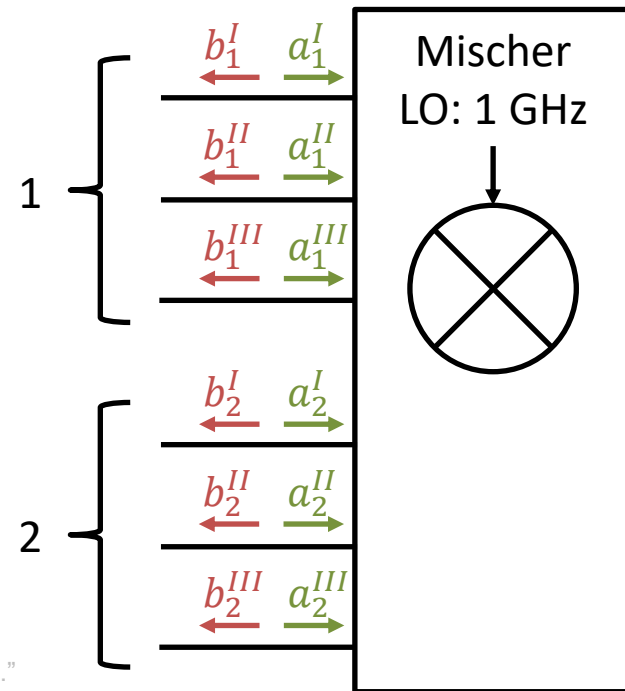
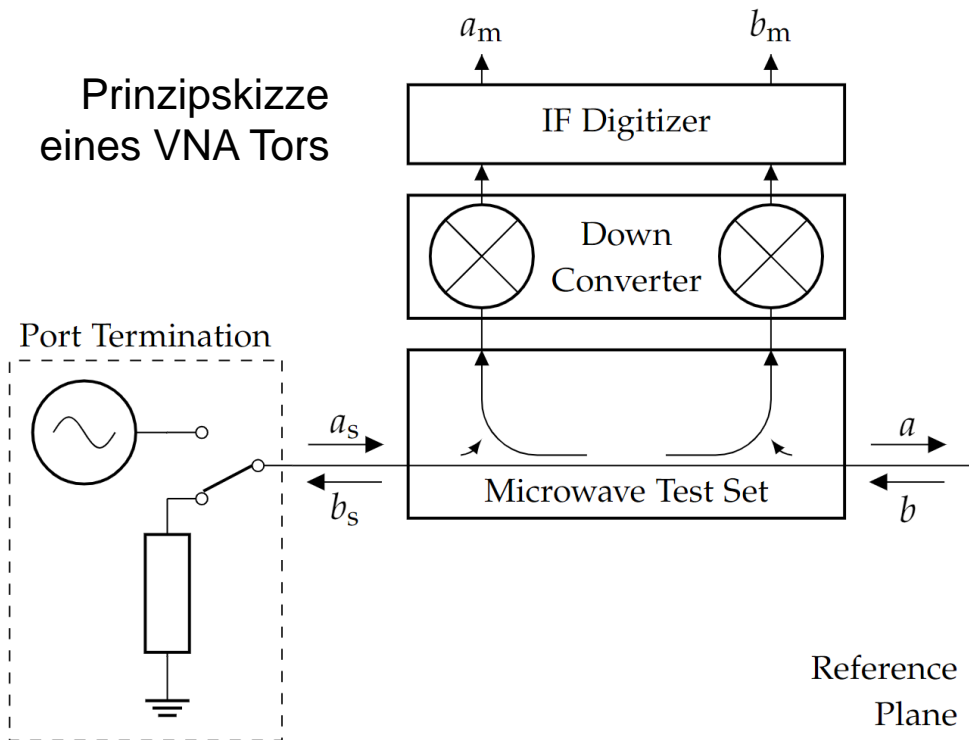


Abbildung abgeleitet von Abb. 8.1. in Ferrero, A (2013). "Two-port network analyzer calibration."
In: Modern RF and Microwave Measurement Techniques. Ed. by A Ferrero, V Teppati, and M
Sayed. Cambridge University Press.

Gesucht: Frequenzumsetzende Streuparameter

z.B.: $S_{2,1}^{II,I} = \frac{b_2^{II}}{a_1^I} \Big| \text{alle anderen a-Wellen gleich 0}$

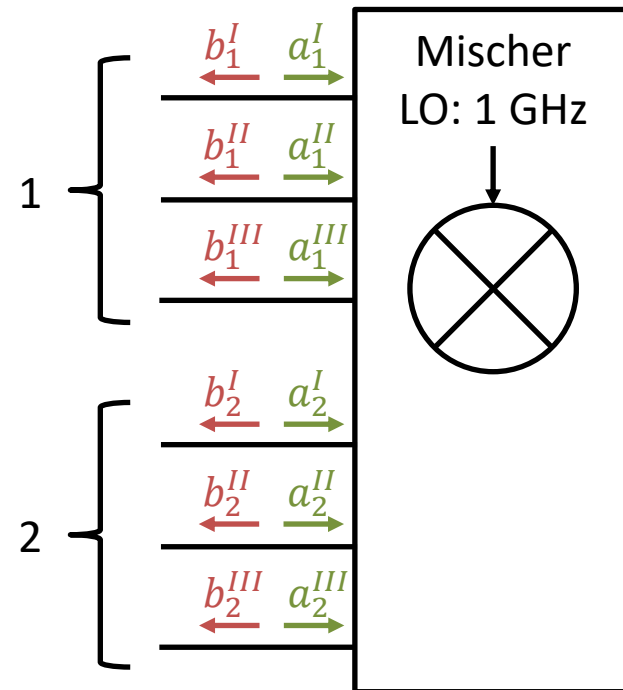
↑
Bei Messung
nicht möglich!

Nötiges Vorgehen

- Bestimmung aller Tore mit relevanter Signalstärke
 - Anregung eines logischen Ports.
 - Messung der a- und b-Wellen an allen logischen Ports.
- Für jeden logischen Port

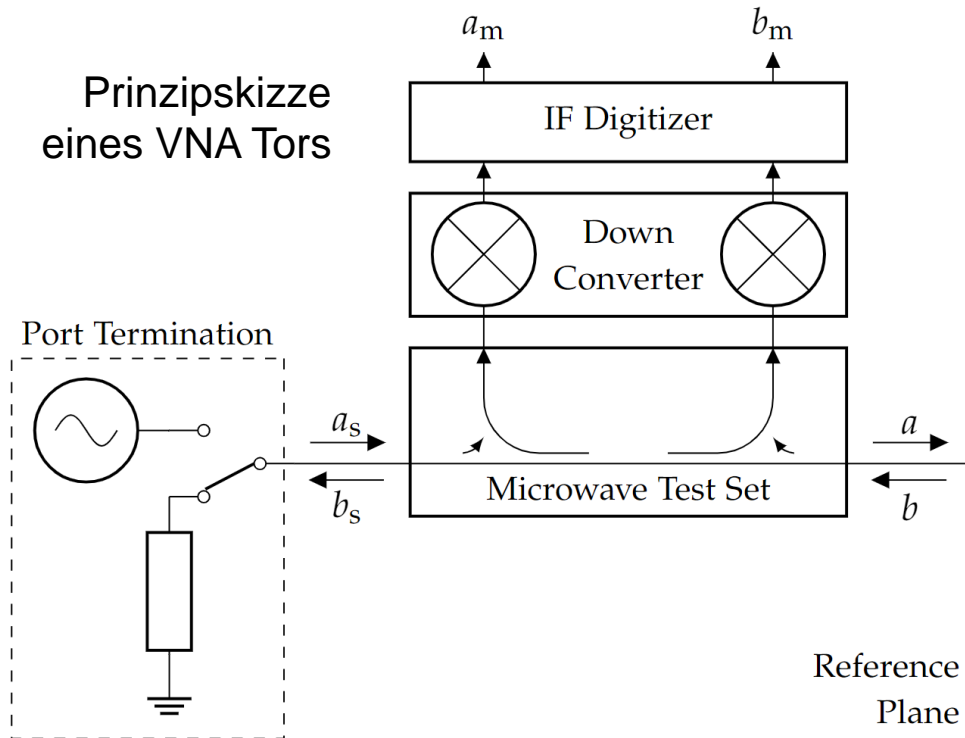
$$\begin{bmatrix} S_{1,1} & \dots & S_{1,N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{N,1} & \dots & S_{N,N} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{1,1} & \dots & b_{1,N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{N,1} & \dots & b_{N,N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{1,1} & \dots & a_{1,N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{N,1} & \dots & a_{N,N} \end{bmatrix}^{-1}$$

Mess-Tor Angeregtes Tor



Switch Term Korrektur nicht (leicht) möglich

Prinzipskizze
eines VNA Tors



Switch Term

Bei ausgeschalteter Quelle und $b > 0$:

$$w = a_m / b_m$$

Idee von Switch Terms

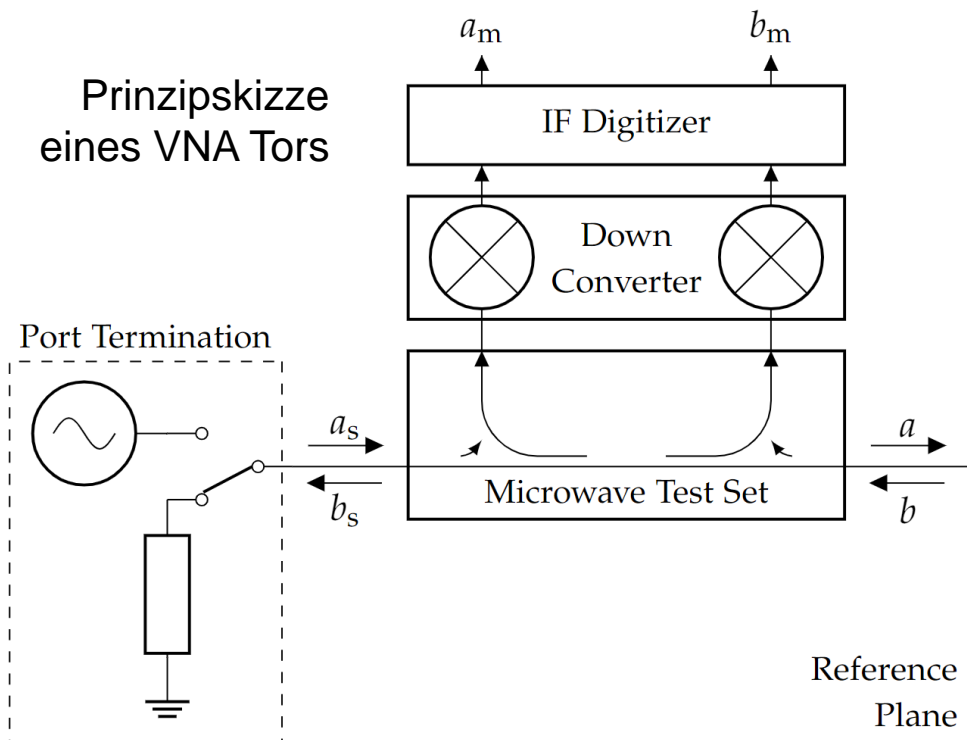
- Direkte Messung der S-Parameter
- Korrektur der a-Wellen der nicht aktiven Tore durch Switch Terms.

Problem bei Mixed Frequency

Abschluss (Schalterposition) eines als Last genutzten logischen Tores hängt davon ab, welches logische Tor als Quelle fungiert.

Abbildung abgeleitet von Abb. 8.1. in Ferrero, A (2013). "Two-port network analyzer calibration."
In: Modern RF and Microwave Measurement Techniques. Ed. by A Ferrero, V Teppati, and M
Sayed. Cambridge University Press.

Prinzipskizze eines VNA Tors



Zusammenhang zwischen a , b , a_m und b_m darstellbar als 2-Tor Netzwerk.

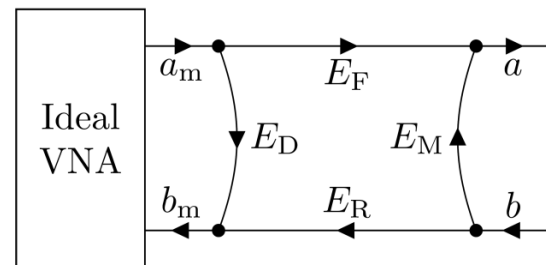
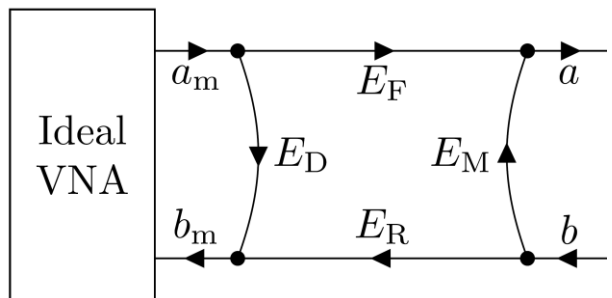


Abbildung abgeleitet von Abb. 8.1. in Ferrero, A (2013). "Two-port network analyzer calibration." In: Modern RF and Microwave Measurement Techniques. Ed. by A Ferrero, V Teppati, and M Sayed. Cambridge University Press.

Without Thru Kalibrierung

- Jeder Port wird einzeln kalibriert
- Bestimmung aller 4 Terme



$$\begin{pmatrix} b_m \\ a \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} E_D & E_R \\ E_F & E_S \end{bmatrix} \begin{pmatrix} a_m \\ b \end{pmatrix}$$

Vorgehen

Schritt 1:

OSM Kalibrierung
 $\Rightarrow E_D, E_M, \text{ und } E_F \cdot E_R$

Schritt 2:

Leistungsmessung
 $\Rightarrow |E_R|$

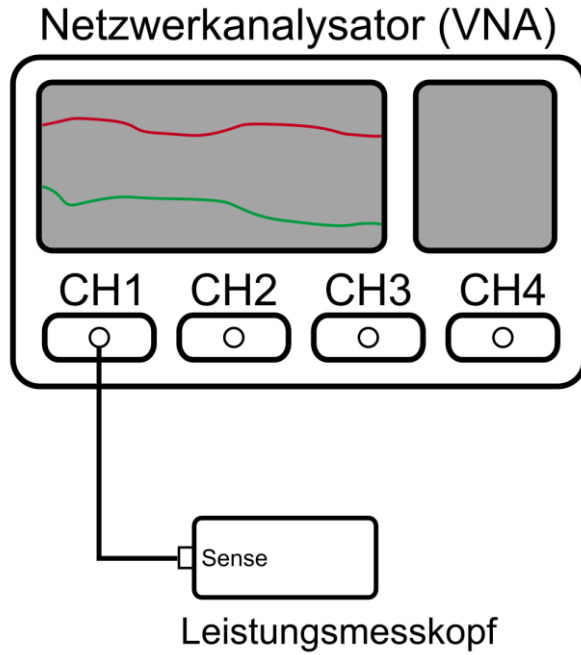
Schritt 3:

Phasenmessung
 $\Rightarrow \angle E_R$

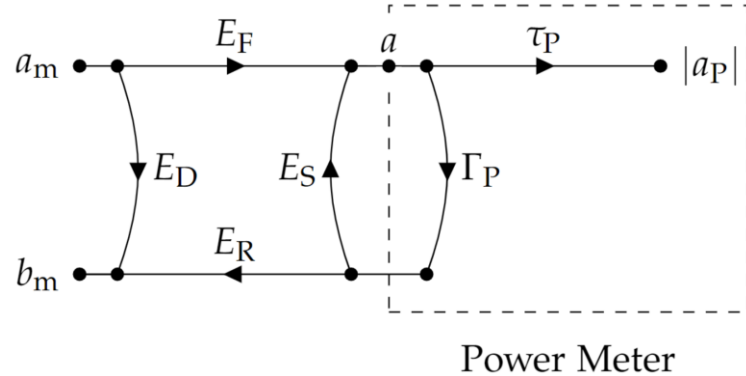
[1] Heuermann, Holger (July 2008). "Calibration of a Network Analyzer Without a Thru Connection for Non-Linear and Multi-Port Measurements." In: IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques 55.7.

Without Thru – Schritt 2: Leistungsmessung

Ziel: Bestimmung von $|E_R|$



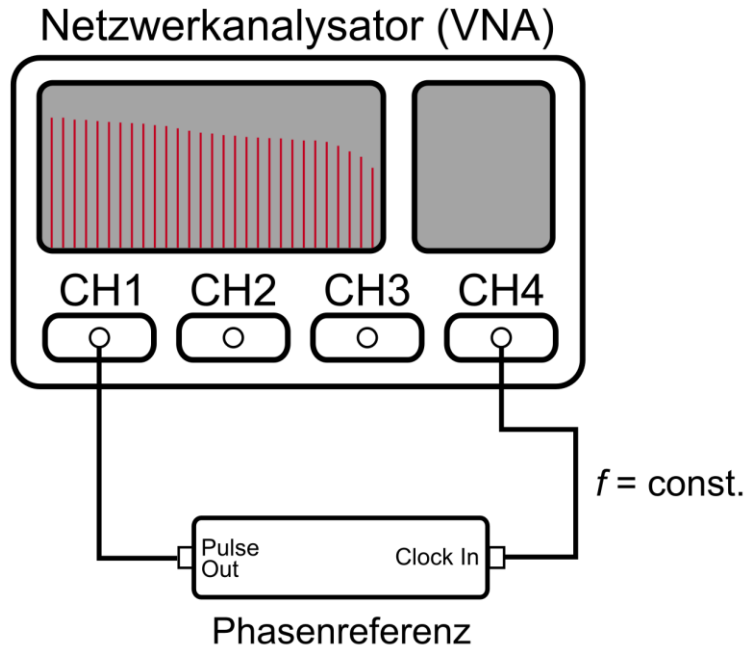
Quelle an CH1 an.



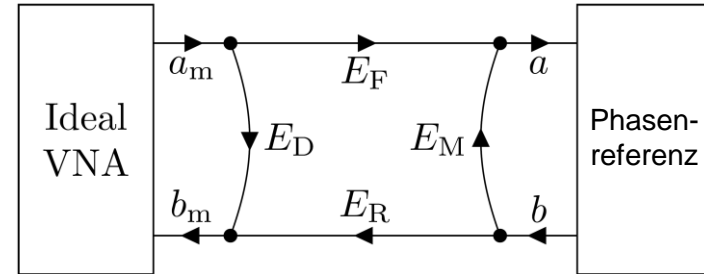
$$|E_R| = \frac{|E_S b_m - \Delta E a_m|}{|a|} \quad \text{mit } \Delta E = E_S E_D - E_F E_R$$

Without Thru – Schritt 3: Phasenmessung

Ziel: Bestimmung von $\angle E_R$



Quelle an CH1 aus.

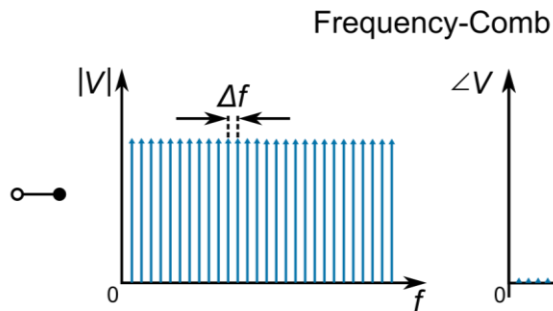
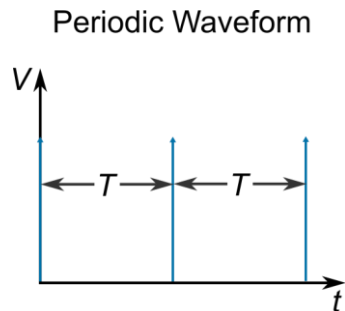


Phasenreferenz erzeugt
Signal bekannter Phase.

Signal einer Phasenreferenz (Frequenzkamm)

Ideal

- Dirac Pulse
- Quelle liegt auf Referenzebene
- Phase konstant

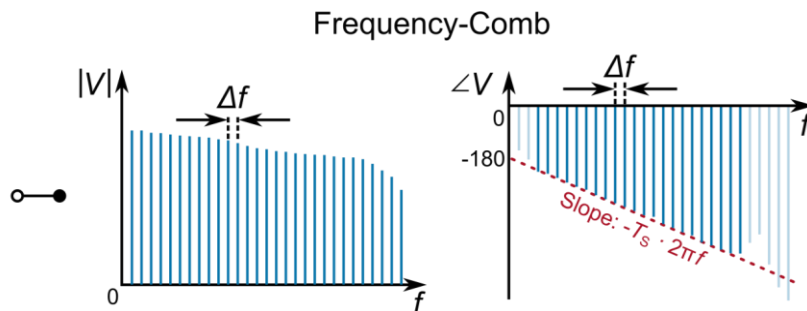
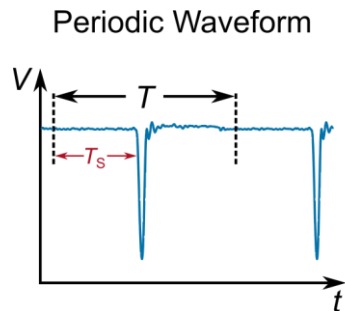


$$\Delta f = 1/T$$

„Real“

- Gauß Pulse
- Phase linear

$$f(t - T_s) \circ \bullet F(f) \cdot e^{-j2\pi f T_s}$$

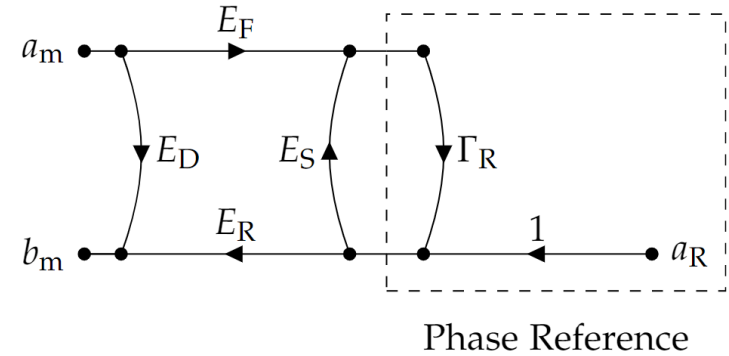


Bei Charakterisierung der Phasenreferenz wird lineare Phase entfernt (detrending).

Without Thru – Schritt 3: Phasenreferenz

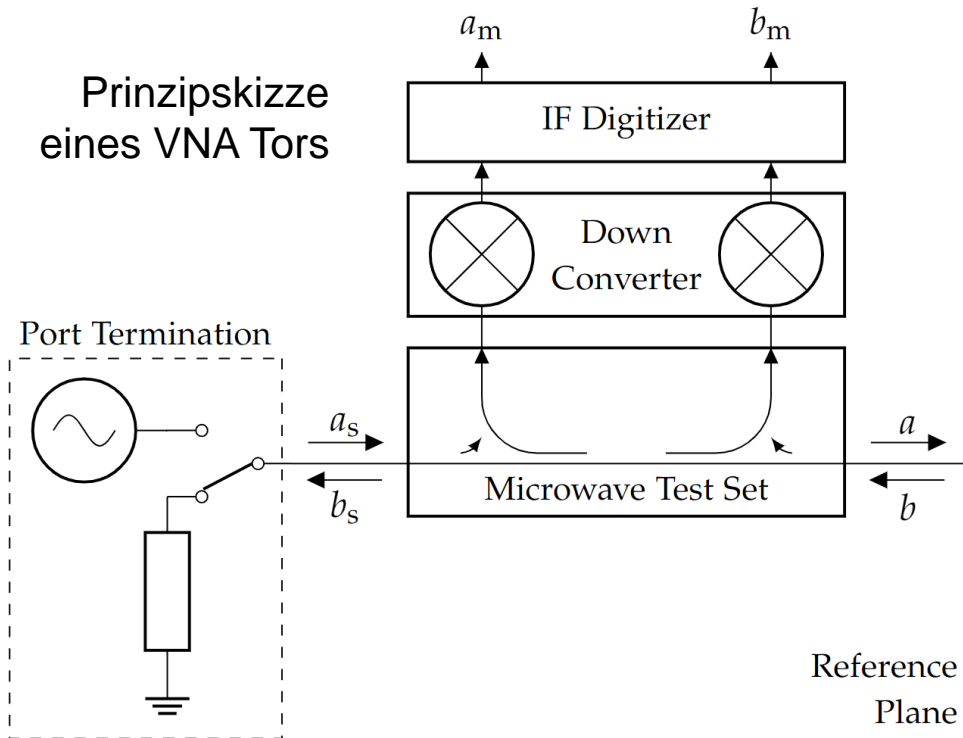
Messung der Phasenreferenz
bei ausgeschalteter VNA Quelle

$$\angle E_R = \angle \left[\frac{1}{a_R} (b_m - E_S \Gamma_R b_m - E_D a_m + \Delta E \Gamma_R a_m) \right]$$



Reflexion am VNA Tor bei ausgeschalteter Quelle

Prinzipskizze
eines VNA Tors



Trotz ausgeschalteter
Quelle gilt: $a \neq 0$

Switch Term

Bei ausgeschalteter Quelle
und $b > 0$:

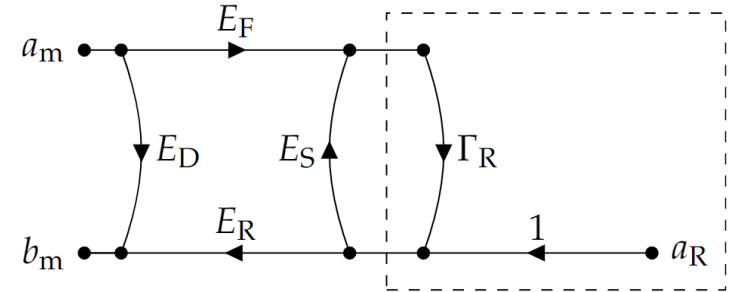
$$w = a_m / b_m$$

Abbildung abgeleitet von Abb. 8.1. in Ferrero, A (2013). "Two-port network analyzer calibration."
In: Modern RF and Microwave Measurement Techniques. Ed. by A Ferrero, V Teppati, and M
Sayed. Cambridge University Press.

Without Thru – Schritt 3: Phasenreferenz

Messung der Phasenreferenz bei ausgeschalteter VNA Quelle

$$\angle E_R = \angle \left[\frac{1}{a_R} (b_m - E_S \Gamma_R b_m - E_D a_m + \Delta E \Gamma_R a_m) \right]$$



Phase Reference

Mit Switch Term w , d.h. $a_m = w \cdot b_m$:

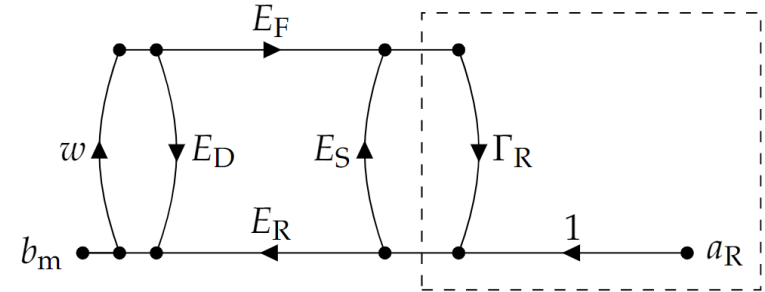
$$\angle E_R = \angle \left[\frac{1}{a_R} (b_m - E_S \Gamma_R b_m - E_D w b_m + \Delta E \Gamma_R w b_m) \right]$$

$$\angle E_R = \angle \left[\frac{b_m}{a_R} (1 - E_S \Gamma_R - E_D w + \Delta E \Gamma_R w) \right]$$

$$\angle E_R = \angle b_m - \angle a_R + \phi \text{ with}$$

$$\phi = \angle (1 - E_S \Gamma_R - E_D w + E_D E_S \Gamma_R w - E_{FR} \Gamma_R w)$$

$$\approx \Im (-E_S \Gamma_R - E_D w + E_D E_S \Gamma_R w - E_{FR} \Gamma_R w)$$

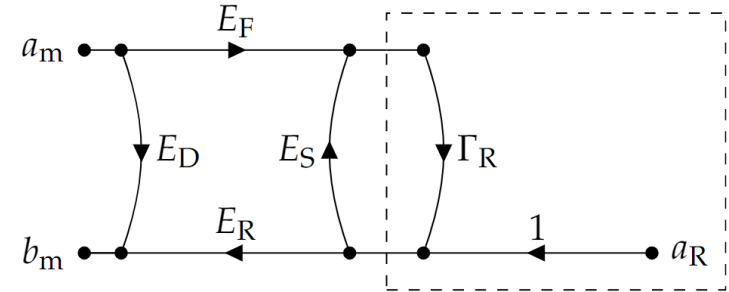


Phase Reference

Without Thru – Schritt 3: Phasenreferenz

Messung der Phasenreferenz bei ausgeschalteter VNA Quelle

$$\angle E_R = \angle \left[\frac{1}{a_R} (b_m - E_S \Gamma_R b_m - E_D a_m + \Delta E \Gamma_R a_m) \right]$$



Phase Reference

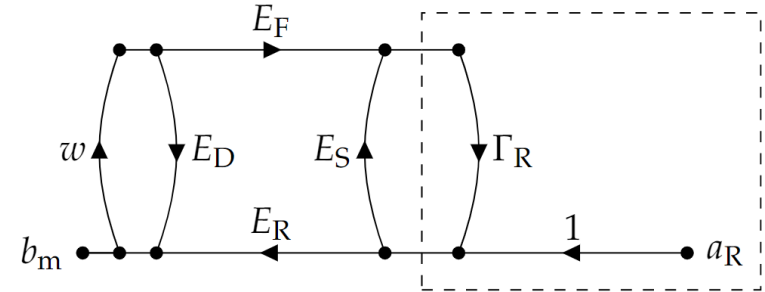
Mit Switch Term w , d.h. $a_m = w \cdot b_m$:

$$\angle E_R = \angle b_m - \angle a_R + \phi \text{ with}$$

$$\phi = \angle (1 - E_S \Gamma_R - E_D w + E_D E_S \Gamma_R w - E_{FR} \Gamma_R w)$$

$$\approx \Im (-E_S \Gamma_R - E_D w + E_D E_S \Gamma_R w - E_{FR} \Gamma_R w)$$

Größter Einfluss: Unsicherheit von a_R



Phase Reference

Messung

- Messung der Standards ohne logische Tore
- Messung der DUTs mit logischen Toren
- Protokollierung in Journal

Auswertung (prf Matlab Toolbox)

- Berechnung der Error Box ohne logische Tore
- Umrechnung der Error Box auf logische Tore
- Systemfehlerkorrektur der DUT Messungen

01_Basic_Example_N(f-m)\Journal_01.vnalog - METAS VNA Tools

File Explorer Database Measurement Journal Calibration Config Error Correction Sliding Load Verification PY Script

New Journal Open Journal Save Journal VNA Settings Cable Movement New Connection New DUT Unc Measurement

VNA Device: Open Close Logger Device: Open

Port	Cable	Connector	Cable Movement	New Connection
1		N50	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2		N50	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

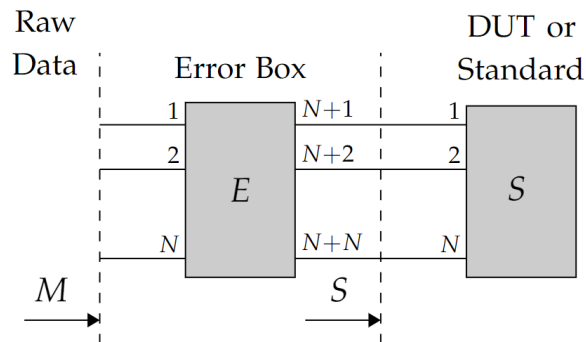
Time Stamp	Type	Info
2011.08.09 08:12:57	New Connection	Connector: N50, Port: 2, Connection: 3
2011.08.09 08:14:42	Measurement	VNA Device: HP8510C_HP8515A_#1, Measurement: 16 Measurement Path: Measurements_01\CalStandards\Short(f)_707_Short(m)_729_01.sdatb
2011.08.09 08:15:51	New Connection	Connector: N50, Port: 1, Connection: 4
2011.08.09 08:15:52	New Connection	Connector: N50, Port: 2, Connection: 4
2011.08.09 08:17:39	Measurement	VNA Device: HP8510C_HP8515A_#1, Measurement: 17 Measurement Path: Measurements_01\CalStandards\Load(f)_11200_Load(m)_245_01.sdatb
2011.08.09 08:19:05	New Connection	Connector: N50, Port: 1, Connection: 5
2011.08.09 08:19:06	New Connection	Connector: N50, Port: 2, Connection: 5
2011.08.09 08:20:48	Measurement	VNA Device: HP8510C_HP8515A_#1, Measurement: 18 Measurement Path: Measurements_01\VerStandards\Load(f)_547_Load(m)_507_01.sdatb
2011.08.09 08:22:16	Cable Movement	Cable: 85132F_3.5mm_7mm, Port: 2, Position: 1, Movement: 2
2011.08.09 08:22:17	New Connection	Connector: N50, Port: 1, Connection: 6
2011.08.09 08:22:18	New Connection	Connector: N50, Port: 2, Connection: 6
2011.08.09 08:30:29	Measurement	VNA Device: HP8510C_HP8515A_#1, Measurement: 19 Measurement Path: Measurements_01\CalStandards\Thru_01.sdatb
2011.08.09 08:32:40	Measurement	VNA Device: HP8510C_HP8515A_#1, Measurement: 20 Measurement Path: Measurements_01\CalStandards\SwitchTerms_01.vdatb
2011.08.09 08:33:23	Cable Movement	Cable: 85132F_3.5mm_7mm, Port: 2, Position: 2, Movement: 3

Ready

- VNA Messungen durchführen und protokollieren
- Datenbank mit Standards, Kabeln, Verbindern, VNAs sowie deren Unsicherheiten
- Kalibrierung und Systemfehlerkorrektur mit Unsicherheiten
- Messergebnisse mit Unsicherheiten betrachten

Die prf Matlab Toolbox ist (soweit möglich) kompatibel zu VNA Tools.

Messmodell ohne Unsicherheiten



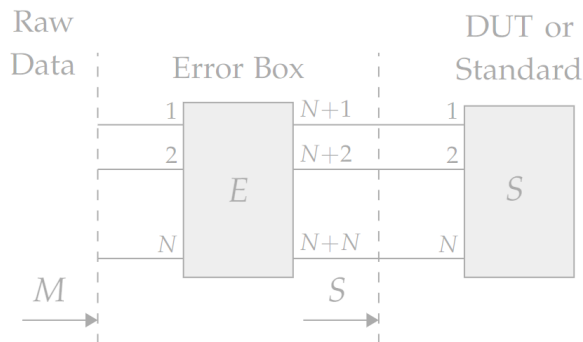
Bestimmung von E :

Vergleich von M und S für mehrere bekannte Standards.

Messung unbekannter S :

Bestimmung von S aus M und E .

Messmodell mit Unsicherheiten

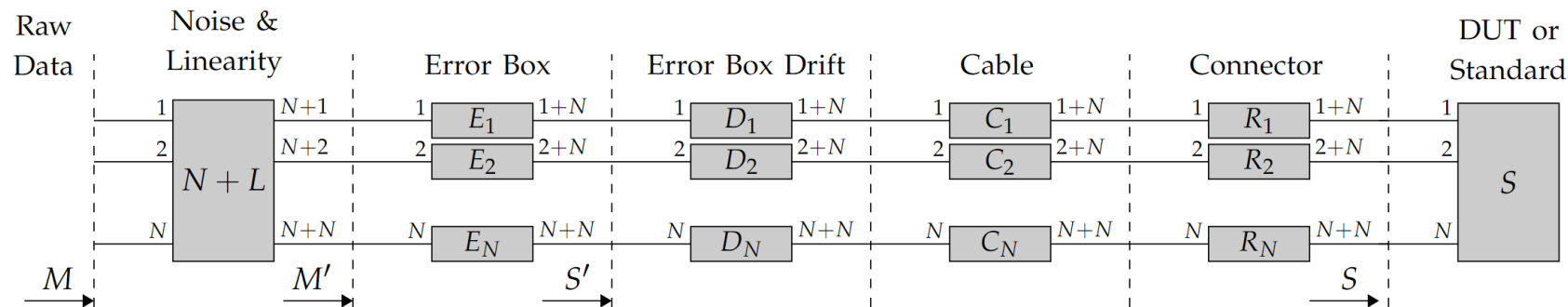


Bestimmung von E :

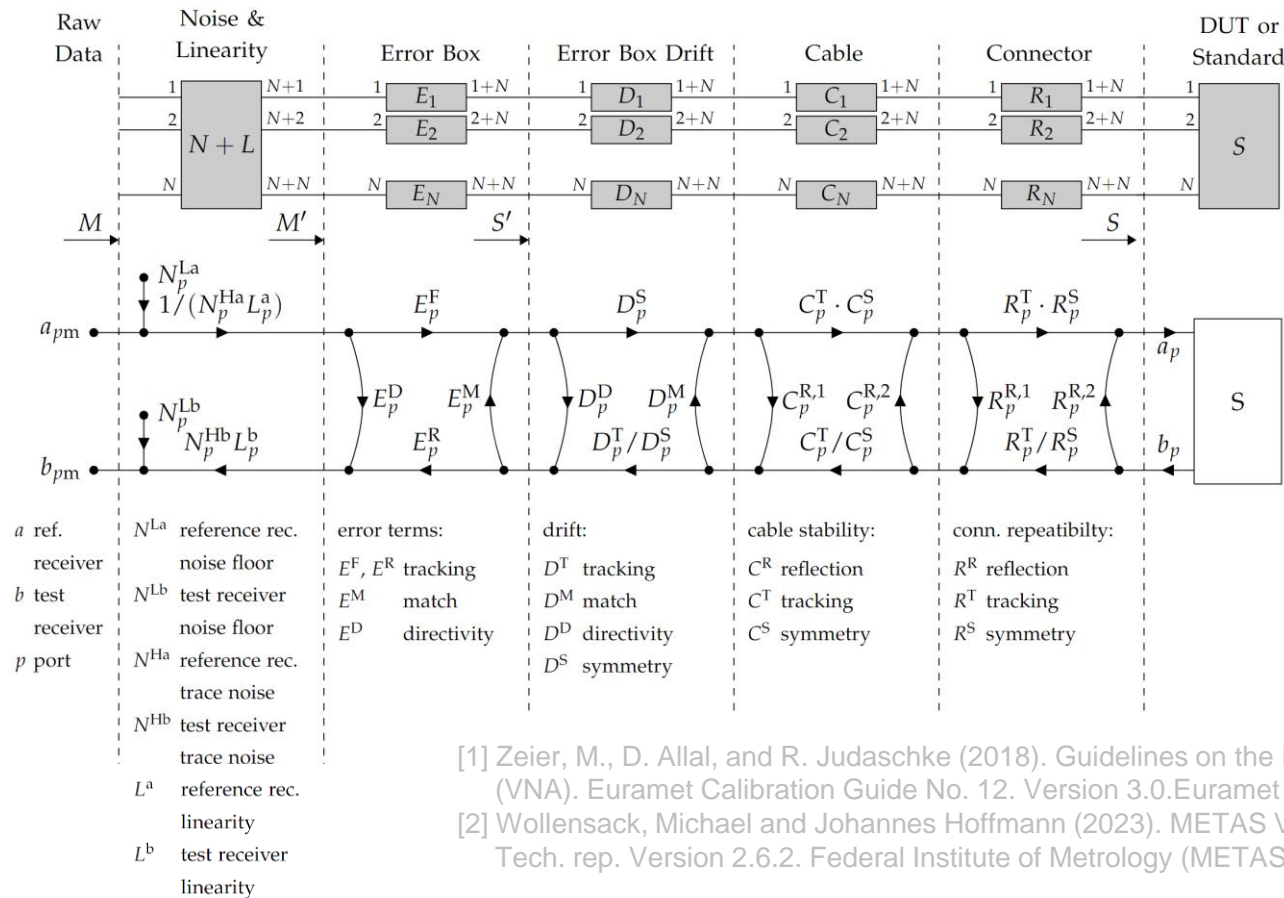
Vergleich von M' und S' für mehrere bekannte Standards.

Messung unbekannter S :

Bestimmung von S aus M unter Verwendung von E .



Messmodell mit Unsicherheiten



Basiert auf CG-12 [1]

Rauschen und Linearitätsfehler angepasst für a- und b-Wellen.

Analog zu vorgehen in VNA Tools [2].

[1] Zeier, M., D. Allal, and R. Judaschke (2018). Guidelines on the Evaluation of Vector Network Analysers (VNA). Euramet Calibration Guide No. 12. Version 3.0. Euramet e.V. cg-12.

[2] Wollensack, Michael and Johannes Hoffmann (2023). METAS VNA Tools - Math Reference V2.6.2. Tech. rep. Version 2.6.2. Federal Institute of Metrology (METAS).

uncLib: Feste IDs für Unsicherheiten

```
a = LinProp(1, 0.1, 0, [0xFF 0x23 0x41 0xd2 0x12 0x43], 'My uncertainty')
```

ID als Vektor
aus 8-Bit Zahlen

Name/Beschreibung
der Unsicherheit

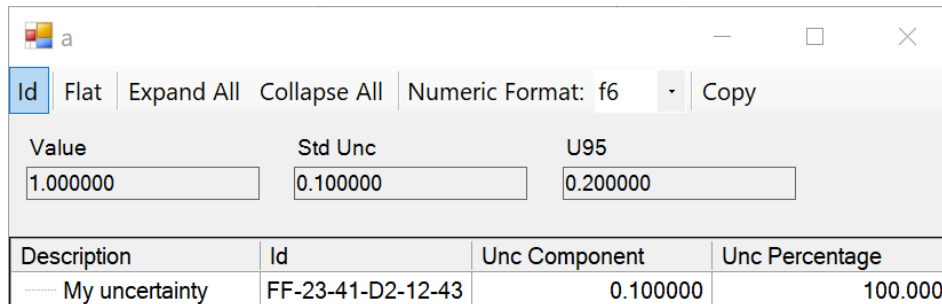
Vorteil

- Reproduzierbare Unsicherheiten

Nachteile

- Nur bei LinProp
- IDs müssen Definiert sein

unc_budget(a)



The screenshot shows a window titled 'a' with a tab labeled 'Id'. It contains input fields for Value (1.000000), Std Unc (0.100000), and U95 (0.200000). Below these is a table with the following data:

Description	Id	Unc Component	Unc Percentage
My uncertainty	FF-23-41-D2-12-43	0.100000	100.000

Unsicherheits IDs in METAS VNA Tools

Table 4: Uncertainty Input IDs									
Unc Contribution	Global ID 128 bit	Influence 16 bit	Reserve 8 bit	Version 8 bit	Counter 63–48 bit	47–40 bit	39–32 bit	31–1 bit	0 bit
Unknown	Random ID	0x0000	0x00	0x00	0x0000	0x00	0x00	0x00000000	0
CMC Entry	CMC ID	0x0001	0x00	0x00	Random ID	Rcv Port	Src Port	Freq	RI
CMC Entry	CMC ID	0x0002	0x00	0x00	Random ID	Rcv Port	Src Port	Freq	MP
VNA Exp Statistical	Journal ID	0x0008	0x00	0x00	Meas Count	Rcv Port	Src Port	Freq	RI
VNA Exp Statistical	Journal ID	0x0008	0x00	0x01, 0x02	Meas Count	Contribution		Freq	0
VNA Exp Statistical	Journal ID	0x0008	0x00	0x03	Meas Count	0x00	Ref Rcv	Freq	0
VNA Exp Systematic	Journal ID	0x0009	0x00	0x00	Exp Count	Rcv Port	Src Port	Freq	RI
VNA Exp Systematic	Journal ID	0x0009	0x00	0x01, 0x02	Contribution			Freq	0
VNA Exp Systematic	Journal ID	0x0009	0x00	0x03	Exp Count	0x00	Ref Rcv	Freq	0
VNA Noise Floor	Journal ID	0x0011	0x00	0x00	Meas Count	Rcv Port	Src Port	Freq	RI
VNA Noise Floor	Journal ID	0x0011	0x00	0x00	Meas Count	Rcv Port	Src Port	Freq	MP
VNA Noise Floor	Journal ID	0x0011	0x00	0x02	Meas Count	0	Ref Rcv	Freq	RI
VNA Noise Trace	Journal ID	0x0012	0x00	0x00	Meas Count	Rcv Port	Src Port	Freq	MP
VNA Noise Trace	Journal ID	0x0012	0x00	0x01	Meas Count	0	Ref Rcv	Freq	MP
VNA Noise Trace	Journal ID	0x0012	0x00	0x02	Meas Count	0	Ref Rcv	Freq	MP
VNA Linearity	VNA ID	0x0020	0x00	0x00	$100(p + 320)$	Rcv Port	0x00	0x00000000	MP
VNA Linearity	VNA ID	0x0020	0x00	0x01, 0x02	0x0000	Rcv Port	0x00	$10^6(p + 1000)$	MP
VNA Linearity	VNA ID	0x0020	0x00	0x03	0x0000	Swf Port	0x00	$10^6(p + 1000)$	MP
VNA Linearity	VNA ID	0x0020	0x00	0x04	0x0000	Ref Rcv	0x00	$10^6(p + 1000)$	MP
VNA Drift Switch Term	Journal ID	0x0031	0x00	0x00, 0x01, 0x02, 0x03	Meas Count	Port	0x00	Freq	RI
VNA Drift Directivity	Journal ID	0x0032	0x00	0x00, 0x01, 0x02, 0x03	Meas Count	Port	0x00	Freq	RI
VNA Drift Tracking	Journal ID	0x0033	0x00	0x00, 0x01, 0x02, 0x03	Meas Count	Port	0x00	Freq	MP
VNA Drift Match	Journal ID	0x0034	0x00	0x00, 0x01, 0x02, 0x03	Meas Count	Port	0x00	Freq	RI
VNA Drift Isolation	Journal ID	0x0035	0x00	0x00, 0x01, 0x02, 0x03	Meas Count	Rcv Port	Src Port	Freq	RI
VNA Drift Symmetry	Journal ID	0x0036	0x00	0x02, 0x03	Meas Count	Port	0x00	Freq	MP

Unc Contribution	Global ID 128 bit	Influence 16 bit	Reserve 8 bit	Version 8 bit	Counter 63–48 bit	47–40 bit	39–32 bit	31–1 bit	0 bit
VNA Noise Floor	Journal ID	0x0011	0x00	0x00	Meas Count	Rcv Port	Src Port	Freq	RI

PRF Toolbox in der MATLAB GUI



MATLAB R2021a

HOME PLOTS APPS EDITOR PUBLISH VIEW

File Navigation: New, Open, Save, Find Files, Compare, Print

Navigation: Go To, Find

Edit: Insert, Comment, Indent

Breakpoints: Breakpoints

Run: Run, Run and Advance, Run Section, Advance, Run and Time

Search Documentation

Current Folder: N:\Abt_2\2\2-2\2-24_\Dion\Laborbuch\2022-06-28 Testmessung Mixer\demo

Editor - N:\Abt_2\2\2-2\2-24_\Dion\Laborbuch\2022-06-28 Testmessung Mixer\demo

```
1 %% Example for High-Level usage of the PRF Toolbox
2 %%
3 % Loading the Journal
4 journal = prf.Journal('Journal.vnalog');
5
6 % Creating a Calibration object
7 cal = prf.calibration.WithoutThru(journal, ...
8     'CalConfig', 'Calibration.calcfg');
9
10 % Requesting a calibrated measurement
11 mixer = cal.measurements('DUTs'*full*-r01.sdatb');
12 mixer = mixer{1}
13
14 % Plotting and saving the result
15 prf.show(mixer);
16 mixer.save('mixer-calibrated.sdatb');
17
```

Command Window

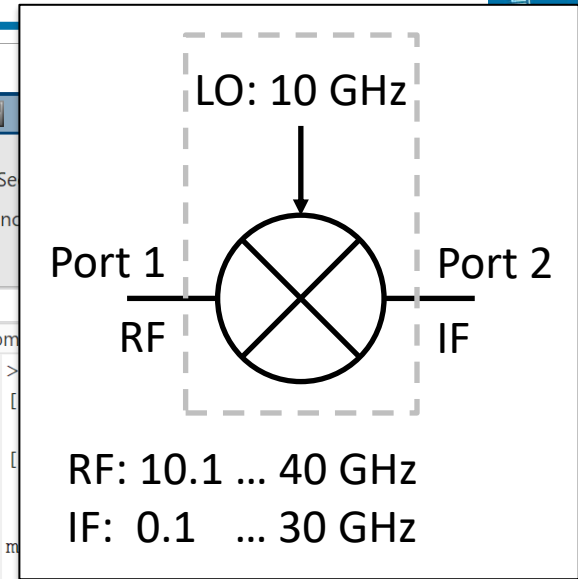
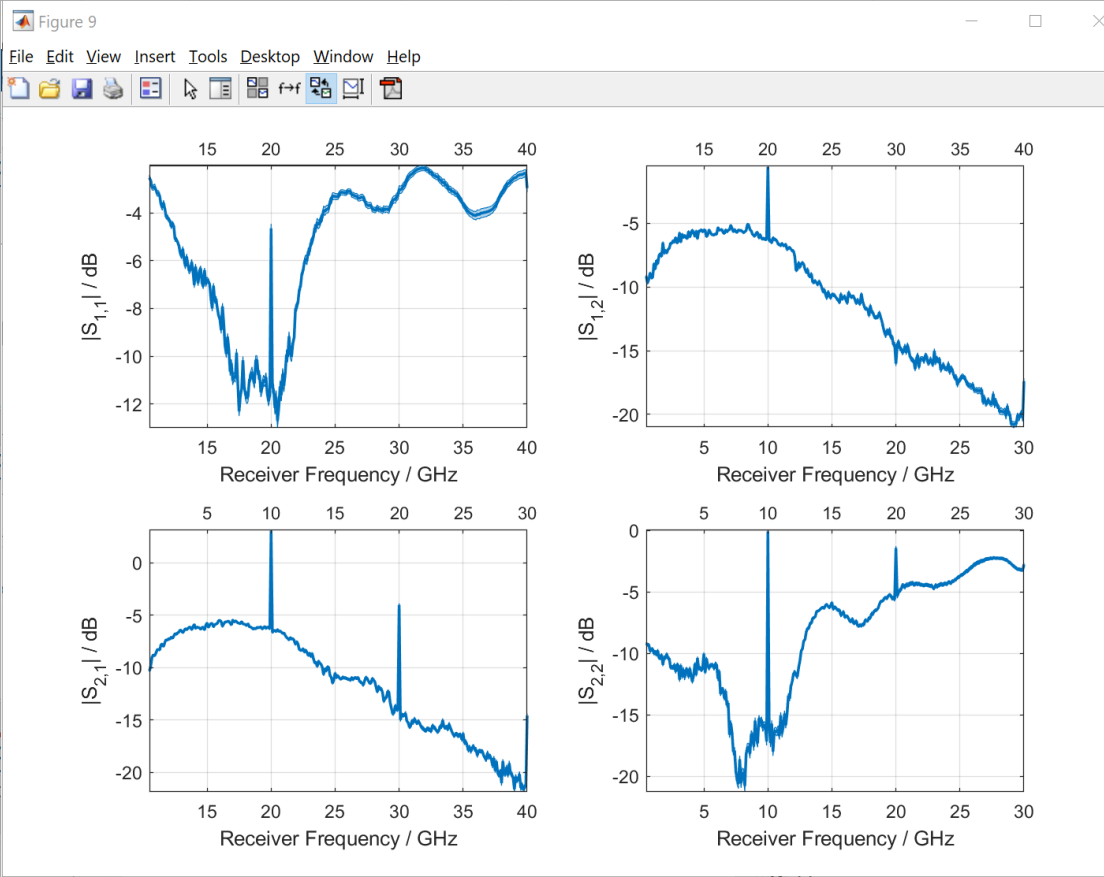
```
>> prf_cal_demo
[2023-02-09 09:19:30] Loading journal 'Journal'
[.....] done
[2023-02-09 09:20:39] Without thru calibration
[.....] done

mixer =

2x2x300 SParameter object with properties:

    Data: [2x2x300 LinProp] [show]
    Ports: [2, 1(1f+10GHz)]
    nPorts: 2
    Frequencies: 100 MHz ... 30 GHz [300 points] [show]
    nFrequencies: 300
    DataType: 'LinProp'
    Label: 'mixer-full-band-direct-r01'
```

S-Parameter eines Mischers



2×2×300 [SParameter](#) object with properties:

```
Data: [2×2×300 LinProp] [show]
Ports: [2, 1(1f+10GHz)]
nPorts: 2
Frequencies: 100 MHz ... 30 GHz [300 points] [show]
nFrequencies: 300
DataType: 'LinProp'
Label: 'mixer-full-band-direct-r01'
```



**Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Braunschweig und Berlin**

Bundesallee 100

38116 Braunschweig

Dion Timmermann

Telefon: 0531 592-2244

E-Mail: dion.timmermann@ptb.de

www.ptb.de

