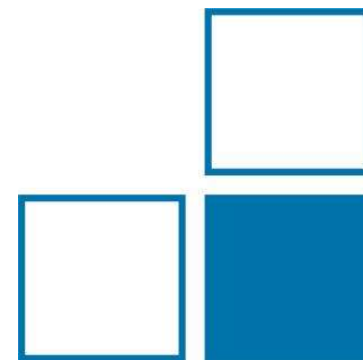


# Messunsicherheiten bei frequenzumsetzenden Messungen

Vektorielle Kalibrierung von Mischern

Frauke Gellersen, 2.24



- Motivation und Konzept vektorielle Mischermessungen
- Fehlerterme für Frequenzumsetztende Messungen
- Without-Thru Kalibrierung
- Simulation und Fehlerterme mit Messunsicherheiten
- Vorgehen bei der Kalibrierung von nicht linearen Bauteilen
- Simulation einer Mischer Kalibrierung mit Messunsicherheiten
- Zusammenfassung und Ausblick

## Abgeleitete HF-Größen

- Streuparameter
- Kal. von Leistungssensoren
- Antennengewinn
- Feldstärke
- Leistungsdichte
- Spezifische Absorptionsrate
- Kanalcharakterisierung bis in den THz-Bereich
- Planare Messungen
- Diel. Materialeigenschaften

## HF-Grundgrößen

- HF-Leistung
- HF-Impedanz
- HF-Dämpfung
- HF-Spannung

## SI-Rückführung

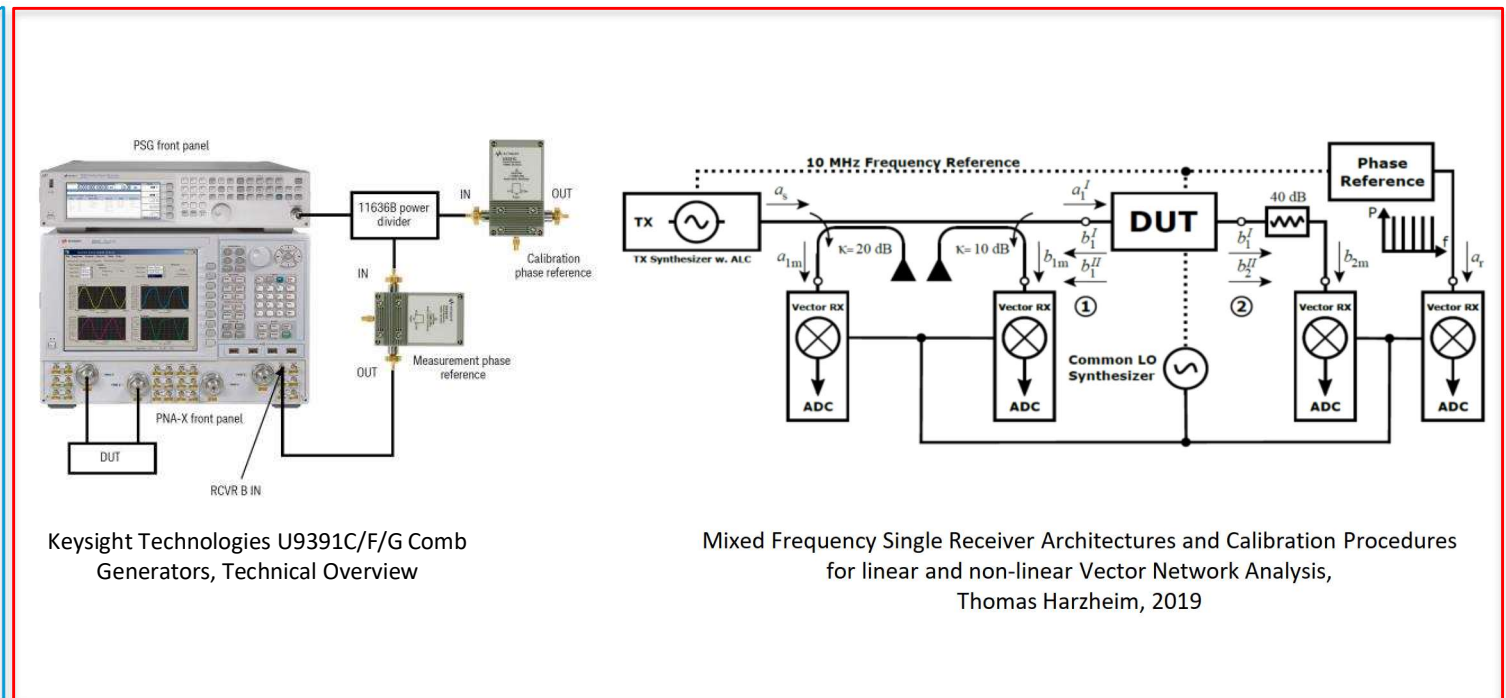
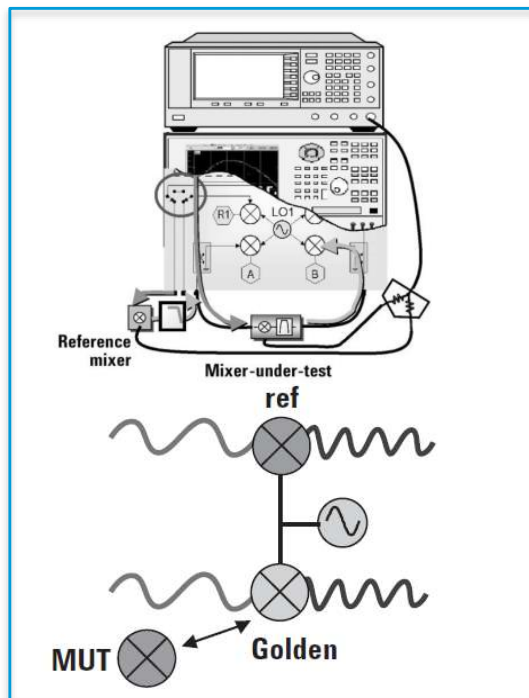
- DC-Größen
- Länge
- Frequenz

- Frequenzumsetzende Messungen
- Nicht lineare Bauteile wie Mischer
- Passive Intermodulation in Mobilfunk
- Bis jetzt keine Rückführbarkeit der Messungen
- Messunsicherheiten sollen bestimmt werden

# Vektorielle Mischermessung

## Mit kalibrierter Phasenreferenz

➤ mit „goldenem Mischer“ oder Frequenzkamm als Phasenreferenz



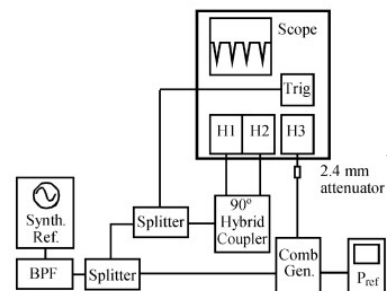
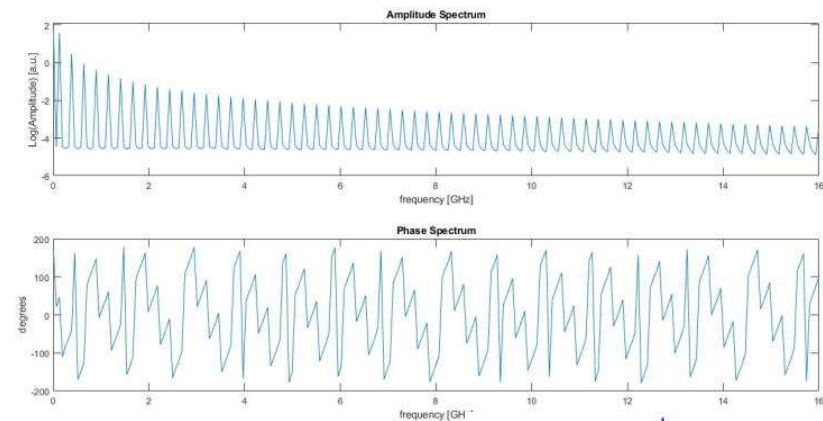
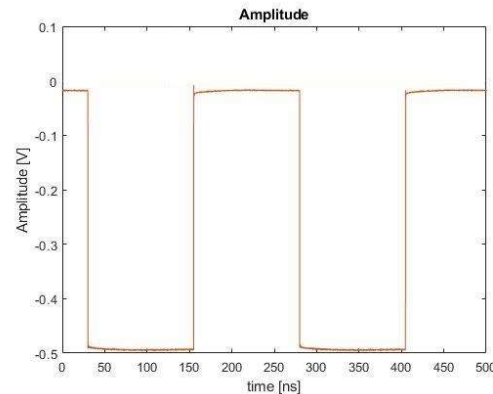
Mixed Frequency Single Receiver Architectures and Calibration Procedures for linear and non-linear Vector Network Analysis, Thomas Harzheim, 2019

Charakterisierung des Mixers mit Phasenreferenz und nicht linearer VNA Kalibrierung

# Vektorielle Mischermessung

Durch nicht lineare VNA Messung  
Frequenzkamm als Phasenreferenz

*Keysight Comb  
Generator N-2806*

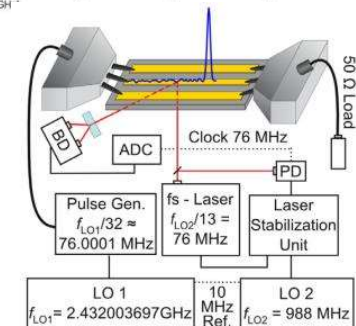


Comb-Generator Characterization  
Howard Charles Reader, Dylan F. Williams, 2008

*Sampling  
Oscilloscope*

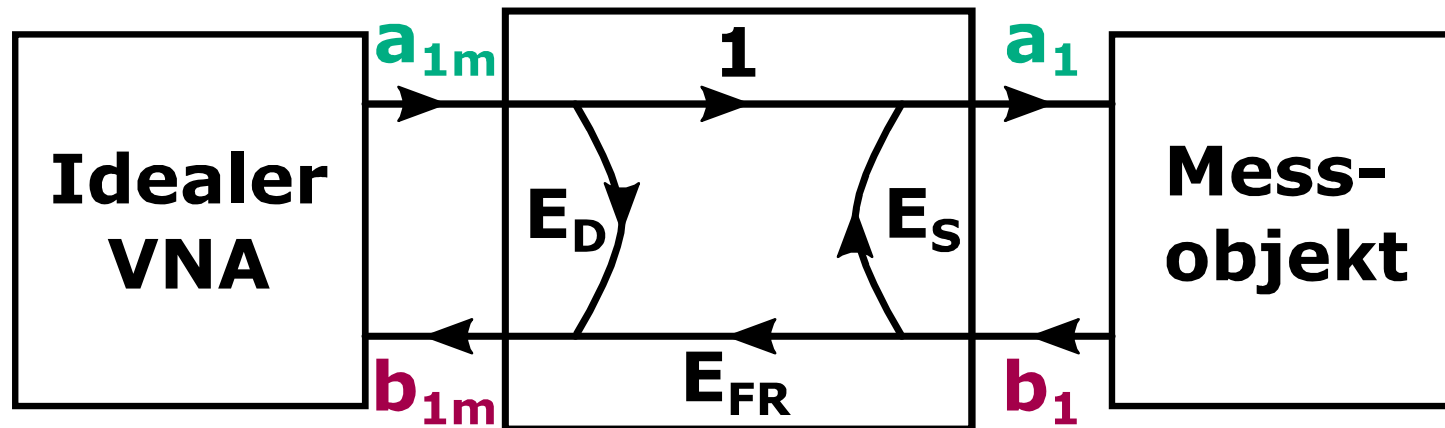
Charakterisierung  
durch

*Electro-Optic sampling  
of ultrashort voltage  
pulses*



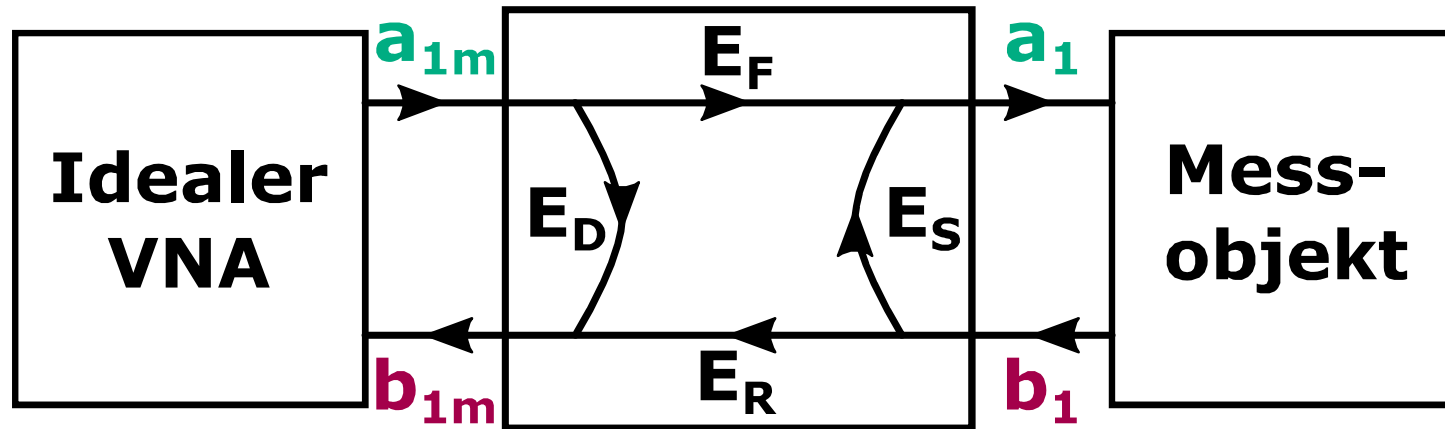
Asynchronous electro-optic sampling of all-electronically generated ultrashort voltage pulses, Heiko Fuser, Mark Bieler, Sajjad Ahmed, Frans Verbeyst, 2014

# Fehlerterm Modell



- 1-Tor Kalibrierung mit drei Fehlertermen
- Nur effektiver Reflexionsgleichlauf bekannt
- Absolute Werte für Betrag und Phase von  $a_{1m}$  und  $b_{1m}$  nicht bekannt

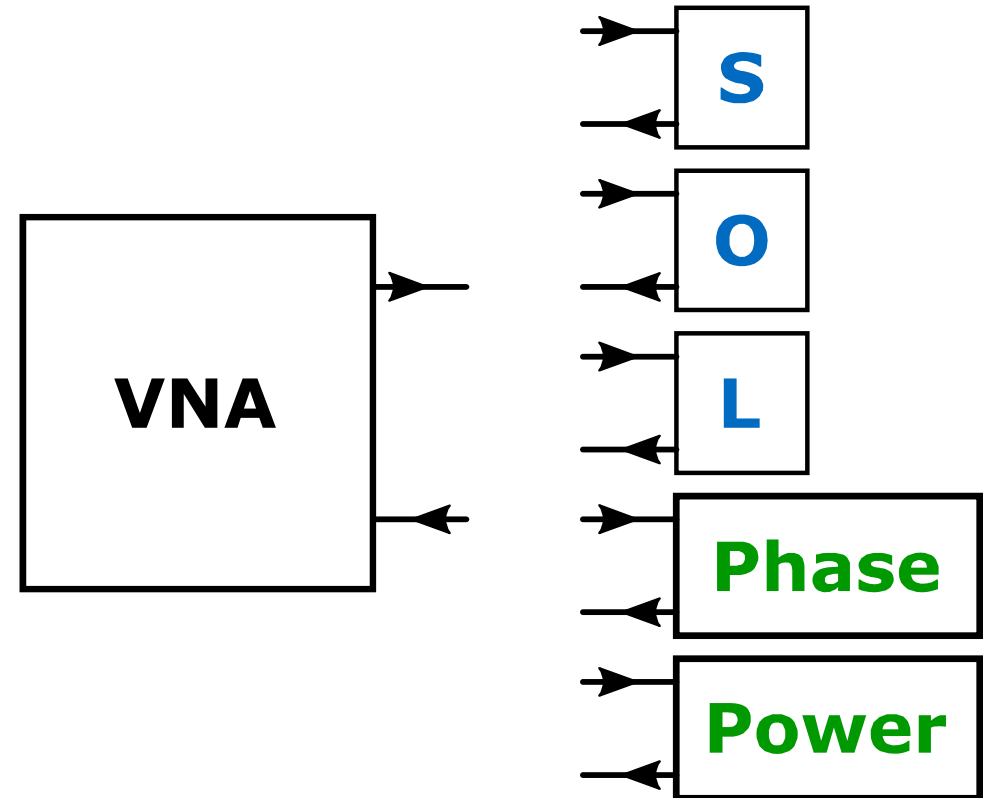
# Fehlerterm Modell



- Vier Fehlerterme statt drei
- Kalibrierte Amplitude und Phase
- Messung von nicht linearen Objekten
- Without-Thru Kalibrierung

# Without-Thru Kalibrierung

- Fünf 1-Tor Normale
- Geeignet für Messungen an nicht linearen Objekten
- Geeignet für N-Tor Messungen
- Fünf Messungen je Tor nötig für die Kalibrierung
- Möglichkeit der Automatisierung





# Without-Thru Kalibrierung

## Normale

- *Short*
- *Open*
- *Load*

 $\Gamma_O, \Gamma_S, \Gamma_L$ 

SOL Kalibrierung:  $E_S, E_D, E_{FR} = E_F \cdot E_R$

- Frequenzkamm

 $a_r, \Gamma_r$ 

$$\angle E_R = \angle \left[ \frac{1}{a_r} (b_{1m} - b_{1m} E_S \Gamma_r - E_D a_{1m} + \Delta E a_{1m} \Gamma_r) \right]$$

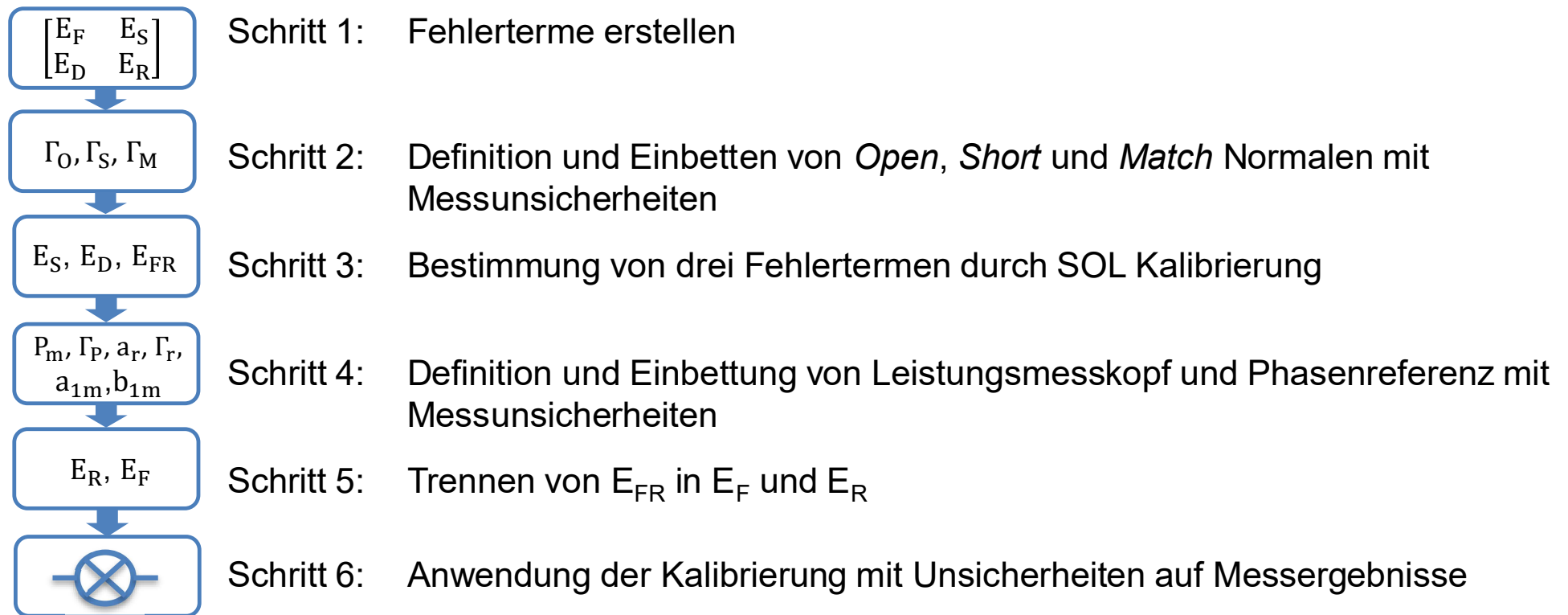
- Leistungssensor

 $P_m, \Gamma_P$ 

$$|E_R|^2 = |E_S b_{1m} - \Delta E \cdot a_{1m}|^2 \cdot \frac{1 - |\Gamma_P|^2}{P_m}, \quad \Delta E = E_S \cdot E_D - E_{FR}$$

# Vektorielle 1-Tor Kalibrierung

## Simulation einer 1-Tor Kalibrierung mit Matlab und METAS UncLib



# Fehlerterme nach Without-Thru Kalibrierung

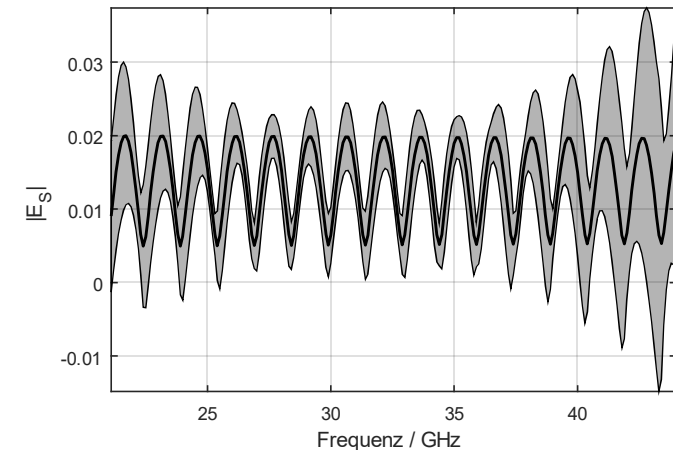
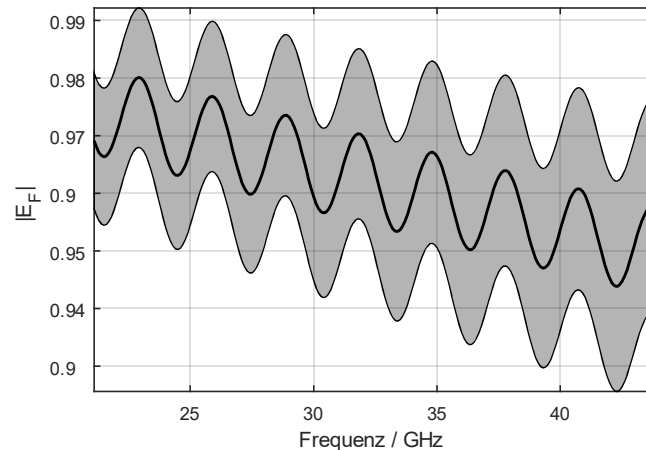
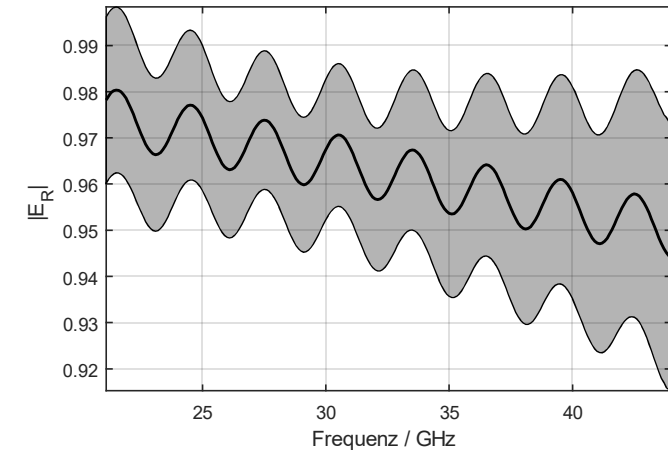
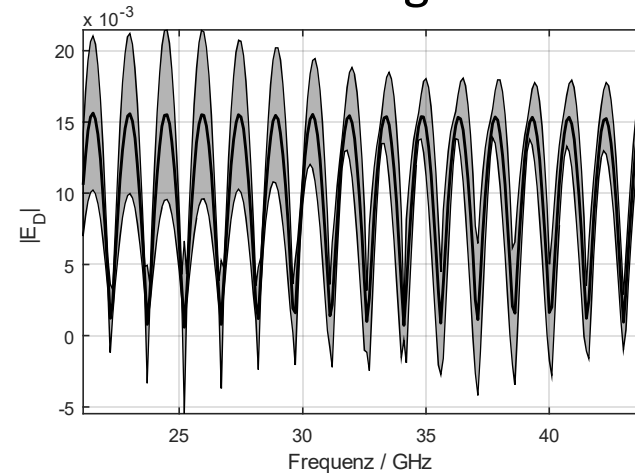
Simulationsergebnis einer 1-Tor Kalibrierung mit MatLab und Metas UncLib

Eingabeparameter:  
 $\Gamma_O$ ,  $\Gamma_S$  und  $\Gamma_L$   
aus 1,85mm Kal. Kit

$\text{unc } P_m = 0,006 - 0,018$   
 $\Gamma_P$  from NRP Z55,

$\text{unc } \angle a_r = 0,1^\circ$ ,  
 $\Gamma_r = 0.5 \text{ unc } 0,01$ ,

Ohne Unsicherheiten bei  
den angenommen  
Messdaten

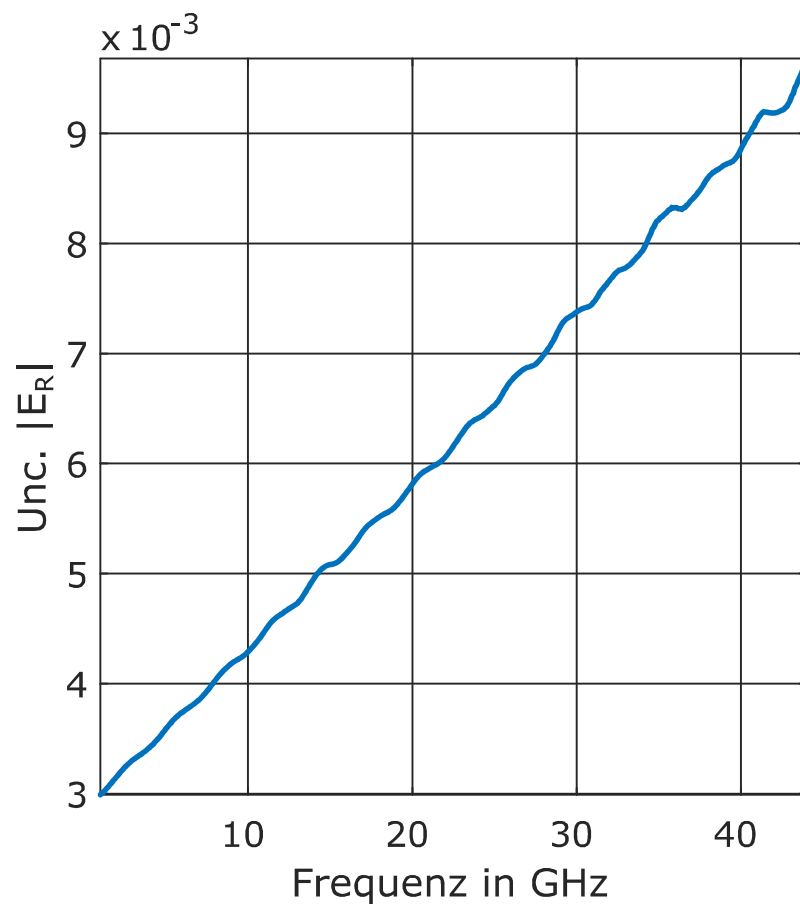


# Messunsicherheiten der Fehlerterme

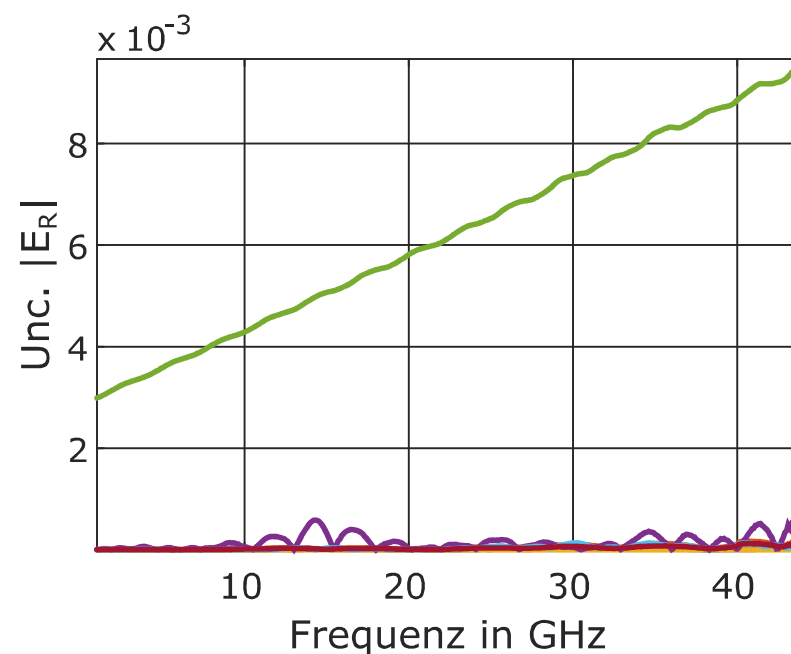
Simulationsergebnis einer 1-Tor Kalibrierung mit MatLab und Metas UncLib bei 10 GHz

Value	Std Unc	U95	$ E_F $	Value	Std Unc	U95	$\angle E_F$
0.982051810	0.004334307	0.008668614		1213.173683635	2.396408885	4.792817771	
Description	Unc Component	Unc Percentage		Description	Unc Component	Unc Percentage	
<input type="checkbox"/> Without-Thru	0.004334307	100.000		<input type="checkbox"/> Without-Thru	2.396408885	100.000	
<input type="checkbox"/> Match reflection coeff	0.000002474	0.000		<input type="checkbox"/> Match reflection coeff	0.003205331	0.000	
<input type="checkbox"/> Open reflection coeff	0.000026271	0.004		<input type="checkbox"/> Open reflection coeff	0.058529022	0.060	
<input type="checkbox"/> Phase of phase reference signal	0.000000000	0.000		<input type="checkbox"/> Phase of phase reference signal	2.393653682	99.770	
<input type="checkbox"/> Phase reference reflection coeff port 1	0.000028715	0.004		<input type="checkbox"/> Phase reference reflection coeff port 1	0.091125454	0.145	
<input type="checkbox"/> Power meter reading port 1	0.004334084	99.990		<input type="checkbox"/> Power meter reading port 1	0.000000000	0.000	
<input type="checkbox"/> Power meter reflection coeff	0.000011625	0.001		<input type="checkbox"/> Power meter reflection coeff	0.004124404	0.000	
<input type="checkbox"/> Raw data load	0.000000000	0.000		<input type="checkbox"/> Raw data load	0.000000000	0.000	
<input type="checkbox"/> Raw data open	0.000000000	0.000		<input type="checkbox"/> Raw data open	0.000000000	0.000	
<input type="checkbox"/> Raw data phase reference signal port 1	0.000000000	0.000		<input type="checkbox"/> Raw data phase reference signal port 1	0.000000000	0.000	
<input type="checkbox"/> Raw data reflection phase reference	0.000000000	0.000		<input type="checkbox"/> Raw data reflection phase reference	0.000000000	0.000	
<input type="checkbox"/> Raw data reflection Power meter	0.000000000	0.000		<input type="checkbox"/> Raw data reflection Power meter	0.000000000	0.000	
<input type="checkbox"/> Raw data short	0.000000000	0.000		<input type="checkbox"/> Raw data short	0.000000000	0.000	
<input type="checkbox"/> Short reflection coeff	0.000016623	0.001		<input type="checkbox"/> Short reflection coeff	0.037958062	0.025	

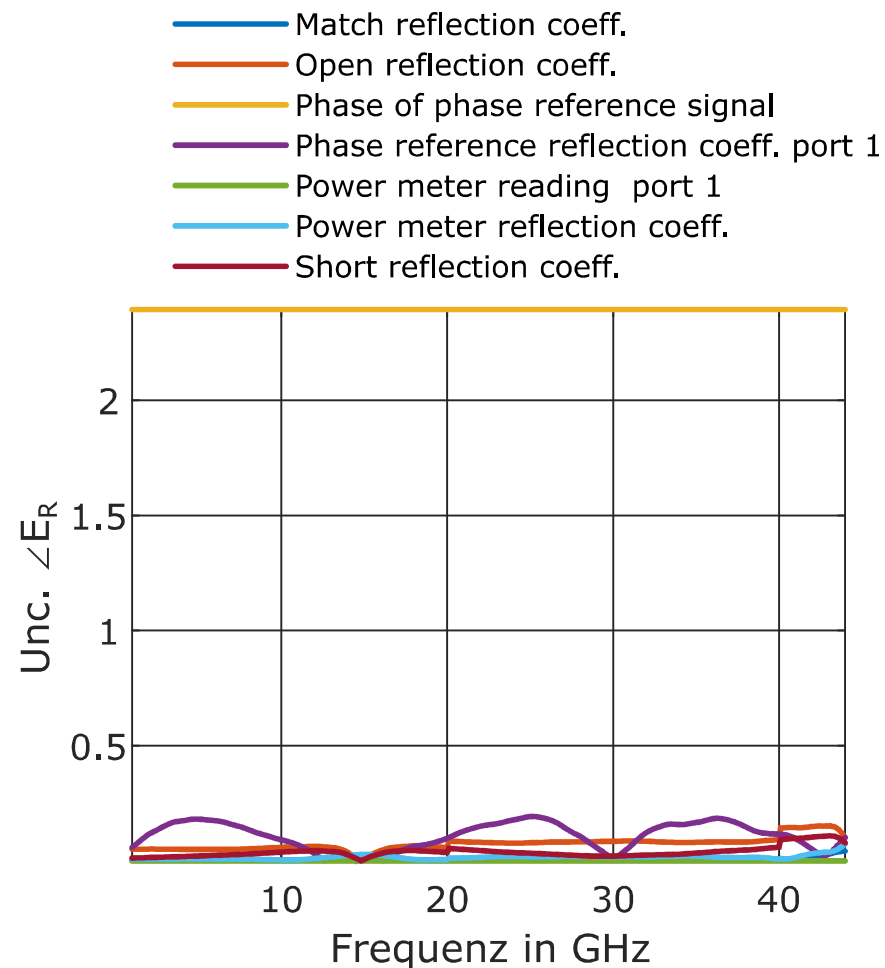
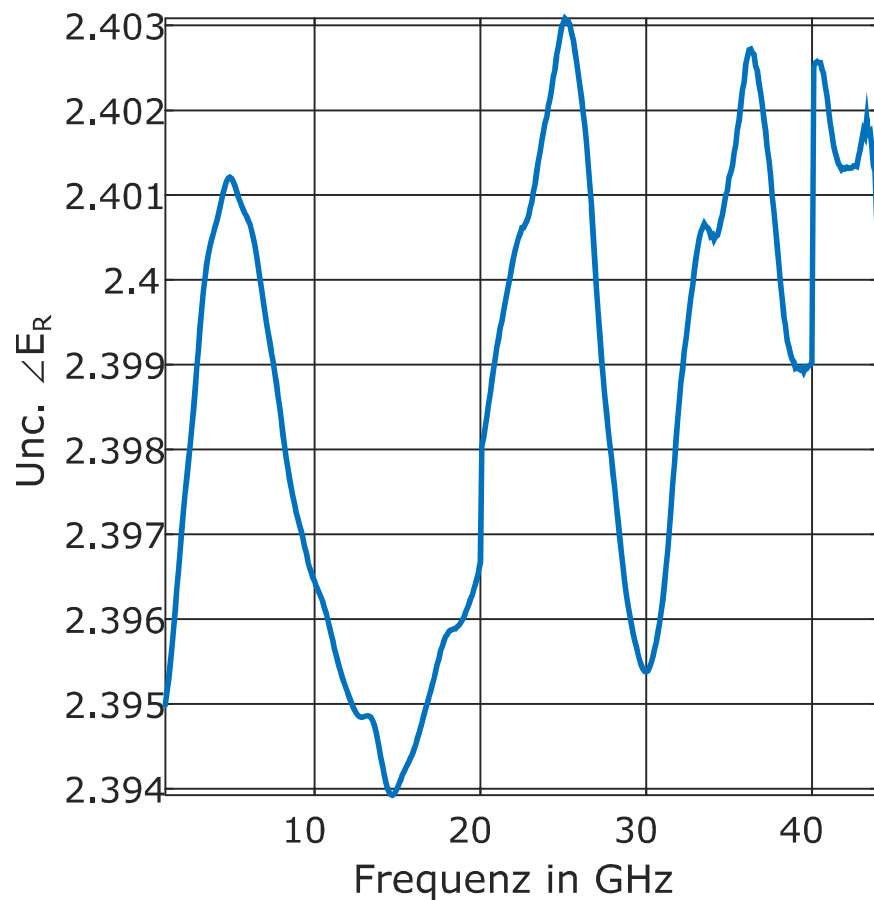
# Messunsicherheiten der Fehlerterme



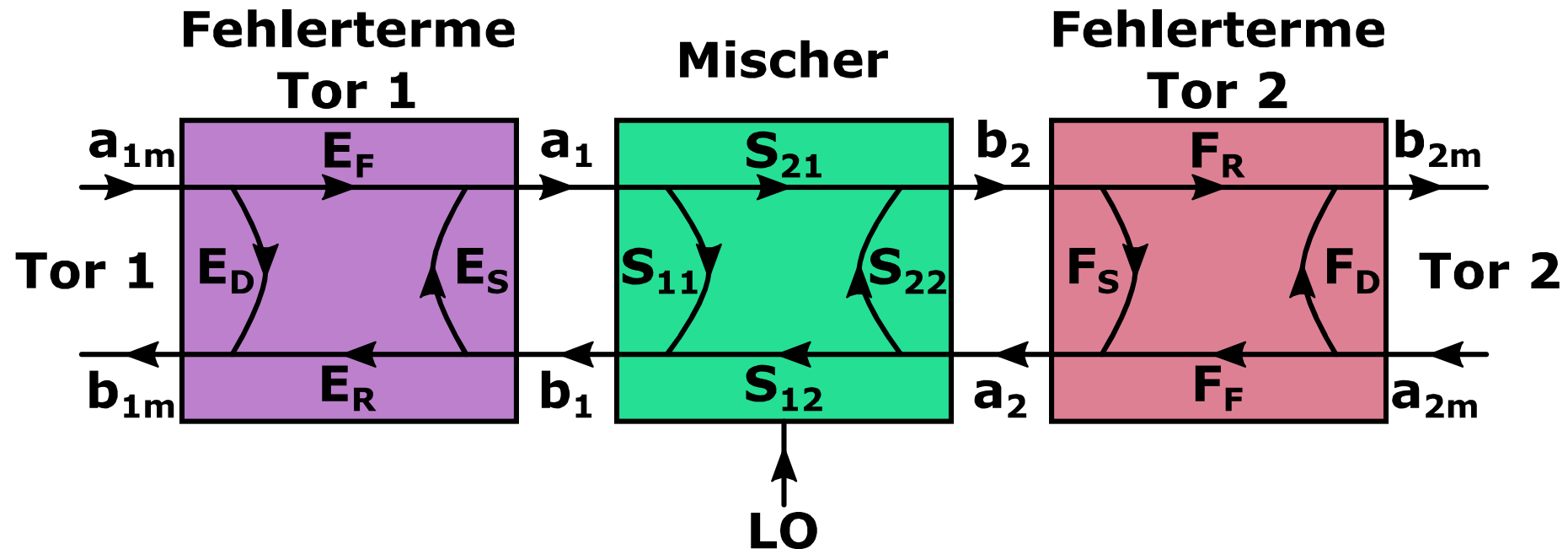
- Match reflection coeff.
- Open reflection coeff.
- Phase of phase reference signal
- Phase reference reflection coeff. port 1
- Power meter reading port 1
- Power meter reflection coeff.
- Short reflection coeff.



# Messunsicherheiten der Fehlerterme

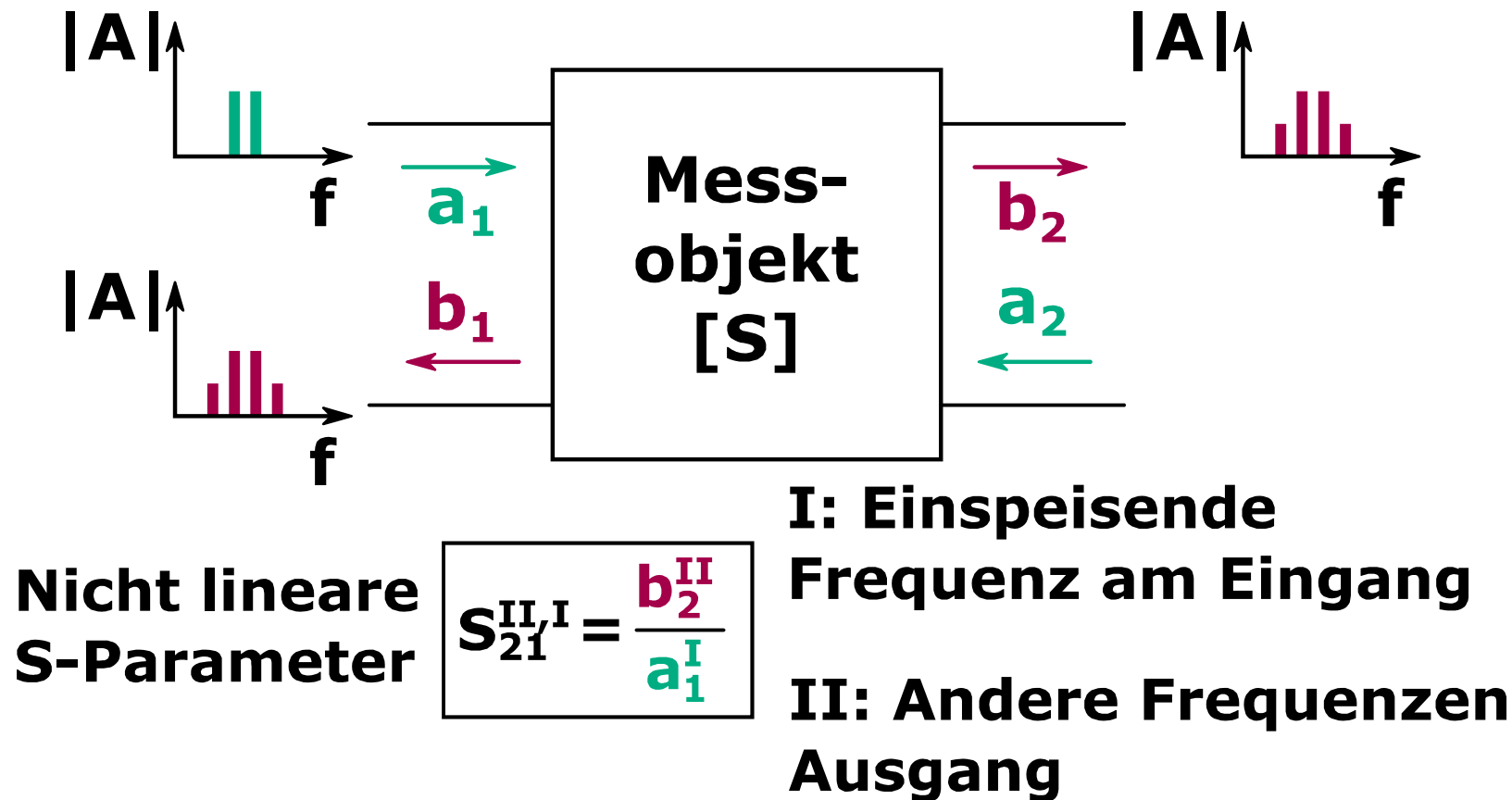


# Einbettung eines Mischers



- Without-Thru Kalibrierung an beiden Toren
- Thru kann als Verifikation verwendet werden
- LO bei 10 GHz wird als ideal angenommen

# S-Parameter für nicht lineare Bauteile





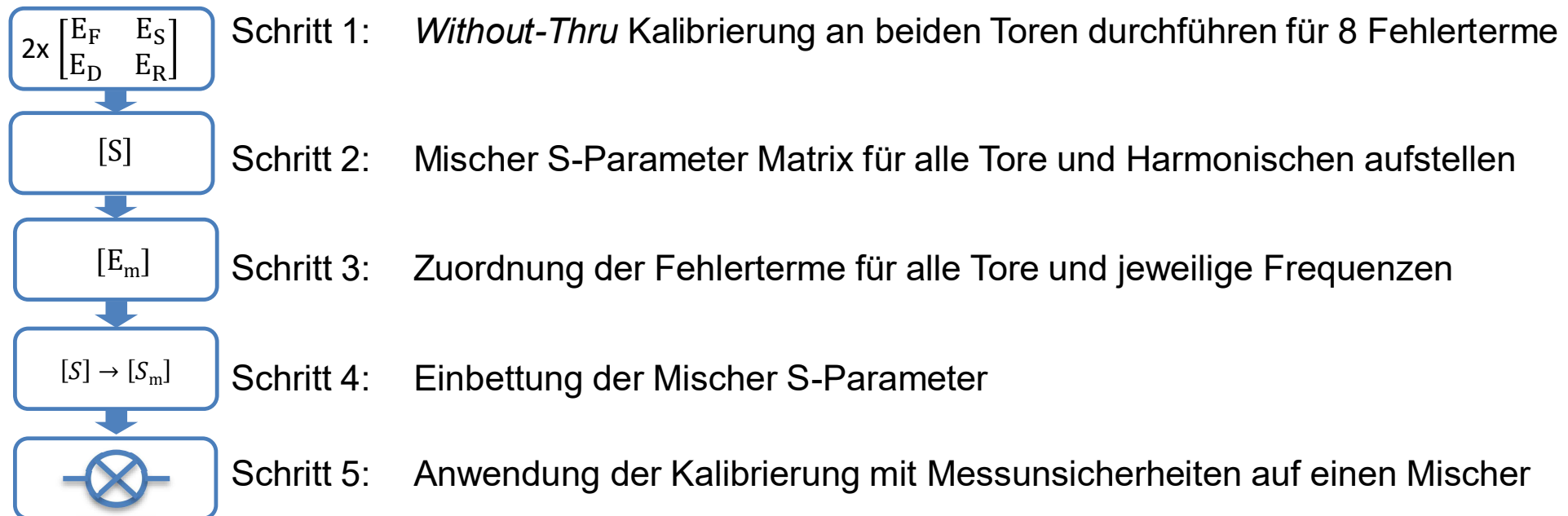
# S-Parameter für nicht lineare Bauteile

$$\begin{pmatrix} \mathbf{b}_1^{\text{I}} \\ \mathbf{b}_2^{\text{I}} \\ \mathbf{b}_1^{\text{II}} \\ \mathbf{b}_2^{\text{II}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{S}_{11}^{\text{I,I}} & \mathbf{S}_{12}^{\text{I,I}} & \mathbf{S}_{11}^{\text{I,II}} & \mathbf{S}_{12}^{\text{I,II}} \\ \mathbf{S}_{21}^{\text{I,I}} & \mathbf{S}_{22}^{\text{I,I}} & \mathbf{S}_{21}^{\text{I,II}} & \mathbf{S}_{22}^{\text{I,II}} \\ \mathbf{S}_{11}^{\text{II,I}} & \mathbf{S}_{12}^{\text{II,I}} & \mathbf{S}_{11}^{\text{II,II}} & \mathbf{S}_{12}^{\text{II,II}} \\ \mathbf{S}_{21}^{\text{II,I}} & \mathbf{S}_{22}^{\text{II,I}} & \mathbf{S}_{21}^{\text{II,II}} & \mathbf{S}_{22}^{\text{II,II}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{a}_1^{\text{I}} \\ \mathbf{a}_2^{\text{I}} \\ \mathbf{a}_1^{\text{II}} \\ \mathbf{a}_2^{\text{II}} \end{pmatrix}$$

- Matrix für zwei Tore mit einer Harmonischen
- Die Spur der Matrix entspricht linearen S-Parametern bei der jeweiligen Frequenz im Betriebspunkt
- Bestimmung der Fehlerterme passend zur S-Parameter Matrix
- Für alle Frequenzen müssen die Fehlerterme bekannt sein
- Fehlerterme müssen nach Frequenz und Tor zugeordnet werden

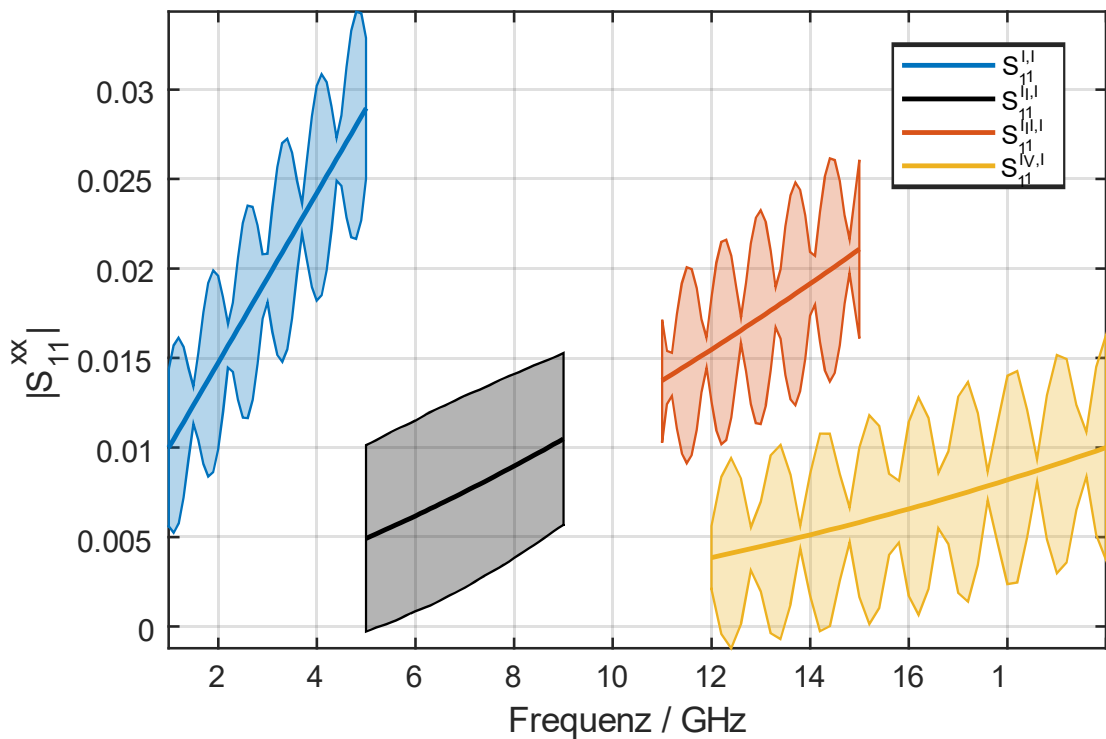
# Vektorielle Mischer Kalibrierung

## Simulation einer Mischer Kalibrierung mit Matlab und METAS UncLib

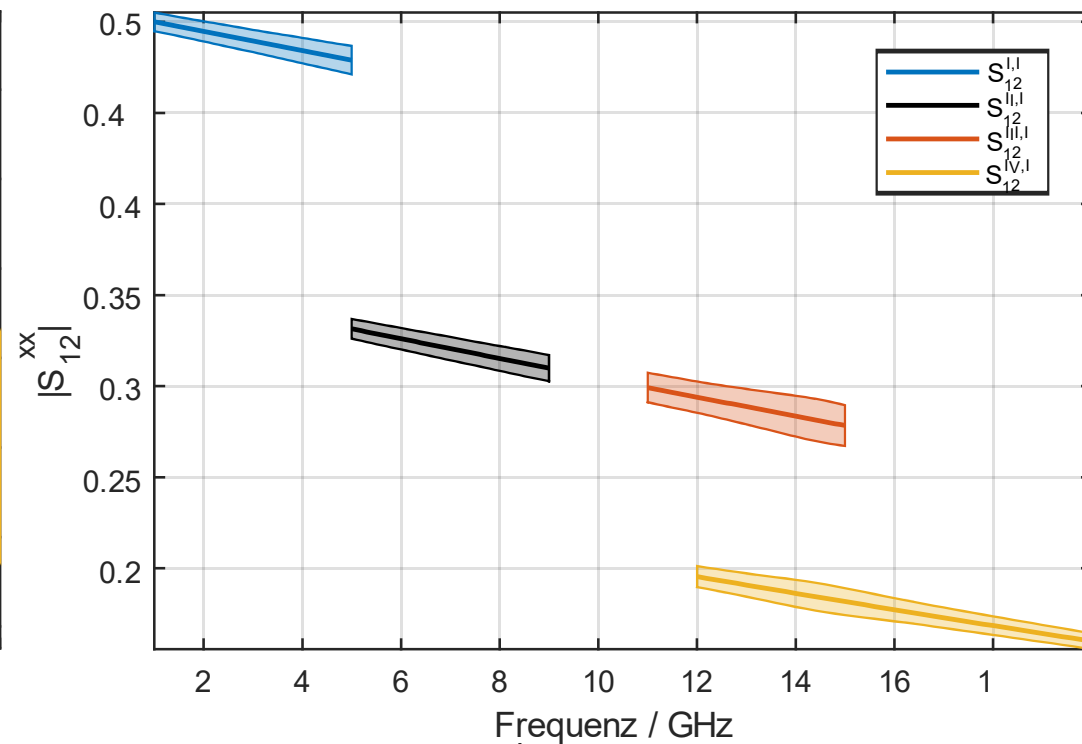


# Simulierte Mischer S-Parameter

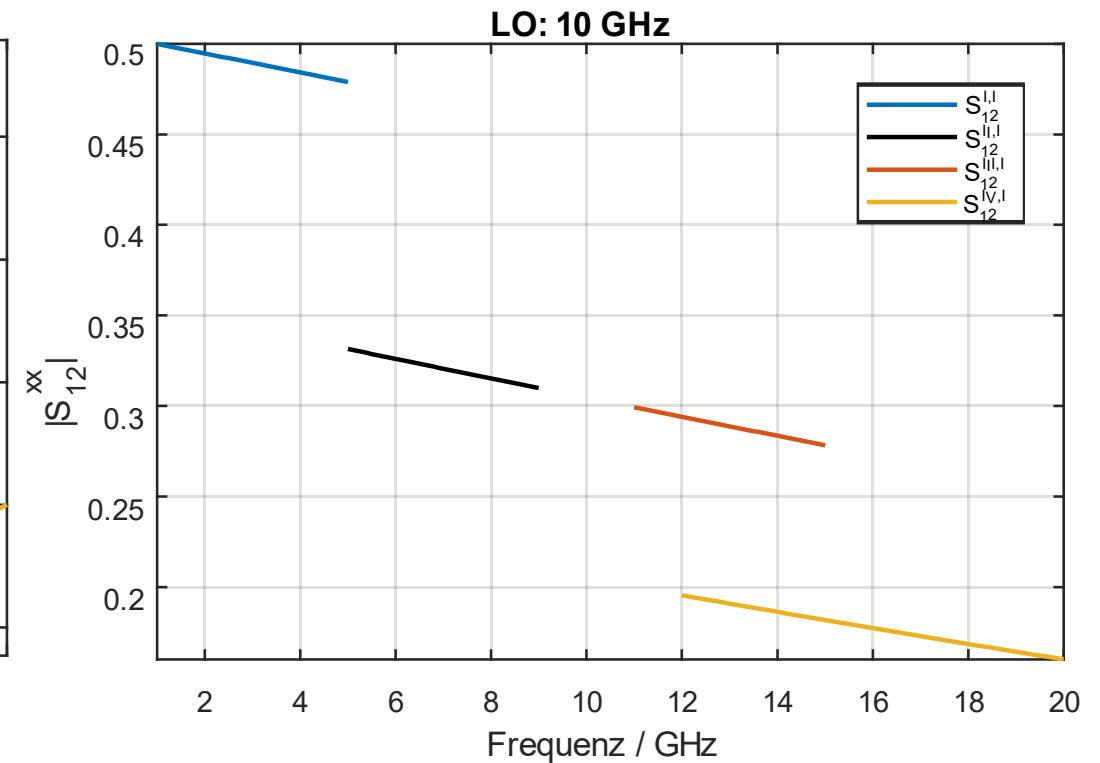
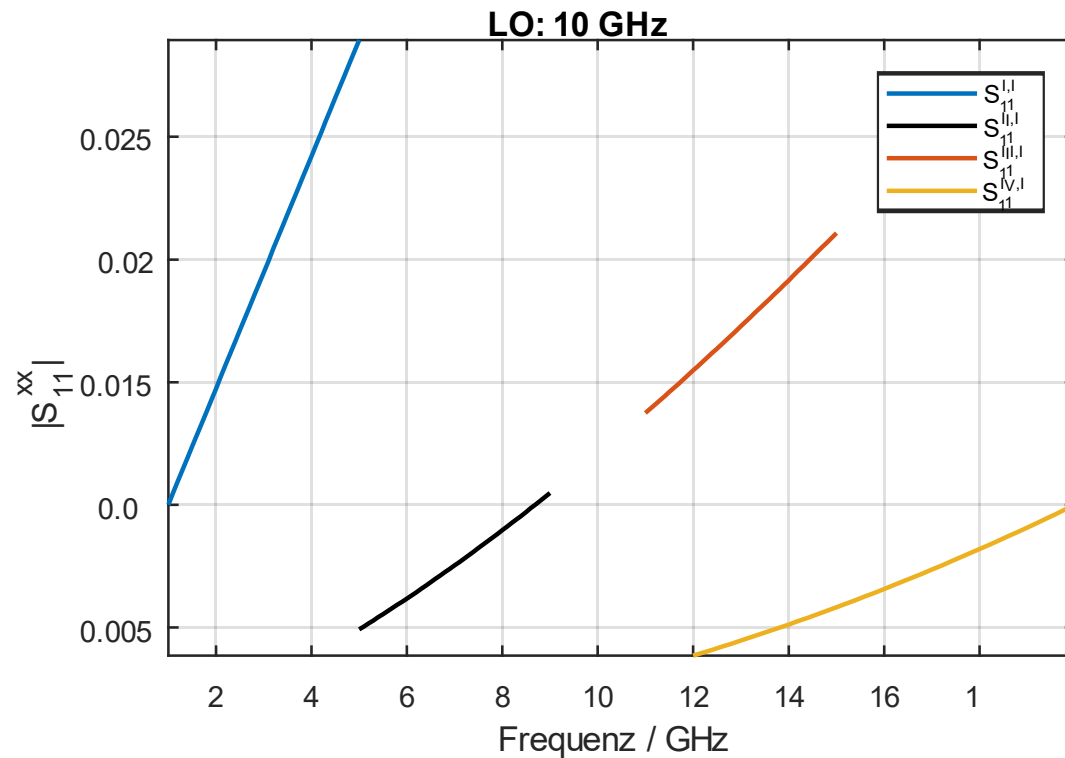
LO: 10 GHz



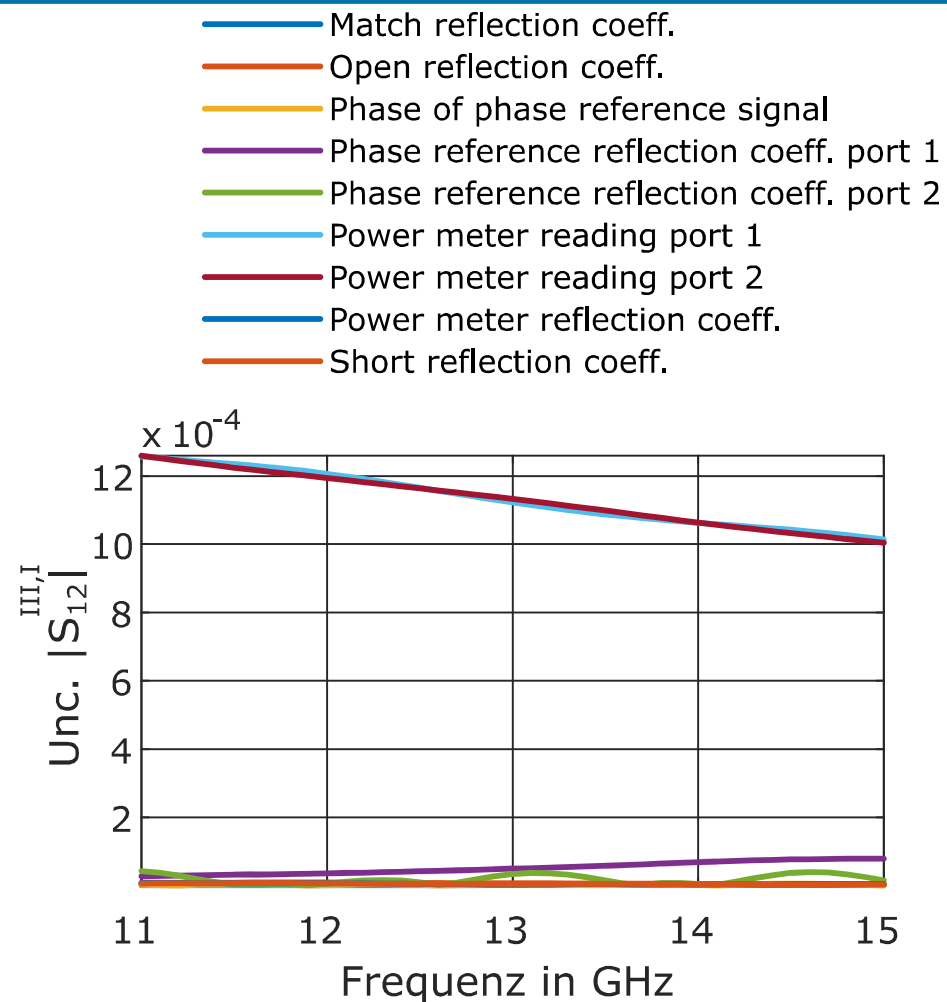
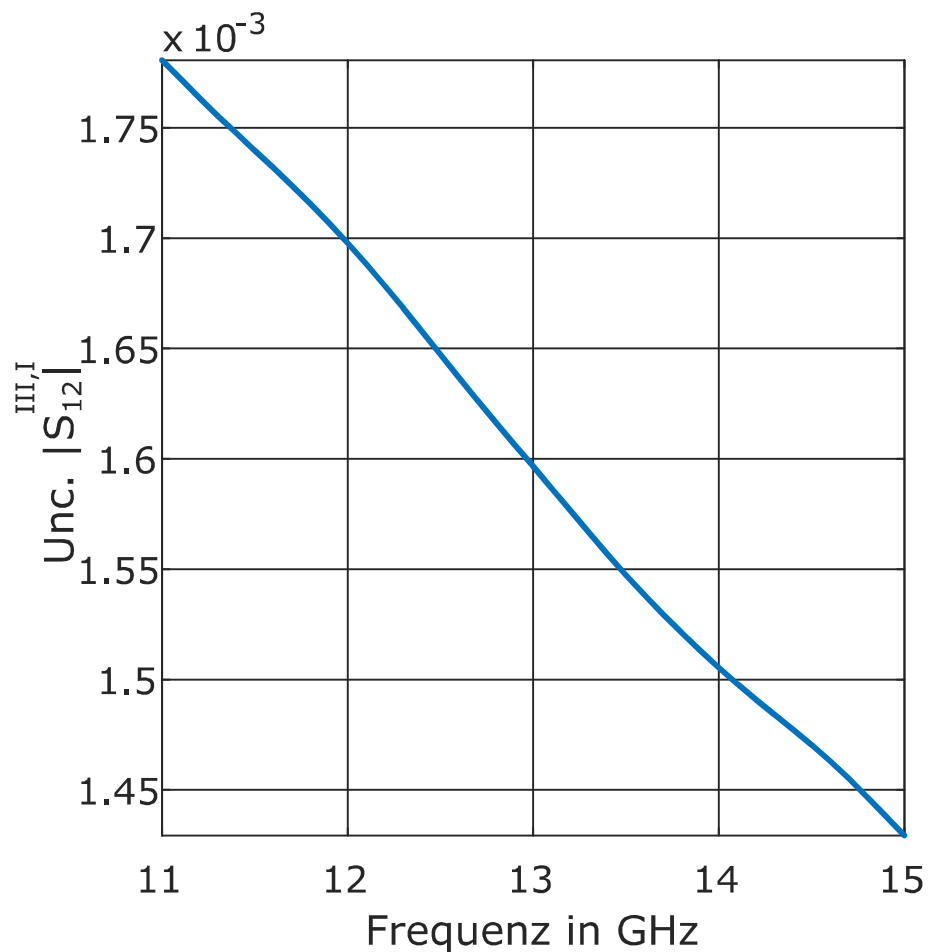
LO: 10 GHz



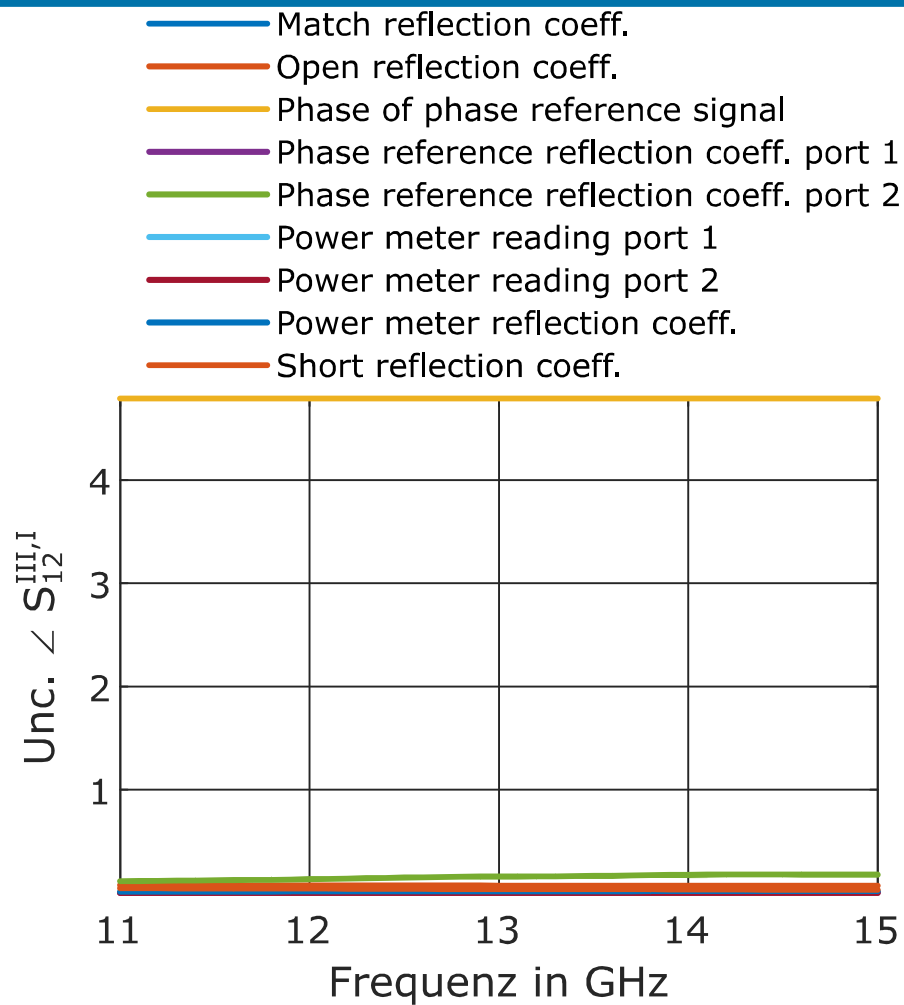
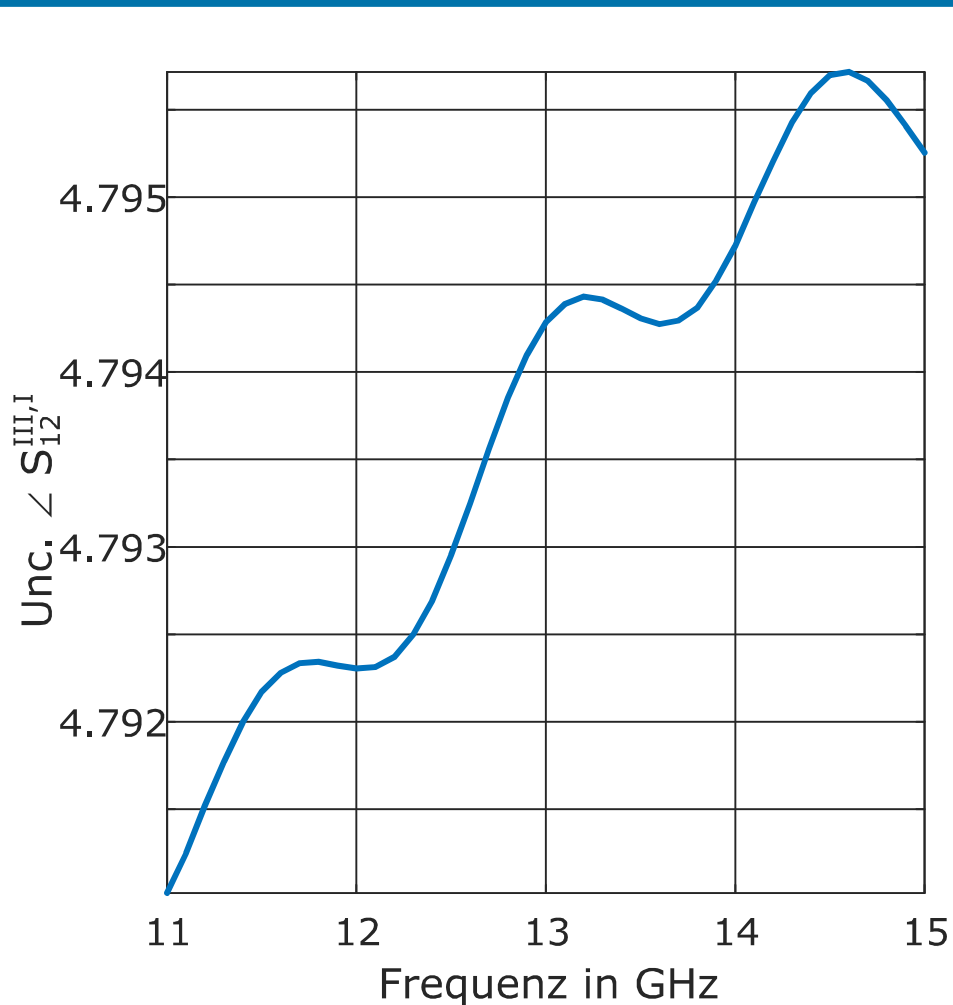
# Simulierte Mischer S-Parameter



# Unsicherheiten Mischer S-Parameter



# Unsicherheiten Mischer S-Parameter



# Zusammenfassung und Ausblick

---

- Messunsicherheiten für vektorielle Mischermessungen
- Implementierung der Without-Thru Kalibrierung mit Messunsicherheiten in Matlab
- Einbettung eines Nichtlinearen DUTs mit Messunsicherheiten

## Ausblick

- Vergleich von Simulationsergebnissen mit Messergebnissen
- Optimierung der Kalibrierung unter Nutzung der PTB Infrastruktur



**Physikalisch-Technische Bundesanstalt  
Braunschweig and Berlin**

Bundesallee 100

38116 Braunschweig

Frauke Gellersen

Telefon: 0531 592-2222

E-Mail: [frauke.gellersen@ptb.de](mailto:frauke.gellersen@ptb.de)

[www.ptb.de](http://www.ptb.de)

