

Mixed-Mode-Streuparameter Messunsicherheiten in differenziellen Leitungssystemen

316. PTB-Seminar, 3. September 2020,

Aktuelle Fortschritte von Kalibrierverfahren im Nieder- und Hochfrequenzbereich

Karsten Kuhlmann, AG 2.22, ORCID ID 0000-0002-4022-7061

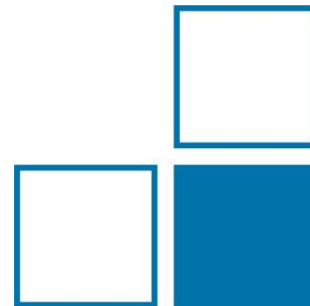
Keywords (Inspec Classification):

B1150 Linear network analysis and design

B7110 Measurement theory

B7130 Measurement standards and calibration

B7210N Network and spectrum analysers



- Übersicht HF-Basisgrößen und Rückführung
 - Motivation für differenzieller Leitungssystemen
- Mixed-Mode-Streuparameter
 - Theorie
- Beiträge zur Messunsicherheit
 - Messsystem
 - Messobjekte
- Zusammenfassung und Ausblick

- Übersicht HF-Basisgrößen und Rückführung
 - Motivation für differenzieller Leitungssystemen
- Mixed-Mode-Streuparameter
 - Theorie
- Beiträge zur Messunsicherheit
 - Messsystem
 - Messobjekte
- Zusammenfassung und Ausblick

Rückführungskette

Abgeleitete HF-Größen

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

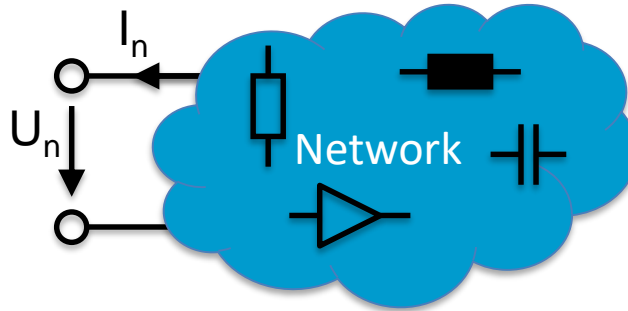
HF-Grundgrößen

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

SI-Rückführung

- DC-Größen
- Länge
- Frequenz (Zeit)

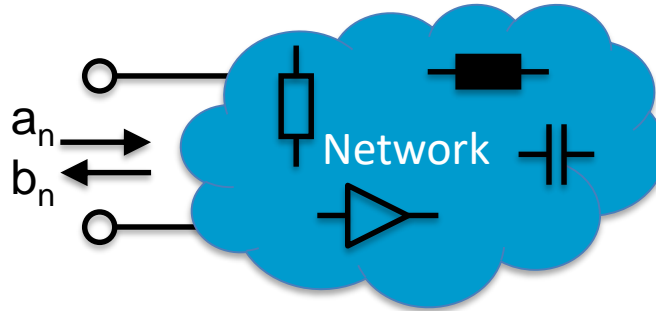
Streuparameter



Beschreibung durch

- Ohmsches Gesetz
- Kirchhoffsche Gesetze

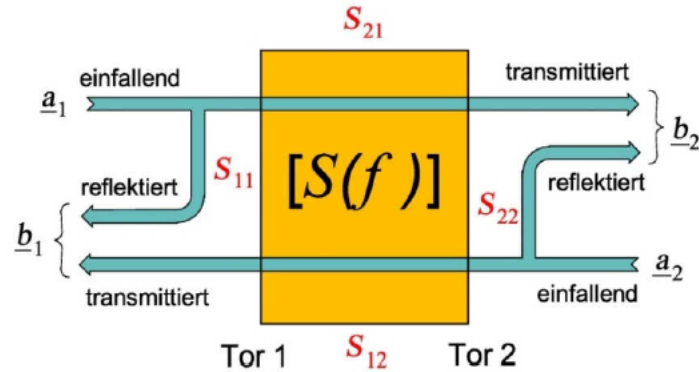
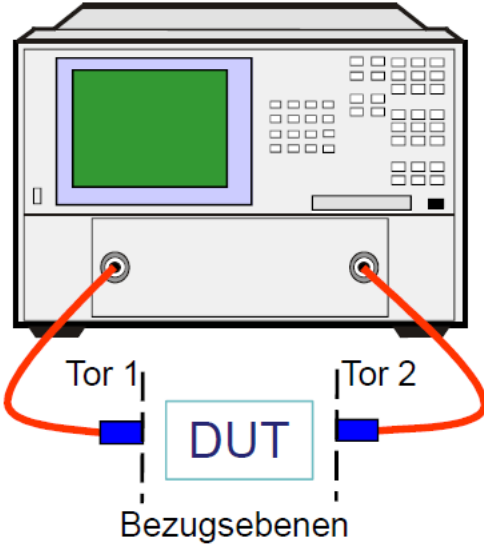
Streuparameter



Wellengrößen

$$a_n = \frac{1}{2} \left(\frac{U_n}{\sqrt{Z_r}} + I_n \sqrt{Z_r} \right)$$
$$b_n = \frac{1}{2} \left(\frac{U_n}{\sqrt{Z_r}} - I_n \sqrt{Z_r} \right)$$
$$U_n = \sqrt{Z_r} (a_n + b_n)$$
$$I_n = \frac{1}{\sqrt{Z_r}} (a_n + b_n)$$

Streuparameter



$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{b} = \mathbf{S}\mathbf{a}$$

$$S_{11} = \left. \frac{b_1}{a_1} \right|_{a_2=0}$$

Eingangsreflexionsfaktor bei Anpassung am Ausgang

$$S_{21} = \left. \frac{b_2}{a_1} \right|_{a_2=0}$$

Vorwärtsübertragungsfaktor bei Anpassung am Ausgang

Streuparameter

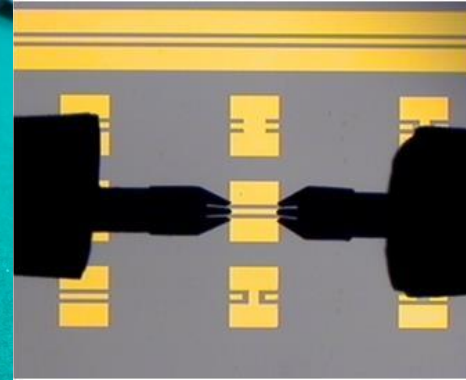
Typische Leitungssysteme für asymmetrische Signalübertragung
(*single-ended*)



Koaxial



Hohlleiter

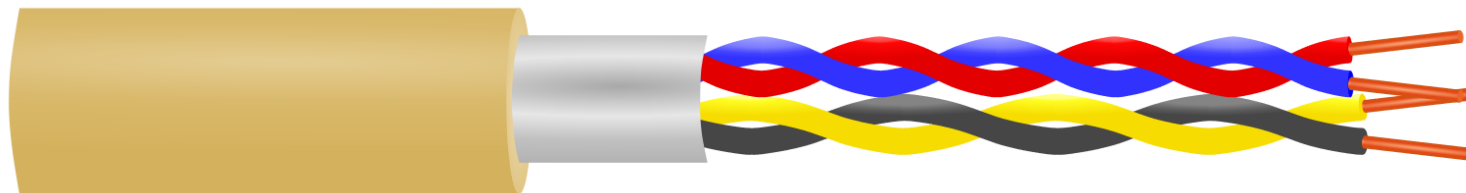


Koplanarleitung

Streuparameter

Typische Leitungssystem für symmetrische Signalübertragung
(*Differential signaling*):

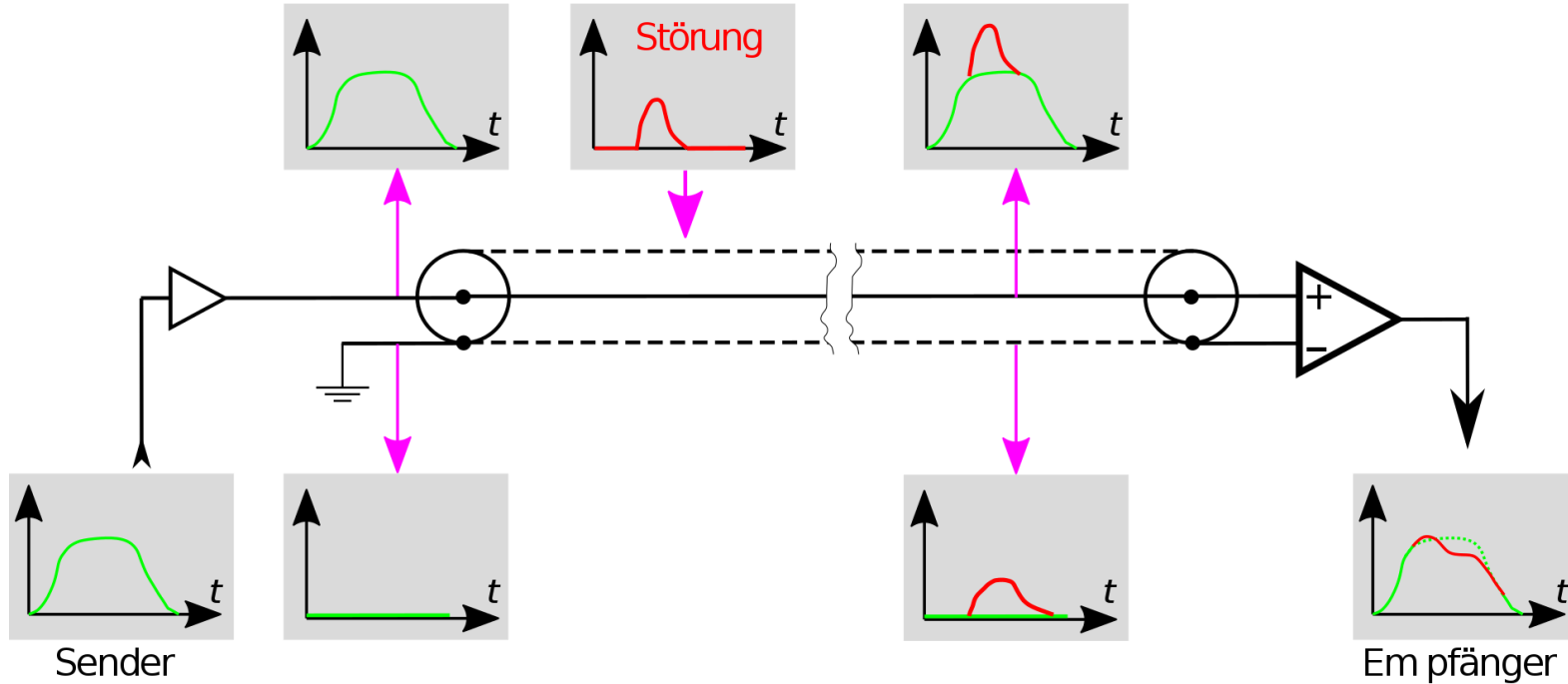
Verdrillte Adernpaare



Vorteil: **unempfindlich gegen Störer**

Streuparameter

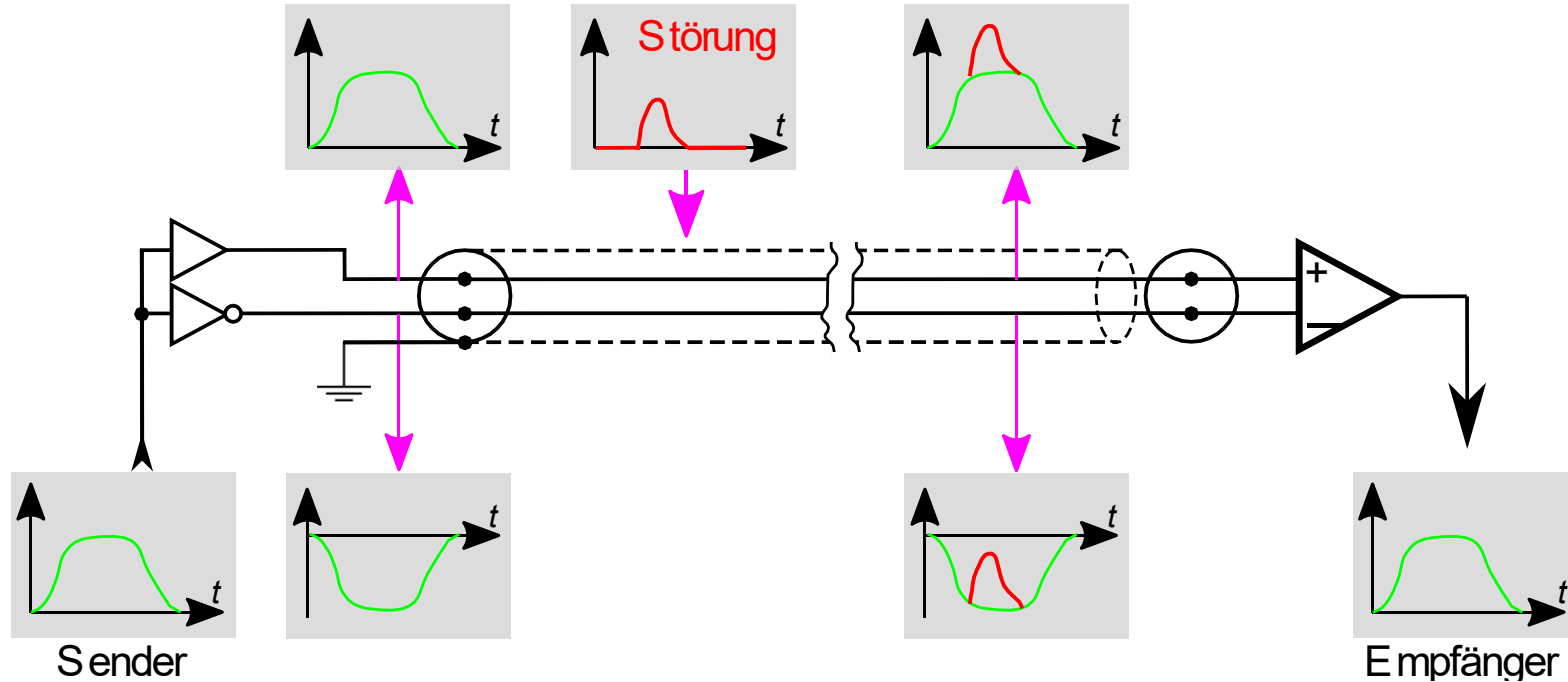
Nicht-symmetrische Übertragung:



Von Patagonier - Eigenes Werk, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=69459798>

Streuparameter

Symmetrische (differenzieller) Übertragung:



Motivation für **LEONI** (int. Kabelhersteller):

IATF (International Automotive Task Force) **16949:2016**

Anforderungen an Qualitätsmanagementsysteme für die
Serien- und Ersatzteilproduktion in der Automobilindustrie.

Abschnitt 7.1.5.2

Messtechnische Rückführbarkeit

- Übersicht HF-Basisgrößen und Rückführung
 - Motivation für differenzieller Leitungssystemen
- **Mixed-Mode-Streuparameter**
 - **Theorie**
- Beiträge zur Messunsicherheit
 - Messsystem
 - Messobjekte
- Zusammenfassung und Ausblick

Mixed-Mode-Streuparameter

Beispiel: 4-Tor

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{bmatrix} = S \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{bmatrix}$$

Mixed-Mode:

N/2 Tore paarweise verknüpft.

Beschreiben Netzwerk für Gleichtakt- (**even mode**) und Gegentaktanregung (**odd mode**).

$$\begin{bmatrix} b_{d1} \\ b_{d2} \\ b_{c1} \\ b_{c2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{dd11} & S_{dd12} & S_{dc11} & S_{dc12} \\ S_{dd21} & S_{dd22} & S_{dc21} & S_{dc22} \\ S_{cd11} & S_{cd12} & S_{cc11} & S_{cc12} \\ S_{cd21} & S_{cd22} & S_{cc21} & S_{cc22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{d1} \\ a_{d2} \\ a_{c1} \\ a_{c2} \end{bmatrix} = S^{mm} \begin{bmatrix} a_{d1} \\ a_{d2} \\ a_{c1} \\ a_{c2} \end{bmatrix}$$

Messung:

4-Tore-VNA (*single-ended* oder *differential*)

- Übersicht HF-Basisgrößen und Rückführung
 - Motivation für differenzieller Leitungssystemen
- Mixed-Mode-Streuparameter
 - Theorie
- Beiträge zur Messunsicherheit
 - Messsystem
 - Messobjekte
- Zusammenfassung und Ausblick

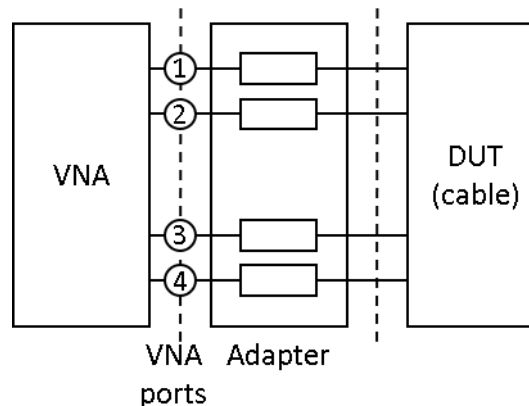
Vorgehen:

EURAMET Calibration Guide No. 12 Version 3.0 (03/2018)

Guidelines on the Evaluation of Vector Network Analysers (VNA)

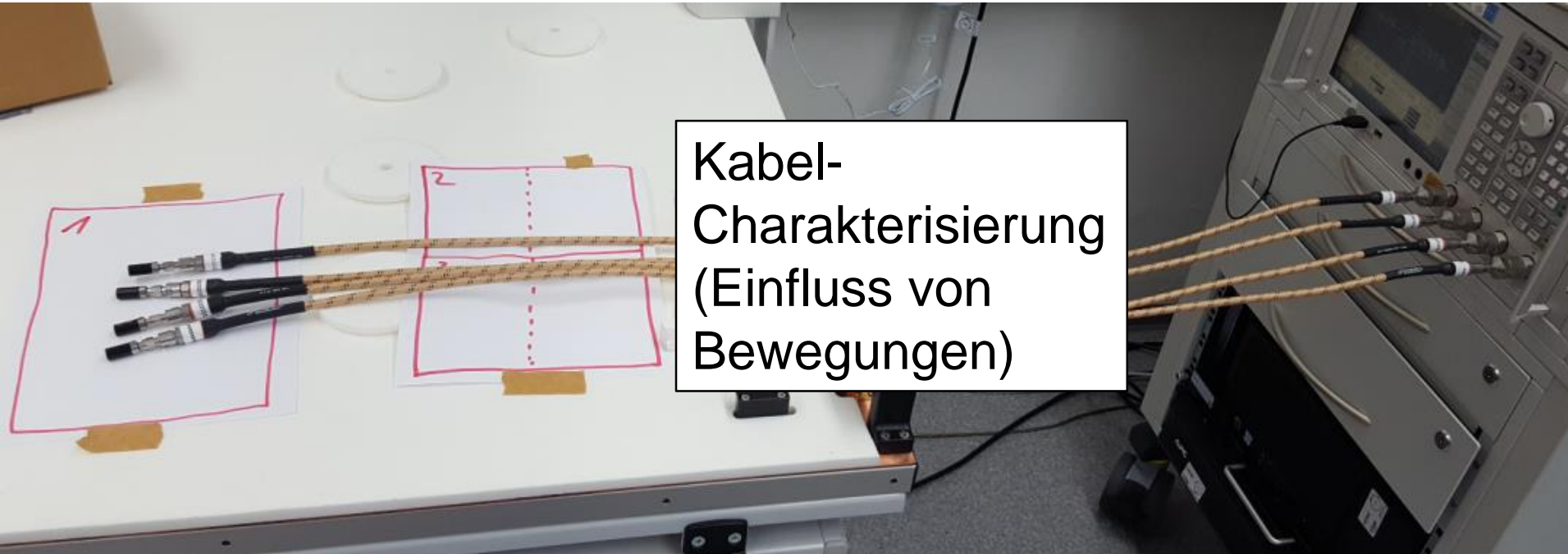
PTB-Seminar
2016

1. Koaxiale 4-Tor-VNA-Kalibrierung (*single-ended*).
2. Messobjekt (Kabel) und Adapter vermessen.
3. Charakterisierung des Adapters als 8-Tor.
4. Bestimmung der Prozess-MU.
5. *De-embedding* des Adapters.
6. Wandlung zu Mixed-mode.

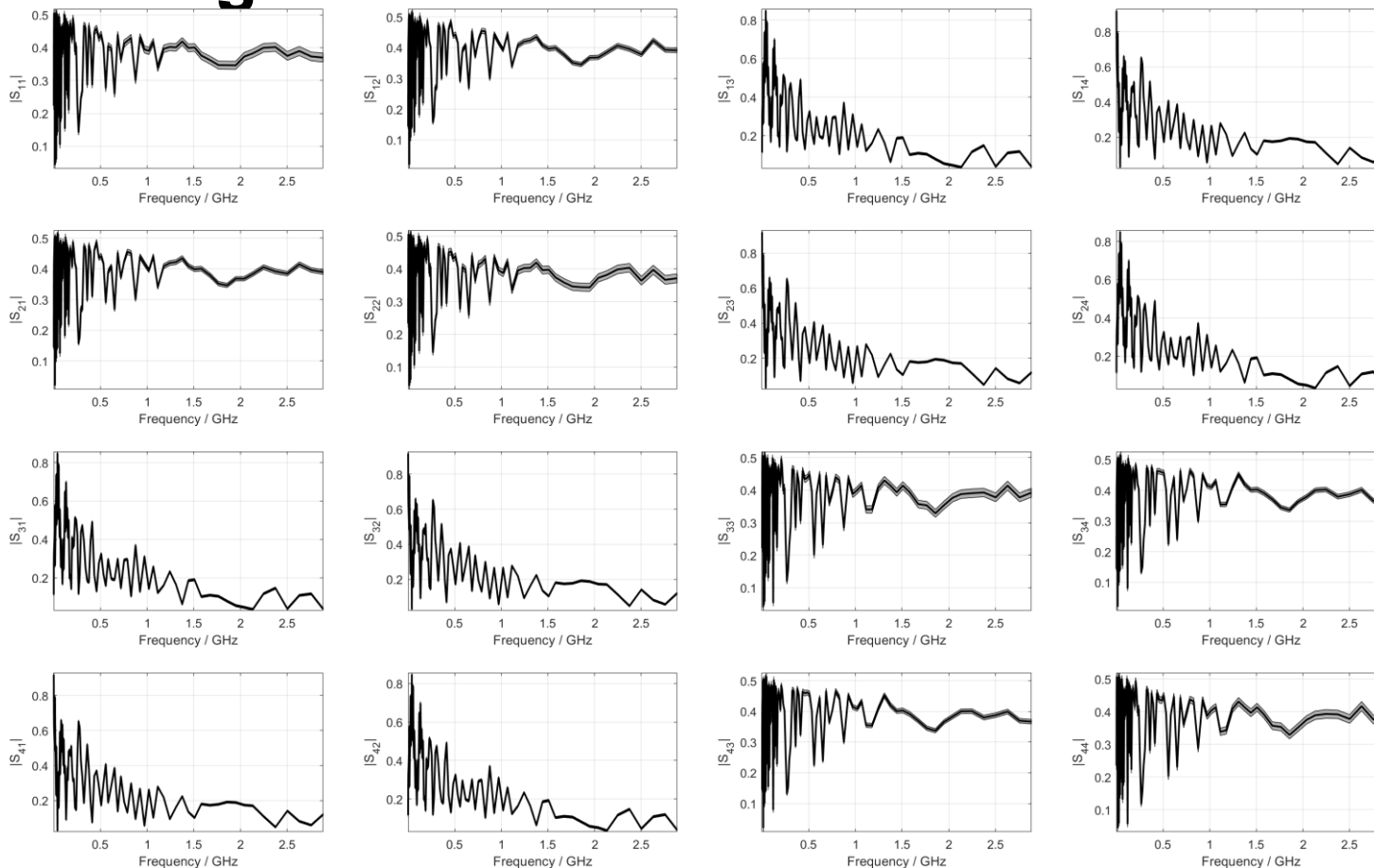


Beiträge zur Messunsicherheit

Messaufbau:

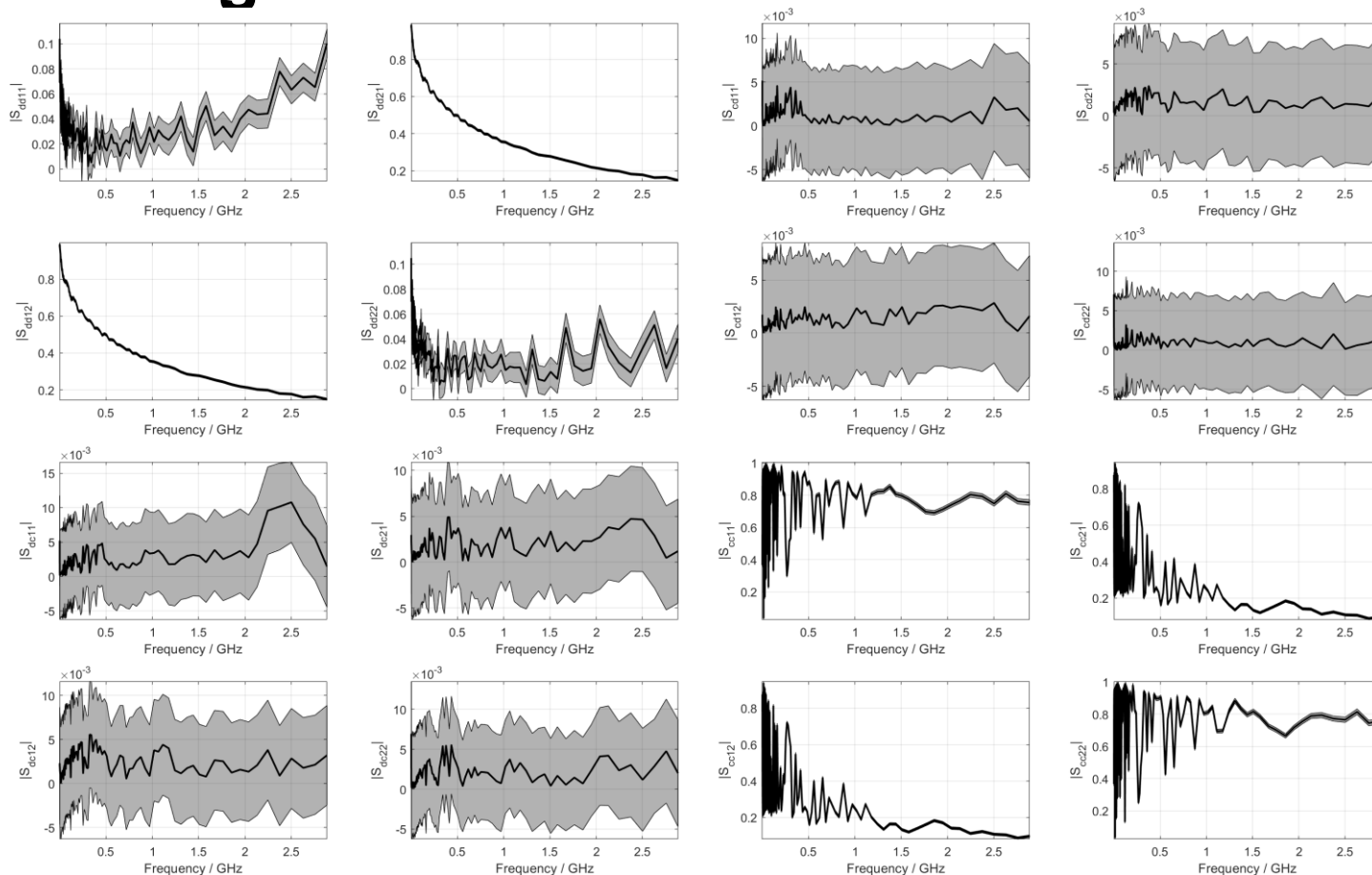


Beiträge zur Messunsicherheit



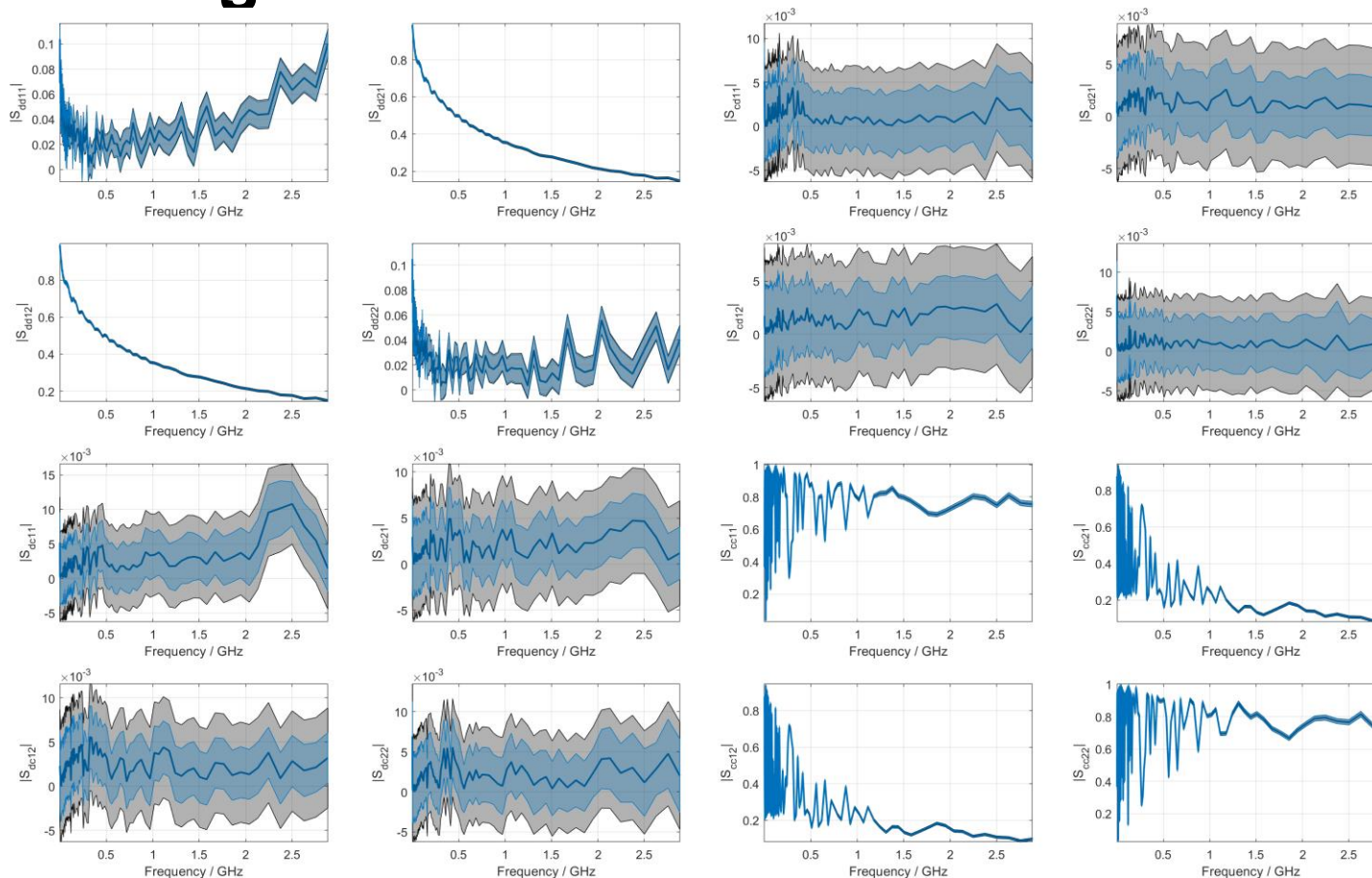
*Single-ended nach
Kalibrierung*

Beiträge zur Messunsicherheit



Mixed-mode:
Prozess-MU
(normal)

Beiträge zur Messunsicherheit



Mixed-mode
Prozess-MU nach
Umwandlung addiert

Beiträge zur Messunsicherheit

S_{dd12} @ 400 MHz

Value	Std Unc	U95
0.520026090	0.003580976	0.007161952

Description	Unc Component	Unc Percentage
+..... Adapter modelling	0.001372498	14.690
+..... Cable Stability	0.000247818	0.479
+..... Calibration Standard	0.002135082	35.549
+..... Connector Repeatability	0.000012916	0.001
+..... Process repeatability SE	0.002500000	48.739
+..... VNA Drift (Ideal VNA correlated)	0.000042570	0.014
+..... VNA Linearity	0.000259933	0.527
+..... VNA Noise	0.000010411	0.001

Beiträge zur Messunsicherheit

S_{dc11} @ 400 MHz

Value	Std Unc	U95
0.001183232	0.003119385	0.006238770

Description	Unc Component	Unc Percentage
+..... Adapter modelling	0.001665293	28.500
+..... Cable Stability	0.000720175	5.330
+..... Calibration Standard	0.000014221	0.002
+..... Connector Repeatability	0.000052596	0.028
+..... Process repeatability SE	0.002500000	64.231
+..... VNA Drift (Ideal VNA correlated)	0.000069793	0.050
+..... VNA Linearity	0.000425184	1.858
+..... VNA Noise	0.000009478	0.001

- Übersicht HF-Basisgrößen und Rückführung
 - Motivation für differenzieller Leitungssystemen
- Mixed-Mode-Streuparameter
 - Theorie
- Beiträge zur Messunsicherheit
 - Messsystem
 - Messobjekte
- Zusammenfassung und Ausblick

- HF-Basisgrößen und Rückführung
- Motivation für differenzieller Leitungssystemen
- Mixed-Mode-Streuparameter
- Beiträge zur Messunsicherheit
 - Prozessschwankungen
 - Adapter
 - Kal.-Normale
 - Kabel

- Ergänzung Richtlinie cg 12
 - MU-Beiträge unterscheiden sich z.T. in Mixed-Mode
- Weitere Untersuchungen
 - Multi-Mode-TRL-Kalibrierung

- (1) Markus Zeier, Djamel Allal, Rolf Judaschke, Guidelines on the Evaluation of Vector Network Analysers (VNA), EURAMET Calibration Guide No. 12, Version 3.0 (03/2018).
- (2) Bockelmann, Combined Differential and Common-Mode Scattering Parameters - Theory and Simulation, IEEE-MTT, 1995.
- (3) Allan Huynh, Pär Håkansson and Shaofang Gong, Mixed-Mode S-Parameter Conversion for Networks with Coupled Differential Signals, Proc. 37th EuMC, 2007.
- (4) Allan Huynh, Magnus Karlsson and Shaofang Gong, Mixed-mode S-parameters and Conversion Techniques, IntechOpen, 2012.

Vielen Dank!



**Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Braunschweig and Berlin**

Bundesallee 100

38116 Braunschweig

Karsten Kuhlmann

Telefon: 0531 592-2220

E-Mail: karsten.kuhlmann@ptb.de

www.ptb.de



Stand: 09/2020