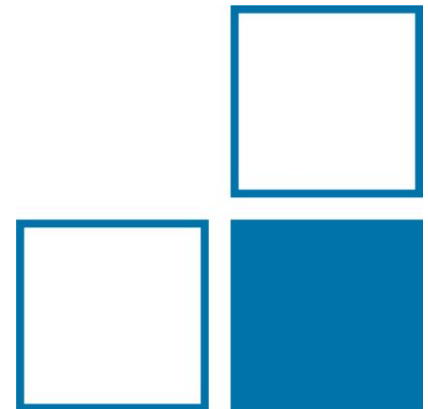


Rückführung von planaren Streuparametermessungen in Membran-Technologie für Frequenzen bis 110 GHz

Uwe Arz

PTB AG 2.23



Motivation: EMPIR-Projekt 14IND02 PlanarCal

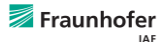


Microwave measurements for planar circuits and components ^[1]

Wissenschaftliche Ziele:

- Rückführung planarer Streuparametermessungen
- Erweiterung hin zu höheren Frequenzen (mindestens bis 325 GHz)
- Entwicklung von Methoden zur HF-Messung von Nanodevices

Partner:



ROHDE & SCHWARZ

QUALCOMM® RF360

A Qualcomm - TDK Joint Venture

Support from Industry

THALES

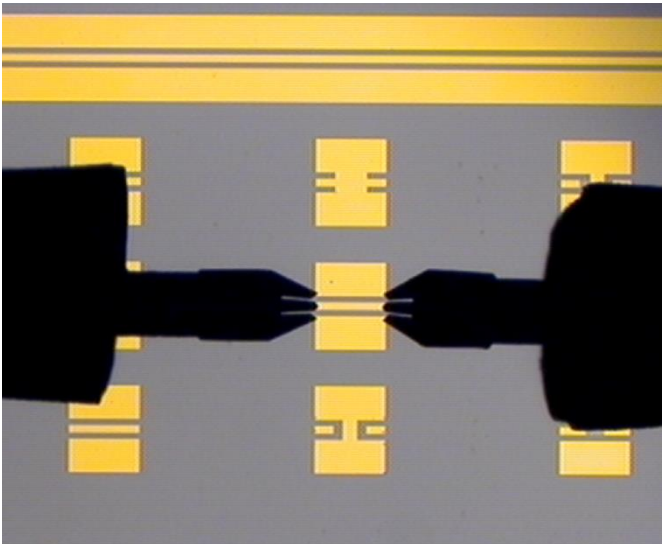


Laufzeit: 1.10.2015-30.9.2018

[1] <https://planarcal.ptb.de>

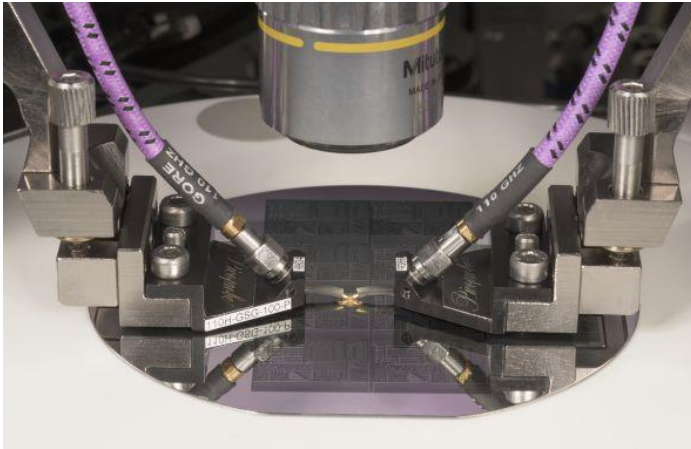
Metrologische Rückführung setzt eine ununterbrochene Kette von Vergleichsmessungen mit Bezug zu einer charakterisierten Referenz voraus, wobei jede einzelne zur Messunsicherheit beiträgt.

- (weitgehend) gelöst für Wellenleiter mit Koaxial- und Hohlleiterverbinder
- planare Wellenleiter: bisher keine umfassende Lösung vorhanden



Grundlegende Fragestellungen:

- Wie können die Unsicherheiten der Kalibrierstandards verringert werden?
- Welcher Weg soll gewählt werden, um die Rückführung umzusetzen?



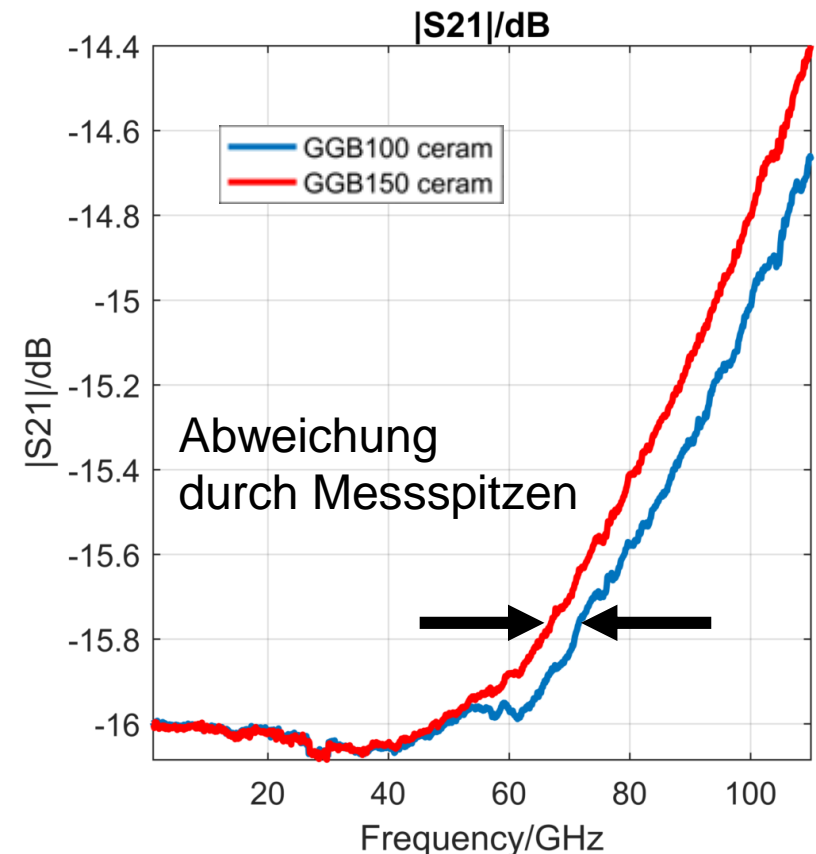
- Anritsu VectorStar VNA
- Suess PA 200 halbautomatischer Prober
- wahlweise Keramik- oder Metall-Chuck
- GGB-Prüfspitzen mit 100 μm Pitchabstand

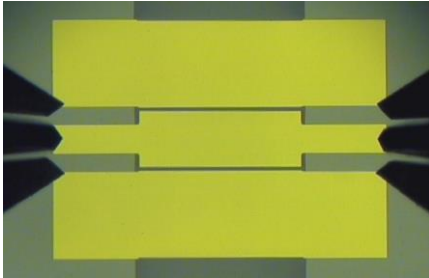
Verlässliche Unsicherheiten können nur für definierte Umgebungsbedingungen unter besonderer Beachtung folgender Komponenten spezifiziert werden:

- Substrat-Material
- planarer Wellenleiter
- Mikrowellen-Prüfspitzen!

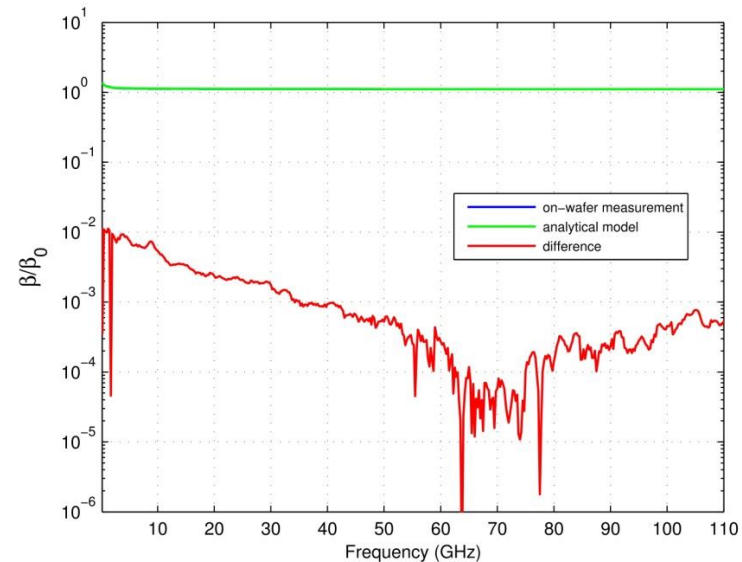
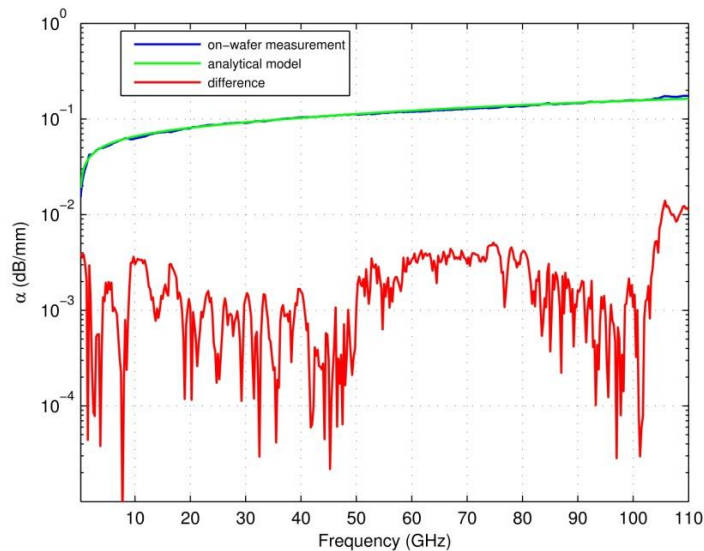
- Beispiel: Messung der Transmission eines Dämpfungsglieds auf Al₂O₃-Wafer mit GGB 100- und GGB 150-Spitzen

- alle Einflussfaktoren bis auf Prüfspitzen identisch (Umgebungsbedingungen, Messplatz mit Keramikchuck, Operator, Substrat, Wellenleiter...)



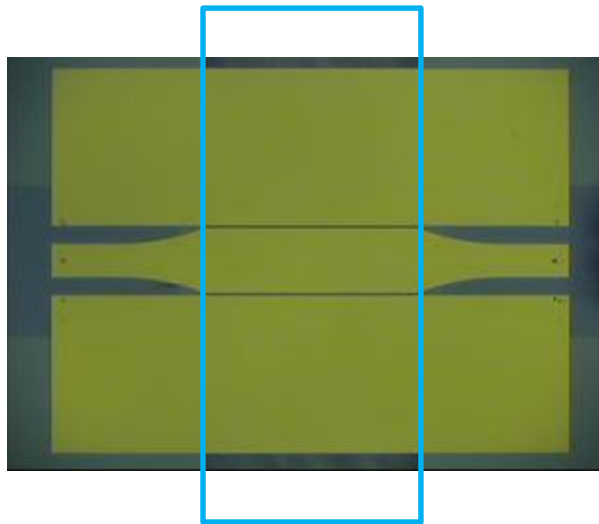


- CPWs in Membran-Technologie auf HRSi-Substraten (Förderung: Rosenberger / Rohde & Schwarz)
- Bestimmung der Ausbreitungskonstante mit Multiline TRL



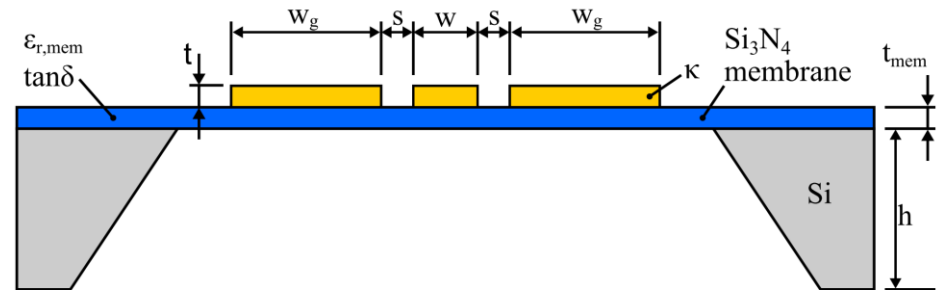
- annähernd ideale Quasi-TEM-Wellenausbreitung bis 110 GHz
- vielversprechender Kandidat für rückführbare On-Wafer-Kalibrierstandards

Verbesserungen in Layout
und Technologie (R&S):



Membranbereich

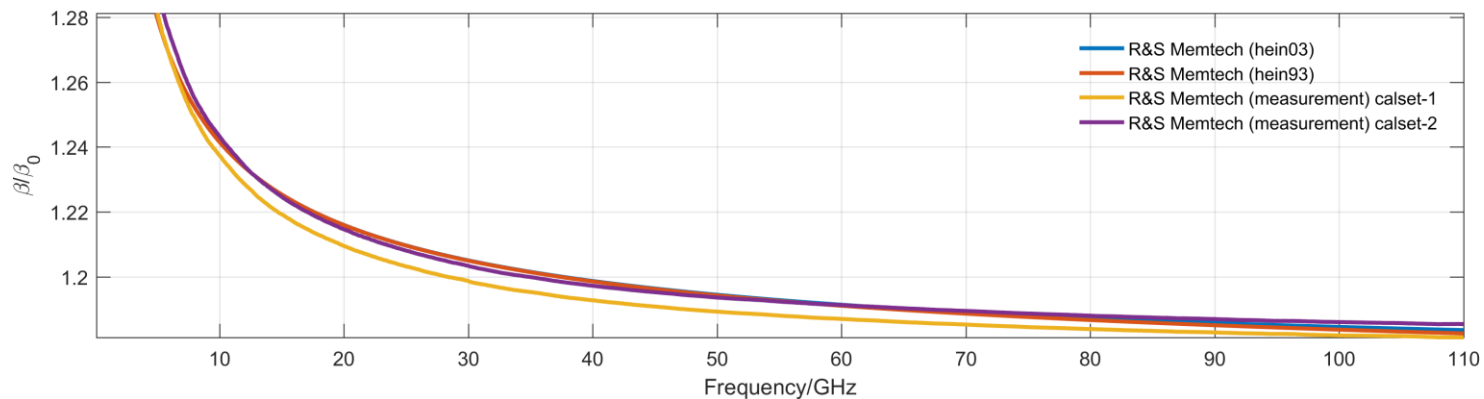
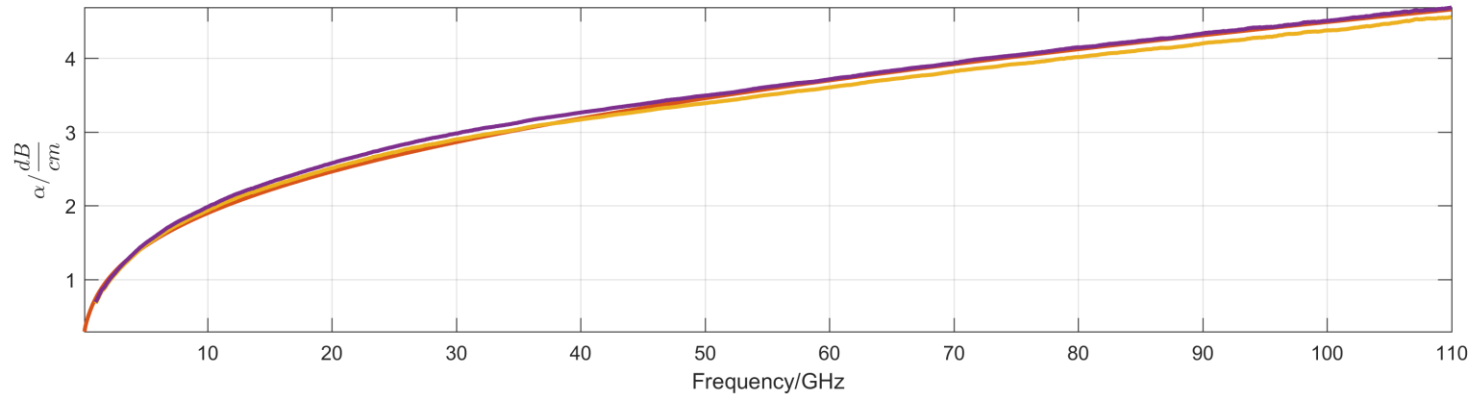
Querschnitt



Parameter nach Charakterisierung

Parameter	value
w_g	$(408.6 \pm 0.5) \mu\text{m}$
w	$(168.7 \pm 0.5) \mu\text{m}$
s	$(6.3 \pm 0.5) \mu\text{m}$
t	$(0.550 \pm 0.05) \mu\text{m}$
k	$(16.5 \pm 1) \text{MS/m}$
$\epsilon_{r, \text{LHP}}$	(1.706 ± 0.1)
t_{mem}	$1.2 \mu\text{m}$
$\tan \delta_{\text{LHP}}$	$(1 \pm 0.5) \cdot 10^{-4}$
h	$295 \mu\text{m}$

Vergleich Messungen und Modell



- Quasi-TEM-Modell (rot) und Modell mit Dispersion (blau) nicht unterscheidbar
- Differenz der Messung unterschiedlicher Kalibriersets > Modellierungsfehler
- keine Anzeichen von Dispersion oder Abstrahlung bis mindestens 110 GHz!

S-Parameter-Unsicherheitsberechnung

Software-Lösungen für S-Parameter-Unsicherheitsberechnung:

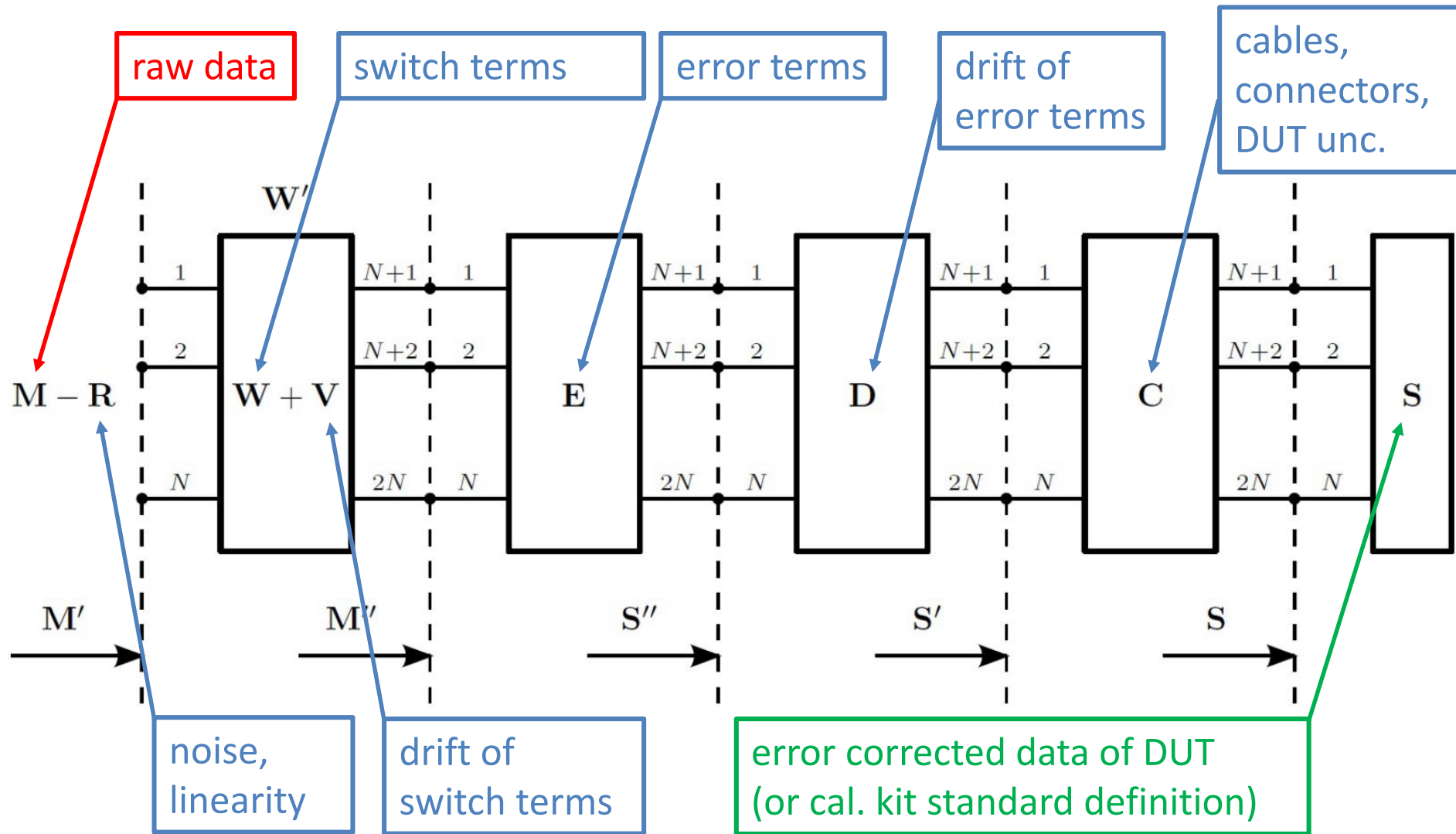
- NIST Microwave Uncertainty Framework (MUF)
- METAS VNATools
- Keysight Firmware (ursprünglich MMS4 von HFE)

Generische Software zur automatischen Berechnung der Unsicherheitsfortpflanzung:

- MSL GUM Tree Calculator (GTC)
- METAS UncLib
- ...

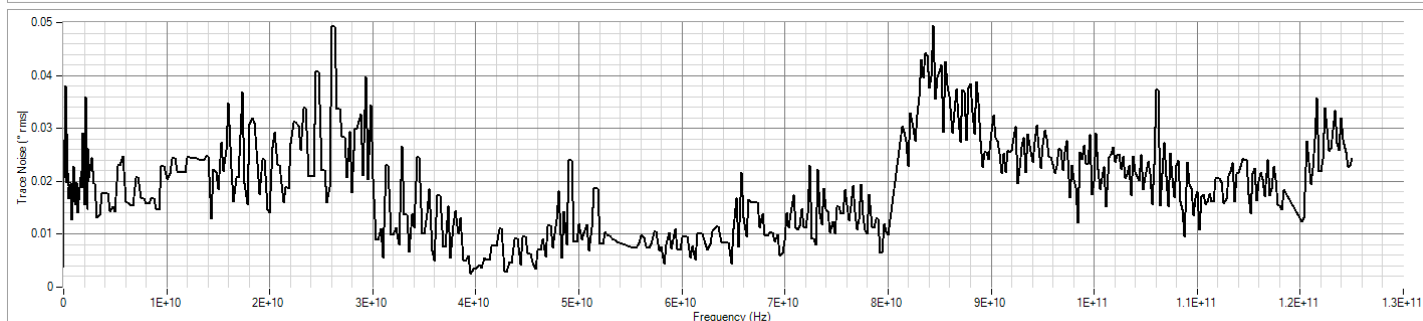
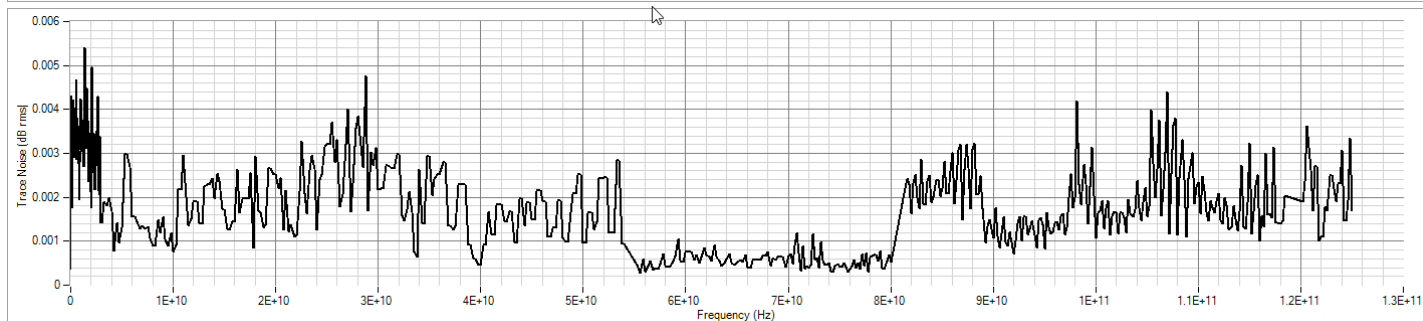
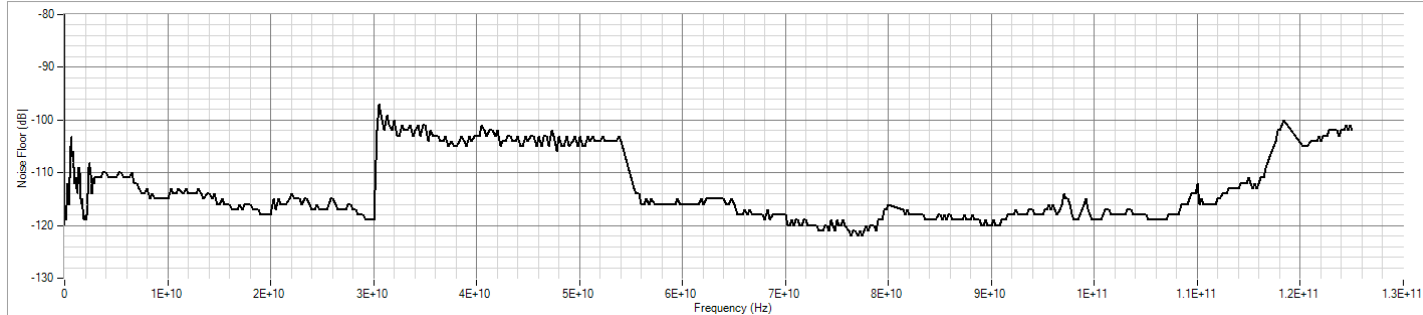
In dieser Arbeit:

- Umsetzung in Matlab mit METAS UncLib
- VNA-Charakterisierung nach Empfehlung in EURAMET CG-12



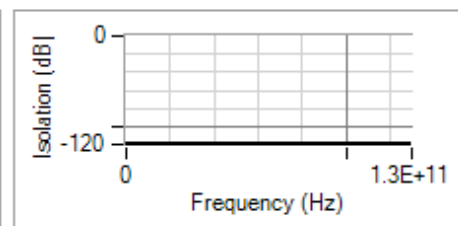
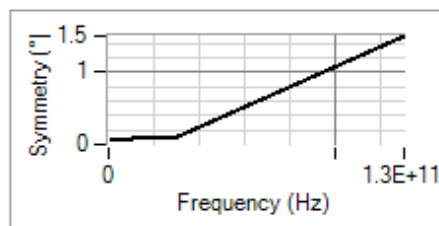
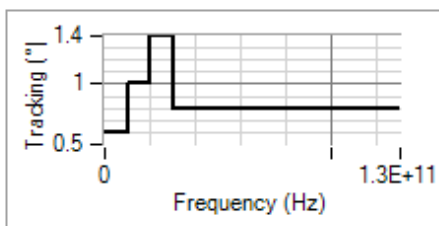
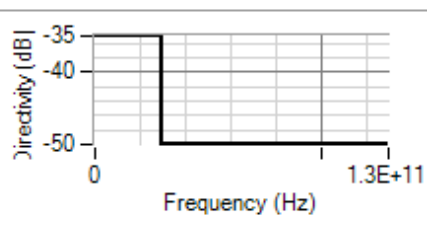
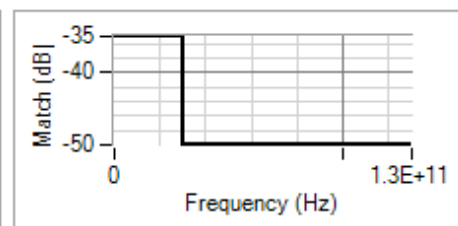
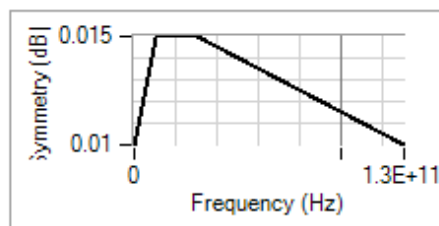
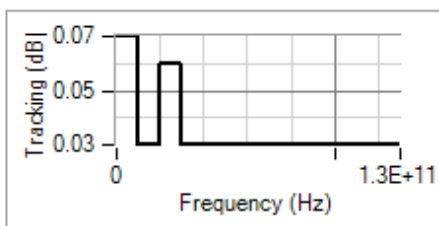
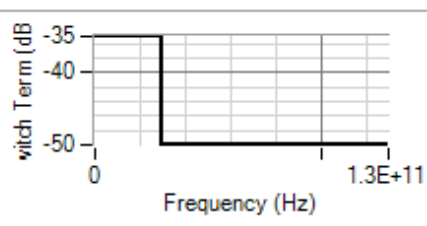
VNA-Charakterisierung: noise floor / trace noise

Frequency (Hz)	Noise Floor (dB) (k = 1)	Trace Noise Mag (dB) (k = 1)	Trace Noise Phase (°) (k = 1)
70.000e+03	-80	0.002486	0.017047
100.000e+03	-84	0.001701	0.010775
200.000e+03	-92	0.001375	0.009441
300.000e+03	-90	0.000645	0.004852
400.000e+03	-91	0.000483	0.003550
500.000e+03	-94	0.001337	0.009476
600.000e+03	-97	0.001337	0.009476
700.000e+03	-98	0.000345	0.004127
800.000e+03	-100	0.000458	0.005466
900.000e+03	-101	0.000787	0.005870
1.000e+06	-94	0.000912	0.005446
2.000e+06	-103	0.002240	0.010981
3.000e+06	-112	0.002647	0.015578
4.000e+06	-117	0.002647	0.016568
6.000e+06	-117	0.002283	0.013514
7.000e+06	-118	0.002522	0.017431
8.000e+06	-118	0.003042	0.016584
9.000e+06	-119	0.003042	0.016703
10.000e+06	-110	0.001784	0.017533
20.000e+06	-118	0.001865	0.018216
30.000e+06	-118	0.001865	0.017124
40.000e+06	-120	0.002178	0.027732
50.000e+06	-118	0.003583	0.022279
60.000e+06	-115	0.002785	0.022279
70.000e+06	-120	0.003250	0.020886
80.000e+06	-118	0.003250	0.020886
90.000e+06	-118	0.004306	0.020631
100.000e+06	-119	0.004023	0.020861
150.000e+06	-116	0.001765	0.026502
200.000e+06	-116	0.003343	0.037994
250.000e+06	-112	0.004220	0.019781
300.000e+06	-115	0.002919	0.028960
350.000e+06	-114	0.003253	0.028960
400.000e+06	-116	0.004004	0.021389
450.000e+06	-113	0.004004	0.019075
500.000e+06	-111	0.003726	0.016748
550.000e+06	-105	0.004678	0.016748
600.000e+06	-105	0.002867	0.018864
650.000e+06	-103	0.003811	0.019642
700.000e+06	-107	0.003321	0.019850
750.000e+06	-106	0.003614	0.013257
800.000e+06	-106	0.002781	0.012674
850.000e+06	-108	0.001950	0.016340



VNA-Drift (switch terms / error terms)

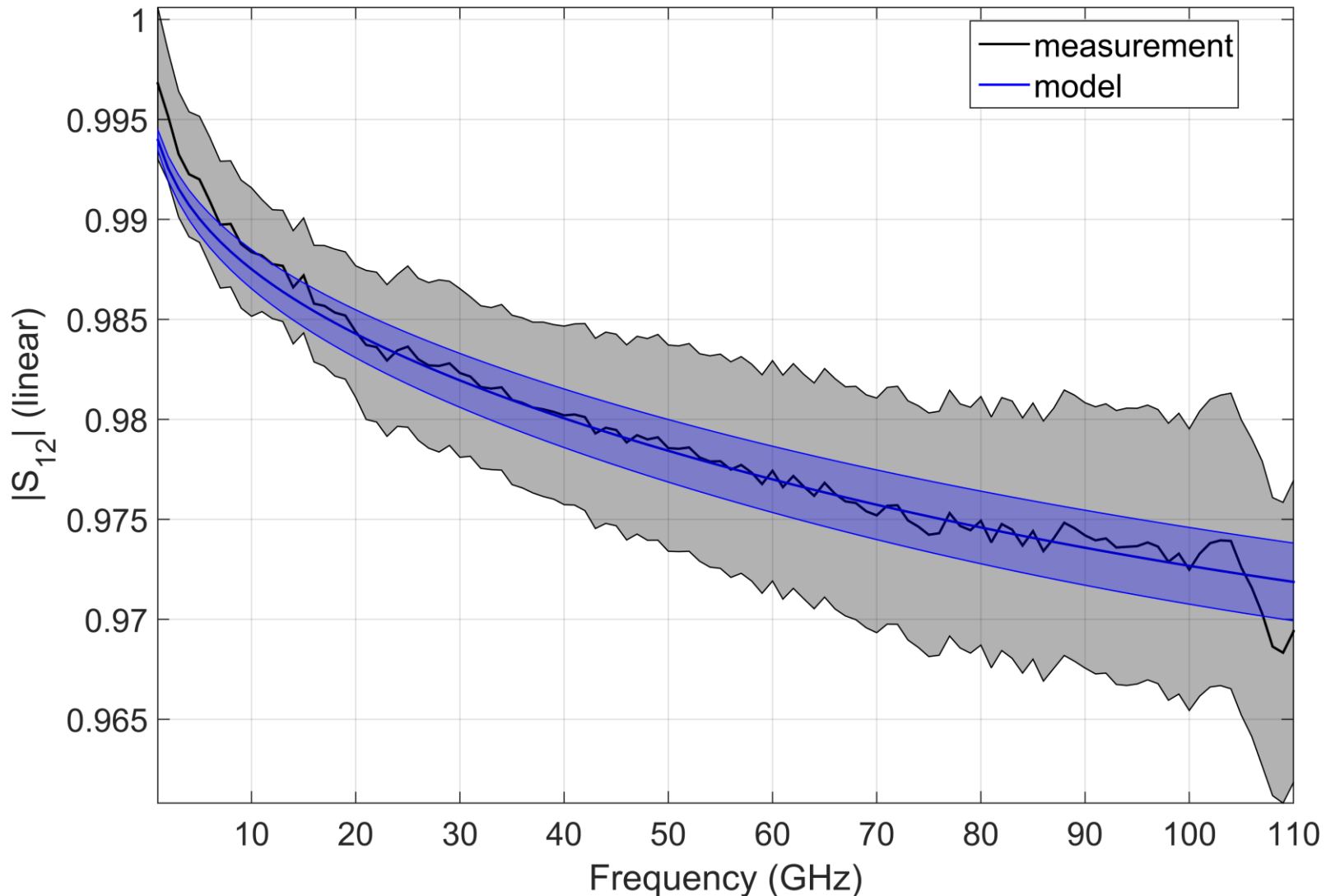
	Frequency (Hz)	Switch Term Drift (dB) ($k = 2$)	Directivity Drift (dB) ($k = 2$)	Tracking Drift Mag (dB) ($k = 2$)	Tracking Drift Phase ($^{\circ}$) ($k = 2$)	Symmetry Drift Mag (dB) ($k = 2$)	Symmetry Drift Phase ($^{\circ}$) ($k = 2$)	Match Drift (dB) ($k = 2$)	Isolation Drift (dB) ($k = 2$)
▶	0.000e+00	-35	-35	0.07	0.6	0.01	0.06	-35	-120
	10.000e+09	-35	-35	0.07	0.6	0.015	0.09	-35	-120
	10.001e+09	-35	-35	0.03	1	0.015	0.09	-35	-120
	20.000e+09	-35	-35	0.03	1	0.015	0.09	-35	-120
	20.001e+09	-35	-35	0.06	1.4	0.015	0.09	-35	-120
	30.000e+09	-35	-35	0.06	1.4	0.015	0.09	-35	-120
	30.001e+09	-50	-50	0.03	0.8	0.015	0.12	-50	-120
	130.000e+09	-50	-50	0.03	0.8	0.01	1.5	-50	-120
*									



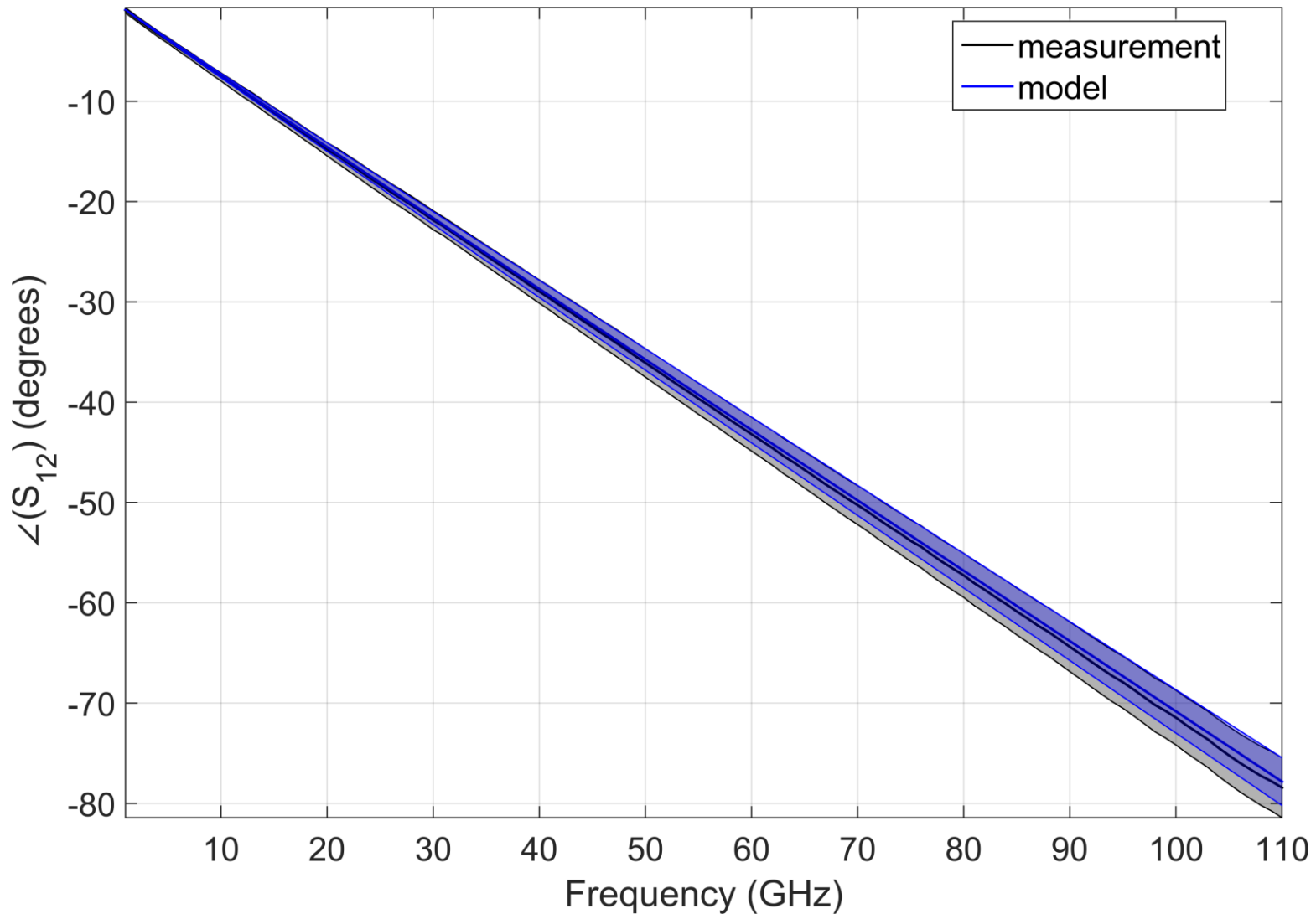
- VNA-Linearität: Unsicherheit in Betrag 0.01 dB und in Phase 0.066°
- Kontakt-Wiederholbarkeit (experimentell überprüft): besser als -50 dB
- Kabelbewegung (nur an Port 2 zu berücksichtigen)
- Unsicherheiten der Kalibrierstandards
 - Multiline-TRL-Kalibrieralgorithmus: keine Standarddefinitionen bis auf die Leitungslängen erforderlich („Selbstkalibrierung“)!
 - „rekursiver Ansatz“ ermöglicht die Propagation von Modellparametern und die anschließende Beaufschlagung der Rohmessdaten mit Unsicherheiten
- DUT-Unsicherheit in Transmission (Annahme für Übersprechen in dB)

Frequency (GHz)	Reflection Mag. (lin.)			
	0.0	0.2	0.8	1.0
0	-60	-60	-60	-60
20	-55	-55	-40	-40
50	-50	-50	-35	-35
130	-45	-45	-20	-20

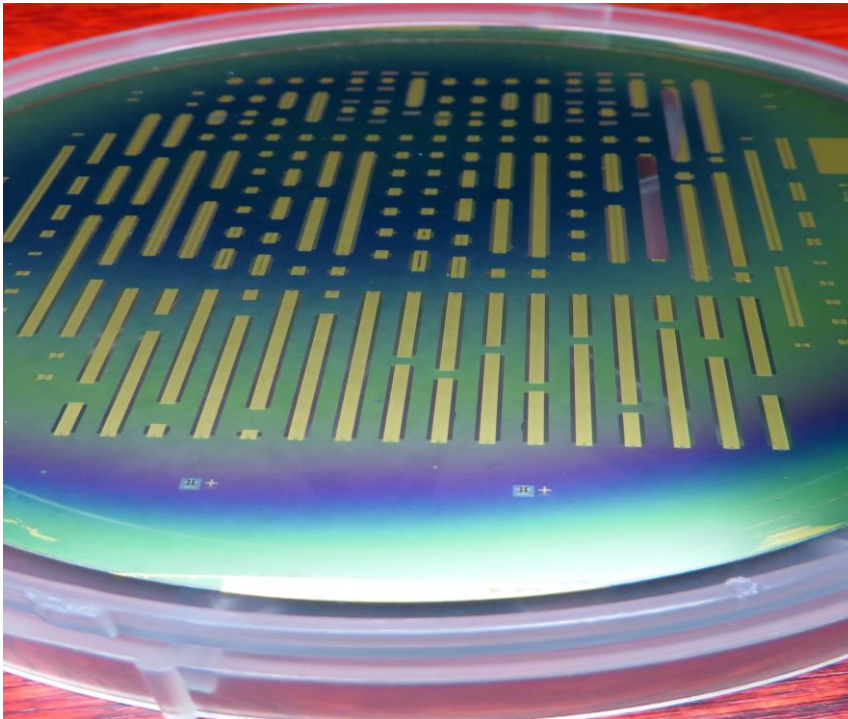
|S₁₂| Messung und Modell: 500 μm Thru



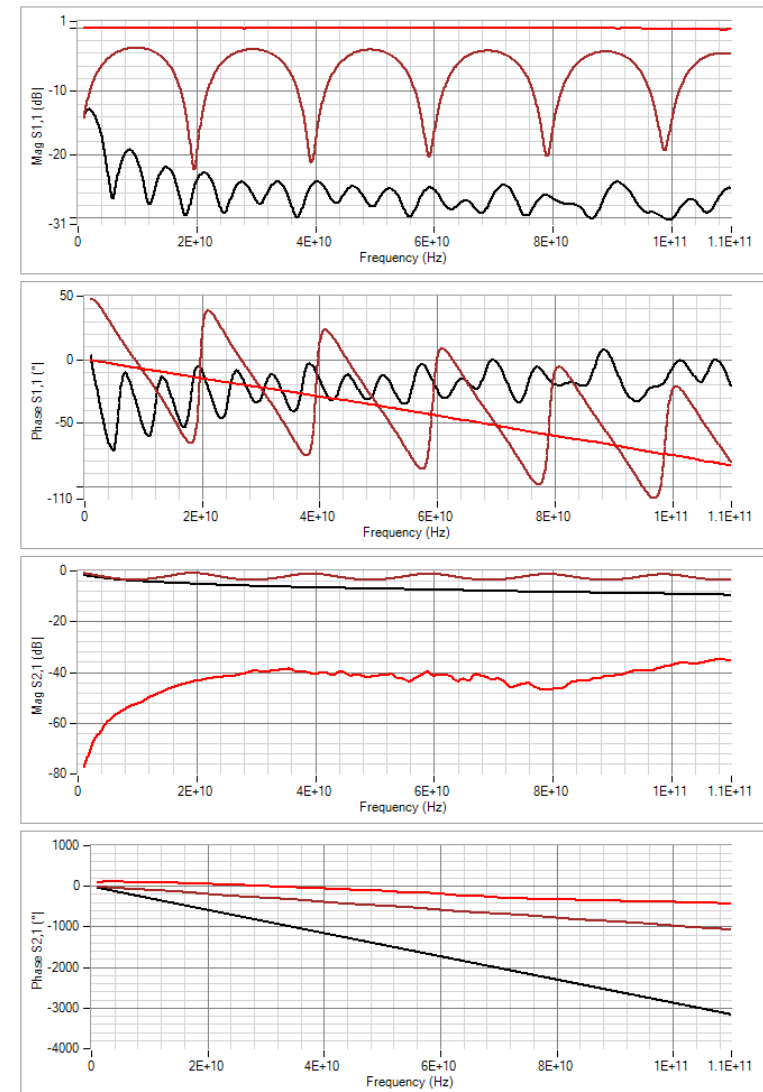
<(S₁₂) Messung und Modell: 500 µm Thru



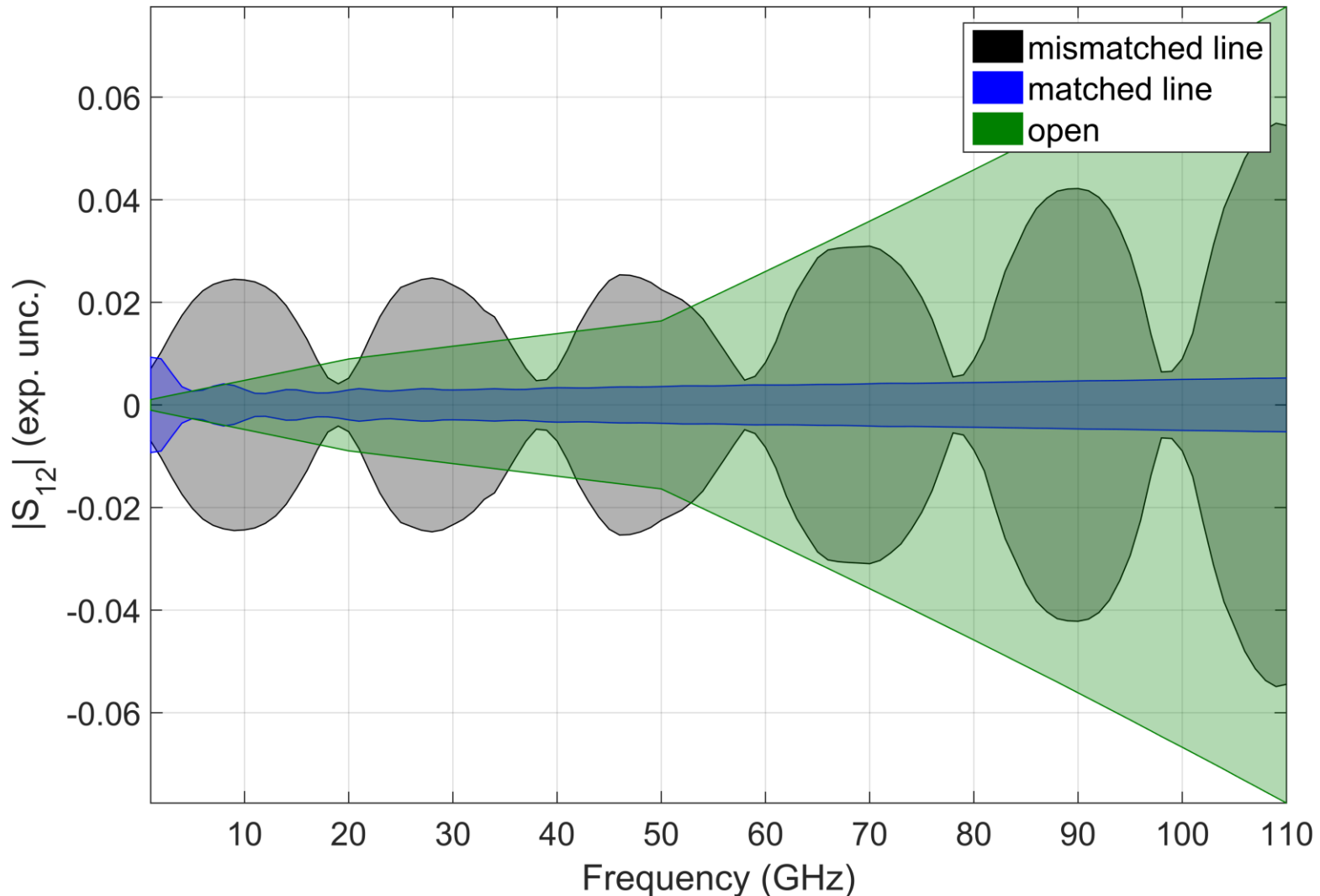
Auswahl von drei Membran-DUTs zur Verifikation



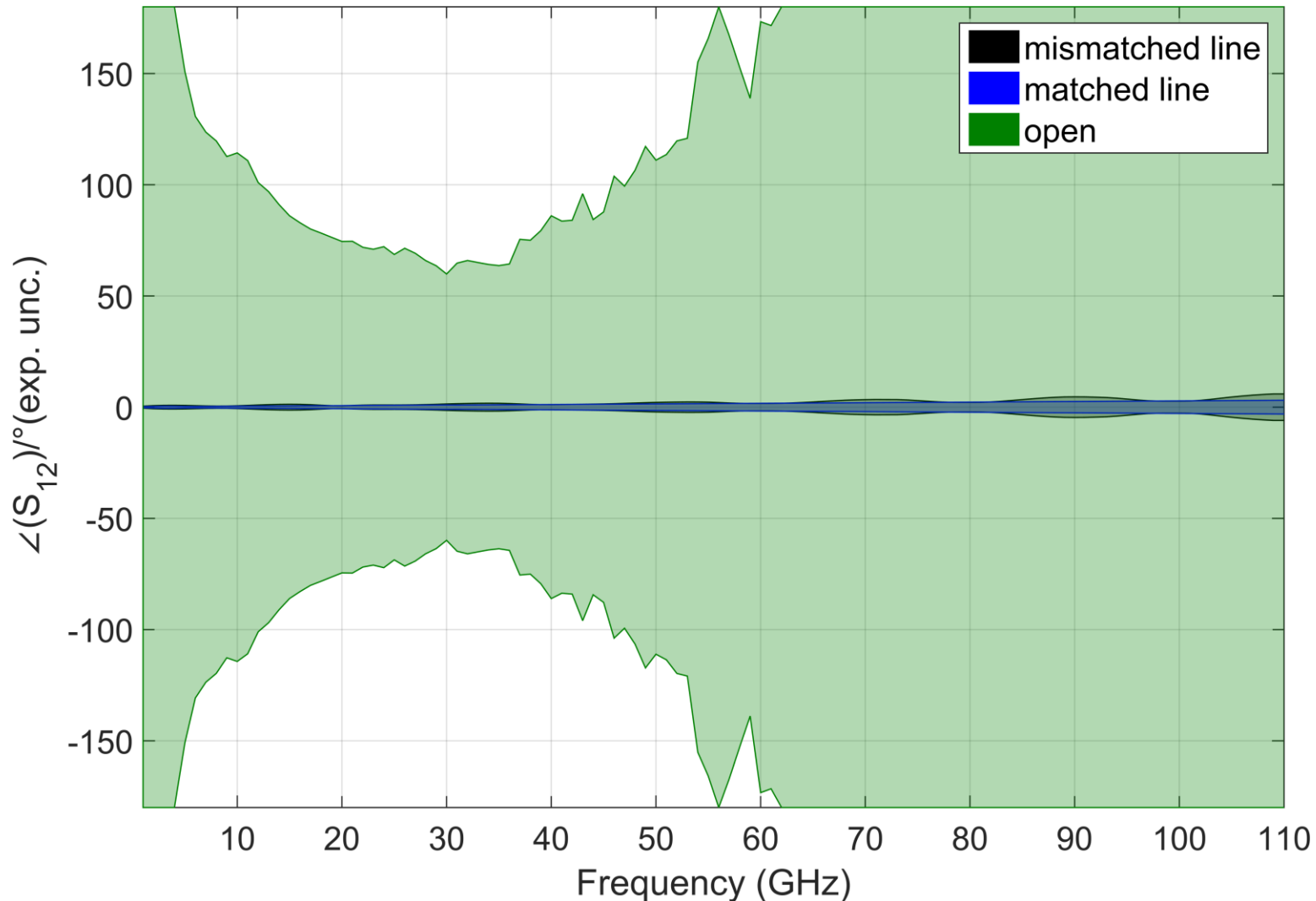
- — Matched Line (Länge 20190 μm)
- — Mismatched Line (Länge 7065 μm)
- — 2-Port-Open



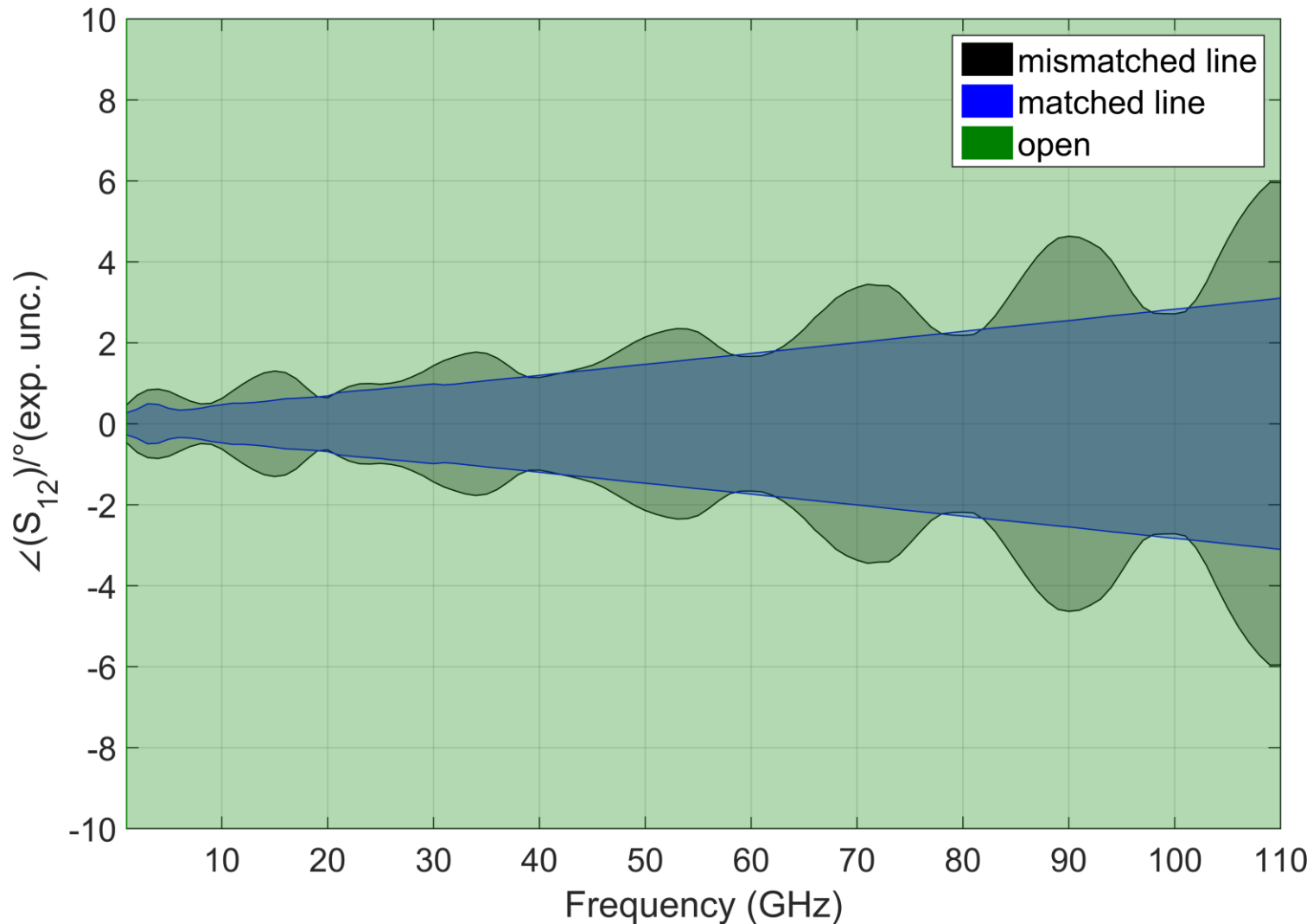
|S₁₂| Erweiterte Messunsicherheit für 3 DUTs



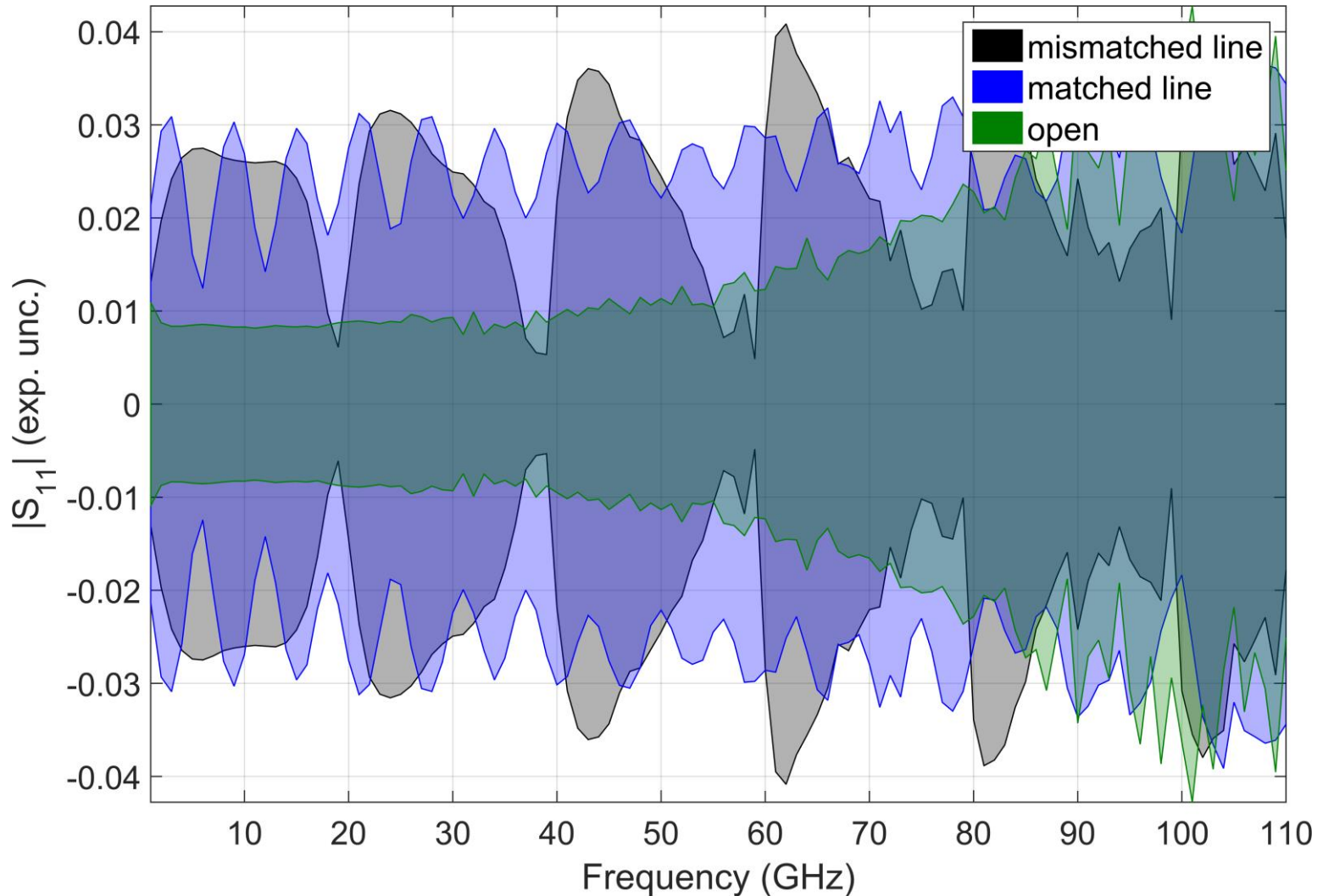
<(S12) Erweiterte Messunsicherheit für 3 DUTs



<(S12) Erweiterte Messunsicherheit für 3 DUTs



|S₁₁| Erweiterte Messunsicherheit für 3 DUTs



- Weltweit erstmalig Rückführung für planare DUTs in Membran-Technologie demonstriert
- Unsicherheitsbudget beinhaltet Gerätefehler, Wiederholbarkeit und Kalibrierstandardunsicherheiten.
- Erweitertes Unsicherheitsintervall für gemessene S-Parameter umschließt vollständig die Modellwerte.
- Komplexität des Problems kann nur mit Software gehandhabt werden (hier: Umsetzung in Matlab).
- Die Methodik kann auf andere Substrate und Konfigurationen übertragen werden.

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

- S. Zinal AG 2.23
- T. Probst AG 2.23
- K. Kuhlmann AG 2.22/2.23
- D. Schubert AG 2.22/2.23
- T. Dziomba AG 5.25
- D. Schulz AG 5.34

Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG

- Gerd Hechtfisher
- Jens Leinhos

Ferdinand-Braun-Institut für Höchstfrequenztechnik

- Franz-Josef Schmückle
- Wolfgang Heinrich

Acknowledgement

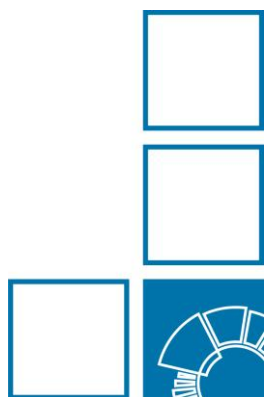
The authors acknowledge support by the European Metrology Programme for Innovation and Research (EMPIR) Project 14IND02 "Microwave measurements for planar circuits and components".

The EMPIR programme is co-financed by the Participating States and from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme.



The EMPIR initiative is co-funded by the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme and the EMPIR Participating States

Vielen Dank!



**Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Braunschweig and Berlin**

Bundesallee 100
38116 Braunschweig

Dr. Uwe Arz

Telefon: 0531 592-2297

E-Mail: uwe.arz@ptb.de