

2-PORT CALIBRATION AND MEASUREMENT WITH QUASIOPTICAL SETUP IN THE E-BAND FOR AUTOMOTIVE APPLICATIONS

Dr. Frank Gumbmann,
Dr. Gerhard Rösel
18.05.2022

ROHDE & SCHWARZ

Make ideas real



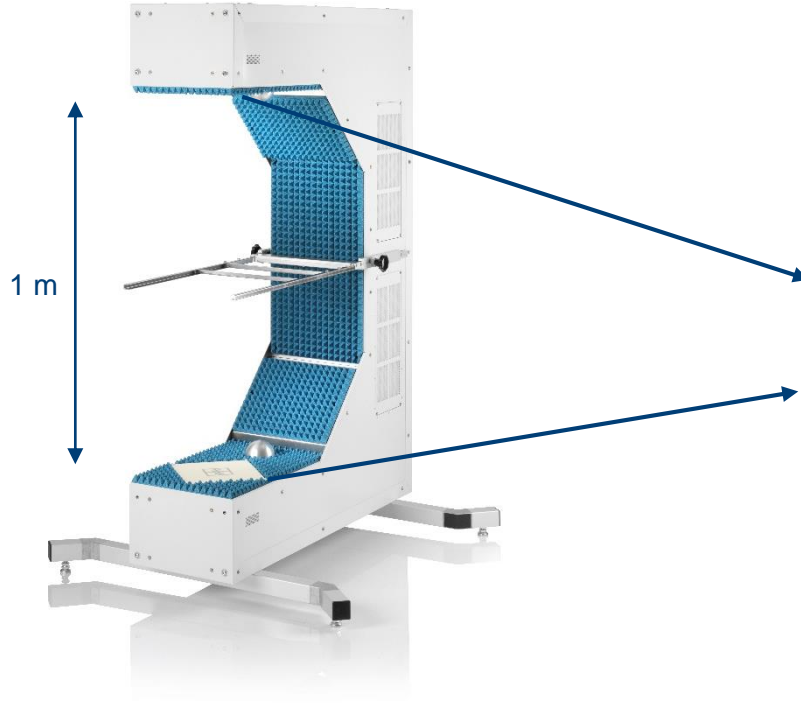
INHALT

- Motivation
- Quasioptischer Messplatz im E-Band (60 GHz – 90 GHz)
- Kalibrierung
- Reproduzierbarkeit und mögliche Fehlerquellen
- Vergleich Messung quasioptischer Messplatz und Simulation
- Zusammenfassung

MOTIVATION

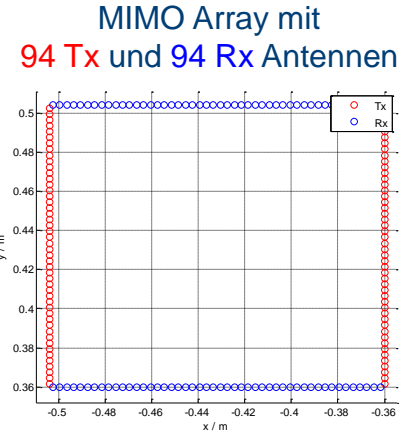
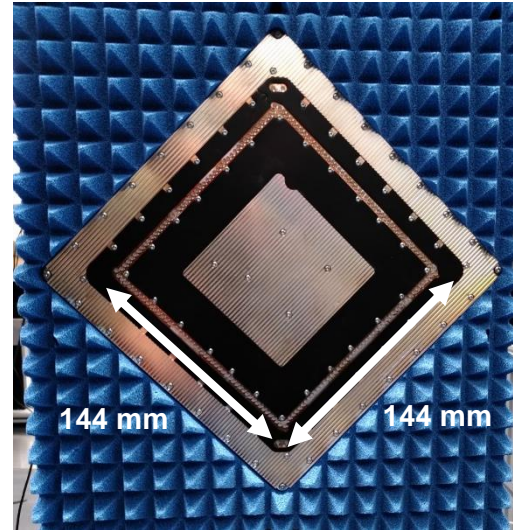
R&S QAR50 Automotive Tester

- MIMO-Bildgebungssystem von 76 GHz – 81 GHz in Reflexion und Transmission



QAR50-Frontend:

MIMO Array mit integriertem digitalen Backend

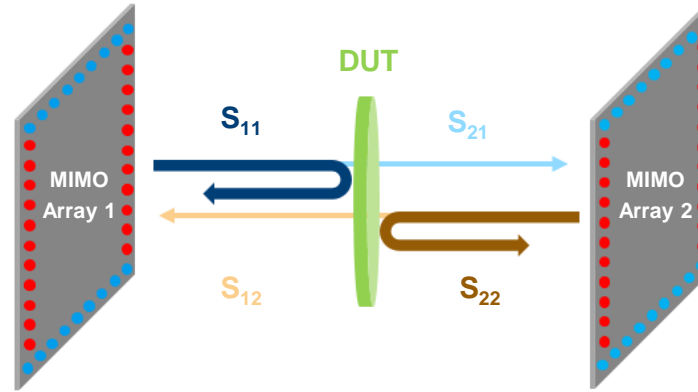


MOTIVATION

R&S QAR50 Automotive Tester



- MIMO-Bildgebungssystem von 76 GHz – 81 GHz in Reflexion und Transmission → „bildgebender 2-Tor-VNA“

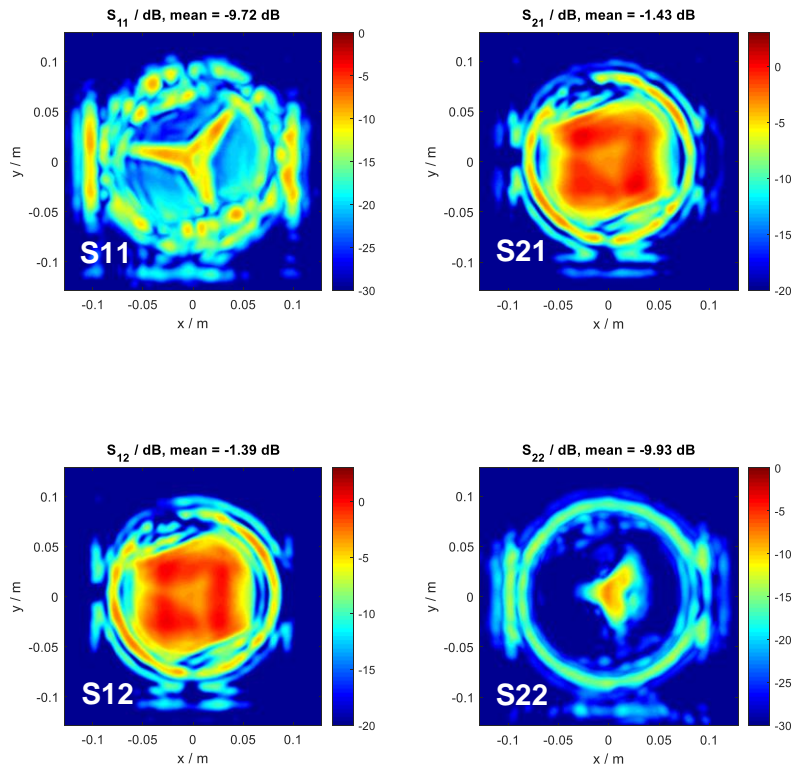


- Ziel:
 1. Vermessung von Kfz-Radomen, Kunststoffteilen in Reflexion und Transmission → mittlere **Reflektivität** und **Dämpfung** von
 - 76 GHz – 77 GHz (Kfz-Radar: LRR- und MRR-Sensoren)
 - 76 GHz – 81 GHz (Kfz-Radar: Gen5 SRR-Sensoren)
 2. Homogenität des Bauteils → Transmissionsphase

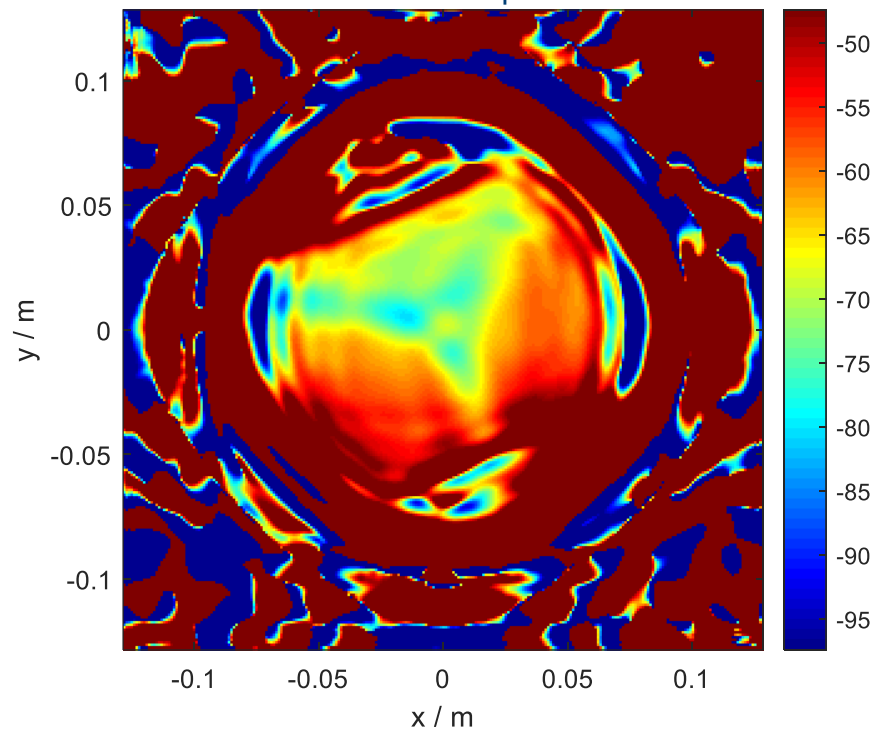
QAR50-MESSUNG: RADOM 1



Betrag in dB, Reflexion und Transmission



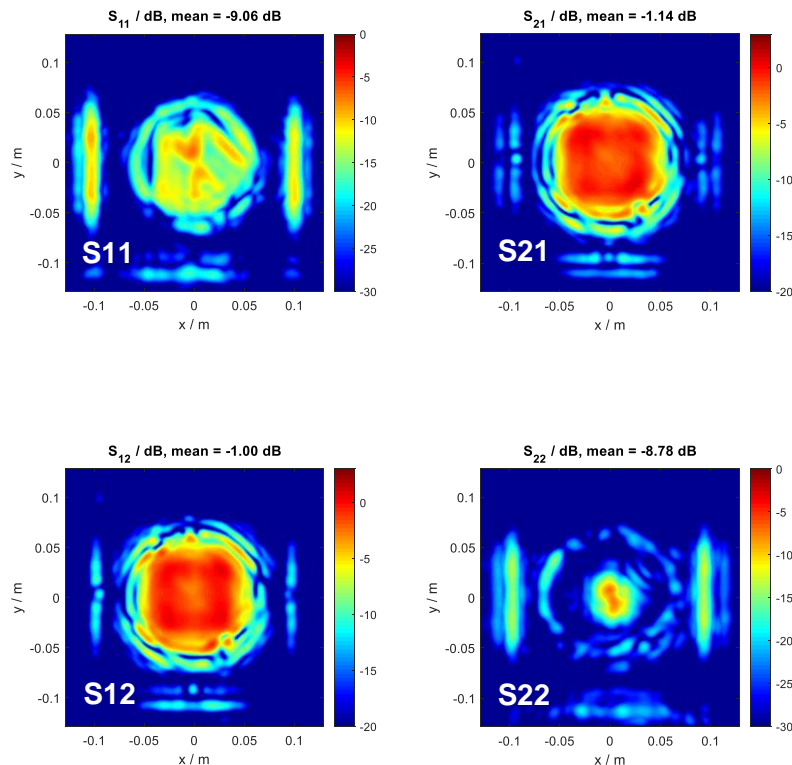
Transmissionsphase



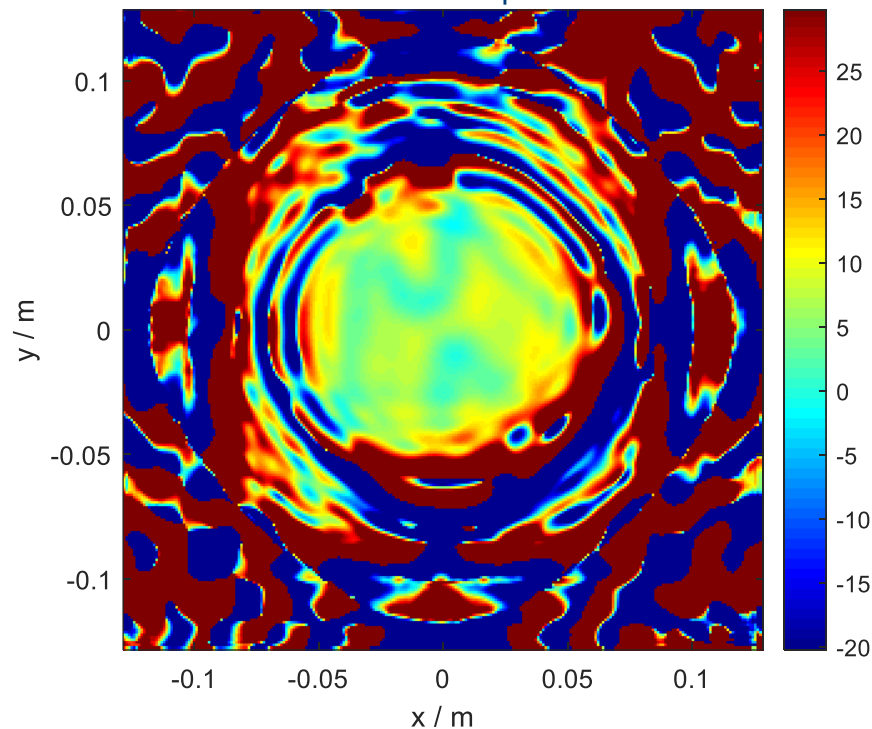
QAR50-MESSUNG: RADOM 2



Betrag in dB, Reflexion und Transmission



Transmissionsphase

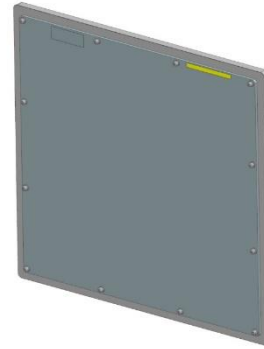


MOTIVATION

R&S QAR50 Automotive Tester



- Verifikationsstandard für Bildgebungssystem → Ist der von QAR50 ermittelte Reflexions- und Dämpfungswert korrekt? → Verifikationskit bestehend aus Kunststoffplatten

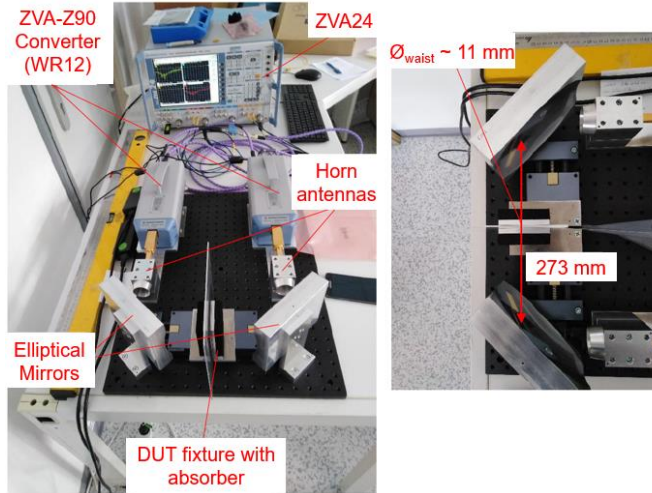


- Verifikationsstandard muss von unabhängigen Messsystem charakterisiert werden → quasioptischer Messplatz

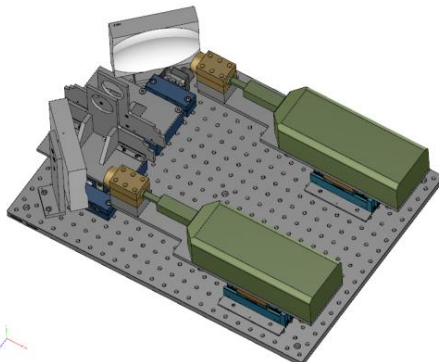
INHALT

- Motivation
- Quasioptischer Messplatz im E-Band (60 GHz – 90 GHz)
- Kalibrierung
- Reproduzierbarkeit und mögliche Fehlerquellen
- Vergleich Messung quasioptischer Messplatz und Simulation
- Zusammenfassung

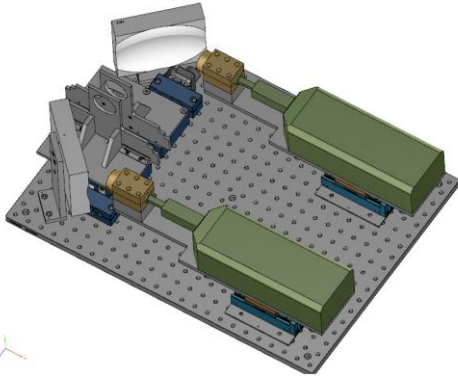
QUASIOPTISCHER MESSPLATZ IM E-BAND



1. Einstellungen am Netzwerkanalysator (typisch):
 - 56,7175 GHz bis 92,540 GHz
 - Frequenzschrittweite: 17,5 MHz \rightarrow 2048 Messpunkte
 - Messbandbreite: 1 kHz eingestellt
2. Messung Kalibrierstandards
3. Messung des DUT
4. Kalibrierung der Messdaten mit nachträglicher Zeitbereichsfilterung (Time Gating)



QUASIOPTISCHER MESSPLATZ IM E-BAND



Elliptischer Spiegel:
Brennweite $F = 67,7 \text{ mm}$

DUT mit Dicke d und ϵ_R

$F = 67,7 \text{ mm}$

$d_{\text{Spiegel}} = 273,1 \text{ mm}$

Eingangsdistanz:
 $d_{\text{in}} \sim 127,85 \text{ mm}$

$d_{\text{out}} = d_{\text{in}}$

Antenne mit Tailen-
radius @ 75 GHz:
 $w_{\text{Taille,Horn}} \sim 5 \text{ mm}$

Tailenradius bei
DUT-Position @ 75 GHz:
 $w_{\text{Taille,DUT}} \sim 5,4 \text{ mm}$

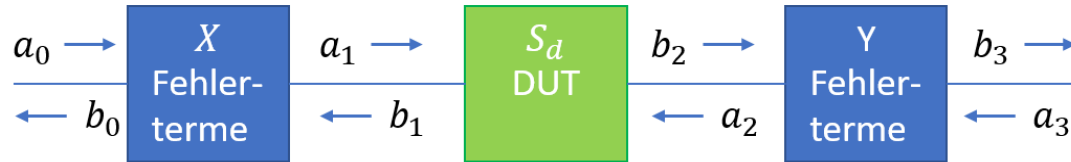
$w_{\text{Taille,Horn}}$

INHALT

- Motivation
- Quasioptischer Messplatz im E-Band (60 GHz – 90 GHz)
- **Kalibrierung**
- Reproduzierbarkeit und mögliche Fehlerquellen
- Vergleich Messung quasioptischer Messplatz und Simulation
- Zusammenfassung

TRM-KALIBRIERUNG DES QUASIOPTISCHEN MESSPLATZES

Fehlermodell (7-Term-Verfahren) für TRM-Kalibrierung



$$\begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} \\ X_{21} & X_{22} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} S_{d11} & S_{d12} \\ S_{d21} & S_{d22} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix}$$

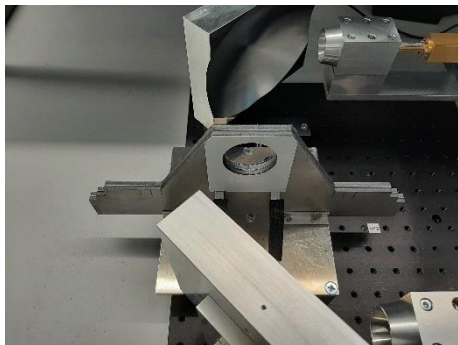
- Selbstkalibrierverfahren TRM (THRU, REFLECT, MATCH)
- Reflexionsstandard REFLECT muss nicht bekannt sein. Wird im Rahmen des TRM-Algorithmus ermittelt.
- Kalibrierung kann einfach für die Fertigung umgesetzt werden.

Literatur zum TRM-Verfahren:

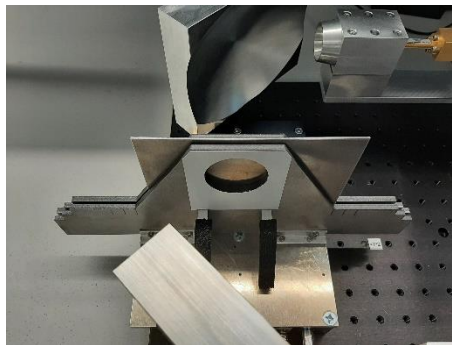
- [1] H. -. Eul and B. Schiek, "A generalized theory and new calibration procedures for network analyzer self-calibration," in IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 39, no. 4, pp. 724-731, April 1991
- [2] U. Stumper, "A simple evaluation procedure of the TAN calibration and the influence of non-ideal calibration elements on VNA S-parameter measurements", in Adv. Radio Sci., 5, pp. 5-12, 2007.

TRM-KALIBRIERUNG DES QUASIOPTISCHEN MESSPLATZES

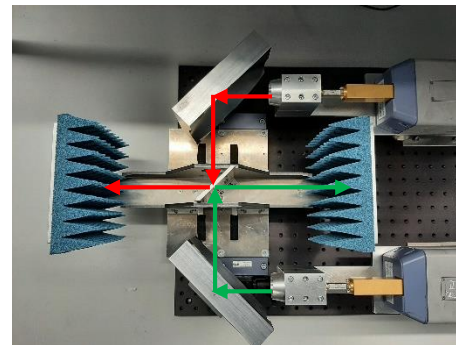
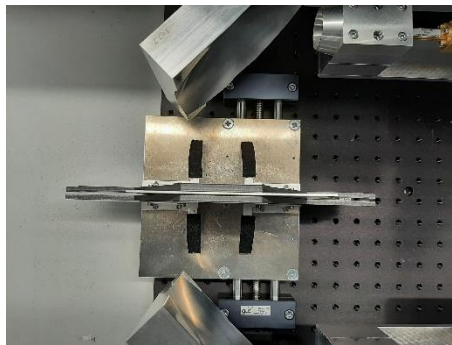
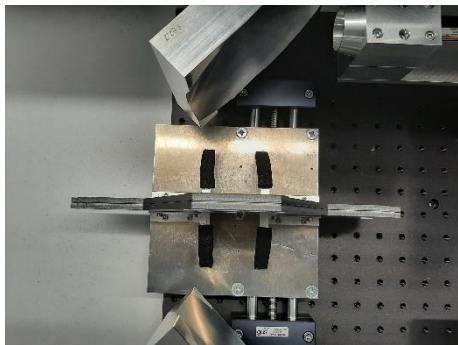
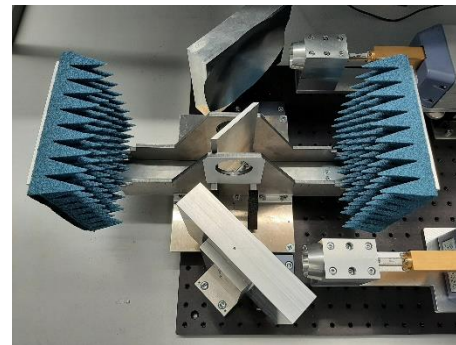
Messung THRU



Messung REFLECT
Metallplatte mit $d = 2 \text{ mm}$



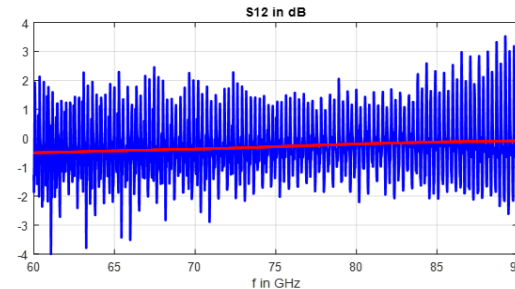
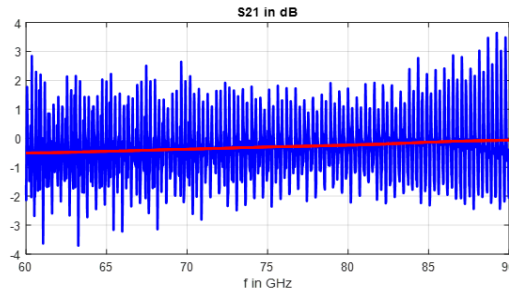
Messung MATCH



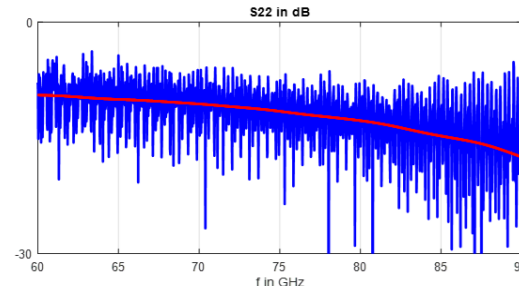
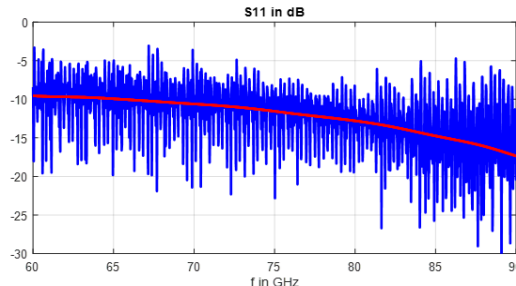
TIME GATING DER KALIBRIERTEN MESSDATEN

- Freiraum-Mehrwegepfade und Mehrfachreflexionen werden durch TRM-Verfahren nicht vollständig eliminiert
- Time Gating bzw. Filterung der Daten im Zeitbereich (siehe folgende Folie)

Messung einer Teflon (PTFE) Platte mit $d = 1$ mm
Frequenzbereich 56,715 GHz bis 92,54 GHz mit 2048 Frequenzpunkten



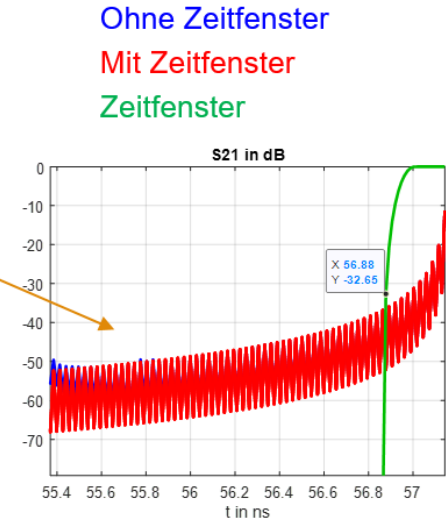
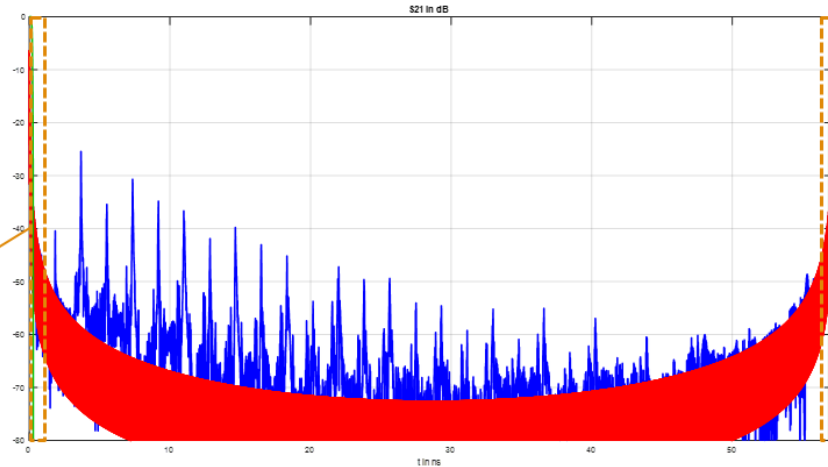
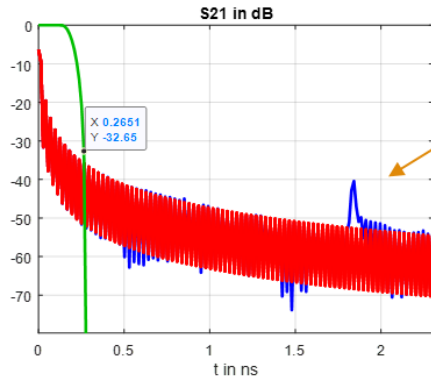
Ohne Zeitfenster
Mit Zeitfenster



TIME GATING DER KALIBRIERTEN MESSDATEN

- Freiraum-Mehrwegepfade und Mehrfachreflexionen werden durch TRM-Verfahren nicht vollständig eliminiert
- Time Gating bzw. Filterung der Daten im Zeitbereich \rightarrow Zeitfenster mit $N_{\text{bin}} = 31$ ($t_{\text{TimeGate}} = 0,84$ ns)
- Anwendung des Verfahrens „post-gate renormalization“ (siehe folgende Folie)

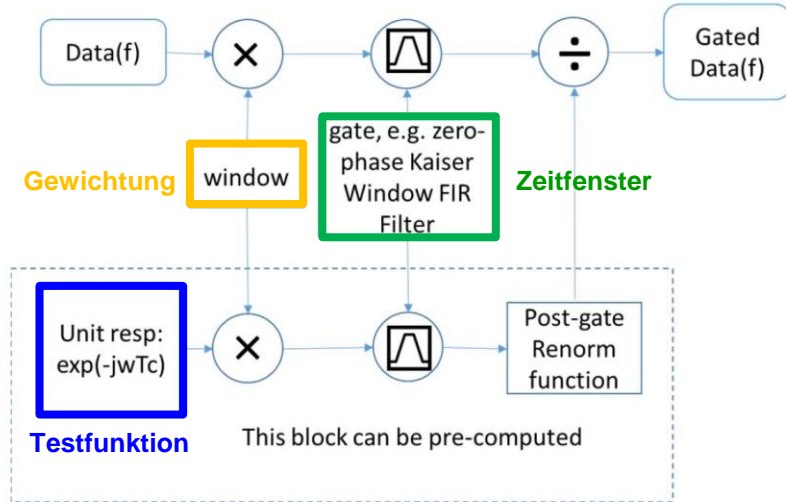
Messung einer Teflon (PTFE) Platte mit $d = 1$ mm
Frequenzbereich 56,715 GHz bis 92,54 GHz mit 2048 Frequenzpunkten



TIME GATING „POST-GATE RENORMALIZATION“

Kalibrierte Messdaten
vor Gating

Kalibrierte Messdaten
nach Gating



Ablaufdiagramm der Zeitbereichsfilterung mit „post-gate normalization“ [3]

Gewichtung : Vorabgewichtung, entfällt hier → Einheitsfunktion

Zeitfenster : „raised cosine“ Fenster

Testfunktion : Einheitsfunktion → $T_c = 0$

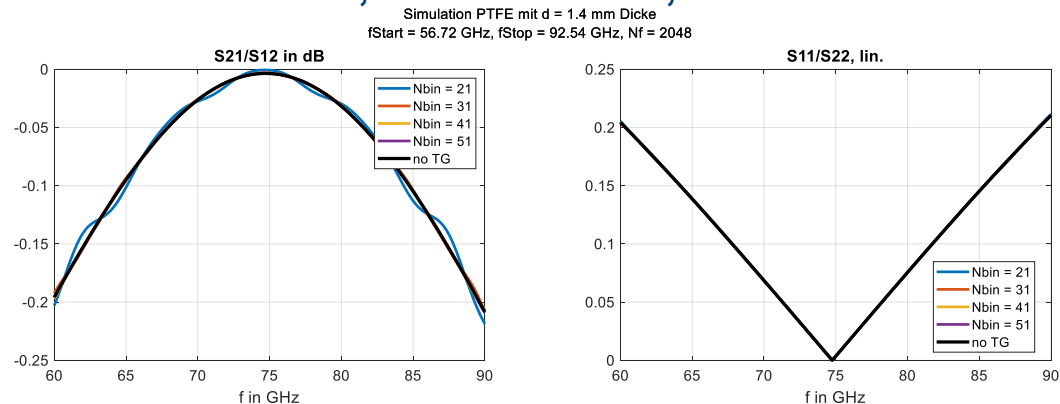
- Zeitbereichsfilterung ist analog zu FIR (Finite Impulse Response) Glättungsfilter im Frequenzbereich → Verzerrungen an den Frequenzrändern, welche als Einschwingverhalten des äquivalenten Glättungsfilters gedeutet werden können
- Reduzierung des Effekts durch Anwendung des Verfahrens „post-gate renormalization“ (siehe links)

[3] Z. Chen and Z. Xiong, “Mitigation of Band Edge Effects in Fourier Transform Based Time Domain Gating”, in 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), 2019, pp. 1-5

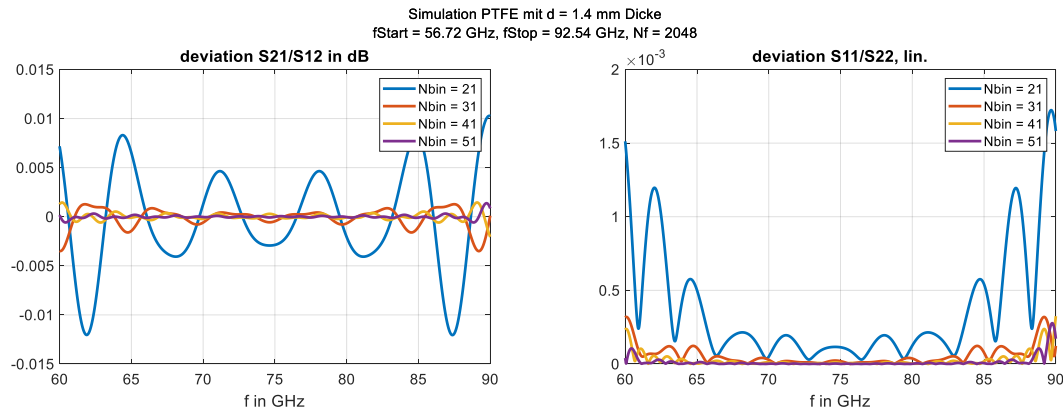
EINFLUSS TIME GATING

ZEITBEREICHSFILTERUNG SIMULIERTER DATEN, PTFE MIT $D = 1,4$ MM:

Simulierte Streuparameter
ohne Zeitfenster (no TG:
schwarze Kurve) und mit
Zeitfenster



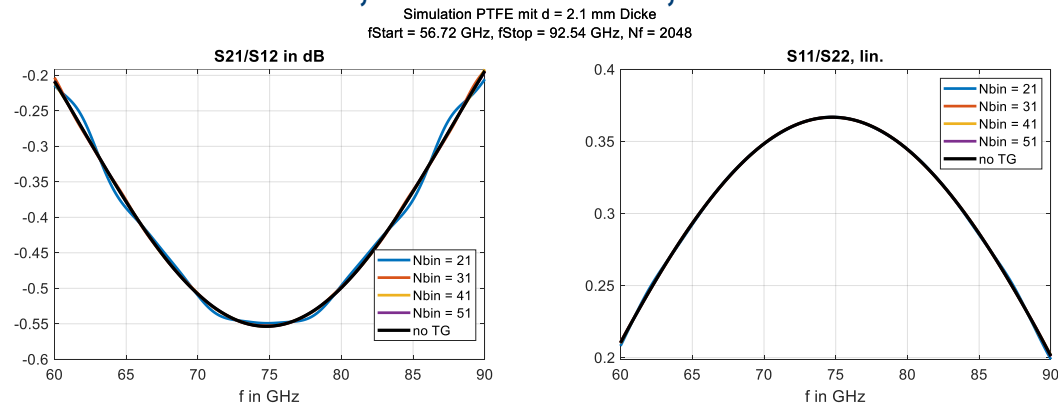
Abweichung zwischen zeitlich
gefensterten Simulationsdaten
und Referenzsimulation



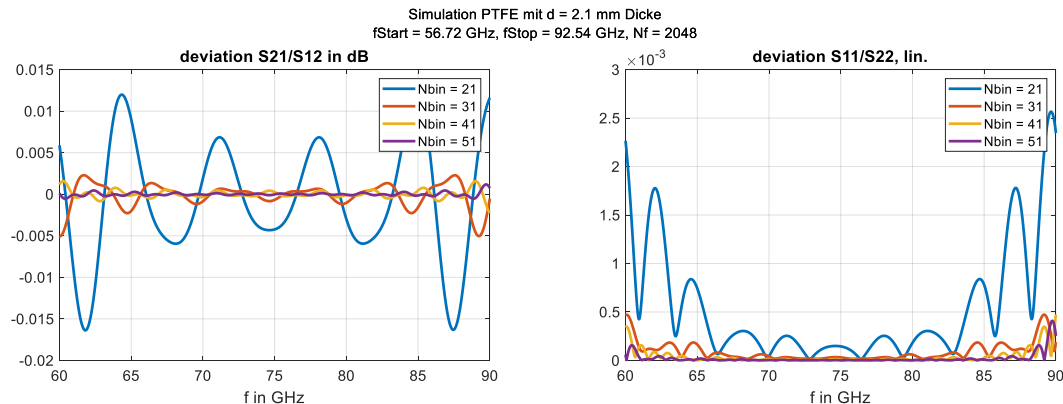
EINFLUSS TIME GATING

ZEITBEREICHSFILTERUNG SIMULIERTER DATEN, PTFE MIT D = 2,1 MM:

Simulierte Streuparameter
ohne Zeitfenster (no TG:
schwarze Kurve) und mit
Zeitfenster

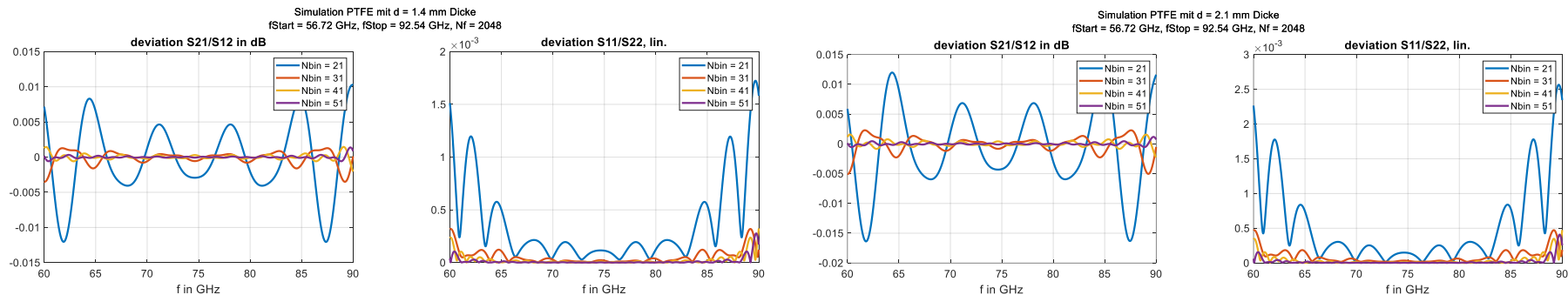


Abweichung zwischen zeitlich
gefensterten Simulationsdaten
und Referenzsimulation

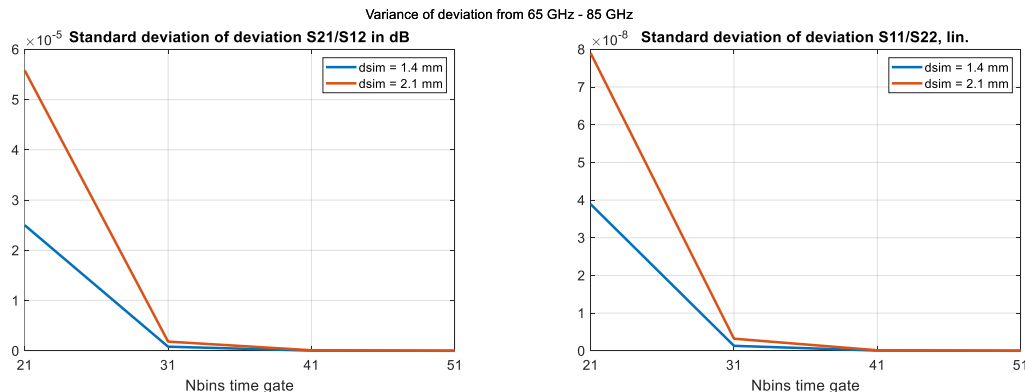


EINFLUSS TIME GATING

ZEITBEREICHSFILTERUNG SIMULIERTER DATEN, PTFE MIT D = 2,1 MM:



Standardabweichung der Abweichung zwischen zeitlich gefensterten Simulationsdaten und Referenzsimulation



INHALT

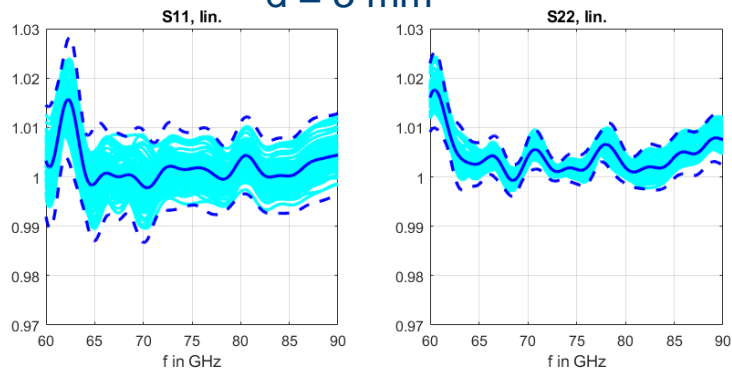
- Motivation
- Quasioptischer Messplatz im E-Band (60 GHz – 90 GHz)
- Kalibrierung
- **Reproduzierbarkeit und mögliche Fehlerquellen**
- Vergleich Messung quasioptischer Messplatz und Simulation
- Zusammenfassung

MESSUNGEN ZUR REPRODUZIERBARKEIT:

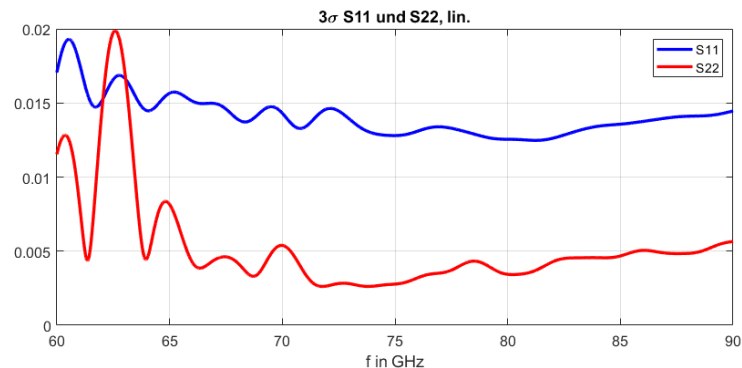
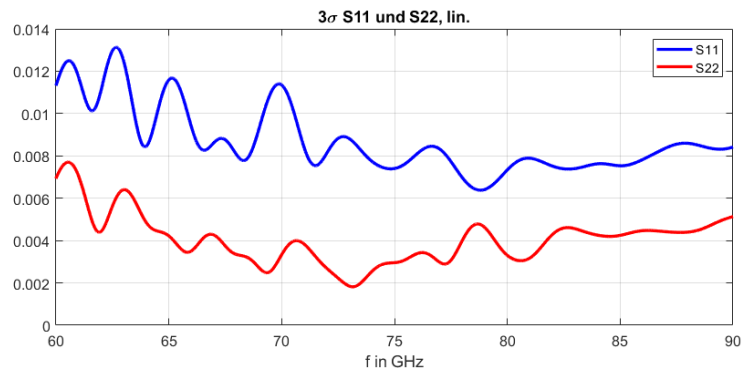
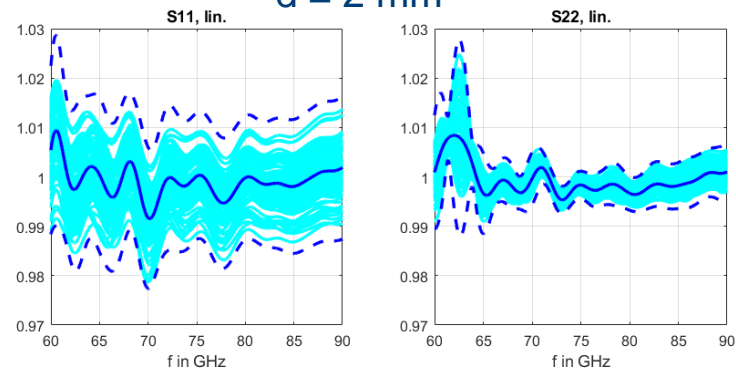
- 10 x Kalibriermessungen mit Neupositionierung der Standards
- 10 x DUT Messungen mit Neupositionierung des DUT
- Kalibrierung der 10 DUT Messungen mit allen Kalibriermessungen → 100 Messkurven
- DUT:
 1. Metallplatte mit $d = 3 \text{ mm}$
 2. Metallplatte mit $d = 1 \text{ mm}$
 3. PVC Platte mit $d = 3 \text{ mm}$ (Literatur: $\epsilon_R = 2,74 - 2,93$, $\tan\delta = 9,5 \cdot 10^{-3} - 10 \cdot 10^{-3}$)
 4. Macor (Glaskeramik) Platte mit $d = 5 \text{ mm}$ (Literatur: $\epsilon_R = 5,67$, $\tan\delta = 15 \cdot 10^{-3}$)

DUT: METALL PLATTEN MIT 1 MM UND 3 MM DICKE

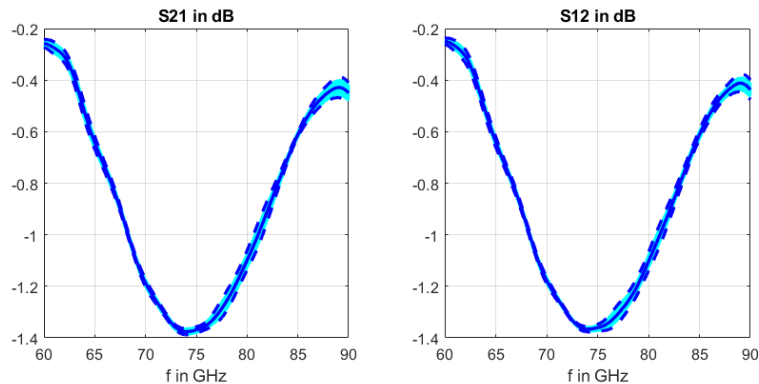
d = 3 mm



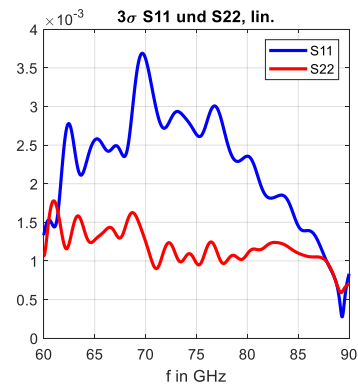
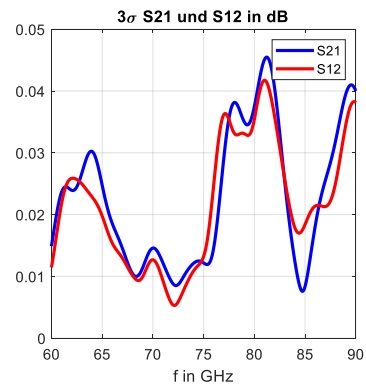
d = 2 mm



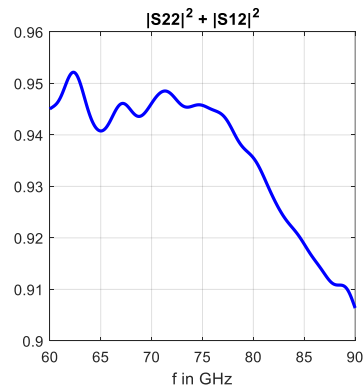
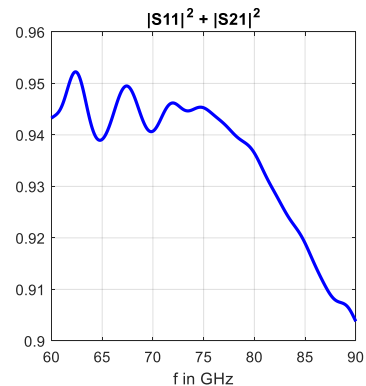
DUT: PVC PLATTE MIT 3 MM DICKE



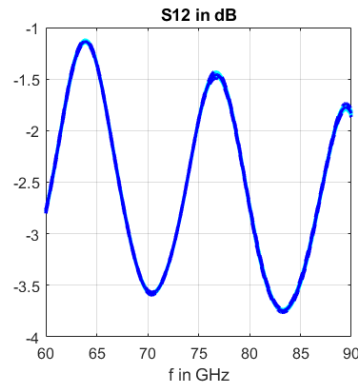
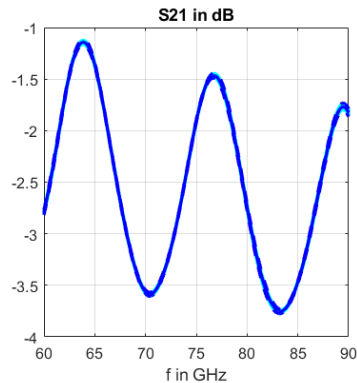
3σ



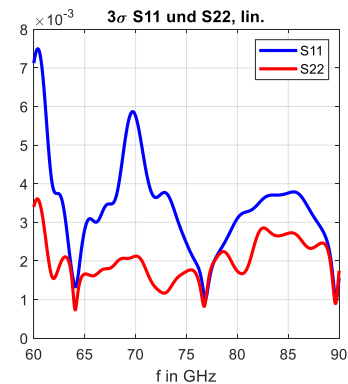
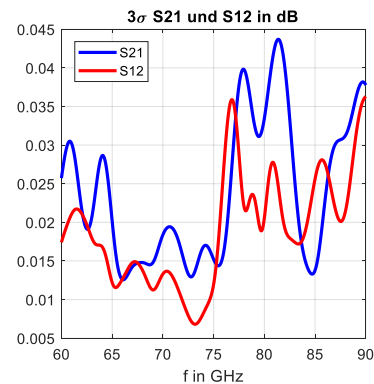
Energierhaltung



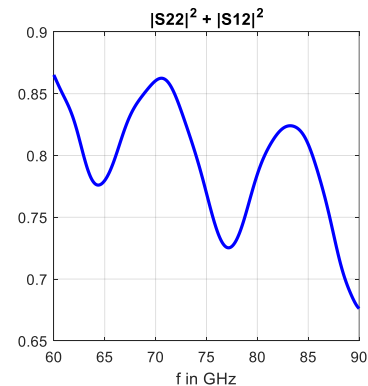
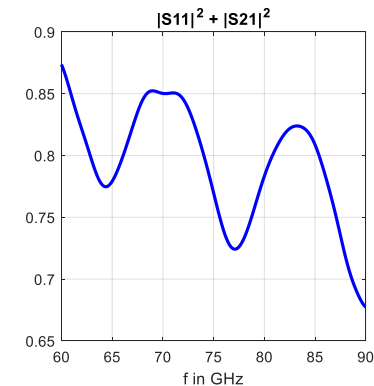
DUT: MACOR (GLASKERAMIK) PLATTE MIT 5 MM DICKE



3σ



Energierhaltung

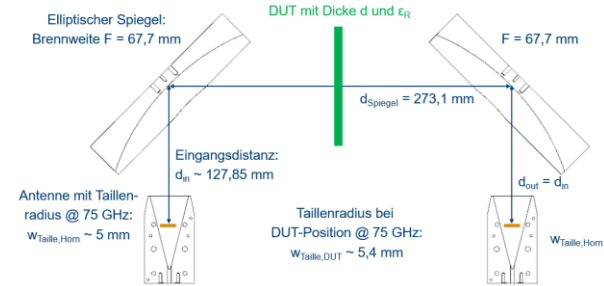


EINFLUSS DER DUT FEHLPLATZIERUNG

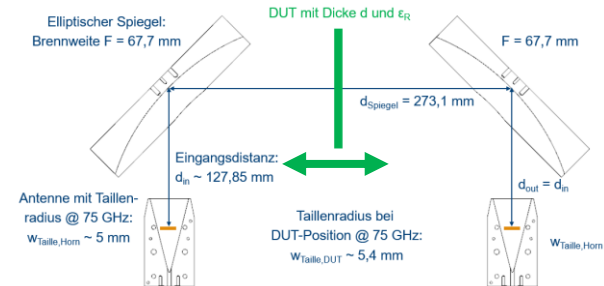
- Vergleich von zwei Setups
- Für beide Setups werden die identischen Kalibrierdaten verwendet.

- 1) Positionierung des DUT im Fokus → in der Mitte, zwischen beiden Spiegeln → default
- 2) Positionierung des DUT außerhalb des Fokus, Variation der DUT Position (2. Blende wurde abmontiert)

1) DUT im Fokus

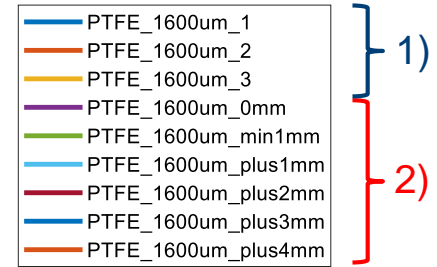
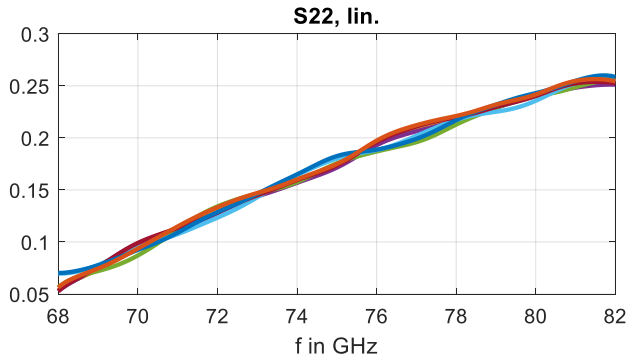
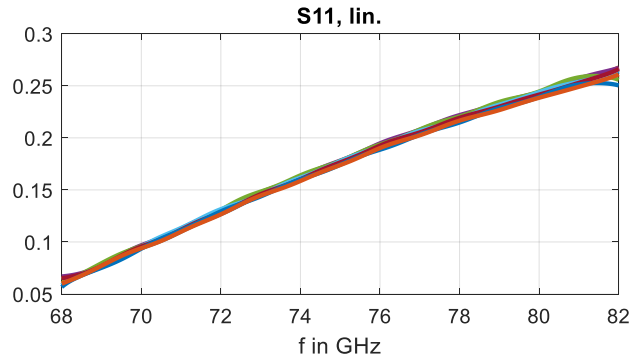
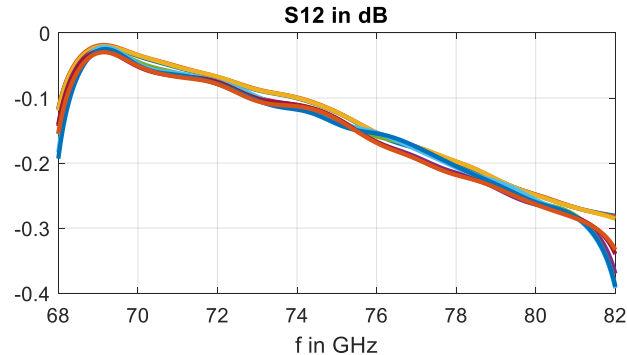
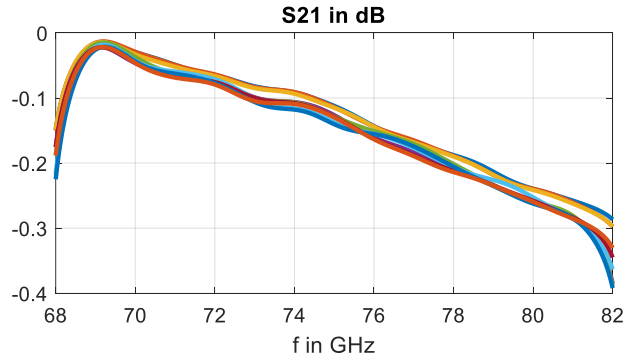


2) DUT außerhalb des Fokus



EINFLUSS DER DUT FEHLPLATZIERUNG: PTFE-PLATTE, D = 1,6 MM

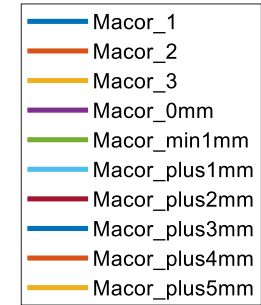
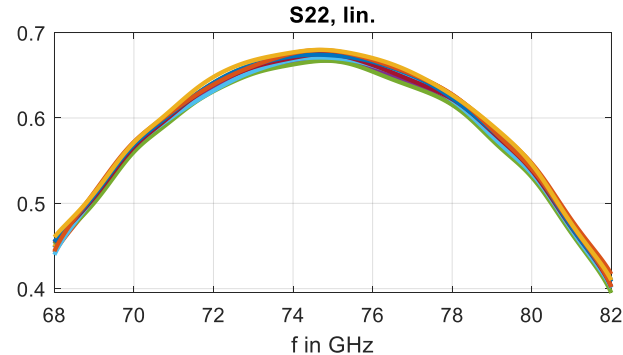
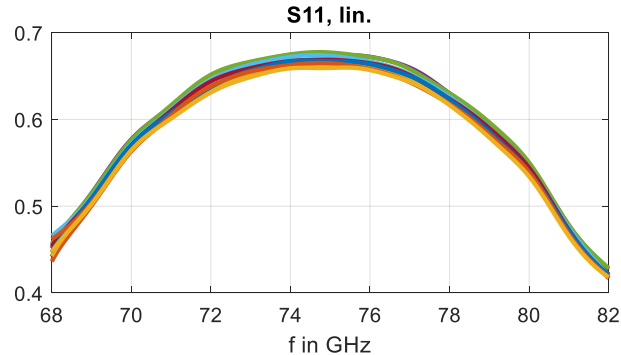
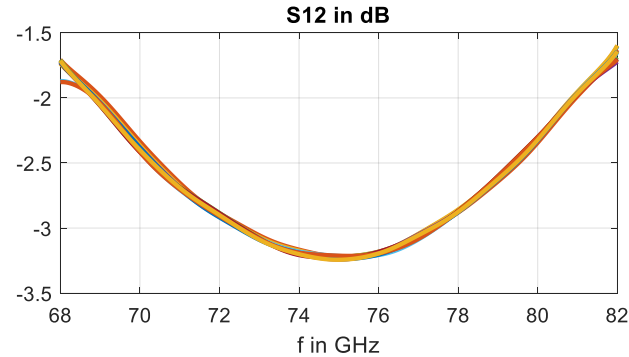
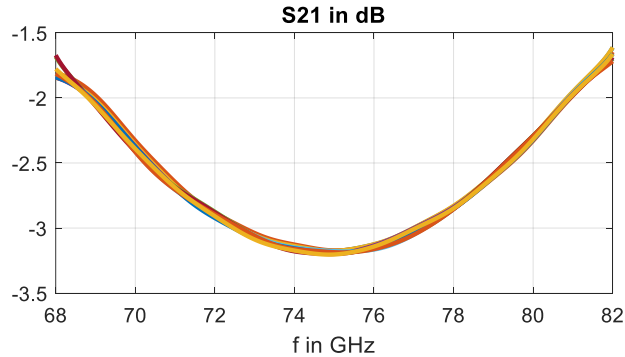
data: PTFE_1600um



- 1) Default Messung mit beiden Blenden
- 2) Messung ohne 2. Blende und mit Fehlpositionierung des DUT

EINFLUSS DER DUT FEHLPLATZIERUNG: MACOR-PLATTE (GLASKERAMIK), D = 3 MM

data: Macor



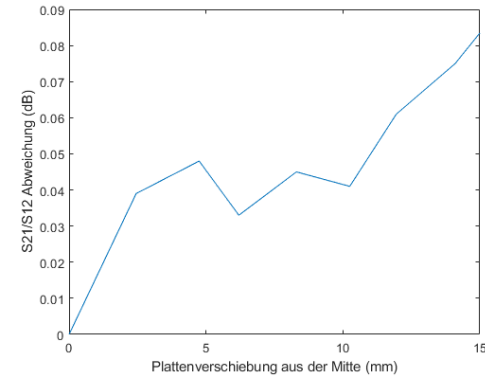
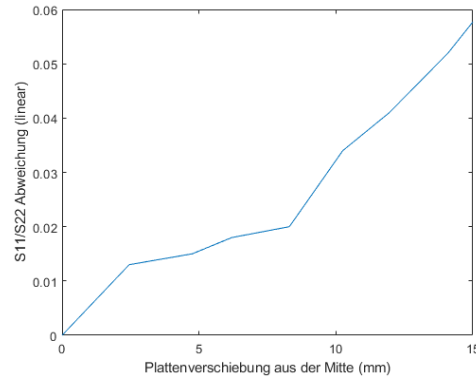
1)

2)

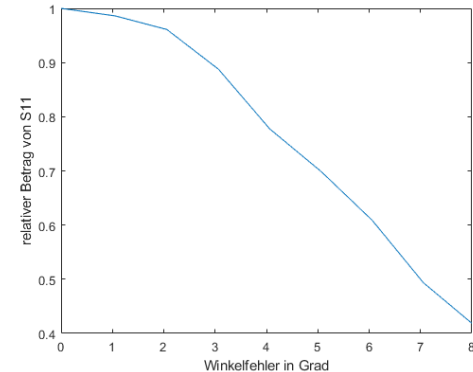
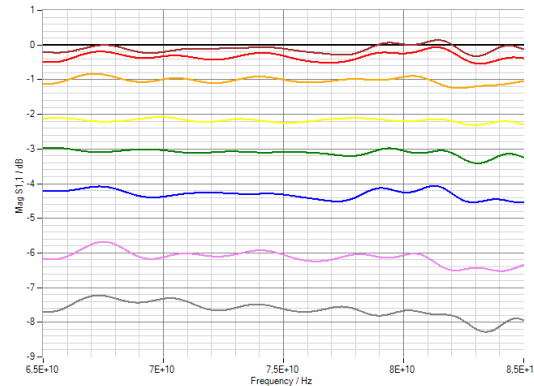
- 1) Default Messung mit beiden Blenden
- 2) Messung ohne 2. Blende und mit Fehlpositionierung des DUT

EINFLUSS DER DUT FEHLPLATZIERUNG:

DUT Fehlplatzierung:
Änderungen der Reflexion
und Dämpfung



DUT Verkipfung:
- Änderungen der Reflexion
- Änderung der Dämpfung
ist nicht signifikant ($\leq 0,03$ dB)



INHALT

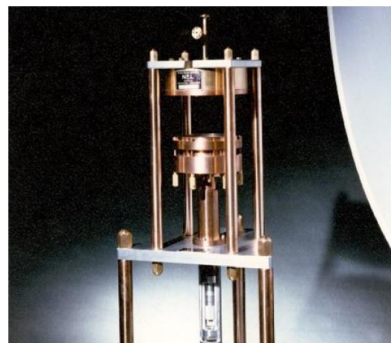
- Motivation
- Quasioptischer Messplatz im E-Band (60 GHz – 90 GHz)
- Kalibrierung
- Reproduzierbarkeit und mögliche Fehlerquellen
- Vergleich Messung quasioptischer Messplatz und Simulation
- Zusammenfassung

VERGLEICH MESSUNG UND SIMULATION

Vergleich PTFE und PC-Messung mit Simulation (ϵ_R - und $\tan\delta$ -Werte aus Resonator-Messungen am NPL (National Physical Laboratory) in UK)



Open Resonators for measurement of dielectric permittivity and loss



www.npl.co.uk

NATIONAL PHYSICAL LABORATORY

Continuation Sheet

MEASUREMENT TECHNIQUE

The real part of the complex permittivity (ϵ') and the dielectric loss angle (δ) [1] of disc specimens were measured at 72 GHz by using an open resonator (see Fig. 1 and references [1-3]). This technique is capable of providing high accuracy measurements on low-loss materials (ideally $\delta < 3$ milliradians) that have an electrical thickness that is approximately a multiple of half a wavelength in the specimen. An integral part of the measurement process is the determination of the Q-factor and frequency of resonances. This was achieved by fitting a numerical model [4] to measurements of complex transmission coefficient (S_{21}) that were made by using a Keysight PNA-X Vector Network Analyser with frequency extenders manufactured by VDI. The resonator has a precision micrometer for length adjustment.

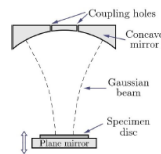


Fig. 1: Open resonator geometry

Measurements followed the established procedures for dielectric measurements with the NPL millimetre-wave open resonators. The first step was to measure the frequencies of resonances between 70 GHz and 76 GHz. These include fundamental (TEM₀₀) and higher-order-mode resonances. The fundamental-mode resonances and their corresponding axial mode numbers could then be identified.

Measuring a specimen requires resonant frequency and Q-factor to be measured twice: (i) with the specimen in situ and the length of the resonator set to give resonance at approximately 72 GHz (axial modes 50, 51 or 52), (ii) with the specimen removed and the resonator lengthened to restore resonance at the same frequency. A higher-order mode can sometimes coincide with a measured mode which will cause error in the measurement of loss angle. Measurements are made at a few modes so that such erroneous measurements can be identified and excluded from the results.

Reference: 2021110074

Checked by:

Page 2 of 5

NATIONAL PHYSICAL LABORATORY

Continuation Sheet

MEASUREMENT RESULTS

Table 1: Measurements at 2.45 GHz made with a Split-Post Dielectric Resonator (measurements in all four orientations are averaged).

Specimen	Thickness (mm)	Unc.	ϵ'	Unc.	δ (μrad)	Unc.
PTFE	1.631	0.002	2.05	0.02	200	50
*PC	1.443	0.004	2.78	0.02	5100	200

*Polycarbonate

Table 2: Measurements at 72 GHz made with an open resonator (average of measurements in axial modes 50-52, in the two orientations shown in Fig. 3(a)).

Specimen	Thickness (mm)	Unc.	ϵ'	Unc.	δ (μrad)	Unc.
PTFE	1.631	0.002	2.06	0.01	250	70
PC	1.443	0.004	2.77	0.01	7000	400

Columns marked 'Unc.' give the uncertainty associated with the column to the left. The reported expanded uncertainty is based on a standard uncertainty multiplied by a coverage factor $k = 2$ (equivalent to 95% Confidence Level).

The dielectric loss is reported in terms of the loss angle (δ), which in this report is given in units of microradians (μrad). When δ is low-valued (as is the case for the above measurements) then it is related to loss tangent (the ratio of imaginary and real parts of permittivity) by $\delta \approx \tan\delta \times 10^6$ μrad.

Table 2: Measurements at 72 GHz made with an open resonator (average of measurements in axial modes 50-52, in the two orientations shown in Fig. 3(a)).

Specimen	Thickness (mm)	Unc.	ϵ'	Unc.	δ (μrad)	Unc.
PTFE	1.631	0.002	2.06	0.01	250	70
PC	1.443	0.004	2.77	0.01	7000	400

PTFE-PROBE, D = 1,631 MM:

MESSUNG VS. SIMULATION

Table 2: Measurements at 72 GHz made with an open resonator (average of measurements in axial modes 50-52, in the two orientations shown in Fig. 3(a)).

Specimen	Thickness (mm)	Unc.	ϵ'	Unc.	δ (μrad)	Unc.
PTFE	1.631	0.002	2.06	0.01	250	70
PC	1.443	0.004	2.77	0.01	7000	400

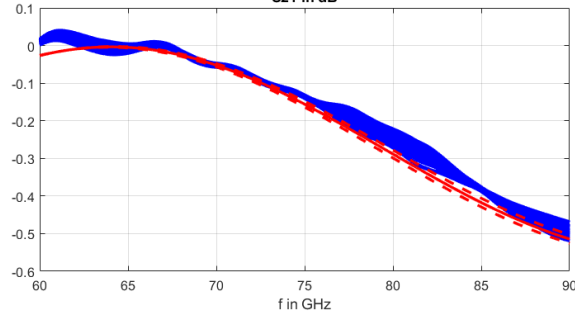
Messung

Simulation

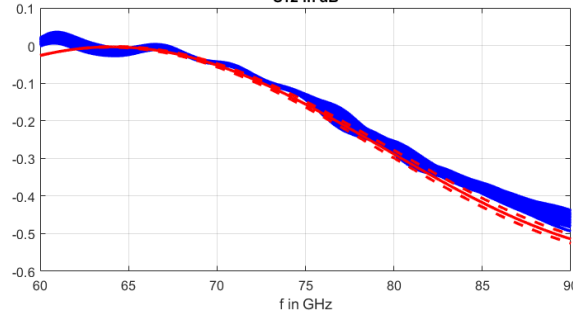
($\epsilon_R = 2,06$ und $\tan\delta = 0,25 \cdot 10^{-3}$,
 $d = 1,631$ mm)

data: PTFE_1_61mm

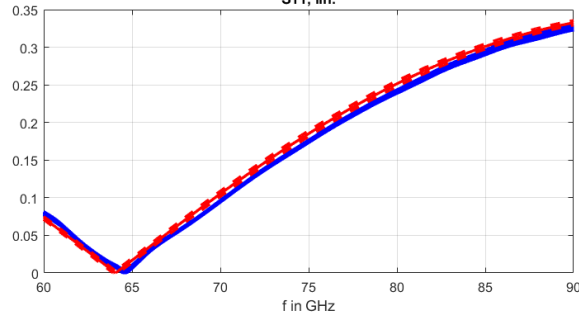
S21 in dB



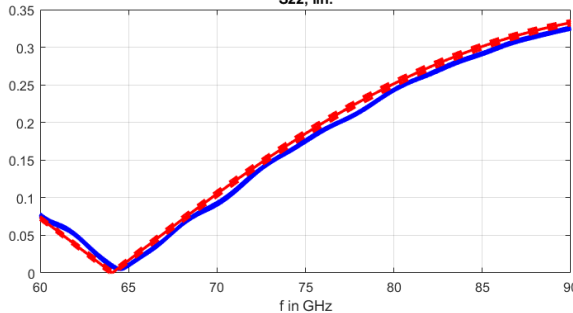
S12 in dB



S11, lin.

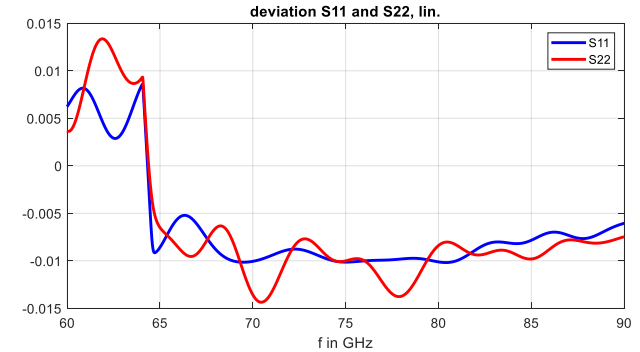
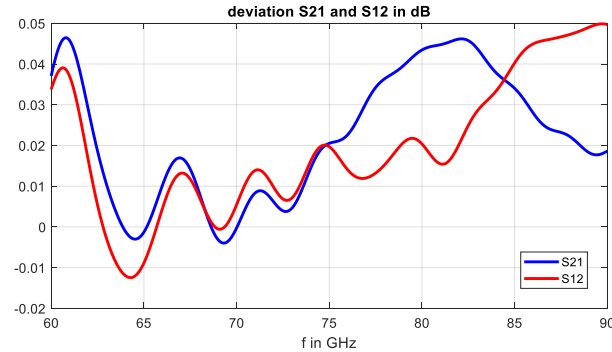


S22, lin.

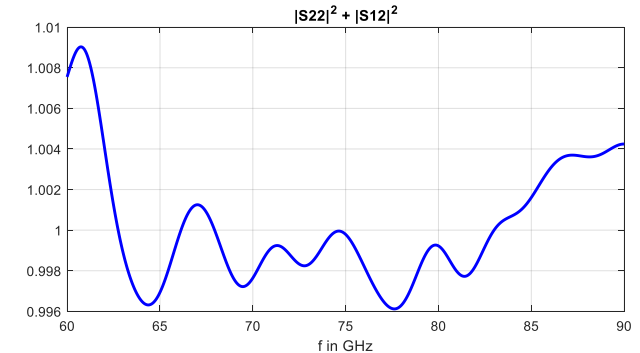
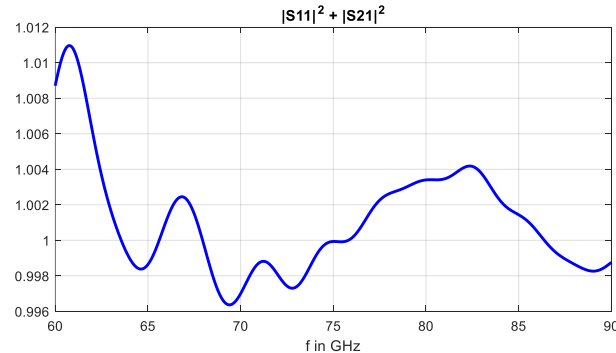


PTFE-PROBE, D = 1,631 MM:

Abweichung



Energieerhaltung



PC-PROBE, D = 1,44 MM: MESSUNG VS. SIMULATION

Table 2: Measurements at 72 GHz made with an open resonator (average of measurements in axial modes 50-52, in the two orientations shown in Fig. 3(a)).

Specimen	Thickness (mm)	Unc.	ϵ'	Unc.	δ (μrad)	Unc.
PTFE	1.631	0.002	2.06	0.01	250	70
PC	1.443	0.004	2.77	0.01	7000	400

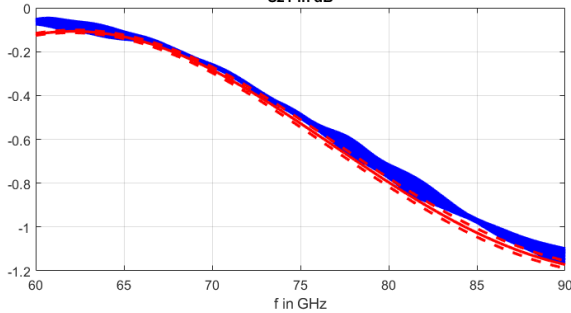
Messung

Simulation

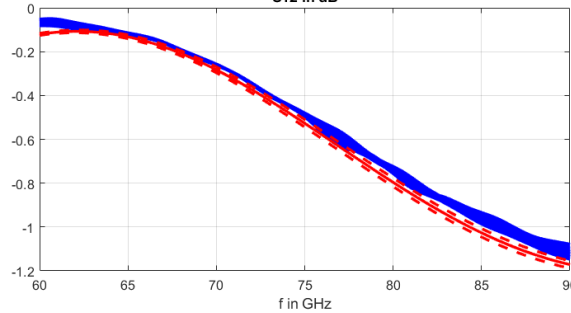
($\epsilon_R = 2,77$ und $\tan\delta = 7 \cdot 10^{-3}$,
d = 1,44 mm)

data: PC_1_5mm

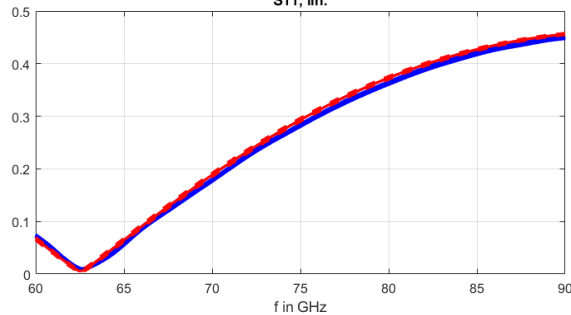
S21 in dB



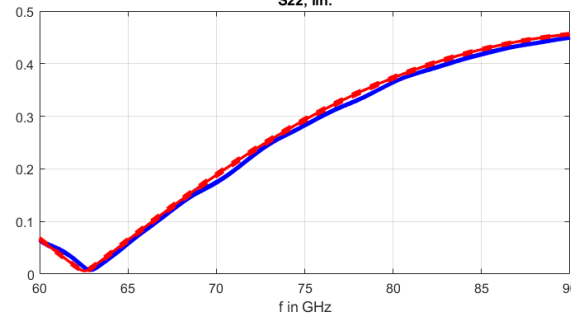
S12 in dB



S11, lin.

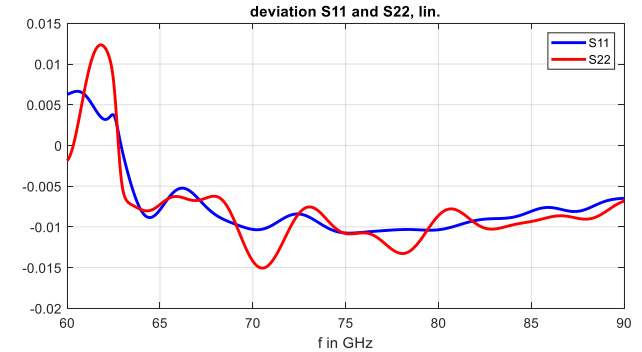
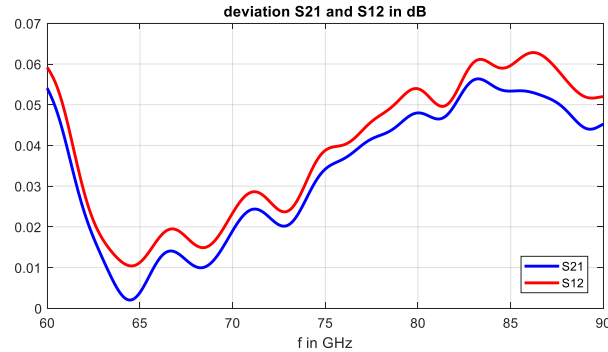


S22, lin.

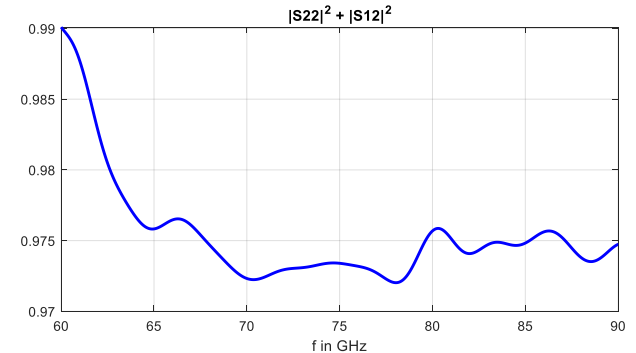
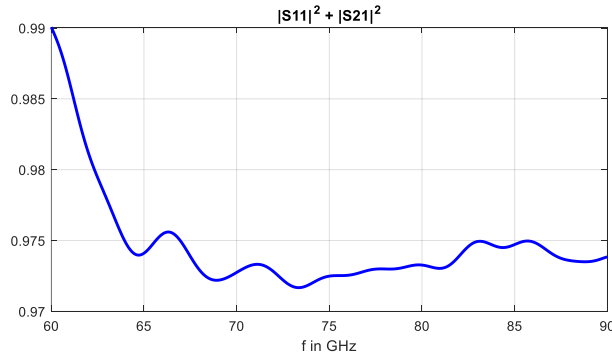


PC-PROBE, D = 1,44 MM:

Abweichung



Energieerhaltung



ZUSAMMENFASSUNG

- Erfolgreiche Implementierung eines quasioptischen Messplatzes in der Fertigung zur Charakterisierung von Verifikationsstandards für den Automotive-Tester R&S QAR50

Reproduzierbarkeit (65 GHz – 85 GHz):

	S11 und S22, lin.	S21 und S12 in dB
3σ	< 0,03	< 0,1

Abweichung Messung zu Simulation (65 GHz – 85 GHz):

	S11 und S22, lin.	S21 und S12 in dB
Δ	< 0,015	< 0,07