

323. PTB-Seminar

# KALIBRIERUNG VON V-NETZNACHBILDUNGEN BEISPIEL R&S ® ENV216

Aktuelle Fortschritte von Kalibrierverfahren  
im Nieder- und Hochfrequenzbereich 2023

Dr. Gerhard Rösel  
Rohde & Schwarz Messgerätebau GmbH

**ROHDE & SCHWARZ**

Make ideas real



# INHALT

- ▶ Eigenschaften einer V-Netznachbildung, Beispiel R&S®ENV215
- ▶ Kalibrierverfahren
- ▶ Einfluss des Adapters auf die Messung der Eingangsimpedanz
- ▶ Charakterisierung des Adapters
  - Open/Short-Messung
  - Korrektion des Adapters mit Deembedding-Tool eines VNA
  - Mit 50 Ohm Gegenadapter
  - Modellierung des Adapters
- ▶ Kalibrierung mit Steckdosen-Kalibrierkit
- ▶ Zusammenfassung
  
- ▶ Referenzen



# TYPISCHER MESSEINSATZ IM PRÜFLABOR, R&S®ENV215

Eigenschaften:

- Frequenzbereich 9 kHz to 30 MHz
- Leistungsaufnahme bis 16 A
- Simulierte Impedanz ( $50 \mu\text{H} + 5 \Omega$ )  $\parallel$   $50 \Omega$  entsprechend CISPR 16-1-2

## Connecting a LISN



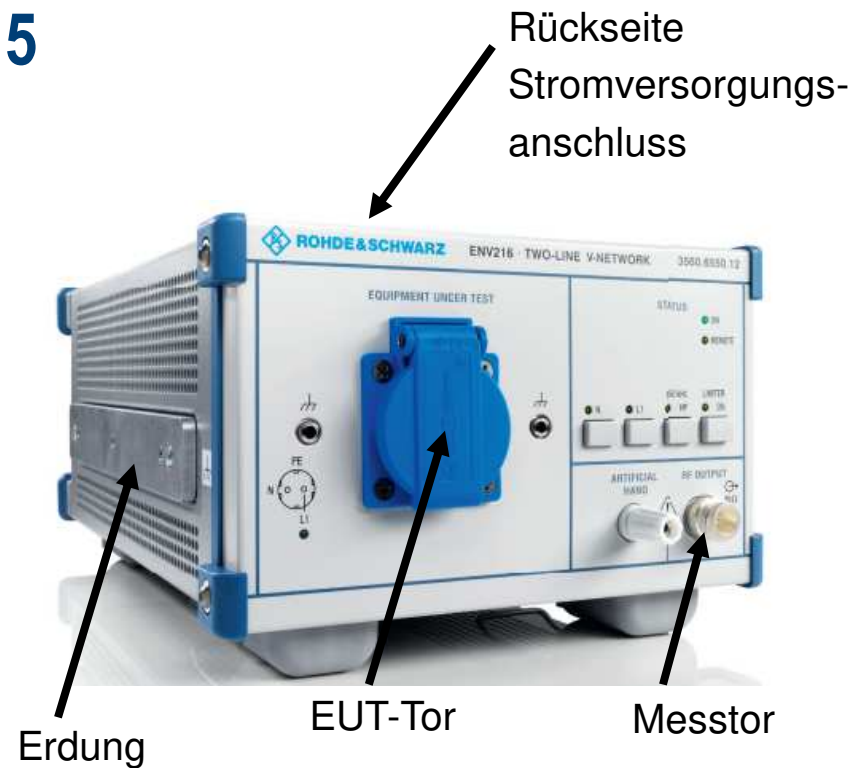
# NETZNACHBILDUNG R&S®ENV215

Messaufgabe:

Messen der kabelgebundenen Störungsemissionen eines Prüflings, z.B. Toaster

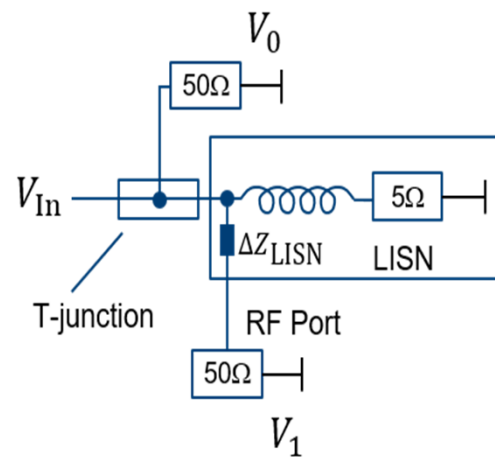
Aufgaben der Netznachbildung:

1. Einkopplung von emittierender Störspannung des Prüflings in den Messempfänger
2. Entkopplung hochfrequenter Störungen vom Stromversorgungsnetz
3. Festgelegte Impedanz zum Prüfling EUT im Hochfrequenzbereich

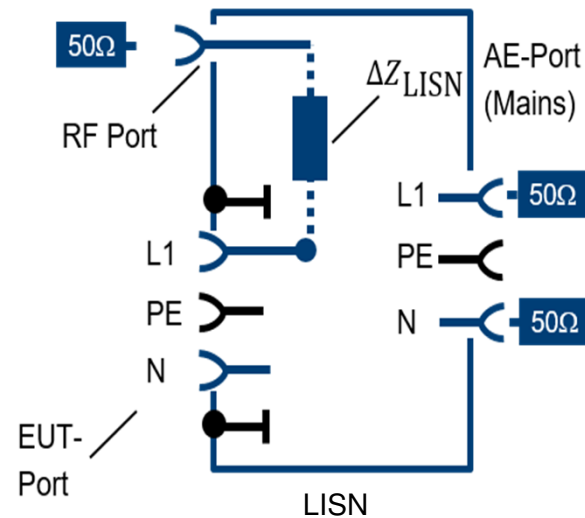


# 1. EINKOPPLUNG: SPANNUNGSTEILUNGSMASS

- Skalare Verhältnismessung mit einer T-Verzweigung

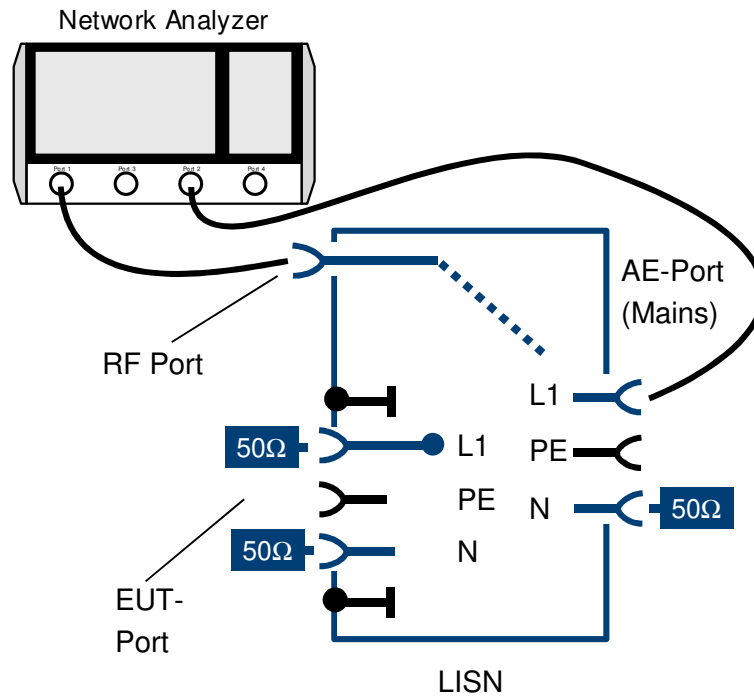


$$A_{VDF} = 20 \cdot \lg \frac{V_0}{V_1}$$



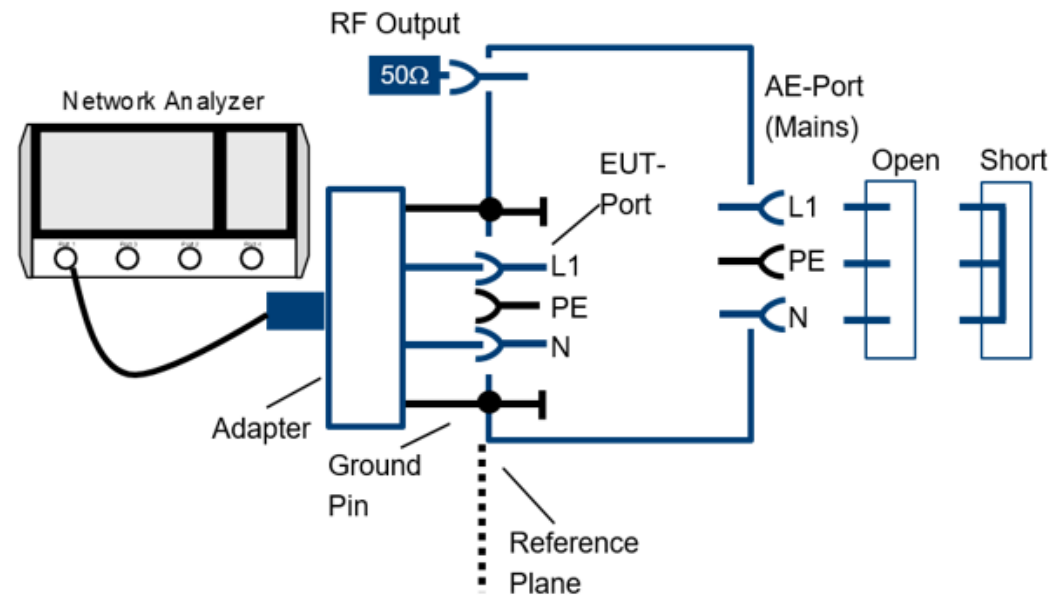
## 2. ENTKOPPLUNG

### ► Dämpfungsmessung



### 3. EINGANGSIMPEDANZ

- Reflexionsmessung der Eingangsimpedanz  $Z_{\text{NNB}}$  mit einem VNA



### 3. EINGANGSIMPEDANZ

- Berechnung der Impedanz aus dem Streufaktor Eingangsreflexionsfaktor
- Referenzebene ist die Frontplatte
- Empfänger RF Port abgeschlossen

$$Z = 50 \cdot \frac{1 + S_{11}}{1 - S_{11}}$$

Referenzebene

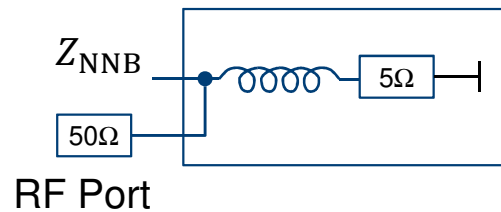




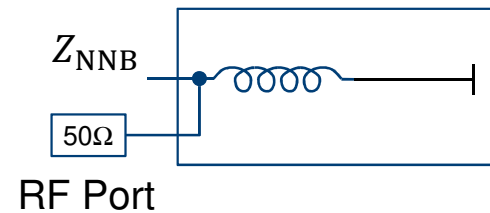
# ERSATZSCHALTIBILD FÜR EINGANGSIMPEDANZ CISPR 16-1-2

- ▶ 50 Ohm werden am Empfänger (RF Port) angeschlossen.
- ▶ Limits: 20% für den Betrag und entsprechend  $11,5^\circ$  für die Phase

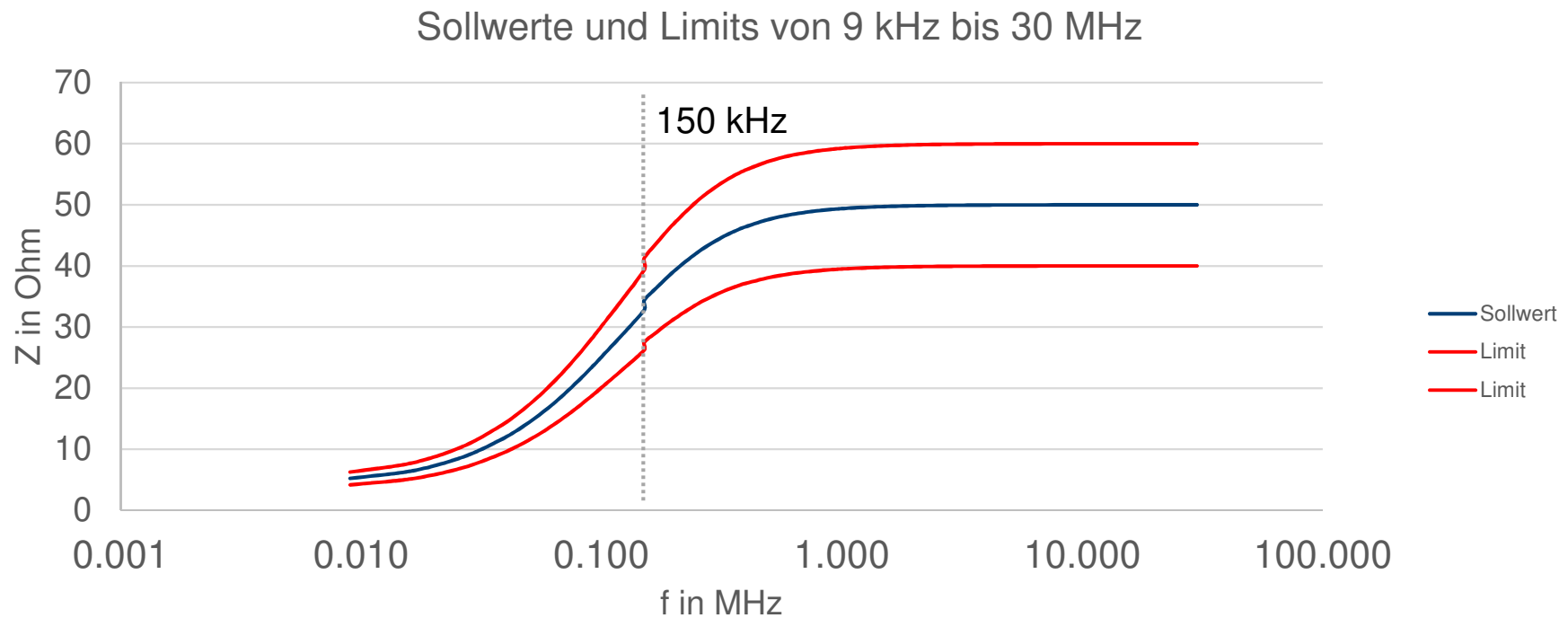
Frequenzbereiche: 9 kHz bis 150 kHz



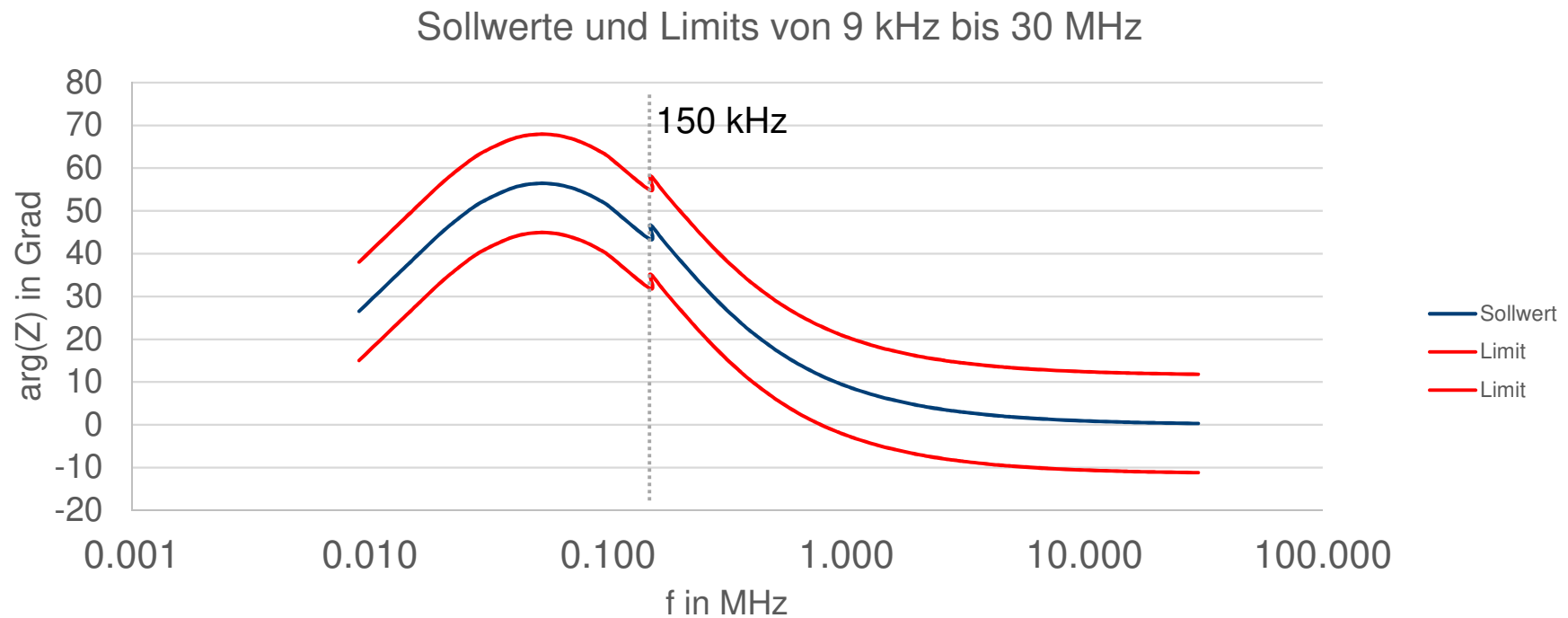
150 kHz bis 30 MHz



# ANFORDERUNG AN DIE EINGANGSIMPEDANZ



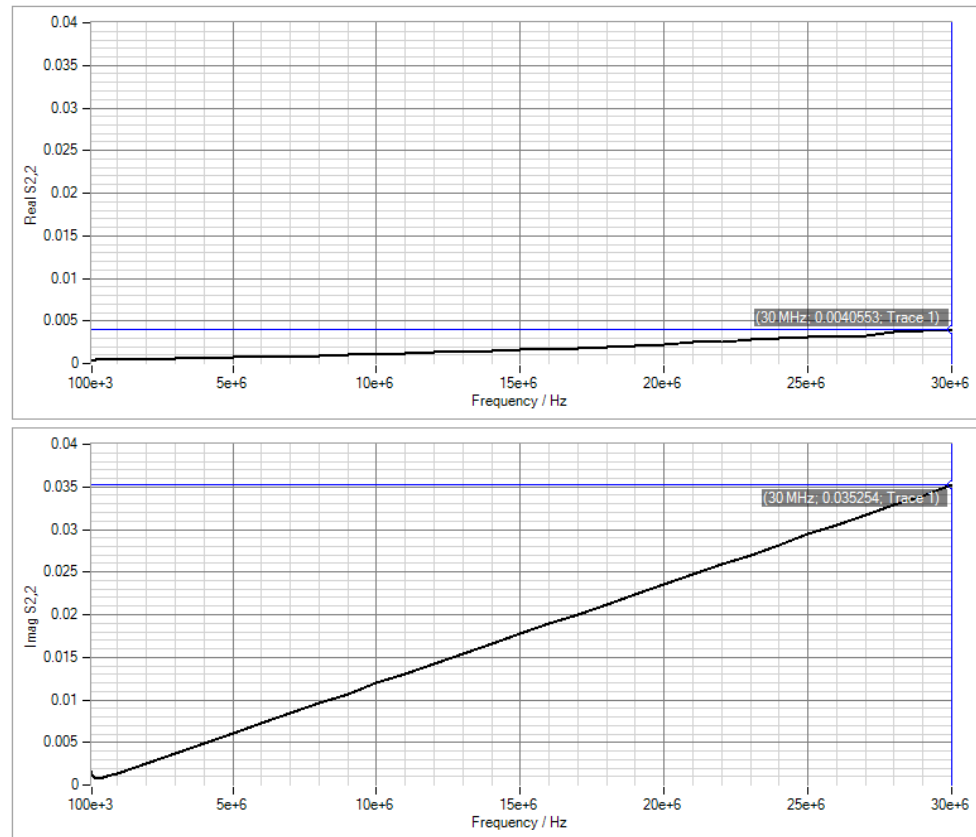
# ANFORDERUNG AN DIE EINGANGSIMPEDANZ PHASE



# EINFLUSS DES ADAPTERS

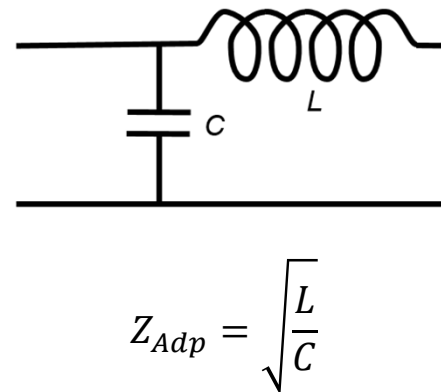
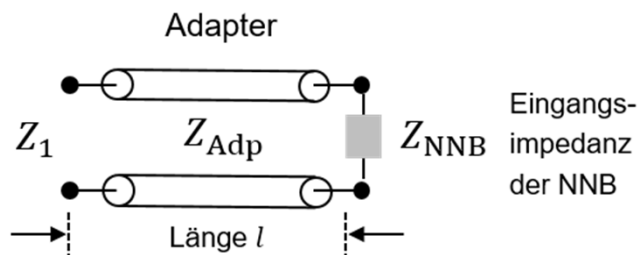
Messung von 50 Ohm mit Adapter.

- ▶  $S_{11} = R + jX$
- ▶ Erwartungswert idealer Adapter:  $S_{11} = 0$ .
- ▶  $Z_{\text{re}} = Z_0 \left( \frac{1-R^2-X^2}{(1-R)^2+X^2} \right)$
- ▶  $Z_{\text{im}} = Z_0 \left( \frac{2X}{(1-R)^2+X^2} \right)$
- ▶  $|Z| = Z_0 \pm 0.5 \text{ Ohm}$
- ▶  $\arg(Z) = 0^\circ \pm 4^\circ$

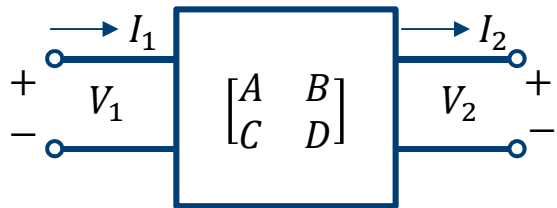


# MODELL DES ADAPTERS

- Modell einer verlustlosen Leitung
- Ersatzschaltbild mit  $L, C$



# BESCHREIBUNG IN ABCD-MATRIX



$$V_1 = AV_2 + BI_2$$

$$I_1 = CV_2 + DI_2$$

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta l & jZ_{\text{Adp}} \sin \beta l \\ j \frac{1}{Z_{\text{Adp}}} \sin \beta l & \cos \beta l \end{bmatrix}$$

mit

$\beta$ : Ausbreitungskonstante

$l$ : Länge des Adapters

Es gilt:  $A = D$

# OPEN-SHORT KORREKTION (TECHNIK BEI LCR-METERN)

$$Z_1 = \frac{V_1}{I_1} = \frac{AV_2 + BI_2}{CV_2 + DI_2} \quad \text{gesucht: } Z_2 = \frac{V_2}{I_2}$$

Zweiter offen:

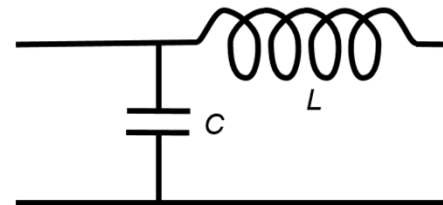
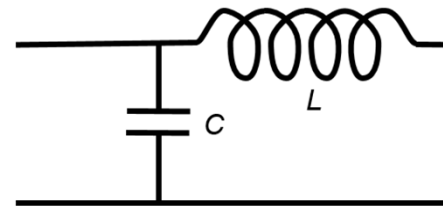
$$I_2 = 0, \quad Z_{\text{op}} = \frac{A}{C}, \quad C = \frac{A}{Z_{\text{op}}}$$

Zweiter kurzgeschlossen:

$$V_2 = 0, \quad Z_{\text{sh}} = \frac{B}{D}, \quad B = DZ_{\text{sh}}$$

$$Z_{\text{NNB}} = \frac{B - DZ_1}{CZ_1 - A} = \frac{D(Z_{\text{sh}} - Z_1)}{(Z_1 - Z_{\text{op}})A} Z_{\text{op}} \quad \text{mit } A = D$$

$$Z_{\text{NNB}} = \frac{(Z_{\text{sh}} - Z_1)}{(Z_1 - Z_{\text{op}})} Z_{\text{op}}$$



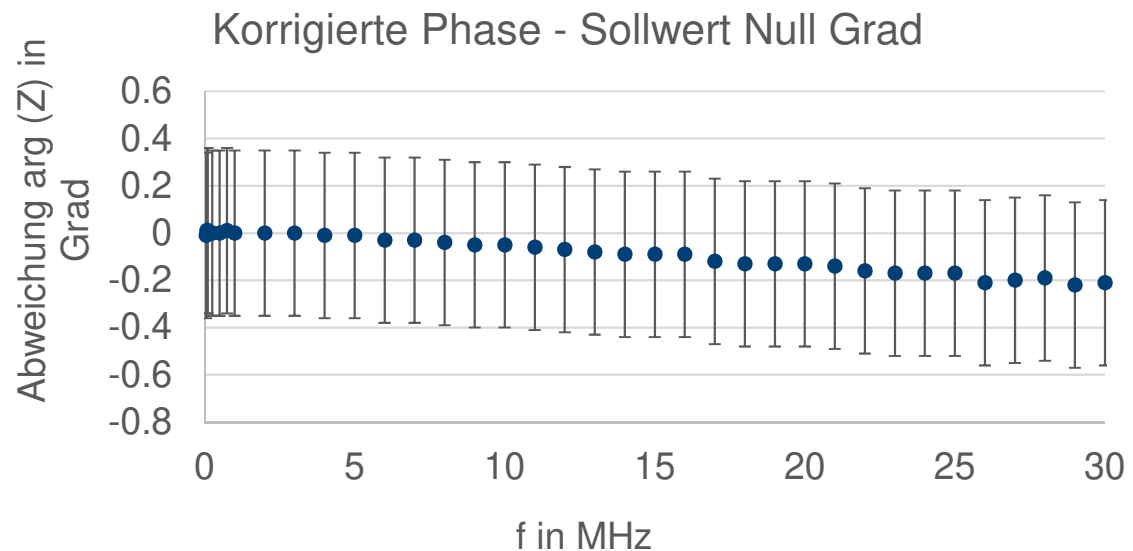
# MU-ANALYSE – GUM TREE CALCULATOR (GTC), PYTHON

```
for i in range(38):
    sh = complex(s1[i], s2[i])
    op = complex(o1[i], o2[i])
    ma = complex(m1[i], m2[i])

    ma = ucomplex(ma, 0.0025)
    sh = ucomplex(sh, 0.005)
    op = ucomplex(op, 0.005)

    sh = 50 * (1 + sh) / (1 - sh)
    op = 50 * (1 + op) / (1 - op)
    ma = 50 * (1 + ma) / (1 - ma)

    erg = (sh - ma) / (ma - op) * op
    ergp = phase(erg) / math.pi * 180
    print(ergp)
```



<https://gtc.readthedocs.io/en/v1.3.6/index.html>



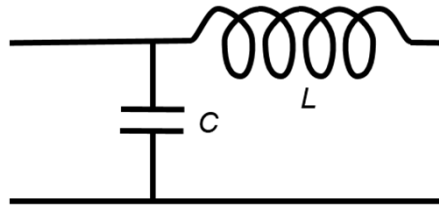
# BESTIMMUNG DER KAPAZITÄT UND INDUKTIVITÄT

Zweiter offen:

$$C(f) = Y_{im}/(2\pi f)$$

$$C(30 \text{ MHz}) = 0.00071 / (2\pi \cdot 30 \cdot 10^6)$$

$$C(30 \text{ MHz}) = 3.7 \text{ pF}$$

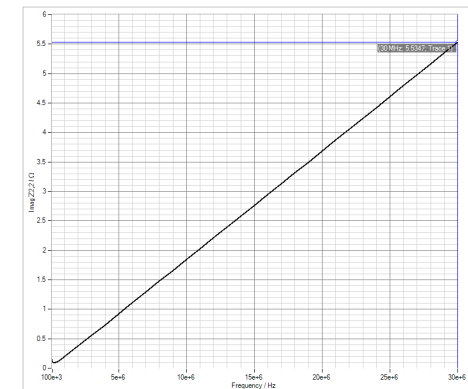
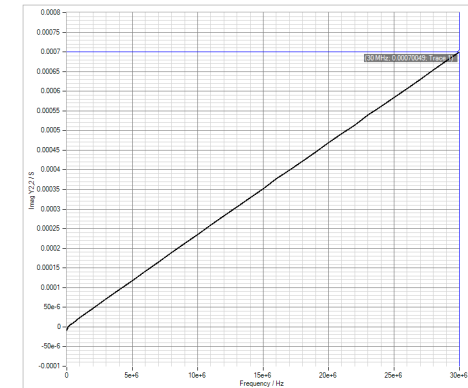
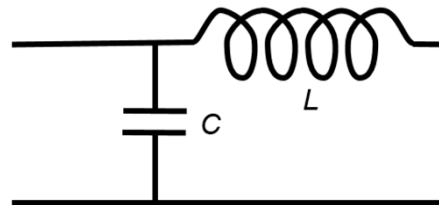


Zweiter geschlossen:

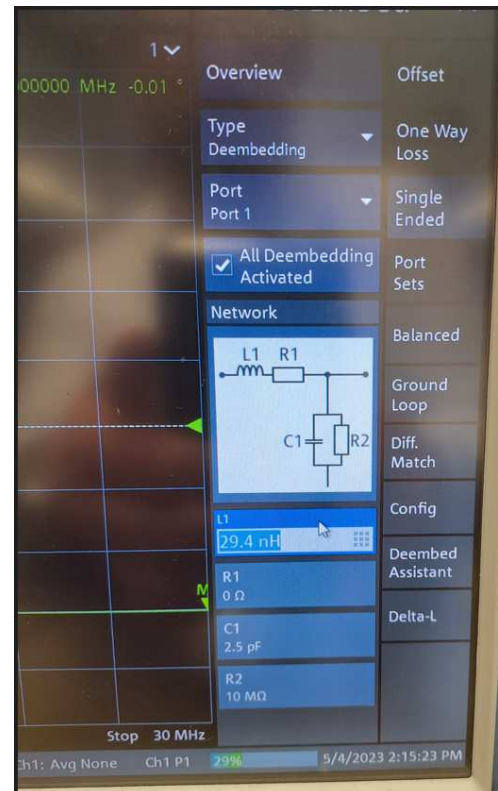
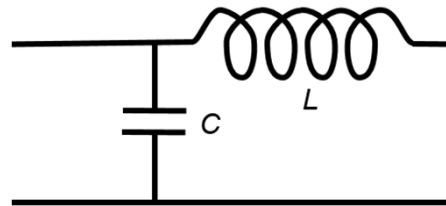
$$L(f) = Z_{\text{im}}/(2\pi f)$$

$$L(30 \text{ MHz}) = 5.535 / (2\pi \cdot 30 \cdot 10^6)$$

$$L(30 \text{ MHz}) = 29.4 \text{ nH}$$



# KORREKTION MIT DEEMBEDDING VNA TOOL

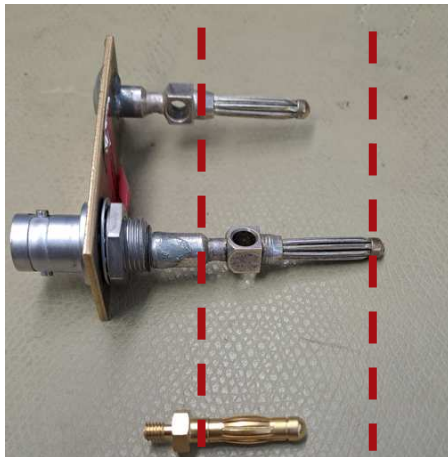


# PROBLEM DER OPEN-MESSUNG

Alter Adapter:

Referenzebene beim Open falsch

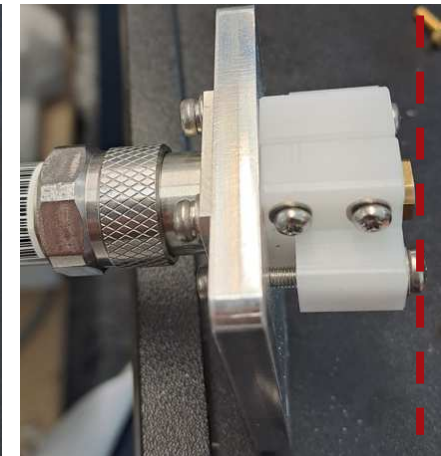
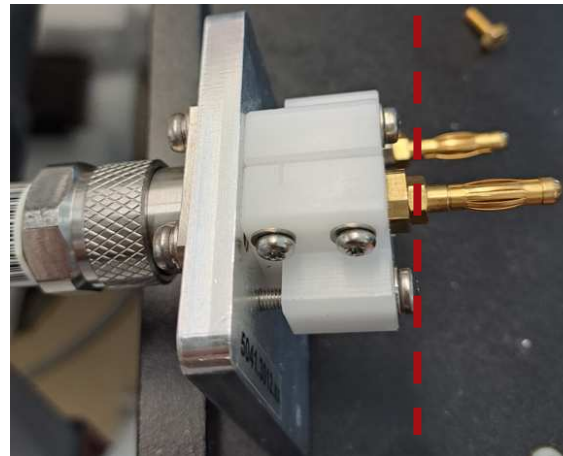
Kapazität Faktor 2 zu groß gemessen



Neuer Adapter:

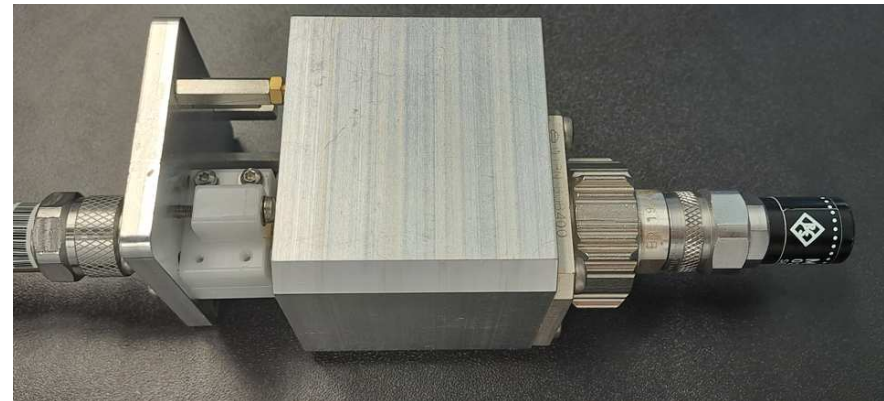
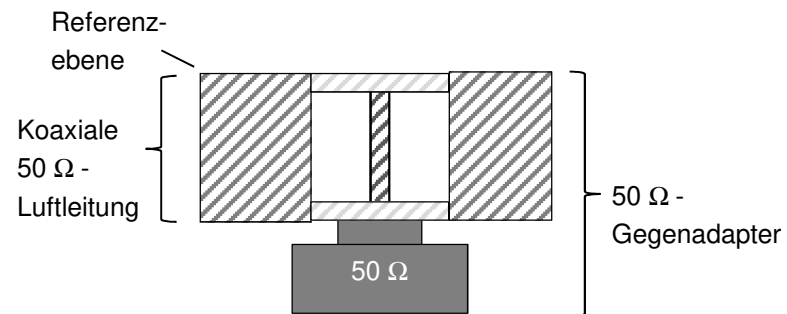
Referenzebene beim Open:

Abschrauben des Kontaktstiftes



# 50 OHM GEGENADAPTER

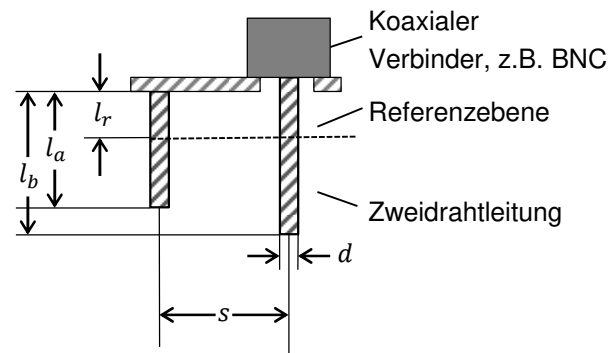
- Verifikation mit Gegenadapter: 50 Ohm



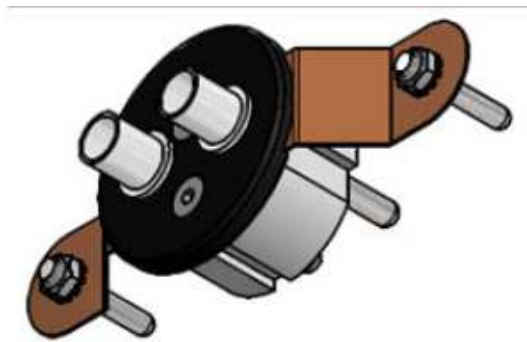
# MODELLIERUNG DES ADAPTERS

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \pi l_r \cdot \frac{1}{\operatorname{arccosh}\left(\frac{s}{d}\right)}$$

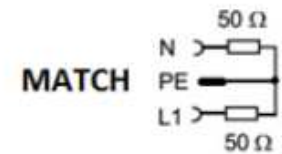
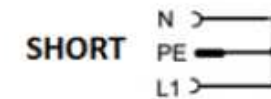
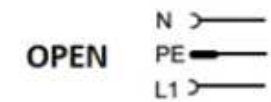
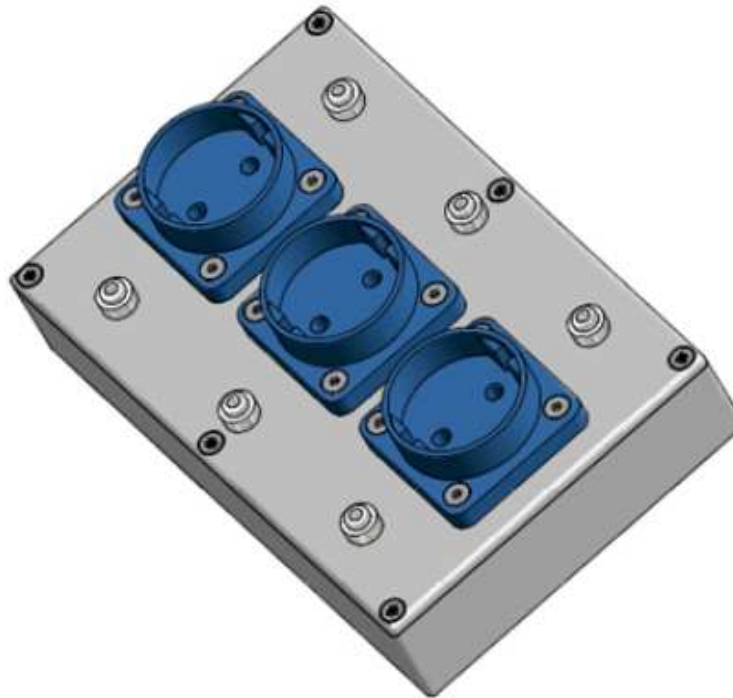
$$L = \frac{\mu_0 \mu_r l_r}{\pi} \cdot \operatorname{arccosh}\left(\frac{s}{d}\right)$$



# LÖSUNG DURCH STECKDOSEN-KALIBRIERKIT



Fa. Giebler  
<https://www.giebler.de/>



# ZUSAMMENFASSUNG

- ▶ Wichtigste Kenngröße der Netznachbildungen
  - Eingangsimpedanz zum Prüfling
  - Entkopplung/Isolation
  - Spannungsteilungsmass
  
- ▶ Adapter bewirkt eine unerwünschten Abweichung auf die Phasenmessung der Eingangsimpedanz der Netznachbildung
  - In der Regel weist der Adapter eine Impedanz größer 50 Ohm auf
  - Adapter Einfluss kann mit Deembedding Tool im VNA leicht korrigiert werden.

## REFERENZEN

- ▶ R&S®ENV216 Zweileiter-V-Netznachbildung – Datenblatt
- ▶ CISPR 16-1-2:2014; Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods - Part 1-2: Radio disturbance and immunity measuring apparatus - Coupling devices for conducted disturbance measurements
- ▶ VDI/VDE/DGQ/DKD 2622 Blatt 15.1:2011-10, Kalibrieren von Messmitteln für elektrische Größen - Netznachbildungen für Stromversorgungsanschlüsse
- ▶ DKD-L 02-2 Verfahren zur rückgeführten Hochfrequenzspannungsmessung, 04/2014.
- ▶ R. H. Judaschke and U. Karsten, "VNA Measurement of Common-Mode Impedance of Coupling/Decoupling Networks in Conductive Immunity Testing," in *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 60, no. 5, pp. 1409-1414, Oct. 2018, doi: 10.1109/TEM.2017.2783950.
- ▶ Impedance Measurement Handbook, A Guide to Measurement Technology and Techniques, 6th Edition, Keysight.