

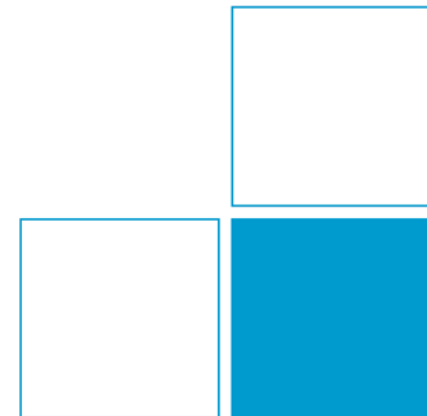
# Bestimmung der Impedanz von Koppelnetzwerken nach IEC 61000-4-6

Rolf Judaschke

303. PTB-Seminar

Aktuelle Fortschritte von Kalibrierverfahren im Nieder- und Hochfrequenzbereich

17. Mai 2017



# Übersicht

- Motivation
- Einleitung
- Messanforderungen nach IEC 61000-4-6
- Bestimmung der Eingangsimpedanz von Koppelnetzwerken
- Modellierung des Messadapters und der Kalibrierstandards
- Vergleich unterschiedlicher Verfahren
- Messunsicherheitsanalyse
- Zusammenfassung

# Motivation

- VDI/VDE 2622 „Kalibrieren elektrischer Messmittel“  
Neufassung Blatt 15.3 Kopplungs- und Entkopplungsnetzwerke
  - Basis: IEC 61000-4-6:2013 „Störfestigkeit gegen leitungsgeführte Störgrößen, induziert durch hochfrequente Felder“
  - (VNA)-Messung der asymmetrischen Eingangsimpedanz nicht erläutert
  - Messunsicherheit unklar



Advanced Test Solutions for EMC

*Uwe Karsten*

- Messaufbauten
- Durchführung der Messungen



*Rolf Judaschke*

- Simulationen
- Auswertung der Messungen
- Messunsicherheitsbetrachtung

# Einleitung

- Definition Störfestigkeit:

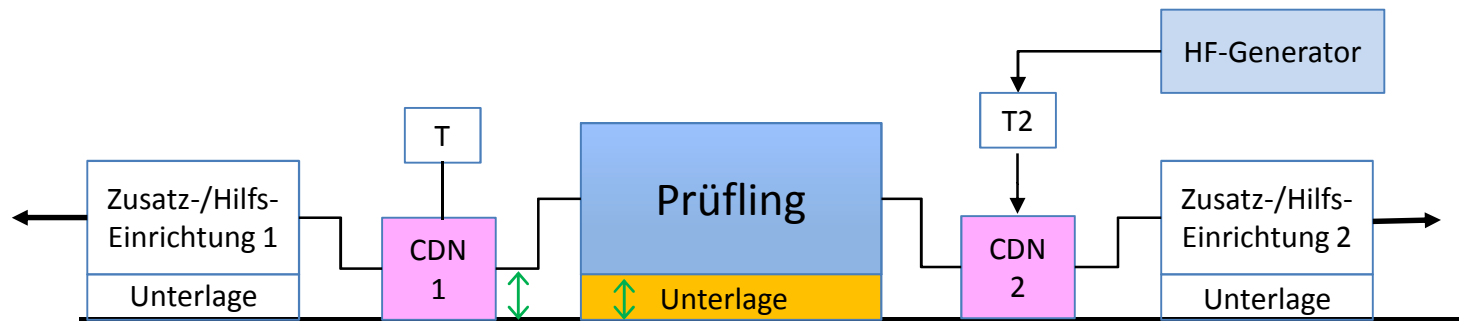
„Die Störfestigkeit beschreibt den Grad der Fähigkeit eines Systems, ohne Fehlfunktion oder Funktionsausfall und unbeeinflusst von einer gezielt und definiert auf den Prüfling einwirkenden Störgröße weiter zu arbeiten.“

- Prüfung der Störfestigkeit gegen:

- schnelle transiente elektrische Störgrößen (Burst)
- Spannungseinbrüche, Kurzzeitunterbrechungen
- Stoßspannungen (Surge)
- elektrostatische Entladungen (ESD)
- Hochfrequenzfelder (Freiraum)
- leitungsgekoppelte Hochfrequenzsignale
- ...

## Einleitung (2)

- Prüfung der Störfestigkeit gegen leitungsgeführte HF-Störgrößen



- Störfestigkeitsprüfung gemäß IEC 61000-4-6

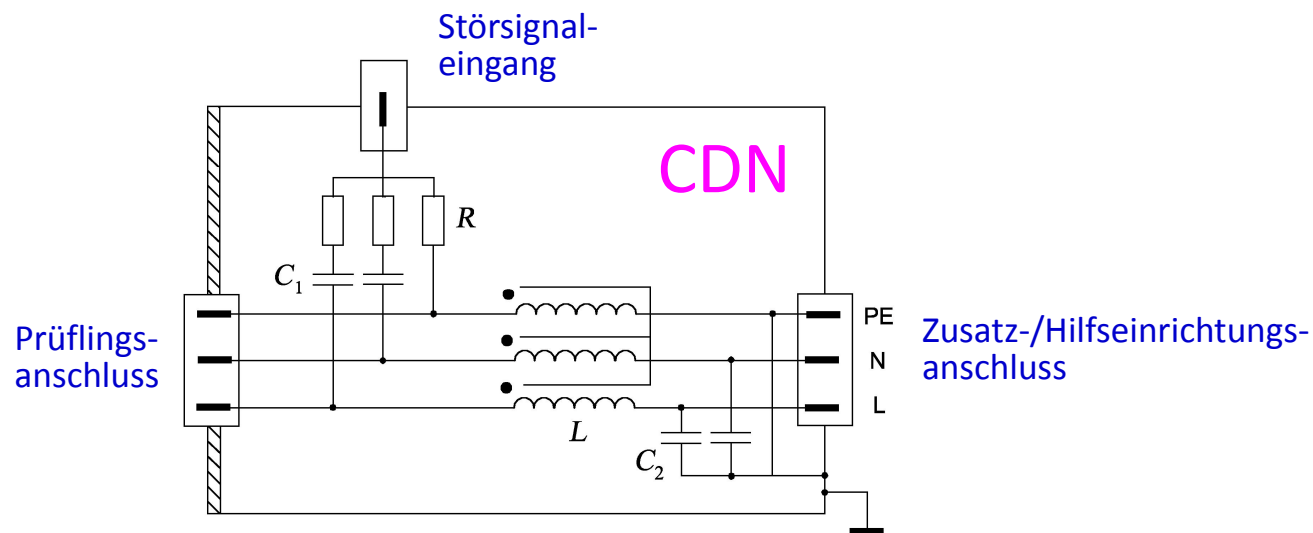
# Messanforderungen nach IEC 61000-4-6

- Frequenzbereich 150 kHz - 80 MHz
- Unterscheidung von Prüfschärfegraden (Prüfpegel)
- Anforderungen an den Prüfgenerator (VSWR, Harmonische,...)
- Anforderungen an Koppel-/Entkopplungsnetzwerke (CDN)
- Arten von Koppel-/Entkopplungsnetzwerken:

Art der Leitung	Beispiele	Art des CDN
Stromversorgung (Wechsel- und Gleichstrom) und Erdverbindung	Wechselstromnetz, Gleichstrom in industriellen Anlagen, Erdverbindung	CDN-Mx
Geschirmte Kabel	Koaxialkabel, Kabel für LAN- und USB-Verbindungen	CDN-Sx
Ungeschirmte symmetrische Leitungen	ISDN-Leistungen, Telefonleitungen	CDN-Tx
Ungeschirmte unsymmetrische Leitungen	sämtliche Leitungen, die nicht in die anderen Kategorien fallen	CDN-Afx oder CDN-Mx

# Messanforderungen nach IEC 61000-4-6 (2)

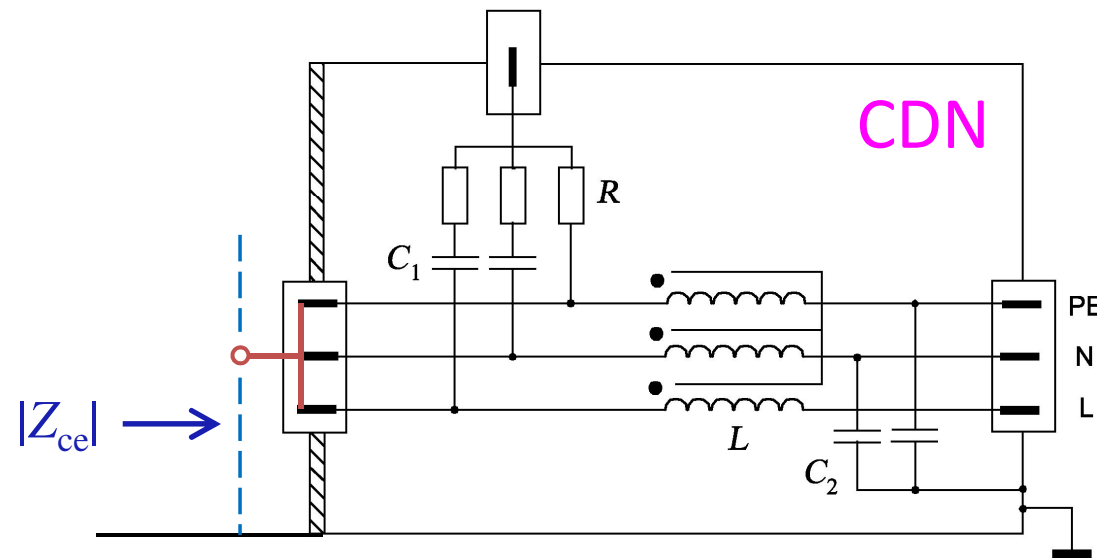
- Funktionsanforderungen an Koppel-/Entkopplungsnetzwerke (CDN):
  - Einkopplung des Störsignals in den Prüfling
  - Sicherstellung einer festen Impedanz vom Prüfling aus gesehen, unabhängig von der asymmetrischen Impedanz der Hilfseinrichtungen
  - Entkopplung der Zusatz-/Hilfseinrichtungen vom Prüfsignal, um eine Beeinflussung der Hilfseinrichtungen zu verhindern
  - keine Beeinflussung der übertragenen Nutzsignale
- Beispiel:



# Messanforderungen nach IEC 61000-4-6 (3)

- Hauptparameter des Koppel-/Entkopplungsnetzwerks:
  - Betrag der asymmetrischen Impedanz  $Z_{ce}$  am Prüfungsanschluss

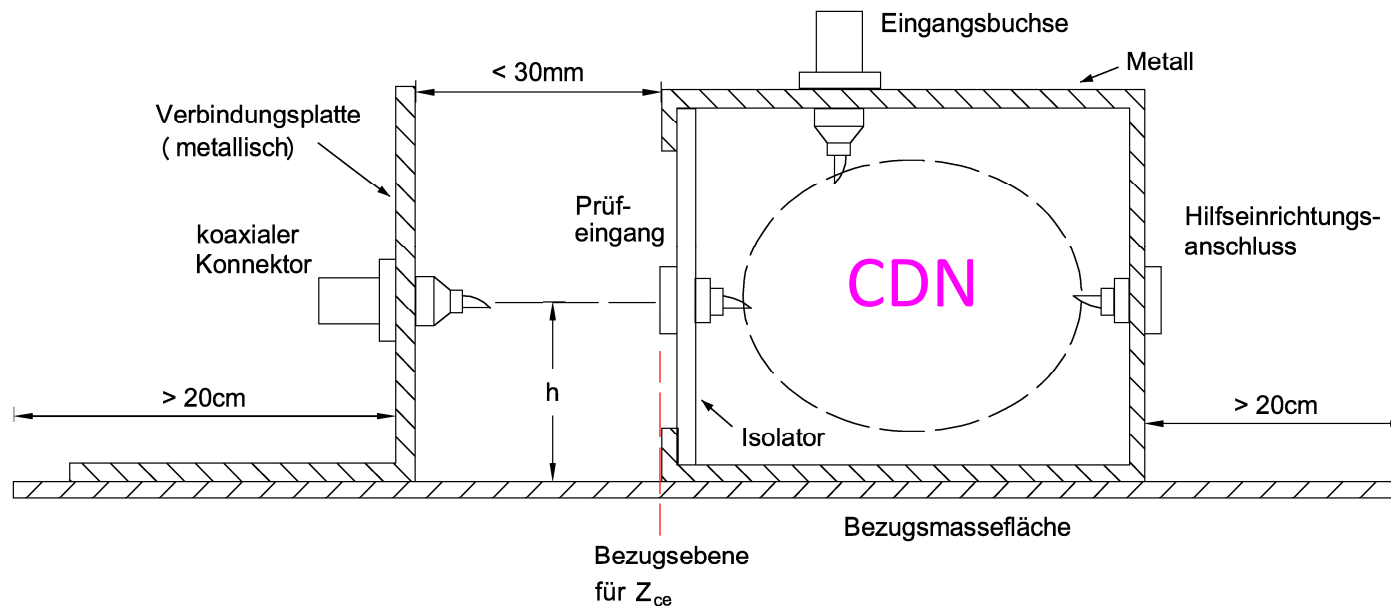
$ Z_{ce} $	150 kHz – 24 MHz	24 MHz – 80 MHz	80 MHz – 230 MHz
	$150 \Omega \pm 20 \Omega$	$150 \Omega \begin{matrix} +60 \Omega \\ -45 \Omega \end{matrix}$	$150 \Omega \begin{matrix} +60 \Omega \\ -60 \Omega \end{matrix}$





# Messanforderungen nach IEC 61000-4-6 (4)

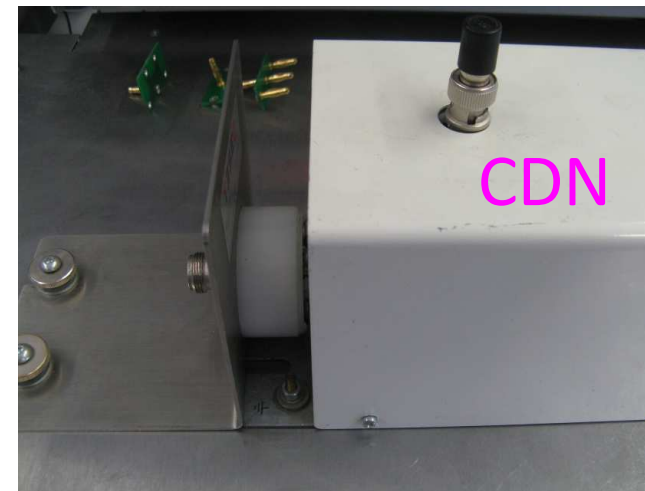
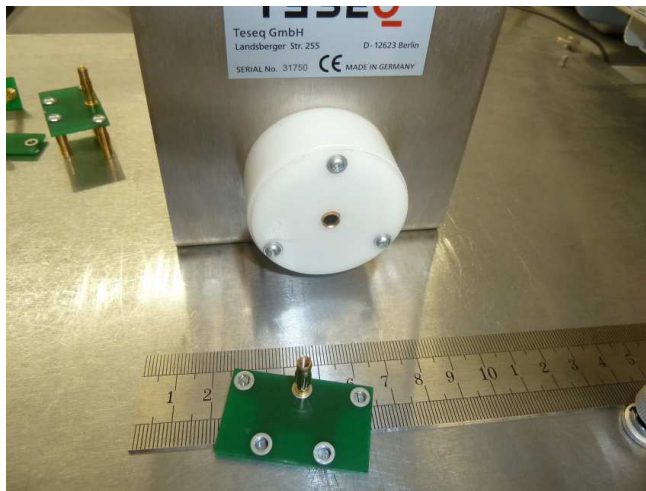
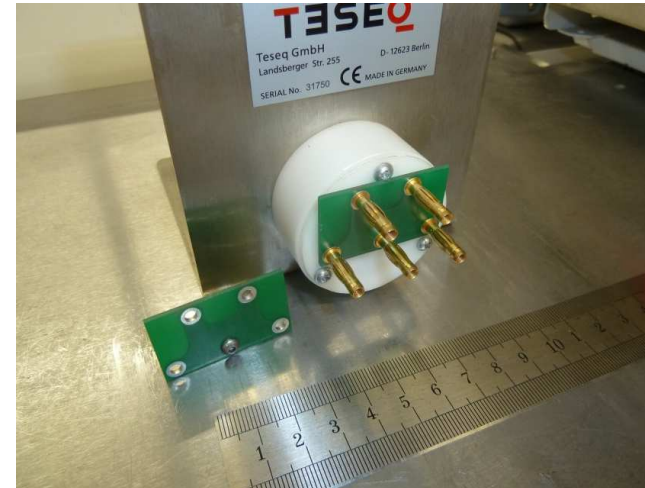
- Messung der asymmetrischen Impedanz  $Z_{ce}$



- Höhe  $h$  des Prüfungsanschlusses 30 mm bis 100 mm
- Verbindungsplatte 100 mm x 100 mm bei  $h = 30$  mm
- koaxialer Konnektor horizontal angeordnet

# Messanforderungen nach IEC 61000-4-6 (5)

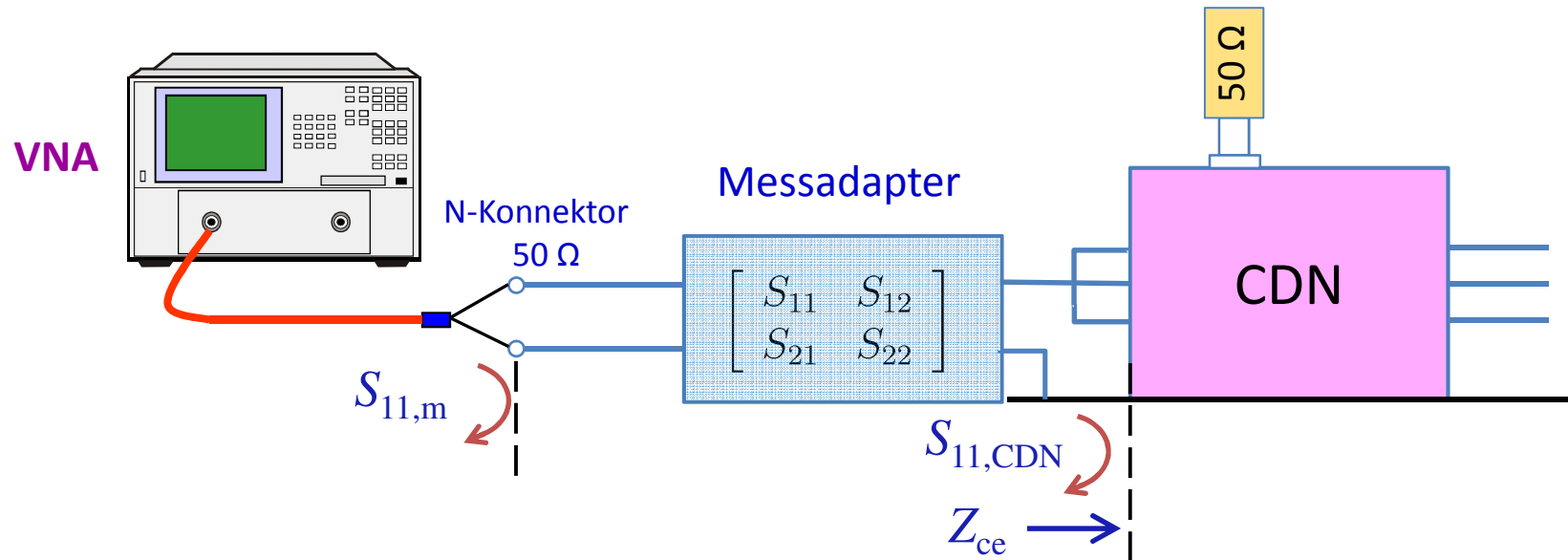
- Beispiel für Messadapter (CDN-M5):



Fa. Teseq

# Bestimmung der Eingangsimpedanz von Koppelnetzwerken

- Messung mit VNA:



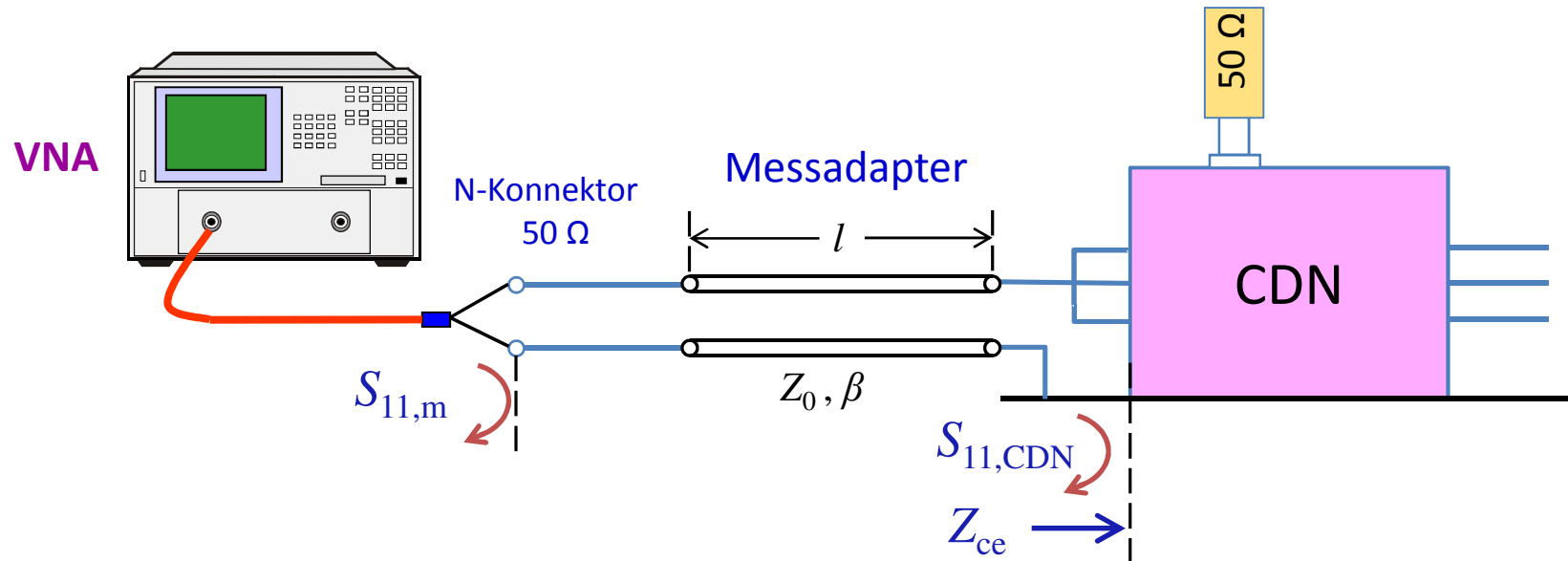
$$Z_{ce} = Z_0 \cdot \frac{1 + S_{11,CDN}}{1 - S_{11,CDN}}$$

$$S_{11,CDN} = \frac{S_{11,m} - S_{11}}{(S_{11,m} - S_{11})S_{22} + S_{12}S_{21}}$$

➔ Charakterisierung des Messadapters erforderlich

# Bestimmung der Eingangsimpedanz von Koppelnetzwerken (2)

## A) Modellierung durch homogene Leitungssektion

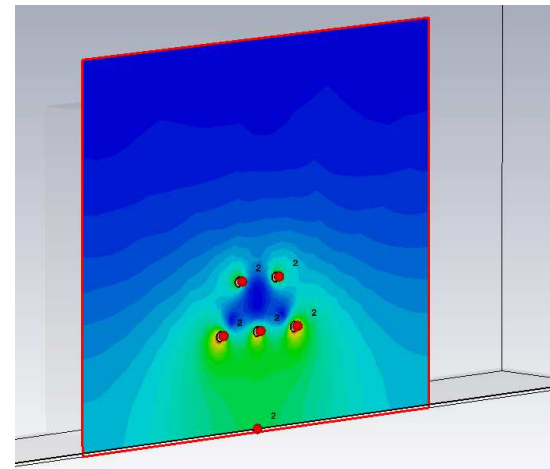
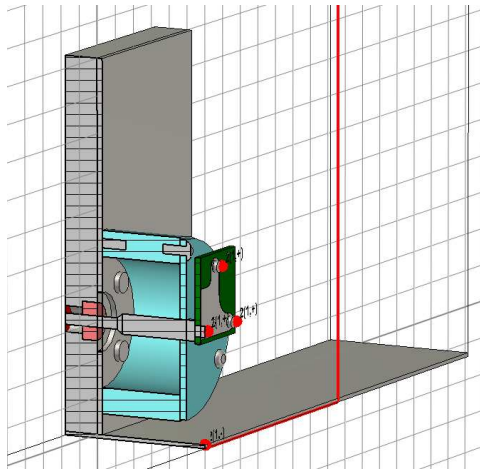
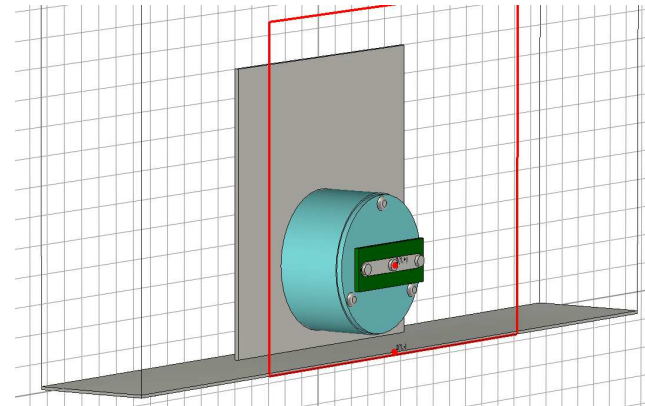
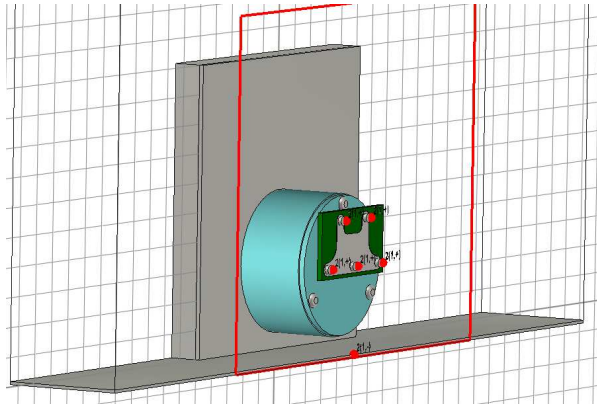


$$S_{11,CDN} \approx S_{11,m} \cdot e^{j2\beta l} = S_{11,m} \cdot e^{j\frac{4\pi f}{c_0} l}$$

- Abschätzung der elektrischen Leitungslänge  $l$  aus Geometrie
- Annahme  $Z_0 = 50 \Omega$
- Praxis: Anwendung der “Autolength-Korrektur” bei leerlaufendem Messadapter

# Modellierung des Messadapters und der Kalibrierstandards

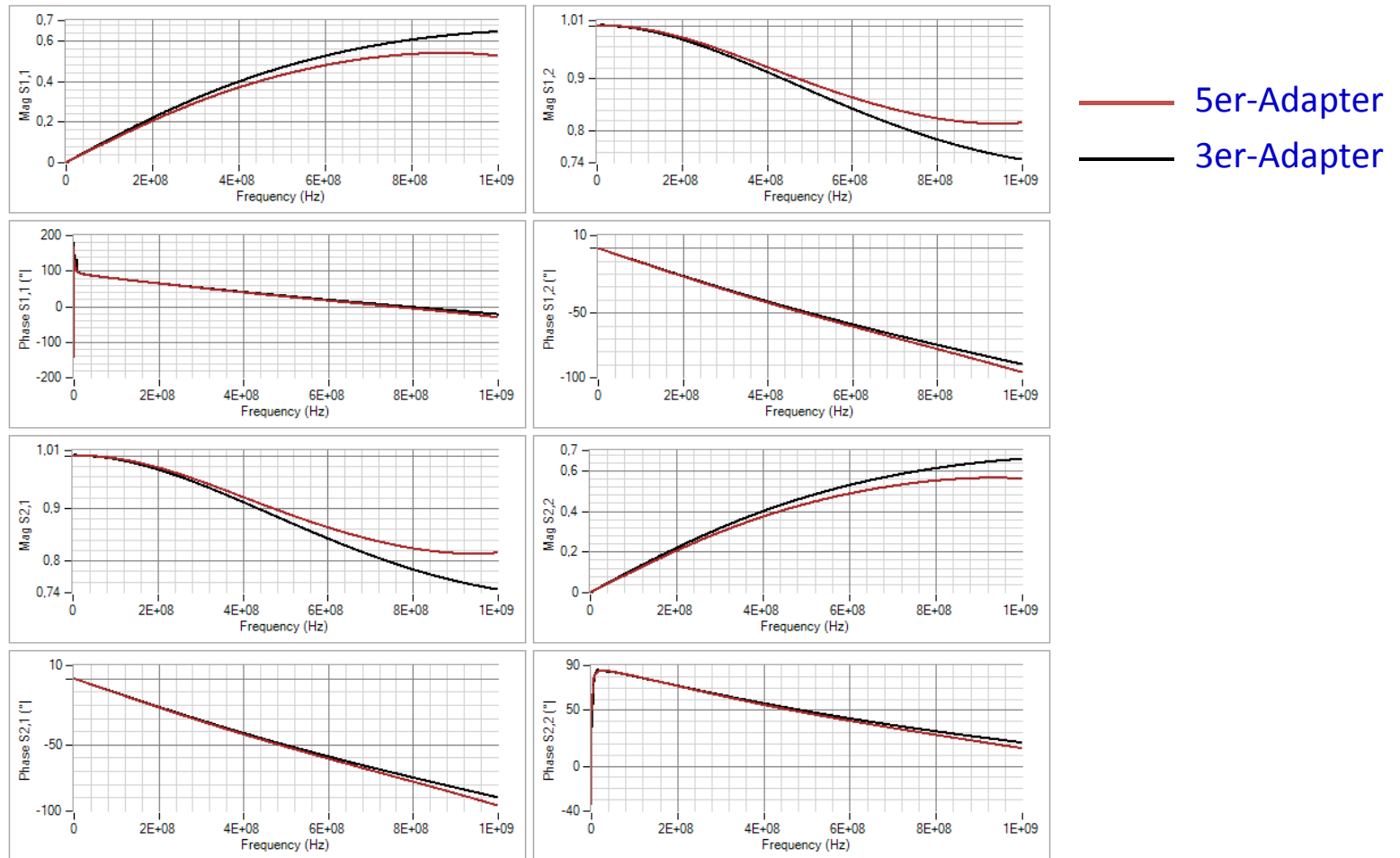
## B) Modellierung des Messadapters mittels EM-Simulation (CST Microwave Studio)



$$Z_{\text{Tor2}} \approx 125 \Omega$$

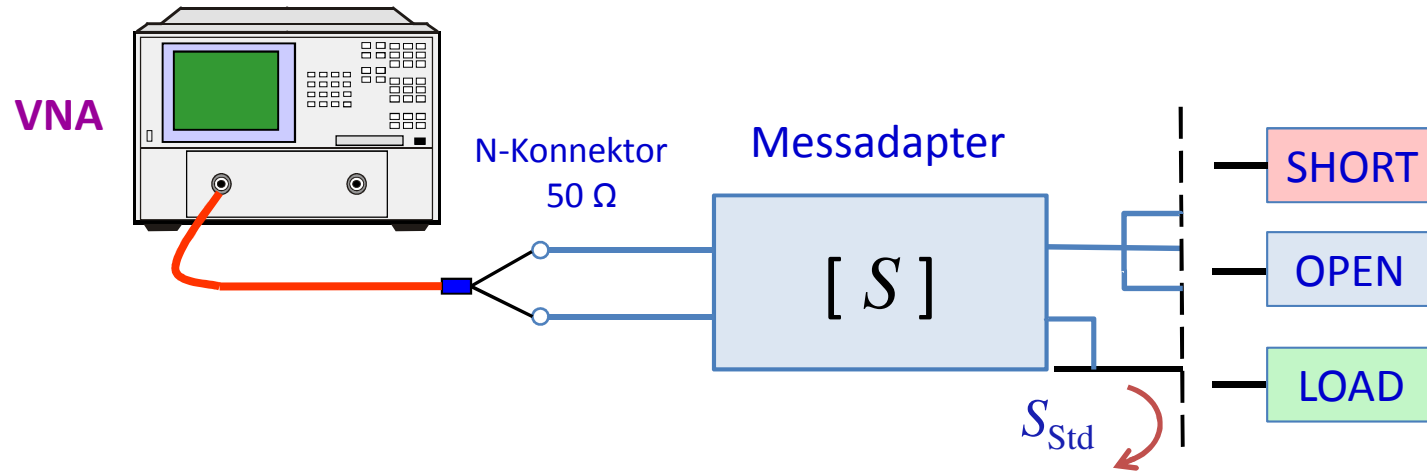
# Modellierung des Messadapters und der Kalibrierstandards (2)

- modellierte S-Parameter (CST-Simulation) des Messadapters bezogen auf 50  $\Omega$



# Modellierung des Messadapters und der Kalibrierstandards (3)

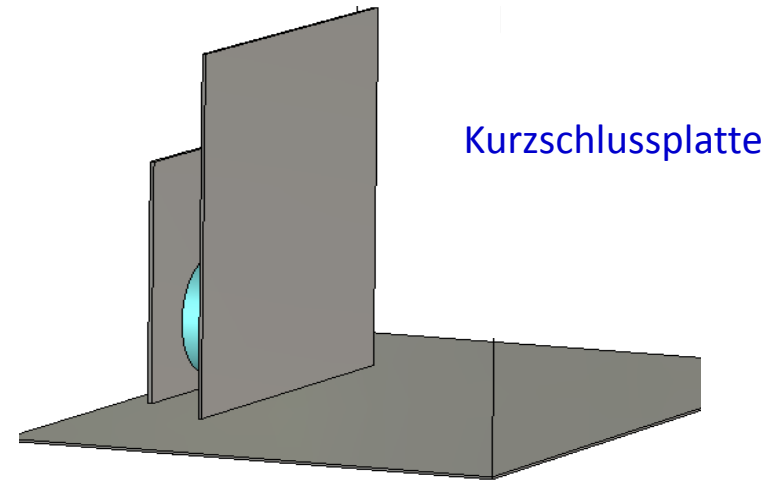
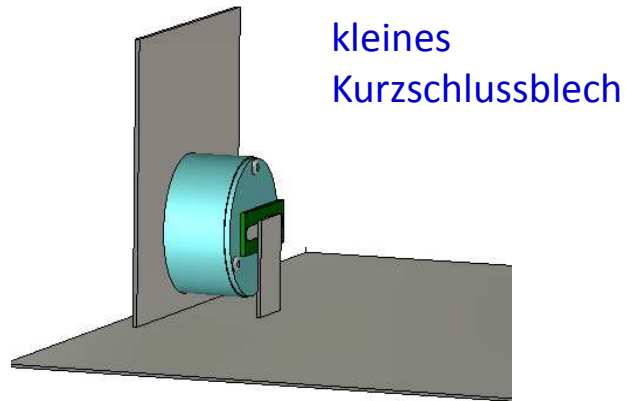
## C) VNA-Kalibrierung am **Ausgang** des Messadapters



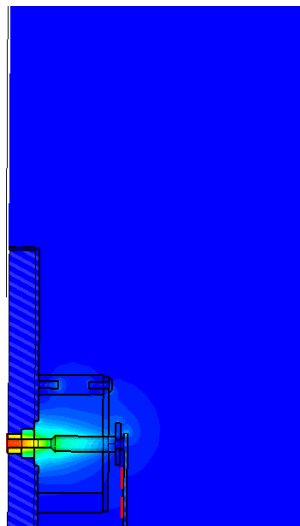
- SOL-Kalibrierung
- Modellierung der Eintorstandards (CST Microwave Studio)

# Modellierung des Messadapters und der Kalibrierstandards (4)

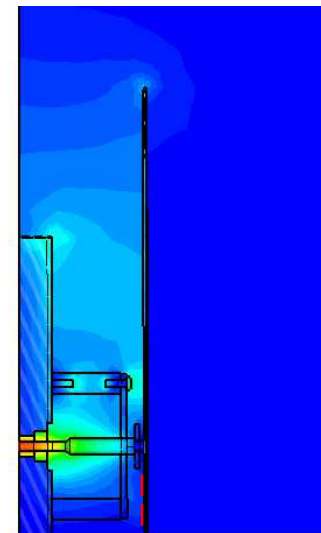
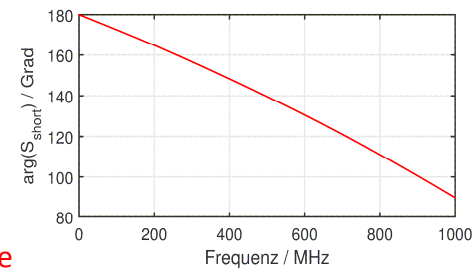
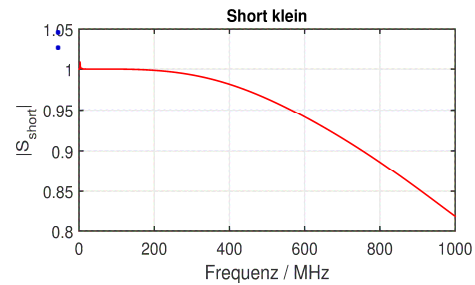
## 1. Modellierung Kurzschluss (SHORT)



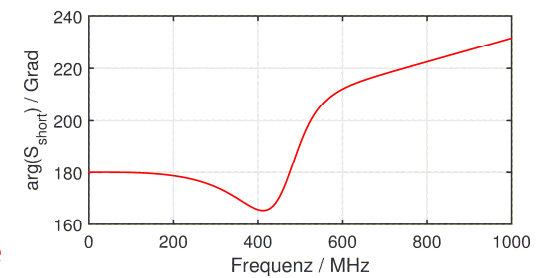
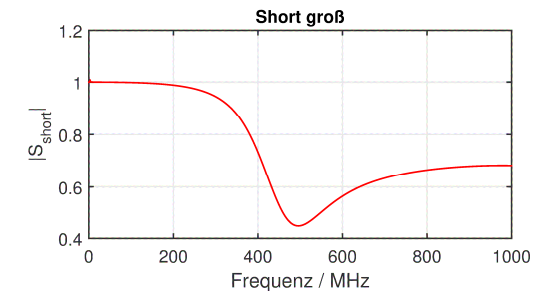
CST-Simulation ( $Z_0 = 50 \Omega$ )



Referenzebene



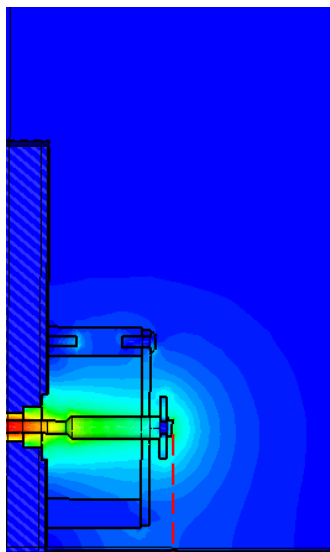
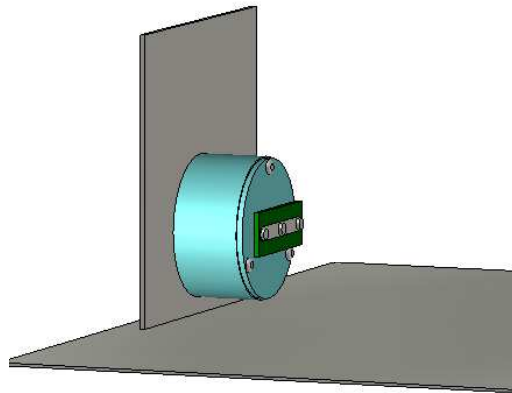
Referenzebene





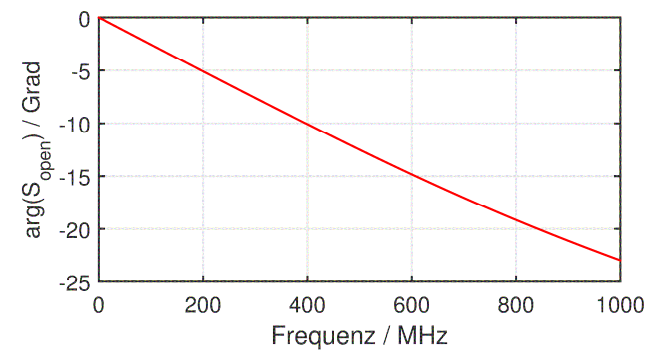
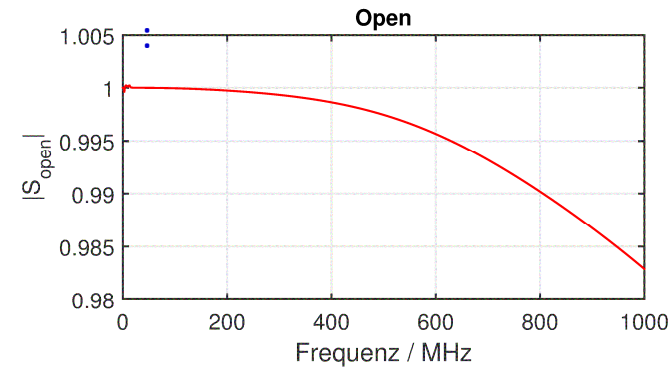
# Modellierung des Messadapters und der Kalibrierstandards (5)

## 2. Modellierung Leerlauf (OPEN)



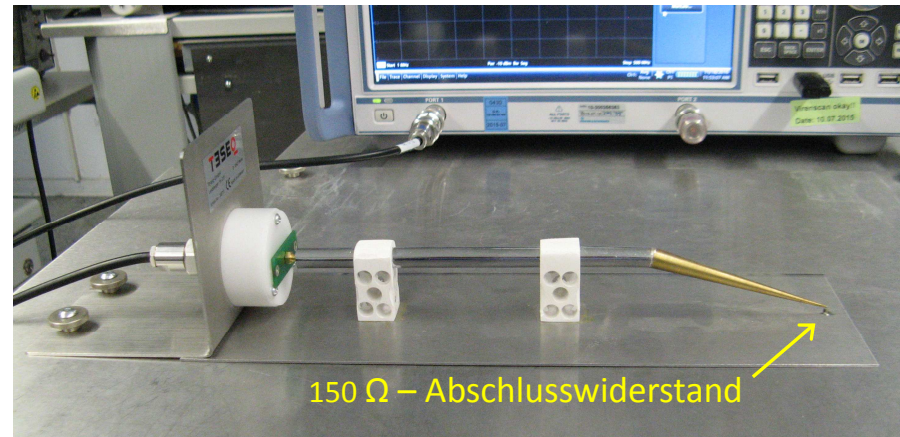
Referenzebene

CST-Simulation ( $Z_0 = 50 \Omega$ )



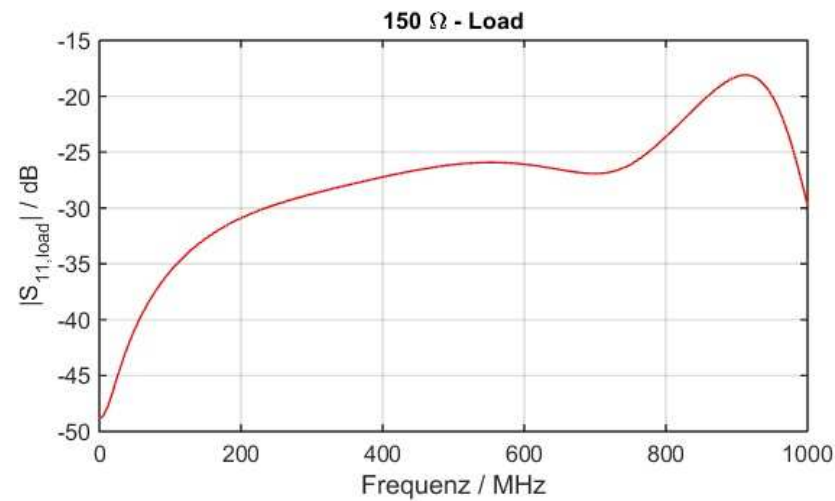
# Modellierung des Messadapters und der Kalibrierstandards (6)

## 3. Modellierung 150 $\Omega$ - Abschluss (LOAD)



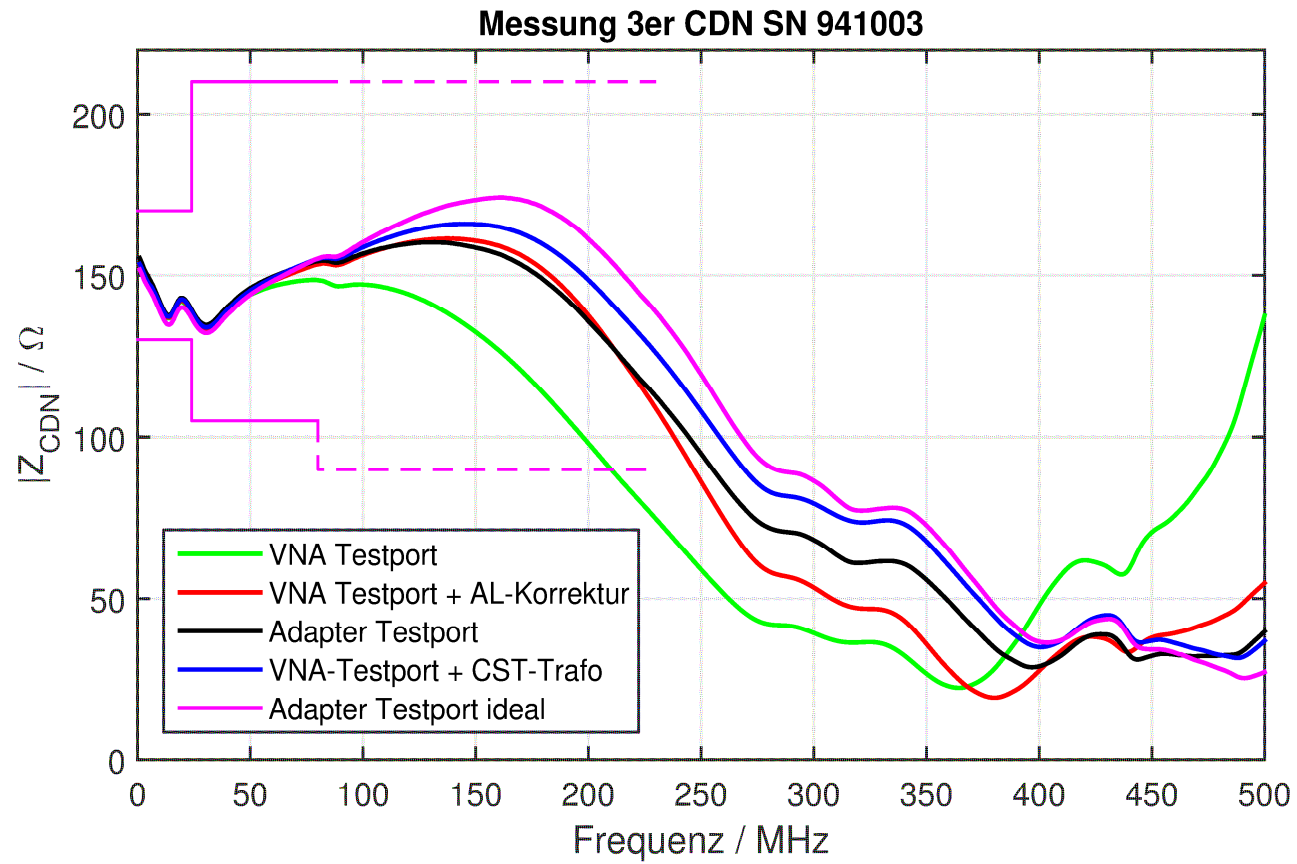
Fa. Teseq

CST-Simulation:  
( $Z_0 = 150 \Omega$ )



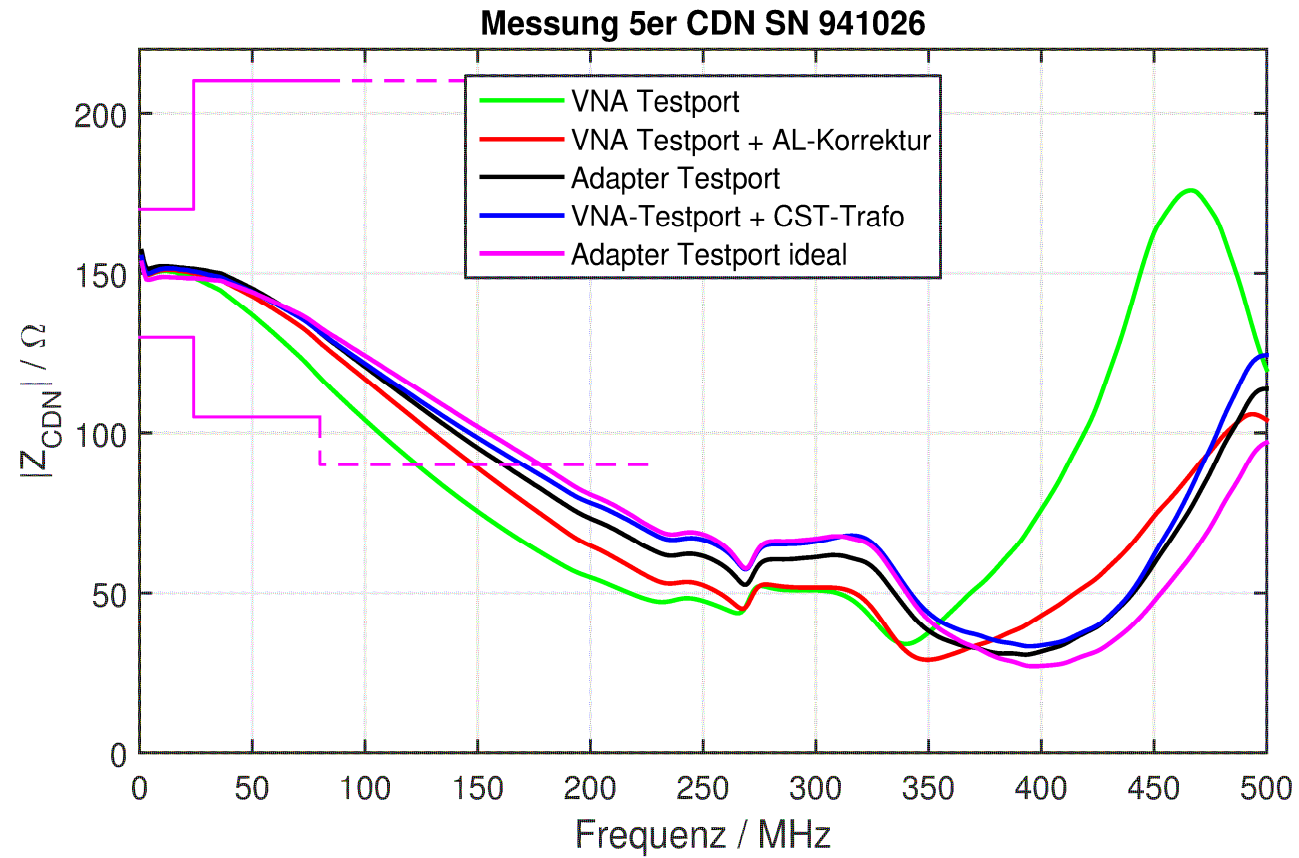
# Vergleich unterschiedlicher Verfahren

## Messung 3er-CDN:



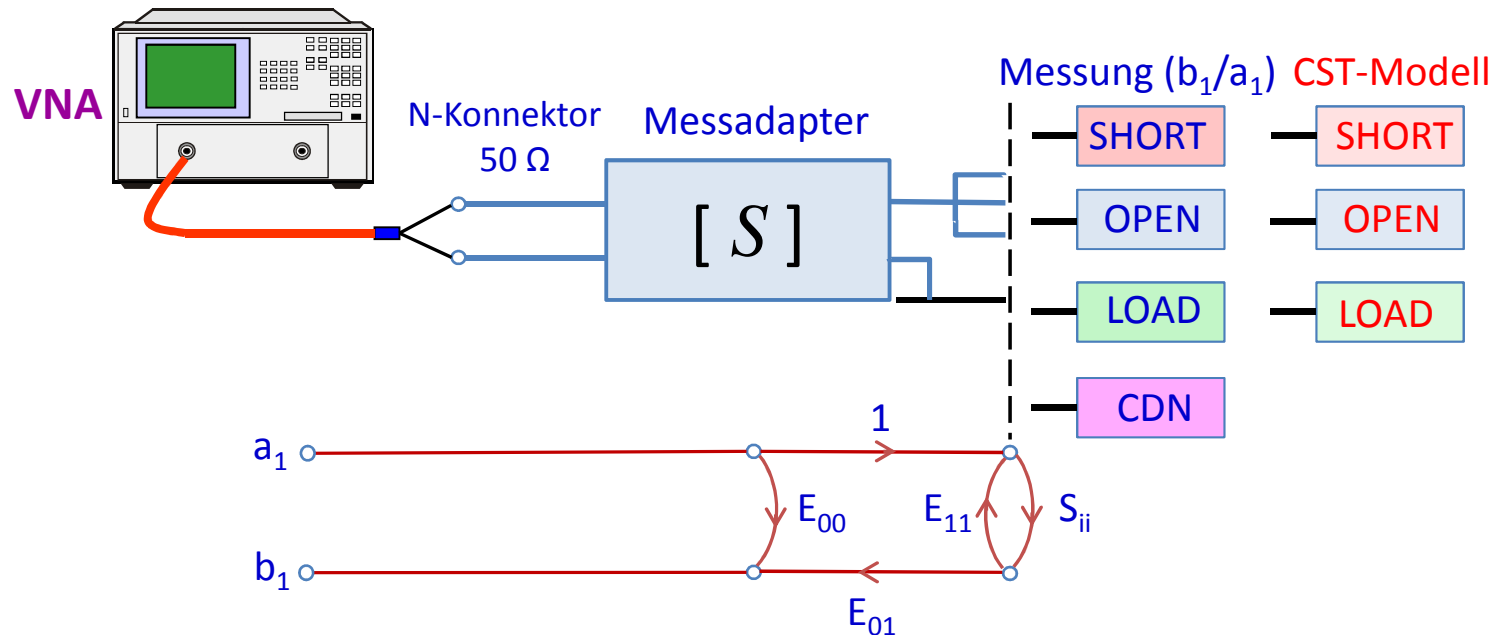
# Vergleich unterschiedlicher Verfahren (2)

Messung 5er-CDN:



# Messunsicherheitsanalyse

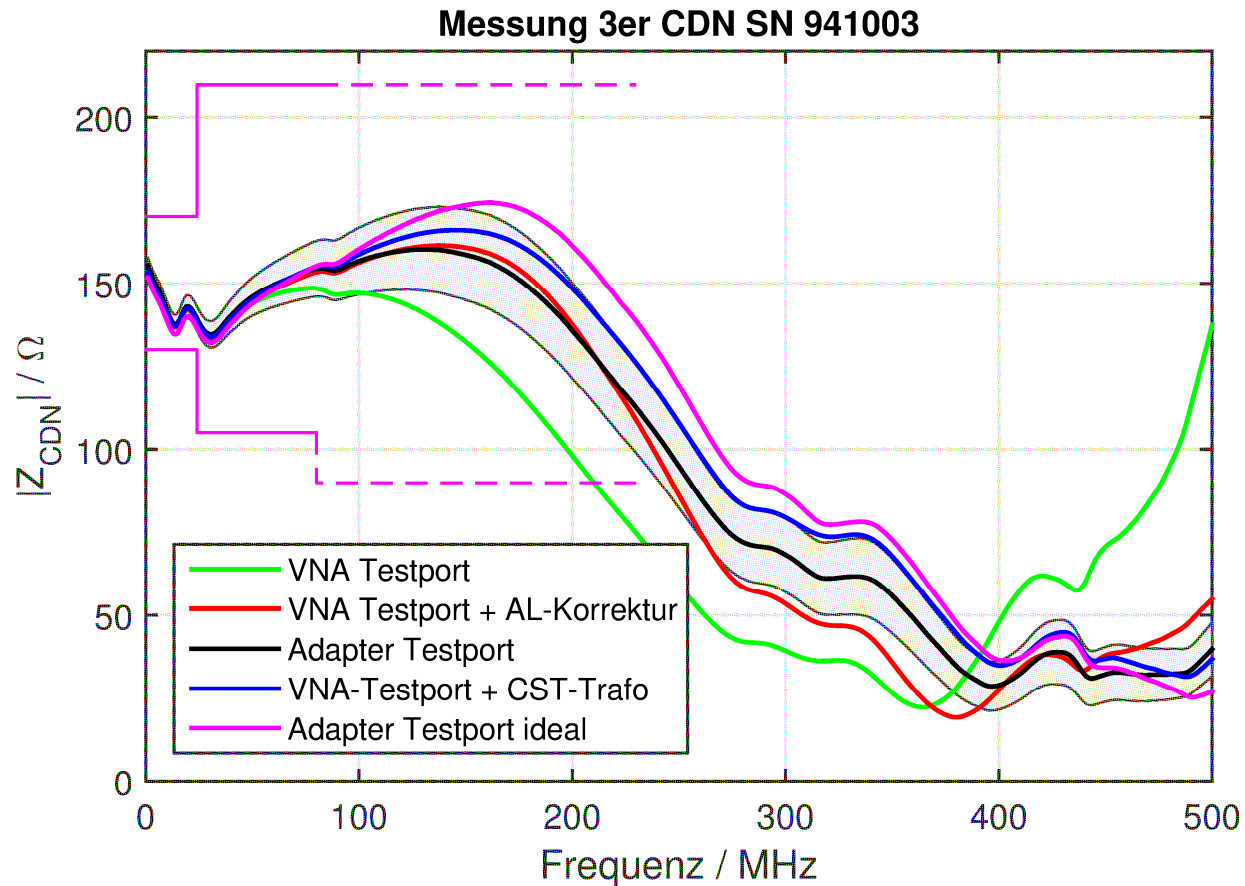
## SOL-Kalibrierung am Ausgang des Messadapters



- Reproduzierbarkeit der Rohdatenmessung für Standards und CDN (Typ A)
- Unsicherheit der Kalibrierstandarddefinitionen (CST-Modellierung):  
Annahme: jeweils linearer Anstieg der Unsicherheiten mit der Frequenz
- Vernachlässigung von VNA-Einflüssen (Drift, Nichtlinearität, Kabelbewegung)
- Externe Kalibrierung und Fehlerpropagation durch VNA-Eintorfehlermodell (Matlab, METAS Uncertainty Library)

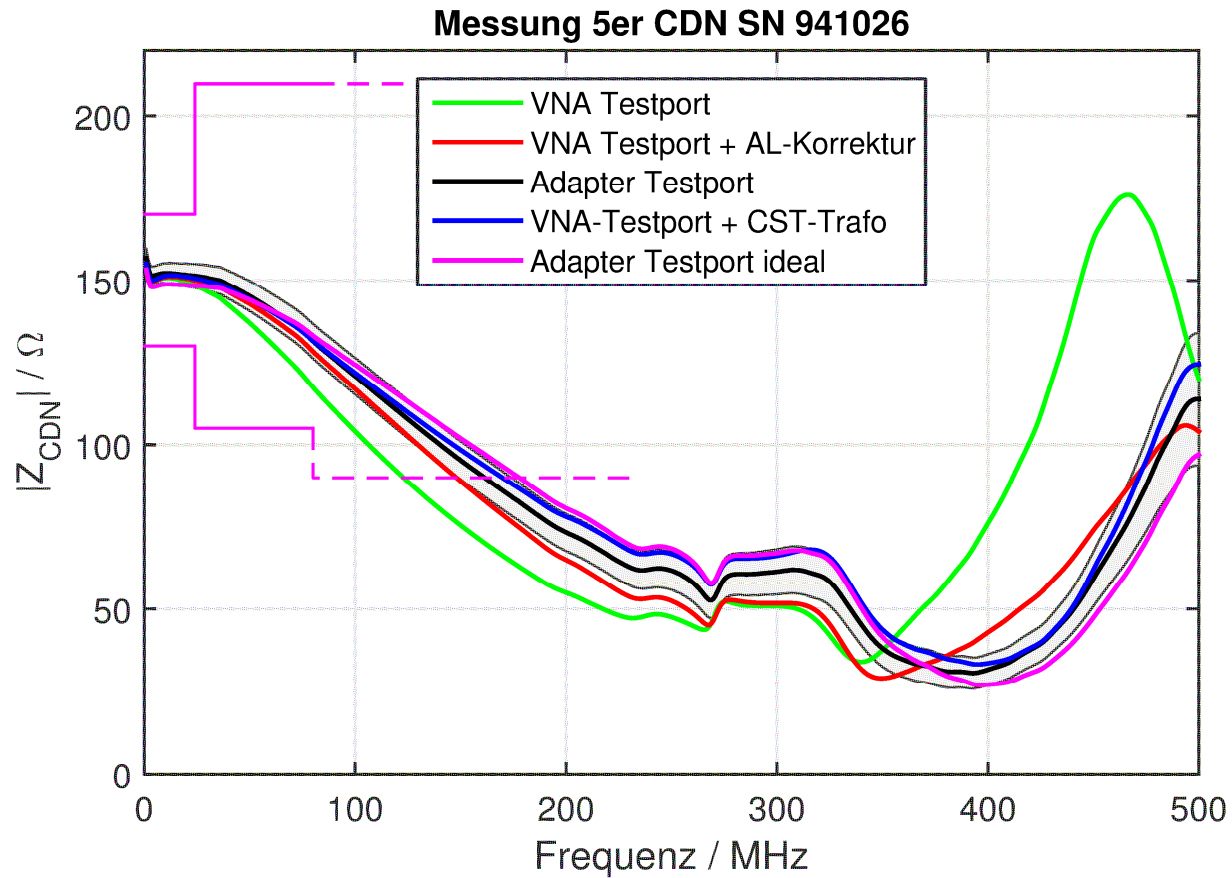
# Messunsicherheitsanalyse (2)

- Erweiterte Messunsicherheit bei **Kalibrierung am Adapterausgang:**



# Messunsicherheitsanalyse (3)

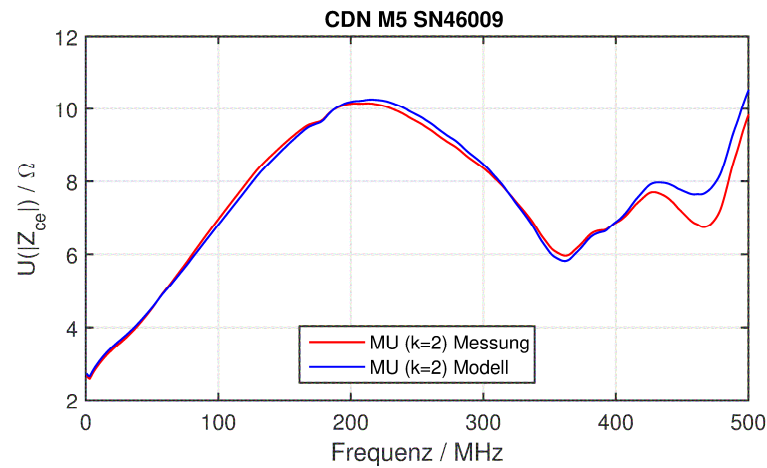
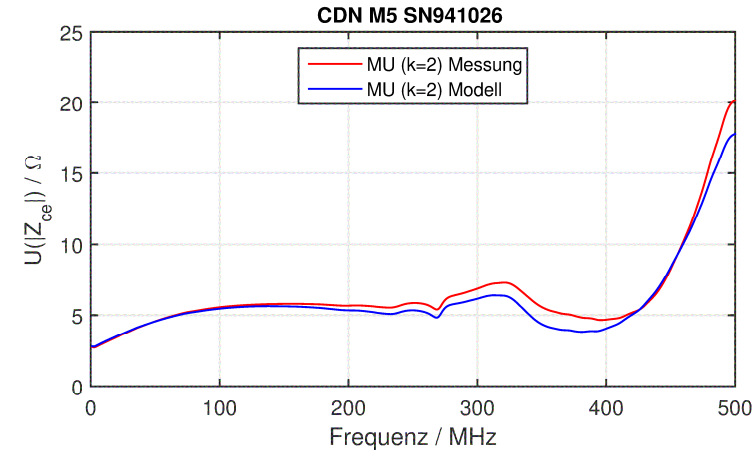
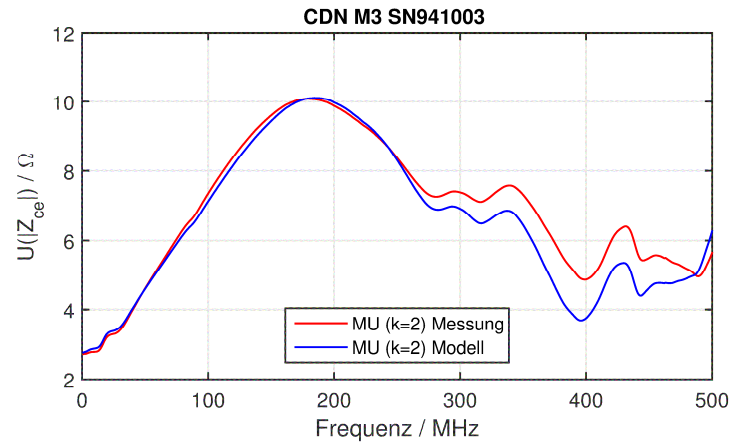
- Erweiterte Messunsicherheit bei **Kalibrierung am Adapterausgang**:



# Messunsicherheitsanalyse (4)

Modellierung der Messunsicherheit am Kalibrieradapterausgang:

$$U(|Z_{ce}|) \approx \left[ U(|Z_{ce}|) \Big|_{f=0} + \frac{f}{23 \text{ MHz}} \Omega \right] \cdot \frac{|Z_{ce}|}{|Z_{ce}(f=0)|}$$





# Zusammenfassung

- Untersuchung von Messverfahren zur Bestimmung der Eingangsimpedanz von Kopplungs-/Entkopplungsnetzwerken (CDN)

- A) Modellierung durch homogene 50  $\Omega$ -Leitungssektion

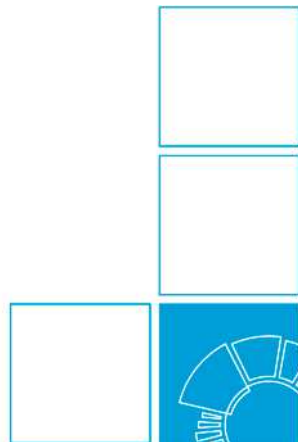
- B) Modellierung des Messadapters mittels EM-Simulation (CST Microwave Studio)

- C) VNA-Kalibrierung am Ausgang des Messadapters

- gute Übereinstimmung der Messverfahren bis 500 MHz

- einfache Leitungslängenkorrektur anwendbar bis 80 MHz

- linearer Anstieg der Messunsicherheit mit dem Betrag der Eingangsimpedanz



**Physikalisch-Technische Bundesanstalt  
Braunschweig und Berlin**

Bundesallee 100

38116 Braunschweig

Dr.-Ing. Rolf Judaschke

Working group 2.22 High Frequency Measuring Techniques

Phone: 0531 592-2229

E-Mail: [rolf.judaschke@ptb.de](mailto:rolf.judaschke@ptb.de)

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