

# Charakterisierung von Datenkabeln - Annäherung von Simulation und Messung

FRANZ HIRTENFELDER  
PRINCIPAL ENGINEER

CST AG BRANCH OFFICE MUNICH  
ELSENHEIMER STRASSE 55  
80687 MÜNCHEN (MUNICH)  
GERMANY

[FRANZ.HIRTENFELDER@CST.COM](mailto:FRANZ.HIRTENFELDER@CST.COM)  
[WWW.CST.COM](http://WWW.CST.COM)



MAXIMILIAN J. SCHWAIGER  
R&D CU-DATA

DÄTWYLER CABLES GMBH  
LILIENTHALSTRASSE 17  
85399 HALLBERGMOOS  
GERMANY

[MAX.SCHWAIGER@DATWYLER.COM](mailto:MAX.SCHWAIGER@DATWYLER.COM)  
[WWW.CABLING.DATWYLER.COM](http://WWW.CABLING.DATWYLER.COM)



# Einführung /Problemstellung

## Netzwerk (LAN) :

- symmetrische Übertragung
- Datenkabel vier unterschiedlich stark verdrehten Adernpaaren
- können aber Paar- und Gesamtschirm haben

## Ungeschirmtes Datenkabel CU 662 4P UUTP, Kat 6

### BESCHREIBUNG

Elektrisch und mechanisch hochwertiges Cat.6-Datenkabel - erfüllt die Anforderungen der ISO/IEC 11801, IEC 61156-5, EN 50173-1 und EN 50288-6-1.

Sehr hohe Verlegestabilität dank Kabelkonstruktion mit Kreuzprofil.

Hohe NEXT-Reserve durch die Kreuzkonstruktion.

Kompatibel mit allen gängigen Stecksystemen nach EN 50173 und ISO/IEC 11801.

### ANWENDUNG

Datenkabel für die strukturierte Gebäudeverkabelung.

Für die Übertragung von digitalen und analogen Sprach-, Bild- und Datensignalen.

Einsetzbar für alle ICT-Netzanwendungen bis zur Klasse E (250 MHz) gemäß EN 50173-1 und ISO/IEC 11801.

Geeignet für die Übertragung von Power over Ethernet (PoE) / PoE+.



# Einführung /Problemstellung

- Hoher experimenteller Aufwand zur Optimierung von Übertragungseigenschaften

## Simulation:

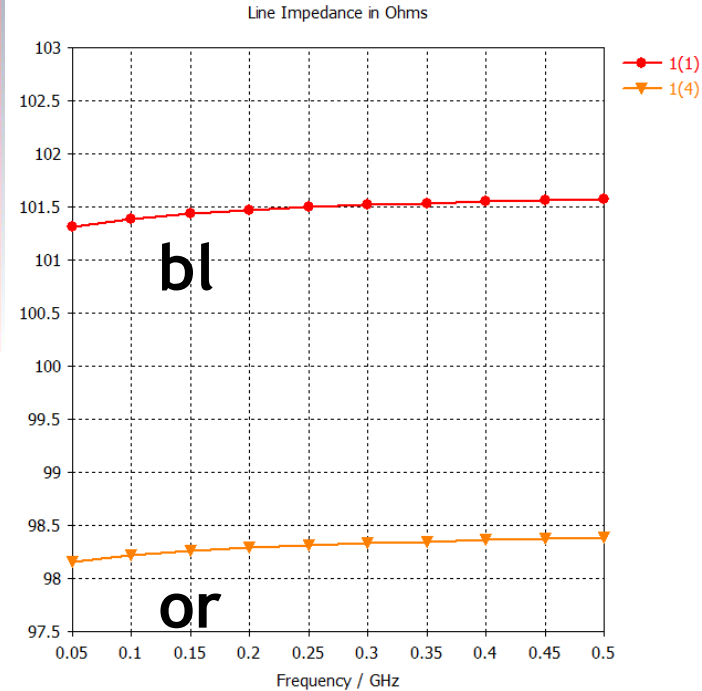
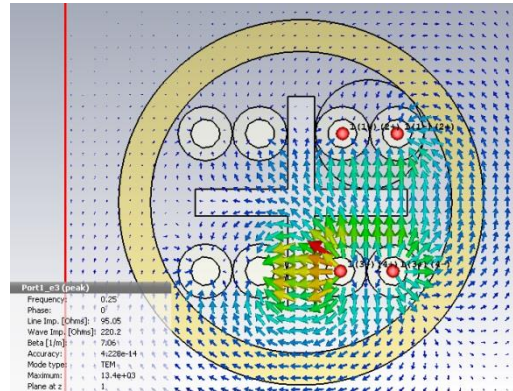
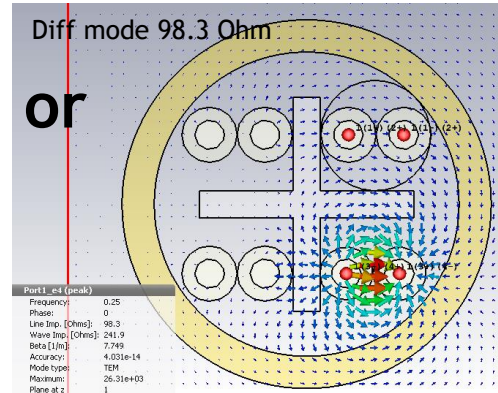
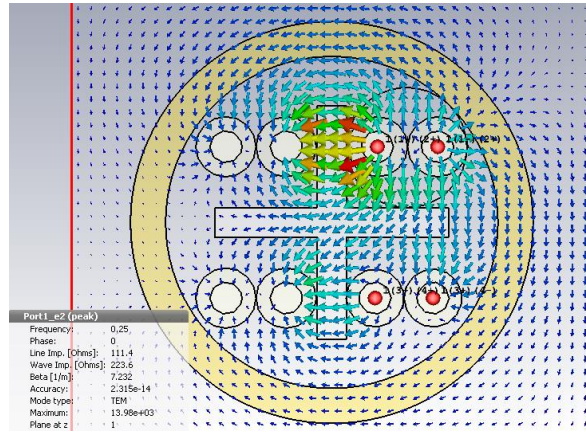
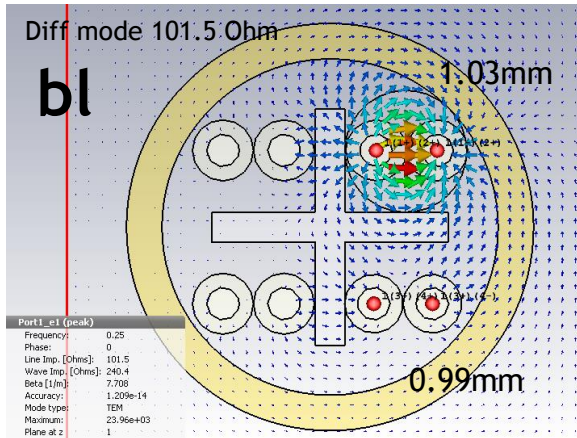
- Flexibilität hinsichtlich geometrischer/materieller Variationsmöglichkeiten
- Zusammenhänge und korrespondierende Abhängigkeiten zwischen mechanischen und elektrischen Eigenschaften einfacher, deutlicher und schneller erkannt werden
- Übertragungsverhalten von Datenkabel realistischer vorhersagbar
- breitbandige Extraktion der dielektrischen, dispersiven Materialparameter
- Einfluss der metallischen Kabelführungssysteme
- periodische Fixierungen beeinflussen das Übertragungsverhalten
- Abweichungen und Toleranzen beim Produktionsprozess

# Übersicht

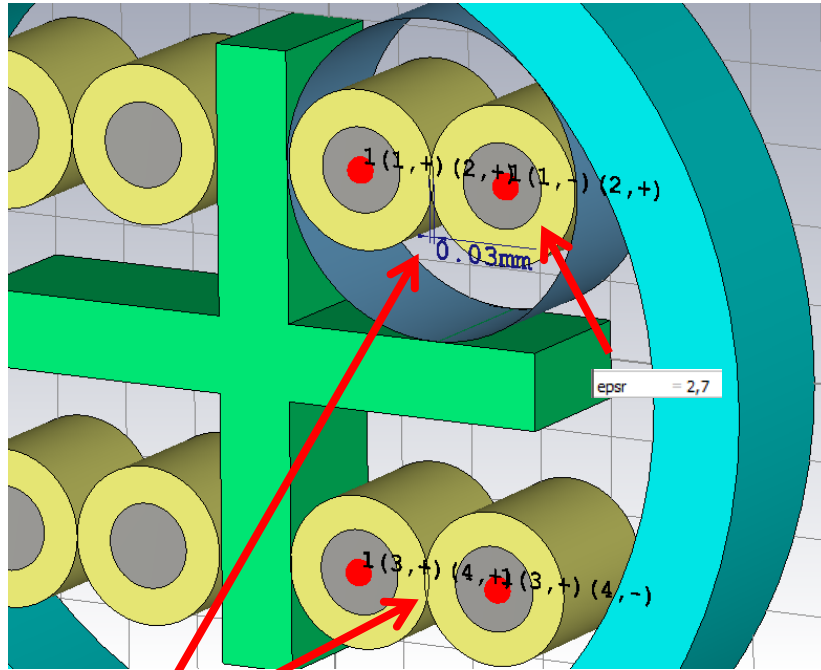
---

- Einführung /Problemstellung
- **Kabeldefinition in CST MWS-Studio und CST CBLS-Studio**
- Testmodell und Ergebnisse für ein 10m Kabel
  - NEXT: Untersuchungen bzgl. Messadapter
  - Unsymmetrie-Verbesserungen (TCTL, TCL)
- Kabel in Metall-Umgebung
- Periodizitäten
- Materialextraktion

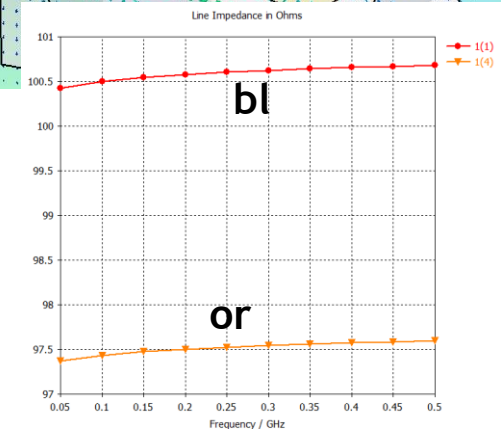
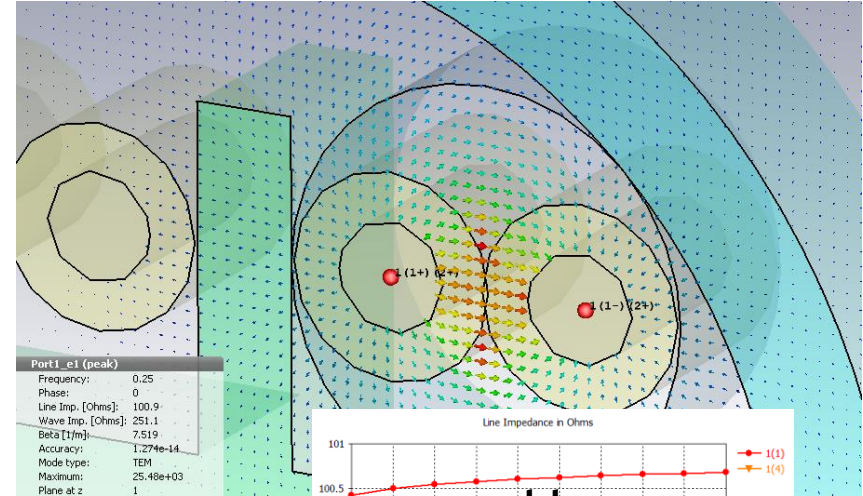
# CST MWS (3D) > Leitungs Impedanz



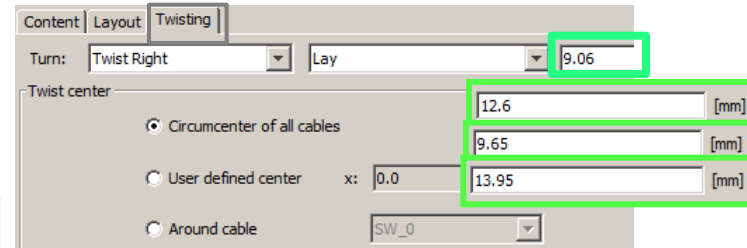
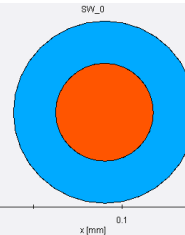
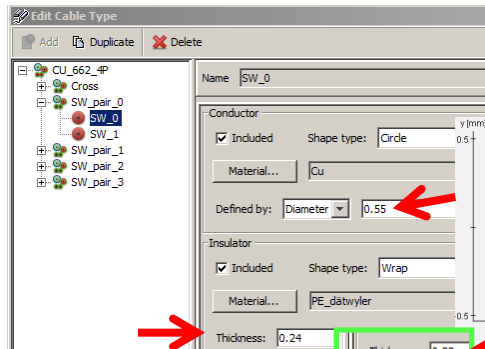
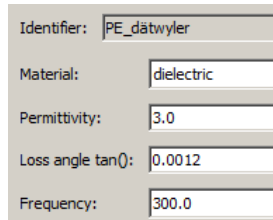
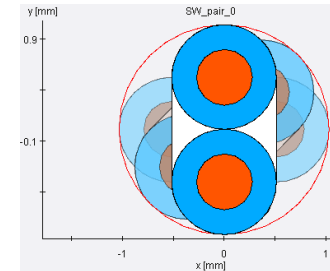
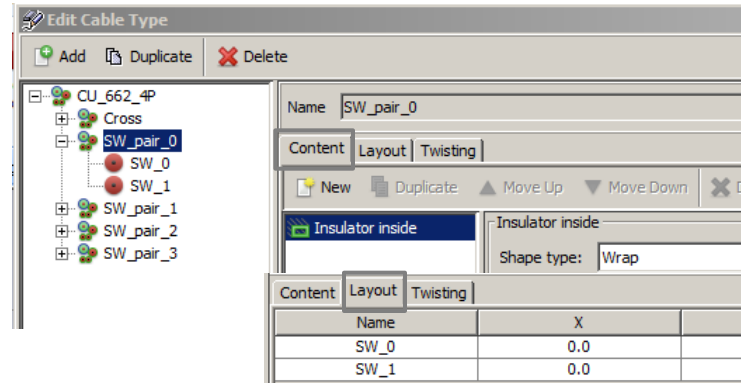
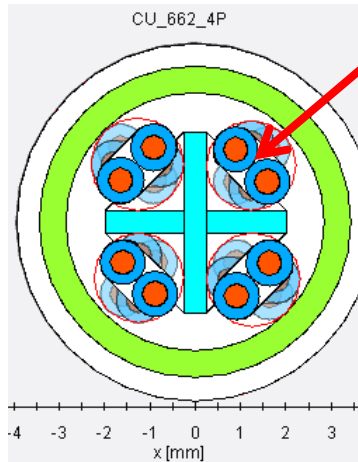
# CST-MWS (3D) > Leistungs Impedanz



Abflachung der Isolierung beeinflusst die Impedanz

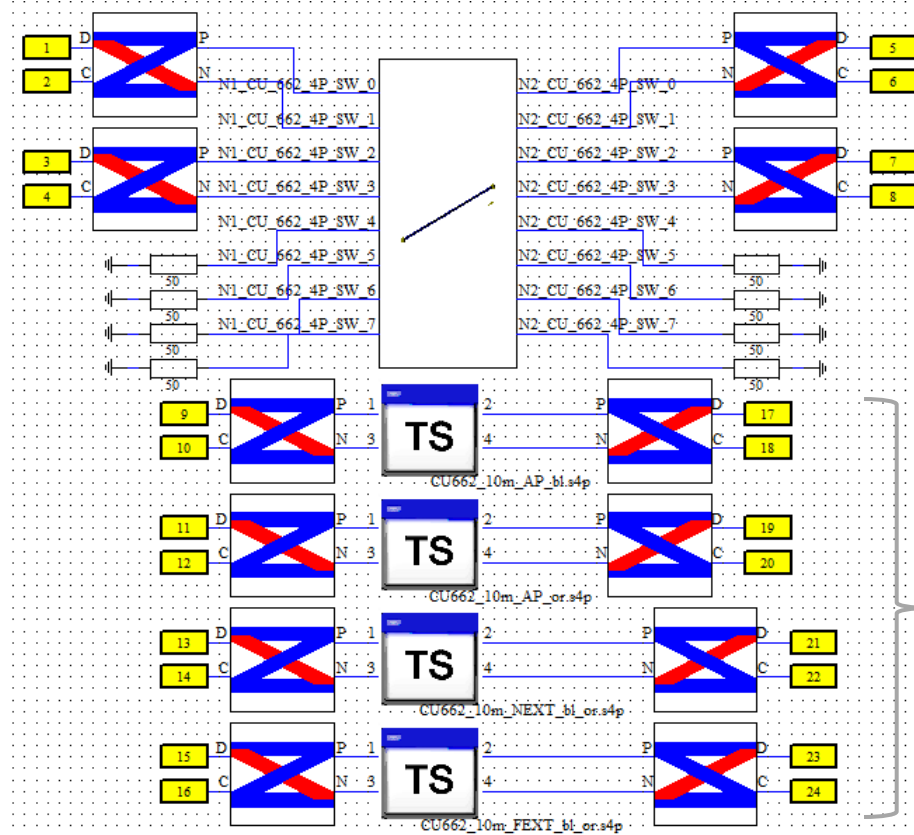
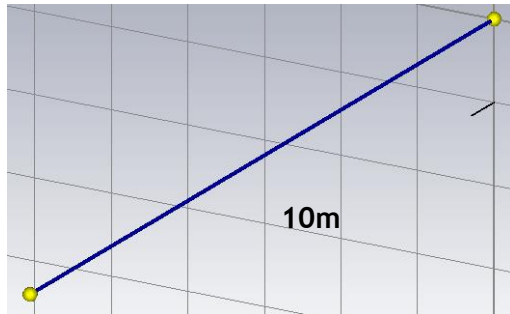
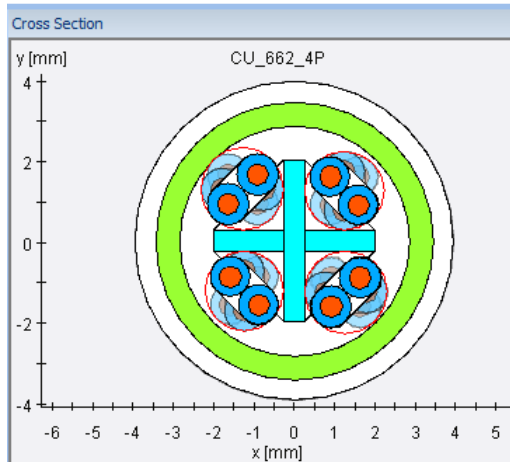


# CST-CBLS: Kabel-Definition



	Twist length	Wire-Isolation $\Phi$	CBLS Name
blue:	9.06 mm	1.03	SW_0, SW_1
Orange:	12.60 mm	0.99	SW_2, SW_3
green:	9.65 mm	1.03	SW_4, SW_5
brown:	13.95 mm	0.99	SW_6, SW_7

# CST-DS: Schaltungssimulator 10 m Kabel



Kabel mit 4  
Konvertern und 4-  
Port Netzwerk-  
Analysator

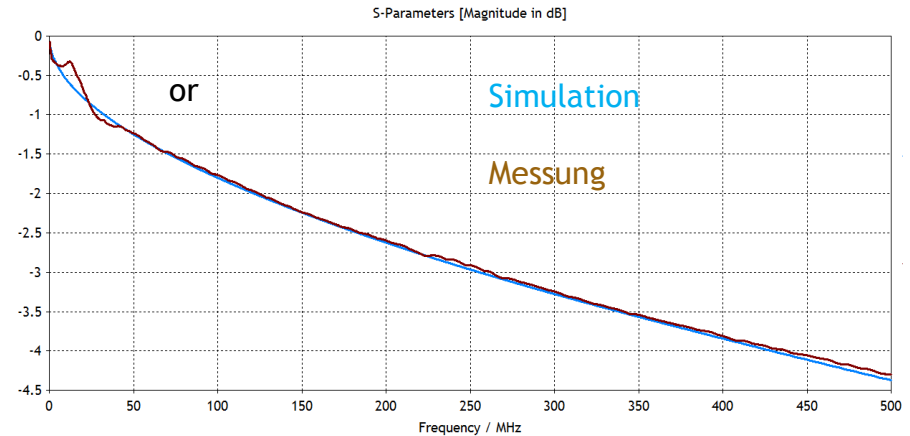
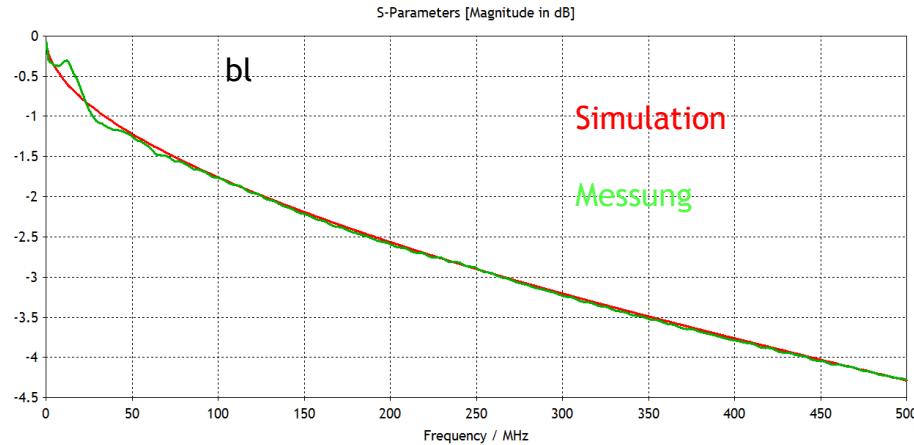
Messung:  
Touchstone  
Importe

# Übersicht

---

- Einführung /Problemstellung
- Kabeldefinition in CST MWS-Studio und CST CBLS-Studio
- **Testmodell und Ergebnisse für ein 10m Kabel**
  - NEXT: Untersuchungen bzgl. Messadapter
  - Unsymmetrie-Verbesserungen (TCTL, TCL)
- Kabel in Metall-Umgebung
- Periodizitäten
- Materialextraktion

# EinfügeDämpfung IL bl,or (dd)



Identifier: PE\_dätwyler

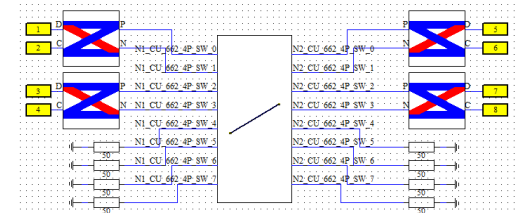
Material: dielectric

Permittivity: 3.0

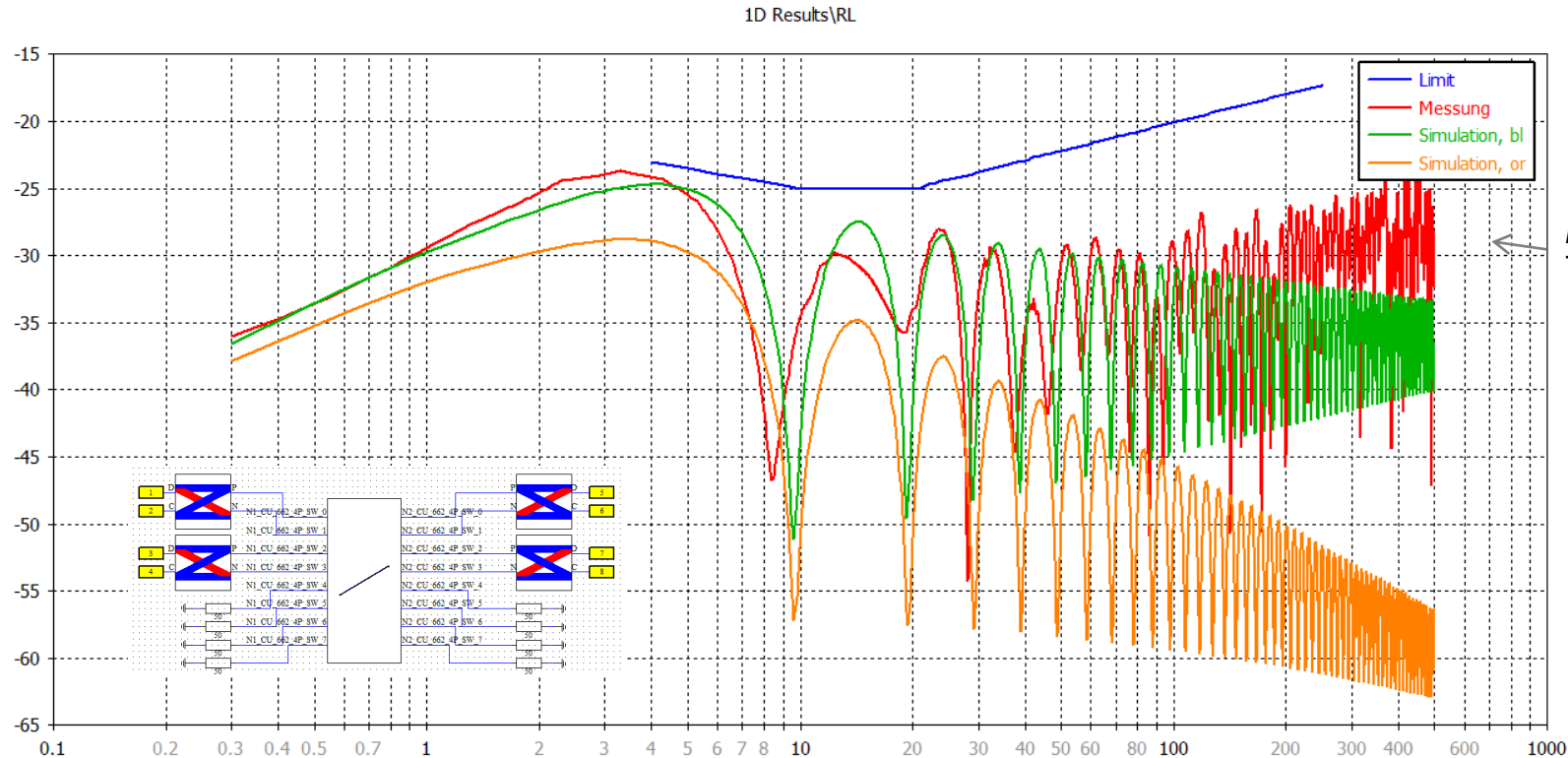
Loss angle tan(): 0.0012

Frequency: 300.0

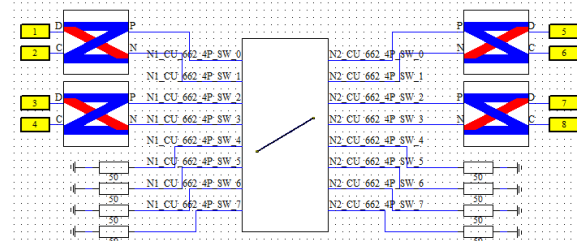
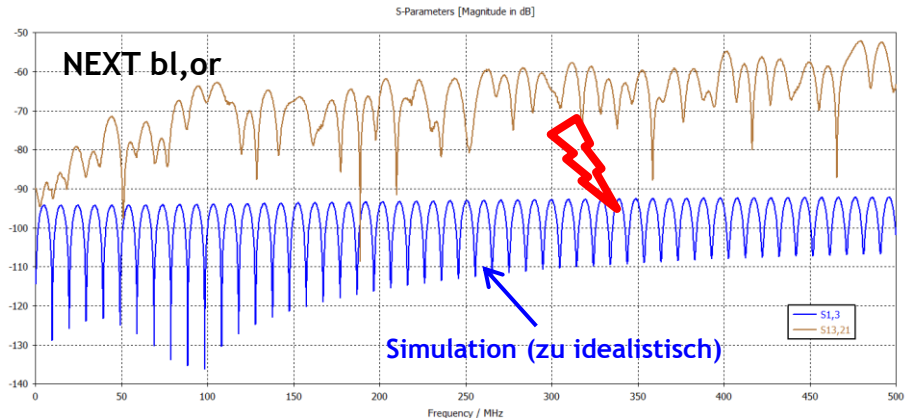
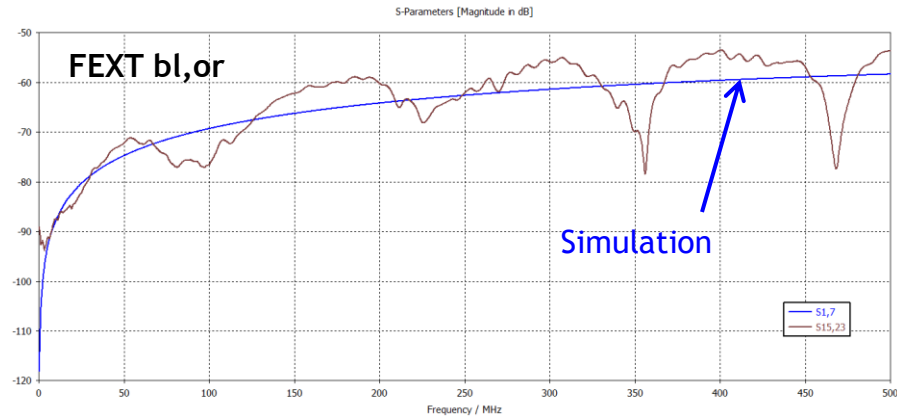
Materialbestimmung durch breitbandige  
Material-Extraktion aus den S-Parametern



# Reflexionsdämpfung RL bl,or (dd)



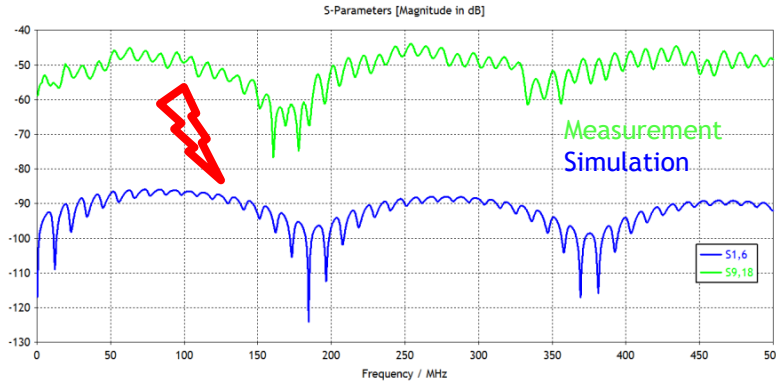
# Nebensprechen: FEXT/NEXT



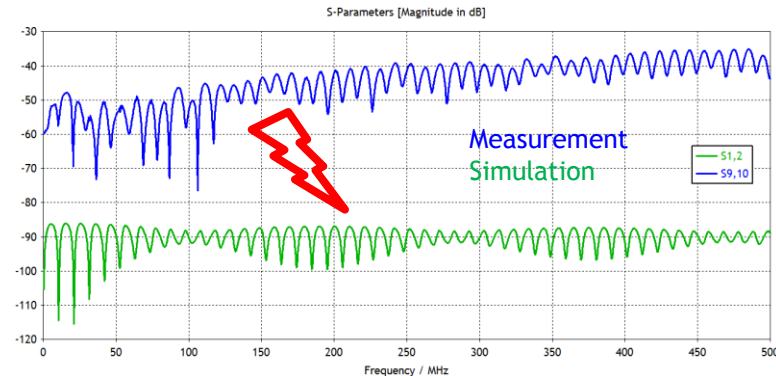
# TCTL (CMR far), TCL (CMR near)

\*TCTL: transverse converse (transfer) loss

bl



TCTL (CMR far)

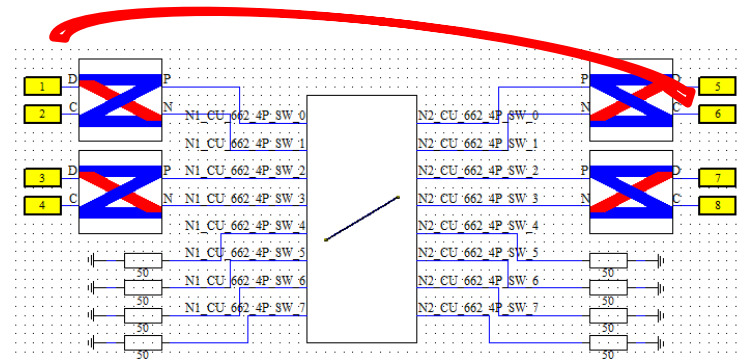


TCL (CMR near)

Gleiches gilt für TCTL und TCL: zu ideal

TCL

TCTL

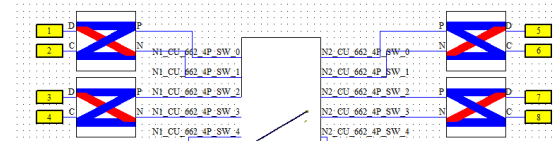
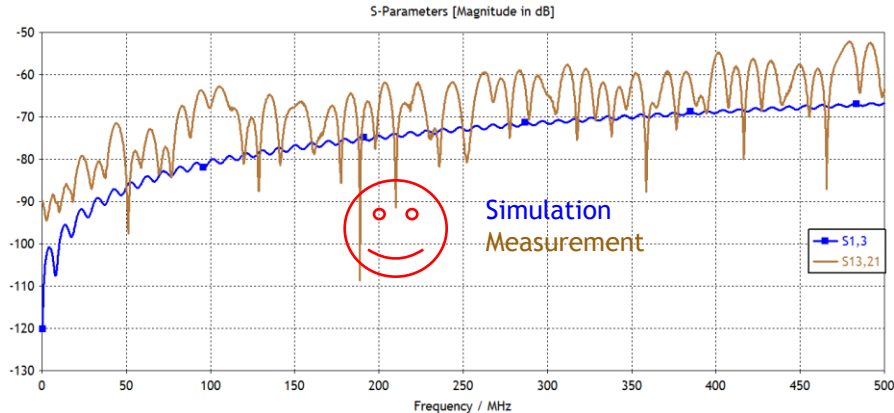
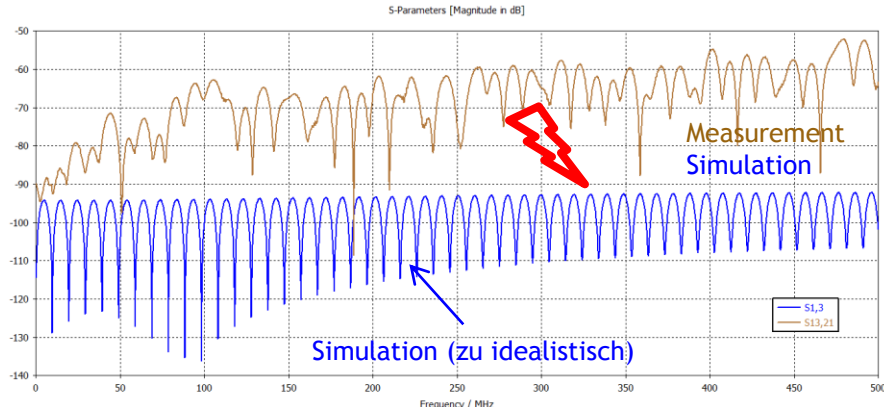


# Übersicht

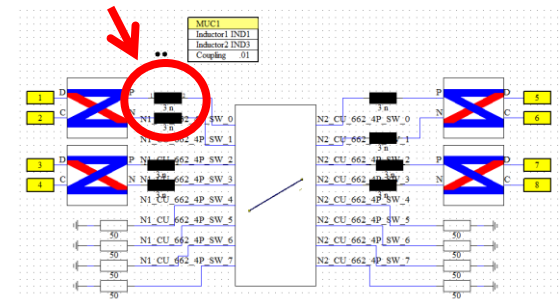
---

- Einführung /Problemstellung
- Kabeldefinition in CST MWS-Studio und CST CBLS-Studio
- Testmodell und Ergebnisse für ein 10m Kabel
  - **NEXT: Untersuchungen bzgl. Messadapter**
  - Unsymmetrie-Verbesserungen (TCTL, TCL)
- Kabel in Metall-Umgebung
- Periodizitäten
- Materialextraktion

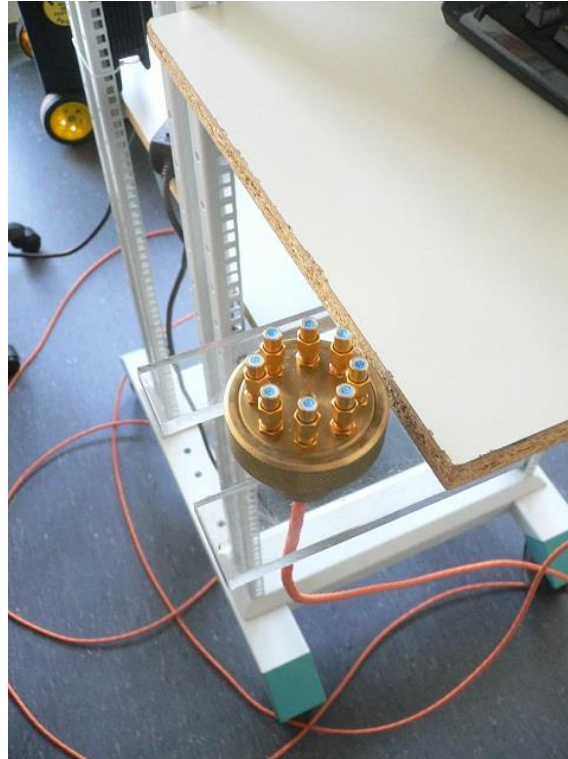
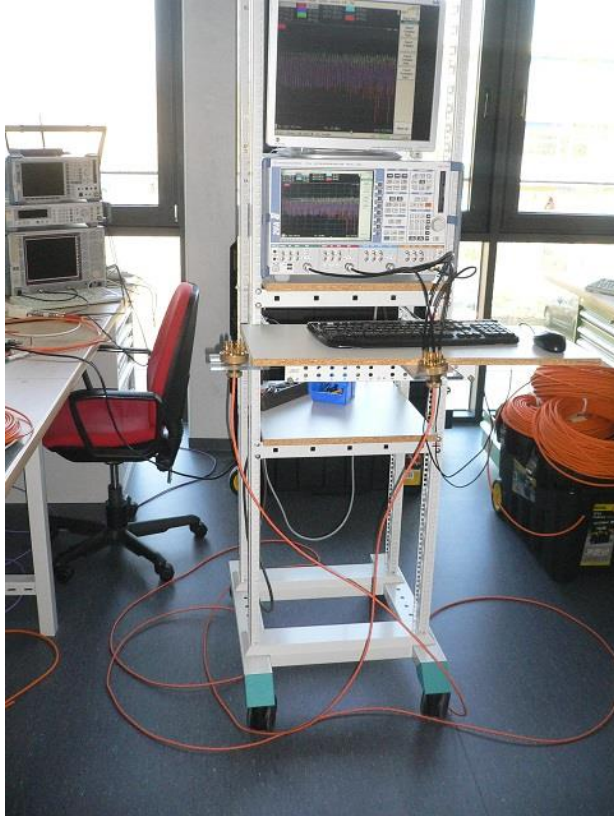
# NEXT bl,or



Verbesserung durch induktive  
Verkopplung:  $k=0.01$



# Messaufbau



# I. „Parasitäre Reaktanzen“



Bild 1: Kabelmessadapter

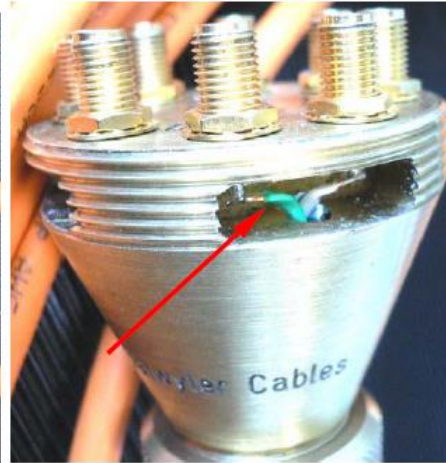


Bild 2: Resultierender induktiver Widerstand

Beim Anschließen des Datenkabels an den Kabelmessadapter müssen im Anschlussbereich jeweils die Adern der Adernpaare ca. 6 mm von der Mitte aus aufgetrennt werden. Damit verliert an dieser Stelle die symmetrische Leitung ihren Kapazitätsbelag und es bleibt in erster Näherung resultierend, die induktive Komponente zurück. Dieser komplexe induktive Widerstand ( $j\omega L$ ) nimmt linear mit der Frequenz ( $\omega=2\pi f$ ) zu.

Einführung einer parasitären Induktivität von ungefähr 2nH, entspricht einem Draht von ca 6 mm Länge

## I. „Parasitäre Reaktanzen“

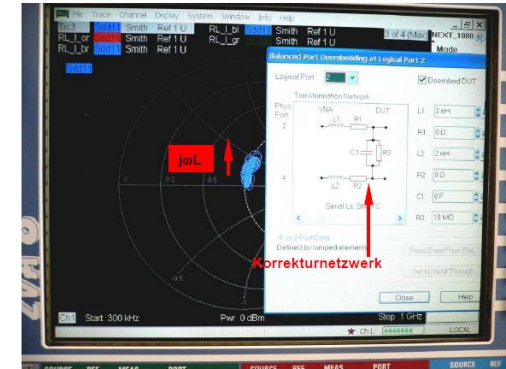
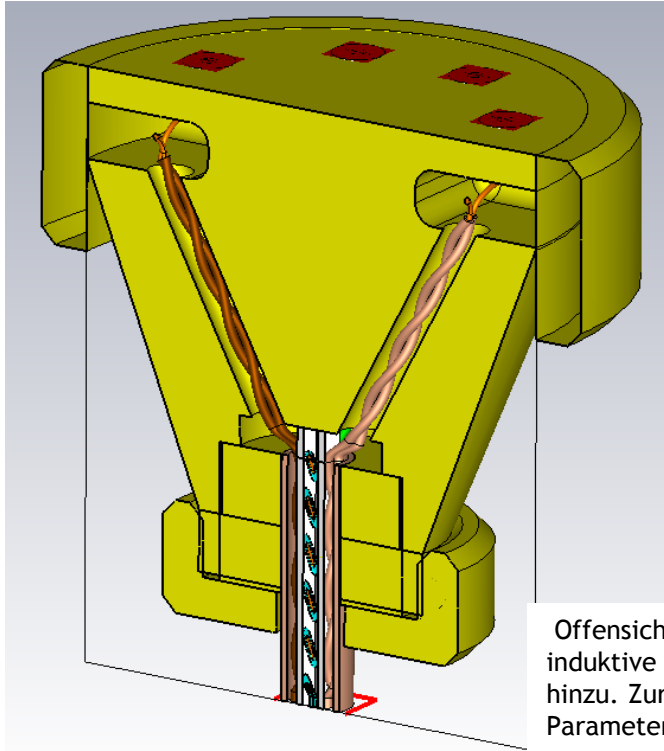


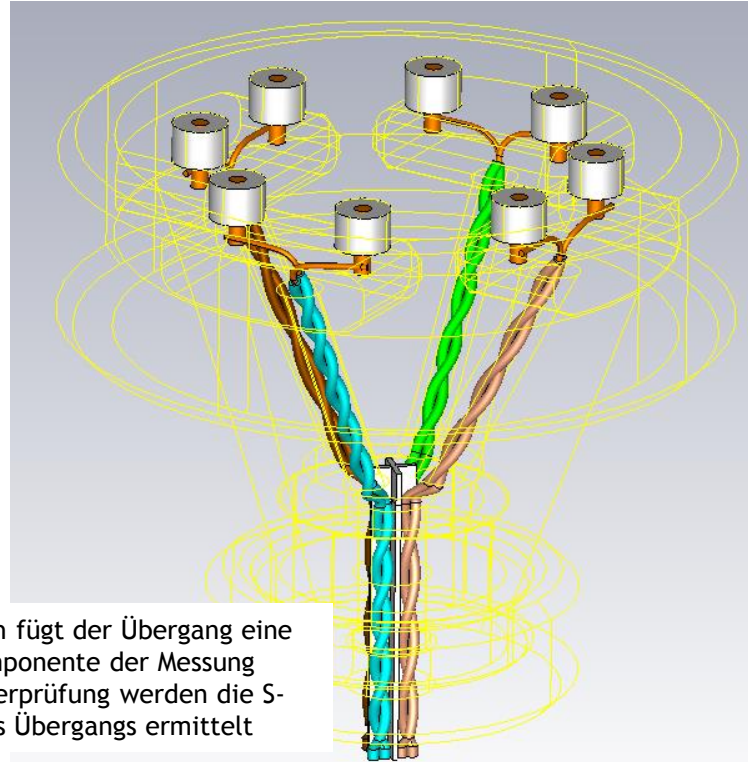
Bild 3: Eingangsimpedanz vom Kabel mit Anschlussinduktivität

In der komplexen Darstellung (z. B. Smith-Chart) der Reflexion lässt sich sehr gut diese induktive Anschlusskomponente am Eingang erkennen, weil dadurch mit zunehmender Frequenz die Reflexion vektoriell additiv in den induktiven Bereich „nach oben“ verschoben wird. Mit diesem Netzwerkanalysator kann das Ergebnis von diesen Anschlussreaktanzen bereinigt dargestellt werden.

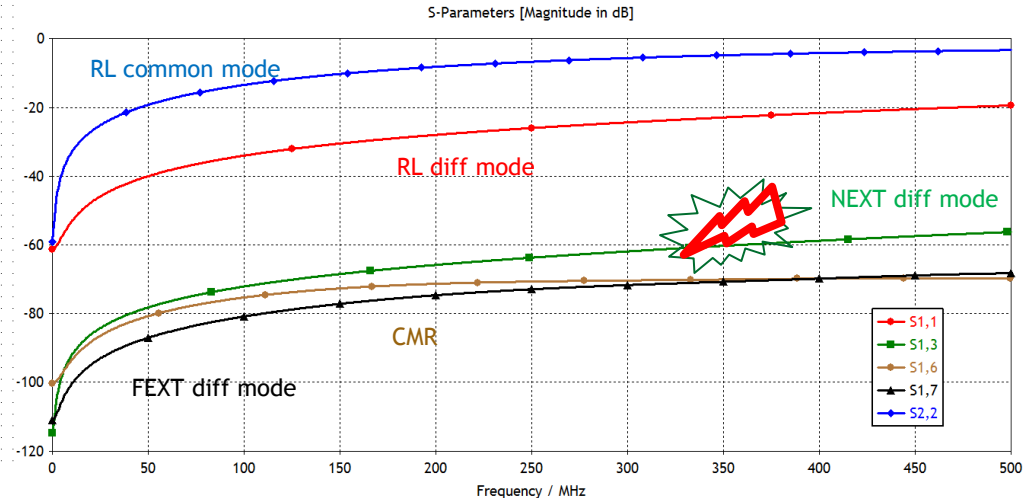
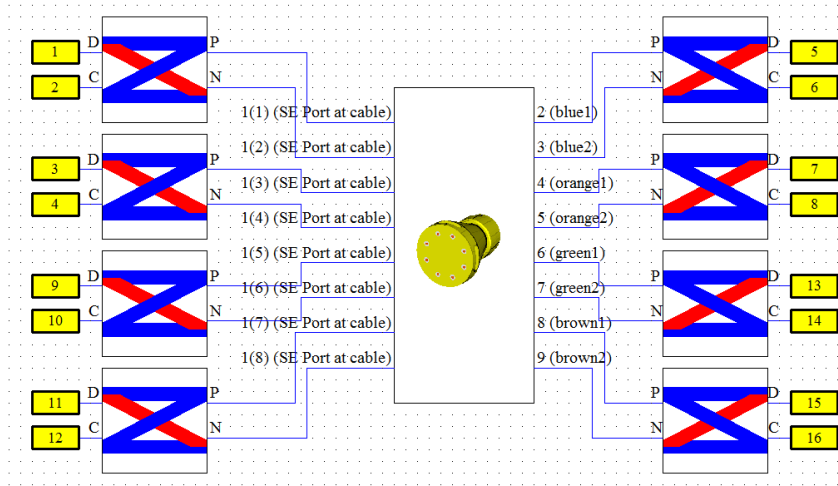
# Konischer Messadapter modelliert in3D CST-MWS



Offensichtlich fügt der Übergang eine induktive Komponente der Messung hinzu. Zur Überprüfung werden die S-Parameter des Übergangs ermittelt



# Messadapter: S-Parameter mit Konvertern



NEXT and FEXT zeigen einen relativ hohen Pegel über das ganze Frequenzband, welches die untere Grenze für den NEXT-Parameter bildet.

# Deembedding und Referenzebene

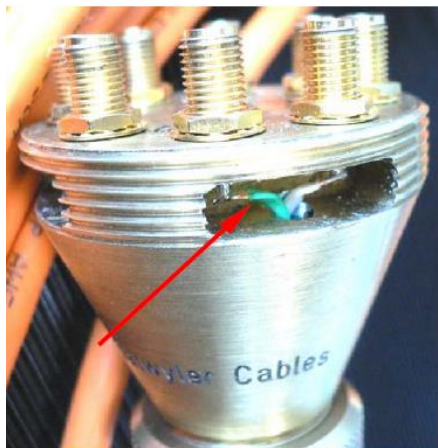


Bild 2: Resultierender induktiver Widerstand

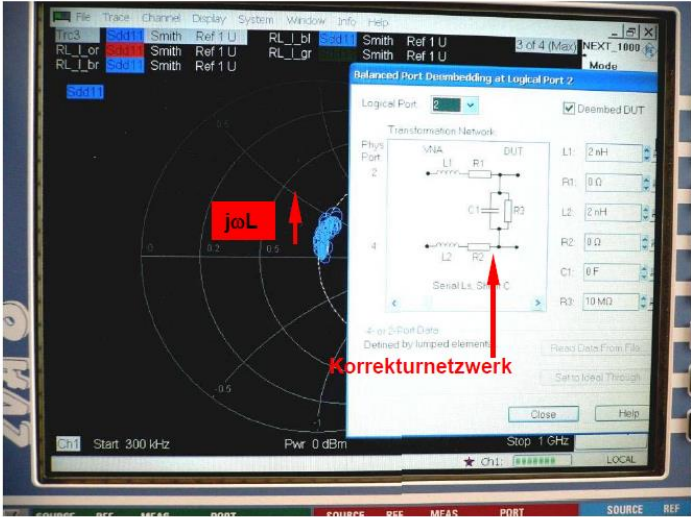
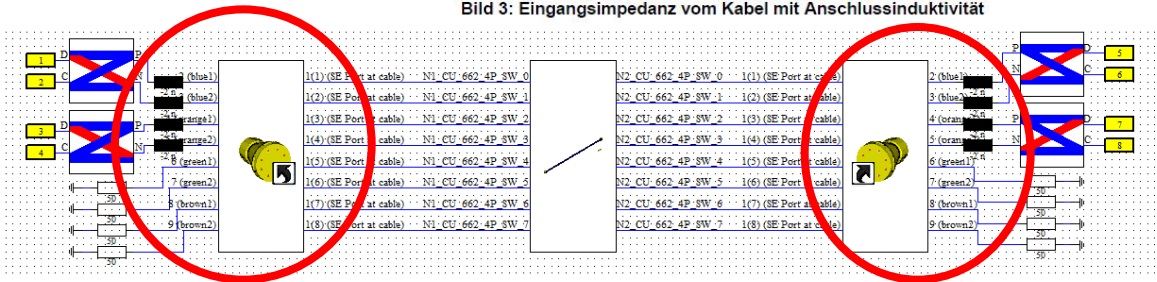


Bild 3: Eingangs impedanz vom Kabel mit Anschlussinduktivität



Um die Messergebnisse zu verifizieren werden die S-Parameter des Adapters zum Kabel hinzugefügt. Ebenso die in der Messung verwendeten SerienInduktivitäten.

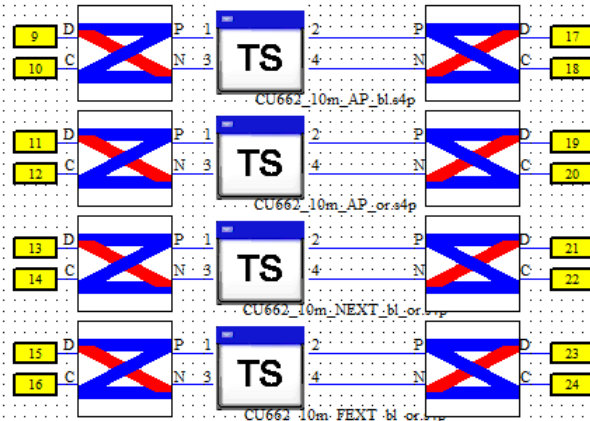
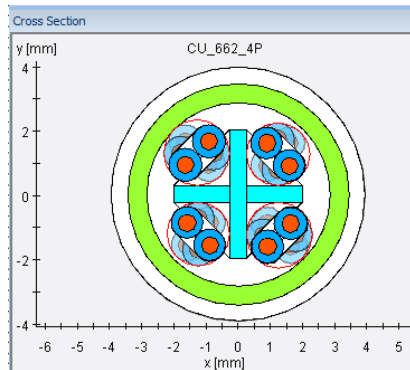
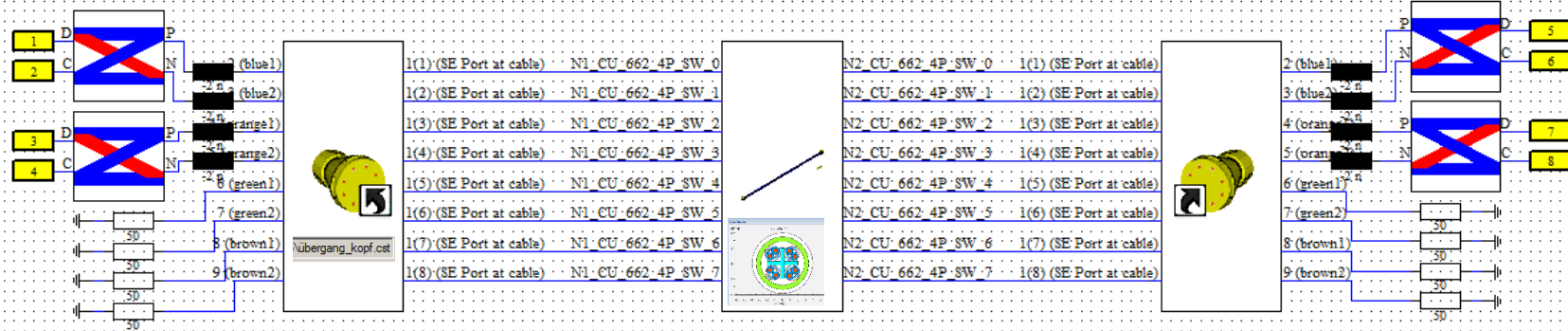
Die bessere Alternative wäre, die Referenzebene an die Coax-Stecker zu legen und den Übergang zu deembedden.

Referenz-Ebene



Bild 2: Resultierender induktiver Widerstand

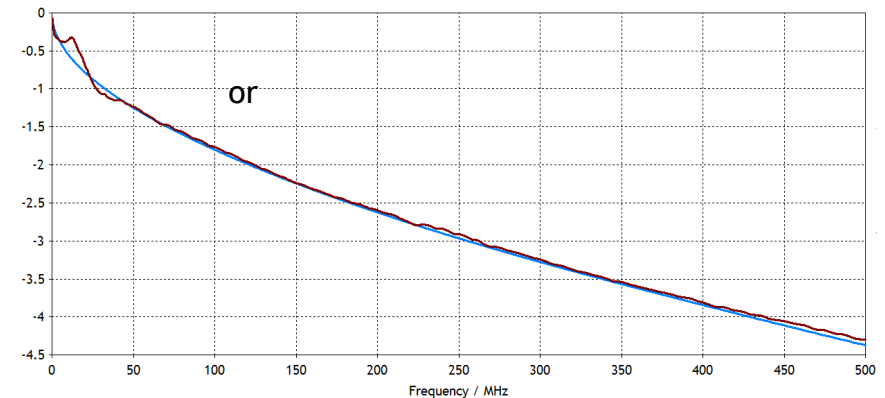
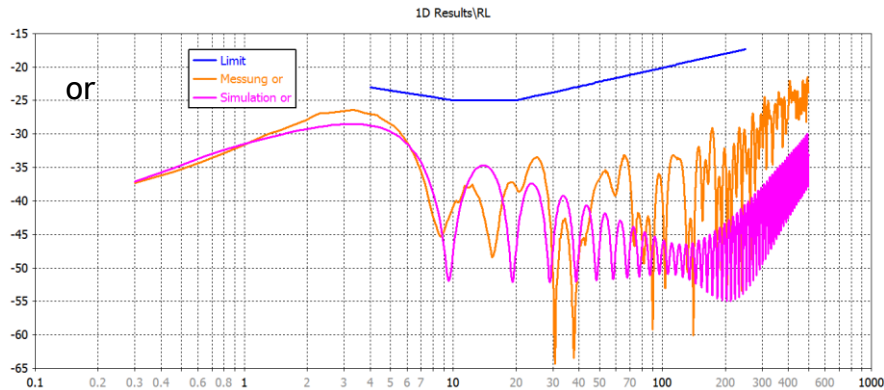
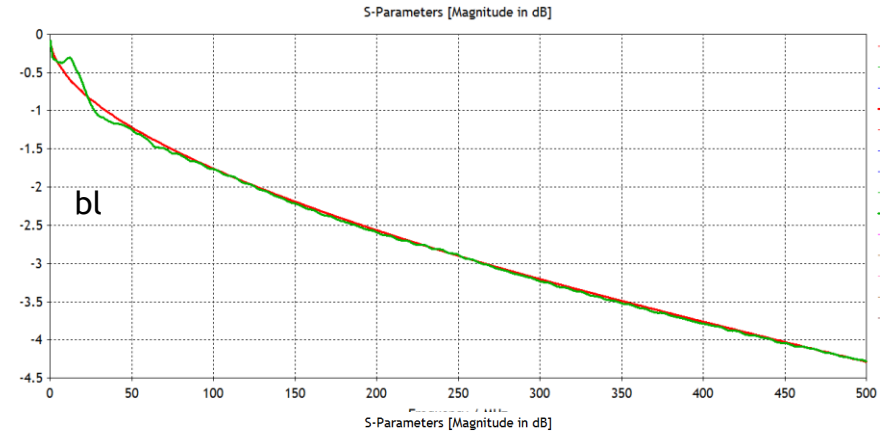
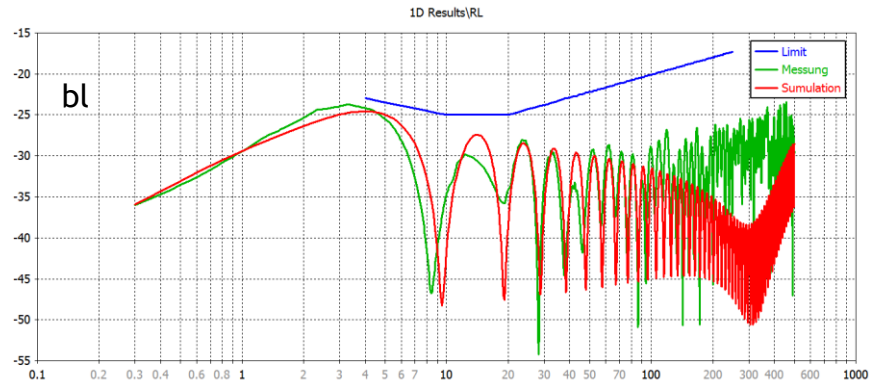
# Vollständiges Modell: 10 m Kabel



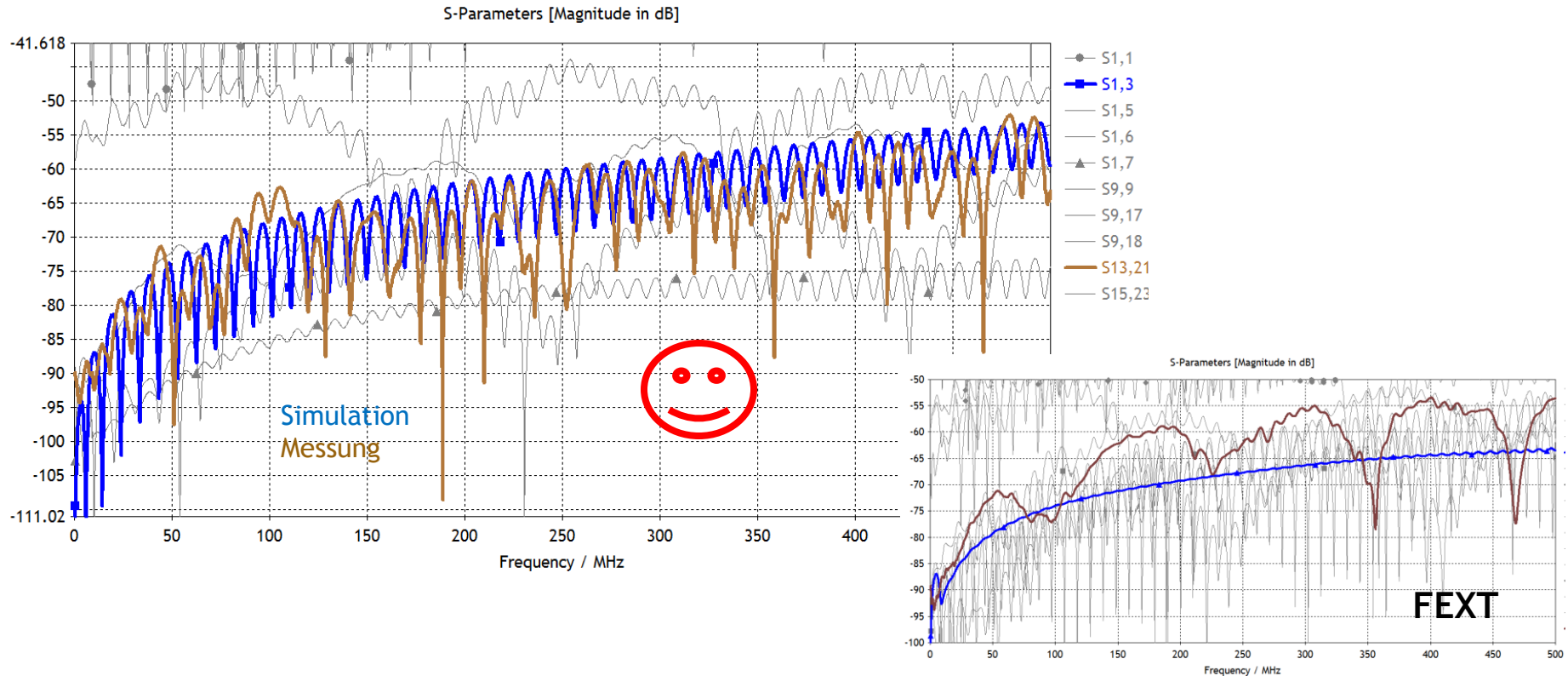
Wie vorher beschrieben, werden die Übergänge deembedded und die Serieninduktivitäten abgezogen, um einen Vergleich mit der Messung zu ermöglichen.

Messung

# Reflexions- und Einfügedämpfung



# Nah-Nebensprechen: NEXT



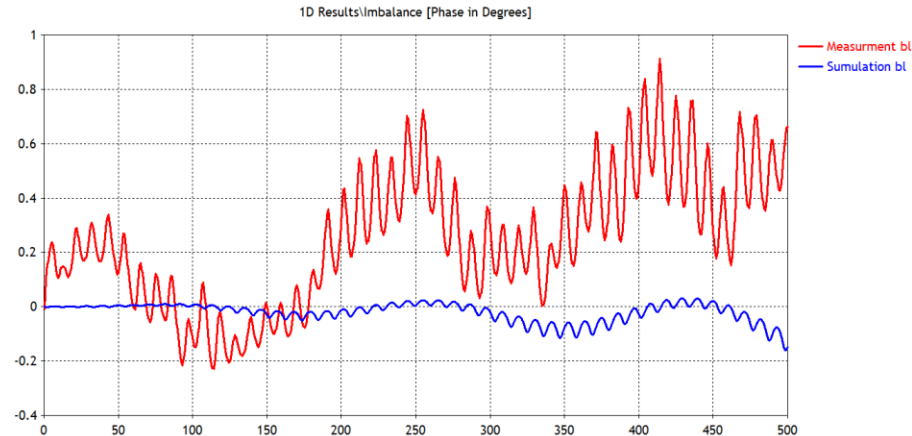
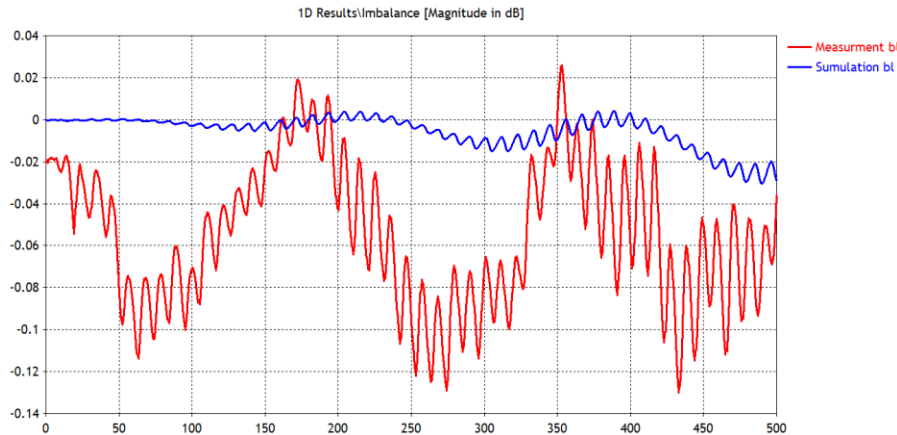
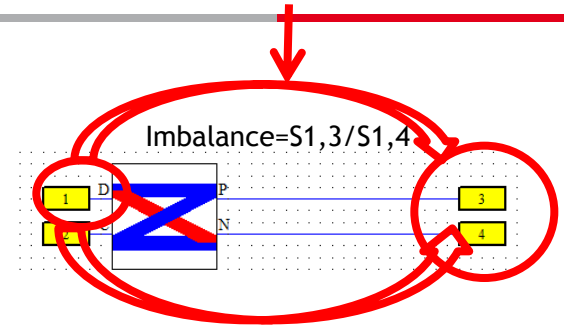
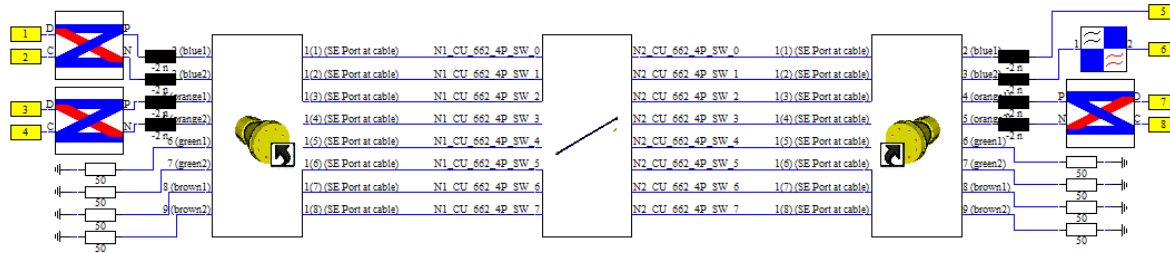
# Übersicht

---

- Einführung /Problemstellung
- Kabeldefinition in CST MWS-Studio und CST CBLS-Studio
- Testmodell und Ergebnisse für ein 10m Kabel
  - NEXT: Untersuchungen bzgl. Messadapter
  - **Unsymmetrie-Verbesserungen (TCTL, TCL)**
- Kabel in Metall-Umgebung
- Periodizitäten
- Materialextraktion

# Imbalance <sub>bl</sub>

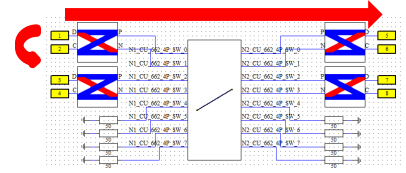
Die Imbalance zeigt auch, daß diese in der Simulation zu ideal dargestellt wird für das Adernpaar. Imbalance =  $S_{1,3}/S_{1,4}$



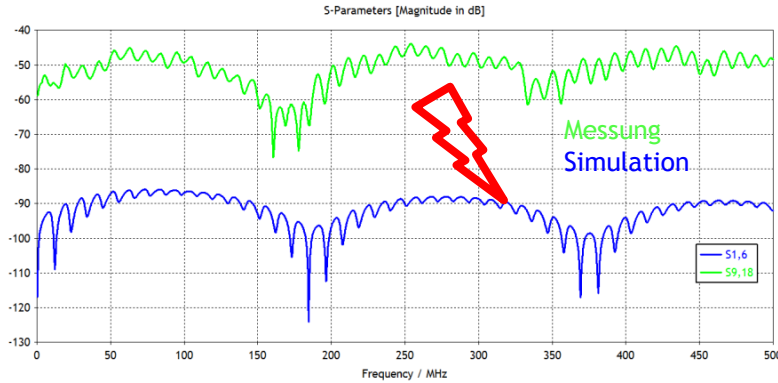
# TCTL (CMR far), TCL (CMR near)

\*TCTL: transverse converse (transfer) loss

Gleiches gilt für TCTL und TCL: zu ideal! Ideal!

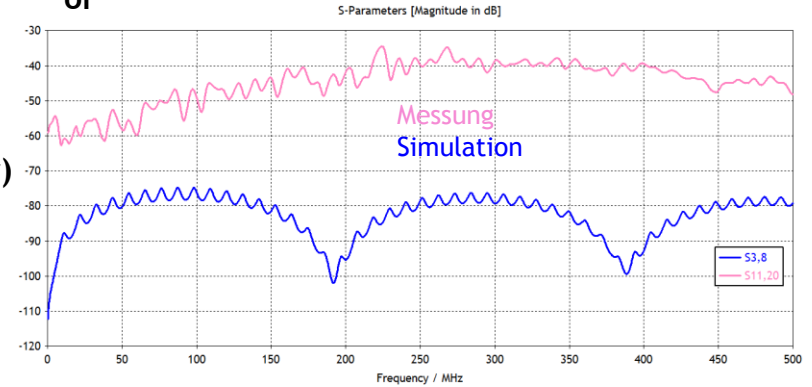


bl

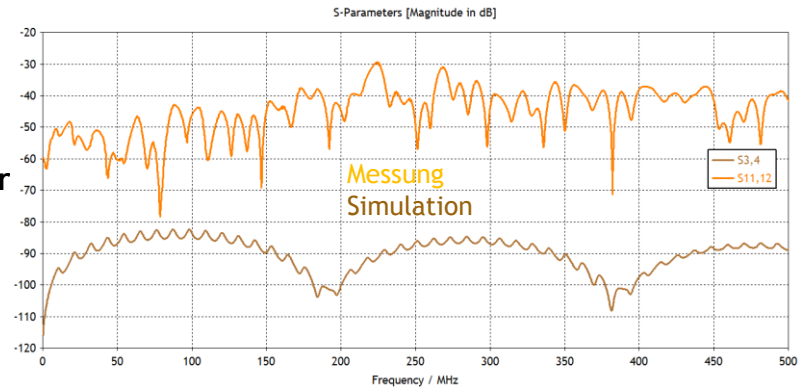
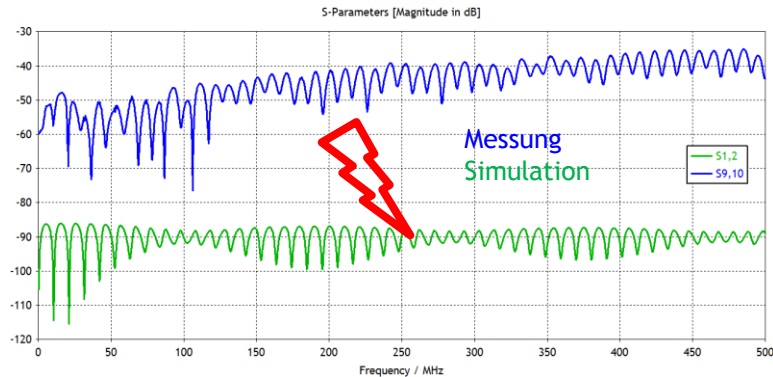


TCTL (CMR far)

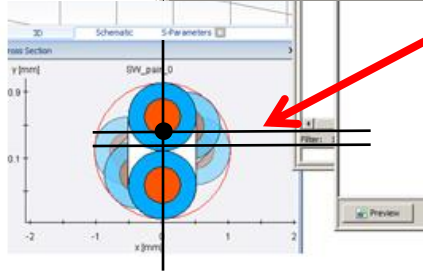
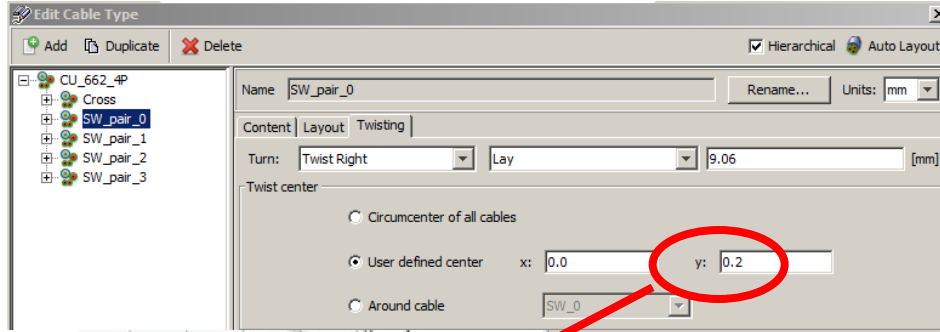
or



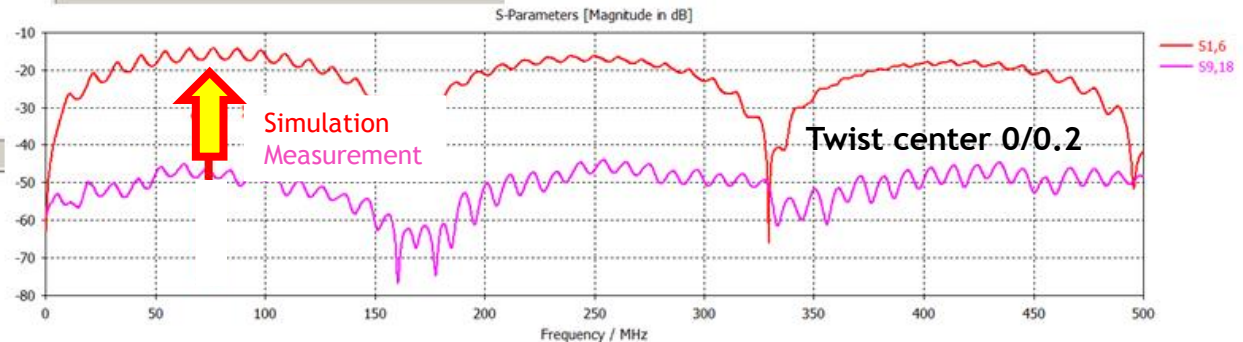
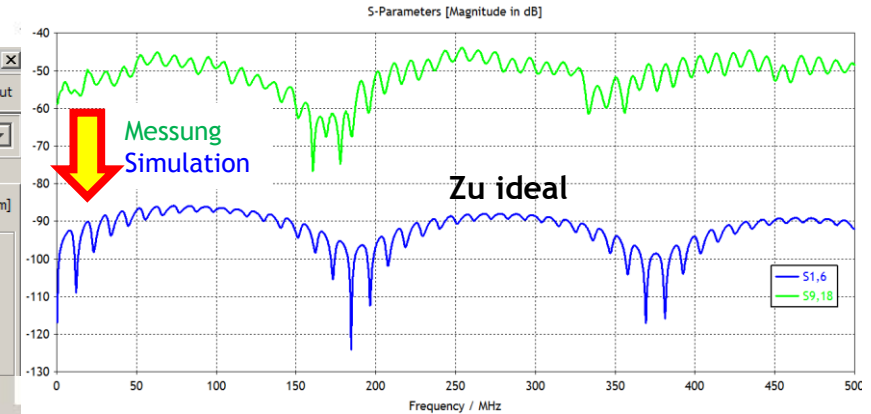
TCL (CMR near)



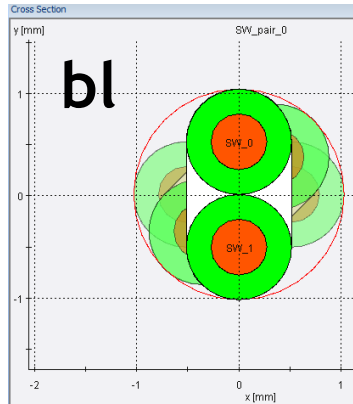
# Einführung eines „Twist-Center Offset“



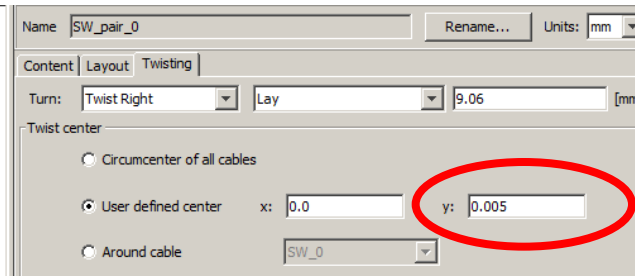
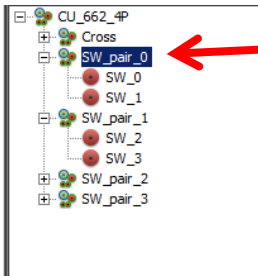
Eine Verlagerung des Mittelpunktes um 0.2mm ändert das TCTL sehr stark!



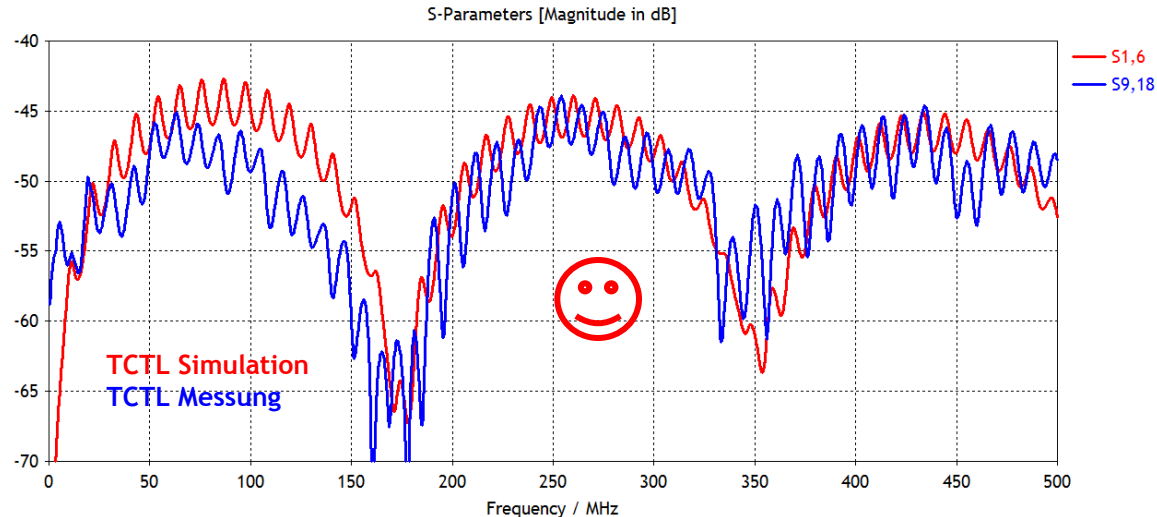
# Einführung eines „Twist-Center Offset“



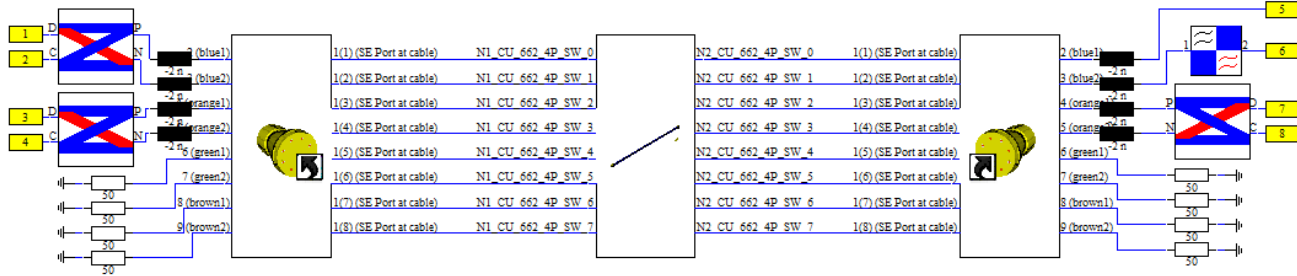
dB



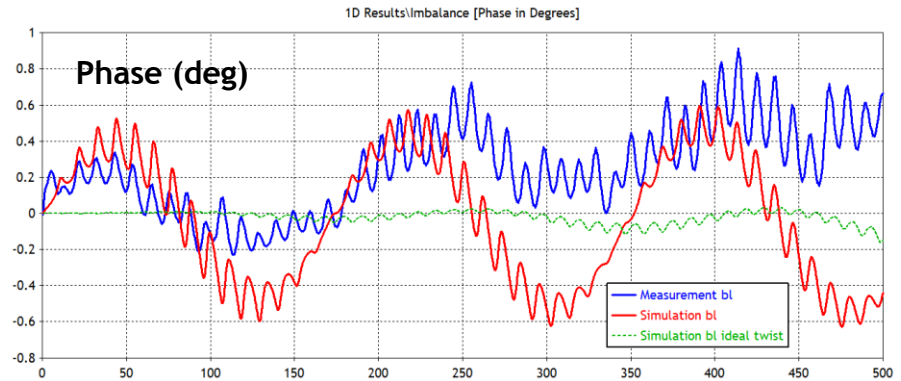
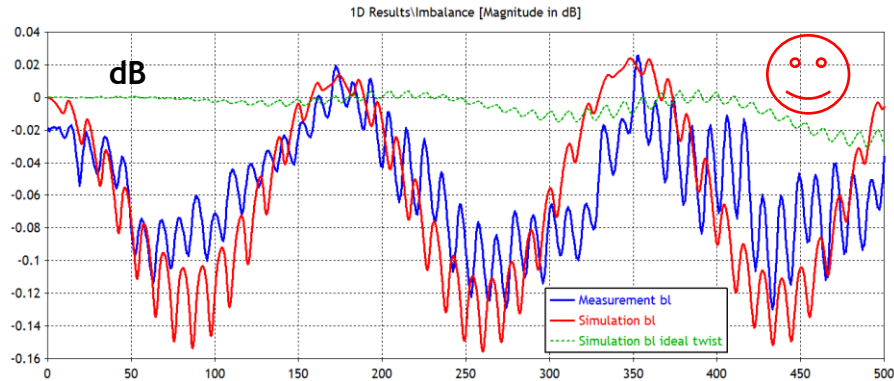
Die Verlagerung von 0.2mm war viel zu hoch, der passende Wert wurde so eingestellt, daß Messung und Simulation zusammenpassen. Diese Exzentrizität ist erstaunlicherweise recht niedrig: nur 5 micro-meter!



# Einführung eines „Twist-Center Offset“



Die „Balance“ hängt mit TCTL und TCL zusammen, so kann auch hier eine gute Übereinstimmung festgestellt werden.

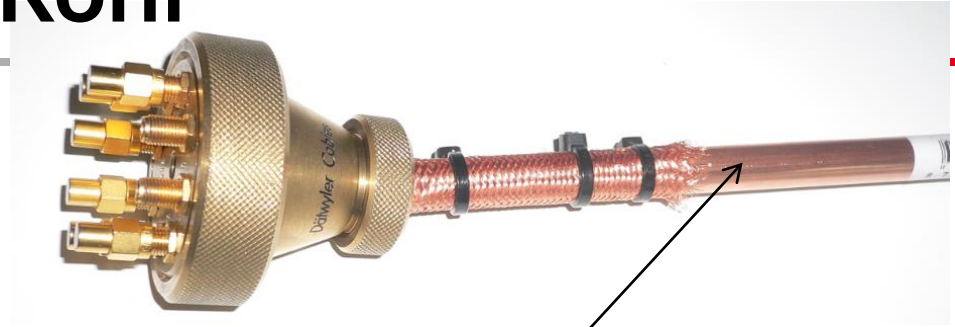


# Übersicht

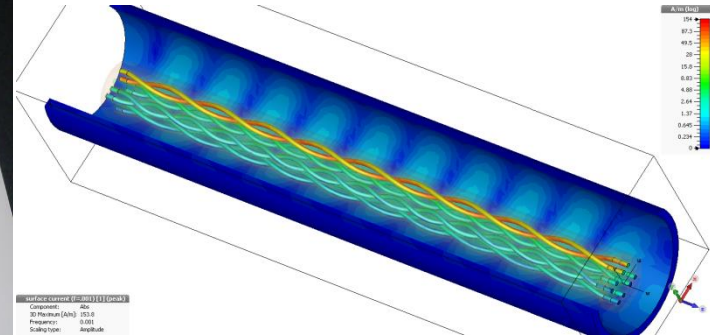
---

- Einführung /Problemstellung
- Kabeldefinition in CST MWS-Studio und CST CBLS-Studio
- Testmodell und Ergebnisse für ein 10m Kabel
  - NEXT: Untersuchungen bzgl. Messadapter
  - Unsymmetrie-Verbesserungen (TCTL, TCL)
- **Kabel in Metall-Umgebung**
- Periodizitäten
- Materialextraktion

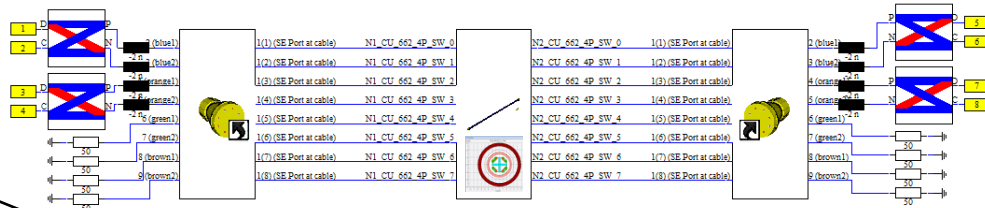
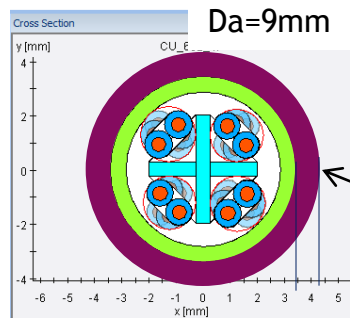
# Messung: Kabel im Rohr



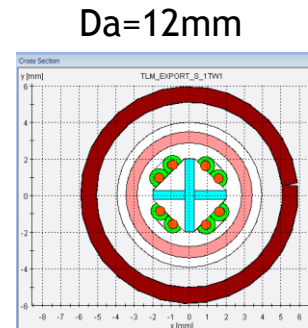
Kupfer-Rohr mit Aussendurchmesser 12mm und Wandstärke 1mm



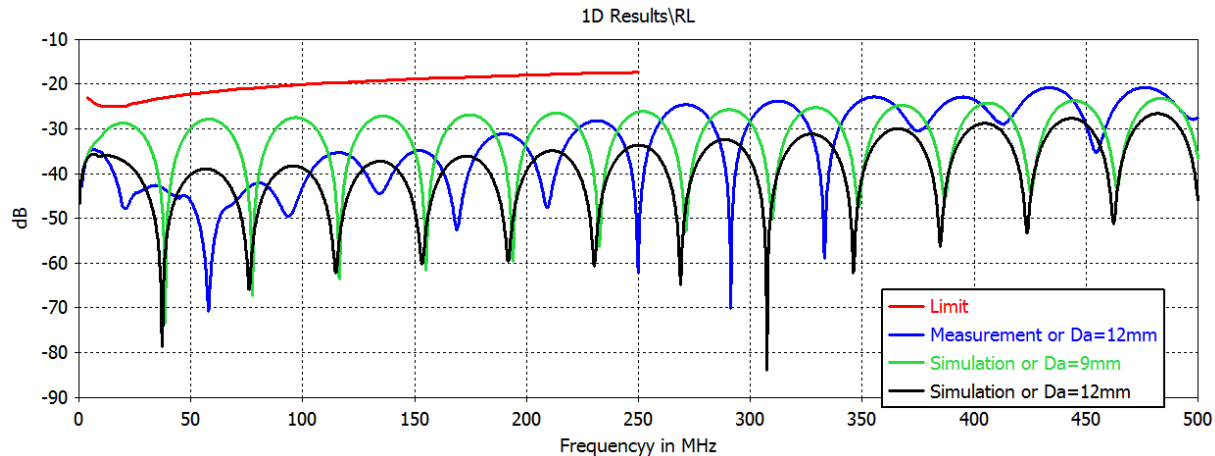
# Reflexionsdämpfung



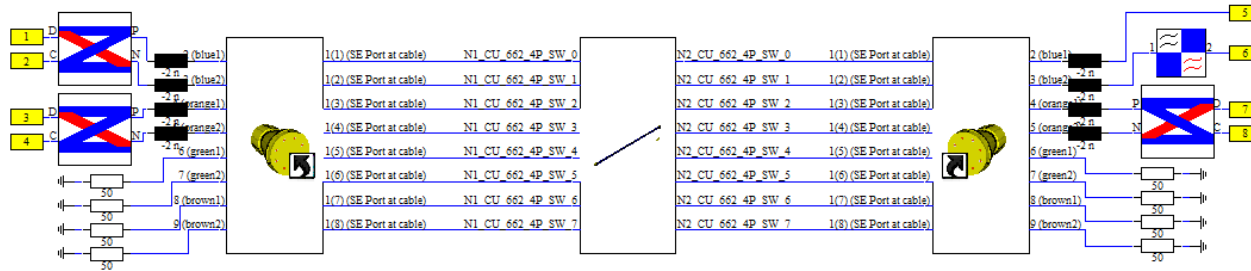
Extrem-Fall: Rohr berührt Kabelmantel



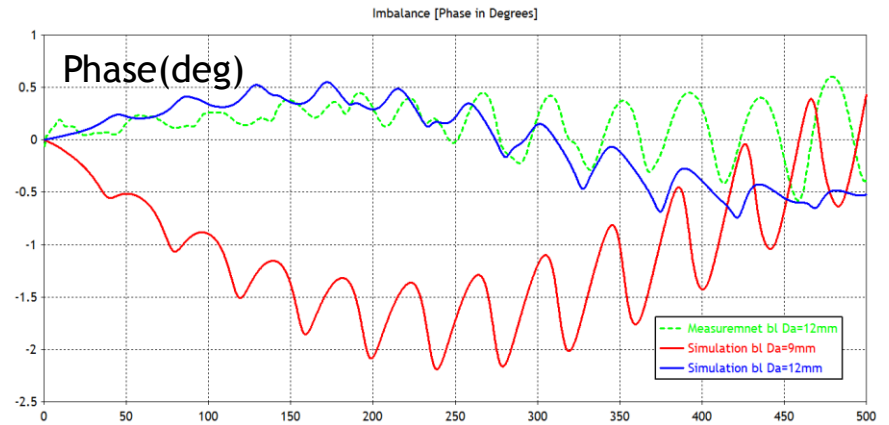
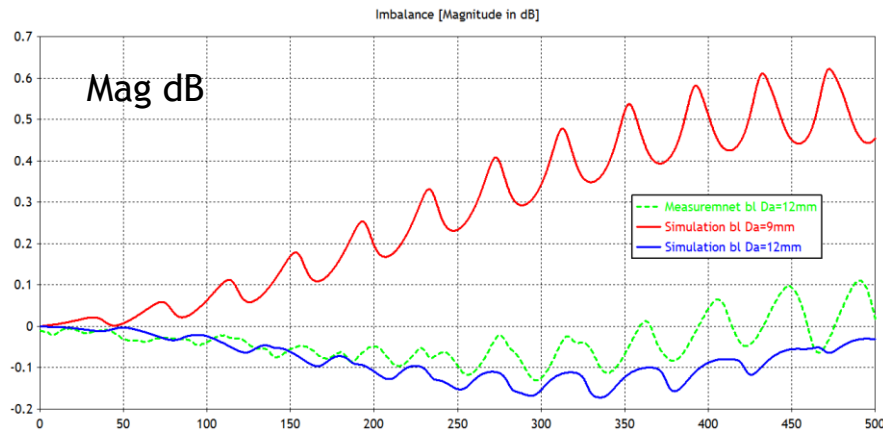
bl



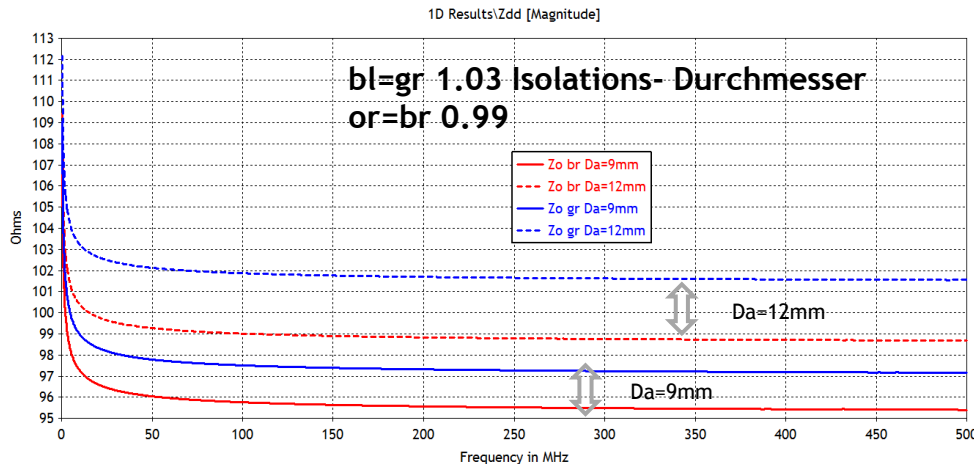
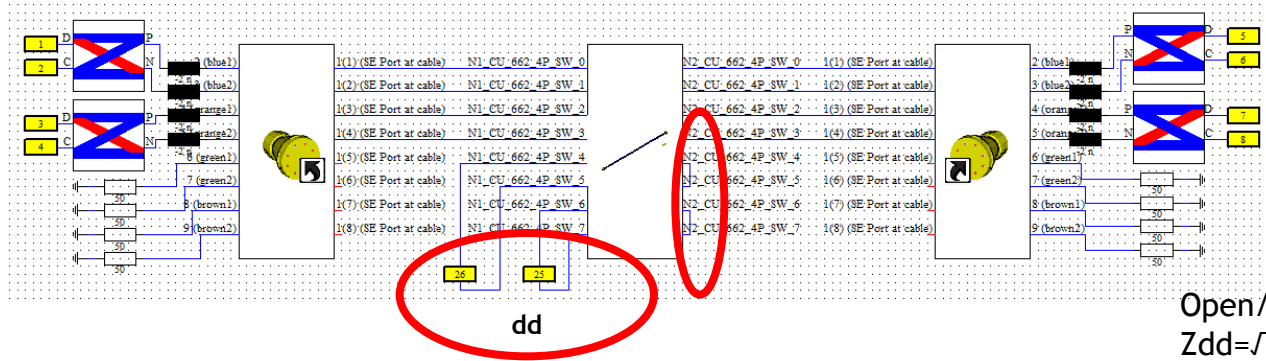
# Imbalance $_{bl}$



Die Imbalance steigt um ca 6% bei höheren Frequenzen an

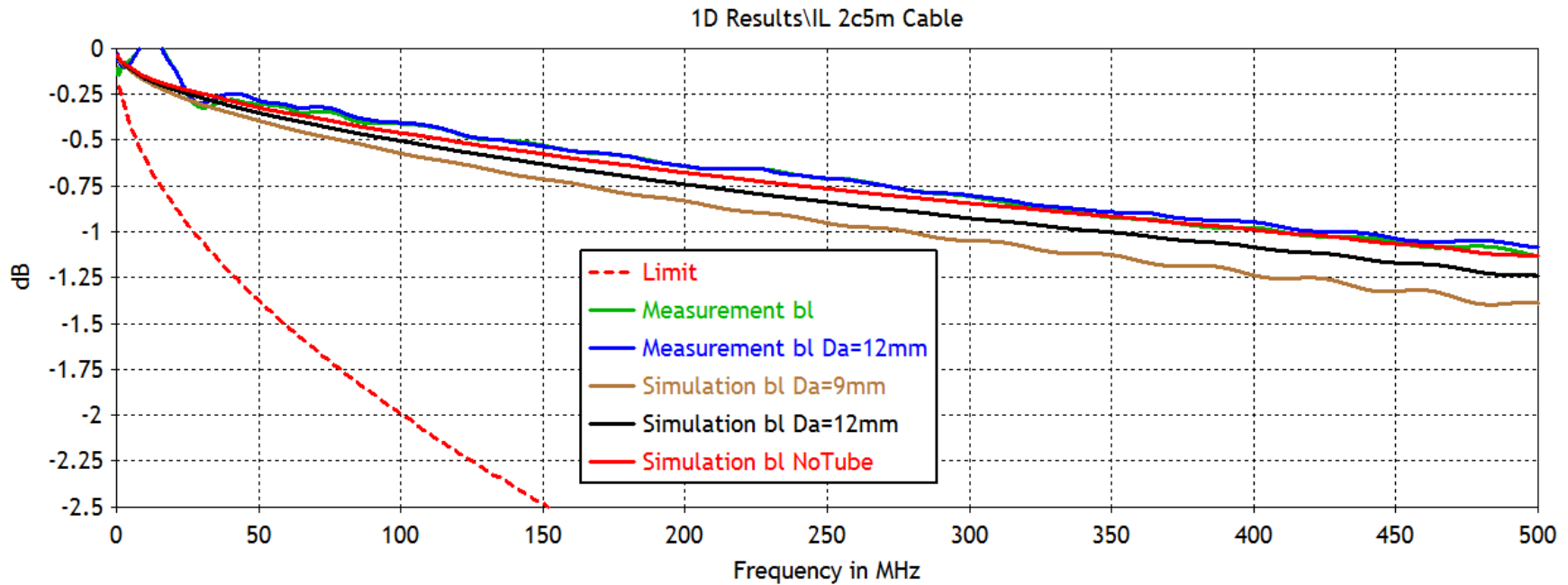


# Impedanz (dd)



Die Impedanz zeigt eine starke Änderung was schlechtere Reflexionsdämpfung mit sich bringt

# Einfügedämpfung IL : Vergleich



# Übersicht

---

- Einführung /Problemstellung
- Kabeldefinition in CST MWS-Studio und CST CBLS-Studio
- Testmodell und Ergebnisse für ein 10m Kabel
  - NEXT: Untersuchungen bzgl. Messadapter
  - Unsymmetrie-Verbesserungen (TCTL, TCL)
- Kabel in Metall-Umgebung
- **Periodizitäten**
- **Materialextraktion**

# Dämpfungspole

Die Dämpfungspole werden durch periodisch auftretende Deformationen der Leitung hervorgerufen. Beim Datenkabel entstehen diese periodischen Deformationen nicht nur alleine durch periodisch punktuell wirkende Kräfte sondern sie werden auch - bedingt durch die jeweils konstante Verdrillung der Adern und die gleichmäßige Verseilung der Adernpaare - durch eine gleichmäßige Pressung des Kabels über die gesamte Länge hervorgerufen, wie sie beim straffen Aufwickeln des Kabels auf eine Kabeltrommel praktisch entstehen können →(3).

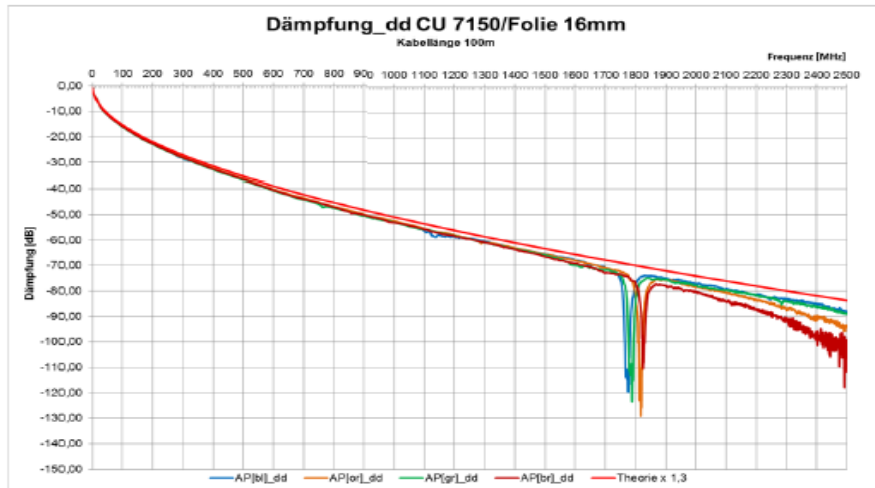


Abb. 1: Idealer bzw. theoretischer (rot) und tatsächlicher Dämpfungsverlauf eines Datenkabels

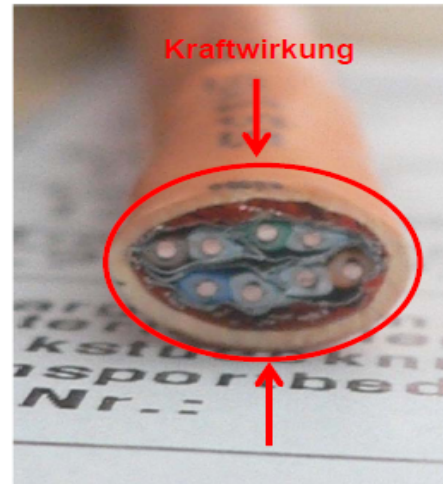


Abb. 2: Beispiel eines deformiertes Datenkabel



**Bild 1: Kabelmuster mit konstantem Abstand der Deformierungen (117 mm)**

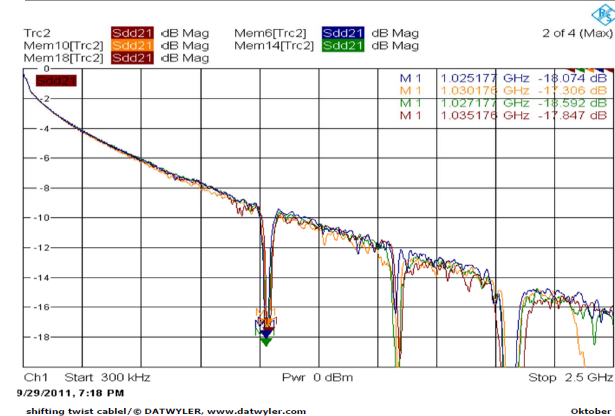


**Bild 2: Kabelmuster mit variablen Abstand der Deformierungen ([95; 142] mm)**



**Bild 3: Kabelbinderzange mit einstellbarer Zugkraft (220 N)**

## Anhang II: Dämpfungspole im Gleichtakt- und Gegentaktmode



Die Frequenzlage der Dämpfungspole verhält sich im Gegentaktmode entsprechend der Versellsteigung der Adernpaare. Je größer die Steigung, umso höher ist auch die Frequenz des Pols.

## II. Dämpfungspole

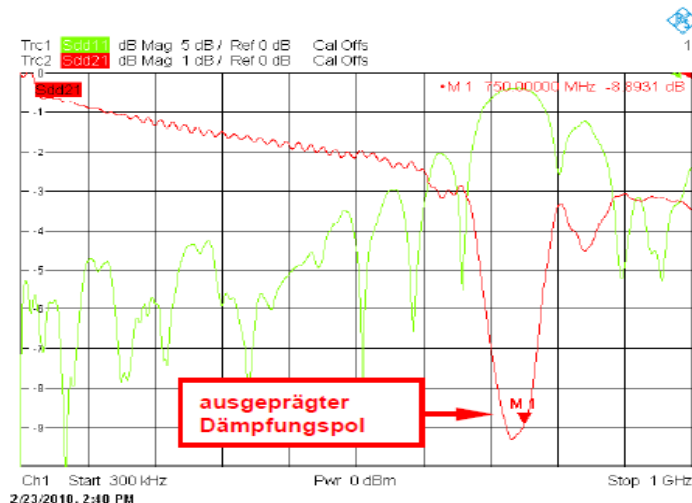


Bild 9: Dämpfungsverlauf (rt) und Rückflussdämpfung (gr)



Bild 10: Kabel mit Knick (10) konstanter Abstand

Umgekehrt kann man die Dämpfungspole auch künstlich erzeugen: Hier wurde das Kabel im Abstand von 16 cm 10 mal geknickt, dann entsteht ein Dämpfungspol nach der oben genannten Formel bei 750 MHz.

## II. Dämpfungspole

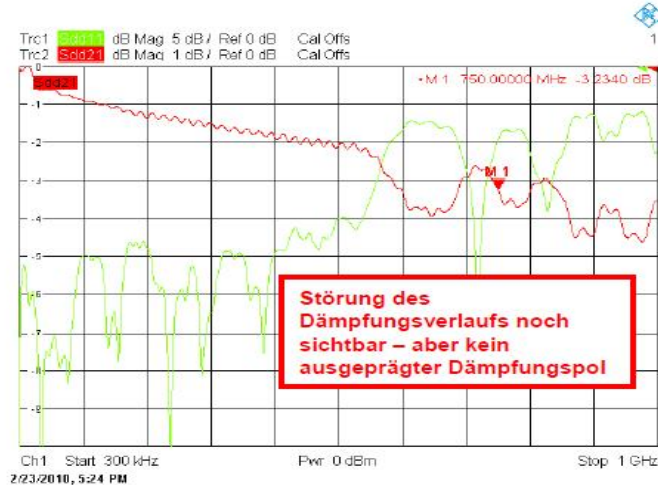


Bild 11: Dämpfungsverlauf (rt) und Rückflusdämpfung (gr)

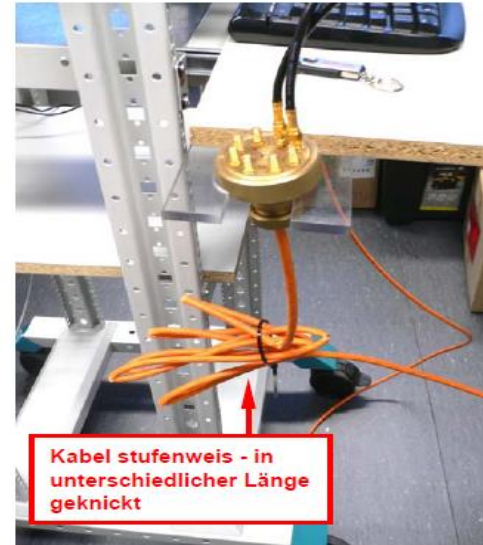


Bild 12: Kabel mit Knick (10) variabler Abstand

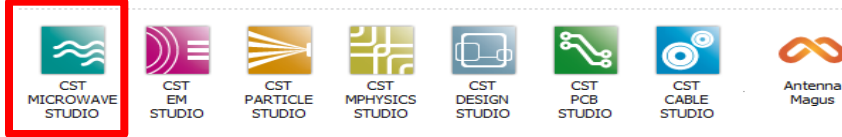
Wird dagegen die strenge Periodizität aufgelöst, indem die Abstände der Deformationen variabel gestaltet werden – z. B. zuerst größer und dann wieder kleiner – dann sind die Dämpfungspole wesentlich weniger stark ausgeprägt.

Wird dieses Prinzip der fließend ändernden alternierenden Periodizität bei der Fertigung der Datenkabel sowohl für die Adernpaare als auch für die Gesamtverseilung angewendet, dann kann man sich vorstellen – da dieser Versuch sehr brachial war – dass dadurch das Problem der Dämpfungspole zumindest stark reduziert werden kann.

**Dätwyler Cables**

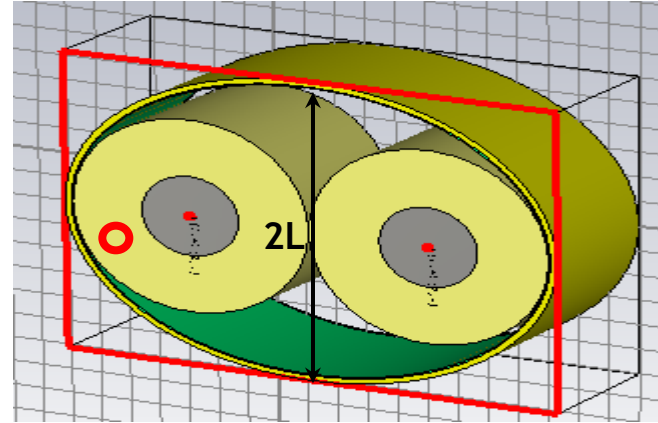
# MWStudio zur Berechnung der Impedanzen

## Modules

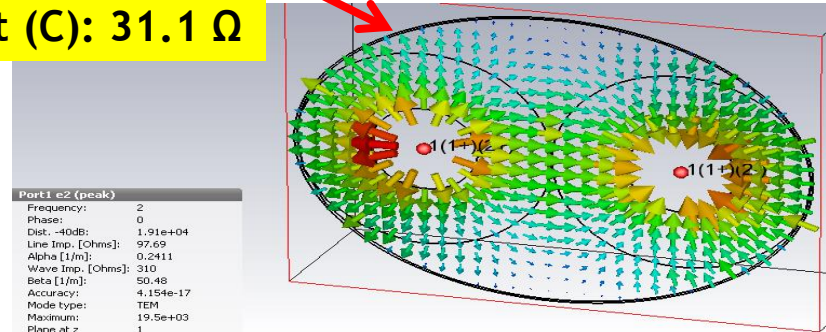
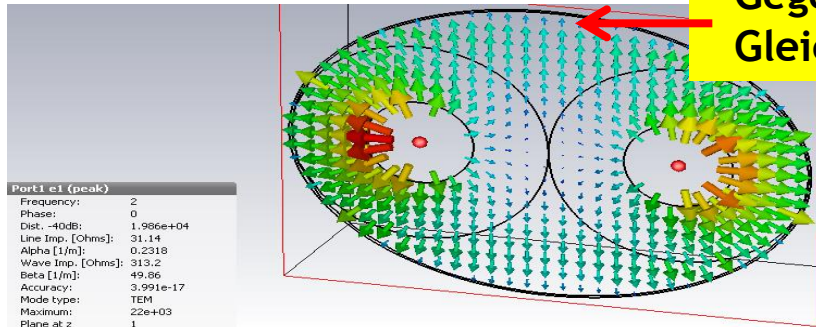


Die Bestimmung der Gegen- und Gleichtakt-Impedanz erfolgt mittels Portmodenberechnung in MWStudio

Name	Value
L	= 1
epsr	= 1.506
minor_ellipse	= 1
r	= .57
rdiel	= 1.36

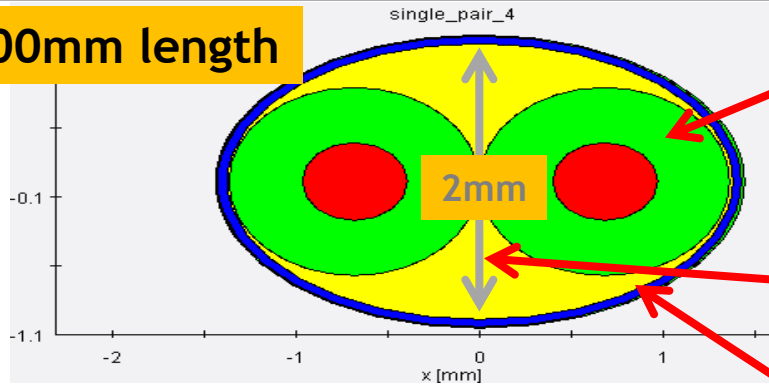


**Gegentakt (D): 97.7  $\Omega$**   
**Gleichtakt (C): 31.1  $\Omega$**



# Cable -Cross-Sections

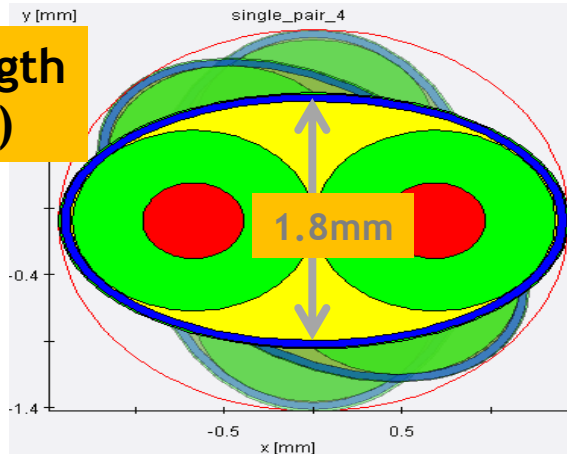
100mm length



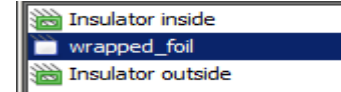
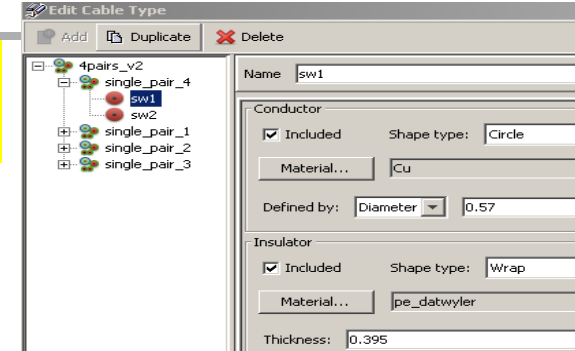
Ader:  
Abmessungen

Füllung

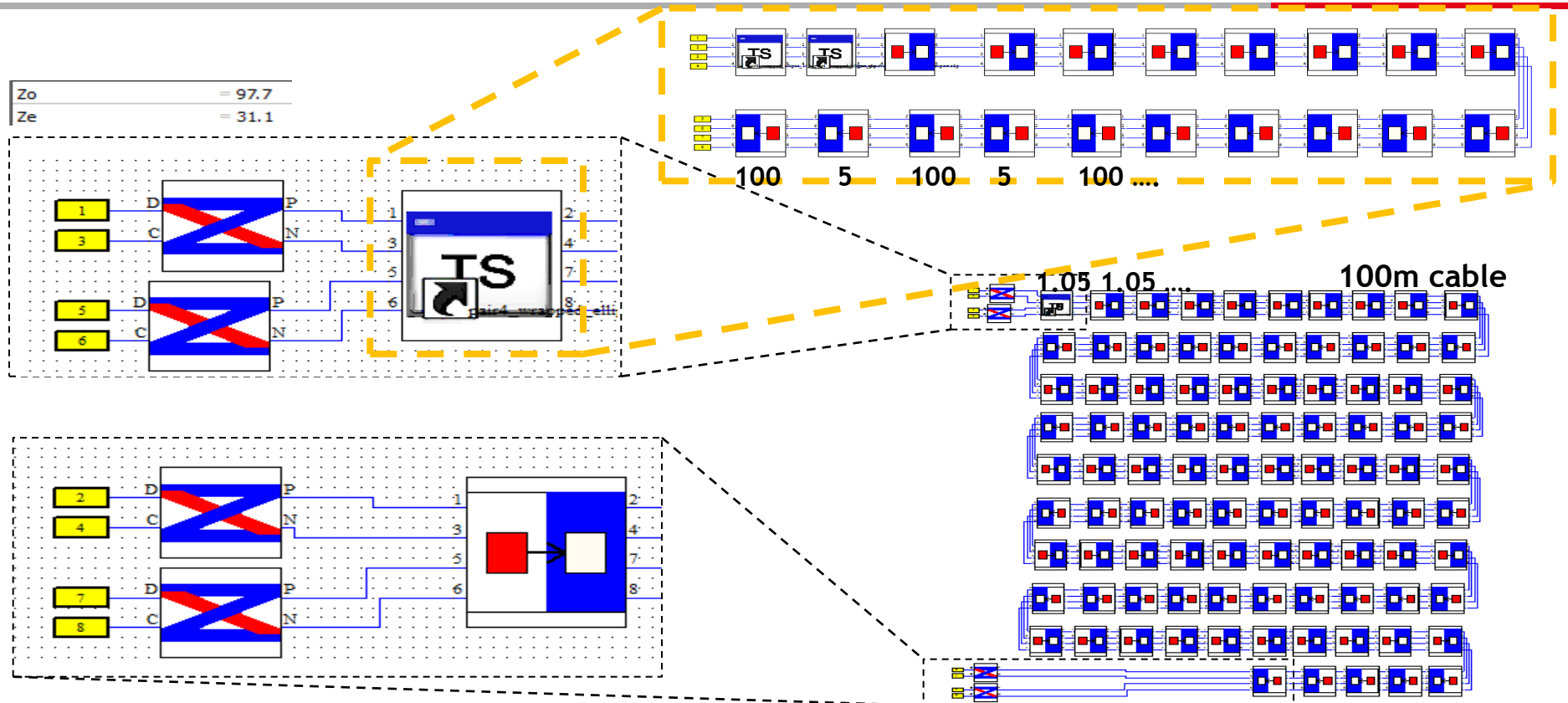
5mm length  
(pinched)



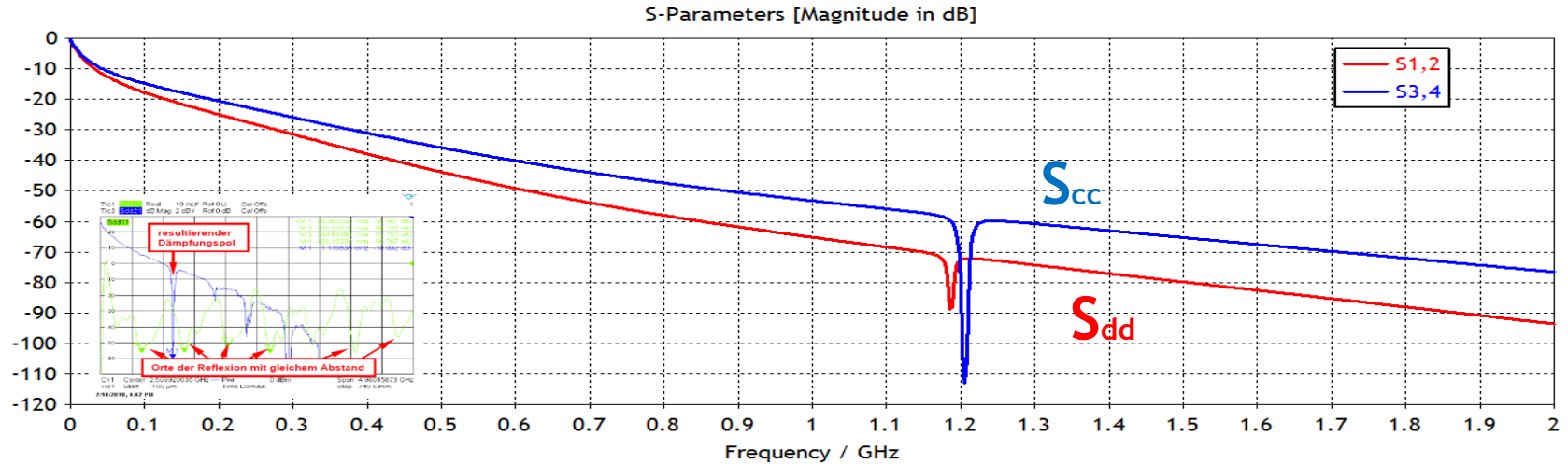
Schirmdefinition



# 100m Kabel



# Kabel -Transmission Zeros



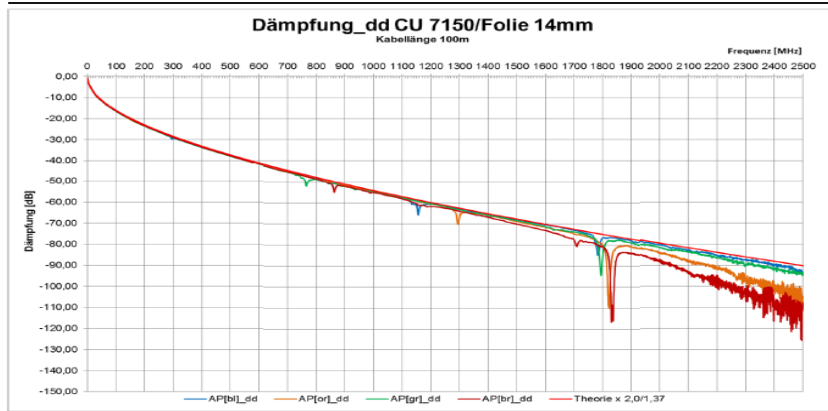
$$v_c = \frac{\omega}{\beta} = \frac{2\pi \cdot 2e9}{49.86} = 2.52e8 \text{ m/s}$$

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{2.52e8}{0.105 \text{ m} * 2} = 1.2 \text{ GHz}$$

$$v_d = \frac{\omega}{\beta} = \frac{2\pi \cdot 2e9}{50.48} = 2.49e8 \text{ m/s}$$

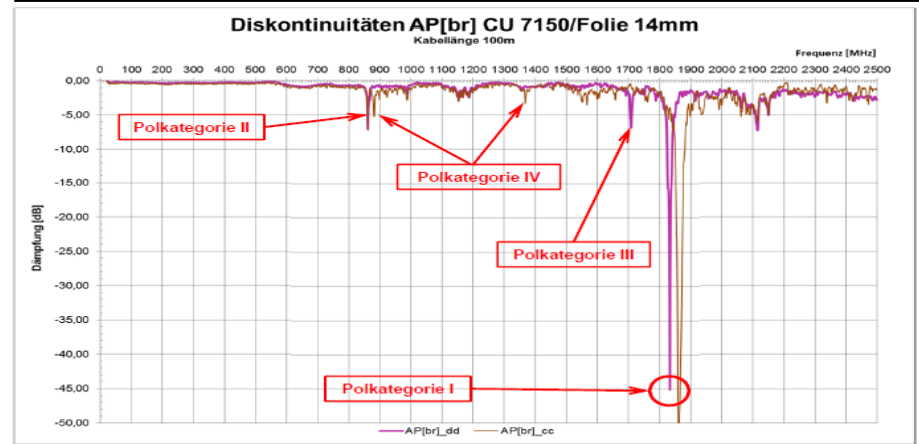
$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{2.49e8}{0.105 \text{ m} * 2} = 1.18 \text{ GHz}$$

## Graph 1: Dämpfungsverlauf bei 20°C



Graph 1: Dämpfungsverlauf (Gleichtaktmodus) in Abhängigkeit der Frequenz bei 20 °C

## Graph 2: Dämpfungsverlauf bei -190°C



Graph 10: «Diskontinuitäten» des AP[br] im Gleichtakt- und Gegentaktmodus in Abhängigkeit der Frequenz bei -190 °C



Abb. 3: Kabelring in einer mit flüssigem Stickstoff gefüllten Isolierwanne

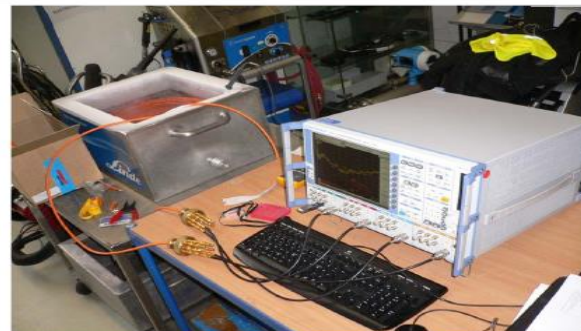


Abb. 4: Versuchsaufbau mit Messobjekt und Messgerät

# Übersicht

---

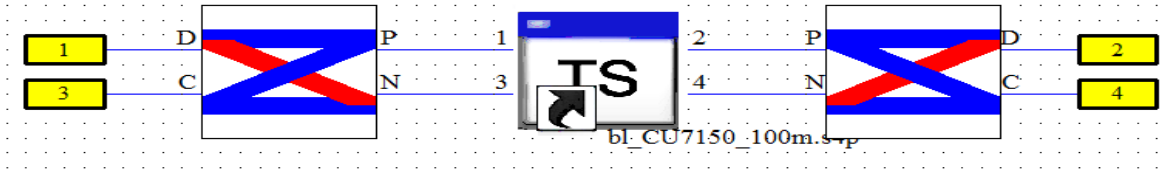
- Einführung /Problemstellung
- Kabeldefinition in CST MWS-Studio und CST CBLS-Studio
- Testmodell und Ergebnisse für ein 10m Kabel
  - NEXT: Untersuchungen bzgl. Messadapter
  - Unsymmetrie-Verbesserungen (TCTL, TCL)
- Kabel in Metall-Umgebung
- Periodizitäten
- **Materialextraktion**

# Messung/Beschaltung mit Konvertern



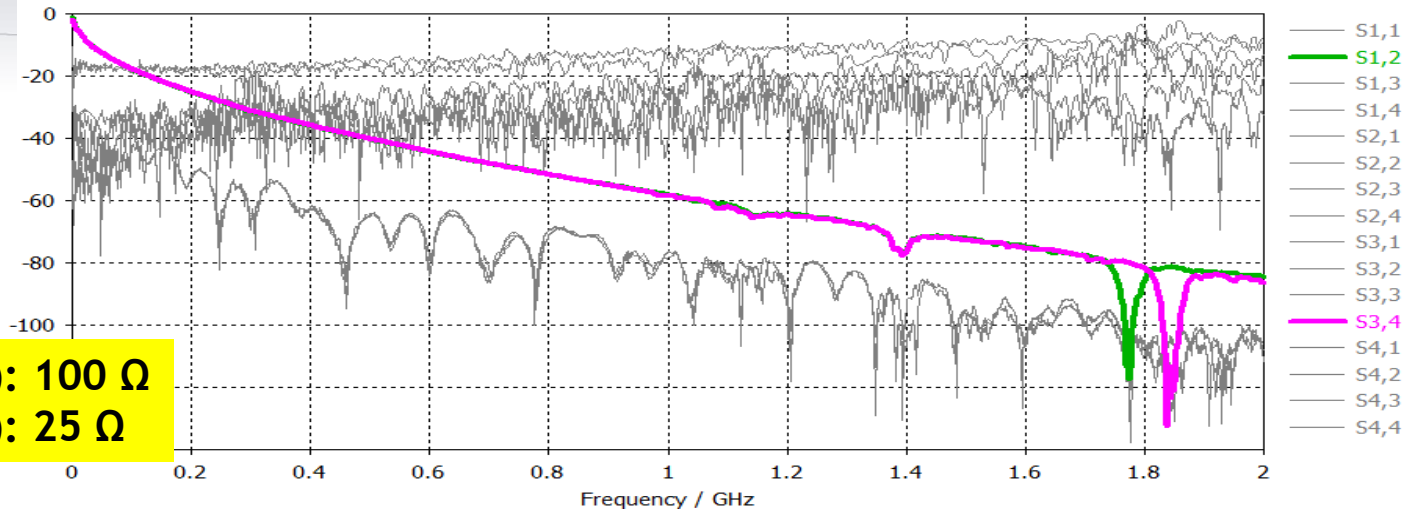
CST  
DESIGN  
STUDIO

100Ω  
25Ω



100Ω  
25Ω

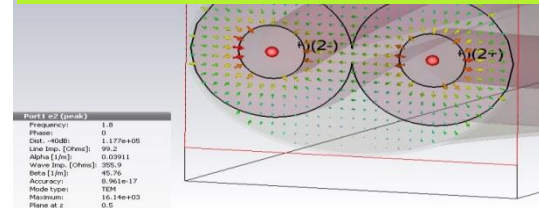
S-Parameters [Magnitude in dB]



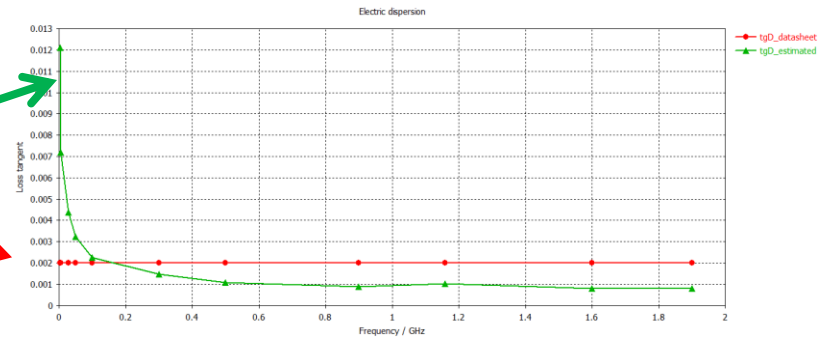
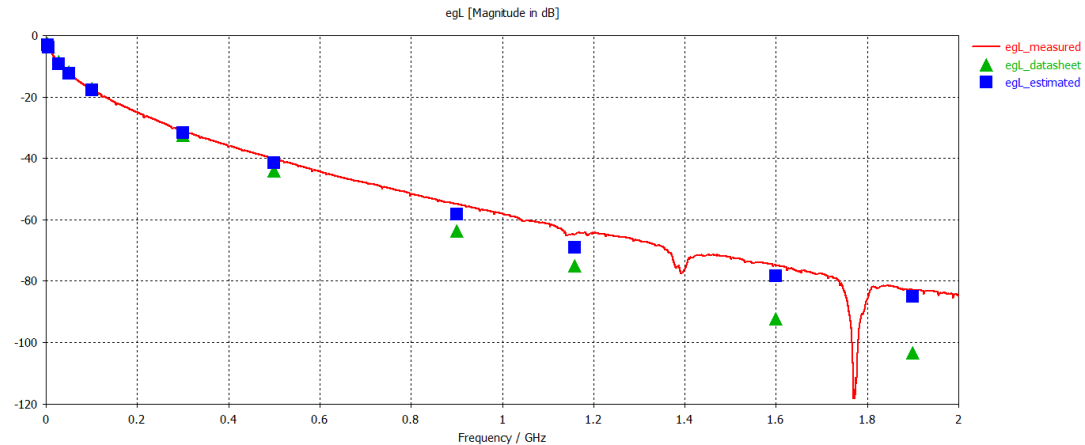
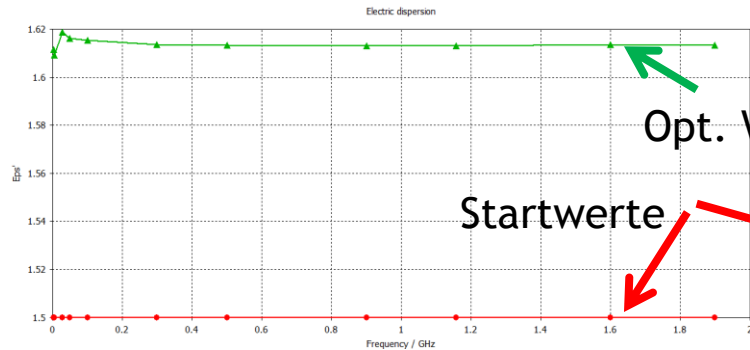
**S12 Gegentakt (D): 100 Ω**  
**S34 Gleichtakt (C): 25 Ω**

# Complex permittivity extraction > PE > egL, Eps', Loss tangent

## Gegentakt Mode



- Max. phase deviation: 3.28569524484692e1 deg
- Max. magnitude deviation: 1.28780647371184e-3 (linear)
- Extraction finished after 3 iterations in 19 min 28 s

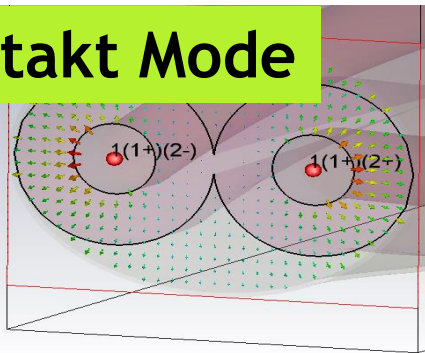


# Complex permittivity extraction > PE > egL, Eps', Loss tangent

## Gleichtakt Mode

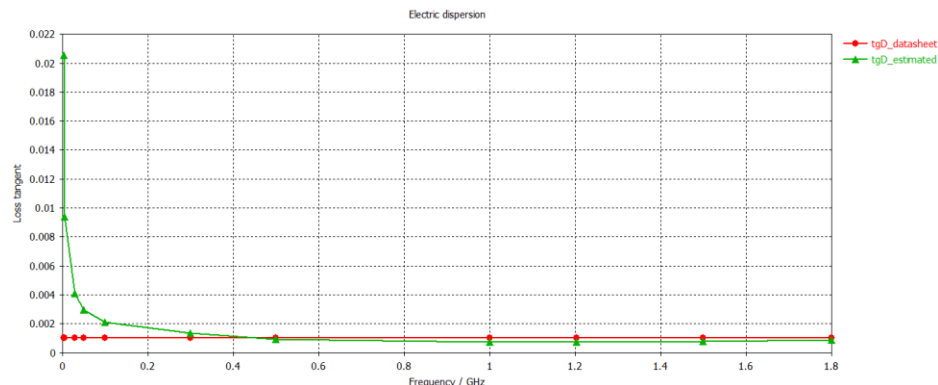
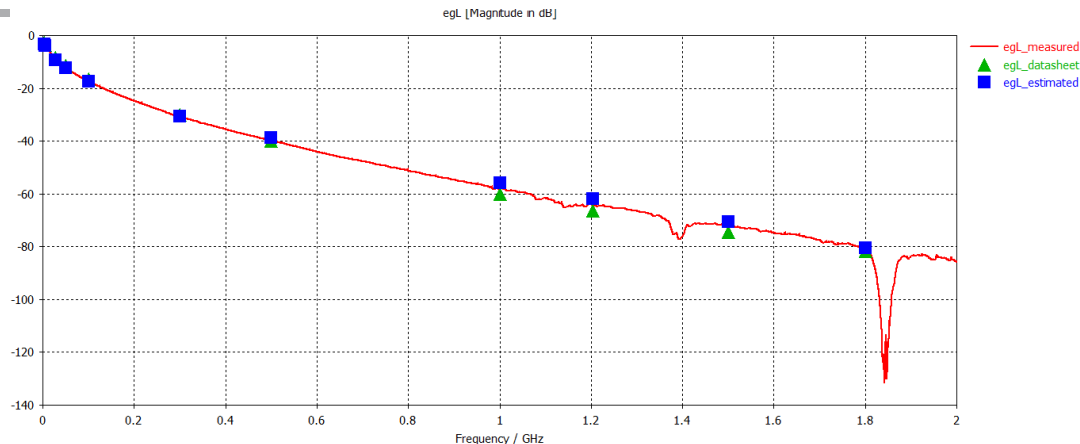
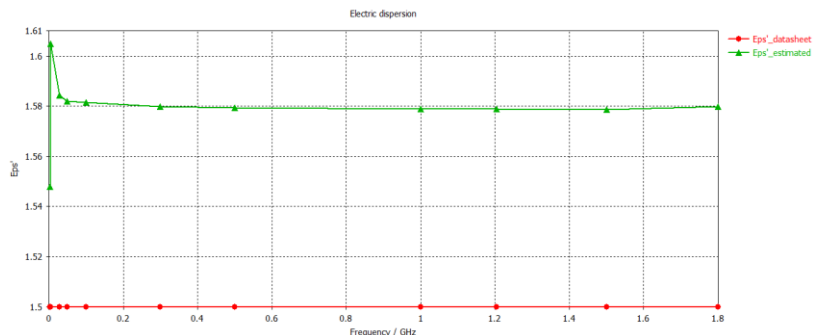
Port1 = 1 (peak)

Frequency:	1.0
Phase:	0
Dist. -40dB:	1.004e+05
Line Imp. [Ohms]:	31.74
Alpha [1/m]:	0.04586
Wave Imp. [Ohms]:	353.4
Beta [1/m]:	44.98
Accuracy:	1.294e-16
Mode type:	TEM
Maximum:	15.22e+03
Plane at z:	0.5



Max. phase deviation: 2.54332332178251e1 deg  
Max. magnitude deviation: 1.36805810710805e-3 (linear)

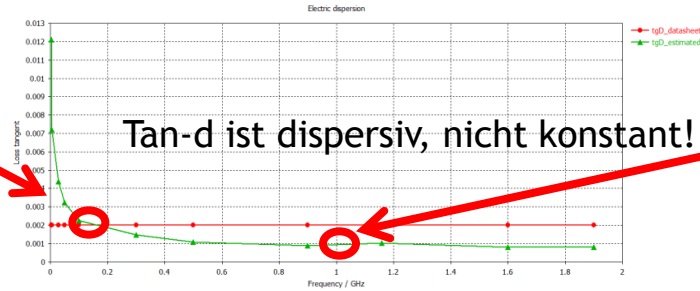
Extraction finished after 3 iterations in 19 min 10 s



# Adaption der tan-d Bereich 100 MHz

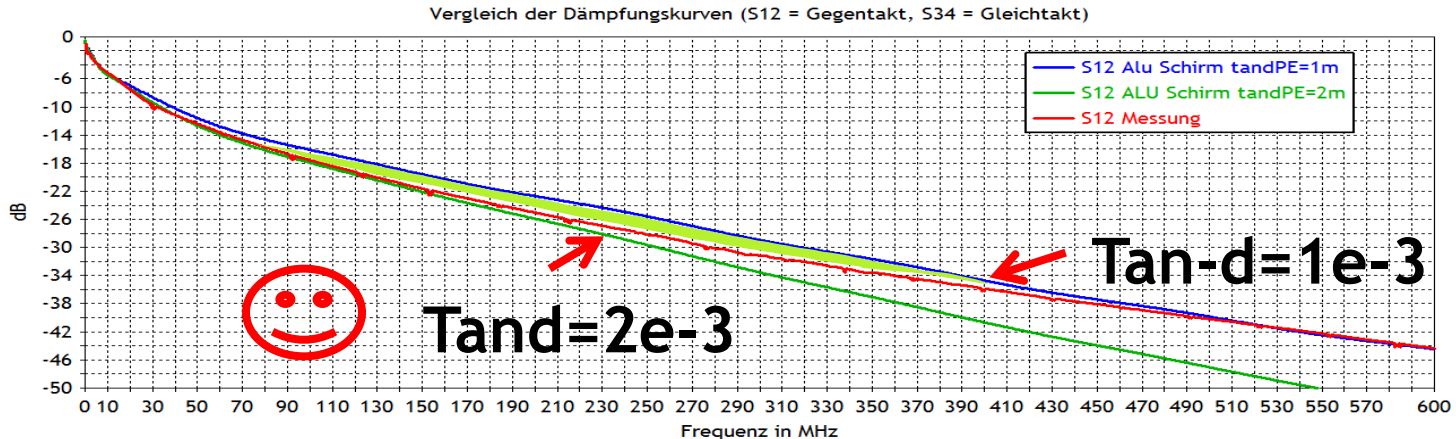
Identifier:	pe_datwyler
Material:	dielectric
Permittivity:	1.61
Loss angle tan():	2m
Frequency:	100.0

MHz



Identifier:	pe_datwyler
Material:	dielectric
Permittivity:	1.61
Loss angle tan():	1.0m
Frequency:	1000.0

MHz



# Zusammenfassung

- Hoher experimenteller Aufwand zur Messung und Optimierung von Übertragungseigenschaften von Kabeln
- Simulation kann helfen:
  - Variation und Optimierung von Abmessungen
  - Bestimmung unbekannter Materialien
  - Einfluß durch Kabelführungssysteme und periodische Störungen
  - Fertigungstoleranzen beim Produktionsprozess
  - Elimination von nicht perfekten Messkomponenten (Adaptoren)



