

Charakterisierung von Datenkabeln - Annäherung von Simulation und Messung

FRANZ HIRTFENFELDER
PRINCIPAL ENGINEER

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

FRANZ.HIRTFENFELDER@CST.COM
WWW.CST.COM

CST



MAXIMILIAN J. SCHWAIGER
R&D CU-DATA

DÄTWYLER CABLES GMBH
LILIENTHALSTRASSE 17
85399 HALLBERGMOOS
GERMANY

MAX.SCHWAIGER@DATWYLER.COM
WWW.CABLING.DATWYLER.COM



Einführung /Problemstellung

Netzwerk (LAN) :

- symmetrische Übertragung
- Datenkabel vier unterschiedlich stark verdrillten 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-Netzwerkanwendungen 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 experimentelle 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 den metallischen Kabelführungssystemen
- periodische Fixierungen beeinflussen das Übertragungsverhalten
- Abweichungen und Toleranzen beim Produktionsprozess

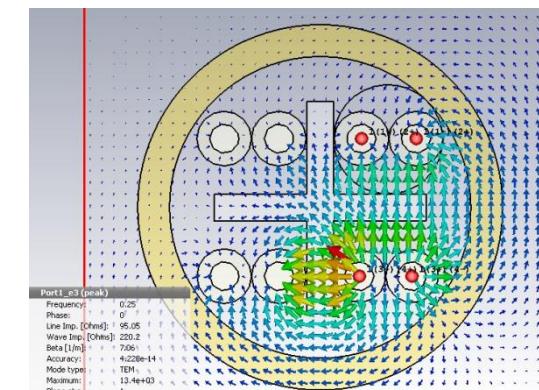
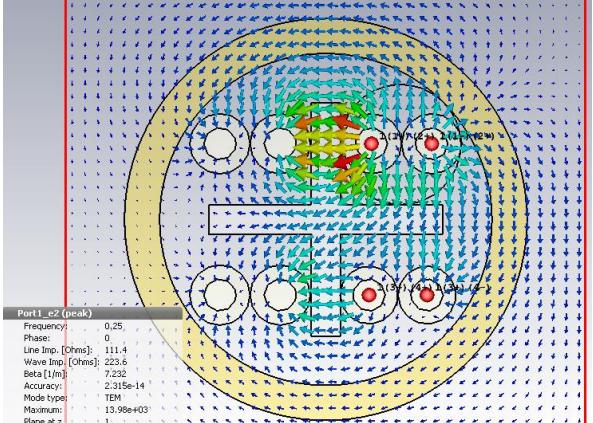
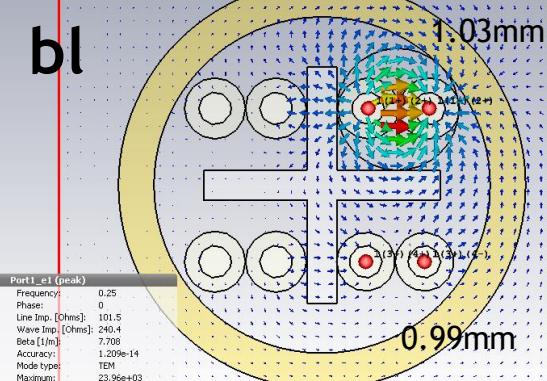
Übersicht

- 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

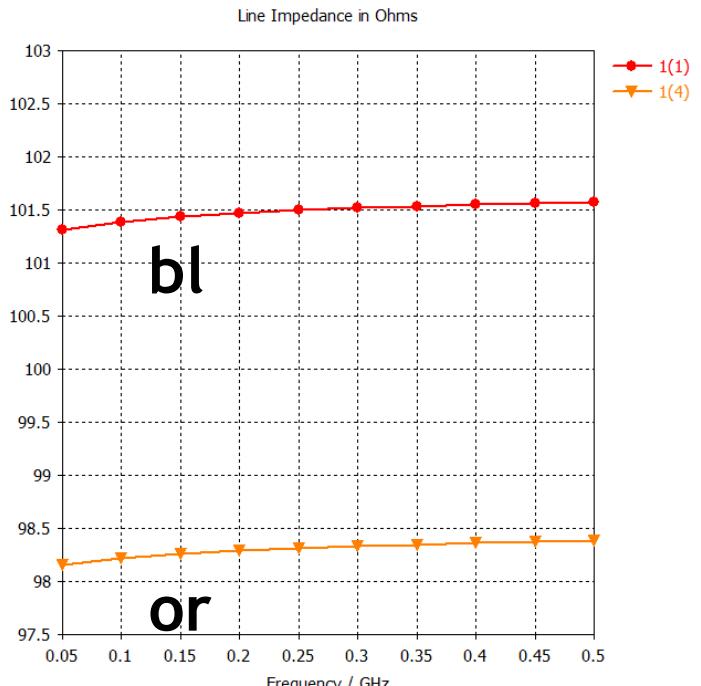
Diff mode 101.5 Ohm

bl

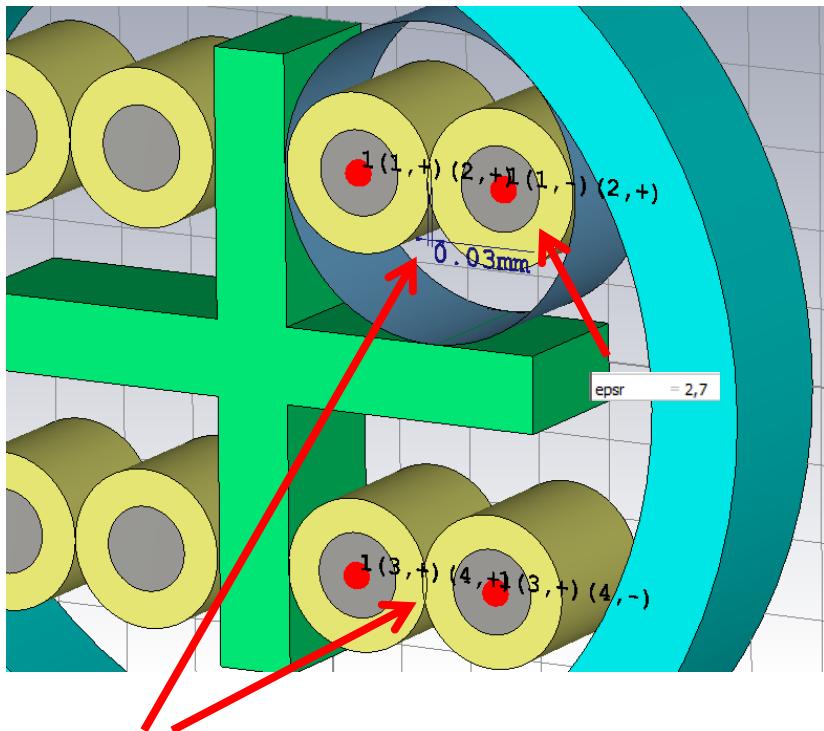


Diff mode 98.3 Ohm

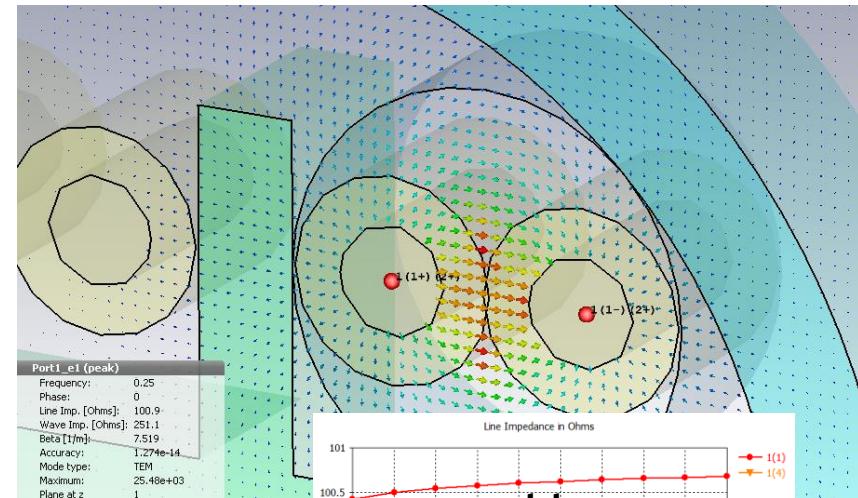
or



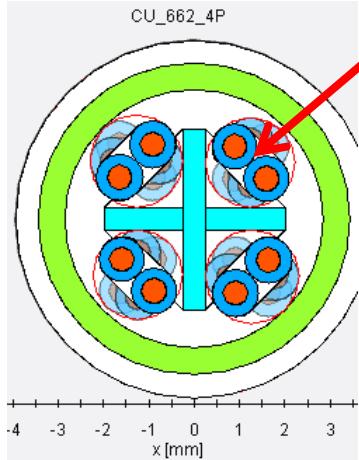
CST-MWS (3D) > Leistungs Impedanz



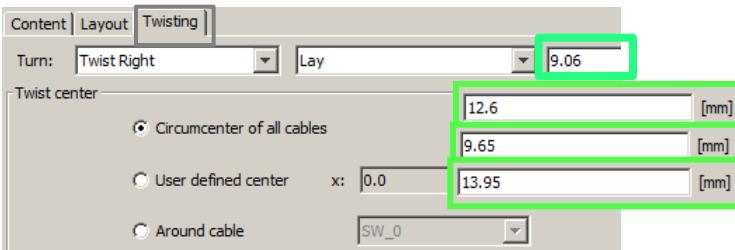
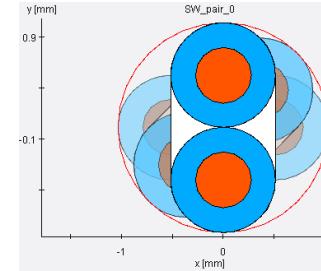
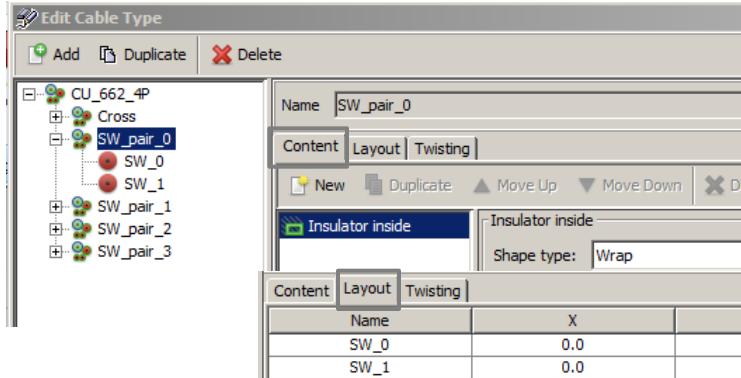
Abflachung der Isolierung beeinflußt die Impedanz



CST-CBLS: Kabel-Definition

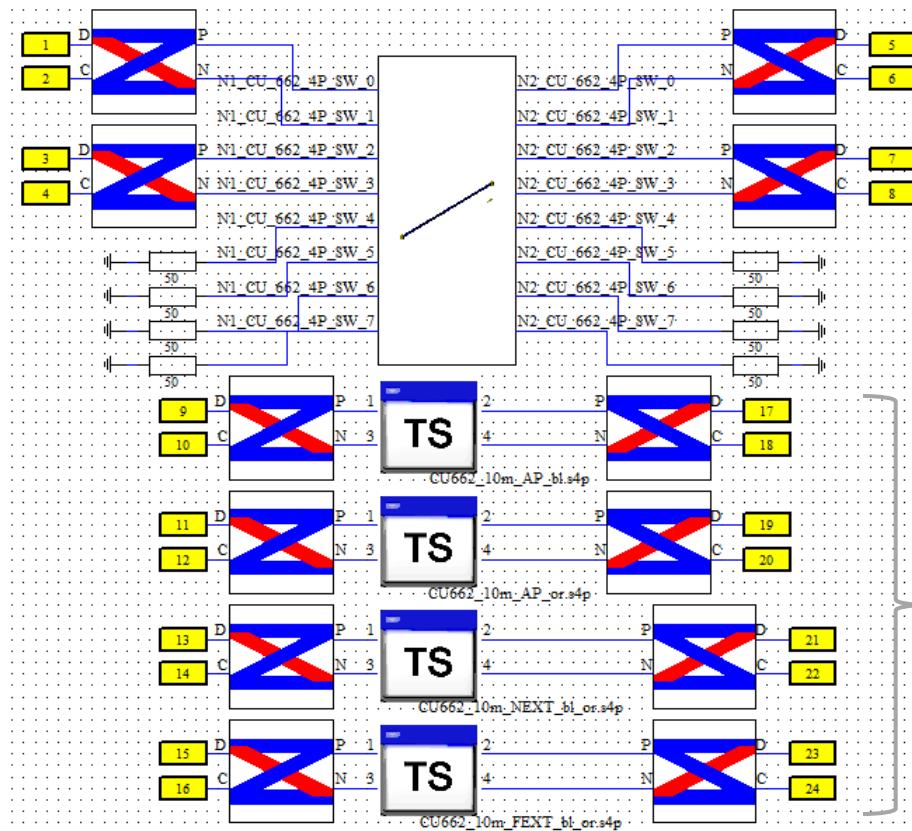
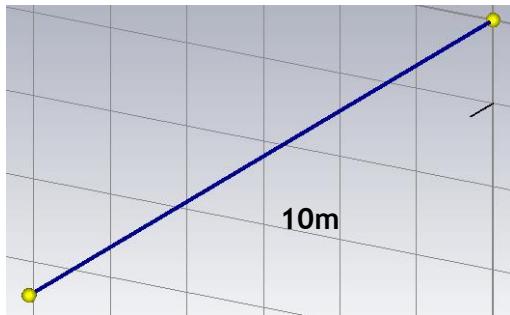
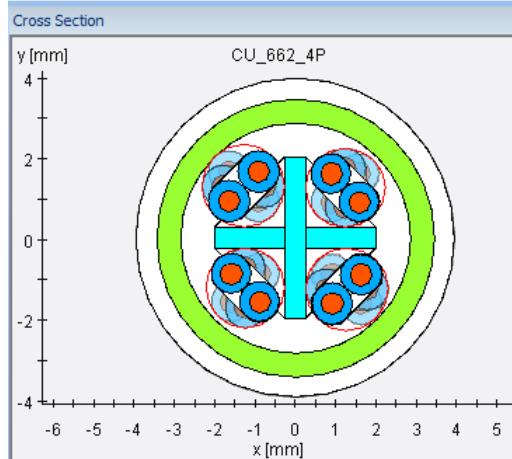


Identifier:	PE_dätwyler
Material:	dielectric
Permittivity:	3.0
Loss angle tan δ :	0.0012
Frequency:	300.0



	Twist length	Wire-Isolation Φ	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



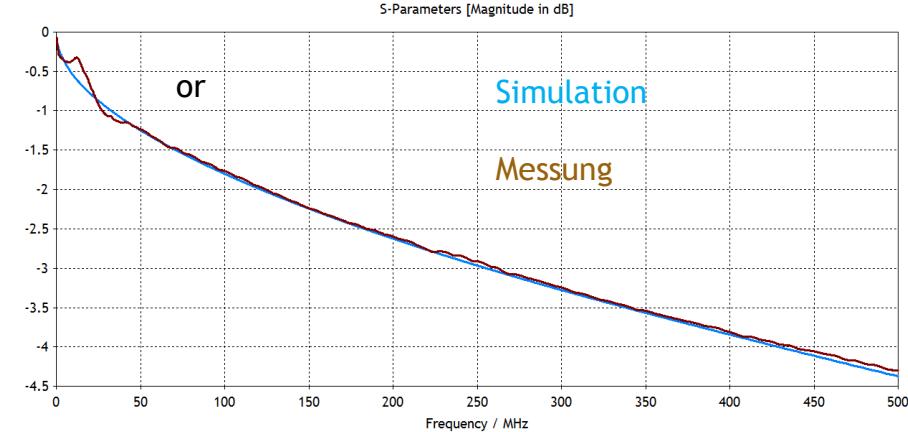
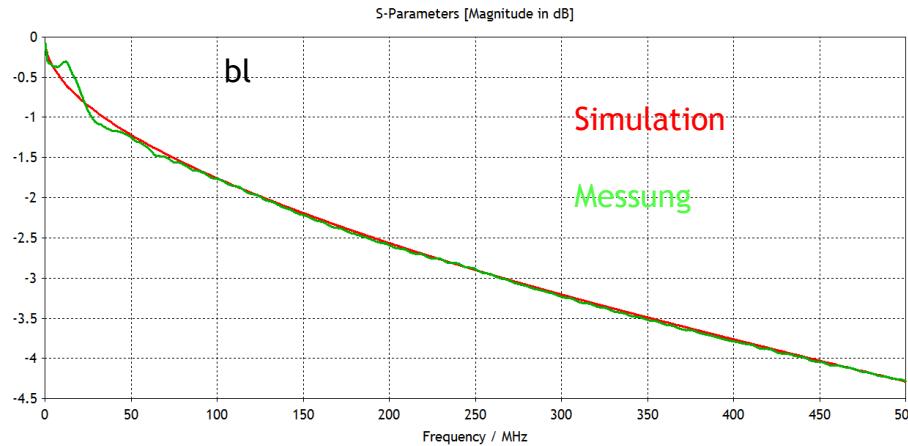
Kabel mit 4
Konvertern und 4-
Port Netzwerk-
Analysator

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

EinfügeDämfung IL bl,or (dd)



Identifier: PE_dätwyler

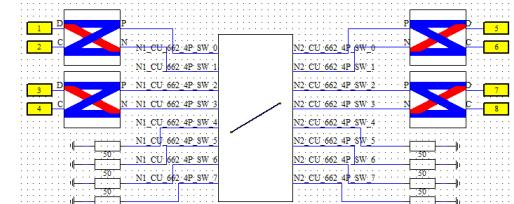
Material: dielectric

Permittivity: 3.0

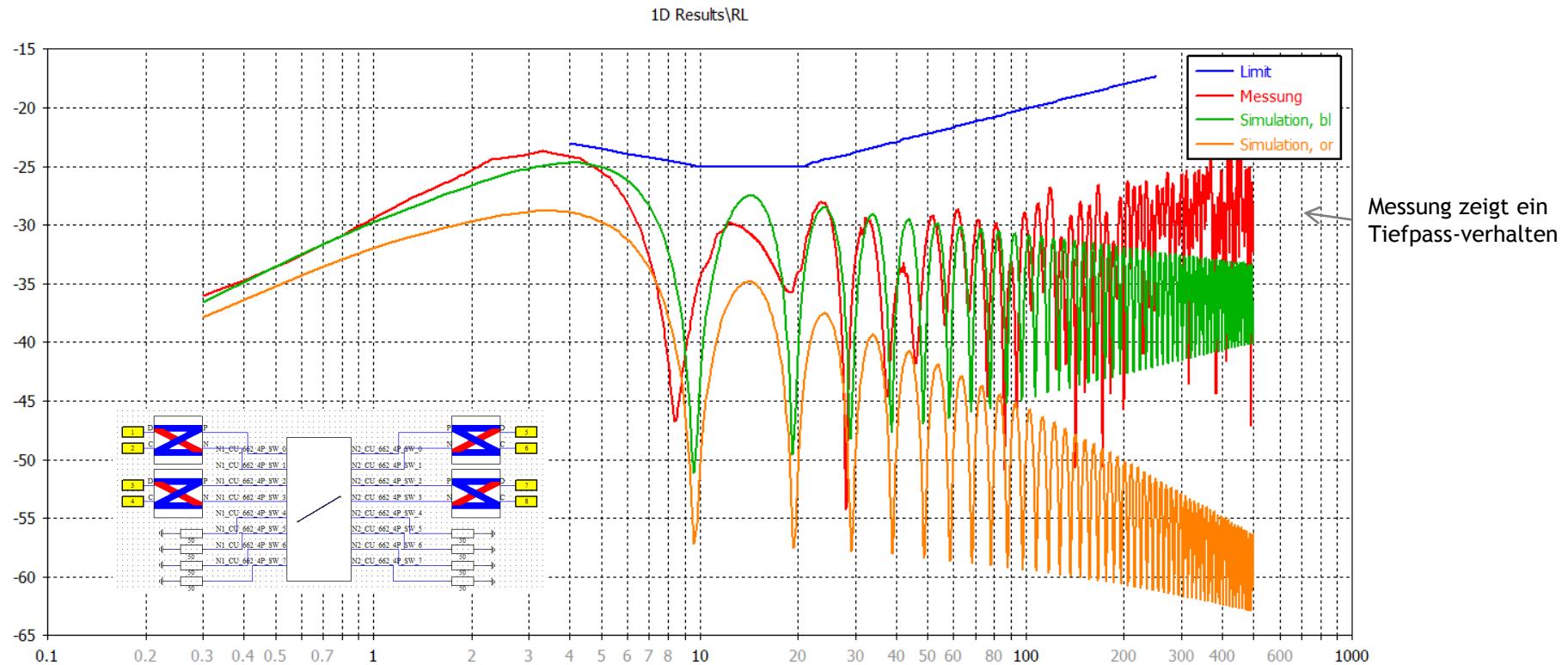
Loss angle tan δ : 0.0012

Frequency: 300.0

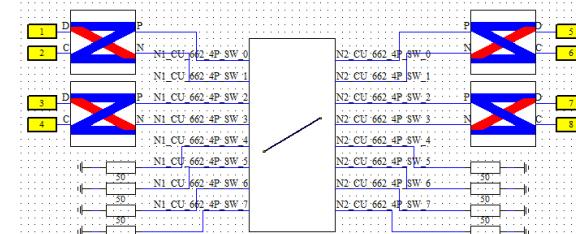
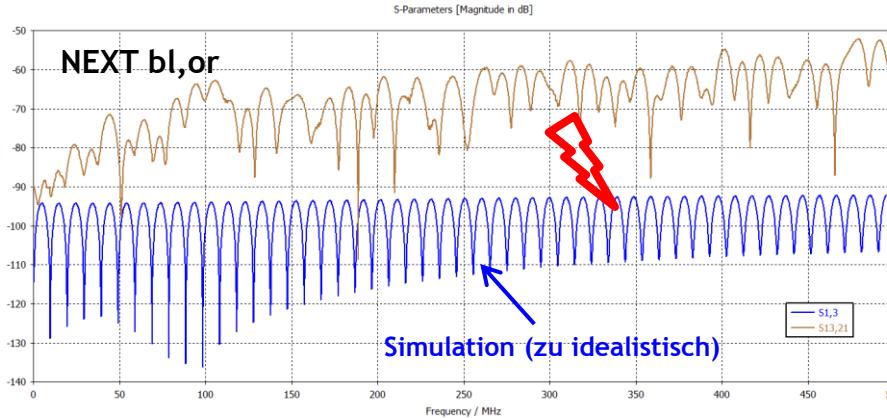
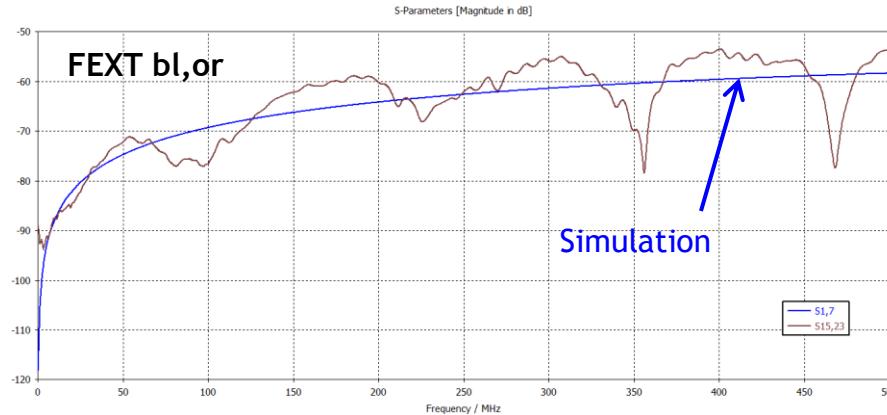
Materialbestimmung durch breitbandige
Material-Extraktion aus den S-Parametern



Reflexionsdämpfung RL bl,or (dd)

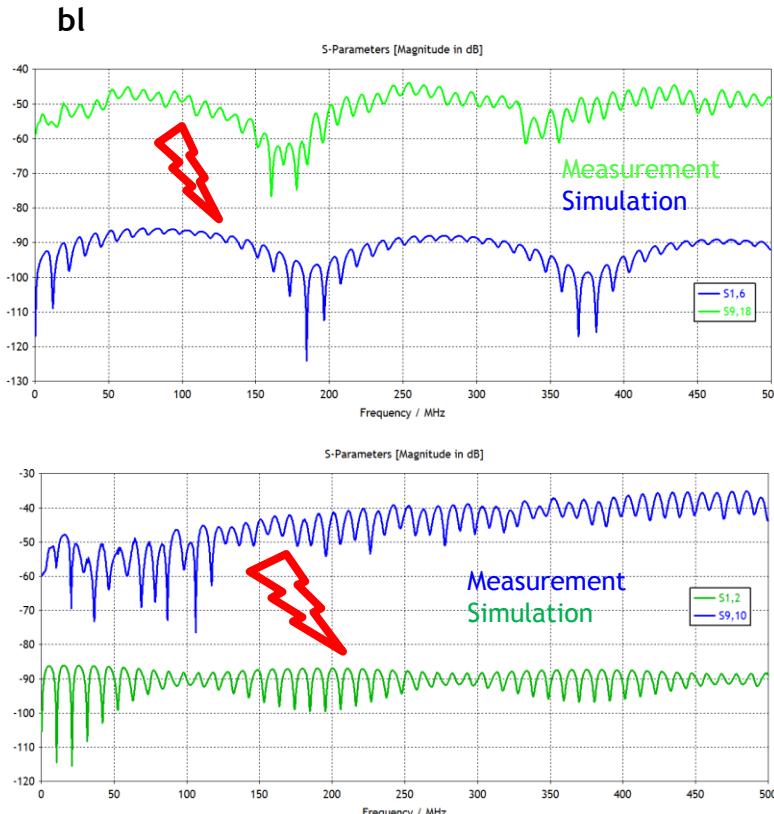


Nebensprechen: FEXT/NEXT



TCTL (CMR far), TCL (CMR near)

*TCTL: transverse converse (transfer) loss

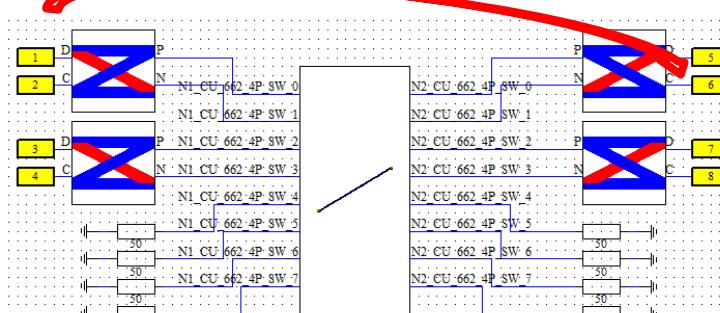


Gleichtes gilt für TCTL und TCL: zu ideal

TCTL (CMR far)

TCL

TCTL

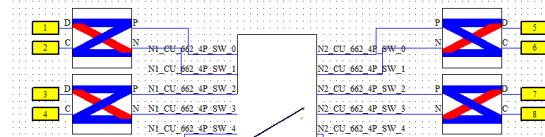
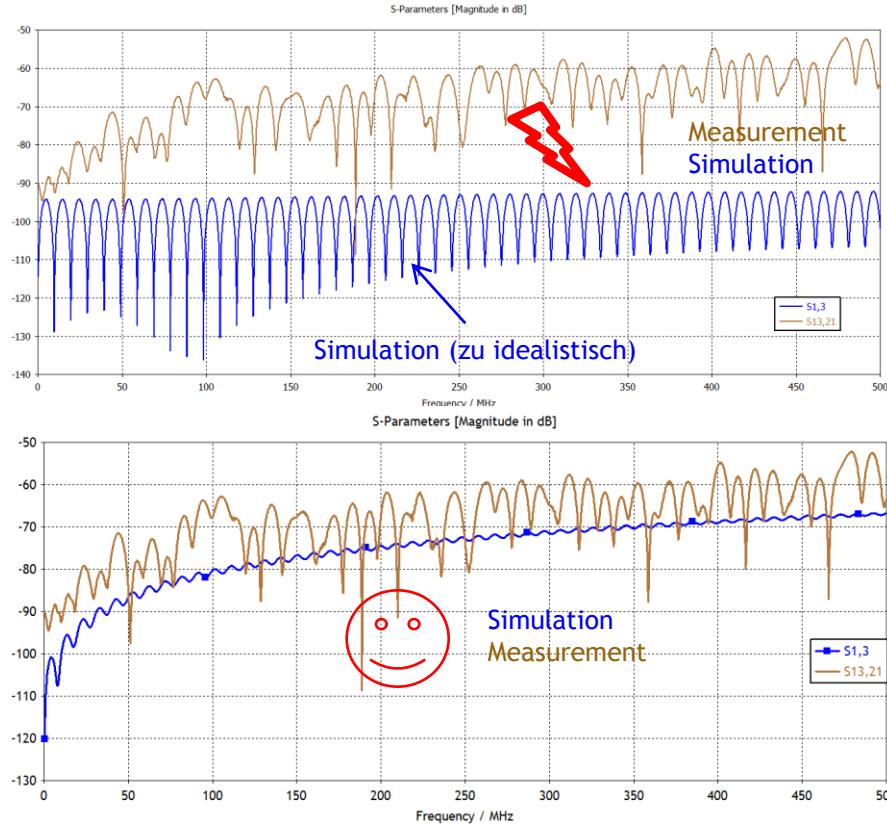


TCL (CMR near)

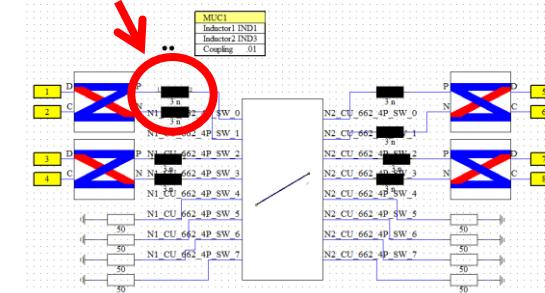
Übersicht

- 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

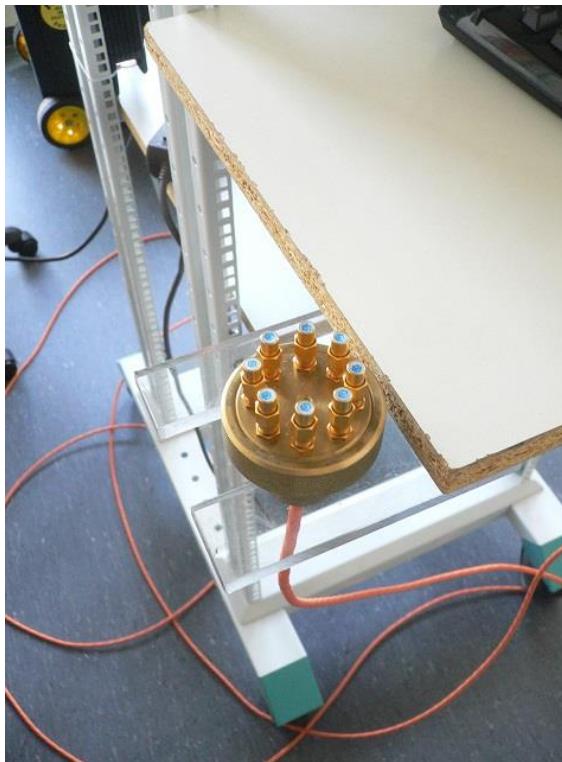
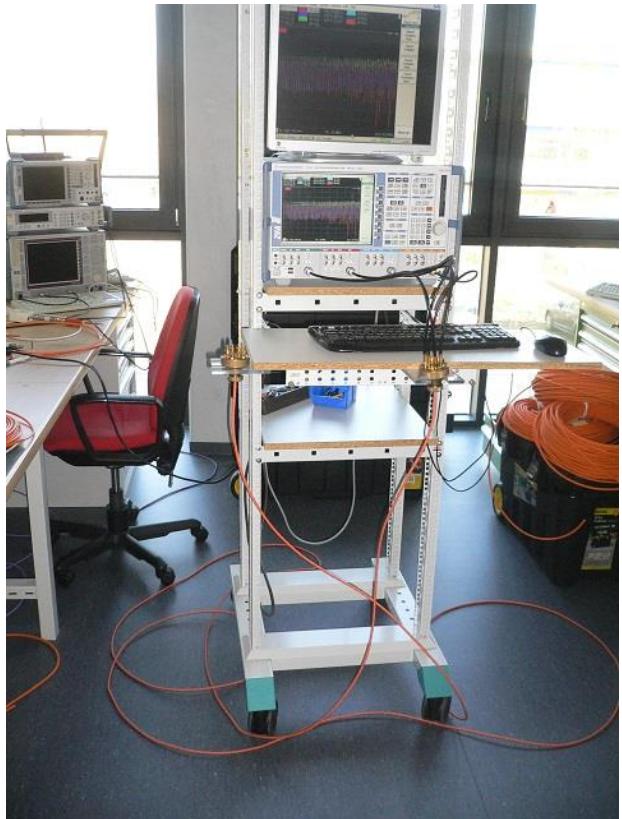
NEXT bl,or



Verbesserung durch induktive Verkopplung: k=0.01



Messaufbau



I. „Parasitäre Reaktanzen“



Bild 1: Kabelmessadapter

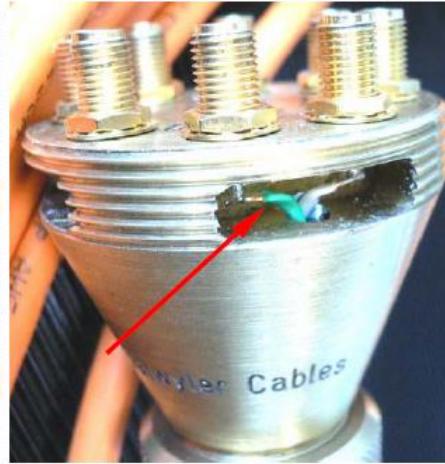


Bild 2: Resultierender induktiver Widerstand

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“

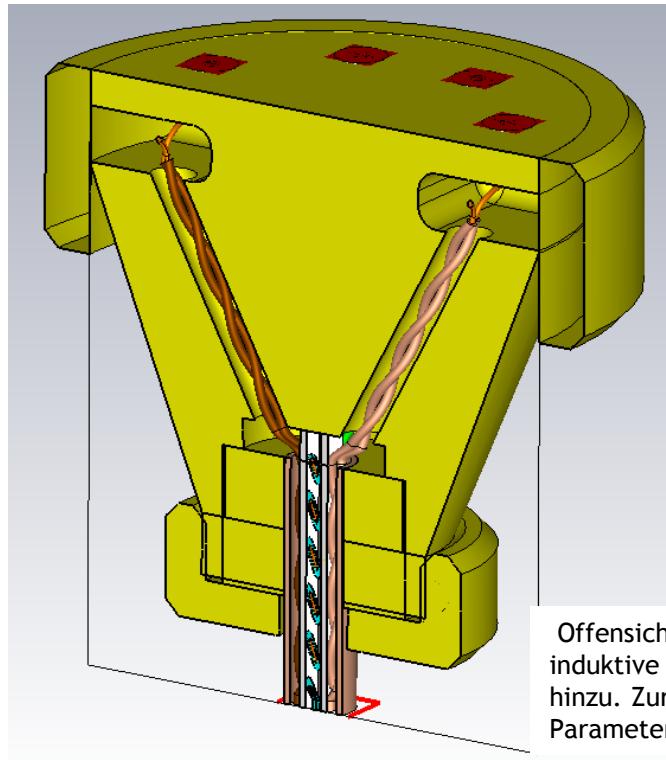


Bild 3: Eingangsimpedanz vom Kabel mit Anschlussinduktivität

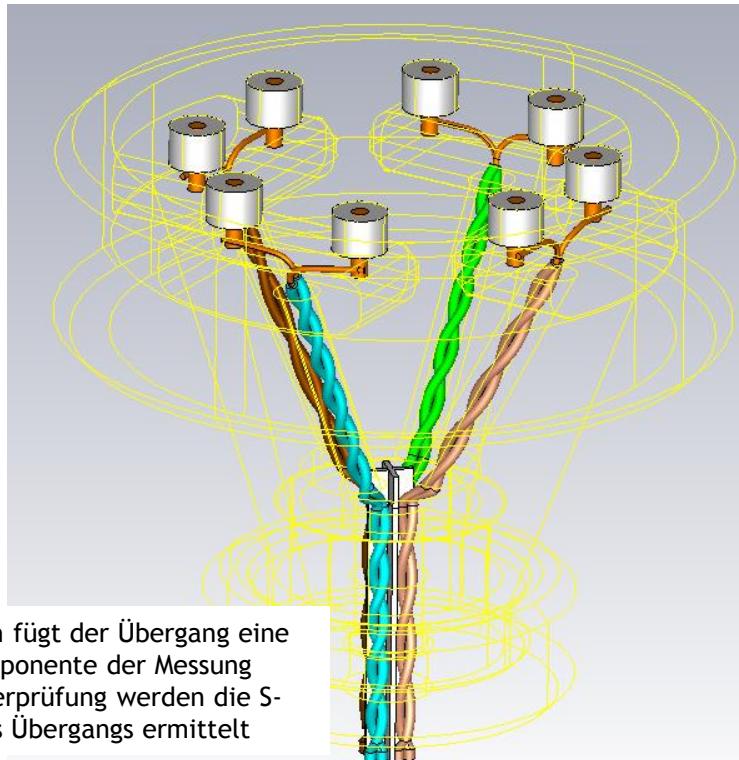
In der komplexen Darstellung (z. B. Smith-Chart) der Reflexion lässt sich sehr gut diese induktive Anschlusskomponente am Eingang erkennen, weil dadurch mit zunehmender Frequenz die Reflexion vektoriell additiv in den induktiven Bereich „nach oben“ verschoben wird. Mit diesem Netzwerkanalysator kann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

Dätwyler Cables

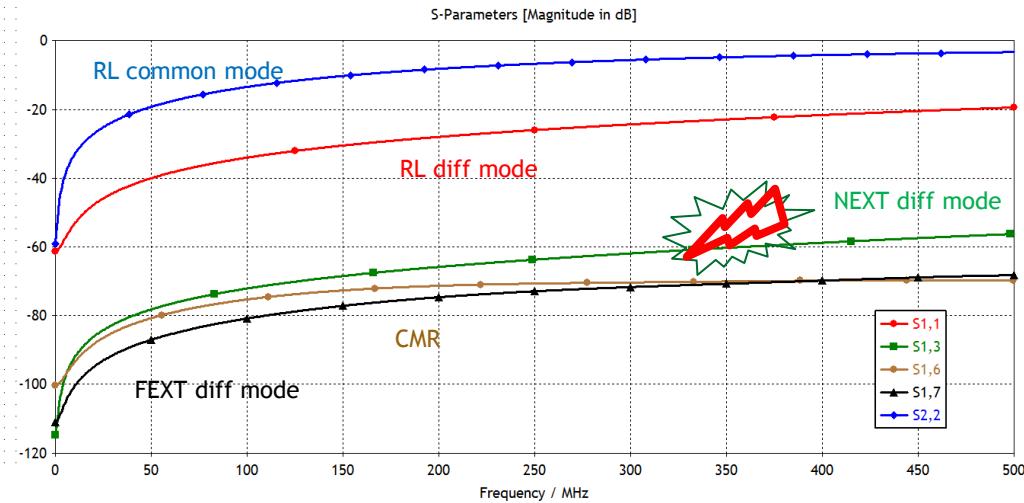
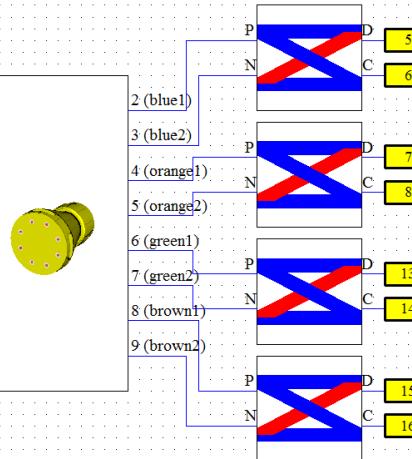
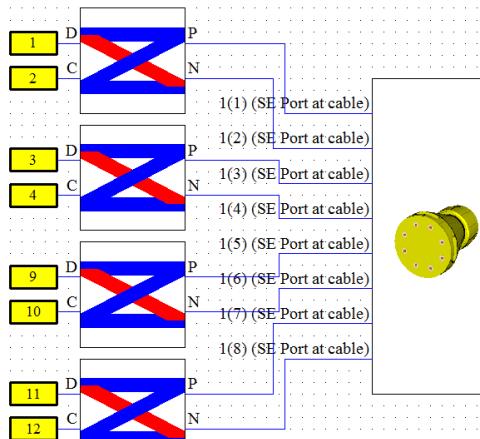
Konischer Messadapter modelliert in3D CST-MWS



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

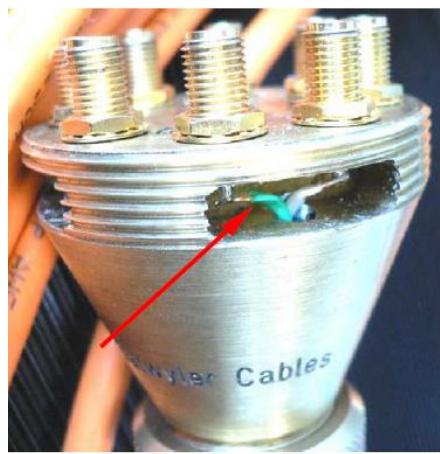


Bild 2: Resultierender induktiver Widerstand

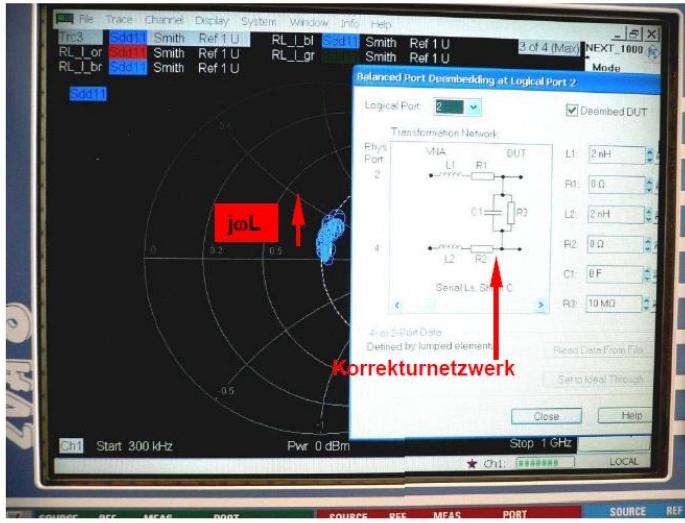
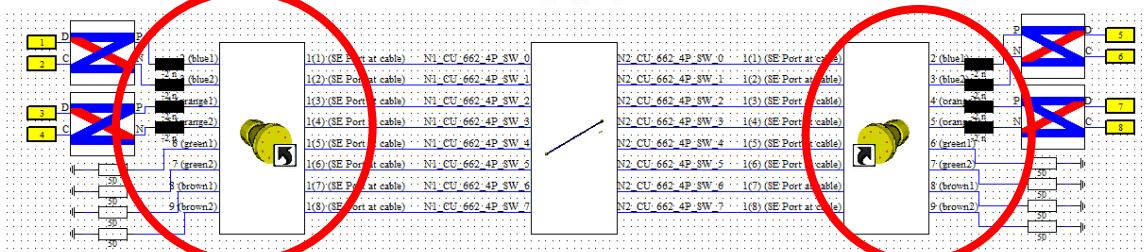


Bild 3: Eingangsimpedanz vom Kabel mit Anschlussinduktivität



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

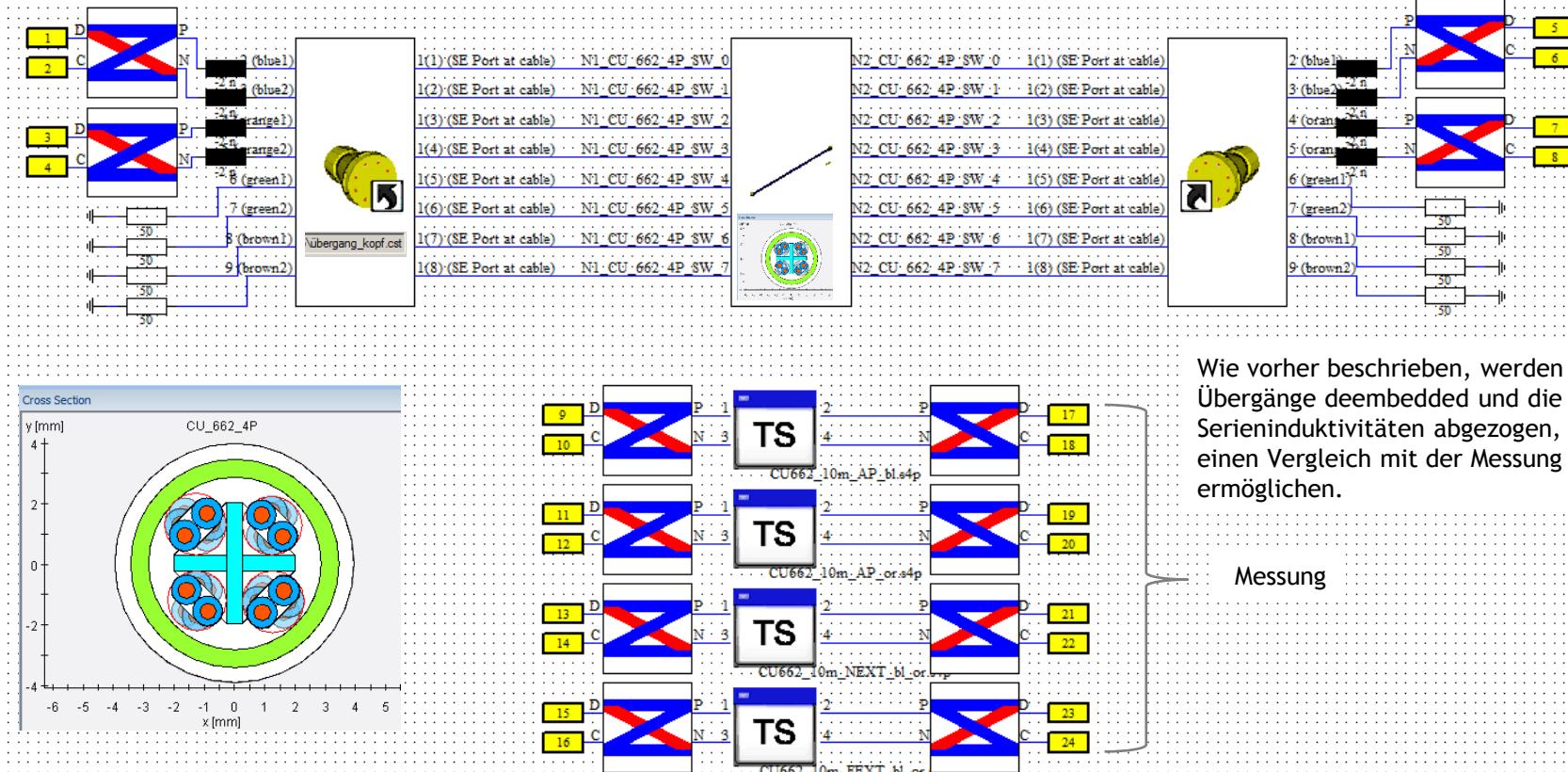
Die bessere Alternative wäre, die Referenzebene an die Coax-Stecker zu legen und den Übergang zu deembedden.

Referenz-Ebene

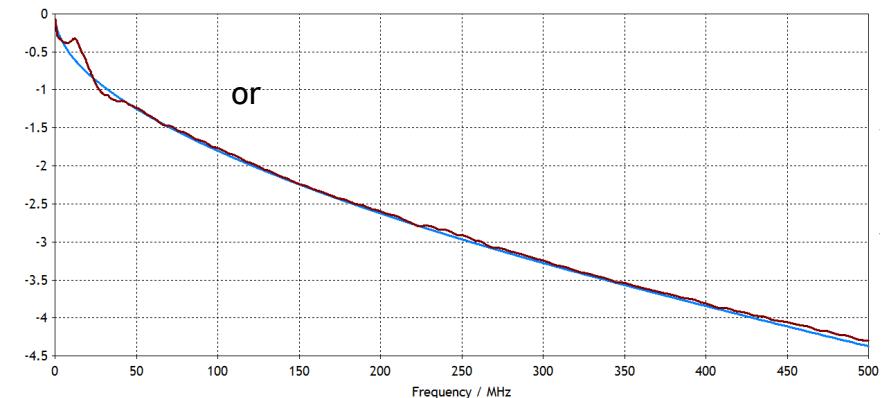
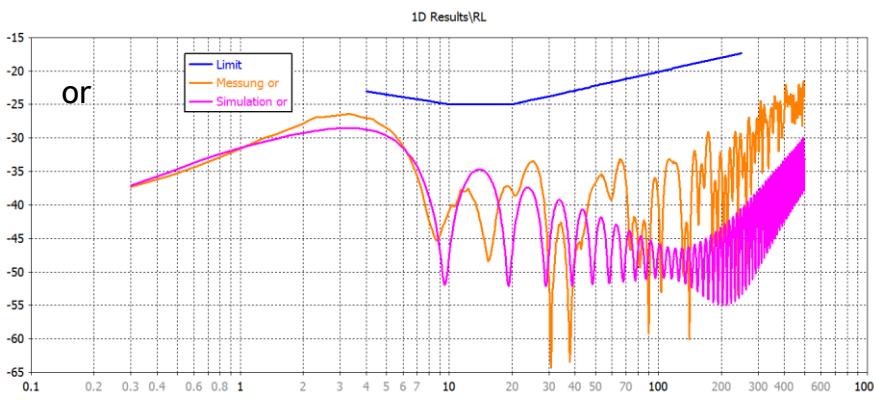
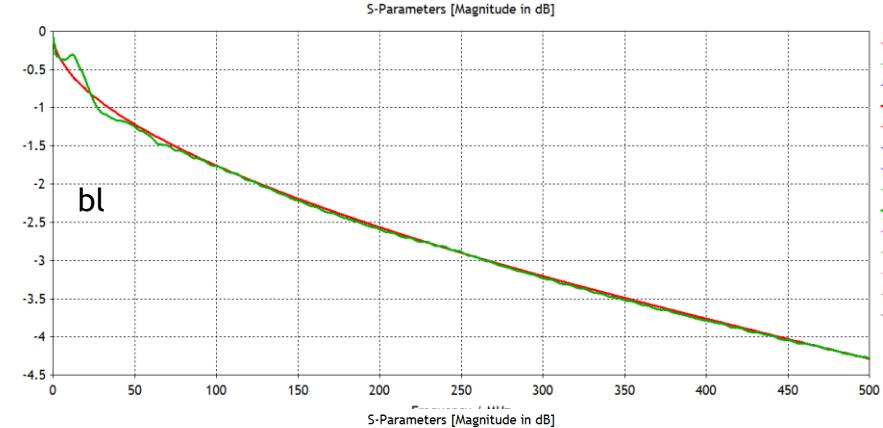
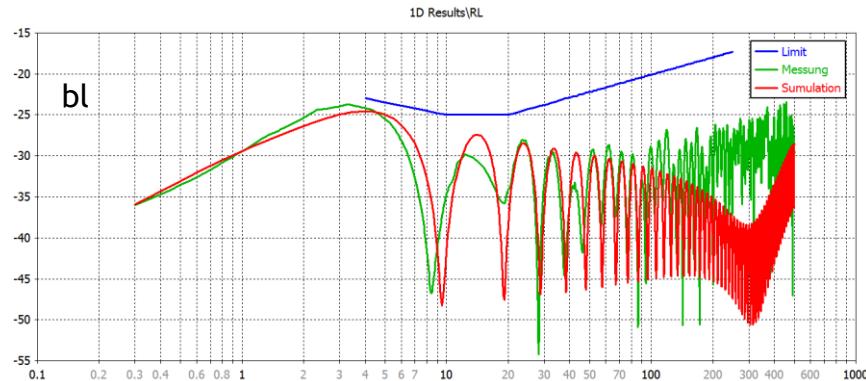


Bild 2: Resultierender induktiver Widerstand

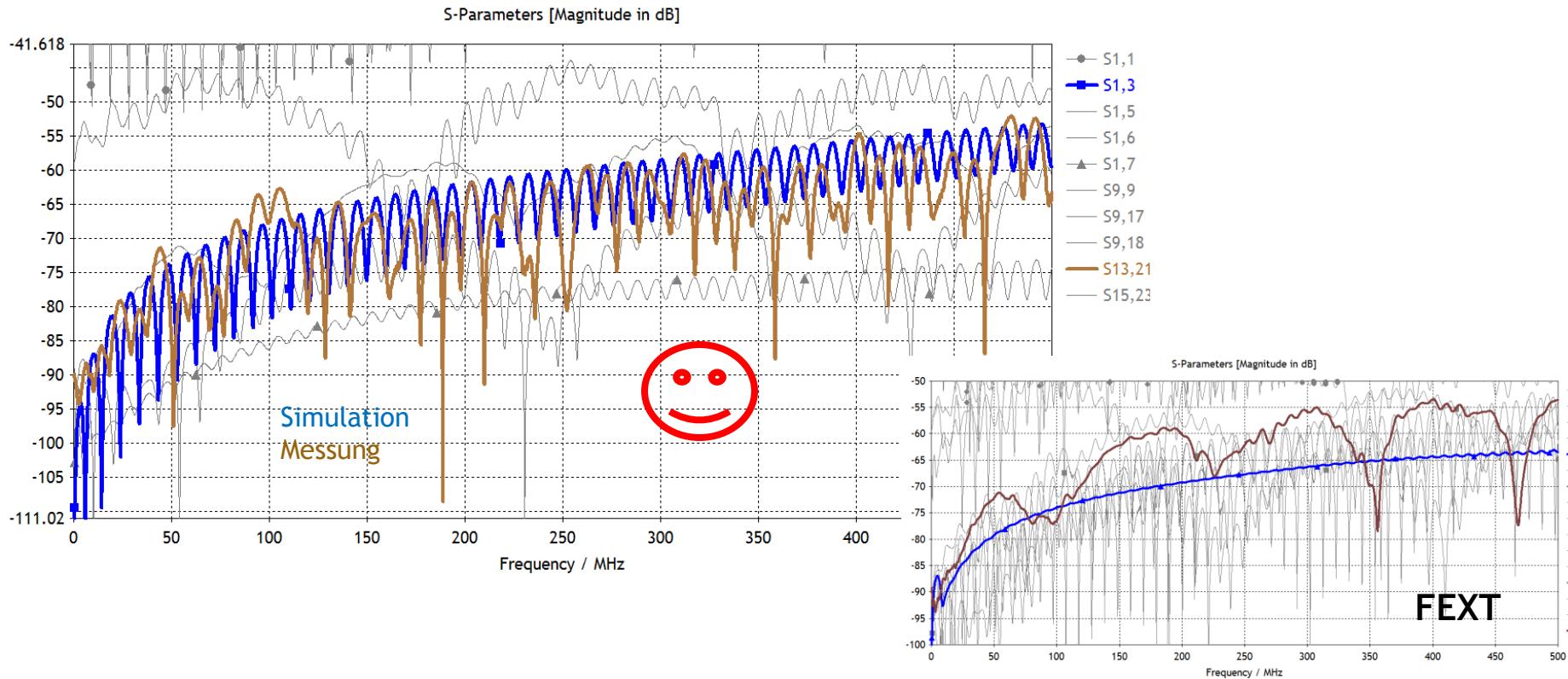
Vollständiges Modell: 10 m Kabel



Reflexions- und Einfügedämpfung



Nah-Nebensprechen: NEXT

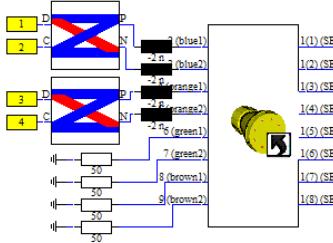


Übersicht

- 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

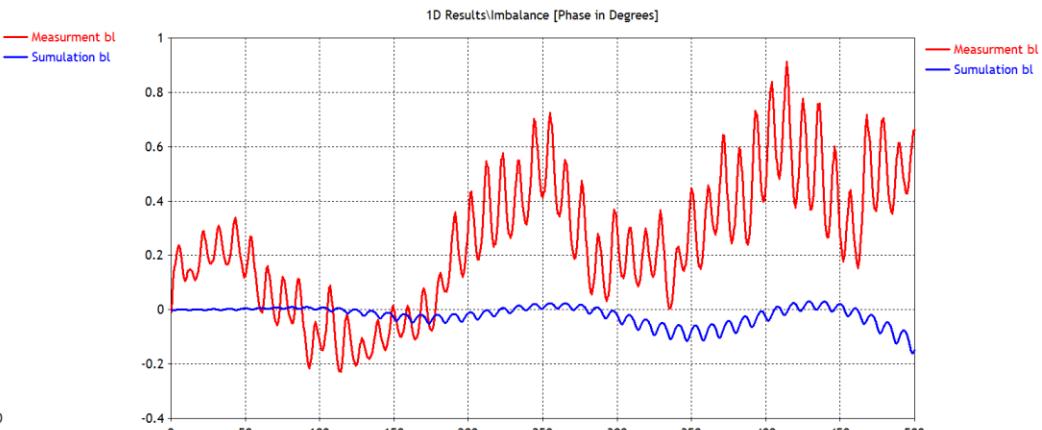
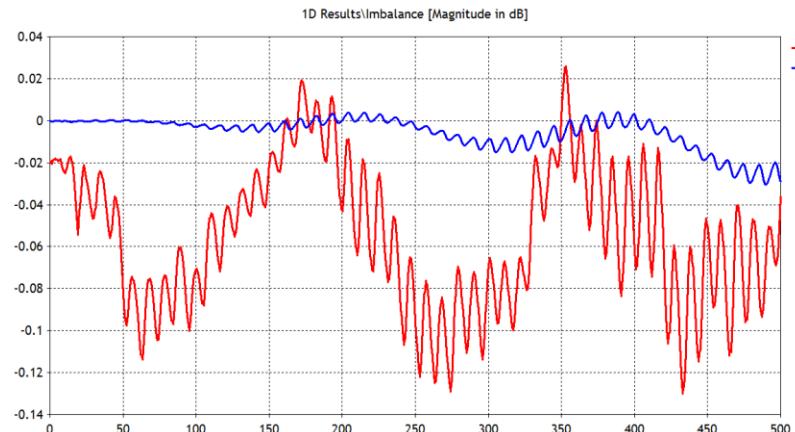
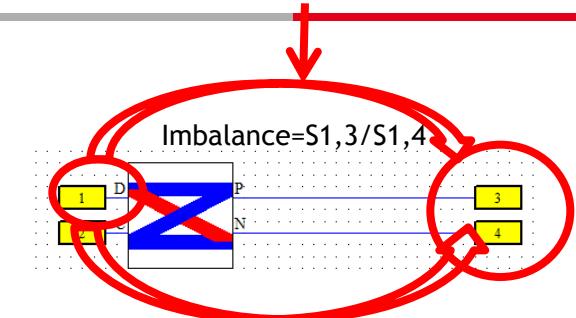
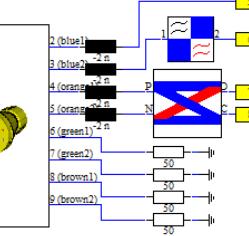
Imbalance bl

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



1(1) (SE Port at cable)	N1 CU_662_4P_SW_0
1(2) (SE Port at cable)	N1 CU_662_4P_SW_1
1(3) (SE Port at cable)	N1 CU_662_4P_SW_2
1(4) (SE Port at cable)	N1 CU_662_4P_SW_3
1(5) (SE Port at cable)	N1 CU_662_4P_SW_4
1(6) (SE Port at cable)	N1 CU_662_4P_SW_5
1(7) (SE Port at cable)	N1 CU_662_4P_SW_6
1(8) (SE Port at cable)	N1 CU_662_4P_SW_7

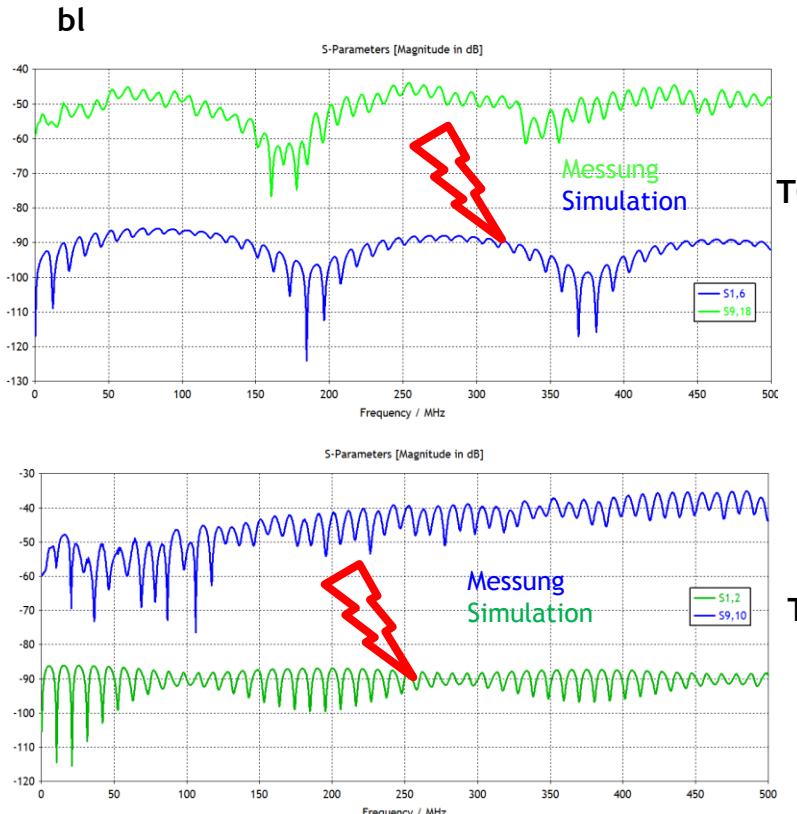
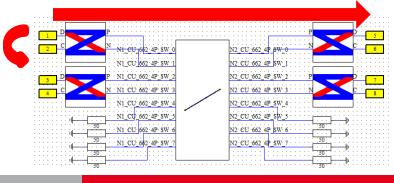
2(1) (SE Port at cable)	N2 CU_662_4P_SW_0
2(2) (SE Port at cable)	N2 CU_662_4P_SW_1
2(3) (SE Port at cable)	N2 CU_662_4P_SW_2
2(4) (SE Port at cable)	N2 CU_662_4P_SW_3
2(5) (SE Port at cable)	N2 CU_662_4P_SW_4
2(6) (SE Port at cable)	N2 CU_662_4P_SW_5
2(7) (SE Port at cable)	N2 CU_662_4P_SW_6
2(8) (SE Port at cable)	N2 CU_662_4P_SW_7



TCTL (CMR far), TCL (CMR near)

*TCTL: transverse converse (transfer) loss

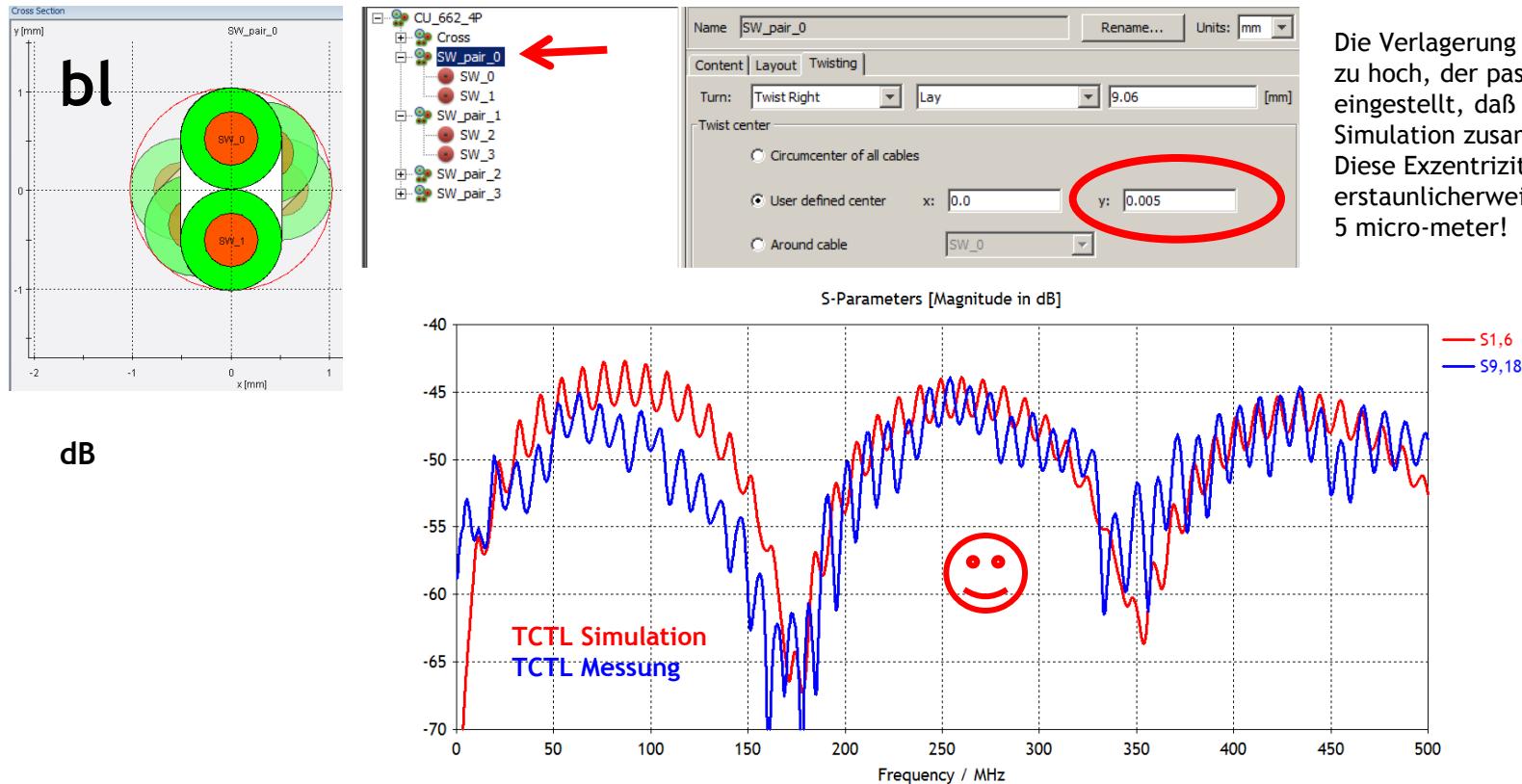
Gleches gilt für TCTL and
TCL: zu ideal! Ideal!



Einführung eines „Twist-Center Offset“

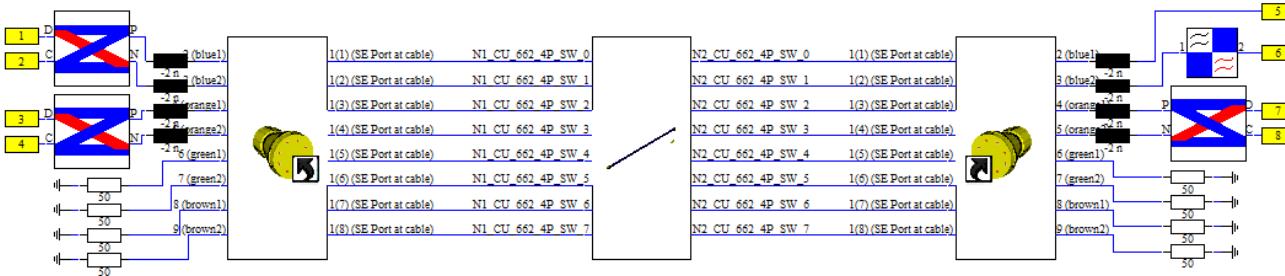


Einführung eines „Twist-Center Offset“



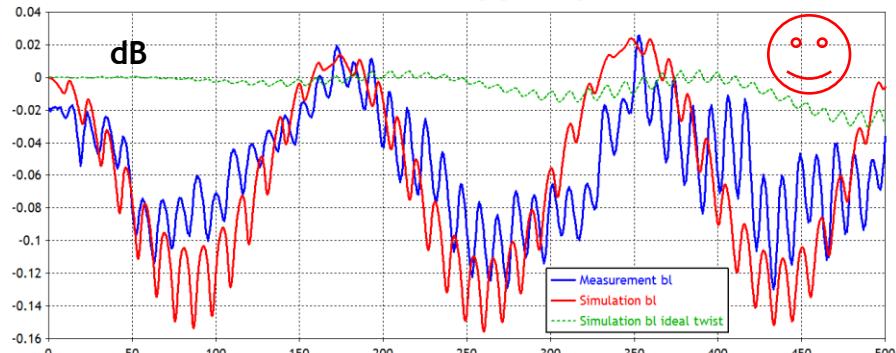
Die Verlagerung von 0.2mm war viel zu hoch, der passende Wert wurde so eingestellt, daß Messung und Simulation zusammenpassen.
Diese Exzentrizität ist erstaunlicherweise recht niedrig: nur 5 micro-meter!

Einführung eines „Twist-Center Offset“

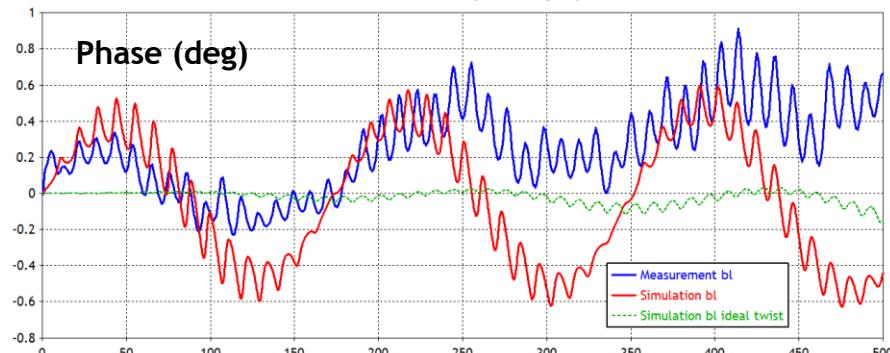


Die „Balance“ hängt mit TCTL und TCL zusammen, so kann auch hier eine gute Übereinstimmung festgestellt werden.

1D Results\Imbalance [Magnitude in dB]



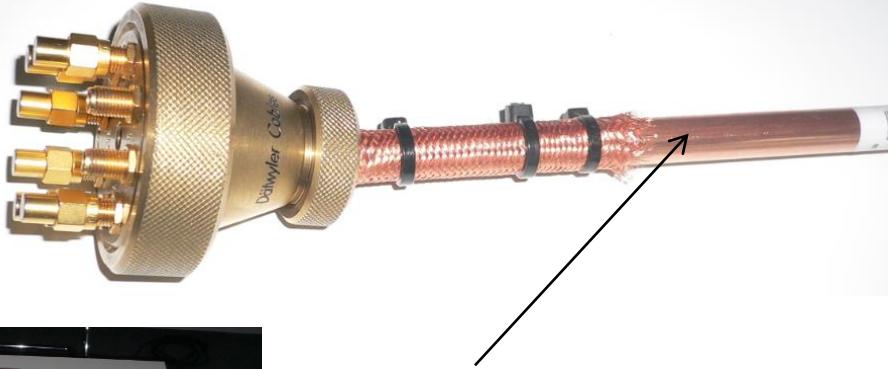
1D Results\Imbalance [Phase in Degrees]



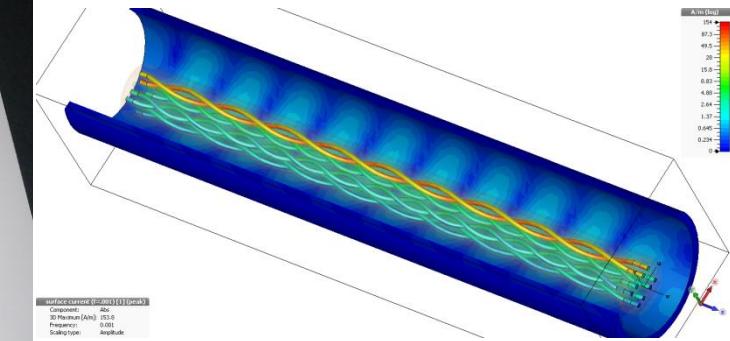
Übersicht

- 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

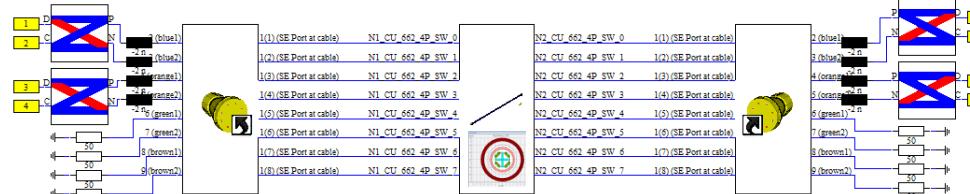
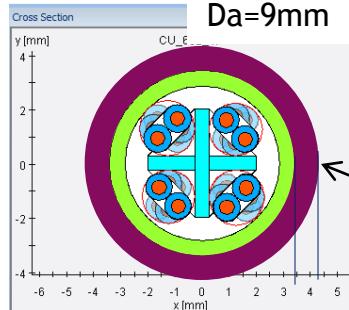
Messung: Kabel im Rohr



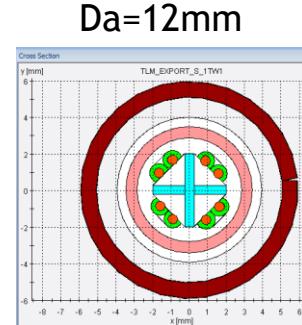
Kupfer-Rohr mit Aussendurchmesser 12mm und Wandstärke 1mm



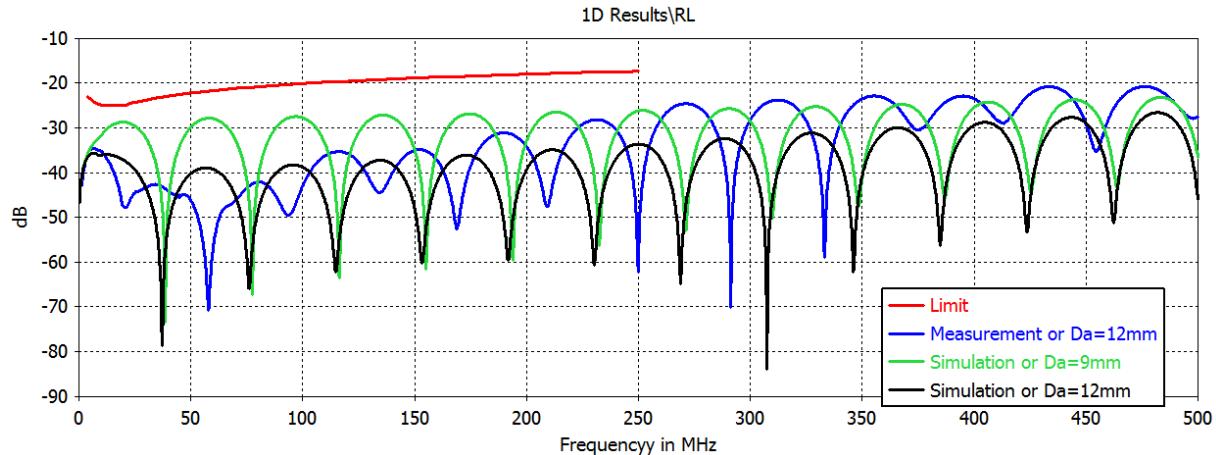
Reflexionsdämpfung



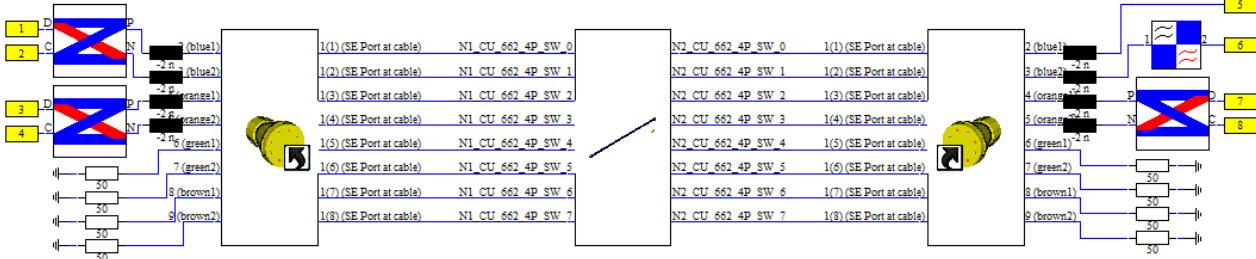
Extrem-Fall: Rohr berührt Kabelmantel



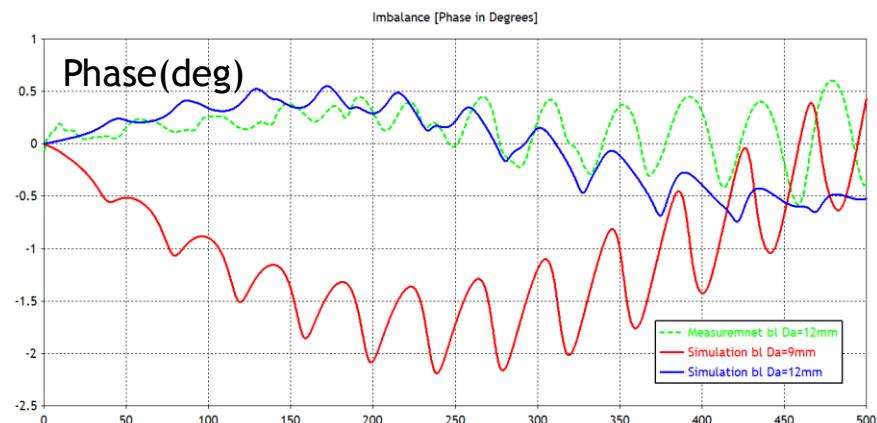
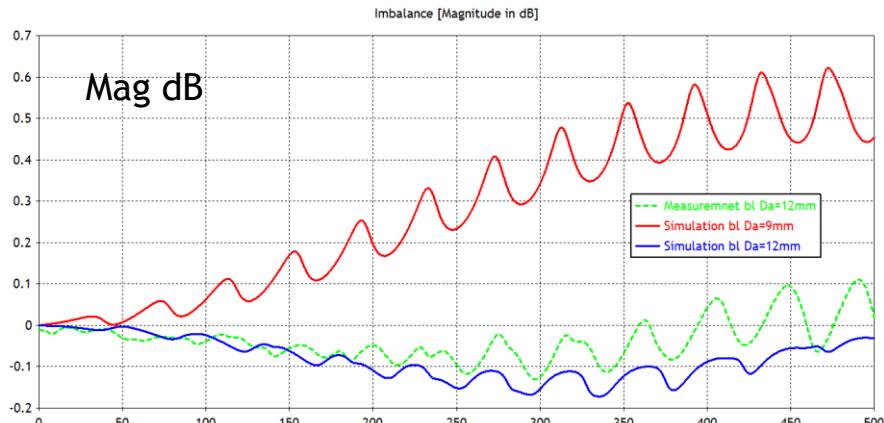
bl



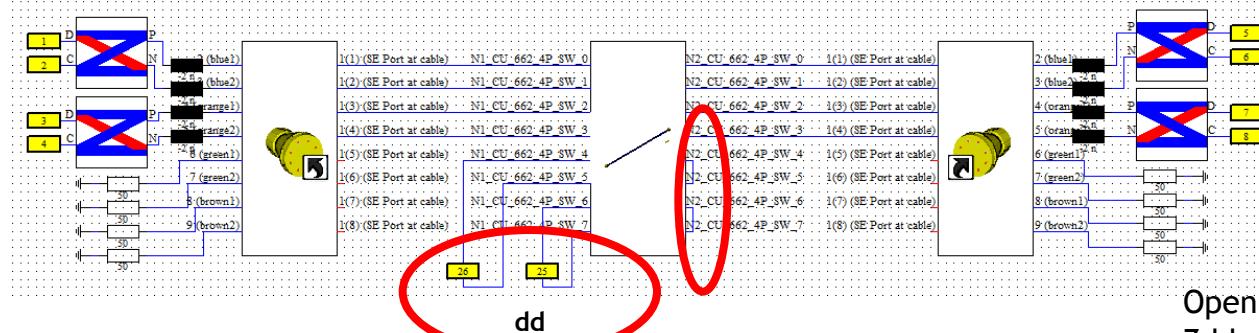
Imbalance bl



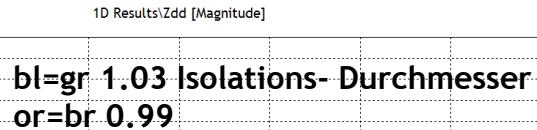
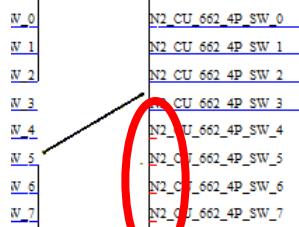
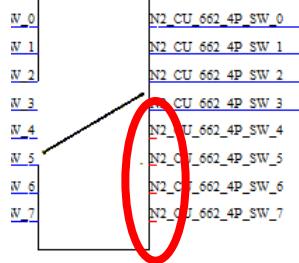
Die Imbalance steigt um ca 6% bei höheren Frequenzen an



Impedanz (dd)



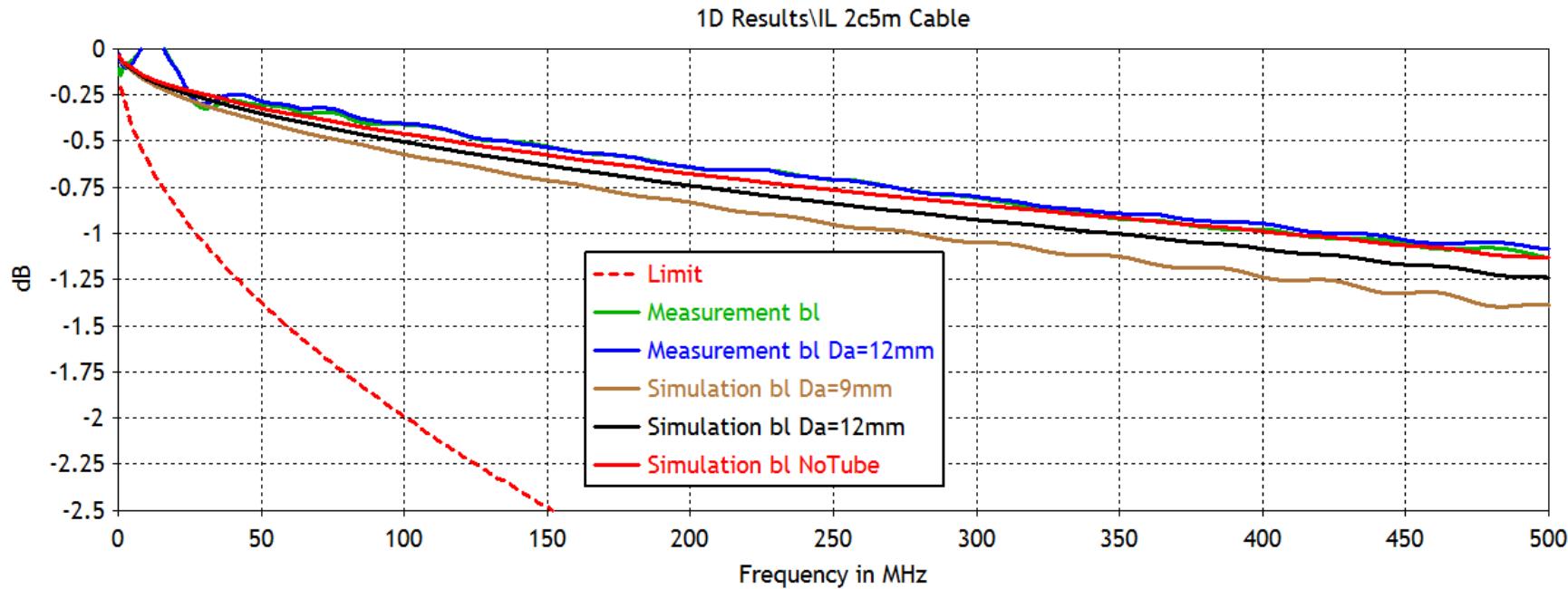
Open/short
 $Z_{dd} = \sqrt{Z_o * Z_s}$



bl=gr 1.03 Isolations- Durchmesser
 or=br 0.99

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).

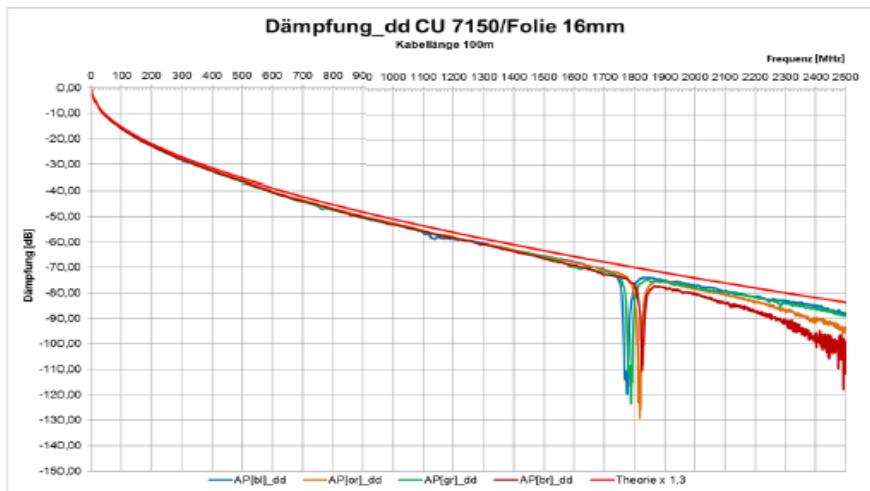


Abb. 1: Idealer bzw. theoretischer (rot) und tatsächlicher Dämpfungsverlauf eines Datenkabels



Abb. 2: Beispiel eines deformierten Datenkabel



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

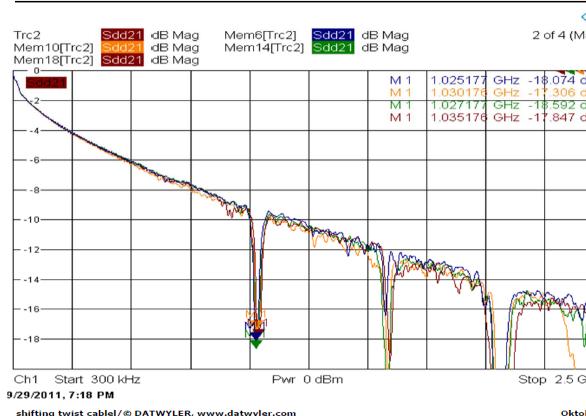


Bild 2: Kabelmuster mit variablen Abstand der Deformierungen ([95; 142] mm)



Bild 3: Kabelbinderzange mit einstellbarer Zugkraft (220 N)

Anhang II: Dämpfungspole im Gleichtakt- und Gegentaktmodus



Die Frequenzlage der Dämpfungsponde verhält sich im Gegentaktmodus entsprechend der Versetzung der Adernpaare. Je größer die Steigung, umso höher ist auch die Frequenz des Pols.

II. Dämpfungspole

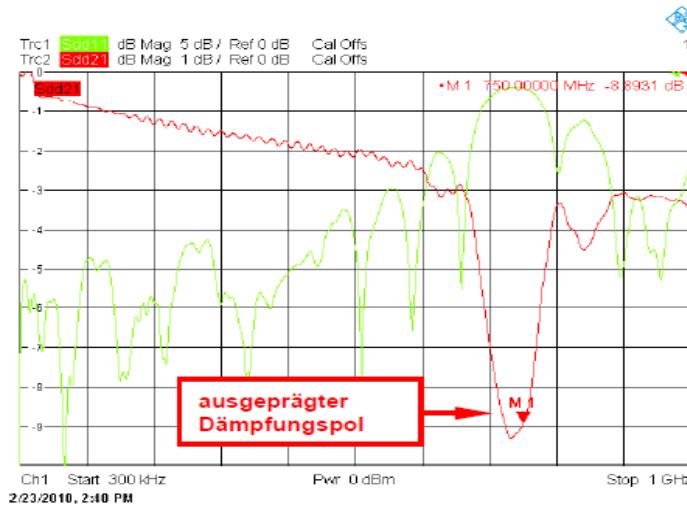


Bild 9: Dämpfungsverlauf (rt) und Rückflussdämpfung (gr)



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

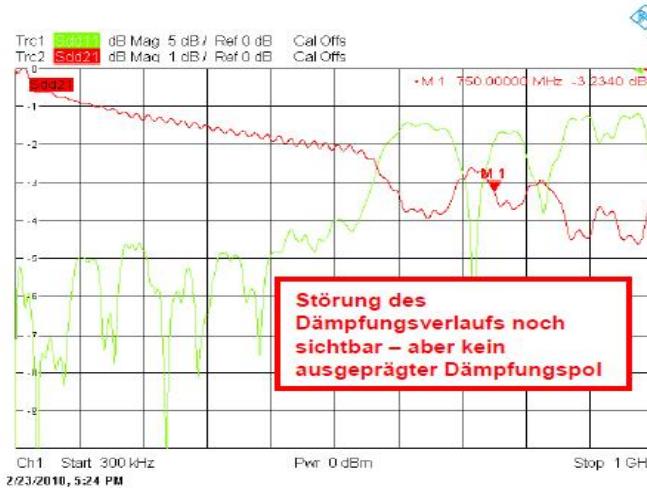


Bild 11: Dämpfungsverlauf (rt) und Rückflussdämpfung (gr)

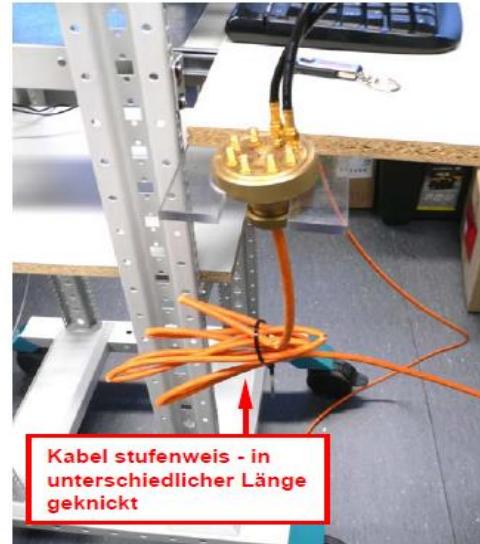


Bild 12: Kabel mit Knick (10) variabler Abstand

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 Gesamtverteilung 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

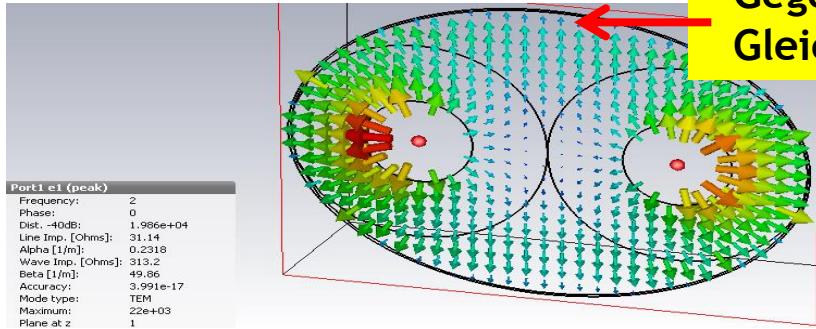
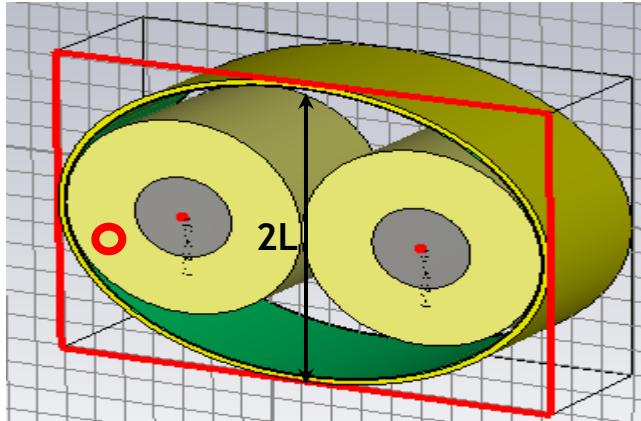
MWStudio zur Berechnung der Impedanzen

Modules

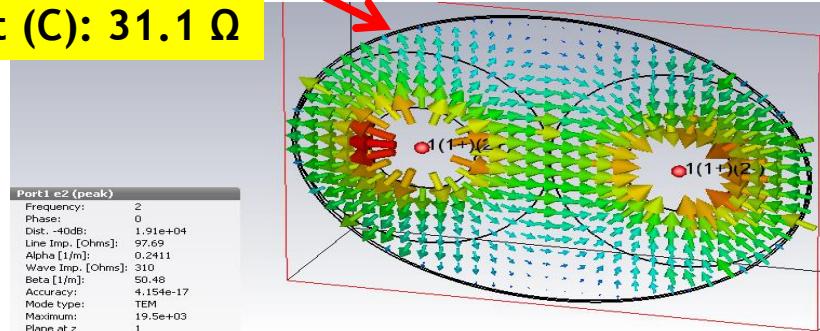


Die Bestimmung der Gegen- und Gleichtakt-Impedanz erfolgt mittels Portmodenberechnung in MWStudio

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

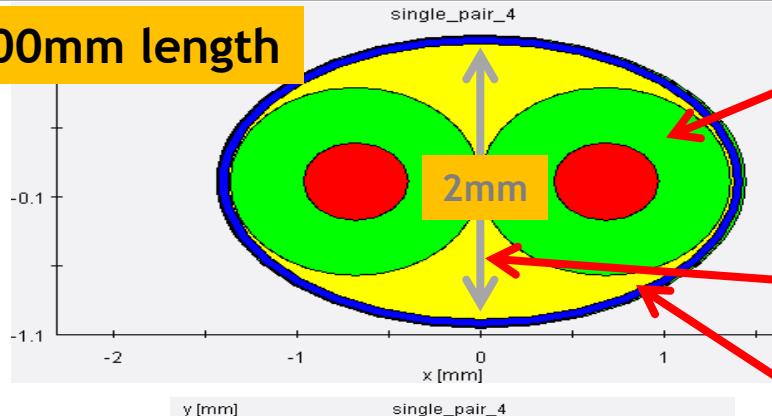


Gegentakt (D): 97.7 Ω
Gleichtakt (C): 31.1 Ω

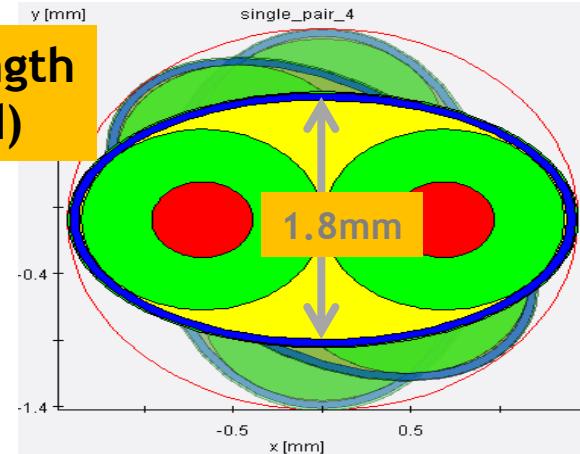


Cable -Cross-Sections

100mm length



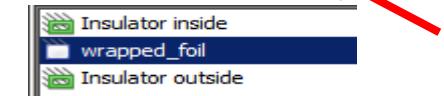
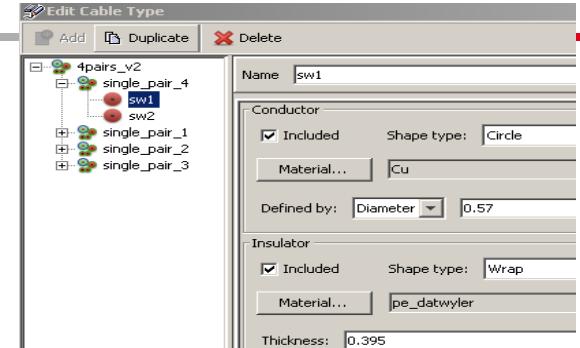
5mm length
(pinched)



Ader:
Abmessungen

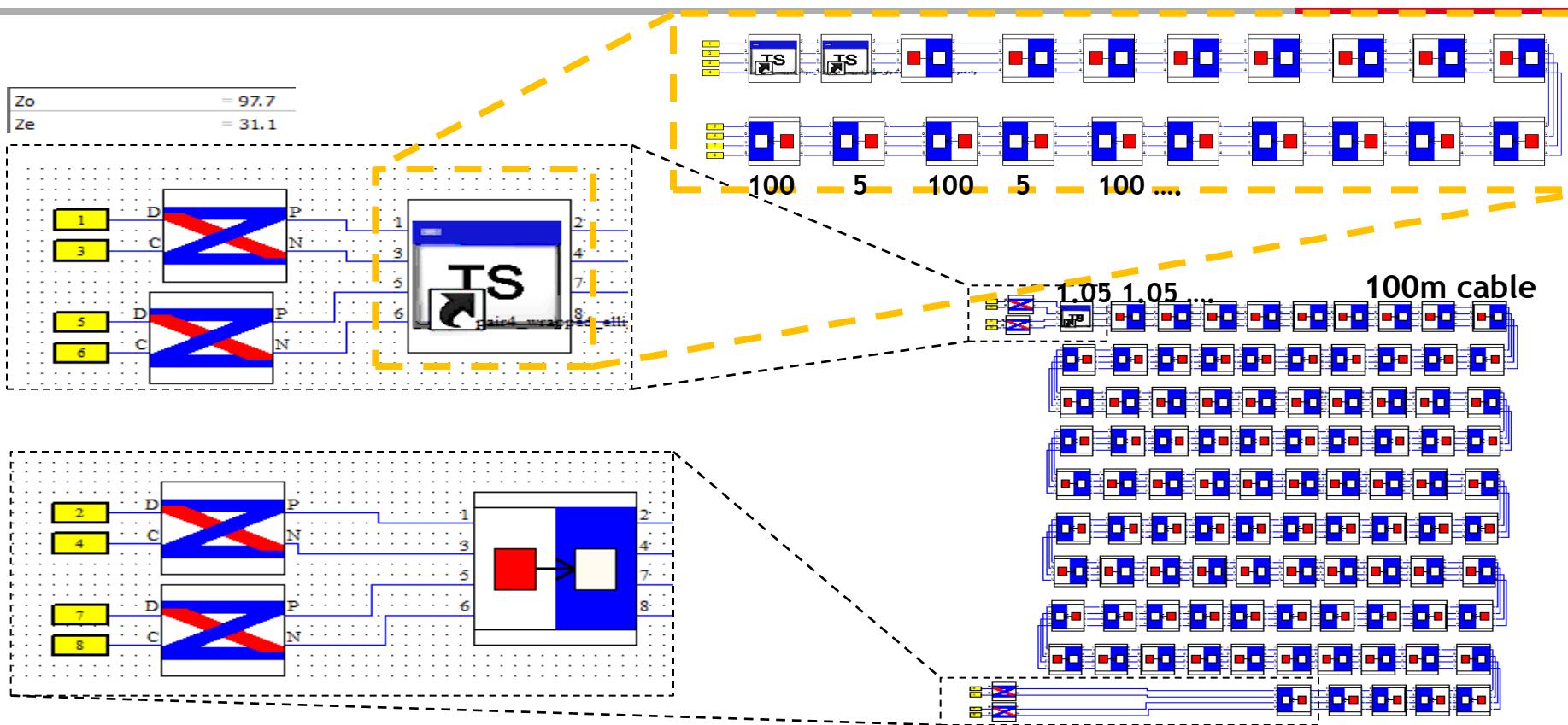
Füllung

Schirmdefinition

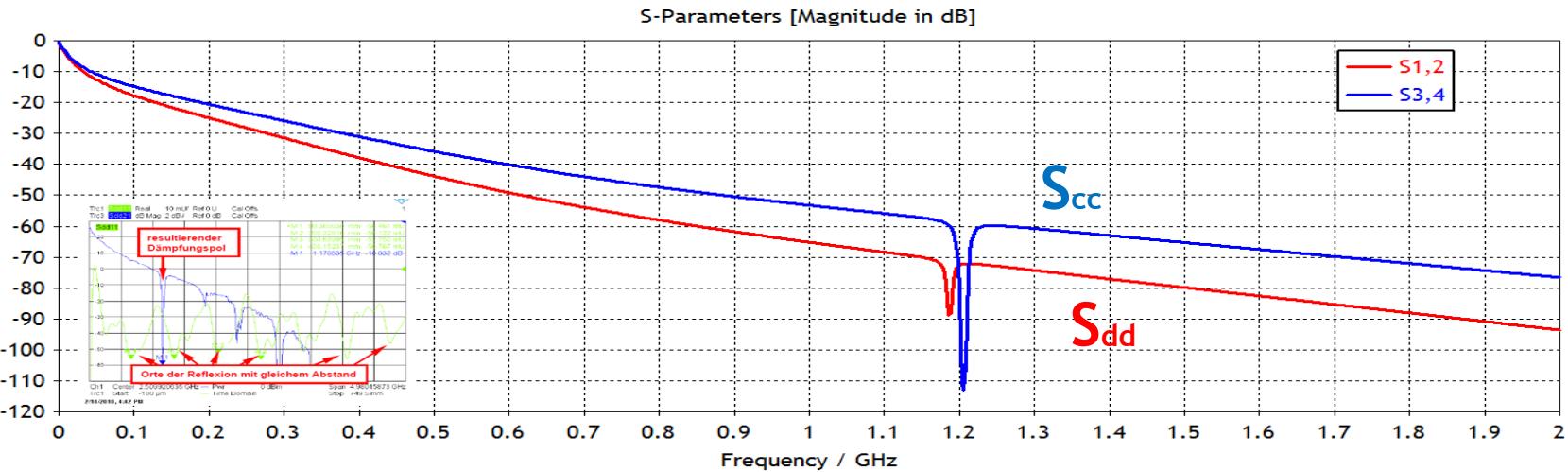


100m Kabel

1.05m cable



Kabel -Transmission Zeros



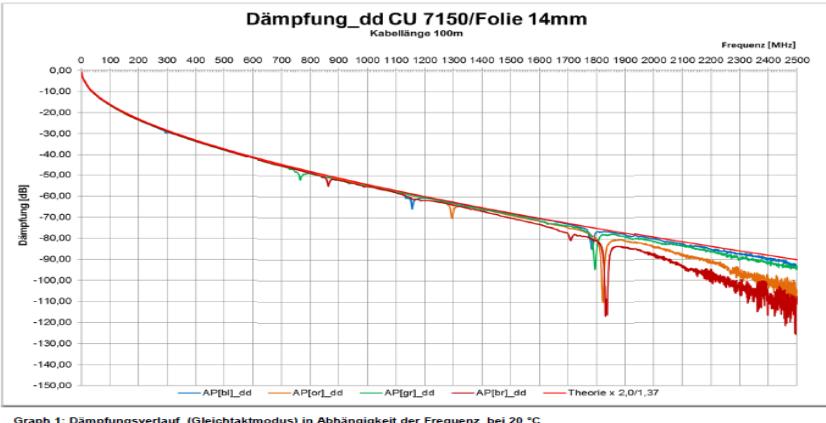
$$v_c = \frac{\omega}{\beta} = \frac{2\pi \cdot 2e9}{49.86} = 2.52e8 \text{ m/s}$$

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

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

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

Graph 1: Dämpfungsverlauf bei 20°C



Graph 2: Dämpfungsverlauf bei -190°C

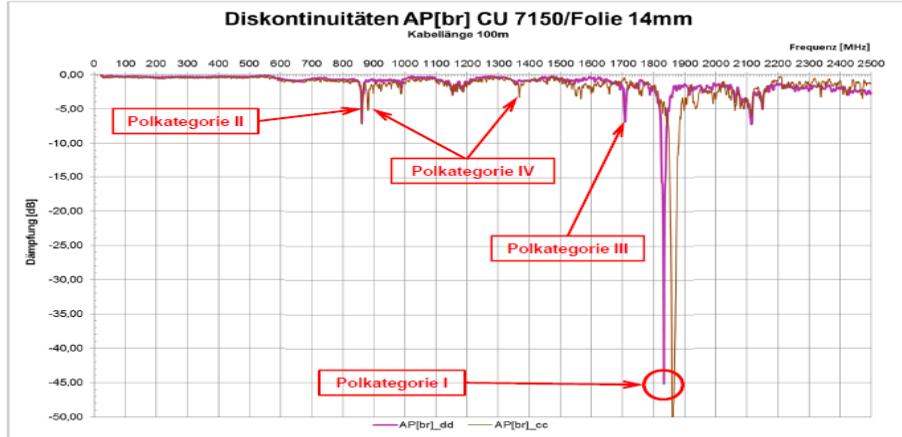


Abb. 3: Kabelring in einer mit flüssigem Stickstoff gefüllten Isolierwanne

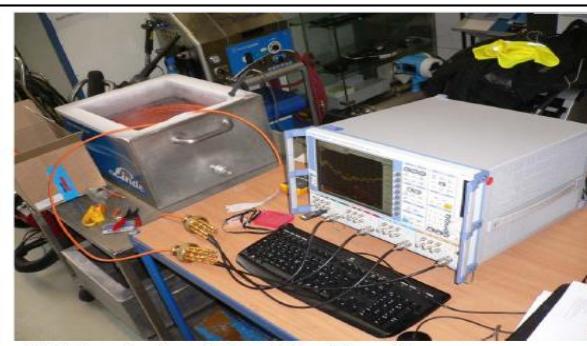


Abb. 4: Versuchsaufbau mit Messobjekt und Messgerät

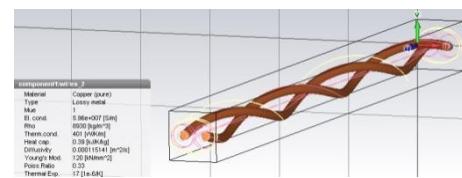
Übersicht

- 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**

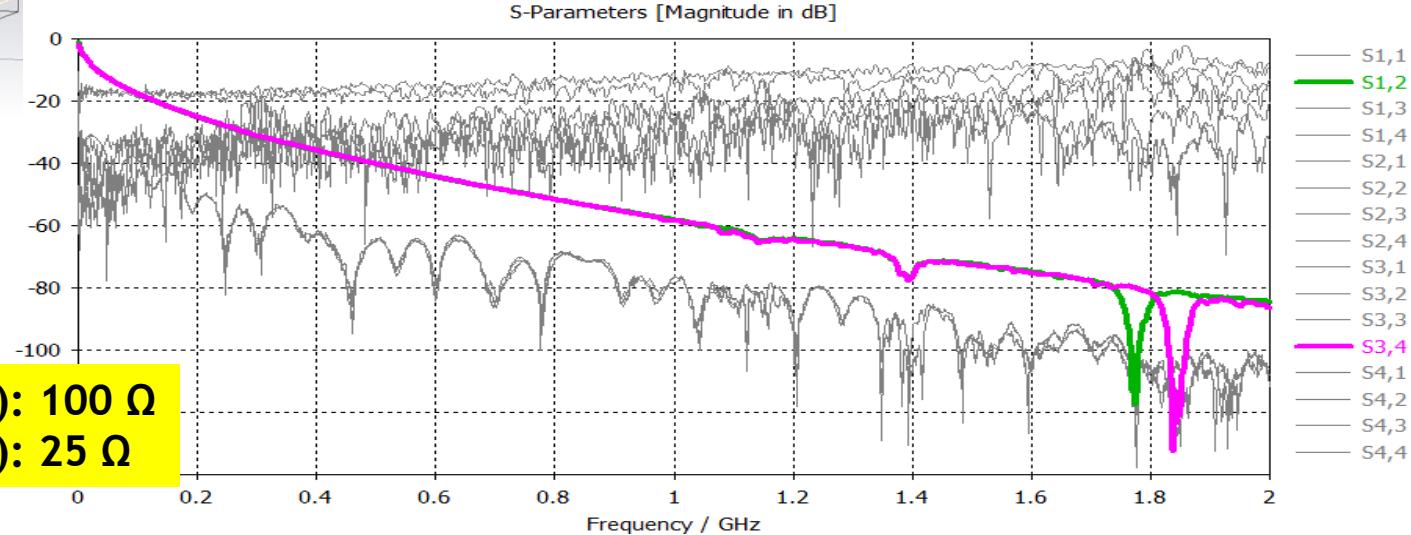
Messung/Beschaltung mit Konvertern



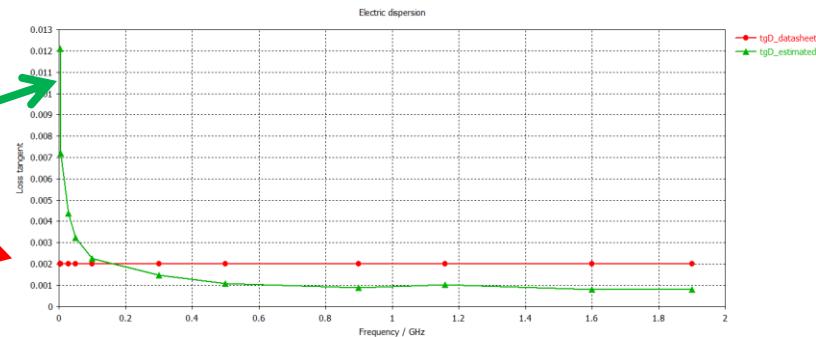
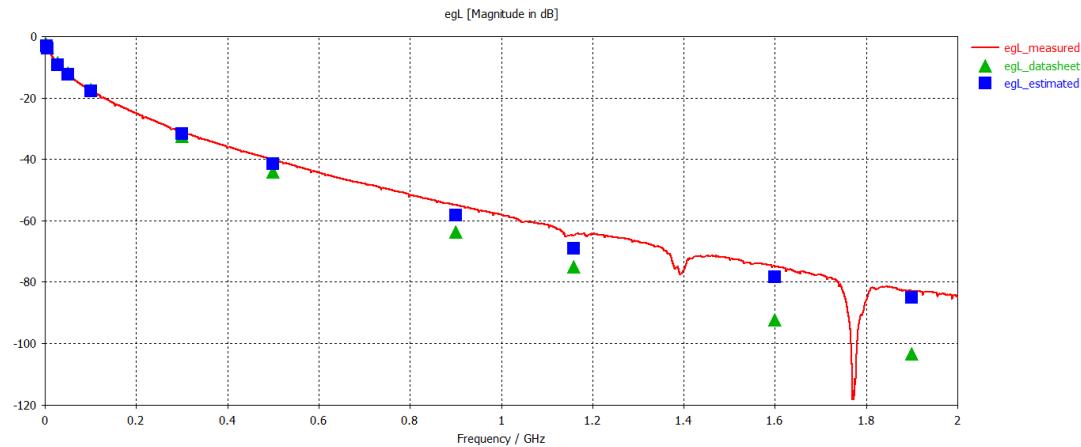
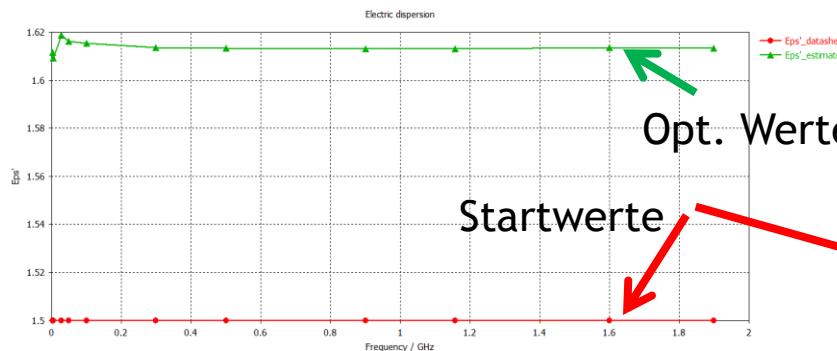
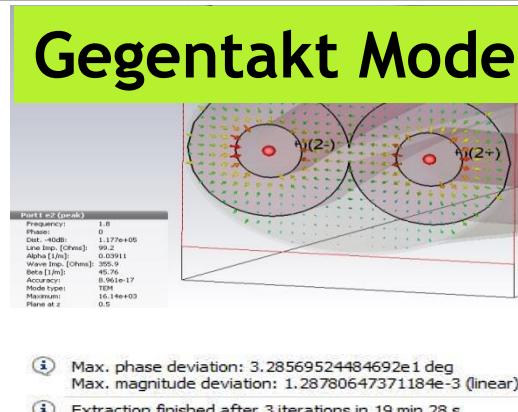
CST
DESIGN
STUDIO



Layer	Material	Type	Thickness	El. cond.	Rho	Therm. cond.	Heat cap.	Dissip.	Young Mod.	Pois. Ratio	Thermal Exp.
1	Copper (Cu)	Lossy media	100 nm	5.8e+007 [S/m]	8800 [kg/m³]	100 [W/mK]	0.38 [J.m/Kg]	0.0001 [W/m²K]	120 [N/mm²]	0.32	-17 [1e-6/K]

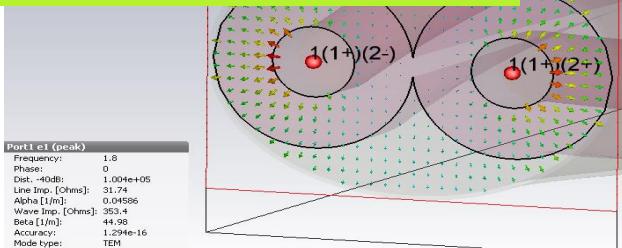


Complex permittivity extraction > PE > egL, Eps', Loss tangent



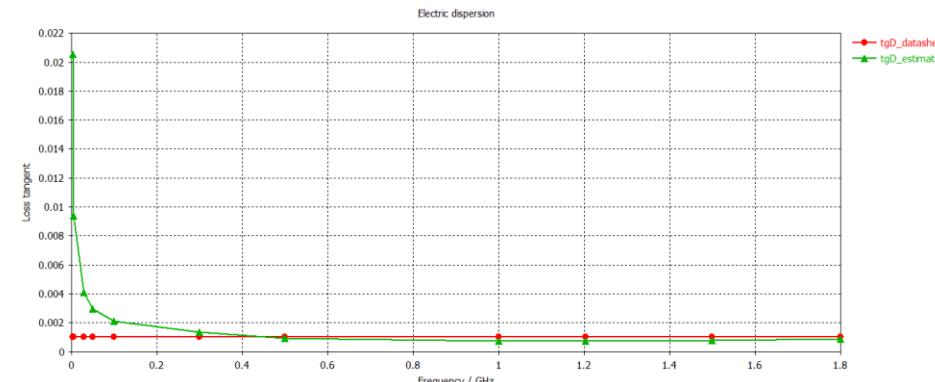
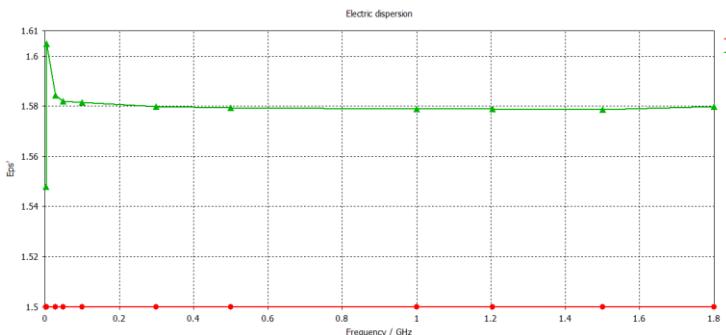
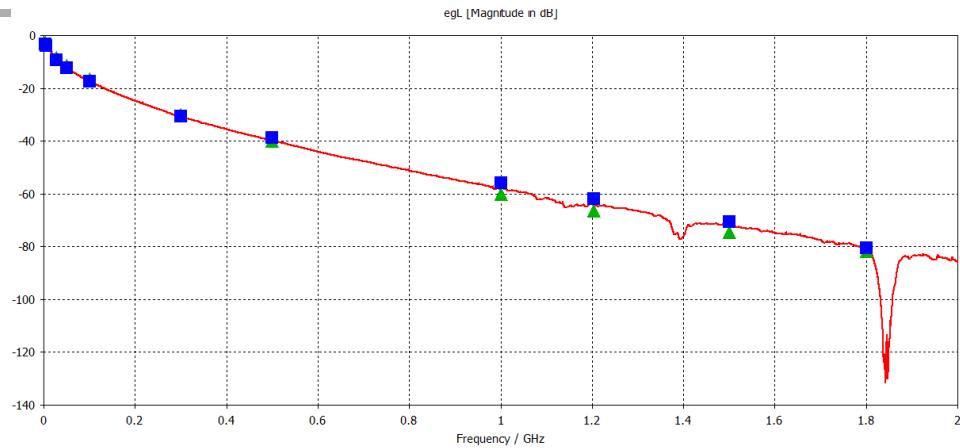
Complex permittivity extraction > PE > egL, Eps', Loss tangent

Gleichtakt Mode

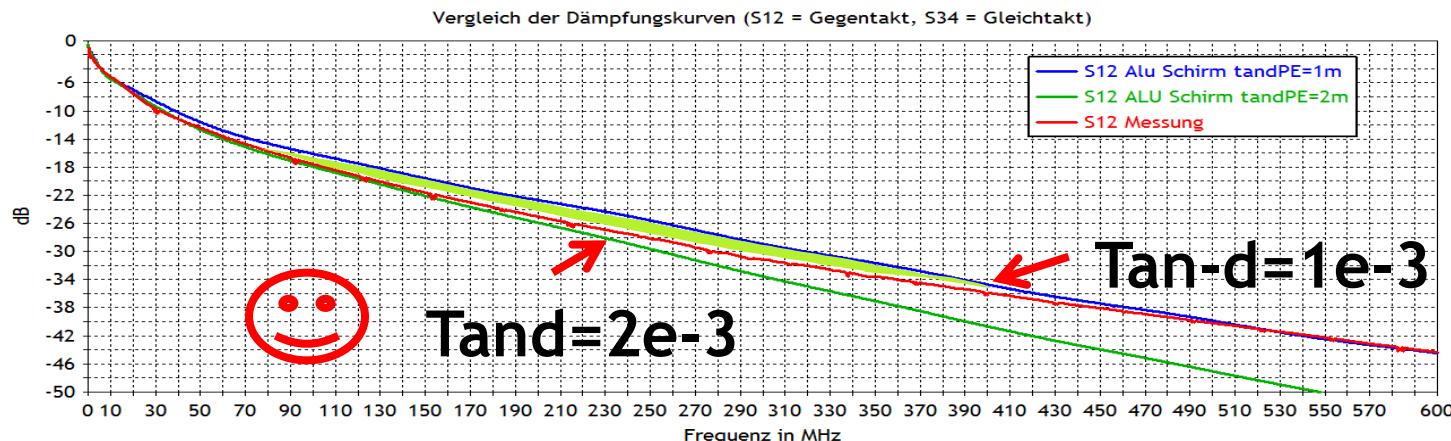
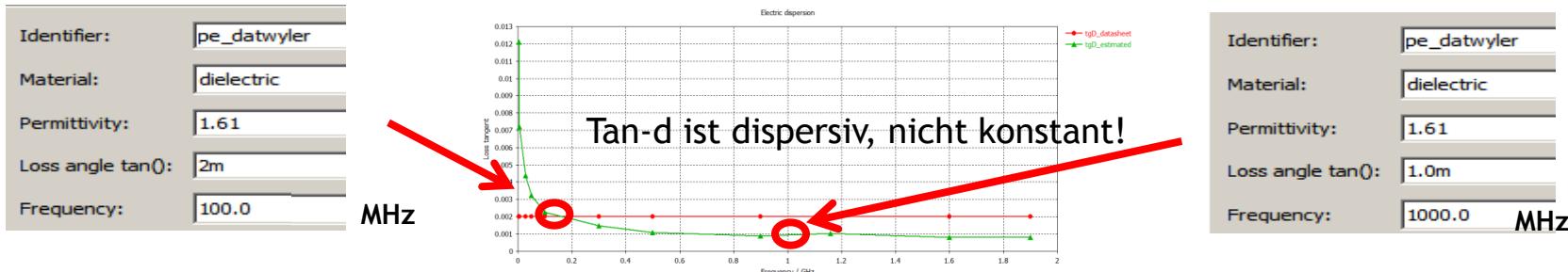


Max. phase deviation: 2.54332332178251e1 deg
Max. magnitude deviation: 1.36805810710805e-3 (linear)

Extraction finished after 3 iterations in 19 min 10 s



Adaption der tan-d Bereich 100 MHz



Zusammenfassung

- Hoher experimentelle 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)



