

HAM RADIO 2018

HAM RADIO



FRIEDRICHSHAFEN

Dein HF-Kabel, das unbekannte Wesen

PROF. DR. THOMAS BAIER

E-mail: baier@hs-ulm.de

DG8SAQ

Hochschule Ulm

Prittwitzstrasse 10

89075 Ulm

Dank an: *Dan Maguire AC6LA*

Ferdinand Sigloch DB2SG

Informatik & Medien

Hochschule Ulm



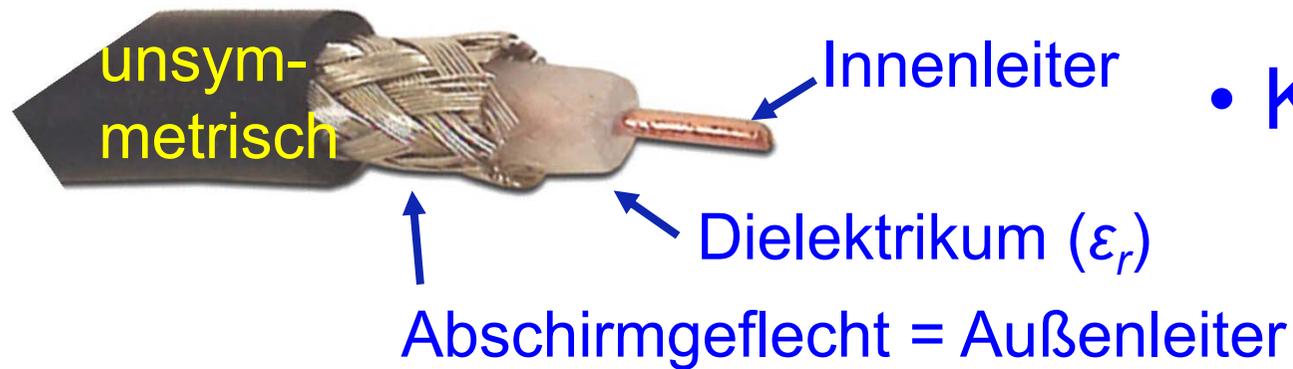
University of
Applied Sciences



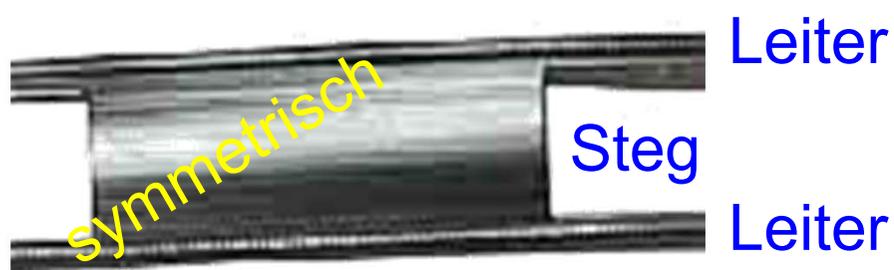
- 
- **Kabelarten und Kenngrößen**
 - **Physik**
 - **Messmethoden**
 - **Analysemethoden**



Kabelarten

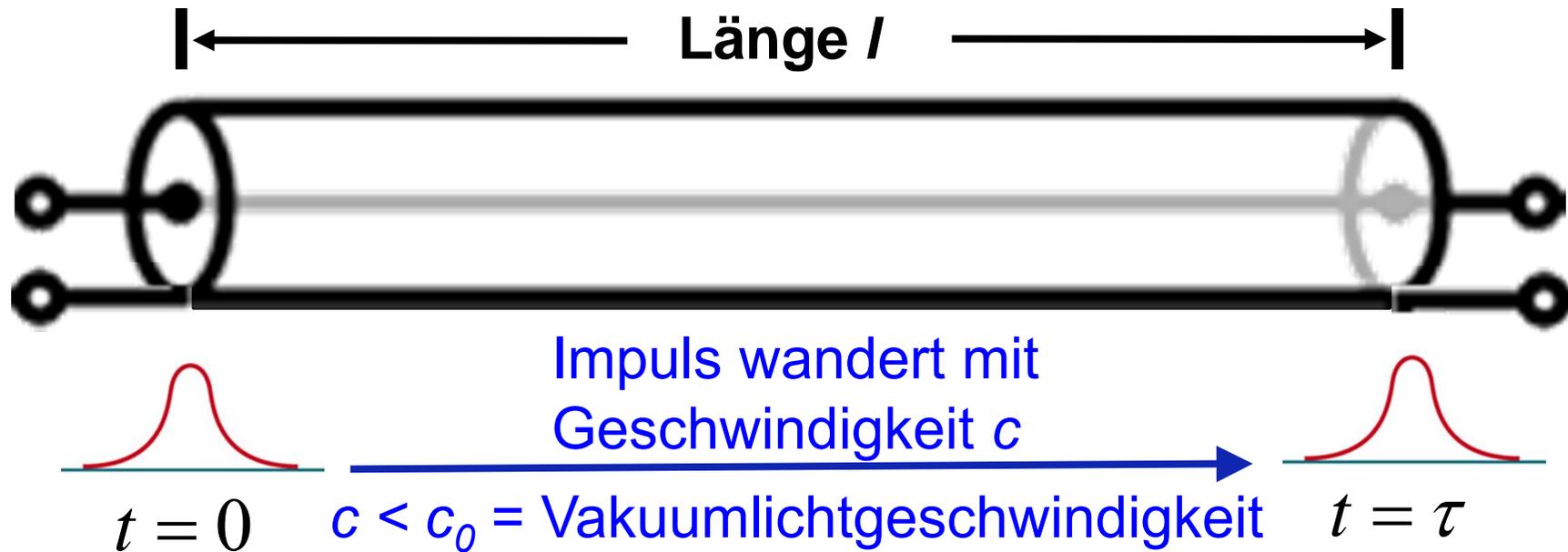


- Koaxialkabel



- Zweidrahtleitung
„Hühnerleiter“

Kenngröße Ausbreitungsgeschwindigkeit c



Laufzeit: τ

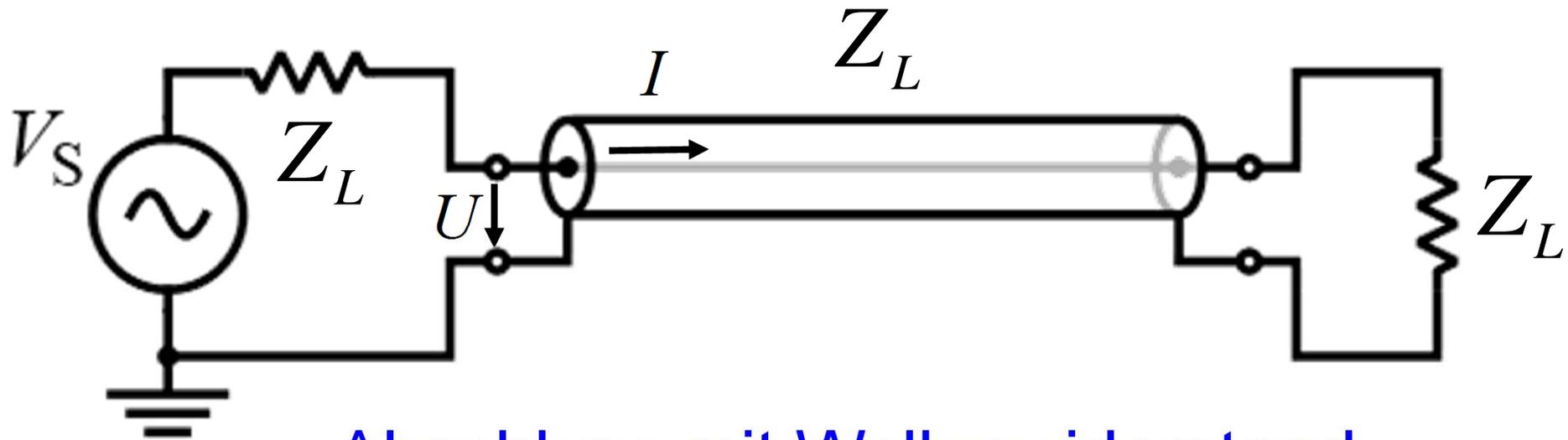
Ausbreitungsgeschwindigkeit: $c = l / \tau$

Verkürzungsfaktor: $VF = c / c_0$

Hochschule Ulm



Kenngröße Wellenwiderstand Z_0

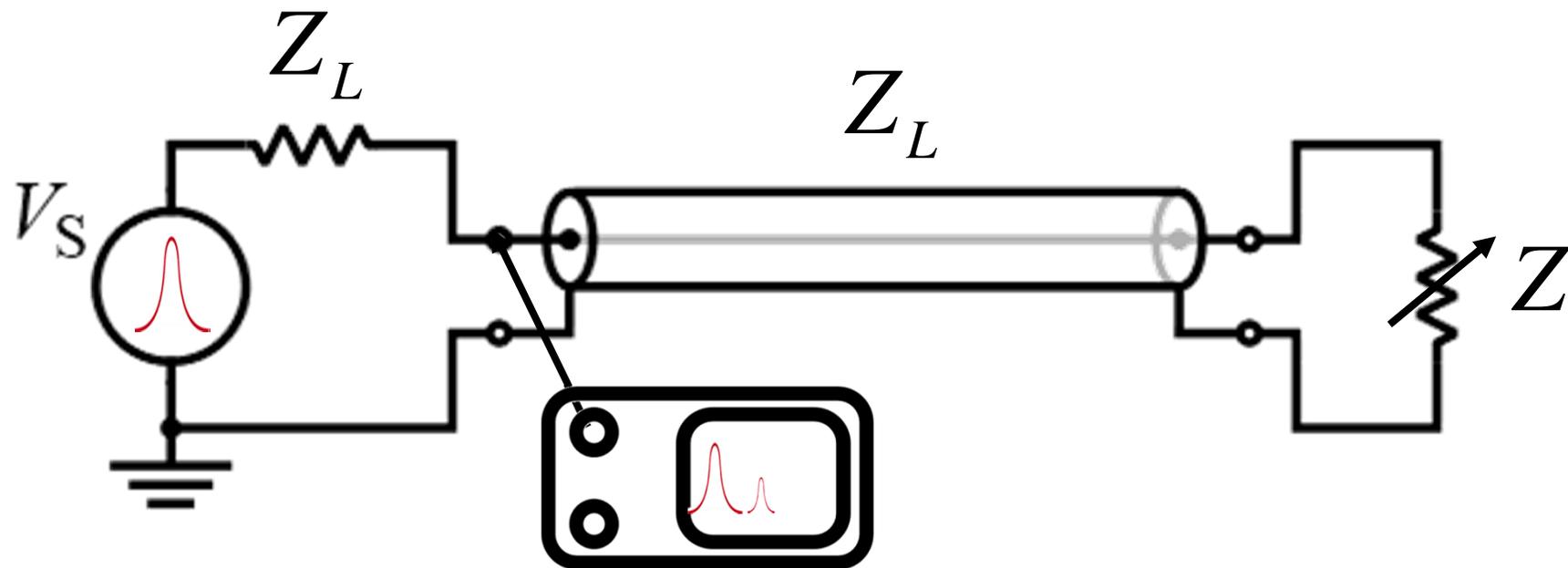


Abschluss mit Wellenwiderstand



$$Z_L = \frac{U}{I}$$

Messung mittels Impulsgenerator: Impulsreflektometrie (1)



Hochohmiges
Oszilloskop,
sieht hin- und
rücklaufende Welle

Technik
Informatik & Medien

Hochschule Ulm



University of
Applied Sciences

Impulsreflektometrie (2)



variabler Kabelabschluss

Testobjekt:

18,3m

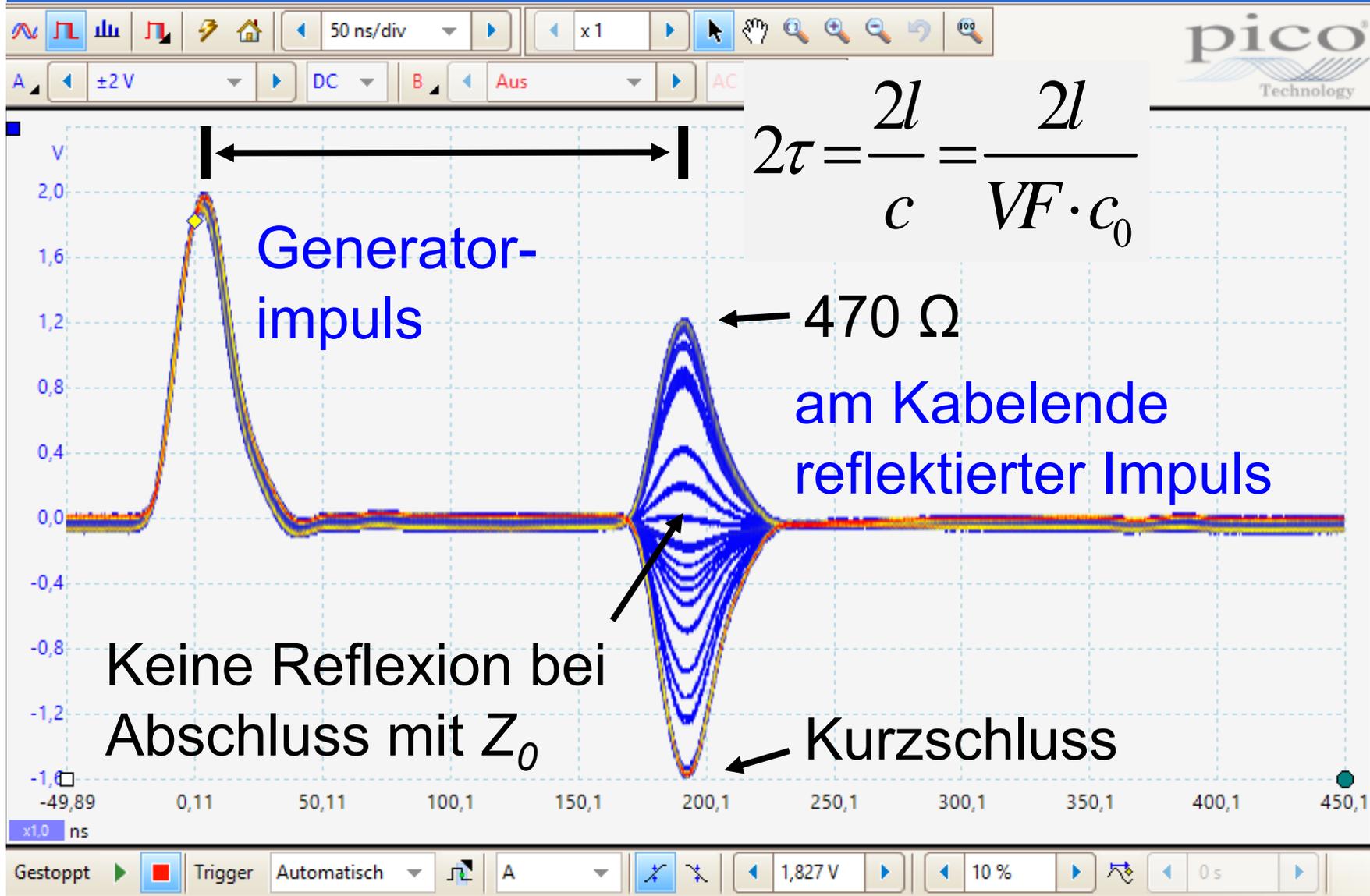
RG58 C/U

Hochschule Ulm



University of
Applied Sciences

Impulsreflektometrie (3)



Impulsreflektometrie (4)

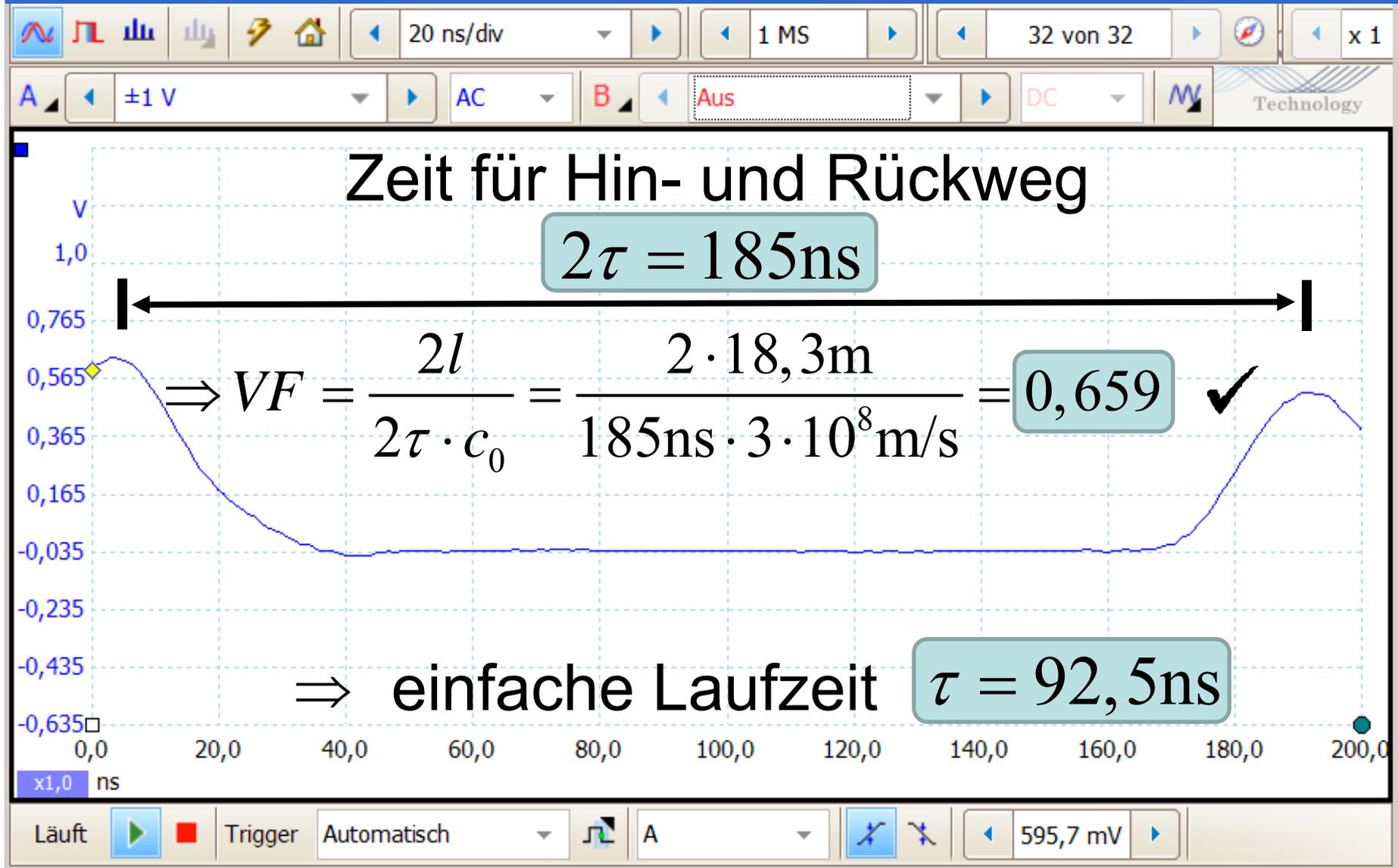
$$Z = Z_L =$$



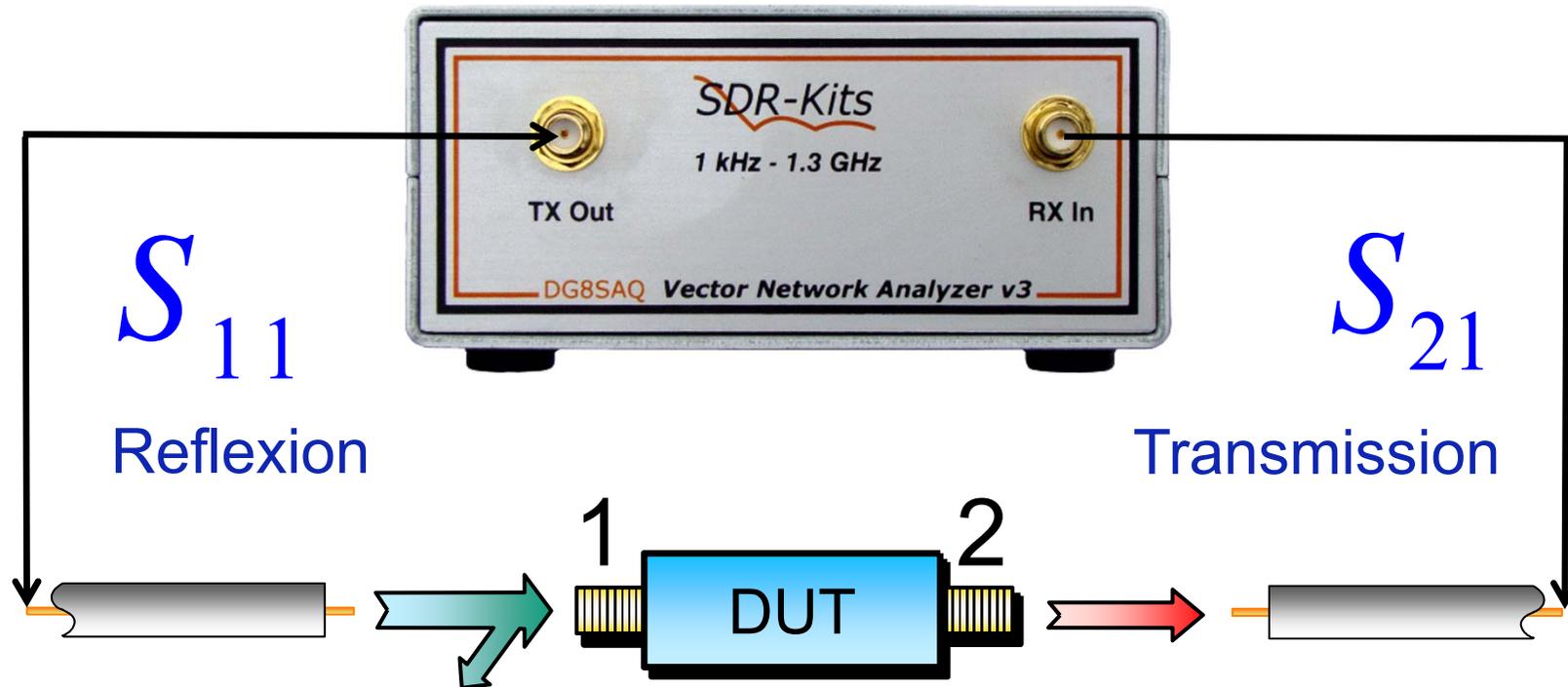
Ω ✓



Impulsreflektometrie (5)



Genauer geht es mit einem Vektor-Netzwerkanalysator



DUT : DEVICE UNDER TEST
= Kabel

Hochschule Ulm



Vorteile der vektoriellen Netzwerkanalyse

- **Präzise mit hoher Messtdynamik**
- **Flexibel:**

**Messung im
Frequenz-
bereich ω**

- Dämpfung
- Anpassung
- Wellenwiderstand
- Gruppenlaufzeit



**Zeit-
bereich t**

- Impulsantwort
- Sprungantwort

Technik
Informatik & Medien

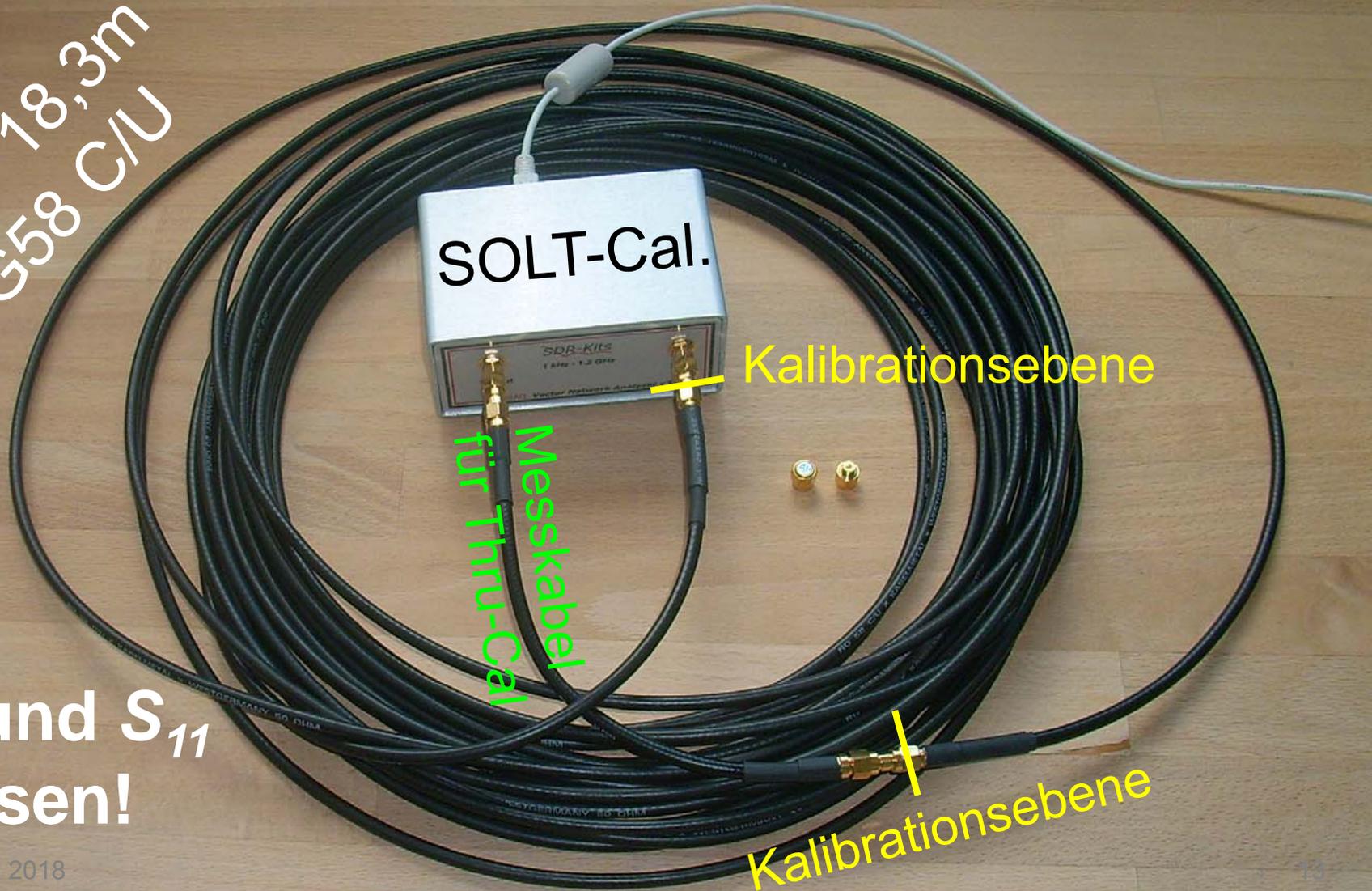
Hochschule Ulm



University of
Applied Sciences

Einfügedämpfung und Wellenwiderstand eines Rings RG58 C/U Antennenkabel

DUT = 18,3m
RG58 C/U



SOLT-Cal.

Kalibrationsebene

Messkabel
für Thru-Cal

Kalibrationsebene

S_{21} und S_{11}
messen!

Zeitbereichsanalyse mittels Fourier-Transformation (DG8SAQ VNWA Software)

Eingangsdaten werden von Frequenz- in Zeitbereich gewandelt

Impulsantwort

Fensterfunktion:

Zeitauflösung ↑
Amplituden- Auflösung ↓
ist besser

Dämpfung ablesbar

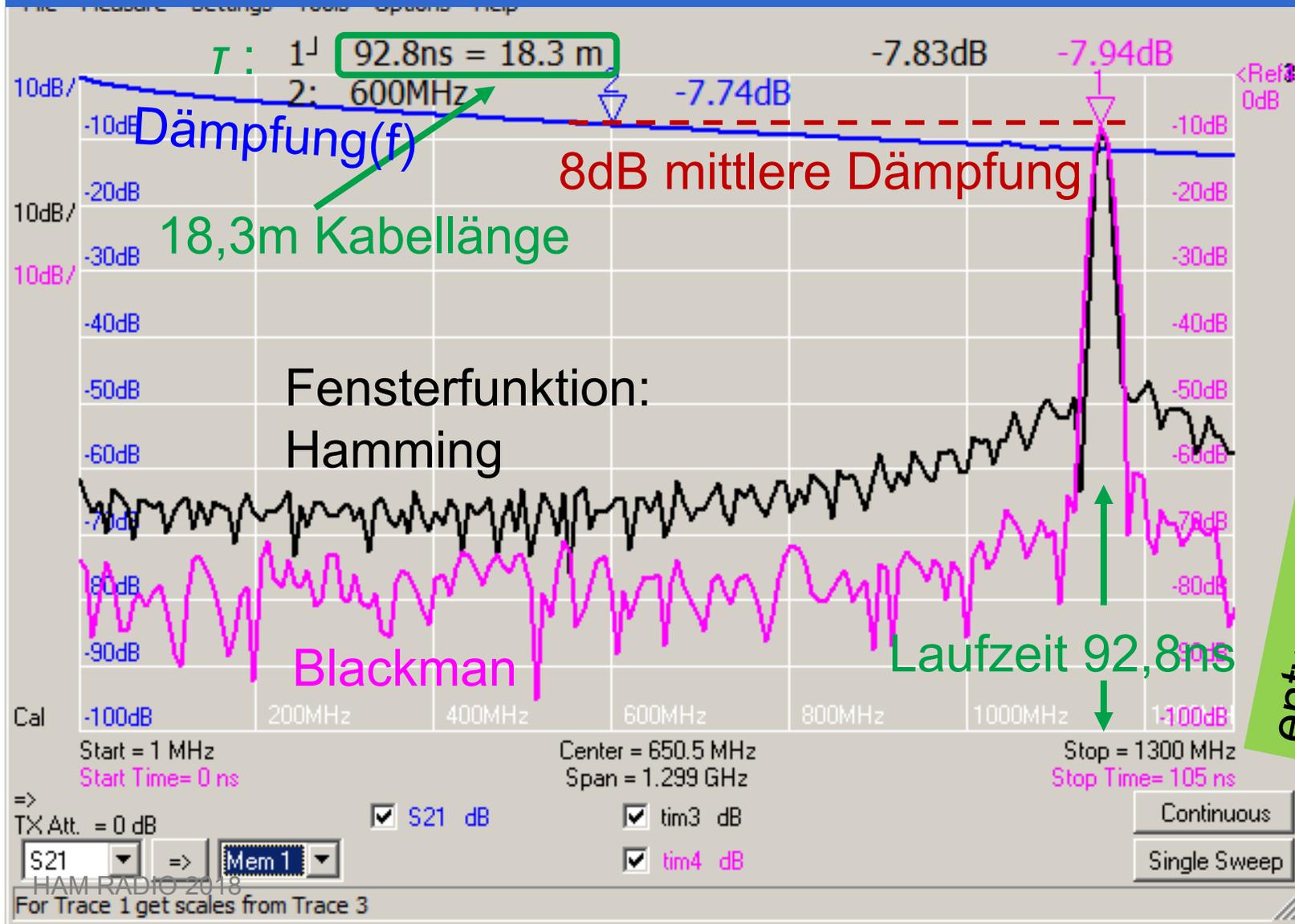
Plotbereich

Bei S_{11} -Messung läuft Signal hin und zurück

Verkürzungsfaktor



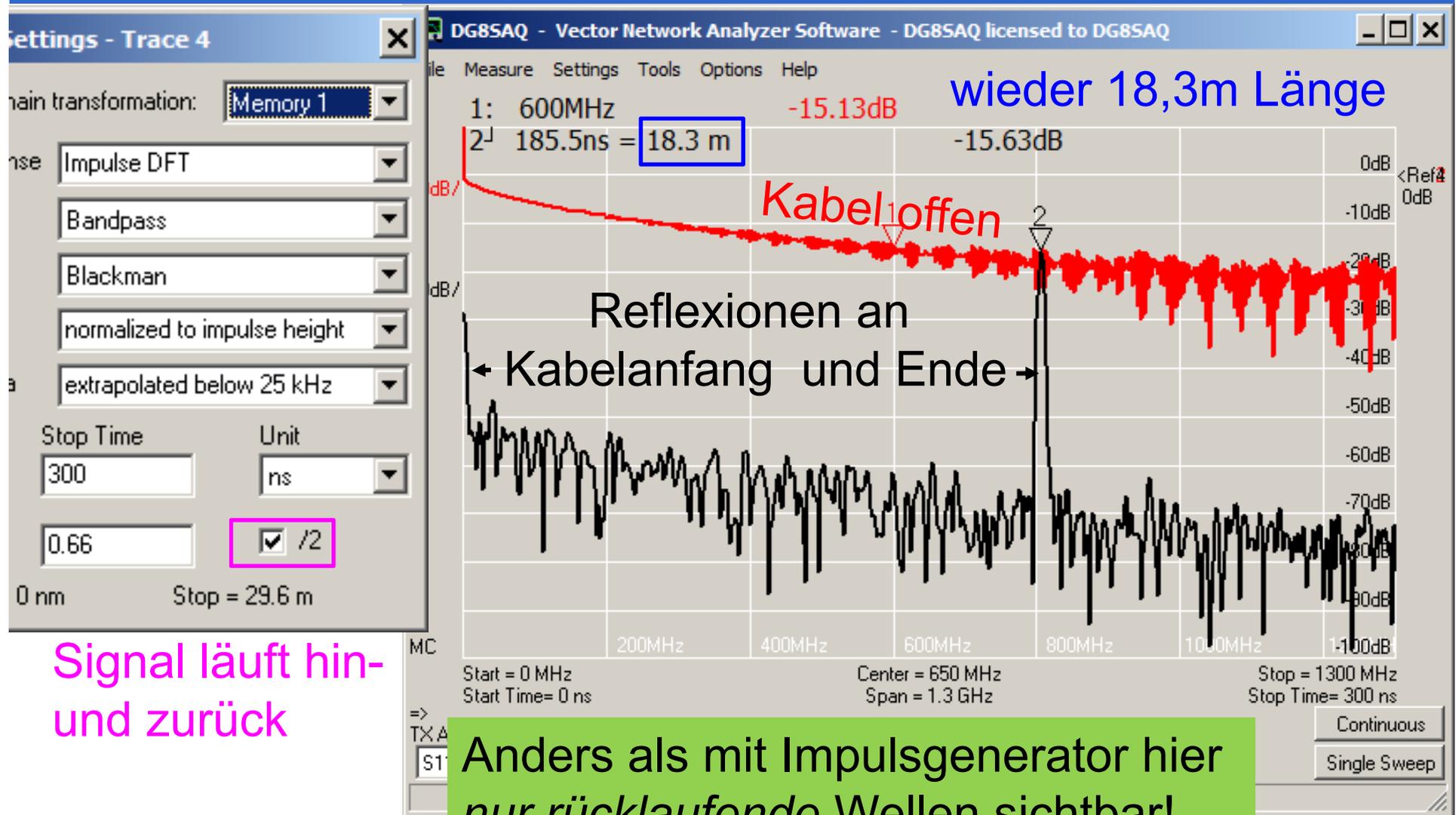
Laufzeitmessung durch das Kabel mittels Impulsantwort aus S_{21} -Messung



entweder Kabellänge oder Verkürzungsfaktor bestimmbar

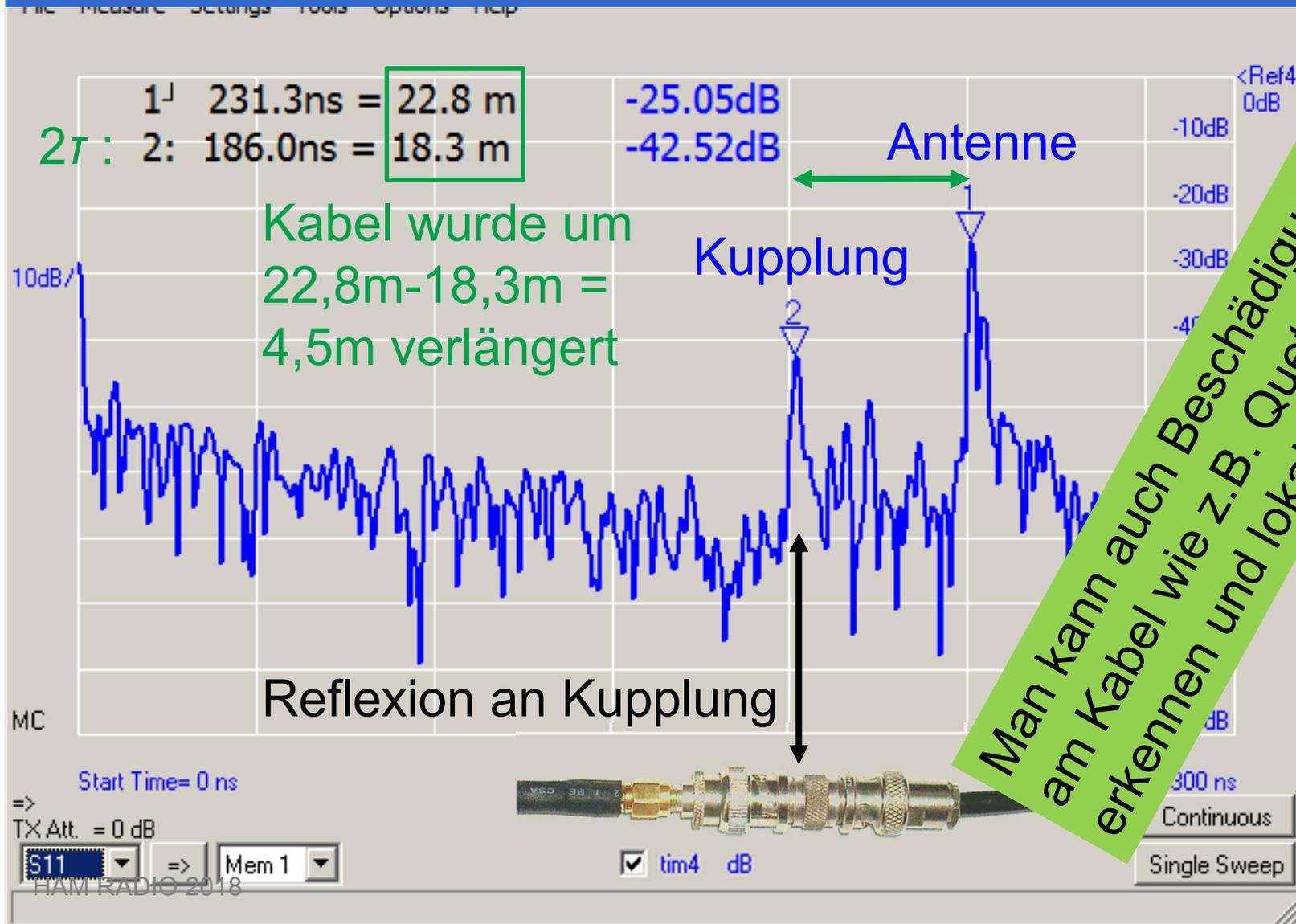


S_{11} des offenen Kabels im Zeitbereich Time Domain Reflectometry = TDR



Signal läuft hin- und zurück

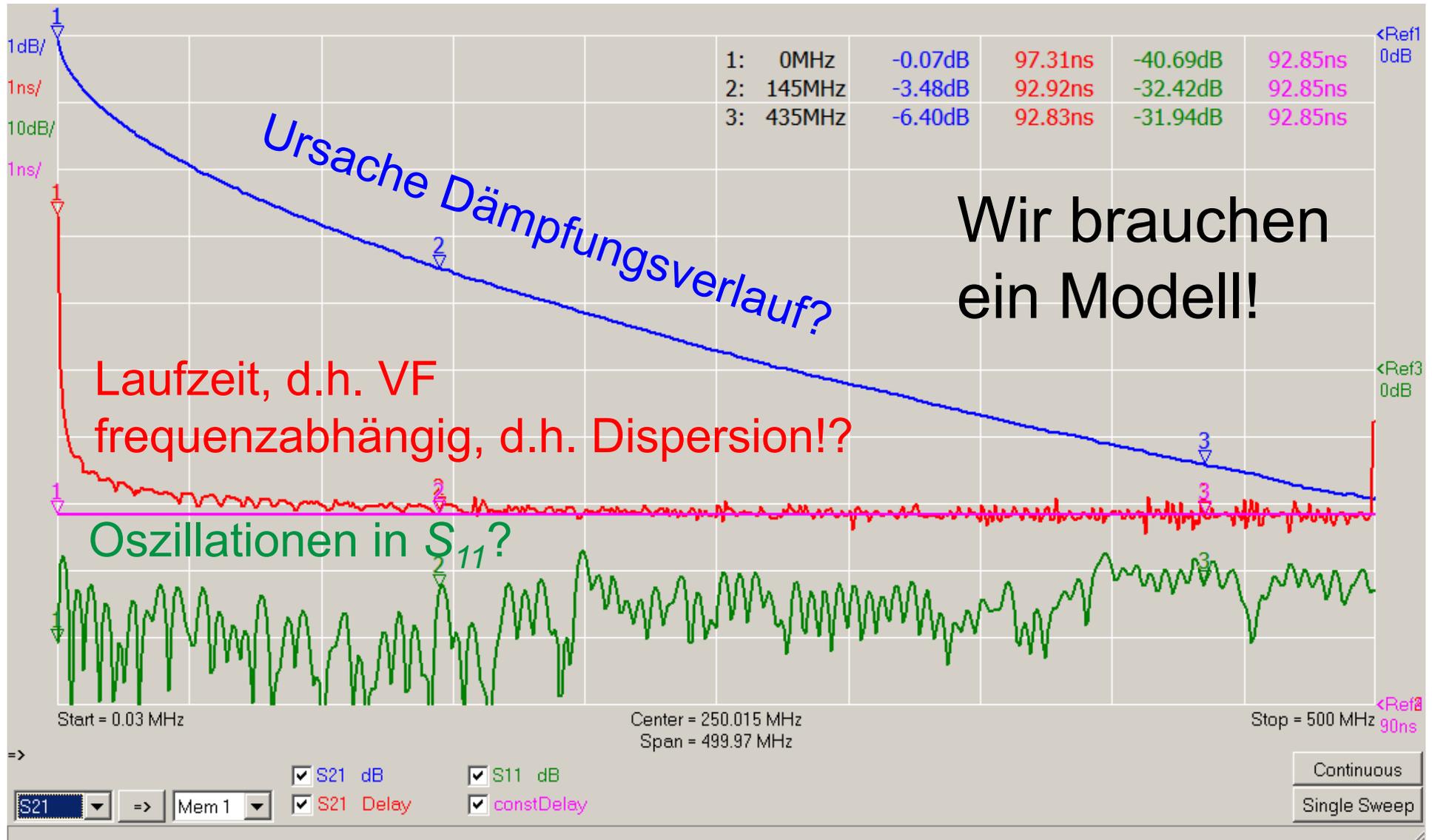
Man kann mit TDR noch mehr sehen: Verlängertes Kabel mit Antenne (S_{11} -Messung)



Man kann auch Beschädigungen
am Kabel wie z.B. Quetschungen
erkennen und lokalisieren



Ring RG58 C/U im Frequenzbereich: Offene Fragen



Modellbildung (1)

Relevante Größen

- Kapazitätsbelag \Leftrightarrow
- Widerstandsbelag \Leftrightarrow
- Induktivitätsbelag \Leftrightarrow

Störeffekte

- dielektr. Verluste
- DC, Skineffekt
- Skineffekt

Technik
Informatik & Medien

Hochschule Ulm



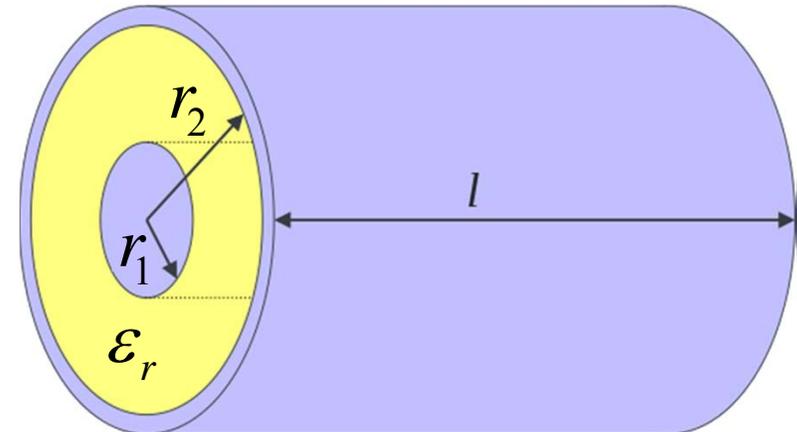
University of
Applied Sciences

Modellbildung (2)

Koaxkabel ist ein Rohrcondensator

$$C' = \frac{C}{l} = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r}{\ln(r_2 / r_1)}$$

$$\left. \begin{array}{l} r_1 = 0,45\text{mm} \\ r_2 = 1,5\text{mm} \\ \epsilon_r = 2,25 \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{Datenblatt RG58 C/U} \\ \text{LAPP GROUP} \\ \text{Polyethylen } \text{http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Tables/diel.html} \end{array}$$



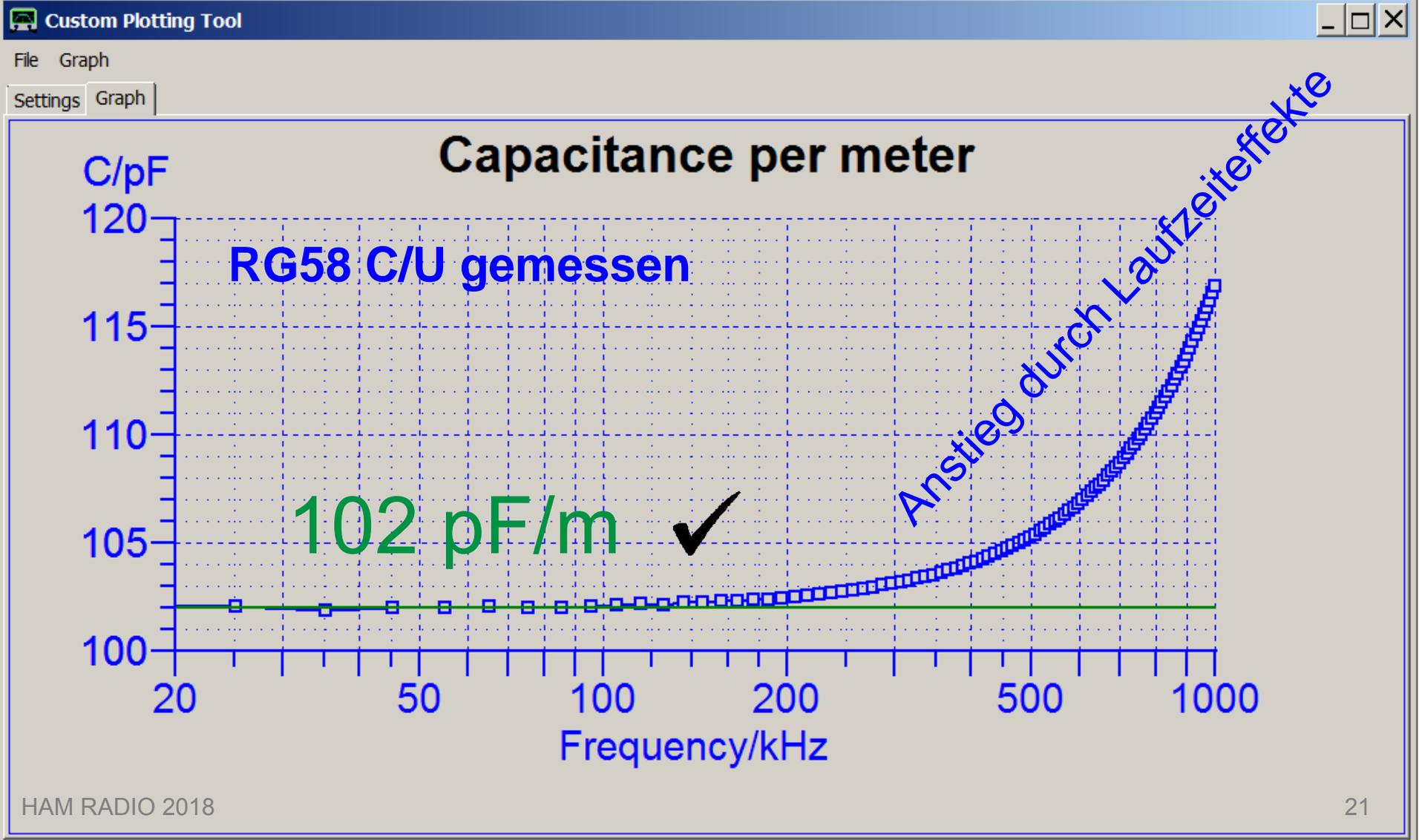
Wikipedia

$$\Rightarrow C' = \frac{C}{l} = 104 \text{ pF/m}$$

Kann man messen...

Modellbildung (3)

Kapazität kann man messen



Modellbildung (4)

Dielektrikum ist komplex, d.h. verlustbehaftet

$$\varepsilon_r = \varepsilon_r' - j \cdot \varepsilon_r'' = \varepsilon_r' (1 - j \cdot \tan(\delta_\varepsilon))$$

δ =Verlustwinkel

$$Y_C = j \cdot \omega \cdot C_0 \cdot \varepsilon_r$$

C_0 = Kapazität
ohne Dielektrikum

$$= j \cdot \omega \cdot C_0 \cdot \varepsilon_r' \cdot (1 - j \cdot \tan(\delta_\varepsilon))$$

$$= j \cdot \omega \cdot C + \underbrace{\omega \cdot C \cdot \tan(\delta_\varepsilon)}$$

$$\Rightarrow C = \varepsilon_r C_0$$

Verlust $\sim \omega = 2\pi f$

Zusätzlich ggf. DC-Leckleitfähigkeit G_0 :

$$Y_C = j \cdot \omega \cdot C + f \cdot \underbrace{2\pi \cdot C \cdot \tan(\delta_\varepsilon)} + G_0$$

G_{PO}

$$Y_C = j \cdot \omega \cdot C + f \cdot G_{PO} + G_0$$

Technik
Informatik & Medien

Hochschule Ulm



University of
Applied Sciences

Modellbildung (5)

Einige Dielektrika

Material	ϵ_r'	$\text{tg}\delta$ $f = 1\text{MHz}$	$\text{tg}\delta$ $f = 10\text{GHz}$
Polyäthylen (PE)	2.25	$2 \cdot 10^{-4}$	$6.6 \cdot 10^{-4}$
Polytetrafluortähylen (PTFE, Teflon)	2.1	10^{-4}	$2.5 \cdot 10^{-4}$
Duroid (Teflon mit Glasfasereinlage)	2.2		10^{-3}

aus „Lineare Elemente der Höchsfrequenztechnik“, Prof. Bächthold, ETH Zürich

$$\Rightarrow G_{PO} = 1,3 \cdot 10^{-13} \frac{\text{S}}{\text{Hz} \cdot \text{m}} \dots 4,2 \cdot 10^{-13} \frac{\text{S}}{\text{Hz} \cdot \text{m}}$$

PE hervorragender Isolator $\Rightarrow G_0 = 0$

Technik
Informatik & Medien

Hochschule Ulm



University of
Applied Sciences

Modellbildung (6)

Widerstands- und Induktivitätsbelag

$$R' = \frac{R}{l} = \frac{1}{\sigma_{Cu} \cdot \pi \cdot r_1^2}$$

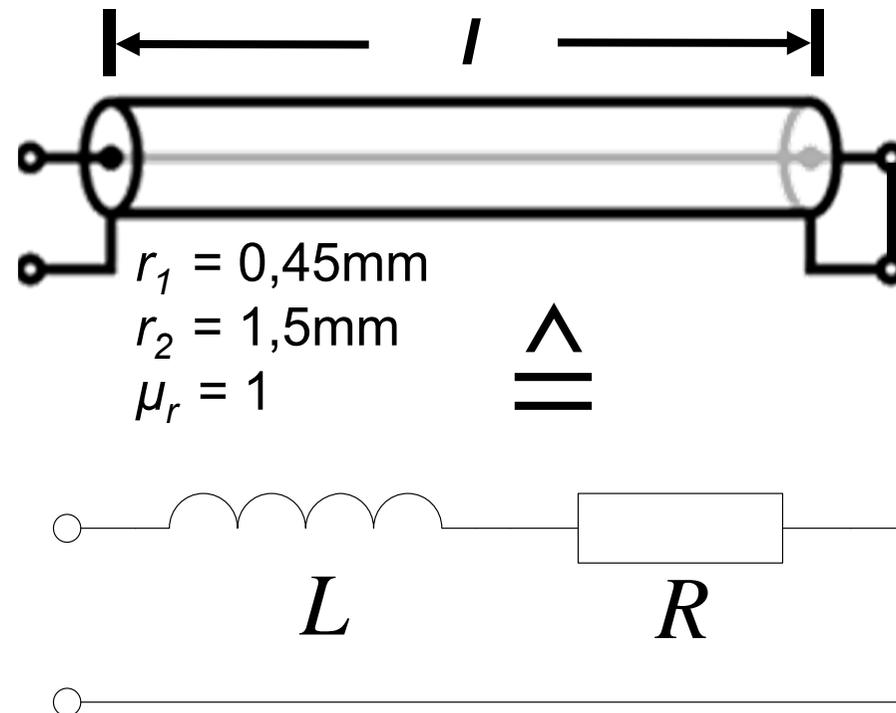
$$= 25 \text{ m}\Omega/\text{m}$$

(nur Innenleiter)

$$L' = \frac{L}{l} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln(r_2 / r_1)$$

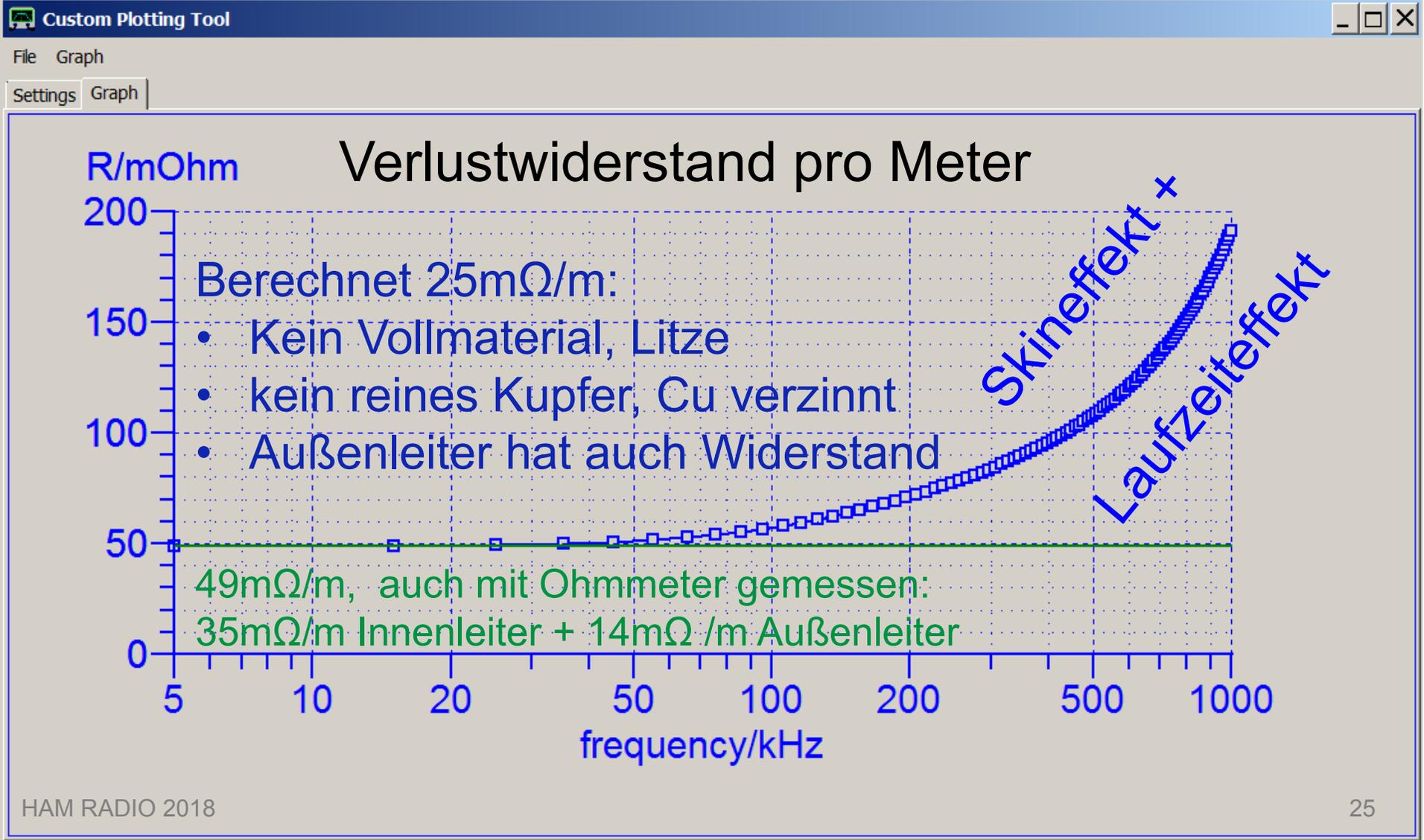
$$= 241 \text{ nH/m}$$

(Hochfrequenzgrenzfall, kein B-Feld in Leitern)



Kann man auch messen...

Kurzgeschlossenes Koaxkabel ist bei niedrigen Frequenzen ein Verlustwiderstand



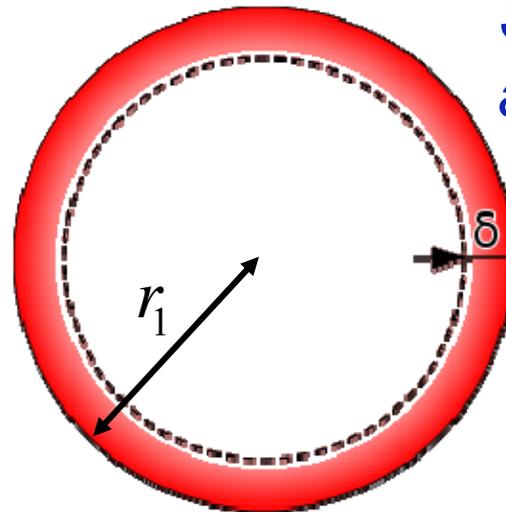
Skineffekt = Hauteffekt

Niederfrequenzfall



$$R' = \frac{R}{l} = \frac{1}{\sigma_{Cu} \pi r_1^2}$$

Hochfrequenzfall



Strom fließt nur an Oberfläche

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\sigma_{Cu} \cdot \omega \cdot \mu_0}} \sim \frac{1}{\sqrt{f}}$$

δ = Eindringtiefe
bzw. Hautdicke
= „skin depth“

Technik
Informatik & Medien

Hochschule Ulm

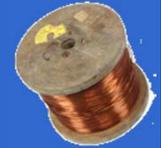


University of
Applied Sciences

$$\sim \frac{1}{r_1} \sqrt{f}$$

Skineffekt im runden homogenen Draht

Ergebnis der Maxwell-Theorie ...



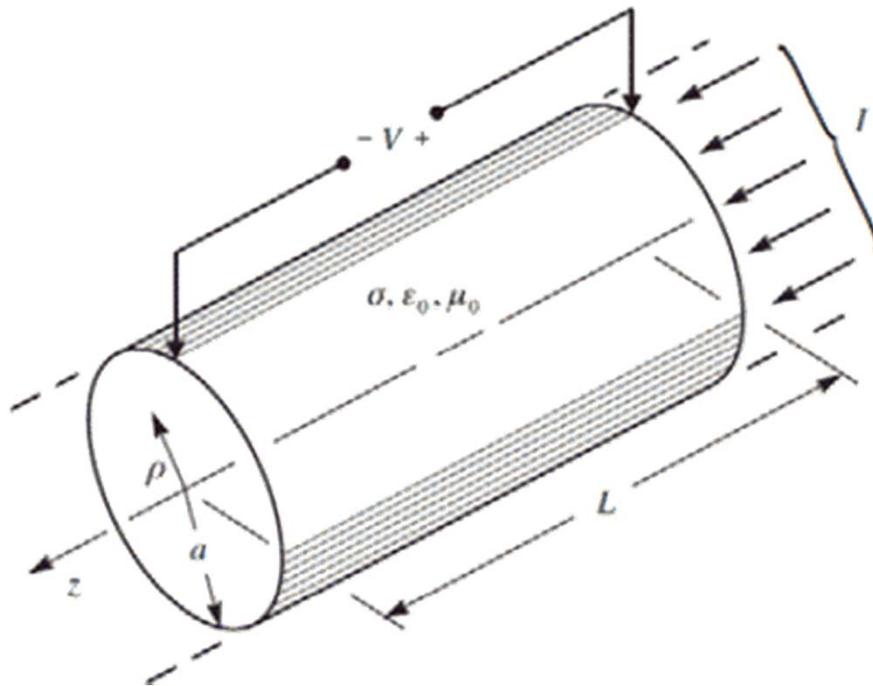
$$z^i(\omega) = r_0 \left\{ \frac{(1+i)a/\delta}{2} \frac{\mathcal{J}_0[(1+i)a/\delta]}{\mathcal{J}_1[(1+i)a/\delta]} \right\}$$

benötigen wir!

Impedanz pro Länge (Theorie)

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu_0 \sigma}}$$

Eindringtiefe



$$r_0 = \frac{1}{L} \left[\frac{V|_{\rho=a}}{I} \right] = \frac{R_0}{L} = \frac{1}{\pi a^2 \sigma}$$

DC-Widerstand pro Länge

Hochschule Ulm



Impedanzmessung in Shunt-Anordnung

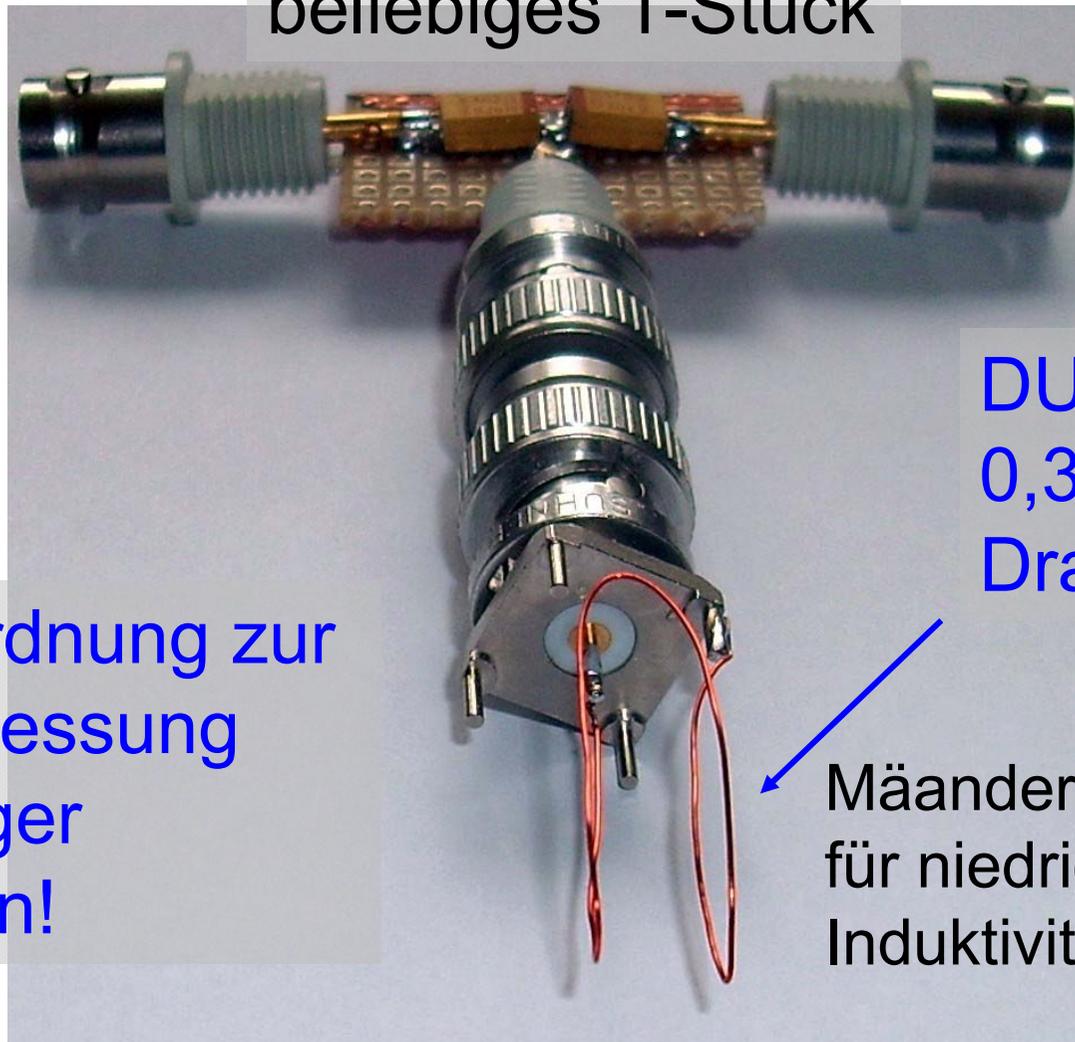
Messobjekt: Stück Kupferdraht



beliebiges T-Stück

zum
VNWA TX

zum
VNWA RX



DUT = 10cm
0,35mm CuL-
Draht

Shunt-Anordnung zur
genauen Messung
sehr niedriger
Impedanzen!

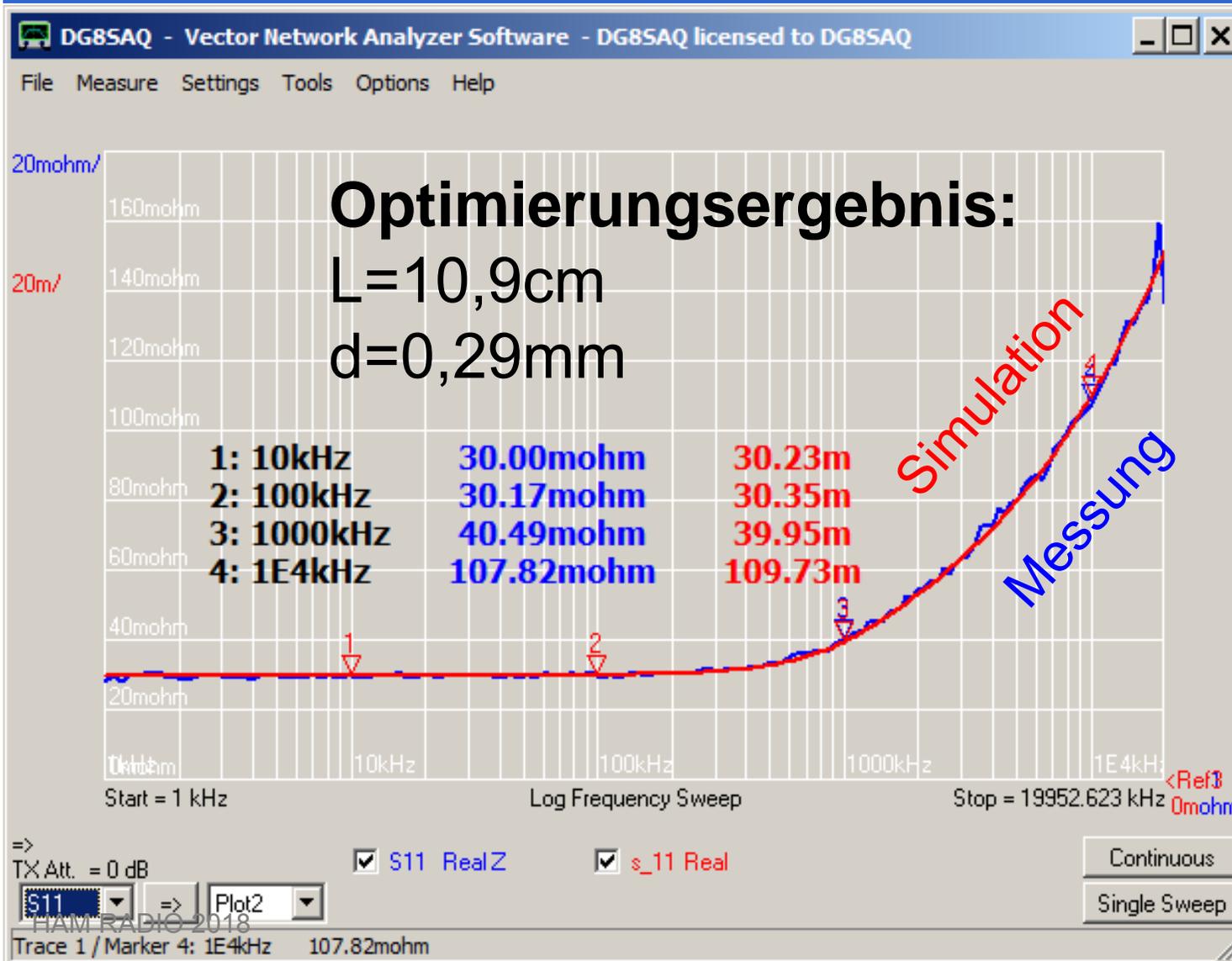
Mäander
für niedrige
Induktivität

Hochschule Ulm



VNWA Optimierer Tool

Berechnetes Modell vs. Messung



Hochschule Ulm



Induktivität vs. magnetische Feldenergie

In Spule gespeicherte Energie = E = magnetische Feldenergie:

$$\frac{1}{2} L \cdot I^2 = E = \frac{1}{2\mu_0} \iiint_{\text{Volumen}} B^2 dV$$

$$\Rightarrow L = \frac{1}{I^2 \mu_0} \iiint_{\text{Volumen}} B^2 dV$$

$$\Rightarrow L' = \frac{L}{l} = \frac{1}{I^2 \mu_0} \iint_{\text{Querschnittsfläche}} B^2 dF$$

für Zylindersymmetrie

Jeder Raumbereich mit B-Feld trägt additiv zur Induktivität bei!

Technik
Informatik & Medien

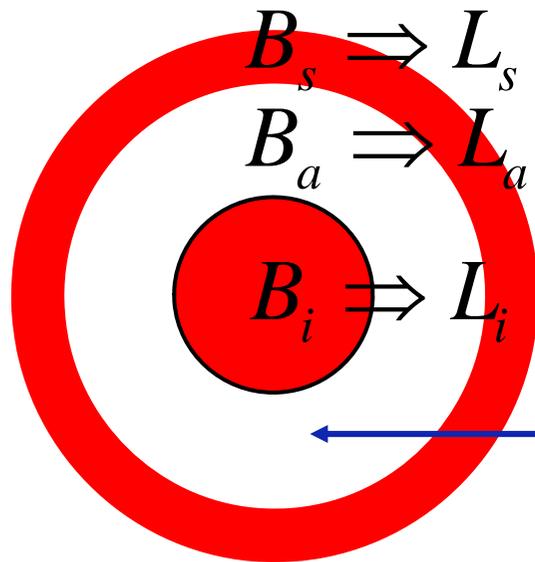
Hochschule Ulm



University of
Applied Sciences

Induktivität

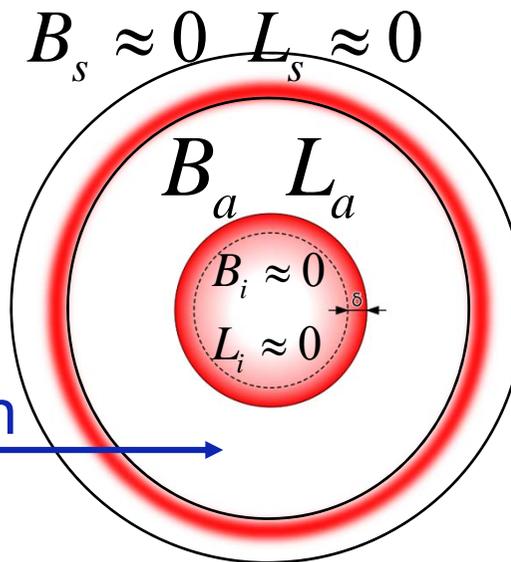
Niederfrequenzfall



$$L_i' = \frac{\mu_0}{8\pi} = 50 \frac{\text{nH}}{\text{m}}$$

$$L_s' \approx 6 \frac{\text{nH}}{\text{m}} \quad (\text{RG58})$$

Hochfrequenzfall



$$L_i' = \frac{1}{2\pi r_1} \sqrt{\frac{\mu_0}{2\sigma_{Cu}}} \frac{1}{\sqrt{\omega}} \sim \frac{1}{\sqrt{f}}$$

$$L_s' \sim \frac{1}{\sqrt{f}}$$

$$L_a' = \frac{L_a}{l} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)$$

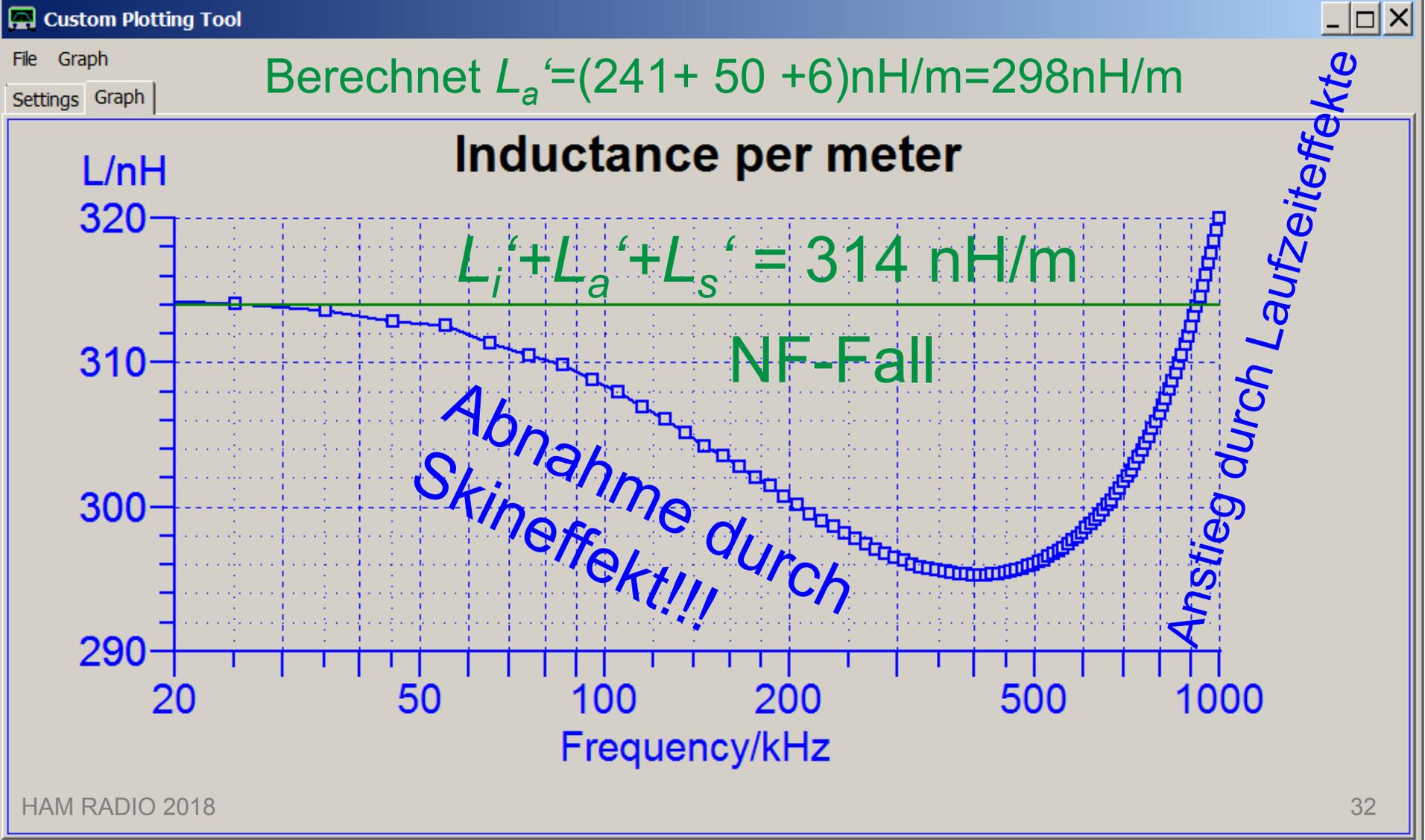
$$= 241 \text{ nH/m (RG58)}$$

In beiden Fällen gleich!

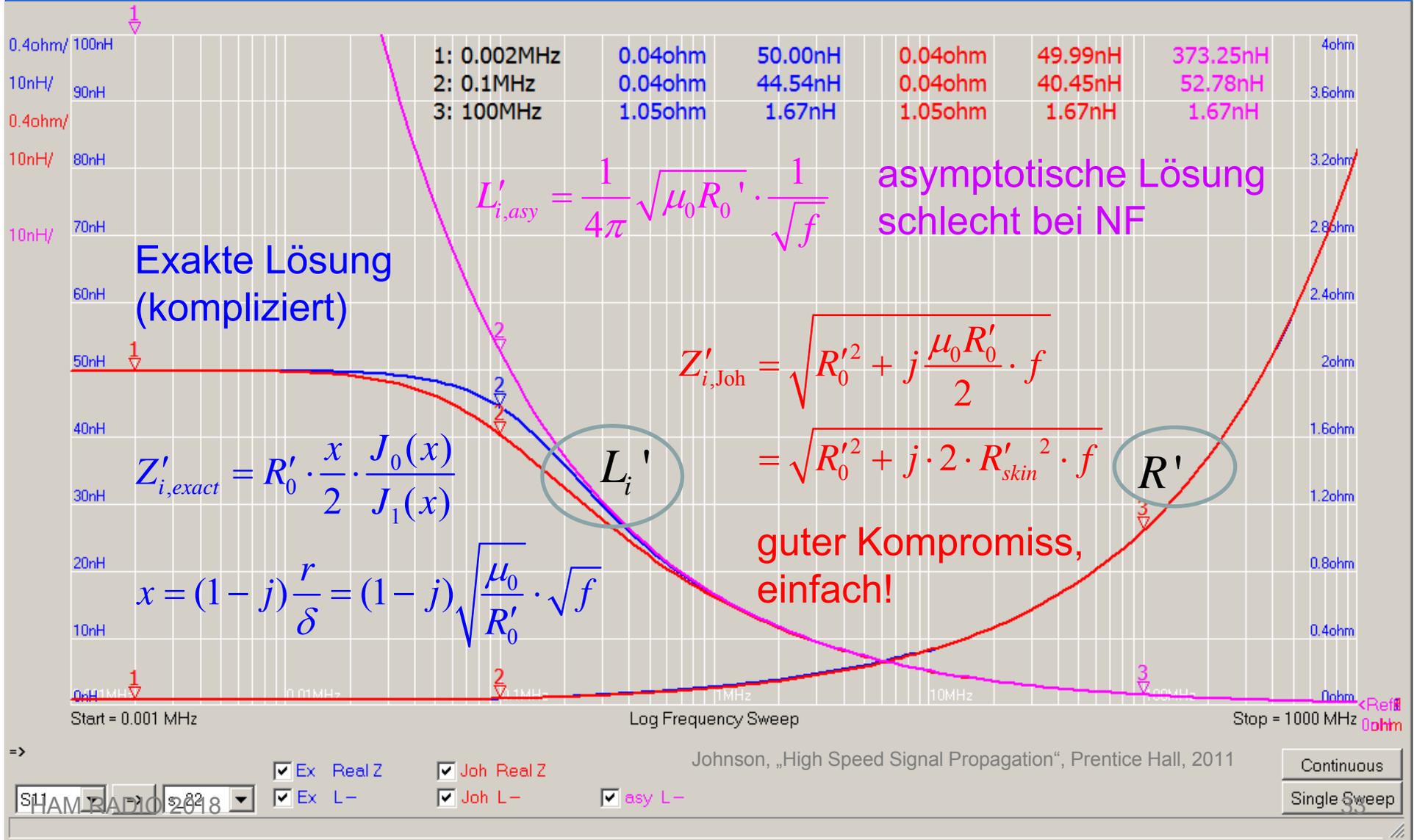
Wird mit wachsender Frequenz f kleiner!

$L' = L_i' + L_a' + L_s'$ muss mit wachsender f sinken!

Induktivitätsmessung am kurzgeschlossenen Koaxkabel



Einfaches Skineffektmodell für innere Impedanz: Runder Draht mit Radius r



Einzeleffekte jetzt bekannt

- Kapazitätsbelag
- Widerstandsbelag
- Induktivitätsbelag



Verhalten im Kabel?

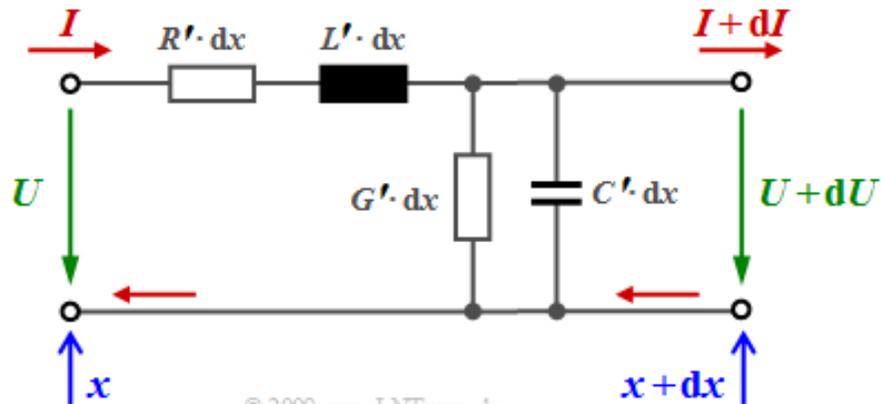
Technik
Informatik & Medien

Hochschule Ulm

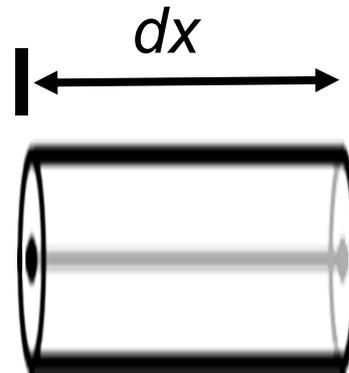


University of
Applied Sciences

Ein wenig Leitungstheorie: Unendlich kurzes Stück Kabel der Länge dx



$\hat{=}$



http://www.lntwww.de/Lineare_zeitinvariante_Systeme/Seite2433.html

- L' = Induktivitätsbelag der Leiter [H/m]
- R' = Verlustwiderstandbelag der Leiter [Ω /m]
- C' = Kapazitätsbelag [F/m]
- G' = Verlustleitfähigkeit Dielektrikum [S/m]

$$\frac{dU(x)}{dx} = -(R' + j\omega L') \cdot I(x)$$

$$\frac{dI(x)}{dx} = -(G' + j\omega C') \cdot U(x)$$

mit $\gamma = \sqrt{(R' + j\omega L')(G' + j\omega C')}$

$$Z_L = \sqrt{\frac{R' + j\omega L'}{G' + j\omega C'}}$$

$$\Rightarrow U(x) = a \cdot \cosh(\gamma x) + b \cdot \sinh(\gamma x)$$

Übertragen
auf endliche
Länge x

**Z- und S-Matrix
der Leitung**

Technik
Informatik & Medien

Hochschule Ulm



University of
Applied Sciences

Nützliche Formeln: Hochfrequenz-Grenzfall (d.h. ω groß)

R' und G' gegenüber $\omega C'$ und $\omega L'$ vernachlässigbar:

$$\gamma = \sqrt{j\omega L' \cdot j\omega C'} = j\omega \sqrt{L' \cdot C'} = \frac{j\omega}{c} = \frac{j\omega}{C_0 \cdot VF}$$

$$\Rightarrow \sqrt{L' \cdot C'} = \frac{1}{C_0 \cdot VF}$$

Außerdem gilt
im HF-Fall:

$$\sqrt{\frac{L'}{C'}} = Z_L = \text{const}$$

Also umgekehrt L' und C' durch Z_L und VF ausdrückbar:

$$L' = \frac{Z_L}{C_0 \cdot VF} \quad C' = \frac{1}{Z_L \cdot C_0 \cdot VF}$$

Das heißt:

L' und C' aus Z_L und VF berechenbar!

Beispiel RG58:

$$Z_L = 50\Omega$$

$$VF = 0,66$$

$$C' = \frac{1}{Z_L \cdot C_0 \cdot VF} = \frac{1}{50\Omega \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} \cdot 0,66} = 101 \frac{\text{pF}}{\text{m}}$$



$$L' = \frac{Z_L}{C_0 \cdot VF} = \frac{50\Omega}{3 \cdot 10^8 \text{ m/s} \cdot 0,66} = 253 \frac{\text{nH}}{\text{m}}$$



HF-Fall!

Technik
Informatik & Medien

Hochschule Ulm

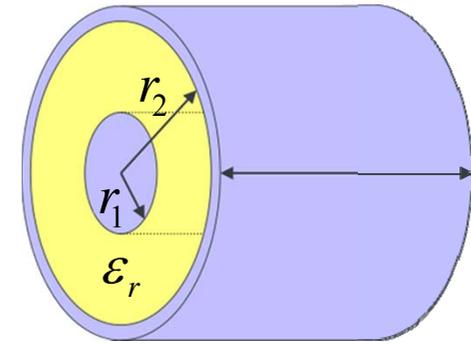


University of
Applied Sciences

Warum eigentlich 50Ω?

Hochfrequenzfall

$$\left. \begin{aligned} L' &= \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \\ C' &= \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r}{\ln(r_2/r_1)} \end{aligned} \right\} \Rightarrow Z_L = \sqrt{\frac{L'}{C'}} = \frac{60\Omega}{\sqrt{\epsilon_r}} \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)$$



Spannungsabfall an Innen- u. Außenleiter:

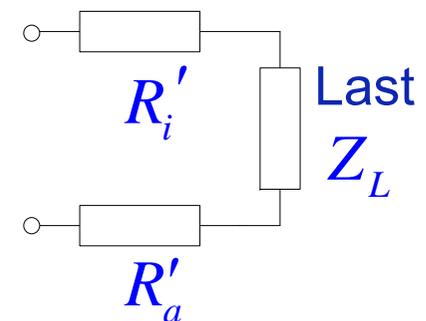
$$\Delta U \sim \frac{R'_i + R'_a}{Z_L} \sim \frac{1/r_1 + 1/r_2}{\ln(r_2/r_1)} = \frac{1}{r_2} \cdot \frac{r_2/r_1 + 1}{\ln(r_2/r_1)}$$

Je dicker Kabel, desto kleiner Dämpfung!

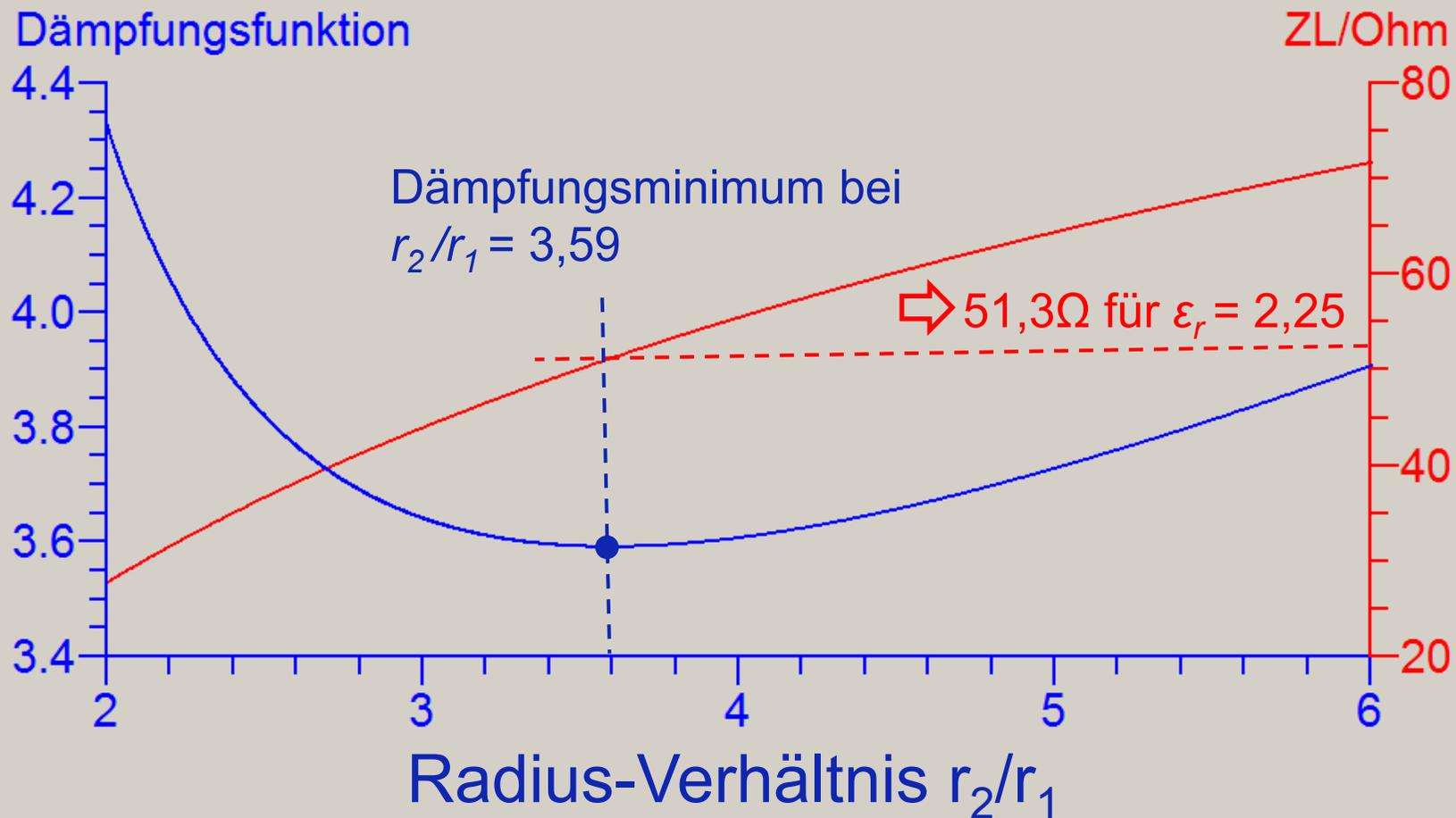
Dämpfungsfunktion

Leitungsimpedanz und Dämpfungsfunktion hängen nur vom Radius-Verhältnis r_2/r_1 ab!

Spannungsteiler



Darum 50Ω: Minimale Dämpfung!



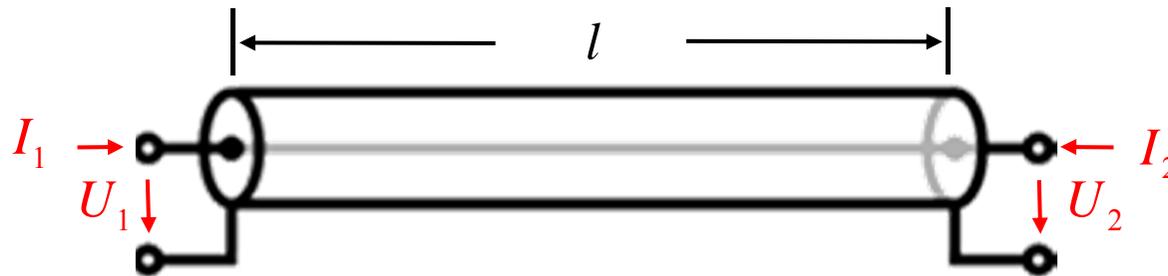
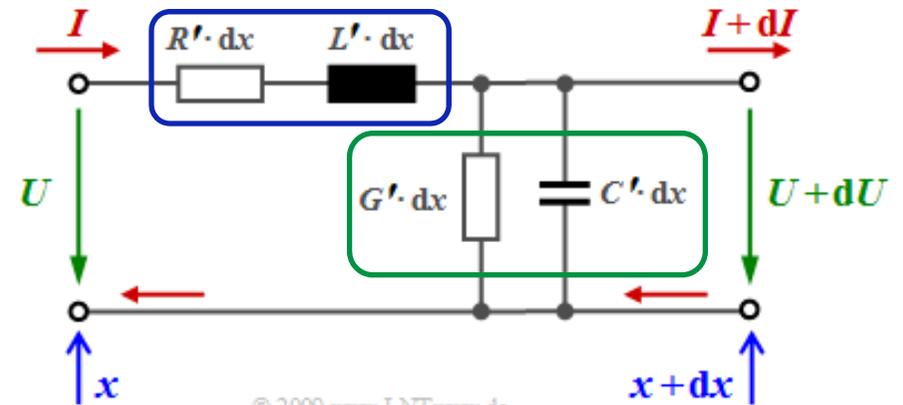
Zusammenfassung Modell

$$R' + j\omega L' = \sqrt{R_0'^2 + j \cdot 2R_{skin}'^2 \cdot f + j\omega L_a'}$$

$$G' + j\omega C' = G_0' + f \cdot G_{pO}' + j \cdot \omega \cdot C_0'$$

$$\gamma = \sqrt{(R' + j\omega L')(G' + j\omega C')}$$

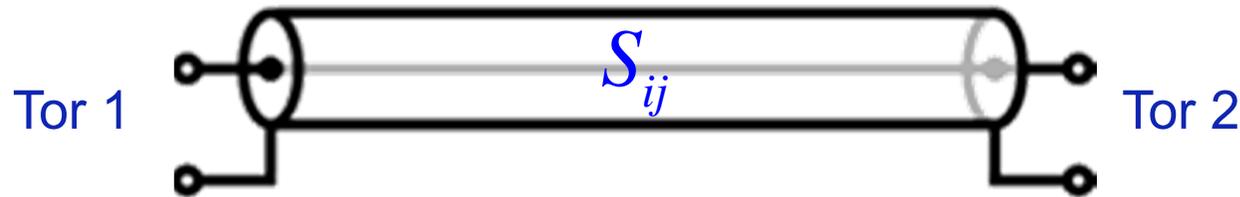
$$Z_L = \sqrt{\frac{R' + j\omega L'}{G' + j\omega C'}}$$



$$\begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \end{pmatrix} = \frac{Z_L}{\sinh(\gamma l)} \begin{pmatrix} \cosh(\gamma l) & 1 \\ 1 & \cosh(\gamma l) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \end{pmatrix}$$

Z-Matrix , in S-matrix umrechenbar

Umrechnung in S-Matrix



$$S_{11} = \frac{R}{\Delta} \quad S_{21} = \frac{T}{\Delta}$$

mit

$z_L = Z_L/Z_0$ mit $Z_0 =$ Normierungsimpedanz, i.a. 50Ω

$$\Delta = e^{2\gamma l} \cdot (z_L^2 + 2z_L + 1) - z_L^2 + 2z_L - 1$$

$$R = (z_L^2 - 1) \cdot (e^{2\gamma l} - 1)$$

$$T = 4z_L e^{\gamma l}$$

Bsp. Spezialfall

$$Z_L = Z_0 \quad \text{d.h.} \quad z_L = 1$$

$$z_L = Z_L / Z_0 = 1$$

$$\Delta = e^{2\gamma l} \cdot (z_L^2 + 2z_L + 1) - z_L^2 + 2z_L - 1 = e^{2\gamma l} \cdot 4$$

$$R = (z_L^2 - 1) \cdot (e^{2\gamma l} - 1) = 0$$

$$T = 4z_L e^{\gamma l} = 4 \cdot e^{\gamma l}$$

$$\Rightarrow S_{11} = \frac{R}{\Delta} = 0 \qquad S_{21} = \frac{T}{\Delta} = \frac{4e^{\gamma l}}{4e^{2\gamma l}} = e^{-\gamma l}$$

- angepasst

- Dämpfung
- Laufzeit

Nützliche Gleichung zur Bestimmung des Wellenwiderstandes aus gemessenen S_{ij}

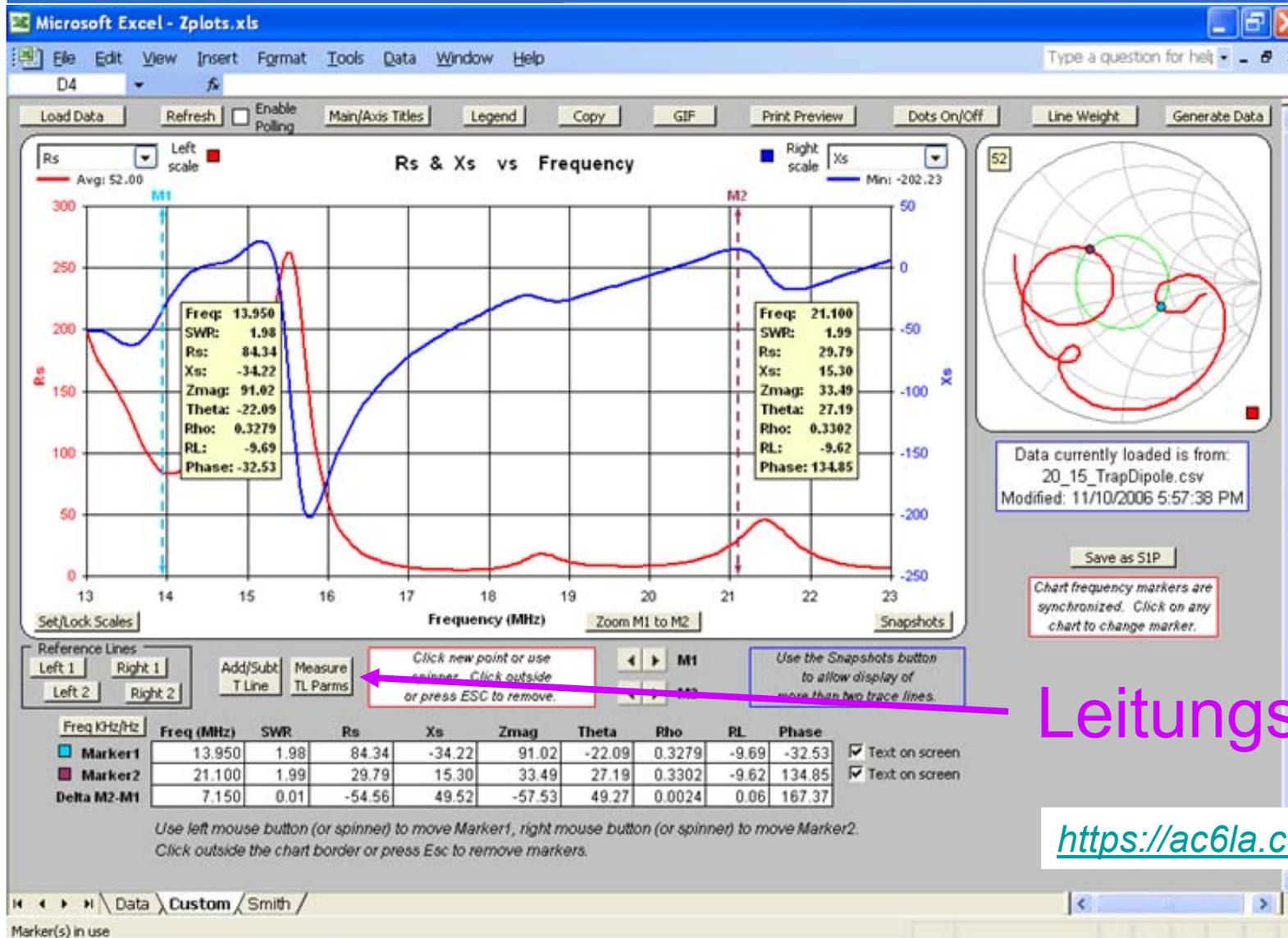
$$Z_L = Z_0 \cdot \sqrt{\frac{S_{11}^2 - S_{21}^2 + 1 + 2S_{11}}{S_{11}^2 - S_{21}^2 + 1 - 2S_{11}}}$$

Z_0 = Normierungsimpedanz (i.A. 50Ω)

Was tun mit der
ganzen Mathematik?



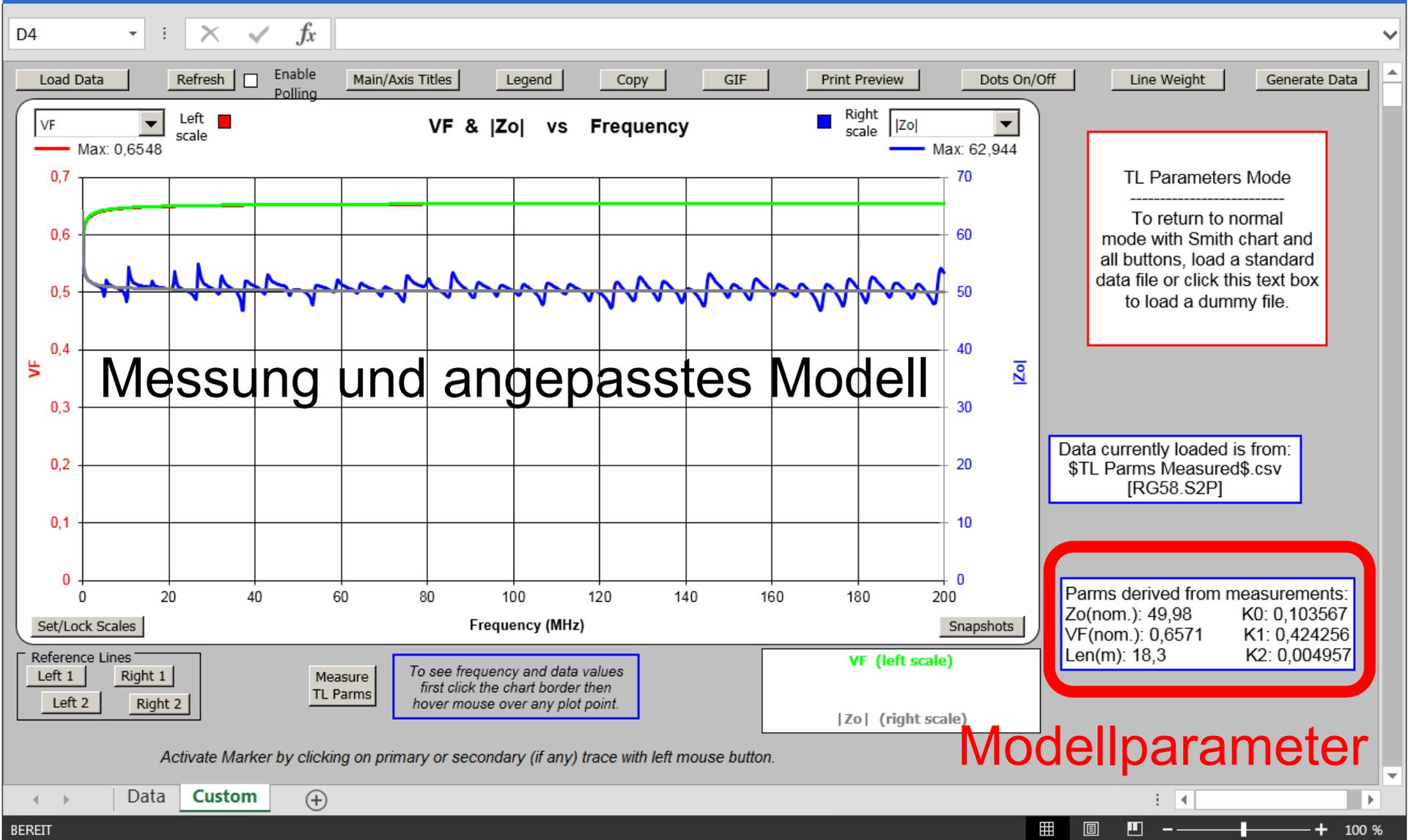
Zplots-Software von Dan Maguire AC6LA: Leitungstheorie und Modell eingebaut



Leitungsanalyse

<https://ac6la.com/zplots.html>

Analyse RG58 C/U mit ZPlots



Modellparameter aus ZPlots

Zo(nom.): 49,98 ← Wellenwiderstand (HF-Grenzwert)
VF(nom.): 0,6571 ← Verkürzungsfaktor (HF-Grenzwert)
Len(m): 18,3 ← Länge

$$R'_0 = k_0 \cdot x \cdot Z_0(\text{nom}) = 39,104 \frac{\text{m}\Omega}{\text{m}}$$
$$R'_{skin} = k_1 \cdot \frac{x \cdot Z_0(\text{nom})}{1000\sqrt{\text{Hz}}} = 0,16019 \frac{\text{m}\Omega}{\text{m}\sqrt{\text{Hz}}}$$
$$G'_{PO} = k_2 \cdot \frac{x \cdot 10^{-6}}{Z_0(\text{nom}) \cdot \text{Hz}} = 7,4924 \cdot 10^{-13} \frac{\text{S}}{\text{m} \cdot \text{Hz}}$$

$$\text{mit } x = \frac{2 \cdot \ln(10)}{100 \text{ ft} \cdot 20} = 7,5544 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{m}}$$

K0: 0,103567
K1: 0,424256
K2: 0,004957

Kann VNWA
simulieren...

VNWA Virtual Demo Device

Options Help

Select Instrument ▾

- DG8SAQ VNWA
- ✓ VNWA Virtual Demo Device

Setup

Instrument related Setup

General Settings



Setup

Simulated DUT

Transmission line (two port)

Length

18.3

m

l

nom. Characteristic Impedance

49.98

Ohm

$Z_0(\text{nom})$

Velocity Factor

0.6571

$VF(\text{nom})$

dc Resistance

R'_0

0.039104

Ohm/m

Skin Resistance

R'_{skin}

0.00016019

Ohm/m sqrt(Hz)

dc Admittance

G'_0

0

S/m

Dielectric Loss Admittance

G'_{PO}

0.74924E-12

S/m Hz

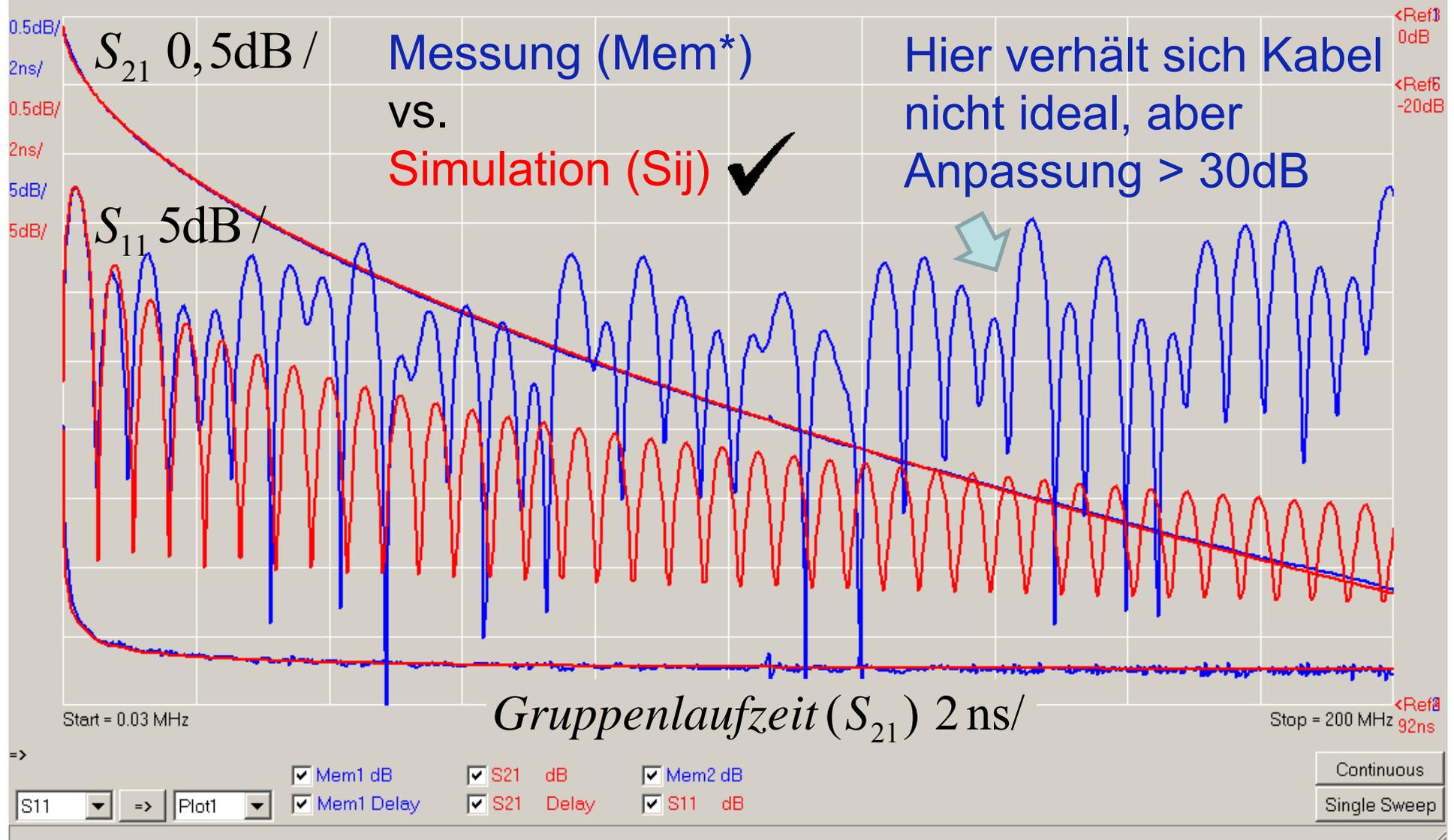
Technik
Medien

ule Ulm

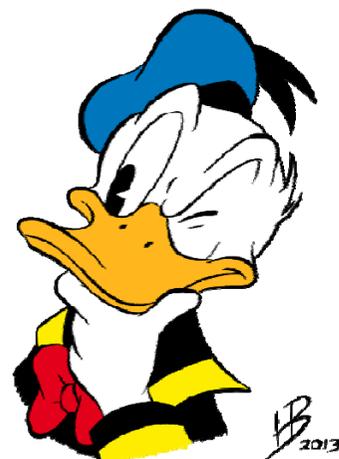
University of
Applied Sciences



Parameterextraktion und Modell funktionieren!



Alles klar, oder???



Technik
Informatik & Medien
Hochschule Ulm



University of
Applied Sciences

Die Hühnerleiter ist eigentlich ein Viertor,...



...im Gegentaktbetrieb aber ein Zweitort



Wie messen???

Streuparameter besitzen Symmetrien

Kabel spiegelsymmetrisch zur halben Länge $\Rightarrow S_{22} = S_{11}$

Kabel reziprokes Bauelement $\Rightarrow S_{21} = S_{12}$



Nur zwei unabhängige Streuparameter S_{21} und S_{11}



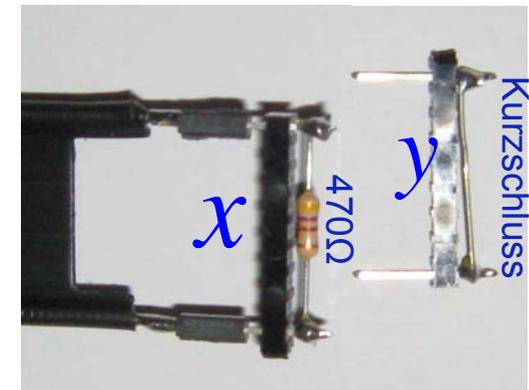
Mit zwei Reflexionsmessungen Γ_x, Γ_y mit zwei verschiedenen Kabelabschlüssen (x, y z.B. Short, Load) bestimmbar

$$S_{11} = \frac{\Gamma_y \cdot S_x - \Gamma_x \cdot S_y}{(\Gamma_y - \Gamma_x) \cdot S_x \cdot S_y + S_x - S_y}$$

$$S_{21} = \pm \frac{\sqrt{(\Gamma_x - \Gamma_y) \cdot (S_x - S_y) \cdot (\Gamma_x \cdot S_y - 1) \cdot (\Gamma_y \cdot S_x - 1)}}{(\Gamma_y - \Gamma_x) \cdot S_x \cdot S_y + S_x - S_y}$$

mit S_x, S_y Reflexionsfaktor Abschluss **x** bzw. **y**

Γ_x, Γ_y Reflexionsfaktor des Kabels mit Abschluss **x** bzw. **y**



Wie misst man symmetrische Lasten mit einem unsymmetrischen VNA?

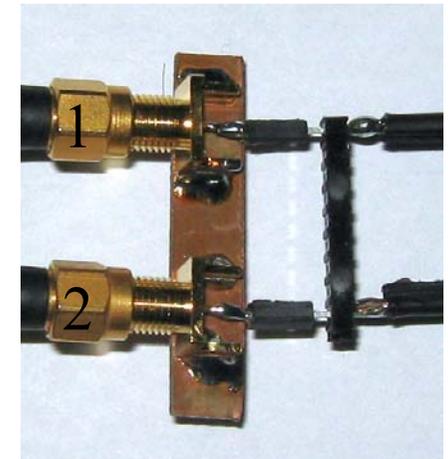
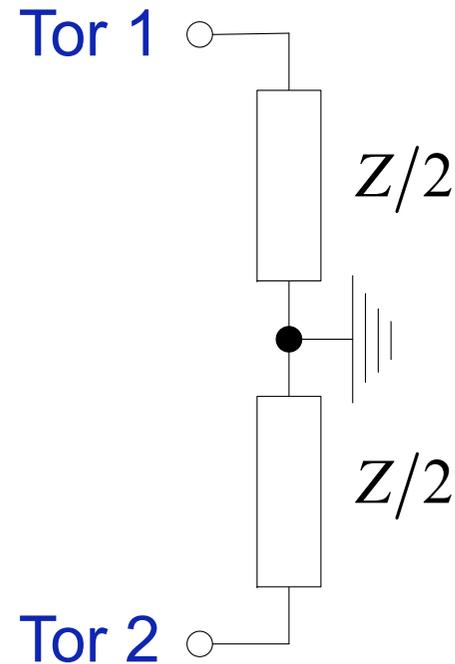
Mittels Zweitormessung!

$$Z = \underbrace{Z_{11} + Z_{22} - Z_{21} - Z_{12}}_{\text{gemessene Z-Matrix-Elemente}}$$

Falls Tore gleich:

$$Z = 2 \cdot (Z_{11} - Z_{21})$$

Berechenbar mit VNWA Custom
Funktionen *s_dm* bzw. *s_dm_sym*
aus den gemessenen S_{ij}



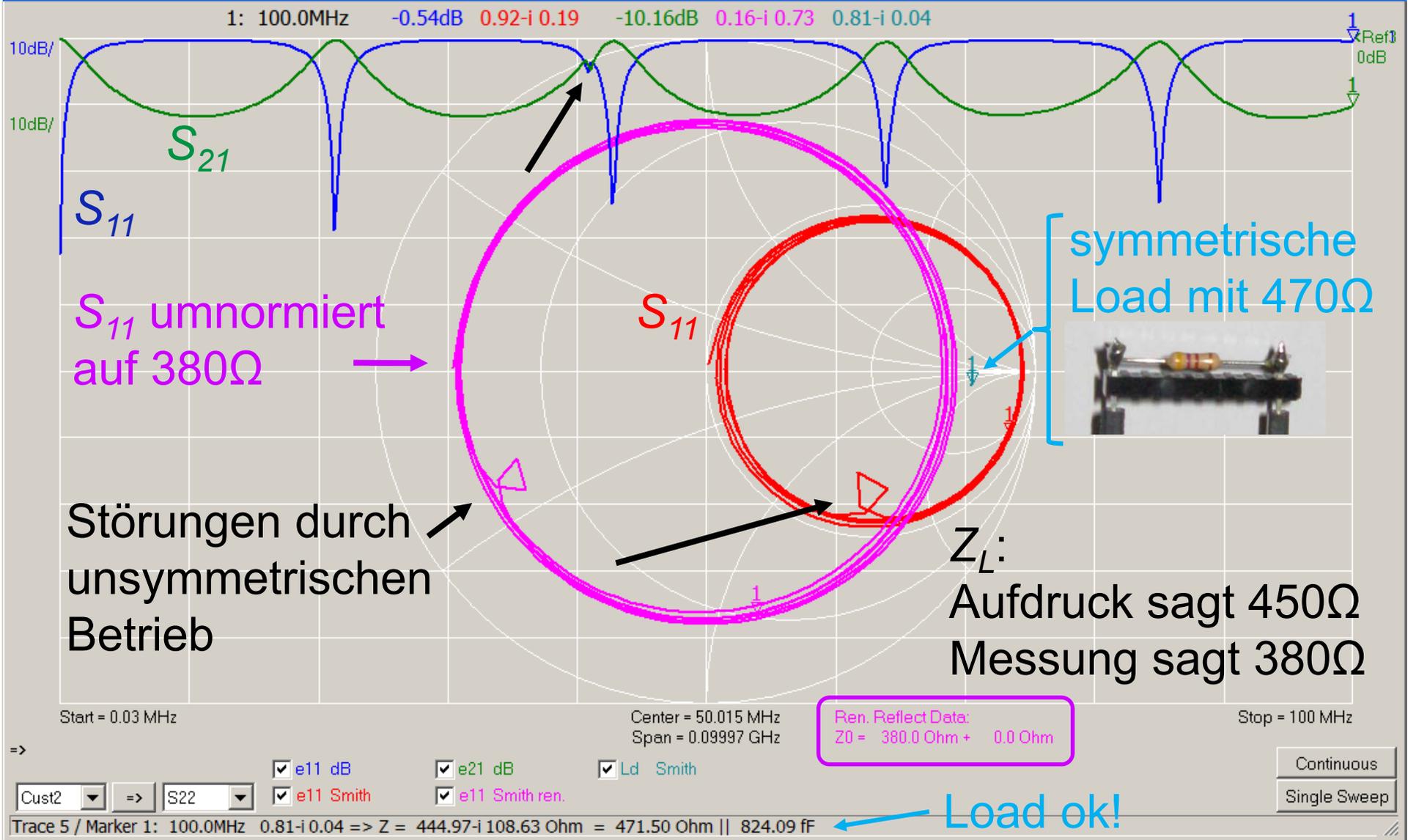
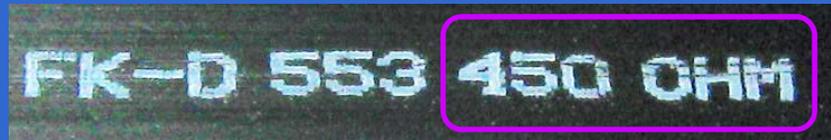
Technik
Informatik & Medien

Hochschule Ulm



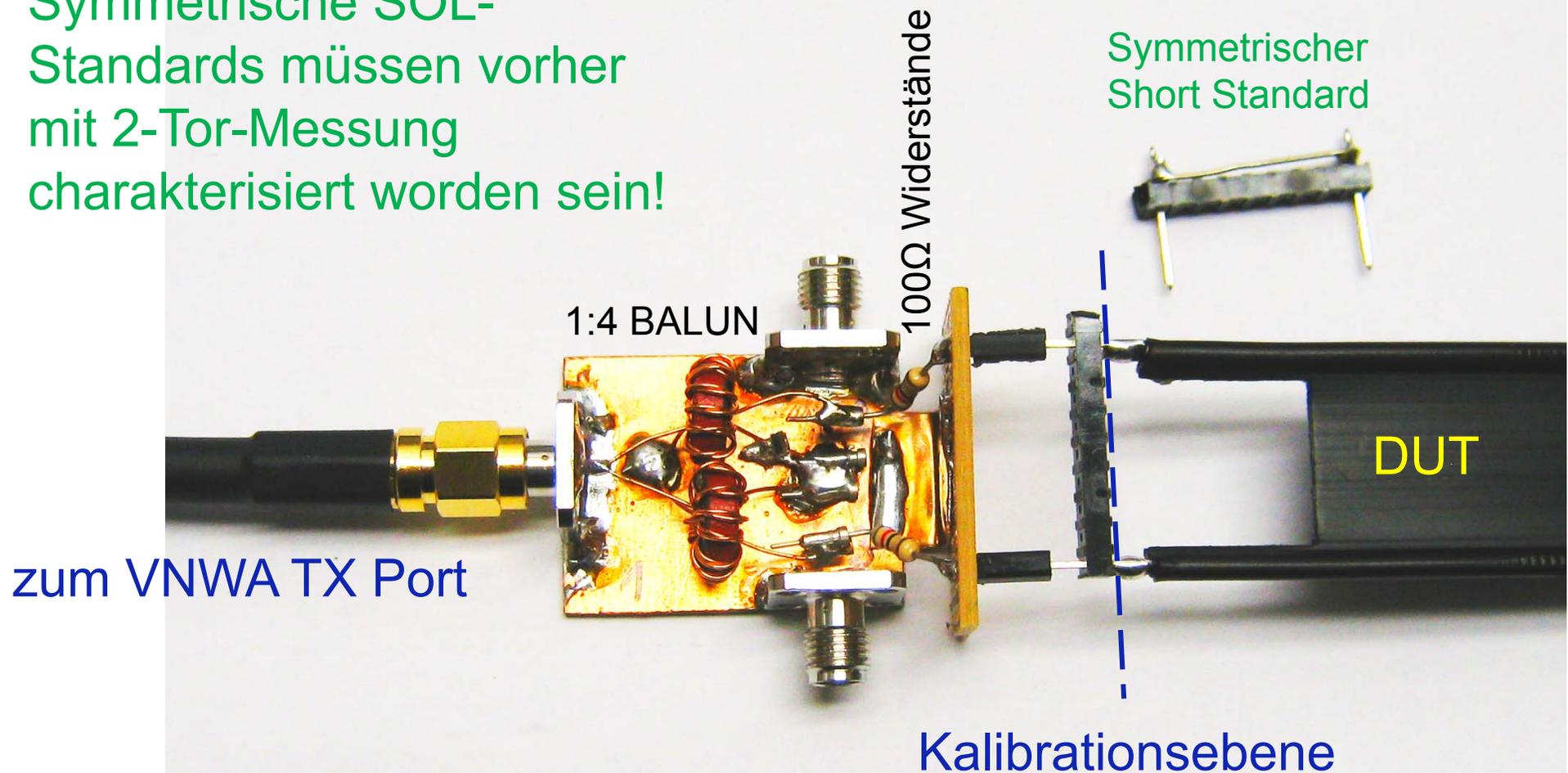
University of
Applied Sciences

6,2m Hühnerleiter aus Zweitormessungen

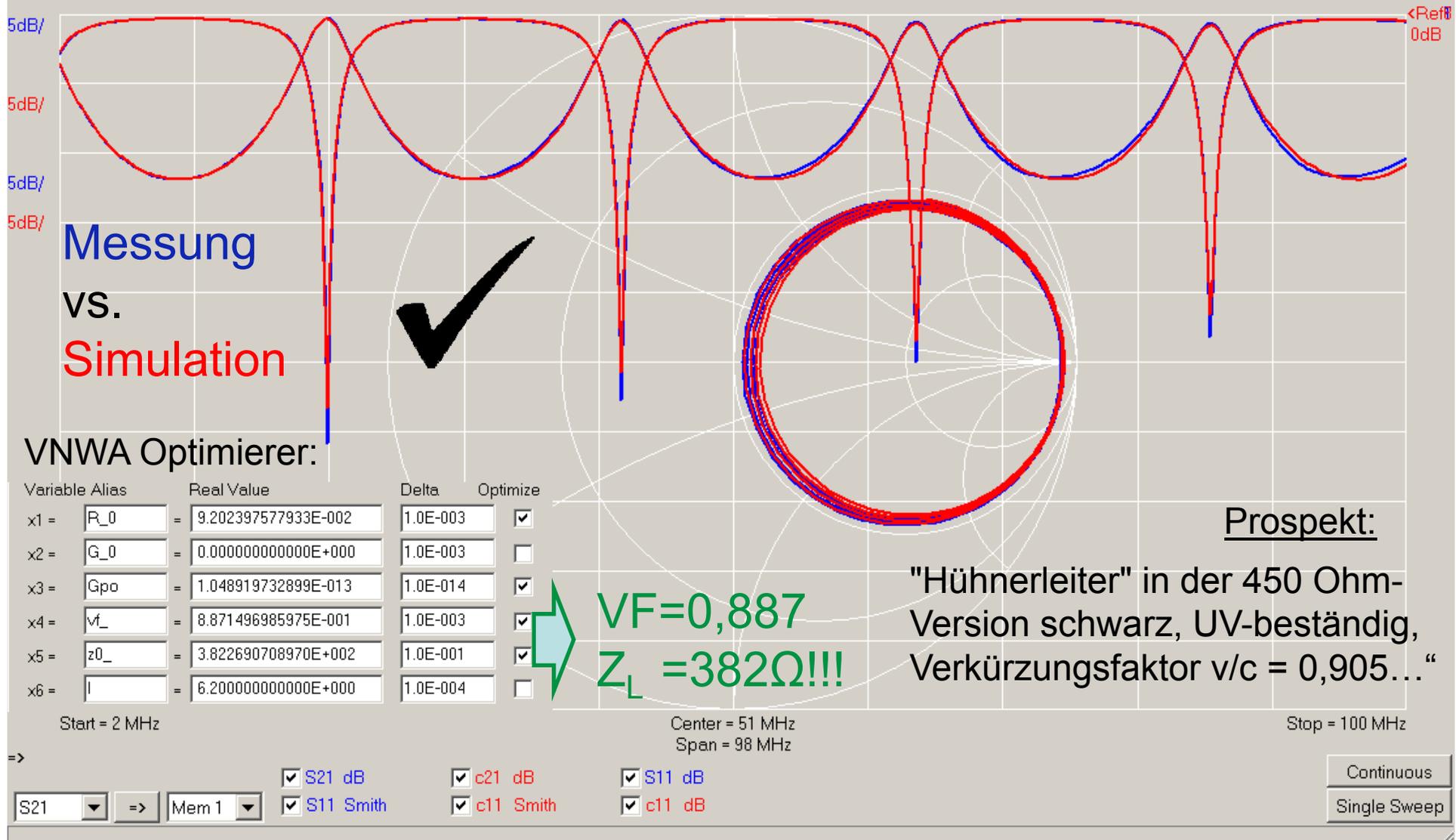


Besser: Reflexionsmessung durch BALUN hindurch mit symmetrischer Kalibrierung

Symmetrische SOL-
Standards müssen vorher
mit 2-Tor-Messung
charakterisiert worden sein!



Dasselbe Simulationsmodell wie für Koaxkabel funktioniert hier auch!



Große Sammlung von Kabelparametern: *TLDetails* von AC6LA

Enter values directly, or click spinners, or click and hold spinners.

1. Choose Transmission Line, Modify Parameters if Desired.

Type: Wireman 553 Ladder Line

Nom. Zo: 395

Nom. VF: 0.902

K0: 0.077708

K1: 0.078862

K2: 0.000900

Length: 100 Feet

Units: Feet

Length Modulo 1/2 Wavelength: 0

Band: R 250 X 0

R and X: At Input At Load

T-Line Model Internal Variables:

R	273.069 mΩ/ft
L	448.229 nH/ft
G	0.073 μS/ft
C	2.854 pF/ft

Matched Loss: 0.312 dB/100ft

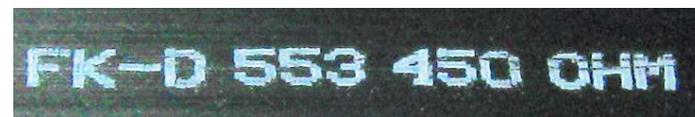
Preferred Units: Feet Meters

Input Watts: 100

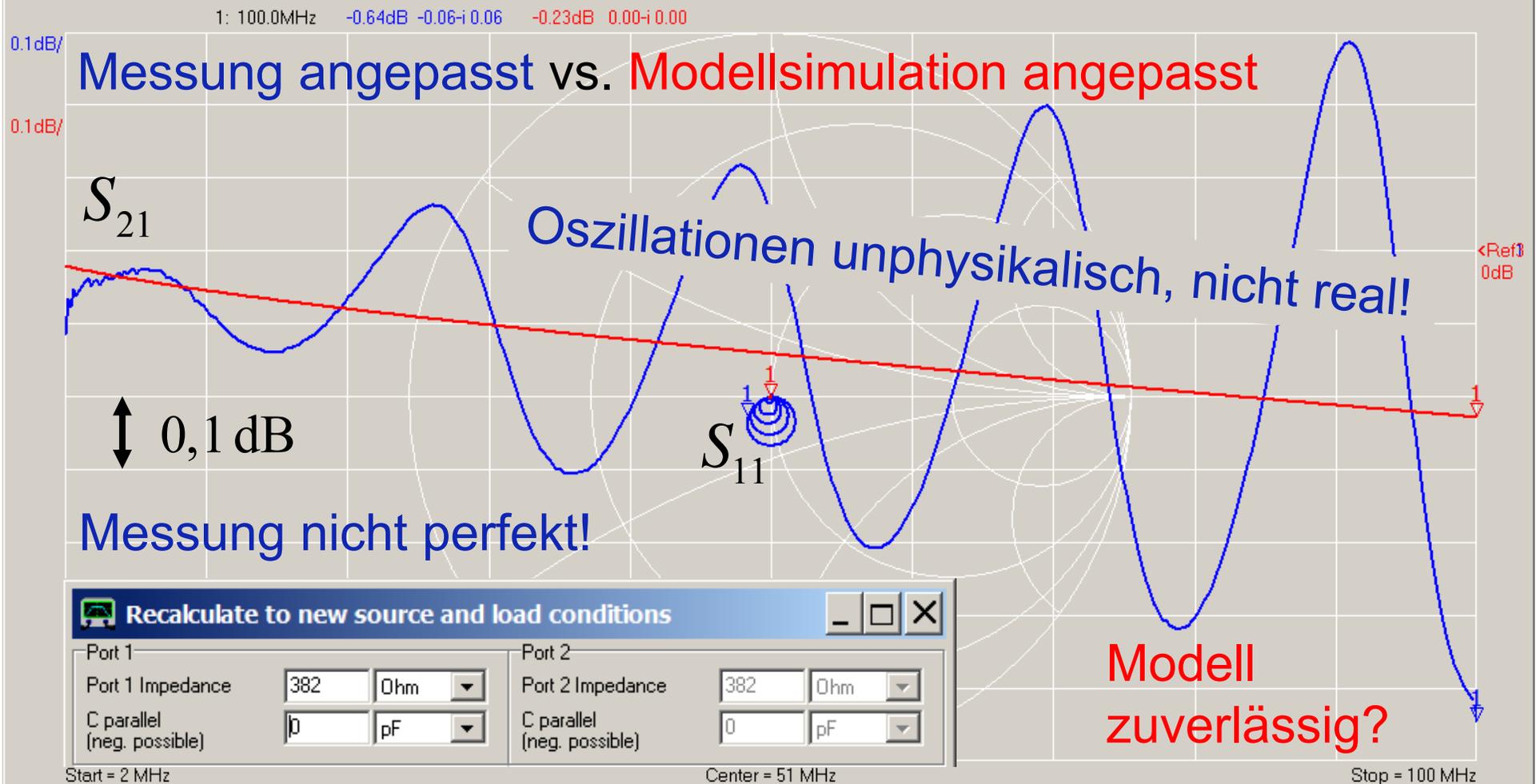
Plot Matched Line Loss

$$VF=0,902$$
$$Z_L = 395\Omega$$

<https://ac6la.com/tldetails.html>

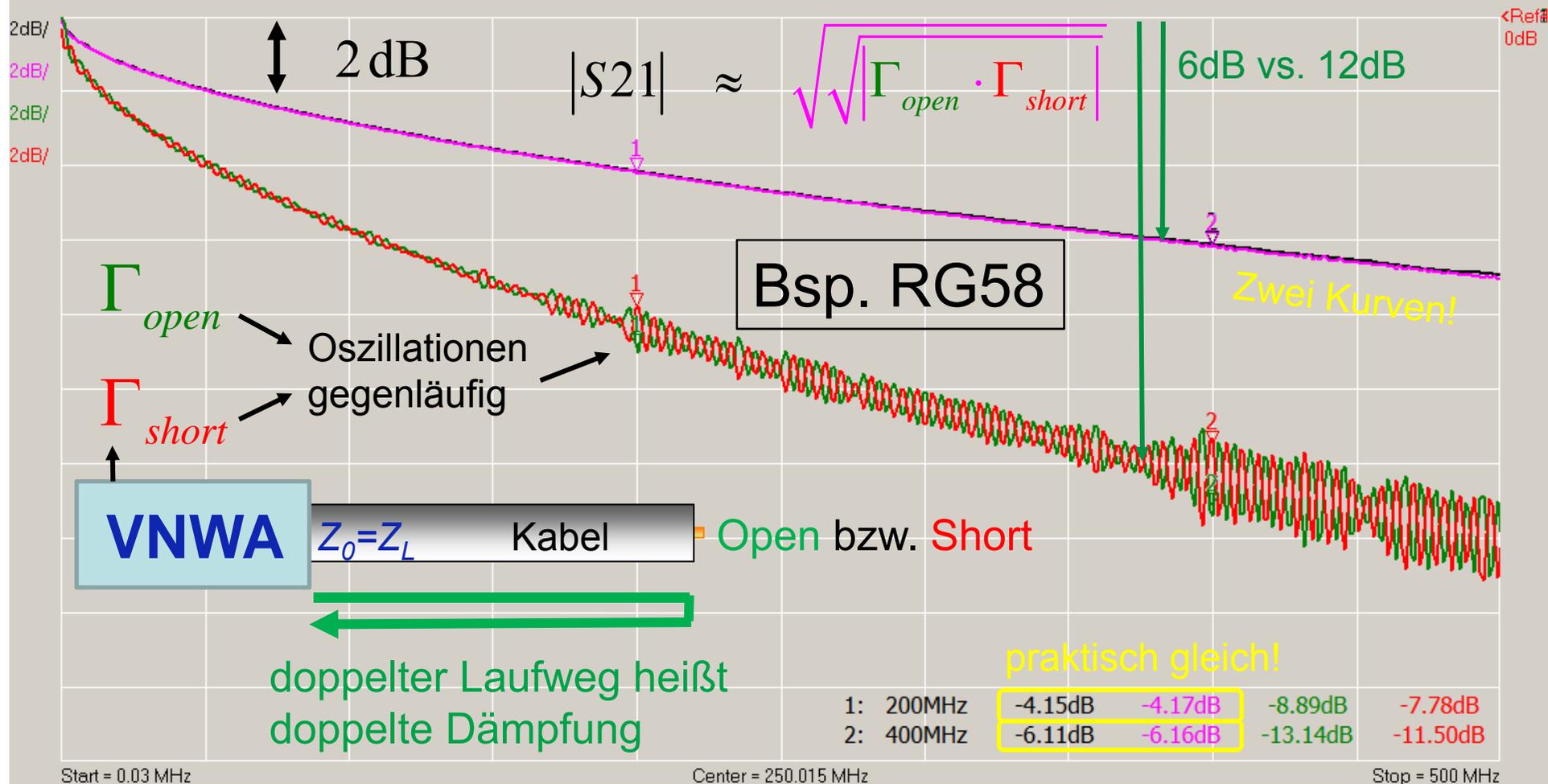


Einfügedämpfung durch simulierte Anpassung auf $Z_L = 382\Omega$?



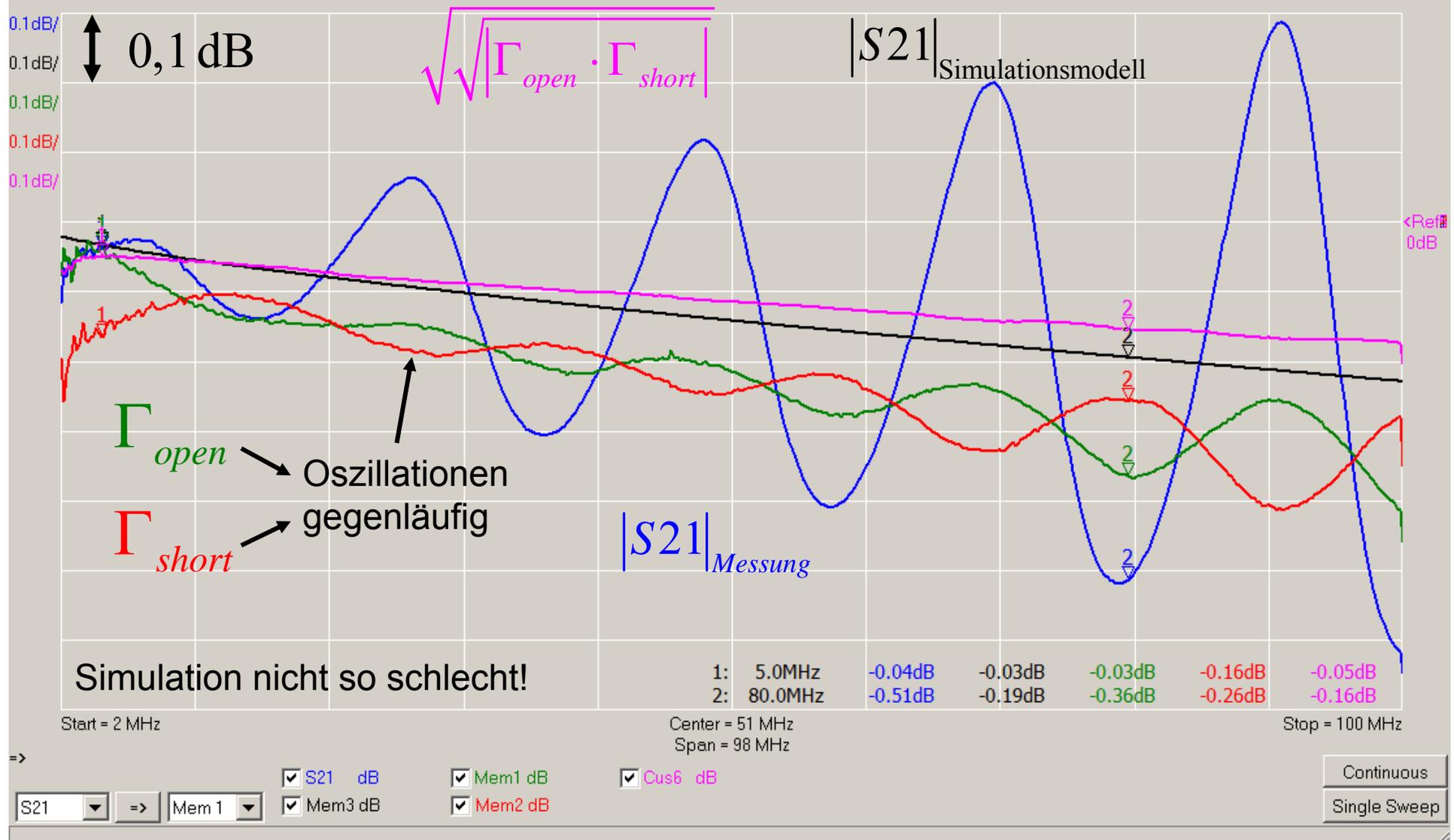
Messung mit BALUN, **Simulation mit Parametern aus VNWA Optimierer bzw. ZPlots**

Alternative Bestimmung der Einfüge- dämpfung aus Reflexionsmessung (RG58)



S_{21} aus Transmissionsmessung
Reflexionskoeffizienten Γ aus Reflexionsmessungen (S_{11})

Funktioniert auch für Hühnerleiter!



HF-Kabel: Was haben wir erreicht?

- Verständnis für zugrundeliegende Physik
- Realistisches Kabelmodell für Simulationen
- Messtechnik für Koaxialkabel
- Messtechnik für symmetrische Leitungen
- Analysemethoden (Zplots, Optimierer)



Hochschule Ulm



Vielen Dank für Ihr Interesse!

Do I get this right? You tell your wife:
"Sorry dear, not tonight. I have a head-
ache" and then you can sit all night and
work with your Vector Network Analyzer!?!

Dipl. Psychologe
dra. Quire

OMICRON
LAB

Plans!