HAM RADIO 2013

HAM RADIO
FRIEDRICHSHAFEN

高周波デザイにおける、Sパラメータの測定および応用

PROF. DR. THOMAS BAIER *E-mail: baier@hs-ulm.de*

DG8SAQ

Hochschule Ulm *University of Applied Sciences*

Prittwitzstrasse 10 *Ulm*

89075 Ulm *Germany*

尚、本文献では、数字の小数点は，(カンマ）で表しております。米国/日本式ではございませんのでご注意願います。

抄訳 ICAS Enterprises

Technik
Informatik & Medien
Hochschule Ulm
University of
Applied Sciences

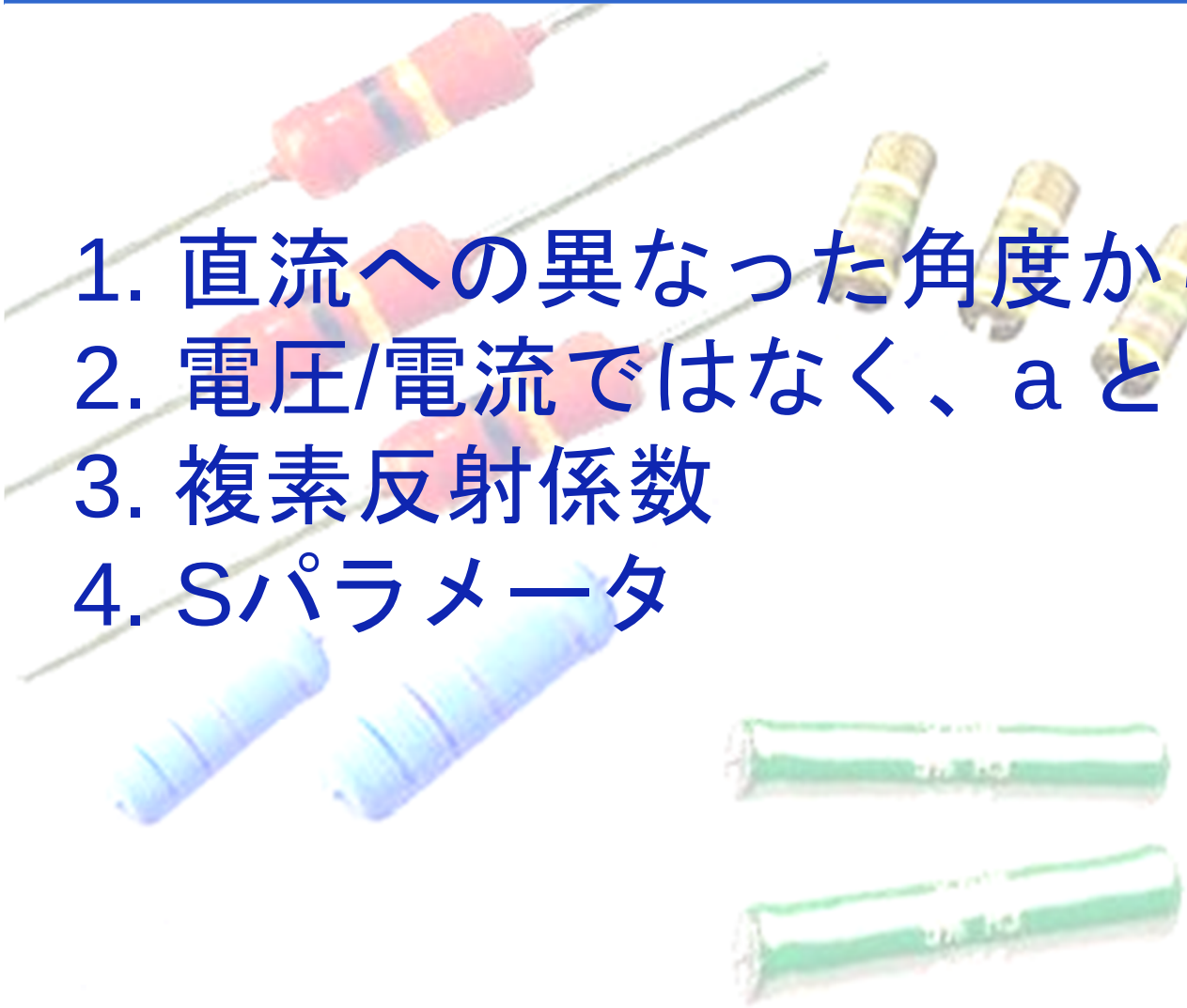
公演内容

- スキャッタリング (S) パラメータ
- 休憩
- VNAによるSパラメータの測定
- 応用例

謝辞：
- *Eric Hecker*
- *Kurt Poulsen*
- *Gerfried Palme*
- *Alan Rowe*
- *Jan Verduyn*
- *Jim Tonne*

Hochschule Ulm

Sパラメータとは何か？



1. 直流への異なった角度からのアプローチ
2. 電圧/電流ではなく、ａとｂを使用
3. 複素反射係数
4. Sパラメータ

Hochschule Ulm

Sパラメータは恐れるに足りません！

$$U = R \cdot I$$

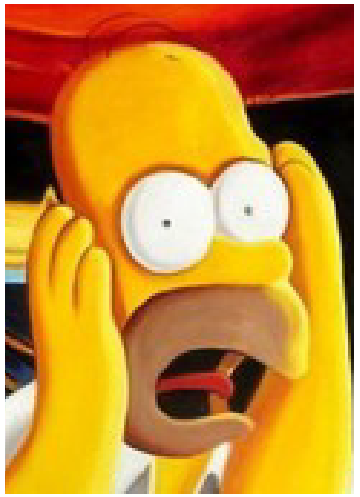
$$b = S \cdot a$$

反応　システム　励起

Ohm

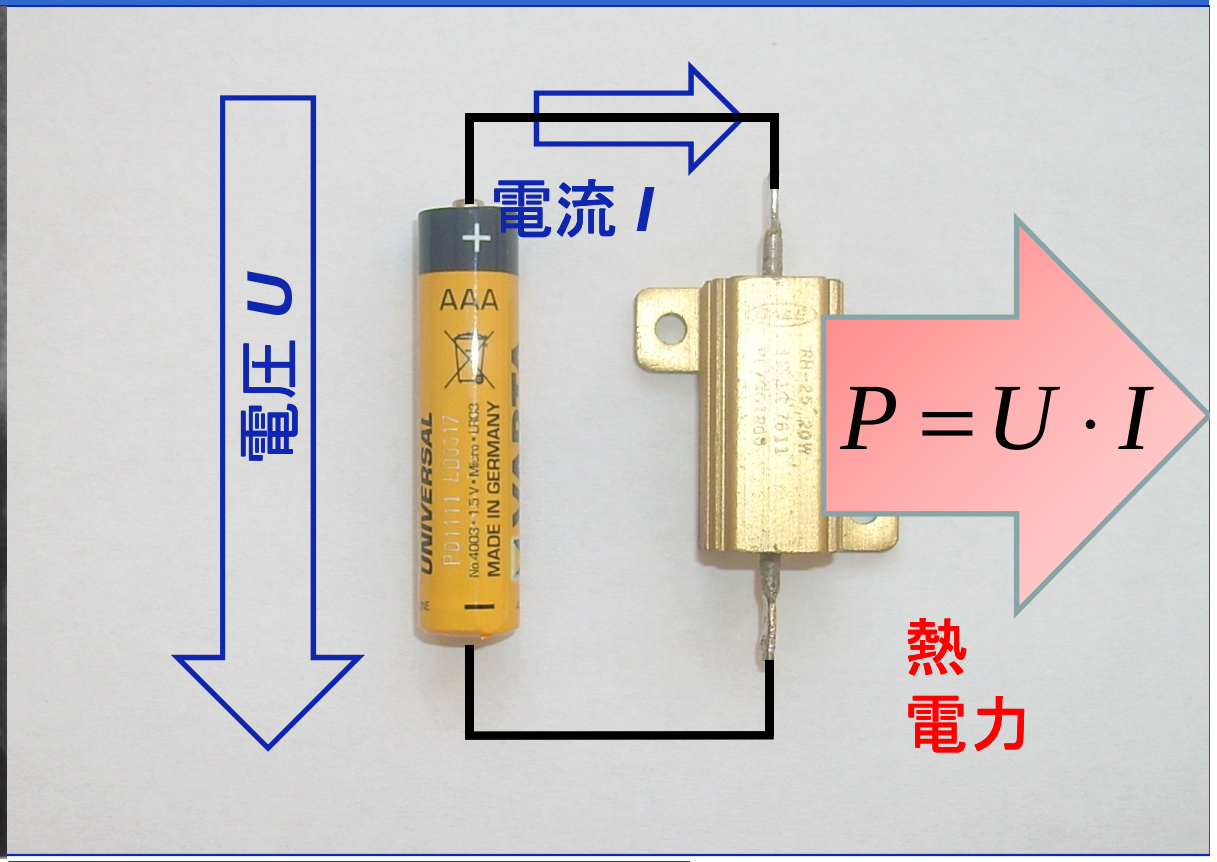
S-Par.

回路のことをいいます。



直流への異なった角度からのアプローチ
オームの法則 (1)



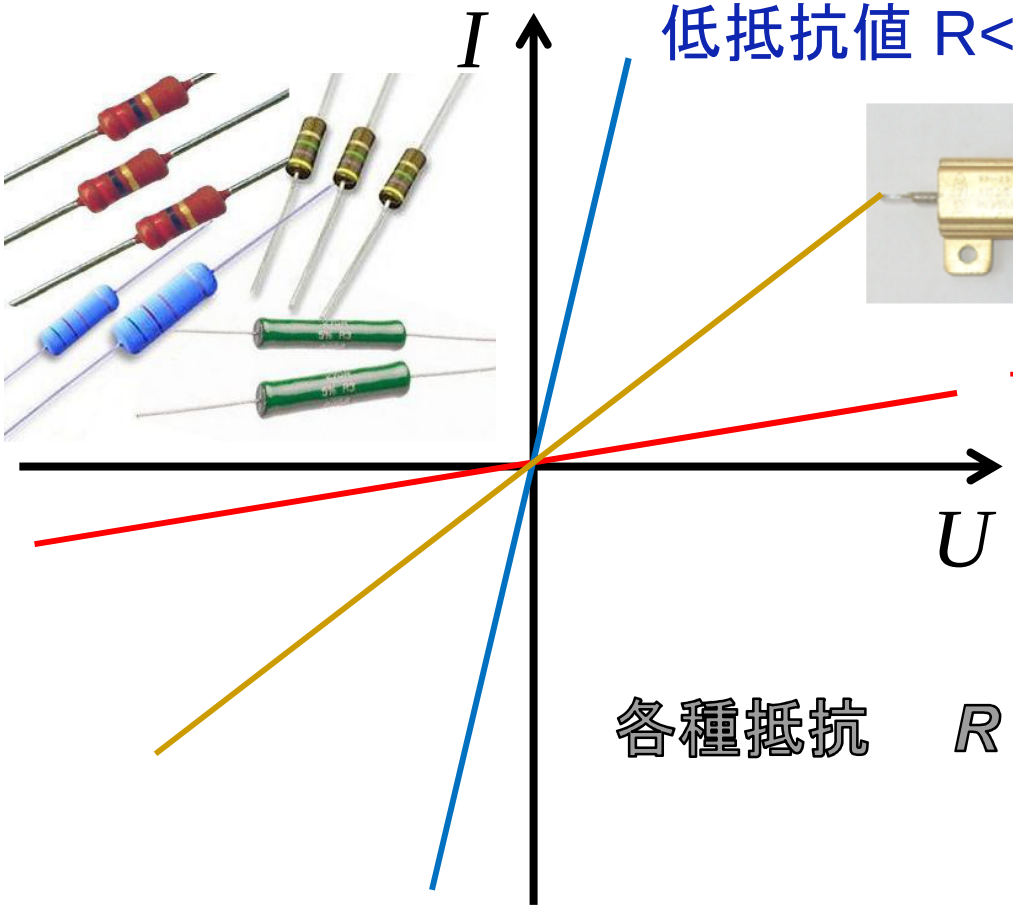


Georg Simon Ohm
(1789-1854)

$$U = R \cdot I$$

Hochschule Ulm

オームの法則 (2)



低抵抗値 $R<R_0$



金色基準
抵抗 R_0

高抵抗値 $R>R_0$

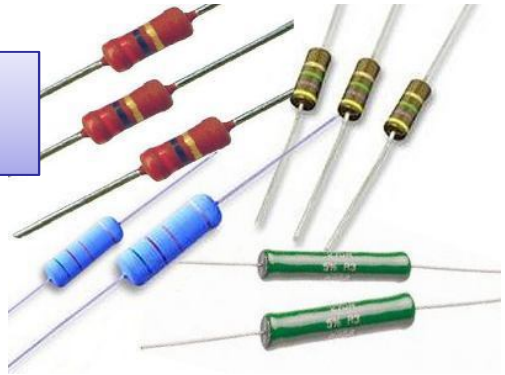
各種抵抗　R

Hochschule Ulm

基準抵抗R_0 に対して抵抗 R を正規化する

任意の抵抗を、基準抵抗R_0 に基づき
倍数値を測定する：

抵抗 *R*



$$r = \frac{R}{R_0}$$

正規化値 *r*

抵抗 R_0



$$r_0 = \frac{R_0}{R_0} = 1$$

正規化値 *1*

Hochschule Ulm

電圧と電流の新しい単位:
R_0 を介したUとIの正規化

R_0 で放散される電力 P に注目:

$$\sqrt{P} = \sqrt{U \cdot I} = \sqrt{\frac{U^2}{R_0}} = \frac{U}{\sqrt{R_0}} \equiv u$$

$$= \sqrt{I^2 \cdot R_0} = I \cdot \sqrt{R_0} \equiv i$$

回路中の抵抗 R_0

Hochschule Ulm

電圧と電流の新しい単位:

$I \rightarrow i$ $\qquad\qquad$ $U \rightarrow u$

R_0 で放散される電力 P に注目:

$$i \equiv I \cdot \sqrt{R_0} = \sqrt{P} = \frac{U}{\sqrt{R_0}} \equiv u$$

u と i は、未だ電圧と電流ですが、表示が異なります。

u と i は、同一です、つまり $\sqrt{\text{Watt}}$ です。

回路中の抵抗 R_0

電圧と電流の新しい単位:

$I \rightarrow i$ $\qquad\qquad$ $U \rightarrow u$

R_0 で放散される電力 P に注目:

$$i \equiv I \cdot \sqrt{R_0} = \sqrt{P} = \frac{U}{\sqrt{R_0}} \equiv u$$

特殊なケース　$u = i = \sqrt{P}$

理由:　$R = R_0$

つまり　$U = R_0 \cdot I$

回路中の抵抗 R_0

R_0 のかわりに任意の抵抗 R の場合

ここでもオームの法則が適用されます

$$u = r \cdot i$$

つまり:

正規化された抵抗値!

$$\frac{u}{i} = \frac{\frac{U}{\sqrt{R_0}}}{\frac{I}{\sqrt{R_0}}} = \frac{U}{I \cdot R_0} = \frac{R}{R_0} \equiv r$$

任意抵抗 R の場合!!!

Hochschule Ulm

任意抵抗での放散電力

$$P = u \cdot i$$

ここでも適用されます

つまり:

$$u \cdot i = \frac{U}{\sqrt{R_0}} \cdot I \cdot \sqrt{R_0} = U \cdot I = P$$

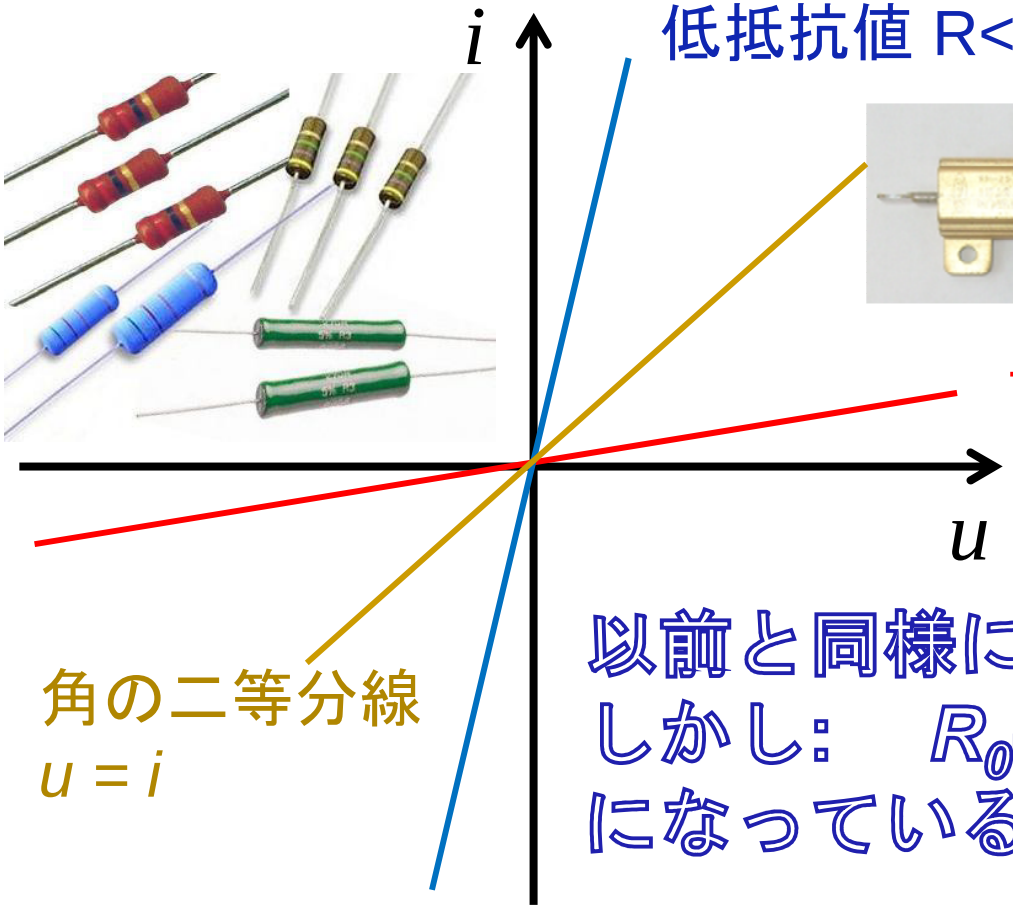
削除!

任意抵抗 R の場合!!!

Hochschule Ulm

新しい単位によるオームの法則





低抵抗値 $R<R_0$

金色基準
抵抗 R_0

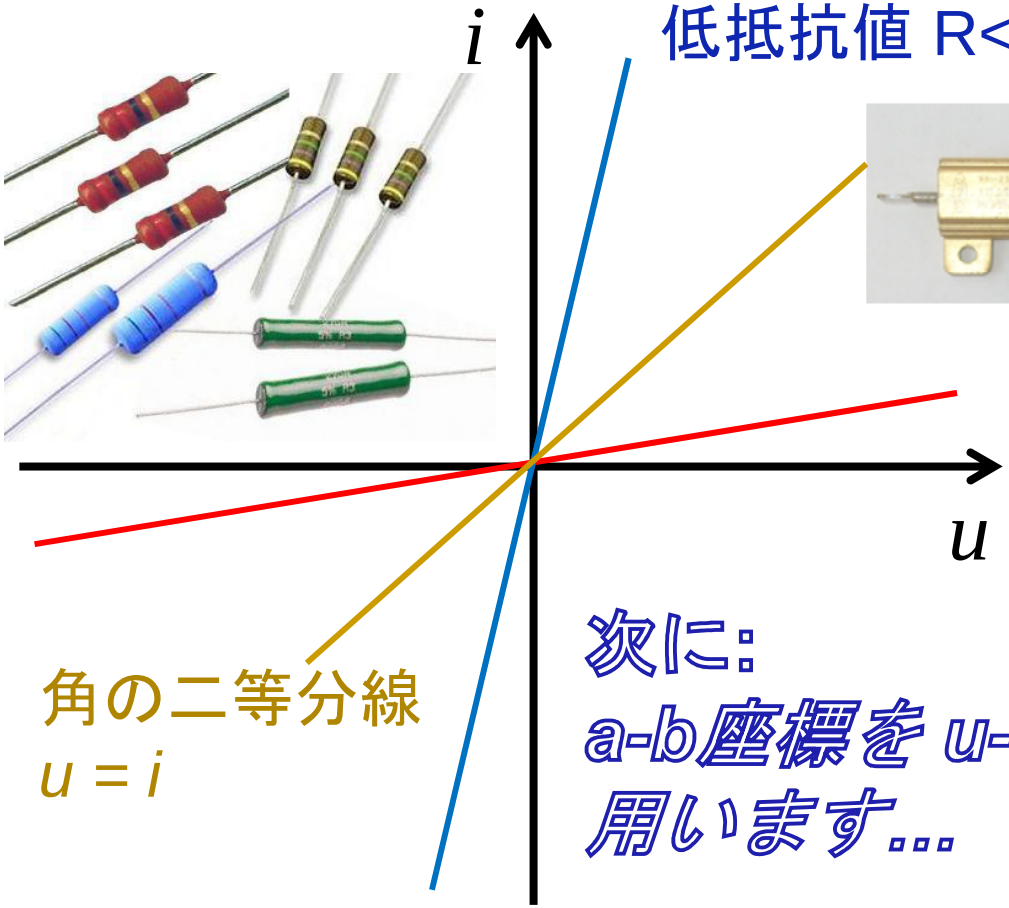
高抵抗値 $R>R_0$

角の二等分線
$u = i$

以前と同様に見えるが、
しかし: R_0-curve は、角の二等分線
になっている。

Hochschule Ulm

それでは本題に入ります:
直流への異なった角度からのアプローチ…



低抵抗値 $R<R_0$



金色基準
抵抗 R_0

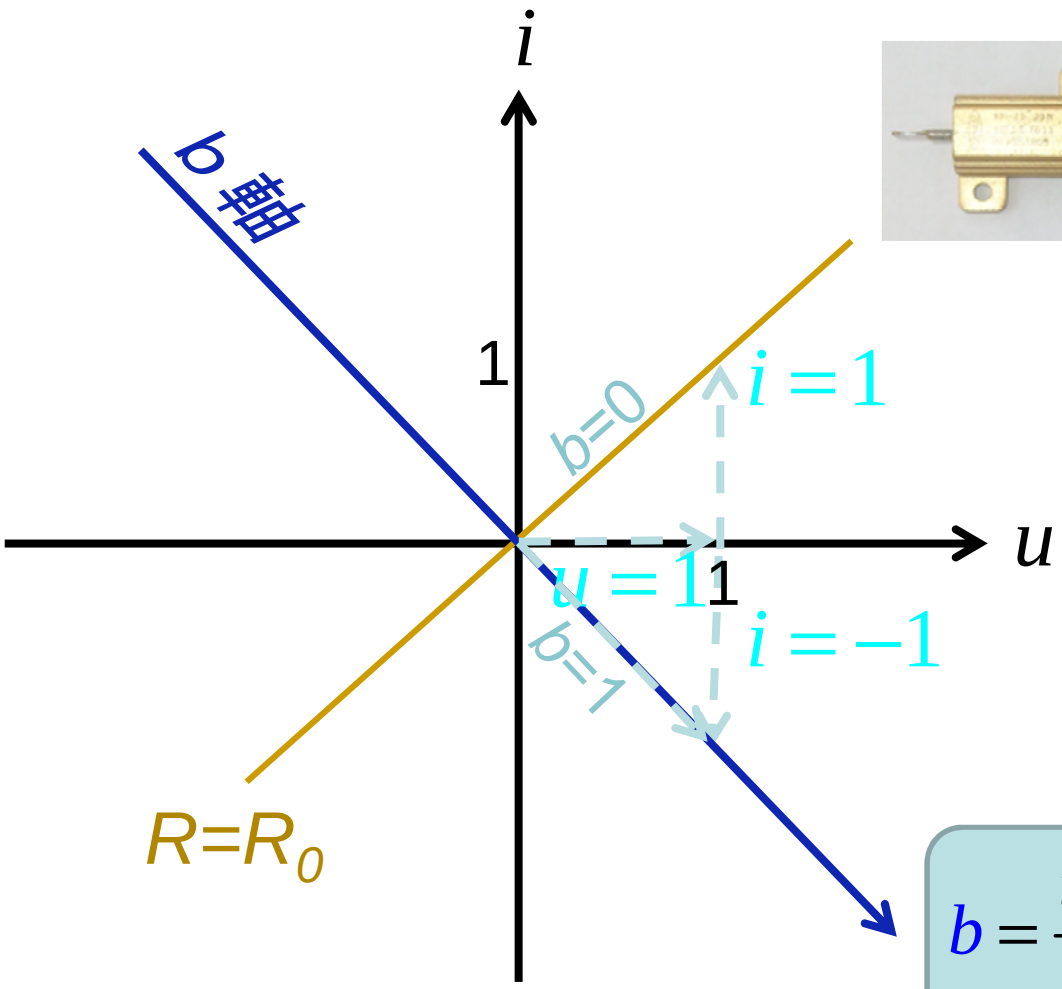
高抵抗値 $R>R_0$

角の二等分線
$u = i$

次に:
a-b座標を u-i座標の代わりに
用います…

Hochschule Ulm

電圧と電流から…
… bへ…

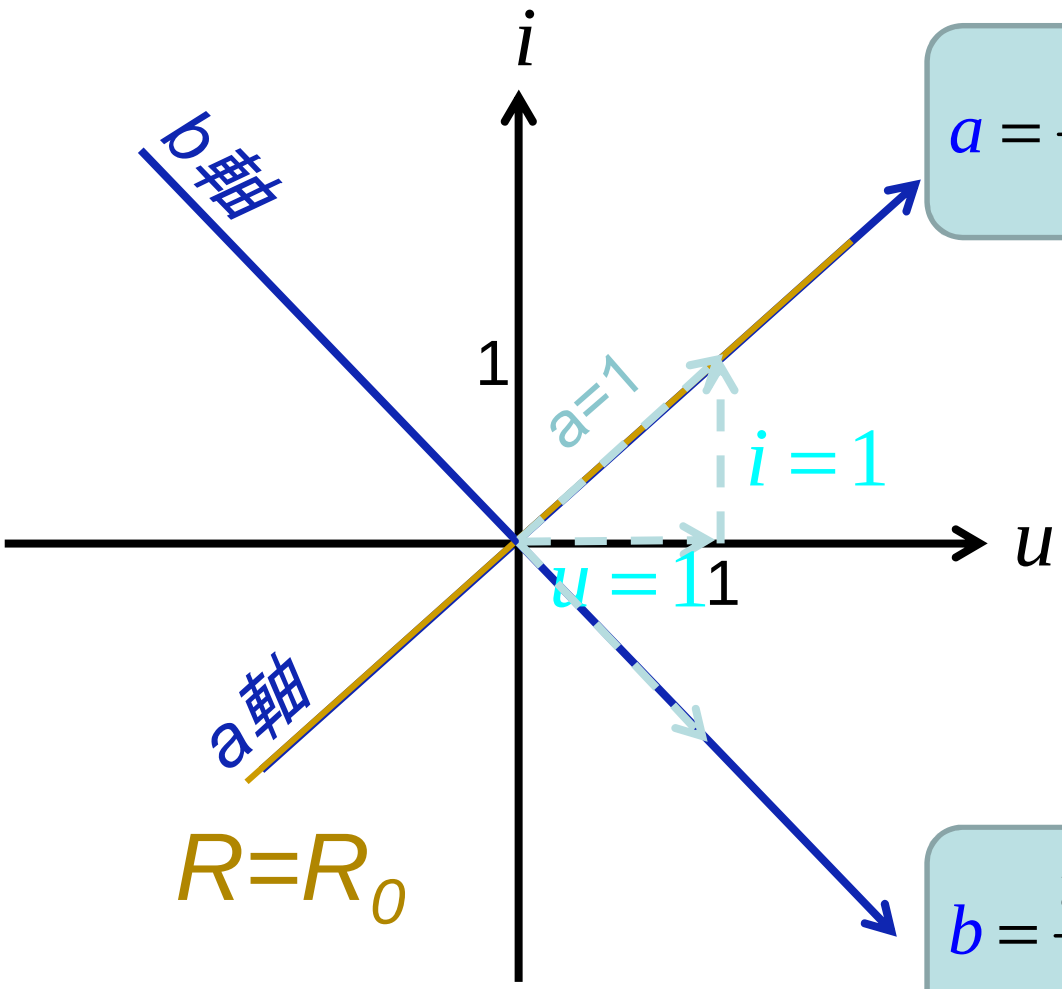




R=R0 の場合、bは
ゼロです。
つまり u = i の為。

$$b = \frac{u - i}{2}$$

電圧と電流から…
…bへ… さらにaへ！



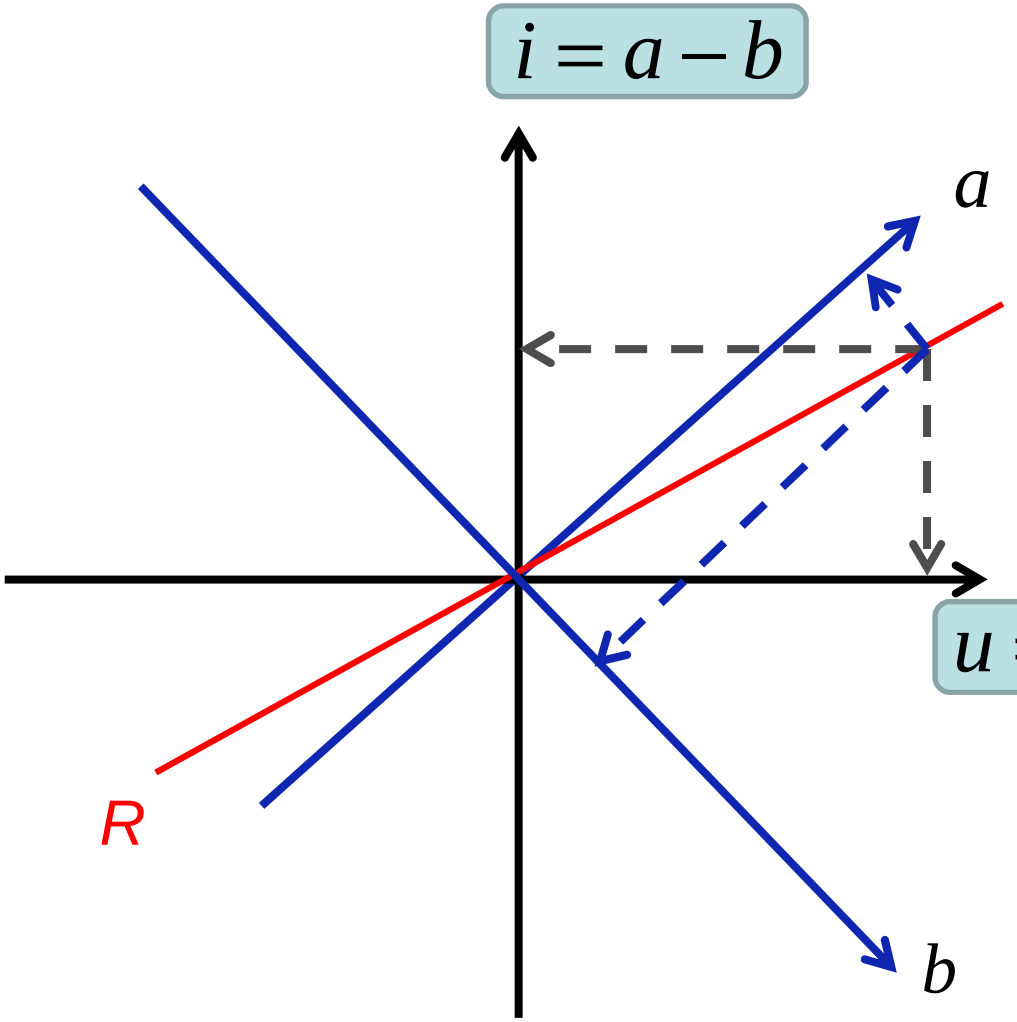
$$a = \frac{u+i}{2}$$

$$b = \frac{u-i}{2}$$

a軸は、b軸と
直行します。

Hochschule Ulm

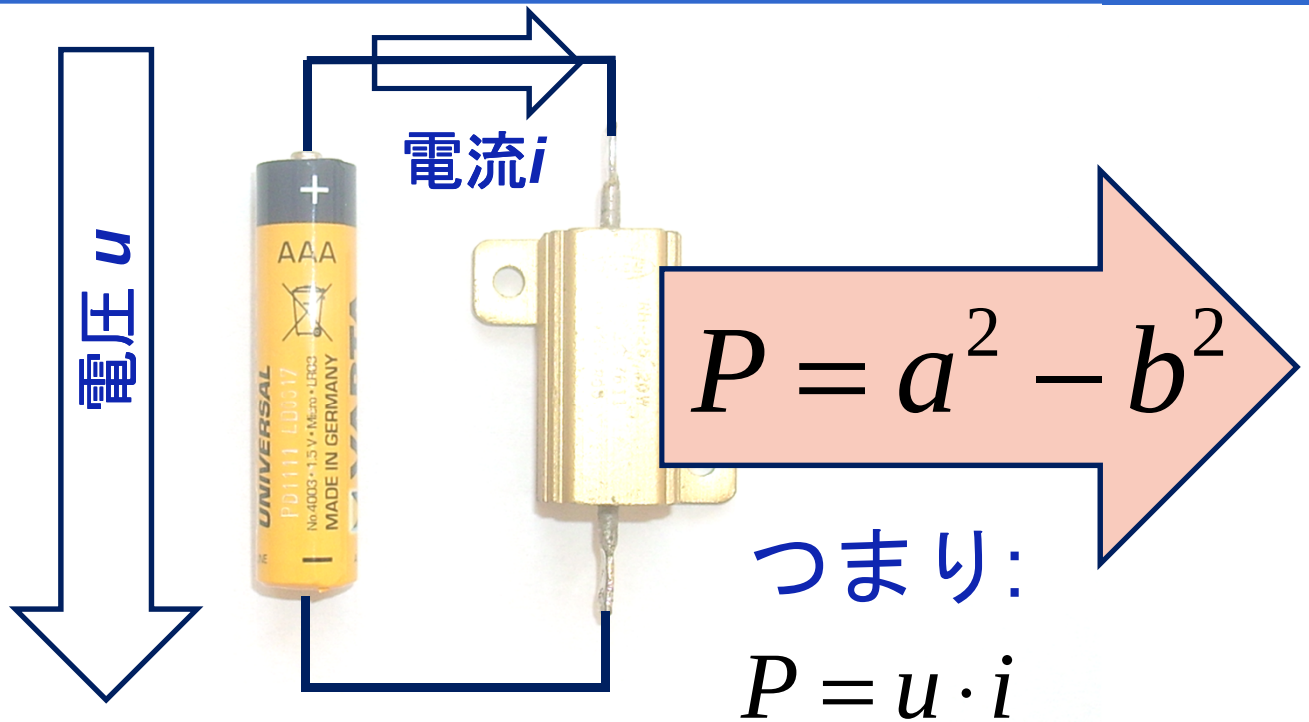
これは、逆の視点でも成立します:
a と b からの電圧と電流



任意抵抗 *R* は、(u,i) 又は(a,b)座標でも同様に説明できます。

Hochschule Ulm

直流への異なった角度からのアプローチ: 抵抗 R での放散電力



$$P = a^2 - b^2$$

つまり:

$$P = u \cdot i$$

$$= (a+b) \cdot (a-b)$$

$$= a^2 - b^2$$

$$R = R_0 \Rightarrow b = 0$$

$$\Rightarrow P = a^2 \text{ の場合}$$

Hochschule Ulm

結論:　a と b を電圧と電流の代わりに用いる



$$P = a^2 - b^2$$

電力 $P \leq a^2$

b=0 の場合, つまり $R=R_0$ で $P = a^2$ になる

a と *b* は、*u* と *i* と同一の情報を持っている：

$$u = a + b \quad u + i = 2a$$
$$\Leftrightarrow$$
$$i = a - b \quad u - i = 2b$$

Hochschule Ulm

金色RF基準抵抗:
特性ラインインピーダンス Z_0



Z中で最大の電力が消費されるのは、
b = 0 の場合、つまり $Z=Z_0$ の時で
ラインが整合状態にあります！

$$P = |a|^2 - |b|^2$$

$$\text{and} \quad b = 0$$

$$\text{if} \quad Z = Z_0$$

a = Zへの入射波
b = Zからの反射波

Hochschule Ulm

次に交流を印加してみましょう!
複素反射係数 S = b/a



a, b = 複素数、交流を加えるので振幅及び位相情報を持つことになります。

$$S = \frac{b}{a} = \frac{u - i}{u + i} = \frac{\frac{u}{i} - 1}{\frac{u}{i} + 1} = \frac{z - 1}{z + 1}$$

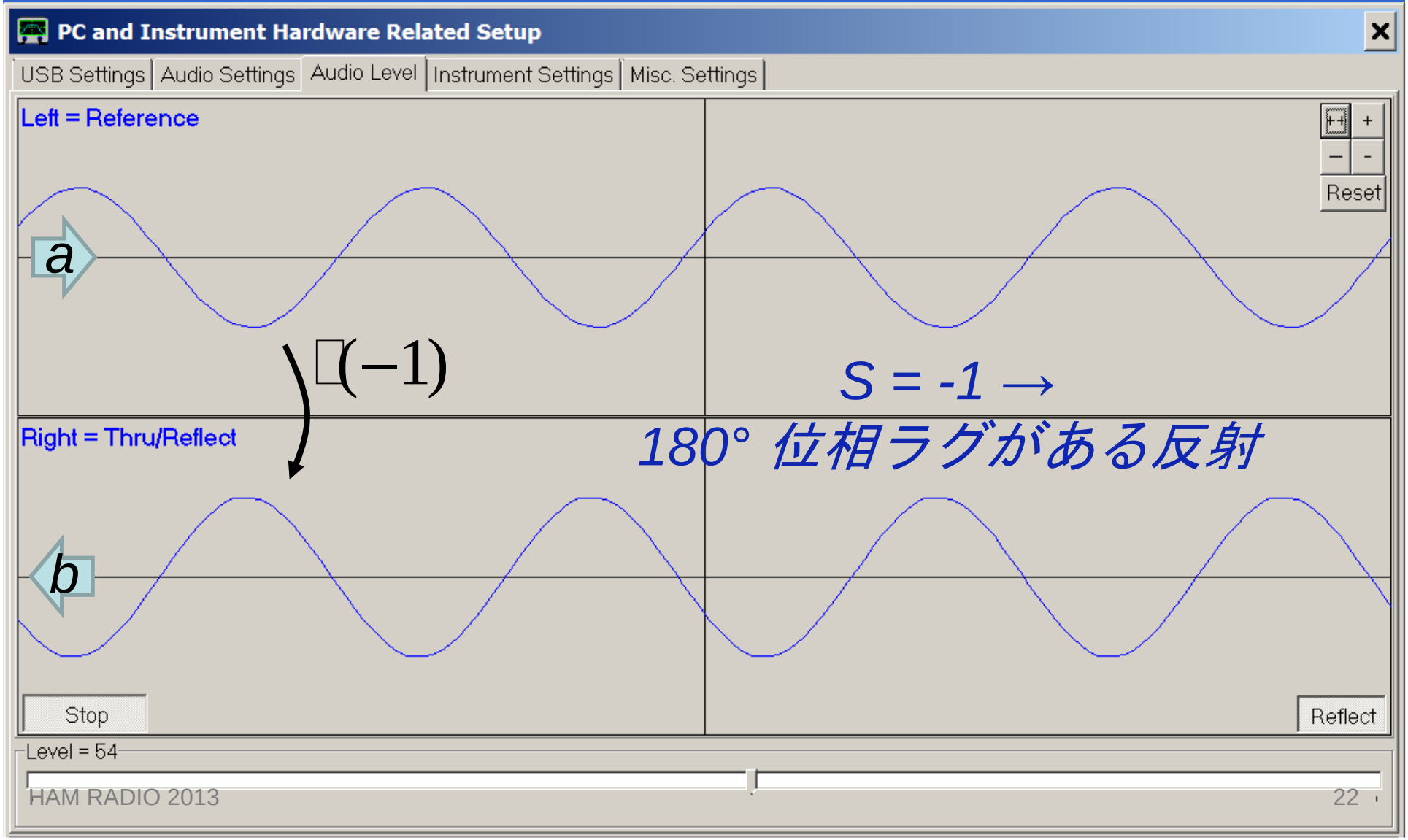
Zが右の場合

$$z = \frac{Z}{Z_0}$$

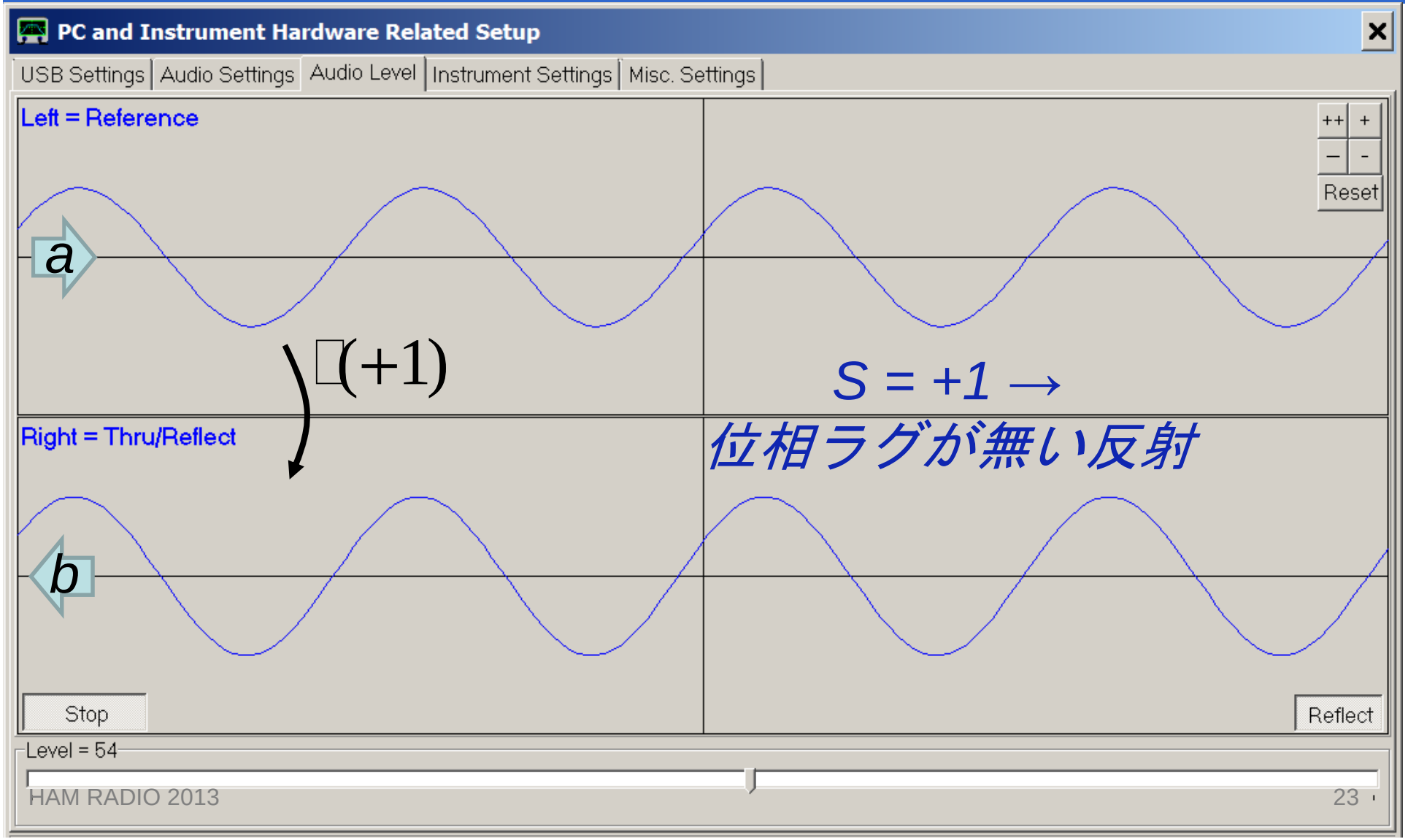
例: ショート - $z = 0 \rightarrow S = -1$

Hochschule Ulm

VNWAで a と b を見てみましょう
例： ショート回路 S=-1

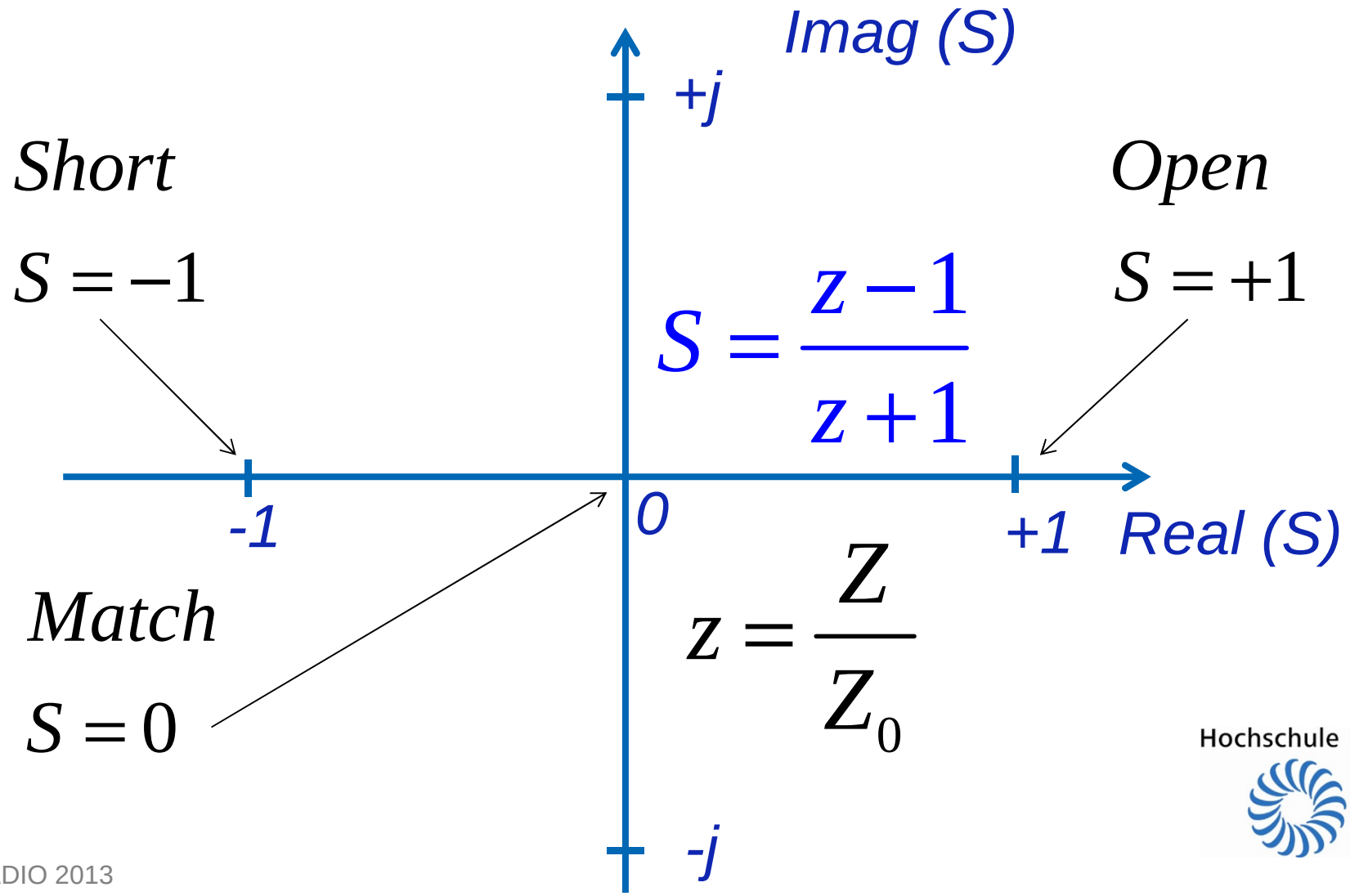


VNWAで a と b を見てみましょう
例： オープン回路 S=+1:

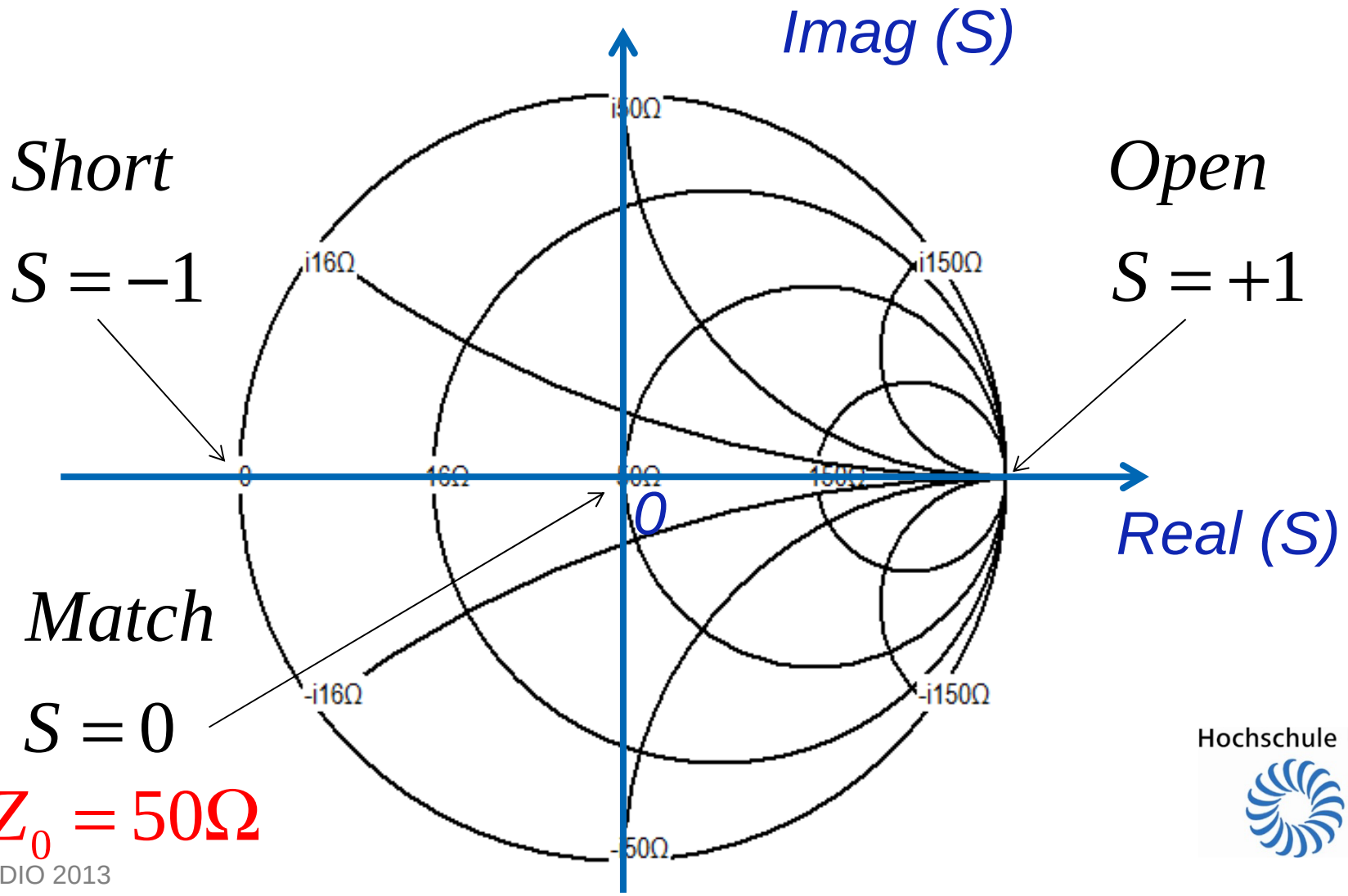


複素反射係数 S = b/a

…


Imag (S)
+j
Short
S = −1
Open
S = +1
$S = \frac{z-1}{z+1}$
-1
0
+1
Real (S)
Match
S = 0
$z = \frac{Z}{Z_0}$
-j

複素反射係数 S = b/a とスミスチャート

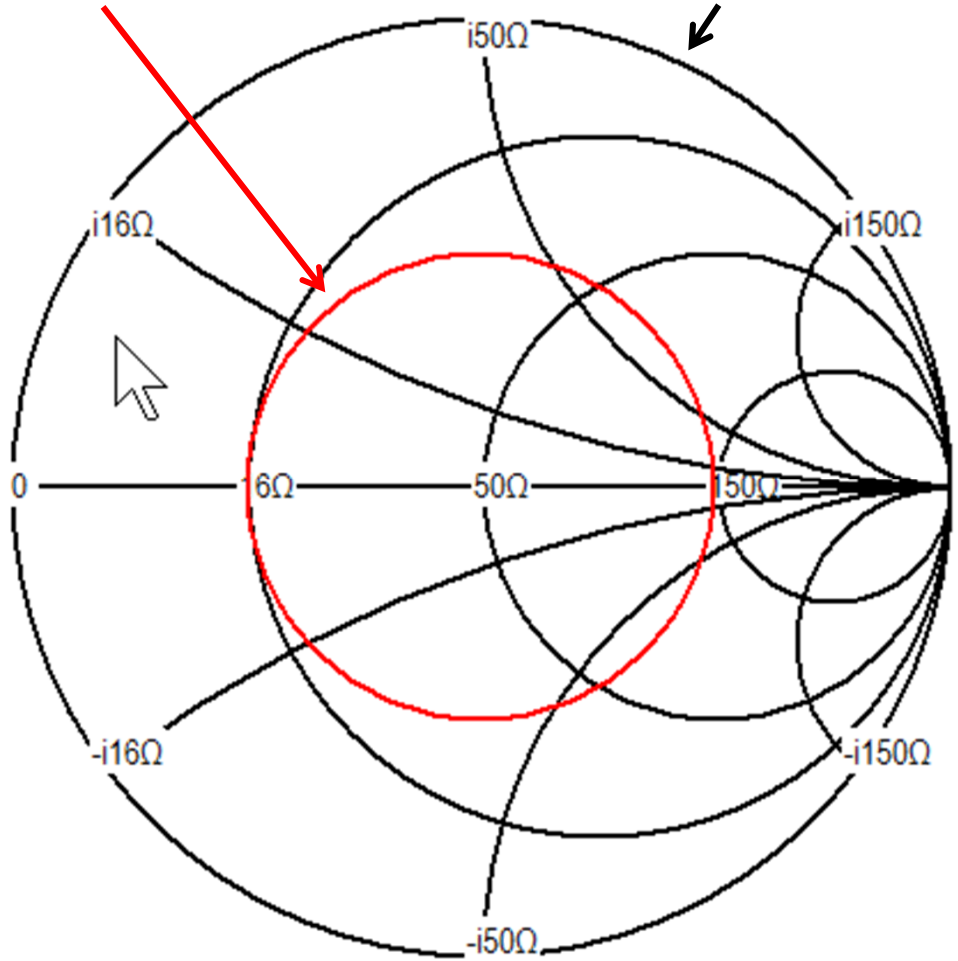


Hochschule Ulm

複素反射係数 S = b/a と定在波比 VSWR

$|S| = 0{,}5 \quad VSWR = 3$

$|S| = 1 \quad VSWR = \infty$



0,5·0,5=25% 反射電力

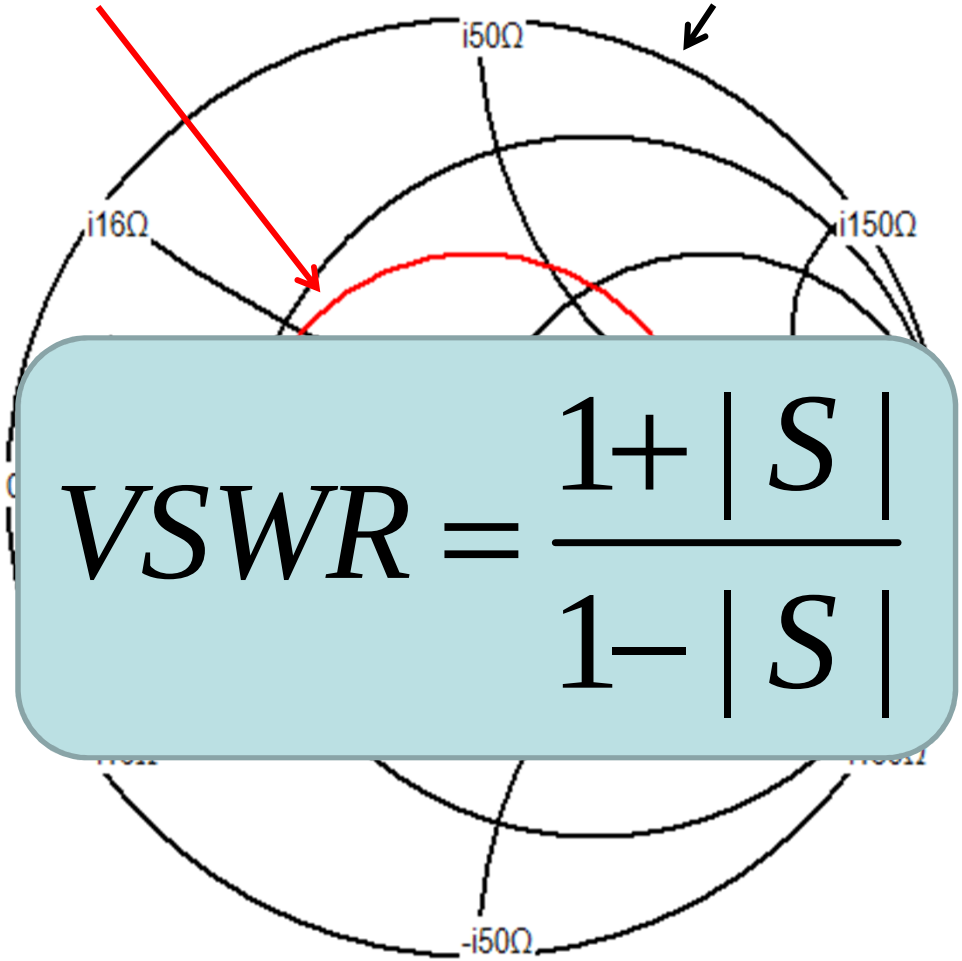
1·1=100% 反射電力

Hochschule Ulm

複素反射係数 S = b/a と定在波比 VSWR

$|S| = 0{,}5 \quad VSWR = 3$

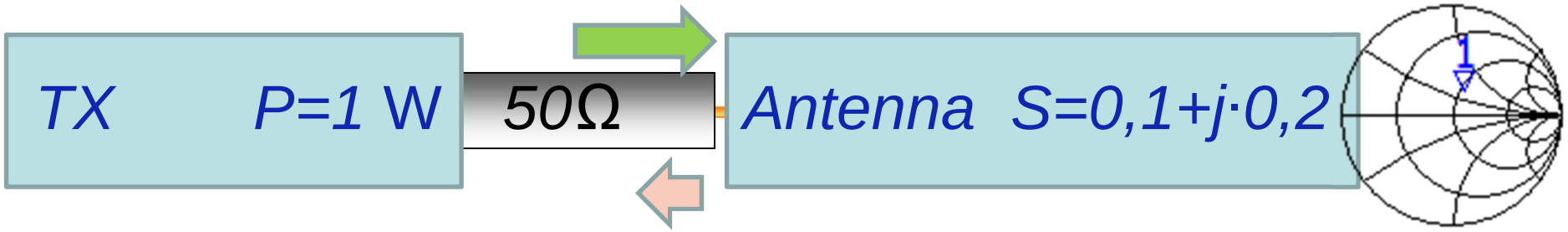
$|S| = 1 \quad VSWR = \infty$



$$VSWR = \frac{1 + |S|}{1 - |S|}$$

Hochschule Ulm

複素反射係数 S = b/a
算出例: 反射電力



$$a = \sqrt{1\,\mathrm{W}} = 1\sqrt{\mathrm{W}}$$

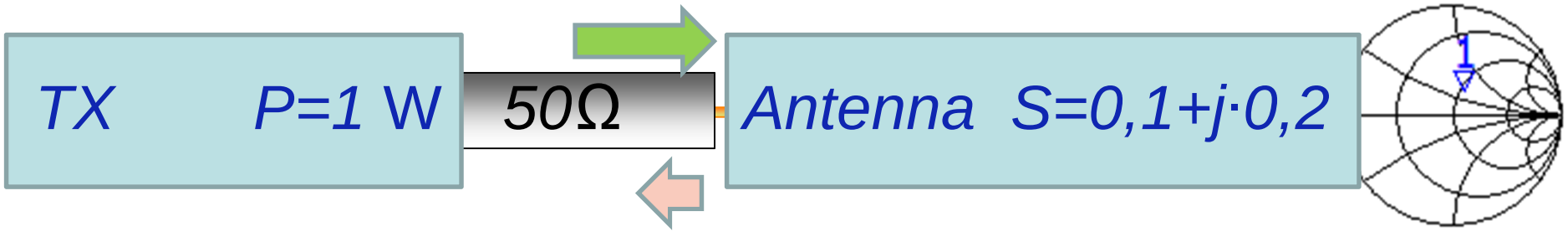
$$b = S \cdot a = (0{,}1 + j0{,}2) \cdot \sqrt{1\,\mathrm{W}} = 0{,}1\sqrt{\mathrm{W}} + j0{,}2\sqrt{\mathrm{W}}$$

反射電力:

$$P_r = |b|^2 = 0{,}1^2 + 0{,}2^2\ \mathrm{W} = 0{,}05\,\mathrm{W}$$

Hochschule Ulm

複素反射係数 S = b/a
算出例: VSWR



$$a = 1\sqrt{\mathrm{W}} \qquad b = 0{,}1\sqrt{\mathrm{W}} + j0{,}2\sqrt{\mathrm{W}}$$

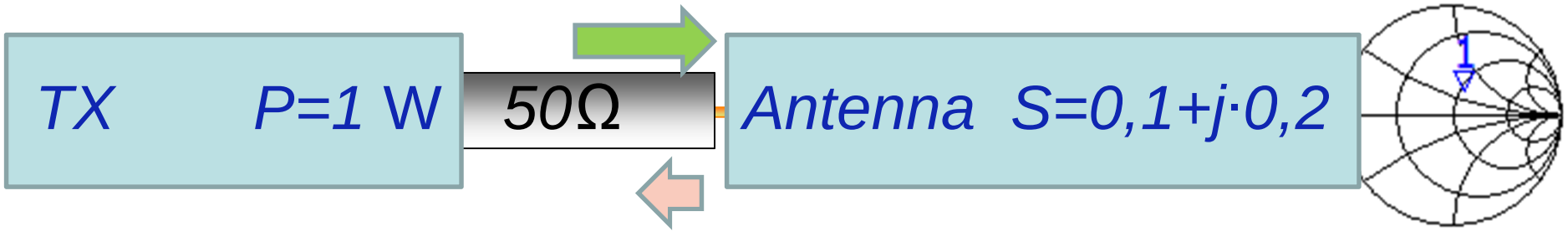
VSWR:

$$|S| = \sqrt{0{,}1^2 + 0{,}2^2} \approx 0{,}22$$

$$VSWR = \frac{1+|S|}{1-|S|} \approx \frac{1+0{,}22}{1-0{,}22} \approx 1{,}6$$

Hochschule Ulm

複素反射係数 S = b/a
算出例: アンテナ電圧



$$a = 1\sqrt{\mathrm{W}} \qquad b = 0{,}1\sqrt{\mathrm{W}} + j0{,}2\sqrt{\mathrm{W}}$$

アンテナ側での実行電圧

$$u = a + b = 1{,}1\sqrt{\mathrm{W}} + j0{,}2\sqrt{\mathrm{W}}$$

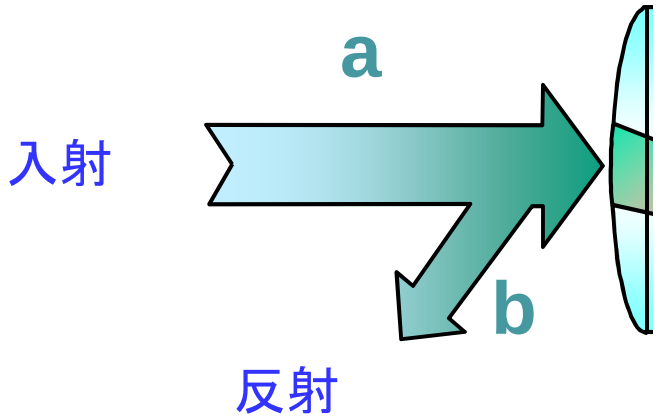
$$U = u \cdot \sqrt{Z_0} = u \cdot \sqrt{50\,\Omega} \approx 7{,}8\,\mathrm{V} + j1{,}4\,\mathrm{V}$$

$$U_{eff} = |U| = \sqrt{7{,}8^2 + 1{,}4^2}\ \mathrm{V} \approx 7{,}9\,\mathrm{V}$$

Hochschule Ulm

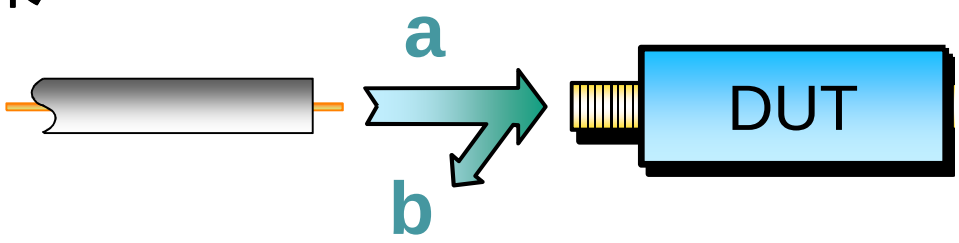
複素反射係数 $S = b/a$
この時点でスキャッタリングパラメータと呼ぶことにします!

工学系



1ポートの場合の波の分散及び吸収

電気系

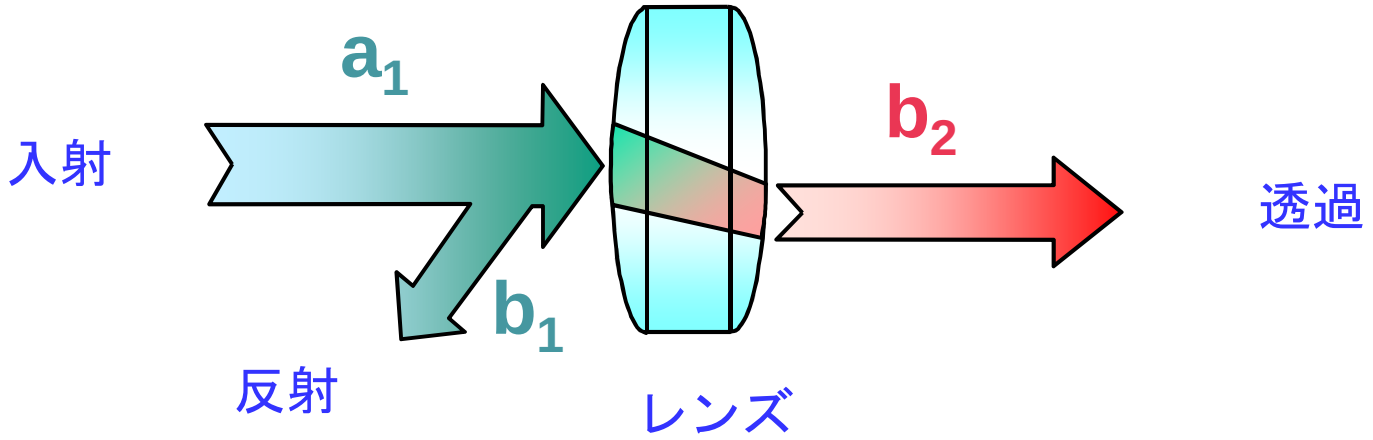


DUT : 被試験体

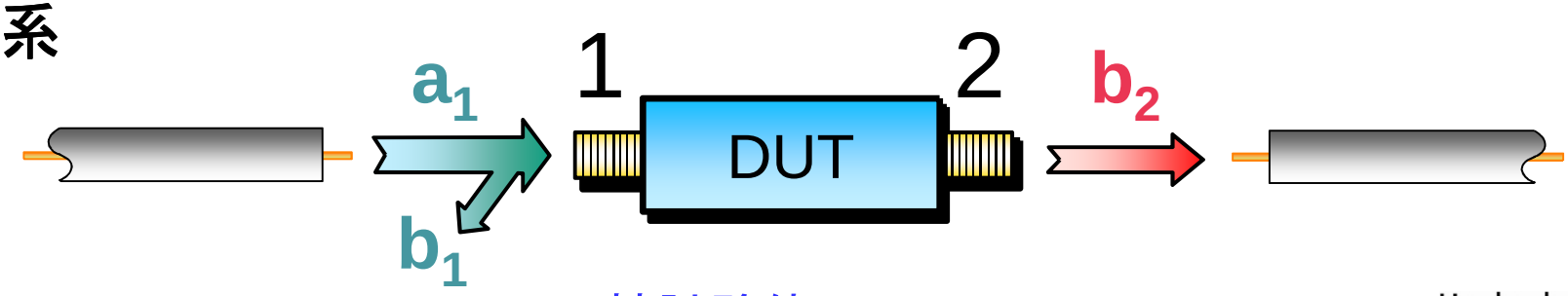
Hochschule Ulm

スキャッタリングパラメータ、略して Sパラメータ: 次は２ポートです!

工学系



電気系

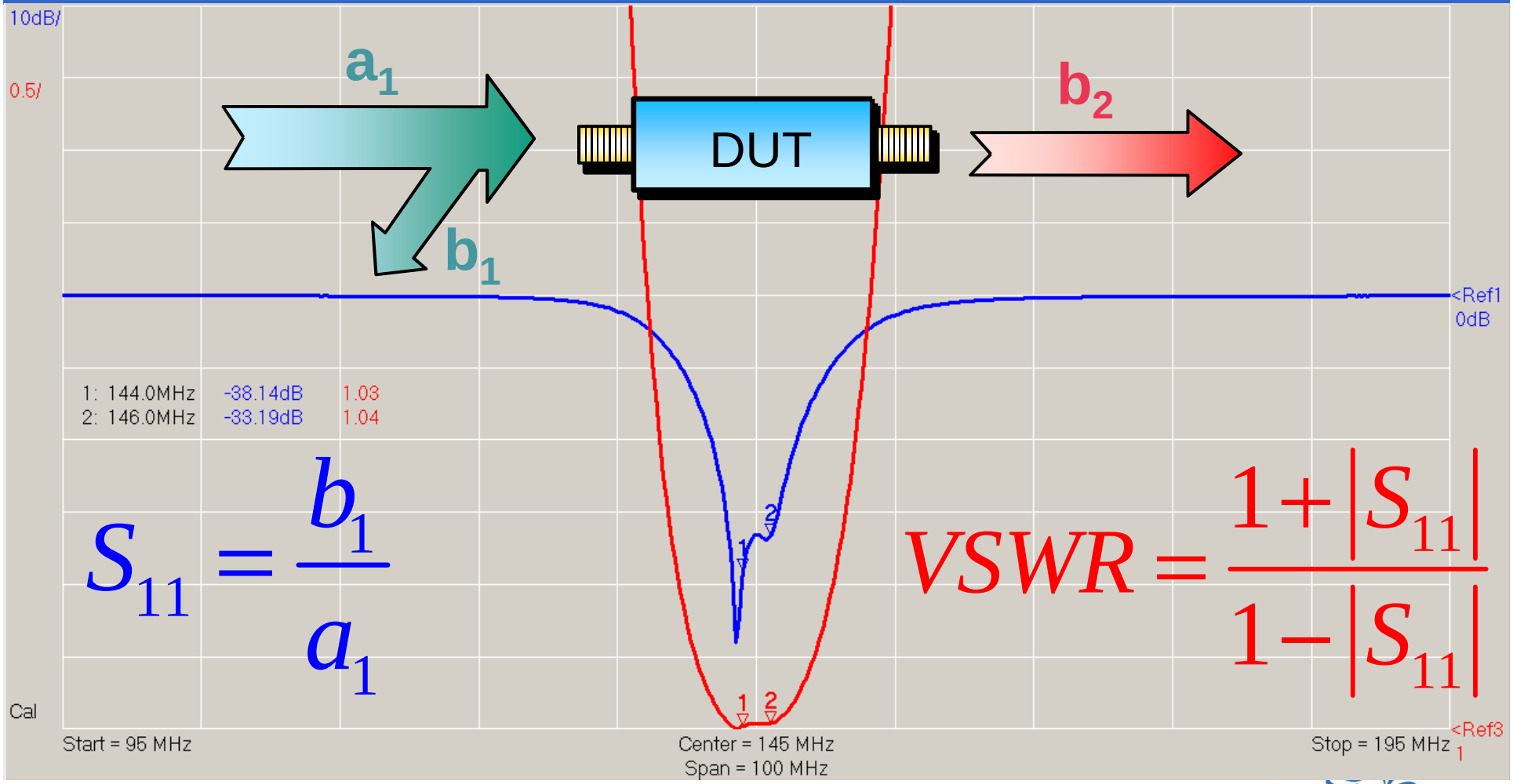


DUT : 被試験体

Hochschule Ulm

Sパラメータ　S_{11}（これ以前はSと表記）

$|S_{11}|$ → リターンロス

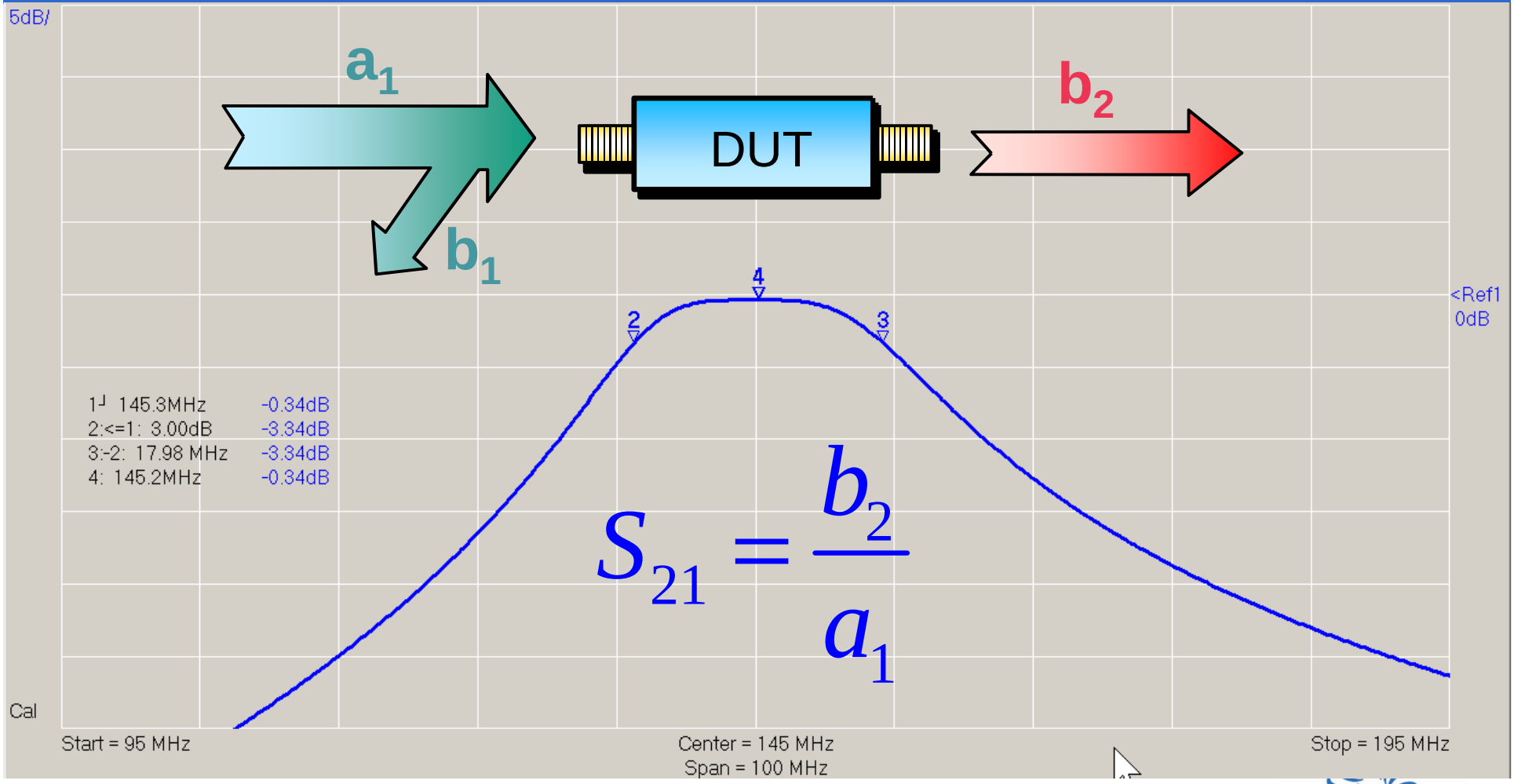


$$S_{11} = \frac{b_1}{a_1}$$

$$VSWR = \frac{1+|S_{11}|}{1-|S_{11}|}$$

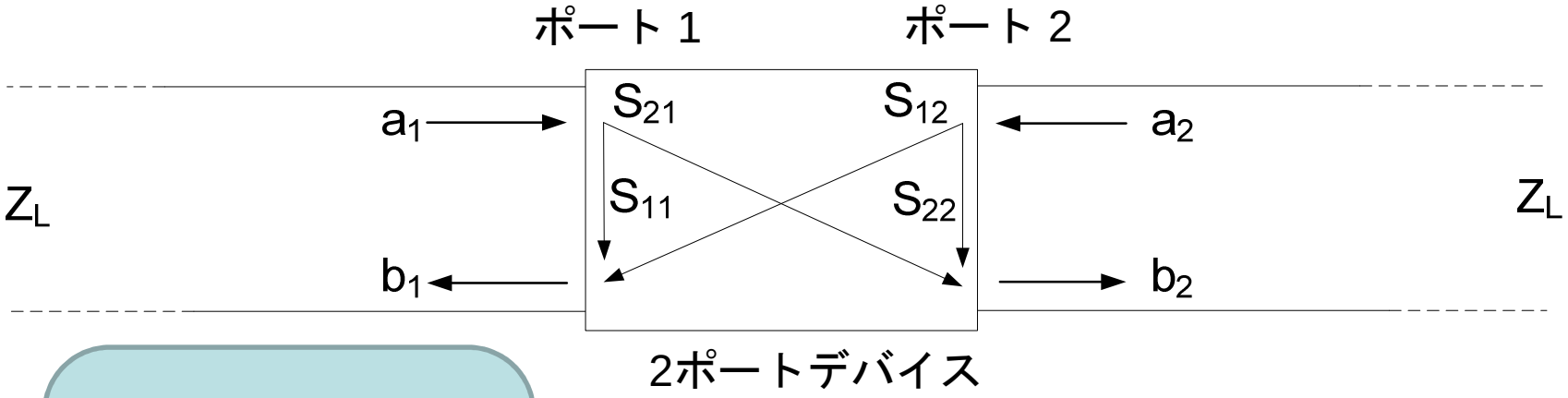
Sパラメータ　S_{21}

$|S_{21}|$ = 送出利得



概論:
Sパラメータ　S_{ik}





$$S_{ik} = \frac{b_i}{a_k}$$

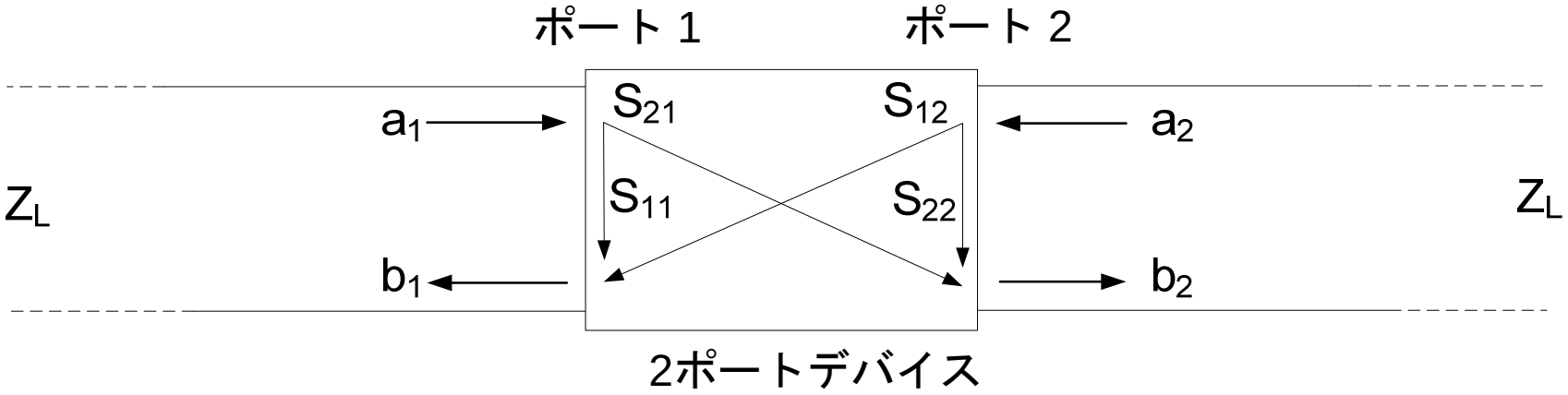
$$i,k = 1 \ldots \text{number of ports}$$

1... ポートの番号

Hochschule Ulm

概論:
Sパラメータ　S_{ik}

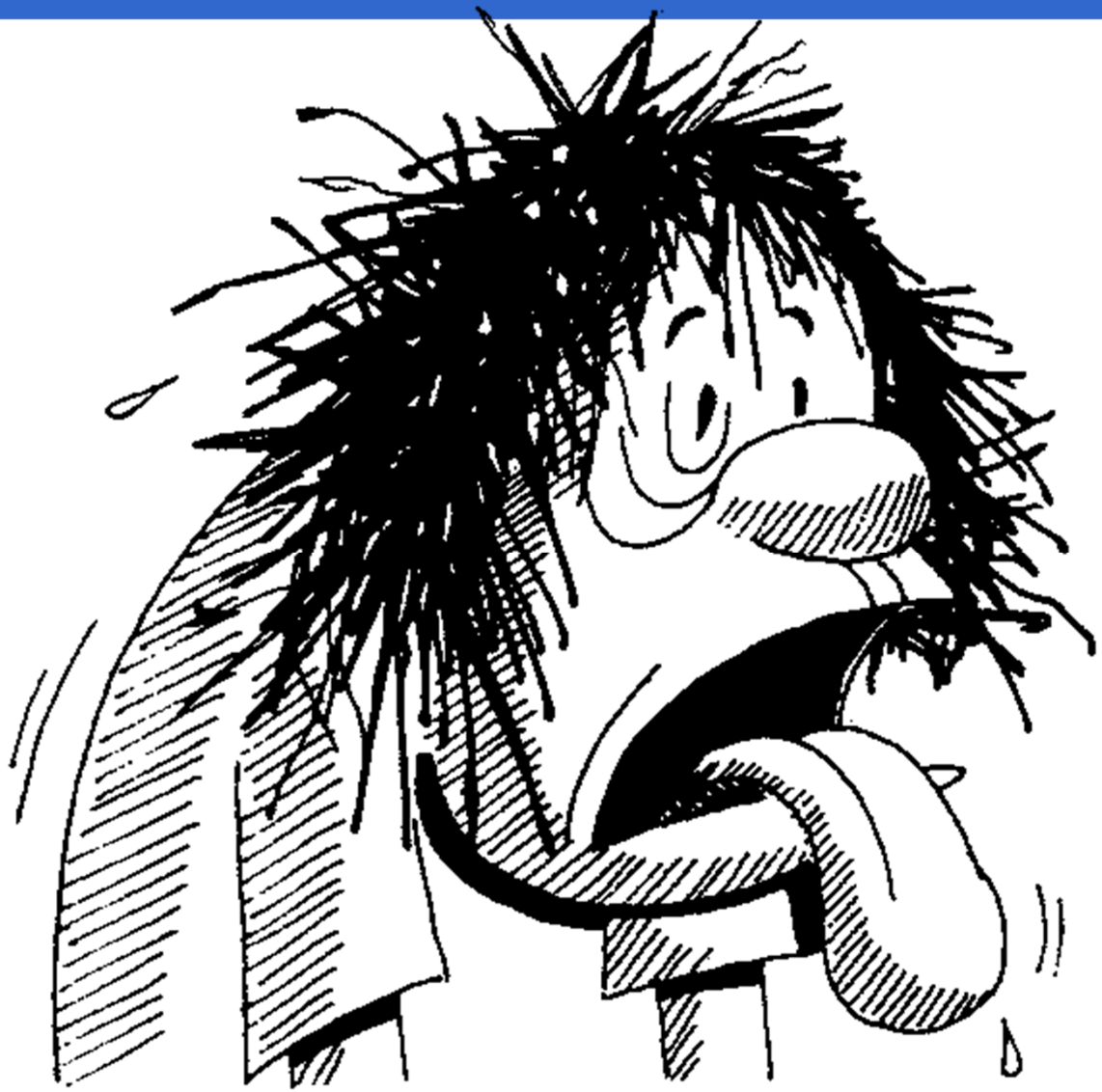




スキャッタリングパラメータ　S_{11}, S_{21}, S_{12}, S_{22}
は完全にリニア型２ポートデバイスを定義してくれます!
=> シミュレーションに便利

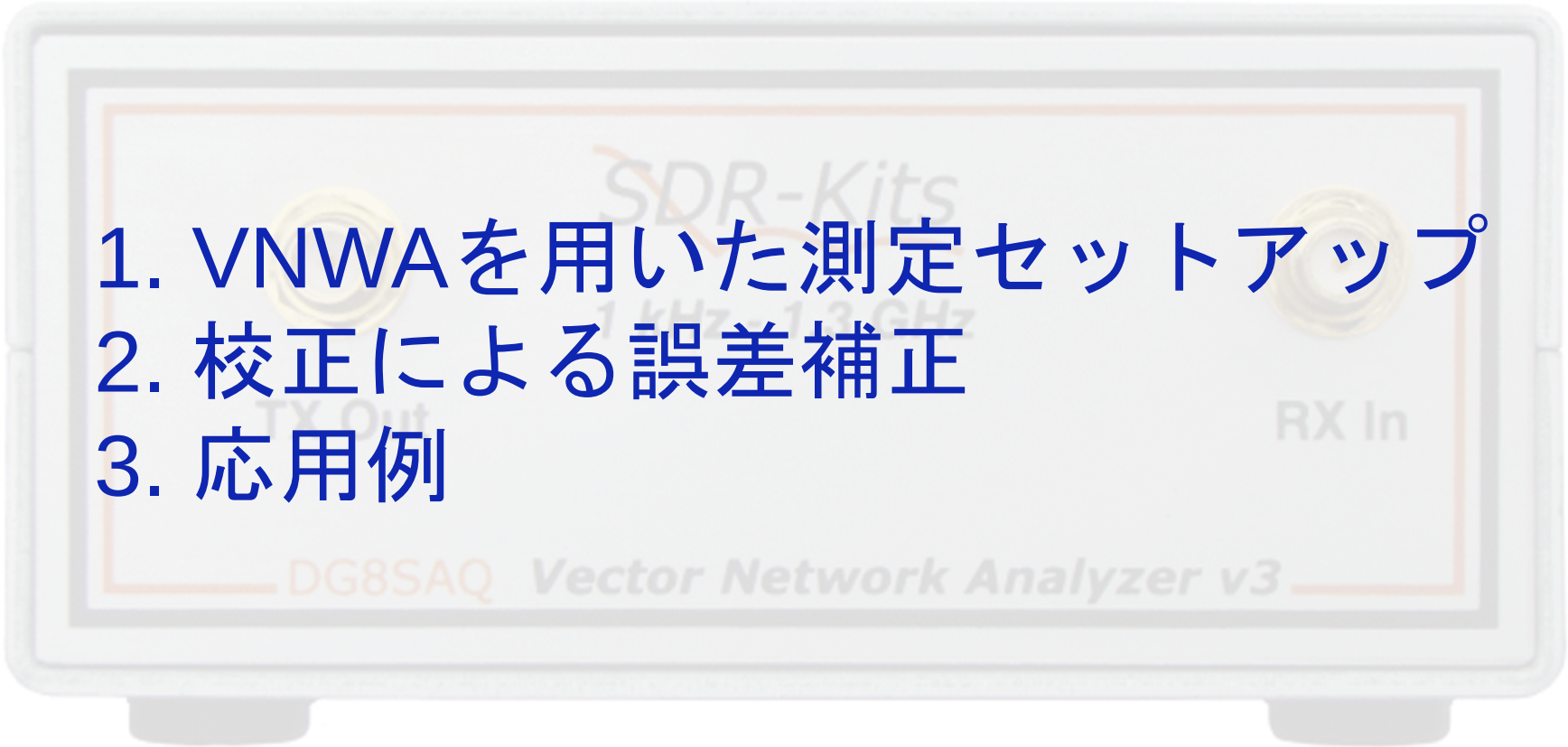
Hochschule Ulm

休憩 ???



Hochschule Ulm

ベクトルネットワークアナライザー（VNA)を用いたSパラメータの測定

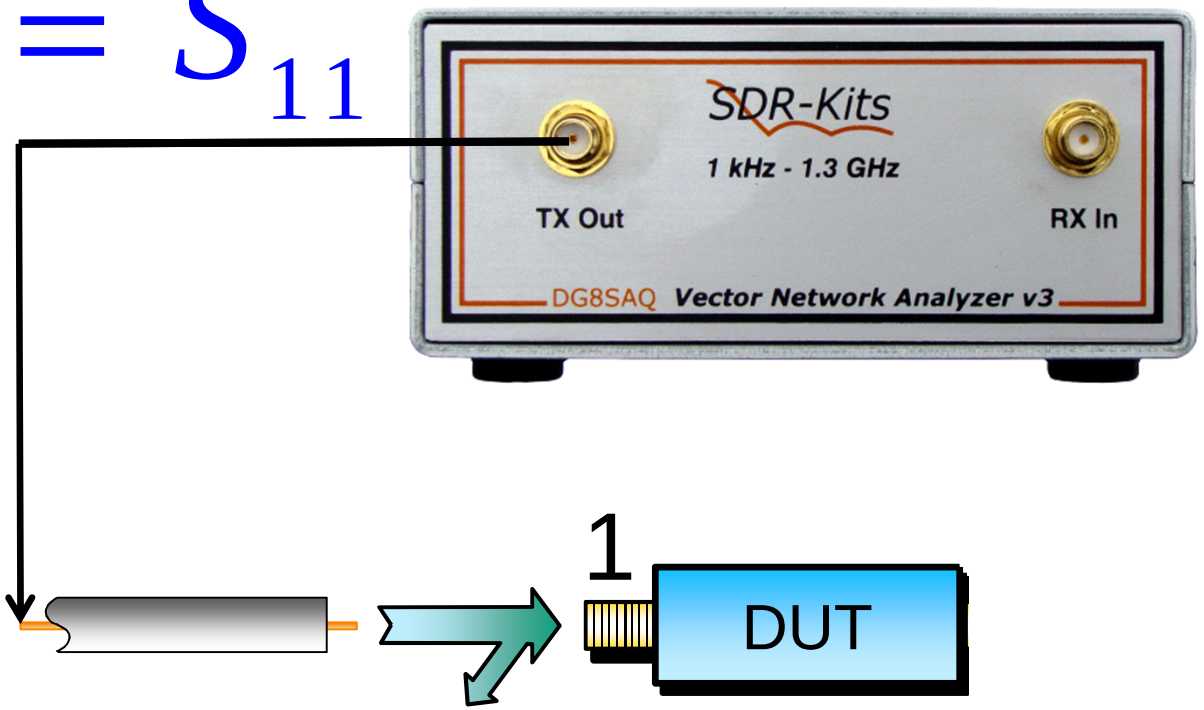


1. VNWAを用いた測定セットアップ
2. 校正による誤差補正
3. 応用例

Hochschule Ulm

VNWAを用いた測定セットアップ
例： 1ポートデバイス

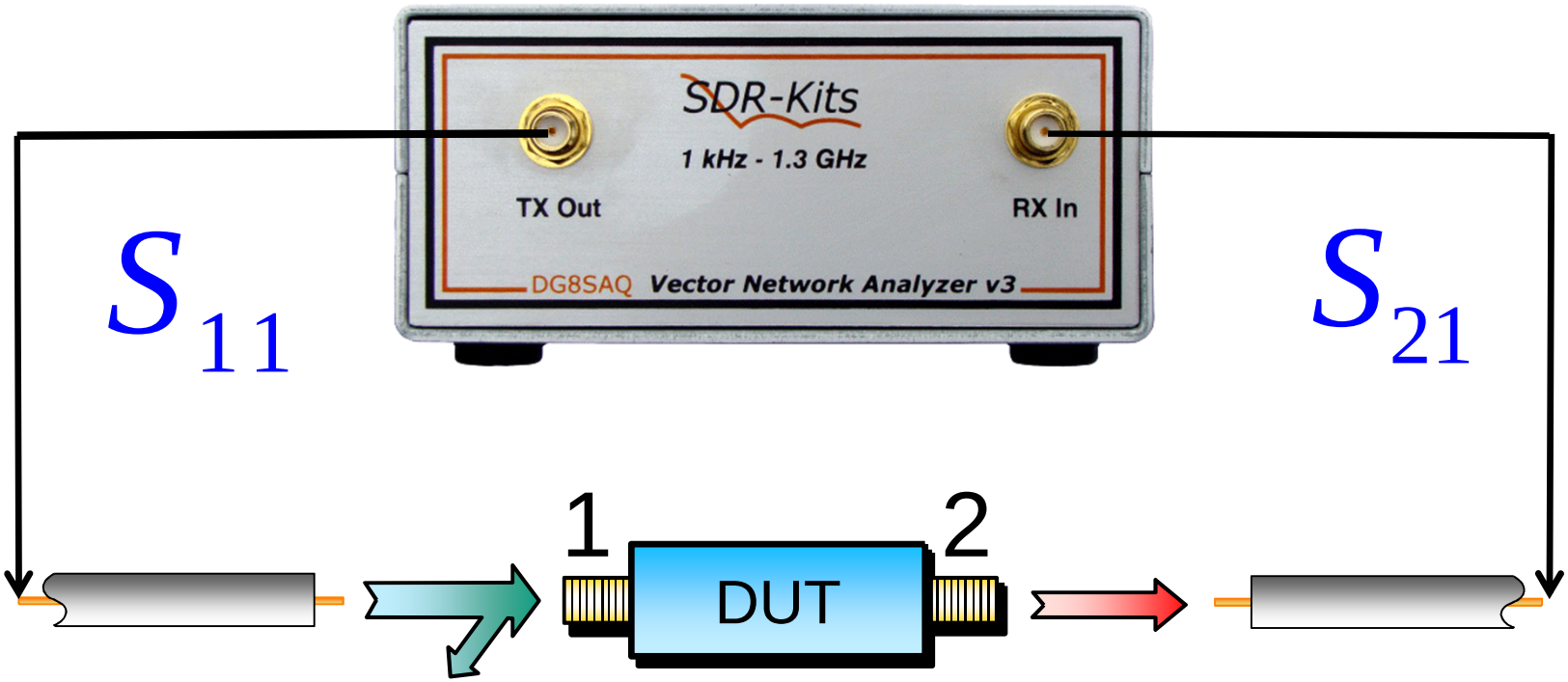
$$S = S_{11}$$



DUT : 被試験体

Hochschule Ulm

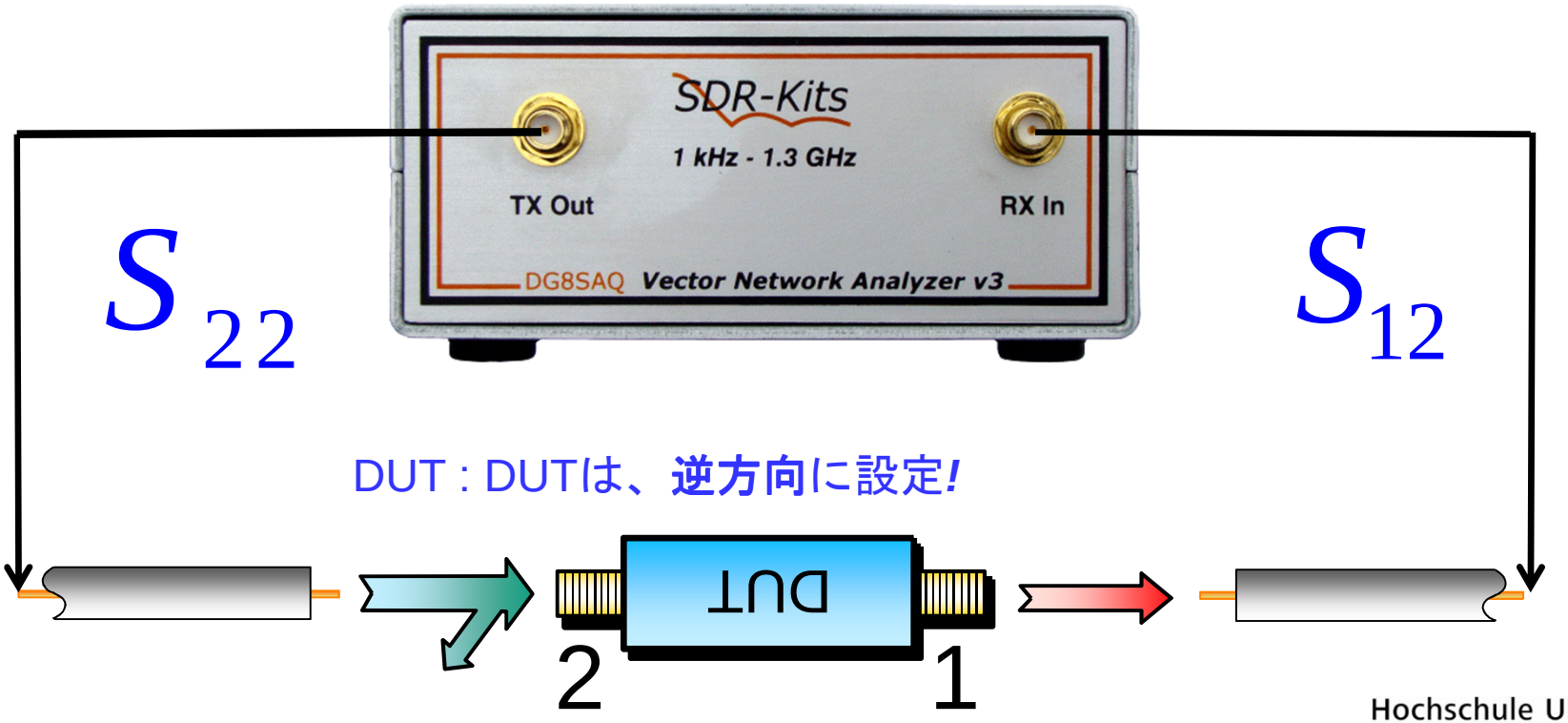
VNWAを用いた測定セットアップ
例： ２ポートデバイス – フォワード（順行）



DUT : 被試験体

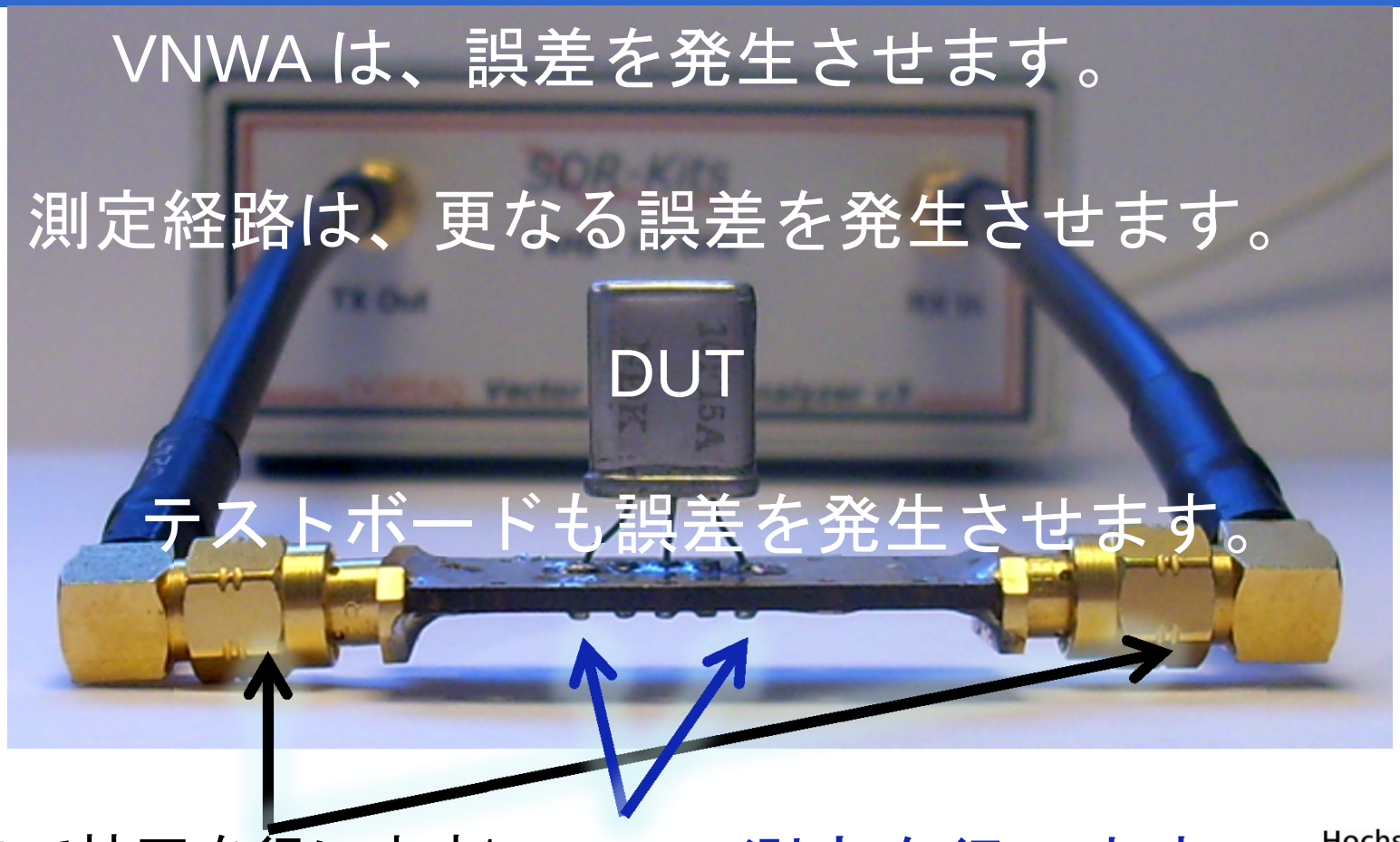
Hochschule Ulm

VNWAを用いた測定セットアップ
例： ２ポートデバイス – リバース（逆行）



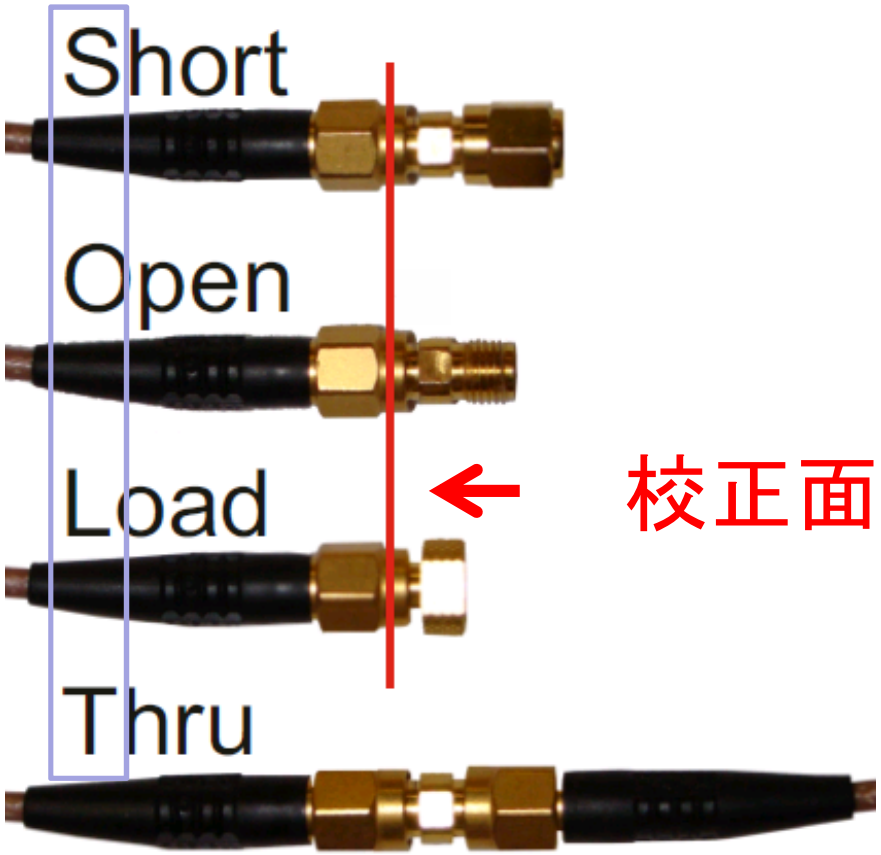
Hochschule Ulm

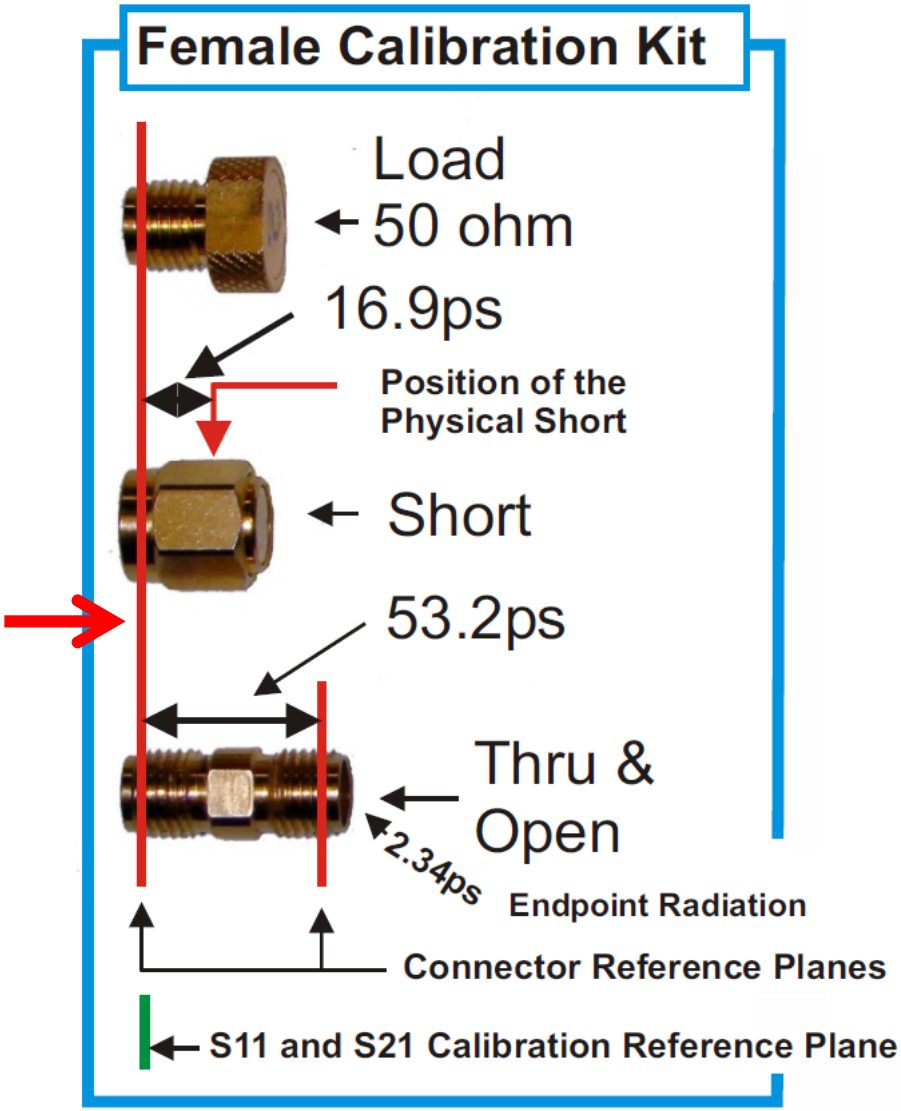
校正による誤差補正
誤差の原因



Hochschule Ulm

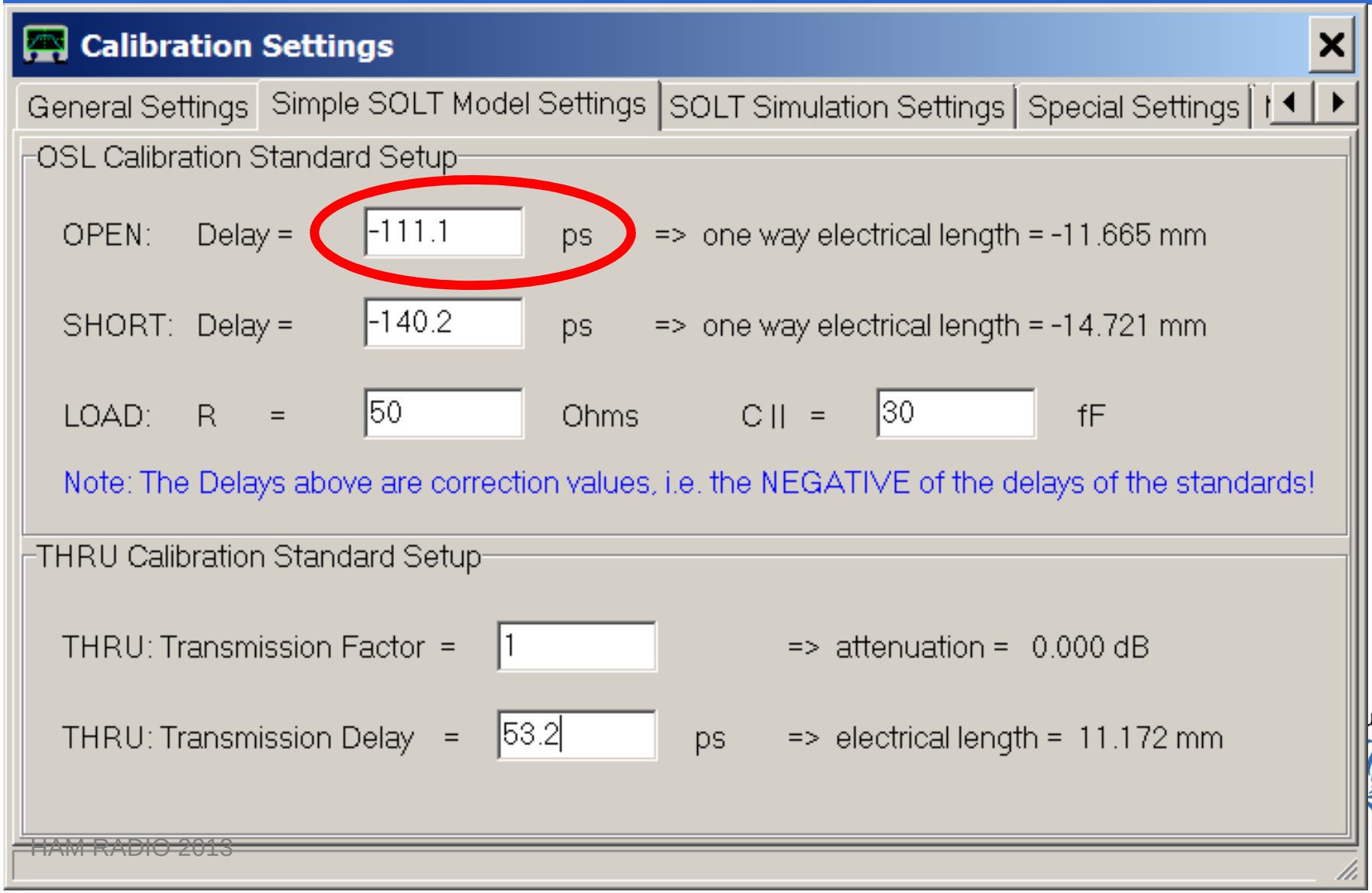
SOLT校正によりVNWAとテストケーブルからの誤差を取り除きます...



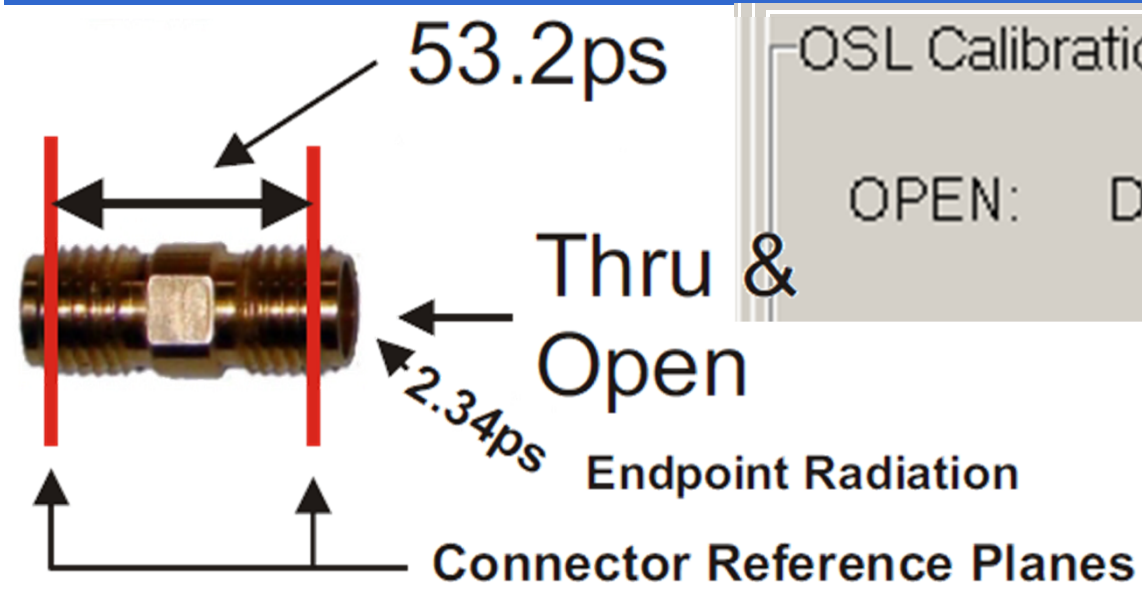


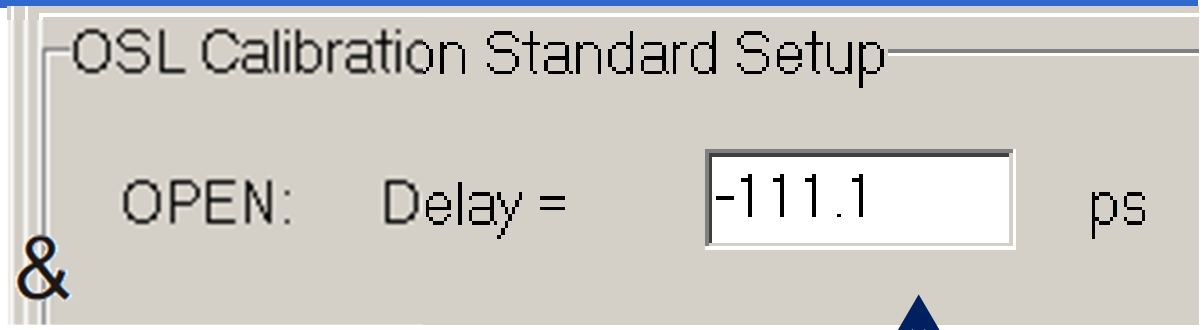
http://www.hamcom.dk/VNWA/

… 校正基準器の特性が分かっている限りは!



例： オープン基準器

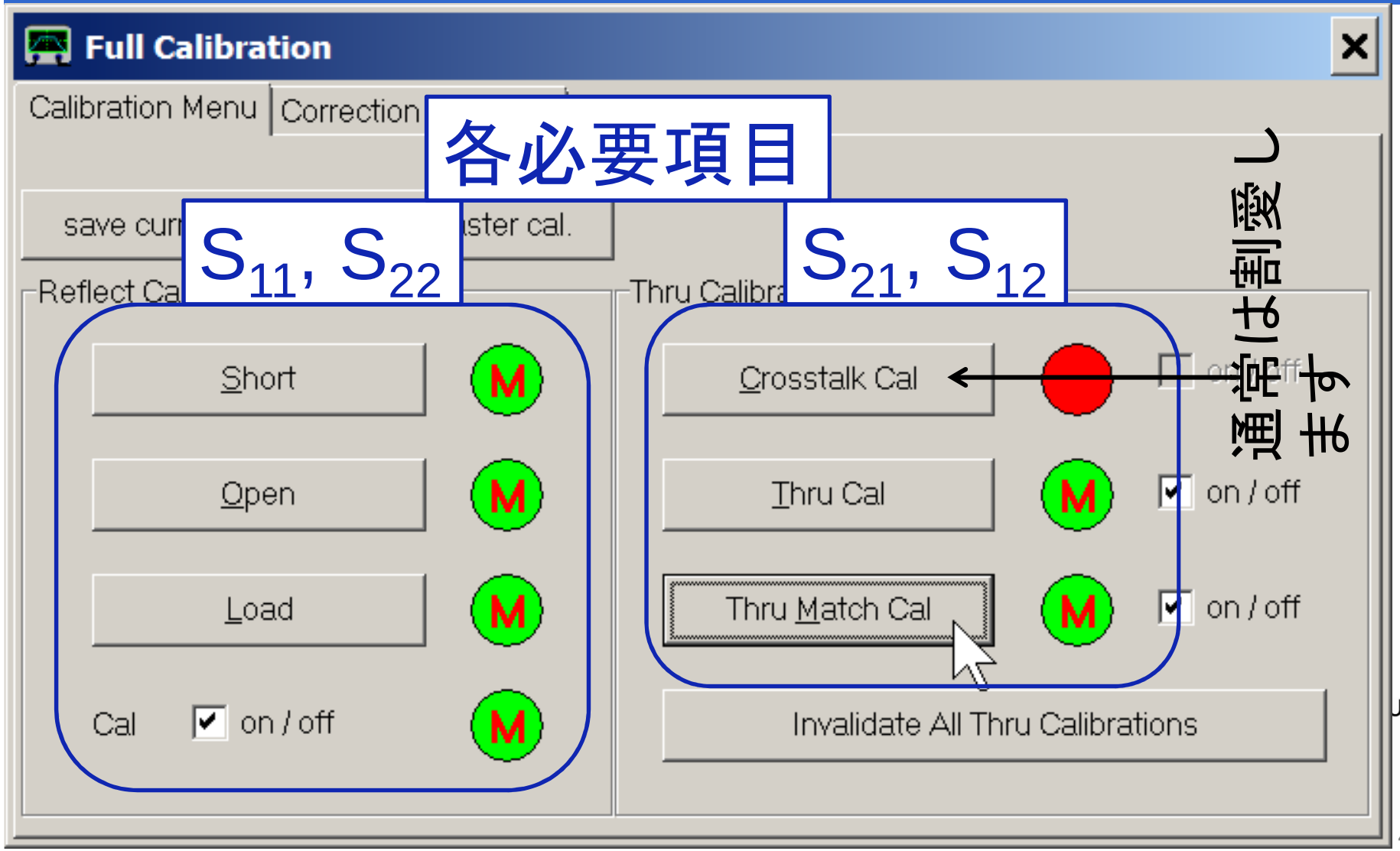




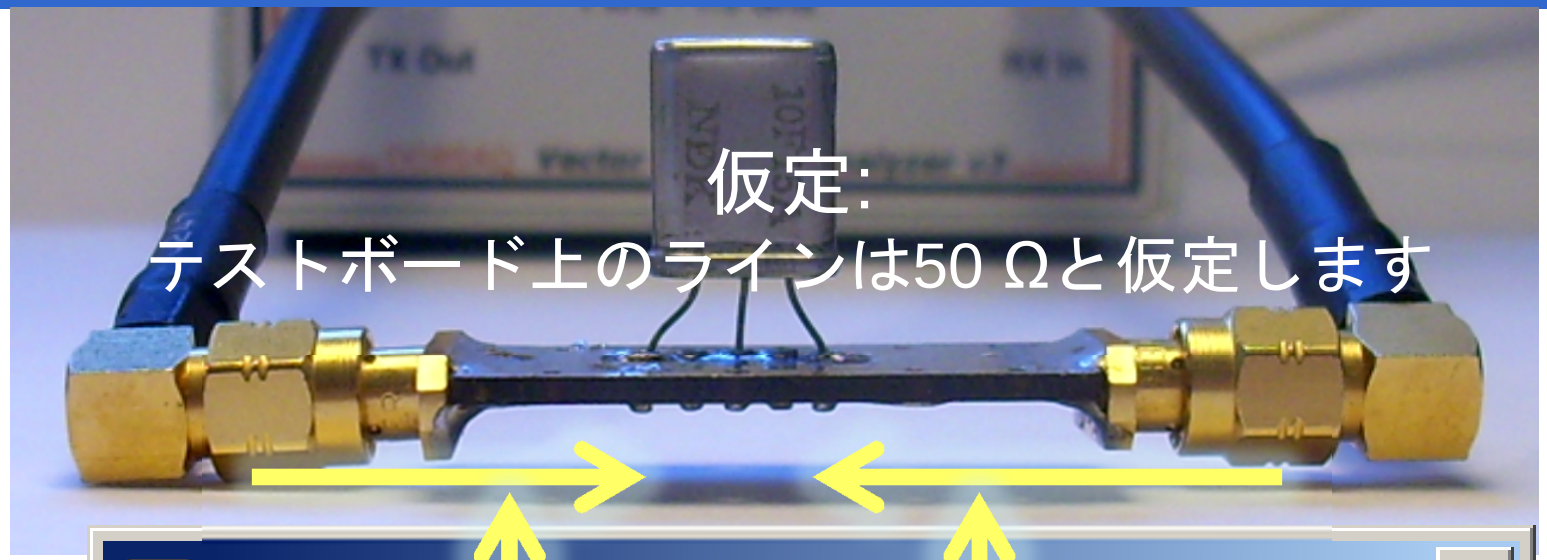
信号は、２回通過します。つまり順方向と逆方向にです:

$$\tau = -2 \times (53{,}2\ \text{ps} + 2{,}34\ \text{ps}) = -111.08\ \text{ps}$$

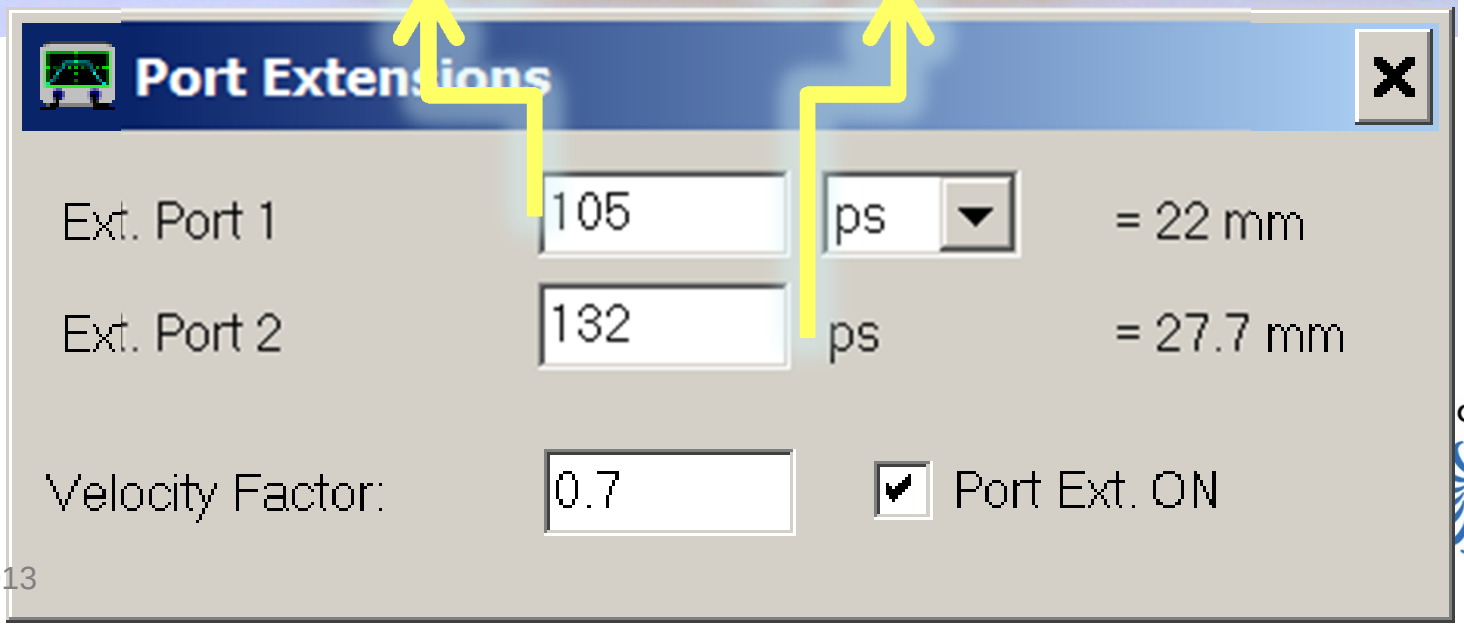
それでは、基準器をVNWAに接続して校正を行なってみましょう。



ポートエクステンションでの遅延補正

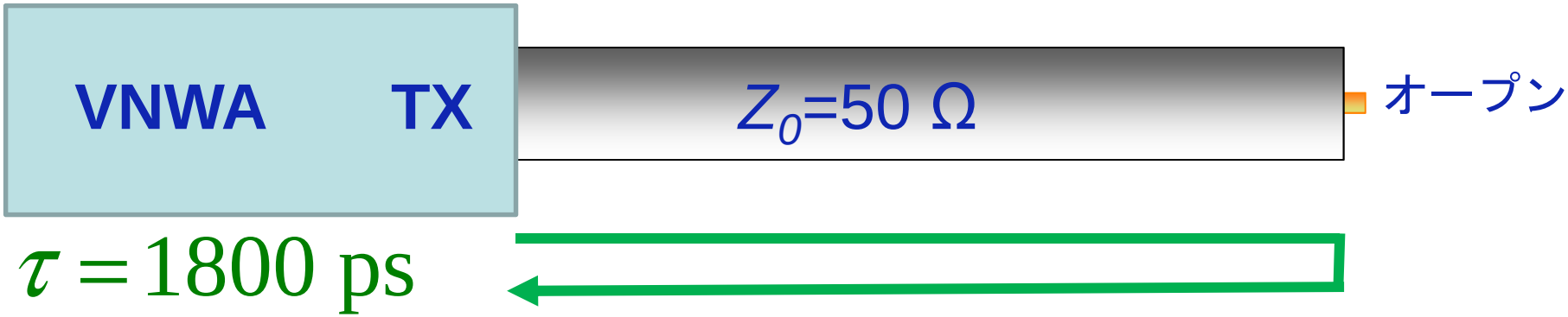


S_{11}
S_{22}



chule Ulm

誤った校正パラメータは、ポート不整合をもたらします。
例: オープン　50Ω – ライン (1)



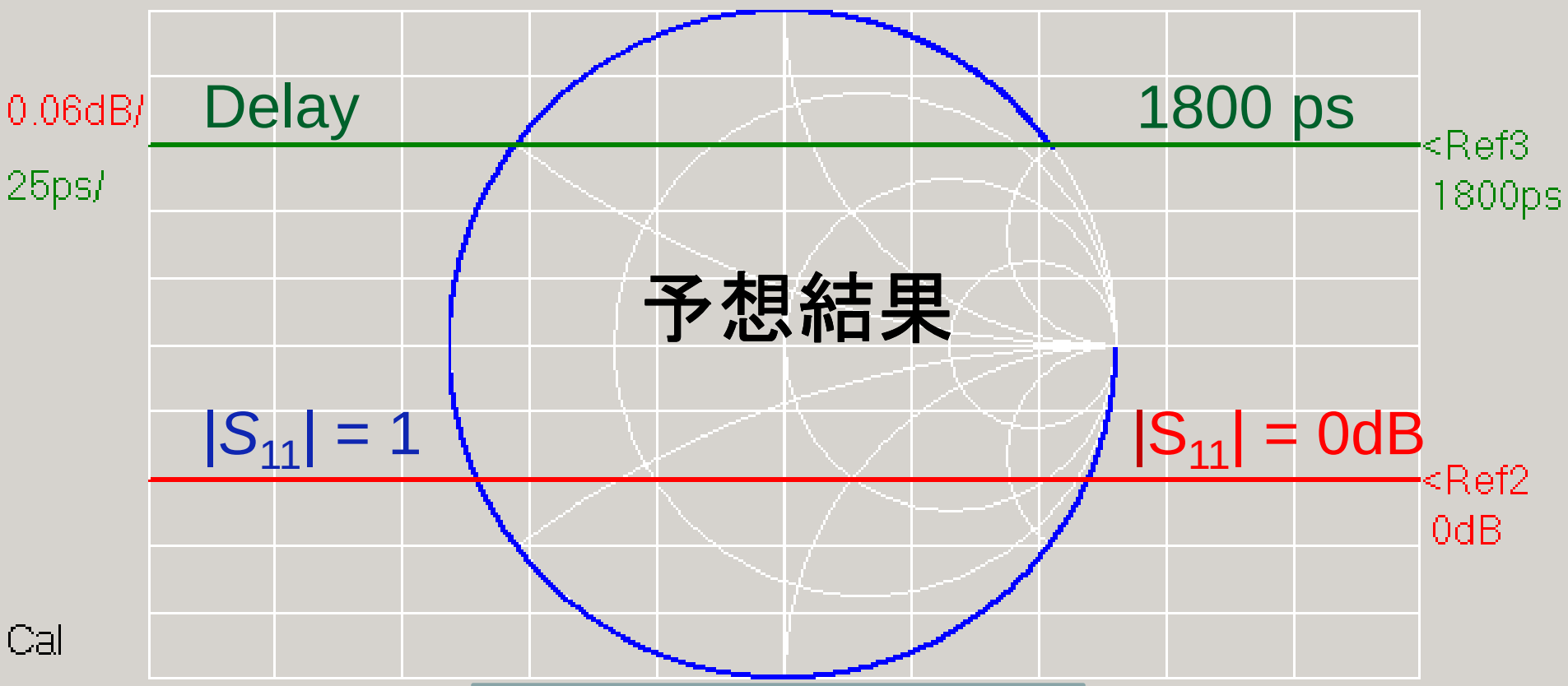


つまり $|S_{11}| = 1$　トータル反射電力

位相(S_{11})=-ω·1800 ps

Hochschule Ulm

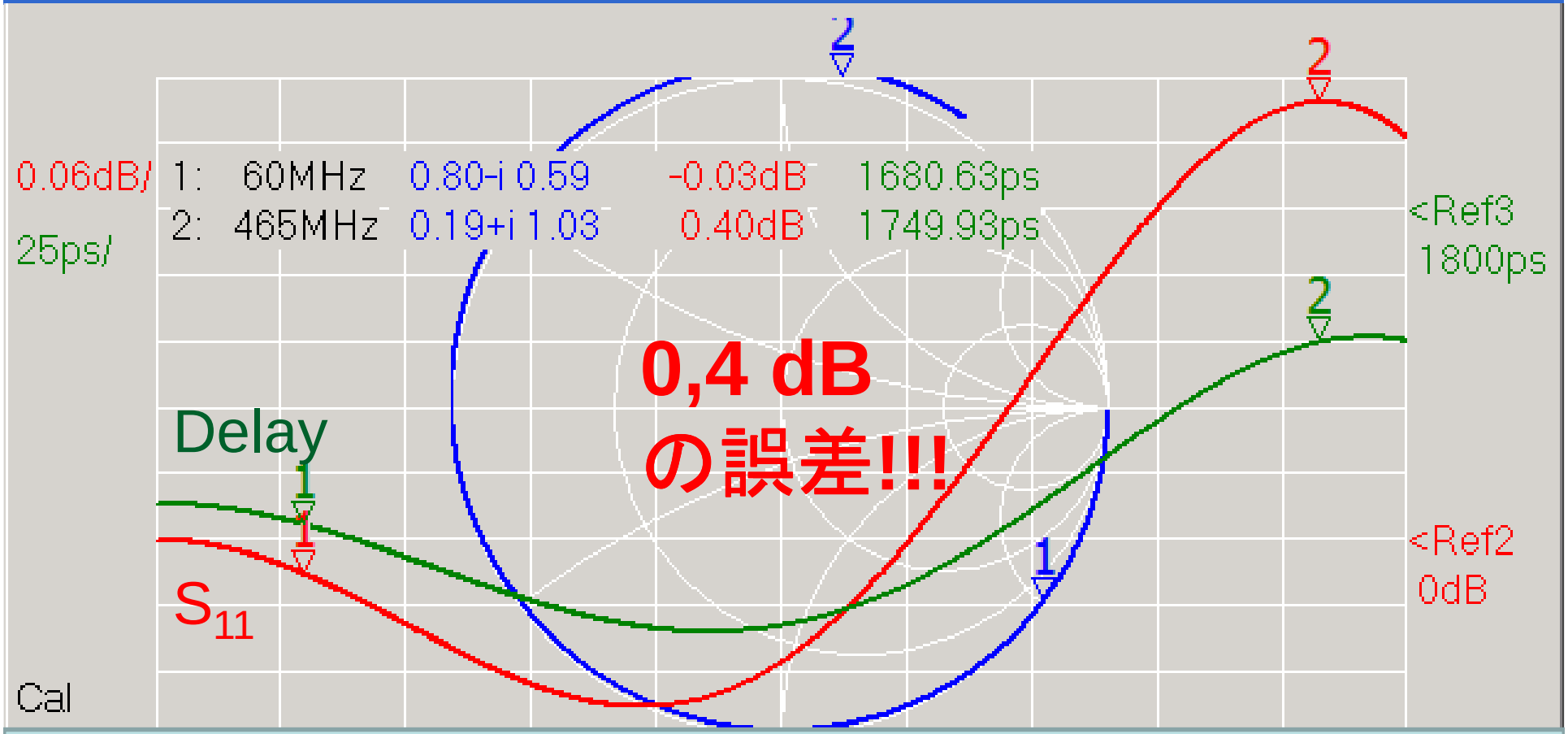
例: オープン 50Ω – ライン (2)
Amphenol メス パラメータでシミュレート



VNWA ソフトでの
シミュレーション

simulate 2-port measurement and do 12 term correction

例: オープン 50Ω – ライン (3)
ソフトが基準器が理想であると思い込ませます:



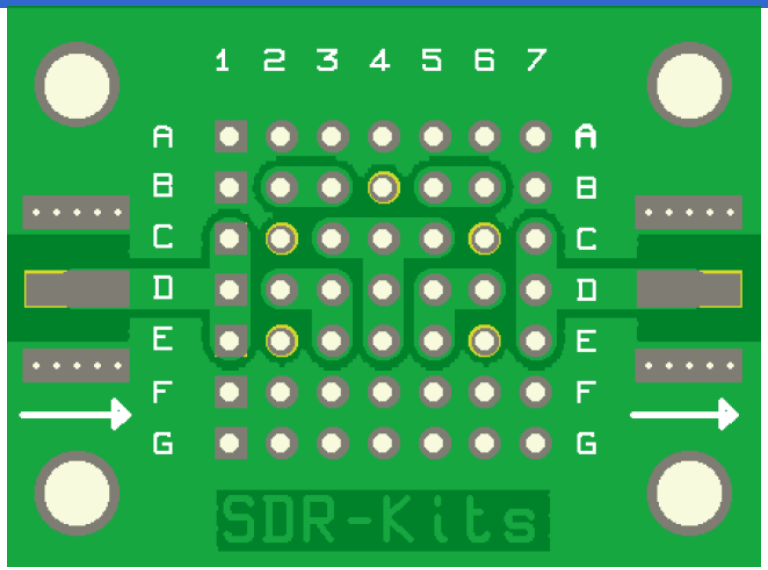
事前にシミュレートした測定データを、
理想校正パラメータを用いて再び補正。

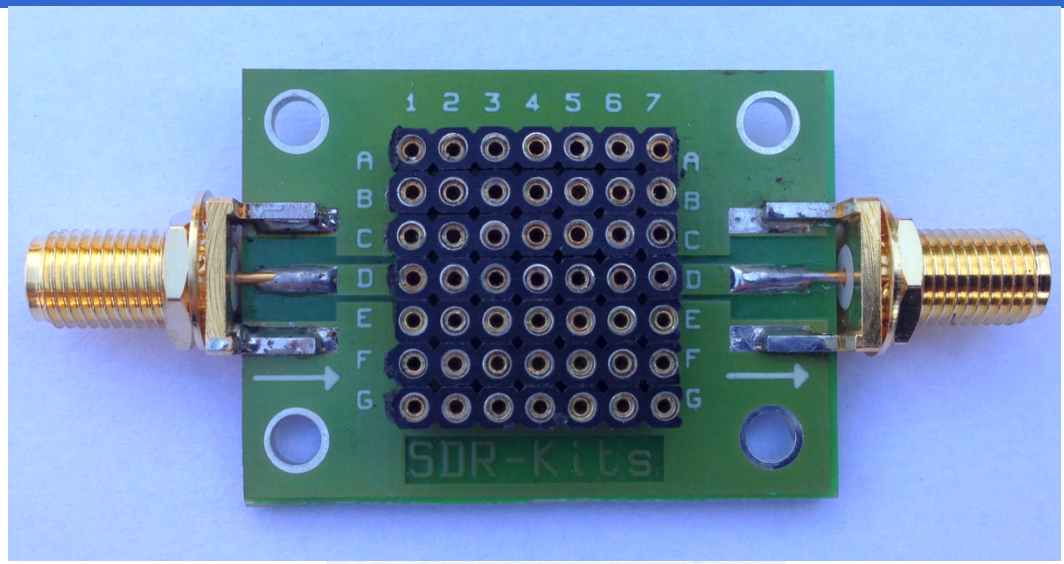
応用例 ...



Hochschule Ulm

HF帯実験用テストボード





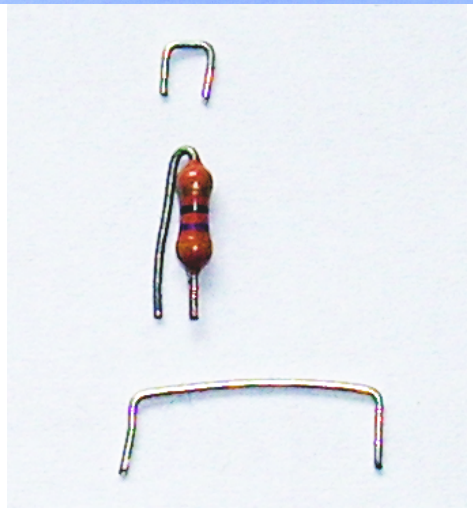
校正基準器:

Short:

Load = 47Ω:

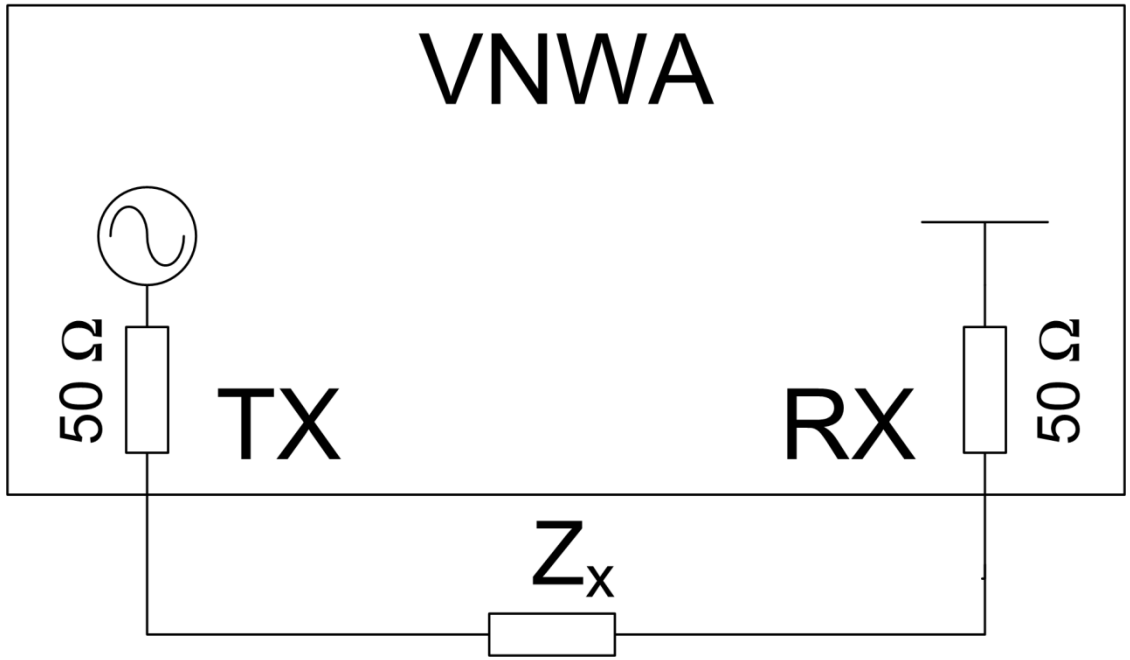
Open = 接続無し

Thru:



Hochschule Ulm

“Load”用抵抗をSOL校正無しに測定?



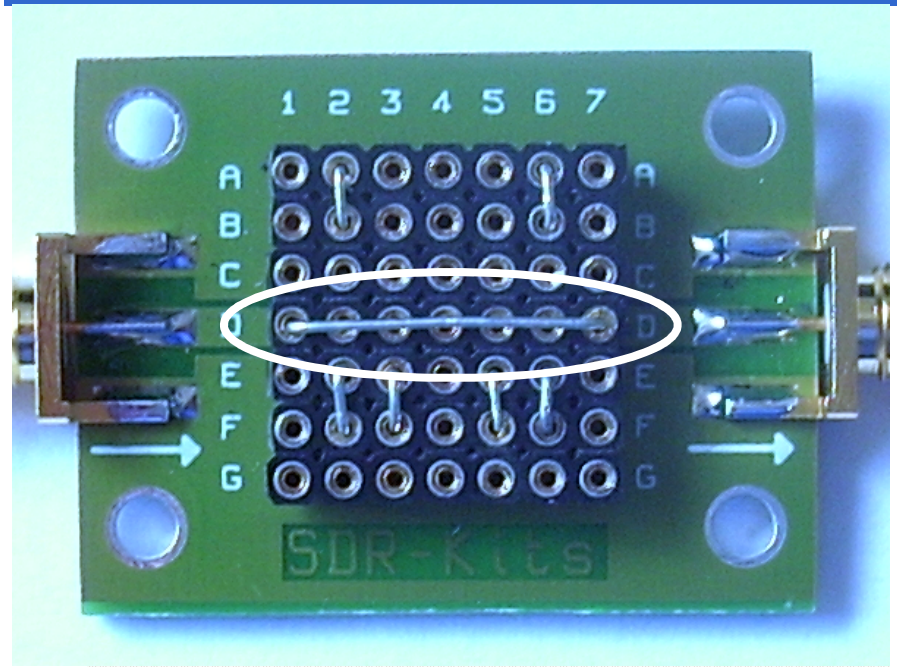
Z_x = 47 Ω では、 ≈3,4 dB
の挿入損失があります。

可能です、つまり
VNWAのTXとRX
ポートは、正確に
50Ωとなっている
からです。

- Thru校正は、
  必要です!

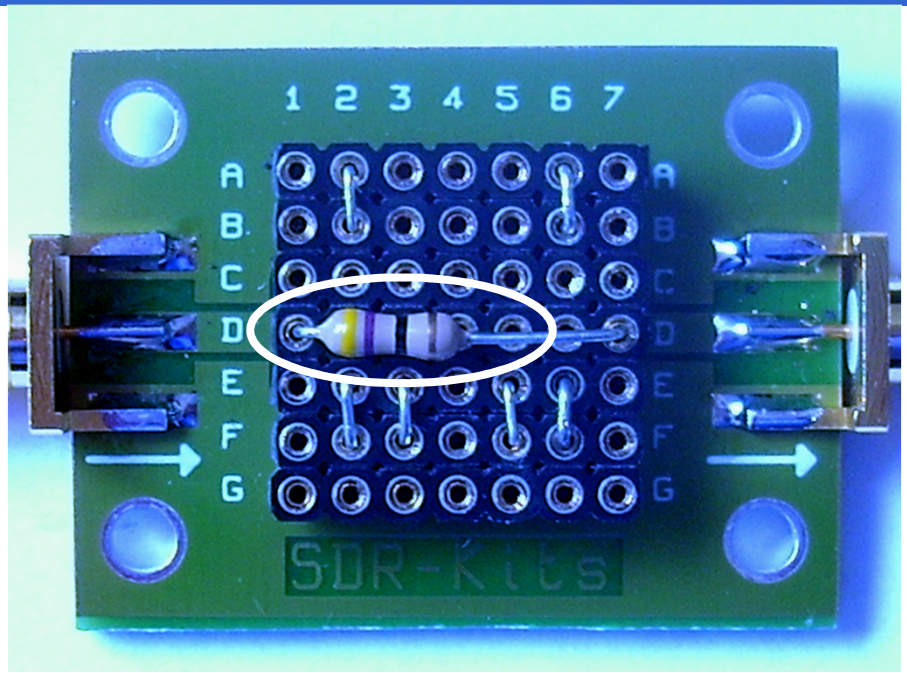
Hochschule Ulm

“Load”抵抗を、通過モード（=S_{21}測定）で測定





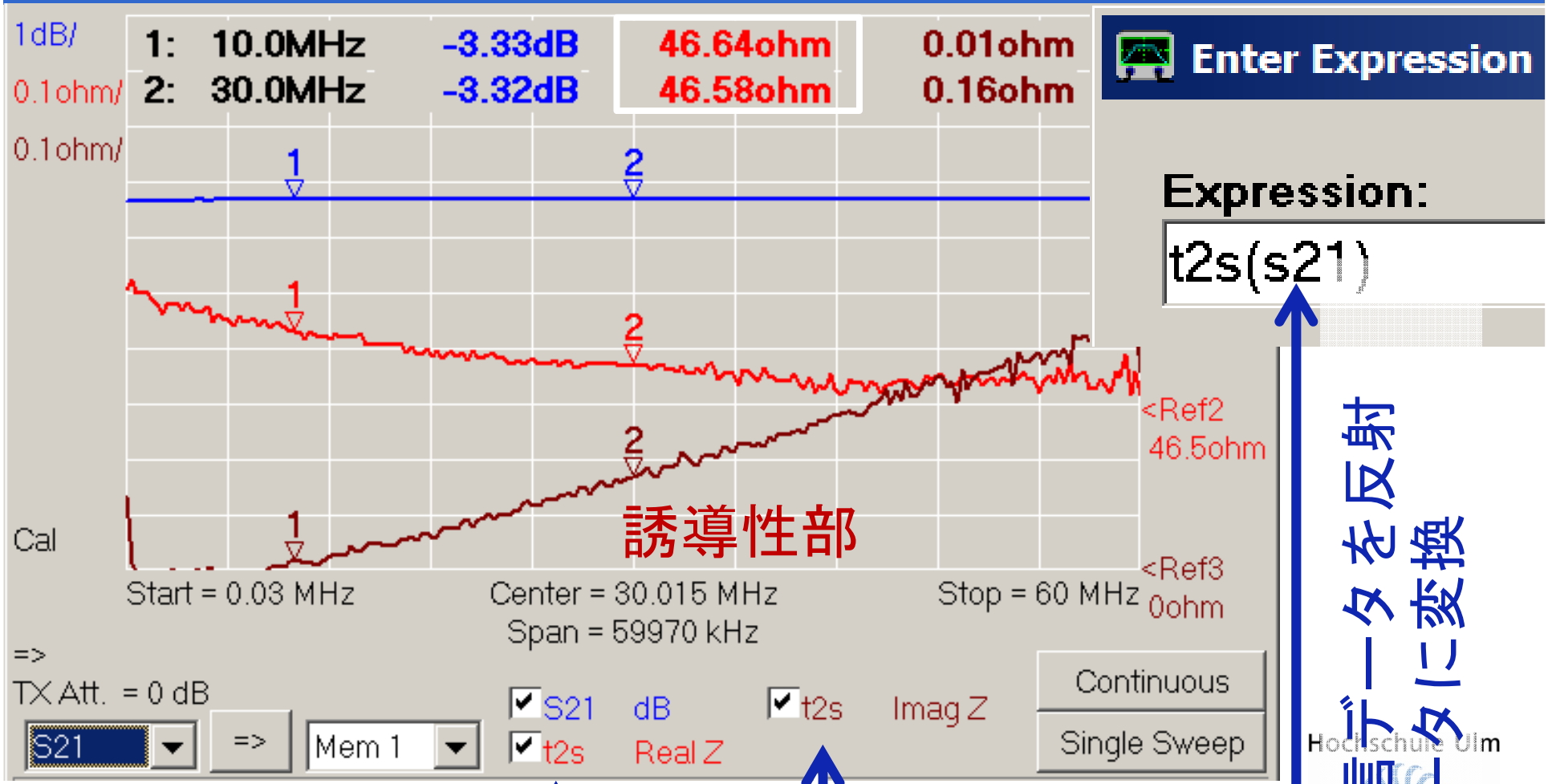
Thru校正のみ必要



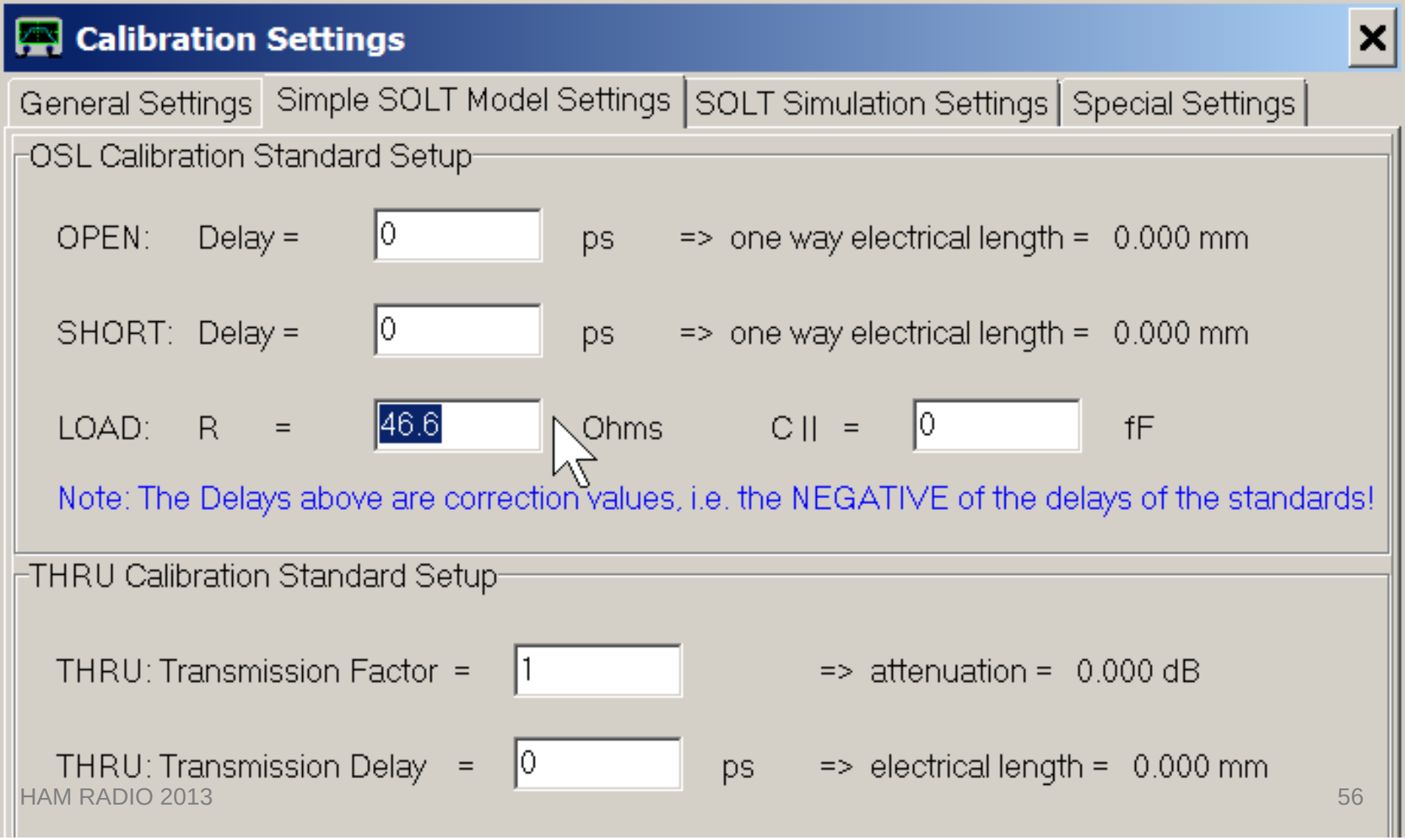
測定:
TXとRX間に抵抗を挿入

Hochschule Ulm

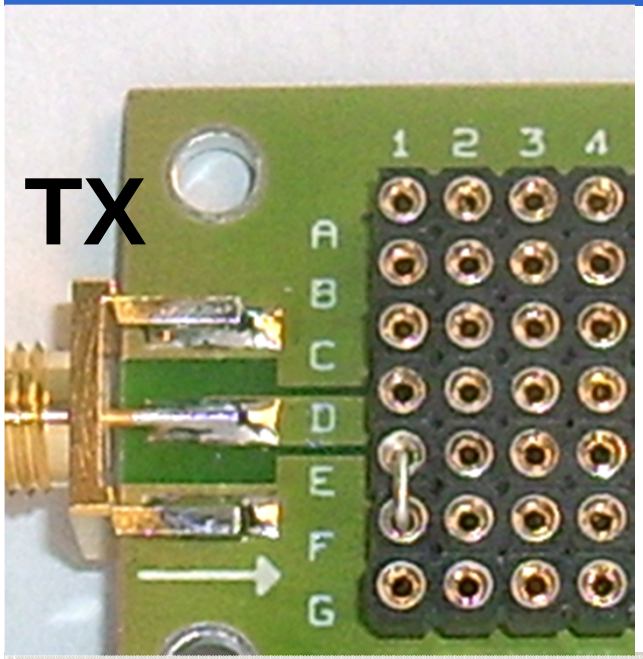
“Load”抵抗
結果 = 46,6 Ω

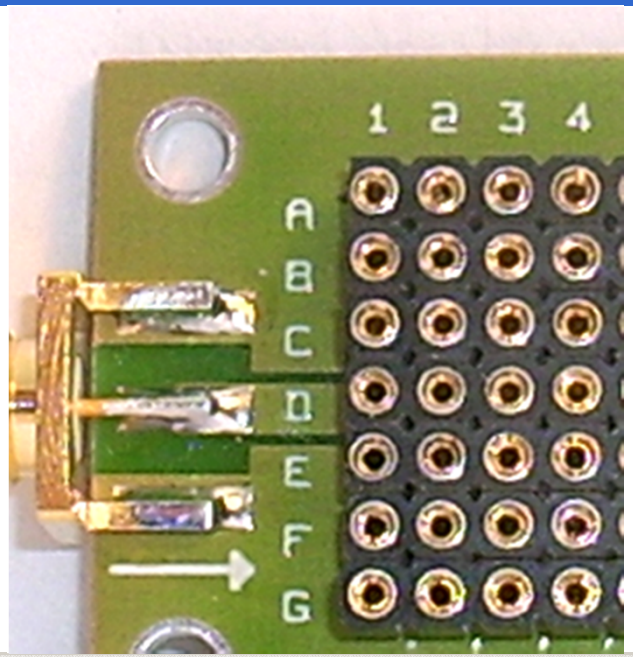


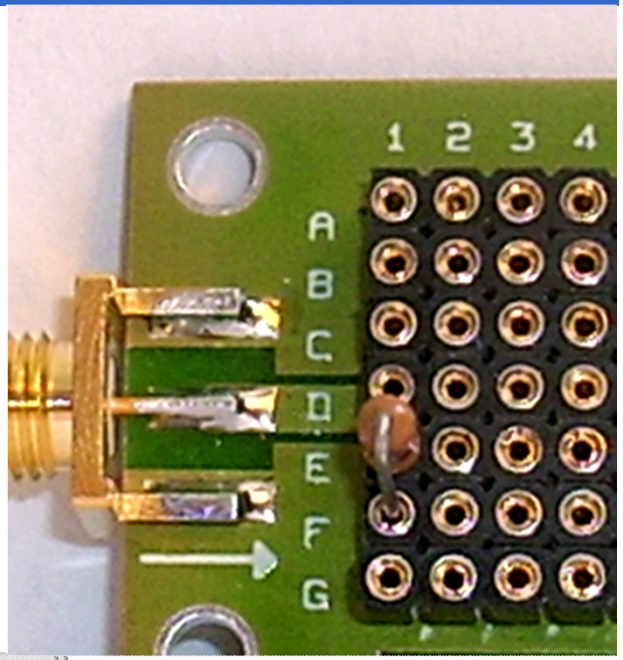
簡易校正基準モデル:
“Load”抵抗のみの測定



S_{11}測定用SOL校正



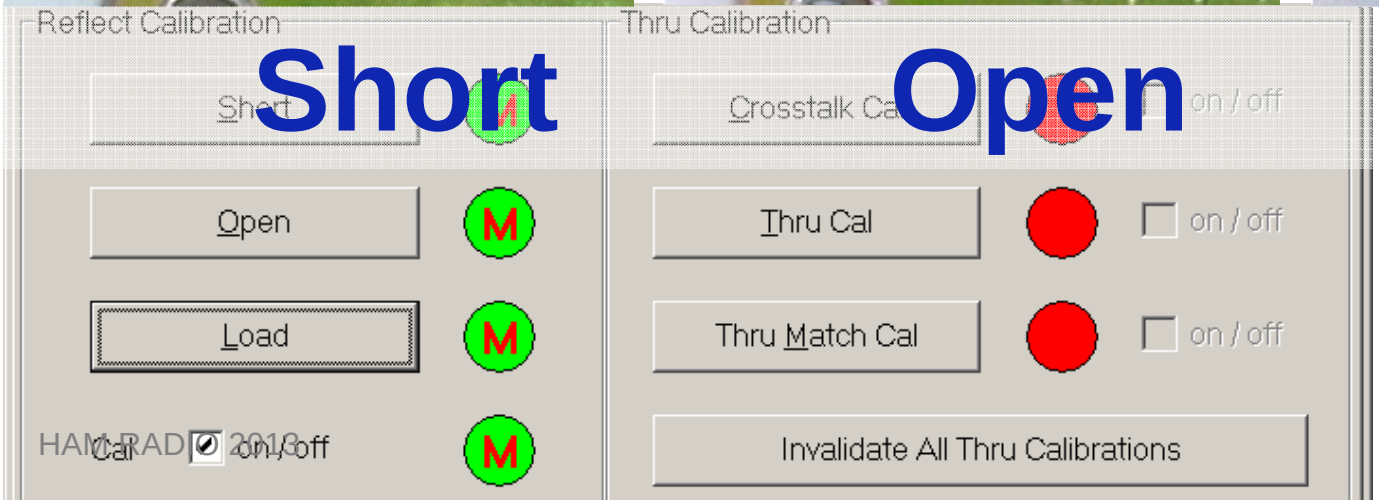




Short

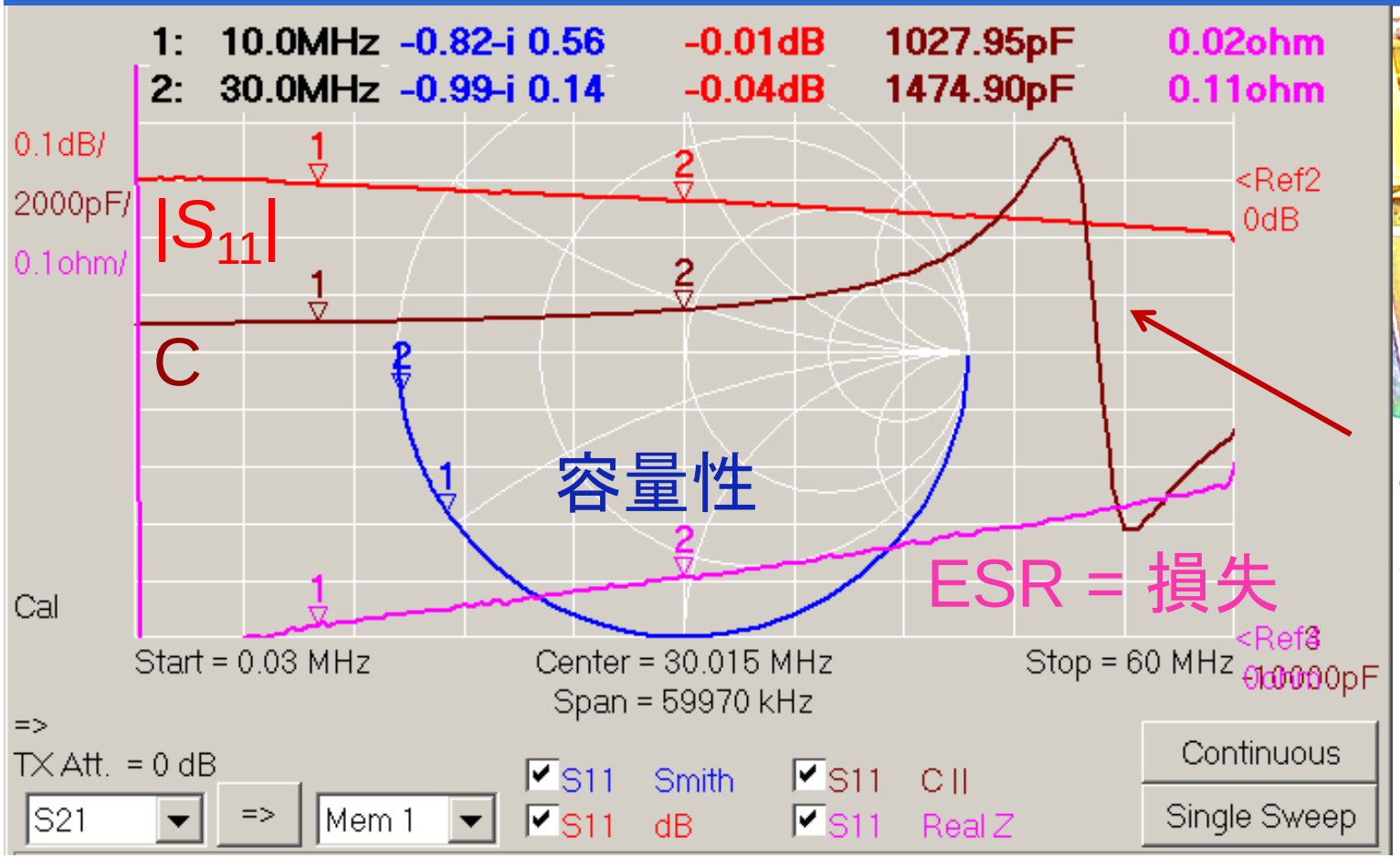
Open

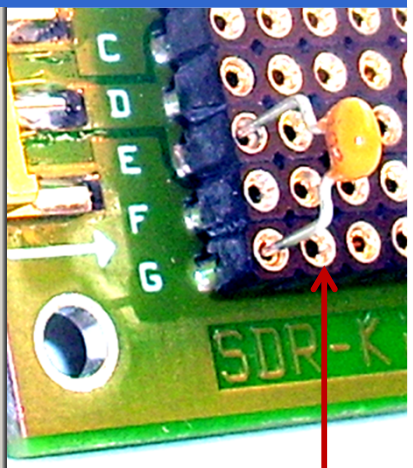
Load



Hochschule Ulm

1nFコンデンサの反射測定 (S_{11})



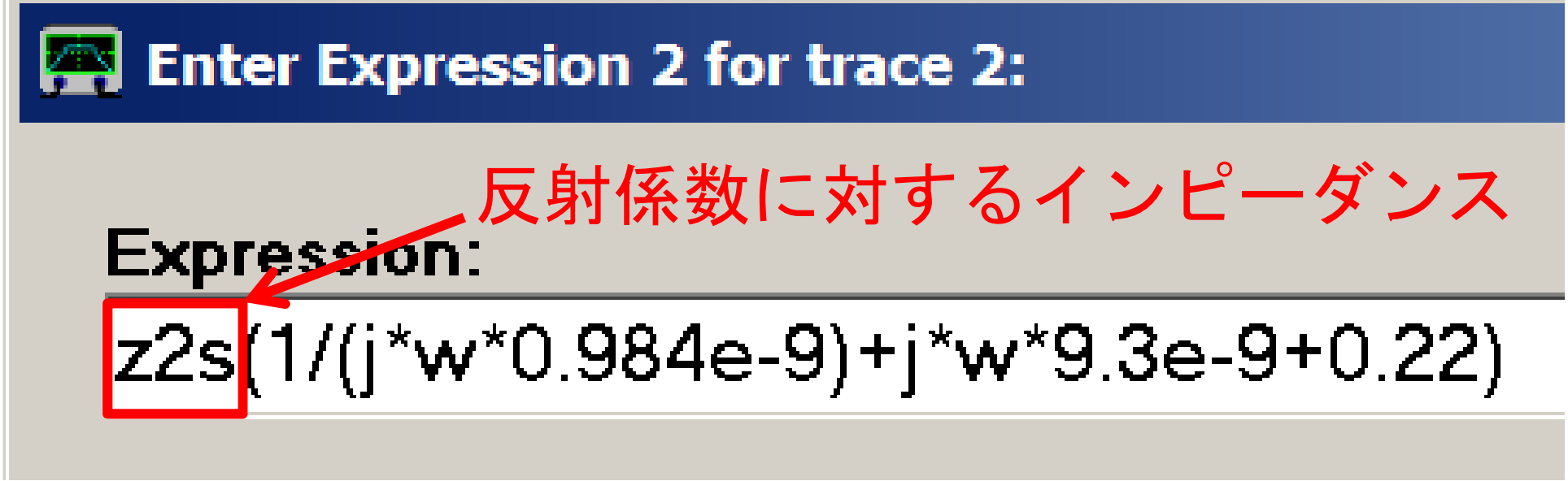


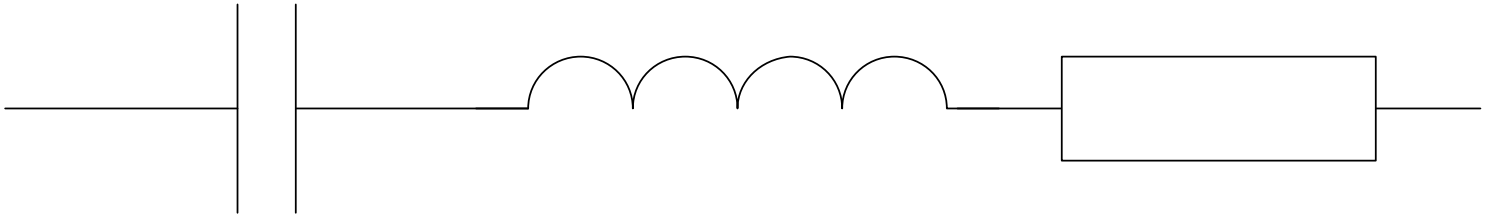
素子リード線による共振

コンデンサがほぼ全ての電力を反射 $|S_{11}| \approx 0$ dB

Hochschule Ulm

カスタムトレースを用いたVNWA測定結果のモデリング



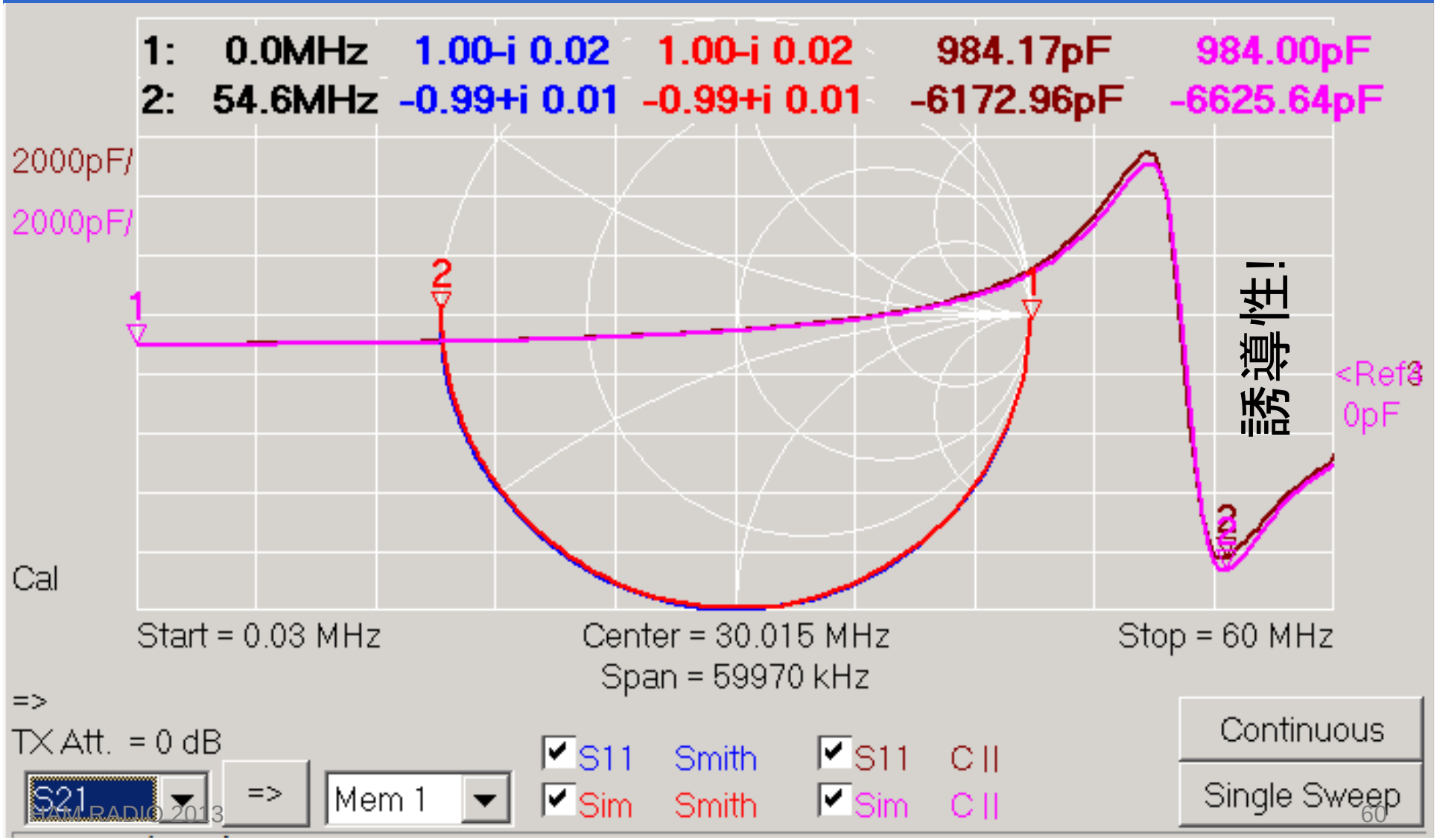


0,984 nF　　9,3 nH　　0,22 Ω

等価モデル

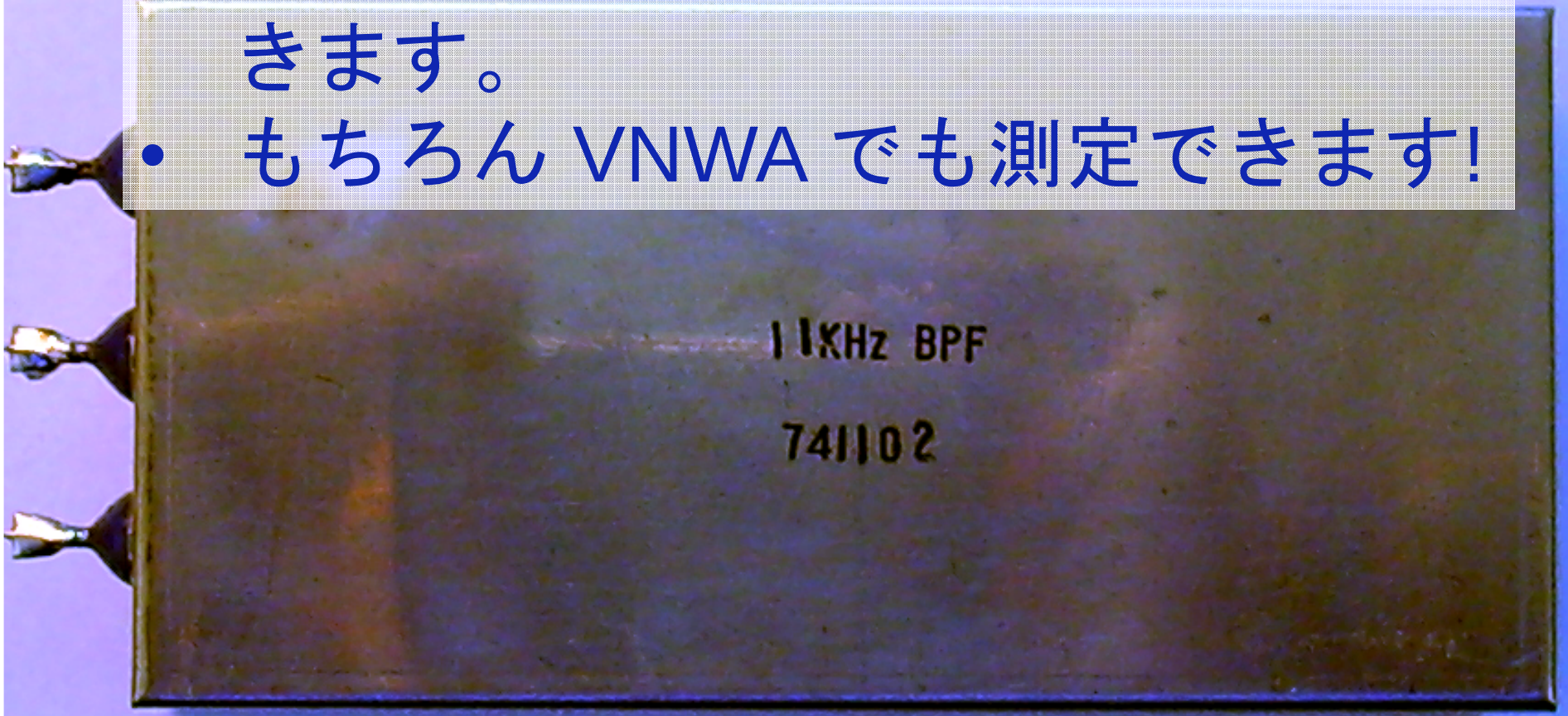
Hochschule Ulm

このモデルは非常に正確です!

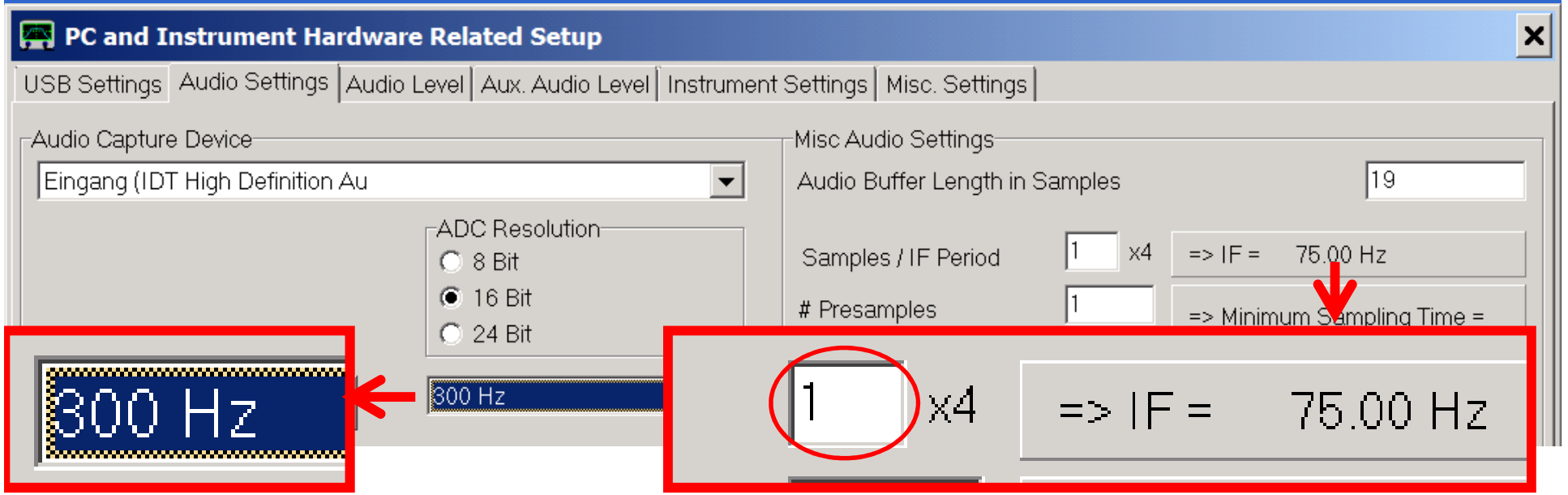


11kHz バンドパスフィルター（BPF)の2ポート測定

- Sパラメータは、低周波にも応用できます。
- もちろん VNWA でも測定できます!



低周波用 VNWA特別設定例

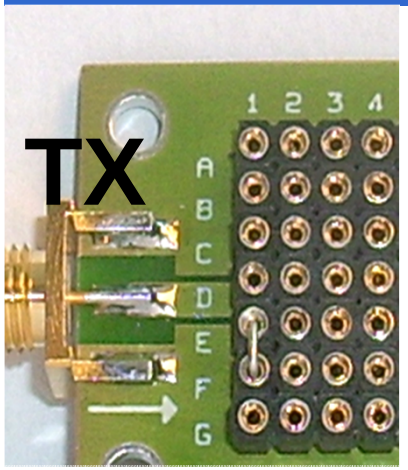


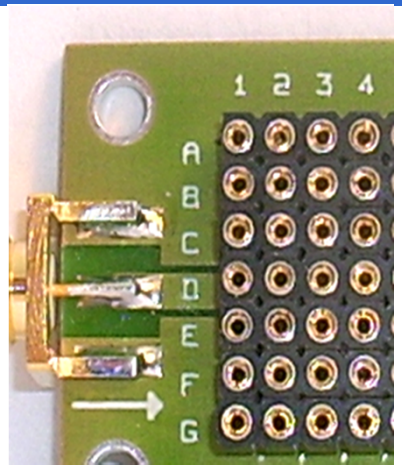
最低サンプル・レート 300 Hz
→ ナイキスト限界 150 Hz
→ ≈150 Hz までの測定が可能

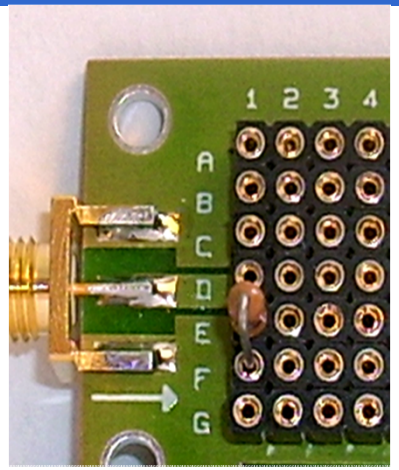
IF は、コーデック周波数レンジ中になければなりません。
(20 Hz…16kHz)

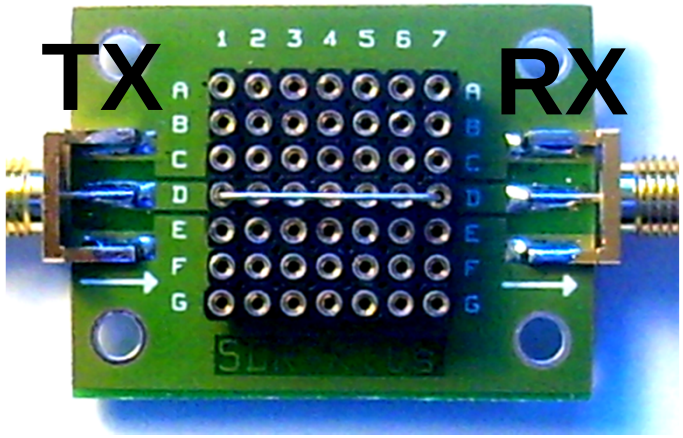
Hochschule Ulm

2ポート測定用SOLT校正









Reflect Calibration

Short

Short

Open

Open

Load

Load

Cal on / off

Thru Calibration

Crosstalk Cal

Thru

on / off

Thru Cal

on / off

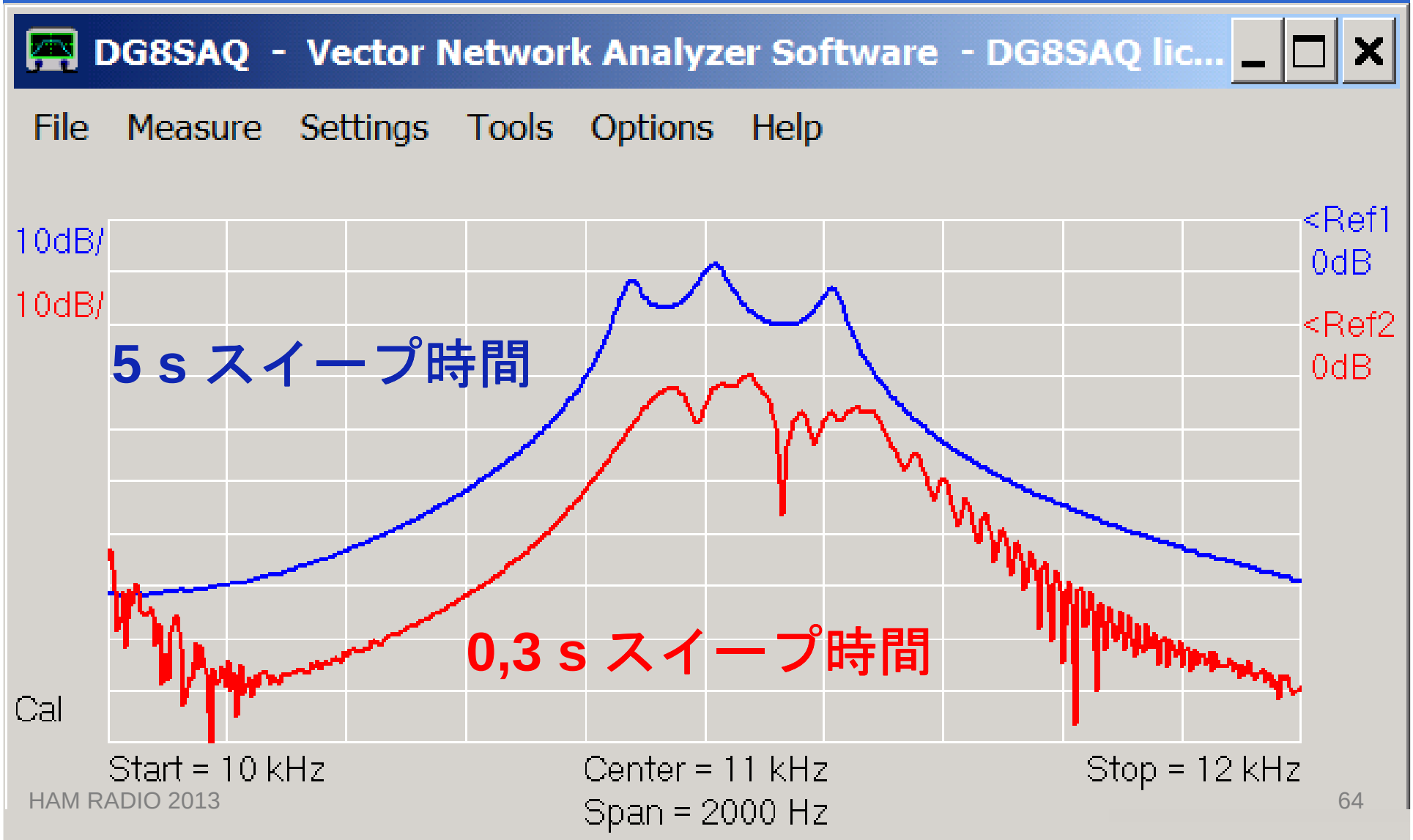
Thru Match Cal

on / off

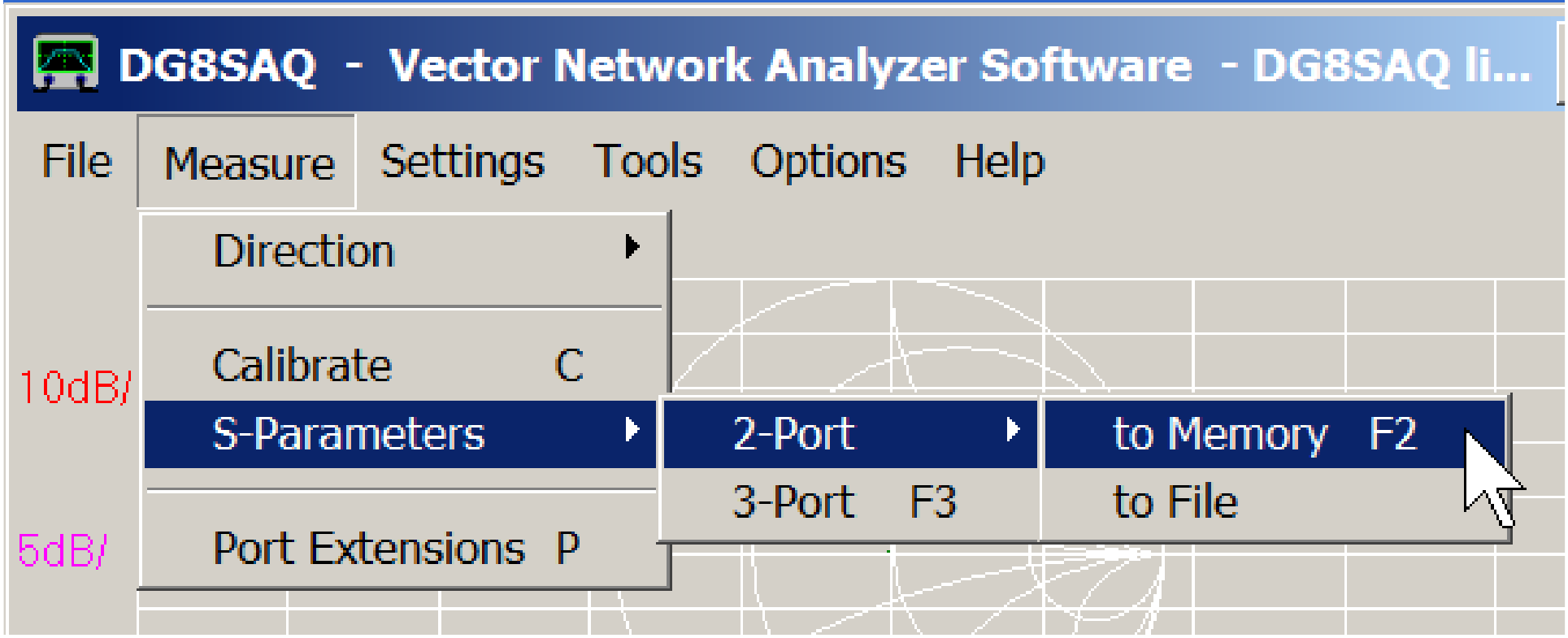
Invalidate All Thru Calibrations

hschule Ulm

ご注意: 狭域スカートフィルターは、変動励振に対して安定するまでに時間がかかります!



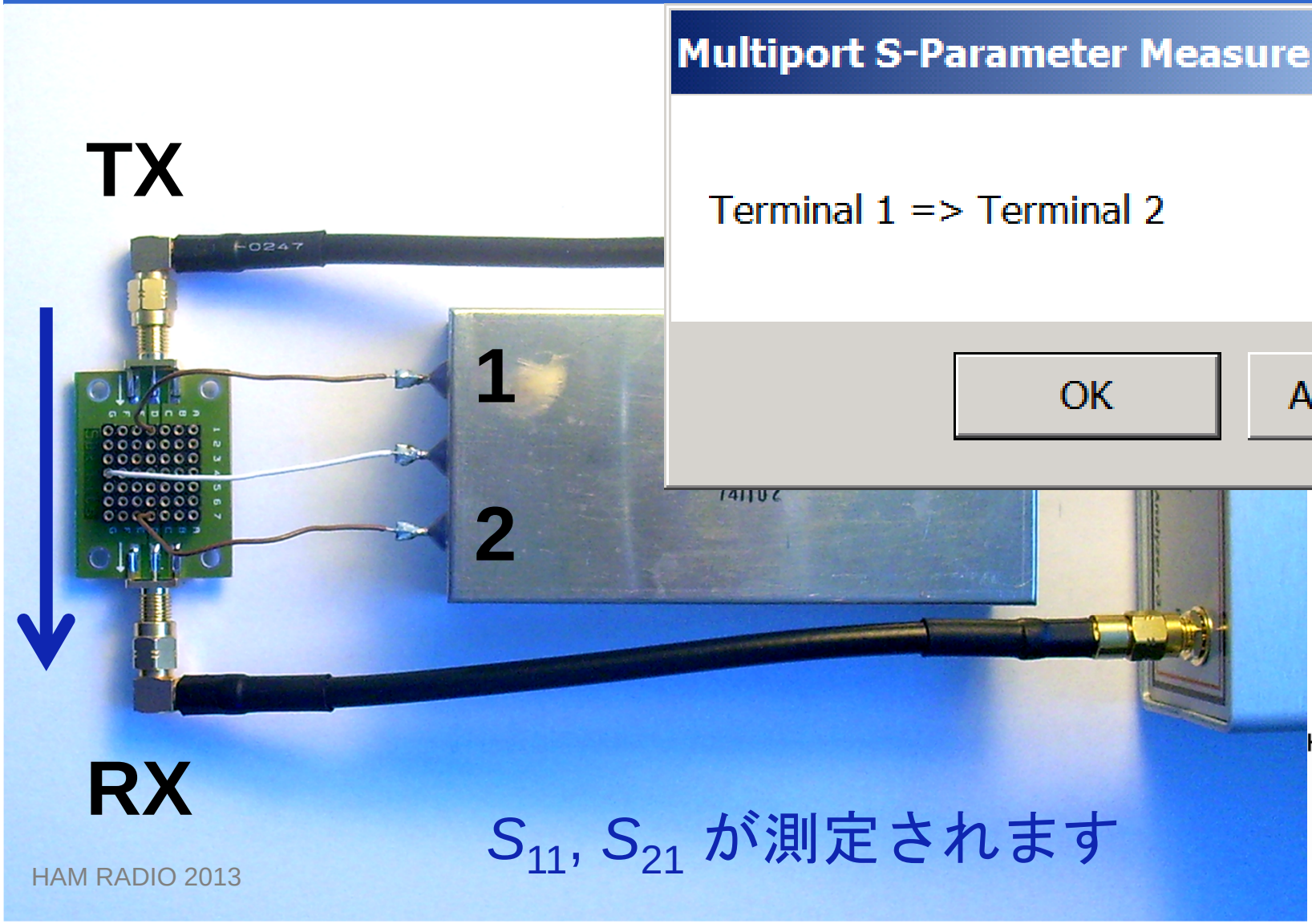
11kHz バンドパスフィルター（BPF)の2ポート測定

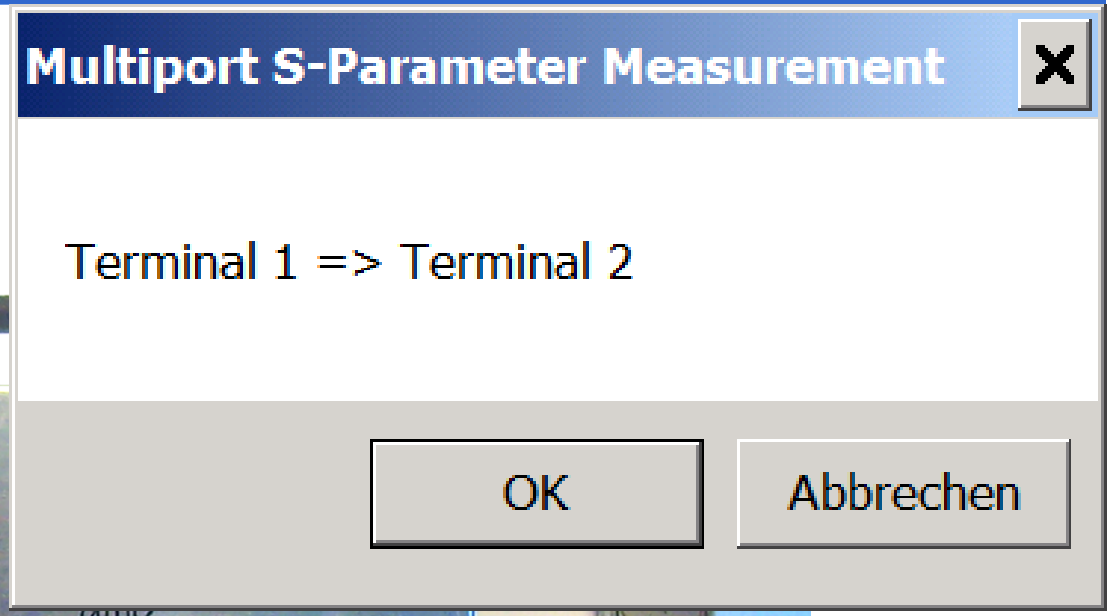


Sパラメータ４つ (S_{11}, S_{21}, S_{12}, S_{22})全てを測定しなければなりません …

Hochschule Ulm

11kHz バンドパスフィルター（BPF)の 2ポート測定：　フォワード（順行）測定

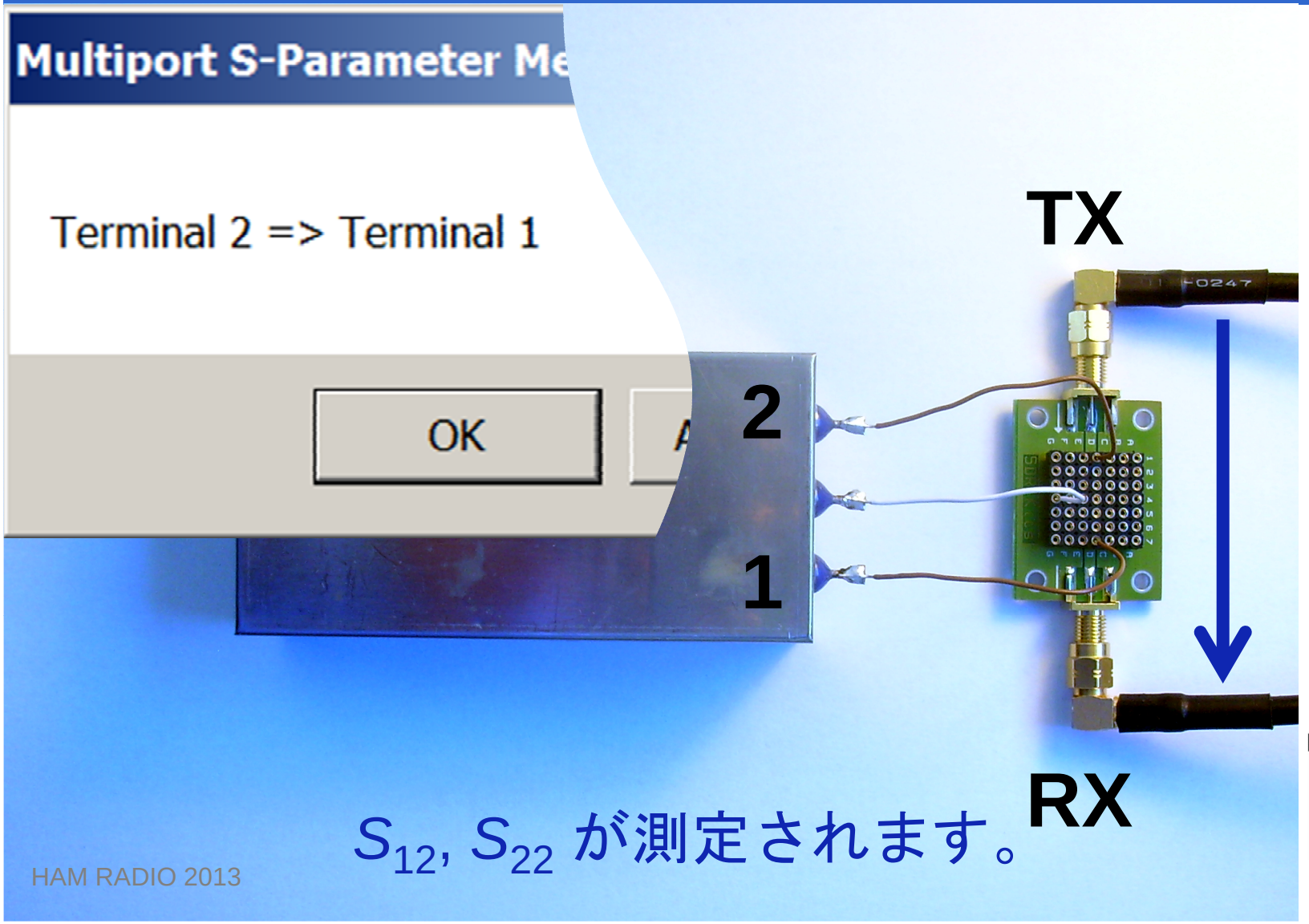




S_{11}, S_{21} が測定されます

Hochschule Ulm

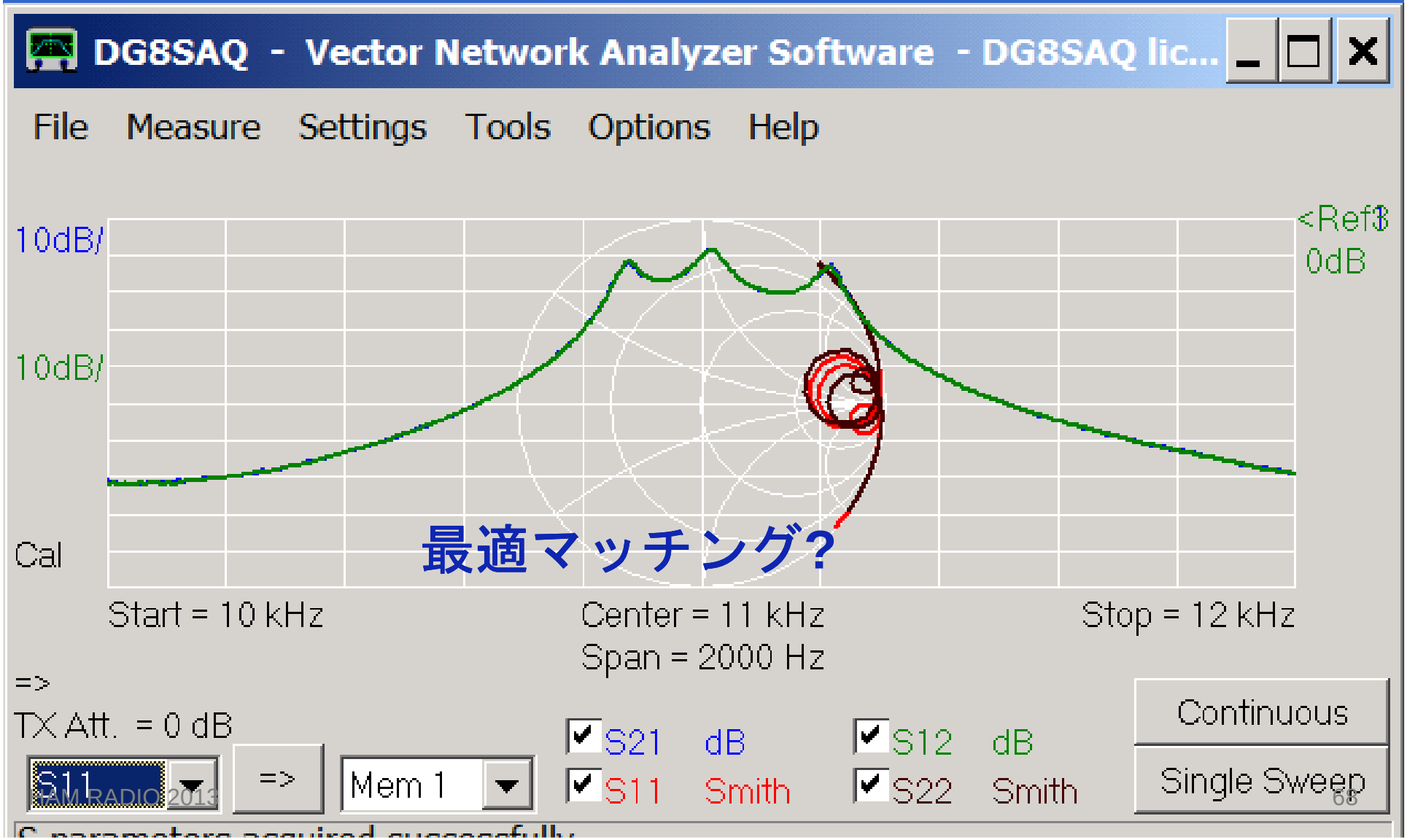
11kHz バンドパスフィルター（BPF)の 2ポート測定:　リバース（逆行）測定



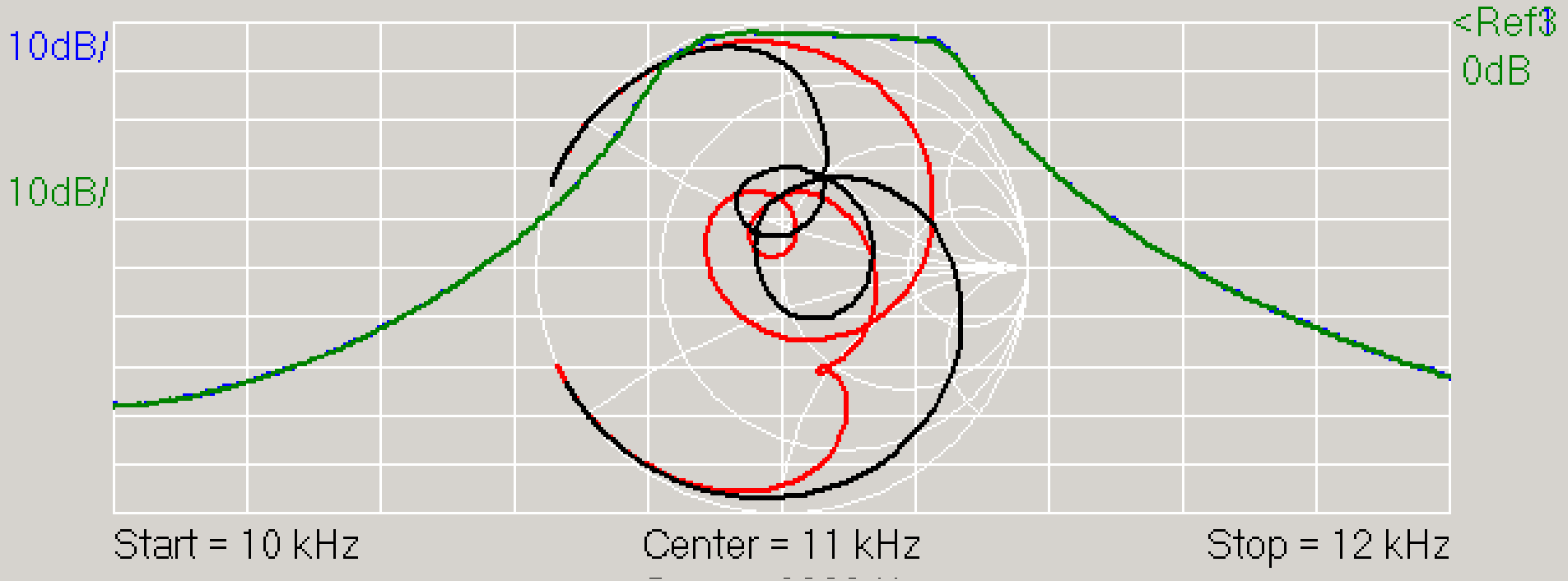
S_{12}, S_{22} が測定されます。

Hochschule Ulm

2ポート測定されたSパラメータは何に有効か？



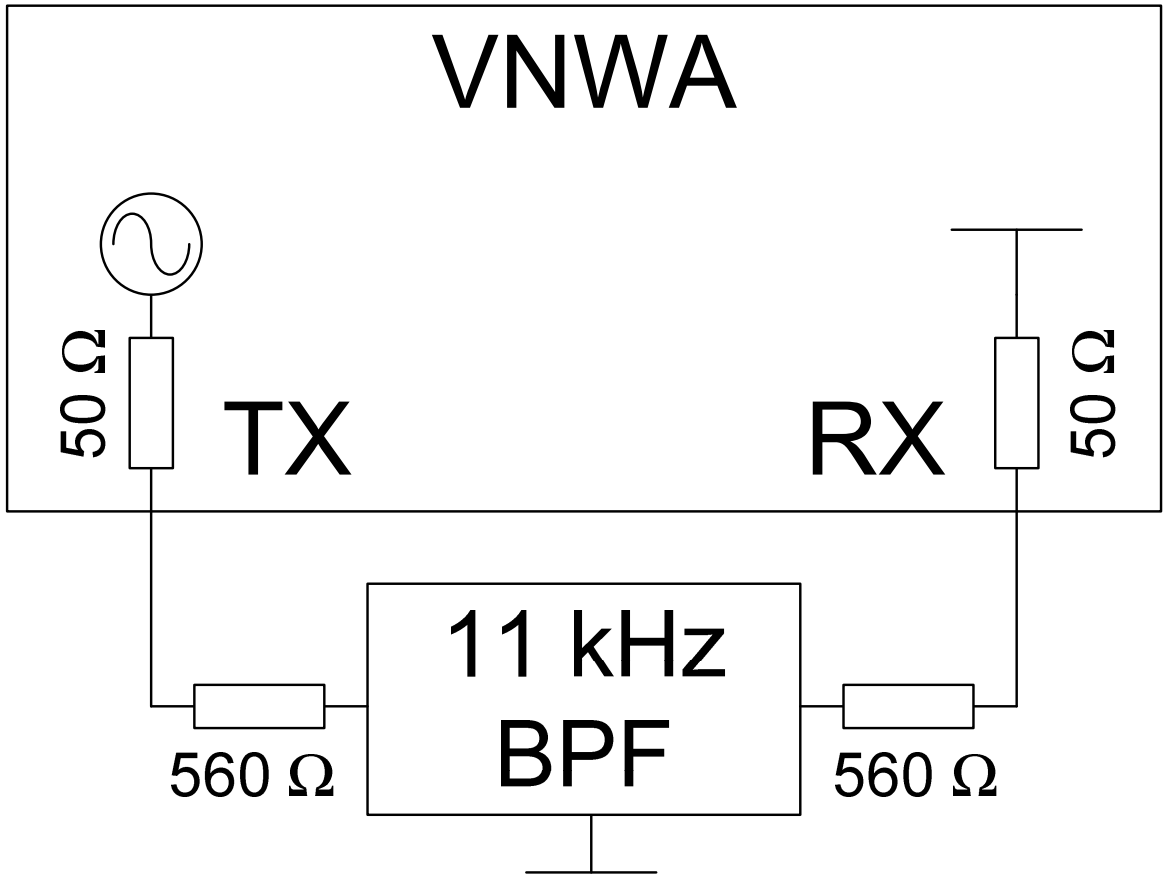
マッチング分析: VNWA マッチングツール
最適値: $Z_{in} = Z_{out} = 610\ \Omega$



Recalculate to new source and load conditi...

Port 1			Port 2		
Port 1 Impedance	610	Ohm	Port 2 Impedance	610	Ohm
C parallel (neg. possible)	0	pF	C parallel (neg. possible)	0	pF

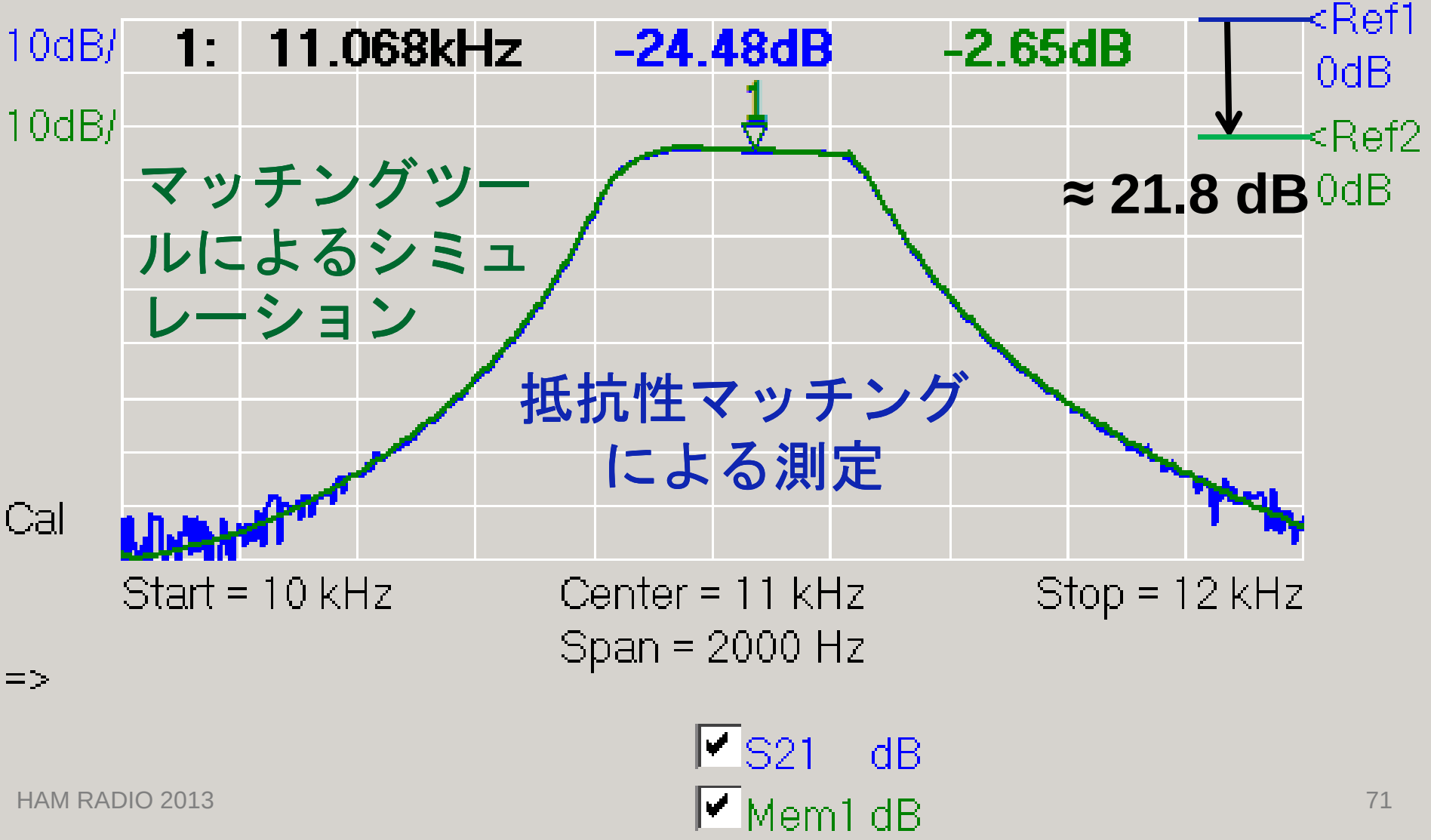
抵抗を用いた強制インピーダンスマッチング



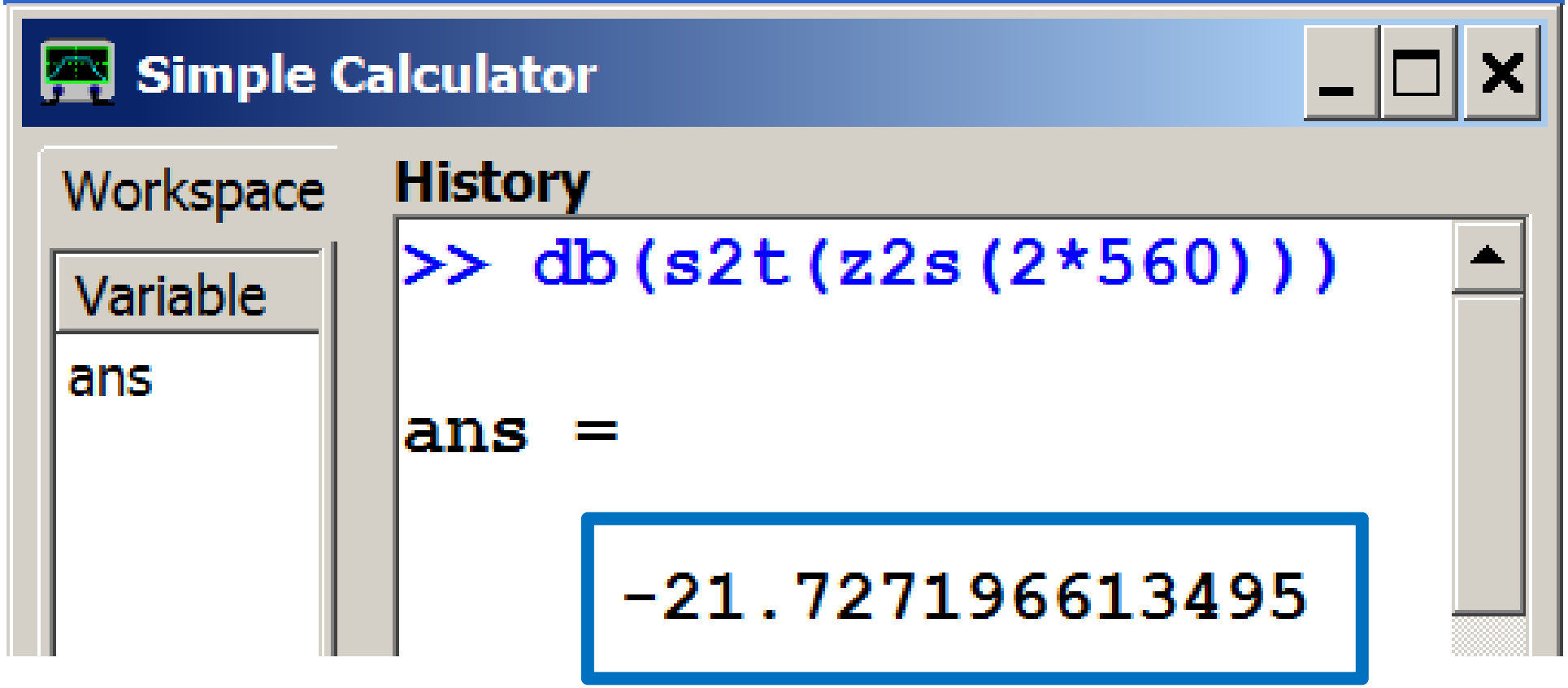
50 Ω + 560 Ω = 610 Ω

Hochschule Ulm

このマッチングにより、損失増加以外は問題有りません。



信号経路上の２つの 560Ω 抵抗による影響: VNWA 複素計算機能



21,7 dB の付加的減衰 ✓

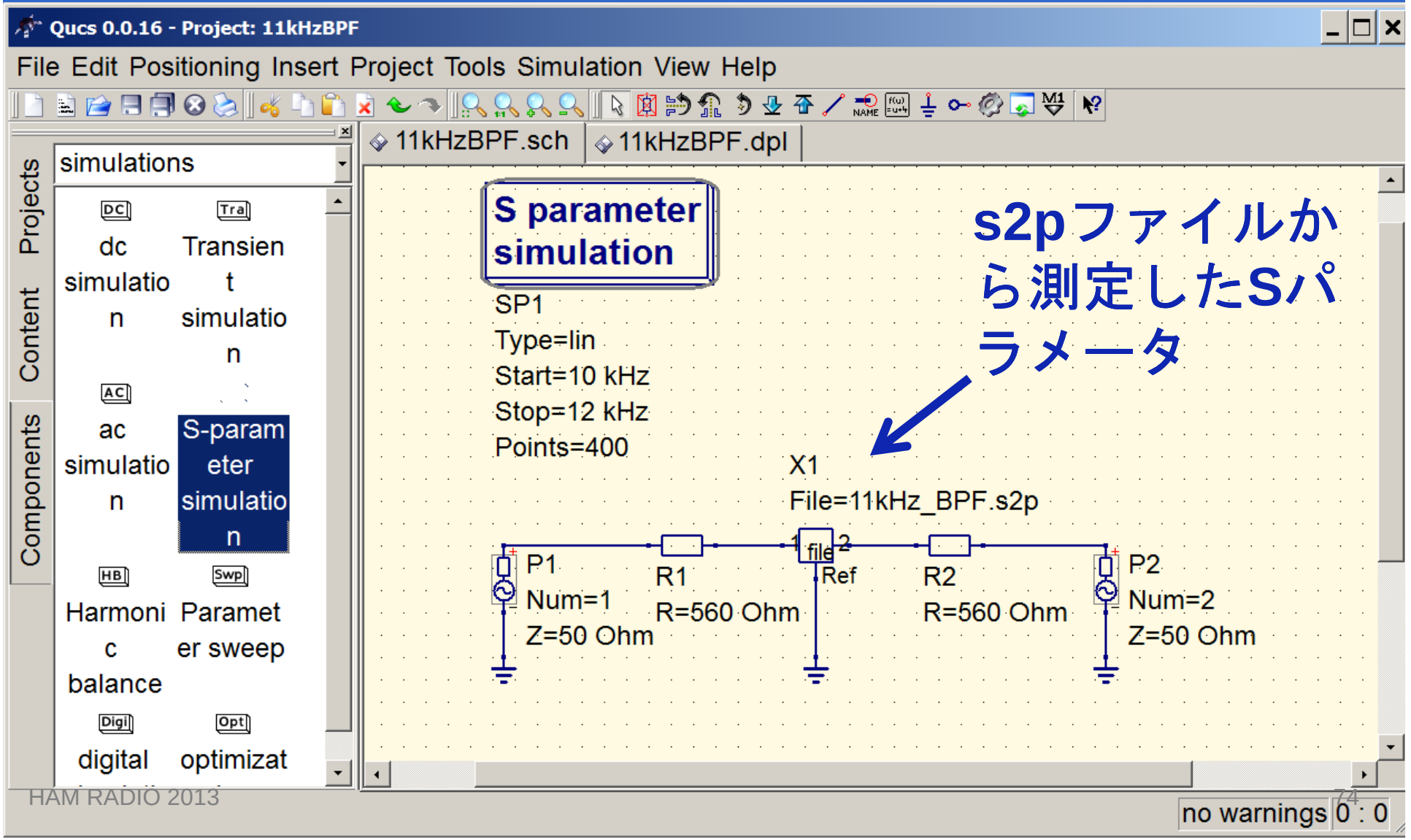
Hochschule Ulm

このソフトでも “適切”シミュレーション可能です!
Simulation Tool QUCS

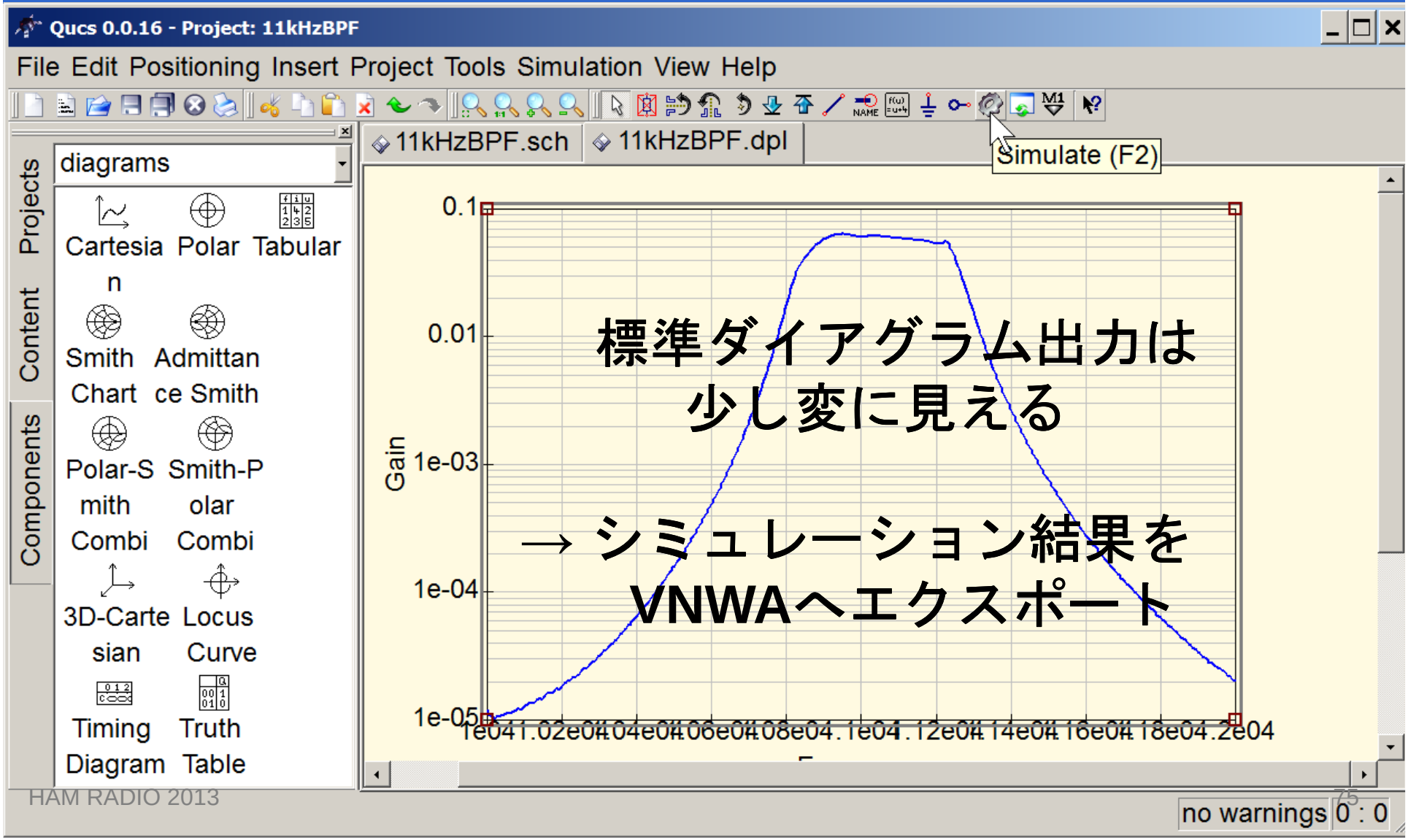


- http://qucs.sourceforge.net/
- 万能型回路シミュレータ
- 無償
- 無制限
- 簡単な使用方法
- グラフィックとデータエクスポートには熟練が必要

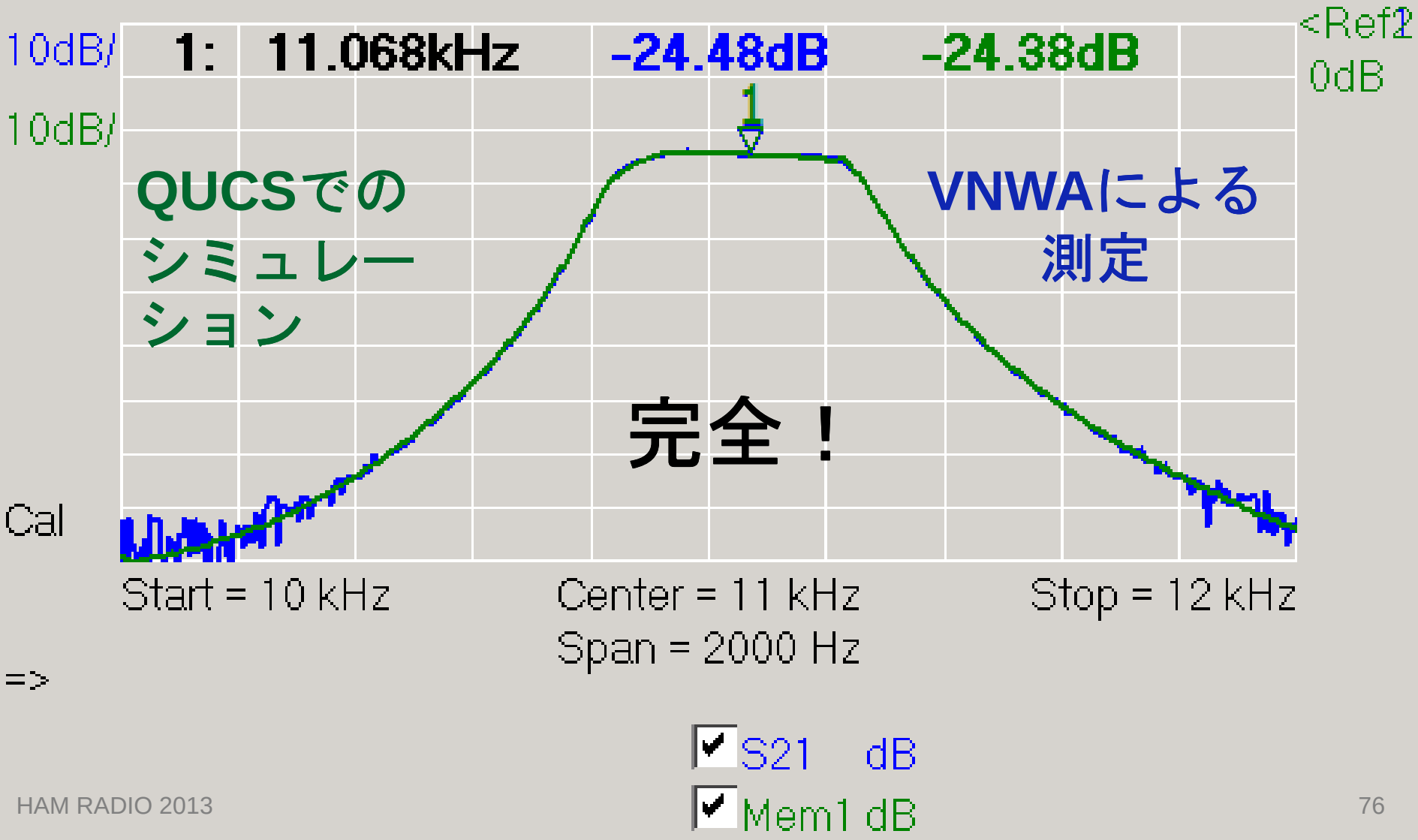
QUCSでのSパラメータ模擬測定



QUCSでのマッチングシミュレーション



QUCSシミュレーションと実際の測定結果の比較



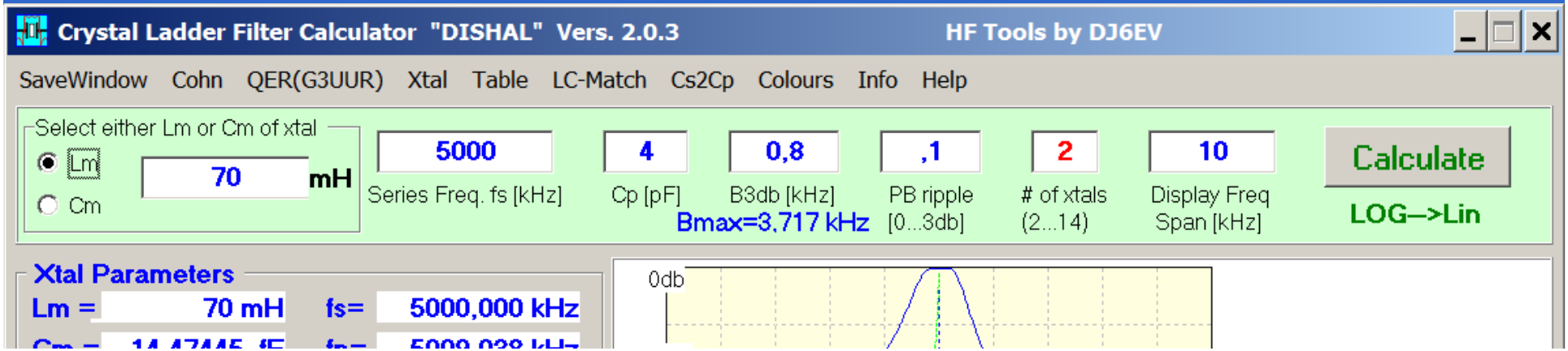
無償フィルターデザインソフト (1): Elsie – LCフィルター用



- http://tonnesoftware.com/elsiedownload.html
- **LCフィルターのデザイン、分析用**
- **学生バージョンは、7素子までに限定**
- **数値シミュレーション結果は、簡単に s2pファイルにエクスポート可能!**

Hochschule Ulm

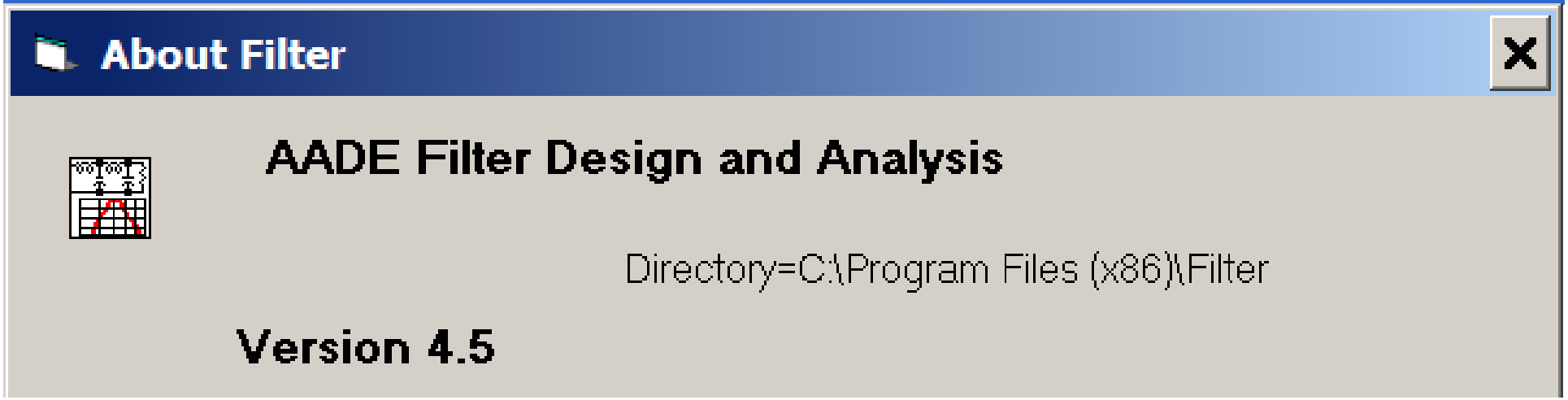
無償フィルターデザインソフト (2): Dishal – クリスタルフィルター用



- http://www.bartelsos.de/dk7jb.php/quarzfilter-horst-dj6ev
- クリスタルフィルターのデザイン、分析用
- クリスタル損失無しでのシミュレーション
- S_{21}シミュレーション結果はエクスポート可能

Hochschule Ulm

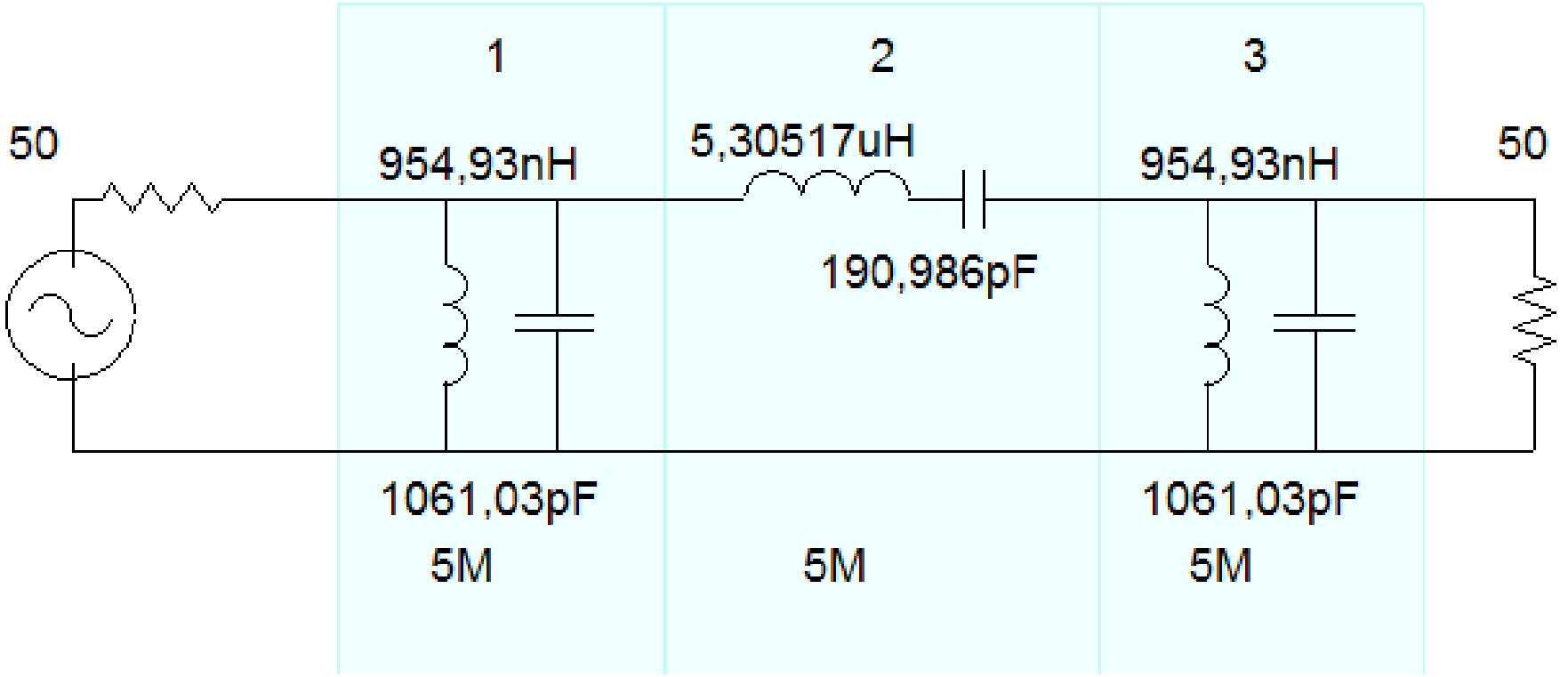
無償フィルターデザインソフト (3): AADE Filter Design – 全てのフィルター用



- http://aade.com/filter32/download.htm
- 全フィルター向けの、デザインおよび分析用
- 無償、しかし有償購買確認の画面が出る
- 簡単な使用方法
- 数値シミュレーション結果は、エクスポート可能

Hochschule Ulm

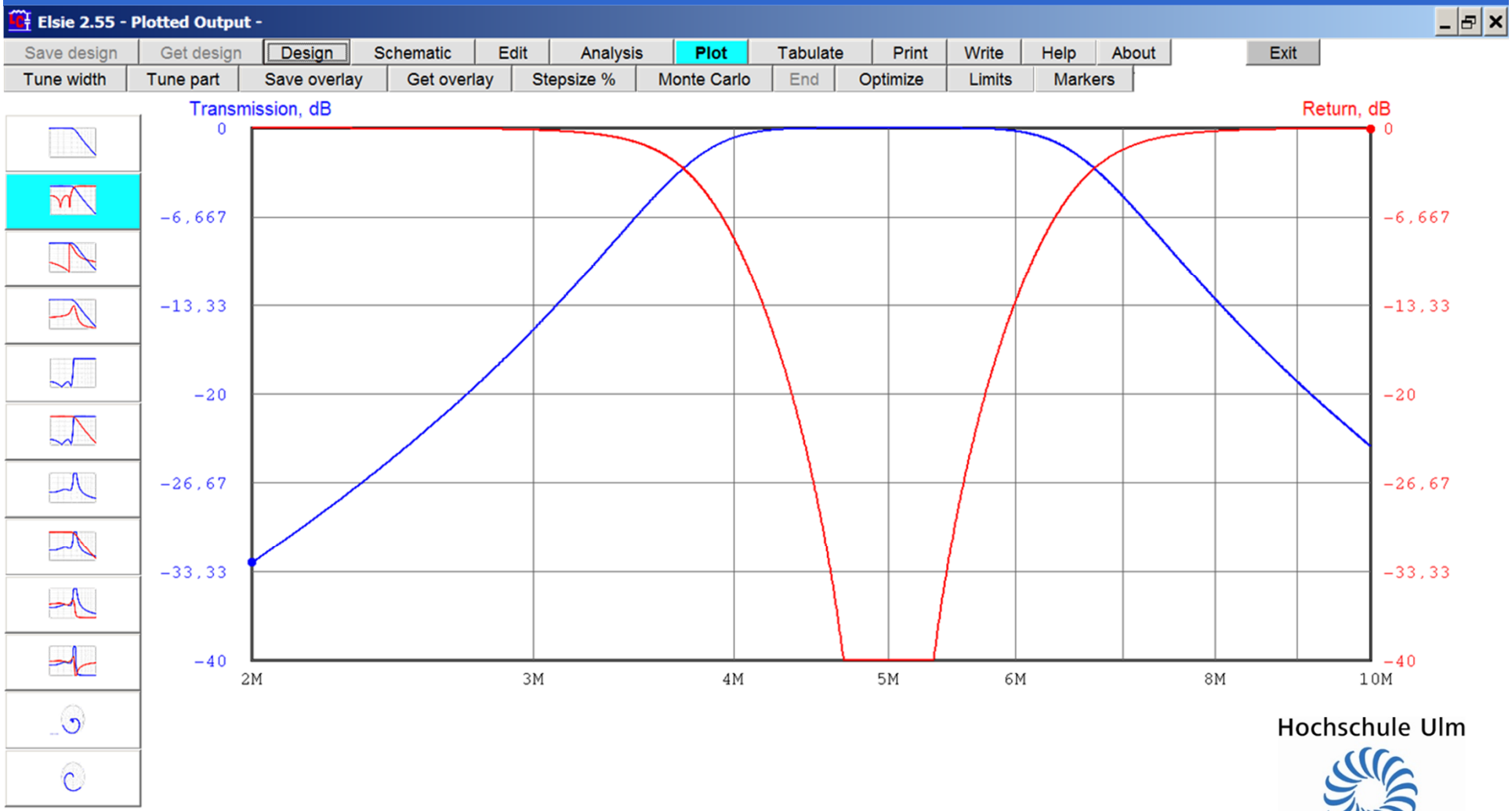
50Ω、バンド幅 3MHz, 5MHz用3素子 バターワース パイ型BPFの設計



Elsieによるフィルター設計

Hochschule Ulm

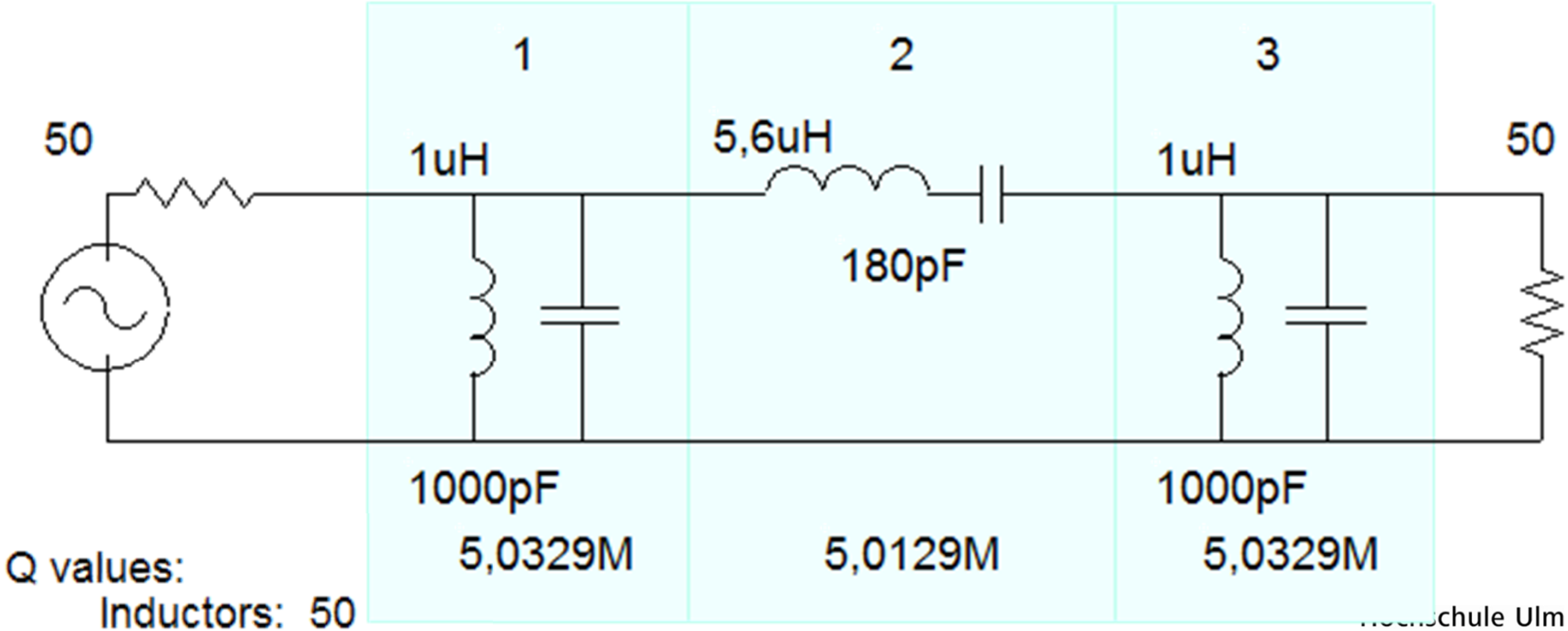
Elsie シミュレーション結果



Hochschule Ulm

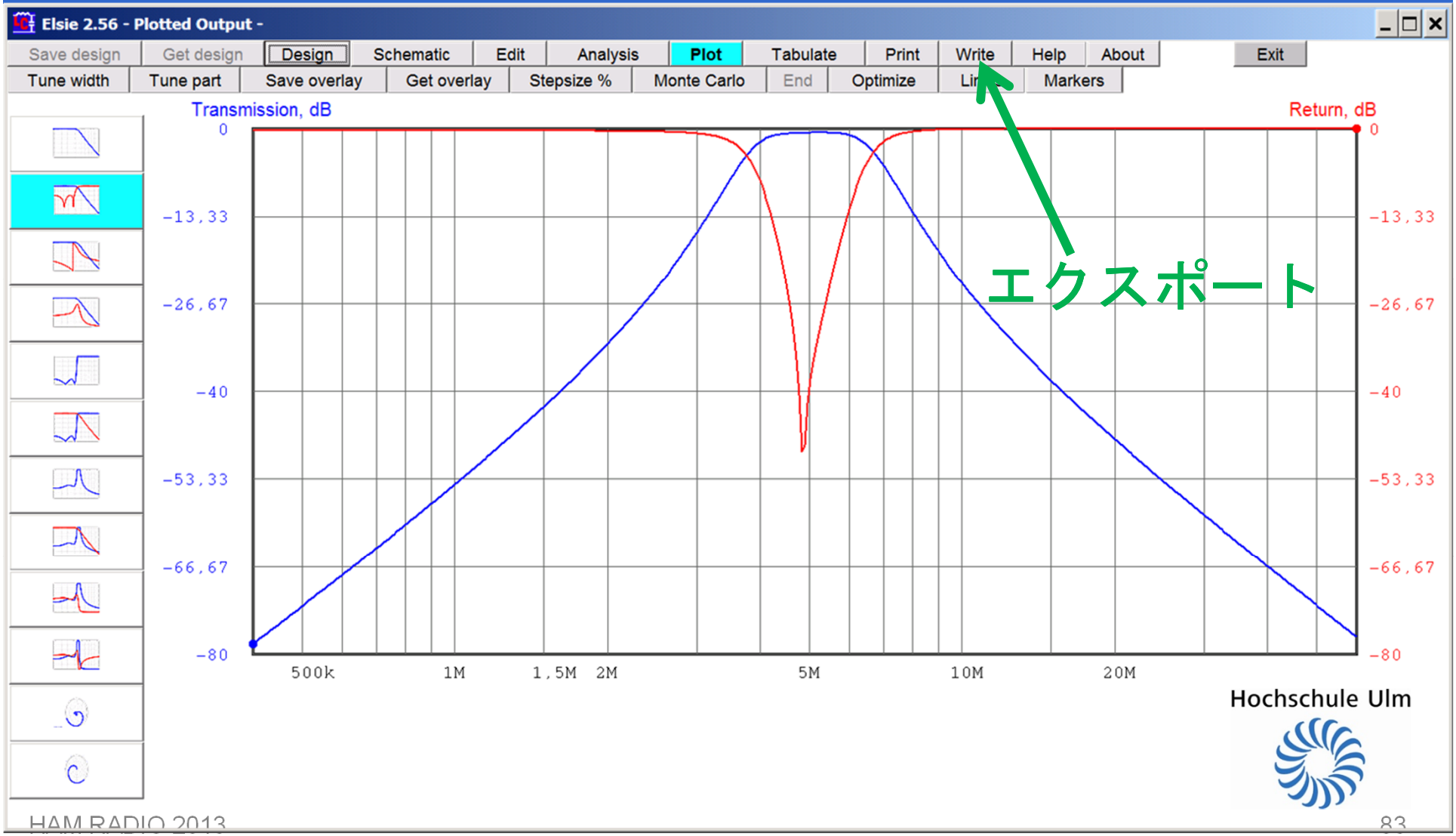
素子を標準値と有効なQに変更 …

Schematic | **Edit** | Analysis | Plot | Tabulate | Print

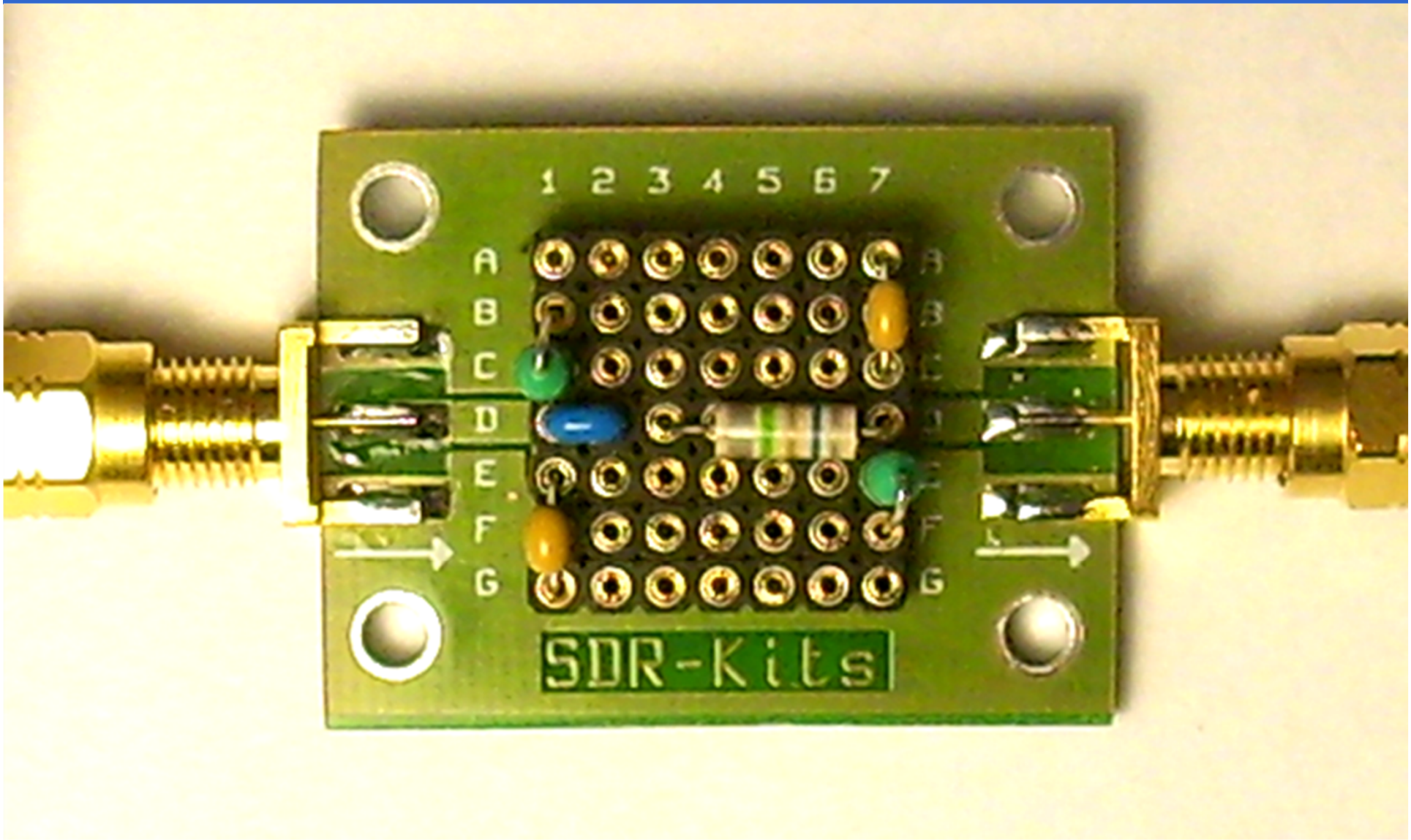


有効なQによるシミュレーション

…測定比較の為、シミュレーションを s2pファイルにエクスポート。



フィルターハードウエア

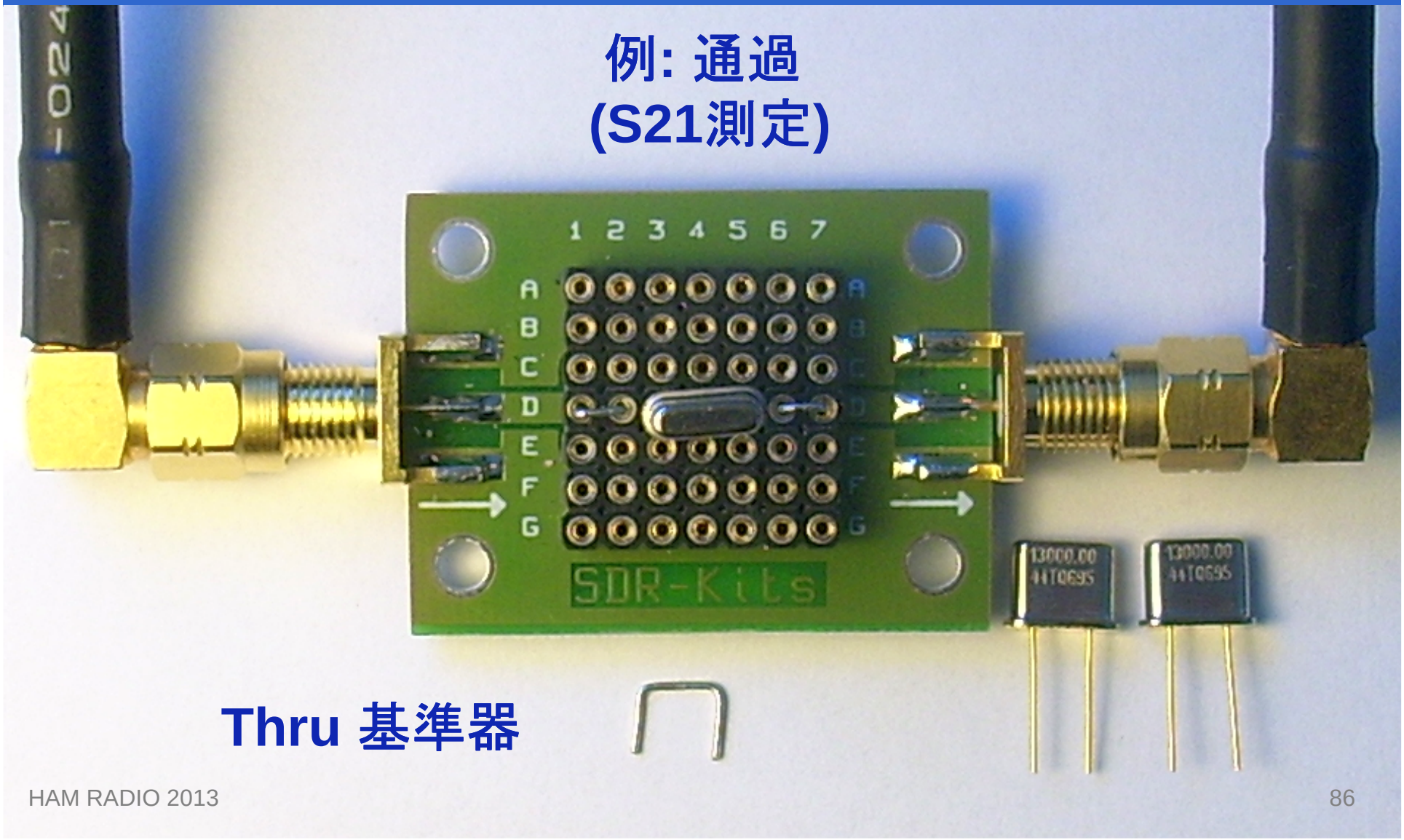


比較
測定値 対 Elsieシミュレーション

S_{21}, S_{11} 測定値 - Plot1, Plot2 Elsieシミュレーション



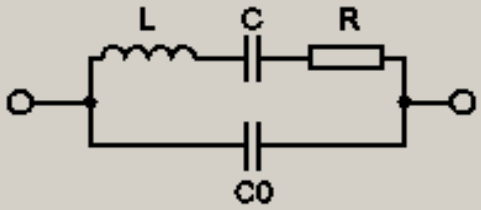
クリスタルの測定/選択:
VNWA Crystal Analyzer



VNWA Crystal Analyzer Tool:
３つの特性が近いクリスタルの特定…

Crystal Analyzer - Analysis will be performed into 3-port data spaces s_11 an...

Equivalent Circuit



L = 23.22917 mH

C = 6.456461 fF

R = 27.285283581 Ohm

C0 = 2.4657104121 pF

$f = 1/2\pi\sqrt{L \cdot C}$ = 12.995886978 MHz

$R \cdot Q = \sqrt{L/C}$ = 1896.7918117 x1000 Q = 69517

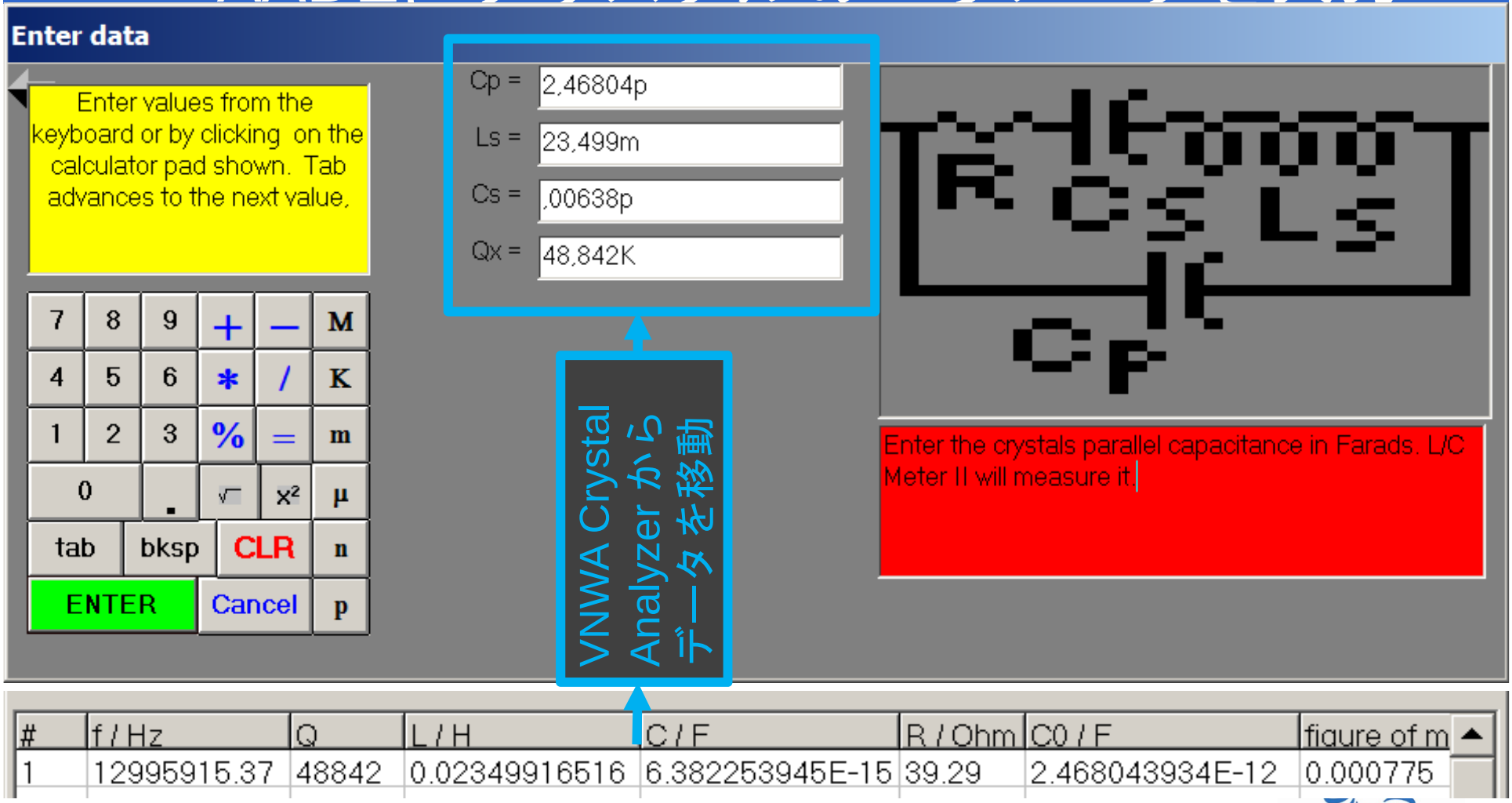
auto-optimize

source = S21 Test Jig Impedances = 50 Ohms

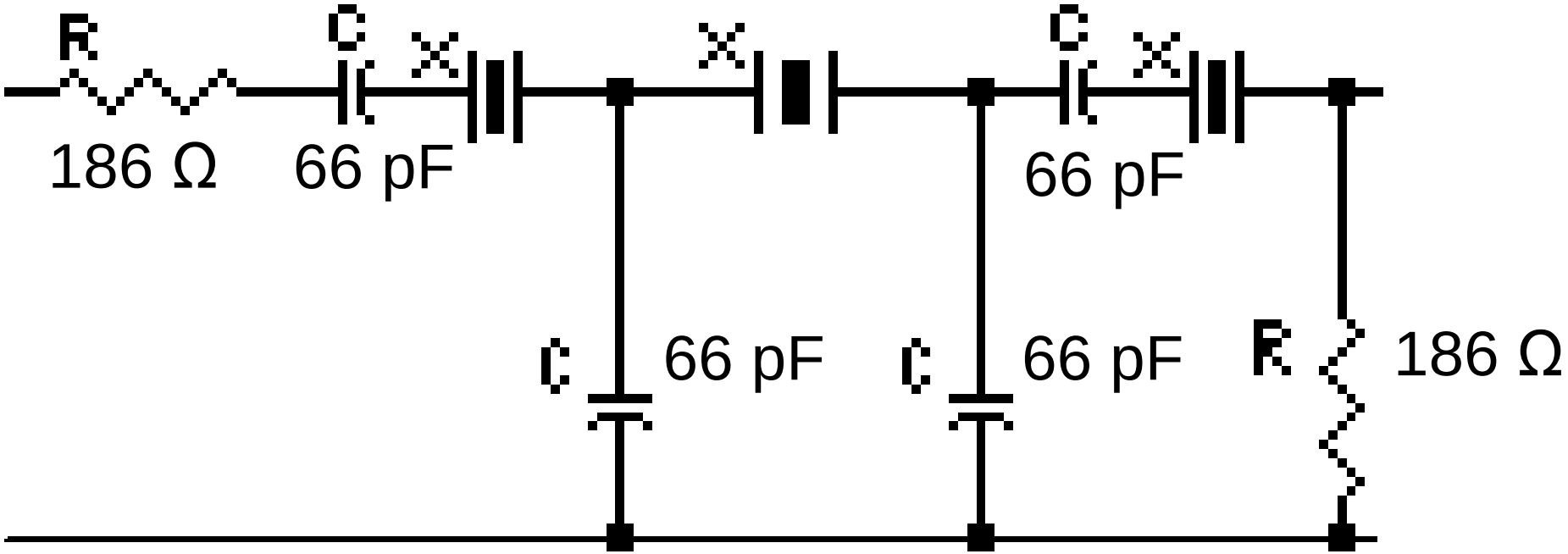
Batch Crystal Analyzer measure save list clear list

#	f / Hz	Q	L / H	C / F	R / Ohm	C0 / F	figure of m
1	12995915.37	48842	0.02349916516	6.382253945E-15	39.29	2.468043934E-12	0.000775
2	12995927.72	54196	0.02368969902	6.330910084E-15	35.69	2.420346928E-12	0.00116
3	12995886.98	69517	0.02322917961	6.456461114E-15	27.29	2.465710412E-12	0.0015

これらのクリスタルでフィルターを作ることにします。
→ AADEにクリスタルのパラメータを入力



AADE 最小ロス (Cohn) デザイン



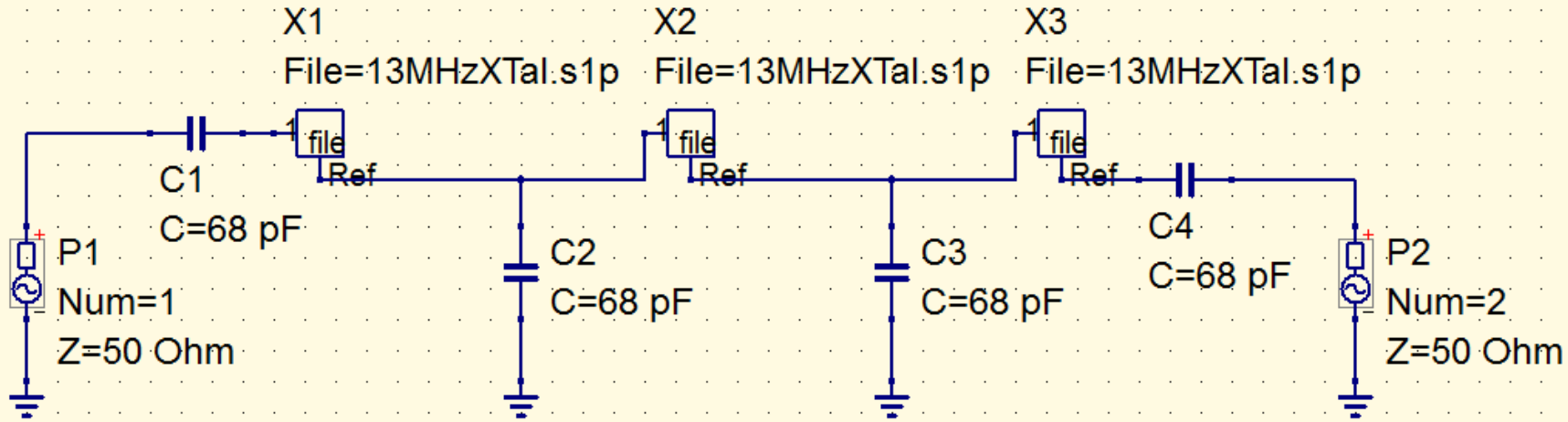
Hochschule Ulm

標準素子値を用いた、50Ω時のQUCSシミュレーション

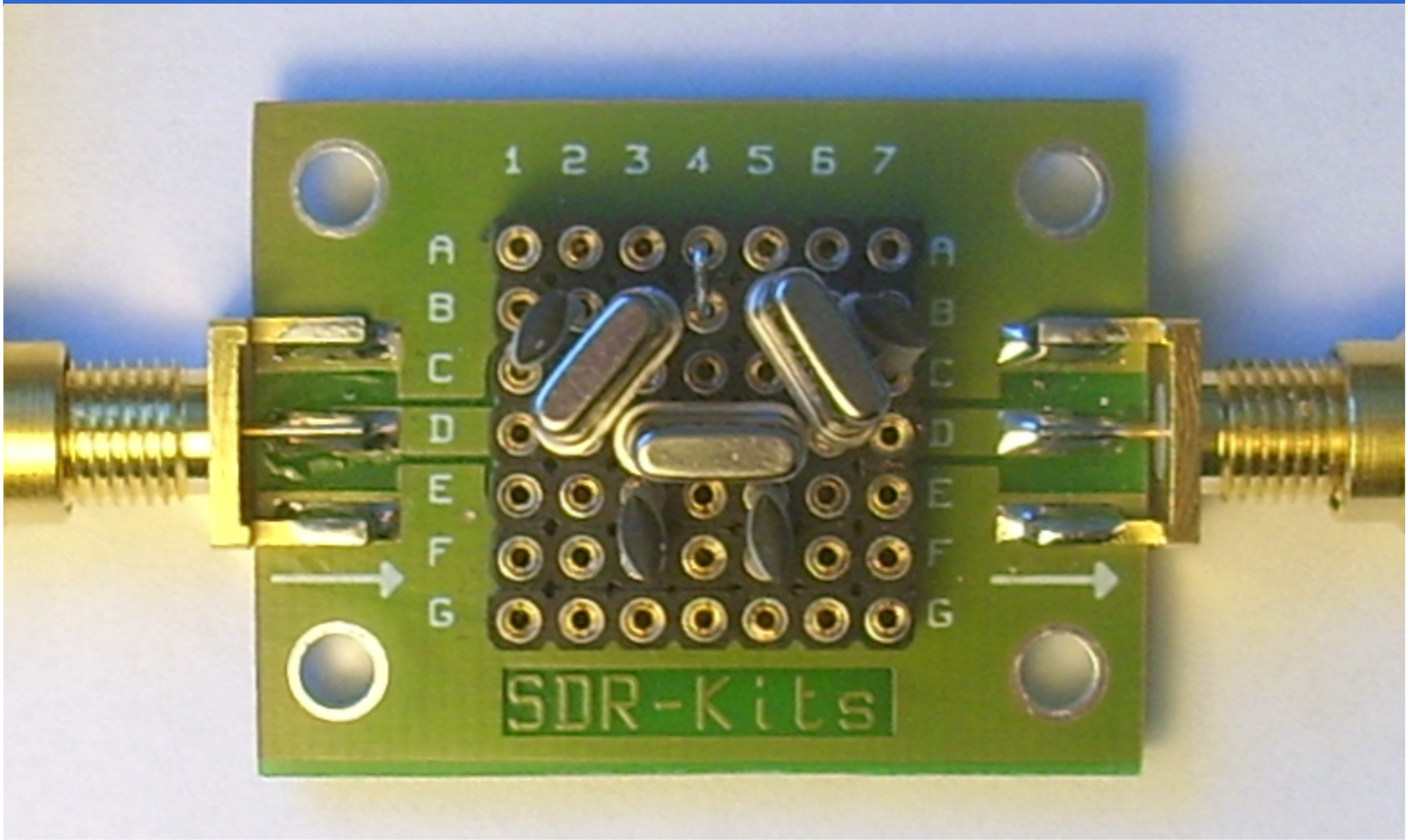
S parameter simulation

SP1
Type=lin
Start=12.987 MHz
Stop=13.007 MHz
Points=800

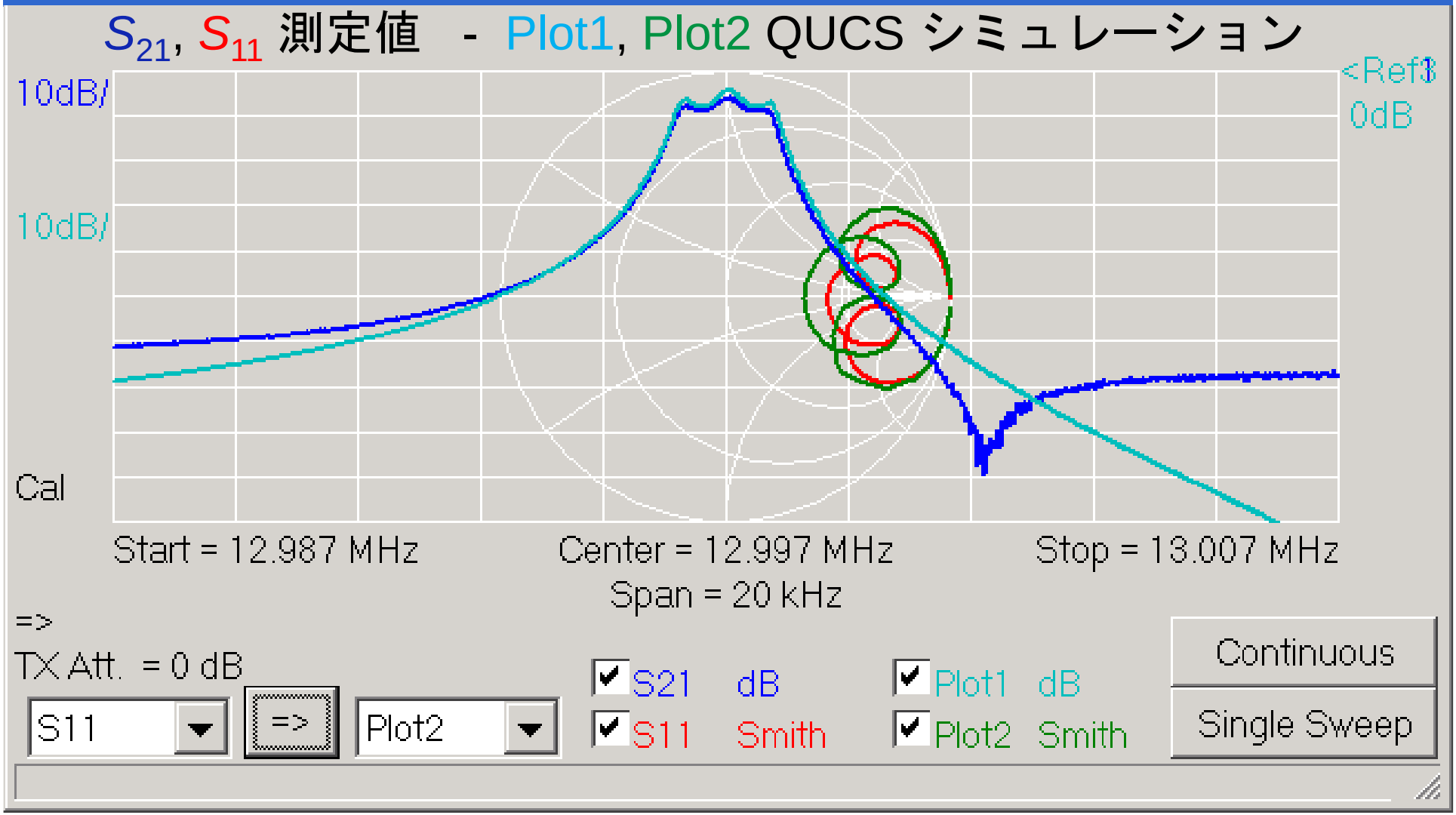
VNWA測定で得られたs1pファイルによるクリスタルのシミュレーション!



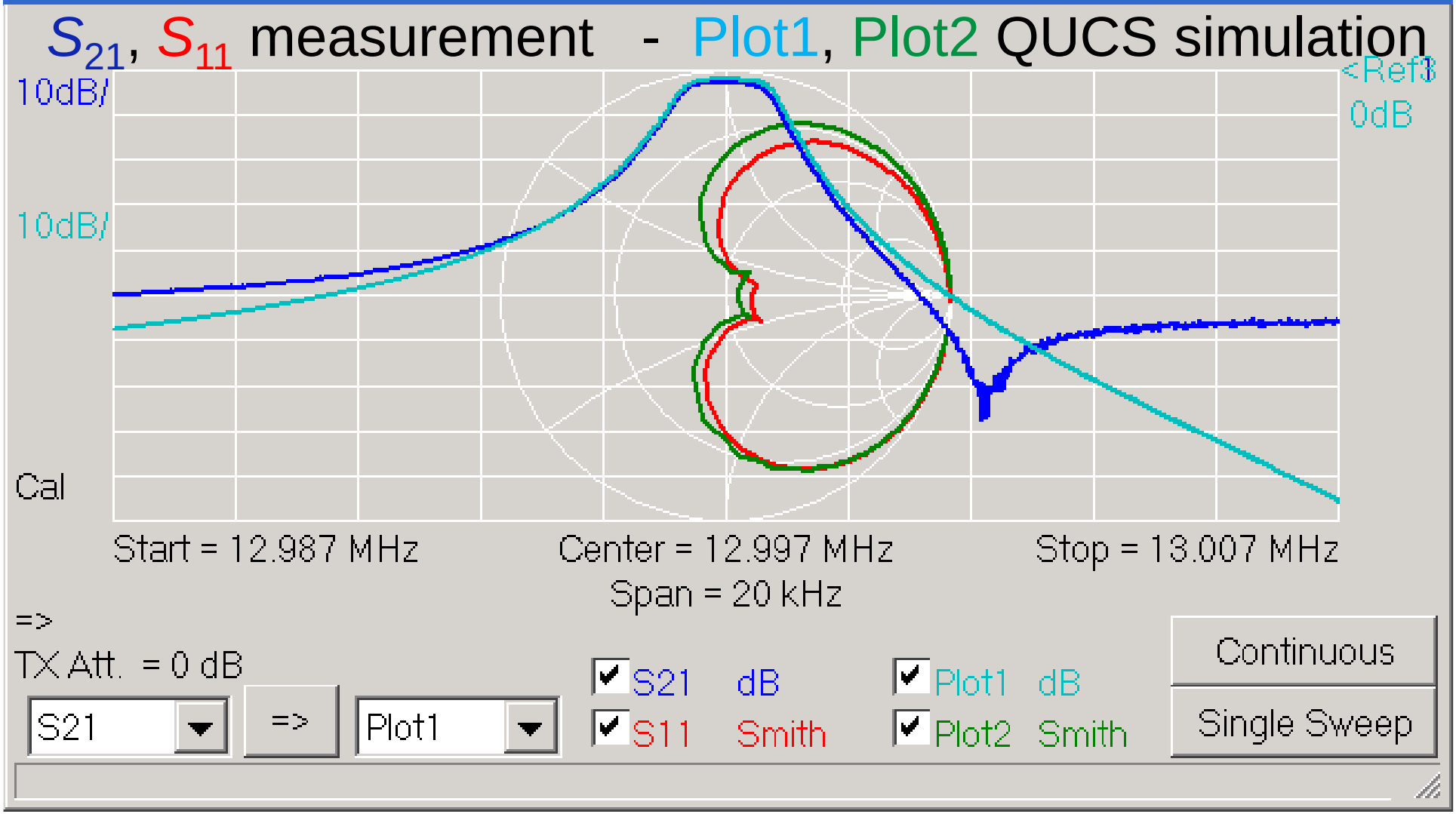
クリスタルフィルターハードウエア



クリスタルフィルター:
測定値 対 シミュレーション、 50Ω時



クリスタルフィルター:
測定値 対 シミュレーション、186Ω時



これにより、以下のことが可能です…

- 電子部品の測定
- フィルターのデザイン
- フィルターのシミュレーション
- フィルターの測定

ワークショップでお楽しみください!



ご清聴有難うございました!

