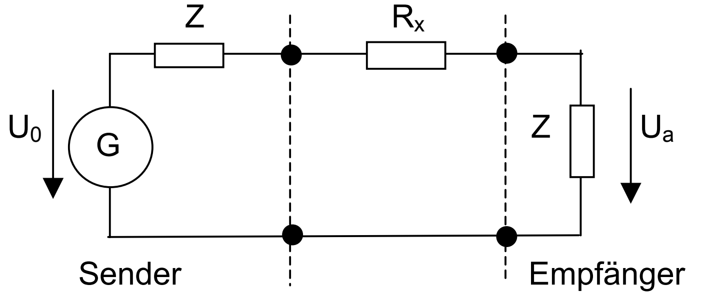
attempo Schindler
Steinbruchstr. 15
72108 Rottenburg
Tel. 07472 96 23 90
Fax 07472 96 23 92
info@attempo.com
www.attempo.com

Messung von Scheinwiderständen mit dem Spektrumsanalysator

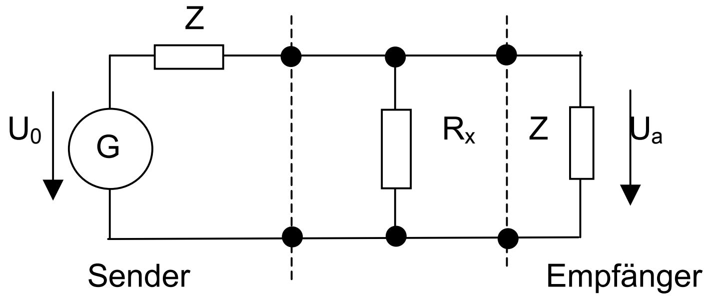
Voraussetzung bei der Ausstattung des Spektrumsanalysators ist ein Mitlaufsender, Trackinggenerator, wie z.B. bei SNA1, oder TSA-1 von W&G.

Es gibt grundsätzlich zwei Schaltungsanordnungen für eine Scheinwiderstandsmessung:

Serielle Einfügung:



Parallele Einfügung:



Prinzipiell kann man sagen, dass für

I R_x I > Z die serielle Anordnung und für
I R_x I < Z die parallele Anordnung günstiger ist.

1. Serielle Schaltung:

Es ist:

$$U_a := \frac{U_0 \cdot Z}{2 \cdot Z + R_x} = \frac{U_0}{2 + \frac{R_x}{Z}}$$

Nur, wenn $R_x / Z >> 2$
d.h. auch $|R_x| >> Z$ ist R_x praktisch proportional zu Z.
Dabei kann R_x auch komplex, oder ein reiner Blindwiderstand sein.
Allerdings führt diese Berechnung bei einem reinen Blindwiderstand (Kapazität) $|X_c| = 10$ Z schon zu einem um 18% zu kleinen Widerstand gegenüber einem Ohmschen Widerstand $R_x = 10Z$.
Erst ab $|X_c| = 100Z$ wird der Unterschied kleiner als 2%.
Mit diesem Manko leben alle einfachen Scheinwiderstandsmessbrücken. Man gestaltet sowohl den Sendewiderstand, wie den Empfangswiderstand so klein wie möglich gegenüber |Rx|. Der Strom durch Rx ist dann weitgehend proportional zu |Rx|.

$|R_x| \approx (U_0/U_a) * Z$

Damit kann die Messung von $|R_x|$ auf eine Dämpfungsmessung zurückgeführt werden.

2. Parallele Schaltung:

$$U_a := \frac{U_0}{2} \cdot \frac{R_x}{\frac{Z}{2} + R_x} = \frac{\frac{U_0}{2}}{1 + \frac{Z}{2R_x}}$$

Dabei können im Ersatzbild Generator- und Empfängerwiderstand zu Z/2 zusammengefasst und die Generatorleerlaufspannung auf $U_0/2$ verringert werden.
Es entsteht ein einfacher Spannungsteiler aus: Z/2 und R_x, gespeist aus $U_0/2$.
Auch hier gilt das oben gesagte, nämlich, dass nur dann

$|R_x|$ proportional zu Z wird, wenn $Z/2R_x >> 1$ oder $R_x << Z$ ist.

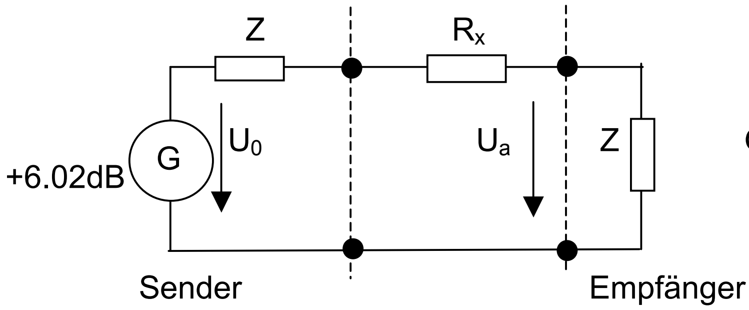
$U_a/U_0 \approx R_x/Z$

$|R_x| \approx U_a/U_0 * Z$

Praktisch zu messende Werte für $|R_x|$ liegen in der Größenordnung von 0.01..100Z für ohmsche Widerstände R_x und reine Blindwiderstände |jX|. Je näher $|R_x|$ oder |jX| dem messgerätebedingten Wert von Z kommen, umso grösser wird der Messfehler. Es soll mit diesem Artikel eine Berechnungsmöglichkeit gesucht werden, die bei einer Ablesung des Verstärkungswertes D am Analysator stets zum korrekten $|R_x|$-Wert führt.

3. Allgemeine Lösung für serielle Einfügung

3.1Ohmische Einfügung, seriell

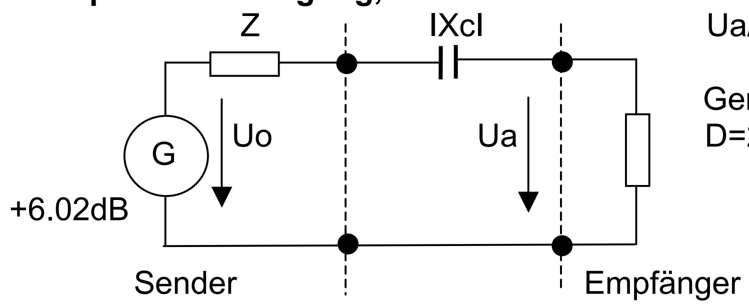


$U_a/U_o = Z / (2Z+R_x)$
$=1 / (2+R_x/Z)$
Gemessene Verstärkung:
$D=20\log[Z/(R_x+2Z)]+ 6.02$ dB

Aufgelöst nach R_x ergibt sich

$Rx=2Z*(10^{-D/20} -1)$ oder für ein 75-Ohm-System **<u>$Rx=150*(10^{-D/20} -1)$</u>**
D ist dabei die gemessene Verstärkung einschl. Vorzeichen

3.2 kapazitive Einfügung, seriell



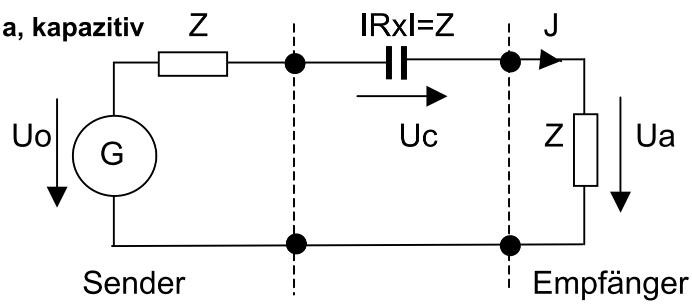
$Ua/Uo=Z/[SQR(4Z^2 +Xc^2)]$

Gemessene Verstärkung
$D=20\log[Z/SQR(4Z^2+Xc^2)]+6.02$dB

Aufgelöst nach Xc ergibt sich

$IXcI = 2Z*SQR(10^{-D/10} -1)$ oder für ein 75-Ohm-System **<u>$IXc)I = 150*SQR(10^{-D/10} -1)$</u>**
D ist dabei die gemessene Verstärkung einschl. Vorzeichen
Der zugehörige Cx-Wert ist von der Frequenz f abhängig:
$Cx=1/[2*\pi*f*2Z*SQR(10^{-D/10} – 1)$
<u>$Cx= 1/[942.48*f*SQR(10^{-D/10} -1]$</u>, wobei f in Hz und C in F gerechnet wird.
Beispiele:

Fall a, kapazitiv

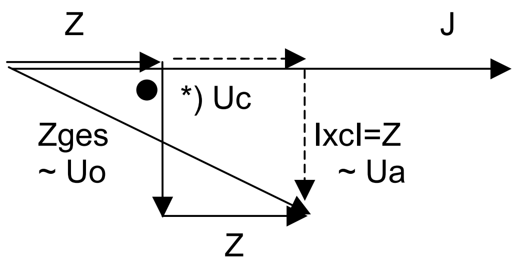


$Ua/Uo=Z/SQR(4Z^2+Z^2)=$
$=1/(Z*SQR(5))$
entspr.$20\log(SQR(1/5))=$
$10\log(1/(4+1)= -6.99$dB
Dämpfung gemessen:
$D=6.02-6.99=-0.97$dB

$IXcI = 2Z*SQR(10^{-D/10} -1)=2*75*SQR(10^{-(-0.97/10)} -1)=75$ Ohm
z.B. f= 100kHz:
$Cx=1/[4*\pi*f*Z*SQR(10^{-D/10} – 1)]=1/[942.48*1E5*SQR(10^{-(-0.97/10)} – 1)]= 21.2$nF

Zeigerdiagramm Fall a: (Widerstandsdiagramm ⟷ Spannungsdiagramm)

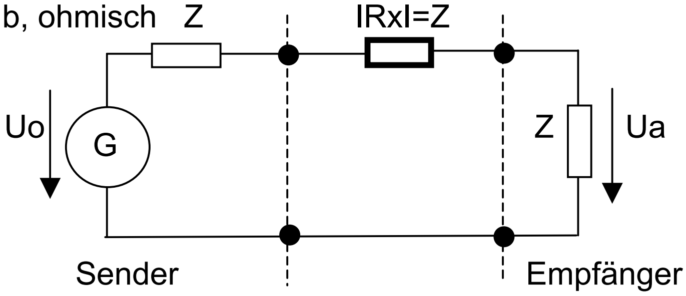
„ähnlich“



Uo/Ua=Z/SQR(Z²+(2Z)²)=
=1/SQR(5)

*) Uc eilt J um 90° nach!

Fall b, ohmisch



Ua/Uo=Z/3Z= 1/3

entspr. 20log(1/3)=-9.54dB
Dämpfung gemessen:
D=6.02-9.54=-3.52dB

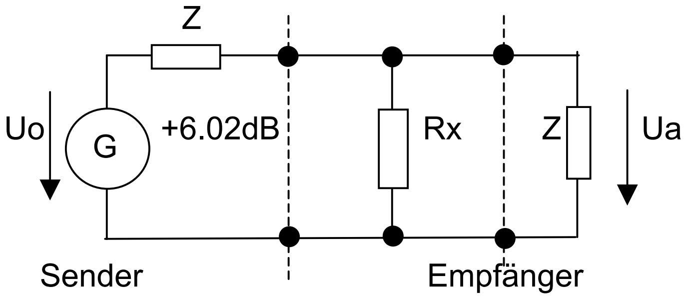
$Rx=2Z*(10^{-D/20} -1)=2*75*(10^{-(-3.52)/20}-1)=75$ Ohm

3.3 Induktive Einfügung,seriell

Die Berechnung erfolgt sinngemäss wie bei der kapazitiven Einfügung:
$IX_LI = 2Z*SQR(10^{-D/10} -1)$ oder für ein 75-Ohm-System **$IX_L)I = 150*SQR(10^{-D/10} -1$**
D ist dabei die gemessene Verstärkung einschl. Vorzeichen
Der zugehörige Lx-Wert ist von der Frequenz f abhängig:
$Lx=Z*SQR(10^{-D/10} – 1)/(\pi*f)$, oder bei einem 75Ohm-System
$Lx=23.87\ SQR(10^{-D/10} –1)/f$, wobei f in Hz und L in H gerechnet wird.
Beispiel:
$IRxI=IX_LI=Z$
D=-0.97dB (wie bei kapazitiver Einfügung!)
$IX_L)I = 150*SQR(10^{0.97/10} –1)=75$Ohm
f=100kHz
$Lx=23.87\ SQR(10^{0.97/10} –1)/100000 = 119.4E-6$ entspr. 119.4 uH

4. Allgemeine Lösung für parallele Einfügung

4.1Ohmische Einfügung, parallel



Ua/Uo= Rx/2(Rx + Z/2)=
= 1/2(1+Z/2Rx)
Dämfung gemessen:
D= -6.02 + 20log(1/(1+Z/2Rx)
= 20log(1/(1+Z/2Rx)

Aufgelöst nach Rx ergibt sich

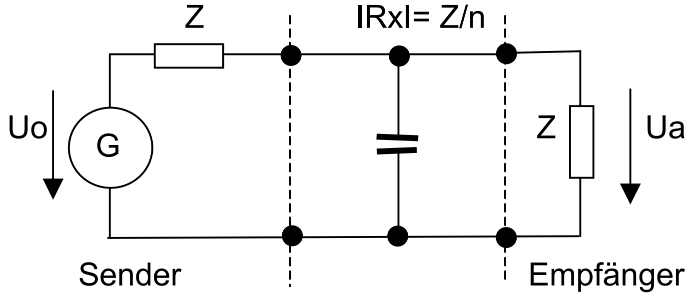
$Rx=Z/2*1/(10^{-D/20} -1)$ oder für ein 75-Ohm-System **$Rx=37.5*1/(10^{-D/20} -1)$**
D ist dabei die gemessene Verstärkung einschl. Vorzeichen

Beispiel: Rx=Z

D= 20log(1/(1+ Z/2Z))=20log(2/3)= -3.52dB

Rx=37.5*(1/($10^{3.52/20}$ –1)) =37.5*2=75 Ohm

4.2 kapazitive Einfügung, parallel



Zges= SQR{(Z/2)²+(IRxI)²}

2Ua/Uo=(IRxI)/Zges
gemessene Dämpfung:
D= -10log(1+ Z²/4Rx²)

Aufgelöst nach Xc ergibt sich

IXcI = (Z/2)/SQR($10^{-D/10}$ -1) oder für ein 75-Ohm-System
IRxI= **IXc)I = 37.5/SQR($10^{-D/10}$ -1)**
D ist dabei die gemessene Verstärkung einschl. Vorzeichen
Der zugehörige Cx-Wert ist von der Frequenz f abhängig:
Cx=SQR($10^{-D/10}$ – 1)/π*f*Z
Cx= SQR($10^{-D/10}$ –1)/(235.41*f), wobei f in Hz und C in F gerechnet wird.

Beispiel: IRxI=IXcI =Z
D= -10log(1+ Z²/4Z²)= -10log(5/4)= -0.969dB

IRxI=IXcI=37.5SQR($10^{0.969/10}$ –1)) =37.5*2=75 Ohm
f= 100kHz
Cx=SQR($10^{0.969/10}$ – 1)/(235.41*100000)=21E-12 entspr.21nF

4.3 Induktive Einfügung, parallel

Die Berechnung erfolgt sinngemäss wie bei der kapazitiven Einfügung
IX_LI = (Z/2)/SQR($10^{-D/10}$ -1) oder für ein 75-Ohm-System
IRxI= **IX_L)I = 37.5/SQR($10^{-D/10}$ -1)**
D ist dabei die gemessene Verstärkung einschl. Vorzeichen
Der zugehörige Lx-Wert ist von der Frequenz f abhängig:
Lx=(Z/4)/(SQR($10^{-D/10}$ – 1)*π*f), oder bei einem 75Ohm-System
Lx=5.968/ (SQR($10^{-D/10}$ –1)*f)), wobei f in Hz und L in H gerechnet wird.

Beispiel: IRxI=IX_LI =Z

D= -10log(1+ Z²/4Z²)= -10log(5/4)= -0.969dB

IRxI=IX_LI=37.5/SQR($10^{0.969/10}$ –1)) =37.5*2=75 Ohm
f= 100kHz

$Lx=5.968/(SQR(10^{-D/10}-1)*100000) = 119.4E-6$ entspr.119uH

5. Dämpfungsanstiege >20dB/Dek.

Auf die Berechnung bei Dämpfungsanstiegen >20dB/Dek. wird bewußt verzichtet, weil einerseits die zu erzielende Genauigkeit mit steilerem Dämpfungsanstieg gering wird (Ablesung am Spektrumsanalysator schwierig) und andererseits steilere Anstiege als 20 dB/Dek. meist nur nahe bei Resonanzstellen auftreten. Die Steigung nimmt 3dB vor und nach der Resonanzstelle auf 10dB/Dek. ab und wird exakt in der Resonanz zu 0dB/Dek. Damit können die dabei auftretenden IRxI-Werte mit den vorstehend aufgeführtrn Formeln für "ohmische Einfügungen" berechnet werden. IRxI enspricht im Maximum einer Parallel- oder Serienresonanz nämlich dem (ohmschen) Resonanzwiderstand.

6. Interpretation des gemessenen Dämpfungswertes D

Da alle vorgenannten Berechnungen sich auf die Quellenspannung des Generators (sprich Mitlaufsenders des Spektrumsanalysators) beziehen, ist die tatsächlich gemessene Leistung in dBm um 6.02 dB zu reduzieren. **Ua/Uo≡ -20dB berechnet, werden als –26dB angezeigt.**

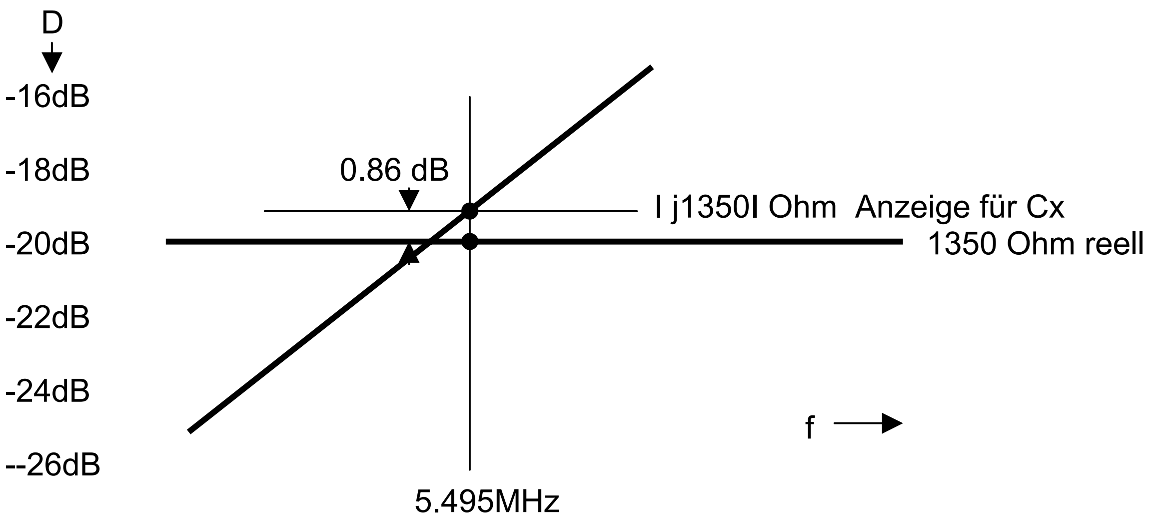
D = abgelesener Pegelwert (negative Dämpfung)

Die Formeln berücksichtigen also den tatsächlich gemessenen Pegelwert

Beispiel:
D= -20dB

Ein ohmscher Widerstand Rx seriell errechnet sich hier für Z=75 Ohm zu
$Rx=2Z*(10^{-D/20}-1)=2*75*(10^{-(-20)/20}-1)=2*75*9 = 1350$Ohm

Eine reine Kapazität, die den gleichen Betrag IXcI=1350Ohm bei z.B. f =5.495MHz besitzt, hat den Wert 21.5pF. IjXcI= 1350Ohm würde aber mit
$D=20\log[Z/SQR(4Z^2+Xc^2)]+6.02dB=-19.14dB$, und damit höher **angezeigt**, als der entspr. Ohm`sche Widerstand. Deshalb also getrennte Berechnungsformeln für **reelle und reine Blindelemente!**



Schirmbild mit horizontalen und vertikalen Cursern bei der Frequenz 5.495MHz
und Dämfungsanzeige –20dB bei 1350 Ohm reell und –19.2dB bei – j1350Ohm
in einem 75Ohm – System

7.Verwendete mathematische Grundlagen

Die Dämpfungen werden bekanntlich im logarithmischen Maßstab dB angegeben. Die Umrechnung erfolgt so:

Für D=20log U2/U1 dB lautet die Umkehrung U2/U1=$10^{D/20}$

Wenn reelle und reaktive Impedanzen A und jB einen Spannungsteiler bilden, müssen A und jB quadratisch addiert werden, um die Gesamtimpedanz zu berechnen. Zges = SQR(A^2 +IjBI²)
Das Verhältnis der an jB anliegende Teilspannung U*jB/Zges zur Quellspannung U kann auch logarithmisch mit
C=20log(B/IZgesI)= -20log[SQR(1+A²/ B ²)] angegeben werden.

Die Umkehrung lautet dann (1+A²/ B ²)=$10^{C/10}$
Daraus kann dann durch Umstellung A bestimmt werden:
A= B*SQR($10^{C/10}$-1)

13.01.09
4.03.08 W. Wehr