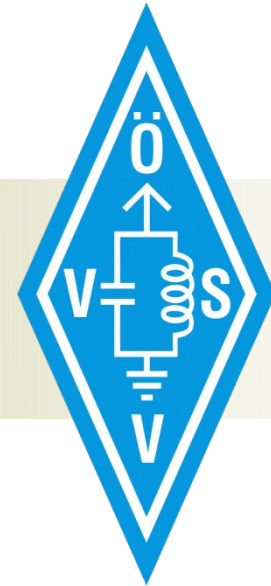


Vortrag:

Anpassung und VSWR



Praxis und Mythen beim Betrieb von Antennen

Vortragender:
Ludwig Stonig

OE7LSH

A´Funk kompakt 06-17 Innsbruck



Vortrag Agenda

- Themen
 - Technische Begriffe
 - Anpassung
 - Wellenwiderstand
 - Reflexion und VSWR
 - Das Smith Diagramm
 - Mythen und Fakten
 - Anpassung im Smith-Diagramm

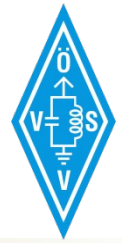


[Ludwig, OE7LSH]

■ Steckbrief

- Name: Dipl.-Ing. Ludwig Stonig
- Familie: verheiratet, 3 Kinder
- Beruf: HTL – Fachtheoretischer Unterricht
- Call: seit 1982 lizenziert
- Schwerpunktinteressen Amateurfunk
 - Kurzwelle, Antennenbau, Reparatur alter Geräte
- Erreichbar via:
 - Inet: oe7lsh@oevsv.at

[Anpassung und VSWR



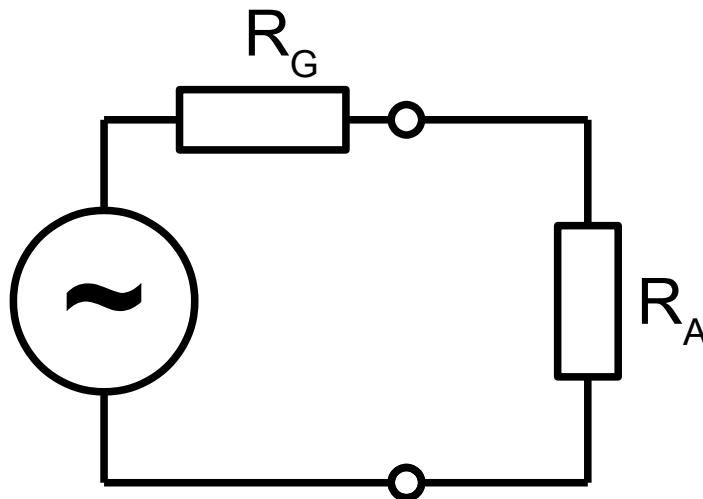
Technische Begriffe

OE7LSH

[Anpassung



- Was ist Anpassung:



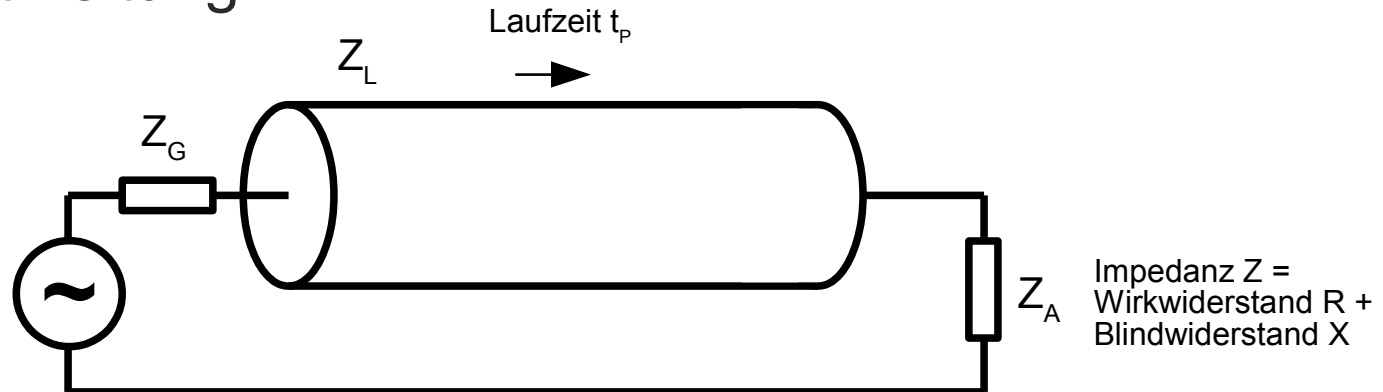
Abschlusswiderstand
=
Generatorwiderstand
=> **Anpassung***

* Eigentlich Wirkleistungsanpassung $Z_G = Z_A^*$
Im Folgenden wird auf die komplexe Darstellung aus Verständlichkeitsgründen verzichtet. Die „Wissenden“ mögen mir diverse „Ungenauigkeiten“ verzeihen.

[Leitung]

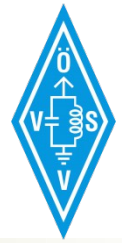


■ Mit Leitung:

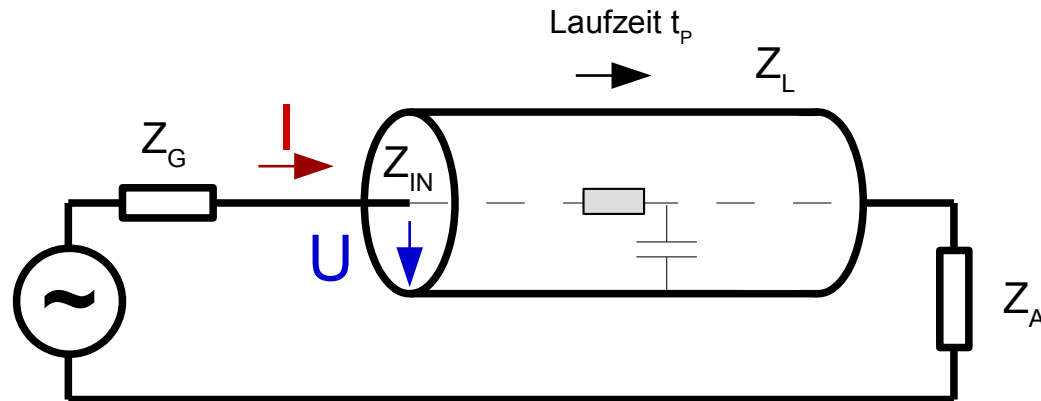


Eine Leitung besitzt eine endliche Laufzeit t_p . Wird die Quelle an die Leitung geschaltet, so „sieht“ sie innerhalb $2 \times t_p$ nur die Leitung und liefert Energie. Die Leitung nimmt die Energie auf und transportiert sie zur Last, ohne sie zu verbrauchen. (Annahme: verlustlose Leitung) Die Leitung verhält sich wie ein Widerstand (= Wellenwiderstand Z_L der Leitung) der Energie aufnimmt. Erst nach $2 \times t_p$ wird der Abschluss „sichtbar“.

[Leitung]



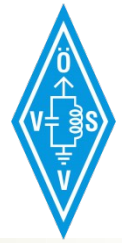
■ Wellenwiderstand



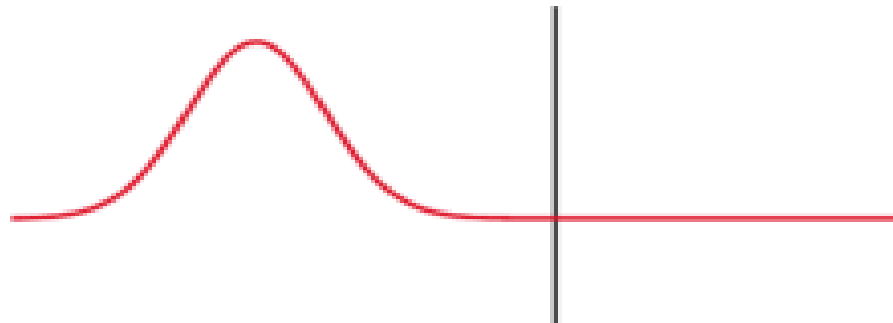
$$Z_{IN} = \frac{U}{I} = Z_L \dots \text{Wellenwiderstand der Leitung}$$

(bis zur „Rückmeldung“ von Z_A nach $2 \times t_p$)

[Leitung



- Bei Fehlanpassung wird ein Teil der Welle reflektiert

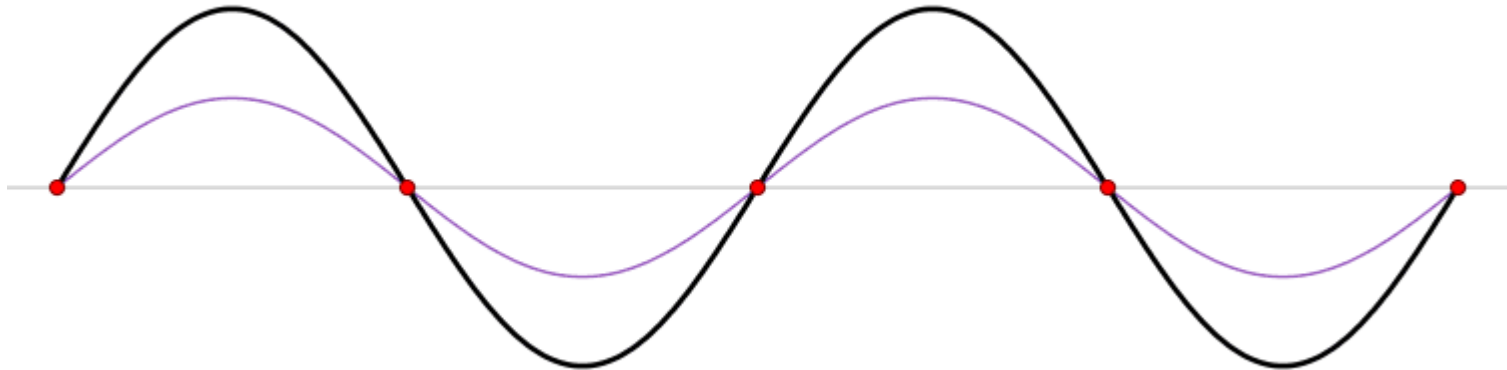


und kehrt zur Quelle zurück



Stehende Welle

- Die hinlaufende und rücklaufende Welle überlagert sich:

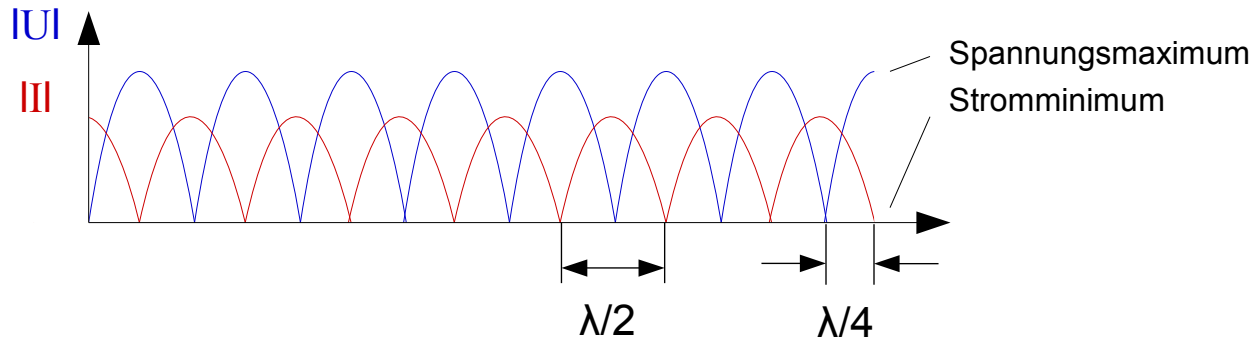


=> auf der Leitung bildet sich eine stehende Welle

Stehende Welle

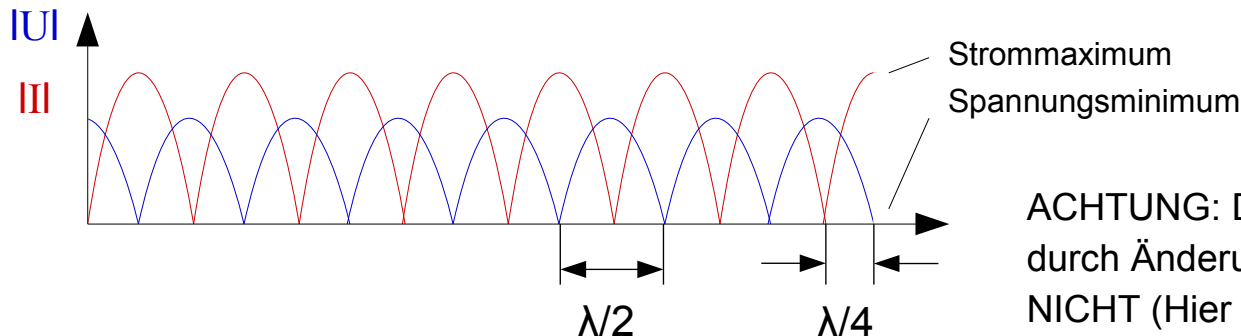


Strom-Spannungsverlauf bei leerlaufendem Ende:



Nach $\lambda/4$ verwandelt sich der Stromknoten in einen Strombauch
 => aus dem Leerlauf wird ein Kurzschluss

Strom-Spannungsverlauf bei kurzgeschlossenem Ende:



Nach $\lambda/2$ verwandelt sich der Strombauch wieder in einen Stromknoten
 => aus dem Kurzschluss wird wieder ein Leerlauf

ACHTUNG: Die Anpassung ändert sich durch Änderung der Leitungslänge NICHT (Hier $|Γ| = 1$ in beiden Fällen)



[Stehende Welle]

- Reflexion tritt an allen Stellen auf, an denen sich der Widerstand ändert. Die Größe der reflektierten Welle hängt vom Widerstandssprung ab.

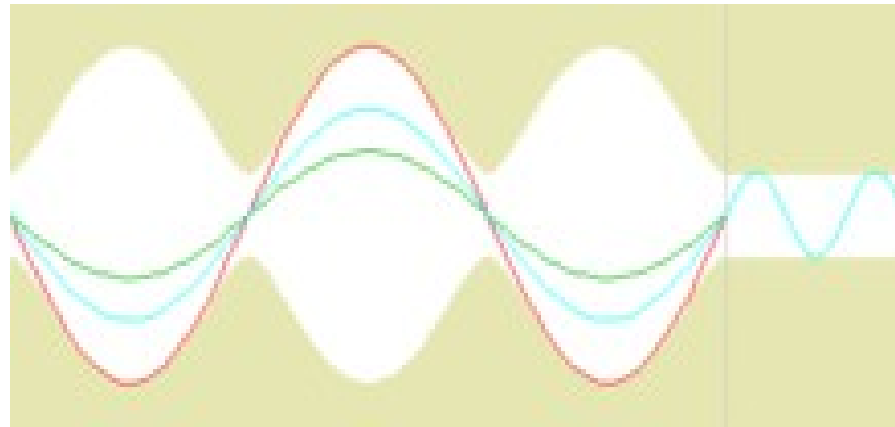
$$\text{Es gilt : } U_{\text{rück}} = \Gamma \cdot U_{\text{hin}} \quad \text{mit} \quad \Gamma = \frac{Z_A - Z_L}{Z_A + Z_L}$$

Γ Reflexionskoeffizient (griech. „Gamma“)
($\Gamma = 1$... Leerlauf, $\Gamma = 0$... Anpassung, $\Gamma = -1$... Kurzschluss)



[Stehende Welle]

- Bei einer Teilreflexion ($Z_A \neq 0$ bzw. $Z_A \neq \infty$) entstehen



ortsfeste Spannungsamplituden U_{\min} und U_{\max}



Stehwellenverhältnis VSWR

- Das Stehwellenverhältnis VSWR ist das Verhältnis aus maximal auftretender Spannung U_{\max} zu minimal auftretender Spannung U_{\min} .

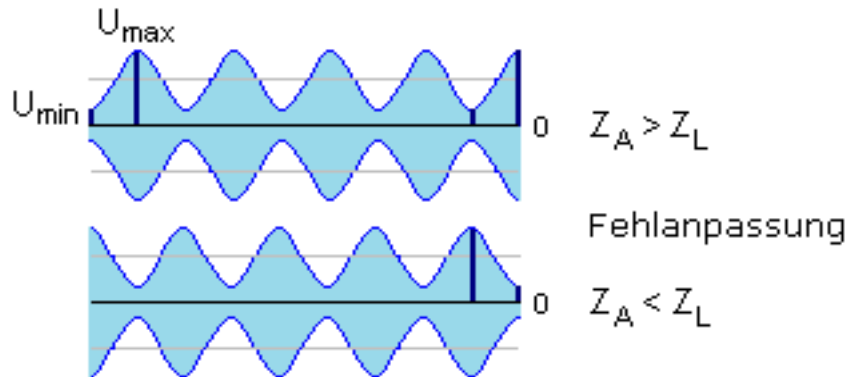
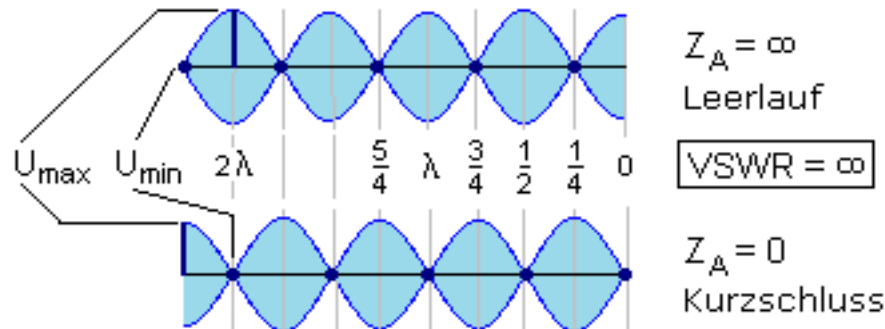
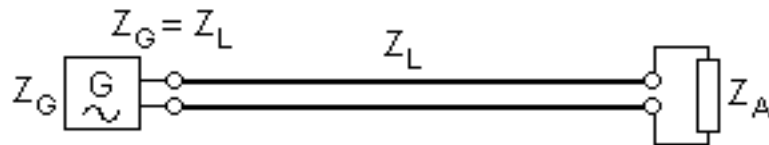
Es gilt : $VSWR = \frac{U_{\max}}{U_{\min}}$... Voltage Standing Wave Ratio

$VSWR = \infty$... Leerlauf, $VSWR = 1$... Anpassung, $VSWR = \infty$... Kurzschluss

$$VSWR = \frac{U_{\text{hin}} + U_{\text{rück}}}{U_{\text{hin}} - U_{\text{rück}}} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad \leftrightarrow \quad \Gamma = \frac{VSWR - 1}{VSWR + 1}$$



Stehwellenverhältnis VSWR



Quelle: <http://elektroniktutor.de/signalkunde/reflex.html>

$$VSWR = \frac{U_{\max}}{U_{\min}} = \frac{U_{\text{hin}} + U_{\text{rück}}}{U_{\text{hin}} - U_{\text{rück}}}$$

erweitern mit $\frac{1}{U_{\text{hin}}}$

$$VSWR = \frac{1 + \frac{U_{\text{rück}}}{U_{\text{hin}}}}{1 - \frac{U_{\text{rück}}}{U_{\text{hin}}}}$$

Reflexionsfaktor

$$|r| = \frac{U_{\text{rück}}}{U_{\text{hin}}} = \frac{Z_A - Z_L}{Z_A + Z_L}$$

Stehwellenverhältnis

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



Reflektierte Leistung

- Die Leistungen verhalten sich proportional zum Quadrat der Spannungen ($P \sim U^2$)

$$\text{Es gilt : } U_{\text{rück}}^2 = \Gamma^2 \cdot U_{\text{hin}}^2$$

$$P_{\text{rück}} = \Gamma^2 \cdot P_{\text{hin}}$$

1. Mythos: Ein hohes VSWR geht gar nicht

$$\text{Annahme VSWR} = 10 \rightarrow \Gamma = \frac{\text{VSWR} - 1}{\text{VSWR} + 1} = \frac{9}{11}$$

$$P_{\text{ant}} = P_{\text{hin}} - P_{\text{rück}} = P_{\text{hin}} - P_{\text{hin}} \cdot \Gamma^2 = P_{\text{hin}} (1 - \Gamma^2) =$$

$$P_{\text{hin}} (1 - 0,67) = P_{\text{hin}} \cdot 0,33 \text{ d.h. } 33\%!! \text{ bleiben in der Antenne}$$

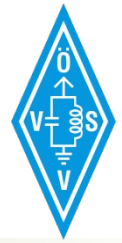
(Nicht berücksichtigt: TRX wird zurückregeln)



1. Zusammenfassung

- Bei $Z_L \neq Z_A$ entsteht eine rücklaufende Welle
- Diese überlagert sich mit der hinlaufenden Welle und es entsteht eine stehende Welle (ortsfeste Spannungsmaxima und -minima)
- Das Stehwellenverhältnis VSWR gibt das Verhältnis von U_{\max}/U_{\min} an
- Der Reflexionsfaktor Γ gibt das Verhältnis von rücklaufender zu hinlaufender Spannung an

[Anpassung und VSWR



Das Smith-Diagramm

OE7LSH



[Impedanzebene]

- Der Abschluss (= die Last) :

Die Lastimpedanz Z_A besteht im Allgemeinen aus einem Wirkanteil R_A und einem Blindanteil X_A

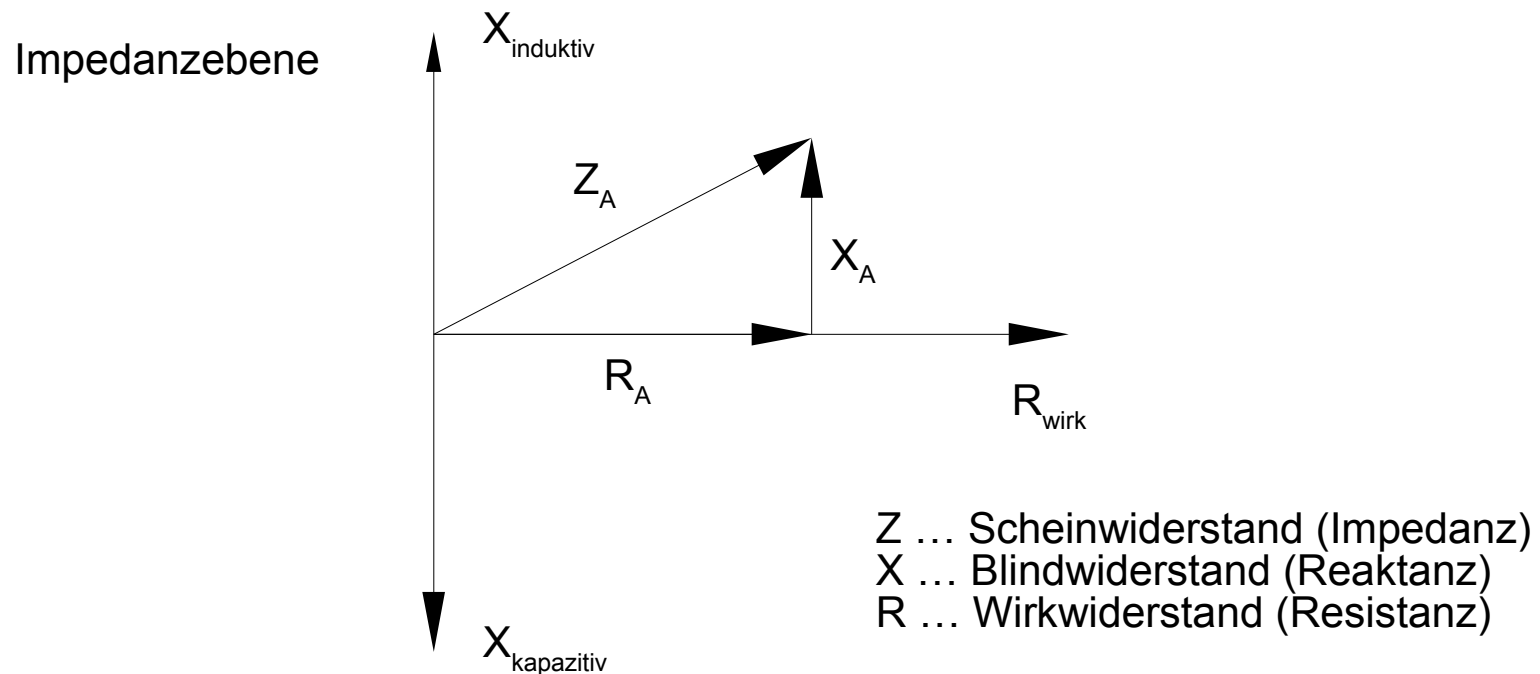
es gilt: $Z_A = \sqrt{R_A^2 + X_A^2}$

(X_A kann kapazitiv oder induktiv sein)



[Impedanzebene]

- In der graphischen Darstellung





[Impedanzebene]

- Wie wirken sich die Anteile der Abschlussimpedanz auf die Reflexion aus?
- Ein **Wirkwiderstand** setzt Energie in Wärme um = **echter Verbraucher**
- Ein **Blindwiderstand** (Spule oder Kondensator) gibt im Mittel die gleiche Energie ab (Entladevorgang), die er vorher aufgenommen hat (Ladevorgang)
Spule und Kondensator unterscheiden sich nur in der Phasenverschiebung = **kein Verbraucher**

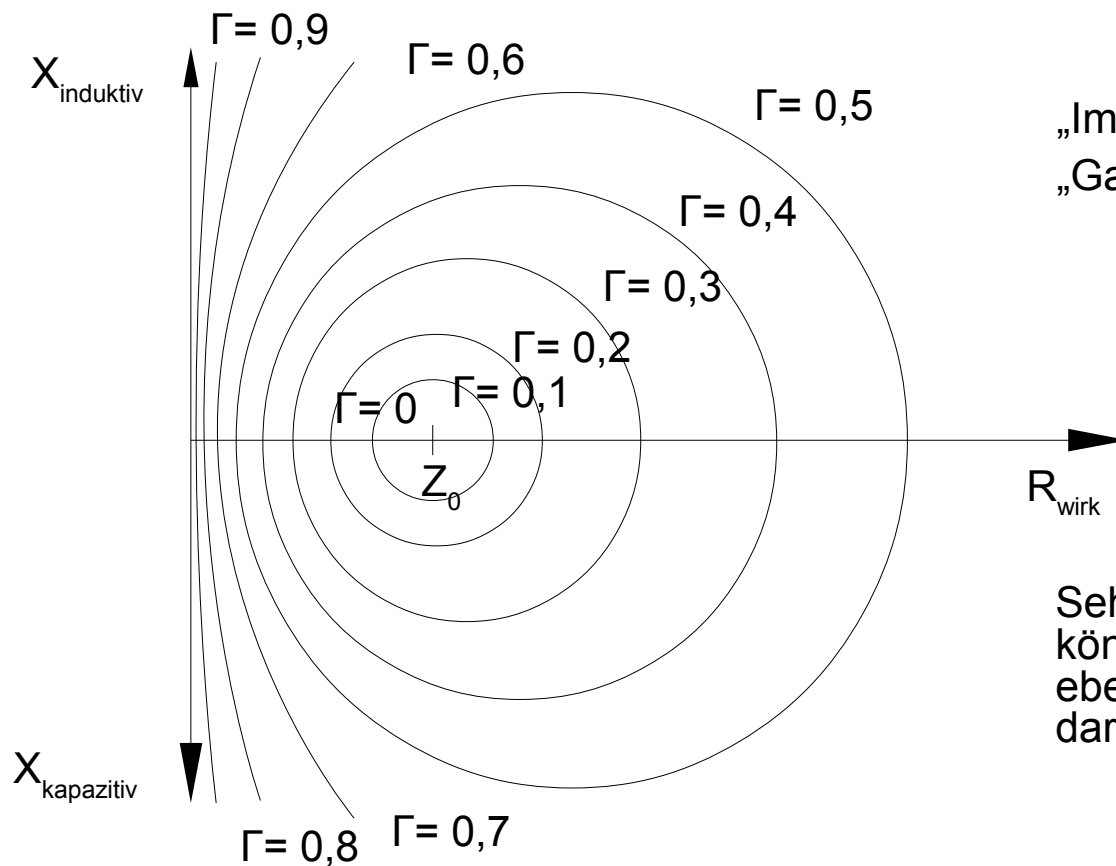
Der Wirkanteil der Lastimpedanz R_A bewirkt Anpassung

Der Blindanteil der Lastimpedanz X_A verursacht Reflexion



Impedanzebene

- Punkte mit gleichem Reflexionskoeffizienten bilden sich als Kreise ab:



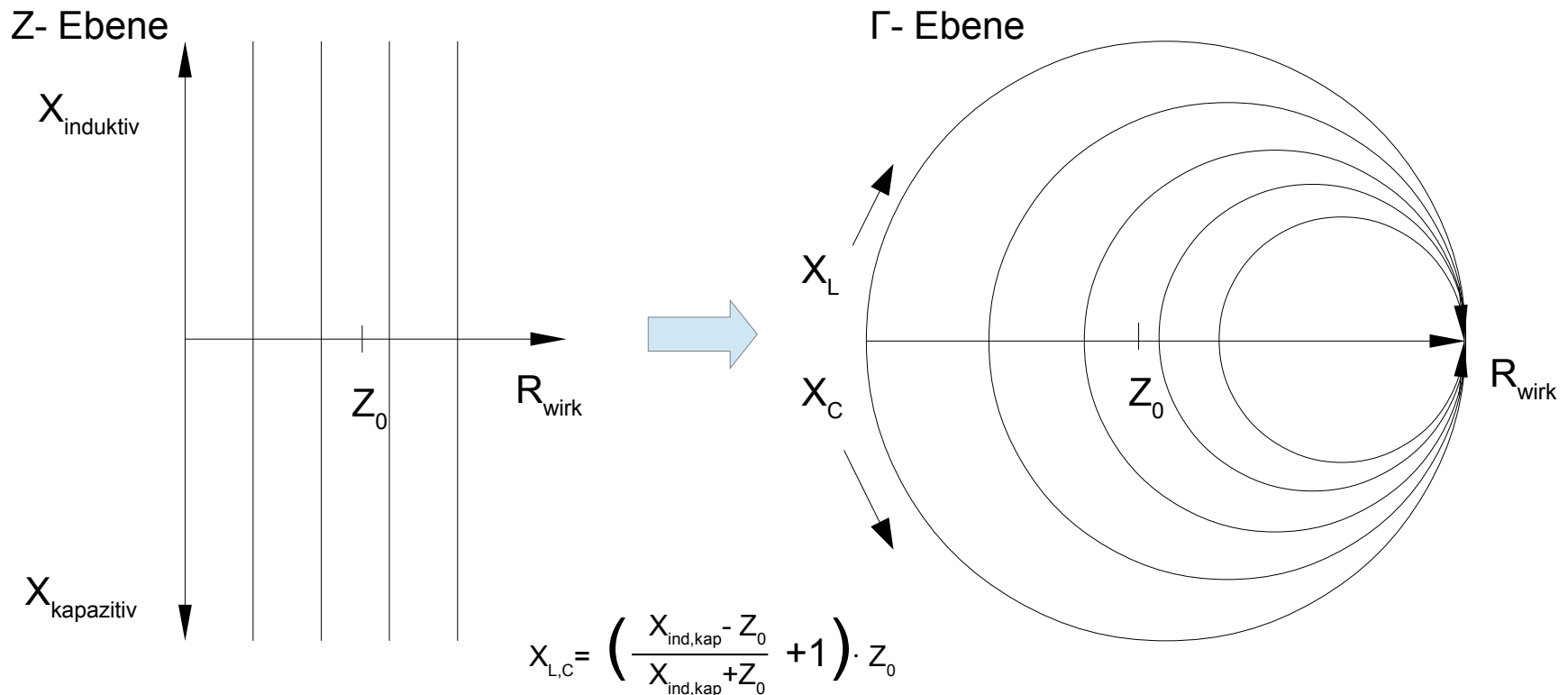
„Impedanzebene“ oder
„Gaußschen Zahlenebene“

Sehr große Widerstände
können in der Impedanz-
ebene zeichnerisch nicht
dargestellt werden



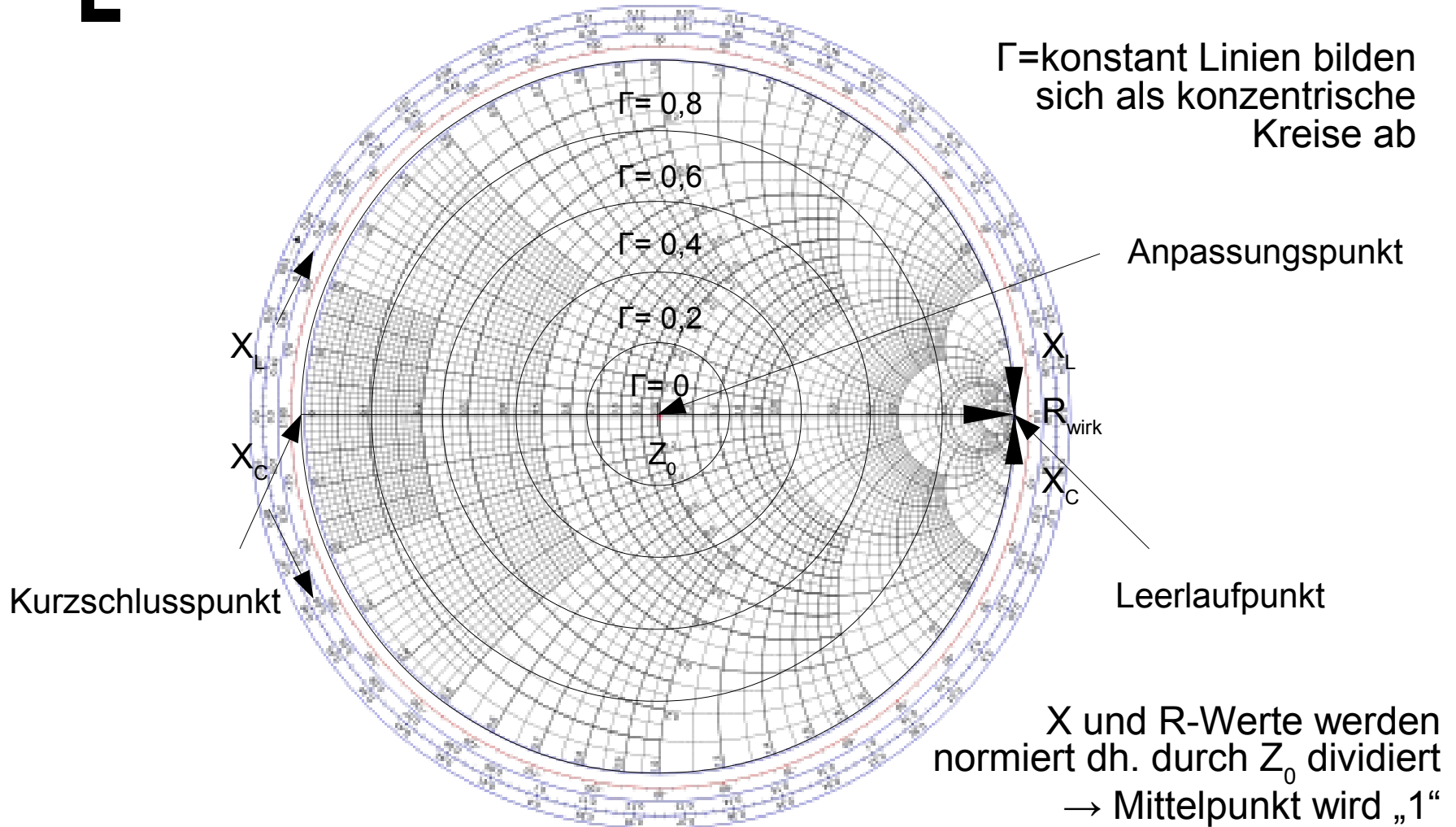
[Impedanzebene]

- Das Smith-Diagramm benützt einen Trick → die X_A -Achsen werden durch Umrechnung „verbogen“





Smith-Diagramm





Smith-Diagramm

Anwendung
des Smith-
Diagramms:

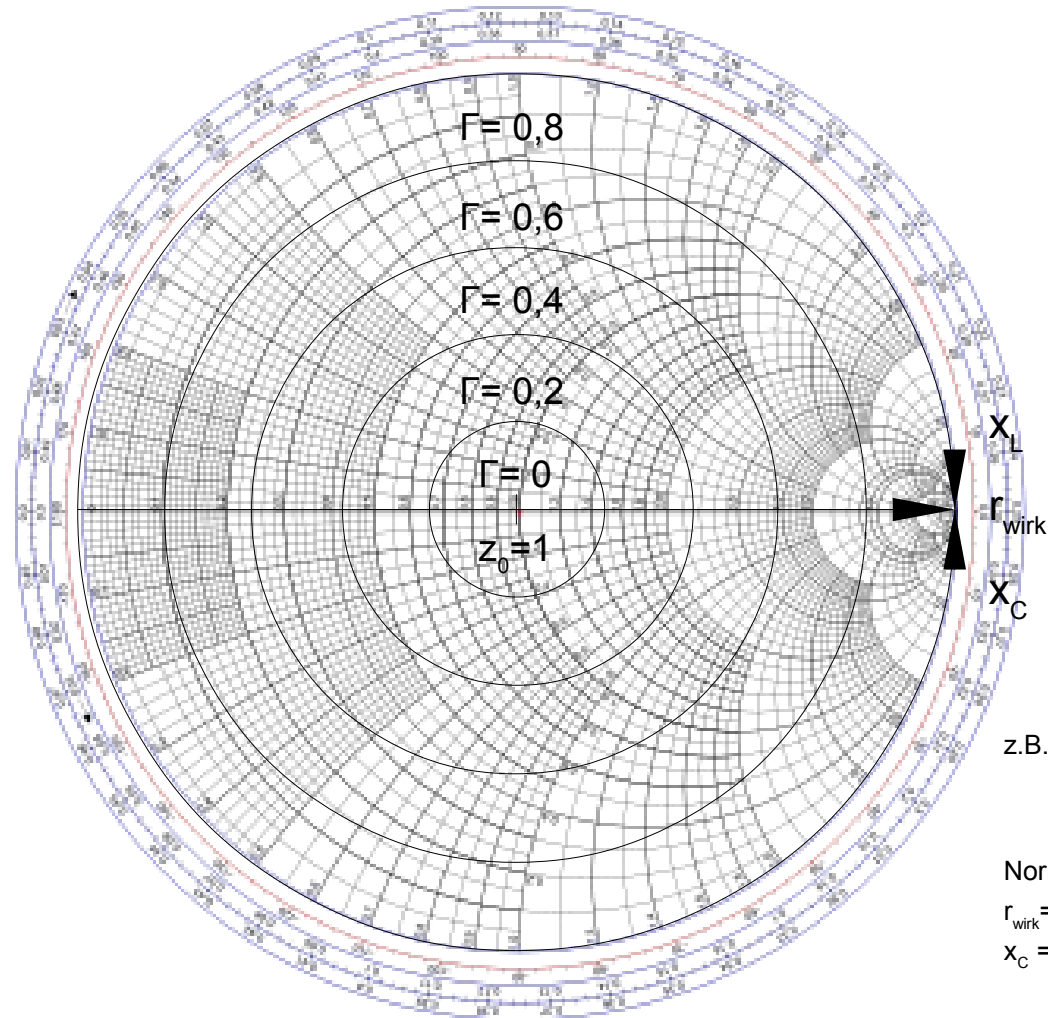
1. Normieren:

$$r_{\text{wirk}} = R_{\text{wirk}} / Z_0$$

$$x_L = X_L / Z_0$$

$$x_C = X_C / Z_0$$

mit $Z_0 = 50\Omega$
oder $Z_0 = 75\Omega$





Smith-Diagramm

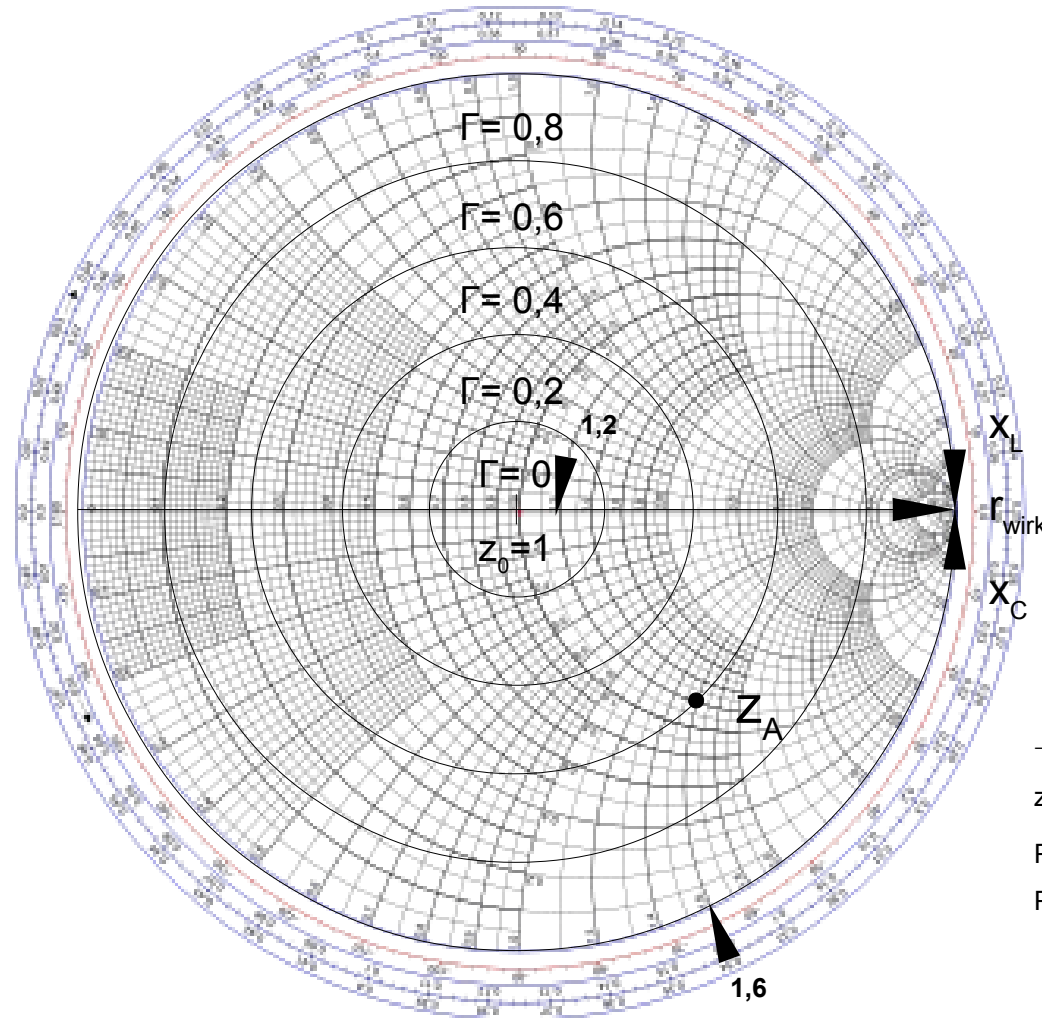
2. Impedanz eintragen:

$$Z_A = r_A + X_A$$

3. Reflexionsfaktor direkt ablesen

4. z.B. rücklaufende Leistung berechnen

$$P_{\text{rück}} = \Gamma^2 \cdot P_{\text{hin}}$$



→ $\Gamma = 0,6$ (VSWR=4)

z.B. $P_{\text{hin}} = 100\text{W}$

$$P_{\text{rück}} = \Gamma^2 \cdot P_{\text{hin}} = 36\text{W}$$

$$P_{\text{Ant}} = P_{\text{hin}} - P_{\text{rück}} = 64\text{W}$$



[Smith-Diagramm]

- Impedanzen mit konstantem Reflexionsfaktor ($\Gamma = \text{const.}$) bilden sich als konzentrische Kreise ab
Das bedeutet:
Alle Impedanzen, die auf einem Kreis um den Anpassungspunkt liegen haben denselben Reflexionsfaktor !!!
- Die Länge einer Leitung kann direkt als Winkel in das Diagramm eingetragen werden

$\lambda/4$ entspricht 180°

- Dadurch ist ein direktes Ablesen der Transformations-eigenschaften einer Leitung aus dem Diagramm möglich



Smith-Diagramm

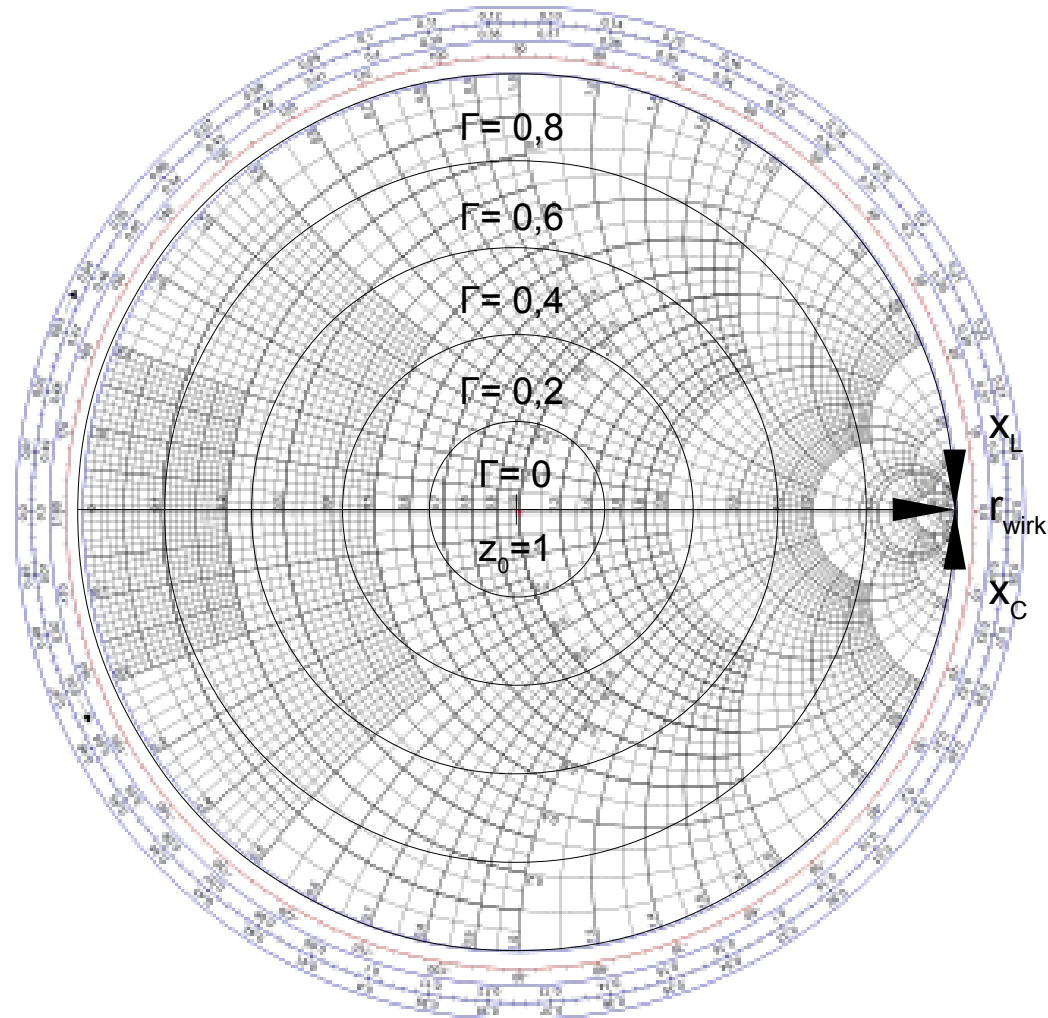
1. Normieren:

$$r_{\text{wirk}} = R_{\text{wirk}} / Z_0$$

$$x_L = X_L / Z_0$$

$$x_C = X_C / Z_0$$

mit $Z_0 = 50\Omega$
oder $Z_0 = 75\Omega$





Smith-Diagramm

2. Widerstand eintragen:

$$z_A = r_A + x_A$$

3. Länge als Winkel eintragen

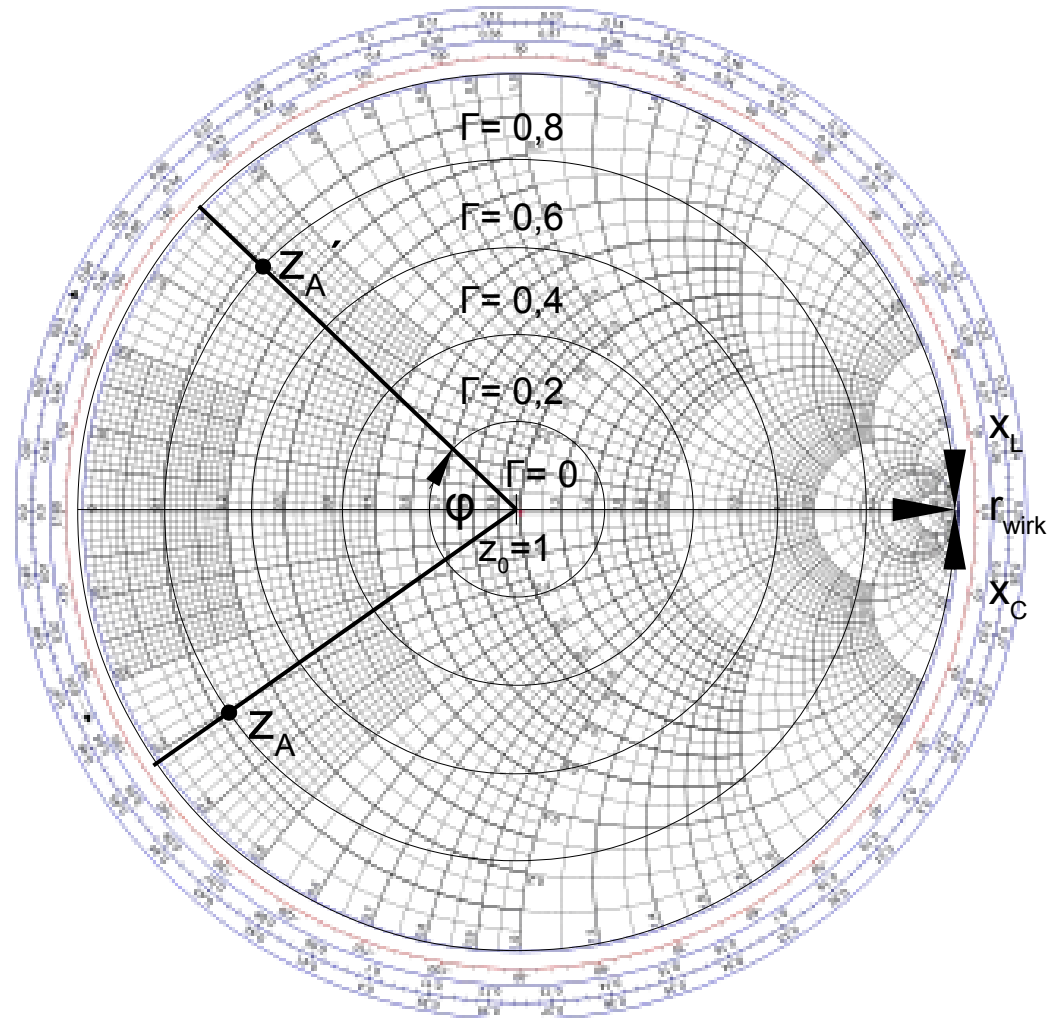
$$\varphi = 360^\circ \cdot \ell / (\lambda/2)$$

4. Transformierten Widerstand ablesen:

$$z_A' = r_A + x_A$$

5. Entnormieren

$$Z_A' = z_A' \cdot Z_0$$





2. Zusammenfassung

■ Erkenntnisse aus dem Smith-Diagramm

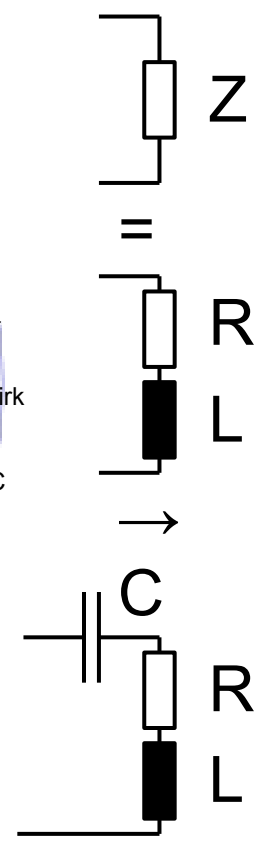
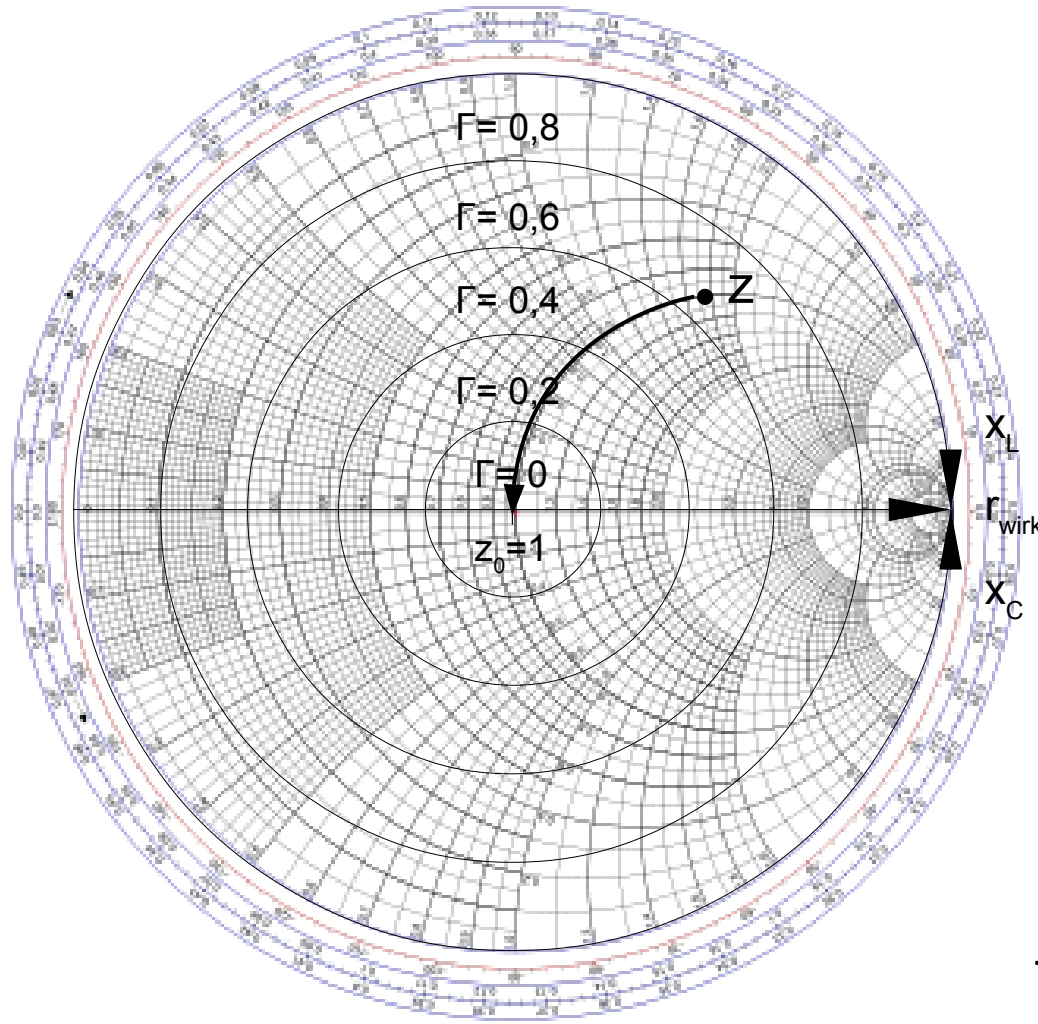
- Die Leitung transformiert Impedanzen
- Das Stehwellenverhältnis verbessert sich durch eine Längenänderung der Speiseleitung nicht, da der Eingangswiderstand (transformierte Impedanz) am selben Γ -Kreis (= VSWR konst.) liegt (**2. Mythos †**)
- Es ändert sich lediglich die Zusammensetzung von $Z_{in} = \sqrt{(R_{in}^2 + X_{in}^2)}$
- Aus dem Smith-Diagramm ist eine direktes Ablesen der Transformationseigenschaften einer Leitung möglich

(Voraussetzung: verlustfreie Leitung – entspricht den Verhältnissen auf Kurzwelle im Allgemeinen sehr gut)

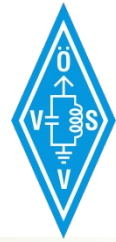


Smith-Diagramm

Bsp.: Anpassung
z besitzt bereits den richtigen Wirkwiderstand aber noch einen falschen (induktiven) Blindanteil.
Durch Zuschalten einer Kapazität kann der Blindanteil für eine Frequenz zum Verschwinden gebracht werden.
=> Resonanz



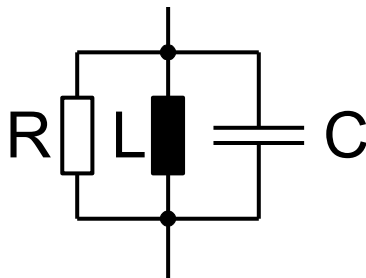
[Resonanz]



■ Serienschwingkreis



■ Parallelschwingkreis



Güte:

$$Q = \frac{\text{im Kreis enthaltene Energie}}{\text{pro Periode verlorene Energie}}$$

Im Kreis ist mehr Energie enthalten als von außen zugeführt wird.

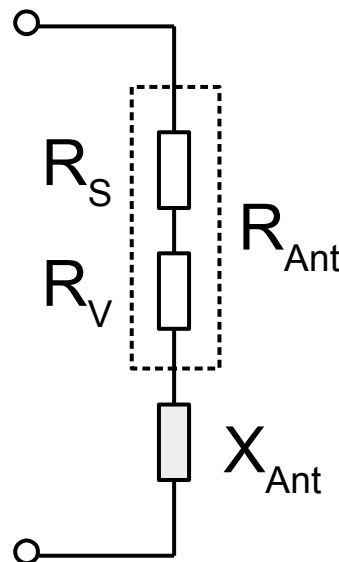
Die Spannungen bzw. Ströme in den Bauteilen sind größer als die äußere anliegende Spannung oder der äußerlich fließende Strom.

=> „Resonanzüberhöhung“



[Antenne]

- Ersatzschaltbild einer Antenne:



R_S ... Strahlungswiderstand

R_V ... Verlustwiderstand

X_{kap} ... kapazitiv (Antenne $\ell < \lambda/4$)

X_{Ant} 0 ... resonant (Antenne $\ell = \lambda/4$)

X_{ind} ... induktiv (Antenne $\ell > \lambda/4$)

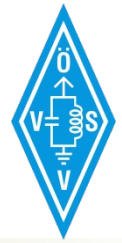
Eine Resonanzüberhöhung steigert die Feldstärken
→ die Abstrahlung / Empfangsspannung wird vergrößert



3. Zusammenfassung

- Die Abstrahlung stellt für den Resonanzkreis Antenne einen „Verlust“ dar:
 - Eine resonante Antenne wird umso schmalbandiger, je schlechter sie abstrahlt (Die Kreisgüte steigt)
 - Das Verhältnis aus ohmschen- zu Abstrahlungsverlusten ergibt den Antennenwirkungsgrad
 - Die Resonanzüberhöhung nimmt bei Anpassung zu, bis die Summe aus ohmschen- und Abstrahlungsverlusten gleich groß wie die zugeführte Leistung wird
 - Auch durch externe Anpassung (Anpassgerät) wird Resonanz und Übereinstimmung des Quellenwiderstandes mit dem Antennenwiderstand hergestellt

[Anpassung und SWR



Mythen und Fakten

OE7LSH



Mythen und Fakten

- Die Antenne muss resonant (=angepasst) sein, um die Sendeleistung am effizientesten zu nutzen
- Bei resonanten Antennen wird die Abstrahlung umso besser, je besser der Wirkungsgrad ist und je näher die Antenne bei Anpassung am Resonanzpunkt betrieben wird
- Durch externe Anpassung (z.B. mit Anpassgerät) sinkt der Wirkungsgrad der Antenne und damit der Gesamtanlage
- Eine leichte Fehlanpassung ist tolerierbar
- Das Ansprechen der Schutzschaltung des TRX für zu hohes VSWR ist zu vermeiden!



[Anpassung und VSWR

Anpassung im Smith-Diagramm

OE7LSH



[Impedanz $Z \leftrightarrow$ Admittanz Y]

- Impedanz $Z =$ Wirkanteil R und Blindanteil X

Serienschaltung: $Z_G = Z_1 + Z_2$ mit $Y = 1/Z$

Parallelschaltung: $Y_G = Y_1 + Y_2$

- Admittanz $Y =$ Wirkanteil G und Blindanteil B



[Impedanz $Z \leftrightarrow$ Admittanz Y

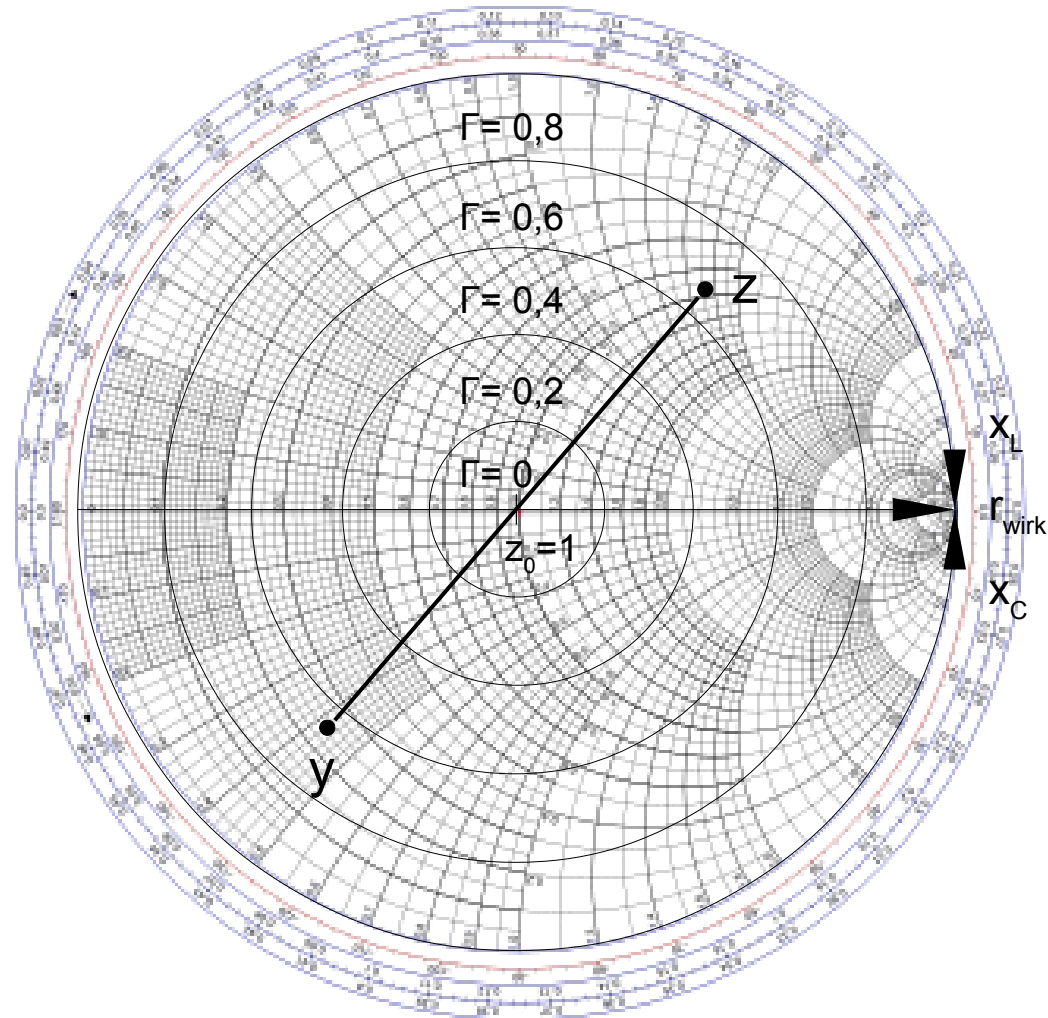
Im Smith-Diagramm
bestimmt man aus

$$z \rightarrow y$$

In dem man den
Wert am Ursprung
spiegelt.

Mit $z = Z / Z_0$ und
 $y = Y / Y_0$

(Normierung)



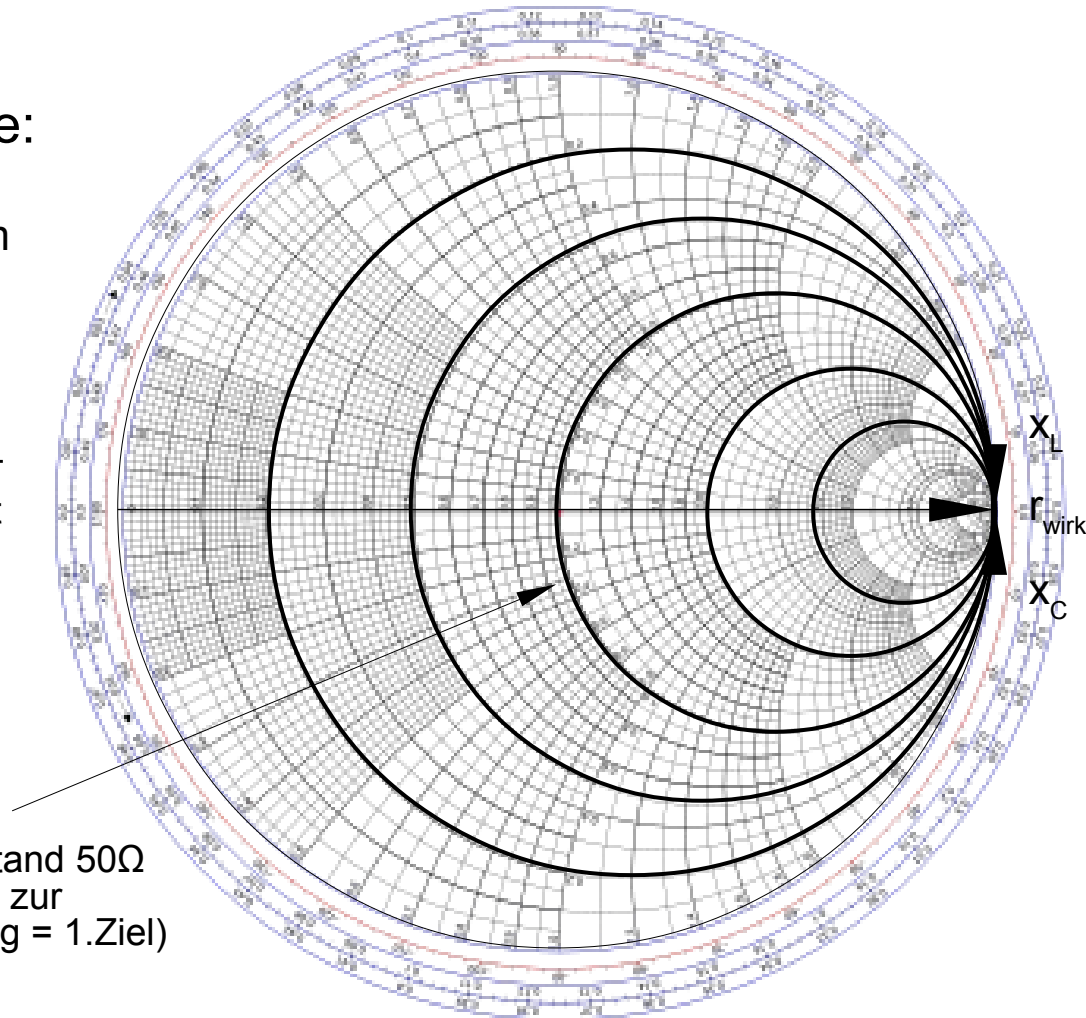


Anpassung im Smith-Diagramm

Impedanzebene:

Kreise mit gleichem Wirkwiderstand

→ Bei einer Serienschaltung eines Blindwiderstandes zur Last bewegt man sich auf diesen Kreisen.



Kreis mit Wirkwiderstand 50Ω
(Nur Blindwiderstand zur Anpassung notwendig = 1.Ziel)

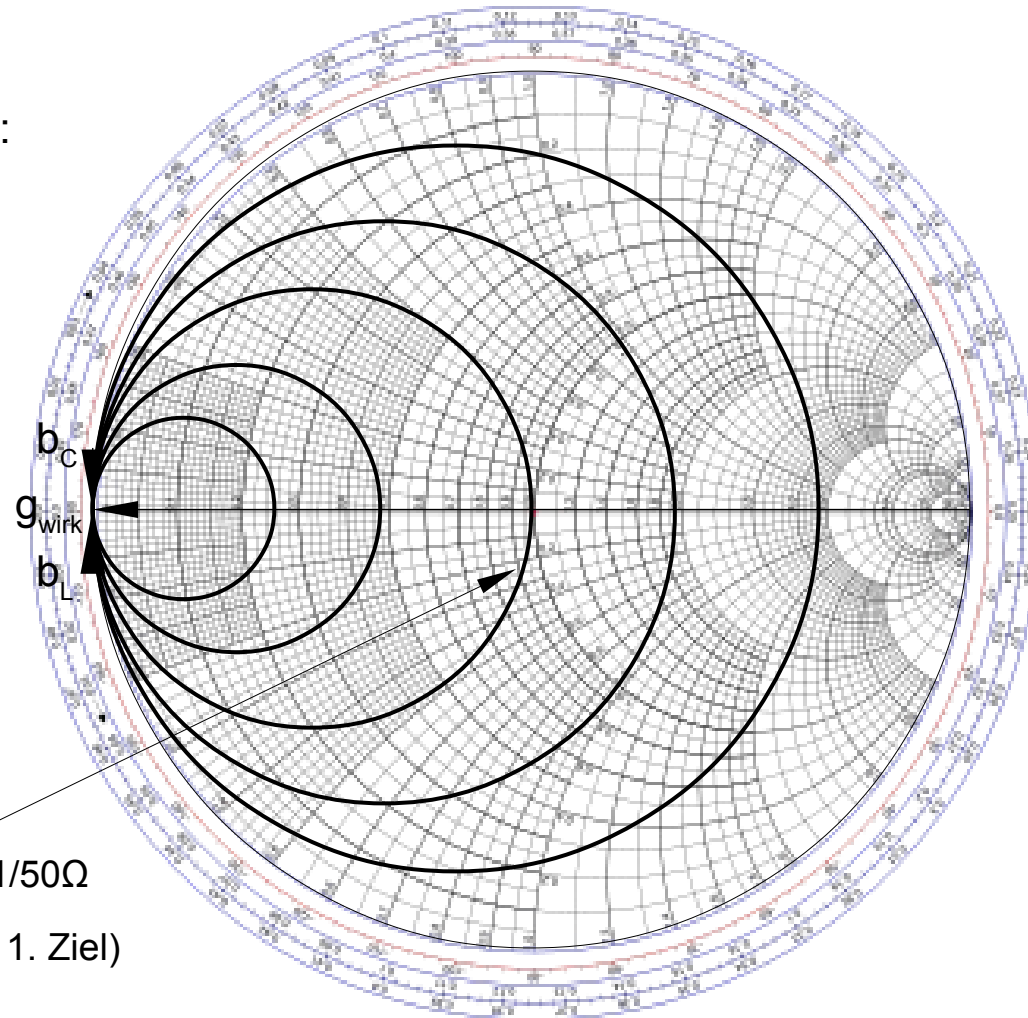


Anpassung im Smith-Diagramm

Admittanzebene:

Kreise mit gleichem Wirkleitwert:

→ Bei einer Parallelschaltung eines Blindleitwertes zur Last bewegt man sich auf diesen Kreisen.

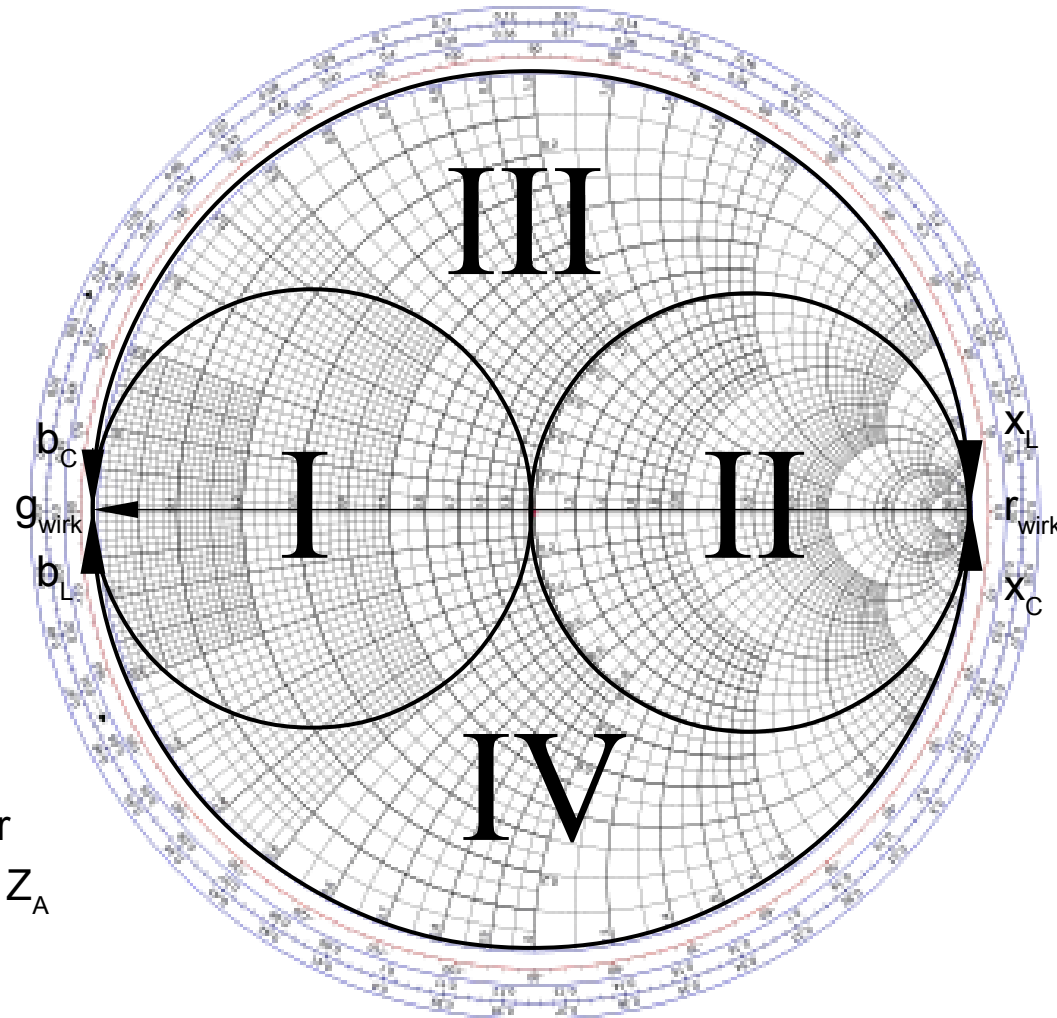


Kreis mit Wirkleitwert $1/50\Omega$
(Nur Blindleitwert zur Anpassung notwendig 1. Ziel)



Anpassung im Smith-Diagramm

Anpassung mit
L und C



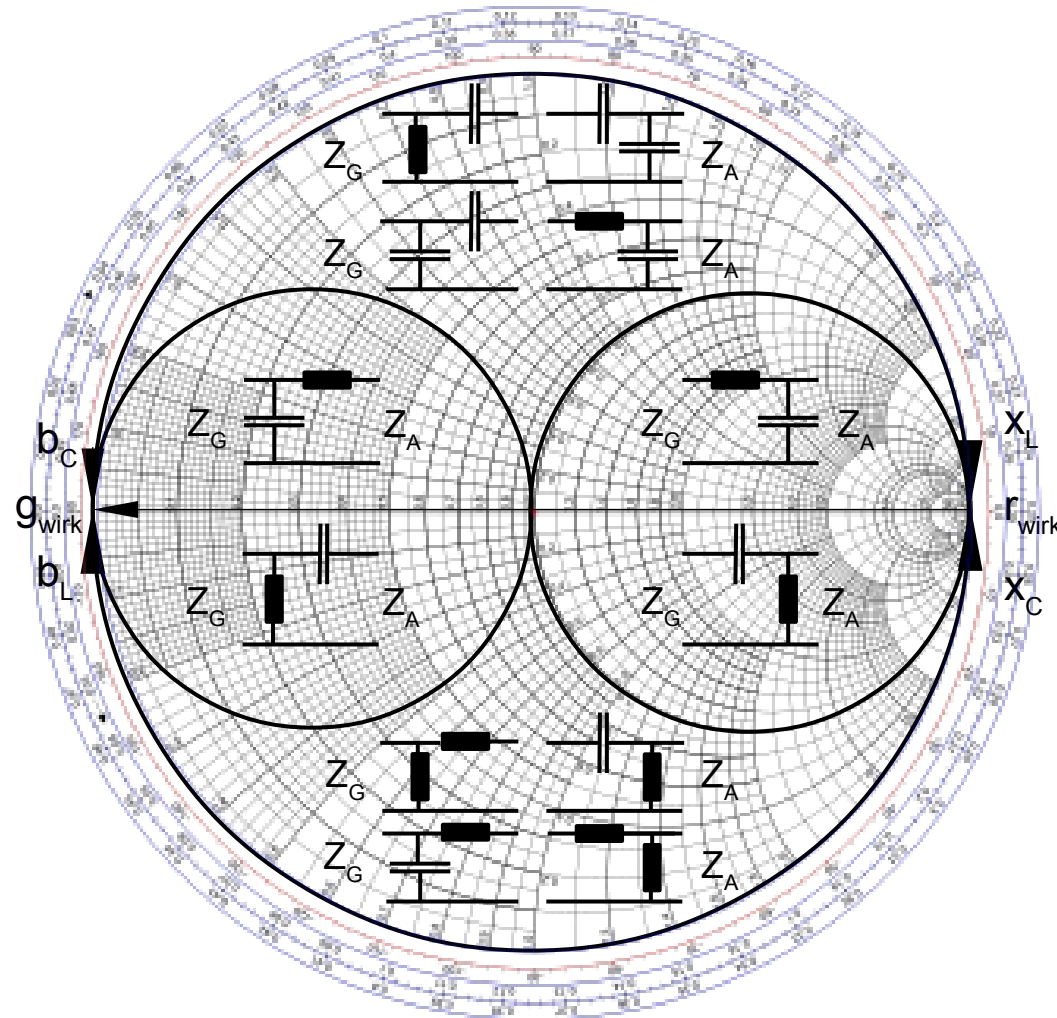
Die geeigneten
Schaltungen zur
Resonanztransfor-
mation richten sich
nach dem Gebiet der
Fusspunktimpedanz Z_A
im Smith-Diagramm.

Anpassung im Smith-Diagramm



Anpassung mit
L und C

Allgemein gilt:
**Je größer die
Fehlanpassung
desto schmal-
bandiger die
Anpassschaltung**



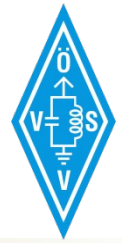


[Anpassung und VSWR]

■ Linksammlungen:

- <http://www.fritz.dellsperger.net/downloads%20Smith/Setup%20Smith%20V4.0.zip>
- <http://www.acs.psu.edu/drussell/Demos/SWR/SmithChart.pdf>
- <https://sourceforge.net/projects/gnssmithchart/>

[Anpassung und VSWR



Vielen Dank für Euer Interesse!

Innsbruck, 16.6.2017