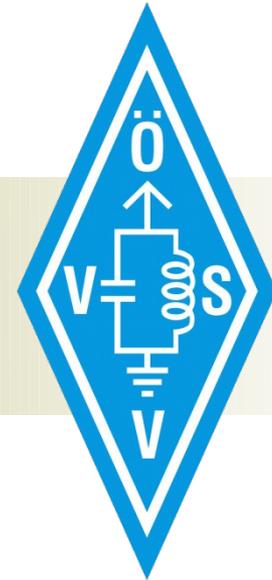


Vortrag:

# 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](mailto:oe7lsh@oevsv.at)

# [Anpassung und VSWR



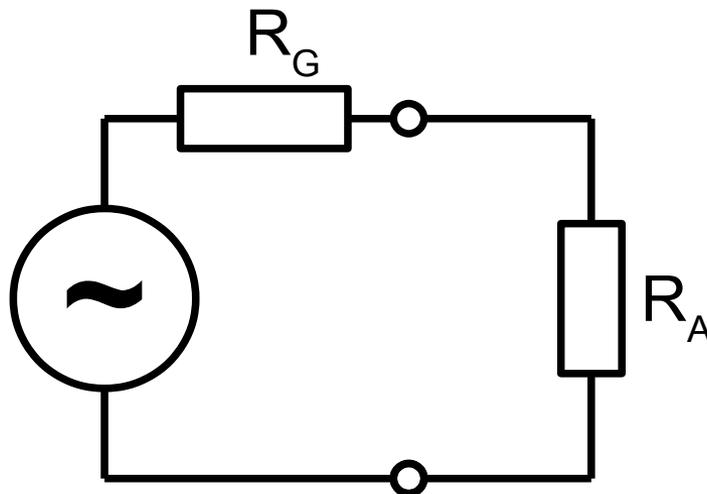
## Technische Begriffe

OE7LSH

# [Anpassung



- Was ist Anpassung:



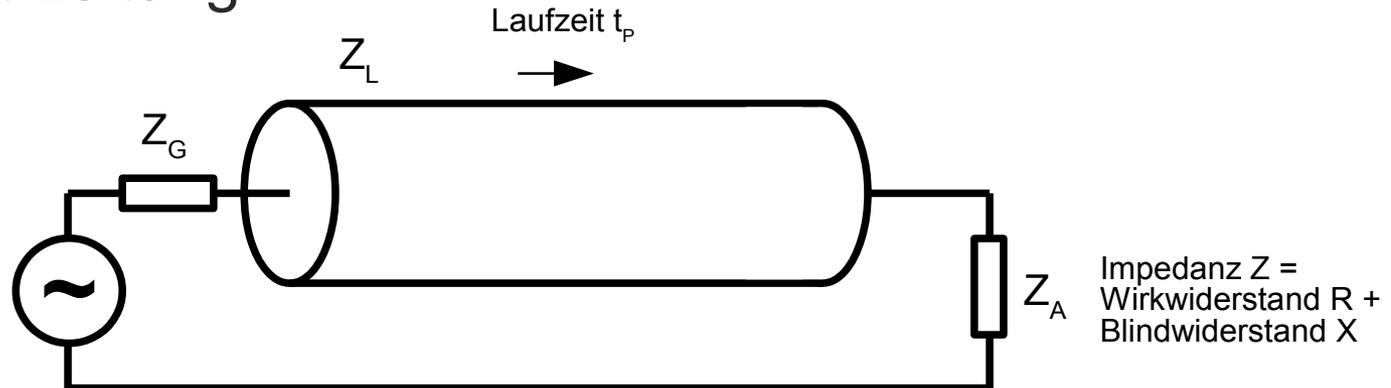
Abschlusswiderstand  
=  
Generatorwiderstand  
=> **Anpassung\***

\* 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:

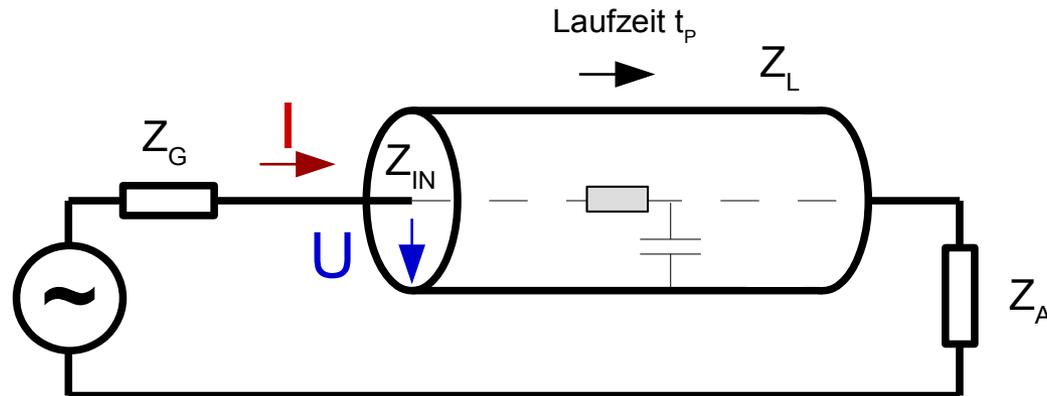


Eine Leitung besitzt eine endliche Laufzeit  $t_p$ . Wird die Quelle an die Leitung geschaltet, so „sieht“ sie innerhalb  $2 \times t_p$  nur die Leitung und liefert Energie. Die Leitung nimmt die Energie auf und transportiert sie zur Last, ohne sie zu verbrauchen. (Annahme: verlustlose Leitung) Die 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



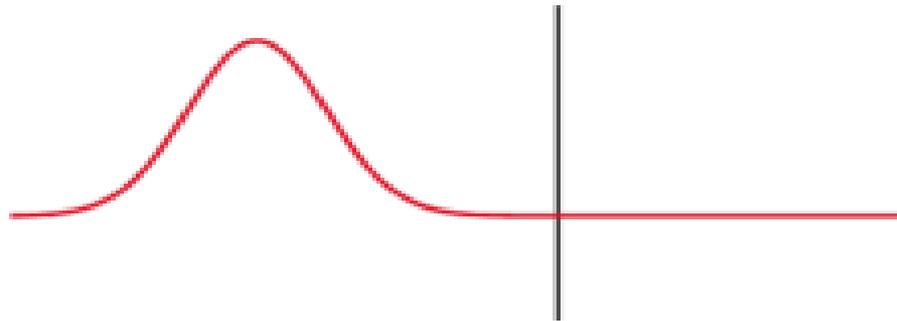
$$Z_{IN} = \frac{U}{I} = Z_L \dots \text{Wellenwiderstand der Leitung}$$

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

# [ Leitung



- Bei Fehlanpassung wird ein Teil der Welle reflektiert

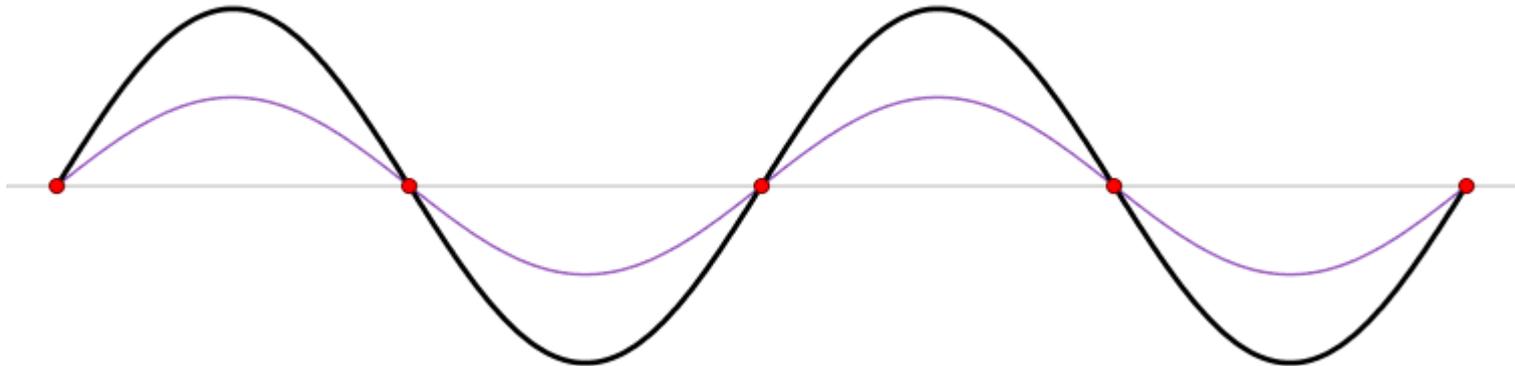


und kehrt zur Quelle zurück



# Stehende Welle

- Die hinlaufende und rücklaufende Welle überlagert sich:

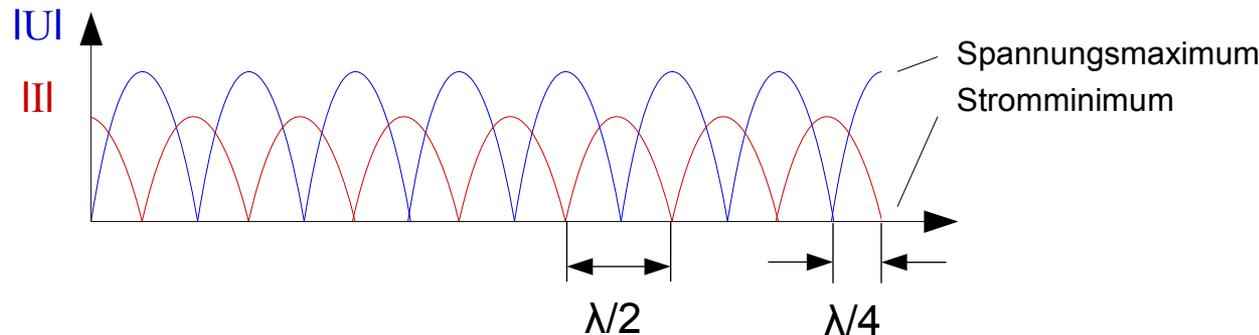


=> auf der Leitung bildet sich eine stehende Welle

# Stehende Welle

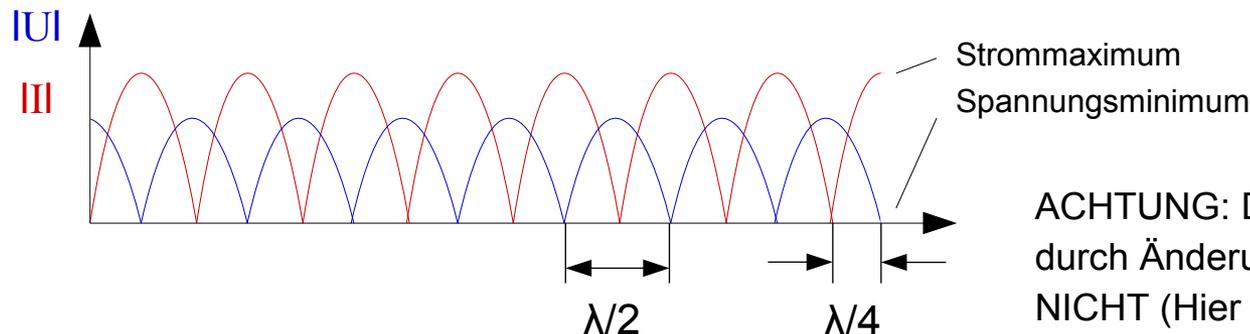


Strom-Spannungsverlauf bei leerlaufendem Ende:



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.

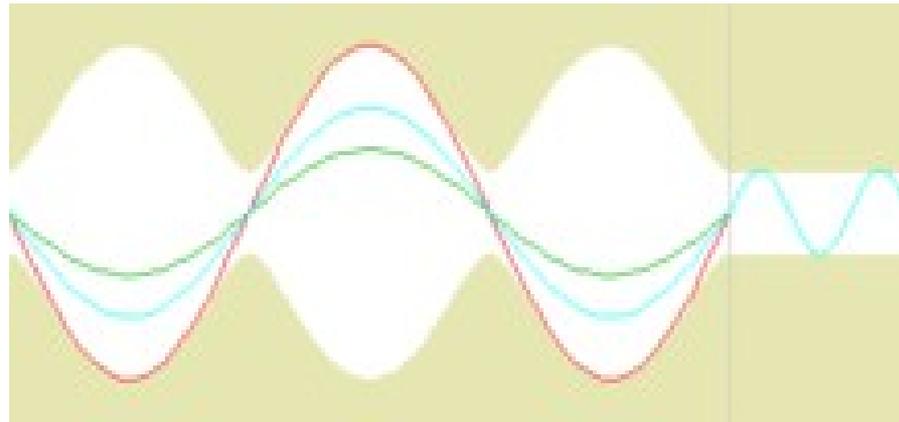
Es gilt :  $U_{\text{rück}} = \Gamma \cdot U_{\text{hin}}$  mit  $\Gamma = \frac{Z_A - Z_L}{Z_A + Z_L}$

$\Gamma$  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  $U_{\min}$ .

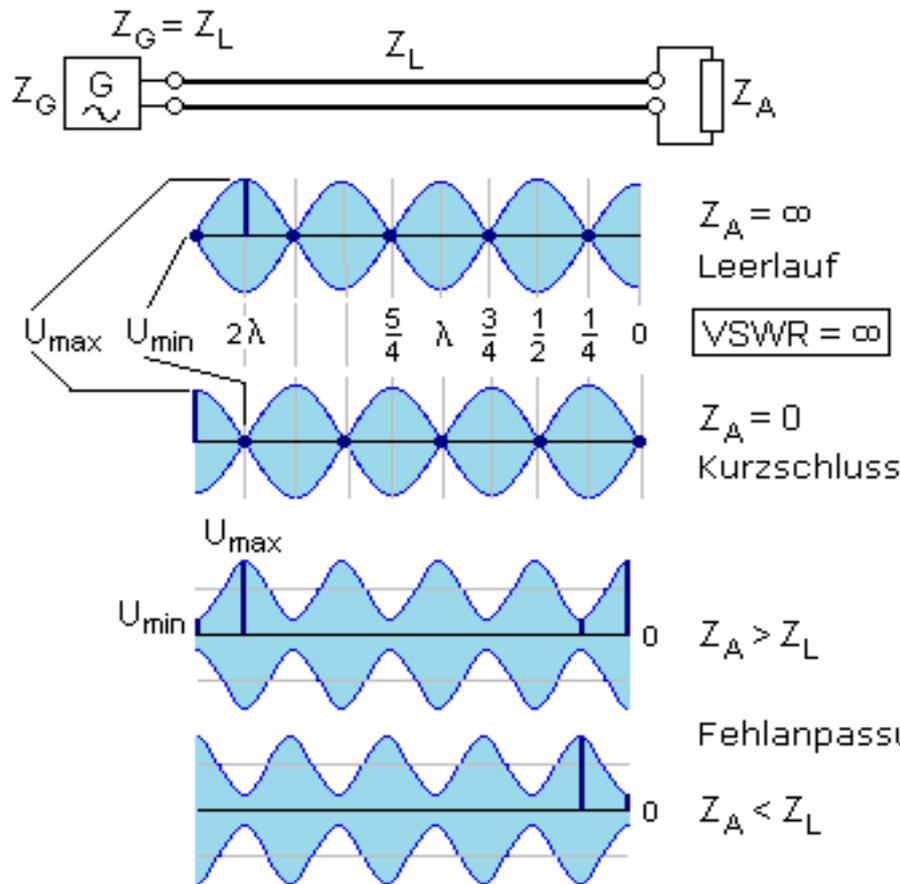
Es gilt :  $VSWR = \frac{U_{\max}}{U_{\min}}$  ... Voltage Standing Wave Ratio

$VSWR = \infty$  ... 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  $\Gamma$  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  $X_A$

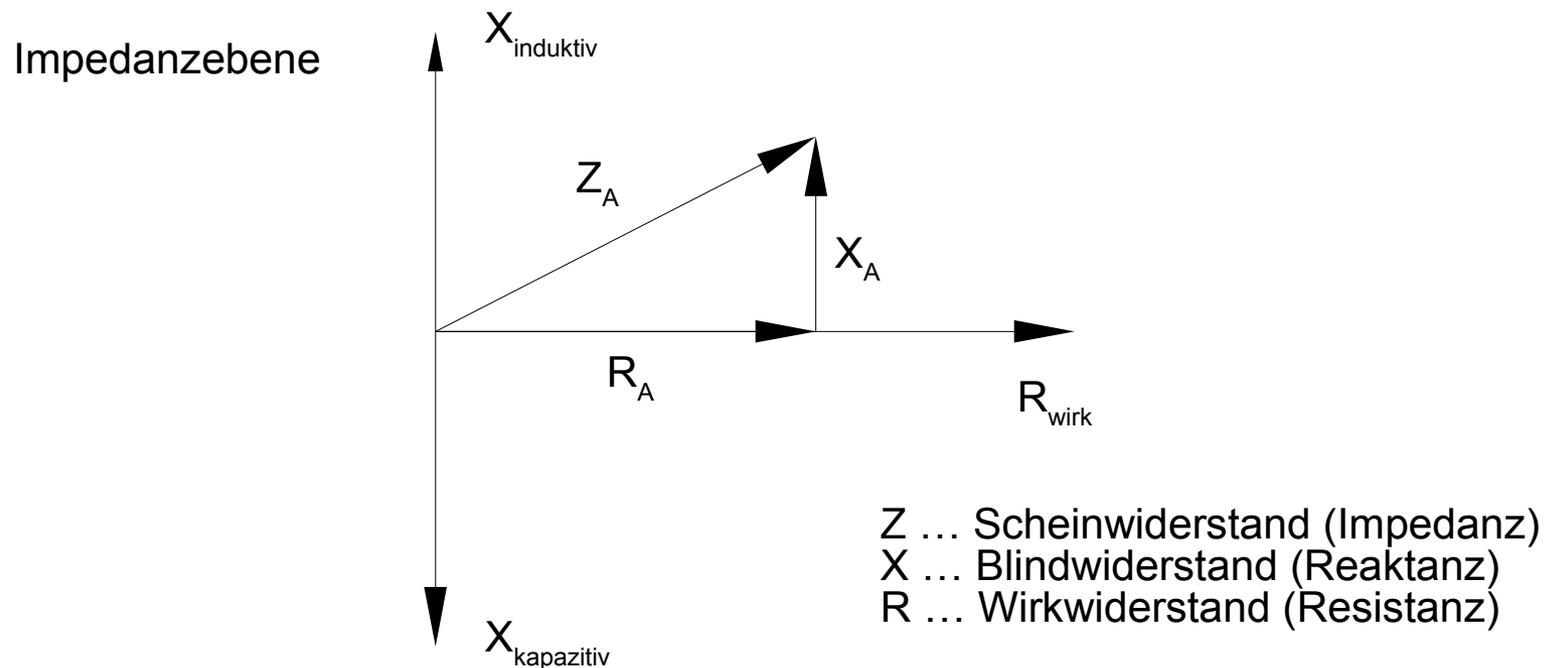
es gilt:  $Z_A = \sqrt{R_A^2 + X_A^2}$

( $X_A$  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**

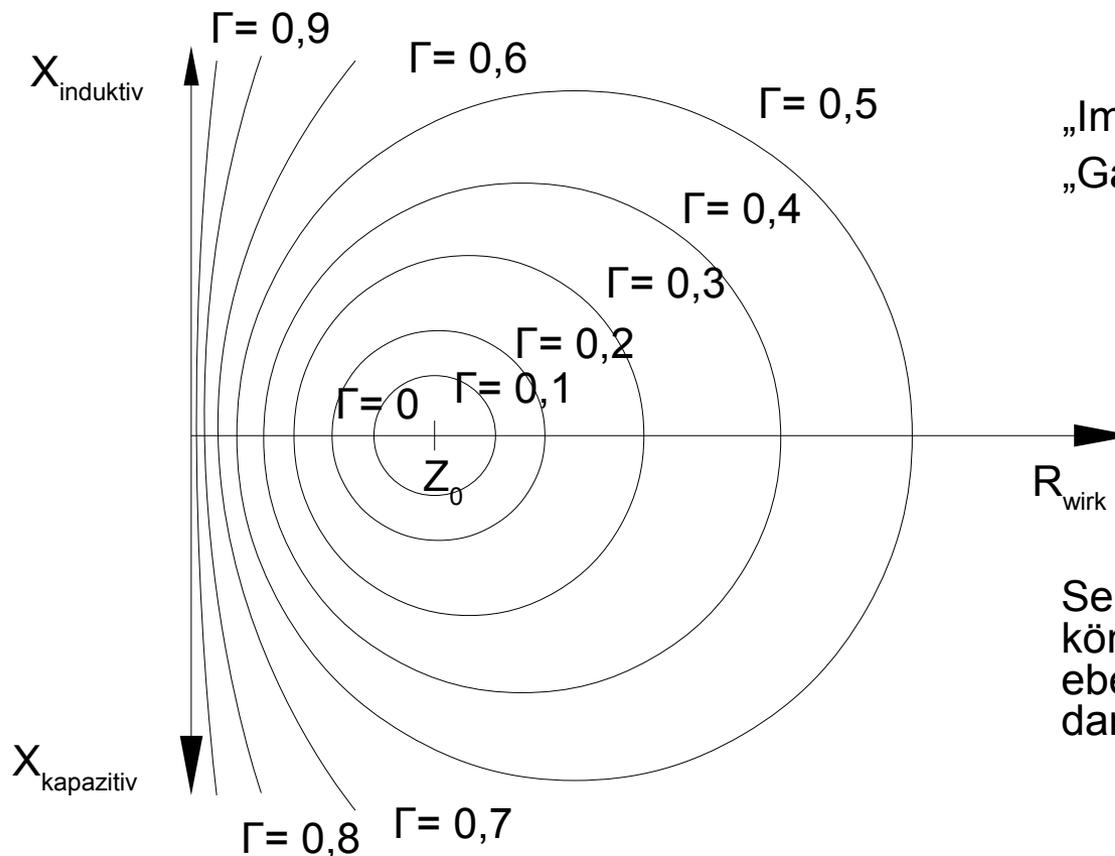
Der Wirkanteil der Lastimpedanz  $R_A$  bewirkt Anpassung

Der Blindanteil der Lastimpedanz  $X_A$  verursacht Reflexion



# [ Impedanzebene ]

- Punkte mit gleichem Reflexionskoeffizienten bilden sich als Kreise ab:



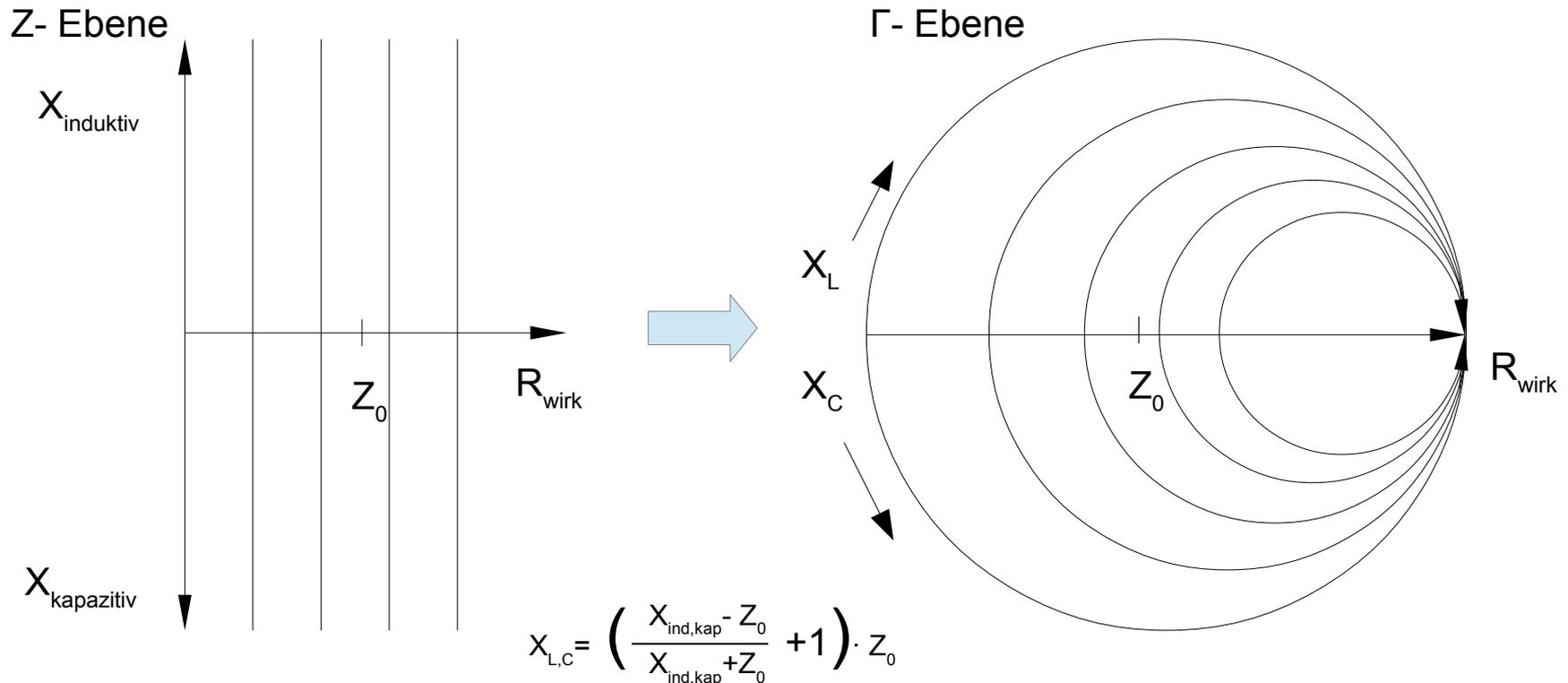
„Impedanzebene“ oder  
„Gaußschen Zahlenebene“

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



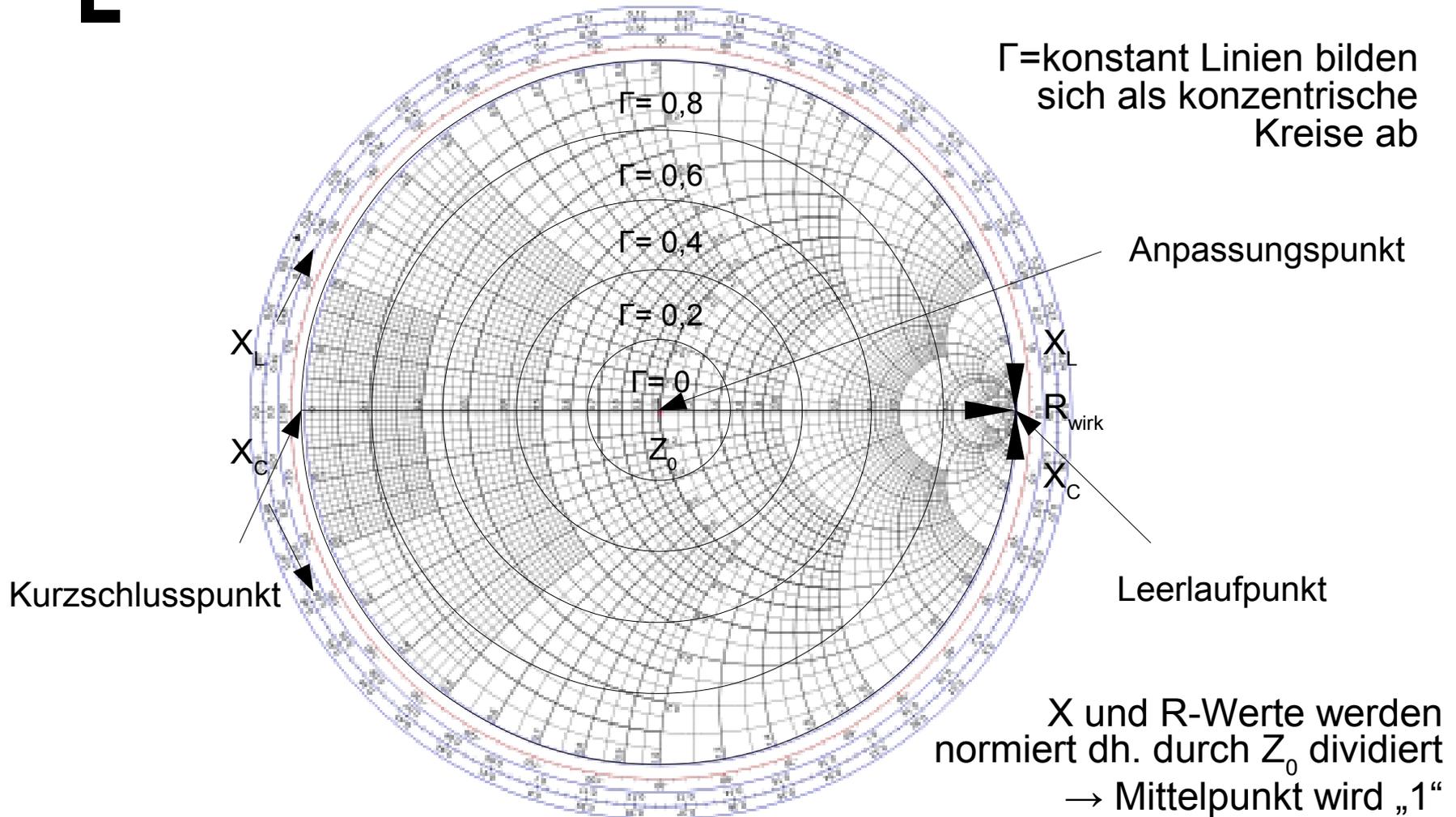
# [ Impedanzebene ]

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





# Smith-Diagramm





# Smith-Diagramm

Anwendung  
des Smith-  
Diagramms:

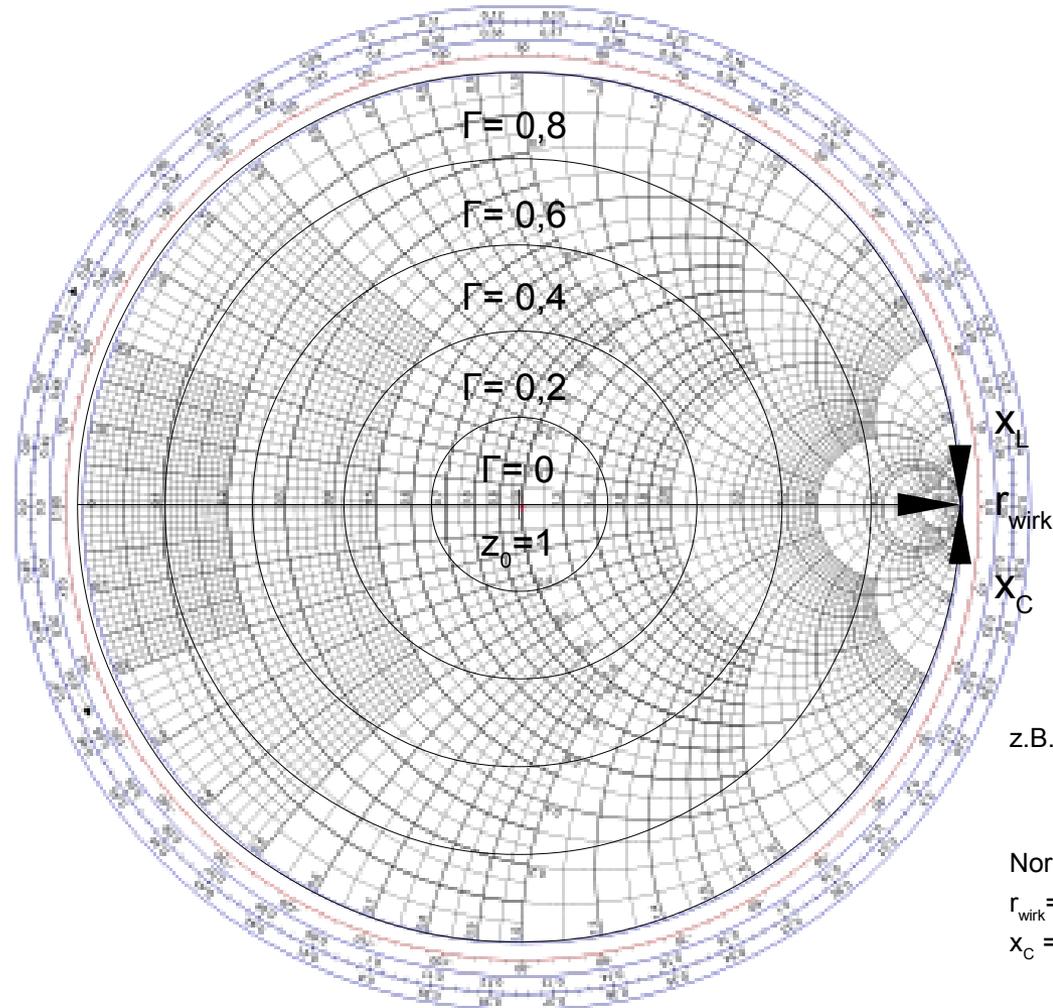
1. Normieren:

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

$$x_L = X_L / Z_0$$

$$x_C = X_C / Z_0$$

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



z.B.:  $R_A = 60\Omega$   
 $X_A = 80\Omega_{\text{kap}}$   
 $Z_0 = 50\Omega$

Normieren:

$$r_{\text{wirk}} = R_{\text{wirk}} / Z_0 = 60\Omega / 50\Omega = 1,2$$

$$x_C = X_C / Z_0 = 80\Omega / 50\Omega = 1,6$$



# Smith-Diagramm

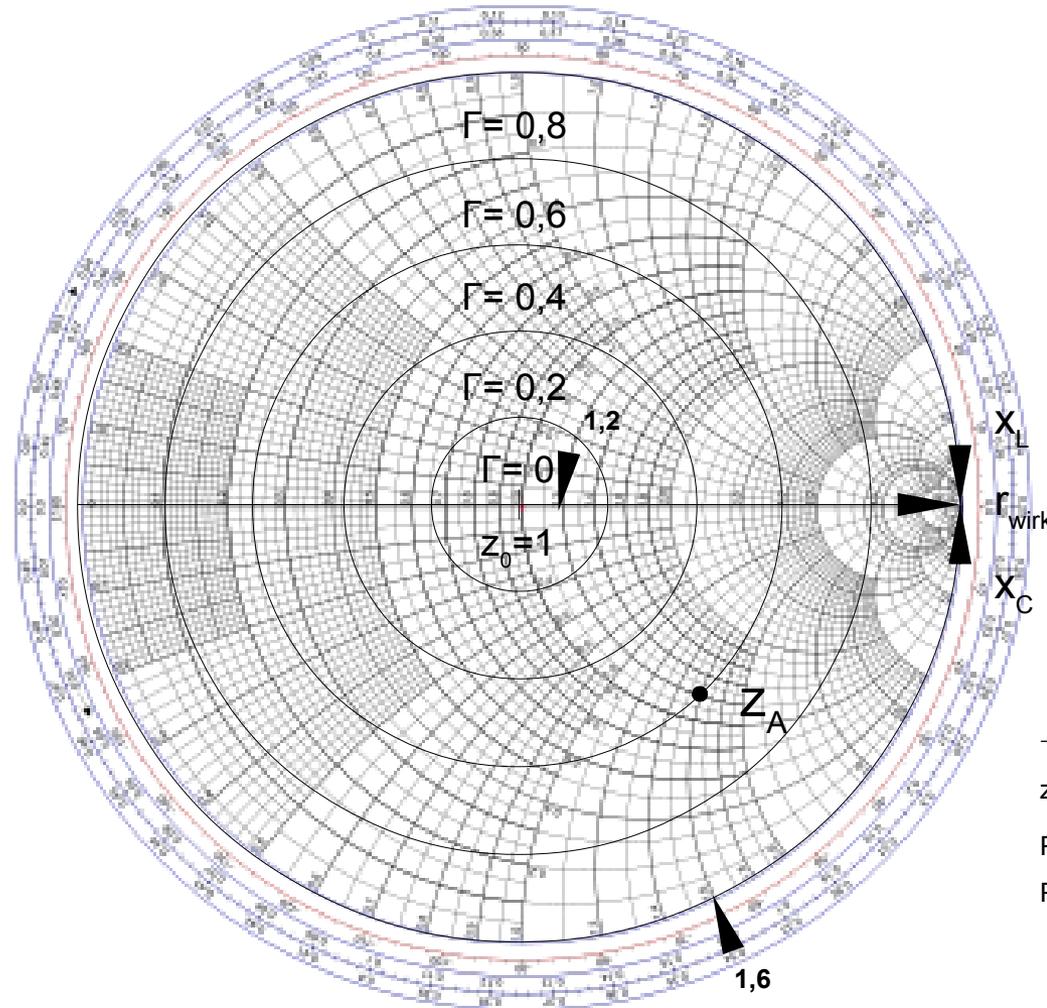
2. Impedanz eintragen:

$$Z_A = r_A + X_A$$

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  $180^\circ$**

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



# Smith-Diagramm

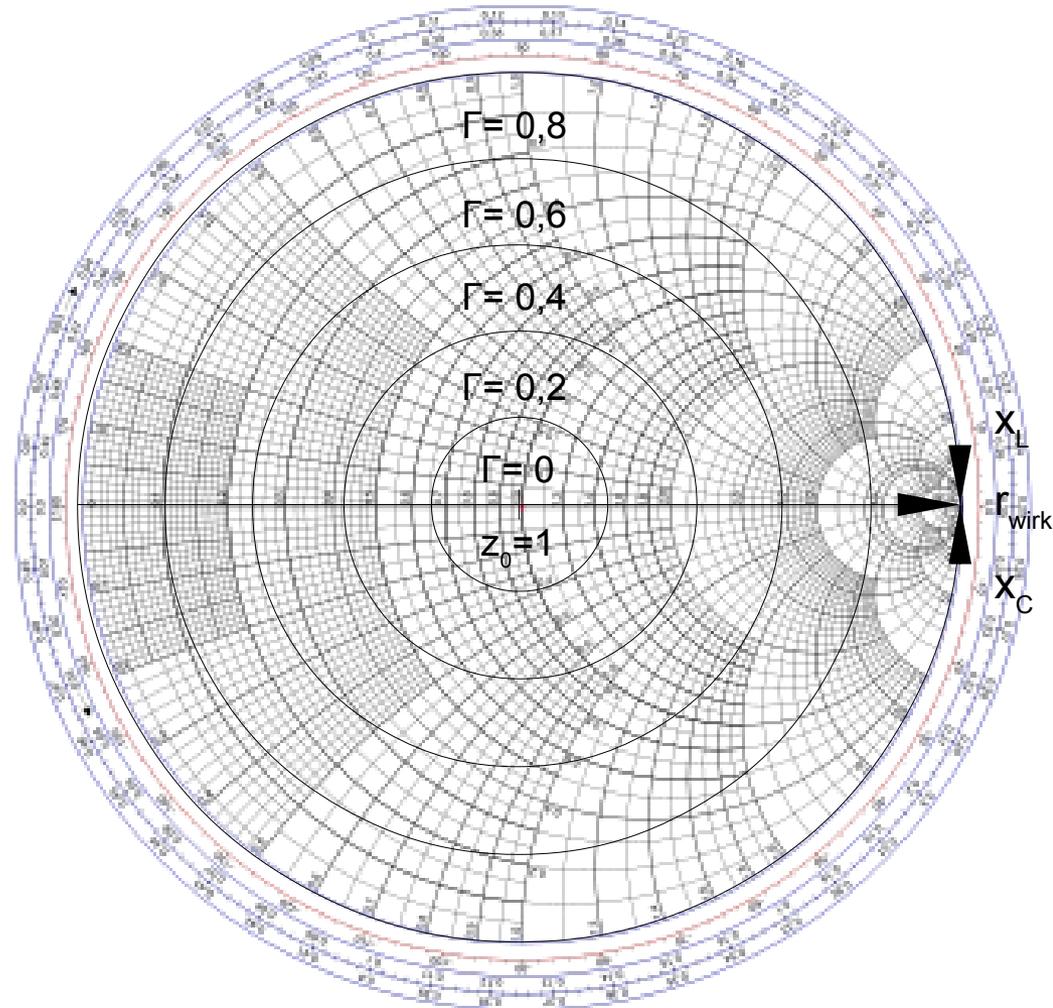
1. Normieren:

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

$$x_L = X_L / Z_0$$

$$x_C = X_C / Z_0$$

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

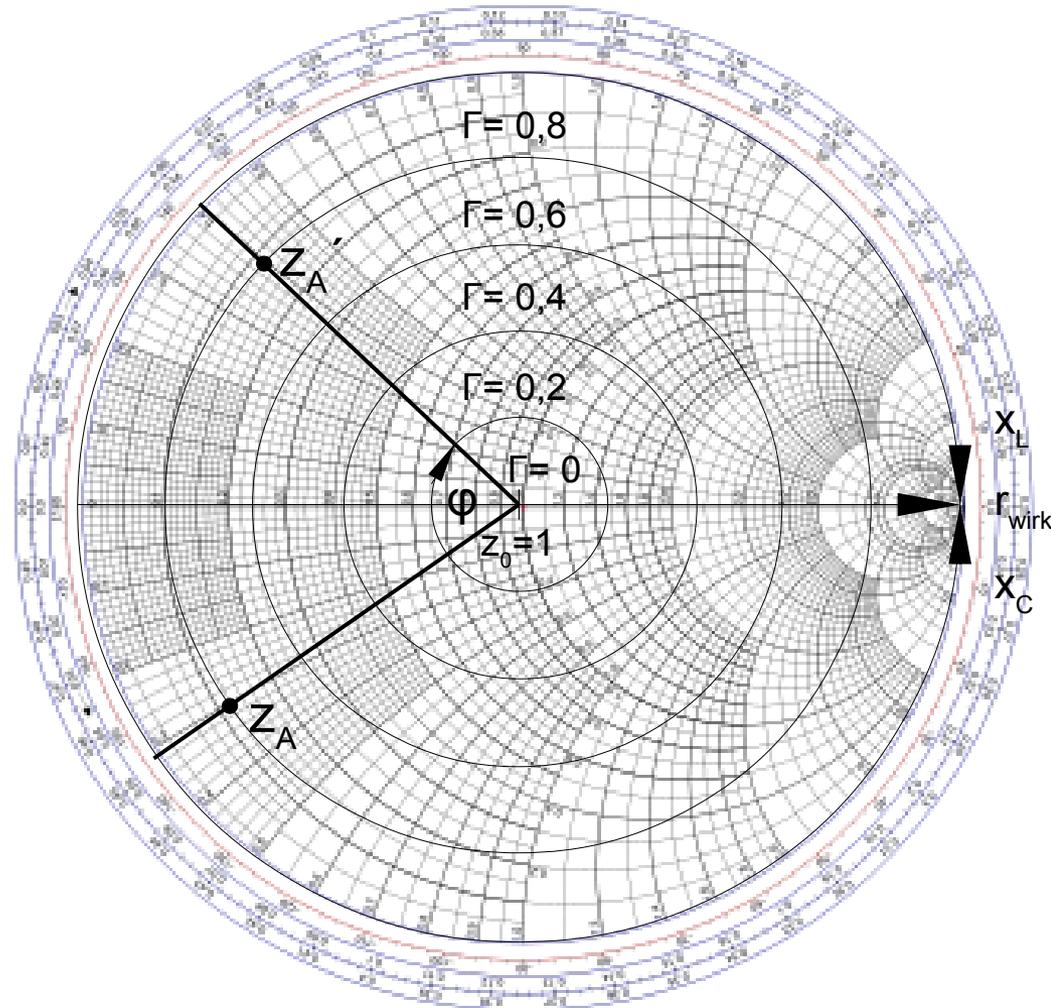
$$\varphi = 360^\circ \cdot \ell / (\lambda/2)$$

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

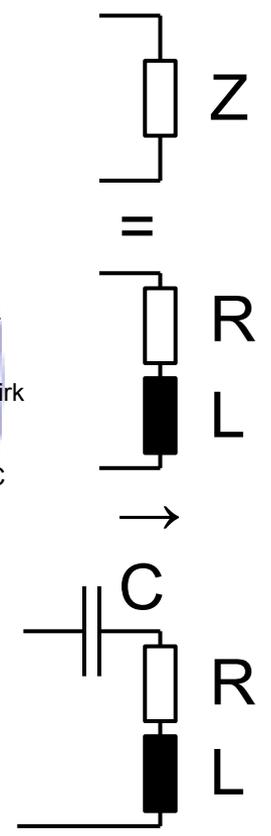
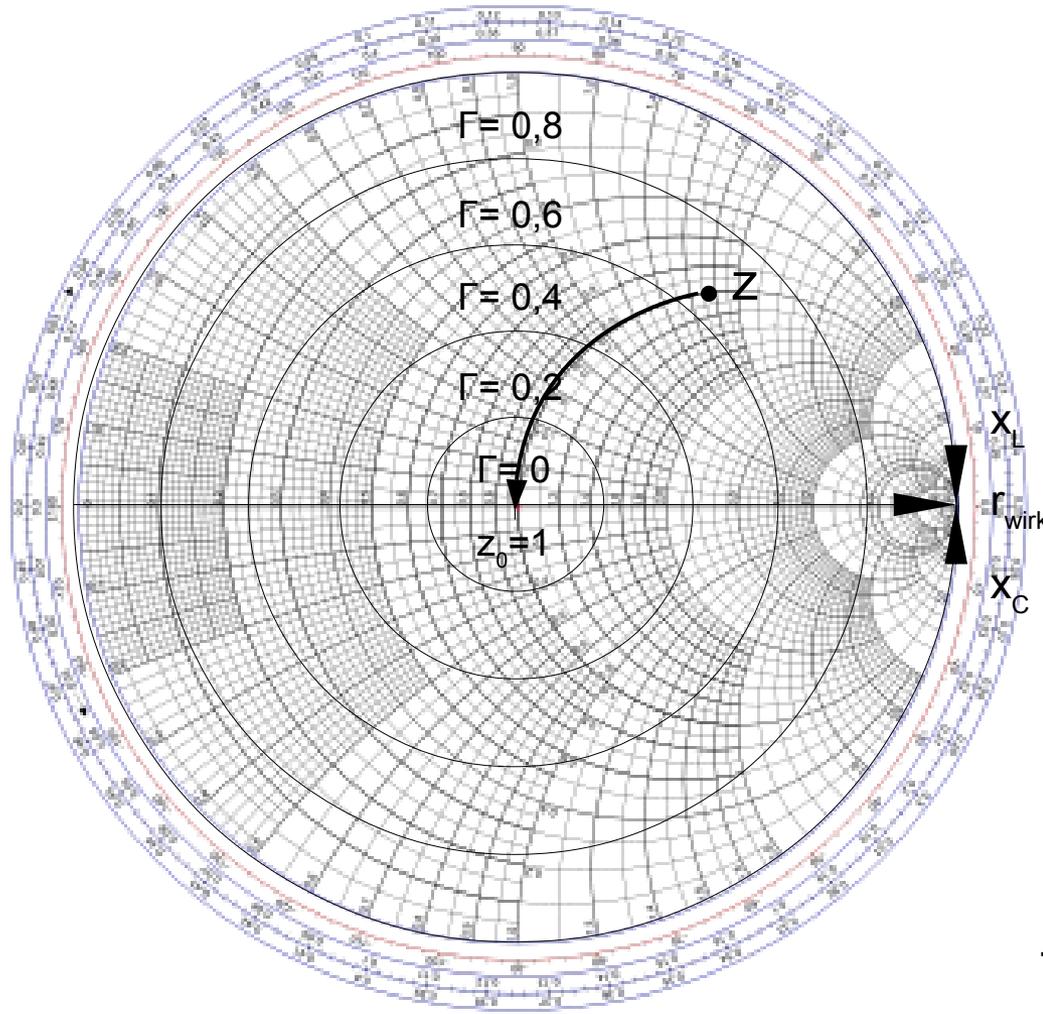
- Die Leitung transformiert Impedanzen
- Das Stehwellenverhältnis verbessert sich durch eine Längenänderung der Speiseleitung nicht, da der Eingangswiderstand (transformierte Impedanz) am selben  $\Gamma$ -Kreis (= VSWR konst.) liegt (**2. Mythos †**)
- Es ändert sich lediglich die Zusammensetzung von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



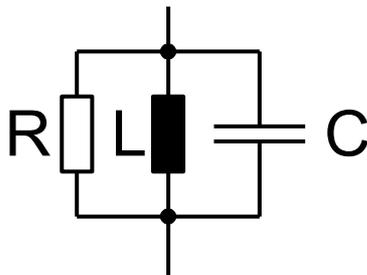


# [ Resonanz ]

- 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.

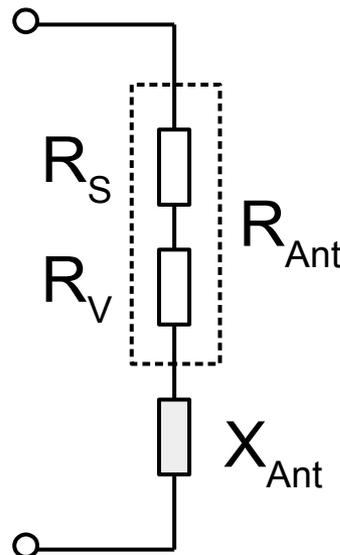
Die Spannungen bzw. Ströme in den Bauteilen sind größer als die äußere anliegende Spannung oder der äußerlich fließende Strom.

=> „Resonanzüberhöhung“



# [ Antenne ]

- Ersatzschaltbild einer Antenne:



$R_S$  ... Strahlungswiderstand

$R_V$  ... Verlustwiderstand

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

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

$X_{\text{ind}}$  ... 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 $Y$

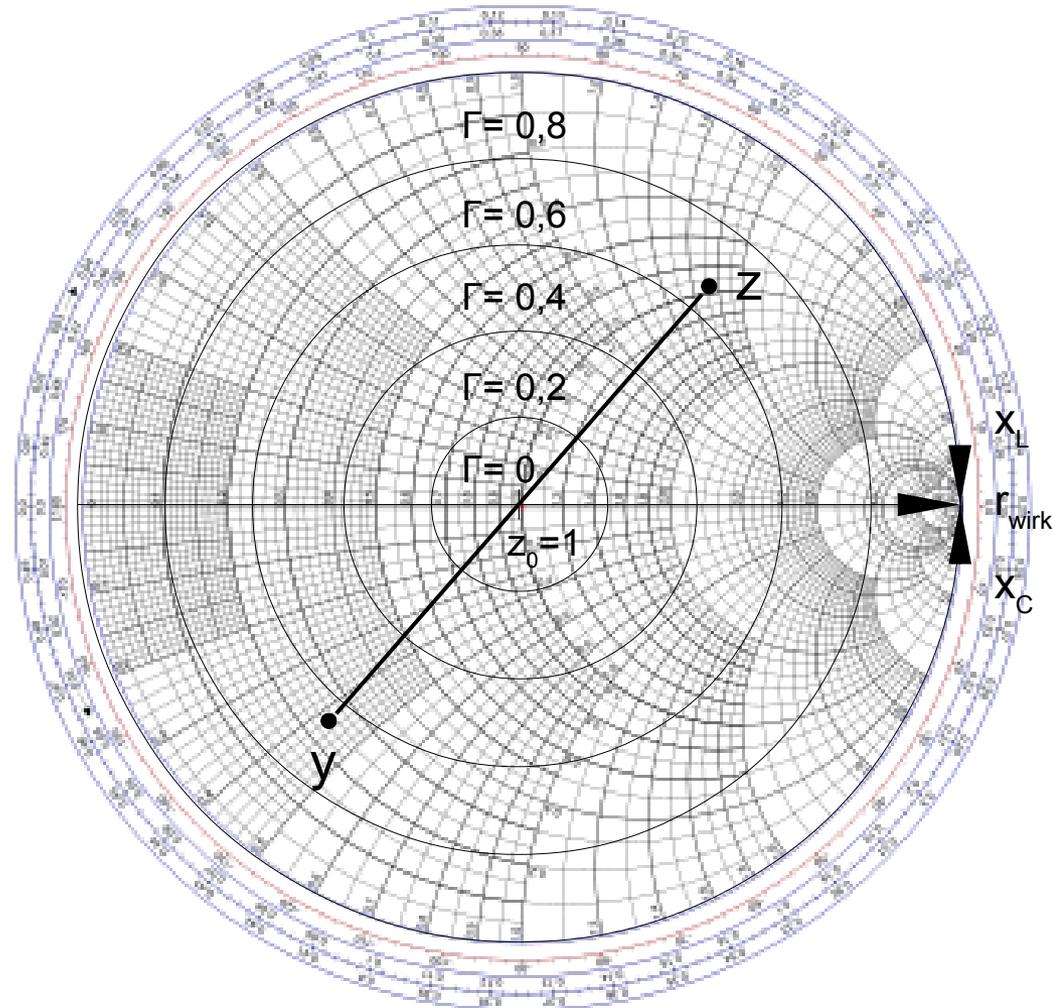
Im Smith-Diagramm  
bestimmt man aus

$$z \rightarrow y$$

In dem man den  
Wert am Ursprung  
spiegelt.

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

(Normierung)



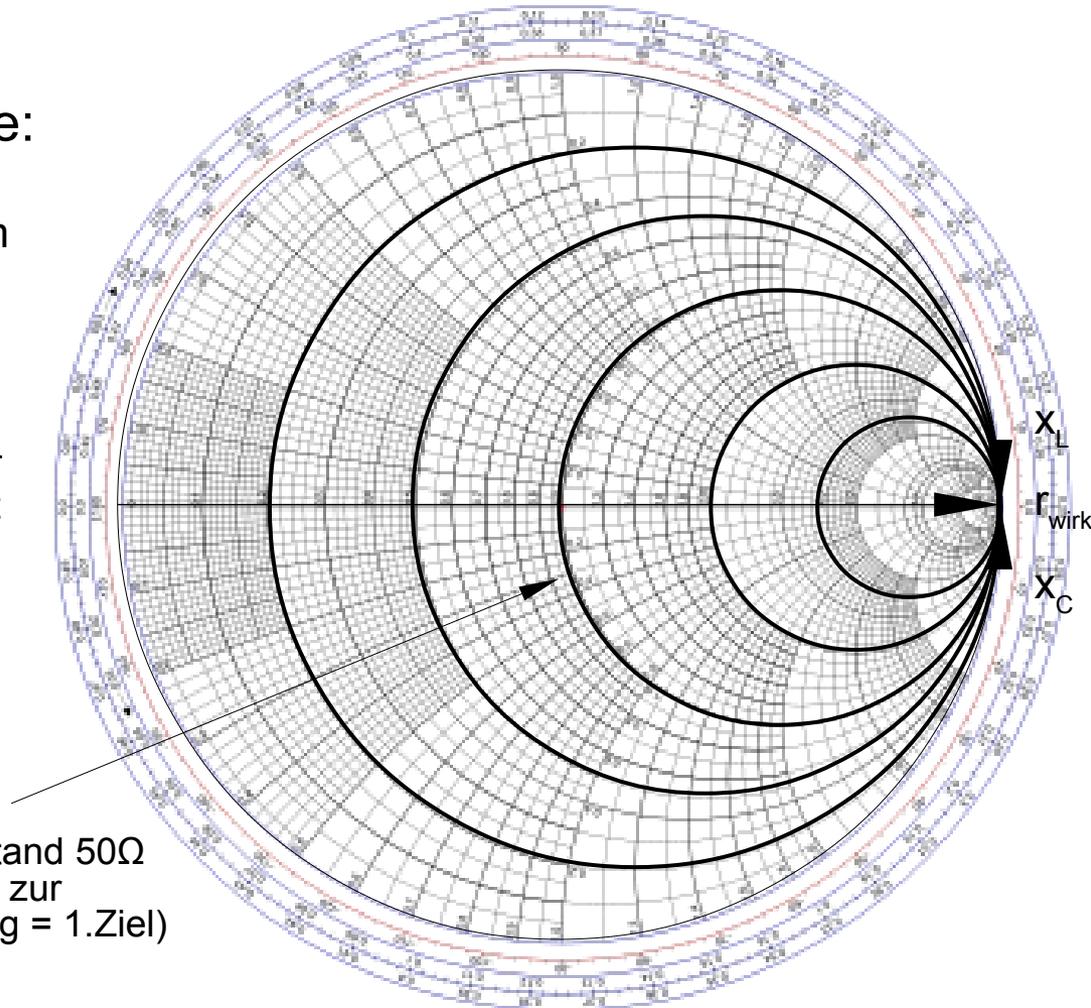


# Anpassung im Smith-Diagramm

Impedanzebene:

Kreise mit gleichem Wirkwiderstand

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



Kreis mit Wirkwiderstand  $50\Omega$   
(Nur Blindwiderstand zur Anpassung notwendig = 1.Ziel)

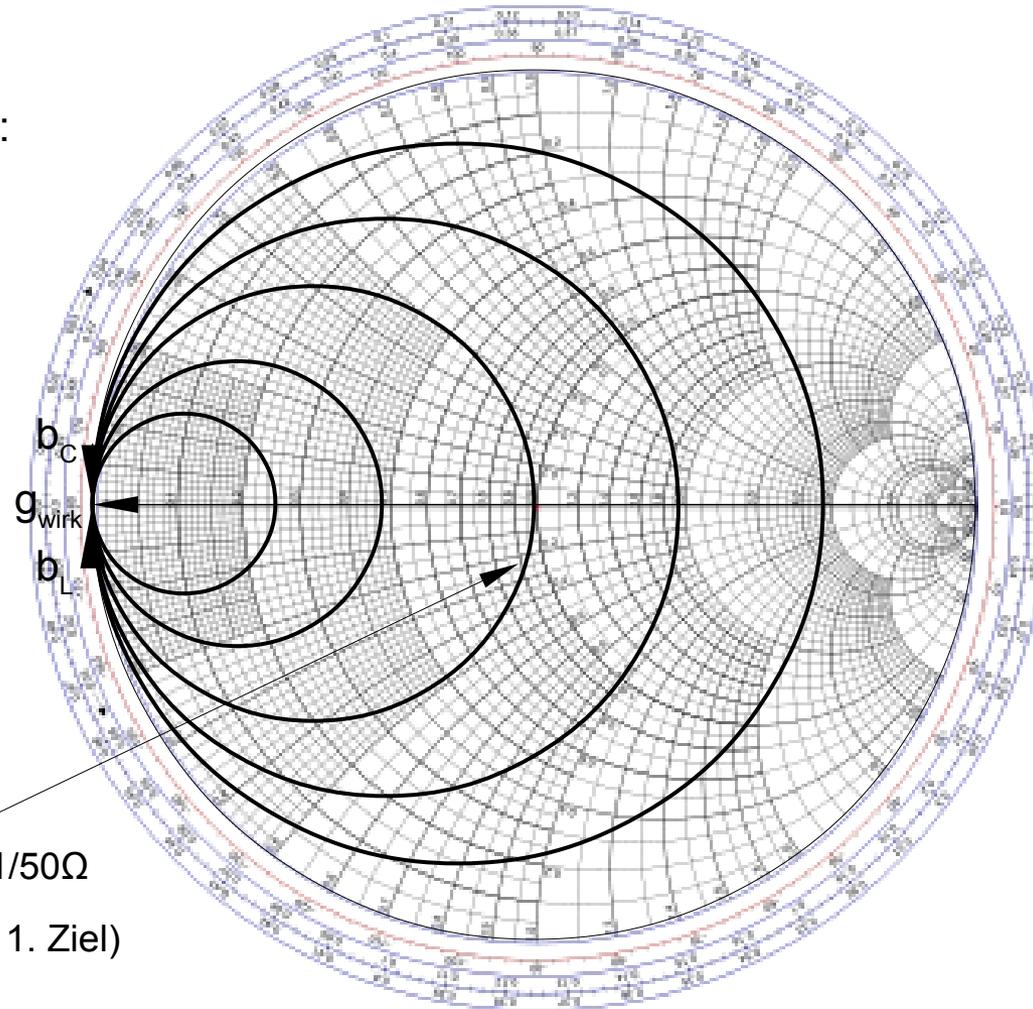


# Anpassung im Smith-Diagramm

Admittanzebene:

Kreise mit gleichem Wirkleitwert:

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

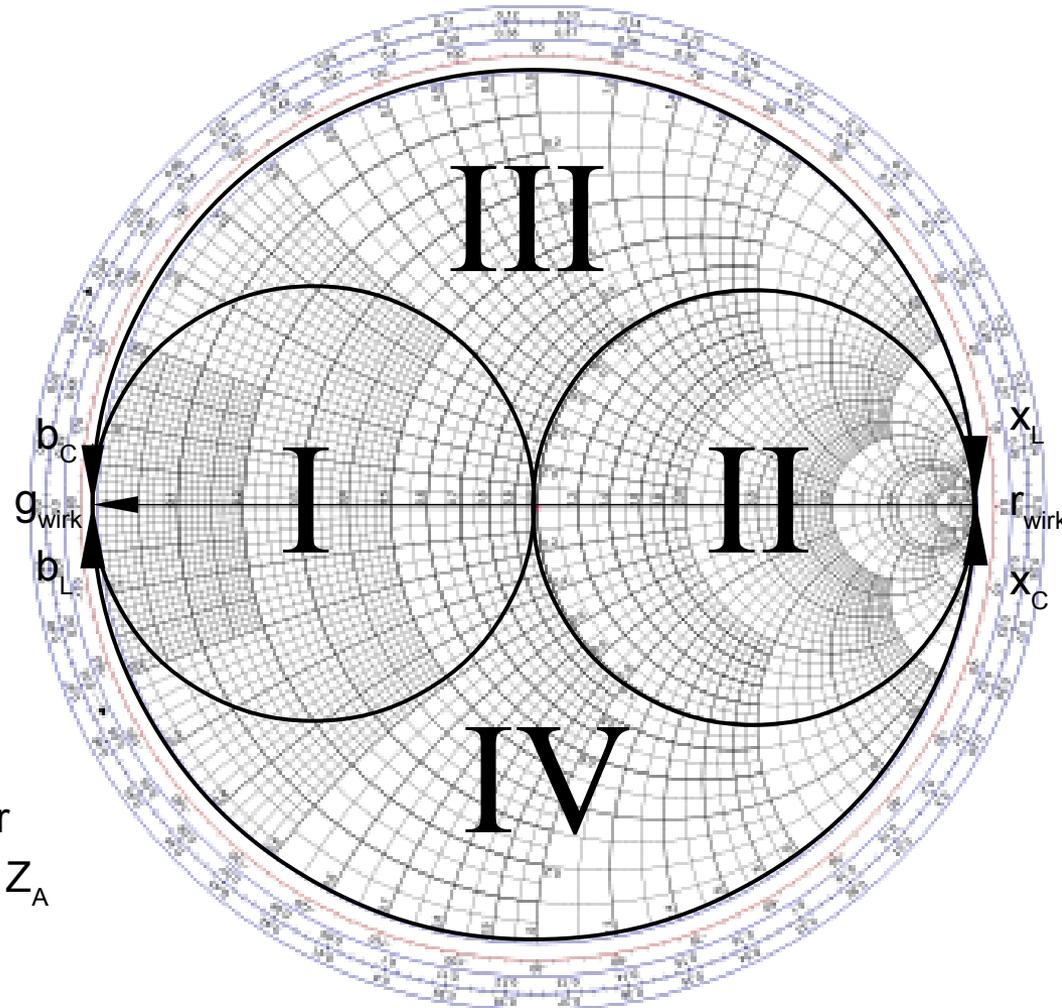


Kreis mit Wirkleitwert  $1/50\Omega$   
(Nur Blindleitwert zur Anpassung notwendig 1. Ziel)



# Anpassung im Smith-Diagramm

Anpassung mit  
L und C



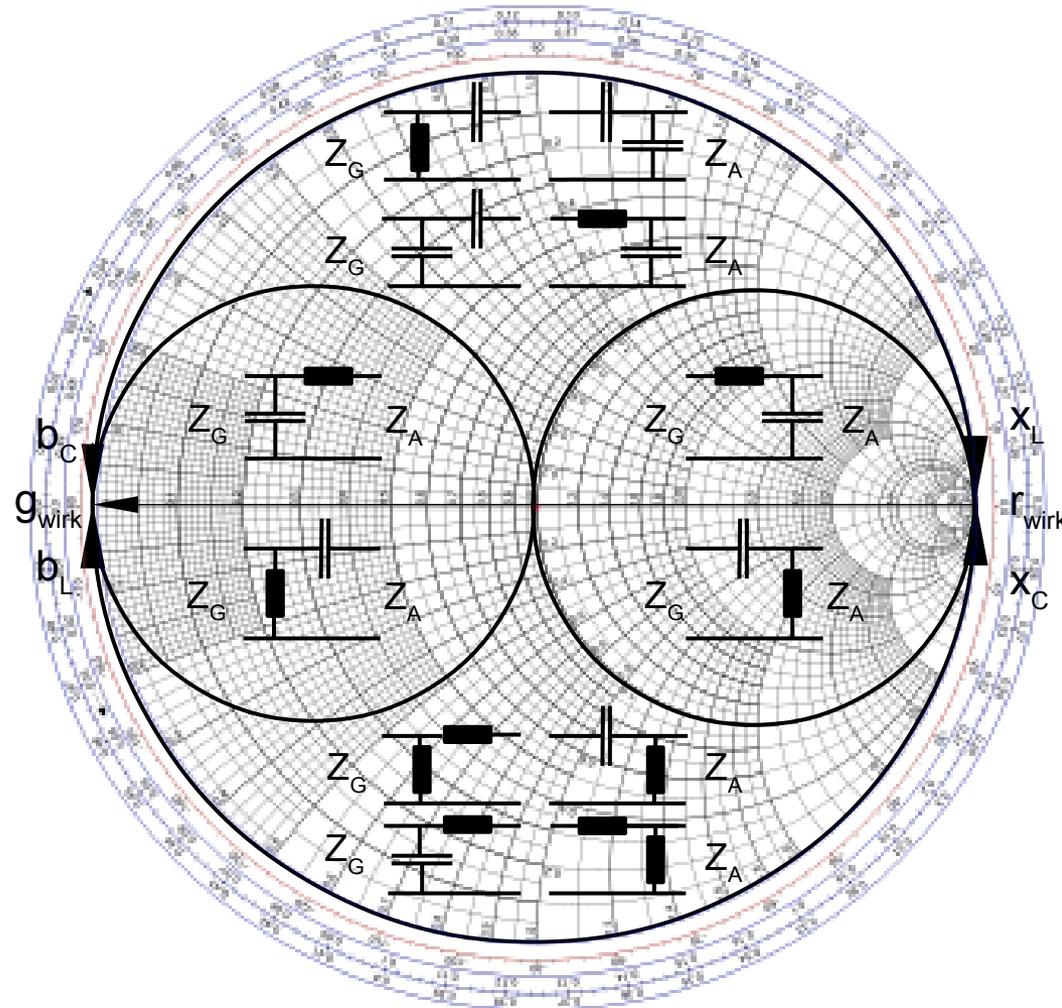
Die geeigneten  
Schaltungen zur  
Resonanztransfor-  
mation richten sich  
nach dem Gebiet der  
Fusspunktimpedanz  $Z_A$   
im Smith-Diagramm.

# 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