

Was ist eine Reaktanz

Die Reaktanz ( $X$ ) ist der Blindwiderstand. Somit ist er der Imaginärteil der Impedanz ( $Z$ ). Die Reaktanz lässt sich folgendermassen berechnen:

Für Kapazitäten:

$$X = -\frac{1}{\omega C}$$

Für Induktivitäten:

$$X = \omega L$$

Da die Impedanz  $Z = jX$  ist folgt:

Für Kapazitäten:

$$Z = jX = -\frac{j}{\omega C} = \frac{1}{j\omega C}$$

Für Induktivitäten:

$$Z = jX = j\omega L$$

Was ist die Güte (einer Reaktanz) und wie ist sie definiert?

Die Güte eines reaktiven Elements ist definiert als das Verhältnis seiner Reaktanz (Imaginärteil der Impedanz) und seiner Resistanz (Realteil der Impedanz):

$$Q = \frac{|\operatorname{Im} Z|}{\operatorname{Re} Z} = \frac{|X|}{R}$$

Grundsätzlich ist ein Bauteil besser je grösser die Güte ist.

Was ist der Verlustfaktor  $d$  und was sagt der Winkel  $\delta$  aus?

Der Verlustfaktor ist der Kehrwert der Güte.

$$d = \frac{1}{Q} = \frac{\operatorname{Re}}{|\operatorname{Im} Z|} = \tan(\delta)$$

$$\delta = \frac{\pi}{2} - |\varphi|$$

Was ist die Güte einer Induktivität  
und einer Kapazität?

Für Induktivitäten:

$$Q_L = \frac{X_L}{R_L} = \frac{\omega L}{R_L} = \omega \tau_L$$

Für Kapazitäten:

$$Q_C = \frac{|X_C|}{R_C} = \frac{1}{\omega R_C C} = \frac{1}{\omega \tau_C}$$



Was ist ein Schwingkreis und welche Betriebsmodus gibt es?

Ein Schwingkreis ist:

- ein Netzwerk aus Ohmschen, Kapazitive und Induktiven Bauteile
- ein resonanzfähiges Netzwerk
- Kann parallel oder seriell geschaltet werden

Es gibt 2 Betriebsmodus:

- Freie Schwingung
- Erzwungene Schwingung (Durch Quelle angeregt)

Welche Frequenzen gibt es in einem Schwingkreis?

Es gibt drei verschiedene Frequenzen in einem Schwingkreis:

- Eigenfrequenz  $\omega_0$   
(Resonanzfrequenz des verlustlosen Schwingkreis)
- Resonanzfrequenz  $\omega_r$   
( $\operatorname{Im}(Z) = 0$ , Reine Reelle Impedanzen und Admitanzen)
- Extremalfrequenz  $\omega_m$   
(Frequenz bei welcher die Impedanz maximal oder minimal ist)

Wie ist die Bandbreite eines  
Schwingkreises definiert?

**(absolute) Bandbreite:**

$$B = f^+ - f^- = \frac{\omega^+ - \omega^-}{2\pi}$$

Die Bandbreite ist der Frequenzbereich, in welchem die Impedanz bzw. Admittanz des Resonators sich nur um den Faktor  $\sqrt{2}$  vom nächsten (lokalen) Minimum  $\omega_m$  unterscheidet.

Oder Formal ausgedrückt:  $|Z(\omega^\pm)| = \sqrt{2} \cdot |Z(\omega_m)|$

**relative Bandbreite:**

$$B_{rel} = \frac{f^+ - f^-}{f_m} = \frac{\omega^+ - \omega^-}{\omega_m} = \frac{1}{Q_s}$$

Wobei  $Q_s$  die Schwingkreisgüte ist.

Was bedeutet Resonanz?

- Aus der Akustik:  
Verstärktes Mitschwingen eines schwingfähigen Systems
- Die Resonanzfrequenz  $\omega_r$  ist die Frequenz bei welcher die elektrische und magnetische Energie gleich gross sind  $W_C = W_L$ .

Bei der Resonanzfrequenz gilt folglich:

- $|X_C| = |X_L|$
- $Im(Z) = 0$
- $\tan(\varphi) = 0 \quad \rightarrow \quad \varphi = 0$



Was ist der Unterschied zwischen einer herkömmlichen Güte (einer Reaktanz) und einer Kreisgüte?

**Definitionen:**

Für eine Reaktanz:

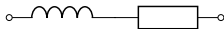
$$Q = \frac{|X|}{R}$$

Kreisgüte:

$$Q = \frac{1}{B_{rel}}$$

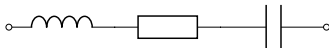
Beispiel Spule:

$$Q_L = \frac{\omega L}{R}$$



Beispiel Serienschwingkreis:

$$Q_s = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{\omega_m L}{R}$$



Wenn die Güte für den Kondensator  $Q_C \rightarrow \infty$  dann ist die Definition identisch!

Wie ist die Güte über die Einergie und Leistung definiert?

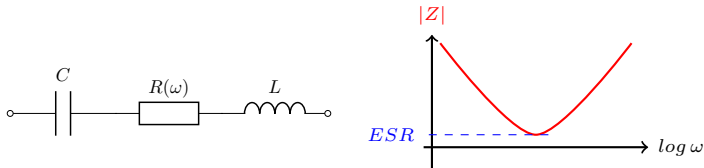
Die Güte ist folgendermassen definiert:

$$Q = \frac{\omega W}{P} = \frac{\text{gespeicherte Energie pro Periode}}{\text{Verlustleistung}}$$

Diese Definition gilt für die herkömmliche Güte so wie auch für die Kreisgüte.

Wie verhält sich ein echter  
Kondensator?

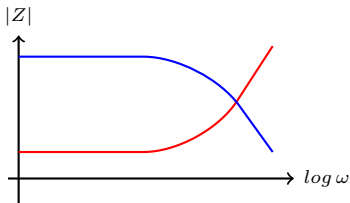
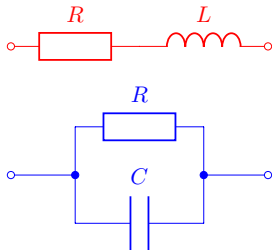
Ein Kondensator ist laut dem Ersatzschaltbild ein Serienschwingkreis und hat dementsprechend folgenden Verlauf:



Das Minimum der Impedanzfunktion ist rein reell und wird ESR (Equivalent Series Resistance) genannt. Es entspricht dem Wert des Seriewiderstands bei der entsprechenden Frequenz.

Wie verhält sich ein echten  
Widerstand?

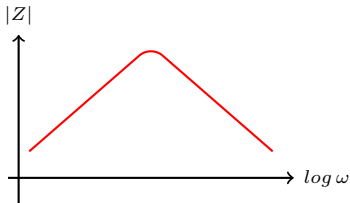
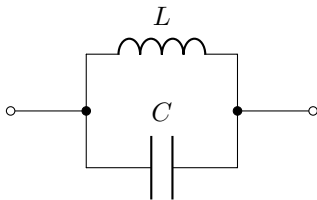
Das Ersatzschaltbild eines Widerstands hat entweder eine Spule in Serie (für kleine  $R$ ) oder einen Kondensator Parallel (für grosse  $R$ ).





Wie verhält sich eine echte Spule?

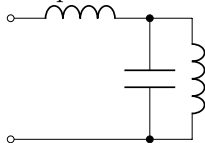
Das Ersatzschaltbild einer Spule ist ein Parallelschwingkreis. Deshalb hat der Impedanzverlauf folgende Eigenschaften.



Was ist ein Reaktanzeintor?

Ein Reaktanzeintor hat zwei Anschlüsse, besteht nur aus Reaktanzen und hat somit keine Wirkwiderstände.

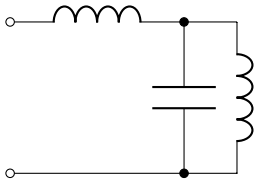
Beispiel:

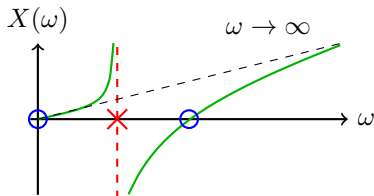


Es wird zwischen minimalen und nicht minimalen Eintoren unterschieden. Nicht minimale Eintore können auf ein minimales Eintor reduziert werden ohne dass die Änderung von aussen bemerkt wird.

Da die RET nur aus  $L$  und  $C$  bestehen hat das RET bei  $\omega = 0$  und bei  $\omega \rightarrow \infty$  jeweils eine Pol oder eine Nullstelle.

Wie sieht der Reaktanzverlauf des folgenden RET aus und was für ein Typ hat das RET?



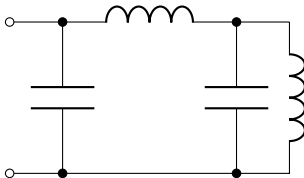


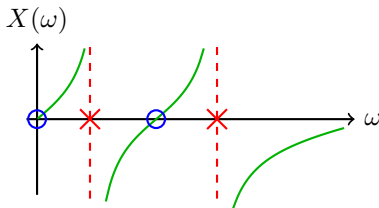
Bei diesem Beispiel handelt sich um ein L-Typ

Als erstes wird das Verhalten des RET bei DC und bei sehr grossen Frequenzen analysiert. Für DC leiten beide Induktivitäten also ist dort eine NS. Für hohe Frequenzen sperrt die Erste Spule also ist dort eine PS.

Da es bei dieser Schaltung um ein minimales RET handelt und aus drei Bauteilen besteht, hat der Reaktanzverlauf drei Pol/Null stellen. Diese treten abwechselnd auf.

Wie sieht der Reaktanzverlauf des folgenden RET aus?



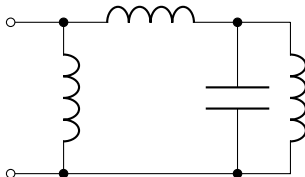


Als erstes wird das Verhalten des RET bei DC und bei sehr grossen Frequenzen analysiert. Für DC leiten beide Induktivitäten also ist dort eine NS. Für hohe Frequenzen leiten Beide Kapazitäten also ist dort ebenfalls NS.

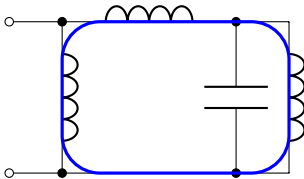
Da es bei dieser Schaltung um ein minimales RET handelt und aus vier Bauteilen besteht, hat der Reaktanzverlauf vier Pol/Null stellen. Diese treten abwechselnd auf.



Ist folgendes RET ein minimales  
Eintor?



Nein! Denn es hat ein Ring aus Induktivitäten. In diesem Ring kann ein Strom fließen. Dieser Strom ist von aussen nicht sichtbar. Eine Induktivität kann ersatzlos gestrichen werden, wenn dementsprechend die anderen Induktivitäten angepasst werden. Danach ist von aussen kein Unterschied feststellbar.

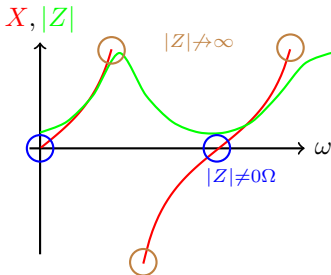


Welche Eigenschaften eines RET sind in der Praxis am unwahrscheinlichsten?

Es gibt zwei Probleme:

- Impedanz wird nie 0 erreichen
- Die Impedanz kann nicht unendlich gross werden.

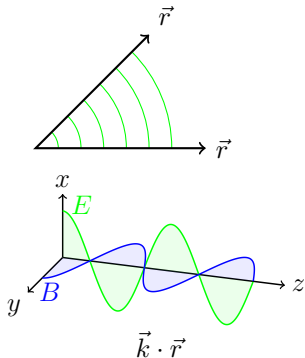
Allerdings wird die Impedanz sich nicht komplett anders verhalten als die Reaktanz.



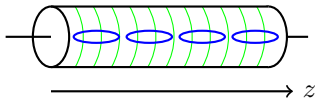
Was ist eine Leitung?

Für uns ist eine Leitung eine Wellenführung.

**Ungeführte Welle:**



**Geführte Welle:**

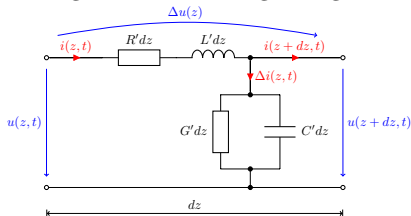


$$k \cdot z = \beta z \quad \Rightarrow \quad k = \beta$$

Im Beispiel ist ein Koaxialleiter zu sehen. Das  $B$ -Feld ist Orthogonal zum  $E$ -Feld. Die gesamte Anordnung ist Symmetrisch.

Wie Sieht das Schema des  
Leitungsmodells aus?

Das Leitungsmodell bezieht sich auf einen kurzen Leitungsausschnitt. Dadurch erhalten wir längenunabhängige Kenngrößen die sogenannten Leitungsbeläge.

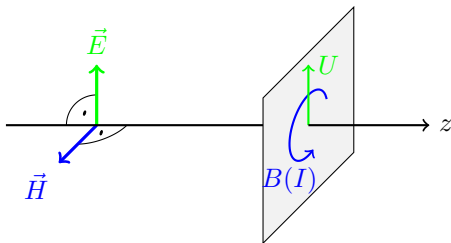


$R' = \frac{dR}{dz}$	Widerstandsbelag in $\Omega/m$
$L' = \frac{dL}{dz}$	Induktivitätsbelag in $H/m$
$G' = \frac{dG}{dz}$	Isolationsbelag in $S/m$
$C' = \frac{dC}{dz}$	Kapazitätsbelag in $F/m$



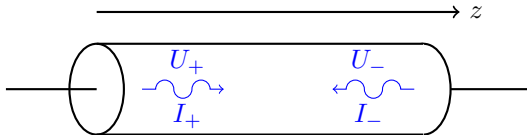
Was ist eine TEM-Welle?

TEM steht für transversalelektromagnetisch. Eine TEM-Welle hat nur Komponenten, welche senkrecht zur Ausbreitungsrichtung sind. Im Bild ist  $z$  die Ausbreitungsrichtung der Welle und steht senkrecht zu  $\vec{E}$  und  $\vec{H}$ .



Was bedeutet der Begriff  
Wellenimpedanz?

Die Wellenimpedanz ist das Verhältnis zwischen Spannung und Strom der Welle. Achtung: Dies ist nicht gleich der gemessenen Spannung und Strom an einem gewissen Punkt  $z$  in der Leitung!



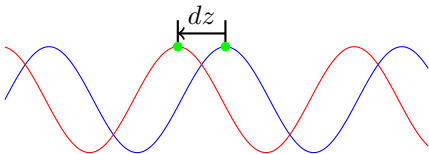
$$\begin{aligned} \rightarrow Z_0 &= \frac{U_+}{I_+} = \frac{U_-}{I_-} \neq \frac{U(z)}{I(z)} \\ &= \sqrt{\frac{R' + j\omega L'}{G' + j\omega C'}} = Z(\omega) \quad \text{gemäss Leitungsmodell} \end{aligned}$$

Was bezeichnet man als  
Ausbreitungsgeschwindigkeit?

Für uns ist meistens mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit die Phasengeschwindigkeit gemeint.

$$v = \frac{dz}{dt} = v_{ph}$$

Am einfachsten wird geschaut wie sich der Peak der Welle fortbewegt.



Was ist die Ausbreitungskonstante?

Die Ausbreitungskonstante  $\gamma$  ist eine komplexe Grösse und hat die Einheit  $Np/m + jrad/m$ .  $Np/m$  ist (Neper/Meter).

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad \begin{array}{ll} \gamma & \Rightarrow \text{Ausbreitungskonstante} \\ \alpha & \Rightarrow \text{Dämpfungskonstante} \\ \beta & \Rightarrow \text{Phasenkonstante} \end{array}$$

Eine Welle kann mittels der Ausbreitungskonstante definiert werden:

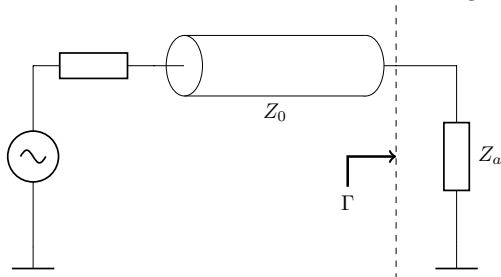
$$U_+ e^{-\gamma z}$$

Wobei  $U_+ e^{-\gamma z}$  eine Welle in die Positive  $z$  Richtung ist mit der komplexen Amplitude  $U_+ = |U_+| e^{j\varphi_+}$



Wie entstehen durch Leitungen  
Verzerrungen und wie können diese  
verhindert werden?

Eine Möglichkeit ist die **Dispersion**. Dies ist dann der Fall wenn  $\beta(\omega)$ ,  $\gamma(\omega)$ ,  $Z(\omega)$ ,  $v(\omega)$  Frequenzabhängig sind.  
Eine andere Möglichkeit für Verzerrungen sind Reflexionen. Die Reflexionen treten immer Zeitverzögert auf ( $\tau$ ).



Weshalb und wann entstehen  
Reflexionen?

# 26

*Antwort*

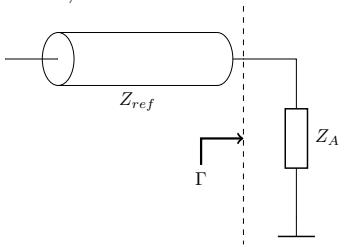
---

Was ist der Reflexionsfaktor?

Der Reflexionsfaktor  $\Gamma$  ist folgendermassen definiert:

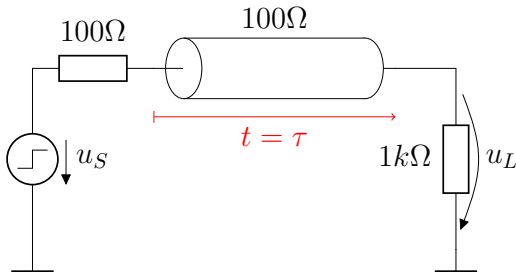
$$\Gamma = \frac{U_-}{U_+} = \frac{Z - Z_{ref}}{Z + Z_{ref}} \quad Z_{ref} \in \mathbb{R} \text{ und } Z \in \mathbb{C}$$

Dabei ist  $U_+$  die vorlaufende Welle und  $U_-$  ist die rücklaufende Welle, welche reflektiert wurde.

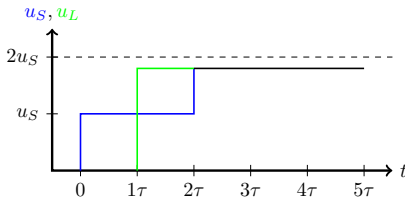


Wenn  $Z_A = Z_{ref}$  dann ist  $\Gamma = 0$ . Das heisst es gibt keine Rücklaufende Welle  $U_- = 0$  und somit auch keine Reflexionen.

Wie sehen die Reflexionen bei folgender Anordnung aus?



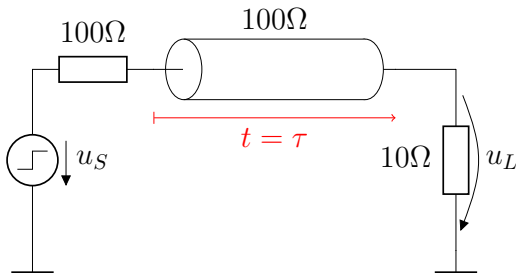
Zum Zeitpunkt  $t = 0$  wird die Welle mit der Spannung  $u_S$  losgeschickt. Zum Zeitpunkt  $t = \tau$  kommt die Welle an der Last an. Da Die Last zu hochohmig ist, kann nur ein Bruchteil der Energie an der Last aufgenommen werden. Der Rest wird Reflektiert. Nach  $2\tau$  kommt die Reflexion beim Sender an und führt zu einer Spannungsüberhöhung.



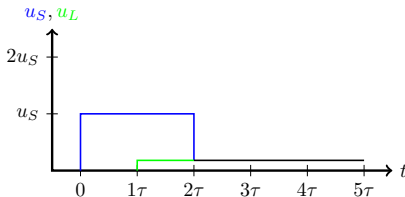
$$\begin{aligned}\Gamma &= \frac{U_-}{U_+} = \frac{Z_L - Z_{ref}}{Z_L + Z_{ref}} \\ &= \frac{1k\Omega - 100\Omega}{1k\Omega + 100\Omega} \\ &= \frac{900\Omega}{1100\Omega} = 0.818\end{aligned}$$



Wie sehen die Reflexionen bei folgender Anordnung aus?

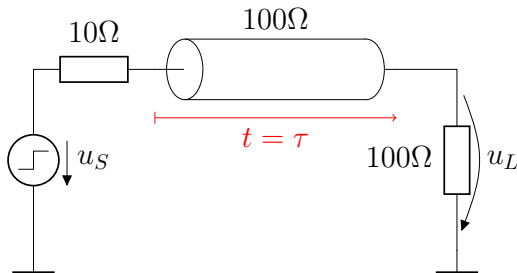


Zum Zeitpunkt  $t = 0$  wird die Welle mit der Spannung  $u_S$  losgeschickt. Zum Zeitpunkt  $t = \tau$  kommt die Welle an der Last an. Da die Last zu niederohmig ist, wird eine Negative Welle mit  $\Gamma u_S$  reflektiert. Nach  $2\tau$  kommt die beim Sender an und führt zu einer geringeren Spannung.

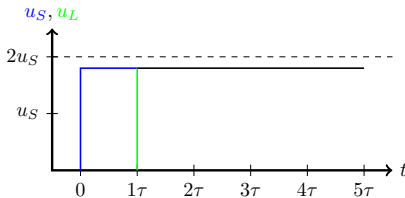


$$\begin{aligned}
 \Gamma &= \frac{U_-}{U_+} = \frac{Z_L - Z_{ref}}{Z_L + Z_{ref}} \\
 &= \frac{10\Omega - 100\Omega}{10\Omega + 100\Omega} \\
 &= \frac{-90\Omega}{110\Omega} = -0.818
 \end{aligned}$$

Wie sehen die Reflexionen bei folgender Anordnung aus?

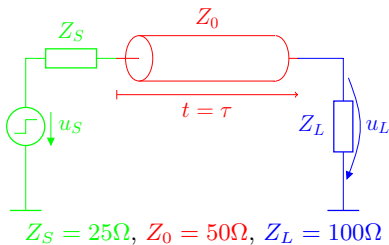


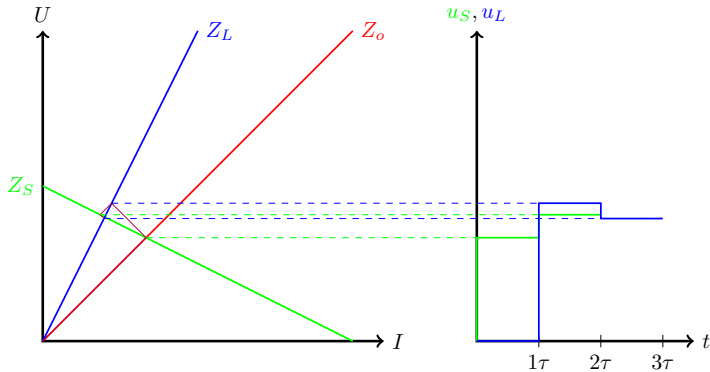
Zum Zeitpunkt  $t = 0$  wird die Welle mit der Spannung  $u_S$  losgeschickt. Allerdings wird diese sofort Reflektiert. Es kommt zu einer Spannungsüberhöhung an der Quelle ( $Z_{ref}$  ist in diesem Fall  $10\Omega$ ). Die Welle wird dann mit  $u_S(1+\Gamma)$  losgeschickt und kommt dann zum Zeitpunkt  $t = 2\tau$  beim Empfänger an. Dort kommt es zu keiner Reflexion.



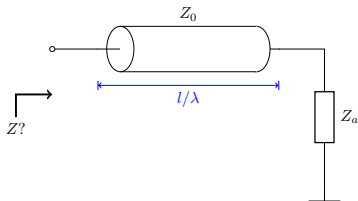
$$\begin{aligned}\Gamma &= \frac{U_-}{U_+} = \frac{Z_L - Z_{ref}}{Z_L + Z_{ref}} \\ &= \frac{100\Omega - 10\Omega}{100\Omega + 10\Omega} \\ &= \frac{90\Omega}{110\Omega} = 0.818\end{aligned}$$

Bestimme die Reflexionen folgender  
Schaltung mit dem  
Bergeron-Verfahren!





Was ist eine Leitungstransformation?



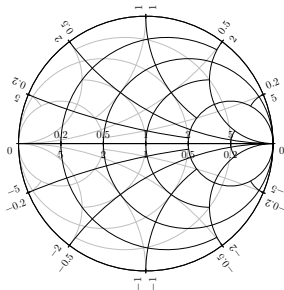
Um Herauszufinden welche Impedanz die Quelle sieht, muss eine Leitungstransformation durchgeführt werden. Die Impedanz ist stark von der Länge der Leitung abhängig. Bei einer Leitungslänge von  $l = \lambda/4$  gilt folgende vereinfachte Formel:

$$Z_{\lambda/4} \cdot Z_A = Z_0^2$$

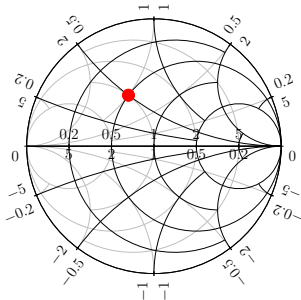


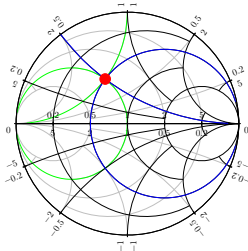
Was zeigt ein Smith-Chart?

- Aufzeichnen des Komplexen Reflexionsfaktor in der Komplexen Ebene von  $\Gamma$
- Eine Ortskurve des Komplexen Reflexionszeigers
- Die Bilinear Transformation der Normierten Impedanz



Was für eine Impedanz und Admittanz zeigt folgendes  $50\Omega$  Smith-Chart?





Aus dem Diagramm lässt sich die Impedanz und die Admittanz sehr einfach auslesen. Dazu muss den Kreisen gefolgt werden. Für die Impedanz (Blau):

$$Z = Z_0 \cdot (0.5 + j0.5) = 50\Omega \cdot (0.5 + j0.5) = (25 + j25)\Omega$$

Für die Admittanz (Grün) sind die Werte oben Negativ:

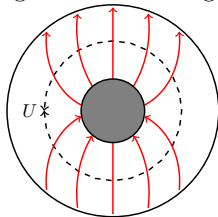
$$Y = Y_0 \cdot (1 - j1) = \frac{1}{50\Omega} \cdot (1 - j1) = (20 - j20)mS$$

Ab wann muss eine Leitung als solches  
betrachtet werden?

Entscheidend ist die Länge der Leitung im Bezug zur Wellenlänge. Ist die Leitung viel kürzer als die Wellenlänge  $l \ll \lambda$  (bsp  $l \approx \frac{\lambda}{100}$ ) haben wir keine Probleme und müssen die Leitung nicht als solches betrachten. Bei höheren Frequenzen oder längeren Leitungen wird es langsam kritisch  $l \approx \frac{\lambda}{20} \dots \frac{\lambda}{10}$ . Dann muss die Leitung auch als Leitung betrachtet werden. Die Grenze variiert stark mit den Qualitätsanforderungen der Schaltung.

Weshalb ist der Einsatz von  
Koaxialkabeln elektrisch begrenzt?

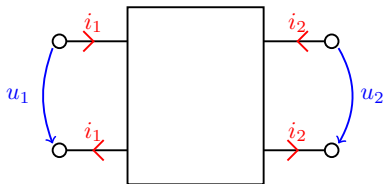
Koaxialkabel können wir ab DC bis in den GHz-Bereich benutzen. Der Grund dafür ist, dass ab einer gewissen Frequenz der mittlere Umfang  $U$  des Koaxialkabels nicht mehr sehr klein ist gegenüber  $\lambda$ . Dann beginnt sich der Sogenannte 2. Mode auszubreiten. Die Überlagerungen der beiden Modes kann zu beliebigen Auslöschung und Verzerrungseffekte führen.





Worum handelt sich bei einem Zweitore?

Ein Zweitor ist ein Vierpol bei welchem immer zwei als Paar auftreten. Die Spannungen und Ströme sind wie im Schema eingezeichnet definiert. Es muss immer auf das Vorzeichen geachtet werden. Ansonsten funktionieren die gesamten Rechenregeln nicht.

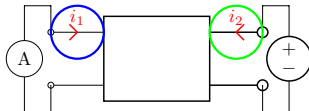
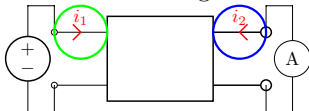


Was versteht man im Bezug auf  
Zweitore unter Passivität, Reziprozität  
und Symmetrie?

**Passivität:** Die Leistung die Das Zweitor aufnimmt ist grösser als 0 ( $P \geq 0$ )

**Reziprozität:** Ist die Symmetrie bezüglich dem Ausgang. Die Ströme durch die Amperemeter (grün umkreist) müssen gleich sein.

**Symmetrie:** Die Ströme durch die Quelle (Blau umkreist) müssen ebenfalls gleich sein.



Was bedeutet EMV?

EMV steht für Elektromagnetische Verträglichkeit. Das bedeutet im Wesentlichen, dass das Gerät in einem Umfeld mit gewissen Störungen störungsfrei funktioniert aber auch dass das Gerät das Umfeld nicht zu stark stört. Ein wenig Stören ist erlaubt. Dies ist von der Kategorie abhängig.

Welche drei Perspektiven gibt es im  
Zusammenhang mit EMV?

Die drei Perspektiven sind **SI**, **PI** und **EMC**.

**SI** steht für Signal Integrity und behandelt vorallem die Frage, Wie gut sind die Signale intern. Werden alle Anforderungen bezüglich den standardisierten Signalen eingehalten?

**PI** steht für Power Integrity. Das ist die Koexistenz Intern. Die Verschieden Teile eines System dürfen sich nicht zu viel stören. Ein bisschen Störung ist allerdings nicht zu vermeiden. Die Störungen werden primär durch die gesamte Leistungs-/Energieversorgung von einem Teil auf den Anderen übertragen.

**EMC** steht für Electromagnetic Compatibility. Das ist die Koexistenz gegen Aussen.



Was beinhaltet das Grundmodell der  
Störungsbeeinflussung?

Das Grundmodell basiert auf drei Komponenten. Es gibt Störquellen, Kopplungspfade und Störsenken.



Bei der Senke kann eigentlich nichts unternommen werden um Störungen zu vermeiden. Bei der Quelle kann man allfällige Störungen versuchen zu verhindern. Beispielsweise indem steile Flanken vermieden werden. Am meisten Einfluss haben wir allerdings auf die Kopplung. Wenn wir die Kopplung reduzieren wird die Störbeeinflussung ebenfalls reduziert.

Welche Kopplungsarten von Störungen  
werden unterschieden?

Es gibt die kapazitive, die induktive, die galvanische und die Strahlen Kopplung.