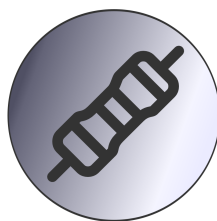


FACHLICHE HINTERGRÜNDE

IMPEDANCE PRO

JAVA-TOOL ZUM ERRECHNEN VON ANPASSUNGSNETZWERKEN

6. Juni 2014



AUFTRAGGEBER:	PROF. P. NIKLAUS
BETREUER:	PROF. P. NIKLAUS PROF. DR. R. GUT P. BUCHSCHACHER DR. A. GERTISER
TEAM:	PATRICK SUTTER FAHRNI STEPHAN FLORJANCIC MICHAEL SCHWAGER FABIAN ZINGG DAVID ZUMBRUNNEN SIMON
STUDIENGANG:	ELEKTRO- UND INFORMATIONSTECHNIK

Inhaltsverzeichnis

1	Elektrotechnische Grundlagen	3
1.1	Berechnung der Anpassnetzwerke	5
1.1.1	Bauteil parallel zur Quelle	5
1.1.2	Bauteil parallel zur Last	8
1.1.3	Spezialfälle	10
1.2	Reflexionsfaktor	15
1.2.1	Standing Wave Ratio	15

1 Elektrotechnische Grundlagen

Selbst bei einfachen elektronischen Geräten wie Kopfhörer, Mäuse und Tastaturen werden vermehrt Funkverbindungen eingesetzt. Bei diesen Geräten spielt die Akkulaufzeit eine wichtige Rolle. Deshalb ist es wichtig, dass bei Funkverbindungen möglichst wenig Leistung verloren geht. Ein wichtiger Bestandteil hierfür ist die Leistungsanpassung von Quellimpedanz zur Lastimpedanz, in diesem Falle sind dies ein Sender und eine Antenne.

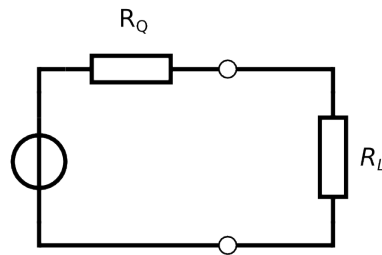


Abbildung 1: Netzwerk mit nur Widerständen

Abb. 1 zeigt eine Quelle mit Quell- und Lastwiderstand. Wenn R_L viel grösser als R_Q ist, dann ist die Spannung über R_L maximal, der Strom durch R_L aber sehr klein. Somit ist auch die Leistung in R_L klein. Ist R_L viel kleiner als R_Q , so ist der Strom durch R_L maximal, jedoch die ist Spannung über R_L fast 0V. Da die Leistung das Produkt aus $P = U * I$ ist, ist in diesem Fall die Leistung über R_L auch klein. Damit die Leistung über R_L maximal wird, muss $R_Q = R_L$ sein. (1) zeigt die Berechnung der maximal verfügbaren Leistung bei einem angepassten Netzwerk

$$P_{AV} = \frac{U_Q^2}{4R_Q} \quad (1)$$

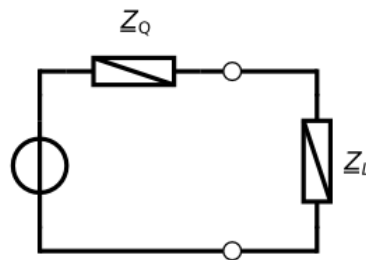


Abbildung 2: Netzwerk mit nur Impedanzen

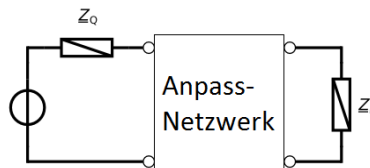


Abbildung 3: Netzwerk mit Anpassnetzwerk zwischen Quelle und Last

Abb. 2 zeigt die gleiche Situation wie Abb. 1, jedoch mit Impedanzen. Damit die Leistung in der Lastimpedanz maximal wird, muss $\underline{Z}_Q = \underline{Z}_L^*$ sein. Da diese Bedingung oft nicht gegeben ist, muss mithilfe eines Anpassnetzwerkes die Lastimpedanz zur Quellimpedanz angepasst werden. Abb. 3 zeigt ein Ersatzschaltbild für ein solches Anpassnetzwerk. Da Spulen und Kondensatoren verlustlos sind, eignen sich diese als Anpassnetzwerke. Um eine Quelle und eine Last schmalbandig anzupassen, sind folgende acht Möglichkeiten aus Abb. 4 und Abb. 5 möglich. Wobei maximal vier dieser acht Möglichkeiten als Topologie für ein Anpassnetzwerk infrage kommen.

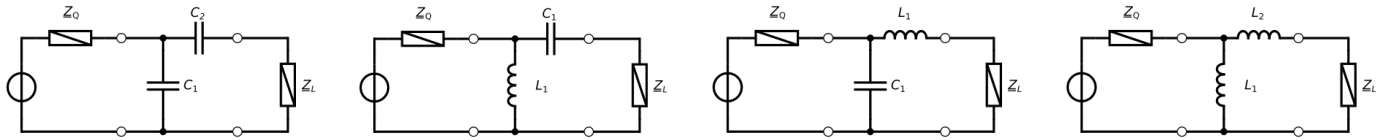


Abbildung 4: Mögliche Anpassnetzwerke mit Bauteil parallel zur Quelle

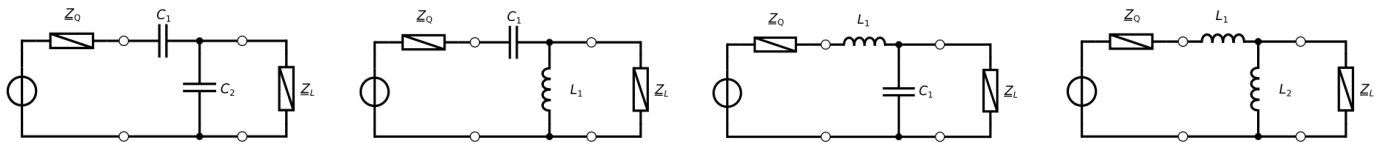


Abbildung 5: Mögliche Anpassnetzwerke mit Bauteil parallel zur Last

Eine einfache Möglichkeit um Anpassnetzwerke zu visualisieren bilden Smith Charts. Hier ist auch klar ersichtlich, in welchen Fällen es weniger als vier Lösungen gibt. Diese Spezialfälle werden weiter hinten noch genauer behandelt.

Hier ein kurzes Beispiel zur Leistungsanpassung:

$$\underline{Z}_Q = 50 + j50$$

$$\underline{Z}_L = 75 - j10$$

$$f = 100\text{MHz}$$

In Abb. 6 sind die vier möglichen Anpassnetzwerke für das Beispiel abgebildet, Abb. 7 Visualisiert die vier Lösungen im Smith-Chart. In Abb. 7 ist gut ersichtlich, dass keine weiteren Lösungen mit nur zwei Anpasselementen möglich sind. DP1 ist die Quellimpedanz und DP2 die konjugierkomplexe Lastimpedanz. Die roten Linien stellen die Impedanzebene und die blauen Linien die Admittanzebene dar.

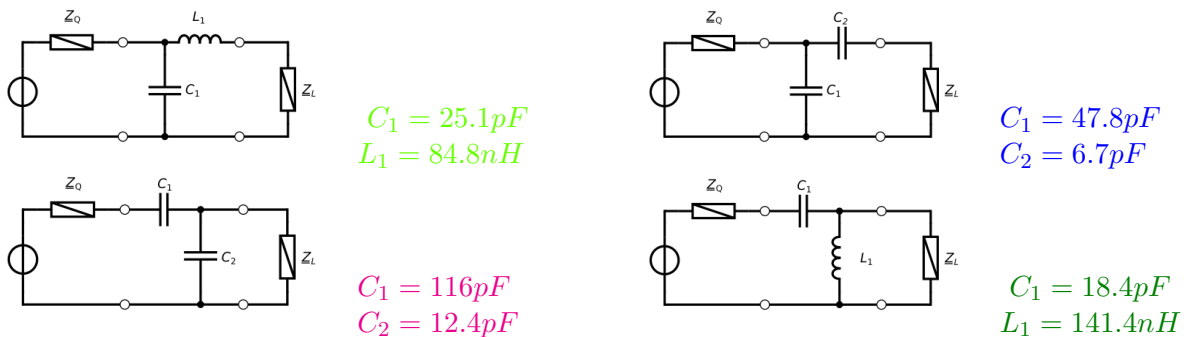


Abbildung 6: mögliche Lösungen

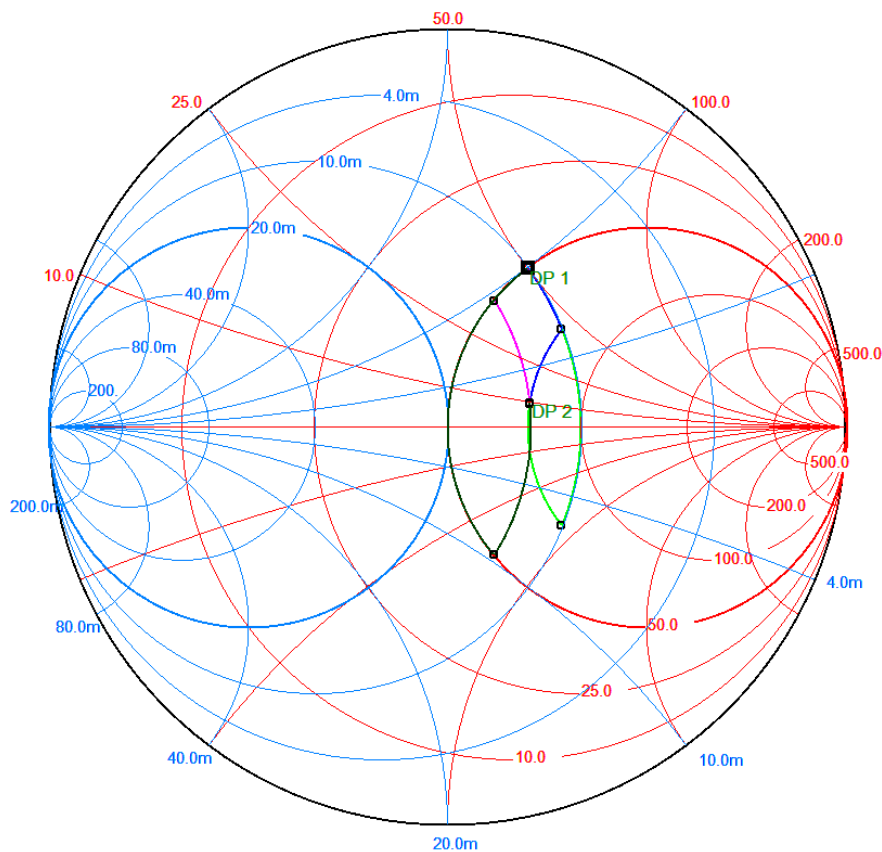


Abbildung 7: Visualisierung einer Anpassung mit vier Lösungen

1.1 Berechnung der Anpassnetzwerke

Die mit Hilfe von Smith-Charts dargestellten Lösungen können auch berechnet werden. Da noch unbekannt ist, welche Topologien als mögliche Anpassnetzwerke infrage kommen, werden zuerst mit Ersatzschaltbildern die Blindwiderstände der Anpasselemente berechnet. Grundsätzlich gibt es folgende Möglichkeiten wie in Abb. 8 gezeigt, um ein Netzwerk schmalbandig anzupassen. Diese beiden Möglichkeiten werden in diesem Kapitel noch einzeln genauer erläutert.

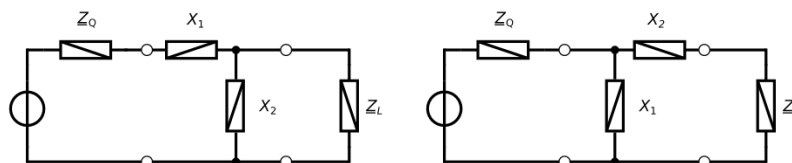


Abbildung 8: Mögliche Anpassnetzwerke

1.1.1 Bauteil parallel zur Quelle

Wie anfangs Kapitel 1 schon erläutert, muss die Bedingung $Z_Q = Z_L^*$ erfüllt sein. Um die Elemente für das Anpassnetzwerk zu berechnen, kann das Netzwerk an einer beliebigen Stelle aufgetrennt werden. Abb. 9 zeigt ein Ersatzschaltbild für ein Anpassnetzwerk Z_Q und Z_L sind bekannt, X_1 und X_2 sind unbekannt. Für die nachfolgenden Berechnungen wird das Netzwerk in der Mitte zwischen X_1 und X_2 aufgeschnitten. Die Herleitungen der Formeln sind im Anhang aufgeführt. So ergeben sich die in

(2) und (3) beschriebenen zusammenhänge. Durch Umformen ergeben (4) für X_1 und (5) für X_2 . Ist die Bedingung (6) erfüllt, so gibt es keine Lösung mit dieser Anpassstopologie. Wenn $R_L = R_Q$ ist, ergeben diese Formeln keine Lösungen. Dieser Fall wird in Kapitel 1.1.3 erläutert.

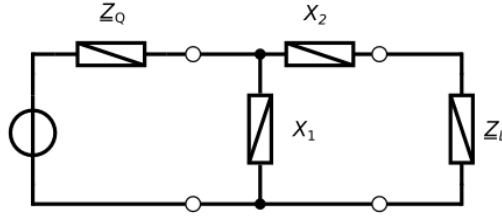


Abbildung 9: Ersatzschaltbild für Anpassnetzwerk

$$\underline{Z}_x = \underline{Z}_Q || jX_1 \quad (2)$$

$$\underline{Z}_x^* = \underline{Z}_L + jX_2 \quad (3)$$

$$X_1 = \frac{-X_Q \pm \sqrt{X_Q^2 - (1 - \frac{R_Q}{R_L})|Z_Q|^2}}{1 - \frac{R_Q}{R_L}} \quad (4)$$

$$X_2 = - \left\{ \frac{X_Q^2 X_1 + X_Q X_1^2 + R_Q^2 X_1}{R_Q^2 + X_Q^2 + 2X_1 X_Q + X_1^2} + X_L \right\} \quad (5)$$

$$X_Q^2 < (1 - \frac{R_Q}{R_L})|Z_Q|^2 \quad (6)$$

Die Lösungen können auch mithilfe von Smith-Charts visualisiert werden siehe Abb. 10. X_1 ist auf einer beliebigen Stelle auf dem grünen Kreis und X_2 auf einer beliebigen Stelle auf dem dunkelblauen Kreis liegen. DP1 ist die Quellimpedanz, in diesem Beispiel $Z_Q = 50 + j50$, DP2 ist die Konjugierkomplexe Lastimpedanz $Z_L^* = 75 + j10$. Die Werte in diesem Beispiel sind dieselben, wie in Kapitel 1 bei den theoretischen Grundlagen. In Abb. 10 schneiden sich der grüne und der blaue Kreis an zwei Punkten, daher gibt es zwei Lösungen. Wenn sich die Kreise an nur einem Punkt berühren, gibt nur eine Lösung. Wenn sich die Kreise gar nicht berühren, gibt es keine Lösung mit dieser Schaltungstopologie. Dies ist in Abb. 11 mit $Z_Q = 50 + j50$ und $Z_L^* = 75 + j10$ visualisiert. Abb. 11 zeigt ein Beispiel, bei welchem es keine Lösung für diese Anpassstopologie gibt.

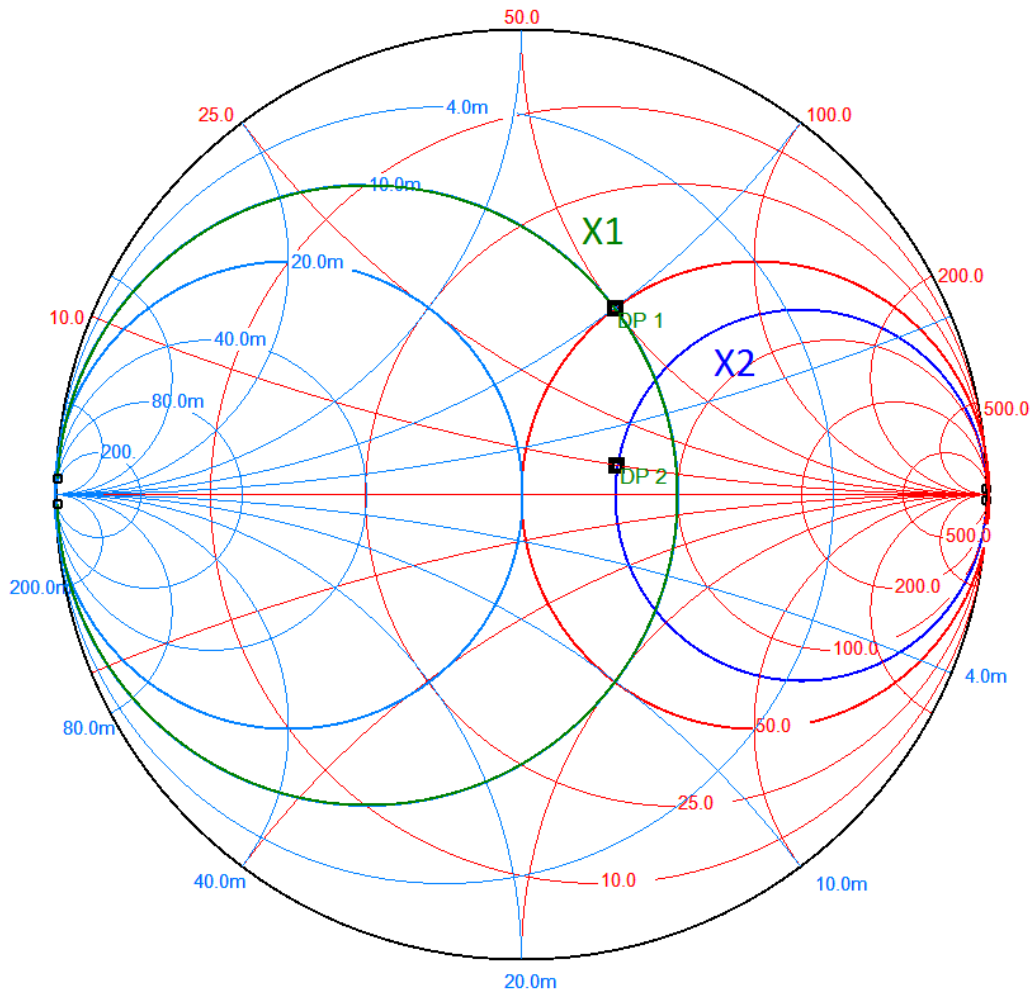


Abbildung 10: Beispiel einer Anpassung

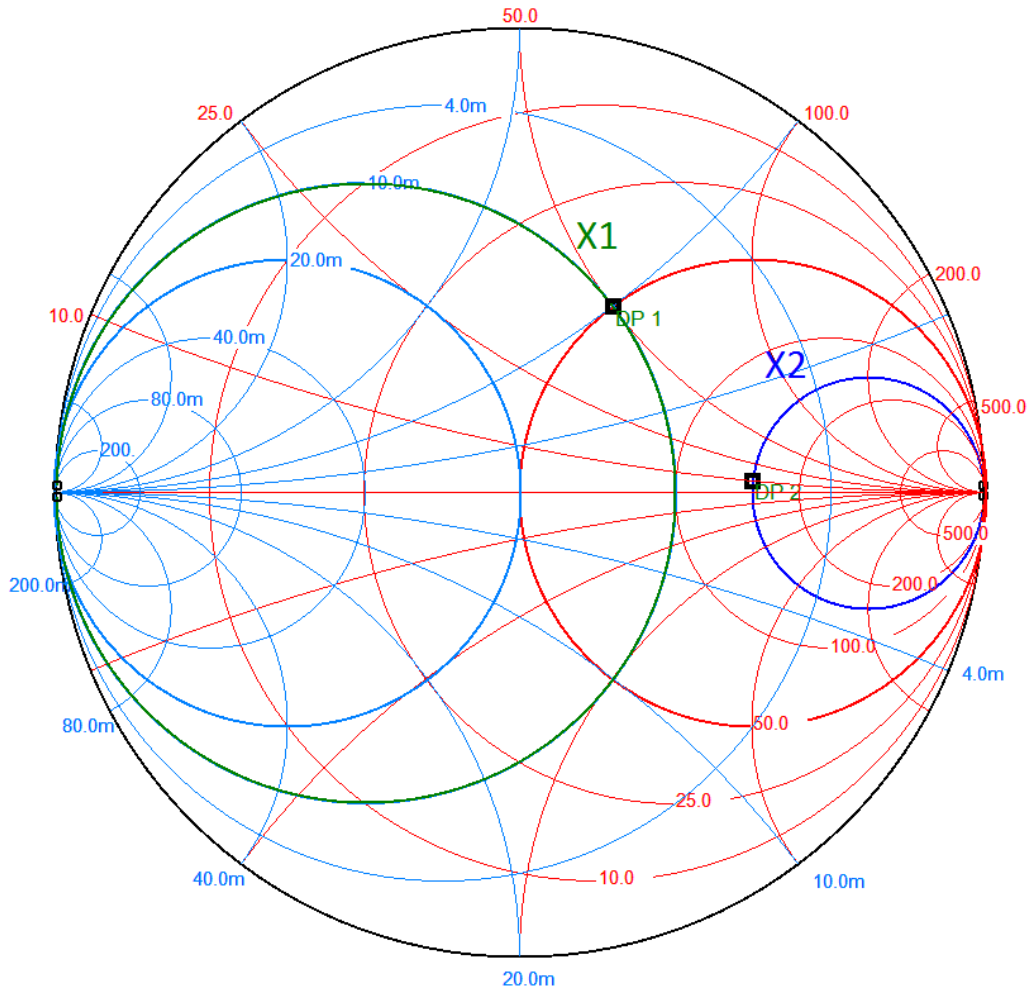


Abbildung 11: Beispiel ohne Lösung mit einem Bauteil parallel zur Quelle

1.1.2 Bauteil parallel zur Last

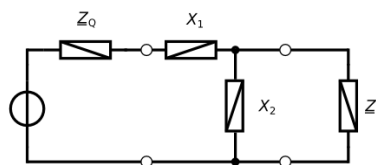


Abbildung 12: Lösungstopologie mit einem Bauteil parallel zur Last

Da X_1 und X_2 im Anpassnetzwerk vertauscht sind, können in (4) und (5) auch Z_Q und Z_L getauscht werden. Somit ergeben sich die Formeln (7) und (8). Formel (9) zeigt die Bedingung, wenn es keine Lösung mit dieser Topologie gibt. Wenn $R_L = R_Q$ ist, ergeben diese Formeln keine Lösungen. Dieser Fall wird in Kapitel 1.1.3 erläutert.

$$X_1 = - \left\{ \frac{X_L^2 X_2 + X_L X_2^2 + R_L^2 X_2}{(R_L^2 + X_L^2) + 2X_2 X_L + X_2^2} + X_Q \right\} \quad (7)$$

$$X_2 = \frac{-X_L \pm \sqrt{X_L^2 - (1 - \frac{R_L}{R_Q})|Z_L|^2}}{1 - \frac{R_L}{R_Q}} \quad (8)$$

$$X_L^2 < (1 - \frac{R_L}{R_Q})|Z_L|^2 \quad (9)$$

Wie auch bei der Topologie mit einem Bauteil parallel zur Quelle, können auch hier die Lösungen mit einem Smith-Chart visualisiert werden. Das vorherige Beispiel aus Abb. 11 mit $\underline{Z}_Q = 50 + j50$ und $\underline{Z}_L^* = 75 + j10$ ergibt bei der Topologie mit einem Bauteil parallel zur Quelle keine Lösung. Mit einem Bauteil parallel zur Last ergibt dasselbe Beispiel jedoch zwei Lösungen. Diese sind in Abb. 13 visualisiert. Auch bei dieser Topologie gibt es Konstellationen von \underline{Z}_Q und \underline{Z}_L , die zu keiner Lösung führen.

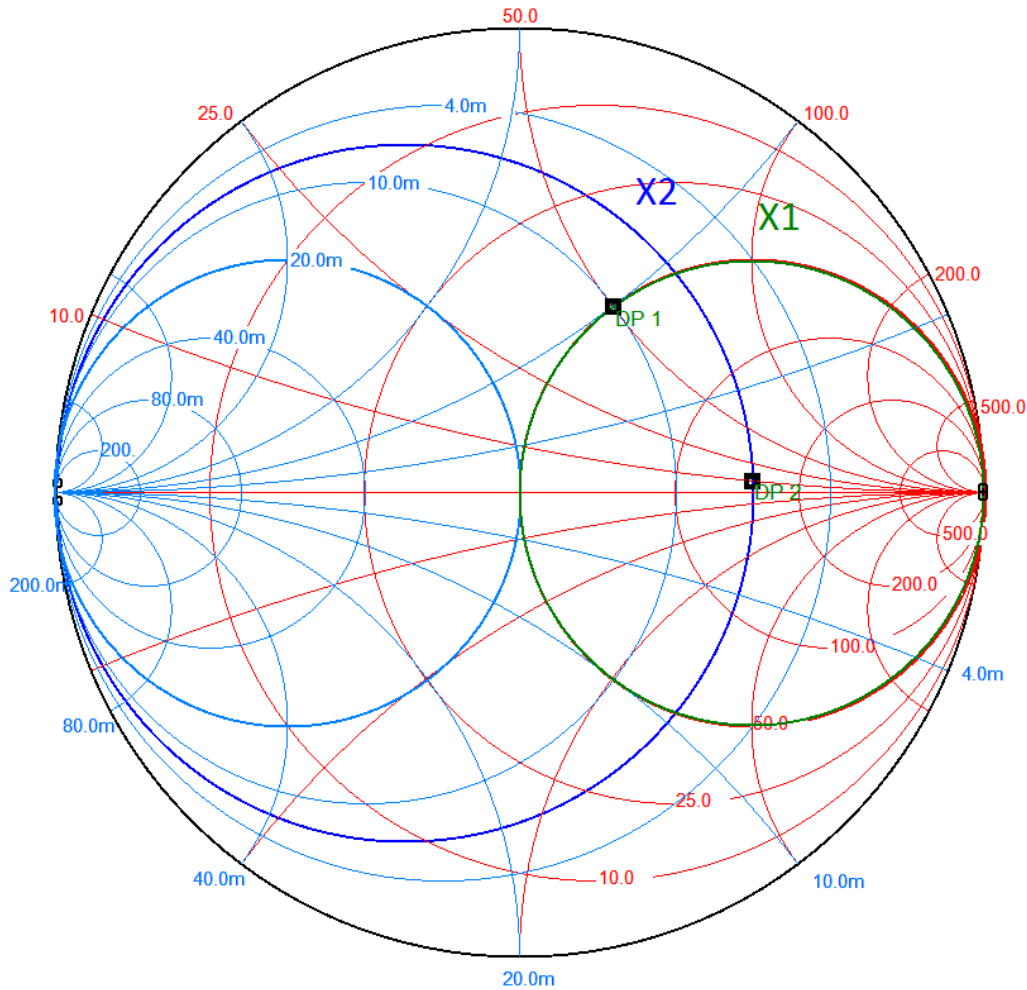


Abbildung 13: Visualisierung einer Anpassung mit Bauteilen parallel zur Last

1.1.3 Spezialfälle

$$R_L = R_Q$$

Bei den Formeln (4) und (8) wird der Nenner in diesem Falle 0. Deshalb können keine Lösungen mit diesen Formeln berechnet werden. Da der Realteil schon angepasst ist, muss nur noch der Imaginärteil angepasst werden, daher gibt es mindestens eine Lösung mit nur einem Bauteil. (10) zeigt die Formel zur berechnung dieses Bauteils. Es gibt trotzdem auch Lösungen mit zwei Bauteilen. Hier ein kurzes Beispiel zur besseren Veranschaulichung.

$$\underline{Z}_Q = 50 + j50$$

$$\underline{Z}_L = 50 + j25$$

Die dunkelblaue Linie in Abb. 14 stellt die Lösung mit nur einem Bauteil als Anpassnetzwerk dar.

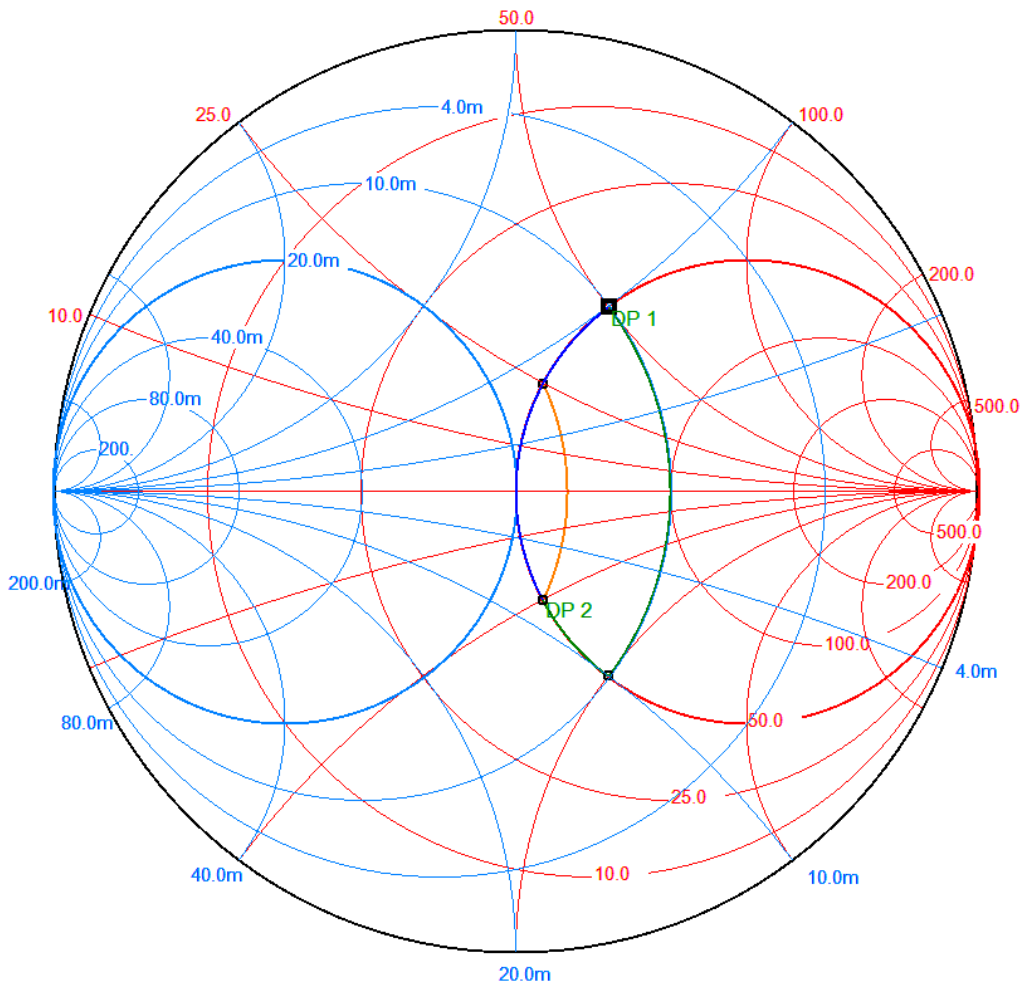


Abbildung 14: Beispiel einer Anpassung mit $R_L = R_Q$

Die grüne Linie ist eine Lösung mit einem Kondensator parallel zur Quelle und einer Spule in Serie zur Last dar. Die orange Lösung hat einen Kondensator in Serie zur Quelle und einen Kondensator parallel zur Last. Um die Lösungen mit zwei Bauteilen berechnen zu können, muss das Netzwerk an einer anderen Stelle aufgeschnitten werden. Die Herleitung für die Formeln ist im Anhang aufgeführt. Da diese Formeln weiter vereinfacht sind, sind diese nur gültig, wenn $R_L = R_Q$ ist.

$$X_1 = -\{X_Q + X_L\} \quad (10)$$

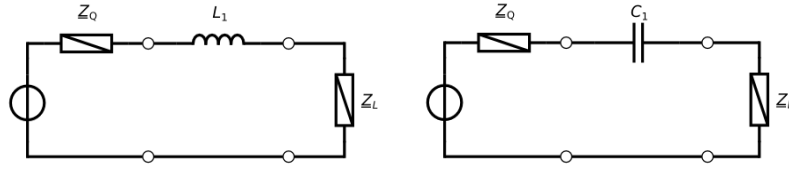


Abbildung 15: Lösungen mit nur einem Bauteil

Sofern X_Q nicht null ist, gibt es auch eine Lösung mit einem Bauteil parallel zur Quelle siehe Abb. 16. Die Blindwiderstände für die Elemente lassen sich mit (11) und (12) berechnen. In Abb. 17 mit $\underline{Z}_Q = 50$ und $\underline{Z}_L = 50 + j25$ ist ersichtlich, dass sich die Kreise im Punkt $\underline{Z}_Q = 50$ schneiden. Somit gibt es keine Lösung mit dieser Topologie.

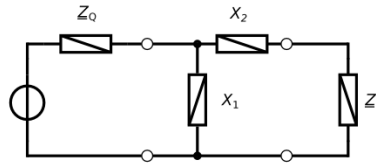


Abbildung 16: Anpassnetzwerk mit Element parallel zur Quelle

$$X_1 = \frac{-(X_Q^2 + R_Q^2)}{2X_Q} \quad (11)$$

$$X_2 = -\left\{ \frac{X_Q^2 X_1 + X_Q X_1^2 + R_Q^2 X_1}{R_Q^2 + X_Q^2 + 2X_1 X_Q + X_1^2} + X_L \right\} \quad (12)$$

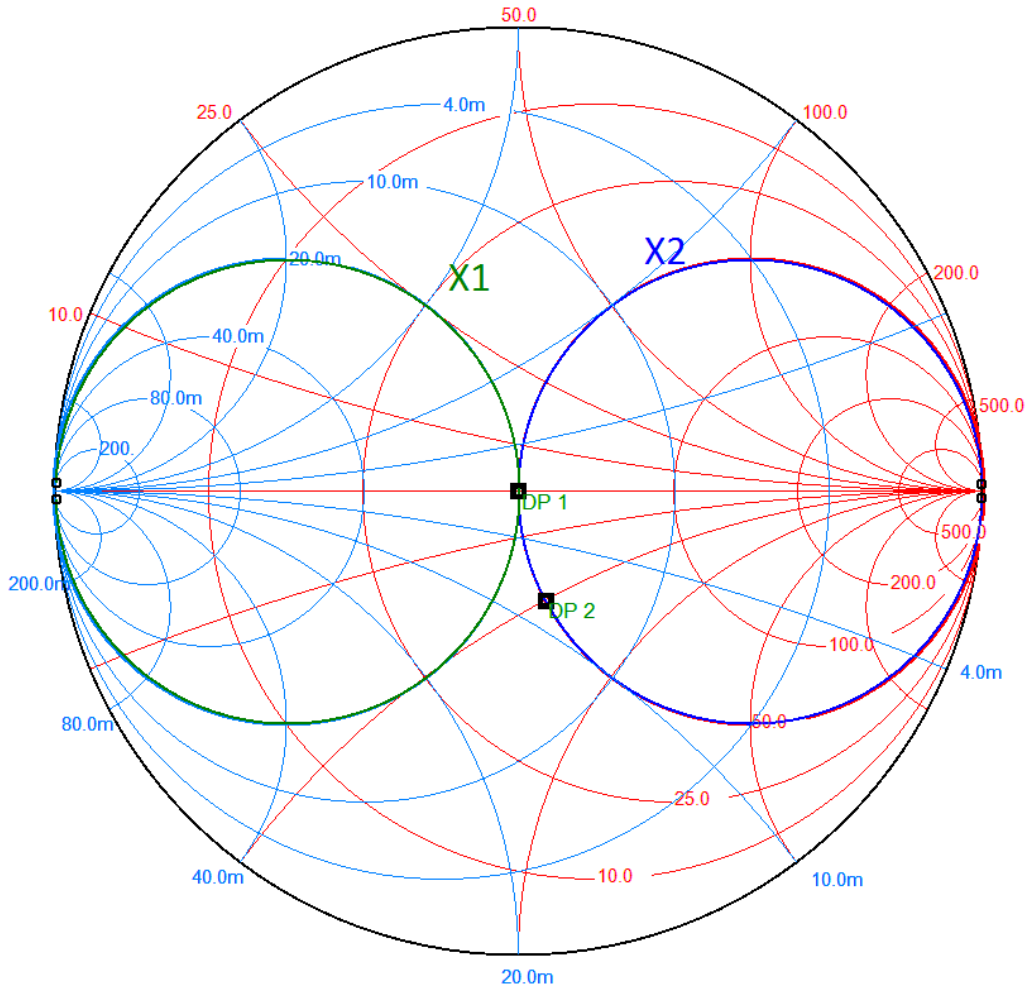


Abbildung 17: Keine Lösung mit einem Bauteil parallel zur Quelle

Sofern X_L nicht null ist, gibt es auch eine Lösung mit einem Bauteil parallel zur Last siehe Abb. 18. Die Blindwiderstände für die Elemente lassen sich mit (12) und (11) berechnen.

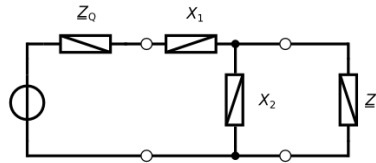


Abbildung 18: Anpassnetzwerk mit Element parallel zur Last

$$X_2 = \frac{-(X_L^2 + R_L^2)}{2X_L} \quad (13)$$

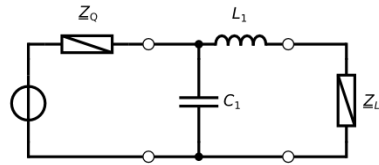
$$X_1 = -\left\{ \frac{X_L^2 X_1 + X_L X_1^2 + R_L^2 X_1}{(R_L^2 + X_L^2) + 2X_1 X_L + X_1^2} + X_Q \right\} \quad (14)$$

bereits angepasstes Netzwerk

Ein bereits angepasstes Netzwerk kein Anpassnetzwerk. Es gibt jedoch zwei Lösungen für ein Anpassnetzwerk, sofern $X_Q \neq 0$ bzw. $X_L \neq 0$ sind. Die Lösungen können mit (14), (13), (11) und (12) berechnet werden. Hier ein kurzes Beispiel:

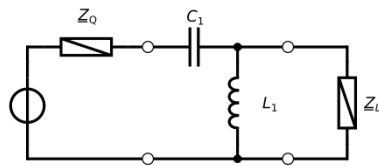
$$\underline{Z}_Q = 50 + j50$$

$$\underline{Z}_L = 50 - j50$$



$$L_1 = 159.15nH, C_1 = 31.83pF$$

Abbildung 19: Lösung mit Anpasselement parallel zur Quelle



$$L_1 = 79.58nH, C_1 = 15.92pF$$

Abbildung 20: Lösung mit Anpasselement parallel zur Last

Abb. 19 und Abb. 20 zeigen die Lösungen für ein angepasstes Netzwerk. In Abb. 21 sind diese Lösungen visualisiert. Beide Lösungen sind auf derselben Linie, die grünen Pfeile zeigen die Lösung aus Abb. 19 mit einem Kondensator parallel zur Quelle und die blauen Pfeile die Lösung aus Abb. 20 mit einer Spule parallel zur Last.

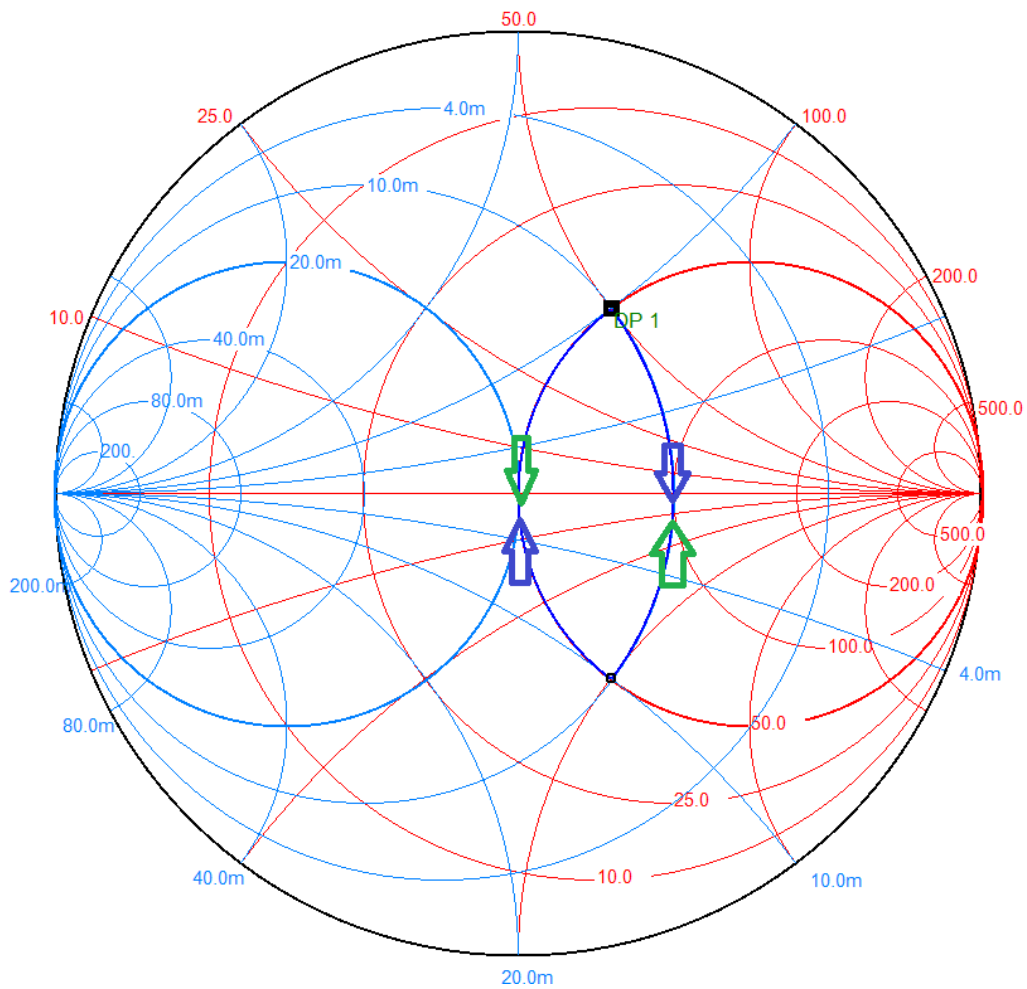


Abbildung 21: Visualisierung eines bereits angepassten Netzwerkes

1.2 Reflexionsfaktor

Der Reflexionsfaktor beschreibt, wie viel der von der Quelle abgegebenen Leistung wieder zurückreflektiert wird siehe Abb. 22. Da das Anpassnetzwerk aus Speicherelementen besteht, wird ein Teil der abgegebenen Leistung gespeichert und anschliessend zurück reflektiert. Da die Impedanzen in einem Netzwerk frequenzabhängig sind, ist dies die reflektierte Leistung ebenfalls. Der Zusammenhang zwischen Leistung und Reflexionsfaktor ist in (15) ersichtlich. In (16) ist ersichtlich, wie der Reflexionsfaktor aus Quell- und Lastimpedanz berechnet werden kann. Eine Leistungsanpassung hat zum Ziel, dass möglichst viel von P_{AV} an die Last abgegeben werden kann. Daher ist bei einem angepassten Netzwerk der Reflexionsfaktor 0.

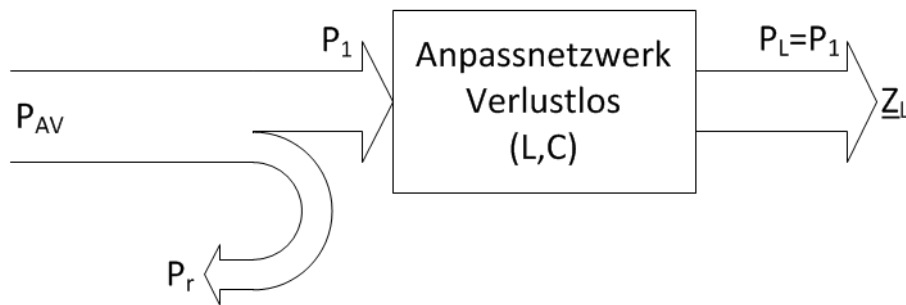


Abbildung 22: Blockschaltbild der verfügbaren Leistung

$$r^2 = \frac{P_r}{P_{AV}} \quad (15)$$

$$r = \left| \frac{\underline{Z}_Q - \underline{Z}_L^*}{\underline{Z}_Q + \underline{Z}_L} \right| \quad (16)$$

1.2.1 Standing Wave Ratio

Im nachfolgenden Abschnitt wird Standing Wave Ratio mit SWR abgekürzt. Der SWR-Wert hat die gleiche Aussagekraft, wie der Reflexionsfaktor, ist jedoch in einigen Branchen mehr verbreitet. Er unterscheidet sich vom Reflexionsfaktor vor allem in folgendem Punkt, dass eine perfekte Netzwerkanpassung bei einem SWR-Wert von 1 besteht.

ImpedancePro errechnet standardmässig den Reflexionsfaktor und wiederum dieser wird verwendet, um den SWR-Wert zu berechnen.

$$SWR = \frac{1 + r}{1 - r} \quad (17)$$