

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	1
1. Einführung in die Anpassung	1
1.1 Warum sind Anpassnetzwerke notwendig ?	2
1.2 Transformation und Kompensation.....	4
1.3 Die 4 möglichen Netzwerke bei Verwendung zweier Blindwiderstände.....	4
1.4 Die Arbeit mit grafischen Darstellungen	5
1.4.1 Anpassungsentwurf mittels kartesischer Impedanz- und Admittanzebene.....	5
1.4.2 Anpassungsentwurf mit dem Smith-Diagramm.....	7

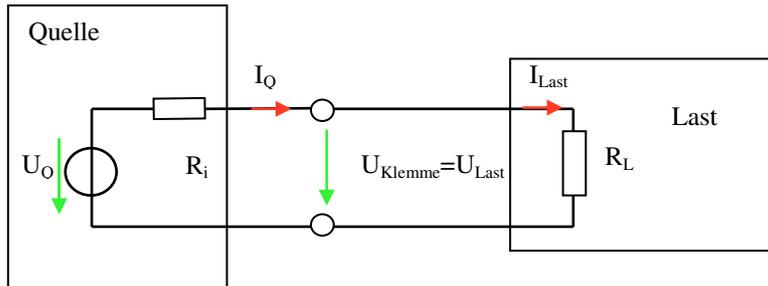
1. Einführung in die Anpassung

Ob es um wenige Picowatt am Empfängereingang eines Mobilteiles oder um mehrere kW am Ausgang einer starken Sendeendstufe geht spielt keine Rolle. In beiden Fällen muss die Wirkleistungsübertragung so optimal wie möglich gestaltet werden um das Signal im ersten Falle noch vom Rauschen trennen zu können oder um im zweiten Fall unnötige Wärmeverluste in der Endstufe zu vermeiden die deren Aufbau erheblich erschweren würden. Die beiden Beispiele sollen stellvertretend für die vielen möglichen Anpassszenarien in der Nachrichtentechnik aufgeführt sein. Ein Großteil dieser Problemstellungen kann mit recht einfach gearteten passiven Netzwerken gelöst werden.

Diese Einführung zeigt daher wie Anpassschaltungen aus einfachsten Blindelementnetzwerken aufgebaut werden können und wie ihre Dimensionierung begründet ist. Nicht zu vergessen ist auch das die alternative Anwendung von Transformatoren bei einigen 100 MHz bereits an ihre technischen Grenzen stößt, viele Verlustquellen aufweist und außerdem häufig teuer gerät. Um bei 2 oder 5GHz Betriebsfrequenz eine Anpassung zu ermöglichen bleiben daher entweder gedruckte Techniken aus Leitungsabschnitten als Alternative, die Verwendung möglichst verlustarmer Reaktanzbauelemente oder eine Kombination aus beiden. Um das Verständnis umfassend zu ermöglichen wird ein diskret aufgebautes Beispielnetzwerk zur Anpassung von 50 auf 75 Ω und die von ihm verursachten Transformationswege eingehend vorgestellt. Es werden in diesem Zusammenhang grafische Hilfsmittel vorgestellt, die beim Entwurf von Anpassungen die Arbeit erleichtern können.

1.1 Warum sind Anpassnetzwerke notwendig ?

Wenn der Innenwiderstand der Quelle sich vom Lastwiderstand stark unterscheidet, dann ist die Energieübertragung zwischen beiden sehr eingeschränkt. Das folgende Rechenbeispiel soll das aufzeigen. Als Signalquelle diene ein Funktions- oder HF-Generator mit 50 Ohm Innenwiderstand. Gesucht sei jetzt die an die Last abgebbare Wirkleistung als Funktion des Lastwiderstandes. Es werden noch keinerlei Blindanteile betrachtet. Alles ist rein reell:



Nach den Grundlagen der Elektrotechnik erhält man für die an die Last abgegebene Leistung folgenden Zusammenhang:

$$P_{AB} = f(R_L) = \frac{U_Q^2}{(R_i + R_L)^2} \cdot R_L$$

Nun sei der optimale Wert für R_L gesucht, den man für maximale Extraktion von Leistung aus der Quelle heraus benötigt. Das entspricht der Suche nach einem Maximum des obigen Funktionsverlaufes. Die Funktion wird dazu einmal abgeleitet nach R_L mit Hilfe der Quotientenregel:

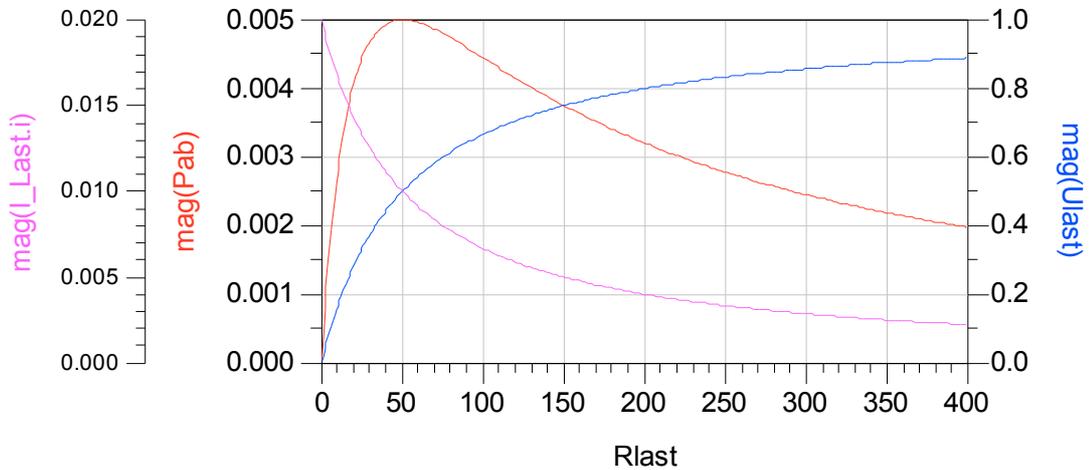
$$\frac{dP_{AB}}{dR_L} = U_Q^2 \cdot \left(\frac{(R_i + R_L)^2 - R_L \cdot 2 \cdot (R_i + R_L)}{(R_i + R_L)^4} \right) = U_Q^2 \cdot \left(\frac{R_i + R_L - 2R_L}{(R_i + R_L)^3} \right)$$

$$\frac{dP_{AB}}{dR_L} = U_Q^2 \cdot \left(\frac{R_i - R_L}{(R_i + R_L)^3} \right)$$

Zur Maximumbestimmung wird jetzt gesucht für welchen Wert von R_L das Differential gleich 0 wird. Es ist am obigen Ausdruck ersichtlich, dass das für den Fall $R_i = R_L$ erfüllt ist. Anmerkung: Das es ein Maximum ist und kein Minimum kann man erst bei nochmaligem Ableiten genau sagen. Siehe dazu auch einschlägige Literatur zur Kurvendiskussion z.B. Taschenbuch der Mathematik von Bronstein Semendjajew o.ä. .

Als Ergebnis lässt sich festhalten, dass nur wenn der Innenwiderstand der Quelle mit dem Wirkwiderstand der Last genau übereinstimmt die maximale Leistung übertragen werden kann.

Zum Ende der Betrachtung sei der simulierte funktionelle Verlauf der abgegebenen Leistung für einen R_L von 0 bis 400Ω und eine Quellspannung von $U_q = 1V$ beispielhaft dargestellt. Laststrom und Lastspannung sind zum besseren Verständnis des Vorganges zusätzlich dargestellt:



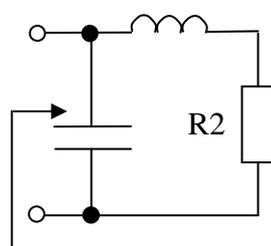
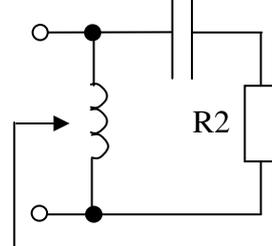
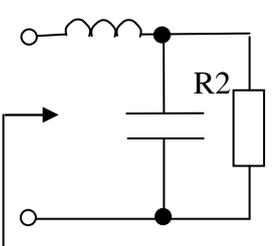
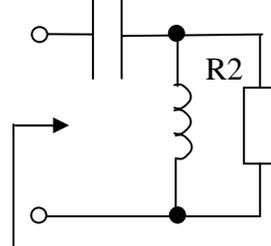
Das vorab analytisch hergeleitete Maximum der abgegebenen Leistung ist gut bei 50 Ohm zu erkennen und wird durch die Simulation bestätigt. In allen anderen Fällen geht die Leistungsübertragung am Optimum vorbei. Es kann jedoch eine Reihe von Gründen geben, warum dieser optimale Punkt nicht einjustiert werden sollte mit einem Anpassnetzwerk. Zum einen kann eine Stabilitätsbetrachtung ergeben, dass die Schaltung instabil wird oder es besteht die Forderung, dass die Schaltung mit mehreren verschiedenen Lasten ähnlich gute Ergebnisse erzielt. Zum Beispiel wenn verschiedene Antennen angeschlossen werden sollen.

1.2 Transformation und Kompensation

Der Vorgang der oft notwendigen zusätzlichen Anpassung unterteilt sich in zwei Schritte. Im ersten Schritt wird der zur Quelle nicht passende Wirkwiderstand durch eine Transformation mittels eines Blindelementes dahingehend verändert, dass er dem Wirkwiderstand der Quelle entspricht. Dabei bleibt jedoch eine meist unerwünschte Blindkomponente in der transformierten Impedanz oder Admittanz zurück. Im zweiten Schritt erfolgt jetzt eine Kompensation. Dazu wird ein Blindelement mit entgegengesetztem Vorzeichen aber betragsgleich zum unerwünschten Blindanteil hinzugeschaltet. In der Folge entsteht eine Resonanz zwischen beiden Blindanteilen. Das entstandene Netzwerk weist jetzt an der Resonanzstelle selbst ein rein reelles Verhalten auf. Mit zunehmendem Abstand zur Resonanzfrequenz verschlechtert sich jedoch das Netzwerkverhalten wieder, da wie bei jeder Resonatorstruktur die Dämpfung zunimmt wenn sich der Abstand zur Resonanzfrequenz vergrößert.

1.3 Die 4 möglichen Netzwerke bei Verwendung zweier Blindwiderstände

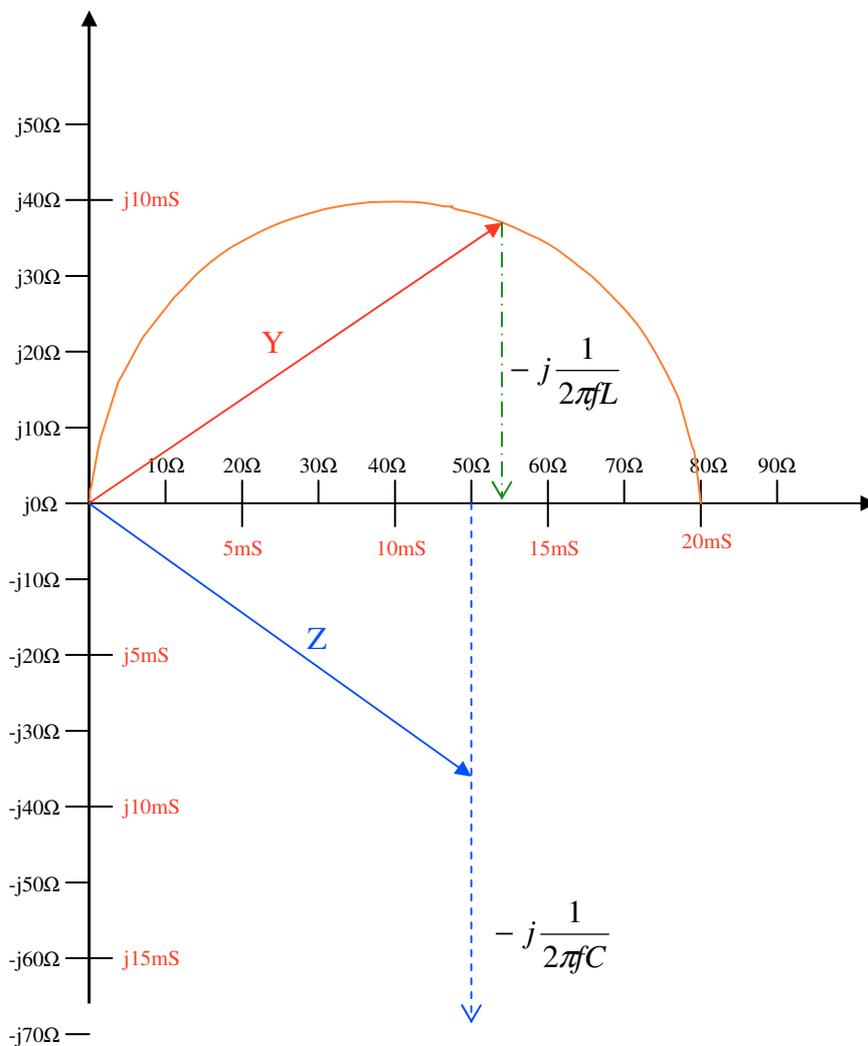
Es gibt zwei Fälle für die Beziehung zwischen Quelle und Last. Entweder der Quellinnenwiderstand R_1 ist kleiner als die Last R_2 oder es ist umgekehrt. Weiterhin gibt es zwei Möglichkeiten die Anpassung zu beginnen. Entweder die Transformation wird mit einer Spule oder mit einem Kondensator vorgenommen. Damit ergeben sich 4 mögliche Netzwerke. Mit allen Varianten ist es möglich einen rein reellen Widerstand für eine bestimmte Betriebsfrequenz in einen anderen rein reellen Wert zu transformieren:

$R_1 > R_2$ Variante 1	$R_1 > R_2$ Variante 2	$R_1 < R_2$ Variante 1	$R_1 < R_2$ Variante 2
			
<p>Anmerkung: Die Klemmenimpedanz und damit auch ihr Wirkanteil R_1 kann sich nur vergrößern, wenn das transformierende Blindelement in Reihe zu R_2 geschaltet wird. Das Blindelement welches parallel zu den Klemmen geschaltet ist kompensiert den unerwünschten Restblindanteil aus.</p>		<p>Anmerkung: Die Klemmenimpedanz und damit auch ihr Wirkanteil R_1 kann sich nur verringern, wenn das transformierende Blindelement parallel zu R_2 geschaltet wird. Der unerwünschte Restblindanteil wird anschließend durch ein in Reihe geschaltetes Blindelement auskompensiert.</p>	

1.4 Die Arbeit mit grafischen Darstellungen

1.4.1 Anpassungsentwurf mittels kartesischer Impedanz- und Admittanzebene

Ein mögliches Hilfsmittel ist es, wenn ein kartesisches Impedanzgitter und ein kartesisches Admittanzgitter übereinandergelegt dargestellt werden. Also eine gaußsche Zahlenebene für die Impedanz und eine darüberliegende für die Admittanz. Die vermittelnde Größe ist dann der Phasenwinkel der komplexen Zahlen. Zum Beispiel soll für die Frequenz von 550MHz ein Anpassnetzwerk für den Fall $R_1 > R_2$ Variante 2 entworfen werden. R_1 sei 75 Ohm und R_2 sei 50 Ohm. Da der Kondensator in Reihe zu R_2 liegt beginnt die Betrachtung in der Impedanzebene. Würde der Wert des Kondensators von 0pF bis hin zu großen Werten nahe unendlich allmählich vergrößert, dann würde die Spitze des zugehörigen Impedanzzeigers der Reihenschaltung aus R_2 und dem Kondensator während dieses Vorganges eine Gerade zeichnen. Da $f=550\text{MHz}$ konstant geblieben ist, handelt es sich nicht um eine Ortskurve sondern um einen Transformationswegverlauf (blau gestrichelt im folgenden Diagramm):



Wie gelangt man jetzt zu der Erkenntnis, wie weit der Transformationsweg genau gehen muss um den neuen gewünschten Wirkanteil von 75 Ohm zu erlangen? Dazu hilft dessen inverser Verlauf in der Admittanzebene.

Die Gesetzmäßigkeiten sind analog zu denen bei Ortskurven, da es für die Variation des Blindanteiles mathematisch gleichgültig ist ob dies über Frequenzänderung oder über eine Kapazitätsänderung verursacht wurde. Der inverse Verlauf zu einer Geraden in allgemeiner Lage (also nicht durch den Nullpunkt) bleibt daher ein Kreis durch den Nullpunkt (rot durchgängig dargestellt).

Ziel ist es einen Wirkanteil von 75Ω an den Klemmen zu erlangen. Eins durch 75Ω ergibt $13,33\text{mS}$.

Mit dem Wissen, dass $\varphi_Z = -\varphi_Y$ ist, können beide Zeiger konstruiert werden. Man setzt die Arbeit dazu in der Leitwertebene fort. Bei $13,33\text{mS}$ Realteil zieht man eine Gerade senkrecht hoch zum Kreis. Der Schnittpunkt ist die Spitze des gewünschten Y-Zeigers für die Reihenschaltung R2 und C. Durch dessen Spiegelung an der X-Achse erhält man den Winkel für den zugehörigen Z-Zeiger. Wo die Verlängerung auf den blaugestrichelten Transformationsweg trifft, da befindet sich der Punkt, dessen Blindanteil durch den Kondensator aufgebracht werden muss. Es sind $-j36\text{Ohm}$ Blindanteil notwendig. Für 550MHz ergeben sich damit rund 8pF . Der positive Blindanteil in der Leitwertebene ist aber noch vorhanden und muss mit einem negativen Blindleitwert kompensiert werden. $+j9,5\text{mS}$ müssen mit $-j9,5\text{mS}$, was der Parallelschaltung einer Spule entspricht kompensiert werden. Für 550MHz sind dazu $30,5\text{nH}$ notwendig. Dieser Kompensationsweg in der Leitwertebene ist wiederum eine Gerade. (grün und gestrichelt dargestellt).

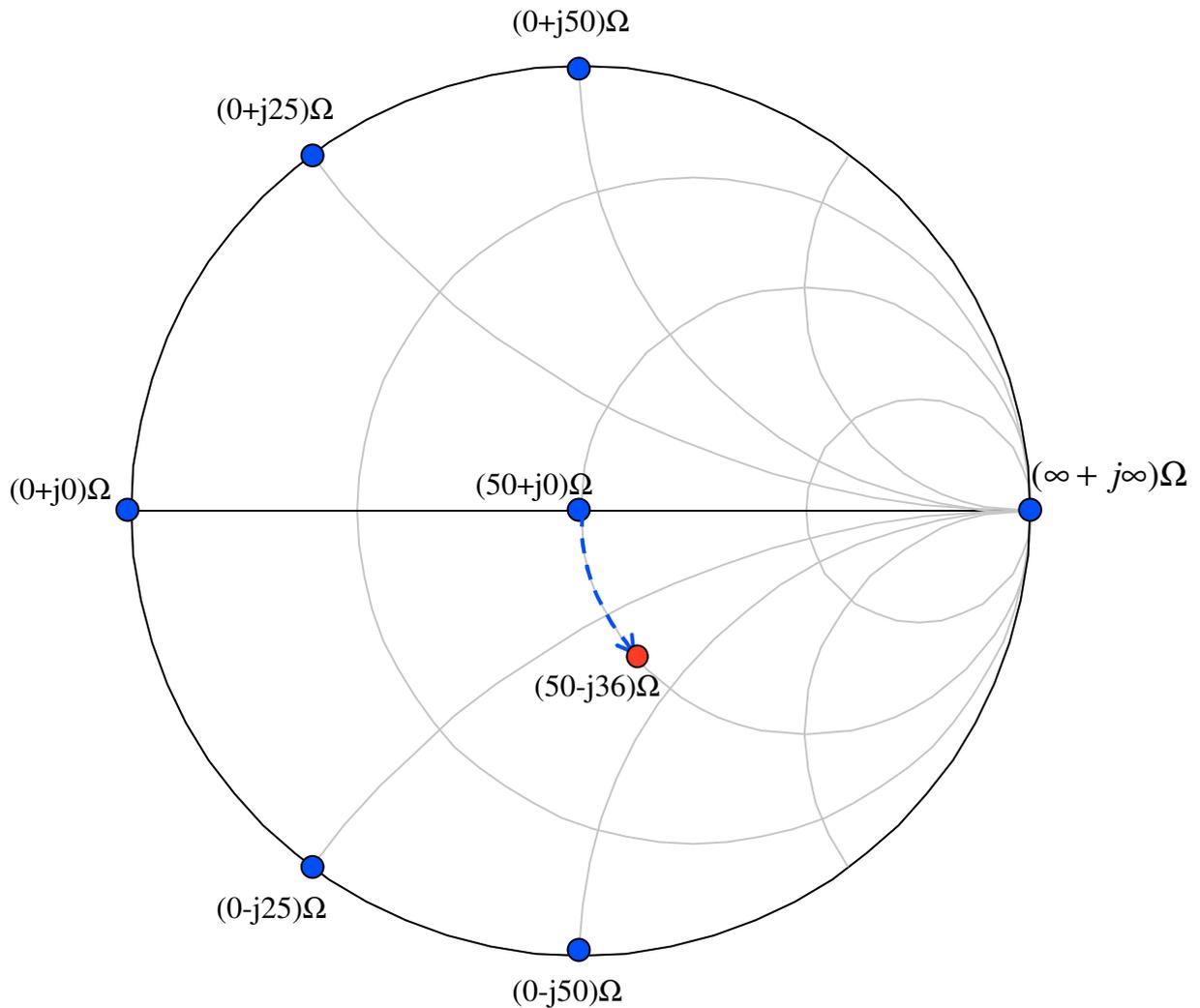
Die Variante 1 mit $R1 > R2$ lässt sich ähnlich aufzeigen. Hier vertauschen sich im Gegensatz zur Variante 2 mit $R1 > R2$ die Vorzeichen der beiden Blindanteile. Der Z-Zeiger würde nach oben den Transformationsweg schreiben und der inverse Y-Verlauf wäre ein Halbkreis im unteren Teil mit negativem Blindleitwert. Es ist die genau gespiegelte Zeichnung zur Variante 2.

Die anderen beiden Fälle mit $R1 < R2$ hingegen beginnen mit Geraden als Transformationswegen in der Leitwertebene deren zugehörige inverse Verläufe dann Halbkreise in der Z-Ebene sind.

Zusammenfassend kann man festhalten: Muss der Widerstand vergrößert werden, dann beginnt es mit einem Reihenelement, muss er verkleinert werden, dann beginnt es mit einem Parallelelement. Durch die Art des ersten Elementes entscheidet man weiterhin darüber, ob das Anpassnetzwerk eine Tiefpassstruktur oder eine Hochpassstruktur darstellt.

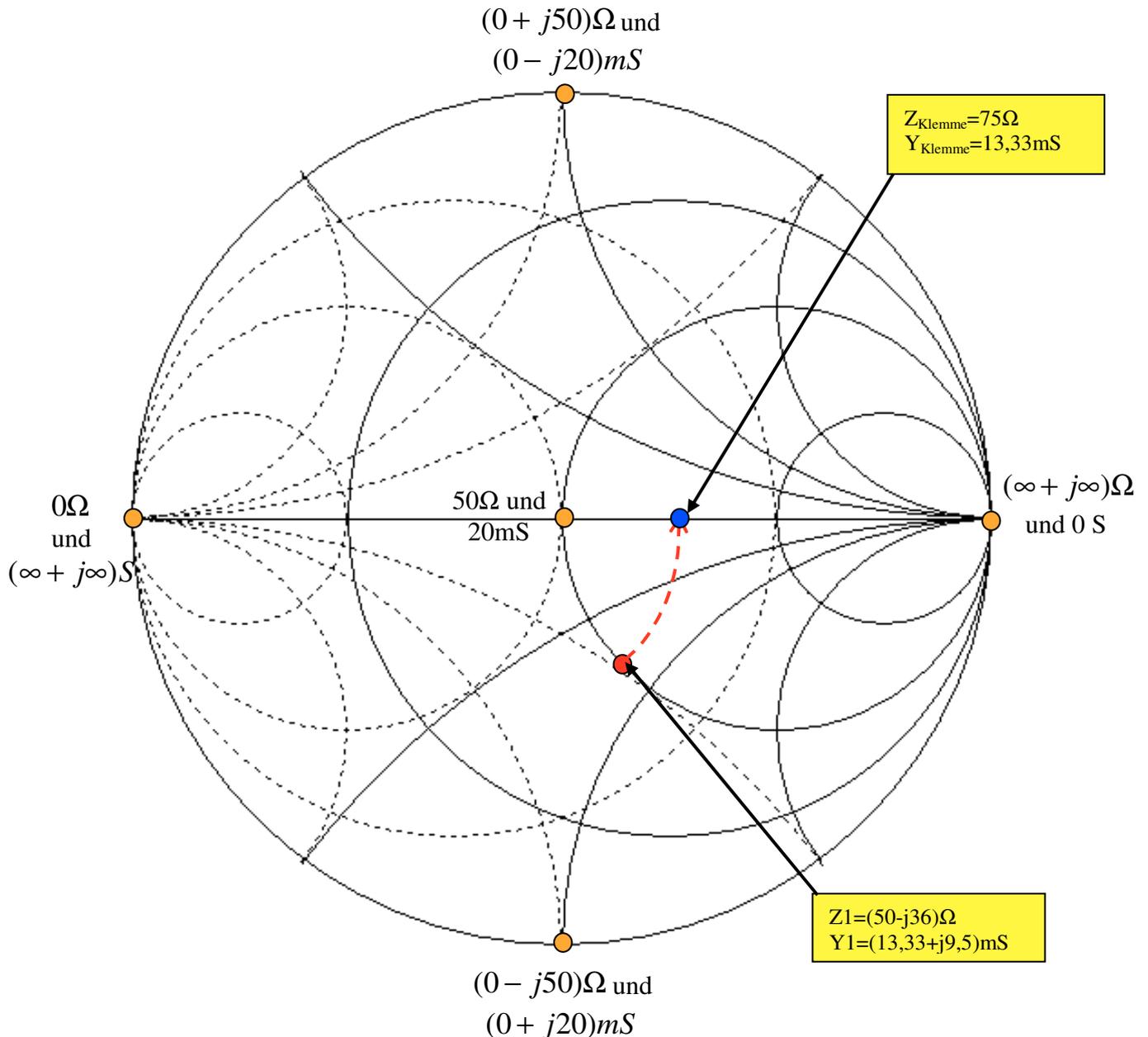
1.4.2 Anpassungsentwurf mit dem Smith-Diagramm

Das gleiche Beispiel wird jetzt im Smithdiagramm dargestellt. Das Smithdiagramm ist eine Überlagerung zweier Diagrammebenen. Diese Auslegung kann richtig angewandt viele Vorteile beim Schaltungsentwurf einbringen. Auf die komplexe auf einen Kreis mit dem Radius 1 beschränkte Ebene des Reflexionsfaktors wird der unendlich große positive Halbraum der kartesischen Impedanzebene konform abgebildet. Zur besseren Orientierung sind mehrere markante Punkte der ehemaligen unverzerrten Impedanzebene mit zugehörigem Real- und Imaginärteil blau miteingezeichnet. Das Ergebnis sieht folgendermaßen aus:



Der Transformationsweg verursacht durch die in 1.4.1 beschriebene Kondensatorvariation verläuft nun auf einem Kreisbogen. Überall auf diesem Kreisbogen ist der Realteil konstant und in unserem Beispiel gleich 50 Ω . Der rote Punkt zeigt auf die transformierte Impedanz als Zwischenergebnis.

In der folgenden Darstellung ist zusätzlich die konforme Abbildung des Leitwertgitters abgebildet: Die graue durchgezogene Darstellung zeigt das Impedanzgitter und die grau gestrichelte Darstellung das Leitwertgitter. Zur besseren Orientierung sind wieder 5 markante Punkte mit ihren Werten hervorgehoben:



Die um 180° gedrehte Ausrichtung des Leitwertgitters entsteht durch den inversen Zusammenhang von Y und Z :

$$Y = \frac{1}{Z}$$

An der Stelle $Z=0\Omega$ ist daher der Leitwert Y unendlich und umgekehrt. An der Stelle $Z=-j50\Omega$ ist der Leitwert $Y=+j20\text{mS}$ da gilt $1/j=-j$ usw. Jedem Punkt im Leitwertgitter ist eindeutig ein Punkt im Impedanzgitter zugeordnet. Wichtig ist zu beachten, dass das Leitwertgitter quasi überkopf dargestellt ist. Also alle negativen Imaginärteile sind in der oberen Hemisphäre des Kreises abgebildet und alle positiven Imaginärteile in der unteren.

Um jetzt das Anpassungsbeispiel im Smithdiagramm abschließend nachzuvollziehen wird jetzt im gestrichelten Leitwertgitter fortgefahren. Der Wirkanteil von $Y1$ ist schon richtig einjustiert durch die Transformation mittels Kondensator. Der Kompensationsweg durch die hinzugeschaltete Parallelinduktivität mit $-j9,5\text{mS}$ Leitwert ist wieder rot gestrichelt dargestellt. Im Ergebnis weist die Schaltung an den Eingangsklemmen $13,33\text{mS}$ Wirkleitwert ohne zusätzlichen Blindanteil auf. Im Impedanzgitter entspricht dies genau 75Ω . Damit ist das Ziel des Netzwerkes erreicht von 50Ω auf 75Ω mit nur zwei Blindelementen anzupassen.