

## 5/10: HF-Technik – keine Hexerei

# Impedanzanpassungen

Impedanzanpassungen gehören zu den wichtigsten Schaltungen in der HF-Technik. Sie werden überall dort gebraucht, wo der Leistungsfluss von einer Komponente zur nächsten optimiert werden soll. Im fünften Teil unserer Serie geht es um den Entwurf solcher Anpassschaltungen. Dieser Entwurf geschieht sehr oft mit Hilfe des Smith-Diagramms, das im dritten Teil eingehend behandelt wurde.

Es ist allgemein bekannt, dass für eine maximale Leistung im Verbraucher der Verbraucherwiderstand so zu wählen ist, dass er dem Innenwiderstand der Quelle entspricht. Man spricht dabei von Leistungsanpassung. Dies kann sehr einfach mit einer Differenziation der Leistung bezüglich des Lastwiderstandes hergeleitet werden. Bild 1 zeigt die normierte Leistung in Funktion des Quotienten aus Last- und Quellenwiderstand. Die Ableitung der Leistung bezüglich des Lastwiderstandes geht auf Null, wenn die Last dem Quellenwiderstand entspricht. Die Leistung ist dann maximal.

Dieses Verhalten kann auch intuitiv verstanden werden. Für kleinste Lastwiderstände ist der Strom zwar gross, die Spannung aber praktisch Null. Die Last nimmt nicht viel Leistung auf. Bei sehr grossen Lastwiderständen entsteht zwar praktisch die volle Quellenspannung an der Last, aber es resultieren nur sehr kleine Ströme. Die Leistung in der Last ist wiederum fast Null. Dazwischen liegt das Optimum, nämlich da, wo das Produkt von Spannung und Strom am grössten ist.

### Jetzt wirds komplex

Man kann den vorher beschriebenen Sachverhalt auf AC-Schaltungen und damit auch auf HF-Schaltungen erweitern. Anstelle von reellwertigen Widerständen geht es jetzt um komplexwertige Impedanzen. Die Regel lautet nun:

**Die Leistung in einer Last ist maximal, wenn die Lastimpedanz konjugiert komplex zur Quellenimpedanz ist.**

Anhand von Bild 2 ist dies leicht nachvollziehbar: Die Blindwiderstände der Quelle und der Last heben sich gerade auf, sodass wiederum nur die reellen Widerstände zu betrachten sind, deren Fall oben dargelegt ist.

Leider ist die Last in den meisten Fällen nicht frei wählbar. Sie ist z. B. gegeben durch die Eingangsimpedanz eines Verstärkers, der an eine 50-Ω-Quelle angeschlossen werden soll. Falls diese Impedanz nun von diesen 50 Ω abweicht, muss eine Impedanzanpassung vorgenommen werden.

### Anpassung tut Not

Es gibt verschiedene Gründe für die Notwendigkeit einer Impedanzanpassung. Der wichtigste

Grund wurde bereits erwähnt: eine maximale Leistung in der Last. Bei Senderstufen mit hohen Leistungen ist jedoch nicht nur eine maximale Leistungsabgabe erwünscht. Es besteht die Gefahr, dass ein bei Fehlanpassung reflektiertes Signal die Endstufe überhitzt und schlimmstenfalls zerstört. Falls genaue Laufzeiten durch Phasenmessungen ermittelt werden (z. B. bei hochpräzisen Ortungssystemen), sind Reflexionen und damit Fehlanpassungen ebenfalls nicht zulässig.

Eine Impedanzanpassung wird in den meisten Fällen durch eine passive, möglichst verlustlose Schaltung von Induktivitäten und Kapazitäten durchgeführt. Grundsätzlich kann eine Impedanzanpassung unter ausschliesslicher Verwendung von Widerständen erzielt werden. In der Regel verliert man aber mehr Leistung in den zusätzlichen Widerständen im Anpassnetzwerk als durch die ursprüngliche Fehlanpassung.

Die weitaus häufigste Schaltungstopologie ist ein L-Netzwerk, bestehend aus zwei Impedanzen (2 Spulen, 2 Kapazitäten oder je eine Spule und



Prof. Dr. Heinz Mathis  
Dozent für  
Mobilkommunikation  
HSR Hochschule für Technik  
Oberseestrasse 10  
8640 Rapperswil  
Tel. 055 222 45 95  
Fax 055 222 44 00  
heinz.mathis@hsr.ch  
<http://mk.hsr.ch>

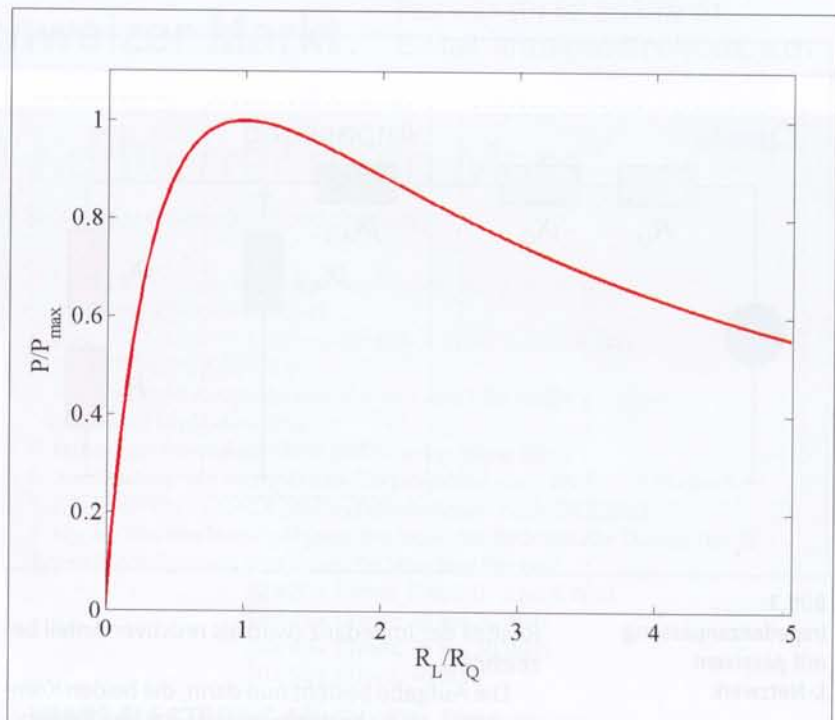
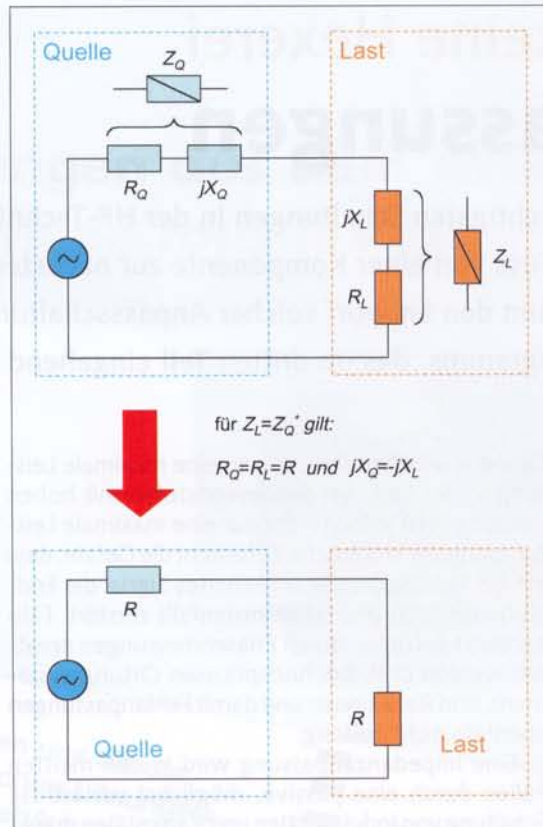


Bild 1: Das Leistungsmaximum wird erreicht, wenn der Last- dem Quellenwiderstand entspricht



**Bild 2:** Die Leistung in einer Last ist maximal, wenn die Lastimpedanz konjugiert komplex zur Quellenimpedanz ist

eine Kapazität). Diese beiden Impedanzen sind in Bild 3 mit  $jX_{A,1}$  und  $jX_{A,2}$  bezeichnet. Die Ausrichtung der L-Topologie richtet sich nach den anzupassenden Impedanzen. Das Parallelelement (hier  $jX_{A,2}$ ) liegt dabei auf der Seite mit dem höheren

Quellenimpedanz «ausieht». Umgekehrt betrachtet, sieht die Quelle mit dem angehängten Impedanznetzwerk aus wie die konjugiert komplexe Lastimpedanz. Anstelle der Impedanzen können auch die entsprechenden Reflexionsfaktoren betrachtet werden. Dieser Zusammenhang wurde im dritten Teil der Artikelserie bereits erläutert. Diese Berechnung kann natürlich durch Lösen eines kleinen Gleichungssystems geschehen oder mit Hilfe von speziellen Computertools. Eine weitere Möglichkeit ist die Verwendung des Smith-Diagramms.

**Ein numerisches Beispiel**

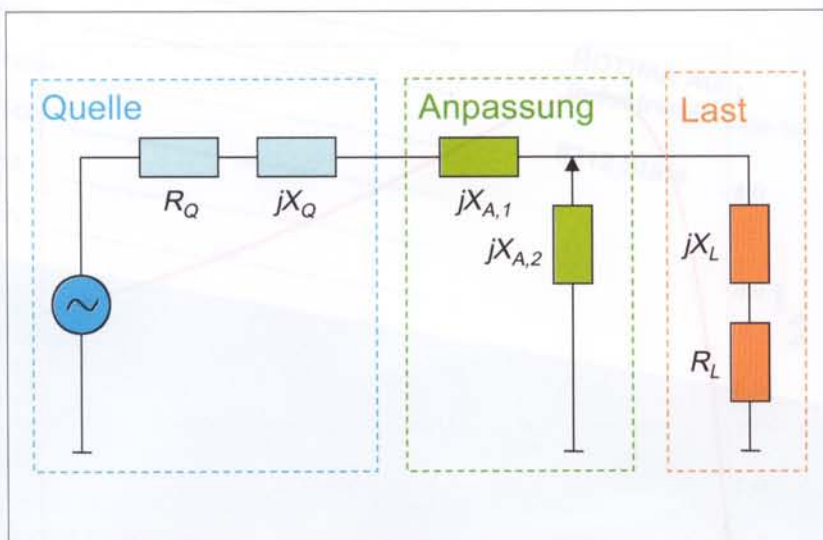
Im Folgenden soll eine Impedanzanpassung bei einer Frequenz von 1 GHz vorgenommen werden. Ausgangslage ist eine Quelle mit der Impedanz  $(25 - j10) \Omega$ . Dies bedeutet, dass der resistive Anteil der Quellenimpedanz  $25 \Omega$  beträgt. Der reaktive Anteil ist  $-10 \Omega$ , was bedeutet, dass für die betrachtete Frequenz das invertierte Produkt aus Kreisfrequenz und Kapazität  $1/\omega C = 10 \Omega$  beträgt. Die anzupassende Last sei mit einer Impedanz von  $(100 + j50) \Omega$  ausgestattet. Das positive Vorzeichen deutet auf eine induktive Last hin, also gilt hier  $\omega L = 50 \Omega$ . Zeichnen wir beide Impedanzen in das Smith-Diagramm ein (Bild 4), so können wir eine LC-Schaltung entwerfen, die die gesuchte Impedanztransformation durchführt.

Eine Induktivität parallel zur Last bewirkt schon mal das richtige resistive Niveau. Anschliessend muss nur noch der Imaginärteil der Impedanz korrigiert werden, was mit dem Serie-C passiert. Alle Elementwerte sind in Bild 4 gegeben, zusammen mit dem Anpassungspfad im Smith-Diagramm. In einem feiner aufgelösten Smith-Diagramm können die Werte der Anpasseelemente leicht ermittelt werden. Es ist noch anzumerken, dass diese Anpassung genau nur für 1 GHz gilt und relativ schmalbandig ist. Soll die Anpassungsgüte über einen grösseren Frequenzbereich aufrechterhalten werden, sind mehrstufige Anpassschaltungen nötig.

**Beidseitige Anpassung eines Zweitores**

Bei den obigen Betrachtungen wurde jeweils nur eine Seite jedes HF-Elements angepasst. Schwieriger wird es, wenn ein Zweitor eingangs- und ausgangsseitig angepasst werden soll. Hier muss beispielsweise ein Verstärker am Eingang auf die vorausgehende Quelle und am Ausgang auf die nachfolgende Last angepasst werden. Für die eingangsseitige Anpassung muss der Reflexionsfaktor des Eingangs bekannt sein. Dieser aber hängt von der Ausgangslast bzw. deren Anpassung ab, weil der Rückwirkungskoeffizient  $s_{12}$  in der Regel nicht Null ist. In ähnlicher Weise kann die Ausgangsanpassung nur vorgenommen werden, wenn die Eingangsanpassung bekannt ist. Diese gegenseitige Abhängigkeit macht es notwendig, beide Anpassschaltungen gleichzeitig zu entwerfen.

Um die Anpassung berechnen zu können, muss der Zusammenhang zwischen dem Eingangsreflexionsfaktor  $r_{in}$  eines Zweitores (gegeben durch seine S-Parameter) und dem Lastreflexionsfaktor  $r_L = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}$  bekannt sein.  $Z_0$  ist dabei das Sys-



**Bild 3:** Impedanzanpassung mit passivem L-Netzwerk

Realteil der Impedanz (wird als resistiver Anteil bezeichnet).

Die Aufgabe besteht nun darin, die beiden Komponenten so zu bestimmen, dass bei der Betriebsfrequenz der Eingang des Impedanznetzwerks mit der angehängten Last wie die konjugiert komplexe

temimpedanzniveau der Betrachtung, also in der Regel  $50 \Omega$ . Der Eingangsreflexionsfaktor kann mit der Regel von Mason aus einem Signalflussdiagramm ermittelt werden und beträgt

$$r_{\text{in}} = s_{11} + \frac{s_{12}s_{21}r_L}{1 - s_{22}r_L} \quad (\text{Gl. 1})$$

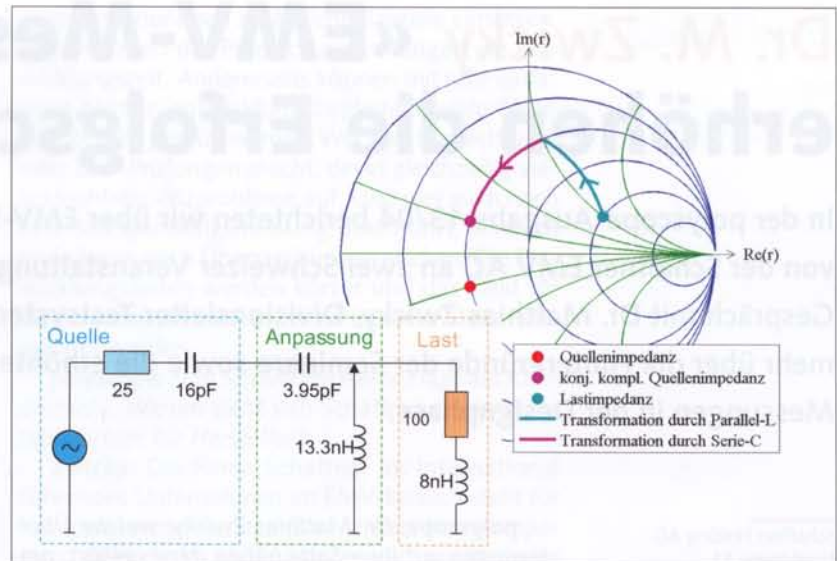
Aus Symmetriegründen gilt andererseits

$$r_{\text{out}} = s_{22} + \frac{s_{12}s_{21}r_Q}{1 - s_{11}r_Q} \quad (\text{Gl. 2})$$

Nun sollen Anpassnetzwerke die Quellen und Lasten so anpassen, dass  $r_Q = r_{\text{in}}^*$  bzw.  $r_L = r_{\text{out}}^*$  wird. Diese Zusatzinformation liefert mit Gl. 1 und Gl. 2 ein – leider nichtlineares – Gleichungssystem mit zwei Gleichungen für die gewünschte Quellen- und Lastimpedanz. Die gewünschten Impedanzen werden anschliessend mit Anpassnetzwerken wie oben beschrieben erreicht. Übrigens: die Verhältnisse sind massiv einfacher, wenn der Rückwirkungsfaktor  $s_{12}$ , d.h. die Rückwirkung eines Verstärkers vom Ausgang zum Eingang, Null ist. Dann nämlich ist  $r_{\text{in}} = s_{11}$  bzw.  $r_{\text{out}} = s_{22}$ , d.h. die Gleichungen sind nun entkoppelt, und die beiden Anpassnetzwerke können unabhängig voneinander entworfen werden.

#### Fazit

Maximale Leistungsübertragung erfordert Impedanzanpassung. Falls die Impedanzanpassung nicht durch die HF-Stufen selbst gegeben ist, kann



**Bild 4:**  
Impedanzanpassung  
am Smith-Diagramm  
(Systemimpedanz-  
niveau =  $50 \Omega$ )

sie mittels Zwischenschaltungen erzielt werden. Auf diese Weise wird die maximale Leistung weitergegeben. Bei einer einzelnen Frequenz kann die Anpassung immer mit Hilfe von zwei einfachen reaktiven Elementen (also L und/oder C) durchgeführt werden. Die Komponentengrößen können mit speziellen Tools oder mit dem Smith-Diagramm bestimmt werden. Schwieriger wird eine gleichzeitige Eingangs- und Ausgangsanpassung für ein allgemeines Zweitor. Die Anpassnetzwerke müssen in diesem Fall gleichzeitig entworfen werden.