

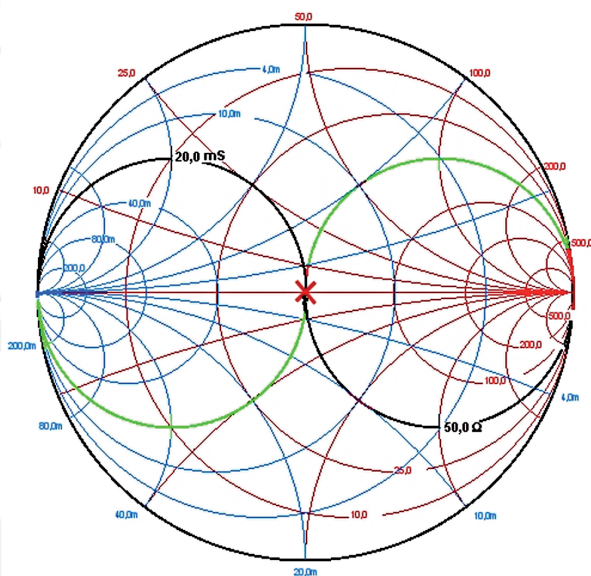
## Antennen-Analyzer + Smith-Diagramm =

# Antennentoptimierung mit System

Den Autor erreichen Sie unter:  
 Max Perner, DM2AU0  
 Franz-Jacob-Str. 12  
 10369 Berlin  
 dm2au0@alice.de

**Max Perner, DM2AU0**

**Antennen kann man durch Probieren („Trial & Error“) optimieren, aber zielführender ist es, zu messen, das Messergebnis auszuwerten und dann dementsprechend die Antenne zu verändern.**



**Bild 2:**  
 Das Smith-Diagramm mit den Kreisen für Impedanz und Admittanz

Ein Antennen-Analyzer liefert aussagekräftige Daten. Mit etwas Geschick und Überlegung kann man auch ohne tiefgehende mathematische Kenntnisse diese auswerten und die Antenne optimal gestalten.

### Die Antennenimpedanz

Der Anschlusswiderstand einer KW-Antenne ist in der Regel komplex, hat also einen ohmschen und einen induktiven oder kapazitiven Anteil. Man kann sich diese beiden Komponenten als in Reihe oder parallel liegend vorstellen. Dabei ergeben sich natürlich verschiedene Werte, aber der Gesamtwiderstand und die Phasenverschiebung auf der Arbeitsfrequenz sind gleich. Vorwiegend trifft man auf die Reihenschaltung (Bild 1). Das hat einen guten Grund: Sie lässt sich einfacher berechnen, da es nur einen Strom gibt. Statt komplexer Widerstand sagt man auch Impedanz. Ihre Anpassung an 50 Ω gelingt in zwei Schritten.

**Bild 3:**  
 Eine Orientierungshilfe für den Start der Transformation für die π- und die T-Konfiguration

### Schritt 1: kompensieren

Der erste Schritt bei der Anpassung der Antennenimpedanz an den Senderausgang ist eine Kompensation. Das Anpassgerät bringt dabei eine Reihenskapazität C ein, die betragsgleich mit  $X_L$  ist oder eine Reiheninduktivität L, die betragsgleich mit  $X_C$  ist. Mathematisch sieht das so aus:

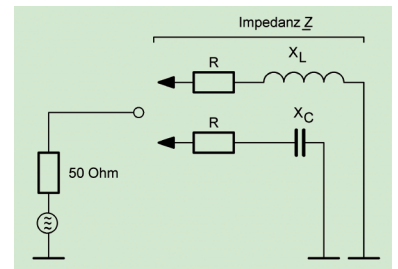
$$C = -X_L / Z_0$$

$$L = -X_C / Z_0$$

Das Ergebnis: Der Sender sieht nur noch R, also einen reinen ohmschen Widerstand.

### Schritt 2: Transformation

Ein Antennenanpassgerät ist auch ein Übertrager (Transformator). Durch Einstellung des richtigen Transformationsverhältnisses sorgt man dafür, dass der Sender 50 Ω sieht, wenn er quasi ins Anpassgerät mit nachfolgender Antenne hineinsieht. Es spielt dabei keine Rolle, ob das Anpassgerät direkt an der Antenne oder im Shack direkt am Sender



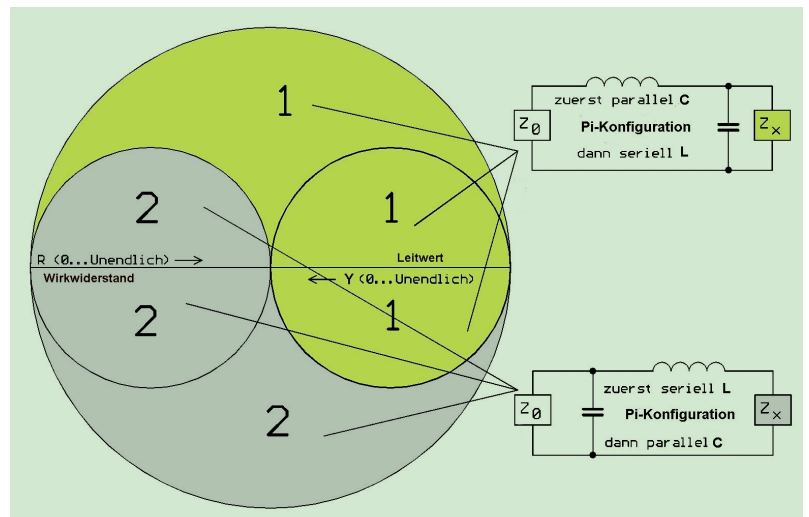
**Bild 1:** Die Antenne als Reihenschaltung von Wirk- und Blindwiderstand

sitzt. Der Unterschied ist nur folgender: Befindet sich das Anpassgerät direkt an der Antenne, so sieht es stets die Antennenimpedanz. Liegt die Antennenleitung jedoch zwischen Anpassgerät und Antenne, so sieht es die durch die Leitung transformierte Antennenimpedanz. Diese lässt sich vom Anpassgerät genauso gut kompensieren und transformieren wie die Impedanz direkt an der Antenne.

In beiden Fällen erfolgt immer eine Anpassung der Antenne an 50 Ω, denn eine 50-Ω-Leitung an einem 50-Ω-Sender bietet an ihrem Ende ebenfalls 50 Ω Innenwiderstand wie der Sender selbst.

### Bestimmung der Anpasskomponenten

Früher musste man die Berechnung manuell vornehmen oder bemalte das so genannte Smith-Diagramm und musste trotzdem noch rechnen.



Heutzutage erledigen die Berechnungen geeignete Computerprogramme, und das Smith-Diagramm ist als Computerbild verwendbar. Ich nutze das Smith-Diagramm V3.10 von www.fritz.dellsperger.net in der Vollvariante. Das Demo-Programm ist kostenfrei downloadbar. Seine Einschränkungen können für den Hausgebrauch hingenommen werden. Es sind fünf Datenpunkte und fünf Elemente nutzbar, und das Projekt kann nicht gespeichert werden. Sowohl mit den reinen Rechenprogrammen als auch im Smith-Diagramm erhält man nach Eingabe der Impedanz und der Frequenz die Anpasselemente in Komponente, Wert und Position. Leichter und schneller geht es wirklich nicht!

## Das Smith-Diagramm

Das Smith-Diagramm ist eine Ansammlung von Kreisen und einer einzigen Geraden. **Bild 2** zeigt das von mir verwendete Programm.

Die einzige Gerade ist die X-Achse, die für den Wirkwiderstand links mit dem Wert  $0 \Omega$  beginnt; sie endet rechts im Unendlichen. Bedingt durch die Unlinearität, legt man den Referenzwert für den Wirkwiderstand in die Achsmitte, hier mit einem dicken X gekennzeichnet. Das sind unsere zu erreichenden  $50 \Omega$ . Rechts unten befindet sich ein Halbkreis, der die Impedanz  $50 \Omega + jX$  markiert, links oben ein Halbkreis, der die Admittanz  $20 \text{ mS} + jB$  kennzeichnet. Das  $j$  hat lediglich eine Hinweisfunktion, es weist auf einen Blindwiderstand hin. Hinter der Admittanz stecken lediglich Kehrwerte der Widerstände:

**Tabelle**

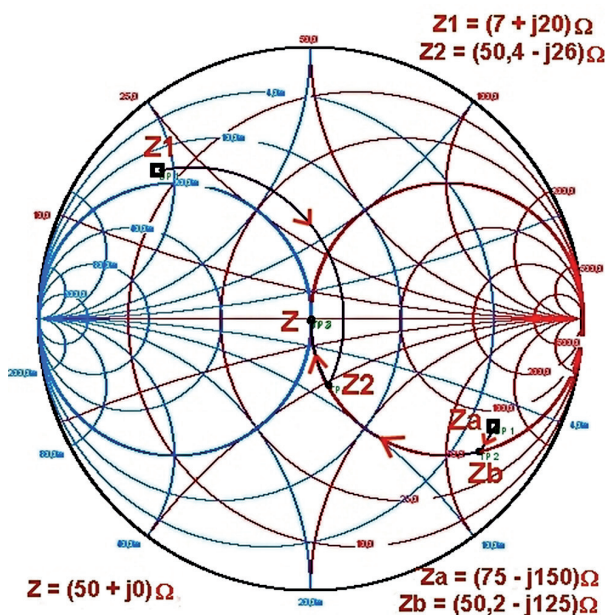
f [MHz]	$Z_{\text{ant}} [\Omega]$	C1 [pF]	$L_s [\mu\text{H}]$	C2 [pF]	$C_e [\text{pF}]$	$L_p [\mu\text{H}]$
1,800	(29,7 - j572,7)	1500	52,8	0	118	28,8
1,825	(47,9 - j583,4)	350	51,7	0	145	26,0
1,850	(48,6 - j550,3)	0	47,3	0	158	24,6
1,875	(47,6 - j560,3)	349	48,6	0	165	23,0
1,900	(23,5 - j558,9)	1800	48,9	0	106	27,4
3,5	(39,0 - j91,7)	477	5,1	0	446	2,7
3,8	(46,0 - j29,5)	230	1,8	0	1600	2,3
7,0	(1331,5 + j992,1)	0	7,2	78	74	8,1
7,2	(1608,6 + j871,0)	0	7,2	72	67	8,2
10,1	(125,3 - j333,5)	0	3,5	26	73	2,2
10,2	(126,1 - j314,6)	0	3,3	27	75	2,1
14,0	(541,5 + j637,7)	0	2,8	55	47	3,8
14,3	(844,6 + j662,9)	0	2,8	48	44	3,5
18,1	(192,2 - j360,9)	0	1,8	22	44	1,3
18,2	(180,9 - j330,6)	0	1,6	24	46	1,2
21,0	(789,6 - j292,1)	0	1,5	32	37	1,5
21,4	(854,6 - j525,6)	0	1,7	27	32	1,6
24,9	(221,3 - j563,4)	0	1,8	12	23	1,3
25,0	(135,8 - j639,1)	0	2,4	7	19	1,5
28,0	(67,3 - j349,3)	0	1,7	3	19	0,95
28,5	(95,8 - j328,4)	0	1,4	6	23	0,83
29,0	(88,4 - j309,5)	0	1,3	6	24	0,76
25,0*	(135,8 - j639,1)	148	1,8	0		
29,0*	(88,4 - j309,5)	108	1,1	0		
7,0**	(1331,5 + j992,1)	550	5,25	100		
7,2***	(1608,6 + j871,0)	ohne	8,25	50		

**Tabelle 1:** Die Antennenimpedanzen und die Anpasselemente einer Vertikalantenne im Bereich 1,8 bis 29 MHz

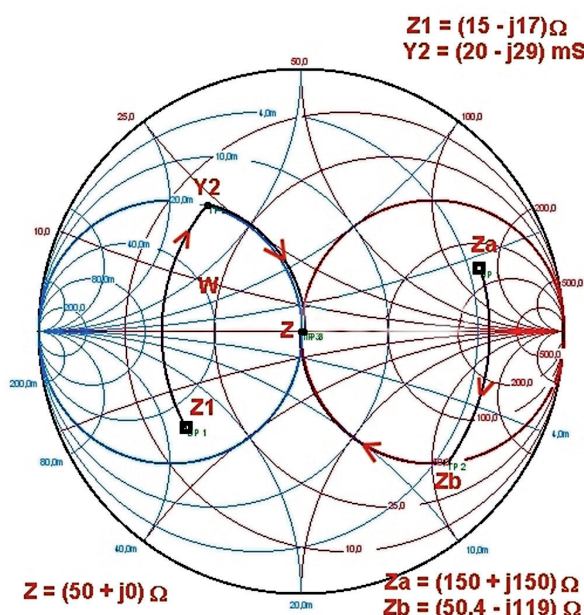
$1/50 \Omega = 20 \text{ mS}$  (Millisiemens). Diese Kehrwerte nennt man Leitwerte. Warum verwendet man sie? Weil man eine Parallelschaltung damit sehr bequem berechnen kann, indem man sie einfach addiert. Beispiel: Widerstände von  $50 \Omega$  und  $100 \Omega$  liegen parallel. Wie groß ist der Gesamtwiderstand?  $20 \text{ mS} + 10 \text{ mS} = 30 \text{ mS}$ ,  $1/30 \text{ mS} = 33,3 \Omega$ . Diese beiden Halbkreise sind die Bezugspunkte

für die Transformation. Im Folgenden wird aus praktischen Gründen zunächst so gut als möglich angepasst und erst dann kompensiert.

**Bild 3** ist eine Hilfe bei der Auswahl der Komponenten für die hier zur Anpassung genutzte  $\pi$ -Konfiguration. Diese Werte sind abhängig von der Position der Ausgangsimpedanz im Smith-Diagramm.



**Bild 4:** Zwei Anpassbeispiele für 14 MHz



**Bild 5:** Zwei Anpassbeispiele für 14 MHz. Zu beachten ist die Startposition von Z1

## Erste Übungen

Den Umgang und die Nutzung des Smith-Diagramms kann man zwar in dicken Büchern nachlesen und aufgrund der dort verwendeten mathematischen Ab- und Herleitungen oft nicht verstehen, schneller und einprägsamer jedoch sind einige praktische Übungen. Beim Smith-Programm V3.10 dient das Komma als Trennzeichen (also z.B. 3,5 und nicht 3.5 eingeben). Ein negativer, also kapazitiver Blindanteil ist mit dem Vorzeichen - und ohne j einzuschreiben. Bei positivem Blindanteil entfallen - und j.

Nach Eingabe der Werte für re (R), im (X) und frequency (Frequenz) im Status keyboard erscheint im Smith-Diagramm der Impedanzwert als ein kleines Quadrat. Im Kasten Cursor werden auch die Impedanz  $Z$  und die Admittanz  $Y$  angezeigt.

Für die Transformation sind die beiden Halbkreise 20 mS oberhalb der Widerstandsachse sowie  $50 \Omega$  unterhalb wichtig. Ich bezeichne sie folgend als Trafo-Kurve. Die hier gezeigten Beispiele sind für die  $\pi$ -Form der Anpasseelemente C-L-C und die Frequenz 14,0 MHz ausgelegt. **Bild 4** zeigt die Impedanz  $7 \Omega + j20 \Omega$  als  $Z_1$ . Ein Parallel-C verschiebt die Impedanz auf den Punkt  $Z_2$ , hier hat sich die Anpassung schon  $50 \Omega$  genähert, es wurde transformiert. Mit einer seriellen Induktivität wird nun der gesamte Blindanteil kompensiert. Im **Bild 6** unten sind die beiden Anpasskomponenten dargestellt.

Bild 4 zeigt auch die Transformation und Kompensation der Impedanz  $Z_a$ ; die Komponenten sind in Bild 6 eingezeichnet.

Im **Bild 5** liegt die Impedanz  $Z_1$  im Sektor 2 des Bildes (Bild 3). Hier kommt

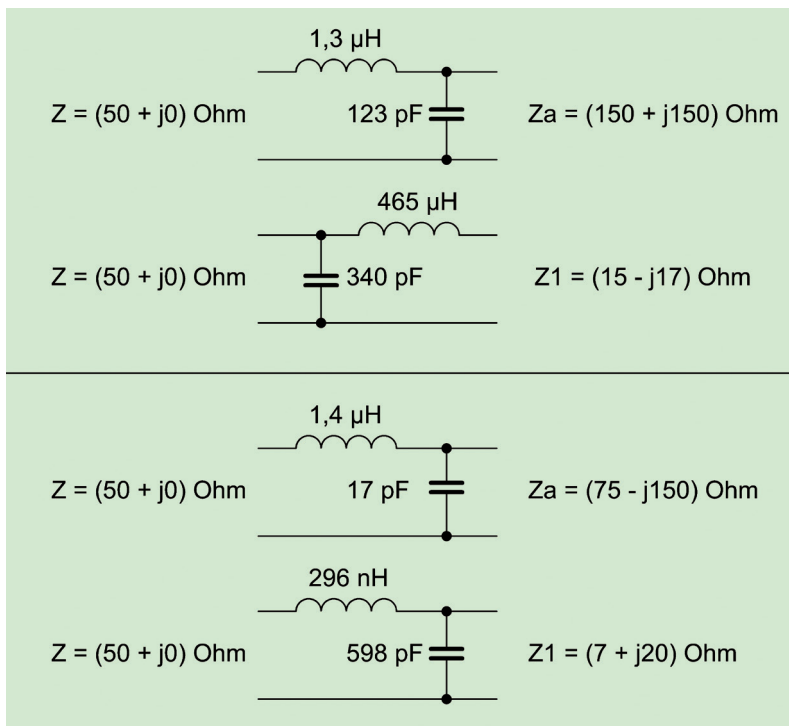


Bild 6: Die Anpasskomponenten für die Beispiele in Bild 4 und Bild 5

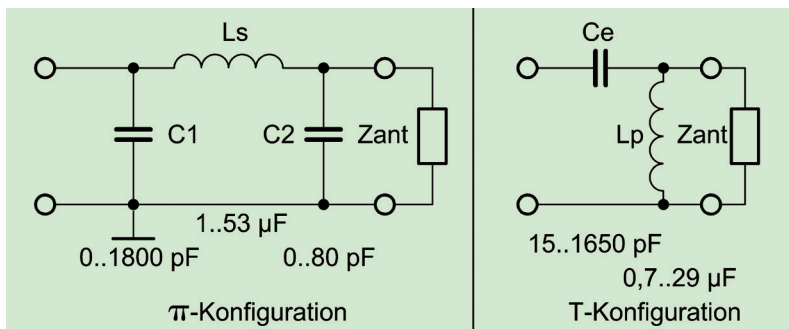


Bild 8: Die Anpasskomponenten und ihre Grenzwerte für die Vertikalantenne

man mit der seriellen Induktivität auf die Trafo-Kurve. Mit der parallelen Kapazität wird jetzt kompensiert. Die Transformation und Kompensation der Impedanz mit dem Wert  $Z_a$  sind äquivalent zum Ablauf in Bild 4 dargestellt.

## Analyzer liefert Ausgangsdaten

Es wurde eine Vertikalantenne von 17,3 m Länge in Verbindung mit drei unterschiedlich langen eingegrabenen Gegengewichten gemessen. Als Messgerät fungierte der AA-54 von RigExpert. Zuerst wurde der SWR-Verlauf im Bereich 1...31 MHz mit den Einstellwerten frequency 16000 (16,0 MHz) und range 30000 (30,0 MHz) gemessen. Damit wurde alle 300 kHz die Impedanz erfasst, s. **Bild 7**. Der AA-54 zeigt in seinem Display zwar nur SWR-Werte bis 10 an, speichert aber alle Werte des Messpunktes mit ihrer Originalgröße intern ab. Für eine detaillierte Aussage folgten Messungen mit 6000/10000, 17000/10000 und 27000/10000 in 100-kHz-Schritten.

**Tabelle 1** zeigt in der zweiten Spalte ( $Z_{ant}$ ) die Impedanzwerte von mindestens zwei Frequenzen pro Amateurfunk-

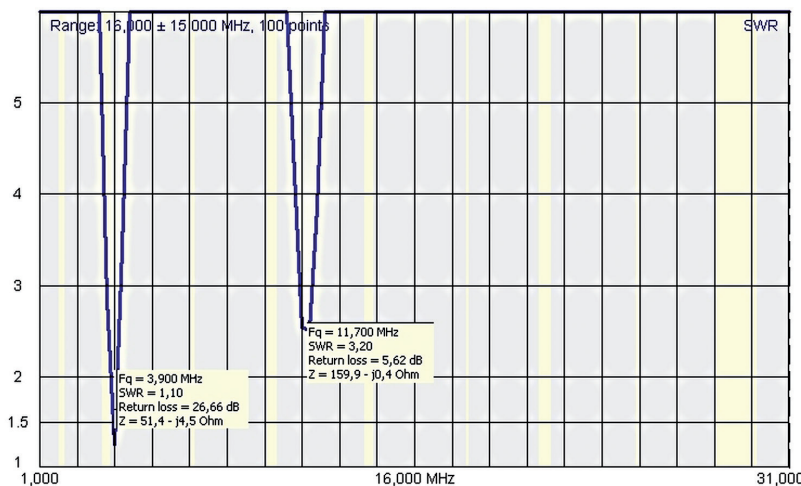


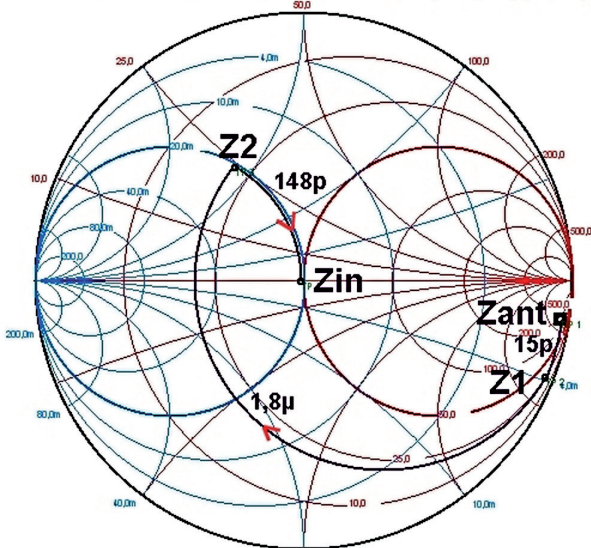
Bild 7: Der SWR-Verlauf im Bereich 1 bis 31 MHz für die Vertikalantenne

Bezug des RigExpert AA-54 auch über



DARC Verlag GmbH  
Lindenallee 6  
34225 Baunatal  
verlag@darcoverlag.de  
www.darcoverlag.de

$$Z_{ant} = (135,8 - j639,1)\Omega \quad Z_1 = (22,7 - j255,9)\Omega$$



$$Z_2 = (21,54 - j24,2)\Omega \quad Z_{in} = (50,0 - j0,45)\Omega$$

band. Ich habe dafür die Anpasskomponenten im Smith-Diagramm ermittelt. Sie gelten für die  $\pi$ - und die T-Konfiguration des **Bildes 8**. Angestrebt wurde immer ein SWV von mindestens 1,1.

Interessant ist bei der  $\pi$ -Konfiguration, dass sich das 160-m-Band auch anpassen lässt, aber doch große Induktivitäten und Kapazitäten erfordert. Für 12 und 10 m ergeben sich sehr kleine Kapazitäten.

Bei der T-Konfiguration zeigte sich, dass man hier bereits mit einer Kapazität von 1,6 nF und einer Induktivität auskommen kann. Die Induktivität für 160 m ist zwar klein, aber bei einem Drehko mit 1600 pF Endkapazität dürften die Einstellungen ab etwa 21 MHz doch ziemlich nervig sein.

Das 160-m-Band wurde speziell gemessen und ausgewertet. Die Werte in **Tabelle 1** zeigen, wie sich die Anpasskomponenten bei der  $\pi$ -Konfiguration innerhalb des Bandes ändern. Bei der T-Konfiguration kommt man auch nur mit zwei Komponenten aus, allerdings ist ihre Einstellung sehr kritisch. Hier ist Feinfühligkeit angesagt.

## $\pi$ -Konfiguration und die kleinen Kapazitäten

Wie man sieht, sind ab etwa 24 MHz die notwendigen Kapazitäten der  $\pi$ -Konfiguration schon im Bereich der parasitären Kapazitäten eines Automatiktuners. Geht man von einer parasitären Kapazität im Tuner von 15 pF aus, so verschiebt sich der Anpassstart um diese Kapazität. Der Ablauf wird im **Bild 9** für 25 MHz gezeigt.

Zunächst verschiebt sich der Start zum Punkt  $Z_1$  und liegt damit unterhalb

der Trafo-Kurve. Um auf diese zu kommen, sind nun serielle 1,8  $\mu$ H für den Punkt  $Z_2$  notwendig. Hier wurde auf 20,03 mS  $- j23,63$  mS transformiert und damit die Trafo-Kurve erreicht.

Die abschließende Kompensation erfolgt mit 148 pF. Nun sieht die Zeile für 25 MHz in Tabelle 1 schon anders aus, es wird eine eingangsseitige Kapazität notwendig. Bei einem externen Tuner mit Rollspule und Drehkos in  $\pi$ -Konfiguration muss nun C2 voll herausgedreht werden, C1 und  $L_s$  werden wirksam.

## Einfluss der binären Stufung

Automatische Antennentuner haben fast immer eine binäre Stufung der Anpasskomponenten.

Die Wichtigkeit eines eingangsseitigen und eines ausgangsseitigen Kondensators soll am Automatiktuner SG-239 gezeigt werden. Die binäre Stufung von C1 beginnt bei 50 pF, bei  $L_s$  mit 0,125  $\mu$ H und C2 mit 50 pF. **Bild 10** zeigt den Ablauf im Smith-Diagramm, **Bild 11** die Summe der Anpasskomponenten. Man kann hieran erkennen, warum der Tuner bei einer Erstanpassung oft etwas länger „klappert“.

Bei einem Automatiktuner mit nur einer Kapazitätsgruppe entweder im Eingang oder im Ausgang wird der Anpassvorgang nur selten ein SWR 1 erbringen. Für die 7,2\*\*\* MHz in Tabelle 1 sind für einen bekannten Tuner dieser Art die Werte eingetragen, mit denen man ein SWR von 1,4 erreichen kann.

## Durch Erkenntnisse zum Erfolg

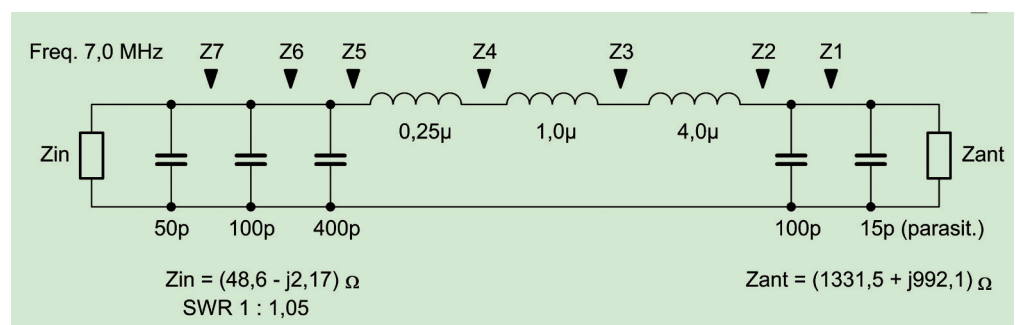
Die Impedanzmessungen und ihre Auswertungen geben Auskünfte darüber, ob und wie eine vorhandene Antenne angepasst werden kann. Ein Blick in das Datenblatt des Tuners ermöglicht die Aussage über die optimalen Anpassungsmöglichkeiten der Antenne. Die Auswertungen der Messungen können auch erkennen lassen, ob sich ein manueller externer Tuner in T-Konfiguration einfacher macht als ein binär gestufter externer Automatiktuner.

Im Prinzip kann man auch für jedes Band eine separate Anpassbox bauen und am Antennenspeisepunkt anbringen, die dann durch Relais und Fernsteuerung weitgehend optimale Bedingungen für jedes Band ermöglicht.

CCDL

**Bild 9 (links):** Der Einfluss der parasitären Kapazität

**Bild 10 (rechts):** Parasitäre Kapazität und binäre Staffelung der Anpasskomponenten eines Automatiktuners



**Bild 11:** Die Komponenten der Anpassschritte des Bildes 10