

Anpassung – ein Muss für jede gute Beziehung

Mit VNA geht alles klar

Ulrich Müller-Menzel, DH1UM

Dieser Artikel stellt ein praxistaugliches, zweistufiges Anpassverfahren vor. Das Programm „VCM“ gibt dabei die Messwerte vor, die unter VNA-Kontrolle erreicht werden müssen, um eine optimale Anpassung zu erreichen.

Zur Person



Ulrich Müller-Menzel, DH1UM
Jahrgang 1951,
Funkamateure seit 1969
Diplommathematiker und
ehemaliger Leiter des
Studienseminars für das
Lehramt an Gymnasien in Lüneburg
Interessen: Leitungstheorie
Hobbys: Segeln

Anschrift:
cq@dh1um.de

Der Fußpunktwiderstand einer Antenne wird deshalb Impedanz genannt, weil sich dieser Widerstand aus zwei unabhängigen Werten zusammensetzt, dem Wirkwiderstand R und dem Blindwiderstand X . Ziel ist es, eine Antenne an die Leitung vom Tx so anzupassen, dass die Antenne die ihr zugeführte Leistung vollständig abstrahlt. Früher schnippelten wir dazu an den Längen der Antennendrähte so lange herum, bis wir am SWR-Meter für den Rücklauf ein Minimum erreichten.

Das SWR-Meter kombiniert dabei auf seine ganz eigene Art die beiden Impedanzwerte R und X zu einem einzigen Anzeigewert für die reflektierte Leistung. Dieser Wert lag auch im Minimum meist über dem gewünschten SWR-Wert von 1. Nur im Ausnahmefall, wenn der Wirkwiderstand R der Antenne zufällig dem Wellenwiderstand der Zuleitung entsprach,

konnte auf der Resonanzfrequenz ein SWR von 1 erreicht werden. Am ehesten trifft dies für einen in der „richtigen“ Höhe aufgehängten Dipol, eine „Tripel-Leg“ mit „richtig“ angewinkelten Beinen oder eine „Up and Outer“ zu.

Irgendwas geht immer

Das Schöne am Amateurfunk: Irgendwas geht immer und mit einer derart abgestimmten Antenne lässt es sich auch ohne $\text{SWR} = 1$ wunderbar funken. Es ist bekannt, dass bis zu einem $\text{SWR} = 2$ die Leistungseinbuße lediglich 11 % beträgt und unser QSO-Partner diesen Verlust am S-Meter kaum wahrnehmen wird. Wird dieser Stehwellenwert jedoch im Shack und nicht am Antennenfußpunkt gemessen, so kann die Leistungsbilanz durchaus deutlich schlechter als 11 % ausfallen [1]. Wenn wir uns also schon um die Anpassung unserer Antenne bemühen, dann können wir doch eine Methode wählen, die die bestmögliche Leistungsbilanz verspricht, also ein $\text{SWR} = 1$.

So wird das nix

Um eine solche optimale Anpassung zu erreichen, müssen wir nur das SWR-Meter durch den günstig erworbenen VNA ersetzen. Dazu laden wir gleich noch die Software „NanoVNASaver“ [2] auf unser Notebook, da dort die Messwerte des VNA übersichtlich und gut lesbar dargestellt werden.



Im Gegensatz zum SWR-Meter weist uns der VNA die beiden Werte für den Wirkwiderstand R und den Blindwiderstand X der Antennenimpedanz getrennt aus. An unserer neu errichteten Vertikal messen wir mit der „Messung 0“ auf 7,1 MHz die beiden Werte $R = 34 \Omega$ und $X = -26 \Omega$ (Bild 1). Die links stehende Zahl der Impedanz ist der Wirkwiderstand R , die rechts stehende Zahl mit Vorzeichen der Blindwiderstand X . Den Buchstaben „j“ zwischen diesen beiden Zahlen ignorieren wir einfach, damit beschäftigt sich das Programm „VCM“ intern.

Grundsätzlich lässt sich jede Antenne beispielsweise in der Bandmitte mit nur zwei Bauteilen auf ein $\text{SWR} = 1$ anpassen. Also nichts wie ran an den PC und eines der zahlreichen Programme starten, die mit Anpassung gut können, wie TLW [3], Smith [4] oder EZNEC [5]. All diese Programme liefern uns korrekte Werte für die serielle Spule und den parallelen Kondensator: $L = 1,11 \mu\text{H}$ und $C = 307,55 \text{ pF}$. Wir löten die Spule in Serie zum Strahler und anschließend den Kondensator parallel zwischen Spule und Masse. Der freudig erwarteten Bestätigung, alles richtig gemacht zu ha-

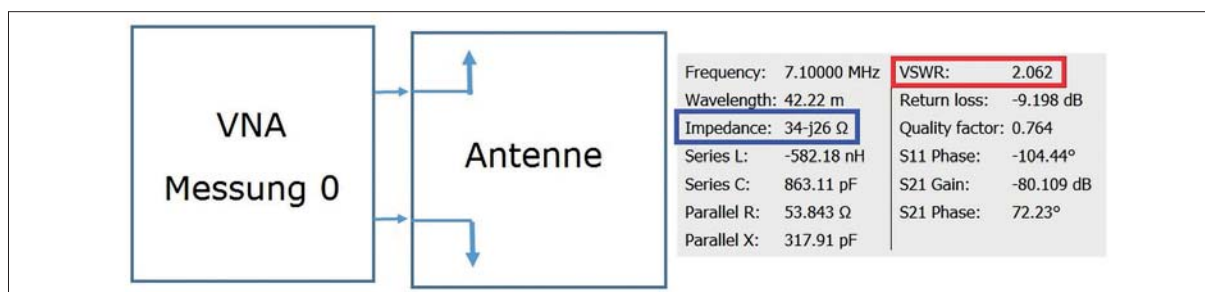


Bild 1: Messergebnisse am Antennenfußpunkt mit $R = 34 \Omega$ und $X = -26 \Omega$

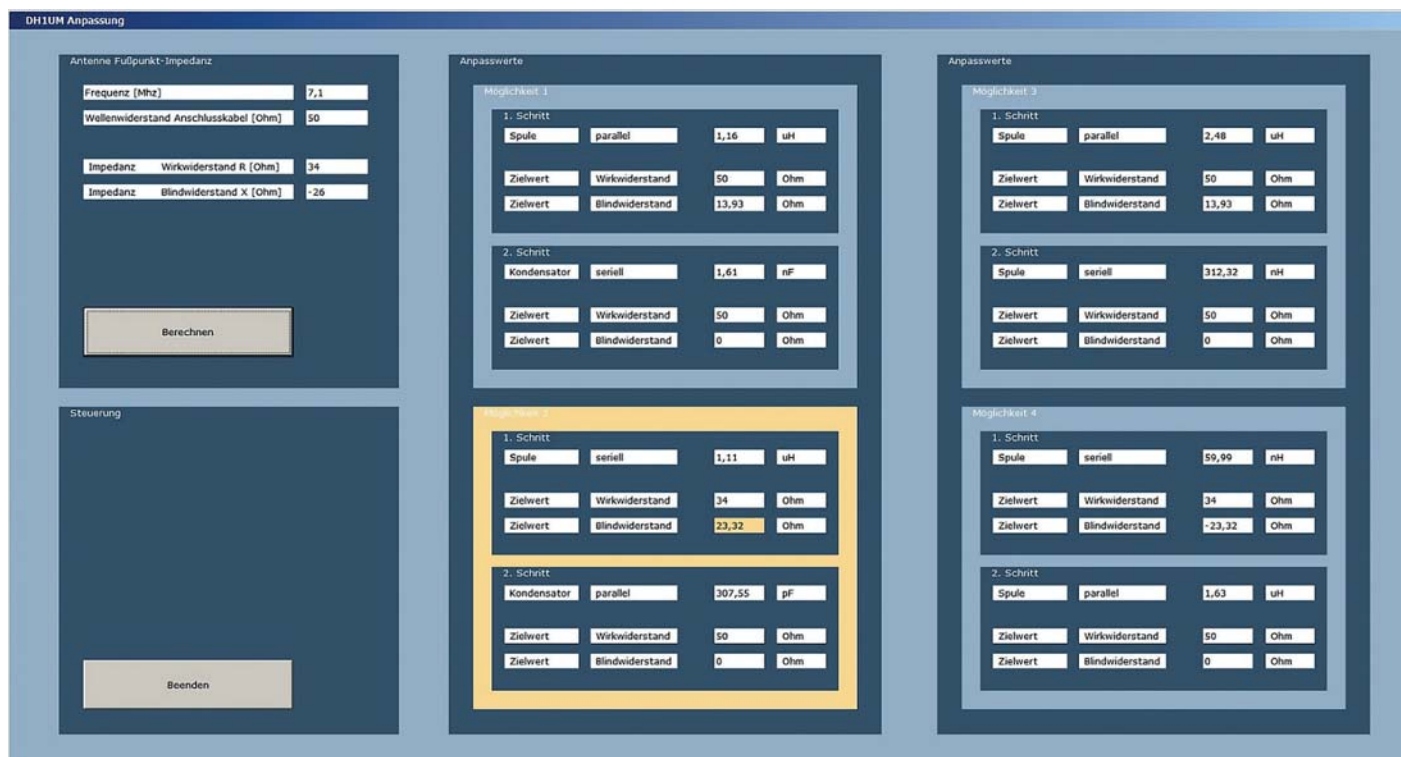


Bild 2: Programmoberfläche des Programms „VCM“

ben, folgt schnell die Ernüchterung nach erneuter VNA-Messung hinter dieser Anpassschaltung: Das SWR liegt wieder oberhalb von eins. Woran liegt das? Klaus Solbach, DK3BA, hat uns die Ursache in seinem lesenswerten Artikel [6] noch einmal ganz deutlich vor Augen geführt. Jeder Kondensator besitzt induktive Anteile, ebenso wie die nebeneinander liegenden Spulendrähte eine Kapazität aufweisen. Einige notwendige Leitungen für die Verdrahtung der Anpassschaltung kommen noch hinzu. Wer nun anfängt, durch Probieren die Werte von C oder L

oder gar beide zu verändern, um die Lage zu verbessern, wird schnell merken: Die Kombinationsmöglichkeiten sind vielfältig und meist wird es schlechter.

Zweistufiges Anpassverfahren

Um systematisch den SWR-Wert von 1 zu erreichen, gibt uns das Programm „VCM“ (VNA Controlled Matching) (Bild 2) hierfür zusätzliche Informationen an die Hand. Verfolgen wir das Vorgehen am Beispiel unserer Vertikal. Wir geben vier Werte in das Programm „VCM“ ein (Frequenz 7,1 MHz, Anschlussleitung 50 Ω sowie

$R = 34 \Omega$ und $X = -26 \Omega$ aus VNA-Messung 0). Wie alle anderen Anpassprogramme auch errechnet „VCM“ ebenfalls für den ersten Schritt eine serielle Spule mit $L = 1,11 \mu\text{H}$.

Wir löten nun nur diese Spule ein und messen mit dem VNA $R = 34 \Omega$ und $X = +30 \Omega$. Der Wert für R verändert sich durch die serielle Spule wie zu erwarten nicht. Aber welches ist der richtige Zielwert für X, den wir mit der Spule erreichen müssen? Obwohl wir Antennenbau nur bei gutem Wetter vornehmen, stehen wir mit dem gemessenen Wert

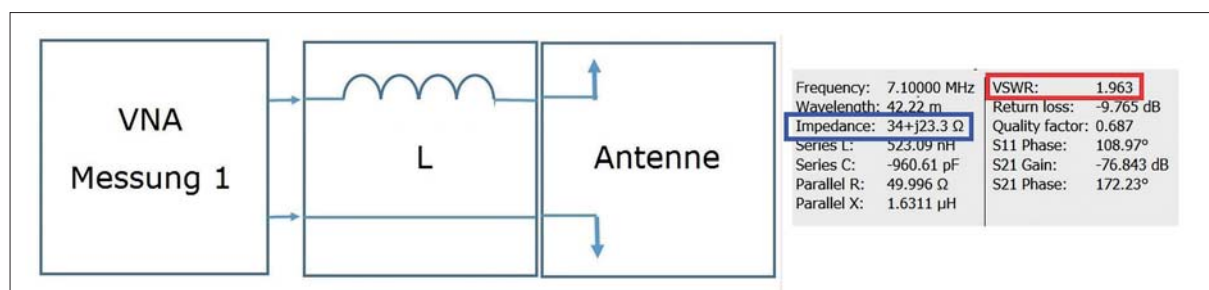


Bild 3: Messergebnisse nach Spuleneinbau mit Zielwert $X = +23,3 \Omega$

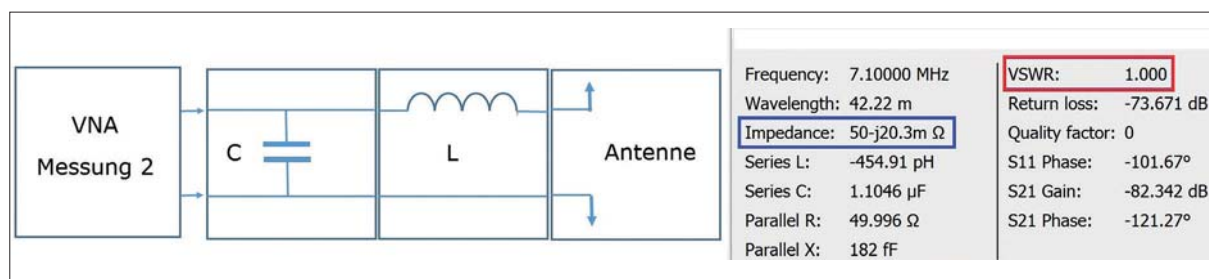


Bild 4: Messergebnisse der fertigen Anpassbox mit SWR = 1

$X = +30 \, \Omega$ ziemlich im Regen. Glücklicherweise weist uns das Programm „VCM“ in der farbig gekennzeichneten „Möglichkeit 2“ den Wert $X = +23,3 \, \Omega$ als den zu erreichenden Zielwert aus. Da wir diesen Wert jetzt kennen, verändern wir die Induktivität der Spule durch Auseinanderziehen der Windungen so lange, bis der VNA diesen Zielwert ausweist (**Bild 3**). Sollte unsere Spule einen nennenswerten ohmschen Anteil besitzen und sich dadurch der Wert von $R = 34 \, \Omega$ auf beispielsweise $R = 40 \, \Omega$ vergrößert haben, kein Problem. Dann geben wir diesen neuen, nach dem Spuleneinbau gemessenen Wert in „VCM“ ein und erhalten als neuen Zielwert $X = +18 \, \Omega$. Entscheidend dabei ist, dass uns der anfängliche theoretische Induktivitätswert der Spule völlig egal ist, genau wie der Wert des Wirkwiderstandes, sollte er sich durch den Einbau der Spule verändert haben. Bemerkenswert ist auch die Tatsache, dass sich das SWR durch den Einbau des ersten Bauteils sogar verschlechtern kann. Kein Grund zur Panik, im zweiten Schritt gleicht das zweite Bauteil alles wieder aus. Einzig der vom Programm „VCM“ ausgewiesene Zielwert $X = +23,3 \, \Omega$ muss im VNA als Abschluss des ersten Schrittes erreicht werden.

Wenn wir jetzt im zweiten Schritt den Kondensator mit Ausgangswert 307,55 pF einlöten, werden wir feststellen, dass durch

Veränderung dessen Kapazität unter VNA-Messung 2 leicht der Zielwert von $R = 50 \, \Omega$ mit $X = -0,0203 \, \Omega$, somit ein $\text{SWR} = 1$ zu erreichen ist (**Bild 4**). Auch hier ist uns der tatsächliche Wert des Kondensators gleichgültig, wichtig ist nur, dass der VNA $R = 50 \, \Omega$, $X = 0 \, \Omega$ und damit $\text{SWR} = 1$ anzeigt. Im Ergebnis entsteht so eine kleine, leichte Box mit zwei Bauteilen am Fußpunkt der Antenne (**Aufmacherbild**).

Für die Freunde des Smith-Diagramms: Im ersten Schritt muss man stets entweder auf dem Impedanzkreis mit $50 \, \Omega$ Resistanz oder auf dem Admittanzkreis mit $20 \, \text{mS}$ Konduktanz landen, andernfalls ist ein SWR von 1 im zweiten Schritt nicht mehr zu erreichen. Bei den zurückgelegten Wegen im Smith-Diagramm wäre zu beachten, dass der kürzeste Weg zum Mittelpunkt des Diagramms nicht immer der verlustärmste ist.

„VCM“ und „NetCas“ liefern alle Informationen

Das Programm „VCM“ listet zunächst alle Möglichkeiten auf, um Anpassung mit zwei Bauteilen zu erreichen, weist dann aber von den bis zu vier Möglichkeiten diejenige als günstigsten Fall aus, bei der die Induktivitätswerte am geringsten ausfallen. Die Gesamtschaltung ist damit am verlustärmsten und die Spule geometrisch am kleinsten.

Ließe man theoretisch die Dämpfung der Leitung vom Tx zur Antenne einschließlich der dämpfenden Wirkung möglicher Störstellen unberücksichtigt, so wäre der Tuner im Tx bzw. im Shack in der Lage, jedes noch so hohe, im Shack gemessene SWR so auszugleichen, dass die Antenne die vollen 100 W unseres Tx abstrahlen würde. Unter Berücksichtigung der Leitungsdämpfung auf dem Weg vom Tx zur Antenne (und wer von uns besitzt schon eine dämpfungsfreie Leitung?) ergibt sich jedoch ein anderes, nun reales Bild der Leistungsübertragung.

Das Programm „NetCas“ [8] ist in der Lage, die vom Tx (Power avs) an die Antenne abgegebene Leistung (Power GT) für Leitungen mit Dämpfungen samt Anpassschaltungen zu berechnen. So kann die Frage entschieden werden, ob sich ein L/C-Einbau am Antennenfußpunkt für die eigene Anlage lohnt. Jeder noch so gute Tuner im Tx oder im Shack ist nicht in der Lage, unter Berücksichtigung von Leitungsdämpfungen die Leistungsabgabe an die Antenne zu optimieren, ein L/C-Netzwerk am Antennenfußpunkt vermag dies durchaus. Speisen wir beispielsweise unsere Vertikal auf 7,1 MHz direkt mit 25 m RG-58 (Dämpfung 4,57 dB/100 m) ohne weitere Anpassung, so werden von einem 100 W Tx noch 67,60 W von der Vertikal abgestrahlt, die restlichen 32,40 W erwärmen

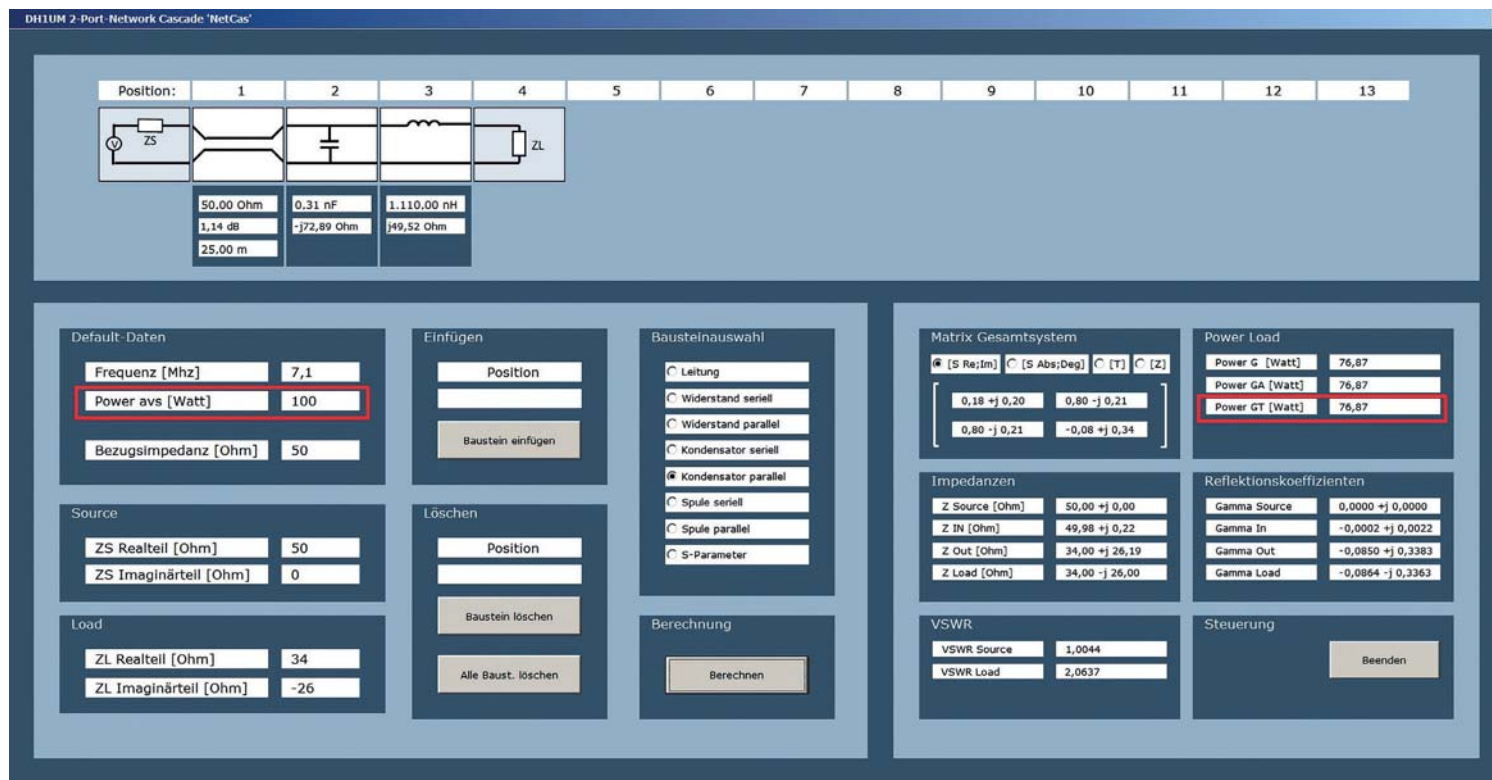


Bild 5: Programmoberfläche des Programms „NetCas“

Tabelle

Eingabedaten			Ausgabedaten für Z(Leitung) = 50 Ω		
Frequenz	R Ant.	X Ant.	1. Bauteil	Wert	Zielwert 1. Schritt
[MHz]	[Ω]	[Ω]	Art		[Ω]
1,85	15	-10	C seriell	6,66 nF	X = -22,91
3,65	32	-15	L seriell	1,7 uH	X = +24,0
7,10	28	+24	L seriell	18,37 nH	X = +24,82
14,175	40	+26	C parallel *	54,96 pF	X = +18,57
21,225	80	-20	C parallel	51,75 pF	R = 50,0
28,50	70	-90	L parallel	353,57 nH	X = +82,38

Beispieldaten des Programms „VCM“

*) Das zweite Bauteil ist in diesem Fall ein zweiter Kondensator seriell mit 604,49 pF

das RG-58-Kabel. Mit der L/C-Box am Fußpunkt der Antenne steigern wir die abgestrahlte Leistung auf 76,87 W (Bild 5). Möchte man die abgestrahlte Leistung noch weiter erhöhen, hilft jetzt nur noch eine dämpfungärmere Leitung zur Antenne.

Die Anpassung am Antennenfußpunkt optimiert zudem nicht nur die Leistungsbilanz der Gesamtanlage in der Bandmitte, sondern wirkt sich bis zu den Bandenden positiv aus. Gleiches gilt im Übrigen auch für den Empfangsfall.

Beispiele und Ausblick

Messen wir an einer anderen Antenne beispielsweise eine Impedanz $R = 35 \Omega$ und $X = 40 \Omega$, so zeigt uns „VCM“, dass wir sogar ohne Spule auskommen und allein mit zwei Kondensatoren ein SWR = 1 erreichen.

Ebenso liefert das Programm die Zielwerte für einen schräg zwischen Hausgiebel und Gartenbaum aufgespannten 80-m-Dipol, der von einer 450- Ω -Hühnerleiter gespeist wird. Der VNA misst hierfür in der Bandmitte die Fußpunktimpedanz $R = 28 \Omega$ und $X = -20 \Omega$. Das Programm gibt für den ersten Schritt als Startwert einen seriellen Kondensator mit einer Kapazität von 492 pF und den Zielwert $X = -109 \Omega$ an. Wir verändern diesen Kondensator, bis uns der VNA diesen Zielwert anzeigt. Ist dieser Zielwert im ersten Schritt erreicht, folgt dann im zweiten Schritt die Veränderung der parallelen Spule mit Startwert $L = 5,1 \mu\text{H}$ bis zu den Werten $R = 450 \Omega$, $X = 0$ und SWR = 1.

Sollten wir bei einer weiteren Antenne bereits einmal $R = 50 \Omega$ bei der „Messung 0“ erhalten und dazu beispielsweise $X = -180 \Omega$, so wäre es naheliegend, diesen negativen X-Wert durch eine serielle Spule auf $X = 0 \Omega$ und damit ein SWR = 1 zu bringen. Das Programm „VCM“ weist jedoch einen komplizierter erscheinenden Weg: zu-

nächst eine parallele Spule und anschließend einen seriellen Kondensator. Warum? Die Spule allein müsste auf Bandmitte im 80-m-Band eine Induktivität von 7,85 μH besitzen, in Kombination mit einem 242,24 pF-Kondensator benötigen wir für die Spule lediglich 4,23 μH , also nur etwas mehr als die Hälfte an Induktivität.

Einige weitere Beispiele zeigt die Tabelle. Ersichtlich ist, dass wir das Programm „VCM“ benötigen, da der Zielwert für den ersten Schritt in vielen Fällen aus den Eingangsdaten nicht ersichtlich ist. Wünschen wir uns eine breitbandigere Anpassung mit mehr als zwei Bauteilen, wie von Gerd Janzen in [7] dargestellt, so wenden wir „VCM“ zweimal hintereinander an. Dazu geben wir für die erste Anwendung in das Feld für den Widerstandswert des Anschlusskabels den gewünschten Zielwert für die erste Transformation ein. Die zweite Anwendung von „VCM“ verläuft dann wie gewohnt und transformiert von der Zwischenimpedanz auf den Wellenwiderstand des Anschlusskabels. Im Ergebnis erhalten wir neben den Ausgangswerten für die vier Bauteile auch die Zielwerte, die unter VNA-Kontrolle jeweils für beide Transformationsschritte erreicht werden müssen, um nach dem Einbau aller vier Bauteile ein SWR = 1 zu erreichen.

Praxistipps

Der Induktivitätswert der Spule lässt sich durch Zusammendrücken oder Auseinanderziehen der Spule einfach verändern. Da dies bei Kondensatoren nicht zielführend ist, benötigt man häufig noch Kondensatoren mit kleinen Kapazitätswerten (Flohmarkt), die parallel zum bestehenden Kondensator verlötet werden.

Befindet sich der VNA samt Notebook zur bequemen Messung auf einem Tisch etwas abseits des Antennenfußpunktes, so ist nichts gegen ein längeres, leichtes

Koaxkabel (RG-58) als Messkabel für den VNA einzuwenden, kann der VNA doch am Leitungsende kalibriert werden. Für die Messung der Fußpunktimpedanz einer Antenne muss aber unbedingt auch das Ende dieser Messleitung mit einem Balun ausgestattet werden, da sonst die Messleitung zum essenziellen Bestandteil der Antenne auf der Masseseite des Koaxkabels wird. Die Kalibrierung des VNA erfolgt dann vom VNA aus gesehen hinter dem Balun der Messleitung.

Alternativ kann auch gleich die ja ohnehin existierende Antennenzuleitung einschließlich des Baluns als Messleitung verwendet werden. Hierzu müssen lediglich einmal die Antennenanschlüsse vom Balun getrennt werden, um dort den VNA zu kalibrieren (short – open – load).

Die Programme „VCM“ und „NetCas“ sind bewusst einfach gestaltet, sodass keine Einarbeitung notwendig ist. Ein Klick auf den „Berechnen“-Button liefert alle gewünschten Informationen. Beide Programme stehen zum Download auf meiner Webseite unter www.dh1um.de zur Verfügung. Die Programme benötigen MS EXCEL ab 2013 und müssen nicht installiert werden. Nach Doppelklick auf die heruntergeladene Programmdatei und einem Klick auf den Button „Inhalt aktivieren“ startet EXCEL auf die Programmoberfläche durch.



Literatur und Bezugsquellen

- [1] Müller-Menzel, U., DH1UM: „Power zum Tower“, CQ DL 2/24, S. 24ff., Programm „TPG“: www.dh1um.de
- [2] Programm „NanoVNASaver“: Download www.nanovna.com/?page_id=90
- [3] Straw, D. R., N6BV: „TLW“ (Transmission Line for Windows), www.arrrl.org/transmission-lines
- [4] Dellsperger, F., HB9AJY: „Smith V4.1“ (Circuit Design with Smith Chart), www.fritz.dellsperger.net
- [5] Lewallen, R., W7EL: „EZNEC Pro+ v. 7.0“, www.eznec.com
- [6] Solbach, K., DK3BA: „Parasitäre Induktivität in Kondensatoren“, CQ DL 12/24, S. 26ff.
- [7] Janzen, G., DF6SJ: „Anpassung von Antennen“, CQ DL 11/24, S. 25ff.
- [8] Müller-Menzel, U., DH1UM: Programm „NetCas“: www.dh1um.de