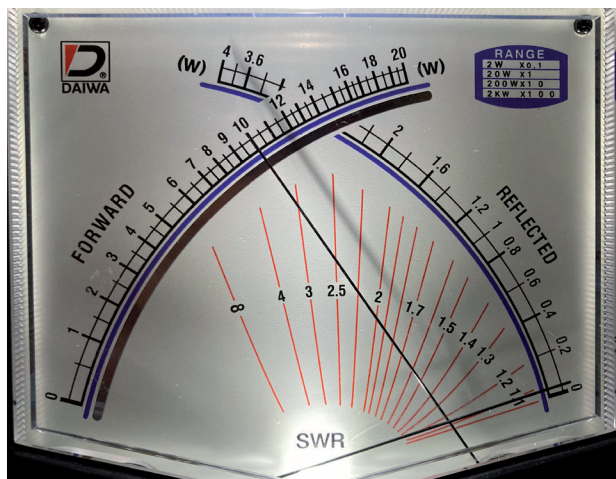


Zur Wechselwirkung zwischen SWR und Leitungsdämpfung

Power zum Tower

Ulrich Müller-Menzel, DH1UM

Genießt du auch ein SWR von 1,14 im Shack als Indikator für deine Sendeanlage? Wenn du dir diese Freude nicht nehmen lassen möchtest, solltest du lieber nicht weiterlesen ...



Kannst du dir vorstellen, dass bei diesem schönen SWR von 1,14 von 100 W weniger als 10 W an deiner Antenne ankommen?

Dämpfung beachten

Bisher konnten wir viel zu Fragen der Anpassung lesen, wobei die Leitung häufig „der Einfachheit halber“ als ver-

lustfrei angesehen wurde. Dabei haben Effekte der Wechselwirkung von Kabeldämpfung und Anpassung teilweise gravierende Auswirkungen auf die Leistungsbilanz der Sendeanlage.

Hier wird eine Antwort auf die uns interessierende Frage gegeben: Wie viel Leistung des Tx erreicht meine Antenne wirklich? Die Tatsache, dass eine Antenne nicht die volle Leistung des Tx erhält, ist zwei Umständen geschuldet: Zum einen dämpft die Leitung vom Tx zur Antenne die Leistung, zum anderen kommt es aufgrund von Fehlanpassungen auf der Leitung zu Reflexionen, die die Leistungsabgabe an die Antenne mindern. Dabei hat die Kabeldämpfung einen entscheidenden Einfluss auf die Anpassung, ebenso wie sich die Anpassungsbedingungen durch Dämpfung auf dem Kabel verändern [1].

Ortsabhängiges SWR

Unter Berücksichtigung der Wechselwirkung von SWR und Dämpfung kann

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

allerdings nicht mehr von „dem SWR“ gesprochen werden, denn bei einem dämpfenden Kabel ist der SWR-Wert an jeder Stelle des Kabels ein anderer.

Beispielsweise zeigt uns unsere Stehwellenmessbrücke im Shack einen SWR-Wert von 1,3 bei 435 MHz an. Dann ist bei unserem 25 m langen Kabel des Typs RG-58 an der Antenne der Stecker ab, das Kabelende offen. Das SWR am Antennenfußpunkt gemessen wäre unendlich. Schlimmer noch: Selbst wenn der Stecker noch dran wäre, unsere Antenne würde keine Leistung abstrahlen. Das Problematische daran: Wir bemerken dieses Problem im Shack bei einem SWR-Wert von 1,3 überhaupt nicht [2].

Eingabedaten	
Tx	
Frequenz [Mhz]	435
Leistung TX [Watt]	100
Leitung	
Tabellenwert Kabeldämpfung für 100 m bei 435 Mhz [dB]	35,61
Länge des Kabels [m]	25
Antenne	
☐ Stehwellenverhältnis VSWR TX	
☒ Stehwellenverhältnis VSWR Antenne	3
Station 1	
TX → Leitung → Antenne	
Station 2	
TX → TUNER → Leitung → Antenne	
Station 3	
TX → Leitung → TUNER → Antenne	
Steuerung	
Berechnen	Druck Station 1, Druck Station 2, Druck Station 3, Beenden
Ausgabedaten	
Dämpfung	
Kabeldämpfung Tabellenwert D [dB]	8,9025
Station 1	
Stehwellenverhältnis VSWR TX	1,1376
Stehwellenverhältnis VSWR Antenne	3,0000
Leistung Antenne [Watt]	9,6563
Station 2	
Stehwellenverhältnis VSWR TX	1,1376
Stehwellenverhältnis VSWR Antenne	3,0000
Leistung Antenne [Watt]	9,6965
Station 3	
Stehwellenverhältnis VSWR TX	1,0000
Stehwellenverhältnis VSWR Antenne	3,0000
Leistung Antenne [Watt]	12,8751

Bild 1:
s. Text

Das Programm TPG

Den Praktiker interessiert die Frage: Wie viel der vom Tx erzeugten Leistung kommt bei meiner Antenne an? Auf meiner Website www.dh1um.de steht das Programm TPG unter „Programme“ zum Download zur Verfügung (**Bild 1**). Das Programm muss nach dem Download nicht installiert, jedoch aktiviert werden (Readme). Es berechnet die Leistung an der Antenne im konkreten Betriebsfall für eine Leitung mit Dämpfung. Wir geben in den Eingabefeldern lediglich fünf Daten ein:

- Betriebsfrequenz
- Leistung Tx
- Kabeldämpfung auf der Betriebsfrequenz für 100 m
- Leitungslänge
- SWR-Wert im Shack

Das Programm TPG ermittelt hieraus die Leistung an der Antenne für jede Frequenz, Sendeleistung, jeden 50- Ω -Kabeltyp und jede reale Antenne. Zum Vergleich werden die Ergebnisdaten für drei unterschiedliche Stationstypen dargestellt:

- Station 1: Tx $\rightarrow$ Leitung $\rightarrow$ Antenne
- Station 2: Tx $\rightarrow$ Tuner $\rightarrow$ Leitung $\rightarrow$ Antenne
- Station 3: Tx $\rightarrow$ Leitung $\rightarrow$ Tuner $\rightarrow$ Antenne

Wählt man für die eigene Station den zutreffenden Stationstyp aus, so kennt man den tatsächlichen Leistungswert an seiner Antenne. Weiterhin bietet das Programm TPG sowohl für den Praktiker als auch für den Theoretiker interessante Einblicke:

- Spannend ist es, zu beobachten, wie sich die Leistung an der Antenne verringert, wenn wir ausgehend vom Dämpfungswert Null die Dämpfungswerte langsam bis zu realen Kabeldämpfungswerten erhöhen.
- Spannend ist es auch, zu beobachten, wie sehr sich die SWR-Werte im Shack von den SWR-Werten an der Antenne unterscheiden, wenn wir die Kabeldämpfung erhöhen.
- Spannend ist es zudem noch, zu beobachten, wie viel (oder besser wenig) der Tuner im Shack gegenüber dem Tuner an der Antenne ausmacht.

Kabeldämpfung

Ich stelle jetzt unsere Beispielstation in **Bild 2** vor: Nachdem wir einen teuren Tx erstanden haben, der auf 70 cm 100 W abgibt, reichte das Budget nur noch für ein 25 m langes, eher preis-

wertes Koaxkabel vom Typ RG-58, welches wir an unsere nicht ganz so gut gelungene selbst gebaute Yagi mit einer Fußpunktimpedanz von 150 Ω anschließen. Zur Ermittlung der Kabeldämpfung gibt es zwei einfache Möglichkeiten:

- Wir vertrauen den Tabellenwerten des Herstellers.

- Wir messen die Dämpfung.

Mir jedenfalls geht es meist so, dass die Frequenz, die mich interessiert, in der Herstellertabelle gerade nicht angegeben ist. In [3] finden wir sehr gut beschrieben, wie wir einen Dämpfungswert der Herstellertabelle auf unsere Frequenz und auf unsere Kabellänge umrechnen können. Ebenso finden wir dort eine Beschreibung zur Messung der Dämpfung. Mit dem Programm „Attenuation Calculator“ von DL4MW, welches im Internet kostenlos herunterzuladen ist, erhalten wir alle benötigten Daten auch ohne eigenen Rechenaufwand.

Die mechanische Kabellänge messen wir aus oder schätzen sie ab. Für unsere Station finden wir den Dämpfungswert des Herstellers $D = 35,61$ dB für 100 m, damit haben wir für 25 m eine Dämpfung von $D = 8,9$ dB.

Antennendaten

Wir benötigen für die Leistungsbilanz unseres Systems den Reflexionskoeffizienten $\Gamma(\text{ANT})$ unserer Antenne, der ein Maß für die Anpassung darstellt. Auch hier gibt es wieder zwei Möglichkeiten zur Ermittlung:

- Wir messen mithilfe einer hoffentlich nicht zu kurzen Leiter und einem VNA die Fußpunktimpedanz oben an der Antenne.
- Wir machen es uns im Shack gemütlich und lesen den SWR-Wert an unserem Stehwellenmessgerät ab.

Nun entspricht der SWR-Wert im Shack nur für eine Leitung ohne Dämpfung dem Wert, den wir am Antennenfußpunkt messen würden. Mit (1) können wir aber den SWR-Wert im Shack in den Wert für den Antennenfußpunkt für eine Leitung mit Dämpfung umrechnen [4]. Das SWR im Shack zeigt für unsere Station einen Wert von 1,14 an, am Antennenfußpunkt würden wir ein $\text{SWR} = 3$ messen. Mit (2) ergibt sich dann $\Gamma(\text{ANT}) = 0,5$.

Auch eine in der Regel vorhandene komplexe Fußpunktimpedanz der Antenne wird durch den SWR-Wert im Shack für die hier relevante Leistungsbilanz korrekt erfasst. All dies erledigt

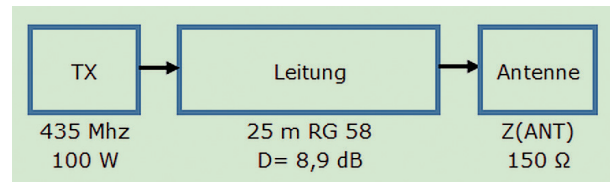


Bild 2, s. Text

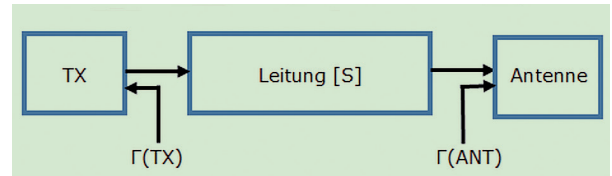


Bild 3, s. Text

das Programm TPG für uns, damit wir weder auf die Leiter noch etwas selber rechnen müssen, obwohl mir der Rechner meines Handys sogar die in (1) benötigte Tangenshyperbolicus-Funktion anbietet, sobald ich es quer halte.

Leistungsdaten

S-Parameter halten auch im Amateurfunk immer mehr Einzug [5], Besitzern eines VNAs sind sie geläufig. Wir ermitteln den S11-Parameter für unsere Leitung, wobei es wieder zwei Möglichkeiten gibt:

- Da die Leitungsimpedanz unseres Koaxkabels der Systemimpedanz von 50 Ω entspricht, gilt mit (3): $S_{11} = 0$.
- Wir messen diesen Wert mit dem VNA am Kabeleingang, wenn wir den Kabelaussgang mit 50 Ω abschließen.

Wir vertauschen beim Kabel Eingang und Ausgang und erhalten aus Symmetriegründen $S_{22} = 0$. Der S21-Parameter stellt ein Maß für die Dämpfung der Leitung dar. Wir können S21 mit dem VNA messen, oder wir übernehmen den Wert für $D = 8,9$ dB und berechnen mit (4) $S_{21} = 0,359$. Wieder aus Symmetriegründen gilt für ein Kabel $S_{21} = S_{12}$. Damit haben wir die S-Parameter unseres Kabels bestimmt, die wir übersichtlich als S-Matrix in (5) darstellen.

Transducer Power Gain

Die Übertragungsleistungsverstärkung bzw. Übertragungsleistungsdämpfung TPG (Transducer Power Gain) [6] des Systems ergibt sich mit (6). TPG ist das Verhältnis zwischen der maximal möglichen Leistungsabgabe des Senders $P(\text{Tx})_{\text{avs}}$ und der an die Antenne gelieferten Leistung $P(\text{ANT})$. Der Wert $P(\text{Tx})_{\text{avs}}$ bedeutet Power available from Source.

Die maximal mögliche Leistungsabgabe des Senders meint die Leistung, die unser Tx auf der Betriebsfrequenz an ein 50- Ω -Dummy-Load abgeben würde. Im

Formelkasten

Z ₀	Z ₀ = 50 Ω : System- und Bezugsimpedanz
D	D [dB] : Dämpfungswert für Betriebsfrequenz und mechanischer Kabellänge
(1)	$SWR(ANT) = \frac{SWR(Tx) - \tanh(D * 0,115)}{1 - SWR(Tx) * \tanh(D * 0,115)}$
(2)	$\Gamma(ANT) = \frac{SWR(ANT) - 1}{SWR(ANT) + 1}$
(3)	$S_{11} = \frac{Z(\text{Leitung}) - Z_0}{Z(\text{Leitung}) + Z_0}$
(4)	$S_{21} = 10^{-0,05 * D}$
(5)	$[S] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0,359 \\ 0,359 & 0 \end{bmatrix}$
(6)	$TPG = \frac{P(ANT)}{P(Tx)_{avs}} = \frac{(1 - \Gamma(Tx) ^2) * S_{21} ^2 * (1 - \Gamma(ANT) ^2)}{ (1 - S_{11} * \Gamma(Tx)) * (1 - S_{22} * \Gamma(ANT)) - S_{12} * S_{21} * \Gamma(Tx) * \Gamma(ANT) ^2}$
(7)	$P(ANT) = P(Tx)_{avs} * TPG$
(8)	$TPG = S_{21} ^2 * (1 - \Gamma(ANT) ^2)$
(9)	$TPG = \frac{ S_{21} ^2 * (1 - \Gamma(ANT) ^2)}{1 - S_{21} ^4 * \Gamma(ANT) ^2}$
(10)	$TPG = S_{21} ^2$

Regelfall sollte dieser Wert den Herstellerangaben des Tx entsprechen. Angenommen, wir errechnen in (6) für TPG den Wert 0,75. Unser Tx, der die Leistung P(TX)_{avs} = 100 W abgeben kann, stellt dann nach (7) der Antenne 75 W zur Verfügung.

Zur Anwendung der TPG-Formel benötigen wir gemäß **Bild 3** neben den S-Parametern der Leitung noch $\Gamma(Tx)$ und $\Gamma(ANT)$. Diese Werte sind die Reflexionskoeffizienten, die die Leitung sieht, wenn sie nach außen schaut. Am Leitungseingang sieht die Leitung den Sender. Der Tx ist für eine maximale Leistungsabgabe an 50 Ω entworfen, besitzt also nach dem Theorem von Thevenin eine Impedanz von 50 Ω. Da diese Impedanz der Systemimpedanz $Z_0 = 50 \Omega$ entspricht, gilt entsprechend nach (3) $\Gamma(Tx) = 0$.

Das Leitungsende sieht die Fußpunktimpedanz von 150 Ω. Den zugehörigen Reflexionskoeffizienten haben wir bereits ermittelt: $\Gamma(ANT) = 0,5$.

Nun sind uns alle für die TPG-Formel benötigten Werte in ihrer Bedeutung und in ihren Werten bekannt und wir können einige Anwendungsfälle betrachten.

Sichtweisen

Wir denken uns in unserer Station die Koaxleitung zunächst so kurz, dass sie weder eine Dämpfung aufweist noch transformieren kann. Damit kennen wir alle S-Parameter dieser elektrisch ultrakurzen Leitung: $S_{11} = S_{22} = 0$. Kabel ohne Dämpfung: $D = 0$ dB, also nach (4) $S_{21} = S_{12} = 1$. Der Tx bietet dem Kabaleingang $\Gamma(Tx) = 0$ an, die Antenne dem Kabelaussgang $\Gamma(ANT) = 0,5$. Wir setzen

diese Werte in (6) ein und erhalten für $TPG = 0,75$. Mit (7) ermitteln wir die Leistung von 75 W für die Antenne.

Genau diesen Wert errechnen wir auch mit $R = U/I$ und $P = U \times I$ für unseren Tx, der 100 W an 50 Ω abgibt und damit eine Ursprungsquelle mit $U(Tx) = 141,41$ V und einen Innenwiderstand von $Z(Tx) = 50 \Omega$ besitzt.

Nach der Regel für die Spannungsteilung mit $Z(Tx) = 50 \Omega$ und $Z(ANT) = 150 \Omega$ gibt der Tx dann eine Leistung von 75 W an die Antenne ab.

Spannend ist allein ein Vergleich der beiden Sichtweisen: Der Elektrotechniker, der „klassisch“ rechnet, schaut primär auf die Quelle und sagt, die Quelle erzeugt 100 W, gibt davon aber nur 75 W nach außen an die Last ab, 25 W verbleiben am Innenwiderstand im Inneren der Quelle [7]. Die Quelle gibt also nur so viel Leistung nach außen, wie die Last aufnehmen kann, da darf natürlich auch keine Leistung in die Quelle zurückfließen, sonst stimmt ja die Leistungsbilanz nicht.

Der HF-Techniker dagegen schaut primär auf die Last und sagt, die Quelle gibt stets nach außen, was sie geben kann, also ihre volle Leistung von 100 W. Die Last kann davon aber wegen ihres Reflexionskoeffizienten von 0,5 leider nur 75 W aufnehmen, den Rest schickt die Last wieder als rücklaufende Leistung zur Quelle zurück und in sie hinein [8], sodass die Leistungsbilanz wieder ausgeglichen ist.

Glücklicherweise gibt es zwischen unseren beiden Technikern keinen Streit, da sich beide in der Leistungsbilanz von 75 W für die Last einig sind.

Obwohl beide Sichtweisen dieselbe Situation korrekt erfassen, wird dennoch um die „richtige“ Sichtweise gerungen, wobei die „richtige“ Vorstellung von rückfließender Leistung als Problem ausgemacht wird [9, 10]. Dieses Problem entsteht aber allein dadurch, dass der HF-Techniker dem Elektrotechniker von rückfließender Leistung erzählt hat, die er an seinem Richtkoppler misst. Rücklaufende Leistung ist mit Volt- und Amperemeter nicht zu messen, daher dem Elektrotechniker unbekannt. In seinem Rechenkalkül gibt es eine solche Leistung überhaupt nicht und er benötigt sie auch nicht, um zu korrekten Ergebnissen zu kommen. Versucht er aber dennoch, rückfließende Leistung in sein bisheriges Rechenkalkül zu integrieren, wird er genötigt, eigene, eher unübliche Hilfsbegriffe wie „Totalreflexion“ oder

„negative Leistung“ zu konstruieren. Bedenken sollten wir auch, dass Berechnungen der Leistungsübertragung auf Hochfrequenzleitungen aus der Telegrafengleichung abgeleitet werden und diese Gleichung eine partielle Differentialgleichung 2. Ordnung ist [11]. Spätestens, wenn zur mathematischen Beschreibung einer Situation Differentialgleichungen benötigt werden, endet in der Regel unsere Anschauungs- und Vorstellungskraft.

Station 1: Leitung ohne Tuner

Die Aussagen des vorigen Abschnittes behalten ihre Gültigkeit auch für eine längere Leitung. Deshalb schließen wir die Antenne jetzt nicht mehr direkt an die Ausgangsbuchse des Tx an, sondern benutzen wieder unsere 25 m lange Koaxleitung. Dann gilt: $S_{11} = S_{22} = 0$ und $S_{21} = S_{12} = 0,359$, $\Gamma(\text{Tx}) = 0$ und $\Gamma(\text{ANT}) = 0,5$. Damit vereinfacht sich (6) zu (8). Die Antenne erhält vom Tx die Leistung $P(\text{ANT}) = 9,66$ W.

Station 2: Tuner im Shack

Um diese schlechte Leistungsbilanz zu verbessern, kaufen wir uns einen Tuner-Tx und setzen ihn zwischen Tx und Kabeleingang. Perfekt beherrscht unser Tuner-Tx die Herstellung von konjugiert-komplexen Anpassungen, und zwar gleichzeitig auf seiner Eingangs- und Ausgangsseite. Da er dies nur mit Spulen und Kondensatoren schafft, ist er selbst als (nahezu) verlustfrei anzusehen. An seinem Eingang sieht der Tuner die Impedanz des Tx und passt sich komplex-konjugiert an. So gelangt vom Tx dessen maximale Leistung $P(\text{Tx})_{\text{avs}}$ durch den Tuner an dessen Ausgang. An seinem Ausgang sieht der Tuner die durch die Leitung transformierte Impedanz der Antenne und passt sich hieran ebenfalls konjugiert-komplex an. Das Programm TPG errechnet mit (9) und (7) $P(\text{ANT}) = 9,7$ W. Der teure Tuner erzeugt einen Leistungszuwachs von nur 0,04 W.

Station 3: Optimale Anpassung

Wollen wir die Leistungsübertragung weiter optimieren, so gelingt dies mit dem verwendeten Koaxkabel nur noch, wenn in (9) $\Gamma(\text{ANT}) = 0$ wäre. Dazu wäre die Antennenfußpunkt-Impedanz konjugiert-komplex an die Ausgangsimpedanz der Leitung anzupassen. Ideal hierfür wäre ein Tuner direkt am Antennenfußpunkt, wenn er nur nicht so schwer wäre. Bei einer Monoband-

antenne können wir einen Kondensator und eine Spule in die Balun-Box löten, damit die Anpassung wenigstens in der Bandmitte, auf der eigenen Lieblingsfrequenz oder der bevorzugten Contestfrequenz gegeben ist. Nun herrscht an allen Übergangstellen eine konjugierte-komplexe Anpassung, es gibt keine stehenden Wellen mehr auf unserer Leitung und (6) vereinfacht sich zu (10). Der Tuner im Shack wird damit auch überflüssig, wir können ihn getrost entfernen, er bringt keinen weiteren Leistungszuwachs an der Antenne. Nun haben wir angepasst, was anzupassen geht, das Optimum der Leistungsanpassung ist erreicht. Unsere Antenne erhält dadurch $P(\text{ANT}) = 12,88$ W, es bleibt ein Leistungsverlust allein durch die Kabeldämpfung von 87,12 W übrig. Jetzt hilft nur noch ein besseres Kabel.

Station 4: Das bessere Kabel

Der Umstieg auf beispielsweise Ecoflex15 ergäbe mit $D = 1,55$ dB Dämpfung für den Fall der optimalen Anpassung am Kabelende für die Antenne immerhin $P(\text{ANT}) = 69,98$ W statt wie bisher nur 12,88 W und dies sogar ohne Tuner im Shack.

Fazit

Geben wir es zu: Bisher haben wir auch schon gewusst, dass durch die Kabeldämpfung „etwas weniger“ Leistung an der Antenne ankommt als gedacht. Das Programm TPG ist nun in der Lage, die Wechselwirkungen zwischen SWR und Kabeldämpfung zu berücksichtigen und dieses „etwas weniger“ qualitativ auszuweisen, es ist oft mehr als gedacht. Die Leistungsbilanz der eigenen Station ist mit dem Programm schnell gecheckt. Da wir die Eingangsdaten im Programm TPG einfach variieren können, dürften sich für den einen oder anderen Anwendungsfall auch neue, vielleicht auch überraschende Sichtweisen ergeben:

- Je weniger Leistung das dämpfende Kabel zur Antenne bringt, desto besser ist das SWR im Shack.
- $\text{SWR} = 1,3$ im Shack und dennoch keine Leistung an der Antenne unserer Station
- Ein Kondensator und eine Spule in der Balun-Box steigern die Leistungsbilanz unserer Beispielstation um mehr als 30 %.
- Die Investition in ein gutes Kabel ist oft deutlich effektiver als die Anschaffung eines Tuners im Shack.

Tabelle

P(ANT) [Watt]	Leitung ohne TUNER	Leitung TUNER TX	Leitung TUNER ANT
RG 58 CU	9,66	9,70	12,88
ECOFLEX 15	52,49	59,81	69,98

Tabelle 1: Vom Programm berechnete Werte bei $P(\text{Tx}) = 100$ W, $f = 435$ MHz und 25 m Leitungslänge

- Dem Kabel als Transportmedium für die Tx-Leistung gebührt viel Aufmerksamkeit, vielleicht sogar mehr als allen Anpassungsfragen (**Tabelle 1**).
- Nicht umsonst sind gute Koaxkabel teurer als billige.

Wer etwas tiefer in die Materie einsteigen oder Fußpunktimpedanzen als komplexe Größen eingeben möchte, den darf ich noch auf das Programm NetCas auf meiner Webseite hinweisen. Neben weiteren Parametern ist dort die Leitungsimpedanz frei wählbar, sodass die Leistungsübertragung beispielsweise auch für „Hühnerleitern“ berechnet wird.

Da ich nicht nur an der ständigen Optimierung meiner Station, sondern auch an der Optimierung meiner eigenen Kenntnisse interessiert bin, würde ich mich über Anregungen und Kritik zum Artikel oder dem Programm TPG freuen (E-Mail: cq@dh1um.de).



Literatur und Bezugsquellen

- [1] S. Stearns, K6OIK: www.fars.k6ya.org/docs/Stearns_K6OIK-Facts_about_SWR_and_Loss.pdf
- [2] W. Doberenz: „SWR gut – alles gut?“, CQ DL 4/2019, S. 28 ff
- [3] F. Sichla, DL7VFS: „Kleiner Ratgeber zu HF-Leitungen“, CQ DL 3/23, S. 33ff.
- [4] A. Krishcke: Rothammels Antennenbuch, 13. Auflage (2013), DARC Verlag, S. 158
- [5] J. Müller: Praxiseinstieg in die Vektorielle Netzwerkanalyse, beam-Verlag 2011
- [6] W. T. Joines: Microwave Transmission Line Circuits, Artech House 2013, S. 113
- [7] L. Borucki: Leistungsanpassung in der Funktechnik, 1. Auflage (2005), Verlag für Technik und Handwerk
- [8] L. Popken: Das hartnäckige Mysterium der „Totalreflexion“ auf HF-Leitungen, www.totalreflexion.net/PDF%20Files/Totalreflexion_i1r2.pdf
- [9] F. Sichla, DL7VFS: HF-Leitungen verstehen und nutzen, DARC Verlag, 2012
- [10] L. Borucki: „Leistungsbilanz in einer fehlabgeschlossenen HF-Leitung“, FUNKAMATEUR, 1/09, S. 1164ff.
- [11] O. Zinke, H. Brunswig: Hochfrequenztechnik 1, 6. Auflage, Springer-Verlag 2000, S. 54