

Kleines Praktikum zur SWR-Bestimmung an verlustbehafteten Leitungen

Unter Funkamateuren ist die Berechnung der Antennenanpassung eines der wichtigsten Themen und deshalb finden gerade hier Halbwahrheiten einen idealen Nährboden. Halbwahrheiten sind bekanntlich schwerer zu durchschauen als Lügen, da sie ja in Teilen durch eigene Erfahrungen bestätigt werden.

Mit zwei Halbwahrheiten, mit denen ich im Zusammenhang mit meiner Software (KNWA, Kabelrechner, ...) konfrontiert wurde, beschäftigt sich dieser Beitrag.

Halbwahrheit 1

Das SWR am Leitungsanfang ist nicht vom Innenwiderstand des Generators abhängig, sondern nur von Impedanz und Abschlusswiderstand des Kabels (Andreas, DL5CN).

Halbwahrheit 2

Ein Einfluss der Lastimpedanz eines Kabels auf das SWR am Kabeleingang ist nicht feststellbar (Ludwig, DH8WN).

Die Tragik dieser Halbwahrheiten ist, dass keinerlei Unterscheidung zwischen einer elektrisch kurzen und einer elektrisch langen Leitung stattfindet, was aufgrund der Leitungsdämpfung zu dramatischen Fehleinschätzungen führen kann.

Mit vier einfachen Experimenten, in denen praktische Messergebnisse mit den Ergebnissen einer computergestützten Berechnung verglichen werden, kann man das einfach nachweisen.

Folgende Ausrüstung empfehle ich:

- NanoVNA (ein bekannter und mittlerweile sehr preisgünstig erhältlicher Vektorieller Netzwerkanalysator)
- eine kurze (22cm) und eine lange (9,3m) Messleitung aus dünnem Koaxkabel RG316U
- drei HF-taugliche ohmsche Widerstände (400Ohm, 20Ohm, 10Ohm) und ein 300pF-Kondensator
- Windows PC mit der Freeware *nanovna-saver* und das Simulationsprogramm *KNWA*¹ (Kleiner Netzwerkanalysator).

¹ Im Unterschied zu anderen Programmen für die Wechselstromanalyse elektrischer Schaltungen (z.B. *LTSpice*) modelliert der *KNWA* auch die wichtigsten Bauelementeverluste (insbesondere auch die Leitungsdämpfung),

Versuch 1

Messung vs Berechnung des eingangsseitigen SWR mit fragwürdiger Formel

Wie oft vor allem in der Hobby-Literatur, im Internet, aber leider auch in Hörsälen verbreitet wird, berechnet sich das SWR am Kabeleingang aus dem Wellenwiderstand Z_L des Kabels und dessen Abschluss Z_A wenn die Voraussetzung $Z_G = Z_L$ erfüllt ist.

"Schöne heile Welt" möchte man meinen, denn Leitungslänge, Leitungsdämpfung und Frequenz scheinen hier keine Rolle zu spielen (Bild 1):

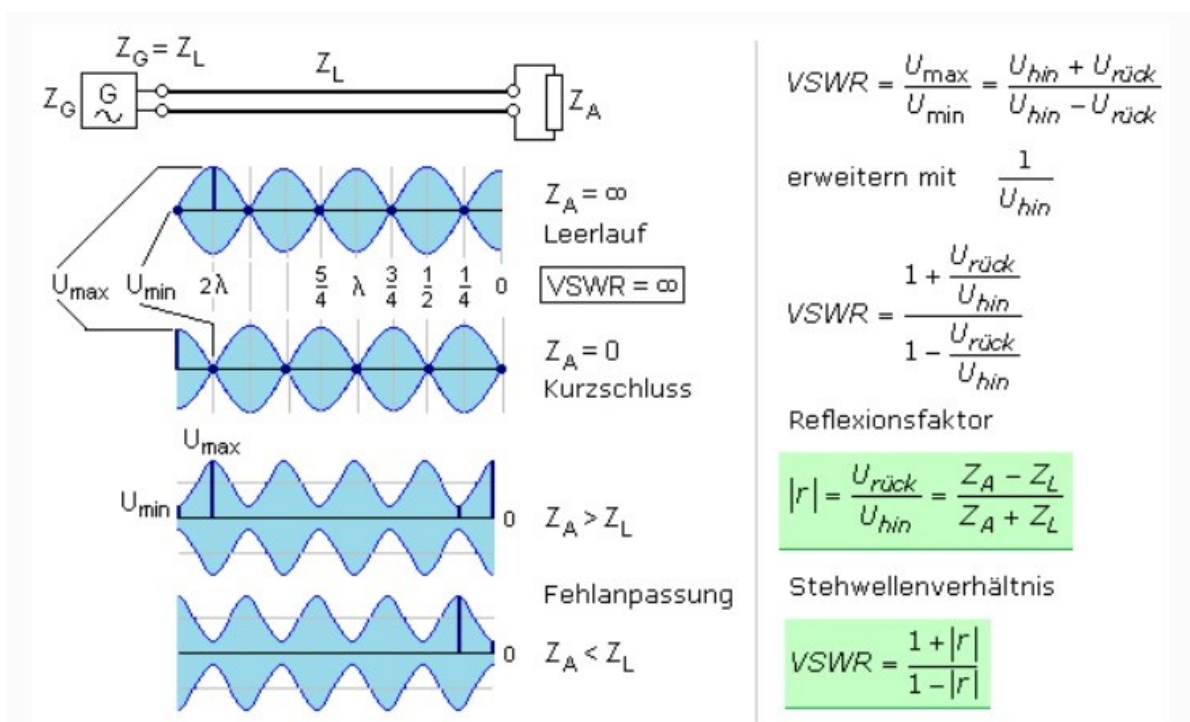


Bild 1: Fragwürdige Berechnung des Stehwellenverhältnisses am Eingang einer Leitung (Quelle Internet)

Nehmen wir zum Beispiel $Z_A = 400\text{Ohm}$ und $Z_L = 50\text{Ohm}$ so ergibt sich $|r| = 0,78$ und $VSWR = 8$.

Messung

- Schließe an PORT1 des VNA über das 26cm lange Messkabel einen ohmschen Widerstand von 400Ohm an und mache eine SWR-Messung im Bereich von 1MHz bis 50MHz (Bild 2a).
- Der 400Ohm-Abschluss sollte ein einigermaßen HF-tauglicher Typ sein (z.B. ausgemessen aus einer Charge 390Ohm, 10% , 1/10W).
- Das 50Ohm Messkabel ist vom Typ RG316U (Verkürzungsfaktor 0,695; Dämpfung lt. Katalog bei 50MHz etwa 19dB/100m, bei 1MHz ca. 2,7dB/100m).

Der VNA bestätigt das berechnete $SWR = 8$ bei 1MHz in guter Näherung, der leichte Abfall bei höheren Frequenzen ($SWR = 7,8$ bei 50MHz) ist für den Praktiker bedeutungslos.

Viel besser als auf dem kleinen NanoVNA-Display kann man diese Werte mit der Software *nanovna-saver* ablesen (Bild 2b).

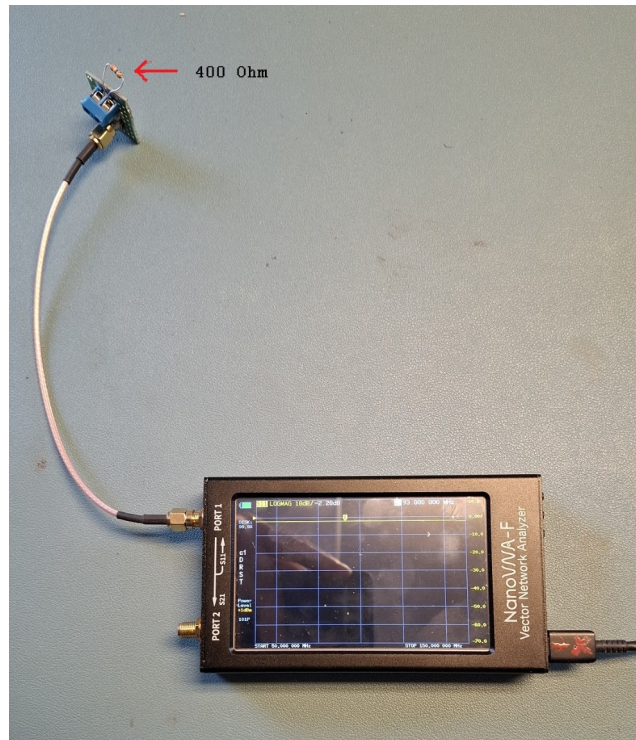


Bild 2a: Messung des Stehwellenverhältnisses am Eingang einer kurzen Leitung mit dem NanoVNA

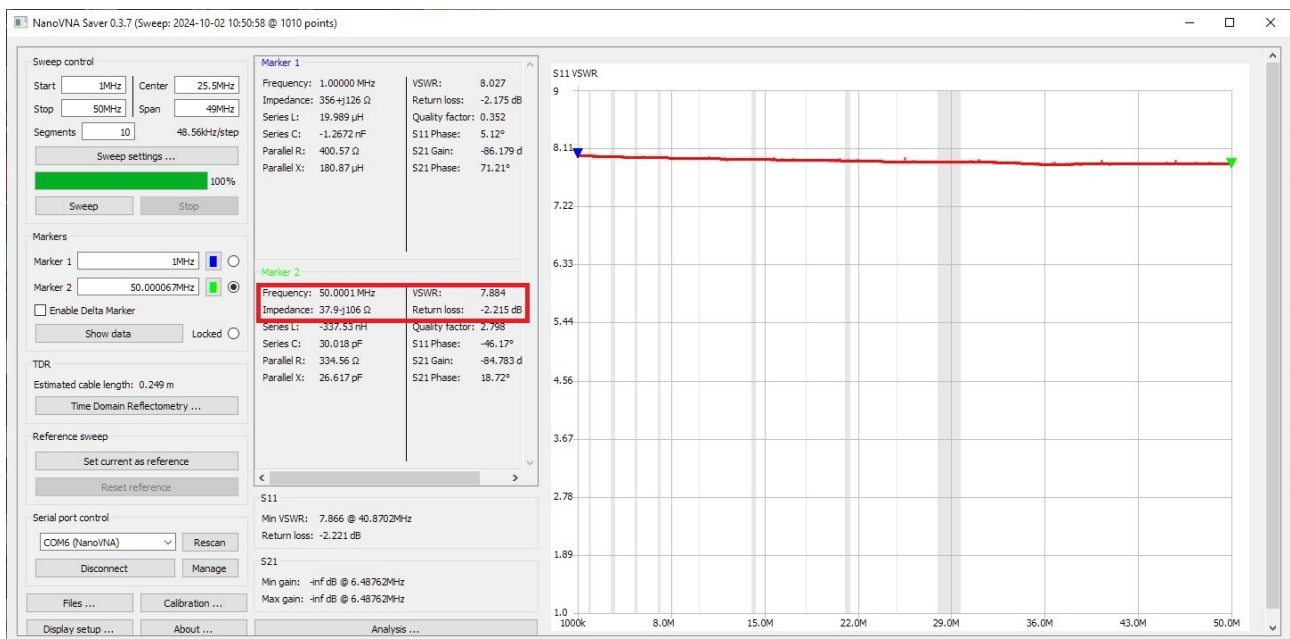


Bild 2b: Mit der Software *nanovna-saver* können SWR-Verlauf und Eingangsimpedanz der Leitung viel genauer als auf dem Display des NanoVNA abgelesen werden

Simulation

Zum Vergleich von Theorie und Praxis modellieren wir die Messanordnung mit dem KNWA-Tool (Bild 3).

Unter Berücksichtigung von Modellgenauigkeiten und Messtoleranzen wird das mit dem VNA erzielte Messergebnis in guter Näherung bestätigt.

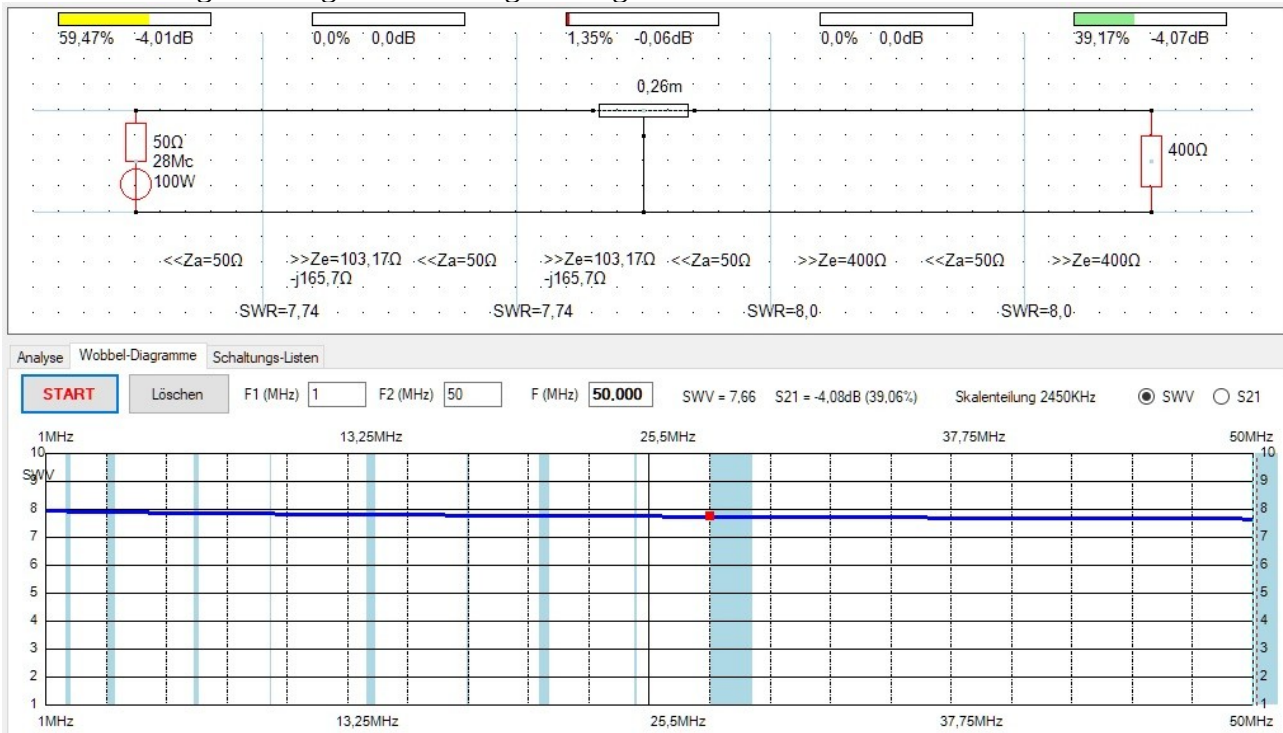


Bild 3: Die Simulation der NanoVNA-Messung im Frequenzbereich 1...50MHz mit dem KNWA liefert exakt das gleiche Ergebnis und bestätigt u.a. den dämpfungsbedingten leichten SWR-Abfall in Richtung höherer Frequenzen

Diskussion

Offensichtlich bestätigen Messung und Simulation die "Halbwahrheit 1" in guter Näherung, es scheint deshalb zunächst keinen Widerspruch zwischen Theorie und Praxis zu geben.

Versuch 2

Messung vs Berechnung des eingangsseitigen SWR bei elektrisch langer Leitung

Im Messbereich 1 ... 50MHz kann man das im **Versuch 1** verwendete Messkabel der Kategorie "**elektrisch kurze Leitung**" zuordnen, denn selbst an der oberen Frequenzgrenze ist die Wellenlänge mit 6m immer noch deutlich größer als 26cm.

Von einer "**elektrisch langen Leitung**" kann man erst dann sprechen, wenn ihre Länge deutlich die Wellenlänge der Betriebsfrequenz übersteigt.

Der leicht abfallende SWR-Verlauf im Versuch 1 (Bild 2 und 3) deutet bereits auf den Übergang der elektrisch kurzen zur elektrisch langen Leitung hin und hat seine Ursache in der wachsenden Leitungsdämpfung, die beim RG316U im Bereich 1MHz...50MHz von ca. 2,7dB/100m auf 19dB/100m ansteigt.

In Versuch 1 war die Leitung mit 26cm "elektrisch kurz" gegenüber der Wellenlänge des Mess-Signals am oberen Bereichsende (6m bei 50MHz), nun wollen wir ein deutlich längeres Stück nehmen.

Messung

Wir entfernen das kurze Kabel und schließen stattdessen das 9,3m lange RG316U an (Bild 4).

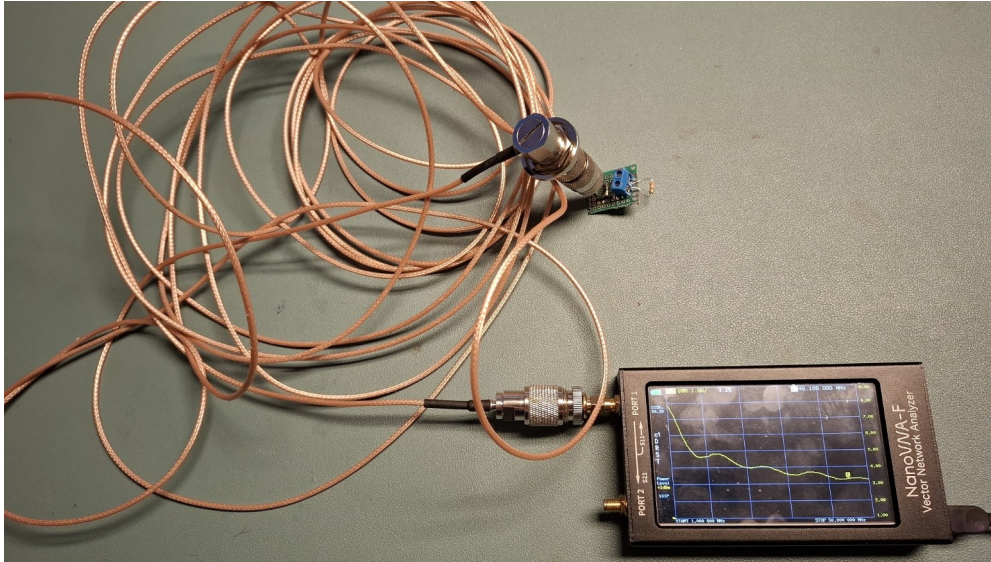


Bild 4: Wiederholung der Messung mit einer 9,3m Leitung

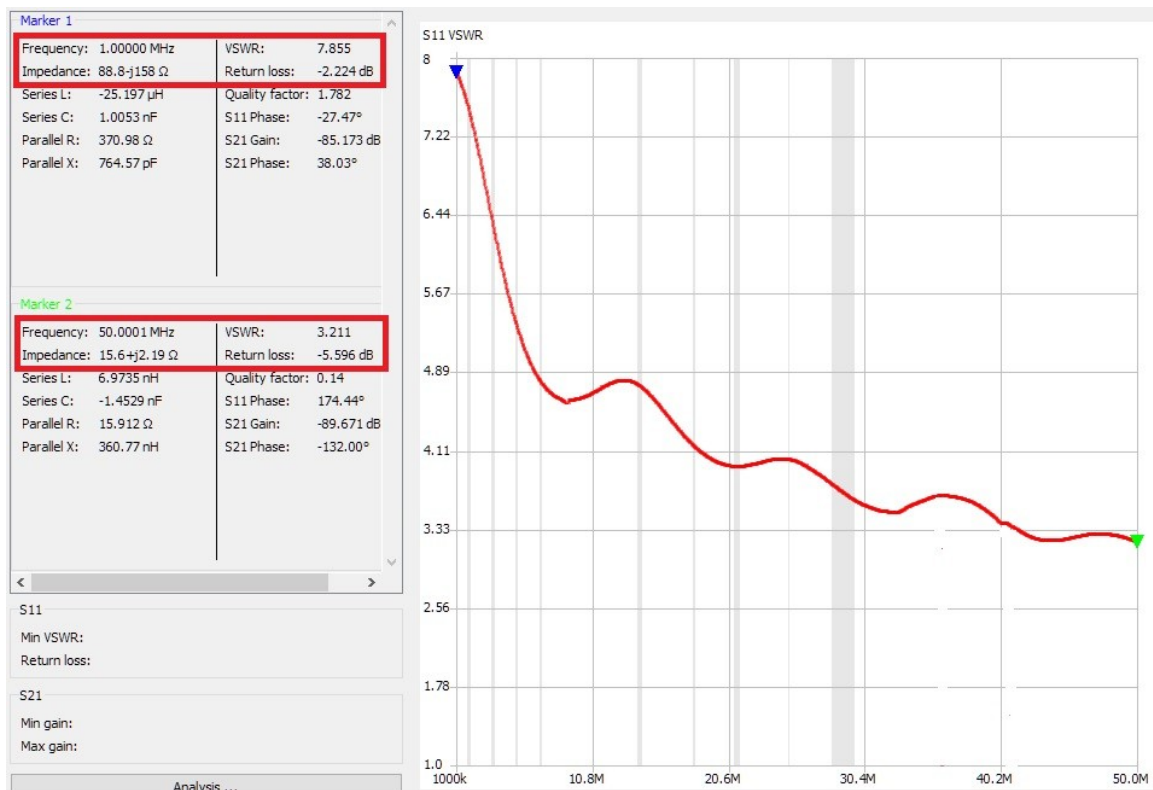


Bild 5: Auswertung der SWR-Messung (Bild 5) mit der Software *nanovna.saver*. Im Vergleich mit Bild 2 und 3 zeigt das SWR jetzt einen völlig anderen Verlauf, es bleibt im Messbereich 1...50MHz nicht konstant, sondern fällt deutlich von 7,8 auf 3,2.

Diskussion

"Halbwahrheit 1" ist widerlegt (Bild 5), denn die einfache Formel für den Reflexionsfaktor (Bild 1) ist **falsch**, sie liefert auch bei 50MHz ein VSWR = 8, der NanoVNA hingegen misst VSWR = 3,2!

$$|r| = (Z_A - Z_L) / (Z_A + Z_L) \quad ???$$

Richtig aber ist

$$\underline{r} = (\underline{R}_G - \underline{Z}_E) / (\underline{R}_G + \underline{Z}_E) \quad !!!$$

denn der Reflexionsfaktor wird gegen einen reellen Generatorwiderstand R_G und einen i.a. komplexen Lastwiderstand $\underline{Z}_E = R_E + jX_E$ gemessen².

In der "falschen" Formel wird Z_L gleichgesetzt mit der Eingangsimpedanz \underline{Z}_E der Leitung, aber der Generator "sieht" tatsächlich nicht Z_L sondern er "sieht" \underline{Z}_E (gewissermaßen das durch die Leitung auf den Eingang transformierte \underline{Z}_A)!

Dass diese "falsche" Formel im Versuch 1 trotzdem ein nahezu richtiges Ergebnis geliefert hat liegt an der Vernachlässigung der Leitungsdämpfung und an dem hier zutreffenden Sonderfall $Z_G = Z_L$

Wir setzen nun die vom NanoVNA gemessene Eingangsimpedanz $\underline{Z}_E = 15,6 + j2,19\text{Ohm}$ (Bild 5) in die "richtige" Formel ein:

$$\underline{r} = (50 - 15,6 - j2,19) / (50 + 15,6 + j2,19) = (34,4 - j2,19) / (65,6 + j2,19)$$

Wer das Rechnen mit komplexen Zahlen (Phasoren) geübt hat³ erhält als Ergebnis

$$\underline{r} = 0,52 - j0,051 \text{ und daraus den Betrag des Reflexionsfaktors zu}$$

$$|\underline{r}| = 0,522$$

Daraus ergibt sich

$$\text{VSWR} = 1 + |\underline{r}| / (1 - |\underline{r}|) = 1 + 0,522 / (1 - 0,522) = 1,522 / 0,478 = 3,19$$

Abgesehen von Rundungsfehlern wird damit die NanoVNA-Anzeige bestätigt, d.h., auch die Entwickler des NanoVNA haben offenkundig die \underline{r} -Definition der klassischen Vierpoltheorie übernommen!

Simulation

Das für den KNWA entwickelte Leitungsmodell liefert für 50MHz den Wert $\underline{Z}_E = 16,1 - j5,61\text{Ohm}$, was einem SWR von ca. 3,2 entspricht.

Die Simulation (Bild 6) bestätigt in brauchbarer Näherung die Messergebnisse des NanoVNA.

² Die Unterstriche bedeuten, dass es sich um komplexe Größen (Phasoren) handelt, die sich aus Real- und Imaginärteil (bzw. aus Betrag und Phase) zusammensetzen.

³ Mit dem *Formelrechner* der JWD-Tools lässt sich auch die Division von Phasoren bequem durchführen.

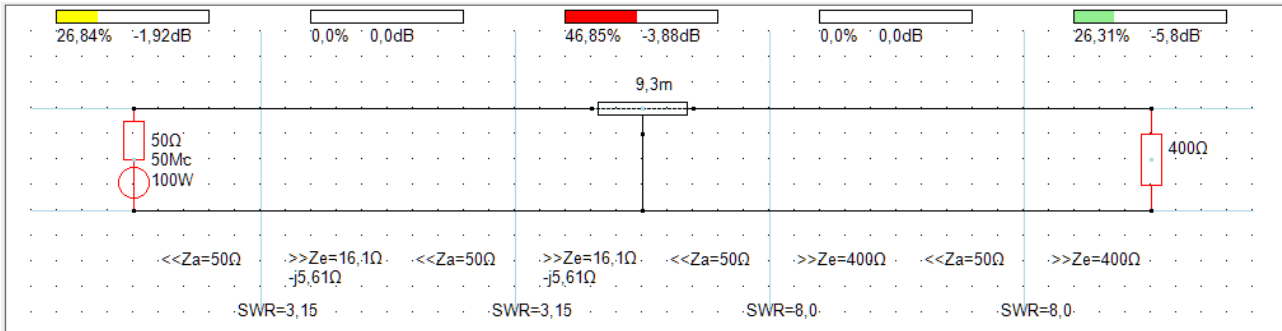


Bild 6: Die 50MHz-Simulation bestätigt die VNA-Messung (Bild 5). Offensichtlich rechnet der KNWA auch für eine elektrisch lange Leitung richtig! Man beachte die hohen Kabelverluste von fast 50%.

Auch das was bereits viele OM's selbst in der Praxis erlebt haben dürften lässt sich mit dem KNWA bequem nachvollziehen:

Macht man das 50Ohm-Antennenkabel lang und länger, nähert sich das VSWR allmählich dem Wert 1, egal ob hinten eine Antenne angeschlossen ist oder nicht.

Allerdings wird dabei immer mehr kostbare HF-Energie verheizt.

Wie der rote Balken in Bild 6 zeigt, geht bei 9,3m Leitungslänge und 50MHz bereits fast die Hälfte der maximal verfügbaren Generatorleistung im Kabel verloren.

Wie eine weitere Simulation zeigt, ist z.B. bei 100m Leitungslänge ein ideales SWR bereits ab ca. 14MHz erreicht (Bild 7).

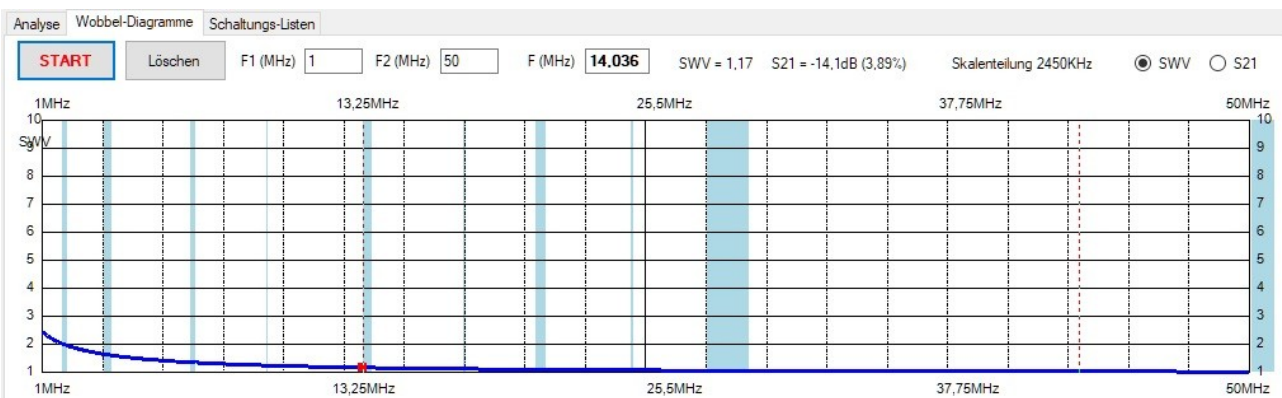


Bild 7: KNWA-Simulation des SWR-Verlaufs im Bereich 1..50MHz einer 100m langen RG316U - Leitung mit 400Ohm Abschluss. Ab ca. 14MHz stellt sich am Leitungsanfang ein konstantes SWR=1 ein.

Man kommt durch "Spielen" mit den Modellparametern des KNWA schnell zur Erkenntnis, dass es aufgrund der Leitungsdämpfung bei einem elektrisch sehr langen Kabel immer egalere wird ist, mit welcher Lastimpedanz Z_A die Gegenseite beschaltet ist, die Eingangsimpedanz Z_E der Leitung nähert sich mit wachsender Frequenz oder Länge allmählich deren Wellenwiderstand!

Demzufolge wird, völlig unabhängig vom fiktiven Innenwiderstand des Generators, das VSWR ebenfalls unverändert bleiben!

Der Preis für das gute SWR:

Wie bereits Bild 6 andeutet, lassen sich elektrisch sehr lange Kabel zwar perfekt anpassen, aufgrund ihrer sehr hohen Verluste sind sie aber i.d.R. nicht für Sende- sondern eher nur für Empfangszwecke (z.B. Gemeinschaftsantennenanlagen) geeignet.

Ein Wort zum Generatorwiderstand R_G

Alle realen elektrische Quellen haben einen Innenwiderstand!

Man spricht von Anpassung, wenn der Innenwiderstand R_G des Generators (Sender) gleich dem Eingangswiderstand Z_E des Verbrauchers (Antennenzuleitung mit vorgeschalteter Anpassung) ist. Nur wenn dieser Zustand herrscht, kann größtmögliche Leistung übertragen werden.

Ist, wie z.B. bei Selbstbau-PAs, der exakte Wert des Innenwiderstands R_G nicht exakt feststellbar, muss der Konstrukteur trotzdem wissen, welche Lastimpedanz Z_E der PA-Ausgang bei idealer Anpassung "sehen" soll, meist sind das reelle 50Ohm⁴.

Versuch 3

Ist das antennenseitige SWR unabhängig von der Eingangsbeschaltung?

Nein, denn zumindest im unteren bis mittleren KW-Bereich sind die üblichen Antennenkabel im Vergleich zur Wellenlänge ziemlich kurz.

Zum Beispiel beträgt die Länge unseres 9,3m RG316U Kabels auf 3,65MHz nur noch ein reichliches Zehntel der Wellenlänge, es handelt sich hier also um eine "elektrisch kurze" Leitung. Man braucht weder VNA noch KNAWA um festzustellen, dass sich in diesem Fall bei einer Antennenimpedanz von 400Ohm ein antennenseitiges SWR = 8 einstellen wird (vgl. Bild 1).

Simulation

Wir schalten zum Generator einen 100Ohm Widerstand parallel und beobachten, ob dadurch auch das antennenseitige SWR beeinflusst wird.

Tatsächlich, wie Bild 8 zeigt, ändert sich das antennenseitige SWR durch Änderung der senderseitigen Anpassung an die Leitung deutlich von vorher 8,0 auf 11,5!

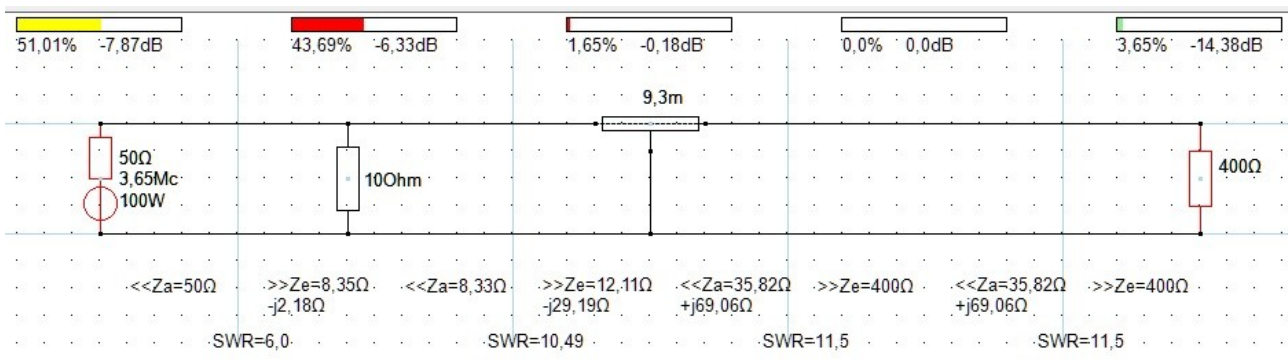


Bild 8: Deutliche Änderung des antennenseitigen SWR durch Herabsetzung der Generatorimpedanz. (bei 3,65MHz handelt es sich um eine "elektrisch kurze" Leitung).

4 Vor langer Zeit hatte ich detailliert die Berechnung einer transistorisierten Gegentakt-PA beschrieben in "Eine einfache 10-W-QRP-Endstufe für Kurzwelle" (FA 1984, Heft 2, S.89ff oder auch im FUNKAMATEUR Digest, Theuberger Verlag 1998, S.77ff)

Diskussion

Auch "Halbwahrheit 2" ist widerlegt, denn diese gilt nur für elektrisch lange Leitungen. Erst dann bleibt z.B. die Parallelschaltung eines 10Ohm-Widerstands zum Kabeleingang ohne Auswirkung auf das ausgangsseitige SWR (Bild 9).

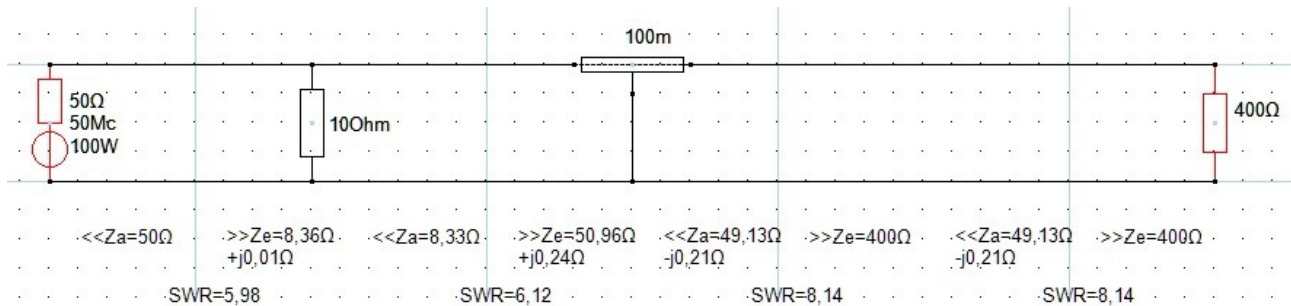


Bild 9: Deutliche Verschiebung der Ausgangsreflexion durch Änderung der Generatorimpedanz

Unseren kurzen Briefwechsel zu diesem Thema hat OM Ludwig, Professor für Kommunikationssysteme und Übertragungstechnik an der FH Jena, leider abgebrochen.

Nachdem er mir seine "Beweisführung" unter Verwendung des untauglichen, weil verlustfreien Leitungsmodells von *LTspice* präsentierte war für ihn offensichtlich das Problem erledigt. Es ist deshalb zu befürchten, dass er immer noch, auch im Hörsaal, seine Halbwahrheiten verkündet⁵.

Versuch 4

Hängt die Anpassung am Leitungsende von den Verhältnissen am Leitungseingang ab?

OM Andreas, ein bekannter und begnadeter Praktiker auf dem Gebiet des Satellitenfunks, bläst in das gleiche Horn wie Ludwig.

Allerdings vermeidet er genauere Messungen wie z.B. mit einem VNA, sondern hat seine "Halbwahrheit 2" u.a. mit einem abenteuerlichen Aufbau begründet:

Ein soeben durchgeführter Versuch mit einer Anordnung aus Sender, Einschleifstelle für zusätzliche BE (R,L,C) zur Beeinflussung des Generators, Kabel, SWR-Meter, Matchbox, Last(Glühlampe)
Ergebnis:

Das mit der LC-Anpassung (maximale Helligkeit der Glühlampe und größte Rückflußdämpfung am SWR-Meter) erreichbare gute SWR ist mit den veränderlichen, zusätzlichen BE am Kabeleingang nicht zu beeinflussen.

Wohl wird und das erscheint mir logisch, die Vorlaufleistung geringer.

Dieses scheinbare Erfolgserlebnis verleitet Andreas zu einer bizarren Kritik am KNWA, für die ihn angeblich auch sein Mentor Ludwig den Segen erteilt hat:

⁵ Möglicherweise liegt es auch daran, dass Ludwig vor seiner Berufung an die FH Jena jahrelang in der Telekommunikation tätig war, wo man es von Haus aus vor allem mit elektrisch ziemlich langen Leitungen zu tun hat.

Nicht einverstanden bin ich deshalb mit Deiner Darstellung, dass die Stehwellsituation auf einer abgeschlossenen (Koax)-Leitung auch von der Generatorimpedanz bestimmt wird. Im Übrigen stimme ich da mit Ludwig und einigen anderen, befragten Bekannten völlig überein.

Leider hat mir Andreas weder die Länge des Kabels noch die Messfrequenz mitgeteilt, ich kann mir aber seine Ergebnisse nur so erklären, dass er eine "elektrisch lange" Leitung verwendet hat.

Simulation

Hier der Versuch zu beweisen, dass die Erkenntnisse von Andreas in einem ähnlichen Messaufbau für "elektrisch kurze" Leitungen nicht mehr zutreffen.

Dazu wähle ich die Frequenz 50MHz (Wellenlänge 6m) und passe mein 9,3m RG316 Kabel über ein LC-Glied (Matchbox) an 400Ohm an (Bild 10a).

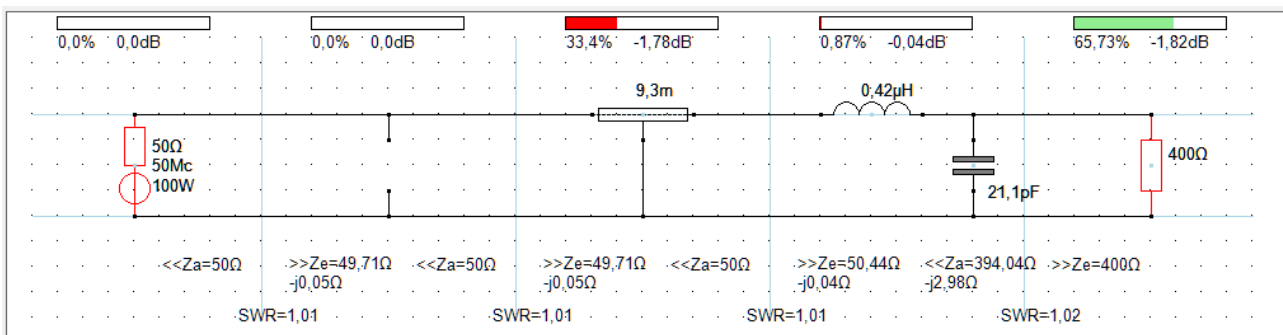


Bild 10a: Anpassung an eine 100W Glühlampe (400Ohm).

Bei 50MHz und einer maximal verfügbaren Generatorleistung von 100W werden ca. 65W in der Lampe umgesetzt, 33W heizen das 9,3m langen RG316U.

Die Transmission (S₂₁) ist etwa 65%, d.h., bei einer 100W-PA und einem Widerstand von ca. 400Ohm (100W-Glühlampe) werden ca. 65Watt abgestrahlt.

Der Rest wird im Kabel verheizt, die Verluste in der LC-Anpassung (Q_L=250, Q_C = 1000) sind vernachlässigbar.

Danach schalte ich parallel zum Generator einen 300pF-Kondensator (ca. 10Ohm Blindwiderstand bei 50MHz) und sehe, wie dramatisch sich diese Änderung auf das ausgangsseitige SWR und die Transmission auswirkt (Bild 10b).

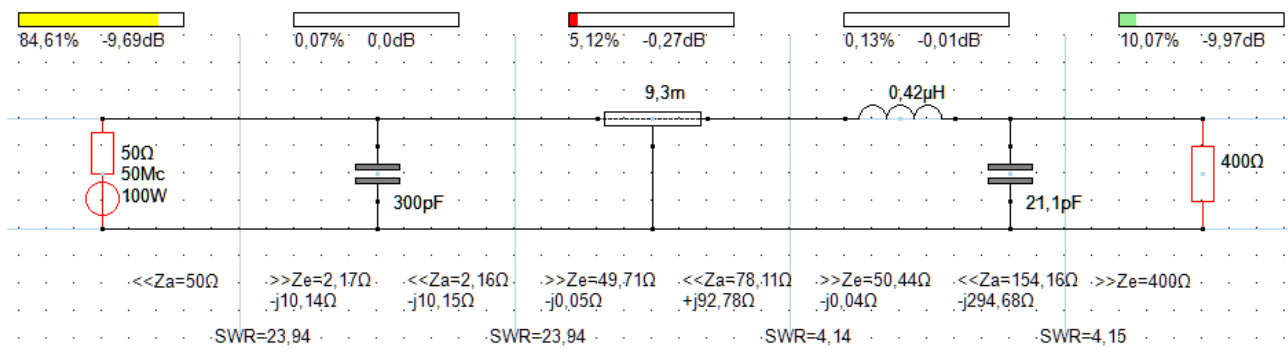


Bild 10b: Nach Beschaltung des Generators mit 300pF werden von der Lampe nur noch 10W abgestrahlt.

Nun könnte ich zwar mittels Matchbox wieder auf ein perfektes ausgangsseitiges SWR nachstimmen, aber das ändert nur unwesentlich etwas am negativen Einfluss der 300pF Eingangsbeschaltung und steigert die Transmission nur minimal (Bild 10c).

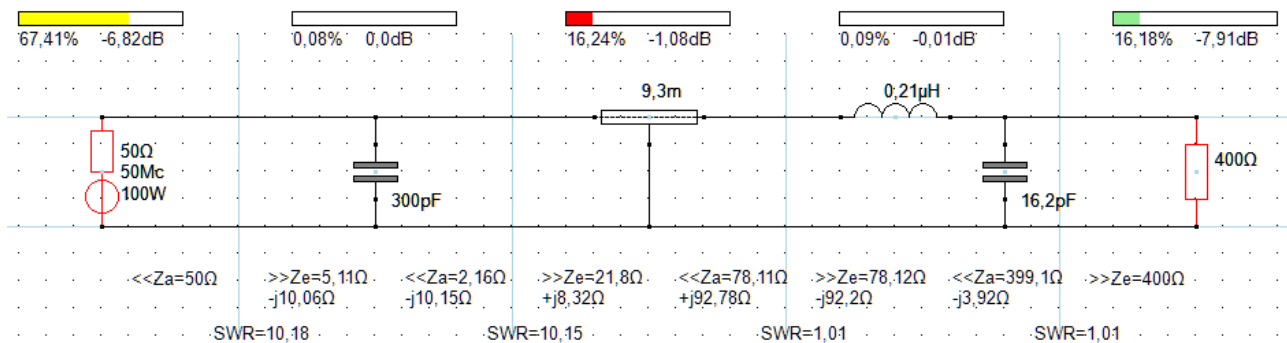


Bild 10c: Die nachträgliche Korrektur des ausgangsseitigen SWR erhöht die abgestrahlte Leistung auf 16W

Diskussion

Auch dieser Versuch hat bestätigt, dass bei den für Kurzwelle typischen "kurzen" Leitungen durch Veränderung des SWR am Leitungseingang auch das SWR am Ausgang stark beeinflusst wird (und umgekehrt)!

Den praktischen Aufbau der Schaltung habe ich mir diesmal guten Gewissens erspart, denn auch eine VNA-Messung wird letztendlich zu keinem deutlich anderen Ergebnis wie der KNWA führen.

Schlussbemerkungen

Die von Andreas und Ludwig verkündeten Halbwahrheiten mögen entweder nur für elektrisch lange oder nur für elektrisch kurze Leitungen zutreffend sein, sie sind aber nicht allgemeingültig! Für die im AFU üblichen Längen und Leitungsdämpfungen sind sie oft falsch und irreführend!

Der Eingangswiderstand einer Leitung ist nicht zu verwechseln mit deren Wellenwiderstand! Die PA "sieht" also nicht den Wellenwiderstand des Kabels sondern dessen Eingangsimpedanz, umgekehrt gilt dasselbe auch für die Antennenseite.

Diese Erkenntnisse sind keine Erfindung eines "abgehobenen Theoretikers" sondern werden durch Messungen bestätigt und sind seit uralten Zeiten fester Bestandteil der Vierpoltheorie (eine Vorlesungsreihe *Wechselstromanalyse elektrischer Netzwerke* Vorlesung mit entsprechenden Praktika habe ich jahrelang selbst an der Ingenieurhochschule Mittweida verantwortet⁶).

In meinen Tools (*HamVNAS*, *KNWA*, *Kabelrechner*, *Doppelzepprechner*, ...) verwende ich die *Knotenspannungsanalyse* (ein Sondergebiet der Vierpoltheorie). Dazu wird vom Computer zunächst die komplexe \underline{Y} -Vierpolmatrix der Schaltung aufgestellt. Nach Beschalten von Input- und Output-Tor mit Generator- bzw. Lastimpedanz können dann die Betriebsparameter (Ein- und Ausgangsimpedanz, Reflektionsfaktoren, Transmission, ...) leicht ermittelt werden. Die Transformation von Y- in S-Parameter (und umgekehrt) ist problemlos.

⁶ Pflichtliteratur für Studenten war z.B. Schröder, H.: Elektrische Nachrichtentechnik, Bd.1: Grundlagen, Theorie und Berechnung passiver Übertragungsnetzwerke

Beim Vergleich Vierpoltheorie vs Leitungstheorie kann ich, zumindest aus Sicht eines Amateurfunkers, nur die Vierpoltheorie empfehlen, denn sie konzentriert sich auf das Verhalten linearer Netzwerke bei sinusförmiger Erregung im stationären (eingeschwungenen) Zustand. Die dadurch mögliche Anwendung komplexer Zahlen (Phasoren) vereinfacht die Berechnung erheblich und liefert i.d.R. zuverlässige Ergebnisse. Hingegen sind die Formeln und Differentialgleichungen der Leitungstheorie zwar allgemeingültiger (z.B. Impulsantworten), verleiten aber zu **schwammigen Aussagen** wie z.B.

- *... es geht ja immer um den Transport einer Energie per Kabel zu einer Last, Antenne, etc.... (Andreas)*
- *... beim Wellenwiderstand werden zwei Wellen extra betrachtet und bei der Impedanz die Überlagerung der beiden Wellen.... (Ludwig)*

Gern hätte ich diese interessante Thematik, so wie es der Ham-Spirit verlangt, mit beiden OMs weiter ausdiskutiert in der Hoffnung, dass beide selbst einmal die von mir vorgeschlagenen kleinen Messungen und Berechnungen durchführen um die großen Defizite ihrer Behauptungen mit eigenen Augen zu erkennen.

Aber nachdem unser Meinungsaustausch gerade begonnen hatte so richtig interessant zu werden herrscht plötzlich "Schweigen im Wald", weshalb ich mich letztendlich zur Veröffentlichung auf meiner Homepage entschlossen habe.

73 de Walter DL1JWD