

## Kleines Praktikum zur SWR-Bestimmung an verlustbehafteten Zweidraht-Leitungen

Unter Funkamateuren ist die Berechnung der Antennenanpassung eines der wichtigsten Themen überhaupt 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, Doppelzepprechner...) konfrontiert wurde, beschäftigt sich dieser Beitrag. Aus Gründen des Datenschutzes nenne ich die beteiligten OMs mal Max und Moritz.

### Halbwahrheit 1

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

### Halbwahrheit 2

*Ein Einfluss der Lastimpedanz eines Kabels auf das SWR am Kabeleingang ist nicht feststellbar (OM Moritz).*

---

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.

Folgendes Equipment für den Messaufbau habe ich verwendet:

- NanoVNA (ein bekannter und mittlerweile sehr preisgünstig erhältlicher Vektorieller Netzwerkanalysator)
- eine kurze (22cm) und eine zufällig vorhandene lange (9,3m) Messleitung aus dünnem verlustarmen 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*<sup>1</sup> (Kleiner Netzwerkanalysator).

---

<sup>1</sup> Im Unterschied zu anderen Programmen für die Wechselstromanalyse elektrischer Schaltungen (z.B. *LTSpice*) berücksichtigt der *KNWA* auch die frequenzabhängige 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 1a):

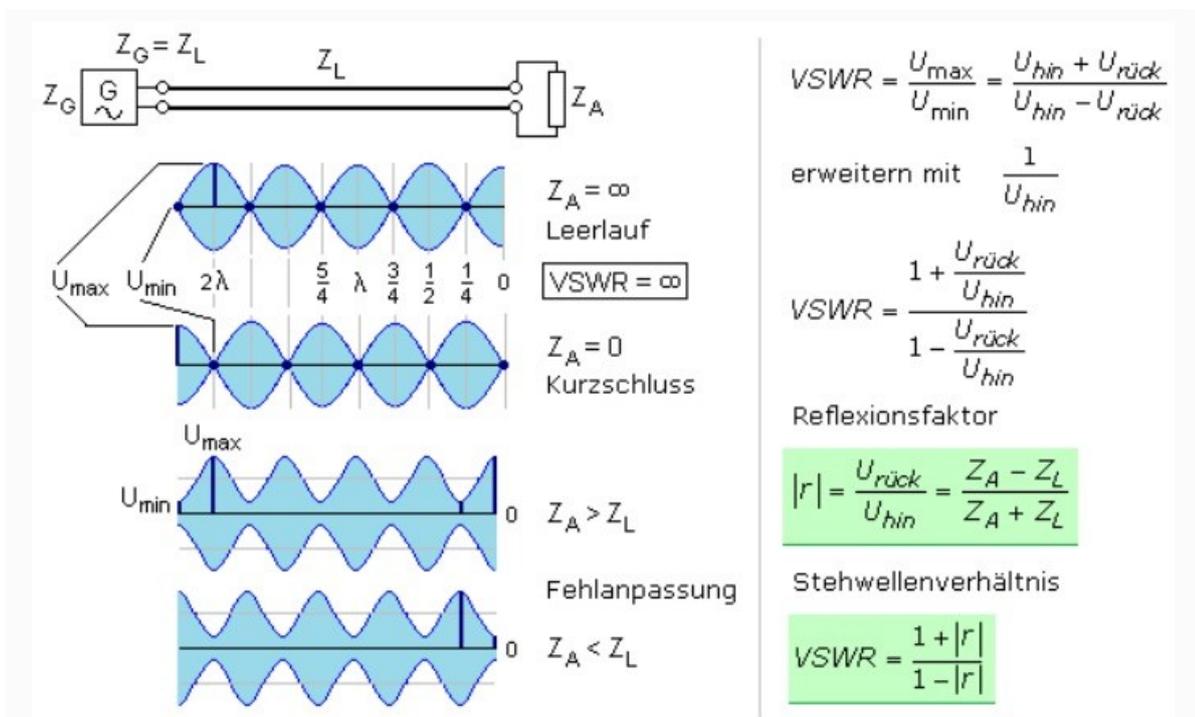


Bild 1a: Fragwürdige Berechnung des Stehwellenverhältnisses am Eingang einer Leitung (Quelle Internet)

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

## Messung

- Schließe an PORT1 des VNA über das 26cm lange Messkabel einen ohmschen Widerstand von  $400\Omega$  an und mache eine SWR-Messung im Bereich von 1MHz bis 50MHz (Bild 1b).
- Der  $400\Omega$ -Abschluss sollte ein einigermaßen HF-tauglicher Typ sein (z.B. ausgemessen aus einer Charge  $390\Omega$ , 10%, 1/10W).
- Das  $50\Omega$  Messkabel (22cm) 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.

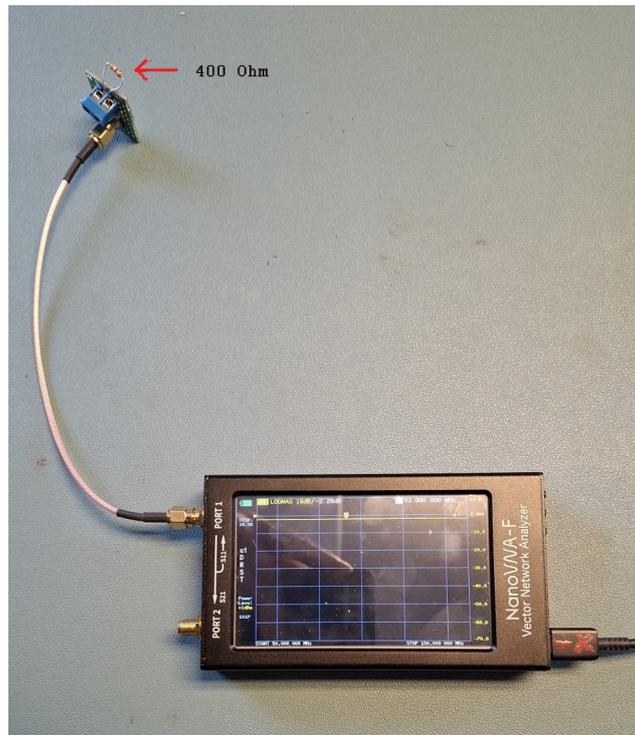


Bild 1b: Messung des Stehwellenverhältnisses am Eingang einer kurzen Leitung mit dem NanoVNA

Viel besser als auf dem kleinen NanoVNA-Display kann man diese Werte allerdings mit dem Programm *nanovna-saver* ablesen (Bild 1c).

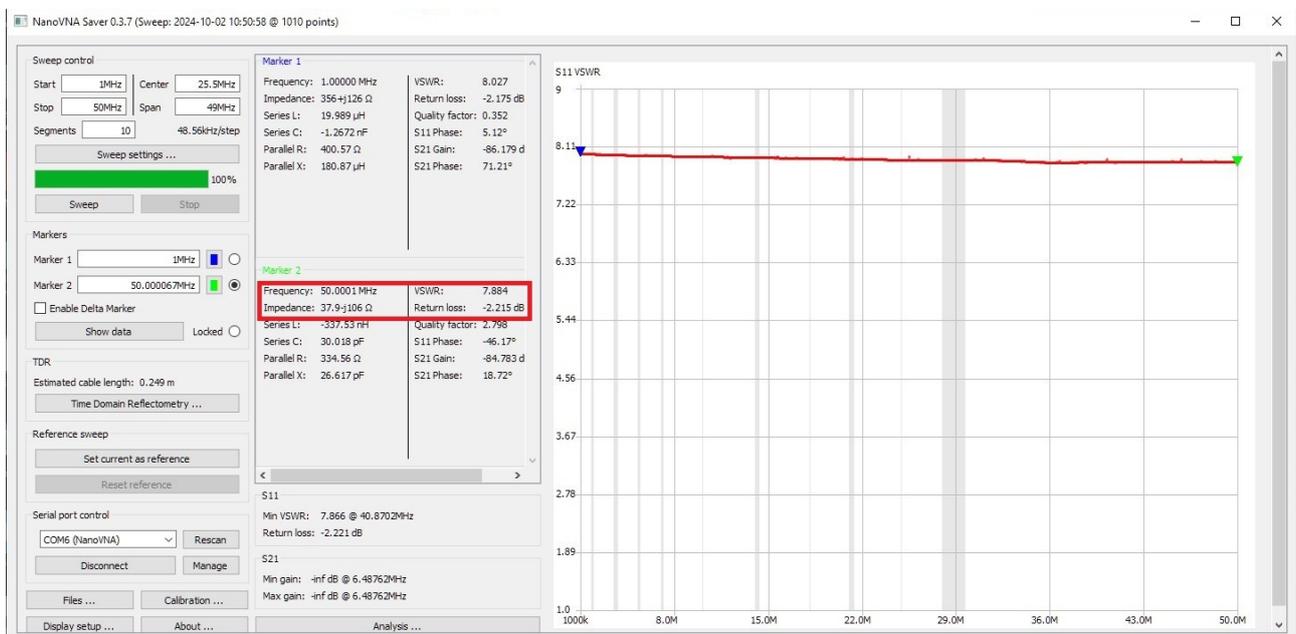


Bild 1c: Mit dem Programm *nanovna-saver* können SWR-Verlauf und Eingangsimpedanz der Leitung viel genauer als auf dem Display des NanoVNA abgelesen werden

## Simulation

Zum Vergleich von Theorie und Praxis modellieren wir die Messanordnung mit dem KNWA-Tool (Bild 1d).

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

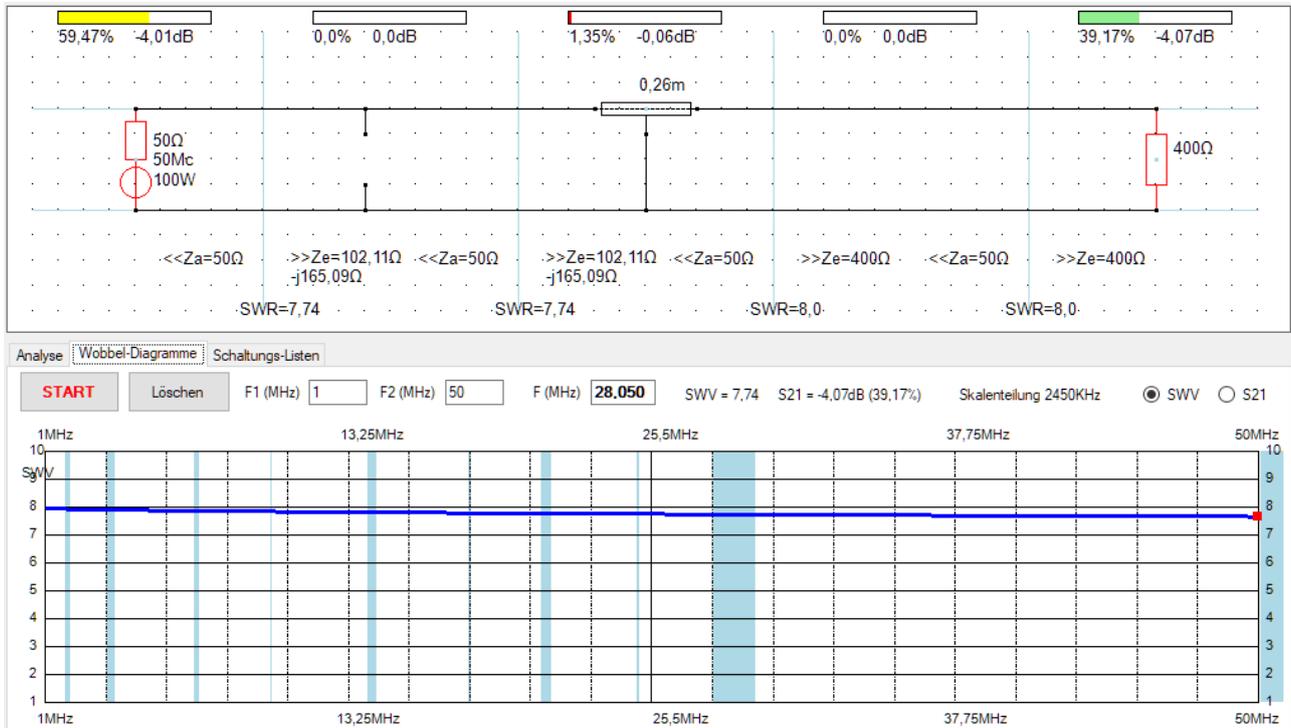


Bild 1d: Der Vergleich der NanoVNA-Messung im Frequenzbereich 1...50MHz mit dem KNWA liefert das gleiche Ergebnis und bestätigt u.a. den dämpfungsbedingten leichten SWR-Abfall in Richtung höherer Frequenzen

## 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 ist das im **Versuch 1** verwendete Messkabel eine so genannte "**elektrisch kurze Leitung**", denn selbst an der oberen Frequenzgrenze ist die Wellenlänge mit **6m** immer noch deutlich größer als **26cm**.

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

Der leicht abfallende SWR-Verlauf im Versuch 1 (Bilder 1c und 1d) 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.

### Messung

Wir entfernen das kurze Kabel und schließen stattdessen das 9,3m lange RG316U an (Bild 2a).

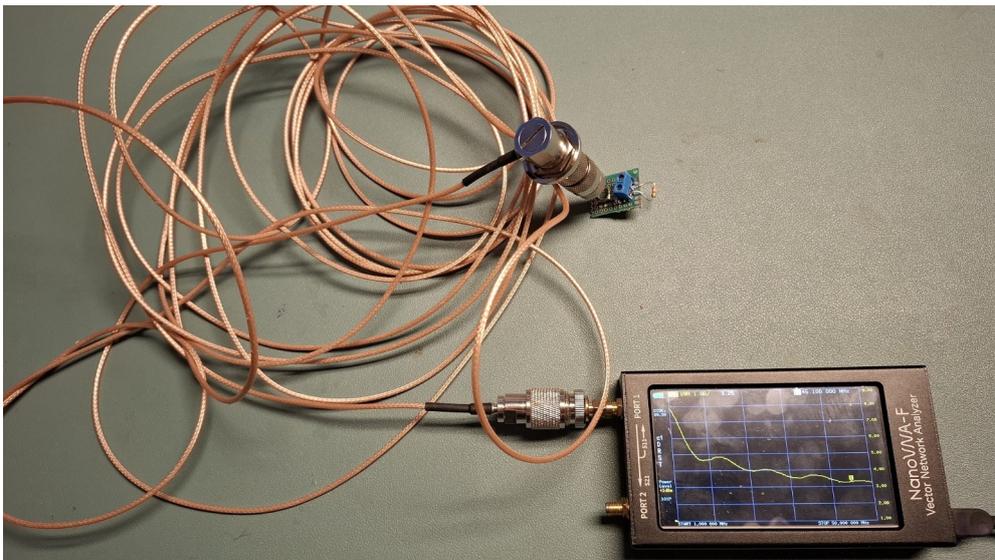


Bild 2a: Wiederholung der Messung mit einer 9,3m Leitung

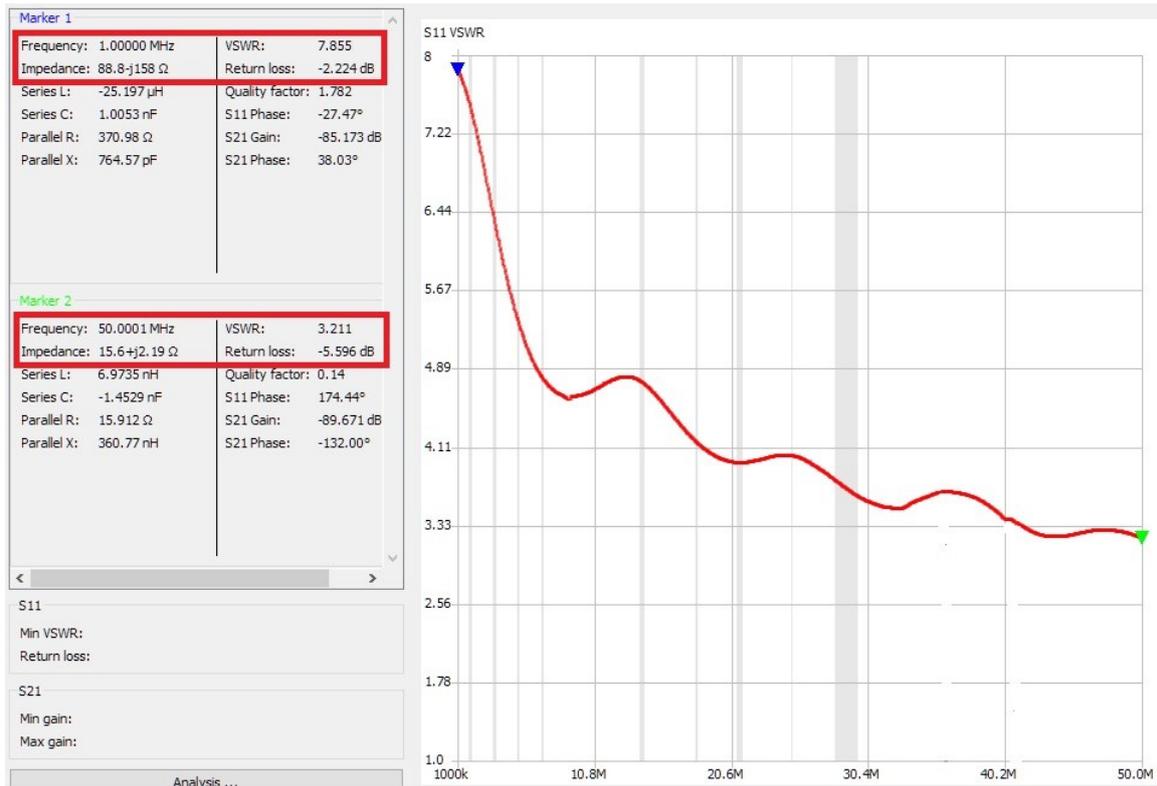


Bild 2b: Auswertung der SWR-Messung (Bild 2a) mit der Software *nanovna.saver*. Im Vergleich mit Bild 1c bleibt das SWR im Messbereich 1...50MHz nicht konstant, sondern fällt deutlich von 7,8 auf 3,2.

## SWR-Berechnung

"Halbwahrheit 1" ist widerlegt (Bild 2b), denn die einfache Formel für den Reflexionsfaktor (Bild 1a) ist für elektrisch lange Leitungen **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 ist aber

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

denn der Reflexionsfaktor  $\underline{r}$  wird mit dem reellen Generatorwiderstand  $R_G = 50\text{Ohm}$  des NanoVNA gegen die gemessene Eingangsimpedanz  $\underline{Z}_E = R_E + jX_E = 15,6 + j2,19\text{Ohm}$  (Bild 2b) berechnet!

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 bei 50MHz gemessene Eingangsimpedanz  $\underline{Z}_E = 15,6 + j2,19\text{Ohm}$  (Bild 2b) in die "richtige" Formel (s.o.) 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 hat<sup>2</sup> erhält als Ergebnis

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

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

Daraus ergibt sich (siehe Bild 1a):

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

Abgesehen von Rundungsfehlern wird damit die NanoVNA-Anzeige bestätigt, d.h., auch die Entwickler des NanoVNA hatten offenkundig keine Probleme damit, die  $\underline{r}$ -Definition der Klassischen Vierpoltheorie zu übernehmen ;-)

## Simulation

Die Simulation (Bild 2c) bestätigt in brauchbarer Näherung die Messergebnisse des NanoVNA, denn das für den KNWA entwickelte verlustbehaftete Leitungsmodell liefert für 50MHz den Wert  $\underline{Z}_E = 16,1 - j5,61\Omega$ , was einem SWR von ca. 3,2 entspricht.

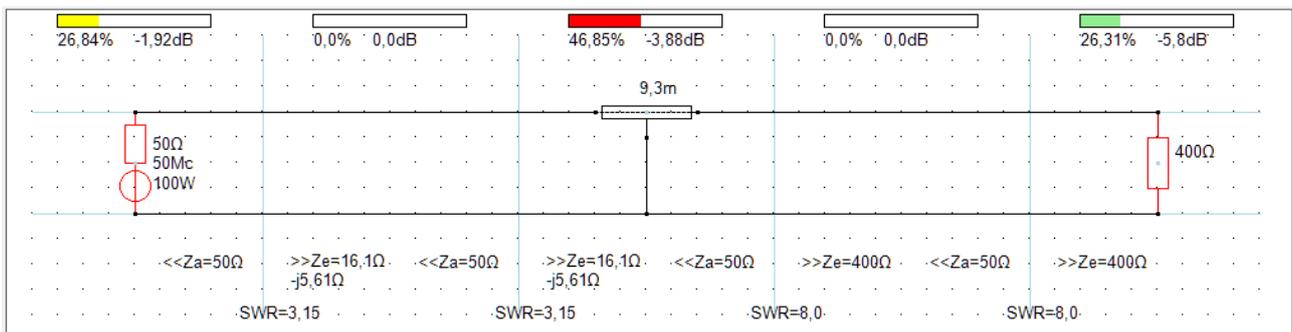


Bild 2c: Die 50MHz-Simulation bestätigt die VNA-Messung (Bild 2b). Beachte die hohen Kabelverluste von fast 50%!

Auch das was bereits viele OMs selbst erlebt haben dürften lässt sich mit dem KNWA bequemer als in der Praxis 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 2c zeigt, geht bei 9,3m Leitungslänge und 50MHz bereits fast die Hälfte der maximal verfügbaren Generatorleistung im Kabel verloren.

Wie eine weitere Simulation beweist, ist z.B. bei 100m Leitungslänge ein ideales SWR bereits ab ca. 14MHz erreicht (Bild 2d).

<sup>2</sup> Mit dem *Formelrechner* der JWD-Tools lässt sich auch die Division von Phasoren bequem durchführen.

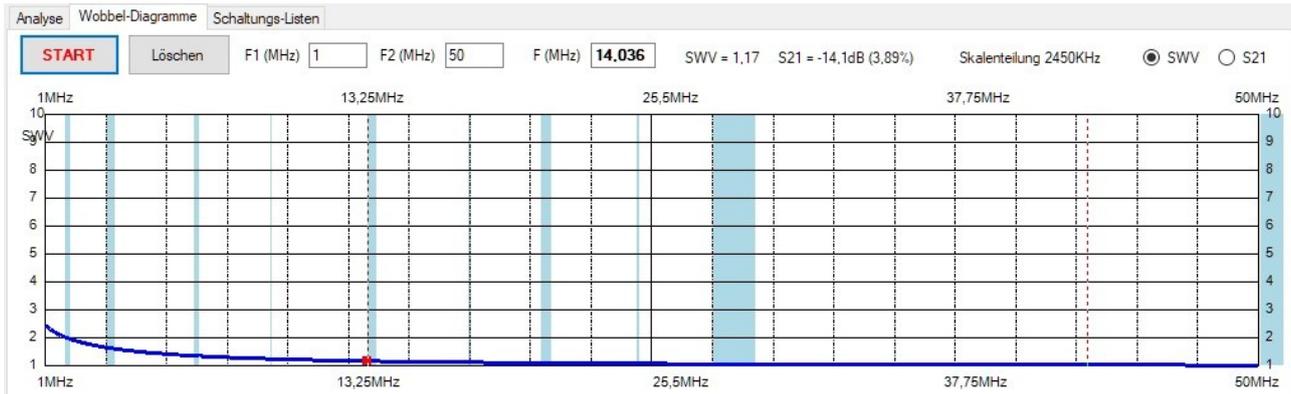


Bild 2d: KNWA-Simulation des SWR-Verlaufs im Bereich 1..50MHz einer 100m langen RG316U - Leitung mit 400Ohm Abschluss. Ab ca. 14MHz stellt sich am Leitungsanfang ein konstantes SWR=1 ein.

Man kommt durch "Spielen" mit den Modellparametern des KNWA schnell zur Erkenntnis, dass es aufgrund der Leitungsdämpfung bei einem elektrisch sehr langen Kabel immer egal wird, 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!

### Der hohe Preis für das perfekte SWR

Elektrisch sehr lange Kabel lassen sich zwar sehr gut anpassen (Bild 2d), vernichten aber (frequenzabhängig!) im Extremfall die gesamte Sendeenergie.

Sehr lange Kabel sind deshalb i.d.R. nicht für Sende- sondern eher nur für Empfangszwecke (z.B. Gemeinschaftsantennenanlagen) geeignet, wo sich die Verluste leicht durch direkt an der Antenne angebrachte Verstärker ausgleichen lassen.

### 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 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 50Ohm<sup>3</sup>.

Auch der NanoVNA basiert auf einem 50Ohm-System, d.h., bei allen S11- bzw. VSWR-Messungen übernimmt er gewissermaßen die Rolle einer PA mit  $R_G = 50\text{Ohm}$ .

3 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)

## Versuch 3

### Ist das antennenseitige SWR unabhängig von der Eingangsbeschaltung?

Nein, im Gegenteil, zumindest im unteren bis mittleren KW-Bereich gibt es eine deutliche Abhängigkeit!

Hier 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 1a).

### Simulation

Wir schalten zum Generator einen 10Ohm Widerstand parallel und beobachten, ob dadurch auch das antennenseitige SWR beeinflusst wird.

Tatsächlich, wie Bild 3a zeigt, ändert sich das antennenseitige SWR durch Änderung der senderseitigen Anpassung an die Leitung deutlich von vorher 8,0 auf 11,5!

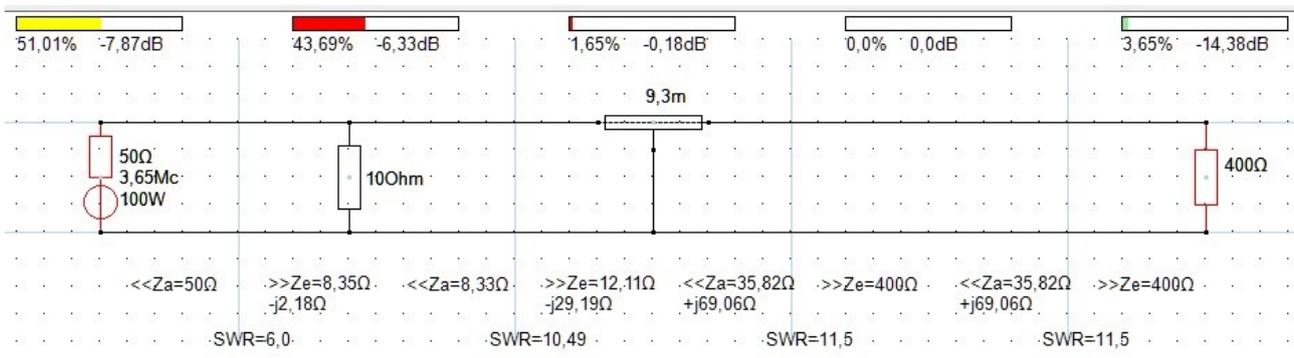


Bild 3a: Die Parallelschaltung des 10Ohm-Widerstands führt bei **elektrisch kurzer Leitung** (3,65MHz) zur deutlichen Veränderung des antennenseitigen SWR (vgl. Bild 3b)

## 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 spürbare Auswirkung auf das ausgangsseitige SWR (Bild 3b).

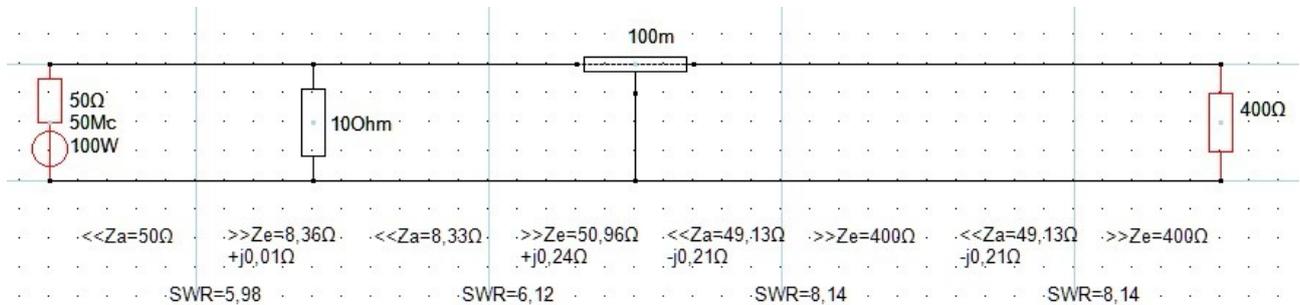


Bild 3b: Die Parallelschaltung des 10Ohm-Widerstands führt bei **elektrisch langer Leitung** (50MHz) kaum zur Veränderung des antennenseitigen SWR (vgl. Bild 3a)

Unseren kurzen Briefwechsel zu diesem Thema hat OM Moritz (Professor für Kommunikationssysteme und Übertragungstechnik!) 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 verkündet.

## Versuch 4

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

OM Max (ein bekannter und erfolgreicher Praktiker auf dem Gebiet des Satellitenfunks) meidet Simulationen/Berechnungen und Messungen und 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 Moritz den Segen erteilt 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 Moritz und einigen anderen, befragten Bekannten völlig überein. ???***

Leider hat mir Max weder die Länge des Kabels noch die Messfrequenz mitgeteilt, ich kann mir aber seine Erkenntnisse nur so erklären, dass er eine "elektrisch sehr lange" Leitung (bzw. sehr hohe Frequenz) verwendet hat (siehe Versuche 2 und 3).

### Simulation

Hier der Versuch zu beweisen, dass die Erkenntnisse von Max in einem ähnlichen Messaufbau selbst für Leitungen mittlerer elektrischer Länge 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 4a).

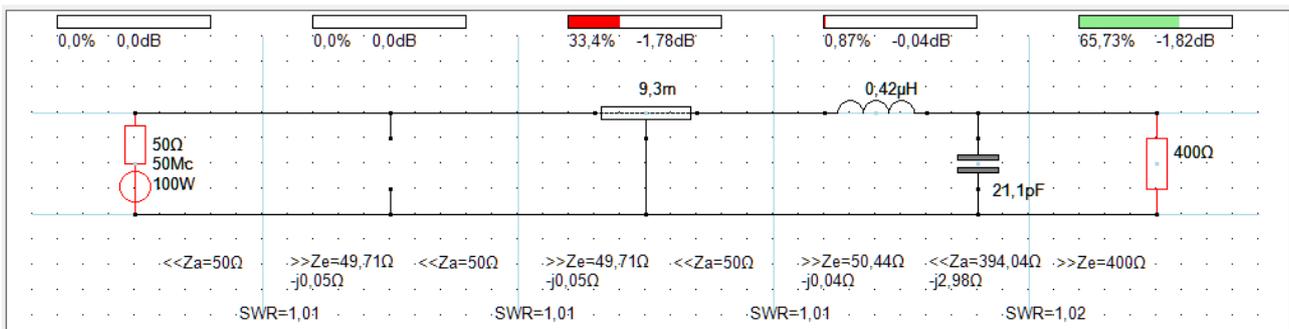


Bild 4a: Ausgangsseitige Anpassung an eine 100W Glühlampe (400Ohm).

Bei 50MHz und einer maximal verfügbaren Generatorleistung von 100W werden ca. 65W in der Lampe umgesetzt, 33W heizen das 9,3m lange 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 (QL=250, QC = 1000) sind vernachlässigbar.

Danach schalte ich parallel zum Generator einen 300pF-Kondensator (ca. 100Ohm Blindwiderstand bei 50MHz) und sehe, wie deutlich sich diese Änderung auf das ausgangsseitige SWR und die Transmission auswirkt (Bild 4b).

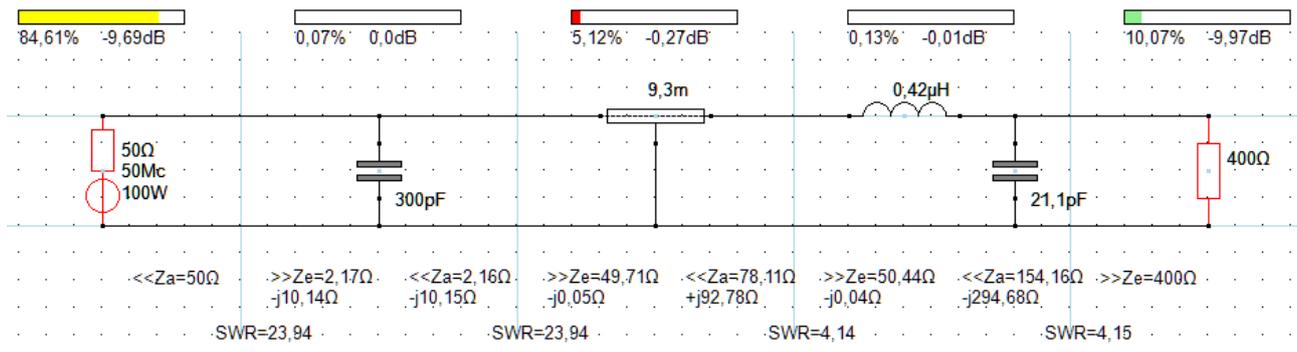


Bild 4b: Nach Beschaltung des Generators mit 300pF verschlechtern sich ein- und ausgangsseitige SWR und von der Lampe werden nur noch 10W abgestrahlt.

Nun kann ich mittels Matchbox wieder auf ein perfektes ausgangsseitiges SWR nachjustieren, aber das ändert nur unwesentlich etwas am negativen Einfluss der 300pF Eingangsbeschaltung und steigert die Transmission nur minimal Bild 4c).

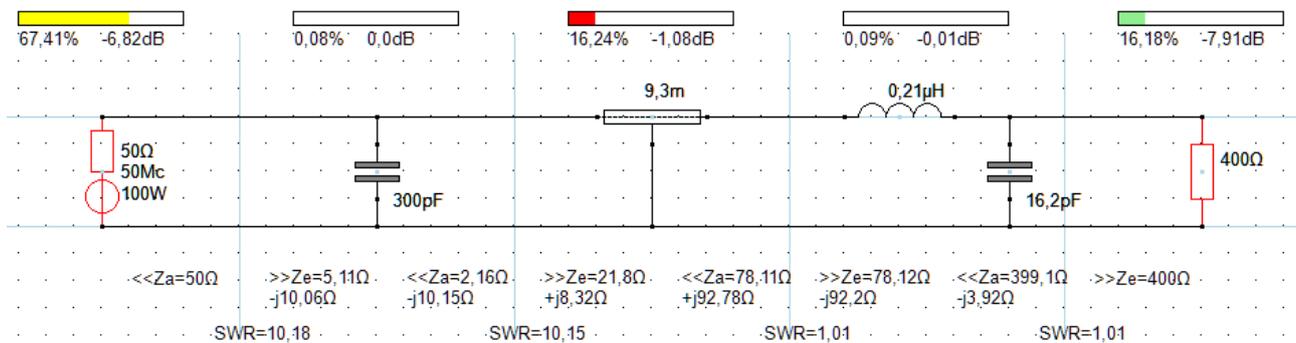


Bild 4c: Die nachträgliche Korrektur des **ausgangsseitigen** SWR verbessert auch das **eingangsseitige** SWR deutlich, erhöht aber die abgestrahlte Leistung (16W) nur unwesentlich

## Diskussion

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

Den praktischen Aufbau der Schaltung kann man sich diesmal ersparen, denn auch eine VNA-Messung wird zu keinem deutlich anderen Ergebnis wie der KNWA führen.

## Schlussbemerkungen

Die von Max und Moritz 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 sehr 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 verantwortet<sup>4</sup>).

*Ok, nicht jeder OM kann ein studierter HF-Ingenieur sein. Trotzdem für Interessenten ein paar Worte zum theoretischen Background: In meinen Tools (HamVNAS, KNWA, Kabelrechner, Doppelzepprechner, ...) verwende ich die Knotenspannungsanalyse, ein Spezialgebiet der Mehrtor-Theorie und u.a. auch Gegenstand meiner 1987 an der Ingenieurhochschule Mittweida verteidigten Habilitationsschrift.*

*Dazu wird zunächst die komplexe **Knotenleitwertmatrix** ( $\underline{Y}$ -Matrix) der Schaltung aufgestellt, die natürlich nicht nur Leitungen sondern auch beliebig anderen Bauelementen (R, L, C, Trafo,...) enthalten kann.*

*Nach Definition der Knoten für Input- und Output-Tor und schrittweiser Torzahlreduktion (Elimination der inneren Knoten nach Gauss-Algorithmus) liegt dann eine echte Y-Vierpolmatrix vor.*

*Die Transformation von Y- in S-Parameter (und umgekehrt) ist problemlos.*

*Nach Beschalten von Input- und Output-Tor mit Generator- bzw. Lastimpedanz können dann die **Betriebsparameter** (Ein- und Ausgangsimpedanz, Reflektionsfaktoren, Transmission, ...) leicht ermittelt werden.*

Beim Vergleich Mehrthortheorie 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.... (Max) ???
- ... beim Wellenwiderstand werden zwei Wellen extra betrachtet und bei der Impedanz die Überlagerung der beiden Wellen.... (Moritz) ???

Schade, nachdem ich Max und Moritz vorgeschlagen hatte selbst einmal mit den von mir vorgeschlagenen kleinen Messungen und Berechnungen Theorie und Praxis zu vergleichen, herrscht unisono "Schweigen im Wald".

---

<sup>4</sup> Pflichtliteratur für Studenten war z.B. Schröder, H.: Elektrische Nachrichtentechnik, Bd.1: Grundlagen, Theorie und Berechnung passiver Übertragungsnetzwerke