Eine einfache Bestimmung der Kenngrössen verlustbehafteter Speiseleitungen

von Rolf Schick, DL3AO

In vielen Beständen von Amateurfunkern finden sich Zweidrahtleitungen aus unbekannter Herkunft und von unbekanntem Alter. Die Speiseleitungen zu den Antennen werden oft über Jahre oder Jahrzehnte weder überprüft, geschweige denn ausgewechselt. Dem Augenschein nach sehen sie ja noch so gut wie neu aus. Doch auch Kabel unterliegen einem Alterungsprozess. Ein bei mir als Vorrat aufbewahrtes, neu erworbenes RG213 Koaxkabel zeigte nach 20 Jahren, trotz einwandfreier und trockener Aufbewahrung einen blauschwarz korrodierten und nicht mehr lötfähigen Mantel. Diese Überraschung hat mich dazu gebracht, Speiseleitungen nicht mehr als notwendiges Übel mit einer über die Zeit weitgehend bedenkenlos ablaufenden Leistungsübertragung vom Sender zur Antenne zu betrachten. Eine Überprüfung meiner zusammen sieben Koaxkabel von der Station zu den Antennen oder den im Aussenbereich stehenden Anpassgeräten war angesagt. Doch wie ?
Am zuverlässigsten für die Messungen sind sicher Wattmeter mit Dummy Load, einmal am Einspeisungsende angeschlossen, einmal am Leitungsende. Nicht nur in meinem Fall ist das schwere und voluminöse Heathkit Gerät wenig geeignet, damit auf dem Dach oder Mast Messungen vorzunehmen. Problematisch mit der erzielten Genauigkeit ist es mit den kleinen und leichteren auf Durchgangsbasis beruhenden Leistungsmessern. Schon ein geringes SWR kann bei den Messungen an unterschiedlichen Längen in der Leitung zu Fehlern führen. Und schliesslich möchte man ja die Leitungsüberprüfung auf 1 dB genau.

Ich habe mich nun an frühere Verfahren erinnert. Das Koaxkabel wurde von der Antenne abgeklemmt, das Ende kurz geschlossen oder offen gelassen, und in diesem Zustand das SWR am Sender- oder Tunerausgang gemessen. Während normalerweise ein geringes SWR den Operator beglückt, ist es hier gerade umgekehrt. (Es soll Amateure geben, welche erfreut über die im Laufe der Jahre eintretende Verbesserung des SWR auf ihrer Speiseleitung berichten!).

Je höher die Kabelverluste, je geringer der Rückfluss vom Kabelende. Bei einer verlustfreien Speiseleitung müsste bei offenem oder geschlossenen Kabelende (also keine Last) die gesamte eingespeiste Energie zurück fliessen. Doch was dann? Der Frage muss man nicht weiter nachgehen: Man bekommt keine Energie in die Leitung rein. Die Impedanz des

Eingangswiderstandes besteht nur aus einer Blindkomponente. Ein gemessener Wirkwiderstand basiert auf Leiterverlusten.

Dieser Umstand lässt sich zur Bestimmung von Leitungsgrössen, wie Wellenwiderstand und Dämpfung, ausnützen. Voraussetzung ist eine Messung des komplexen Eingangswiderstandes an einem Leitungsende, während das andere Ende der Leitung einmal offen und einmal kurzgeschlossen ist.

Das Verfahren wurde in der Praxis für den Amateurfunk erst brauchbar, nachdem preiswerte und genügend genau arbeitende Analysatoren auf den Markt kamen. In meinem Fall verwende ich den von der Zeitschrift FUNKAMATEUR vertriebenen "Vektoriellen Antennenanalysator FA-VA4". Vor Beginn meiner Antennen- und Kabelmessungen führte ich mit dem Gerät einige "Trockenübungen" aus, d.h., ich habe im "shack" ziemlich willkürlich Netzwerke aus diskreten R,L,C- Bauteilen mit bekannten Werten zusammengesetzt, die Übertragungsfunktion gerechnet und mit den ermittelten Werten des VA4 verglichen. Als ich von der Leistungsfähigkeit des VA4 überzeugt war, und auch seine Messgrenzen erkannte, begann ich mit den im Folgenden beschriebenen Kabelarbeiten.

Für die theoretischen Grundlagen zur Einleitung empfehle ich das Buch (1):

Robert A. Chipman: Theory and Problems of Transmission Lines, McGraw-Hill, 1968.

Der folgende Auszug entstammt diesem Werk.

7.5. Determination of transmission line characteristics from impedance measurements.

When an arbitrary length of any general transmission line is terminated in an open circuit or a short circuit, its input impedance is determined completely by the propagation factors α and β, the characteristic impedance Z_0 and the line length l. From (*7.20*), if $Z_T = 0$ (but $\alpha \neq 0$) the input impedance Z_{sc} of a line of length l with short circuit termination is

$$Z_{sc} = Z_0 \tanh(\alpha + j\beta)l \tag{7.25}$$

The input impedance Z_{oc} of the same line with open circuit termination is

$$Z_{oc} = Z_0 \coth(\alpha + j\beta)l \tag{7.26}$$

If Z_{sc} and Z_{oc} are measured at the same frequency, for a line section of length l, then Z_0, α, β, and l will have the same values in both of the equations (*7.25*) and (*7.26*). Multiplying together the corresponding sides of these equations gives

$$Z_0 = \sqrt{Z_{sc} Z_{oc}} \tag{7.27}$$

This is a valuable and universally valid equation by which the characteristic impedance of any type of uniform transmission line can be obtained from two impedance measurements made on a sample length of the line, using two readily available terminal load impedances.

Two precautions must be observed in making the measurements needed for this calculation. First, the impedance-measuring device must be capable of measuring "balanced" impedances if the line conductors are symmetrical (e.g. a parallel-wire line or a shielded pair), or of measuring "unbalanced" impedances if the line has one of its two conductors acting as a shield or "ground" (e.g., a coaxial line or a stripline). Second, the length of line l cannot be completely arbitrary but must be chosen so that both Z_{sc} and Z_{oc} have values appropriate to the impedance-measuring device. It is obvious, for example, that for an extremely short section of any line Z_{sc} might be too small and Z_{oc} too large to be accurately measurable by any available bridges. Use of the transmission line charts discussed in

l	=	Leiterlänge [m]
Z0	=	Wellenwiderstand [Ω]
ZSC	=	Input Impedance R + jX "short"
ZOC	=	Input Impedance R + jX "open"
λ	=	Wellenlänge [m]
α	=	Dämpfungsfaktor [Neper/m]
β	=	Phasenwinkel [rad/m]
j	=	imaginäre Einheit
tanh	=	tangenshyperbolicus
coth	=	cotangenshyperbolicus
atanh	=	arcustangenshyperbolicus
loge	=	natürlicher Logarithmus
1 Neper	=	8,685 dB

Chapter 9 will show that line-section lengths close to any odd number of eighths of a wavelength are particularly appropriate. For such line lengths Z_{sc}, Z_{oc} and Z_0 will all have similar magnitudes. If the wavelength is only approximately known, measurements can be made at several values of l until this condition is found.

The attenuation factor α and the phase propagation factor β can also be calculated from the measured impedances Z_{sc} and Z_{oc}. Dividing corresponding sides of (*7.25*) by those of (*7.26*),

$$\sqrt{Z_{sc}/Z_{oc}} = \tanh(\alpha + j\beta)l$$

Expanding this hyperbolic tangent in exponential form, using $\gamma = \alpha + j\beta$,

$$\sqrt{Z_{sc}/Z_{oc}} = (1 - e^{-2\gamma l})/(1 + e^{-2\gamma l})$$

which gives

$$e^{2\gamma l} = \frac{1 + \sqrt{Z_{sc}/Z_{oc}}}{1 - \sqrt{Z_{sc}/Z_{oc}}}$$

Taking logarithms of both sides,

$$(\alpha + j\beta)l = \tfrac{1}{2} \log_e \frac{1 + \sqrt{Z_{sc}/Z_{oc}}}{1 - \sqrt{Z_{sc}/Z_{oc}}}$$

The logarithm of a complex number expressed in polar form $Ae^{j\phi}$ is defined by

$$\log_e Ae^{j\phi} = \log_e A + j(\phi + 2n\pi)$$

The attenuation factor α is therefore given by

$$\alpha = \frac{1}{2l} \log_e \left| \frac{1 + \sqrt{Z_{sc}/Z_{oc}}}{1 - \sqrt{Z_{sc}/Z_{oc}}} \right| \quad \text{nepers/m} \qquad (7.28)$$

when l is in meters. The phase propagation factor β is given by

$$\beta = \frac{1}{2l} \left\{ \left(\text{phase angle of } \frac{1 + \sqrt{Z_{sc}/Z_{oc}}}{1 - \sqrt{Z_{sc}/Z_{oc}}} \right) + 2n\pi \right\} \quad \text{radians/m} \qquad (7.29)$$

This method does not determine a unique value for β, but a series of values differing consecutively by π/l rad/m. In a practical case it may sometimes be difficult to decide which value in the series is the correct answer.

Die Bestimmung von Wellenwiderstand der Leitung und Leitungsdämpfung benötigt nur die Gleichungen (7.27) und (7.28)

Die Gleichung (7.28) ist mathematisch gleichwertig der Gleichung

$$\alpha = (1/2l) * \operatorname{atanh} \sqrt{Zsc / Zoc}$$

Sie ist einfacher anzuwenden, wenn auf dem Auswerterechner die Funktion atanh zur Verfügung steht.

An drei Beispielen wird das Verfahren verdeutlicht:

Beispiel 1: 10.30 m langes Koaxkabel RG58 C/U
Beispiel 2: 8,47 m langes Twinlead, ohne Herstellerangaben, nach den Abmessungen niederohmig
Beispiel 3: 11,40 m langesTwinlead, Ladder Line, ohne Herstellerangaben, nach den Abmessungen um 300 Ohm Wellenwiderstand.

Beispiel 1.

Koaxkabel RG58 C/U, ca. 30 Jahre im Besitz

Geometrische Länge: 10.30 m.

Als erstes wird, mit *offenem* Kabelende auf die bekannte Art die elektrische Kabellänge über die Kabelresonanzen bei $\lambda/4$ und bei der 3. ,5 . und 7. Harmonischen ermittelt.
Das Kabel transformiert das hochohmige (theoretisch $\propto$) Kabelende auf das niederohmige, (theoretisch 0) am VA4 angeschlossenen Kabelende. Es werden die Frequenzen gesucht, bei denen die Blindkomponenten nahe Null sind.

VA4 R+jX	Frequenz [kHz]	Resonanz λ	Wellenlänge [m]	geom. W.L./ el. W.L.	Verk-faktor vf
1.8-j 0.8	5098	0.25	14.71	10.30/14.71	0.70
3.4-j 0.3	15588	0.75	14.34	10.30/14.34	0.71
4.4-j 0	26148	1.25	14.34	10.30/14.34	0.71
5.3 + j 0.6	36688	1.75	14.31	10.30/14.31	0.72

Tab. 1: Kabelresonanzen und Verkürzungsfaktoren für das Koaxkabel RG58 C/U

(Anmerkung: Mit Sorgfalt ist eine Frequenz für jX=0 zu finden. Für das Beispiel ist die Abweichung jedoch bedeutungslos).

Wie später gezeigt wird, ist zur Erzielung einer hohen Messgenauigkeit bei den Impedanzmessungen eine Frequenz zu wählen, welche in der elektrischen Kabellänge einer Wellenlänge von $\lambda/8$ oder einer ungeraden Harmonischen davon entspricht.

Die numerische Auswertung für das erste $\lambda/8$ verläuft dann folgendermassen:

Die elektrische Kabellänge $\lambda/8$ entspricht 2549 KHz.

Der VA4 zeigt bei dieser Frequenz die Impedanzen

$$Zsc = 4.7 + j\,51.8 \text{ Ohm für "short"}$$

$$Zoc = 0.9 - j\,51.9 \text{ Ohm für "open"}$$

Die Werte in Glg. (7.29) eingesetzt ergibt:

$$Z_0 = \sqrt{Zsc * Zoc} = \sqrt{(4.7+51.8j)*(0.9-51.9j)} = 51.52 - 1.87\,j \text{ Ohm}$$

$$\alpha = (1/2l) * \operatorname{atanh} \sqrt{Zsc/Zoc} = 1/(2*10.30) * \sqrt{(4.7+51.8j)/(0.9-51.9j)} = 0.0026 N/m$$

Die Bestimmung der komplexen Ausdrücke unter den Wurzeln erregt zunächst etwas Grauen, ist aber mit Hilfe des Rechenprogramms FreeMAT (2) sehr einfach möglich.

Z_0 ist der komplexe Wellenwiderstand (characteristic impedance) der Leitung,
α die Dämpfungskonstante in Neper/m.

Die Tabelle 2 fasst die Messdaten und die Ergebnisse zusammen. Zur besseren Anschaulichkeit und zum Vergleich mit Literaturdaten wurden die Kabelverluste auf dB/100 m umgerechnet.

VA4 (open) R+jX (short)	Frequenz [KHz]	Lambda	Wellenwiderstand [Ohm]	Dämpfung dB/100m
0.9-51.1j 4.7+51.8j	2549	$\lambda/8$	51.52-1.87j	2.29
6+46.7j 3.6-51.4j	7647	$3\lambda/8$	49.23-1.42j	4.1
5.5-58.2j 7.4+45.9	12745	$5\lambda/8$	52.10-1.71j	4.1
10.8-67.8j 8.2+39.2j	22941	$9\lambda/8$	52.42-1.26j	7.4

Tab. 2: Mess- und Auswerteergebnisse für Beispiel 1.

Die Abb. 1 stellt den Verlauf der reellen und imaginären Impedanzen für "open" und "short" für das Beispiel 1, Koax RG58, im Frequenzbereich 0.5 - 30 Mhz dar. Die für das Beispiel ermittelten Werte für Dämpfung und elektrischer Länge wurden in die Glg. (7.25) und (7.26) von Chipman eingesetzt. Die Kurven für offenes und geschlossenes Kabel schneiden sich bei $\lambda/8$ und ungeraden Vielfachen dieses Wertes. Bei diesen Frequenzen wird der Wirkwiderstand numerisch gleich dem Blindwiderstand, was den geringsten Fehlerbereich für die Messungen ergibt.

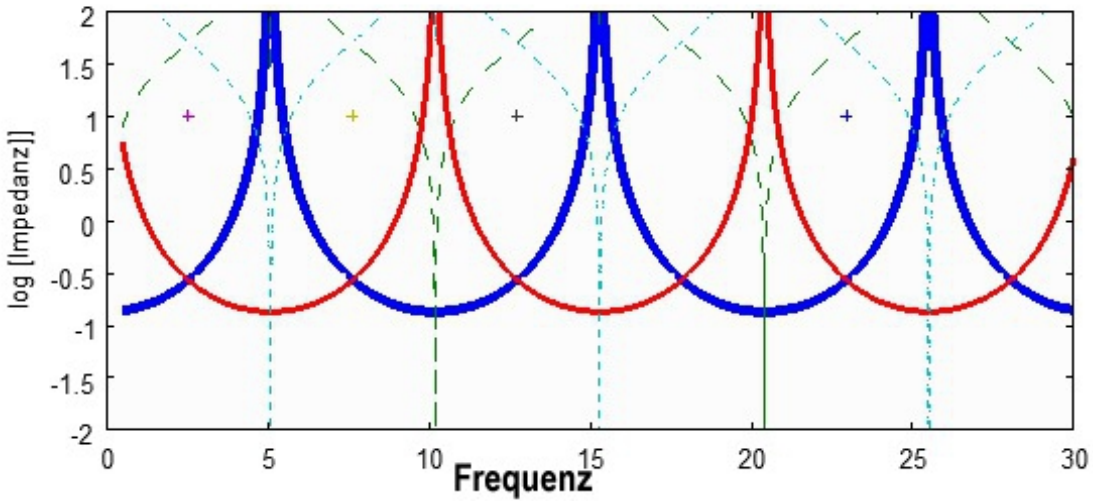


Abb. 1: Logarithmus der reellen und imaginären Impedanzen am Kabeleingang für offenes und geschlossenes Kabelende, Beispiel 1. Frequenz in MHz.
Blau: reell, geschlossen. Rot: reell, offen. Gestrichelt: imaginär, geschlossen. Strich-Pkt: imaginär, offen.

In Abb. 2 sind die Dämpfungswerte aus Tab. 1 in ein von AC6LA gezeigtes Diagramm für "matched 100 m line loss RG58 C/U" eingetragen.

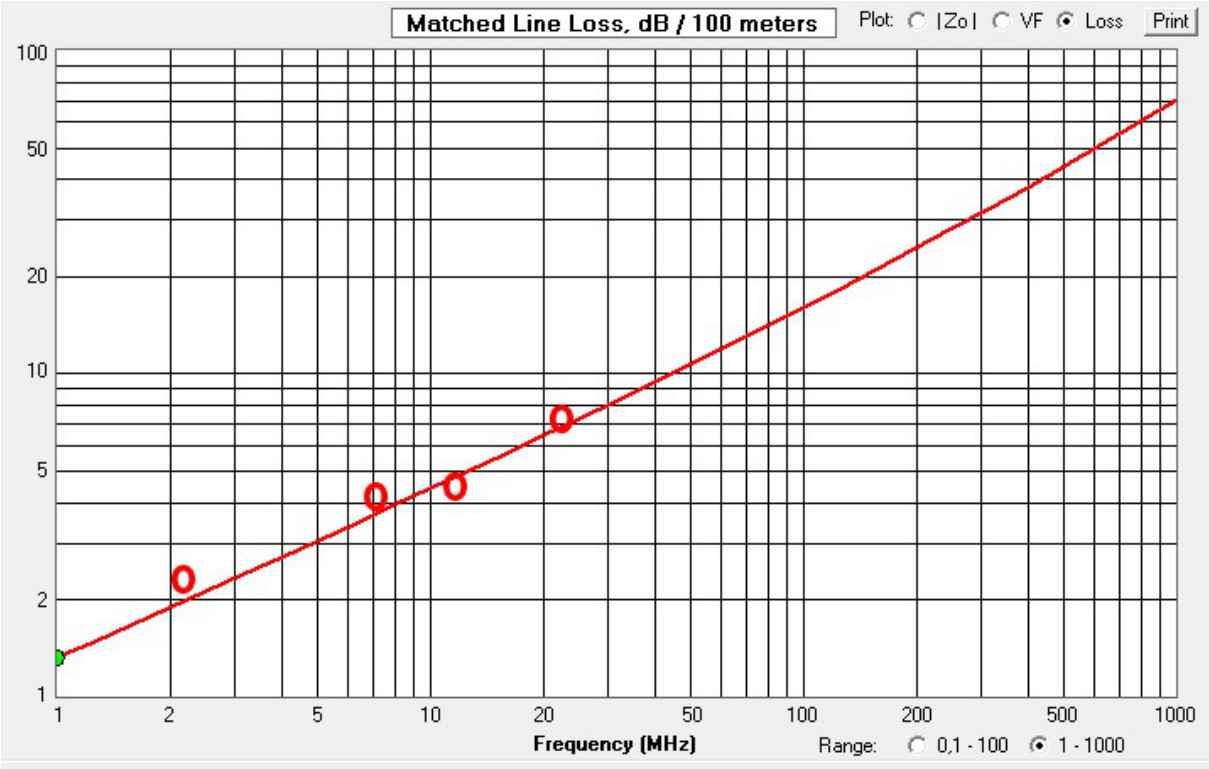
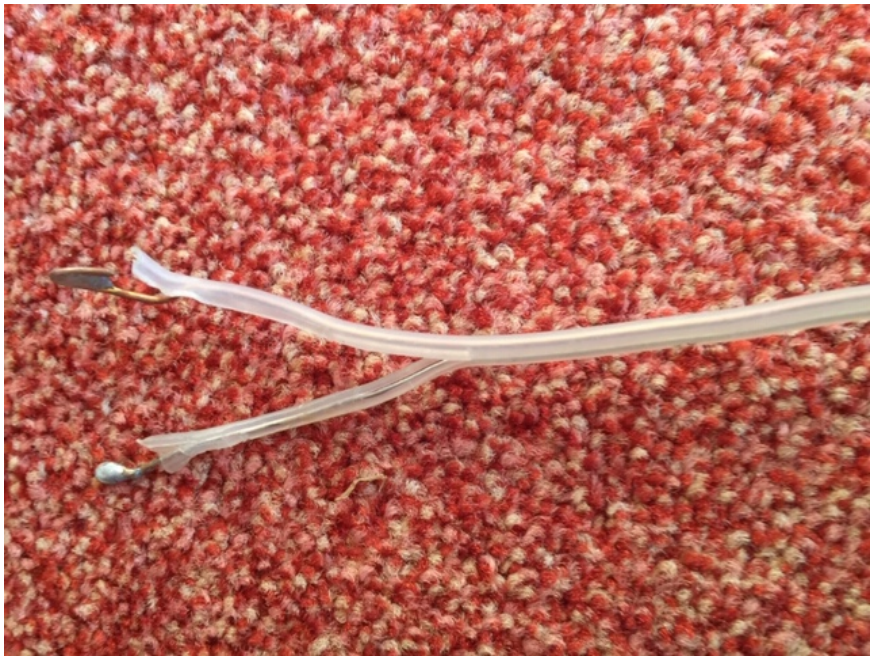


Abb 2.: Ermittelte Dämpfungswerte aus Tab. 1 , eingetragen in Literaturangaben für RG58 C/U.

Beispiel 2

Untersucht wurde eine 1958 von der damals bekannten Firma Hannes Bauer, Bamberg, erworbene Parallelleitung. Sie wurde unter der Bezeichnung "Twinlead 75 Ohm zur Speisung von Dipolen" vertrieben. Flachbandleitung mit 300 Ohm Wellenwiderstand war für TV Empfang damals weit verbreitet. Twinlead mit 75 Ohm war in Deutschland weitgehend unbekannt. Meine in dieser Zeit benutzte "2-Element ZL-Special" Antenne (Später als HB9CV Antenne bekannt) wurde mit 300 Ohm Leitung gespeist. Überlegungen legten einen Speisewiderstand der Antenne unter 100 Ohm nahe. Zum Verkleinern des SWR, und zur erhofften Reduzierung der Leitungsverluste durch das erhöhte SWR, ersetzte ich die 300 Ohm TV-Leitung durch dieses neu auf dem Markt angepriesene Twinlead. (Bild)



Die geometrische Länge des (jetzt nach 61 Jahren !) untersuchten Kabels betrug 8.47 m. (Zur Speisung waren es damals um 12 m).
Mehrere Messungen des Verkürzungsfaktors zwischen 5 MHz und 30 Mhz gaben ansteigende Werte von 0.658 bis 0.665. Der Wert deutet auf Polyäthylen als Dielektrikum hin.

VA4 (open) R+jX (short)	Frequenz [KHz]	Lambda	Wellenwiderstand [Ohm	Dämpfung dB/100m
1.2 - 71.1 j 6.6 +74.2 j	2915	λ/8	53.0 -3.98 j	4.54
8.4 + 68.3 j 4.3 - 67.3 j	8745	3λ/8	68.0 -2 j	4.8
6.9 - 77.4 j 11.4 + 74.4 j	14575	5λ/8	76.4 - 2.4 j	6.2

Tab. 3: Mess- und Auswerteergebnisse für Beispiel 2.

Die Dämpfungswerte dieser Parallelleitung entsprechen etwa denen von Koax RG58. Sie sind für ein niederohmiges und nicht für "high-power" ausgelegtes Bandkabel recht gut und widerlegen die damals geäusserten Vermutungen "das Kabel sei nicht HF-tauglich und nur für NF geignet". ("better late than never!")

Beispiel 3.

Es handelt sich um eine "Window"- oder "Ladder-Line", d.h. ein Twinlead mit teilweise ausgestanztem Dielektrikum. Die Leitung ist unbeschriftet, Herstellerdaten sind nicht bekannt. Die Leitung wurde um 1985 bezogen, in einer Zeit, als diese "Windows" Twinlead noch unbekannt waren. Vielleicht handelt es sich um eine frühe Versuchsausführung eines heute unter "Wireman" vertriebenen Kabels. (Bild).

Messungen des Verkürzungsfaktors zwischen 5 und 40 MHz erbrachten ansteigende Werte von 0,823 bis 0.829. Auf Grund der "Luftlöcher" in der Leitung ist es nicht einfach, die Dielektrizitätskonstante aus dem Verkürzungsfaktor zu ermitteln. Die heute bekannten "Wireman" Ladder-Lines weisen Verkürzungsfaktoren um 0.91 auf.
Das ARRL Antenna Book gibt für 300 Ohm Bandleitung um 1. 4 dB/100 m und 14 MHz an. Rothe und Spindler, Antennenpraxis, 1968, geben für 300 Ohm Bandleitung (ohne "Fenster"), und sehr abhängig vom Erhaltungszustand nach Betrieb im Freien 2-5 dB/100 m und 20 MHz an. Die in Tabelle 4 ermittelten Dämpfungswerte sind für eine nur wenige Zeit im freien hängende "300 Ohm" Ladder-Leitung leicht erhöht.

VA4 (open) R+jX (short)	Frequenz [KHz]	Lambda	Wellenwiderstand [Ohm	Dämpfung dB/100m
4.7 - j 262 19.1 + j268	2707	λ/8	265 - 7 j	1.7
20.7 + j 273 9.4 - j 265	8121	3λ/8	269 5.42 j	2.13
8.8 - j 263 21.8 + j 262	13535	5λ/8	263 6.52 j	2.23
28 + j 275 7.1 - j 265	18949	7λ/8	270 - 10.1 j	2.46

Tab. 4: Mess- und Auswerteergebnisse für Beispiel 3.

Bemerkungen zur Anwendung

Wie erwähnt, ist die Messgenauigkeit bei einer elektrischen Länge des untersuchten Kabels von λ/8 oder einem ungeraden Vielfachen davon am grössten. In "open" und "short" entsprechen sich dann die Impedanzwerte konjugiert komplex (Abb. 1). In der Praxis wird der Zustand nur angenähert erreicht. Der Abschluss "open" ist nicht unendlich gross und "short" nicht unendlich klein. Man kann jedoch empirisch die Frequenz mit bester Annäherung suchen. Am einfachsten gelingt dies natürlich, wenn ein VA mit Frequenzsweep und Datenabspeicherung zur Verfügung steht.

Für eine gute Messgenauigkeit darf die Leitung nicht zu kurz sein. Nach Chipman sollen die Dämpfungswerte 2 dB oder höher betragen. Bei Messungen mit dem FA-VA4 wird diese Bedingung schon durch die ansonsten sehr kleinen Anzeigewerte des Wirkwiderstandes intuitiv klar.
Der Anschluss beim FA-VA4 für die zu untersuchenden Leitungen ist asymmetrisch. D.h. ein Pol ist isoliert gegen das Gehäuse hochgelegt, der andere Pol ist der Anschluss am Gehäuse selbst. Die Verbindung ist so für den Anschluss von Koaxkabel ausgelegt, nicht jedoch für den Anschluss von Leitern mit symmetrischer Drahtführung, wie Twinlead. Streng genommen sollte eine Symmetrierung von Messgerät zur symmetrischen Leitung mit einem Symmetrieübertrager ("Balun") erfolgen. Der Einfluss dieser Bauteile auf die Messwerte ist jedoch schwer abzuschätzen. In der Praxis hat sich gezeigt, dass eine Entkopplung des Gehäuses des FA-VA4 zur umgebenden "Erde" die Symmetrie einer Parallelleitung beim "asymmetrischen" Anschluss an den VA4 zumindest nicht wesentlich stört. Eine Art der "Erdentkopplung" ist es, den VA4 an einer Schnur frei schwebend im Raum aufzuhängen. Bequemer für die Messungen und offenbar gleichwertig geht es mit einem Vorschlag von DL6JH, den VA4 auf eine leere Kartonschachtel zu stellen. Über die Stabilität in der Anzeige der Messwerte kommt man schnell dahinter, ob die Entkopplung ausreichend ist.

Anhang:

(1)

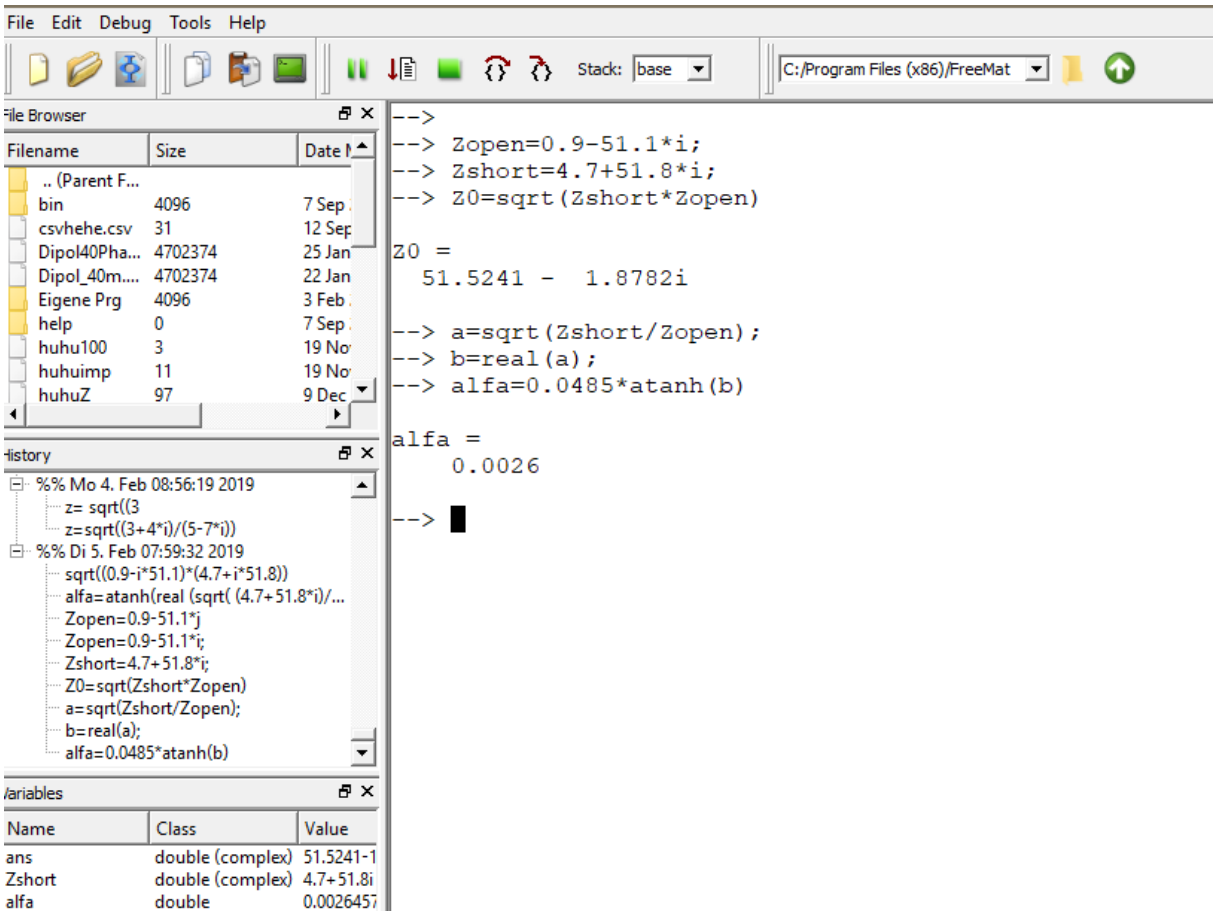
Robert A. Chipman: Theory and Problems of Transmission Lines, McGraw-Hill, 1968.
ist für mich ein klar und verständlich geschriebenes Lehrbuch zur Ausbreitung elektrischer Wellen auf Leitungen. Das Buch ist in ganzer Länge aus dem Internet frei herunter zu laden. Viele und numerisch detailliert dargestellte Beispiele verdeutlichen die theoretischen Ableitungen.

(2):

FreeMAT:
Die numerischen Auswertungen zu den Beispielen wurden mit dem Mathematik-Programm "FreeMAT" durchgeführt. Das Programm ist weitgehend kompatibel zu dem bekannten (und teuren) Programm "MATLAB". FreeMAT ist frei aus dem Internet herunter zu laden.

Das Programm ist interaktiv wie ein Taschenrechner zu benutzen. Der folgende screenshot zeigt eine interaktive Eingabe mit Werten aus Beispiel 1. Man sieht, wie wenig Zeilen zum Rechenablauf nötig sind.

Startseite von FreeMAT:



Bei mehreren Messungen arbeitet man natürlich besser mit einem script. Dies kann z.B. so aussehen:

%Berechnung von Wellenwiderstand und Kabeldaempfung

```
%aus komplexen Impedanzmessungen, Leitungsabschluss "short" und "open"

Rs=input('Reeller Impedanzwert [Ohm]    "short"  Rs =      ');
Xs=input('Imaginaerer Impedanzwert[Ohm] "short"  Xs =      ');


Ro=input('Reeller Impedanzwert [Ohm]    "open"   Rs =      ');
Xo=input('Imaginaerer Impedanzwert [Ohm "open"   Xs =      ');

l= input('Geometrische Kabellaenge [m]           l  =      ');

Zs= Rs+i*Xs;
Zo= Ro+i*Xo;

WW= sqrt(Zs*Zo);


u=1+sqrt(Zs/Zo);
v=1-sqrt(Zs/Zo);

w=abs(u/v);

alfa= 1/(2*l)*log(w);

disp('------------------------')

disp('Wellenwiderstand [Ohm] =   ' WW)

disp('Daempfungskonstante alpha [Neper/m] =        ' alfa)


dB= alfa*8.685*100;

disp('Daempfung [dB/100m] =      ' dB)
```