

## Welche Impedanz hat Ihre Leitung ?

Von Nothart Rohde / März 2011

-1-

Auch den härtesten Digitalisten ist es inzwischen bekannt, dass es bei Problemen mit Kabeln keine gute Idee ist, noch mehr draufzuschlagen und einen stärkeren Buffer einzubauen. Kabel wollen einen passende Abschlusswiderstand, zumindest auf einer Seite. Als Serienwiderstand auf der Sendeseite spart das auch Strom und senkt den Störpegel. Wenn man nur wüsste, welche Impedanz diese neumodischen Kabel haben. Aber das ist doch ganz einfach .....

Alle Leitungen, Kabel etc. haben bei definierter Struktur einen definierten Widerstand (Impedanz, Wellenwiderstand), der sich aus der Induktivität und Kapazität pro cm ergibt. Man verwendet das Modell des unendlich langen Leiters und stellt daran fest, dass das Ende einer Leitung einen ohmschen Widerstand darstellt, den in diesem Fall jedermann mit dem Ohmmeter nachmessen kann.

Kabel mit praktikablen Längen wirken dagegen, über die Frequenz gesehen, abwechselnd wie ein Kurzschluss oder ein Leerlauf und dies mit allen Zwischenwerten. Dabei ist es unerheblich, ob das Kabel am Ende offen oder kurzgeschlossen ist. Im ersten Fall ist es bei Frequenz 0 Hz natürlich hochohmig und bei steigender Frequenz tritt irgendwo der erste Kurzschluss auf. Im zweiten Fall beginnt die Sache mit einem Kurzschluss, bei steigender Frequenz wird dieser, bis hin zum echten Leerlauf, mehr und mehr abgeschwächt. Die Welligkeit verschwindet komplett, wenn man am Ende der Leitung einen ohmschen Widerstand anbringt, dessen Wert der besagten Impedanz entspricht.

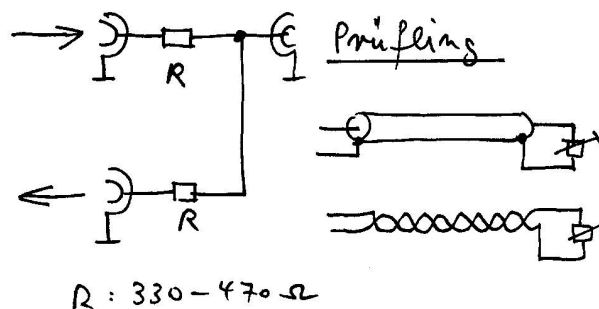
Man kann das Verhalten als geschlossene Formel angeben, die im Wesentlichen den Absolutbetrag einer tan-Funktion der Frequenz enthält. Die Pole der Funktion entsprechen dem Leerlauf.

Eine der möglichen Meßmethoden besteht nun darin, an einem Ende einer Leitung hochohmig einen Wechselstrom einzuspeisen und an derselben Stelle die entstehende Spannung zu messen. Am anderen Ende der Leitung werden versuchsweise induktionsarme Widerstände eingebaut (gegebenfalls kleines Trimpoti) mit der Maßgabe, dass die besagte Welligkeit verschwindet. Ist der passende Wert gefunden, hat man damit die Impedanz bestimmt. Genaue als aus der Reihe E 12 muss es hier nicht sein und die zu erwartenden Werte liegen im Bereich von 30 bis 200 Ohm. Die Messgenauigkeit steigt mit der Länge des verwendeten Kabels.

Nun ist der Begriff "hochohmig" bei Strukturen, deren Widerstand typischerweise bei 50 Ohm liegt, recht relativ. Unter praktischen Gesichtspunkten wären 330 bis 470 Ohm schon hochohmig genug und man kommt zu einer wirklich einfachen Testschaltung (**Bild 1**). Der gezeigte "Knotenpunkt" sollte möglichst klein aufgebaut werden, auf einer kleinen Platine mit Platinenbuchsen oder in ein kleines Schirmgehäuse mit koaxialen Anschlüssen.

**Bild 1**

Der Messaufbau.



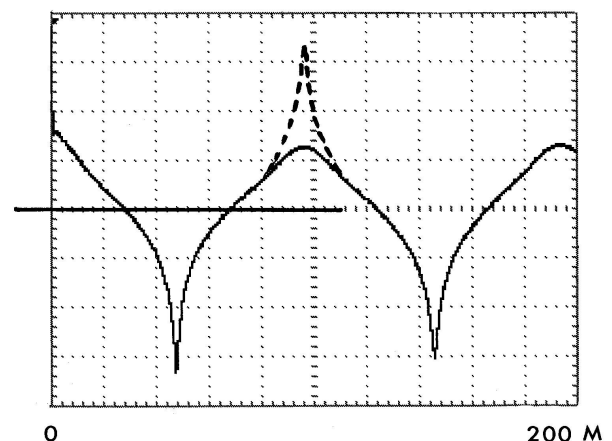
Im Prinzip reicht es, mit einem Sinusgenerator und einem Oszilloskop alle Frequenzen durchzufahren, aber das ist wenig praktikabel. Am schnellsten geht es mit einem Spektrumanalysator + Mitlaufgenerator. **Bild 2** zeigt das Ergebnis bei einem am Ende offenen Koaxialkabel vom Typ RG 58 bei 1 m Länge. Man sieht die Wirkung der genannten tan-Funktion, allerdings mit begrenzter Dynamik. Durch die logarithmische Darstellung ergeben die Nullstellen des Tangens weitere Pole, allerdings in negativer Richtung. Würde man wirklich hochohmig Strom einspeisen und auch messen, wäre die Kurve bezüglich der Horizontalen weitgehend spiegelsymmetrisch. Mit einem Abschlusswiderstand von 50 Ohm ergibt sich im Bild auf halbem Wert eine ziemlich glatte, durchgezogene Linie, bei anderen Werten bleibt es wellig. Die Folgefrequenz der Einbrüche im Bild hat mit der Kabellänge bzw. mit der Signallaufzeit zu tun, je länger das Kabel, desto enger liegen diese Stellen.

**Bild 2**

Messung an einem Kabel, Typ RG 58 bei 1 m Länge, Bereich 0 bis 200 MHz.

Die Kurve schwankt mehr oder weniger um den 50 Ohm-Pegel.

Angedeutet ist der Kurvenverlauf, wenn man am Knotenpunkt mit HF-Stromquelle und FET-Tastkopf arbeiten würde.



Anhand der Darstellung sieht man, dass das reine Kabel, das vielleicht für eine Übertragung von 100 W gut wäre, durch hin- und herlaufende Energie ein Eigenleben entwickelt, dessen Dynamik über 60 dB liegt, was einer Leistung von 1 : 1.000.000 entspricht. Salopp gesagt : Wenn man das nicht abgeschlossene Kabel frequenzmäßig auf dem falschen Fuß erwischt, hat man als Elektroniker keine Chance, Energie zu übertragen. Und wenn es doch gelingen sollte, wird alles in Flammen aufgehen.

Die Forderung, alle möglichen Frequenzen gleichzeitig zu betrachten, damit die Messung schnell abgeschlossen ist, lässt sich nicht nur im Frequenzbereich, sondern auch im Zeitbereich durchführen. Dann ist es aber unübersichtlicher. Ein Vorschlag für die übliche Laborausstattung wäre, einen Rechteckgenerator mit 1 MHz und ein Oszilloskop an den Messaufbau anzuschließen, bei einer Länge des Testkabels von 10 m. Man gleicht den Abschlusswiderstand dann so ab, dass ein sauberes Rechteck zu sehen ist, weder ein Über- noch ein Unterschwingen oder sonstige, merkwürdige Kurvenformen.

Abschließend sei erwähnt, dass bei komplexeren Kabeln unterschiedliche Wellenwiderstände auftreten können. So ist es bei einer geschirmten 2-Draht-Leitung ein Unterschied, ob man zwischen den Litzen oder zwischen den Litzen als Summe gegenüber dem Schirm misst. Für einen optimalen Abschlusswiderstand muss man daher fragen, wie die Signale angelegt werden. Gänzlich unübersichtlich wird es, wenn ein Signal als Differenz zwischen den Leitungen und ein weiteres als Summe gegenüber dem Schirm auftritt. Das kommt vor.

Eine Testmessung an einem USB 2 - Kabel : Beide Datenleitungen zusammenschaltet (an beiden Enden !) und gemessen gegenüber Masse : 130 Ohm, wobei oberhalb von 50 MHz die Welligkeit nicht mehr ganz weggedämpft werden kann. Gemessen als Differenz zwischen den Datenleitungen : 85 Ohm, wobei sauberer Abgleich bis zu 500 MHz möglich ist. Das entspricht dem Protokoll, nach dem die schnellen Signale als Differenz zwischen den Leitungen mit einer nominellen Impedanz von 90 Ohm übertragen werden.

Man kann mit dieser Methode auch ganz leicht den korrekten Anschluss von HF-Verstärkern und die Anpassung von (passiven) Antennen messen. Man wählt ein 50 oder 75 Ohm-Kabel so lang, dass es im untersuchten Frequenzbereich genügend Perioden der Welligkeit aufweist und schließt an sein Ende das untersuchte Objekt an. Verschwindet oder reduziert sich die Welligkeit, sieht man, inwieweit Anpassung vorliegt oder wie groß die Abweichungen sind. Dazu einen Widerstand aussuchen, der eine vergleichbare Welligkeit produziert. Das Stehwellenverhältnis ergibt sich dann durch Teilung des gefundenen Widerstandswertes durch die Nennimpedanz des Kabels. Gegebenfalls den Kehrwert nehmen, denn das Ergebnis muss laut Definition größer gleich 1 sein .