

Leitungen

Definition

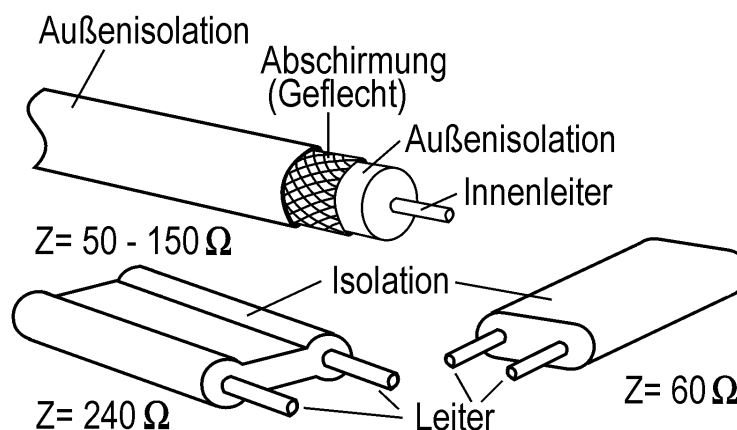
Sobald die Laufzeit der Signale in einer elektrischen Verbindung zwischen 2 Punkten in den Bereich der Anstiegszeiten und Impulslängen kommt, muß man die Verbindung als Leitung betrachten. Bei korrekter Behandlung kann man auch breitbandige Signale ohne Verzerrungen über Leitungen senden. Dabei tritt außer einer Verzögerung keinerlei Beeinträchtigung der Signalform auf.

Der Wellenwiderstand

Ein ganz wichtiger Begriff ist der Wellenwiderstand Z einer Leitung. Stellen wir uns eine unendlich lange Leitung vor: An ihrem Eingang mißt man einen rein ohmschen Widerstand, den Wellenwiderstand Z . Man kann sich vorstellen, daß die Front der angelegten Meßspannung in die Leitung hineinläuft und dabei Strom zur Aufladung der Leitungskapazität fließt. Nehme ich ein kurzes Leitungsstück und schließe am Ende abwechselnd einen Widerstand des Werts Z oder die unendlich lange Leitung an, so kann ich am Anfang des Leitungsstücks keinen Unterschied feststellen. Liegt am Ende der Leitung ein Widerstand des Wertes Z , so ist die Leitung abgeschlossen und man mißt den Eingangswiderstand Z .

Am Ende einer falsch oder garnicht abgeschlossenen Leitung mißt man je nach Länge und Abschluß alle möglichen induktiven und kapazitiven Impedanzen vom Kurzschluß bis zur Isolation in allen denkbaren Kombinationen, aber keinen ohmschen Widerstand. Dies Verhalten kommt durch die Reflexion der Meßspannung am unkorrekt abgeschlossenen Leitungsende zustande. In die Leitung hineingeschickte Signale werden am Ende reflektiert und kommen zum Eingang zurück.

Leitungstypen



Die beiden Grundtypen von Leitungen sind das Koaxkabel mit dem von der Abschirmung umgebenen Innenleiter und die Bandleitung mit 2 Leitern in festem Abstand. Das Koaxkabel ist asymmetrisch, da die Abschirmung spannungslos ist und den Innenleiter von der Umwelt perfekt isoliert. Die Bandleitung dagegen ist symmetrisch, da ihre beiden Leiter entgegengesetzt gleiche Spannungen gegen Erde führen, die sich schon in geringem Abstand aufheben. Beide Leitungstypen sind stromneutral, denn der im Leiter fließende Strom fließt in der Abschirmung bzw. dem anderen Leiter zurück. Statt einer Bandleitung kann man auch eine verdrehte Zweidrahtleitung, ein sog. twisted-pair als Leitung benutzen.

Die unmittelbare Nachbarschaft der Bandleitung nicht feldfrei und muß daher frei von Leitern und anderen Leitungen gehalten werden. Deshalb sollte in Gebäuden, Fahrzeugen etc. das vollständig geschirmte Koaxkabel verlegt werden.

Daten von Leitungen

Die wichtigsten Angaben über eine Leitung sind der Typ und der Wellenwiderstand. Koaxkabel haben Wellenwiderstände von 50Ω bis ca. 150Ω , Bandleitungen Z von 60Ω bis über 400Ω . Je dünner die Leiter und je größer der Abstand, desto höher wird Z. Ebenso wichtig für den Einsatz ist die Dämpfung der Leitung. Sie wird vor allem durch den Skineneffekt verursacht, der die Eindringtiefe des Stromflusses mit der Wurzel aus der Frequenz absinken läßt. Schon bei 1 MHz beträgt die Eindringtiefe in Kupfer $66 \mu\text{m}$, bei 100 MHz nur noch $6,6 \mu\text{m}$. Zur Abhilfe macht man die Oberflächen größer, das Kabel also dicker. Eine geringfügige Verbesserung ist durch Versilberung möglich.

Die kleine Übersicht gibt die Dämpfung üblicher 50Ω Koaxkabel in dB / 100m.

Kabeltyp	30 MHz	100 MHz	500 MHz	1 GHz
RG-174/U	17	28	60	-
RG-58/CU	8	16,1	40	-
RG-214/U	3,1	7,2	17,3	25,5
AIRCOM	1,7	3,3	8,2	12,5

Andere gängige Werte des Wellenwiderstands sind 60Ω , 75Ω und 100Ω . Für kleinere Werte kann man Kabel passend parallelschalten.

Das elektrische Feld in einer Leitung verläuft teilweise oder ganz im Isolator, der ein ϵ_r größer als 1 hat. Das macht die Signalgeschwindigkeit v_s kleiner als die Lichtgeschwindigkeit v_c . Der Verkürzungsfaktor $V = v_s / v_c$ sinkt proportional zur Wurzel aus $1 / \epsilon_r$ des Isolators. Das oft verwendete Polyäthylen hat ein ϵ_r von 2,25. Koaxkabel mit Polyäthylenisolation haben somit ein $V = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{1}{\sqrt{2,25}} = \frac{1}{1,5} = 0,66$. In Bandleitung ver-

laufen die Feldlinien teils im Isolator und in Luft, so daß das wirksame ϵ und der Verkürzungsfaktor näher an 1 liegen.

Legt man an das Ende eines Koaxkabels mit $Z = 50 \Omega$ eine Spannung von 1 V, so fließt ein Strom von 20 mA. In 5 ns läuft die Spannungsfront gerade um 1 Meter in das Kabel hinein und es floß eine Ladung von $20 \text{ mA} \cdot 5 \text{ ns} = 100 \text{ pCb}$. Da 1 m Kabel bei 1 V eine Ladung 100 pCb aufnimmt, hat ein Koaxkabel mit $Z = 50 \Omega$ eine spezifische Kapazität von $C^* = 100 \text{ pF} / \text{m}$.

Berechnet man die Frequenz, bei der 100 pF einen Blindwiderstand von 50Ω ergeben, so erhält man $f = 31,8 \text{ MHz}$. Schon bei 31,8 MHz und 1 m Leitungslänge hat eine abgeschlossene Leitung einen rein ohmschen, höheren Eingangswiderstand als der Blindwiderstand der Leitungskapazität. Dazu erhält man die Verzerrungsfreiheit und Frequenzunabhängigkeit der Übertragung.