

Hochfrequenzleitungen – oder Wellenleiter- haben die Aufgabe HF-Energie möglichst verlustarm weiterzuleiten, ohne dabei selbst zu strahlen.

Inhalt

Einführung	1
Der Wellenwiderstand	2
Der Verkürzungsfaktor	4
Die Dämpfung.....	7
Die Schirmdichte	8
Die Grenzfrequenz.....	9
Die Rückflussdämpfung (Return loss).....	9
Literaturverzeichnis.....	10

Einführung

Da zwischen Sender und Antenne in den meisten Fällen eine Leitung eingefügt ist, muss diese so beschaffen sein, dass sie die Anpassungsbeziehung zwischen Sender und Antenne nicht stört.

Größtmögliche Leistung wird übertragen, wenn der Scheinwiderstand des Generators (Sender) an den Scheinwiderstand des Verbrauchers (Antenne) angepasst ist.

Die Hochfrequenzleitung soll die Anpassung zwischen Sender und Antenne möglichst nicht oder nur wenig beeinflussen. Deshalb ist die Impedanz des Kabel, der von Sender und Antenne gleich. Diese ist in der Nachrichtentechnik ausnahmslos 50Ω

Weitere Formen von Hochfrequenzleitungen sind:

Die **Lecherleitung** (zwei parallelverlaufende Drähte mit einem Abstand klein gegenüber der Wellenlänge)

Die **Gobau-Leitung**, (eine Eindrahtleitung mit dielektrischem Überzug)

Der **Hohlleiter**, (Ausbreitung elektromagnetischer Wellen in leitenden Hohlzylindern).

Die **Streifenleitung** (strip line) und **Microstreifenleitung** (microstrip line)

Die ständig wachsende Informationsmenge in der Nachrichtenübertragung und die dafür erforderliche größere Bandbreite führte zur Entwicklung von Glasfaserkabel, die sogenannten LWL -Licht **Wellen Leiter**- Kabel.

Hochfrequenzleitungen Grundlagen, Begriffe, Parameter

Heinrich Hertz hat 1888 seinen gradlinig ausgespannten Draht zum Schutz gegen störende Einflüsse von außen, mit einem zylindrischen Drahtkäfig umbaut, und somit eine **Koaxialleitung** aufgebaut.

Wir beschränken uns aber in der folgenden Betrachtung auf die koaxial aufgebaute Hochfrequenzleitung, dem **Koax-Kabel**

Die wichtigsten Parameter eines koaxialen Kabels sind:

der Wellenwiderstand (Impedanz),

der Verkürzungsfaktor,

die Dämpfung,

die Schirmdichte,

die Grenzfrequenz,

die Rückflussdämpfung (Return loss RL, besser Struktur RL)

Einfluss auf diese Parameter haben das Leitermaterial, das Isolationsmaterial, der Durchmesser des Innenleiters, massiv oder verseilter Innenleiter, sowie das Durchmesser Verhältnis von Innenleiter zu Abschirmung und die Dichte des Abschirmgeflechtes.

Der Wellenwiderstand

Eine wichtige Größe bei HF-Leitungen ist der Wellenwiderstand (Z_0 , Z_L , oder nur Z und der Si Einheit Ω).

Vereinfacht gilt: $Z_0 = 1000 \times \sqrt{L} \div C$

Z_0 ist bei dieser Näherung reell. Der Wellenwiderstand hängt nicht von der Frequenz und der Leitungslänge ab.

Der Wellenwiderstand ist keinesfalls mit dem Gleichstromwiderstand der Leitung zu verwechseln, der ja auch Längenabhängig ist.

Eine HF-Leitung kann daher als die Zusammensetzung von Längstinduktivitäten und Querkapazitäten dargestellt werden.

Beispiel:

Seite | 2

Hochfrequenzleitungen Grundlagen, Begriffe, Parameter

An einem Kabel von $L = 1,70$ m wird eine Kapazität von 169 pF gemessen. Die Induktivität ist $0,495$ μH

$$Z_0 = 1000 \times \sqrt{0,495 \mu\text{H} \div 169 \text{ pF}} = 54 \Omega \quad (\text{Dipmeter-Methode } 55,8 \Omega) \quad \text{Soll } 50 \Omega$$

Ein weiteres Kabel hat eine Kapazität von 206 pF bei gleichzeitig einer Induktivität von $3,08$ μH

$$Z_0 = 1000 \times \sqrt{3,08 \mu\text{H} \div 206 \text{ pF}} = 122 \Omega \quad (\text{Dipmeter-Methode } 108 \Omega) \quad \text{Soll } ?? \Omega$$

Ein weiteres Kabel hat eine Kapazität von 409 pF bei gleichzeitig einer Induktivität von $4,19$ μH

$$Z_0 = 1000 \times \sqrt{4,19 \mu\text{H} \div 409 \text{ pF}} = 101 \Omega \quad (\text{Dipmeter-Methode } 84 \Omega) \quad \text{Soll } 75 \Omega$$

Ein Kabel hat eine Kapazität von 61 pF bei einer Induktivität von $0,646$ μH

$$Z_0 = 1000 \times \sqrt{0,646 \mu\text{H} \div 61 \text{ pF}} = 85 \Omega \quad (\text{Dipmeter-Methode } 84 \Omega) \quad \text{Soll } 75 \Omega$$

Beachte: Die Länge des Kabels geht nicht in das Messergebnis ein. Ebenso ist die Messfrequenz ohne Bedeutung

Merke: Der Wellenwiderstand eines Koax-Kabels ist nur von Induktivität und der Kapazität - also vom Aufbau des Kabels- abhängig. Nicht aber vom Gleichstromwiderstand.

Für die Praxis bedeutet dies, dünne Innenleiter (großes L) in weitem Abstand voneinander (kleines C) haben einen großen Wellenwiderstand Z_0 , dagegen dicke Leiter (kleines L) in geringem Abstand voneinander (großes C) einen kleinen Wellenwiderstand Z_0

Weil der Wellenwiderstand unabhängig von Leitungslänge und Frequenz ist, kann man die Messungen bei tiefen Frequenzen –wie bei digitalen LCR – Metern üblich machen. Das Ende der Leitung wird zuerst bei der Induktivitätsmessung kurzgeschlossen, und danach bei der Kapazitätsmessung offengelassen.

Eine weitere Möglichkeit zur Ermittlung des Wellenwiderstandes besteht darin, dass bei bekannter Kapazität (vorher messen) mit einem Dipmeter der Frequenzabstand Δf zweier benachbarter Resonanzen festgestellt wird.

$$Z_0 = 500000 \div C[pF] \times \Delta f[MHz]$$

Der Verkürzungsfaktor

In Folge des Dielektrikums $\epsilon_r > 1$ ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit auf Leitungen kleiner als die Lichtgeschwindigkeit (300000 km/s).

Die tatsächliche Länge stimmt nicht mit der elektrischen Länge (Freiraumlänge) überein. Die Formel für den Verkürzungsfaktor V lautet:

$$V = l_L \div l_0 \quad l_L, = \text{physikalische Länge} \quad l_0 = \text{Freiraumlänge, elektrische Länge}$$

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit v der elektromagnetischen Welle wird durch das Medium bestimmt, das sie durchläuft.

$$V = C_0 \div \sqrt{\epsilon_r}$$

Handelt es sich bei dem Medium um atmosphärische Luft, so ist $v = 3E10^8$ m/s (Lichtgeschwindigkeit). Die Permittivität ist 1. Die relative Permittivität ϵ_r aller anderen Stoffe ist immer >1 .

Aus der relativen Permittivität ϵ_r des verwendeten Stoffes lässt sich der Verkürzungsfaktor V einer Leitung bestimmen.

Man erhält V aus der Beziehung: $V = 1 \div \sqrt{\epsilon_r}$

Der Verkürzungsfaktor V ist in den Datenblättern von HF-Leitungen immer angegeben. Man benötigt ihn u. A. als Multiplikationsfaktor, wenn eine HF-Leitung auf eine bestimmte (elektrische z.B. $\lambda/2$ Länge zugeschnitten werden soll (muss!)) Die folgende Tabelle zeigt typische Werte für gebräuchliche Isolationsmaterialien.

Hochfrequenzleitungen Grundlagen, Begriffe, Parameter

Der Verkürzungsfaktor ist stets ≤ 1 und wird nur durch das ϵ_r (Dielektrizitätskonstante, heute Permittivität) des verwendeten Materials für das Dielektrikum bestimmt, welches u. A. auch mitbestimmend für die Dämpfung des Koax-Kabels ist.

Der Verkürzungsfaktor ist auch ein Qualitätsmerkmal. Je näher der Zahlenwert für den Verkürzungsfaktor V an 1 (Luft / Vakuum) herankommt, desto idealer (Verlustärmer) ist das Kabel.

Moderne Kabel haben ein V von 0,83 bis 0,87. Dagegen steht der Verkürzungsfaktor der vielleicht schon mehr als 50 Jahre alten Koaxkabel mit voll PE Dielektrikum von nur 0,66!

Dielektrikum	ϵ_r	V/%	V
Voll PE	2,3	66	0,66
PTFE/FEP	2,0	71	0,71
Schaum PE	1,5	83	0,83
Schaum PE Triple Layer	1,3	87	0,87
Luft / Vakuum	1,0	100	1,00

Die relative Permittivität ϵ_r eines Materials gibt den Faktor an, um den ein elektrisches Feld E bei konstanter äußerer Ladungsverteilung im Material gegenüber dem Freiraum geschwächt wird. Je kleiner der Wert von ϵ_r ist, desto Dämpfungsärmer ist das Material.

Vorteile von geschäumten PE gegenüber voll PE:

Dämpfung	ca. 30 % geringer
Kapazität	ca. 20 % niedriger
Verkürzungsfaktor	ca. bis 25 bis 33 % höher
Flexibilität	ausgezeichnet
Grenzfrequenz	ca. 15 % höher
Gewicht	ca. 60 % leichter bei gleicher Dämpfung

Nachteile von geschäumten PE gegenüber voll PE:

nicht ganz so kältebeständig

nicht ganz so feuchtigkeitsbeständig

nicht ganz so Dimensionsstabil, empfindlich gegen mechanische Pressung

Der Verkürzungsfaktor V einer unbekanntenen Leitung kann mit Amateurmitteln bestimmt werden.

Man schneidet ein kurzes Stück (2 – 3 m) ab und schließt ein Ende kurz. Das andere Ende erhält eine Koppelschleife aus 2-3 Windungen. Koppelt man nun die kurzgeschlossene Leitung z.B. an ein Dip-Meter an und verändert die Frequenz des Dip-Meters so werden mehrere Resonanzstellen (Dip's) gefunden.

Da die Leitung an beiden Seiten kurzgeschlossen ist, handelt es sich hier um eine $\lambda^{1/2}$ Resonanz.

Zuerst wird die geometrische (mechanische) Gesamtlänge ermittelt, welche identisch mit der verkürzten resonanten Wellenlänge ist. Danach wird die tiefste der Resonanzfrequenzen ermittelt. Daraus wiederum die Freiraumwellenlänge.

Da es sich um eine $\lambda^{1/2}$ Resonanz der HF-Leitung handelt, muss für die Berechnung auch nur die halbe Freiraumwellenlänge eingesetzt werden.

Aus der Division von der Leitungslänge durch die halbe Freiraumwellenlänge der gemessenen tiefsten Resonanzfrequenz ergibt sich der Verkürzungsfaktor v der HF-Leitung.

Beispiel:

Ein 4,10 m langes Koaxkabel wird an einem Ende kurzgeschlossen und am anderen Ende über eine Koppelwicklung mit einem Grid-Dip-Meter gespeist. Es werden $\lambda^{1/2}$ ($n \times \lambda^{1/2}$) Resonanzen bei 24,2; 48,5; 73; 96; 123; 147; 170; 195 und 220 MHz festgestellt.

Die erste Resonanzfrequenz ist also 24,2 MHz. Die zu dieser Frequenz gehörende Freiraumwellenlänge ist $L = 3E^8 \div 24,2E^6 \text{ MHz} = 12,40 \text{ m}$ $L/2 = 6,20 \text{ m}$

Hochfrequenzleitungen Grundlagen, Begriffe, Parameter

$$V = 4.10 \text{ m} \div 6,20 \text{ m}$$

$$V = 0,66 \text{ (voll PE)}$$

aus dem Verkürzungsfaktor lässt sich die relative Permittivität ermitteln

$$\epsilon_r = 1 \div V^2 = 1 \div 0,66^2 = 2,296$$

Die Dämpfung

Die Dämpfung einer HF-Leitung ist im Gegensatz zum Verkürzungsfaktor und Wellenwiderstand, frequenzabhängig. Die Verluste steigen mit der Frequenz und der Kabellänge. Sind Leitungen mit ihrem Wellenwiderstand abgeschlossen, werden die Verluste ausschließlich durch den Längswiderstand der Leiter und durch den Verlustwinkel (Permittivität) des verwendeten Isoliermaterials bestimmt.

Die Dämpfung α einer HF-Leitung resultiert hauptsächlich aus den proportional zu \sqrt{f} zunehmenden Leiterverlusten (Skinneffekt) und den oberhalb 10 MHz auftretenden proportional zu f zunehmenden dielektrischen Verlusten (ϵ_r abhängig).

Normalerweise besteht das Leitermaterial aus Elektrolyt-Kupfer. Es handelt sich entweder um Drähte oder verseilte Kupferlitze in blanker (Cu), versilberter (CuAg) und verzinnter Ausführung (CuSn). Der Oberflächenschutz dient dazu Oxydation des Kupferleiters zu verhindern. Besonders bei hohen Frequenzen kommt dem Oberflächenschutz wegen des Skinneffektes eine große Bedeutung zu.

Feste Drähte haben die kleinste Dämpfung. Litzen haben eine höhere Dämpfung, aber auch eine erhöhte Flexibilität.

Für Leitungen, die eine höhere Festigkeit erfordern, wird der Stakudraht –ein kupferplattierter Stahldraht (StCu) verwendet.

Für Dämpfungskabel wird z.B. eine Chrom-Nickel-Legierung eingesetzt. Chrom-Nickel Legierungen haben nur eine elektrische Leitfähigkeit (S/m) von $1,39E6$, Kupfer hat $5,80E7$, also eine um den Faktor 42 schlechtere Leitfähigkeit als Kupfer.

Anmerkung:

Aus diesem Grund ist Edelstahlitze als Antennendraht oder Edelstahlstäbe als parasitäre Elemente für Yagi-Antennen nicht die erste Wahl!

Hochfrequenzleitungen Grundlagen, Begriffe, Parameter

Aus Gewichts- und Kostengründen wird bei dicken Koaxkabeln häufig ein kupferbeschichteter Alu-Draht (ECOFLEX15) oder ein dünnwandiges Kupferrohr (CELLFLEX-Kabel) verwendet. Beide Kabel sind in der Anwendung eingeschränkt. Kupferbeschichteter Aludraht ist nicht geeignet bei permanenter Bewegung (Rotorumgehung). Bruchgefahr!

CELLFLEX Kabel sind (fast) nicht bewegbar, eignen sich daher nur für feste Verlegung.

Die einfachste, komfortabelste Methode zur Bestimmung der Frequenz – und längenabhängigen Dämpfung ist ein Network-Analyzer.

In dem Messmode „Transmission, S21“ lässt sich die Dämpfung sehr leicht und sicher bestimmen. Der Analyzer schickt ein vom Mitlaufgenerator (Tracking Generator) erzeugtes Signal durch das zu messende Objekt zurück in den Messeingang des Analyzers. Zuvor wurde der Analyzer in der Betriebsart Transmission kalibriert in dem der Generatorausgang mit dem Messeingang durch ein kurzes (fast) verlustfreies Kabel verbunden wurde.

Wegen der üblichen Skalierung in dB dieser Messgeräte, wird auch die Dämpfung unmittelbar in Dezibel angezeigt. Der Messbereich zu hohen Frequenzen hin geht bis in den GHz Bereich, je nach Preisklasse des NWA.

Der dargestellte Dämpfungsverlauf kann komfortabel mit einem Marker abgefahren werden, so dass für jede beliebige Frequenz die Dämpfung des DUT abgerufen werden kann.

Ein wichtiger Hinweis. Das zu messende Kabel darf nicht als Rolle gemessen werden, sondern muss abgewickelt werden.

Ein zur Spule aufgewickelter Kabel ist eine Induktivität (vergleiche Kabeldrossel als Mantelwellensperre) welche das Messergebnis dadurch verfälscht, dass ein Frequenzabhängiger induktiver Widerstand im Messpfad liegt.

Die Schirmdichte

Der Außenleiter eines Koaxkabels wirkt als Schirm und schützt einerseits das übertragende Signal vor Störungen von außen, als auch die Umgebung vor Störungen aus dem Kabel. Der Außenleiter ist meistens ein Schirmgeflecht aus blanken, versilberten oder verzinnenden Kupferdrähten.

Für besondere Anforderungen -mechanische oder elektrische- besteht der Außenleiter aus

Hochfrequenzleitungen Grundlagen, Begriffe, Parameter

Doppelgeflecht, Geflecht und Folie, oder aus Vollmaterial
(Festmantelkabel, semi rigid wie das RG141 oder CELLFLEX)

Man spricht bei den Geflechten von Bedeckungsgrad.

Das ist eine berechnete Prozentangabe, die beschreibt, wie gut ein Geflecht die darunterliegende Oberfläche bedeckt. Werte zwischen 80 und 90% sind üblich

(Anmerkung: aber nur bei Qualitätsware, billige Kabel erreichen diese Werte überhaupt nicht)

Die Schirmdämpfung (dB) beträgt bei hohen Frequenzen:

Kabel	Dämpfung	Art des Kabels
Einfach geschirmte Kabel	> 40 dB	einfaches RG58, RG8, RG213
Doppelt geschirmte Kabel	> 60 dB	RG214, RG223, RG401
Vollmantelkabel	> 120 dB	RG141, CELLFLEX
Folie/Geflecht	> 105 dB	alle neuartigen Kabel wie Ecoflex, Aircell, Airborne, HyperFlex, Ultraflex

Die Grenzfrequenz

Die nutzbare Frequenz liegt zwischen Gleichspannung und der oberen Grenzfrequenz, bei der sich die Ausbreitungscharakteristik der elektrische Welle ändert.

Die Grenzfrequenz ist abhängig vom Kabeltyp bis in den hohen GHz Bereich (zwischen 6 und 10 GHz) und ist in den Daten des Herstellers vermerkt.

Sie ist abhängig von der relativen Permittivität ϵ_r des Dielektrikums und dem Durchmesser von Schirm und Innenleiter.

$$f_0[\text{GHz}] = 191 \div \sqrt{\epsilon_r} \times 1 \div D+d$$

Die Rückflusdämpfung (Return loss)

Strukturelle Verluste des Koax-Kabels verursacht durch Unvollkommenheiten der Impedanz führen dazu, dass Wellen an einem oder mehreren Punkten entlang der Übertragungsleitung reflektiert werden und in Richtung Quelle wandern.

Die richtungsabhängige Intensität wird gemessen und in dB frequenzabhängig quantifiziert.

Rückflusdämpfungen sind frequenzabhängig und erreichen im Bereich bis ca. 500 MHz einen Wert von >30dB was einem VSWR von 1,06 entspricht.

Ab ca. 500 MHz bis 1 GHz ist das SRL >25 dB entsprechend einem VSWR von 1,10.

Oberhalb 1 GHz ist das SRL nur noch >20 dB entsprechend einem VSWR von 1,20.

Oberhalb 6 GHz sinkt das Return loss deutlich ab. Für 10 GHz werden 10 dB SRL (VSWR 2) nur noch von sehr wenigen Kabeltypen erreicht.

Hochfrequenzleitungen Grundlagen, Begriffe, Parameter

Neben dem strukturellen Return loss kann bei unsachgemäßer mechanischer Behandlung das daraus resultierende selbst erzeugte Return loss überwiegen.

Schlaufen beim Aufwickeln vom Kabel, Knickstellen, häufiges biegen in zu kleinen Radien, Druckstellen durch Kabelbinder oder durch unachtsames „auf das Kabel treten“ verformen die Geometrie und damit unweigerlich die Kapazität zwischen Außenleiter und Innenleiter was eine Impedanzänderung bewirkt.

Gerade bei den verlustarmen Kabeln mit geschäumten Dielektrika ist die Gefahr der Geometrieänderung durch mechanische Einflüsse sehr groß. Größer als bei Kabeln der alten Generation mit Voll PE Dielektrika.

Nur sorgfältiger Umgang und umsichtige Behandlung der Koax-Kabel schützen vor einer dauerhaften Verschlechterung der eigentlich sehr guten Parametern moderner verlustarmer Koax-Kabel.

Literaturverzeichnis

Krische, A. (kein Datum). *Antennenbuch* (Bd. 13. Auflage).

MESSI & PAOLONI. (2018). *Produktkatalog*.

SSB Electronic. (kein Datum). *Datenblätter AIRCELL Kabel*.