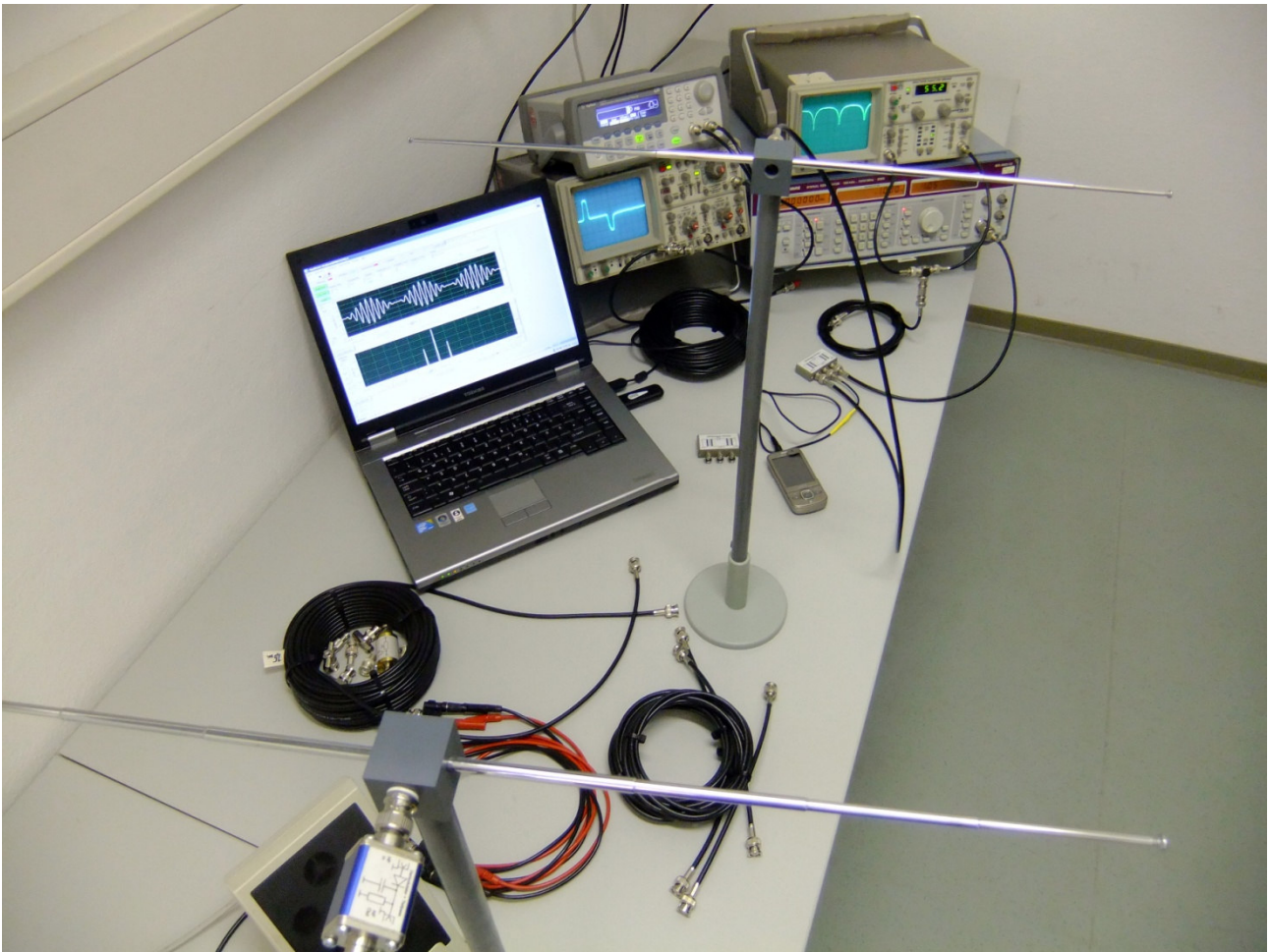


Radiowellen auf Leitungen und im freien Raum



Einführung:

Radiowellen sind elektromagnetische Wellen (EM-Wellen) und werden seit mehr als 100 Jahren bei drahtgebundenen und drahtlosen Übertragungsverfahren benutzt. In der drahtgebundenen Übertragungstechnik wie **Telefonverbindungen, Breitbandanschlüssen, DSL, LAN** und anderen **Internetverbindungen** werden EM-Wellen genutzt. Auch bei der traditionellen drahtlosen Übertragung wie **Rundfunk, Fernsehen, Funkverbindungen**, sowie bei modernen Kommunikationsmitteln wie **Mobilfunk GSM, UMTS, LTE, 5G, DECT, WLAN, Bluetooth, DAB+, DVB-S, DVB-T, GPS, RFID** e.t.c., sind EM-Wellen die physikalische Grundlage zur Informationsübertragung. Dafür wird der typische Radiofrequenzbereich (MHz bis einige GHz) genutzt. Notwendig für die Übertragung von grösseren Informationsraten ist die Modulation. Hierbei wird der Trägerfrequenz der EM-Welle ein Nutzsignal aufgeprägt. Der Versuch beinhaltet Experimente, welche die Ausbreitungseigenschaften der EM-Wellen und die Möglichkeiten einer Modulation in diesem Frequenzbereich verdeutlichen.

Experimenteller Inhalt:

- Reflexion und stehende Wellen bei Fehlanpassung der Übertragungsleitung
- Ausbreitungsgeschwindigkeit EM-Wellen auf Leitungen, rel. Permittivität, Verkürzungsfaktor
- Übertragung höherer Frequenzen und kurzer Impulse über Kabel und mögliche Fehlerquellen
- Modulation und Demodulation von Signalen (Beobachtung im Zeit- und Frequenzbereich)
- Abstrahlung und Empfang von Radiowellen über Antennen (EM-Wellen im freien Raum)
- Aufbau einer drahtlosen Übertragungsstrecke (Senden und Empfangen eines Tonsignals)
- Experimente mit Mikrowellen im Bereich von ca. 9 GHz im Hohlleiter und freien Raum

Literatur:

Meinke, H.H., Gundlach, F.W.: Taschenbuch der Hochfrequenztechnik; Springer-Verlag
Rothammel, K., Alois Krischke: Rothammels Antennenbuch; DARC-Verlag

www.radartutorial.eu

Zinke, O., Brunswig, H.: Hochfrequenztechnik 1; Springer-Verlag
Unger, H.G.: Elektromagnetische Wellen auf Leitungen; Hüthig Buch Verlag; Heidelberg
Voges, E.: Hochfrequenztechnik; Bd. 2; Hüthig Buch Verlag; Heidelberg
Unger, H.G.: Hochfrequenztechnik in Funk und Radar; Teubner Studienskripten; Stuttgart
Unger, H.G.: Elektromagnetische Theorie für die Hochfrequenztechnik - Teil I; Hüthig Buch Verlag
Zimmer, G.: Hochfrequenztechnik; Springer-Verlag

Fragen zur Versuchsvorbereitung

1. Welche Besonderheiten sind bei der Übertragung von Hochfrequenzsignalen im Vergleich zur Niederfrequenztechnik zu beachten?
2. Beschreiben Sie einige Leitungsarten zur Übertragung höherfrequenter Signale.
3. Warum muss man mit Modulation arbeiten, um Signalinformationen zu übertragen?
4. Was ist der Unterschied zwischen Modulation und Mischung?
5. Beschreiben Sie die Funktionsweise von Antennen zur Abstrahlung b.z.w. Empfang von elektromagnetischen Wellen
6. Ausbreitungseigenschaften elektromagnetischer Wellen verschiedener Frequenzen im freien Raum (kHz...GHz)

1. Elektromagnetische Wellen (Radiowellen) auf Leitungen

Die Übertragung höherfrequenter Signale auf Leitungen unterscheidet sich von der Versorgungstechnik, wo nur Gleichstrom oder sehr niederfrequenter Wechselstrom transportiert wird. In beiden Fällen gilt aber natürlich das Leistungsanpassungsgesetz mit Z_Q , dem Quellwiderstand und Z_A , dem Abschlusswiderstand (bei Wechselstrom als komplexe Größe). Bei $Z_Q = Z_A$ entsteht Leistungsanpassung d.h. max. Leistung wird übertragen. $Z_Q > Z_A$ entspricht Unteranpassung, sollte meistens vermieden werden. Bei Überanpassung $Z_Q < Z_A$ kann ein höherer Wirkungsgrad erreicht werden. Der Leistungsanpassungsfall $Z_Q = Z_A$ wird nicht immer angestrebt, da hier der Wirkungsgrad nur 50% beträgt. Bei der Gleichstrom- und Niederfrequenzübertragung ist ansonsten nur der ohmsche Widerstand und bei mehreren Leitern der Isolationswiderstand, der zur Übertragung benutzten Leitung von Interesse.

Im höherfrequenten Bereich muss man bei der Übertragung auf Leitungen eine zusätzliche physikalische Größe, den Leitungswellenwiderstand Z_L zusätzlich beachten.

Es wird gefordert: Leitungswellenwiderstand Z_L = Abschlusswiderstand Z_A .



Diese Widerstandsanpassung hat aber nichts mit dem oben genannten Leistungsanpassungsgesetz zu tun, sondern ist nur nötig, um stehende Wellen zu vermeiden. Gelegentlich werden allerdings stehende Wellen in der Praxis bewusst eingesetzt. Bei Leitungslängen, welche einige Prozent der zu übertragenden Wellenlänge haben, muß diese Regel eingehalten werden, um Signalverfälschungen zu vermeiden. Im Laborbereich betrifft das Frequenzen ab einigen MHz. Auch bei digitalen Signalen höherer Bitrate (ab ca. 1 Mbit/sek) sind hohe Frequenzanteile enthalten und müssen optimal übertragen werden, um Informationsverlusten vorzubeugen.

Um mögliche Fehler beim Zusammenschalten von Gerätetechnik im Frequenzbereich $>1\text{MHz}$ zu vermeiden ist das Wissen um die Begriffe Wellenwiderstand, Anpassung, Reflexion, Ausbreitungsgeschwindigkeit, e.t.c. unentbehrlich.

Leitungstheorie

James Clerk Maxwell (1831-1879) entwickelte mit seinen Maxwellschen Gleichungen die Grundlage für die mathematische Beschreibung von elektromagnetischen Wellen.

Mit der Leitungstheorie werden die Vorgänge auf den Leitungen erklärt.

Wird an die Leitung eine Wechselspannung angelegt, wird ein Wechselstrom $u(t)$ „in die Leitung fließen“.

$$u(t) = \hat{u} \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

Signale können die unterschiedlichsten Frequenzen enthalten, die am Ende einer Übertragungskette noch alle vorhanden sein sollten.

Die erdgebundene Übertragung von Signalen höherer Frequenz ($>1\text{MHz}$) erfolgt im einfachsten Fall durch eine symmetrische Leitung eine Koaxialleitung oder

Twisted Pair Leitung.

Die symmetrische Leitung ist z.B. eine gewöhnliche Zweidrahtleitung/Lecherleitung (Adernpaar).

Sie kann auch mit besonderen geometrischen Eigenschaften ausgerüstet werden und hat einen konstanten Abstand zwischen zwei einander gleichen Einzeladern.

Eine Koaxialleitung besteht aus einem Innenleiter und einem koaxial angeordneten Aussenleiter.

In der Twisted Pair Leitung liegen zwei sich gleichende Einzeladern ohne Steg nebeneinander und sind mit konstantem Drehsinn miteinander verdreht.

Die elektrischen Grundeigenschaften einer Leitung

Der Leitungswellenwiderstand Z_L einer beliebigen, allgemeinen Leitung ergibt sich aus den Grundeigenschaften der Leitung: Induktivität $L' dx$, Kapazität $C' dx$, Widerstandsbelag $R' dx$, Querwiderstand $G' dx$.

Die Induktivität $L' dx$ einer Spule als Haupteigenschaft entsteht durch das Hintereinanderschalten vieler einzelner Leiterschleifen. Eine Leitung kann als abgewickelte Spule oder zumindest als eine Spule mit nur einer Windung aufgefasst werden. Es ist daher zu erwarten, dass eine Leitung auch geringe induktive Eigenschaften hat.

Genauer betrachtet setzt sich der Wert aus einem äußeren und einem inneren Induktivitätsbelag zusammen. Der äußere Induktivitätsbelag ist vom geometrischen Leitungsaufbau und von den magnetischen Eigenschaften des Leiters abhängig. Da normalerweise keine ferromagnetischen Leiter verwendet werden, ist dieser Induktivitätsbelag unabhängig vom Stromfluss. Ein viel kleinerer innerer Induktivitätsbelag beruht auf den magnetischen Wechselfeldern im Leiter. Mit zunehmender Frequenz nimmt der Wert ab, da infolge des Skin效ekts das Leiterinnere feldfrei wird. In guter Näherung kann daher der Induktivitätsbelag als frequenzunabhängig angesehen werden.

Die Kapazität $C' dx$ einer Leitung ergibt sich aus den gegenüber liegenden Flächen der Leitungsadern. Eine Leitung wird erwartungsgemäß auch eine geringe Kapazität besitzen. Die Leitung hat ebenso einen ohmschen **Gleichstromwiderstand**. Er wird für die gesamte Schleife gemessen, d.h., sein Wert steht für die Hin- und Rückleitung.

Der Wert wird durch den geometrischen Aufbau der Leitung und der Dielektrizitätskonstante der Isolierung bestimmt. Wie bei jedem Kondensator nimmt der Wert zu, je geringer der Abstand zwischen den Adern ist, je größer die Leiteroberfläche ist und je größer der Wert der Dielektrizitätskonstante ist. Leitungen hoher Güte haben kleinere Werte für C' .

Widerstandsbelag $R'dx$ (Leitungswiderstand, Längswiderstand, Serienwiderstand)

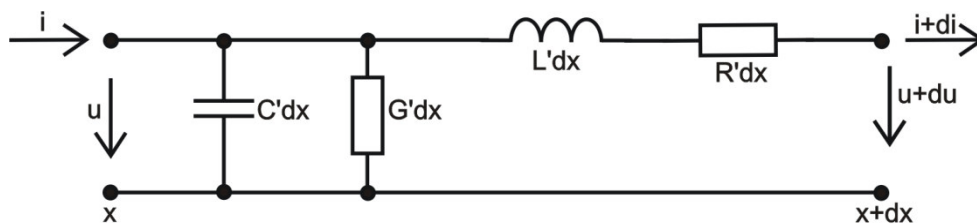
In den meisten Fällen reicht es, darunter den Gleichstromwiderstand einer Ader zu verstehen. Teilweise wird in Datenblättern symmetrischer Kabel auch der Schleifenwiderstand eines Aderpaares angegeben. Mit zunehmender Frequenz ändert sich der Wert des Widerstandsbelags. Der ohmsche Wechselstromwiderstand der Leitung nimmt zu, da durch den Skineneffekt eine Stromverdrängung an die Leiteroberfläche erfolgt. Der noch aktiv vom Strom durchflossene Leiterquerschnitt wird kleiner, d.h., der Widerstand nimmt zu.

Der Isolationswiderstand $G'dx$ (Ableitungswiderstand Querwiderstand, Parallelwiderstand) erfasst die Isolationsverluste und die dielektrischen Verluste (Permittivität).

In diesem Wert werden die Isolationsverluste und die dielektrischen Verluste der Isolierung erfasst. Der Ableitungsbelag ist von der Frequenz abhängig. Sein Wert wird in mS/km oder uS/m angegeben. An Stelle von G' wird manchmal auch der Verlustfaktor $\tan \delta$ angegeben werden. Sein Wert errechnet sich zu $\tan \delta = G' / \omega C'$

Für analoge und digitale Signale lässt sich eine Leitung durch eine passive Vierpolschaltung beschreiben. Sie vereint die wichtigen Eigenschaften in den uns bekannten Bauteilen wie Widerstand, Induktivität und Kapazität. In den Leitungsgleichungen wird nur ein "kurzes" Stück der Leitung betrachtet und zur Berechnung herangezogen. Wenn diese Größen gleichmäßig über die Leitung verteilt sind spricht man von einer homogenen Leitung.

Ersatzschaltbild eines homogenen Leitungsstücks von x bis $x + dx$



Wird an den Eingang der Leitung eine Spannung angelegt gilt:

$$u_{Hin} = Z_L \cdot i_{Hin}$$

u_{Hin} : Spannung am Eingang der Leitung

i_{Hin} : Strom am Eingang der Leitung

Z_L : Wellenwiderstand der Leitung

Aus der Spannung u und dem Strom i an der Leitung ergeben sich die beiden Differentialgleichungen der homogenen Leitung (Leitungsgleichungen).

Leitungsgleichungen

$$\frac{du}{dx} = -(R' + j\omega L') \cdot i$$

$$\frac{di}{dx} = -(G' + j\omega C') \cdot u$$

Leistungsarten

Zur Übertragung höherfrequenter elektromagnetischer Wellen benutzt man verschiedene Leistungsarten z.B.: Zweidrahtleitungen (Lecherleitung), Koaxialleitungen, Twisted Pair, Streifenleitungen und Hohlleiter (ab ca. 5 GHz).

Zweidrahtleitung (Lecherleitung)

Die Lecher-Leitung ist nach dem Physiker Ernst Lecher (1856-1926) benannt. Es ist die "Urform" einer Leitung zur Übertragung einer elektromagnetischen Welle. Für Twisted Pair Kabel, welche heute hauptsächlich wegen der kostengünstigen Herstellung, das meistverwendete Kabel zur Übertragung der Signale in Computernetzwerken ist, gelten die gleichen Funktionsprinzipien wie für Zweidrahtleitungen.

Koaxialleitung

Neben der Zweidrahtleitung ist die Koaxialleitung die am meisten verwendete Leitung. Koaxkabel werden als selbstabschirmende Kabel bezeichnet.

Die Grenzfrequenz von Koaxkabeln liegt zwischen 1...5 GHz.

Typische Werte für den Wellenwiderstand von Koaxkabel sind 50 Ohm und 75 Ohm.

Im Hochfrequenzbereich nimmt die Koaxialleitung eine dominierende Stellung ein.

Diese verdankt sie folgenden Eigenschaften:

- Verwendbar von DC bis ca. 10 GHz
- Das Feld ist vollständig auf das Innere des Leitersystems begrenzt
- mässige Verluste

Twisted Pair

Twisted-Pair-Kabel bestehen aus 2 Einzeladern, welche miteinander verdreht sind.

Diese werden vorzugsweise in der Telekommunikations und Computertechnik verwendet.

Streifenleitung

Die Koaxialleitung hat den Nachteil, dass sie für den Bau von Schaltungen, z.B. Verstärkern unter Einbezug von Stichleitungen oder generell für den Zusammenbau mit konzentrierten Bauelementen, nicht sonderlich geeignet ist. Gewünscht werden Leistungsarten, welche folgende Eigenschaften aufweisen:

- Einfache Herstellung mittels Ätzverfahren
- Einfacher Einbau von konzentrierten Schaltelementen wie Halbleiterbauteilen, Widerständen und Kondensatoren.
- Kleine Abmessungen und die Möglichkeit, viele Schaltfunktionen auf einer Platine vereinigen zu können (gedruckte Hochfrequenzschaltungen oder sog. Hochfrequenz-Hybridschaltungen bis hin zu monolithisch integrierten HF-Schaltungen)

Die Antwort auf dieses Anforderungsprofil bilden eine ganze Reihe von sogenannten Streifenleiterschaltungen.

Hohlleiter

Für die Übertragung höherer Frequenzen (ab ca. 6 GHz) bietet sich die Verwendung von Hohlleitern an. Hohlleiter sind erst oberhalb der kritischen Frequenz funktionsfähig. Sie lässt sich unmittelbar durch die Abmessungen bestimmen.

Abhängig von den Abmessungen des Hohlleiters und der Leitfähigkeit der Innenwände bilden sich die unterschiedlichen Feldkombinationen (Moden) aus.

Die Moden ermöglichen durch richtige Dimensionierung eine spez. Form der geführten Wellenausbreitung mit geringen Verlusten bis in den EHF Bereich.

Hohlleiter besitzen ein Hochpassverhalten.

Bei Hohlleiterkabel werden mittels einer Sonde elektromagnetische Felder angeregt.

Wellenwiderstand einer Leitung

Aus den oben genannten Leitungsgleichungen lässt sich der Wellenwiderstand bestimmen. Wenn Längsverluste über R' und Querableitverluste über G' auftreten gilt für Z_L :

$$Z_L = \sqrt{\frac{R' + j\omega L'}{G' + j\omega C'}} \quad (\text{Leitung mit Verlusten})$$

$$Z_L = \sqrt{\frac{L'}{C'}} \quad (\text{verlustlose Leitung})$$

In der Praxis lässt sich Z_L mit einer LC - Messbrücke durch zwei Messungen bei höherer Frequenz ermitteln. Die Wellenlänge der Messfrequenz muss sehr viel größer sein als die Länge des Leiterstücks. Die eine Messung erfolgt im Leerlauf bei offenem Leitungsende und liefert die Kapazität C' des Leitungsstücks. Die zweite Messung wird bei kurzgeschlossener Leitung durchgeführt und ergibt die Induktivität L' dieses Leitungsstücks.

Hauptsächlich hängt also der Wellenwiderstand vom Induktivitätsbelag L' und dem Kapazitätsbelag C' ab. Für einfache Leitungen kann deshalb der Wellenwiderstand Z_L aus den geometrischen und physikalischen Eigenschaften wie folgt hergeleitet werden

Wellenwiderstand einer Koaxialleitungen

Ein Koaxialkabel stellt einen Zylinderkondensator dar, C' ist dessen Kapazität pro Längeneinheit. L' ist die Induktivität des Kabels pro Längeneinheit.

Herleitung für den Wellenwiderstand einer Koaxialleitung

Der Wellenwiderstand ist: $Z_L = \sqrt{\frac{L'}{C'}}$

für den Induktivitätsbelag gilt: $L' = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \frac{D}{d}$

für den Kapazitätsbelag gilt: $C' = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r}{\ln \frac{D}{d}}$

$$Z_L = \sqrt{\frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot \left(\ln \frac{D}{d} \right)^2}{(2 \cdot \pi)^2 \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r}} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \sqrt{\frac{\mu_0 \cdot \mu_r}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r}} \cdot \ln \frac{D}{d}$$

$$Z_L = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \cdot \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \cdot \ln \frac{D}{d}$$

mit magnetische Feldkonstante: $\mu_0 = \frac{4 \cdot \pi}{10^7} \approx 1,2566 \cdot 10^{-6} \left[\frac{V \cdot s}{A \cdot m} \right]$

und elektrische Feldkonstante: $\epsilon_0 = \frac{1}{\mu_0 \cdot c_0^2} \approx 8,854 \cdot 10^{-12} \left[\frac{A \cdot s}{V \cdot m} \right]$

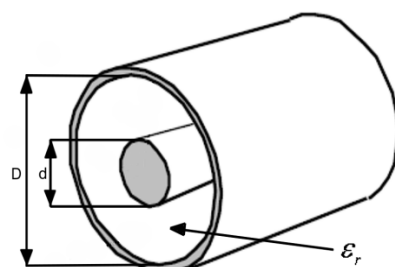
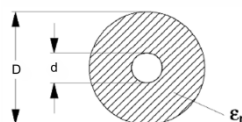
ergibt sich:

$$Z_L = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{4 \cdot \pi}{10^7} \cdot c_0 \cdot \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \cdot \ln \frac{D}{d} [\Omega]$$

bei Permeabilitätszahl im Vakuum, Luft, Nichteisenmetalle: $\mu_r \approx 1$

ergibt sich für den Wellenwiderstand eines Koaxialkabels:

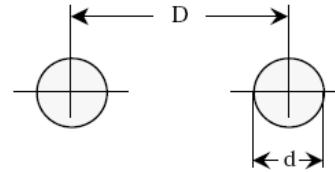
$$Z_L = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \cdot \ln \frac{D}{d} [\Omega]$$



Wellenwiderstand einer Zweidrahtleitung

Bei luftgefüllten Zweidrahtleitungen (Lecherleitung) können die Leitungsbeläge L' und C' und der Wellenwiderstand wie folgt aus den geometrischen Abmessungen berechnet werden. Es gilt:

$$Z_L = 120\Omega \cdot \ln \frac{2D}{d} \quad \frac{2D}{d} = e = 2,71828$$

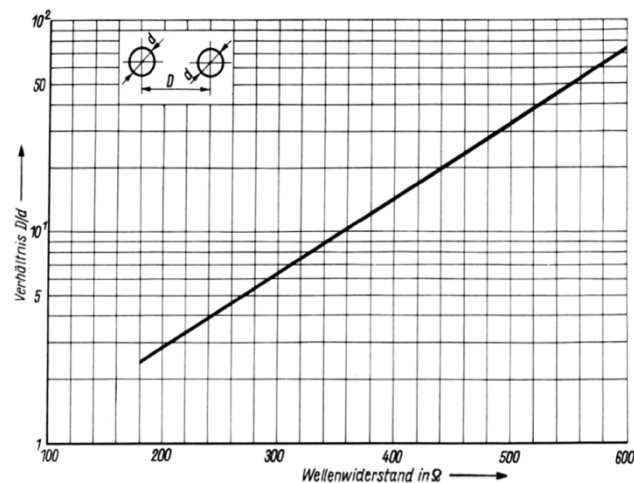


D = Abstand der Leitungen

d = Durchmesser der Leitung

($D/d \geq 2,5$)

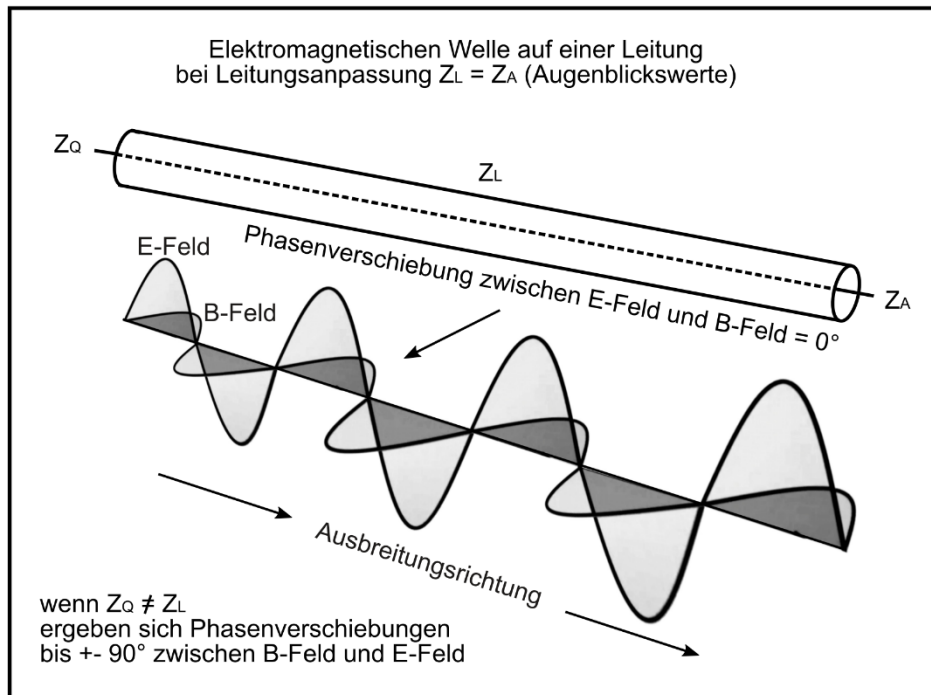
Der Wert von 120Ω ergibt sich bei einer "luftgefüllten Zweidrahtleitung" ($\epsilon_r = 1$) mit den Normabmessungen.



Anpassung und Reflexion bei Leitungen:

In der Praxis sind Leitungen endlich. Deshalb werden Wellen am Ende reflektiert, sofern nicht die vorhandene Energie in einem Widerstand abgeleitet wird (Anpassung der Leitung).

Der Verbraucher Z_A ist "angepasst", wenn $Z_L = Z_A$ ist. Dann wird die Energie der Welle voll in Z_A aufgenommen (Idealfall). Für diesen Fall entsteht keine stehende Welle verursacht durch Reflexionen. Es ist kein Phasenunterschied zwischen E-Feld und B-Feld der Welle zu beobachten. Nur in diesem Fall kann die maximale Leistung von der Leitung an den Verbraucher b.z.w. Abschlusswiderstand Z_A abgegeben werden.



Für alle Fälle $Z_L \neq Z_A$ ergibt sich ein Phasenunterschied zwischen E-Feld und B-Feld.

Bei Kurzschluss am Ende der Leitung wird die Welle reflektiert, und es kann am Ende ein Strommaximum und Spannungsminimum (B-Feld maximal, E-Feld minimal) beobachtet werden. Ist die Leitung offen ($Z_A = \infty$), wird am Ende die Spannung maximal und der Strom zu Null (E-Feld maximal, B-Feld minimal). Die Welle wird ebenfalls reflektiert.

Je nach Grösse des Abschlusswiderstandes Z_A (im Vergleich zum Leitungswiderstand Z_L) ergibt sich ein Reflexionsanteil, der zu einer rücklaufenden Welle mit der Spannung $U_{\text{Rück}}$ und dem Strom $I_{\text{Rück}}$ führt. Für die Grössen der rücklaufenden Welle gilt ebenso die Bedingung: $U_{\text{rück}} = Z_L \cdot I_{\text{rück}}$. Hinlaufende und rücklaufende Welle überlagern sich und es entsteht eine stehende Welle. Wenn man den hinlaufenden und rücklaufenden Anteil der Spannungen misst kann man die Anpassung feststellen. Die physikalische Grösse dafür ist der Reflexionsfaktor r oder Stehwellenverhältnis VSWR.

$$\text{Stehwellenverhältnis } VSWR = \frac{U_{\text{max}}}{U_{\text{min}}} = \frac{U_{\text{Hin}} + U_{\text{Rück}}}{U_{\text{Hin}} - U_{\text{Rück}}} = \frac{1 + |r|}{1 - |r|} \quad 1 \leq VSWR = \infty$$

$$\text{Reflexionsfaktor } |r| = \frac{U_{\text{Rück}}}{U_{\text{Hin}}} = \frac{I_{\text{Rück}}}{I_{\text{Hin}}} \quad r = \frac{Z_A - Z_L}{Z_A + Z_L} \quad -1 \leq r \leq 1 \quad Z_A = Z_L \frac{r+1}{1-r} \quad Z_L = \frac{Z_A}{\frac{r+1}{1-r}}$$

Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wellen auf Leitungen

An den Anfang einer unendlich langen Leitung wird zur Zeit $t = 0$ ein Rechteckimpuls angelegt. Wäre die Geschwindigkeit der Ausbreitung unendlich, so würde zur gleichen Zeit diese Spannung an allen Punkten der Leitung liegen. In Wirklichkeit spielt sich der Vorgang aber so ab, wie es die Abbildung angibt: Der Impuls breitet sich mit endlicher Geschwindigkeit aus.

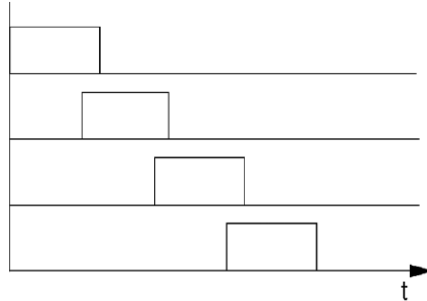


Abbildung 5 Ausbreitung eines Rechteckimpulses auf einer Leitung

*Berechnung der Ausbreitungsgeschwindigkeit
einer elektromagnetischen Welle durch*

Multiplikation der Belagswerte von Induktivität und Kapazität :

$$L' \cdot C' = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \frac{D}{d} \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r}{\ln \frac{D}{d}} \quad \text{es folgt daraus :}$$

$$L' \cdot C' = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \quad \text{Ersetzen von } \epsilon_0 = \frac{1}{\mu_0 \cdot c_0^2}$$

$$L' \cdot C' = \mu_0 \cdot \frac{1}{\mu_0 \cdot c_0^2} \cdot \mu_r \cdot \epsilon_r \quad \text{ergibt weiter}$$

$$\frac{1}{\sqrt{L' \cdot C'}} = c_0 \cdot \frac{1}{\sqrt{\mu_r \cdot \epsilon_r}} \left[\frac{m}{s} \right]$$

*da rechte Seite Dimension einer Geschwindigkeit
muss dies auch für linke Seite gelten*

*Ausbreitungsgeschwindigkeit einer elektromagnetischen Welle
im Medium ist also :*

$$c = \frac{1}{\sqrt{L' \cdot C'}} = \frac{c_0}{\sqrt{\mu_r \cdot \epsilon_r}} \quad \text{bei handelsüblichen Kabeln ist } \mu_r = 1$$

$$\text{Ausbreitungsgeschwindigkeit auf Leitungen : } c = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

im Vakuum gilt : $\mu_r = \epsilon_r = 1$ folglich wird $c = c_0$

$$L' \left[\frac{\text{Induktivität}}{\text{Länge}} \right] = \left[\frac{H}{m} \right] = \left[\frac{Vs}{A \cdot m} \right] \quad C' \left[\frac{\text{Kapazität}}{\text{Länge}} \right] = \left[\frac{F}{m} \right] = \left[\frac{As}{V \cdot m} \right]$$

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit ist von der Permittivitätszahl ϵ_r (Dielektrizitätskonstante) des zur inneren Isolation verwendeten Materials bestimmt.

Die Permittivitätszahl ϵ_r als auch die Permeabilitätszahl μ_r ist im Vakuum gleich 1.

Die Permittivitätszahl für Luft und die Permeabilitätswerte nicht ferromagnetischer Materialien unterscheiden sich aber erst ab der vierten Stelle nach dem Komma, für sie gilt in der Praxis weiterhin der Wert 1.

Im Vakuum breiten sich elektromagnetische Wellen mit Lichtgeschwindigkeit aus, folglich kann für jede Frequenz auch die zugehörige Wellenlänge errechnet werden. In einem beliebigen Medium ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit geringer, wodurch sich auch die Wellenlänge ändert. Gegenüber dem Vakuum werden in einem beliebigen Medium sowohl die Ausbreitungsgeschwindigkeit als auch die Wellenlänge um den Verkürzungsfaktor kleiner. Die Frequenz bleibt unverändert.

$$\text{Wellenlänge im Vakuum: } \lambda_0 = \frac{c_0}{f}$$

$$\text{Wellenlänge auf einer Leitung: } \lambda_L = \frac{c_L}{f} \quad \text{mit } c = \frac{c_0}{\sqrt{\mu_r \cdot \epsilon_r}} \quad \text{ergibt sich}$$

$$\lambda_L = \frac{c_0}{f \cdot \sqrt{\mu_r \cdot \epsilon_r}} \quad \text{mit } \mu_r \approx 1 \quad \text{folgt}$$

$$\lambda_L = \frac{c_0}{f \cdot \sqrt{\epsilon_r}}$$

Verkürzungsfaktor

Eine Wellenlänge ist auf Leitungen also kleiner als in Luft (Vakuum). Daraus ergibt sich eine weitere Größe welche für Leitungen wichtig ist: Der Verkürzungsfaktor: Sein Wert ist immer kleiner als 1. Übliche Koaxialleitungen weisen Verkürzungsfaktoren zwischen 0,65 bis 0,85 auf.

$$\text{Verkürzungsfaktor } K = \frac{\lambda_L}{\lambda_0} = \frac{c_L}{c_0} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} \leq 1 \quad \text{Permittivitätszahl } \epsilon_r = \left(\frac{1}{K} \right)^2$$

Dispersion

Da die Permittivitätszahl eine Funktion der Frequenz ist, ergibt sich für die Wellen auf dem Koaxialkabel keine konstante Ausbreitungsgeschwindigkeit d.h. c ist frequenzabhängig. Dies bezeichnet man als Dispersion.

Dämpfung der Wellen auf Leitungen

Ist der ohmsche Widerstand am Kabel nicht vernachlässigbar so breiten sich gedämpfte Wellen aus. Ebenfalls ist die Dämpfung vom Isolationsmaterial abhängig. Dadurch entsteht eine Dämpfung auf der Leitung (Skin-Effekt), welche frequenzabhängig ist. In der Technik wird die Dämpfung durch das Dämpfungsmaß a beschrieben.

$$\text{Dämpfungsmaß} = \text{Leitungs-dämpfung } a = 20 \cdot \lg \frac{U_{in}}{U_{out}} [dB]$$

Es wird bei einer beidseitig angepassten Leitung in dB/100m frequenzabhängig angegeben. Dies ist ein logarithmisches Maß. Eine Abnahme um 20dB bedeutet also eine Abnahme der Spannung U auf 10% des ursprünglichen Wertes.

1.1. Aufgaben u. Experimente EM-Wellen auf Leitungen

- Wellenwiderstand einer Leitung bestimmen
- Stehende Wellen bei $Z_A=0$, $Z_A=\infty$, $Z_A=Z_L$
- Impulsübertragung bei Anpassung und Fehlanpassung
- Verkürzungsfaktor von Leitungen bestimmen
- Ausbreitungsgeschwindigkeit bestimmen
- $\lambda/4$, $\lambda/2$ als Stichleitung
- (-Stehwellenmessung, Reflektometer, Richtkoppler)

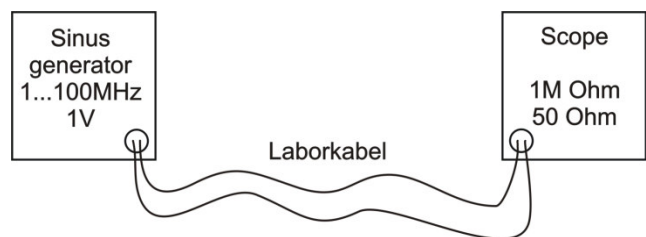
Verhalten von Sinussignalen auf der Leitung bei verschiedenen Anpassungen

Die Frequenzgänge (10Stck.) im Bereich 1MHz bis 100MHz verschiedener Kabelanordnungen messen und graphisch darstellen. Interpretieren der Ergebnisse.

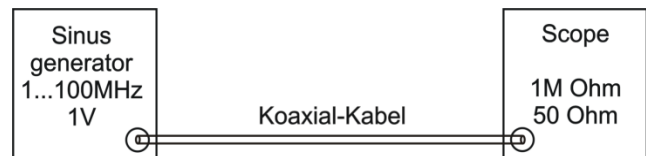
Verwenden eines HF-Generators mit Ausgang 50 Ohm

und nachgeschaltetem T-Stück, einseitig mit 50 Ohm abgeschlossen.

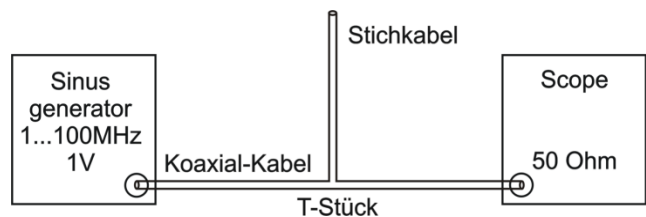
- Laborkabel (Länge 2m)
- Scope Eingangswiderstand 1M Ohm
- Scope Eingangswiderstand 50 Ohm



- Koaxialkabel (Länge 2m)
- Scope Eingangswiderstand 1M Ohm
- Scope Eingangswiderstand 50 Ohm



- zusätzlich ein Stichkabel (Länge 2,48m) über T-Stück anschliessen
- Scope Eingangswiderstand 50 Ohm
- Abschluss des Stichkabels: offen
- Abschluss des Stichkabels: Kurzschluss
- Abschluss des Stichkabels: Wellenwiderstand



- Stichkabel (Länge 2 x 2,48m) Scope Eingangswiderstand 50 Ohm
- Abschluss des Stichkabels:
- Abschluss des Stichkabels: offen
- Abschluss des Stichkabels: Kurzschluss
- Abschluss des Stichkabels: Wellenwiderstand

Bestimmung des Verkürzungsfaktors, Ausbreitungsgeschwindigkeit, Permittivität für die verwendeten Kabel aus den vorangegangenen Messergebnissen.

Verhalten von Rechtecksignalen auf der Leitung bei verschiedenen Anpassungen

Erzeugen Sie ein Rechtecksignal:

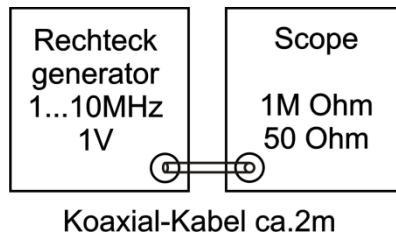
Pulslänge: 50ns, Wiederholfrequenz: 100KHz,

Amplitude : 0V/1V

mit dem Generator (Funktionsgenerator Agilent 33220A oder Pulse Generator Hameg HM8035)

(ev. Pulserzeugung mit einem Differenzier-Glied: 100pF, 50Ohm aus 1:1 100KHz Rechtecksignal)

und oszillographieren es am Scope mit 50 Ohm und 1 MOhm Eingangswiderstand.

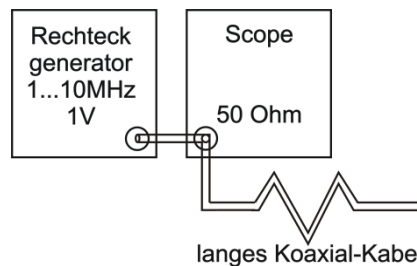


Schliessen Sie jetzt ein längeres Kabel (Länge=25m) mit einem T-Stück an. Beobachten Sie die Impulsformen am Anfang des Kabels bei folgenden Abschlußwiderständen Z_A am Ende des Kabels.

$Z_A = \infty$ (offenes Leitungsende)

$Z_A = 0$ (Kurzschlussstecker)

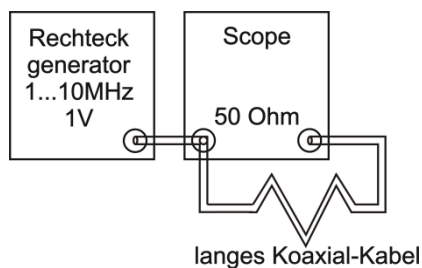
$Z_A = 50 \text{ Ohm}$ (Stecker mit Wellenwiderstand 50 Ohm)



Man beobachte das Signal zusätzlich am Ende des Kabels

unter Verwendung des 2.Eingangs am Scope mit einem Eingangswiderstand 50Ohm und 1MOhm.

($Z_A = Z_L$ und $Z_A = \infty$ Z_A : Abschlußwiderstand, Z_L : Wellenwiderstand der Leitung).



Verwenden Sie an Stelle des Koaxialkabels ein Laborkabel zur Übertragung des Rechtecksignals.

Diskutieren Sie die Ergebnisse.

Bestimmung der Ausbreitungsgeschwindigkeit, Verkürzungsfaktor, Permittivität aus den Messdaten dieser Versuchsanordnungen.

Experimentelle Bestimmung des Wellenwiderstandes eines RG58 Koaxialkabels mit Rechteckimpulsen

Das Ende eines langen Koaxialkabels (25m) wird mit einem veränderbaren Widerstand R (Potentiometer) abgeschlossen.

Sie können die vorherige Versuchsanordnung verwenden

Man beobachtet am Scope die Reflexion der Impulse am Anfang der Leitung in Abhängigkeit vom eingestelltem Widerstand und bestimme diejenige Einstellung von R, bei der die Reflexionen minimiert sind. Dieser eingestellte Widerstandswert wird mit Hilfe eines Multimeters gemessen.

Verwenden Sie danach einen kommerziellen 50 Ohm Abschlusswiderstand.

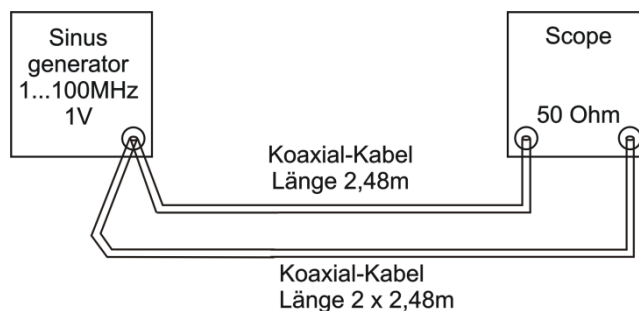
Speichern oder skizzieren der entsprechenden Bilder und Beschreiben der auftretenden Effekte.

Bestimmen Sie den Wellenwiderstand einer RG58 Koaxialleitung und einer Lecherleitung durch L und C Messung (Beachte: Messwellenlänge des LC Messgerätes $\gg$ Kabellänge).

Messung der Ausbreitungsgeschwindigkeit über die Phasenverschiebung bei Sinussignalen

Wie kann man mit folgender experimenteller Anordnung durch Variieren der Generatorfrequenz den Verkürzungsfaktor b.z.w. die Ausbreitungsgeschwindigkeit bestimmen?

Beachten Sie den reflexionsfreien Abschluss der Kabelenden am Eingang des Oszilloscopes.



LAN-Netzwerkabel:

Bestimmung Wellenwiderstand, Ausbreitungsgeschwindigkeit, Verkürzungsfaktor, Permittivität

Frequenzgang messen 1MHz bis 1GHz (ev.vorher Eichkurve vom Scope aufnehmen)

Koaxialkabel RG58

LAN-Netzwerkkabel (Cat5, Cat5e, Cat6)

Vergleich dieser beiden Kabeltypen

Abschätzung der möglichen Bitrate (bit/s)

Analysieren LAN-Signals zwischen 2PC's bei 10Mbit/s, 100Mbit/s und 1Gbit/s Datenrate

Kabel als Phasenschieber

Dispersion eines Koaxialkabels zu bestimmen

Überlegen Sie sich einen geeigneten Versuchsaufbau.

Materialbestimmung

Welches Material wird bei der Verwendung der Koaxialkabel aus den vorangegangenen Experimenten als Dielektrikum verwendet?

Bestimmung des Materials welches als Dielektrikum für ein unbekanntes Kabelstück verwendet wird.

Detektieren eines Fotodiodenimpulses 50ns mit 25m Kabel zum Scope 1MOhm/50Ohm

2. Modulation und Mischung

2.1. Modulation b.z.w. Mischung von elektrischen Signalen

Begriffe Mischung und Modulation:

Mischung wird technisch genauso realisiert wie die Modulation. Man unterscheidet diese zwei Begriffe nur bezüglich der Ausnutzung der entstehenden Frequenzen:

Bei der Mischung wird nur eine der entstehenden Frequenzen ausgenutzt.

(Heterodynempfänger, Superhetempfänger, Überlagerungempfänger).

Als Modulation bezeichnet man dieses Verfahren, wenn mehrere Mischprodukte der entstandenen Frequenzen ausgenutzt werden.

(Amplitudenmodulation, Frequenzmodulation z.B.: bei Drahtlosübertragung)

Bei der Modulation wird das Basisband, welches die zu übertragende Information enthält, in einen definierten höheren Frequenzbereich verschoben. Das Basisband wird einem Träger aufmoduliert. Dieser Träger wird meist für die spätere Rückgewinnung der Information des Basisbandes wieder benötigt.

2.2. Amplitudenmodulation

Die Amplitudenmodulation war lange Zeit das wichtigste Signalaufbereitungsverfahren in der Rundfunktechnik und die technische Realisierung im Sender und Empfänger relativ einfach zu handhaben.

In der Messtechnik ist eine Amplitudenmodulation des Messsignals nötig, um das wichtige Messverfahren, die Lock-in-Technik anwenden zu können.

Das Trägersignal ist eine sinnvollerweise eine sinusförmige Schwingung, welche von der Frequenz meist deutlich über dem Nutzsignal liegt.

Dieses Trägersignal wird im einfachsten Fall (additive Modulation b.z.w. Mischung) mit übertragen, ist ein notwendiges Hilfssignal, enthält aber keine Information.

Man unterscheidet die additive und multiplikative Amplitudenmodulation (Zweiseitenbandmodulation).

2.2.1. additive Amplitudenmodulation

Dies ist die am einfachsten zu realisierende Variante. Es werden die zu modulierenden Signale überlagert und anschliessend an einer exponentiell verlaufenden Kennlinie z.B. einer Diode oder

Amplitudenmodulation (additiv)

$$U_{AM}(t) = \widehat{U}_T \cos(\omega_T t) + \widehat{U}_N \cos(\omega_N t) \cdot \cos(\omega_T t)$$

$$\omega_T > \omega_N \quad \begin{array}{ll} U_T : \text{Spannung Trägerfrequenz [V]} & \omega_T : \text{Trägerfrequenz [Hz]} \\ U_N : \text{Spannung Nutzfrequenz [V]} & \omega_N : \text{Nutzfrequenz [Hz]} \end{array}$$

Neben der schon vorhandenen Frequenz $U_T \cos(\omega_T t)$

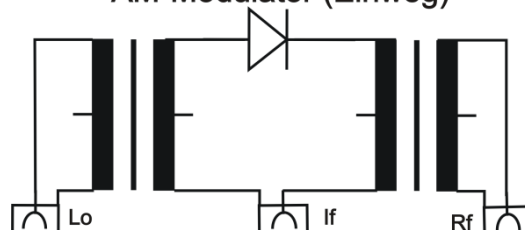
entstehen 2 neue Frequenzen

$$U_{\text{oberes Seitenband}} \cos(\omega_T + \omega_N t)$$

$$U_{\text{unteres Seitenband}} \cos(\omega_T - \omega_N t)$$

Transistor verzerrt. Es entstehen dabei neue Frequenzen.

AM-Modulator (Einweg)



2.2.2. multiplikative Amplitudenmodulation

Diese in der Praxis häufiger eingesetzte Variante kann mit Diodenringmodulatoren realisiert werden. Hier wird die Trägerfrequenz nicht mit erzeugt und andere unerwünschte Nebenfrequenzen

Amplitudenmodulation (multiplikativ)

$$U_{AM}(t) = \widehat{U}_N \cos(\omega_N t) \cdot \widehat{U}_T \cos(\omega_T t)$$

U_T : Spannung Trägerfrequenz [V] ω_T : Trägerfrequenz [Hz]

$\omega_T > \omega_N$ U_N : Spannung Nutzfrequenz [V] ω_N : Nutzfrequenz [Hz]

entstehen nur 2 neue Frequenzen

$$U_{\text{oberes Seitenband}} \cos(\omega_T + \omega_N t)$$

$$U_{\text{unteres Seitenband}} \cos(\omega_T - \omega_N t)$$

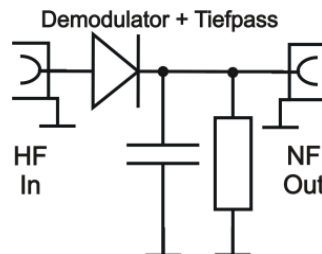
werden unterdrückt. Im Zeitsignal entsteht im Minima ein Phasensprung.

2.3. Amplitudendemodulation

Eine Demodulation kann ungesteuert und gesteuert realisiert werden.

In vielen Anwendungen z.B.: bei einem additiv amplitudenmoduliertem Signal, reicht die ungesteuerte Demodulation (einfache Gleichrichtung, Hüllkurvendemodulation) aus.

Diese kann mit Eintakt-Demodulatoren realisiert werden. Ein multiplikativ amplitudenmoduliertes Signal kann damit allerdings nicht fehlerfrei demoduliert werden, da der Träger fehlt.



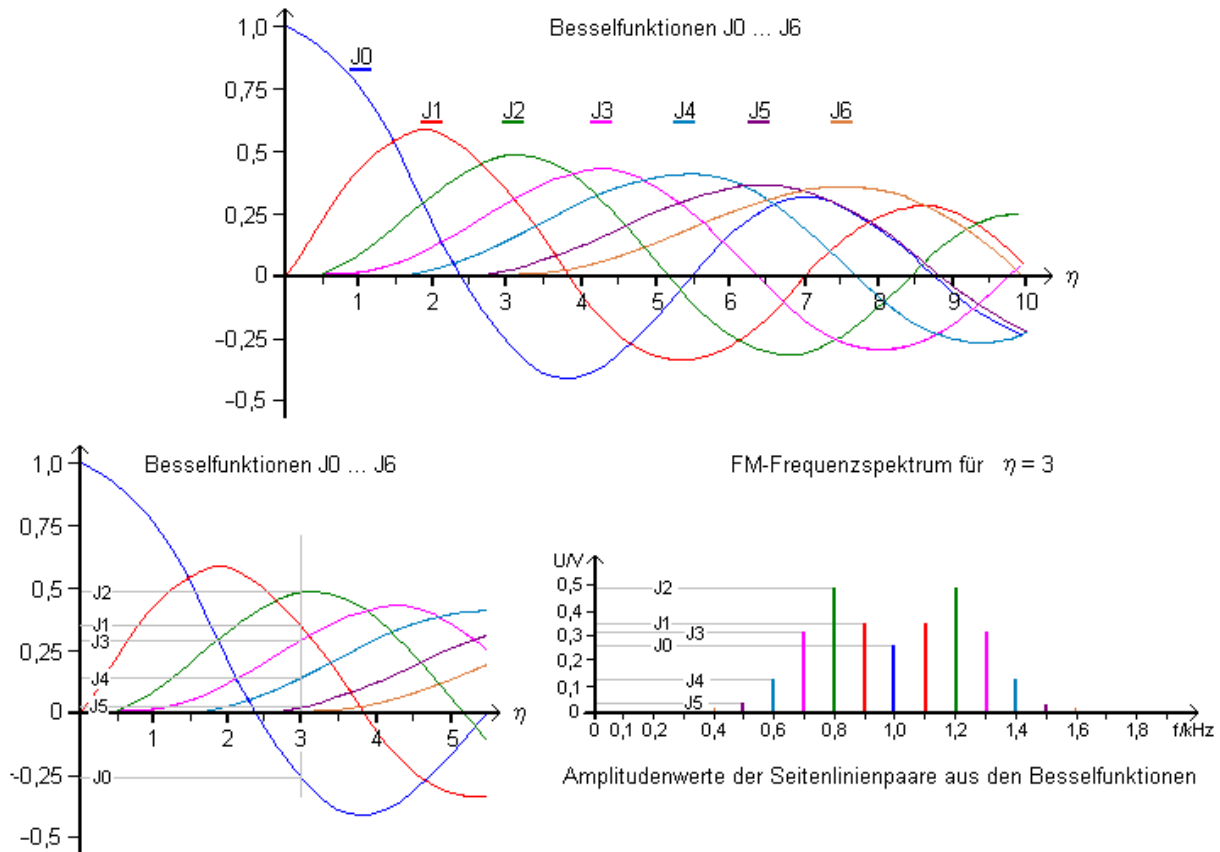
Ein Sonderfall ist die gesteuerte Demodulation. Hiermit wird eine phasenempfindliche Gleichrichtung vorgenommen werden. Dabei wird ein Steuersignal benötigt um je nach Phasenlage die Gleichrichtung vorzunehmen. Diese gesteuerte Demodulation ist die phasenempfindliche Gleichrichtung (PED) und ist Bestandteil einer Lock-In Baugruppe.

$$\text{Modulationsindex (Frequenzhub)} \eta = \frac{\Delta\omega_T}{\omega_N}$$

ω_T = Trägerfrequenz

ω_N = Nutzfrequenz

2.4. Frequenzmodulation



Quelle: www.elektroniktutor.de

Frequenzmodulation

$$\begin{aligned}
 U_{FM} = & U_T \cdot [J_0(\eta) \cdot \cos(\omega_T \cdot t)] && \text{Anteil der Trägerschwingung} \\
 & + U_T \cdot [-J_1(\eta) \cdot \sin((\omega_T - \omega_N) \cdot t)] && \text{Anteil erste Unterschwingung} \\
 & + U_T \cdot [-J_1(\eta) \cdot \sin((\omega_T + \omega_N) \cdot t)] && \text{Anteil erste Oberschwingung} \\
 & + U_T \cdot [-J_2(\eta) \cdot \cos((\omega_T - 2\omega_N) \cdot t)] && \text{Anteil zweite Unterschwingung} \\
 & + U_T \cdot [-J_2(\eta) \cdot \cos((\omega_T + 2\omega_N) \cdot t)] && \text{Anteil zweite Oberschwingung} \\
 & + U_T \cdot [+J_3(\eta) \cdot \sin((\omega_T - 3\omega_N) \cdot t)] && \text{Anteil dritte Unterschwingung} \\
 & + U_T \cdot [+J_3(\eta) \cdot \sin((\omega_T + 3\omega_N) \cdot t)] && \text{Anteil dritte Oberschwingung} \\
 & + U_T \cdot [+J_4(\eta) \cdot \cos((\omega_T - 4\omega_N) \cdot t)] && \text{Anteil vierte Oberschwingung} \\
 & + U_T \cdot [+J_4(\eta) \cdot \cos((\omega_T + 4\omega_N) \cdot t)] && \text{Anteil vierte Oberschwingung}
 \end{aligned}$$

2.5. Aufgaben u. Experimente

Amplitudenmodulation:

Simulation additive und multiplikative AM

mit LabView-Programm +Spektrum-Analyzer(USB6251NI).exe

Nutzfrequenz $f_N=100\text{Hz}$ Trägerfrequenz $f_T=100\text{kHz}$

Experiment mit Modulator für additive und multiplikative AM

Darstellung im Frequenzbereich mit Spektrumanalysator:

bei Nutzfrequenz $f_N=100\text{kHz}$ Trägerfrequenz $f_T=100\text{MHz}$

Nutzfrequenz und Nutzamplitude variieren und Seitenbänder beobachten

schrittweise die Nutzfrequenz auf 500Hz verkleinern

Darstellung jetzt im Zeitbereich mit analogem / digitalem Scope:

bei Nutzfrequenz $f_N=500\text{Hz}$ Trägerfrequenz $f_T=100\text{MHz}$

Nutzamplitude (Modulationsgrad) variieren: 0% ... 100% und auf ca. 50% einstellen

AM-Signal (additiv) $f_N=500\text{Hz}$ $f_T=200\text{MHz}$ über Koaxialleitung 25m transportieren und mit Scope darstellen.

Demodulation des Signals mit Hüllkurvendemodulator und Darstellung im Zeitbereich mit Scope.

Frequenzmodulation

Simulation mit LabView-Programm

Simulation bei Nutzfrequenz $f_N=100\text{Hz}$ Trägerfrequenz $f_T=100\text{kHz}$

Modulationsindex: 2,4 mind.3 Seitenbänder programmieren

Experiment FM-Modulation im Generator:

Darstellung im Zeitbereich und Frequenzbereich

Nutzfrequenz $f_N=100\text{kHz}$ Trägerfrequenz $f_T=100\text{MHz}$)

3. Elektromagnetische Wellen (Radiowellen) im freien Raum

Die Ausbreitung der elektromagnetischen Wellen im Raum ist die Grundlage jeder Funkanwendung. Auch hier gelten die aus der Optik bekannten Gesetze:

- Brechung (Refraktion)
- Beugung (Diffraktion)
- Reflexion (Spiegelreflexion, Totalreflexion, Diffuse Reflexion, Streuung)
- Absorption
- Dispersion (Brechzahl abhängig von der Frequenz)

Damit man elektromagnetische Wellen im freien Raum nutzen kann muß man diese über Antennen abstrahlen und empfangen.

Die elektromagnetische Welle sollte ohne Reflexionen in den freien Raum abgestrahlt oder aus diesem empfangen werden. Antennen müssen die elektromagnetische Welle von einer Leitung auf den freien Raum übertragen. Dabei muß eine Anpassung an den Wellenwiderstand des freien Raumes erreicht werden.

Wenn man bei der Herleitung der Wellenwiderstandsgleichung für Leitungen alle Werte entfernt, die mit der Drahtleitung in Verbindung stehen, so bleiben nur die Naturkonstanten übrig. Aus ihnen errechnet sich der Wellenwiderstand des freien Raumes. Er ist für die Ausbreitung einer elektromagnetischen Welle wirksam.

Wellenwiderstand des freien Raumes Z_0 :

$$Z_0 = \frac{\vec{E}}{\vec{H}} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \approx 376\Omega$$

$\vec{E}$ = elektrische Feldstärke

$\vec{H}$ = magnetische Feldstärke

Im **geschlossenen Schwingkreis** konzentriert sich der Energieaustausch zwischen den Bauteilen. Man geht von einem geladenen Kondensator aus, der sich in die Spule entlädt. Durch den Entladestrom baut sich im Kondensator das elektrische Feld ab dafür aber das magnetische Feld in der Spule auf. Bedingt durch die Selbstinduktion der Spule entsteht wieder eine Ladespannung die zum Aufladen des Kondensators führt und somit den Ursprungszustand wieder herstellt. Die Wechselwirkung zwischen elektrischem und magnetischem Feld nennt man bekanntlich eine elektromagnetische Schwingungen.

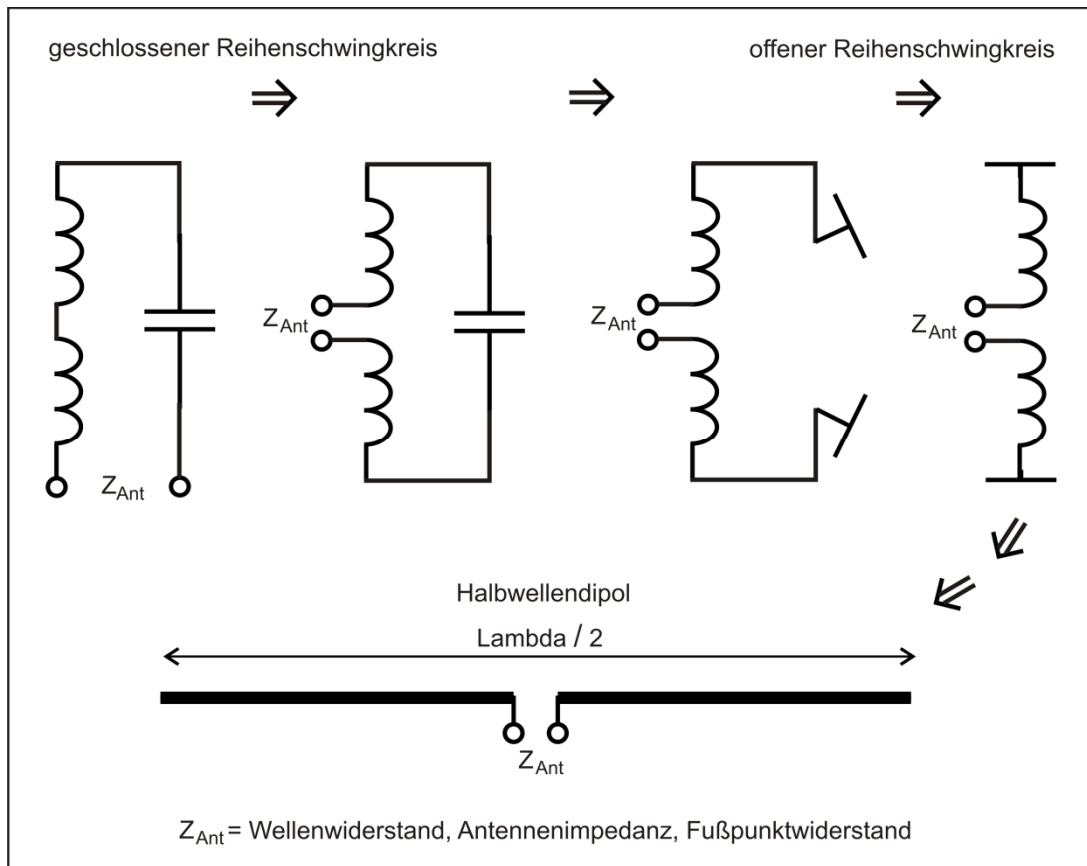
Schwingung (Zeitliche Änderung der physikalischen Größe)

Welle (Zeitliche und räumliche Änderung der physikalischen Größe)

Der **offene Schwingkreis** besteht aus einem “aufgeklappten” geschlossenen Schwingkreis mit dessen Hilfe elektromagnetische Wellen in den Raum abgestrahlt werden. Dies erfolgt durch die abwechselnde Abstrahlung von Energieteilen aus dem elektrischen und magnetischen Feld. Die durch die Abstrahlung entnommene Energie muss durch einen Generator wieder zugefügt werden, damit die Amplitude konstant bleibt.

Ein offener Schwingkreis wirkt als Dipol und stellt die Grundform einer Antenne dar.

Die ursprüngliche Variante eines Dipols ist der Halbwellendipol. Alle anderen, vielfältigsten Antennenformen sind hierauf zurückzuführen.



Der Halbwellendipol verhält sich also ähnlich wie ein Reihenschwingkreis. Ein solcher ist in der Resonanzfrequenz niederohmig und reell.

Wenn die mechanische Länge exakt der halben Wellenlänge entspricht gilt für den Wellenwiderstand Z_{Ant} (Antennenimpedanz) eines unendlich dünnen Halbwellendipols:

Die Herleitung des Wellenwiderstandes Z_{Ant} eines unendlich dünnen Halbwellenstrahlers ergibt :

$$Z_{Ant} = R_{Ant} + jX_{Ant} = (73,13 + j42,54)\Omega$$

R_{Ant} = reeller Widerstandsanteil

jX_{Ant} = imaginärer Widerstandsanteil

um einen reellen Wellenwiderstand Z_{Ant} (Antennenimpedanz) zu ermöglichen

und die Antenne in Resonanz betreiben zu können

muss der induktive Anteil $+j42,54\Omega$ zu "0" gebracht werden!

das erreicht man durch ein Verkürzen der Antenne

Es ergibt sich ein Verkürzungsfaktor : $K_{Ant1} = 0,96$

dieser gilt für alle Halbwellenstrahler egal welcher Frequenz!

Bei den bisherigen Betrachtungen geht man von einem unendlich dünnen Halbwellenstrahler aus. Reale Dipole haben schon wegen der mechanischen Festigkeit eine bestimmte Dicke b.z.w. Durchmesser. Dadurch entstehen zusätzliche parasitäre Kapazitätsanteile, welche die Resonanzfrequenz des Halbwellenstrahlers nochmals verringert. Diesen zusätzlichen Verkürzungsfaktor kann man wie folgt berechnen:

Verkürzungsfaktor K_{Ant2} :

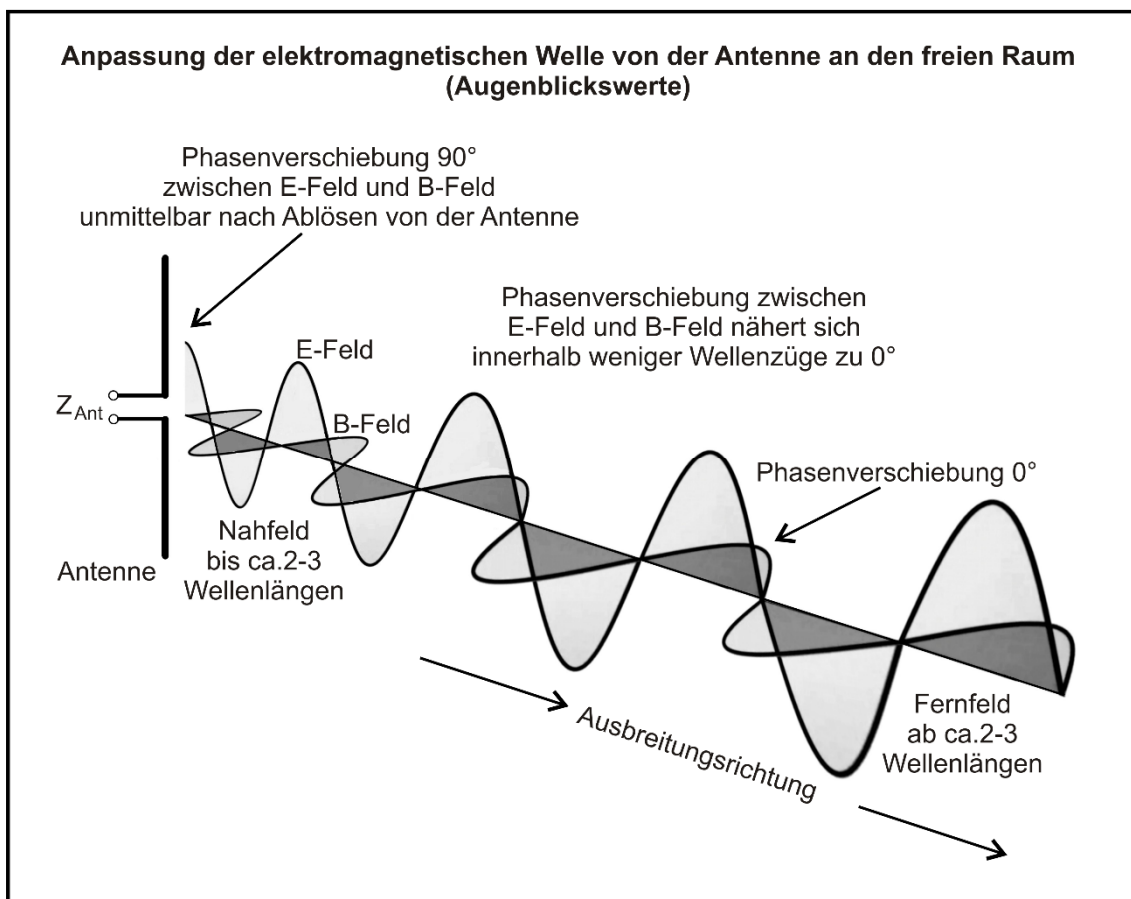
$$K_{Ant2} = \frac{l}{l + d}$$

l = Länge der Dipoldrähte

d = Durchmesser der Dipoldrähte

Eine weitere eventuell notwendige Verkürzung des Halbwellenstrahlers ergibt sich durch parasitäre Kapazitäten, welche sich durch das Umfeld (Bäume, Häuser, Boden u.s.w.) ergeben. Diese sind allerdings theoretisch schlecht erfassbar und können in der Praxis nur durch Messungen der Reflexionen korrigiert werden.

Bei der von der Antenne abgestrahlten elektromagnetischen Welle unterscheidet man das Nahfeld und das Fernfeld. Im Fernfeld ist das E-Feld und B-Feld phasengleich. Unmittelbar nach dem Ablösen der Welle von der Antenne besteht ein Phasenunterschied von etwa 90 Grad. Innerhalb einiger Wellenlängen gleichen sich die Phasen an. Diesen Bereich nennt man Nahfeld.



3.1. Experimente EM-Wellen im freien Raum

Mit Reflektometer den Reflexionsfaktor (Stehwellenverhältnis) messen:

mit Koaxialkabel 2,48m, bei Abschluss: offen, Kurzschluss, Anpassung mit 50Ohm
bei einer Frequenz 20MHz.

Halbwellendipol anpassen für 200MHz

d.h. in der Länge abgleichen und Reflexionsfaktor bestimmen

Unmoduliertes Signal 200MHz, 1V_{eff} mit diesem angepassten Halbwellendipol abstrahlen.

Effektive HF-Sendeleistung bestimmen, welche auf die Antenne gebracht wird.

Empfang über 2. Antenne, Scope-Beobachtung

Effektive HF-Empfangsleistung im Abstand 4m bestimmen

Leistungsverlust Sendeantenne zu Empfangsantenne bestimmen

Polarisation horizontal und vertikal beobachten und ausmessen

Richtwirkung beobachten (Richtdiagramm Polarkoordinatendarstellung)

Für welche Frequenz sind folgende Antennen am Besten angepasst:

Halbwellendipol bei min. und max. Länge

Viertelwellendipol (Marconi Antenne)

Bei bester Anpassung die Verkürzungsfaktoren der Antennen bestimmen

Welche Möglichkeiten zur Messung der Ausbreitungsgeschwindigkeit in Luft könnte man experimentell realisieren? Experiment versuchen.

Moduliertes AM-Signal (additiv) $f_N=500\text{Hz}$ $f_T=200\text{MHz}$ über Halbwellendipol abstrahlen

Dieses Signal über 2.Antenne empfangen

**Demodulation des Signals mit Hüllkurvendemodulator und Darstellung im Zeitbereich
Scope-Beobachtung und Spektrumanalysator-Beobachtung)**

Übertragung eines AM-Audiosignals über diese Funkstrecke

Übersicht der verwendeten Funkfrequenzen und Verwendungszweck

Messung des örtlichen Frequenzspektrums mit Spektrum Analyzer und Bestimmung der Funkdienste.

Experiment: Ausbreitung EM-Wellen im Wasser.

Radar-Funktionsweise: Experiment versuchen

RFID-Experiment

Mikrowellen im Hohlleiter

verwendete Bauelemente, Wellenlänge im Hohlleiter, Bestimmung der Frequenz aus der Hohlleiterwellenlänge, Wellenlänge in Luft (Klystronfrequenz) , Phasengeschwindigkeit, Ausbreitungsgeschwindigkeit im Hohlleiter (Gruppengeschwindigkeit)

Formelsammlung (EM – Wellen)

Wellenwiderstand $Z_L = \sqrt{\frac{L'}{C'}} \quad [\Omega] \quad (\text{verlustlose Leitung})$

$$L' \left[\frac{\text{Induktivität}}{\text{Länge}} \right] = \left[\frac{H}{m} \right] = \left[\frac{Vs}{A \cdot m} \right] \quad C' \left[\frac{\text{Kapazität}}{\text{Länge}} \right] = \left[\frac{F}{m} \right] = \left[\frac{As}{V \cdot m} \right]$$

Verkürzungsfaktor $K = \frac{c}{c_0} \approx \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} \leq 1$

Ausbreitungsgeschwindigkeit
einer elektromagnetischen Welle im Medium :

$$c = \frac{1}{\sqrt{L' \cdot C'}} = \frac{c_0}{\sqrt{\mu_r \cdot \epsilon_r}} \quad \left[\frac{m}{s} \right] \text{ bei handelsüblichen Kabeln ist } \mu_r = 1$$

Ausbreitungsgeschwindigkeit auf Leitungen : $c = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \left[\frac{m}{s} \right]$

Reflexionsfaktor $|r| = \frac{U_{\text{Rück}}}{U_{\text{Hin}}} = \frac{I_{\text{Rück}}}{I_{\text{Hin}}} \quad r = \frac{Z_A - Z_L}{Z_A + Z_L} \quad -1 \leq r \leq 1$

Stehwellenverhältnis $VSWR = \frac{U_{\text{max}}}{U_{\text{min}}} = \frac{U_{\text{Hin}} + U_{\text{Rück}}}{U_{\text{Hin}} - U_{\text{Rück}}} = \frac{1 + |r|}{1 - |r|}$

Dämpfungsmaß = Leitungsdämpfung $a = 20 \cdot \lg \frac{U_{\text{in}}}{U_{\text{out}}} [dB]$
Amplitudenmodulation (additiv)

$$U_{AM}(t) = \widehat{U}_T \cos(\omega_T t) + \widehat{U}_N \cos(\omega_N t) \cdot \cos(\omega_T t)$$

$$\omega_T \gg \omega_N$$

Amplitudenmodulation (multiplikativ)

$$U_{AM}(t) = \widehat{U}_N \cos(\omega_N t) \cdot \widehat{U}_T \cos(\omega_T t)$$

$$\omega_T \gg \omega_N$$

Physikalische Größen (EM – Wellen)

$$c_0 = \text{Lichtgeschwindigkeit im Vakuum} = 299\,792\,458 \frac{\text{km}}{\text{s}}$$

c = Ausbreitungsgeschwindigkeit von el. magn. Wellen im Medium

ε = Permittivität = dielektrische Leitfähigkeit

$$= (\text{Durchlässigkeit eines Materials für elektrische Felder}) \left[\frac{\text{A} \cdot \text{s}}{\text{V} \cdot \text{m}} \right]$$

ε_0 = Elektrische Feldkonstante (früher Dielektrizitätskonstante)

= Permittivität (im Vakuum)

$$= 8,854187... \cdot 10^{-12} \frac{\text{A} \cdot \text{s}}{\text{V} \cdot \text{m}}$$

ε_r = relative Permittivität = Permittivitätszahl = Dielektrizitätszahl

(früher relative Dielektrizitätskonstante)

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = 1 \text{ (im Vakuum)} = 1,00059 \text{ (in Luft)} = 2 \text{ (PTFE, Teflon)}$$

μ = Permeabilität = magnetische Leitfähigkeit

$$= (\text{Durchlässigkeit eines Materials für magnetische Felder}) \left[\frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{A} \cdot \text{m}} \right]$$

μ_0 = Magnetische Feldkonstante = Permeabilität (im Vakuum)

$$= 1,2566... \cdot 10^{-6} \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{A} \cdot \text{m}}$$

μ_r = relative Permeabilität = Permeabilitätszahl

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} = 1 \text{ (im Vakuum)} = 1,000001 \text{ (in Luft)}$$

Die rel. Permittivität und rel. Permeabilität

im Frequenzbereich des sichtbaren Lichtes (ca. 550 THz)

hat folgende Relation zur Brechzahl n :

$$\text{Brechzahl } n = \sqrt{\mu_r \cdot \varepsilon_r}$$

Für optisch transparente Materialien gilt $\mu_r = 1$, so dass näherungsweise gilt:

$$n = \sqrt{\varepsilon_r} \quad c = \frac{c_0}{\sqrt{\varepsilon_r}} \quad n = \frac{c_0}{c} \quad \text{Der Verkürzungsfaktor } k \text{ ist: } k = \frac{1}{n}$$

$$\text{aus den Maxwell Gleichungen folgt: } c_0^2 = \frac{1}{\varepsilon_0 \cdot \mu_0} \quad c_0 = \sqrt{\frac{1}{\varepsilon_0 \cdot \mu_0}}$$

Bessel-Funktionen

η	J(0)	J(1)	J(2)	J(3)	J(4)	J(5)
0	1	0	0	0	0	0
0.25	0.9844	0.124	0	0	0	0
0.5	0.9385	0.2423	0.0306	0	0	0
0.75	0.8642	0.3492	0.0671	0	0	0
1	0.7652	0.4401	0.1149	0.0196	0	0
1.25	0.6459	0.5106	0.1711	0.0369	0	0
1.5	0.5118	0.5579	0.2321	0.061	0.0118	0
1.75	0.369	0.5802	0.294	0.0919	0.0209	0
2	0.2239	0.5767	0.3528	0.1289	0.034	0
2.25	0.0827	0.5484	0.4047	0.1711	0.0515	0.0121
2.4	0.0025	0.5202	0.431	0.1981	0.0643	0.0162
2.5	-0.0484	0.4971	0.4461	0.2166	0.0738	0.0195
2.75	-0.1641	0.426	0.4739	0.2634	0.1007	0.0297
3	-0.2601	0.3391	0.4861	0.3091	0.132	0.043
3.5	-0.3801	0.1374	0.4586	0.3868	0.2044	0.0804
4	-0.3971	-0.066	0.3641	0.4302	0.2811	0.1321
4.5	-0.3205	-0.2311	0.2178	0.4247	0.3484	0.1947
4.75	-0.2551	-0.2892	0.1334	0.4015	0.3738	0.228
5	-0.1776	-0.3276	0.0466	0.3648	0.3912	0.2611
5.5	-0.0068	-0.3414	-0.1173	0.2561	0.3967	0.3209
6	0.1506	-0.2767	-0.2429	0.1148	0.3576	0.3621
6.5	0.2601	-0.1538	-0.3074	-0.0353	0.2748	0.3736
7	0.3001	-0.0047	-0.3014	-0.1676	0.1578	0.3479
7.5	0.2663	0.1352	-0.2303	-0.2581	0.0238	0.2835
8	0.1717	0.2346	-0.113	-0.2911	-0.1054	0.1858
8.5	0.0419	0.2731	0.0223	-0.2626	-0.2077	0.0671
9	-0.0903	0.2453	0.1448	-0.1809	-0.2655	-0.055
9.5	-0.1939	0.1613	0.2279	-0.0653	-0.2691	-0.1613
10	-0.2459	0.0435	0.2546	0.0584	-0.2196	-0.2341
10.5	-0.2366	-0.0789	0.2216	0.1633	-0.1283	-0.2611
11	-0.1712	-0.1768	0.139	0.2273	-0.015	-0.2383
11.5	-0.0677	-0.2284	0.0279	0.2381	0.0963	-0.1711
12	0.0477	-0.2234	-0.0849	0.1951	0.1825	-0.0735
12.5	0.1469	-0.1655	-0.1734	0.11	0.2262	0.0347

Kontrollfragen:

1. Bei der Übertragung von Signalen über Leitungen mit EM-Wellen muss man auf die „Anpassung“ achten.
Was ist damit gemeint? Schätzen Sie, ab welcher Frequenz dies nötig wird.
Was ist die physikalische Ursache?
2. Wie ist der Wellenwiderstand einer Leitung definiert (ohmsche Verluste vernachlässigt)?
3. Welche elektrischen Grundeigenschaften hat eine Leitung?
4. Welche Möglichkeiten kennen Sie, um den Wellenwiderstand einer Leitung experimentell zu bestimmen?
5. Berechnen Sie die Laufzeit eines Rechtecksignals auf einer Koaxialleitung von 10m Länge.
geg.: Leitungswellenwiderstand $Z_L = 50 \, \Omega$ Abschlusswiderstand $Z_A = 50 \, \Omega$
Dielektrikum der Leitung: PE Kunststoff mit $\epsilon_r = 2,3$ Leitung mit $K = 0,66$
Durchmesser des Aussenleiters: 5mm Durchmesser des Innenleiters: 1mm
6. Beschreiben Sie den Verlauf von Spannungs- und Stromamplitude einer elektromagnetischen Welle entlang einer Leitung (Wellenlänge = Leitungslänge). Skizze!
 - bei hochohmigem Abschluss am Leitungsende ($Z_A = \infty$) (offenes Leitungsende)
 - bei kurzgeschlossenem Abschluss ($Z_A = 0$) (Kurzschluss)
 - bei Abschluss mit Wellenwiderstand ($Z_A = Z_L$)(Z_A = Abschlusswiderstand, Z_L = Wellenwiderstand der Leitung)
7. Was beobachtet man am Anfang einer Leitung, wenn diese mit einem Rechteckimpuls gespeist wird? (Länge des Impulses $\ll$ als die Laufzeit auf der Leitung)
 - bei hochohmigem Abschluss am Leitungsende ($Z_A = \infty$) (offenes Leitungsende)
 - bei kurzgeschlossenem Abschluss ($Z_A = 0$) (Kurzschluss)
 - bei Abschluss mit Wellenwiderstand ($Z_A = Z_L$)(Z_A = Abschlusswiderstand, Z_L = Wellenwiderstand der Leitung)
Bitte Skizze anfertigen!
8. Mit welcher Anordnung von Kabeln kann man einen Sperrfilter für 200MHz realisieren?
Fertigen Sie eine aussagefähige Skizze an und führen nötige Berechnungen durch.
9. Wie funktioniert die Amplitudenmodulation (additiv)
 - mathematische Funktion
 - graphische Darstellung Zeitbereich
 - graphische Darstellung Frequenzbereich
10. Wie funktioniert die Amplitudenmodulation (multiplikativ)
 - mathematische Funktion
 - graphische Darstellung Zeitbereich
 - graphische Darstellung Frequenzbereich
11. Worin unterscheiden sich im Ergebnis die additive AM und multiplikative AM.
12. Wie kann man die additive Amplitudenmodulation elektronisch realisieren? (Schaltung)
13. Wie kann man ein additiv amplitudenmoduliertes Signal elektronisch demodulieren? (Schaltung)
Beschreiben Sie diesen Vorgang mit einer Darstellung im Zeitbereich.
14. Welche Antennenvarianten zur Abstrahlung von EM Wellen im Radiofrequenzbereich kennen Sie?
15. Berechnen Sie eine Antenne für 900MHz. (Skizze)
Ist diese Antenne auch für weitere Frequenzen nutzbar? (Begründung)