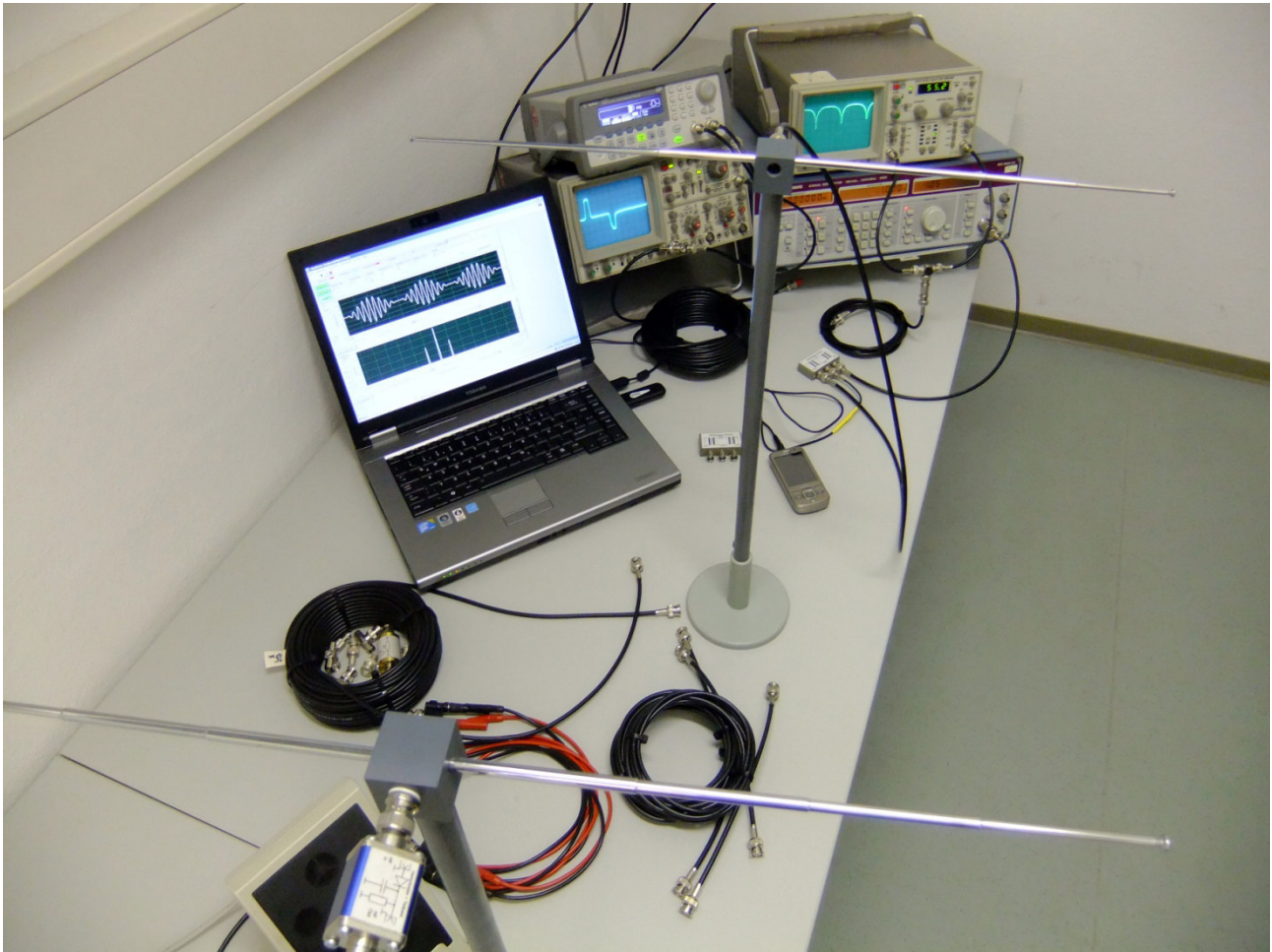


# Radiowellen auf Leitungen und im freien Raum



## 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), DECT, WLAN, WiMAX, 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 / Laufzeit der EM-Wellen auf Leitungen
- 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

Literatur:

Meinke, H.H., Gundlach, F.W.: Taschenbuch der Hochfrequenztechnik; Springer-Verlag  
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 auf Leitungen**

Das Verhalten von Leitungen zur Übertragung höherfrequenter Signale unterscheidet sich von dem der Versorgungstechnik, wo nur Gleichstrom oder sehr niederfrequenter Wechselstrom transportiert wird. In beiden Fällen gilt aber das Leistungsanpassungsgesetz ( $R_i = R_a$ ), um max. Leistung von der Quelle an den Verbraucher zu bringen. Bei der Gleichstrom- und Niederfrequenzübertragung ist allerdings einzig der ohmsche Widerstand und bei mehreren Leitern der Isolationswiderstand der zur Übertragung benutzten Leitung von Interesse.

Im höherfrequenten Bereich muss man eine zusätzliche physikalische Grösse, den Leitungswellenwiderstand mit einbeziehen. Hier müssen bei der Übertragung mit Kabeln, welche die Länge von einigen Prozent der zu übertragenden Wellenlänge haben, bestimmte Regeln beachtet werden, um Signalverfälschungen zu vermeiden. Im Labor betrifft das Frequenzen ab einigen MHz. Auch bei digitalen Signalen höherer Bitrate (ab ca. 1Mbit/sec) 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

Die **Induktivität** einer Spule als Haupteigenschaft entsteht durch das Hintereinanderschalten vieler einzelner Leiterschleifen. Eine Leitung kann als abgewinkelte 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.

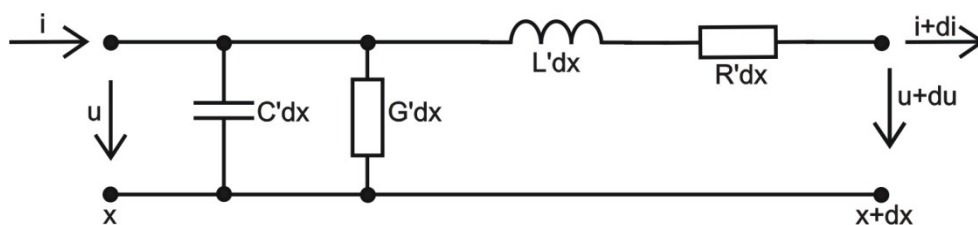
Die **Kapazität** einer Leitung ergibt sich aus den gegenüber liegenden Flächen der Leitungsadern.

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 **Isolationswiderstand (Ableitungswiderstand)** erfasst die Isolationsverluste und die dielektrischen Verluste (Permittivität).

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*

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

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

**Leitungsbeläge:  $R'$ ,  $L'$ ,  $C'$ ,  $G'$**

### **Widerstandsbelag $R'$**

$R'dx$  = Leitungswiderstand, Längswiderstand, Serienwiderstand  $R_s$

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.

### **Induktivitätsbelag $L'$**

$L'dx$  = Induktivität

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 Skineneffekts das Leiterinnere feldfrei wird. In guter Näherung kann daher der Induktivitätsbelag als frequenzunabhängig angesehen werden.

### **Kapazitätsbelag $C'$**

$C'dx$  = Kapazität

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  $C'$ .

### Ableitungsbelag $G'$

$G'dx$  = Ableitungswiderstand, Querwiderstand, Parallelwiderstand  $R_p$

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  $\tan \delta = G' / \omega C'$

### Wellenwiderstand einer Leitung:

Aus den 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 Leitungstücks. Die zweite Messung wird bei kurzgeschlossener Leitung durchgeführt und ergibt die Induktivität  $L'$  dieses Leitungstücks.

Zur Übertragung höherfrequenter elektromagnetischer Wellen benutzt man Zweidrahtleitungen (Lecherleitung), Koaxialleitungen, Twisted Pair, Streifenleitungen, Hohlleiter.

### 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 Leitungsarten, 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. 10GHz) 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 einen Hochpassverhalten.

Bei Hohlleiterkabel werden mittels einer Sonde elektromagnetische Felder angeregt.

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

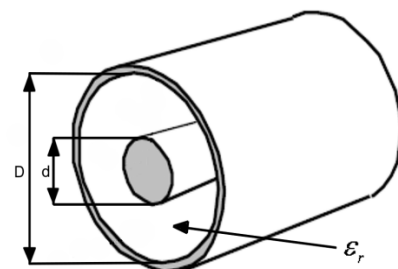
ergibt sich :

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

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

ergibt sich für den Wellenwiderstand eines Koaxialkabels :

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

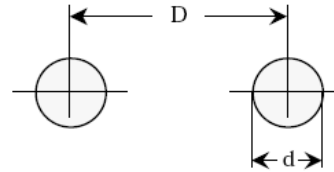


### Wellenwiderstand einer Zweidrahtleitung

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

$$Z_L = 120\Omega \cdot \ln \frac{2D}{d}$$

$$\frac{2D}{d} = e = 2,71828$$

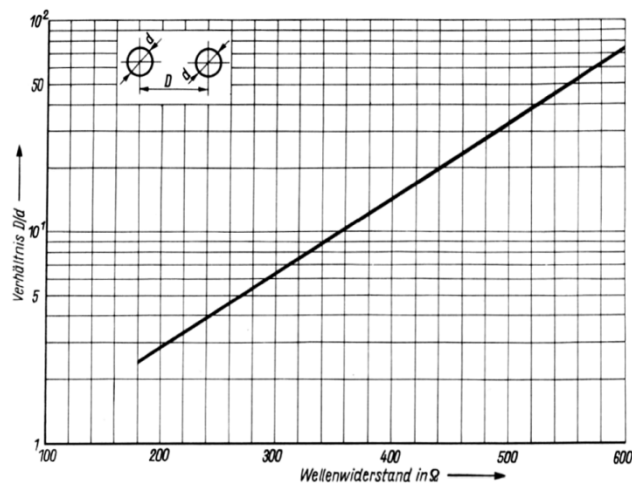


$D$  = Abstand der Leitungen

$d$  = Durchmesser der Leitung

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

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





## Anpassung und Reflexion bei Leitungen

Der Wellenwiderstand ist ein Wirkwiderstand, allerdings ist er kein Verlustwiderstand. Die Leitung nimmt am Einspeisepunkt Energie auf und transportiert sie zum angeschlossenen Verbraucher. Ist dieser widerstandsmäßig angepasst, so wird diese Energie im Verbraucher vollständig umgesetzt und es liegt Leistungsanpassung vor.

Leitung mit Verbraucher

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. Bei Kurzschluss am Ende der Leitung wird die Welle reflektiert, und es kann am Ende ein Strommaximum beobachtet werden. Ist die Leitung offen ( $Z_A = \infty$ ), wird am Ende die Spannung maximal und der Strom zu Null. 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. Der Reflexionsfaktor  $r$  wird wie folgt definiert:

$$r = \frac{U_{\text{Rück}}}{U_{\text{Hin}}} = \frac{I_{\text{Rück}}}{I_{\text{Hin}}} = \frac{Z_A - Z_L}{Z_A + Z_L}$$

Als Maß für den Anpassungsgrad eines Abschlusses wird in der Praxis das Verhältnis von  $U_{\text{max}}$  :  $U_{\text{min}}$  definiert und als Welligkeit (Stehwellenverhältnis) (Voltage Standing Wave Ratio = VSWR) angegeben:

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

## 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.

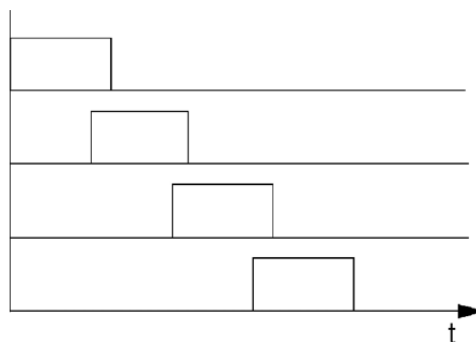


Abbildung 5 Ausbreitung eines Rechteckimpulses auf einer Leitung

*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*

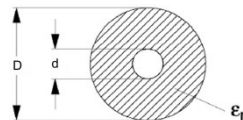
*Ausbreitungsgeschwindigkeit einer elektromagnetischen Welle  
im Medium ist also :*

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

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

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

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit ist also unabhängig von der Geometrie des Kabels und wird nur durch die Permittivitätszahl  $\epsilon_r$  (Dielektrizitätskonstante) des zur inneren Isolation verwendeten Materials bestimmt.



Im Vakuum hat sowohl die Permittivitätszahl  $\epsilon_r$  als auch die Permeabilitätszahl  $\mu_r$  den Wert 1. Besteht das Isoliermaterial einer Leitung nicht aus Luft, so ist die Permittivitätszahl größer als 1. Die Permeabilitätswerte nicht ferromagnetischer Leiter unterscheiden sich aber erst ab der vierten Stelle nach dem Komma, für sie gilt in der Praxis weiterhin der Wert 1.

### Verkürzungsfaktor

Die elektromagnetische Welle bewegt sich entlang einer Leitung langsamer als im freien Raum. Das Verhältnis der Geschwindigkeiten wird als Verkürzungsfaktor bezeichnet. Sein Wert ist immer kleiner als 1. Übliche Koaxialleitungen weisen Verkürzungsfaktoren zwischen 0,65 bis 0,85 auf.

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

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.

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

$$\text{Wellenlänge auf einer Leitung: } \lambda = \frac{c}{f} \quad \text{mit } c = \frac{c_0}{\sqrt{\mu_r \cdot \epsilon_r}} \quad \text{folgt}$$

$$\lambda = \frac{c_0}{f \cdot \sqrt{\mu_r \cdot \epsilon_r}} \quad \text{mit } \mu_r \approx 1 \quad \text{und Verkürzungsfaktor } K = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad \text{folgt}$$

$$\lambda = \frac{c_0}{f \cdot \sqrt{\epsilon_r}} \quad \lambda = k \cdot \lambda_0$$

Gegenüber dem Vakuum werden in einem beliebigen Medium sowohl die Ausbreitungsgeschwindigkeit als auch die Wellenlänge um den Verkürzungsfaktor geringer. Die Frequenz bleibt unverändert.

### 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, 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 auf die Leiterlänge 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
- Ausbreitungsgeschwindigkeit bestimmen
- $\lambda$   $\frac{1}{4}$ ,  $\frac{1}{2}$  als Stichleitung
- (-Stehwellenmessung, Reflektometer, Richtkoppler)

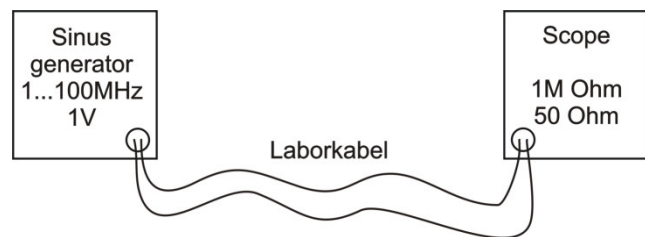
### Verhalten von Sinussignalen auf der Leitung bei verschiedenen Anpassungen

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

Verwenden eines Sinusgenerators mit niederohmigen Ausgang  $<20\Omega$ .

(Teiler 10:1 einfügen, RR-Glied 45 zu  $50\Omega$ )

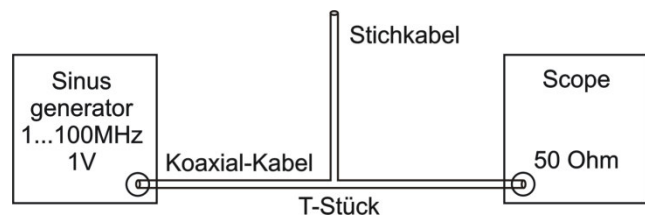
- Laborkabel (Länge ca. 2m)
- Scope Eingangswiderstand  $1M\Omega$
- Scope Eingangswiderstand  $50\Omega$



- Koaxialkabel (Länge ca. 2m)
- Scope Eingangswiderstand  $1M\Omega$
- Scope Eingangswiderstand  $50\Omega$



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



- Stichkabel (Länge  $2 \times 2,48m$ ) Scope Eingangswiderstand  $50\Omega$
- Abschluss des Stichkabels:
- Abschluss des Stichkabels: offen
- Abschluss des Stichkabels: Kurzschluss
- Abschluss des Stichkabels: Wellenwiderstand

### Verhalten von Rechtecksignalen auf der Leitung bei verschiedenen Anpassungen

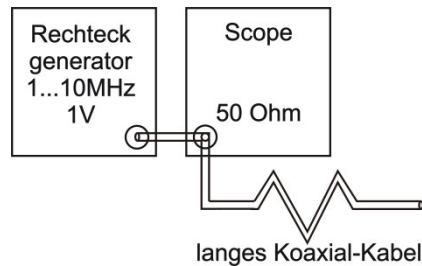
Erzeugen Sie ein Rechtecksignal (50ns/100KHz) mit dem Generator (Funktionsgenerator Agilent 33220A (oder Pulse Generator Hameg HM8035 oder mit Diff-glied:100pF,50Ohm aus 1:1 100KHz Rechtecksignal erzeugen) und oszillographieren es am Scope mit 50 Ohm Eingangswiderstand. Schliessen Sie jetzt ein längeres Kabel (Länge=25m) mit einem T-Stück an. Beobachten Sie die Impulsformen am Anfang des Kabels bei folgenden Abschlußwiderständen am Ende des Kabels.

$Z_A = \infty$  (offenes Leitungsende)

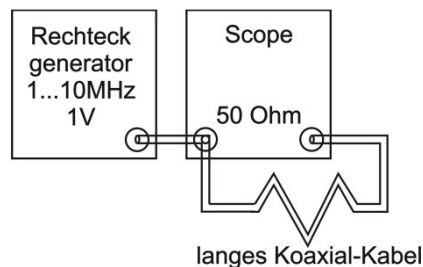
$Z_A = 0$  (Kurzschlussstecker)

$Z_A = Z_L$  (Stecker mit Wellenwiderstand 50 Ohm)

( $Z_A$  = Abschlusswiderstand,  $Z_L$  = Wellenwiderstand der Leitung)



Für  $Z_A = Z_L$  und  $Z_A = \infty$  beobachte man das Signal zusätzlich am Ende des Kabels. (2.Eingang des Scopes verwenden Eingangswiderstand 50Ohm/1MOhm)



Entscheiden Sie an Hand des experimentellen Impulsverlaufes ob  $Z_A > Z_L$  oder  $Z_A < Z_L$  ist und begründen Sie dies.

Skizzieren und beschreiben Sie die Ergebnisse.

Welche Schlussfolgerungen ergeben sich für die Praxis?

Verwenden Sie einfache Laborkabel zur Übertragung des Rechtecksignals.

### Messung der Ausbreitungsgeschwindigkeit mit Rechteckimpulsen

Ermitteln Sie die Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Welle für das verwendete Kabel mit dem vorhergehenden Messaufbau .

Berechnen Sie den Verkürzungsfaktor.

### Experimentelle Bestimmung des Wellenwiderstandes eines RG58 Koaxialkabels mit Rechteckimpulsen

Das Ende eines langen Koaxialkabels (50m) wird mit einem veränderbaren Widerstand (Potentiometer) abgeschlossen.

Sie können die vorherige Versuchsanordnung verwenden.

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

Verwenden eines kommerziellen 50 Ohm Abschlusswiderstandes

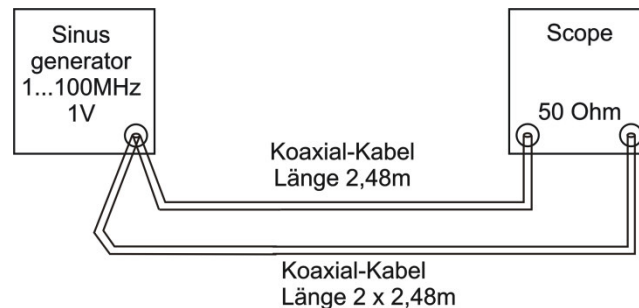
Speichern oder skizzieren der entsprechenden Bilder und beschreiben der auftretenden Effekte.

**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.



### Messung der Ausbreitungsgeschwindigkeit mit stehenden Wellen

Bestimmen Sie mit stehenden Wellen auf einer Stichleitung den Verkürzungsfaktor der Leitung und die Ausbreitungsgeschwindigkeit. Benutzen Sie Kabel bekannter Länge, durchstimmbaren Sinusgenerator (1MHz...100MHz) und Scope.

Bauen Sie eine geeignete Schaltung dafür auf.

### Bestimmung der Permittivitätszahl

Ermitteln Sie die Permittivitätszahl von 2 verschiedenen Leitungstücken. Ermitteln Sie welches Material als Dielektrikum verwendet wurde.

### Vermessen eines LAN-Netzkabels (Kat5, Kat5e, Kat6)

Wellenwiderstand bestimmen

Frequenzgang bis 1GHz unter angepassten Bedingungen

Vergleich mit einem Koaxialkabel RG58

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

### Anpassung messen

Mit Reflektometer den Reflexionsfaktor (Stehwellenverhältnis) bestimmen:

Frequenz: 20MHz

Koaxialkabel 2,48m,  $\lambda/4$  (20MHz) bei Abschluss: offen, Kurzschluss, Anpassung

## 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, Überlagerungsempfänger).

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 Transistor verzerrt.

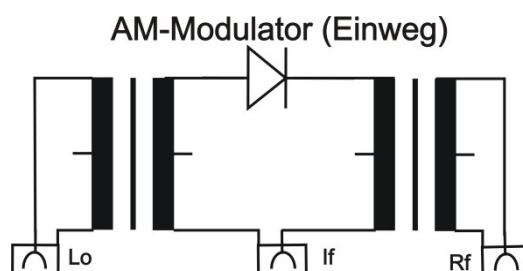
Es entstehen dabei neue Frequenzen.

*Amplitudenmodulation (additiv)*

$$U_{AM} = U_T \cdot \sin(\omega_T \cdot t) + U_N \cdot \sin(\omega_N \cdot t) \cdot \sin(\omega_T \cdot t)$$
$$\omega_T \gg \omega_N$$

$\omega_T$  = Trägerfrequenz

$\omega_N$  = Nutzfrequenz



### 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 werden unterdrückt. Im Zeitsignal entsteht im Minima ein Phasensprung.

*Amplitudenmodulation (multiplikativ)*

$$U_{AM} = U_N \cdot \sin(\omega_N \cdot t) \cdot U_T \cdot \sin(\omega_T \cdot t)$$
$$\omega_T \gg \omega_N$$

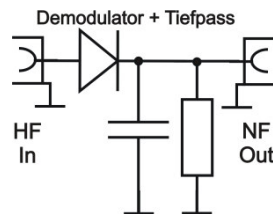
Welcher Unterschied ergibt sich zwischen beiden Verfahren hinsichtlich der entstehenden Frequenzen?

### 2.3. Amplitudendemodulation

Eine Demodulation kann ungesteuert und gesteuert realisiert werden.

In vielen Anwendungen reicht die ungesteuerte Demodulation (einfache Gleichrichtung, Hüllkurvendemodulation) aus.

Diese kann mit Eintakt-Demodulatoren realisiert werden.



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.

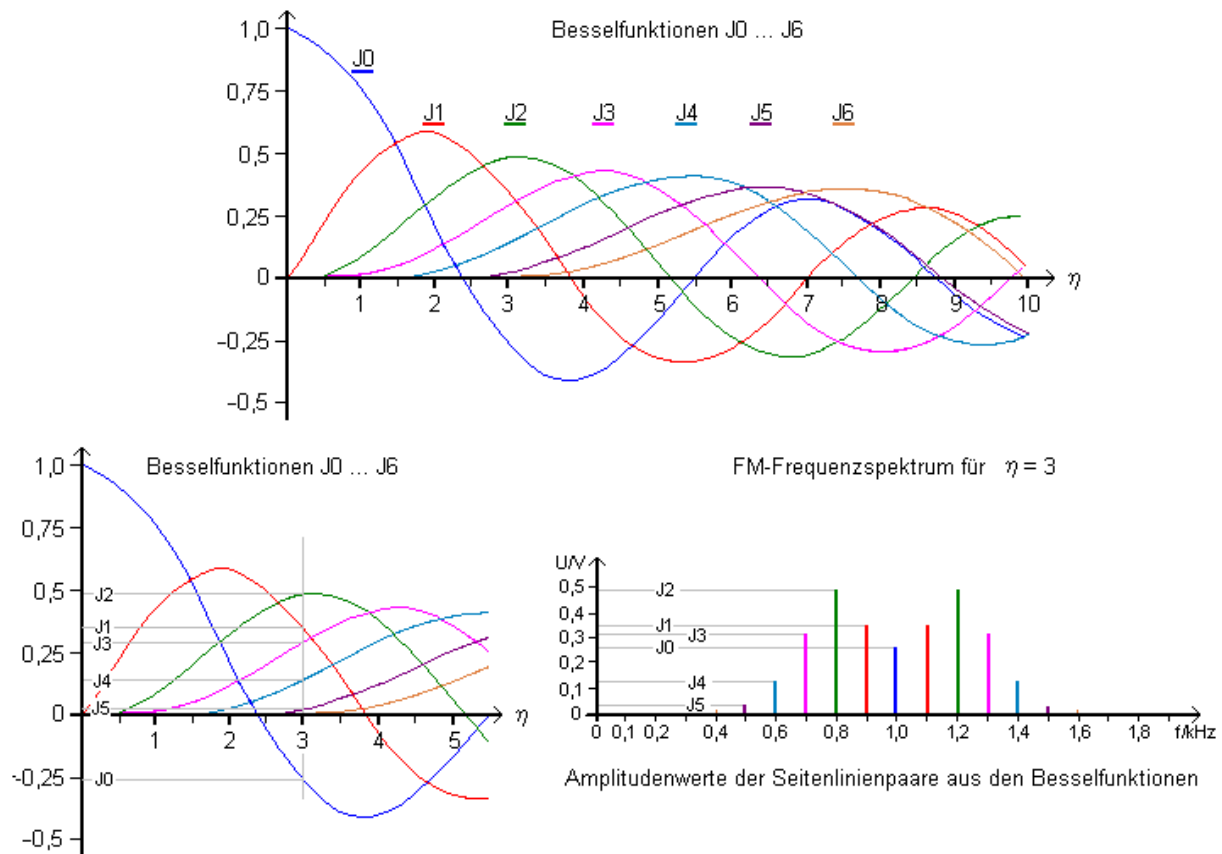


## 2.4. Frequenzmodulation

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

$\omega_T$  = Trägerfrequenz

$\omega_N$  = Nutzfrequenz



Quelle: [www.elektroniktutor.de](http://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 additiv und multiplikativ:

Simulation mit LabView-Programm

(Simulation bei Nutzfrequenz  $f_N=200\text{Hz}$     Trägerfrequenz  $f_T=200\text{kHz}$ )

und paralleler Aufbau von Experiment:

Darstellung im Zeitbereich und Frequenzbereich

(Experiment bei Nutzfrequenz  $f_N=200\text{kHz}$     Trägerfrequenz  $f_T=200\text{MHz}$ )

Modulationsgrad variieren: 0% ... 100%

### additive AM mit folg. Parametern im Zeit- und Frequenzbereich darstellen

Sweep der Nutzfrequenz  $f_N$  : in 5sek von  $f_N$  100kHz...1MHz

Trägerfrequenz  $f_T=200\text{MHz}$

Modulationsgrad: ca 80%

### Frequenzmodulation:

Modulationsindex: 2,4            mind.4 Seitenbänder

Simulation mit LabView-Programm

(Simulation bei Nutzfrequenz  $f_N=200\text{Hz}$     Trägerfrequenz  $f_T=200\text{kHz}$ )

und paralleler Aufbau von Experiment:

Darstellung im Zeitbereich und Frequenzbereich

(Experiment bei Nutzfrequenz  $f_N=200\text{kHz}$     Trägerfrequenz  $f_T=200\text{MHz}$ )

### FM mit folg. Parametern im Zeit- und Frequenzbereich darstellen

Nutzfrequenz  $f_N$  : 1Hz

Trägerfrequenz  $f_T=200\text{MHz}$

Modulationsindex: maximal einstellen

### Demodulation eines amplitudenmodulierten Signals im Experiment

Zeitbereich u. Frequenzbereich darstellen

Variation der Nutzfrequenz  $f_N$  : 1kHz...1MHz

Trägerfrequenz  $f_T=200\text{MHz}$

Variation des Modulationsgrades: 0...80%

### 3. Elektromagnetische Wellen im freien Raum und im Medium

Die Ausbreitung der elektromagnetischen Wellen ist die Grundlage jeder Funkanwendung. 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 Elektromagnetische Schwingungen.

Schwingung (Zeitliche Änderung der physikalischen Größe)

Welle (Zeitliche und räumliche Änderung der physikalischen Größe)

Auch hier gelten die aus der Optik bekannten Gesetze:

- Brechung (Refraktion) und Dispersion, d.h. die Frequenzabhängigkeit der Brechzahl
- Beugung (Diffraktion)
- Reflexion (Spiegelreflexion, Totalreflexion, Diffuse Reflexion und Streuung)
- Absorption.

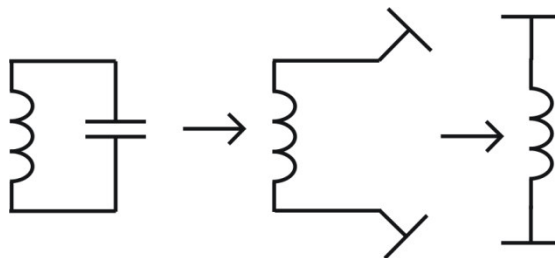
Der offene Schwingkreis besteht aus einem “aufgeklappten” Parallelkreis mit dessen Hilfe elektromagnetische Wellen in den Raum abgestrahlt werden. Dies erfolgt durch die abwechselnde Abstrahlung von Energieteilen aus dem elektrischen und magnetischen Feld. Die durch die Abstrahlung entnommene Energie 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 Abstrahlung einer Antenne erfolgt dreidimensional.

geschlossener Schwingkreis

offener Schwingkreis



Wellenwiderstand des freien Raumes

Wenn man bei der Herleitung der Wellenwiderstandsgleichung 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.

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \quad Z_0 = \sqrt{\mu_0^2 \cdot c_0^2} = \frac{4 \cdot \pi}{10^7} \cdot 2,998 \cdot 10^8 [\Omega] \quad Z_0 = 376,74 \Omega$$

Recherchieren Sie die Grundlagen der Dimensionierung und Berechnung von einer Halbwellendipolantenne und Viertelwellenstrahler (Marconi Antenne).

### **3.1. Experimente EM-Wellen im freien Raum**

Mit unmoduliertem HF-Signal (ca. 10 MHz...1 GHz) eine offene Halbwellendipolantenne und Viertelwellendipol (Marconi Antenne) ausmessen, d.h. Frequenz für Anpassung der Antennen bestimmen. (Halbwellendipol bei min. und max. Länge sowie vorhandener Viertelwellendipol).

Unmoduliertes Signal mit Halbwellendipol bei Anpassung und Generatorspannung 1 V<sub>eff</sub> abstrahlen.

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

Empfang über 2. Antenne und Weiterleitung des Signals zum Scope.

HF-Empfangsleistung (Spannung) in Abhängigkeit von Abstand und Polarisation messen.

Welche Möglichkeiten zur Messung der Ausbreitungsgeschwindigkeit in Luft sind experimentell realisierbar?

Polarisation, Richtwirkung (Richtdiagramm mit Polarkoordinaten)

und Abstandsämpfung (für genauere Messungen Frequenz >500 MHz wählen).

Amplitudenmoduliertes Signal (additiv)  $f_N=10\text{kHz}$   $f_T=210\text{MHz}$  zunächst auf abgeschlossener Koaxialleitung 25 m transportieren und am Ende der Leitung mit Scope darstellen.

Anpassung b.z.w. Reflexion mit Reflektometer (Richtkoppler) bestimmen.

Demodulation des Signals mit Hüllkurvendemodulator und Darstellung im Zeit- und Frequenzbereich.

Audiosignal modulieren und Zeitbereichsdarstellung.

Drahtlose Informationsübertragung mit AM-Modulation (additiv).

$f_N=10\text{kHz}$   $f_T=210\text{MHz}$

Antenne anpassen... Abstrahlung über Sendeantenne... Empfangen des modulierten Signals über 2.

Antenne und Demodulation des amplitudenmodulierten Signals.

Übertragung eines Audiosignals über diese Sendestrecke

Übersicht der verwendeten Funkfrequenzen und Verwendungszweck.

Messung und Nachweis des örtlichen Frequenzspektrums mit Spektrum Analyzer.

Ausbreitung EM-Wellen im Wasser

Radar: Funktionsweise, Frequenzen, Experiment versuchen

RFID: Experiment

## Anhang:

### Physikalische Größen

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

$c$  = Ausbreitungsgeschwindigkeit von el. magn. Wellen im Medium

$\epsilon_0$  = Permittivität (im Vakuum) = Elektrische Feldkonstante (früher Dielektrizitätskonstante)  
= dielektrische Leitfähigkeit (Durchlässigkeit für elektrische Felder)

$$\epsilon_0 = 8,854187... \cdot 10^{-12} \frac{\text{A} \cdot \text{s}}{\text{V} \cdot \text{m}}$$

$\epsilon_r$  = relative Permittivität = Permittivitätszahl = Dielektrizitätszahl  
(früher relative Dielektrizitätskonstante)

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = 1 \text{ (im Vakuum)} = 1,00059 \text{ (in Luft)} = 2 \text{ (PTFE, Teflon)}$$

$\mu_0$  = Permeabilität (im Vakuum) = Magnetische Feldkonstante  
= magnetische Leitfähigkeit (Durchlässigkeit für magnetische Felder)

$$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{A} \cdot \text{m}}$$

$\mu_r$  = relative Permeabilität = Permeabilitätszahl

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

Die Permittivität im Frequenzbereich des sichtbaren Lichtes (ca. 550 THz)  
hat folgende Relation zur Brechzahl  $n$ :

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

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

$$n = \sqrt{\epsilon_r} \quad c = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad n = \frac{c_0}{c}$$

Der Verkürzungsfaktor  $k$  ist:  $k = \frac{1}{n}$

aus den Maxwell Gleichungen folgt:

$$c_0^2 = \frac{1}{\epsilon_0 \cdot \mu_0} \quad c_0 = \sqrt{\frac{1}{\epsilon_0 \cdot \mu_0}}$$

## Bessel-Funktionen

$\eta$	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 längs 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 (Länge des Impulses  $\ll$  als die Laufzeit auf der Leitung) gespeist wird?
  - 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 amplitudenmoduliertes Signal elektronisch demodulieren? (Schaltung)  
Beschreiben Sie diesen Vorgang mit einer Darstellung im Zeitbereich.
14. Welche Antennenformen 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)