

# Leitungstechnik

Die meisten Inhalte des Kapitels „Leitungstechnik“ werden bei einem Lehrgang „Radargrundlagen“ vorausgesetzt. Dieses Kapitel ist im ersten Teil eine Wiederholung von bekannten Themen aus dem Physikunterricht. Besonderer Schwerpunkt liegt im zweiten Teil auf der Technik der Hohlleiter.

## Inhaltsverzeichnis

### Leitungstechnik

<a href="#">Kenngößen einer Leitung.....</a>	<a href="#">2</a>
<a href="#">Ohmscher Längswiderstand R.....</a>	<a href="#">2</a>
<a href="#">Induktivität L.....</a>	<a href="#">2</a>
<a href="#">Isolationswert G.....</a>	<a href="#">3</a>
<a href="#">Leitungskapazität C.....</a>	<a href="#">3</a>
<a href="#">Impedanz (Z).....</a>	<a href="#">3</a>
<a href="#">Leitungsanpassung.....</a>	<a href="#">4</a>
<a href="#">Frequenzunabhängigkeit des Wellenwiderstandes.....</a>	<a href="#">4</a>
<a href="#">Stehwellenverhältnis.....</a>	<a href="#">4</a>
<a href="#">Der Skineneffekt.....</a>	<a href="#">6</a>
<a href="#">Koaxialkabel.....</a>	<a href="#">6</a>
<a href="#">Wellenwiderstand von Koaxialkabeln.....</a>	<a href="#">7</a>
<a href="#"><b>Grundlagen der Hohlleiter.....</b></a>	<a href="#"><b>8</b></a>
<a href="#">Ausbreitung elektromagnetischer Wellen im Hohlleiter.....</a>	<a href="#">8</a>
<a href="#">Ausbreitungsmoden im Hohlleiter.....</a>	<a href="#">9</a>
<a href="#">Hohlleitereinspeisung.....</a>	<a href="#">10</a>
<a href="#">Einspeisung durch eine Sonde.....</a>	<a href="#">10</a>
<a href="#">Einspeisung durch eine Leiterschleife.....</a>	<a href="#">10</a>
<a href="#">Hohlleiterverbindungen.....</a>	<a href="#">10</a>
<a href="#">Drosselverbindung.....</a>	<a href="#">11</a>
<a href="#">Drehbare Hohlleiterverbindung.....</a>	<a href="#">11</a>
<a href="#">Krümmungen und Drehungen.....</a>	<a href="#">12</a>
<a href="#">Krümmungen.....</a>	<a href="#">12</a>
<a href="#">Drehungen.....</a>	<a href="#">12</a>
<a href="#">Hohlleiteranpassungen.....</a>	<a href="#">12</a>
<a href="#">Verzweigungsschaltungen mit Hohlleitern.....</a>	<a href="#">13</a>
<a href="#">H- oder Parallelverzweigung.....</a>	<a href="#">13</a>
<a href="#">E- oder Serienverzweigung.....</a>	<a href="#">13</a>
<a href="#">Magic - T.....</a>	<a href="#">13</a>
<a href="#">Monopulsduplexer.....</a>	<a href="#">13</a>
<a href="#">Zusammenfassung Hohlleiter.....</a>	<a href="#">14</a>

## Kenngrößen einer Leitung

Elektrische Leitungen zur Versorgung verschiedenster Geräte mit elektrischer Energie können wir überall antreffen. Speziell in der Kommunikationselektronik haben Leitungen aber noch eine weitere Aufgabe als nur Energietransport, zum Beispiel die Nachrichtenübermittlung beim Telefon. Jedoch gelangt eine Nachricht auf einer Leitung nicht unverändert über 100 km zum Empfänger, sondern unterliegt längs der Leitung vielen Einflüssen, die sich auf das Signal auswirken.

Vergleicht man das Ausgangssignal einer Leitung mit dem Eingangssignal, so wird man Veränderungen feststellen, die folgende Ursachen haben.

- Verzerrungen,
- Dämpfungen oder
- Laufzeitunterschiede bei unterschiedlichen Eingangsfrequenzen.

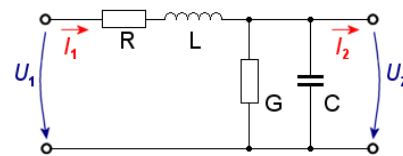


Bild 1: Ersatzschaltbild einer Leitung

Da jede Leitung unterschiedliche Eigenschaften aufweist, aber alle Leitungen denselben Einflüssen unterliegen, kann für eine Leitung ein Ersatzschaltbild gezeichnet werden, welches im Bild 1 gezeigt wird. Auf der Leitung wirkt ein Ohmscher Längswiderstand R, eine Leitungsinduktivität L, ein Isolationswert G und eine Leitungskapazität C.

### Ohmscher Längswiderstand R

Jeder noch so gute Leiter stellt dem Stromfluss einen Widerstand entgegen, da die beweglichen Elektronen immer auf Atomrümpfe treffen, und somit etwas abgebremst werden. Formelmäßig lässt sich der Widerstand so ausdrücken:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A} \quad [\Omega]$$

R: Längswiderstand in  $\Omega$

A: Leitungsquerschnitt

$\rho$ : spezifischer Leiterwiderstand in  $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$

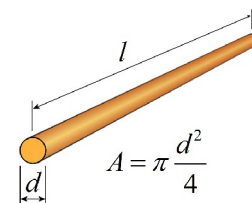


Bild 2: Berechnung des Widerstands eines Leiters

Die Kenngröße wird in Datenblättern für eine definierte Leitungslänge von z.B. 1 km angegeben und dann als *Widerstandsbelag*  $R'$  bezeichnet. Dieser wird mit folgender Formel berechnet:

$$R' = \frac{R}{l} \quad \text{in} \quad \frac{\Omega}{\text{km}}$$

### Induktivität L

Um jeden stromdurchflossenen Leiter baut sich ein Magnetfeld auf. Das Magnetfeld ändert sich proportional zur angelegten Wechselspannung. Dadurch wird im Leiter eine Spannung induziert, die ihrer Ursache entgegenwirkt. Diese induzierte Spannung schwächt damit den Stromfluss. Die Größe der Induktivität L hängt von folgenden Parametern ab:

- Länge des Leiters,
- Querschnitt des Leiters und
- Abstand zwischen Hin- und Rückleiter.

Die Kenngröße wird in Datenblättern für eine definierte Leitungslänge von z.B. 1 km angegeben und dann als *Induktivitätsbelag*  $L'$  bezeichnet. Dieser wird mit folgender Formel berechnet:

$$L' = \frac{L}{l} \quad \text{in} \quad \frac{\text{mH}}{\text{km}}$$

### Isolationswert G

In der Praxis gibt es keinen idealen Isolator, der ohne jeglichen Stromfluss ist. Daher tritt auch bei einer isolierten Zweidrahtleitung immer ein gewisser Leckstrom auf, der über die Isolation vom Hin- zum Rückleiter fließt. Die Größe der Leitfähigkeit wird mit  $G$  bezeichnet und wird manchmal auch Querwiderstand oder Ableitung genannt. Die Leitfähigkeit einer Isolation ist gleich dem Reziprokwert ihres Ohmschen Widerstandes. Als Maßeinheit für den Leitwert wird das  $S$  („Siemens“) verwendet.

$$S = \frac{1}{R}$$

Die Kenngröße wird in Datenblättern für eine definierte Leitungslänge von z.B. 1 km angegeben und dann als *Leitwertbelag*  $G'$  bezeichnet. Dieser wird mit folgender Formel berechnet:

$$G' = \frac{G}{l} \quad \text{in} \quad \frac{S}{\text{km}}$$

### Leitungskapazität C

Jeder Verbraucher hat einen Widerstand, an dem die Spannung abfällt. Wird diese Spannung durch eine Leitung an den Verbraucher herangeführt, so entsteht zwischen Hin- und Rückleiter ein Potentialgefälle.

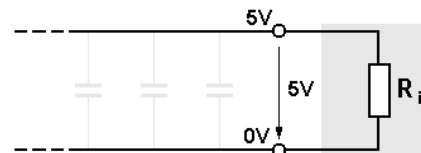


Bild 3: Entstehung einer Leitungskapazität

Auf Grund dieser Tatsache wirken die Hin- und Rückleitung wie die Platten eines Kondensators. Diese Kopplung über das elektrische Feld wird mit der Kapazität  $C$  beschrieben.

Die Kenngröße wird in Datenblättern für eine definierte Leitungslänge von z.B. 1 km angegeben und dann als Kapazitätsbelag bezeichnet. Dieser wird mit folgender Formel berechnet:

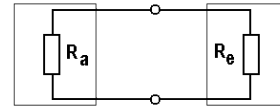
$$C' = \frac{C}{l} \quad \text{in} \quad \frac{\text{nF}}{\text{km}}$$

### Impedanz (Z)

Bei Hochfrequenzanwendungen wird auch der Begriff *Impedanz des Kabels* verwendet. Diese Größe ist der Wechselstromwiderstand  $\underline{Z}$ . Dieser ist der Quotient aus der zeitabhängigen komplexen Wechselspannung  $\underline{u}(t)$  und dem zeitabhängigen komplexen Wechselstrom  $\underline{i}(t)$ . Die Impedanz setzt sich aus einem Realteil (Ohmscher Widerstand  $R$ ) und einem Imaginärteil (Blindwiderstand  $X$ ) zusammen. Die Größe der Impedanz eines Kabels ist längenunabhängig. Dieser Begriff wird später im Zusammenhang mit dem Koaxialkabel genauer betrachtet.

## Leitungsanpassung

Um einem Gerät die maximale Leistung entnehmen zu können, muss intern jeder Baugruppenübergang leistungsmäßig angepasst werden. Das bedeutet, dass der Ausgangswiderstand der 1. Baugruppe  $R_a$  gleich dem Eingangswiderstand  $R_e$  der 2. Baugruppe sein muss.



Baugruppe 1 Baugruppe 2  
Bild 4: Anpassung zweier Baugruppen

Mit Hilfe von umfangreichen Leitungsgleichungen ist der sogenannte Wellenwiderstand oder Leitungswiderstand berechenbar.

$$Z_L = \sqrt{\frac{L'}{C'}}$$

$Z_L$ : Wellenwiderstand in  $[\Omega]$   
 $L'$ : Induktivitätsbelag in  $[\text{mH}/\text{km}]$   
 $C'$ : Kapazitätsbelag in  $[\text{nF}/\text{km}]$

Dabei gilt obige Formel für den vereinfachten Fall einer verlustlosen Leitung, mit den Bedingungen  $R' = 0 \text{ } \Omega/\text{m}$  und  $G' = 0 \text{ } \text{S}/\text{m}$ . Man erkennt, dass für diese Bedingung der Wellenwiderstand frequenzunabhängig ist. Durch Kürzung der Leitungslänge sowohl im Nenner als auch im Zähler kann in die obige Formel statt der Leitungsbeläge auch gleich die Kapazität und die Induktivität eingetragen werden.

### Frequenzunabhängigkeit des Wellenwiderstandes

Warum sollte auch die *Größe des Kondensators C* frequenzabhängig sein? Höchstens der *Scheinwiderstand  $X_C$*  des Kondensators ist frequenzabhängig. Aber nach dem ist hier nicht gefragt!

Wir können noch ein wenig die Maßeinheiten umformen um die Zusammenhänge zu erläutern. Dazu kann die DIN 1301-2 (physikalische Maßeinheiten, SI-Basisgrößen und abgeleitete Größen) zu Hilfe genommen werden. Die „millis“ und die „nanos“ können wir weglassen, es geht hier ja nur um das Prinzip.

$$\sqrt{\frac{\text{Henry}}{\text{Farad}}} = \sqrt{\frac{\frac{\text{Weber}}{\text{A}}}{\frac{\text{Coulomb}}{\text{V}}}} = \sqrt{\frac{\text{Weber} \cdot \text{V}}{\text{Coulomb} \cdot \text{A}}} = \sqrt{\frac{\text{Vs} \cdot \text{V}}{\text{As} \cdot \text{A}}} = \sqrt{\frac{\text{V}^2}{\text{A}^2}} = \Omega$$

Also spätestens hier:

Man erkennt, dass der Wellenwiderstand frequenzunabhängig sein muss, da dessen Maßeinheit das frequenzunabhängige „Ohm“ ist.

(q.e.d.)

### Stehwellenverhältnis

Herrscht in einem HF- System überall Anpassung, so wird die gesamte Leistung von der Quelle bis zum Empfänger verlustlos übertragen. Da in der Praxis jedoch nie die absolute Anpassung erreicht werden kann, beschäftigt sich die Technik mit den Problemen, die bei Fehlanpassung auftreten.

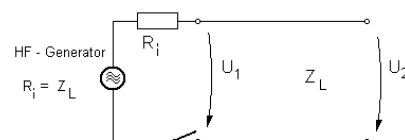


Bild 5: Ersatzschaltbild einer an einen Generator angeschlossenen Leitung

Dazu bedient sie sich der Einfachheit halber zweier Extremfälle der Fehlanpassung:

- der am Ende kurzgeschlossenen Leitung und
- der am Ende leerlaufenden Leitung.

Bevor diese Sonderfälle näher betrachtet werden, ist zu klären, was theoretisch in einer unendlich langen Leitung vorgeht, wenn eine HF- Schwingung eingespeist wird. Es soll Leistungsanpassung vorliegen ( $R_i = Z_L$ ).

Im Moment des Einschaltens beginnt der Generator seine Leistung auf die Leitung zu schicken (siehe Bild 6). Zum Zeitpunkt  $t = 0$  soll die Spannung ihren Minimalwert haben. Dieser Spannungswert wandert mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle die Leitung entlang.

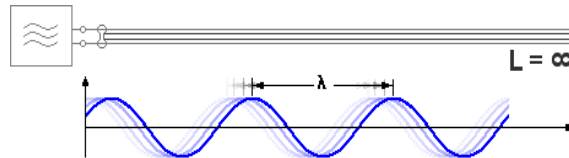


Bild 6: Zeitlicher Verlauf der Spannung auf einer HF- Leitung (sogenannte „Wanderwelle“)

Wenn die Leitung mit einem Widerstand  $R_a$  abgeschlossen ist, der so groß ist wie der Wellenwiderstand  $Z_L$  der Leitung, wird die gesamte Leistung im Widerstand  $R_a$  umgesetzt.

Beispiel: Eine 5 m lange Leitung ( $Z_L = 75 \Omega$ ) wird von einem Generator ( $R_g = 75 \Omega$ ) gespeist und hat einen Abschlusswiderstand von  $R_a = 75 \Omega$ , d.h. es besteht Anpassung. Der Generator liefert eine Schwingung mit einer Frequenz von 30 GHz. Wie viele Schwingungen passen auf die Leitung?

Lösungsweg: Umrechnung Frequenz in Wellenlänge: 
$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{3 \cdot 10^{10}} = 0,01\text{m}$$

Verhältnisrechnung Wellenlänge zur Leitungslänge:

$$\text{Anzahl der Schwingungen} = \frac{\text{Länge der Leitung}}{\text{Wellenlänge der Welle}} = \frac{5\text{m}}{0,01\text{m}} = 500 \text{ Schwingungen}$$

Was geschieht mit einer Welle, wenn keine Anpassung herrscht, z.B. bei einem Abschlusswiderstand von  $50 \Omega$  an einer Leitung mit einer Impedanz von  $75 \Omega$ ?

Der Generator liefert die Leistung  $P_{gen}$ . Diese teilt sich am Punkt 1 nach folgender Gleichung auf:

$$P_{R_i} = P_{Z_L} = \frac{P_{gen}}{2}$$

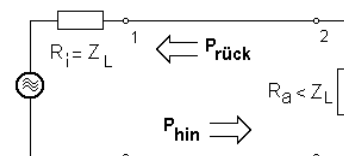
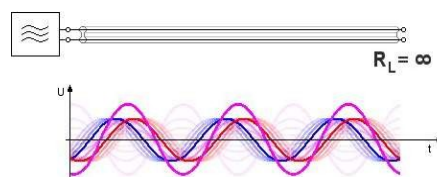


Bild 7: Eine an einen Generator angeschlossene fehlangepasste Leitung

Die Leistung  $P_{ZL} = P_{hin}$  wandert entlang der Leitung und erreicht den Widerstand  $R_a$ . Dieser ist aber kleiner als bei Anpassung. Er kann also nicht die gesamte Leistung aufnehmen und in Wärme umwandeln. Es bleibt ein Teil von  $P_{ZL}$  übrig, der am Punkt 2 reflektiert wird und zum Generator als  $P_{rück}$  zurückwandert.

Immer dann, wenn  $Z_L$  ungleich  $R_a$  ist, wird ein Teil der hinlaufenden Welle reflektiert, unabhängig davon, ob  $R_a > Z_L$  oder  $R_a < Z_L$  ist. In diesem Fall spricht man von Fehlanpassung.



Entstehung einer stehenden Welle

Bild 8:

Das hinlaufende Signal (blau) und das rücklaufende Signal (rot) überlagern sich und bilden eine stehende Welle (violett), die örtlich konstante Spannungsmaxima  $U_{max}$  und Spannungsminima  $U_{min}$  aufweist. Die Spannung am Spannungsmaxima wechselt ständig von  $-2 \cdot U_{ein}$  bis  $+2 \cdot U_{ein}$ . Weil sich die Spannung der stehenden Welle auf den doppelten Wert der Ausgangsspannung erhöht, kann diese Spannung im Generator, der fehlangepasst betrieben wird, die Ausgangsstufe überlasten und sogar unter Umständen zerstören.

Um den Grad der Fehlanpassung besser in den Griff zu bekommen, wurde der Reflexionsfaktor  $r$  und das Stehwellenverhältnis  $s$  (oder VSWR = voltage standing wave ratio) definiert:

$$|r| = \frac{U_{rück}}{U_{hin}} = \frac{|R_a - Z_L|}{|R_a + Z_L|}$$

$$s = \frac{U_{max}}{U_{min}} = \frac{U_{hin}(1+r)}{U_{hin}(1-r)} = \frac{(1+r)}{(1-r)}$$

Da sich ab etwa 1 GHz Leistungen besser messen lassen als Spannungen, findet in der Höchstfrequenztechnik das Leistungsstehwellenverhältnis (PSWR) Anwendung.

### Der Skineneffekt

Dass sich außerhalb von stromdurchflossenen Leitern ein Magnetfeld aufbaut, ist als bekannt vorauszusetzen. Doch auch im Innern eines Leiters baut sich ein Magnetfeld auf und wechselt periodisch seine Richtung. Durch die Änderung des Magnetfeldes werden aber Ströme erzeugt, die das Magnetfeld ringförmig umschließen. Dadurch schwächen sie den Primärstrom im Innern des Leiters nahe der Mittelachse, während die Wirbelströme in der Nähe der Oberfläche den Primärstrom verstärken.

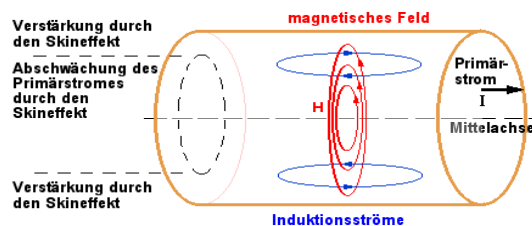


Bild 9: Grafik zur Veranschaulichung des Skineneffektes

Wechselströme werden durch die Bildung von Wirbelströmen im Leitungsinnen zur Leiteroberfläche verdrängt. Dieses Phänomen bezeichnet man als Skineneffekt.

Je höher die Frequenz ist desto stärker ist dieser Skineneffekt ausgeprägt. Der Skineneffekt verkleinert den effektiv genutzten Leitungsquerschnitt. Der Stromfluss ist auf eine dünne Schicht an den Oberflächen der Leiter begrenzt und nimmt exponentiell mit dem Abstand von der Oberfläche ab.

Durch die Verringerung des effektiv genutzten Leitungsquerschnittes erhöht sich der Widerstand der Leitung frequenzabhängig. Der frequenzabhängige Widerstand kann berechnet werden. Er ergibt sich zu:

$$R_{\omega} = \frac{l}{r} \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r \omega}{4\pi \sigma}}$$

$l$  ist die Drahtlänge,  
 $r$  dessen Radius,  
 $\mu_0$  die magnetische Feldkonstante,  
 $\mu_r$  die Permeabilität,  
 $\sigma$  die Leitfähigkeit des Materials und  
 $\omega$  die Kreisfrequenz ( $\omega = 2\pi f$ ).

Um die Auswirkungen des Skineneffektes so klein wie möglich zu halten, werden in der HF-Technik Leiter mit möglichst großer Oberfläche eingesetzt (HF-Litze, Bandleiter usw.).

### Koaxialkabel

Bei einem Koaxialkabel haben der Hin- sowie der Rückleiter die gleiche Achse, der Hinleiter verläuft also genau in der Mitte einer metallischen Außenhülle. Da der Innenleiter vollständig vom Außenleiter umgeben ist, erfolgt nahezu keine Abstrahlung, die Kabelart wirkt selbstabschirmend. Der dünne Innenleiter unterscheidet sich deutlich vom großen Außenleiter. Deshalb bezeichnet man dieses Kabel auch als „asymmetrisches Kabel“.



Bild 10: Koaxialkabel

Um den Innenleiter immer im Zentrum zu halten, wird der Zwischenraum mit Kunststoff ausgefüllt oder es werden in bestimmten Abständen isolierende Abstandsscheiben eingesetzt. Je besser die Dielektrizitätskonstante  $\epsilon$  ist, umso besser ist auch das Übertragungsverhalten des Kabels. Deshalb wird oft geschäumtes Isolationsmaterial verwendet.

$$Z = \frac{138,059}{\sqrt{\epsilon}} \cdot \lg \frac{D}{d}$$

$D$  Innendurchmesser des Außenleiters,  
 $d$  Durchmesser des Innenleiters,  
 $\epsilon$  Dielektrizitätskonstante

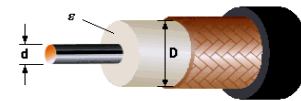


Bild 11: flexibles Koaxialkabel

Sowohl der Wellenwiderstand des Kabels als auch das Dämpfungsverhalten des Koaxialkabels hängen stark vom Verhältnis der Leiterdurchmesser ab. Bei einem Wellenwiderstand von  $50 \Omega$  bis  $75 \Omega$  haben Koaxialleitungen eine minimale Dämpfung.

Deshalb haben Koaxialkabel für den Fernsehbereich immer einen Wellenwiderstand von  $75 \Omega$ , während Koaxialkabel für Funk-Anwendungen meist mit einem  $50 \Omega$  Wellenwiderstand (dickerer Innenleiter!) für höhere Ströme ausgelegt sind.

Kupferlitze und Kupfergeflecht haben bei sehr hohen Frequenzen den Nachteil, dass höhere Leitungsinduktivitäten auftreten. Deshalb wird trotz des zu erwartenden Skin-Effektes doch lieber ein starrer Draht verwendet. Die Oberfläche ist dann aber meist versilbert.

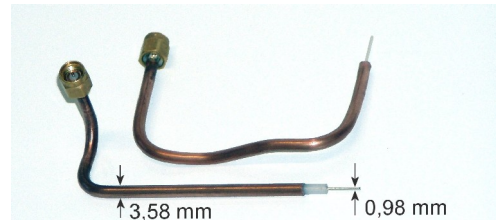


Bild 12: Halbstarres „Semi-Rigid“- Koaxialkabel

Wenn das Kabel nicht flexibel sein muss, kann auch der Außenleiter als halbstarres Kupferrohr ausgeführt werden. Diese Kabel tragen den Namen „Semi-Rigid-Kabel“.

### Wellenwiderstand von Koaxialkabeln

Für Hochfrequenzanwendungen und für die Messtechnik sind allgemein Kabel mit  $50 \Omega$  Wellenwiderstand üblich. Breitbandkabel für das Fernsehen haben meist  $75 \Omega$ , teilweise auch  $60 \Omega$  Wellenwiderstand. Spezialkabel mit anderen Wellenwiderständen, zum Beispiel  $90 \Omega$  für Netzwerke, sind ebenfalls erhältlich. Annähernd optimale Koaxialkabel haben folgende Wellenwiderstände:

- $77 \Omega$  für geringste Dämpfung,
- $60 \Omega$  für größte Spannungsfestigkeit,
- $30 \Omega$  für größte Leistungsbelastbarkeit und
- $50 \Omega$  als guter Kompromiss-Wert zwischen Spannungsfestigkeit und Belastbarkeit.

# Grundlagen der Hohlleiter

Im Frequenz- Bereich über etwa 1000 MHz weisen koaxiale Leitungen bei der Übertragung von hohen Leistungen (z.B. Sendesignale) eine Reihe von erheblichen Nachteilen, wie hohe Dämpfung und geringe Überschlagsfestigkeit, auf. Sind die Nachteile bei leistungsschwachen Signalen noch akzeptabel, führen sie im Hochleistungsbereich zu nicht tolerierbaren Verlusten.

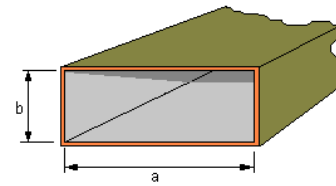


Bild 13: Abmessungen eines Rechteckhohlleiters

Die Dämpfungsverluste entstehen durch leitungseigene Kapazitäten und Induktivitäten, sowie dem Skineneffekt und nehmen mit steigender Übertragungsfrequenz erheblich zu. Die Überschlagsfestigkeit wird durch den geringen räumlichen Abstand zwischen Innen- und Außenleiter stark begrenzt.

Zur Vermeidung der geschilderten Nachteile, werden in Radar - Anlagen zur Übertragung leistungsstarker HF - Signale sogenannte Hohlleiter eingesetzt. Hohlleiter sind metallische Rohre mit rundem, elliptischem oder rechteckigem Querschnitt, wobei der rechteckige Hohlleiter am häufigsten eingesetzt wird.

Theoretisch entsteht ein Hohlleiter, indem unzählige, kurzgeschlossene  $\lambda/4$  - Leitungen aneinandergereiht werden. Zwei dieser Gebilde aneinandergesetzt ergeben einen Hohlleiter mit rechteckigem Querschnitt.

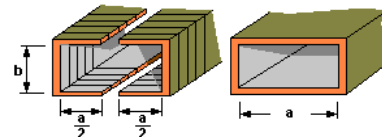


Bild 14: Entstehung des Hohlleiters aus kurzgeschlossenen  $\lambda/4$  - Abschnitten

Signale können sich aber erst ab einer bestimmten Frequenz im Hohlleiter ausbreiten. Diese Frequenz ist von den Abmessungen des Hohlleiters, speziell von der Seite a, abhängig. Ausbreitungsbedingungen bestehen, wenn die Welle kleiner als die sogenannte Grenzwellenlänge  $\lambda_{Grenz}$  wird.

Die Grenzwellenlänge rechteckförmiger Hohlleiter ergibt sich aus der Formel:

$$\lambda_{Grenz} = 2 \cdot a$$

$\lambda_{Grenz}$  = Grenzwellenlänge [m]  
 $a$  = längere Seite des Hohlleiters [m]

## Ausbreitung elektromagnetischer Wellen im Hohlleiter

Hochfrequente Energie, die in einen Hohlleiter eingespeist wird, baut im Innern eine elektromagnetische Welle mit E- und H- Feld auf. Diese elektromagnetische Welle breitet sich mit nahezu Lichtgeschwindigkeit in dem Hohlleiter aus.

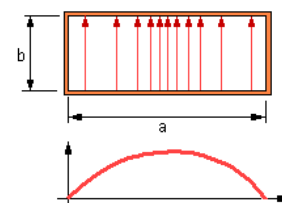


Bild 13: E- Feld im Hohlleiter (Querschnitt, Momentaufnahme,  $H_{10}$ - Modus)

Zwischen den a- Wänden bildet sich ein E- Feld aus, das zu den b- Wänden hin abnimmt und schließlich an den Wänden kurzgeschlossen wird. Das E- Feld weist im Querschnitt einen sinusförmigen Verlauf auf.

In Längsrichtung wechselt das E- Feld periodisch mit der Frequenz seine Polarität und bildet jeweils im Abstand von  $\lambda/2$  ein Maximum aus.

Die Felder verharren nicht in den jeweiligen Zuständen, sondern ändern, über die Zeitachse betrachtet, ihre Intensität und Polarität im Rhythmus des Eingangssignals.



Das Dämpfungsverhalten von Hohlleitern ist stark frequenzabhängig. Ein Hohlleiter, mit der Grenzfrequenz betrieben, weist noch eine relativ starke Dämpfung auf, die erst mit der Erhöhung der Frequenz ein Minimum erreicht, das über einen bestimmten Bereich fast konstant bleibt, um anschließend wieder anzusteigen.

Ausschlaggebend für die gute Leitfähigkeit des rechteckigen Hohlleiters ist seine Abmessung (Seite „a“) in Bezug auf die zu übertragende Frequenz. Hohe Frequenzen benötigen Hohlleiter mit kleineren Abmessungen und umgekehrt.

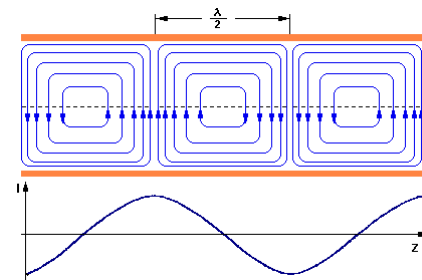


Bild 14: H- Feld im Hohlleiter (Draufsicht, Momentaufnahme)

Die Durchschlagsfestigkeit eines Hohlleiters hängt von den Abständen der Hohlleiterwände ab, d.h. im Querschnitt kleine Hohlleiter (für hohe Frequenzen) weisen eine geringere Durchschlagsfestigkeit auf als Hohlleiter mit großem Querschnitt. Bei Rechteckhohlleiter ist der geringste Abstand, also die Länge der Seite b, maßgebend. Um die Durchschlagsfestigkeit bei höheren Übertragungsleistungen zu verbessern, wird im Innern des Hohlleiters ein Überdruck erzeugt, der Feuchtigkeit aus dem Hohlleiter drückt, bzw. nicht eindringen lässt.

### Ausbreitungsmoden im Hohlleiter

Innerhalb eines Hohlleiters sind mehrere Ausbreitungsmoden möglich. Dabei ist eine unterschiedliche Grenzfrequenz für jeden Mode durch die geometrischen Abmessungen bestimmt. Ist die Frequenz des in den Hohlleiter eingespeisten Signals oberhalb der Grenzfrequenz, kann die elektromagnetische Energie durch den Hohlleiter mit minimaler Dämpfung transportiert werden. Unterhalb dieser Grenzfrequenz wird die Energie schon nach kurzer Entfernung auf einen unbedeutenden Wert abgeschwächt.

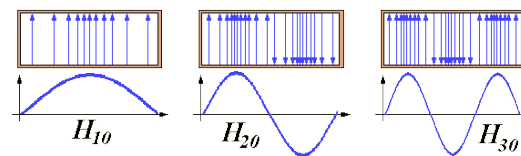


Bild 15: Hohlleiterquerschnitte mit E-Feld bei verschiedenen Ausbreitungsmoden

Der überwiegend auftretende Mode in einem bestimmten Hohlleiter ist derjenige Mode, der die niedrigste Grenzfrequenz hat. Für einen rechteckigen Hohlleiter ist das der  $H_{10}$ -Mode. Der  $H_{10}$ -Mode bedeutet, dass alle elektrischen Feldlinien quer zur Ausbreitungsrichtung befinden und kein elektrisches Feld in longitudinaler Richtung existiert. Als Folge des elektrischen Feldes entsteht ein magnetisches Feld  $H_{01}$  in longitudinaler Richtung.

Die Grafik zeigt die E-Feldverteilung im Hohlleiterquerschnitt bei verschiedenen Ausbreitungsmoden. Der Index „m“ gibt die Anzahl der Feldstärke-Maxima auf der breiten Seite und „n“ auf der schmalen Seite an - „n“ ist in den hier gezeigten Fällen Null.

Es ist ratsam, die Maße des Hohlleiters so zu wählen, dass sich die Energie nur in dem gewünschten Mode ausbreiten kann. Ist der Hohlleiter z.B. so breit und die Frequenz so hoch, so dass sich die Energie schon im  $H_{20}$ - Mode ausbreiten kann, treten eine Vielzahl von Problemen auf, da sich z. B. Ein- und Auskopplungen nun nicht mehr im Maximum des Feldes befinden.

Eine andere Art weit verbreiteter Hohlleitergeometrie ist der rechteckige „double ridge“ Hohlleiter. Die sich im Inneren des Hohlleiters befindlichen Verdickungen („Rücken“) steigern die Bandbreite des Hohlleiters allerdings auf Kosten der Dämpfung und der Durchschlagsfestigkeit.

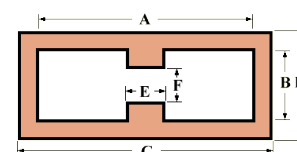


Bild 16: „double ridge“ Hohlleiter

## Hohlleitereinspeisung

### Einspeisung durch eine Sonde

Die elektrische Energie wird mit einer Sonde eingekoppelt, die  $\lambda/4$  vom geschlossenen Ende entfernt in den Hohlleiter hineinragt. Der Einspeisepunkt ist somit  $\lambda/4$  vom Ende und  $\lambda/4$  von den b-Seiten entfernt. Die sich von der Sonde des Kopplers ablösende Welle „sieht“ an drei Seiten den unendlich hohen Widerstand der kurzgeschlossenen  $\lambda/4$ -Leitung. Die elektromagnetische Welle kann sich also nur in der verbleibenden Richtung ausbreiten.

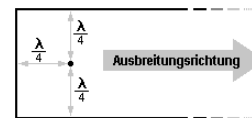


Bild 17: E-Sonde im Hohlleiter

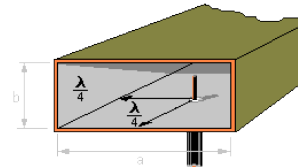


Bild 18: Abstände zu den Wänden

Hohlleitersonden sind prinzipiell reversibel, d.h. eine Sonde zum Einkoppeln von HF-Energie kann ebenso gut auch zum Auskoppeln von HF-Energie verwendet werden. Bei der Sondenkopplung wird zuerst ein E-Feld erzeugt, welches ein H-Feld zu Folge hat.

Praktisch ist jedoch ein kleines Problem zu bewältigen. Die Sonde sollte für das Kabel auch eine gute Anpassung haben. Das bedeutet, sie sollte auch  $\lambda/4$  lang sein! Leider steht dieses Maß aber im Widerspruch mit der Kantenlänge  $b$ , die meist auch nur ein wenig länger als  $\lambda/4$  ist.

Deswegen erhält die Sonde oft eine zusätzliche Kapazitätslast. Im nebenstehenden Beispiel ist mit einer gegenüberliegenden Abstimmerschraube diese zusätzliche Kapazitätslast realisiert, auch um eine abstimmbare Resonanzfrequenz zu erreichen. Die zur Spitze hin stark verbreiterte Form der Sonde bewirkt eine größere Bandbreite der Sonde.



Bild 19: Sonde im Hohlleiter für 2,7 GHz mit kapazitiver Abstimmerschraube

### Einspeisung durch eine Leiterschleife

Durch eine Leiterschleife wird eine Wechselspannung geleitet. Diese verursacht ein Magnetfeld um die Schleife. Da aber keine magnetischen Feldlinien senkrecht auf leitenden Flächen stehen, sondern parallel dazu verlaufen, nehmen die magnetischen Feldlinien die Formen des Hohlleiters an und bilden geschlossene Linien. Diese Feldlinien ändern ihre Richtung im Takt der Frequenz und wandern als feste Pakete längs zum Hohlleiter in die Ausbreitungsrichtung.

Die effektivste Stelle für die Installation einer Schleifenkopplung ist diejenige, bei der das H-Feld bei normaler Ausbreitung im Hohlleiter ein Maximum hat. Bei der Schleifenkopplung wird zuerst ein H-Feld erzeugt, welches ein E-Feld zu Folge hat.



Bild 20: Koppelschleifen für etwa 1060 MHz an BNC-Buchsen

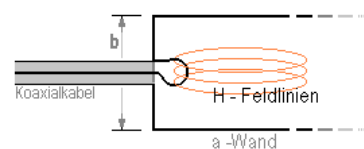


Bild 21: Schleifenkopplung im Hohlleiter

## Hohlleiterverbindungen

Ein Hohlleitersystem wird in den seltensten Fällen aus einem Stück gefertigt. Es ist also fast immer eine Verbindung der einzelnen Elemente notwendig. Man unterscheidet hierbei drei Hauptarten:

- **Feste Verbindung**

Die feste Verbindung wird bei der Fertigung vorgenommen. Die Hohlleiterabschnitte werden bis auf einige tausendstel Millimeter genau zusammengefügt und verlötet. Damit wird eine luftdicht abgeschlossene und spiegelglatte Verbindung erreicht.



Bild 22: Drosselverbindung mit E-Krümmung eines Hohlleiters

- **Halbfeste Verbindung**

Müssen die Hohlleiterabschnitte zur Durchführung von Wartungs- und Reparaturarbeiten demontierbar sein, so wird eine halbfeste Verbindung verwendet. Die am meisten verwendete Verbindung ist die sogenannte Drosselverbindung.

- **Drehbare Verbindung**

In Fällen, in denen die Energie von einem feststehenden zu einem rotierenden Teil der Anlage (z.B. zur Antenne) übertragen werden soll, verwendet man runde Hohlleiter. Der Übergang von dem festen zum rotierenden Teil kann ebenfalls eine Drosselverbindung sein.

Die Verbindungsstücke müssen einen reflexionsfreien Übergang von einem Hohlleiterabschnitt zum anderen und damit kleinstmögliche Verluste an der Übergangsstelle gewährleisten. Kleinste Unregelmäßigkeiten an der Verbindungsstelle können erhebliche Verluste bewirken.

### Drosselverbindung

Die Drosselverbindung besteht aus zwei Flanschen, die zusammengeschraubt werden. In deren Mitte sind die zu verbindenden Hohlleiter angebracht. Der rechte Flansch ist flach. In den linken Flansch ist ein Schlitz mit der Tiefe von  $\lambda/4$  eingedreht. Dieser Schlitz ist an seinem Ende kurzgeschlossen.

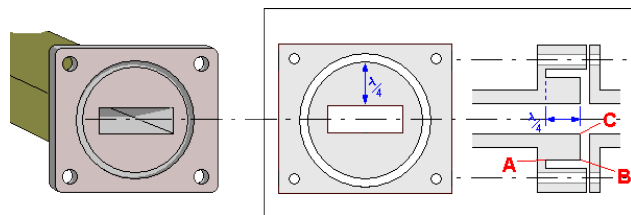


Bild 23: Drosselflansch

Der Kreisdurchmesser des Schlitzes ist so bemessen, dass er von der Mitte der oberen bzw. unteren Wand der zu verbindenden Hohlleiter - aber auch von den Stellen, an denen im Hohlleiter die höchste Spannung auftritt - ebenfalls  $\lambda/4$  entfernt liegt. Der Kurzschluss des Schlitzes liegt demnach  $\lambda/4 + \lambda/4 = \lambda/2$  von den Stellen entfernt, an denen die obere bzw. die untere Wand der Hohlleiterabschnitte zusammenstoßen.

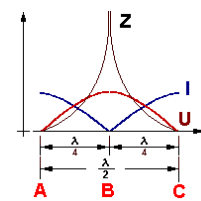


Bild 24: Widerstands-  
transformation

### Drehbare Hohlleiterverbindung

In Fällen, in denen die Energie von einem feststehenden zu einem rotierenden Teil der Anlage (z.B. zur Antenne) übertragen werden soll, verwendet man entweder runde Hohlleiter, oder einen kurzen koaxialen Abschnitt im Hohlleitersystem, der im Zentrum einer drehbaren Verbindung steht.

Mittels einer Sonde wird die HF-Energie vom Hohlleiter in den Koaxialabschnitt ein- oder ausgekoppelt. Für eine drehbare Verbindung eignet sich besonders ein runder Hohlleiterabschnitt. Die im Bild 25 gezeigte drehbare Verbindung ist die gebräuchlichste Variante.

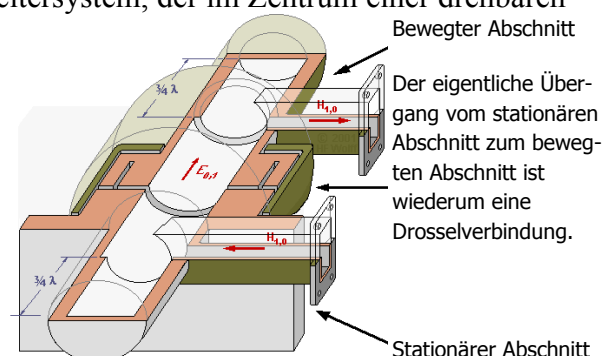


Bild 25: Drehbarer Hohlleiterabschnitt

Der runde Hohlleiterabschnitt ist so bemessen, dass er die elektromagnetischen Wellen als  $E_{0,1}$  Welle überträgt.

Die rechteckigen Hohlleiteranschlüsse sind so angebracht, dass sie den kreisförmigen Hohlleiter daran hindern, im falschen Mode zu arbeiten. Die Länge der Resonanzstücke ist  $3/4 \lambda$ , so dass eine hohe Impedanz für unerwünschte Moden erreicht wird.

## Krümmungen und Drehungen

Voraussetzung für eine reflexionsarme Fortpflanzung der Energie in einem Hohlleiter ist die konstante Größe und Form über seine gesamte Länge. Jede plötzliche Veränderung von Größe und Form verursacht Reflexionen. Sind solche unerwünscht, so muss jede Änderung von Größe und Form allmählich vorgenommen werden oder es müssen Spezialvorrichtungen verwendet werden, bei deren Konstruktion bestimmte Regeln beachtet werden.

### Krümmungen

Bei allmählichen Krümmungen ist darauf zu achten, dass der Krümmungsradius größer als zwei Wellenlängen ist. In diesem Fall werden die Reflexionen auf ein Minimum beschränkt, und zwar gleichgültig, ob die Krümmung an der breiten oder an der schmalen Seite des Hohlleiters vorgenommen wird. Scharfe Krümmungen um  $90^\circ$  haben normalerweise Reflexionen zur Folge. Diese werden durch Verwendung solcher Winkelstücke vermieden.

### Drehungen

Ist es erforderlich, die elektromagnetischen Felder zu drehen, so wird dies durch ein Verdrehen des Hohlleiters erreicht. Die Drehung soll allmählich verlaufen und sich über mindestens zwei Wellenlängen erstrecken. Um jede Art von Krümmungen und Drehungen zu ermöglichen, werden oft flexible Hohlleiterabschnitte eingebaut. Ihr biegsamer Teil kann in jede Richtung gebogen werden. Allerdings ist die Dämpfung in solchen Hohlleitern höher als in festen Abschnitten.

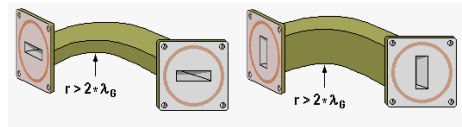
### Hohlleiteranpassungen

Eine Anpassung der Hohlleiterabschnitte wird oft zur Korrektur einer Fehlanpassung und zur Verhinderung von schädlichen Reflexionen vorgenommen. Diese Anpassung wird „Iris“ genannt und wirkt entweder induktiv, kapazitiv oder resonant.

Eine induktive Iris und das dazugehörige Ersatzschaltbild werden in der Grafik A gezeigt. Die Iris stellt einen Nebenschluss im Hohlleiter dar, der umgekehrt proportional zu der Größe der verbliebenen Öffnung ist. Die Flanke der induktiven Iris befindet sich senkrecht zu dem Magnetfeld.

Der Nebenschluss einer kapazitiven Iris (Grafik Ansicht B) wirkt ebenso. Wieder ist die Kapazität umgekehrt proportional zu der Größe der verbliebenen Öffnung, aber die Flanke der Iris befindet sich senkrecht zum elektrischen Feld.

Die Iris der Ansicht C beeinflusst sowohl das magnetische als auch das elektrische Feld und bildet so einen Parallelschwingkreis im Hohlleiter. Bei der Resonanzfrequenz wirkt dieser als Ohmscher Widerstand. Unterhalb der Resonanzfrequenz wirkt dieser Schwingkreis als Induktivität, oberhalb als Kapazität. Leitfähige Pfosten und Schrauben können ebenfalls zur Abstimmung verwendet werden.



H - Krümmer

E - Krümmer

Bild 26: H- Krümmer und E- Krümmer

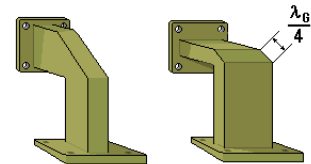


Bild 27: Winkelstücke



Bild 28: Hohlleiterdrehung



Bild 29: Flexibler Hohlleiter

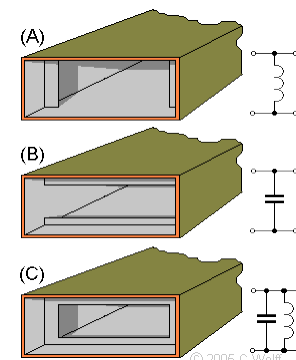


Bild 30: Hohlleiteranpassungen

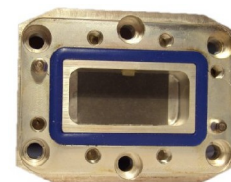


Bild 31: Hohlleiterabschnitt mit luftdichtem Abschluss und induktiver Blende

## Verzweigungsschaltungen mit Hohlleitern

Oft wird die durch einen Hohlleiter transportierte Energie nicht nur an einem Verbraucher benötigt, sondern an mehreren Endgeräten. Dazu verwendet man sogenannte Hohlleiterverzweigungen.

### H- oder Parallelverzweigung

Zuerst wird nebenstehender Aufbau betrachtet. Diese Verzweigung wird H- oder Parallelverzweigung genannt.

Das H-Feld erreicht die Verzweigung und teilt sich auf beide Zweige in Verhältnis der Endbelastung auf. Die E-Feldlinien wandern phasengleich in beide Richtungen.

### E- oder Serienverzweigung

In der E- oder Serienverzweigung teilt sich der Energiefluss in beide Richtungen mit  $180^\circ$  Phasenunterschied auf. Das Ersatzschaltbild macht deutlich, dass diese Verzweigungsart zu gleichem Strom, aber unterschiedlichen Spannungen an den Verzweigungen führt.

### Magic - T

Die Kombination aus Serien- und Parallelverzweigung nennt man Magic - T (Hybrid - T).

Wird mit Hilfe der Kompensationsschrauben die Anpassung erreicht, so kann keine Energie vom H-Eingang in den E-Eingang gelangen und umgekehrt. Die Ausgänge B und C jedoch beinhalten die Summe aus beiden Eingängen.

Dieser Schaltungsbaustein wird zur Frequenzmischung, für Messzwecke und bei Monopulsantennen verwendet.

## Monopulsduplexer

Monopulsantennen als Parabolreflektor mit Hornstrahlern werden oft bei Zielverfolgungsradargeräten verwendet. Hier befinden sich im Brennpunkt eines Parabolreflektors vier Hornstrahler, die um den Brennpunkt herum angeordnet sind. Jeder Hornstrahler ist für einen Quadranten zuständig. Befindet sich das reflektierende Objekt genau in der Mitte des Antennendiagramms, dann haben alle vier Hornstrahler ein gleichstarkes Echosignal empfangen. Befindet sich das reflektierende Objekt *nicht* genau in der Mitte des Antennendiagramms, dann hat mindestens ein Hornstrahler ein stärkeres Signal empfangen, als die anderen.

Aus den vier einzelnen durch die Hornstrahler empfangenen Energieteile werden durch Summen- und Differenzbildung die Echosignale für die drei Empfangskanäle Summensignal  $\Sigma$ , Seitenwinkeldifferenz  $\Delta_{Az}$  (sprich: Delta Azimut) und Höhenwinkeldifferenz  $\Delta_{El}$  (sprich: Delta Elevation) gebildet. Der dazu verwendete Hohlleiterabschnitt wird Monopulse Duplexer

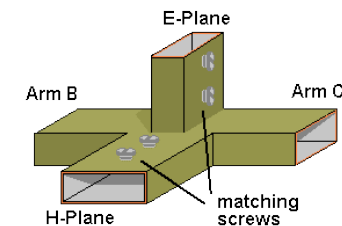
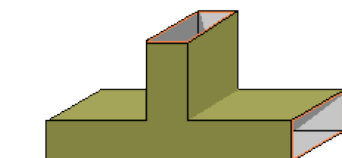
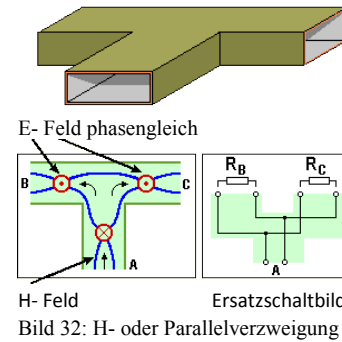


Bild 34: Magic-T Hybrid

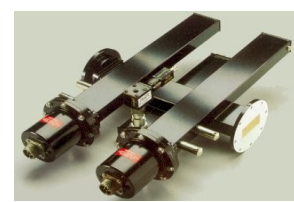


Bild 35: Magic-T Hybrid

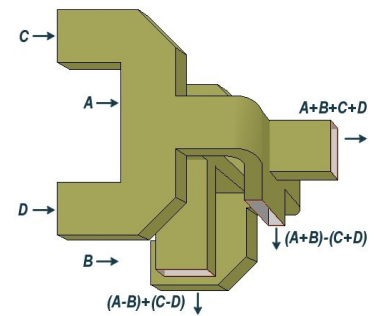


Bild 36: Ansicht der Hohlleiterverschaltungen

genannt und nutzt auf sehr kompakten Raum viele der bisher beschriebenen Hohlleiterverzweigungen, -drehungen und Magic T's.

Die Summen- und Differenzbildung geschieht an einem Magic-T. Beide Teilarme A und B werden gleichphasig durch das hier horizontal polarisierte Empfangsfeld angeregt. An der E- oder Serienverzweigung des Magic-T liegt die Differenz und an der H- oder Parallelverzweigung die Summe beider Hornstrahler an. Genauso werden an einem zweiten Magic-T die Signale der Hornstrahler C und D verarbeitet.

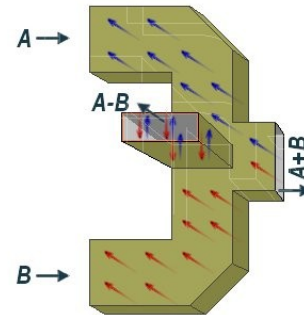


Bild 37: Summen- und Differenzbildung an einem Magic T

Insgesamt werden drei Magic-T's eingesetzt:

1. für A-B und A+B
2. für C-D und C+D
3. für  $\Delta_{E1} = (A+B)-(C+D)$  und  $\Sigma = A+B+C+D$

Eine weitere reine E- oder Serienverzweigung bildet das Signal  $\Delta_{Az} = (A-B)+(C-D)$

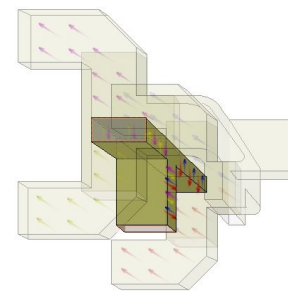


Bild 38: Summenbildung an einer E- oder Serienverzweigung

### Zusammenfassung Hohlleiter

1. Im Hohlleiter pflanzt sich die Energie in Form von elektromagnetischen Feldern fort.
2. Es gibt die verschiedensten Hohlleiterquerschnitte. Von praktischer Bedeutung sind jedoch nur die Hohlleiter mit rechteckigem und rundem Querschnitt.
3. Die Hohlleiterwände haben lediglich die Aufgabe, ein Ausbrechen der Wellen vom vorgeschriebenen Weg zu verhindern.
4. Hohlleiter haben geringere Verluste und sind höher belastbar als vergleichbare Koaxialleitungen.
5. Infolge der von der Erregerfrequenz abhängigen Mindestabmessungen haben Hohlleiter erst ab etwa 1000 MHz praktische Bedeutung.
6. Elektrische Felder können nur senkrecht, magnetische Felder nur parallel zu leitenden Flächen bestehen.
7. Die Felder pflanzen sich auf einem Zick-Zack-Weg zwischen den Seitenwänden des Hohlleiters fort.
8. Hohlleiter können nur oberhalb der Grenzfrequenz betrieben werden. Für die Grenzwellenlänge gilt:  $\lambda_{\text{grenz}} = 2 \cdot a$
9. Wanderwellen (E- und H-Feld in Phase) können in einem Hohlleiter nur bei Abschluss mit dem Wellenwiderstand des Hohlleiters erreicht werden.
10. Hohlleiter können durch Sonden im E-Feld-Maximum, durch Drahtschleifen im H-Feld-Maximum oder durch Öffnungen von außerhalb des Hohlleiters erregt werden.
11. Man unterscheidet feste, halbfeste und rotierende Verbindungen. Für halbfeste und rotierende Verbindungen wird oft die sogenannte Drosselverbindung verwendet.
12. Krümmungen und Drehungen dürfen zur Vermeidung von Reflexionen nicht plötzlich vorgenommen werden. Der Krümmungsradius muss mindestens zwei Wellenlängen betragen. Die Drehung muss sich mindestens über zwei Wellenlängen erstrecken. Für scharfe Krümmungen dürfen nur Spezialwinkelstücke verwendet werden.
13. Die stehenden Wellen in einem Hohlleiter können mit Hilfe einer in den Hohlleiter eingeführten Sonde gemessen werden.
14. Hohlleiter werden oft mit aufwändig getrockneter Druckluft gefüllt, um das Eindringen von Feuchtigkeit zu verhindern.