

65.90/II d

Technische Grundlagen
für
Übermittlungsgerätemechaniker

Band II

Gültig ab 1. Januar 1977

L. Sendetechnik

I. Der amplitudenmodulierte Sender

I. Einführung

Wir erinnern uns, dass bei der Amplitudenmodulation das Modulationssignal die Amplitude des Trägers beeinflusst, und dass bei der Modulation Seitenbänder im Abstand der Frequenz des Modulationssignals symmetrisch zum Träger entstehen. Die Amplitudenmodulation weist verschiedene Vorteile auf: sie ist einfach zu erzeugen und die Demodulation lässt sich mit wenig Aufwand realisieren. Dies ist auch der Grund, weshalb Rundfunkstationen im Mittel- und Langwellenband amplitudenmoduliert sind. Als Nachteile sind der grosse Bedarf an Bandbreite für beide Seitenbänder und der grosse Energiebedarf des Trägers zu erwähnen. Trotz dieser Nachteile konnte sich die Amplitudenmodulation neben dem Rundfunk noch weitere Anwendungsgebiete erhalten. So wird beim Fernsehen die Bildinformation mittels Amplitudenmodulation übertragen. Auch bei tragbaren Kleinfunkgeräten trifft man sie noch an, obwohl das Gros dieser Apparate mit der qualitativ besseren Frequenzmodulation arbeitet.

Amplitudenmodulation und Mischung sind identisch. Als Modulatoren werden meistens Röhren verwendet. Man unterscheidet dabei zwischen Gitter-, Schirmgitter- und Anodenmodulation. Amplitudenmodulierte Sender bestehen aus einem Oszillator zur Erzeugung des Trägers, einem Verstärker zur Aufbereitung des Modulationssignales und einer Endstufe, in welcher in den meisten Fällen die Modulation vorgenommen wird. Je nach Grösse und Umfang des Senders kommen noch Misch- und HF-Verstärkerstufen dazu.

2. Was wissen Sie schon über amplitudenmodulierte Sender? (Lösung Seite 491)

- Zeichnen Sie massstäblich richtig ein Signal von 500 kHz, das mit einem Modulationssignal von 2 kHz amplitudenmoduliert ist. Der Modulationsgrad beträgt 100 %.
- Definieren Sie den Ausdruck «Modulationsgrad».
- Ein Träger wird mit 6 kHz moduliert. In welchem Abstand treten die Seitenbänder auf?
- Wieviel Prozent der abgestrahlten Energie fallen beim Signal von Aufgabe a auf den Träger?
- Wie errechnet sich der Bedarf an Bandbreite für ein amplitudenmoduliertes Signal?
- Welches ist der höchst zulässige Modulationsgrad?
- Welches sind die Vorteile des Quarzoszillators?
- Welches sind die Nachteile des Quarzoszillators?

3. Der amplitudenmodulierte Sender

a. Definition

Ein amplitudenmodulierter Sender ist ein Hochfrequenzleistungsgenerator, dessen Hochfrequenzsignal mit einem Niederfrequenzsignal in der Amplitude

moduliert ist. Das unmodulierte Hochfrequenzsignal heisst *Träger*, das Niederfrequenzsignal bezeichnet man als *Modulationssignal*.

b. Funktionsprinzip der verschiedenen Modulationsschaltungen

ba. Anodenspannungsmodulation

Bild 297 zeigt die Schaltung einer anodenmodulierten Endstufe.

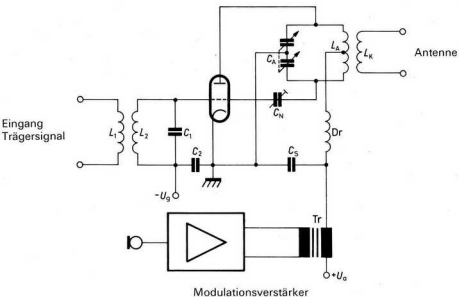


Bild 297

In Serie zum symmetrischen Anodenschwingkreis liegt der Modulationstransformator T. Die an ihm auftretende niederfrequente Modulationsspannung wird der Anodengleichspannung überlagert. Die Anodenspannung schwankt damit im Rhythmus des Modulationssignals. Bei hoher Anodenspannung gibt die Endstufe eine grössere Hochfrequenzleistung ab als bei tiefer. Das erzeugte Signal wird somit in seiner Amplitude moduliert. Diese Art der Modulation erlaubt einen hohen Modulationsgrad bei kleinem Klirrfaktor. Der Modulator muss als Leistungsverstärker ausgelegt werden, da er die Seitenbandleistung aufbringt. Das bedeutet, dass er eine Niederfrequenzleistung erzeugen muss, die etwa der halben Hochfrequenzleistung in unmoduliertem Zustand entspricht. Da es sich bei der Endstufe um eine Triode handelt, ist es notwendig, die schädliche Gitter-Anodenkapazität zu neutralisieren. Zu diesem Zweck ist der Ausgangsschwingkreis symmetrisch ausgeführt. Über den einstellbaren **Neutralisationskondensator** C_N wird dem Steuergitter eine um 180° gedrehte Neutralisationsspannung

zugeführt. Diese Neutralisationsspannung kompensiert die über die röhreninnere Kapazität rückgeführte Rückkopplungsspannung. Das Prinzip der Neutralisation ist dasselbe, wie wir es beim transistorisierten Hochfrequenzverstärker kennen gelernt haben.

Die Stufe arbeitet im C-Betrieb, die notwendige negative Gittervorspannung wird der Röhre vom Stromversorgungsteil zugeführt. Die Gitterspannungsquelle muss sehr niederohmig sein, damit der über diese fließende Gitterstrom nicht eine zusätzliche Erhöhung der Gittervorspannung verursacht. Die Hochfrequenzdrossel D_r verhindert ein Abfließen von Hochfrequenz über den Modulationstransformator. Der Siebkondensator C_s schliesst Hochfrequenzresten gegen Masse kurz. Seine Kapazität ist jedoch so bemessen, dass er den Frequenzgang des Modulators nicht beeinträchtigt.

Anodenspannungsmodulation ergibt eine saubere Amplitudenmodulation. Sie ist unproblematisch in der Einstellung. Die abgestrahlte Leistung steigt an, da der Modulator die Seitenbandleistung aufbringt. Ihr Nachteil besteht im grossen Leistungsbedarf des Modulators. Wegen der guten Modulationsqualität wird die Anodenspannungsmodulation in den meisten Rundfunksendern angewendet.

bb. Schirmgittermodulation

Das Schaltungsprinzip einer schirmgittermodulierten Endstufe zeigt Bild 298.

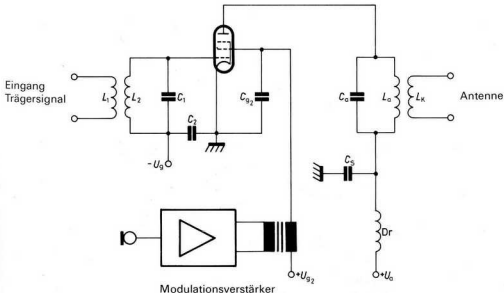


Bild 298

Die Modulationsspannung wird dabei an das Schirmgitter gelegt. Die Schirmgitterspannung schwankt im Rhythmus des Modulationssignals. Die Schirmgittermodulation braucht im Vergleich zur Anodenspannungsmodulation ausgesprochen wenig Modulationsleistung. Der Wirkungsgrad der Röhre wird jedoch nicht voll ausgenutzt, da die Schirmgitterspannung nur etwa halb so gross gewählt werden kann wie bei einer Endstufe ohne Modulation. Dies ist leicht einzusehen, wenn man bedenkt, dass durch das Modulationssignal die Schirmgitterspannung während den positiven Signalhalbwellen grössere Werte annimmt. Der Spitzenwert der Schirmgitterspannung darf nun nicht höher liegen als die maximal zulässige Schirmgitterspannung. In unmoduliertem Zustand erzeugt demzufolge die Endstufe eine bedeutend kleinere Leistung, als die gleiche Endstufe mit der maximalen Schirmgitterspannung ohne Modulator abgeben würde. Infolge des geringen Bedarfes an Modulationsleistung ist die Schirmgittermodulation eine billige Modulation. Sie weist jedoch einen entscheidenden Nachteil auf, der ihre Anwendung für die Übertragung von Rundfunksignalen ausschliesst: Der Zusammenhang zwischen Schirmgitterspannung und Anodenstrom ist nicht linear. Das bedeutet, dass bei der Schirmgittermodulation Verzerrungen auftreten. Zudem lässt sich der Sender nicht mit einem Modulationsgrad von 100% modulieren, wenn man nicht allzu hohe Verzerrungen in Kauf nehmen will. Schirmgittermodulation ist deshalb nur in Sendern für Telefonieübertragung anzutreffen.

Bei anodenmodulierten Endstufen, die mit Pentoden ausgerüstet sind, wird oft das Schirmgitter mitmoduliert, um zu verhindern, dass dieses bei starkem Absinken der Anodenspannung infolge der Modulation überbelastet wird.

Die Stufe arbeitet wegen dem hohen Wirkungsgrad ebenfalls in Klasse C. Dr und C_s dienen zur Siebung der Anodenspannung, indem sie ein Zurückfliessen der Hochfrequenz verhindern. Der Schirmgitterentkopplungskondensator C_{g2} ist so bemessen, dass er den Frequenzgang des Modulationsverstärkers nicht beeinträchtigt.

bc. Steuergittermodulation

Das Prinzip der Steuergittermodulation ist in Bild 299 dargestellt.

Die Modulationsspannung liegt in Serie zur Gittervorspannung. Die Gittervorspannung schwankt im Rhythmus des Modulationssignals. Die Steuergittermodulation braucht nur sehr wenig Modulationsleistung. Sie wird jedoch nur bei Trioden angewendet, da die Qualität der Schirmgittermodulation besser ist. Die Steuergittermodulation verursacht merkliche Verzerrungen, da im C-Betrieb der Eingangswiderstand zwischen Gitter und Katode der Schaltung von der Grösse der Modulationsspannung abhängig ist. Steuergittermodulation wird deshalb nur bei Telefoniesendern vorgenommen.

bd. Kollektormodulation

Die Kollektormodulation des Transistorsenders entspricht dem Wesen nach der Anodenspannungsmodulation des Röhrensenders. Bild 300 zeigt einen Transistorsender mit Kollektormodulation.

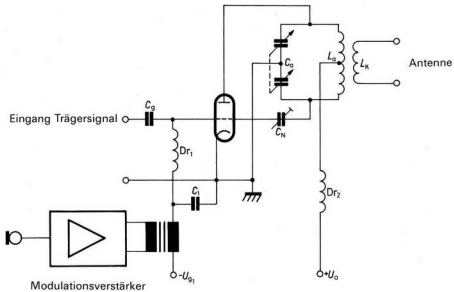


Bild 299

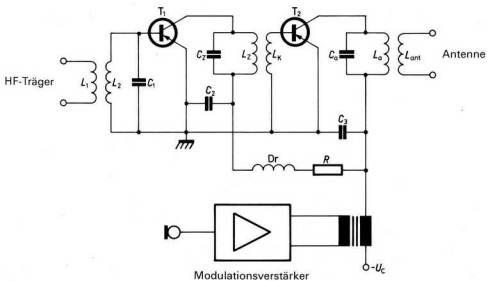


Bild 300

Der Modulationsvorgang ist derselbe wie beim Röhrensender. In Serie zum Kollektorschwingkreis der Endstufe liegt der Modulationstransformator. Die Kollektorspannung schwankt im Rhythmus des Modulationssignals. Damit schwankt auch die Leistung der Endstufe mit der Modulation; die Stufe wird amplitudenmoduliert. Der Modulationsverstärker muss auch hier ungefähr eine Niederfrequenzleistung aufbringen, die der halben Hochfrequenzleistung im unmodulierten Zustand entspricht. Um Verzerrungen zu vermeiden, wird beim Transistorsender immer die Vorstufe mitmoduliert. Dies geschieht über den Widerstand R und die Drossel Dr . Diese Massnahme ist notwendig, da die Modulation auf den Eingang der Stufe rückwirkt. Der Sender arbeitet als C-Verstärker. Die C-Einstellung ergibt sich, wenn die Basis gleichstrommässig am Emitter liegt. Der Transistor ist dann gesperrt, was dem C-Betrieb entspricht.

c. Prinzipieller Aufbau verschiedener amplitudenmodulierten Sender
ca. Blockschaltbild eines einfachen amplitudenmodulierten Senders

Bild 301 zeigt den Standardaufbau eines einfachen amplitudenmodulierten Senders.

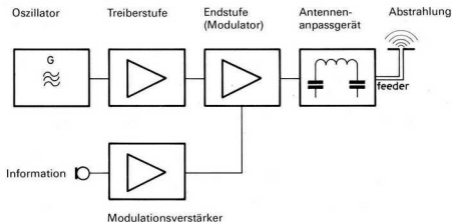


Bild 301

Das Trägersignal wird im Oszillator erzeugt. Es kann sich dabei um einen Quarzoszillator oder um einen freischwingenden Oszillator handeln. Der Quarzoszillator bringt den Vorteil der sehr grossen Frequenzkonstanz. Sein Nachteil besteht darin, dass bei einem Frequenzwechsel der Quarz ausgetauscht werden muss. Ein freischwingender Oszillator bringt den Vorteil, dass jede beliebige Frequenz eingestellt werden kann. Die Frequenzkonstanz kommt jedoch nur bei sehr grossem Aufwand an diejenige des Quarzoszillators heran. Die Treiberstufe hat den

Zweck, die für die Aussteuerung einer C-Endstufe notwendige Steuerleistung aufzubringen.

Es handelt sich bei der Treiberstufe um einen kleinen Leistungsverstärker. Die Endstufe arbeitet zur Erreichung eines guten Wirkungsgrades in den meisten Fällen als C-Verstärker. Gleichzeitig übernimmt sie die Funktion des Modulators. Der Modulationsverstärker liefert das Modulationssignal. Seine Niederfrequenzleistung richtet sich nach der Modulationsart. Das Antennenanpassgerät hat die Aufgabe, den Speisungswiderstand der Antenne an die Endstufe anzupassen und gleichzeitig die Antenne elektrisch auf Resonanz abzustimmen.

cb. Blockschaltbild eines einfachen amplitudenmodulierten Senders mit Quarzsteuerung

Bild 302 zeigt einen quarzgesteuerten amplitudenmodulierten Sender.

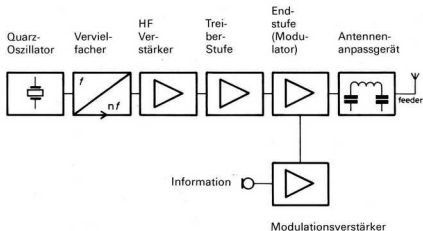


Bild 302

Diese Art von Sender ist oft in tragbaren Funkgeräten anzutreffen. Man macht sich dort die grosse Frequenzstabilität des Quarzes zunutze. Oft werden solche Geräte als Mehrkanalgeräte konzipiert. Sie sind dann mit einigen Quarzen bestückt. Die Frequenzumschaltung geschieht dabei durch Umschalten auf einen neuen Quarz. Gleichzeitig müssen natürlich alle Verstärker auf die neue Frequenz abgestimmt werden, was meistens mittels eines Mehrfachdrehkondensators geschieht.

Der Quarzoszillator schwingt oft nicht auf der Sendefrequenz. Wenn die Ausgangsfrequenz relativ hoch liegt, lässt man den Quarz tiefer schwingen und vervielfacht in einer Vervielfacherstufe seine Frequenz. Diese wird im Vervielfacher meistens verdoppelt oder verdreifacht.

Ein Vervielfacher ist ein übersteuerter Verstärker, dessen Anoden- oder Kollektorkreis auf die gewünschte Oberwelle abgestimmt ist. Das Ausgangssignal einer Vervielfacherstufe ist meistens zu schwach, um damit eine Treiberstufe ansteuern zu können. Zwischen dem Vervielfacher und dem Treiber wird deshalb ein Hochfrequenzverstärker geschaltet. Dieser verstärkt das Signal des Vervielfachers auf den für die Ansteuerung des Treibers notwendigen Pegel. Ab der Treiberstufe unterscheidet sich dieser Sender nicht von demjenigen nach Bild 301.

cc. Blockschaltbild eines amplitudenmodulierten Mehrbandsenders

Bild 303 zeigt das Blockschaltbild eines Mehrbandsenders.

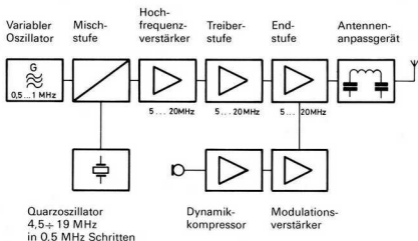


Bild 303

Ein Mehrbandsender ist ein Sender, dessen Frequenzbereich mehrere Bänder kontinuierlich überstreicht. In solchen Anlagen erfolgt die Signalaufbereitung meistens durch Mischung von Quarzfrequenzen mit Frequenzen eines freischwingenden Oszillators.

Der variable Oszillator – in der Literatur oft VFO genannt – erzeugt ein Signal zwischen 0,5 und 1 MHz. In diesem Bereich lässt sich jede beliebige Frequenz einstellen. Dieses VFO-Signal wird in einer Mischstufe mit einem Quarzsignal gemischt. Das Quarzsignal stammt von einem Quarzoszillator mit 30 Quarzen. Der

Quarzoszillator überstreicht einen Frequenzbereich von 4,5 MHz bis 19 MHz in Schritten von 0,5 MHz. Am Ausgang der Mischstufe steht ein Signal von 5 bis 20 MHz zur Verfügung. Zur Frequenzeinstellung müssen zwei Oszillatoren eingestellt werden: Die Bandwahl erfolgt durch den Quarzoszillator und die Feineinstellung innerhalb des Bandes durch den VFO. Im Anschluss an die Mischstufe wird das Mischprodukt in einem abgestimmten Hochfrequenzverstärker verstärkt und der Treiberstufe zugeführt. Ab der Treiberstufe funktioniert dieser Sender wie die bereits beschriebenen Anlagen. Dem Modulationsverstärker ist ein **Dynamikkompressor** vorgeschaltet. Der Dynamikkompressor engt die Dynamik des NF-Signals ein. Man erreicht dadurch eine bessere Ausnutzung des Senders, indem der Wirkungsgrad und dadurch die Verständlichkeit ansteigt. Dynamikkompressoren werden nur für Telefonieübertragungen eingesetzt. Musikübertragungen werden in den Studios in ihrer Dynamik auch beschnitten, jedoch nicht in dem Ausmass wie dies bei einem Kompressor für Sprache der Fall ist. Durch den Kompressor werden die Lautstärkeunterschiede weitgehend unterdrückt.

4. Das Wesentliche

Amplitudenmodulierte Signale haben einen schlechten Wirkungsgrad, da der Träger das Gros der Sendeenergie beansprucht.

Amplitudenmodulation unterscheidet sich nicht von der Mischung. Symmetrisch zum Träger entstehen Seitenbänder.

Bei der Anodenspannungsmodulation wird das Modulationssignal in Serie zur Anodenspannung gelegt. Anodenmodulierte Endstufen verlangen recht hohe Modulationsleistungen. Die Anodenmodulation zeigt in bezug auf Qualität die besten Resultate von allen Modulationsschaltungen für Amplitudenmodulation. Die Schirmgittermodulation erfordert eine bedeutend kleinere Modulationsleistung. Der Wirkungsgrad der Endstufe ist dabei kleiner, da mit der halben Schirmgitterspannung gearbeitet werden muss. Das Modulationssignal liegt in Serie zur Schirmgitterspannung. Da der Anodenstrom nicht linear von der Schirmgitterspannung abhängig ist, entstehen bei der Schirmgittermodulation Verzerrungen. Diese ist deshalb nur für Sprachübertragung zu gebrauchen.

Steuergittermodulation wird nur bei Endtrioden angewendet, da die Qualität der Schirmgittermodulation besser ist. Bei der Steuergittermodulation liegt das Modulationssignal in Serie zur Gittervorspannung. Infolge des aussteuerungsabhängigen Eingangswiderstandes der Endstufe entstehen recht hohe Verzerrungen. Der Leistungsbedarf für den Modulator ist gering.

Die Kollektormodulation eines Transistorsenders unterscheidet sich im Prinzip nicht von der Anodenspannungsmodulation. Um Verzerrungen zu umgehen, wird beim Transistorsender jedoch meistens die Vorstufe mitmoduliert.

Amplitudenmodulierte Sender werden entweder als einfache Sender für eine einzelne Frequenz gebaut, oder sie werden für mehrere Kanäle oder gar für mehrere Bänder konzipiert. Beim einfachen Sender wird in der Regel die Sendefrequenz in einem Oszillator erzeugt, in einem Treiber soweit verstärkt, dass die

Steuerleistung für die Ansteuerung der C-Endstufe aufgebracht werden kann und in dieser Endstufe verstärkt. Die Anpassung des Speisewiderstandes der Antenne an die Endstufe geschieht im Antennenanpassgerät. Dieses sorgt auch für die Abstimmung der Sendeantenne auf die Sendefrequenz. Die Endstufe übernimmt zusätzlich die Rolle des Modulators. Das Modulationssignal wird im Modulator verstärkt und der Endstufe zugeführt.

Sender für sehr hohe Sendefrequenzen verwenden nach dem Quarzoszillator Vervielfacherstufen, um die Frequenz des Quarzoszillators zu vervielfachen. Anschliessend an die Vervielfacherstufen wird oft ein Hochfrequenzverstärker eingeschaltet, um das relativ schwache Signal soweit zu verstärken, dass es die Treiberstufe aussteuern kann.

Mehrbandsender arbeiten meistens mit zwei Oszillatoren: Einem variablen Oszillator und einem umschaltbaren Quarzoszillator. Der Quarzoszillator bestimmt das Band; innerhalb des gewählten Bandes wird die Frequenz mit dem variablen Oszillator eingestellt. Zu diesem Zweck werden die Signale der beiden Oszillatoren gemischt und in einem auf die Mischstufe folgenden Hochfrequenzverstärker verstärkt.

Zur Erhöhung des Sendewirkungsgrades bei Sprachübertragungen werden oft Dynamikkompressoren eingesetzt.

5. Repetitionsaufgaben (Lösung Seite 492)

- a) Nennen Sie die Vorteile der Anodenmodulation.
- b) Warum muss der Modulator bei Anodenmodulation eine grosse Niederfrequenzleistung aufbringen?
- c) Welches ist der Vorteil der Schirmgittermodulation?
- d) Nennen Sie die beiden entscheidenden Nachteile der Schirmgittermodulation.
- e) Warum kann die Schirmgittermodulation nur für Sprachübertragungen verwendet werden?
- f) Warum wird die Steuergittermodulation nur bei Endtrioden verwendet?
- g) Weshalb entstehen bei der Schirmgittermodulation Verzerrungen?
- h) Warum entstehen bei der Steuergittermodulation Verzerrungen?
- i) Mit welcher Modulationsart lässt sich die Kollektormodulation vergleichen?
- k) Warum wird bei der Kollektormodulation die Vorstufe mitmoduliert?
- l) Welches ist der Zweck der Treiberstufe?
- m) Welche Aufgaben erfüllt das Antennenanpassgerät?
- n) Warum ist in der Regel hinter einer Vervielfacherstufe ein Hochfrequenzverstärker anzutreffen?
- o) Welcher Oszillator bestimmt bei einem Mehrbandsender das Band?
- p) Welcher Oszillator bestimmt bei einem Mehrbandsender die Frequenz innerhalb des Bandes?
- q) Zu was dient ein Dynamikkompressor?

II. Der Frequenzmodulierte Sender

1. Einführung

Rundfunksender und Funkgeräte, die im Ultrakurzwellenband arbeiten, sind meistens frequenzmoduliert. Diese Modulationsart erlaubt eine qualitativ gute, meist störungsfreie Übertragung von Sprache und Musik. Im Vergleich zu amplitudenmodulierten Sendern mit Anodenmodulation ist der Aufwand für den Modulator eher gering. Der Nachteil einer Übertragung im UKW-Bereich liegt in der geringen Reichweite der Sender. Diese ist durch das physikalische Verhalten der Ultrakurzwellen bedingt, welche weitgehend optischen Gesetzen folgen. Für eine einwandfreie Verbindung bei kleiner Senderleistung ist in vielen Fällen Sichtverbindung zwischen Sender und Empfänger erforderlich. Da ultrakurze Wellen an Hindernissen jeder Art reflektiert werden, sind auf kürzere Distanzen Verbindungen möglich, ohne dass zwischen Sender und Empfänger Sichtverbindung besteht. Für die Bedürfnisse der Armee wandelt sich der Nachteil der geringen Reichweite in einen Vorteil um, indem Funknetze auf gemeinsamen Frequenzen betrieben werden können, ohne dass sie sich gegenseitig stören, wenn sie räumlich genügend voneinander entfernt sind. Diese Eigenschaften haben das frequenzmodulierte Kleinfunkgerät zum weitverbreitetsten Funkmittel für militärische und zivile Zwecke gemacht.

2. Was wissen Sie schon über frequenzmodulierte Sender? (Lösung Seite 493)

- Welches sind die Vorteile der Frequenzmodulation gegenüber der Amplitudenmodulation?
- Kennen Sie Nachteile der Frequenzmodulation?
- Was verstehen Sie unter dem Ausdruck «Frequenzhub»?
- Welcher elektrische Wert des übertragenen FM-Signals wird durch die Amplitudenänderungen des Modulationssignals beeinflusst?
- Schwankt die Leistung eines frequenzmodulierten Signals unter dem Einfluss des Modulationssignals?
- Kann ein Quarzoszillator frequenzmoduliert werden?
- Kann ein Quarzoszillator phasenmoduliert werden?
- Welches ist der Unterschied zwischen Frequenzmodulation und Phasenmodulation?
- Darf eine Endstufe eines frequenzmodulierten Senders im C-Betrieb arbeiten?

3. Der frequenzmodulierte Sender

a. Definition

Ein frequenzmodulierter Sender ist ein Hochfrequenzleistungsgenerator, dessen Hochfrequenzsignal mit einem Niederfrequenzsignal in der Frequenz moduliert ist. Die maximale Frequenzabweichung wird Frequenzhub genannt.

b. Funktionsprinzip der verschiedenen Modulationsschaltungen

ba. Der Diodenmodulator

Bild 304 zeigt die Schaltung eines Diodenmodulators. Die Dioden wirken dabei als Gleichrichter. Die über C_k ausgekoppelte Oszillatorspannung wird gleichgerichtet. Der Stromflusswinkel der Gleichrichterdiode wird durch die Modulationsspannung gesteuert. Der Arbeitspunkt der Dioden ist durch die Amplitude der Oszillatorspannung fixiert.

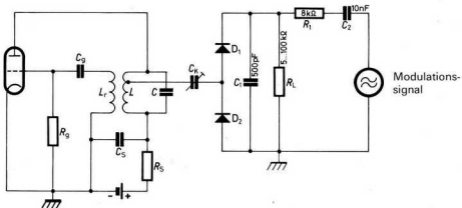


Bild 304

Die Steuerung des Stromflusswinkels durch das dem Arbeitspunkt überlagerte Modulationssignal hat zur Folge, dass der Kondensator C_k den frequenzbestimmenden Kreis LC des Oszillators mehr oder weniger verstimmt. Die Dioden wirken durch die Stromflusswinkelsteuerung wie spannungsgesteuerte Widerstände, deren Widerstandswerte im Rhythmus des Modulationssignals schwanken.

bb. Modulation mit Kapazitätsvariationsdiode

Bild 305 zeigt die Schaltung eines FM-Modulators mit einer Kapazitätsvariationsdiode.

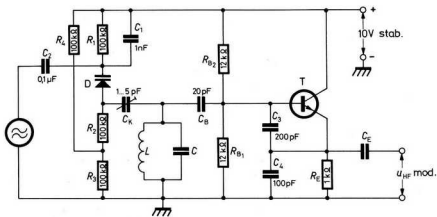


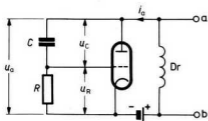
Bild 305

Die über die Widerstände R_1 bis R_4 in Sperrichtung vorgespannte Kapazitätsvariationsdiode D erhält ein der Vorspannung überlagertes Modulationssignal. Der Kapazitätswert der Diode pendelt im Rhythmus des Modulationssignals um den festen durch die Vorspannung gegebenen Wert. Die Diode verstimmt somit den frequenzbestimmenden Schwingkreis LC des Oszillators und verursacht dadurch eine Frequenzmodulation. Der Frequenzhub lässt sich mit dem Koppelkondensator C_k einstellen. Die Speisespannung muss stabilisiert werden, da die Frequenzstabilität der Schaltung weitgehend vom stabilen Arbeitspunkt der Diode abhängig ist.

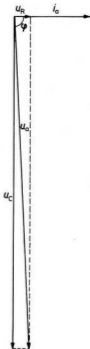
Diodenmodulatoren nach Bild 304 und 305 bringen immer einen gewissen nicht zu vermeidenden Prozentsatz an Verzerrungen, da die Dioden nie ganz linear arbeiten. Diodenmodulatoren werden deshalb meistens nur in portablen Kleinfunkgeräten eingesetzt. Für qualitativ bessere Modulatoren werden Reaktanzstufen gewählt.

bc. Modulator mit Reaktanzröhre

Jede Verstärkerröhre lässt sich als Reaktanz schalten. Wir wollen mit Hilfe von Bild 206 eine mögliche Reaktanzschaltung besprechen.



Vektordiagramm des RC-Phasenschiebers



Bedingung für den Phasenschieber: $X_c \gg R$

$$1. Z = \frac{u_a}{i_a} \approx \frac{1}{\omega C_p} ; 2 \cdot i_a = 5 \cdot u_R ;$$

$$2. u_R \approx \frac{u_a}{X_c} \cdot R \approx u_a \omega CR$$

$$3. S \cdot u_a \cdot \omega CR$$

$$4. Z \approx \frac{u_a}{S \cdot u_a \cdot \omega CR} \approx \frac{1}{S \cdot \omega CR}$$

$$5. \frac{1}{\omega C_p} \approx \frac{1}{S \cdot \omega \cdot C \cdot R}$$

$$6. C_p \approx S \cdot C \cdot R$$

Z = Impedanz der Reaktanzröhre

C_p = durch die Reaktanzröhre simulierte Kapazität

S = Steilheit der Reaktanzröhre

u_a = an der Röhre liegende HF-Spannung

u_R = HF-Spannung am Gitter der Röhre

Die Reaktanzröhre liegt zwischen den Anschlüssen a und b parallel zum frequenzbestimmenden Schwingkreis des zu modulierenden Oszillators. Die Drossel D_r hat lediglich die Aufgabe, der Röhre die Anodenspannung zuzuführen. Das Gitter erhält über den Phasenschieber RC einen Teil der angelegten Wechselspannung des Schwingkreises. Bedingung für den Phasenschieber ist, dass der kapazitive Blindwiderstand des Kondensators sehr viel grösser ist als der Widerstand R . Dadurch wird der Strom durch den Phasenschieber fast ausschliesslich vom Kondensator bestimmt. Das Vektordiagramm zeigt die Verhältnisse, wobei in Wirklichkeit der Unterschied zwischen dem kapazitiven Blindwiderstand des Kondensators C und dem Ohmschen Widerstand des Widerstandes R noch viel grösser ist. Die Anodenspannung verursacht am Phasenschieber die Spannungsabfälle U_C und U_R . Da der Kondensatorblindwiderstand sehr viel grösser als der Widerstand ist, besteht zwischen der Anodenspannung und dem Spannungsabfall an R eine Phasenverschiebung von beinahe 90° . U_R liegt am Steuergitter und steuert den Anodenstrom. Dieser weist demzufolge zur Anodenspannung eine Phasenverschiebung von fast 90° auf. Da der Anodenstrom voreilt, wirkt die Röhre wie eine Kapazität.

Der Blindwiderstand der Röhre ist gegeben durch den Quotienten aus Anodenwechselspannung und Anodenwechselstrom. Ändert man nun die Steilheit der Röhre, so ändert sich der Anodenwechselstrom und mit ihm der Blindwiderstand der Stufe. Eine Änderung des Blindwiderstandes bei gleichbleibender Frequenz kann jedoch nur durch ein Verändern des Kapazitätswertes erreicht werden. Das bedeutet, dass durch Veränderung der Steilheit die durch die Röhre dargestellte Kapazität sich ebenfalls ändert. Die Formel zu Bild 306 zeigt den Einfluss der Schaltmittel und der Steilheit auf den Kapazitätswert der Röhre.

Die Steilheit der Stufe wird über das Gitter gesteuert. Verwendet man hierzu eine Regelröhre, so schwankt die Steilheit mit dem dem Steuergitter zugeführten Modulationssignal. Die Steilheitsänderungen steuern die Kapazität der Stufe, womit der angeschlossene Schwingkreis verstimmt wird, was eine Frequenzmodulation des Oszillators bewirkt.

Reaktanzstufen werden nicht nur zur Frequenzmodulation verwendet, sie dienen oft auch der Frequenznachstimmung von Oszillatoren. Dem Reaktanzrohr wird dann eine Korrekturspannung zugeführt, die den Kapazitätswert steuert.

bd. Modulator für Phasenmodulation

Die Phasenmodulation hat den grossen Vorteil, dass sie sich auch für quarzgesteuerte Oszillatoren eignet. Wir wissen, dass bei der Phasenmodulation die Phase des Oszillatorsignals durch das Modulationssignal beeinflusst wird. Die Modulation geschieht dabei meistens in einem gesteuerten Phasenschieber. Bild 307 zeigt das Prinzip.

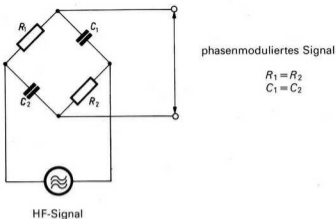


Bild 307

Die Phasenbrücke besteht aus zwei Kondensatoren und zwei Widerständen. Wird ein Kondensator oder ein Widerstand in seinem Wert verändert, so ändert sich die Phasenlage des Ausgangssignals. Meistens wird ein Kondensator durch eine Kapazitätsvariationsdiode ersetzt. Diese wird mit dem Modulationssignal gesteuert und moduliert somit im Takt des Niederfrequenzsignals die Phase des Trägersignals. Der erreichbare Phasenhub ist relativ gering, so dass nach dem Modulator das Signal vervielfacht werden muss, um einen genügend grossen Hub zu erreichen.

c. Prinzipieller Aufbau verschiedener frequenz- und phasenmodulierter Sender

ca. Blockschaltbild eines einfachen frequenzmodulierten Senders

Zur Erzeugung einer **echten** Frequenzmodulation muss ein frequenzbestimmender Oszillator des Senders frequenzmoduliert werden. Im einfachsten Fall besteht der Sender aus einem Oszillator, der die Sendefrequenz erzeugt, einem Modulator, der die Frequenz des Oszillators frequenzmoduliert, einem Hochfrequenzverstärker zur Verstärkung des modulierten Hochfrequenzsignals und einer Leistungsstufe, welche die geforderte Leistung aufbringt. Bild 308 zeigt das Blockschaltbild dieser Anlage.

Der Nachteil dieses Senders liegt darin, dass der frequenzbestimmende Oszillator direkt moduliert wird, und dadurch die Frequenzkonstanz beeinträchtigt wird. Dieser Nachteil kann vermieden werden, indem das Hochfrequenzsignal mit zwei Oszillatoren aufbereitet wird.

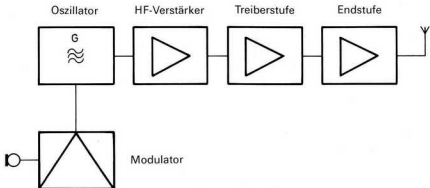


Bild 308

cb. Blockschaltbild eines frequenzmodulierten Senders mit zwei Oszillatoren

Das Hochfrequenzsignal wird durch Mischung aus zwei Oszillatorsignalen gewonnen. Der quarzgesteuerte Oszillator O_1 erzeugt ein sehr stabiles Signal mit der Frequenz von 90 MHz. Der freischwingende Oszillator O_2 wird frequenzmoduliert. Er liefert ein Signal von 10 MHz. In der Mischstufe werden die beiden Oszillatorfrequenzen gemischt. Das Summensignal wird im folgenden Hochfrequenzverstärker auf den für die Ansteuerung der Treiberstufe erforderlichen Pegel verstärkt. Bild 309 zeigt das Blockschaltbild der Anlage.

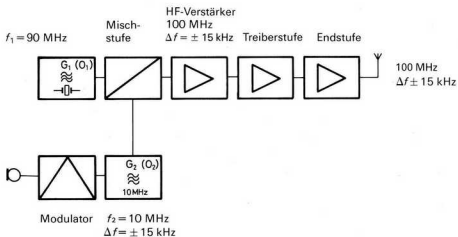


Bild 309

Die relativ niedrige Frequenz des freischwingenden Oszillators O_2 lässt sich besser konstant halten als die hohe Frequenz des Oszillators O_1 , deshalb ist dieser quartzgesteuert. Da wir zur Erzeugung einer echten Frequenzmodulation einen freischwingenden Oszillator benötigen, weil sich ein Quarzoszillator nicht frequenzmodulieren lässt, wird die Frequenz dieses freischwingenden Oszillators möglichst tief gewählt, da sich eine tiefe Frequenz besser konstant halten lässt. Zur Verbesserung der Frequenzstabilität wird in tragbaren Funkgeräten die Frequenz des freischwingenden Oszillators oft mit einer Frequenzkorrekturereinrichtung stabilisiert.

Der Modulator besteht in beiden Fällen aus einem gesteuerten Blindwiderstand und einem Niederfrequenzverstärker.

Wesentlich bei der echten Frequenzmodulation ist die Tatsache, dass der Schwingkreis des Oszillators durch den Modulator direkt beeinflusst wird, was eine direkte Frequenzmodulation der Oszillatorfrequenz zur Folge hat.

cc. Blockschaltbild eines phasenmodulierten Senders

Der phasenmodulierte Sender arbeitet nach einem anderen Prinzip als der frequenzmodulierte Sender. Bild 310 zeigt das Blockschaltbild eines phasenmodulierten Senders.

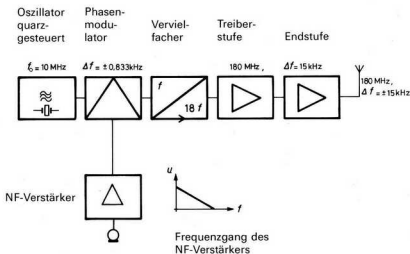


Bild 310

Der **Phasenmodulator** beeinflusst die frequenzbestimmenden Elemente des Oszillators **nicht**. Es lassen sich deshalb quartzgesteuerte Oszillatoren phasenmodulieren, worin der grosse Vorteil dieser Modulationsart liegt. Das Signal des quartzgesteuerten Oszillators wird im Phasenmodulator in der **Phase** moduliert. Der Frequenzgang des Niederfrequenzverstärkers muss dabei so korrigiert werden, dass mit zunehmender Modulationsfrequenz die Amplitude **linear** abnimmt. Durch diese Massnahme erreicht man einen von der Modulationsfrequenz unabhängigen Frequenzhub. Diese Frequenzkorrektur drängt sich auf, da wir wissen, dass bei der Phasenmodulation der daraus resultierende Frequenzhub bei gleichbleibender Amplitude des Modulationssignales proportional mit der Modulationsfrequenz ansteigt. Der Nachteil der Phasenmodulation liegt im geringen Frequenzhub direkt hinter dem Modulator.

Um einen genügend grossen Hub am Senderausgang zu erzeugen, ist es notwendig, dass das phasenmodulierte Signal in einer oder in der Regel in mehreren Stufen vervielfacht wird. Mit der Frequenzvervielfachung steigt auch der Frequenzhub entsprechend an.

cd. Blockschaltbild eines frequenzmodulierten Mehrkanalsenders

Bild 311 zeigt ein Beispiel eines Mehrkanalsenders, wie er in tragbaren Kleinfunkgeräten anzutreffen ist.

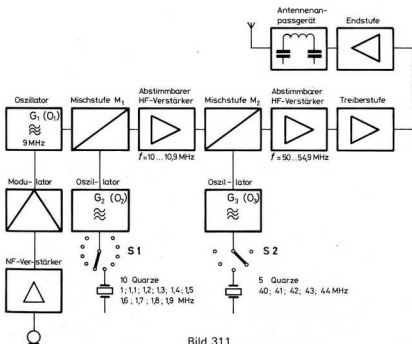


Bild 311

Zur Signalaufbereitung werden drei Oszillatoren benötigt. Der erste Oszillator O_1 ist freischwingend; er wird vom Modulator in der bekannten Art frequenzmoduliert. Das frequenzmodulierte 9 MHz-Signal des ersten Oszillators wird in der ersten Mischstufe mit einem Signal des quartzesteuerten zweiten Oszillators gemischt. Dieser Oszillator erzeugt je nach Stellung des Schalters S_1 eine Frequenz zwischen 1 und 1,9 MHz. Die Summenfrequenz der beiden Oszillatorsignale wird am Ausgang der Mischstufe M_1 im abgestimmten Hochfrequenzverstärker verstärkt und dem Eingang der Mischstufe M_2 zugeführt. In dieser Mischstufe erfolgt eine zweite Mischung.

Das Summensignal 10...10,9 MHz wird mit der Frequenz des dritten Oszillators gemischt. Dieser Oszillator erzeugt je nach Stellung des Schalters S_2 eine Frequenz zwischen 40...44 MHz. Am Ausgang der zweiten Mischstufe wird wiederum das Summensignal weiter verwendet. Es wird im abgestimmten Hochfrequenz- und Treiberverstärker verstärkt und steuert die Endstufe aus.

Die Frequenz des Ausgangssignals lässt sich in Schritten von 100 zu 100 kHz zwischen 50 und 54,9 MHz einstellen. Der zweite Oszillator erzeugt die Hunderterschritte, während der dritte Oszillator die Megahertzschritte liefert. Insgesamt lassen sich mit dieser Kombination 49 Kanäle einstellen.

4. Das Wesentliche

Frequenzmodulierte Sender erlauben eine weitaus bessere Übertragungsqualität als amplitudenmodulierte. Frequenzmodulation ist für Sender im UKW-Bereich reserviert, da die benötigte Bandbreite sehr hoch ist.

Ein frequenzmodulierter Sender ist ein Hochfrequenzleistungsgenerator, dessen Hochfrequenzsignal mit einem Niederfrequenzsignal in der Frequenz moduliert ist. Die maximale Frequenzabweichung wird Hub genannt.

Der einfachste Modulator arbeitet mit einer Diode, die als Gleichrichter wirkt. Sie wird über eine kleine Kapazität an den frequenzbestimmenden Schwingkreis angekoppelt. Das Modulationssignal bewirkt eine Steuerung des Stromflusswinkels, wodurch der Kopplungskondensator mehr oder weniger zum Schwingkreis geschaltet wird und diesen so im Takt des Modulationssignals verstimmt.

Ein weiterer einfacher Frequenzmodulator arbeitet mit einer Kapazitätsvariationsdiode. Die Kapazität der parallel zum frequenzbestimmenden Schwingkreis geschalteten Kapazitätsvariationsdiode wird durch das Modulationssignal gesteuert.

Grössere Sender verwenden oft Reaktanzröhren zur Frequenzmodulation. Eine Reaktanzröhre verhält sich wie ein Blindwiderstand. Über einen Phasenschieber wird ein Teil der an der Röhre liegenden Hochfrequenzspannung mit einer Phasendrehung von beinahe 90° dem Steuergitter zugeführt. Dadurch erhält der Strom eine gleiche Phasenverschiebung zur angelegten Spannung; die Röhre wirkt als Blindwiderstand. Die Grösse der durch die Reaktanzröhre dargestellten Kapazität hängt unter anderem auch von der Röhrensteilheit ab. Zur Modulation wird deshalb die Steilheit durch das Modulationssignal gesteuert.

Bei der Phasenmodulation erfolgt die Modulation nach dem Oszillator; es lassen sich also auch quartzgesteuerte Oszillatoren modulieren. Die Phasenmodulation wird meistens mit einem gesteuerten Phasenschieber durchgeführt. Frequenzmodulierte Sender arbeiten meistens mit zwei Oszillatoren. Der Oszillator mit der bedeutend niedrigeren Frequenz ist freischwingend und wird moduliert, während der zweite Oszillator mit der hohen Frequenz quartzgesteuert ist. Die beiden Oszillatorsignale werden in einer Mischstufe gemischt, wobei meistens das Summensignal weiterverstärkt wird. Durch diese Massnahme erreicht man eine recht gute Frequenzstabilität, da nur die Unkonstanz des tiefer schwingenden Oszillators die Stabilität bestimmt. Durch eine Frequenzaufbereitung mit drei Oszillatoren gelingt es, Sender mit einer grossen Kanalzahl zu bauen. Der Phasenmodulierte Sender unterscheidet sich in seinem Blockaufbau vom frequenzmodulierten Sender. Der realisierbare Phasenhub ist so gering, dass das modulierte Oszillatorsignal vervielfacht werden muss, um den erforderlichen Hub zu erhalten. Das Modulationssignal muss in seinem Frequenzgang korrigiert werden, da der aus dem Phasenhub resultierende Frequenzhub bei gleichbleibender Signalamplitude des Modulationssignals linear mit der Frequenz ansteigen würde.

5. Repetitionsaufgaben (Lösung Seite 494)

- Welche Grösse des Modulationssignals bestimmt bei der Frequenzmodulation den Frequenzhub?
- In welcher Art tritt die Frequenz des Modulationssignals im frequenzmodulierten Signal in Erscheinung?
- Definieren Sie den Ausdruck «Frequenzhub».
- Welches ist die Bedeutung des Modulationsindex?
- Ist der Modulationsindex eine konstante Grösse?
- Warum muss die Empfängerbandbreite grösser gewählt werden als der Senderhub?
- Erklären Sie den Unterschied zwischen Phasenmodulation und Frequenzmodulation.
- Warum kann ein quartzgesteuerter Oszillator nicht frequenzmoduliert werden?
- Erklären Sie, wie auf dem Weg über die Phasenmodulation ein quartzgesteuerter Oszillator frequenzmoduliert werden kann.
- Welche Anforderungen sind an den Niederfrequenzverstärker eines Phasenmodulators zu stellen, damit das resultierende Signal der Norm für frequenzmodulierte Signale entspricht?
- Wie lässt sich die Frequenzunstabilität eines frequenzmodulierten Senders verbessern, die dadurch entsteht, dass der Oszillator nicht quartzgesteuert werden darf, damit er frequenzmoduliert werden kann?
- Wie arbeitet der Diodenmodulator, der eine gewöhnliche Halbleiterdiode verwendet?
- Erklären Sie die Funktionsweise eines Modulators für Frequenzmodulation mit einer Kapazitätsvariationsdiode.
- Was ist eine Reaktanzröhre?
- Über welchen Wert wird die Kapazität oder die Induktivität, die durch eine Reaktanzröhre simuliert wird, gesteuert?
- Erklären Sie, wie eine Phasenmodulation zustande kommt?

III. Der einseitenbandmodulierte Sender

1. Einführung

Wir wissen, dass bei der Einseitenbandmodulation von einem amplitudenmodulierten Signal nur ein einziges Seitenband abgestrahlt wird. Der Träger und das andere Seitenband werden im Sender unterdrückt. Durch diese Modulationsart erreicht man einen hohen Senderwirkungsgrad, da die gesamte Senderleistung für ein einziges Seitenband zur Verfügung steht. Der Leistungsgewinn bezogen auf ein Zweiseitenband amplitudenmoduliertes Signal ist ein sechsfacher. Da nur ein Seitenband abgestrahlt wird, verringert sich die notwendige Bandbreite auf die Hälfte. Einseitenbandsignale sind unempfindlich gegenüber selektivem Schwund. Die erwähnten grossen Vorteile der Einseitenbandmodulation bedingen sender- wie empfängerseitig einen grossen Aufwand. Vor allem an die Stabilität der Oszillatoren im Sender wie im Empfänger werden höchste Ansprüche gestellt, da bereits eine Frequenzabweichung, die kleiner ist als 40 Hz, eine merkliche Verschlechterung der Übertragungsqualität mit sich bringt. Die Trägerunterdrückung im Sender erfolgt meistens in Ring- oder Gegentaktmodulatoren. Die Seitenbandunterdrückung erfordert Filter mit sehr steilen Flanken. Meistens werden dazu mechanische Filter oder Quarzfilter verwendet.

Der grosse Aufwand schränkt den Einsatz von Einseitenbandgeräten ein. Diese werden meistens nur für kommerzielle oder militärische Zwecke eingesetzt. Für die Rundfunkübertragungen dürfte die Einseitenbandmodulation wegen der hohen Qualitätsanforderungen, die an die Empfangsgeräte gestellt werden müssen, in absehbarer Zeit nicht in Frage kommen.

2. Was wissen Sie schon über einseitenbandmodulierte Sender?

(Lösung Seite 496)

- Erklären Sie, weshalb ein einseitenbandmodulierter Sender gegenüber einem amplitudenmodulierten einen Leistungsgewinn von Sechs aufweist.
- Einseitenbandempfänger haben ein besseres Signal- zu Rauschverhältnis als solche für Amplitudenmodulation. Erklären Sie weshalb.
- Warum ist eine Einseitenbandübertragung unempfindlich gegenüber selektivem Schwund?
- Weshalb wird die Übertragungsqualität schon bei ganz geringen Frequenzabweichungen merklich schlechter?
- Was ist ein Quarzfilter?
- Nach welchem Prinzip funktioniert ein mechanisches Filter?
- Welche Vorteile bietet ein mechanisches Filter?
- Darf die Senderendstufe eines Einseitenbandsenders im C-Betrieb arbeiten?

3. Der einseitenbandmodulierte Sender

a. Definition

Ein einseitenbandmodulierter Sender ist ein Hochfrequenzleistungsgenerator, dessen Hochfrequenzsignal mit einem Niederfrequenzsignal in der Amplitude moduliert ist, wobei beim Modulationsvorgang der Träger und ein Seitenband unterdrückt werden.

b. Funktionsprinzip

ba. Die Trägerunterdrückung

Die Trägerunterdrückung erfolgt in einem symmetrischen genau abgeglichenen Ring- oder Gegentaktmodulator, wie er im Kapitel Modulatoren beschrieben wurde.

bb. Die Seitenbandunterdrückung im Quarzfilter

Die Seitenbandunterdrückung erfordert Filter mit sehr steilen Flanken. Die ideale Filterkurve für diesen Zweck wäre eine Rechteckkurve. Die Extremforderung einer rechteckigen Durchlasskurve lässt sich nicht realisieren. Mit Hilfe von Filterquarzen lassen sich jedoch Bandfilter aufbauen, die eine sehr grosse Flankenteilheit aufweisen. Quarzfilter basieren auf einer Brückenschaltung. Bild 312 zeigt die Prinzipschaltung.

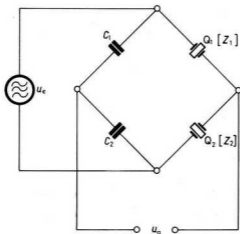


Bild 312

Die Ausgangsspannung U_a wird Null, wenn das Verhältnis $C_1 : C_2$ gleich dem Verhältnis $Z_1 : Z_2$ wird. Wobei Z_1 und Z_2 die Impedanzen der Quarze sind. Die Quarze werden nun so gewählt, dass die Seriersonanzfrequenz des einen Quarzes mit der Parallelresonanzfrequenz des anderen zusammenfällt. Bild 313 zeigt den Impedanzverlauf eines Quarzes in Abhängigkeit der Frequenz. Die beiden Resonanzstellen liegen nahe beieinander.

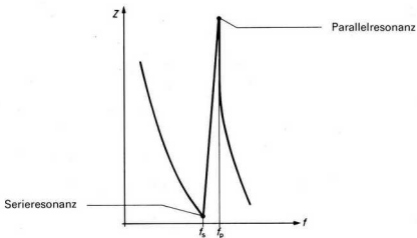


Bild 313

Unter diesen Voraussetzungen wirkt die Brücke wie ein Filter. Die resultierende Durchlasskurve wird nach Bild 314 sehr steile Flanken aufweisen.

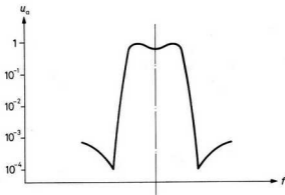


Bild 314

Ein Quarzfilter mit zwei Schwingquarzen zeigt Bild 315. Die Brückenkondensatoren C_1 und C_2 wirken als Schwingkreiskapazitäten für den Sekundärkreis des Eingangsfilters. Eingangs- und Ausgangsfilter sind auf die mittlere Frequenz der Quarzbrücke abgestimmt.

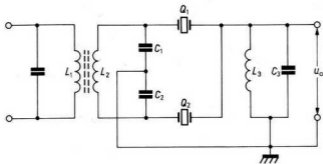


Bild 315

Eine Verbesserung der Durchlasskurve ergibt sich, wenn im Filter nach Bild 316 vier Quarze verwendet werden.

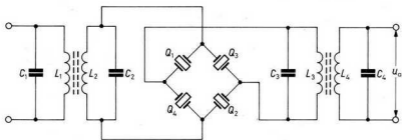


Bild 316

In der Literatur werden Filter mit zwei Quarzen als **Half-Lattice-Filter** und solche mit vier Quarzen als **Full-Lattice-Filter** bezeichnet. Quarzfilter sind in der Herstellung nicht allzu teuer. Sie sind deshalb oft in Geräten der mittleren Preisklasse anzutreffen.

bc. Die Seitenbandunterdrückung im mechanischen Filter

Noch steilere Flanken der Durchlasskurve werden mit dem **mechanischen Filter** erreicht. Im mechanischen Filter wird die mechanische Resonanz von Metallresonatoren ausgenutzt. Bild 317 zeigt den prinzipiellen Aufbau.

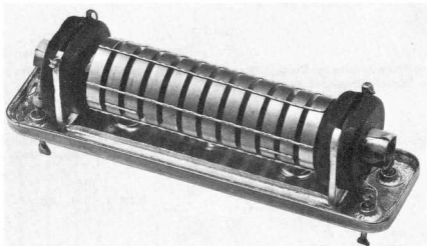
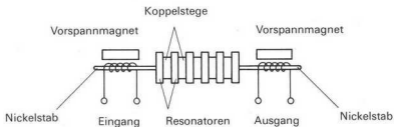


Bild 317

Die Resonatoren bestehen aus Metallkörpern, deren mechanische Resonanzfrequenz im Durchlassbereich der gewünschten Filterkurve liegen. Die einzelnen Resonatoren sind über Koppelstege miteinander mechanisch gekoppelt. Die Erregung des ersten Resonators erfolgt über einen Nickelstab. Dieser Nickelstab befindet sich im Magnetfeld der Eingangsspule. Ein Vorspannmagnet sorgt für eine feste magnetische Vorspannung. Wird die Eingangsspule vom Signalstrom

durchflossen, so baut sich in ihr ein magnetisches Wechselfeld auf, das sich im Takt der Signalfrequenz ändert. Dieses magnetische Wechselfeld bewirkt eine mechanische Längenänderung des Nickelstabes. Der Vorgang heisst **Magnetostriktion**. Magnetostriktion tritt bei den meisten in der Technik benutzten Eisensorten auf. Besonders ausgeprägt ist der Effekt bei Nickel, Nickellegierungen und Ferriten. Der Nickelstab regt somit den ersten Resonator im Rhythmus der Eingangsfrequenz an. Die in ihm erzeugte Schwingung wird über die Koppelstege auf die folgenden Resonatoren übertragen. Der Nickelstab, der mit dem letzten Resonator fest verbunden ist, schwingt mit diesem und erzeugt so in der Ausgangsspule ein magnetisches Wechselfeld. Dieses induziert in der Spule eine Wechselspannung, die als Ausgangsspannung ausgekoppelt wird. Da nur diejenigen Frequenzen die Resonatoren erregen können, die innerhalb des Durchlassbereiches der mechanischen Resonanzstellen der einzelnen Resonatoren liegen, werden nur Signale übertragen, die sich innerhalb der Filterkurve befinden. Die mit mechanischen Filtern erreichten Durchlasskurven zeichnen sich durch extreme Flankensteilheiten auf. Es sind damit Kreisgüten bis zu 5000 realisierbar. Mechanische Filter sind relativ teuer. Alle Spitzengeräte arbeiten jedoch wegen der hohen Filterqualität ausschliesslich mit mechanischen Filtern.

Prinzipieller Aufbau einseitenbandmodulierter Sender

ca. Einfacher quarzgesteuerter Einseitenbandsender

Bild 318 zeigt einen einfachen quarzgesteuerten einseitenbandmodulierten Sender für eine feste Frequenz.

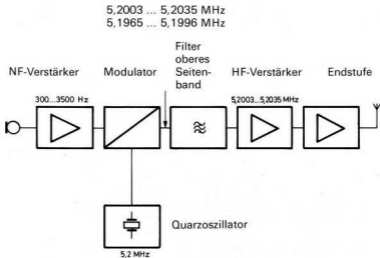


Bild 318

Einseitenbandmodulierte Sender verlangen eine lineare Verstärkung des Hochfrequenzsignals. Es dürfen keine Frequenzverdopplerstufen verwendet werden, da nichtlineare Verstärkung und Frequenzvervielfachung Modulationsverzerrungen verursachen, die das Signal unverständlich machen. Aus dem gleichen Grund darf die Endstufe nicht im C-Betrieb arbeiten. B-Betrieb im Eintaktbetrieb ist dagegen möglich, da nur der lineare Zusammenhang zwischen Strom und Spannung einer Halbwelle zählt.

Das Modulationssignal wird vom Mikrofon kommend im Niederfrequenzverstärker verstärkt. Dem Modulator wird das verstärkte Modulationssignal und das Oszillatorsignal zugeführt. Am Modulatorausgang treten nur noch die beiden Seitenbänder auf, der Träger wurde im Modulator unterdrückt. Das Filter ist auf das obere Seitenband abgestimmt; das untere Seitenband wird vom Filter nicht mehr durchgelassen, so dass am Filterausgang nur noch das obere Seitenband wirksam ist. Dieses wird linear verstärkt und der Senderendstufe, die meistens im B-Betrieb arbeitet, zugeführt.

Dieser einfache Sender arbeitet nur auf einer einzigen Sendefrequenz. Da das Filter für diese Frequenz ausgewählt wurde, ist ein Frequenzwechsel nicht möglich.

cb. Einseitenbandsender mit variabler Sendefrequenz

Bild 319 zeigt das Blockschaltbild eines Einseitenbandsenders für variable Sendefrequenzen.

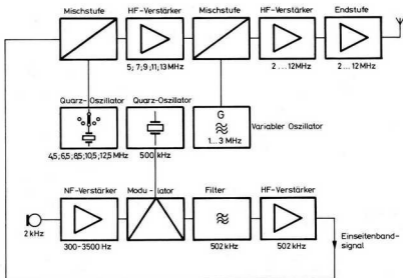


Bild 319

Im unteren Teil wird das Einseitenbandsignal aufbereitet. Wir wollen die Entstehung dieses Signals verfolgen. Zu diesem Zweck nehmen wir an, dass das Mikrofon von einer Schallquelle mit einer Frequenz von 2 kHz beschallt werde. Das Mikrofonsignal wird im Niederfrequenzverstärker verstärkt und dem Modulator zugeführt. Gleichzeitig wird der Modulator mit dem Signal des 500 kHz-Quarzoszillators gespeist. Der Träger wird im Modulator unterdrückt. Am Ausgang treten die beiden Seitenbänder 496 kHz und 402 kHz auf. Das Filter lässt nur das obere Seitenband passieren, das untere wird unterdrückt. Im folgenden Hochfrequenzverstärker wird das obere Seitenband verstärkt, so dass am Ausgang dieses Verstärkers das Einseitenbandsignal mit entsprechendem Spannungspegel auftritt. Dieses Einseitenbandsignal wird in der folgenden Mischstufe mit einem weiteren Quarzoszillatorsignal gemischt. Der Oszillator erzeugt fünf Quarzfrequenzen im Abstand von zwei Megahertz. Der nachfolgende Hochfrequenzverstärker wird mit dem Quarzoszillator gleichzeitig umgeschaltet und ist auf die fünf Summenfrequenzen der Mischstufe abgestimmt. In der nächsten Mischstufe werden diese Festfrequenzen mit der Frequenz des variablen Oszillators gemischt. Dieser variable Oszillator überstreicht einen Frequenzbereich von ein bis drei Megahertz. Am Ausgang der Mischstufe kann ein Signal abgenommen werden, dessen Frequenz je nach Stellung des Quarzoszillators und des variablen Oszillators zwischen zwei und zwölf Megahertz jeden beliebigen Wert annehmen kann. Der folgende Hochfrequenzverstärker ist abgestimmt. Seine Abstimmenelemente sind mit denjenigen des Quarzoszillators und des variablen Oszillators synchronisiert. Er erzeugt das zur Aussteuerung der Endstufe notwendige Signal. In der Endstufe wird die Senderleistung erzeugt und der Antenne zugeführt.

Wir sehen, dass der Aufbau eines Einseitenbandsenders für variable Sendefrequenzen viele Bausteine beansprucht. Besonders hohe Anforderungen werden an den variablen Oszillator gestellt, da seine Frequenz sehr stabil bleiben muss.

4. Das Wesentliche

Im Einseitenbandsender wird der Träger im Modulator unterdrückt. Als Modulatoren werden meistens Ring- oder Gegentaktmodulatoren verwendet.

Zur Seitenbandunterdrückung sind Filter mit sehr steilen Flanken erforderlich. Diese Bedingung wird nur von Quarzfiltern oder von mechanischen Filtern erfüllt. Das Quarzfilter arbeitet nach dem Prinzip der Brückenschaltung. Zwei Brückenarme werden durch Filterquarze gebildet, wobei die Serieresonanzfrequenz des einen Quarzes mit der Parallelresonanzfrequenz des anderen übereinstimmt. Die beiden anderen Brückenarme bestehen aus zwei gleich grossen Kondensatoren. Am Ausgang dieser Brücke kann nur ein Signal auftreten, dessen Frequenz innerhalb des Durchlassbereiches der Quarze liegt. Es gibt Quarzfilter, wo alle vier Brückenarme mit Quarzen bestückt sind. Diese Filter weisen eine noch bessere Durchlasskurve auf als Filter mit nur zwei Quarzen. Eine fast ideale Bandfilterkurve lässt sich mit mechanischen Filtern erreichen. Im mechanischen Filter werden Metallresonatoren über Nickelstäbe angeregt. Der Nickelstab befindet

sich im Magnetfeld der Erregerspule. Dank dem magnetostriktiven Effekt führt der Nickelstab im Takt der Erregerfrequenz Längenänderungen aus. Liegt die Erregerfrequenz innerhalb der Durchlassfrequenz der Metallresonatoren, so wird sie übertragen. Mechanische Filter erreichen sehr steile Flanken für die Durchlasskurve, wobei die Güte der Kreise ausserordentlich hoch liegt.

Ein Einseitenbandsender für nur eine feste Sendefrequenz lässt sich recht einfach aufbauen. Soll die Sendefrequenz jedoch variabel gehalten werden, dann steigt der Aufwand an. An die Oszillatoren sind sehr hohe Anforderungen in bezug auf die Frequenzkonstanz zu stellen. Im Einseitenbandsender müssen alle Signale linear verstärkt werden. Frequenzvervielfacherstufen und C-Verstärker dürfen deshalb nicht verwendet werden.

5. Repetitionsaufgaben (Lösung Seite 497)

- a) Wieviel Prozent der abgestrahlten Leistung eines mit einem Sinuston hundertprozentig modulierten SSB-AM-Senders fällt auf den Träger?
- b) Wo erfolgt im Einseitenbandsender die Trägerunterdrückung?
- c) Was für Modulatoren werden in der Regel für die Trägerunterdrückung verwendet?
- d) Wo erfolgt im Einseitenbandsender die Seitenbandunterdrückung?
- e) Auf welcher Grundschialtung basiert das Quarzfilter?
- f) Nach welchen Kriterien werden die Quarze für das Quarzfilter ausgewählt?
- g) Was ist Magnetostriktion?
- h) Wie wird der Effekt der Magnetostriktion im mechanischen Filter ausgenutzt?
- i) Warum darf die Senderendstufe eines Einseitenbandsenders nicht im C-Betrieb arbeiten?
- k) Warum sind im Einseitenbandsender keine Frequenzvervielfacherstufen anzutreffen?
- l) Warum müssen die Oszillatoren eines Einseitenbandsenders frequenzstabil sein?
- m) Was für ein Signal wird beim unmodulierten Einseitenbandsender abgestrahlt?

IV. Wellenausbreitung

I. Einführung

Das Zustandekommen einer Funkverbindung sowie die Qualität der Übertragung sind von der richtigen Wahl der Sendefrequenz und der Antennenform abhängig. Wir unterscheiden grob zwischen Bodenwellenverbindungen und Raumwellenverbindungen. Die Bodenwellenverbindung spielt beim Einsatz von tragbaren Kleinfunkgeräten geringer Reichweiten, beim UKW-Rundfunknetz und bei Mittel- und Langwellenrundfunksendungen eine Rolle. Interkontinentale Verbindungen und Reichweiten von einigen hundert Kilometern sind jedoch nur mit der Raumwelle möglich. Der Mechanismus der Raumwellenausbreitung und die Faktoren, die diese Ausbreitung ermöglichen und beeinflussen, sind bekannt. Sie lassen sich mit grosser Treffsicherheit voraussagen. Man kennt deshalb für Raumwellenverbindungen eine Frequenzprognose ähnlich der Wettervorhersage, mit dem Unterschied, dass die Frequenzprognose sehr viel zuverlässiger ist.

Die Raumwellenverbindungen werden von drei Faktoren beeinflusst: Die verschiedenen Sonnenaktivitäten auf der Sonne haben einen direkten Einfluss auf den Funkverkehr, der Sonnenstand und dadurch bedingt die Jahres- und Tageszeiten bestimmen ebenfalls die Frequenzbereiche, die sich für eine Raumwellenverbindung eignen. Die Frequenzprognose für die wichtigsten Strecken im interkontinentalen Funkverkehr wird in Form von Tabellen oder Kurven erstellt. Die Daten werden durch Computer viele Wochen zum voraus errechnet. Armeefunkgeräte arbeiten oft mit Raumwellen, wenn sich zwischen den beiden Standorten der Stationen ein Hindernis, zum Beispiel ein Berg, befindet, das eine Bodenwellenverbindung unmöglich macht. Für diese Kurzstreckenraumwellenverbindungen werden spezielle Frequenzprognosen in Kurvenform erstellt, die jeweils einen Monat gültig sind.

Der Raumwellenempfang wird oft durch eine unangenehme Begleiterscheinung gestört. Es handelt sich dabei um den Fading oder Schwund. Er hat seine Ursache im Mehrfachempfang, der dann auftritt, wenn das Signal den Empfänger auf zwei verschiedenen langen Ausbreitungswegen erreicht. Am Empfangsort entstehen dabei Phasendifferenzen, die im ungünstigsten Fall bis zur Auslöschung des empfangenen Signales führen können.

2. Was wissen Sie schon über Wellenausbreitung? (Lösung Seite 498)

- In welchem Frequenzbereich werden die Funksignale in der Ionosphäre reflektiert?
- Was ist eine Bodenwelle?
- Was ist eine Raumwelle?
- Wo befindet sich die Heaviside-Schicht?
- Handelt es sich dabei um eine einzelne Schicht, oder sind an der Reflexion mehrere Schichten beteiligt?

- f) Welches ist die Ursache der Ionisation der Schichten in der Ionosphäre?
- g) Weshalb üben die Sonnenflecken einen Einfluss auf die Ionosphäre aus?
- h) Warum spielen die Tageszeiten eine Rolle für die Wahl der Frequenz einer Raumwelenverbindung?

3. Die Wellenausbreitung

a. Ionosphäre

Die Ionosphäre ermöglicht den interkontinentalen Funkverkehr, da sie Signale in bestimmten Frequenzbereichen reflektiert. Als Ionosphäre bezeichnet man eine Folge von hochgelegenen Schichten der Atmosphäre, in denen die Moleküle durch die Ultraviolettstrahlung der Sonne stark ionisiert sind.

Wir erinnern uns an den Begriff der Ionisation. Wenn einem Atom oder Molekül unter Aufwendung von Energie ein Elektron abgetrennt wird, wird das Atom oder Molekül zum Ion. Ein Ion ist ein elektrisch geladenes Teilchen; wenn ihm ein Elektron fehlt, ist seine Ladung positiv. Positive Ionen heissen Kationen. Fängt ein Kation ein Elektron ein, so gleichen sich die Ladungen aus, das Teilchen verhält sich wieder neutral. Der Vorgang heisst Rekombination. Die Ionisierung eines Gases kann auf verschiedene Arten zustandekommen: Durch Strahlung und durch Stossionisation. Ionisation durch Strahlung findet nur dann statt, wenn die Strahlung sehr energiereich ist. Die Energie einer Strahlung wächst mit steigender Frequenz; Ultraviolettstrahlung ist deshalb energiereicher als Strahlung im Bereich des sichtbaren Lichtes. Eine Tatsache, die jedem bewusst wird, der einmal unter einem Sonnenbrand litt. Die Energie der Ultraviolettstrahlung der Sonne reicht nun aus, um die höchsten Schichten der Atmosphäre zu ionisieren. Neben der Ultraviolettstrahlung trägt auch noch die **Korpuskularstrahlung** der Sonne zur Ionisierung der Ionosphäre bei.

Im Gegensatz zum Licht besteht die Korpuskularstrahlung aus Elementarteilchen und Atomkernen. Die Sonne sendet vor allem **Elektronen, Protonen und Alpha-Teilchen** aus. Alpha-Teilchen sind Heliumkerne.

Die Ionisation ist nur in sehr hohen Schichten von Dauer, da in tieferen Schichten der Atmosphäre die Dichte des Gases so gross ist, dass Ionen sofort wieder rekombinieren. Die Ionosphäre reicht von etwa 60 km in eine Höhe von über 400 km. Der Zustand der Ionosphäre ist weitgehend durch die Sonnenstrahlung bestimmt. Leider wird sie auch noch durch das Erdmagnetfeld beeinflusst, was bei Störungen zur Beeinträchtigung des Funkverkehrs führen kann. Sobald die freien Elektronen in der Ionosphäre eine gewisse Dichte aufweisen, werden Funksignale reflektiert. Je kürzer die Wellenlänge des zu reflektierenden Signals gewählt wird, desto grösser muss die Elektronendichte in der Ionosphäre sein. Die Ionosphäre zerfällt in verschiedene Schichten. Die Intensität dieser Schichten hängt von der Sonnenstrahlung ab. Ein über den ganzen Erdball verteiltes System von Echolotstationen überwacht dauernd den Zustand dieser Schichten und schafft somit die Unterlagen für eine zuverlässige Frequenzplanung. Bild 320 zeigt schematisch die Aufteilung der Ionosphäre in vier Schichten.

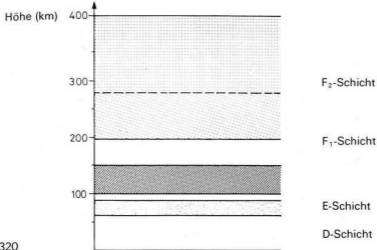


Bild 320

In Bild 321 erkennen wir die Abhängigkeit der Elektronendichte von der Höhe der Schicht. Das Dichtemaximum liegt bei etwa 300 km. Der Grund für diese Verteilung ist leicht einzusehen; wenn man bedenkt, dass in den tieferen Schichten infolge der grösseren Dichte der Atmosphäre die Ionen rasch rekombinieren und dass in den höchsten Schichten das Gas so dünn wird, dass einfach weniger Atome und Moleküle ionisiert werden.

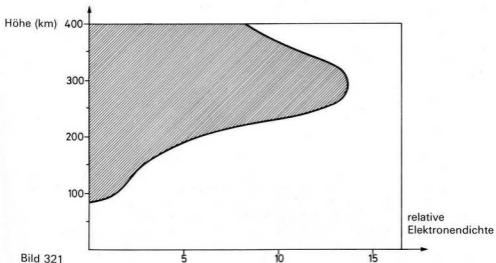


Bild 321

b. Das Verhalten der Schichten der Ionosphäre

ba. Die D-Schicht

Die D-Schicht absorbiert langwellige Signale und schwächt beim Durchgang kurzwellige Signale.

Der Mechanismus der Absorption und der Dämpfung lässt sich anhand eines Modells vereinfacht darstellen. Die elektromagnetische Welle regt die Elektronen der Schicht zum Schwingen an. Da das Gas im Bereich der D-Schicht dicht ist, prallen die schwingenden Elektronen häufig mit Luftteilchen zusammen. Durch den Zusammenstoss wird der elektromagnetischen Welle Energie entzogen. Je langsamer nun ein Elektron schwingt, desto grösser ist die Wahrscheinlichkeit eines Zusammenstosses. Aus diesem Grund werden die langwelligeren Signale absorbiert. Die D-Schicht wirkt für diese Frequenzen wie ein Schwamm.

bb. Die E-Schicht

Die E-Schicht reflektiert längere Kurzwellen.

Auch der Mechanismus der Reflexion lässt sich mit Hilfe eines Modells darstellen. Die Elektronen der Schicht werden wiederum durch die elektromagnetische Welle angeregt und schwingen. Damit diese Elektronen zu schwingen beginnen, müssen sie der Welle Energie entziehen. Schwingende Elektronen erzeugen ihrerseits wiederum eine elektromagnetische Strahlung. Diese Strahlung heisst Sekundärwelle. Die Sekundärwelle schwingt zur Erregerwelle mit einer gewissen Phasenverschiebung und strahlt zur Erdoberfläche zurück. Die Reflexion gehorcht den optischen Gesetzen. Der Brechungsindex ist dabei von der Elektronendichte und der Frequenz der Welle abhängig. Im Gegensatz zum Licht erfolgt die Brechung der Welle weich, der Übergang ist fließend. Die Reflexion ist zudem vom Einfallswinkel der Strahlung abhängig. Je flacher die Schicht angestrahlt wird, desto besser ist die Reflexion. Das bedeutet, dass ein Signal mit einer bestimmten Frequenz bei senkrechter Anstrahlung der Schicht nicht mehr reflektiert wird, bei flacher Anstrahlung jedoch noch eine Reflexion erfährt. Man spricht in diesem Zusammenhang vom **MUF-Faktor**. Der MUF-Faktor sagt aus, um wieviel eine Frequenz bei einem bestimmten Anstrahlwinkel höher sein darf als die Frequenz, welche bei senkrechter Anstrahlung gerade noch reflektiert wird, um noch eine Reflexion zu erfahren. Diejenige Frequenz, die bei senkrechter Anstrahlung der Ionosphäre gerade noch reflektiert wird, heisst **Grenzfrequenz** oder **MUF**. MUF bedeutet **Maximum Usable Frequency**, das heisst höchste noch brauchbare Frequenz. Ist beispielsweise die MUF oder Grenzfrequenz für eine bestimmte Tageszeit 9 MHz und wird bei flacherer Anstrahlung für den verwendeten Anstrahlwinkel ein MUF-Faktor von 1,8 angegeben, dann wird für diese Anstrahlung ein Signal mit der Frequenz von $1,8 \text{ mal } 9 \text{ MHz} = 16,2 \text{ MHz}$ gerade noch reflektiert.

bc. Die F1-Schicht

Die F1-Schicht reflektiert Kurzwellen.

Der Mechanismus der Reflexion ist derselbe wie bei der E-Schicht. An der F1-Schicht werden Frequenzen reflektiert, die die E-Schicht durchdrungen haben.

bd. Die F2-Schicht

Die F2-Schicht ist die wichtigste Schicht für die Reflexion von Kurzwellen. Über sie spielt sich der grösste Teil des interkontinentalen Funkverkehrs ab. Der Mechanismus der Reflexion ist derselbe wie bei der E- und F1-Schicht. Bild 322 zeigt die Bedeutung des MUF-Faktors. Ein Strahl, dessen Frequenz oberhalb der MUF liegt, durchstösst die F2-Schicht und wird in das Weltall abgestrahlt, wenn er senkrecht abgestrahlt wird. Der gleiche Strahl wird jedoch reflektiert, wenn er die F2-Schicht flacher anstrahlt.

Strahl, dessen Frequenz oberhalb der Grenzfrequenz der F₂-Schicht liegt, durchstösst diese bei senkrechter Anstrahlung

Der gleiche Strahl wird reflektiert, wenn die Anstrahlung der F₂-Schicht flacher erfolgt.

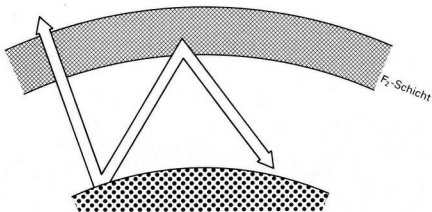


Bild 322

nicht mit gleicher Phasenlage ein. Je nach Phasenlage addieren oder subtrahieren sich die beiden Signale. Wäre die Übertragung stabil, so würde deshalb noch kein Schwund auftreten, da die resultierende Empfangsfeldstärke konstant bliebe. Die Ionosphäre ist jedoch dauernd in Bewegung begriffen, so dass sich der Übertragungsweg der Raumwelle dauernd ändert, was seinerseits die Phasenlage am Empfangsort beeinflusst. Die dadurch entstehende schwankende Empfängerfeldstärke verursacht den Schwund.

Bei Kurzwellenübertragungen tritt der beschriebene Fall selten auf, da die Bodenwelle bei einer Kurzwellenemission nicht sehr weit reicht und Kurzwellen meistens zur Überbrückung grosser Distanzen verwendet werden. Da jedoch die Reflexion in der Ionosphäre nicht sehr scharf erfolgt und sich zudem der Zustand der Schichten dauernd ändert, entstehen Phasendifferenzen, die sich als Interferenzschwund auswirken. Oft kommt es auch vor, dass Signale mehrmals reflektiert werden. Das Signal wird von der Ionosphäre reflektiert, gelangt zur Erde und wird von dieser wiederum zur Ionosphäre zurückgeworfen. Es kommt oft vor, dass Wellen über mehrere solche Sprünge den Empfänger erreichen. Wenn nun am Empfänger ein Signal eintrifft, das beispielsweise nur einmal reflektiert wurde, das gleiche Signal aber über eine doppelte Reflexion ebenfalls zum Empfänger gelangt, dann bewirkt dies wiederum einen Schwund dank der ungleichen, sich dauernd ändernden Phasenlagen der beiden Signale.

Der *Selektivschwund* hat eine andere Ursache und Auswirkung. Er äussert sich in einer starken Verstümmelung der Modulation. Selektivschwund tritt auf, wenn innerhalb des zu übertragenden Spektrums einer Sendung nicht alle Frequenzen gleich gut reflektiert werden. Es kann vorkommen, dass zum Beispiel nur ein Seitenband störungsfrei übertragen wird, was bei amplitudenmodulierten Sendungen zu starken Modulationsverzerrungen führen kann. Aus diesem Grund sind Einseitenbandübertragungen günstiger, da sich der Selektivschwund bedeutend weniger störend auswirken kann.

Der *Grenzfrequenzschwund* tritt auf, wenn eine Übertragung an der Grenze der MUF erfolgt.

Der *Absorptionsschwund* wird durch das wechselnde Absorptionsverhalten der D-Schicht hervorgerufen.

d. Wechsel im Verhalten der Ionosphäre

da. Ursachen

Wir haben gesehen, dass die Ionisation der Ionosphäre von der Sonne herrührt. Demzufolge hat der Sonnenstand einen Einfluss auf den Zustand der Ionosphäre. Die Ionisation ist deshalb von der Jahreszeit und von der Tageszeit abhängig. Die Sonnenaktivität, die die Ionosphäre beeinflusst, ist einem Zyklus von ungefähr 11 Jahren (genauer: 9 bis 14) unterworfen. Dieser elfjährige **Sonnenfleckenzyklus** bestimmt den Grad der Ionisation der reflektierenden Schichten. Beobachtungen haben ergeben, dass ungefähr alle elf Jahre auf der Sonne ein Maximum von Sonnenflecken sichtbar werden. Das Sonnenfleckenmaximum fällt mit der grössten Aktivität der Sonne zusammen. Die Zusammenhänge zwischen

Sonnenfleckenmaximum und grösster Sonnenaktivität sind noch nicht restlos geklärt. Grösste Sonnenaktivität bedeutet intensivste Strahlung und somit stärkste Ionisation der Ionosphäre. Sonnenstand und Aktivität der Sonne sind vorausberechenbar, wobei sich der Sonnenstand für jeden Punkt und für jede Zeit auf der Erde genau bestimmen lässt, dagegen ist die Vorhersage der Sonnenflecktätigkeit schwieriger. Aufgrund langjähriger Beobachtungen lässt sich jedoch die Sonnenaktivität ziemlich präzise voraussagen. Was sich jedoch nicht voraussagen lässt, das sind die sporadischen Störungen der Ionosphäre und die Störungen des Erdmagnetfeldes. Eine Prognose wird deshalb nie hundertprozentig treffsicher sein.

Es sei noch erwähnt, dass man bis heute die Sonnenflecken allein als Ursache für die Störungen des Funkverkehrs angesehen hatte. Neuere Forschungen haben jedoch diese Annahme widerlegt und die wahren Ursachen in den verschiedenen «Sonnenaktivitäten» erkannt. Mit «Sonnenaktivität» sind, ohne näher auf die Begriffe einzugehen, Protuberanzen, Filamente, Fackeln und die chromosphärischen Eruptionen gemeint. Von den Aktivitätsgebieten entstehen im wesentlichen 3 Arten von Strahlungen, welche nachstehend ohne nähere Erläuterungen aufgeführt sind: Elektromagnetische Strahlung, Korpuskulare kosmische Strahlung, Magnetische Sturmpartikel (verantwortlich für das Nord- und Südlicht). Im weitern wollen wir jedoch die Begriffe wie Sonnenflecktätigkeit, Sonnenfleckennmaximum usw. beibehalten.

db. Verlauf der E-Schicht

Die E-Schicht ist die regelmässigste der reflektierenden Schichten. Bild 324 zeigt den Verlauf der Grenzfrequenz in Funktion der Tageszeit.

Verlauf der Grenzfrequenz der E-Schicht

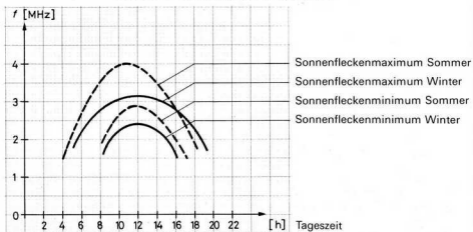


Bild 324

Die Kurve erreicht um die Mittagszeit den Höchstwert. Wir erkennen, dass die Grenzfrequenz im Sommer höher liegt als im Winter und dass ein Sonnenfleckenmaximum ebenfalls eine höhere Grenzfrequenz verursacht. Das Diagramm zeigt, dass beispielsweise in einem Jahr mit maximaler Sonnenfleckenaktivität im Sommer um die Mittagszeit Frequenzen bis 4 MHz an der E-Schicht reflektiert werden. Höhere Frequenzen durchstossen diese und werden von den darüberliegenden F-Schichten reflektiert.

dc. Die F2-Schicht

Die F2-Schicht ist die unregelmässigste Schicht. Sie ist zugleich für den interkontinentalen Funkverkehr die wichtigste Schicht, da sie im Gegensatz zur E- und D-Schicht, die sich nach Sonnenuntergang infolge von Rekombination auflösen, auch nachts vorhanden ist. Die Luftschicht ist in der Höhe der F2-Schicht so gering, dass die Rekombination zu schwach ist, um die Schicht bei fehlender Sonneneinstrahlung ganz aufzulösen. Bild 325 zeigt den Verlauf der Grenzfrequenzen der F2-Schicht in Abhängigkeit der Tageszeiten.

- Kurve 1 F_2 Grenzfrequenz Juli 1969
 Sonnenfleckenrelativzahl $R = 97$
 Kurve 2 F_2 Grenzfrequenz Dezember 1969
 Sonnenfleckenrelativzahl $R = 100$

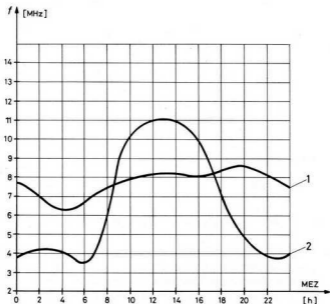


Bild 325

Im Sommer verläuft die Kurve bedeutend flacher als im Winter, wo das Tagesmaximum sehr ausgeprägt ist. Beide Kurven wurden bei ungefähr gleicher Sonnenaktivität gemessen. Den Begriff der Sonnenfleckenrelativzahl werden wir später kennenlernen, er ist ein Mass für die Sonnenaktivität. Je grösser die Sonnenfleckenrelativzahl, desto intensiver ist die Sonnenaktivität.

dd. Die F1-Schicht

Die F1-Schicht ist nur tagsüber und nur im Sommer wirksam. Nach Sonnenuntergang vereinigt sie sich wieder mit der F2-Schicht. Die Grenzfrequenzen der F1-Schicht verlaufen gleich wie diejenigen der E-Schicht, sind aber um etwa 50 Prozent höher. Sie ist demzufolge für die langwelligen Kurzwellenbänder für Tagesverbindungen interessant. An Bedeutung gewinnt sie bei Störungen der F2-Schicht, da sie davon nicht betroffen wird und somit Verbindungen im Bereich ihrer Grenzfrequenzen möglich sind.

de. Die D-Schicht

Die D-Schicht besteht nur am Tag. Ihre Grenzfrequenzen sind infolge der Absorption nicht messbar. Sie ist wichtig wegen der dämpfenden Wirkung auf tiefe Frequenzen.

df. Die sporadische E-Schicht E_s

Die sporadische E-Schicht tritt in Form von stark ionisierten « Wolken » auf. Diese messen meistens einige hundert Kilometer im Durchmesser. Ihr Auftreten ist an keine Gesetzmässigkeit gebunden. Sie sind am Tag wie in der Nacht feststellbar. Sie erscheinen besonders im Sommer. Die Grenzfrequenzen sind sehr hoch, sie erreichen Werte bis zu 20 MHz. Die Intensität kann so gross werden, dass andere Schichten durch diese sporadische Schicht abgedeckt werden. Die Ursachen dieser Schichten sind noch nicht geklärt. Man vermutet, dass es sich dabei um eine Einströmung von Meteorstaub oder um ein Abtreiben von anderen Schichten von der beleuchteten Seite der Erdkugel durch das Erdmagnetfeld handelt.

e. Einfluss und Störungen durch die Sonnenaktivität

ea. Die Sonnenfleckenrelativzahl

Wir haben gesehen, dass die Sonne die Quelle der elektromagnetischen Strahlung ist. Die Ultraviolett- und Röntgenstrahlung stammt aus der höheren Sonnenatmosphäre, der sogenannten Corona. Wir wissen auch, dass zwischen der Sonnenfleckenhäufigkeit und der Intensität der ionisierenden Strahlung ein Zusammenhang besteht. Als Mass für die Sonnenaktivität hat sich deshalb die

Sonnenfleckenrelativzahl R eingebürgert. Da die Sonnenflecken in Gruppen auftreten, werden die Gruppenzahl und die Anzahl der beobachteten Sonnenflecken zur Sonnenfleckenrelativzahl zusammengefasst.

$R = K (f + 10 g)$

R = Sonnenfleckenrelativzahl

K = Korrekturfaktor zur Berücksichtigung des Beobachtungsstandortes und des Beobachtungsinstrumentes

f = Anzahl Sonnenflecken

g = Anzahl Fleckengruppen

Die Sonnenfleckenrelativzahl ermöglicht somit eine Aussage über die Sonnenaktivität.

eb. Störungen durch «Sonnenflecken»

Lokale chromosphärische Eruptionen auf der Sonne, welche in der Nähe der Sonnenflecken auftreten, erhöhen die ionisierende Strahlung erheblich. Diese wird so stark, dass die D-Schicht stark ionisiert wird, was eine Absorption der Kurzwellen zur Folge hat. Dadurch bricht der Funkverkehr total zusammen (Mögel-Dellinger-Effekt). Der Zusammenbruch dauert Minuten bis etwa zwei Stunden, je nach der Intensität der Sonneneruption.

ec. Korpuskularstörungen

Die Sonne wirkt nicht nur durch Strahlung auf die Ionosphäre ein, sie sendet auch Korpuskel aus. Diese bestehen meistens aus Wasserstoffionen und Elektronen. Dieser sogenannte Sonnenwind erzeugt Ionosphärenstörungen und magnetische «Stürme», wodurch Funkverbindungen empfindlich gestört werden können. Diese Störungen sind unabhängig von den Sonnenflecken und treten sporadisch auf.

f. Die Ausbreitungsprognose

Die Ausbreitungsprognose soll zuverlässige Angaben liefern, die es erlauben, für eine bestimmte Strecke und eine bestimmte Tageszeit die optimale Arbeitsfrequenz zu bestimmen. Das bedingt, dass sich der Zustand der Ionosphäre vorausberechnen lässt. Als Basis für diese Berechnungen dient die Sonnenfleckenrelativzahl und der Sonnenstand.

Der Sonnenstand kann genau berechnet werden, während sich die Sonnenfleckenrelativzahl aufgrund gemachter Beobachtungen relativ genau vorausberechnen lässt. Alle auftretenden Störungen lassen sich nicht voraussagen, sie bringen eine gewisse Unsicherheit in die Frequenzprognose.

Bild 326 zeigt die Frequenzprognose für den Monat September 1969, gültig für Verbindungen über kurze Distanzen innerhalb unserer Landesgrenzen.

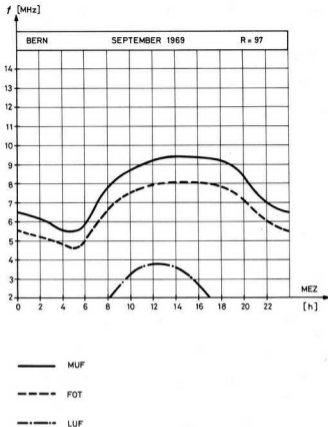


Bild 326

Die Daten basieren auf einer vorhergesagten Sonnenfleckenrelativzahl R von 97. Schwarz ausgezogen ist die Grenzfrequenz MUF. Gestrichelt ist die **FOT** dargestellt. FOT bedeutet «Fréquence Optimum de Travail». Es ist dies die günstigste Arbeitsfrequenz. Ihre Werte liegen bei 85 % der MUF, das bedeutet, dass sie während 90 % der Zeit des Monats erreicht oder überschritten wird. Es handelt sich somit lediglich um einen Sicherheitswert, der einen gewissen Abstand (15 %) von der MUF einhält. Arbeitet man nämlich exakt mit der MUF, so geht man das Risiko ein, dass eine Verbindung nicht zustande kommt, da die Werte nicht sicher zu allen Zeiten erreicht werden. Der Verlauf der MUF wird, wie wir wissen, durch die F2-Schicht bestimmt. Wie zu erwarten war, ist die F2-Schicht um die Mittagszeit am stärksten ionisiert, die Grenzfrequenz ist am höchsten.

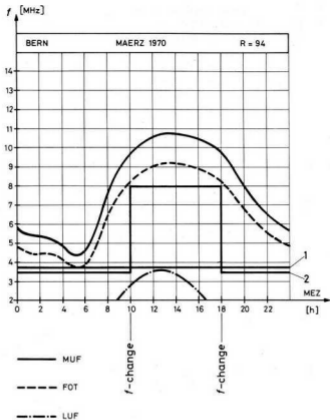


Bild 327

Die strichpunktierte Kurve zeigt den Einfluss der Absorption der D-Schicht. Frequenzen unterhalb dieser LUF-Kurve werden absorbiert.

Der Kurvenverlauf zeigt sehr gut die Abhängigkeit der LUF vom Sonnenstand; die Ionisation der D-Schicht ist am Mittag am grössten. Die LUF deckt auch die Problematik von Funkverbindungen im unteren Kurzwellenband auf, diese sind über die Mittagszeit einfach nicht möglich.

Die Handhabung der Frequenzprognosenblätter ist sehr einfach. Die Arbeitsfrequenz muss zwischen der FOT und der LUF gewählt werden, dann ist eine Verbindung mit grösster Wahrscheinlichkeit möglich. Die besten Ergebnisse werden erzielt, wenn die Arbeitsfrequenz möglichst nahe an der FOT liegt. Wählt man beispielsweise die Arbeitsfrequenz zu 4,5 MHz, dann ist ein 24-Stunden-Betrieb möglich, ohne dass die Frequenz gewechselt werden muss.

Bild 327 zeigt die Frequenzprognose für den März 1969. Obschon die Sonnenfleckenrelativzahl eher etwas tiefer liegt als bei der Septemberprognose, liegt die MUF am Mittag höher als im September. Auch ist der Rückgang der Grenzfrequenz am Morgen und zu den Nachtstunden ausgeprägter als im September. Wir haben die gleiche Tendenz bereits in Bild 325 kennen gelernt. Der flachere Verlauf der MUF in den Sommermonaten ist auf die kürzeren Nächte zurückzuführen. Im Sommer kann sich die F2-Schicht während der Nacht weniger abbauen als in den langen Winternächten, wo die Sonneneinwirkung fehlt. In Bild 327 sind zwei Beispiele für die Frequenzwahl eingezeichnet. *Kurve 1* zeigt die Wahl einer Arbeitsfrequenz, die über 24 Stunden beibehalten werden kann. Der Nachteil liegt in der ungünstigen Frequenzlage während des Tages, weil die besten Empfangsergebnisse mit Frequenzen erzielt werden, die möglichst nahe bei der FOT liegen. *Kurve 2* zeigt ein Beispiel, wo man mit zwei Frequenzen auskommt, mit einer Tages- und einer Nachtfrequenz, wobei der Frequenzwechsel um 1000 und um 1800 vorgenommen wird. Die Beispiele liessen sich beliebig erweitern, indem man die Frequenzwahl immer feiner der FOT anpasst und beispielsweise alle 2 Stunden die Frequenz wechseln würde. In der Praxis begnügt man sich in der Regel mit der Wahl einer Tages- und einer Nachtfrequenz, da ein allzu häufiger Frequenzwechsel den Betrieb beeinträchtigt.

4. Das Wesentliche

Die Ionosphäre wird durch die Ultraviolettstrahlung der Sonne und durch Korpuskularstrahlung ionisiert. Im ionisierten Zustand reflektiert die Ionosphäre Radiowellen in einem bestimmten Frequenzbereich.

Die Ionosphäre zerfällt in verschiedene Schichten:

Die **D-Schicht** ist die unterste Schicht. Sie ist nur am Tag wirksam und wirkt absorbierend auf Signale mit Frequenzen unter einigen Megahertz. Signale mit höheren Frequenzen durchstossen die D-Schicht und werden von dieser lediglich gedämpft.

Die **E-Schicht** liegt über der D-Schicht. Sie reflektiert die längeren Kurzwellen. Sie ist nur am Tag wirksam. Ihre Intensität ist vom Sonnenstand abhängig und erreicht ihren höchsten Wert um die Mittagszeit.

Die **F1-Schicht** ist nur tagsüber und nur im Sommer wirksam. Sie zeigt ein ähnliches Verhalten wie die E-Schicht, ihre Grenzfrequenzen liegen jedoch etwa 50 Prozent höher.

Die **F2-Schicht** ist die wichtigste Schicht. Dank ihrem Verhalten ist ein interkontinentaler Funkverkehr über 24 Stunden möglich, da sie auch nachts wirksam ist. Sie ist die unregelmässigste Schicht. Die Grenzfrequenzen sind ausgeprägt von der Sonnenaktivität und vom Sonnenstand abhängig.

Die **sporadische E-Schicht** tritt sporadisch in Form von grossflächigen ionisierten Wolken auf. Ihr Auftreten ist an keine erkennbaren Gesetzmässigkeiten gebunden. Ihre Grenzfrequenzen erreichen Werte bis zu 20 MHz. Sie kann so intensiv auftreten, dass andere Schichten abgedeckt werden.

Der Zustand der ionisierten Schichten ist abhängig vom Sonnenstand und von der Sonnenaktivität. Die Aktivität der Sonne schwankt in einem elfjährigen Rhythmus – dem Sonnenfleckenzyklus –, womit auch die Ionosphäre diesem Rhythmus unterworfen wird. Aus dem berechenbaren Sonnenstand und der prognostizierten Sonnenfleckenrelativzahl lässt sich der Zustand der Ionosphäre voraussagen. Die aus dieser Voraussage abgeleiteten Frequenzprognosen erlauben die Wahl der günstigsten Frequenz für eine bestimmte Funkverbindung. Die in Kurvenform herausgegebenen Frequenzprognosen enthalten meistens drei Kurven:

- Die MUF-Kurve gibt die höchste für eine Funkverbindung mögliche Frequenz an.
 - Die FOT-Kurve liegt 15 % unter der MUF-Kurve. Sie gibt die günstigste Arbeitsfrequenz an, da sie mit einer Wahrscheinlichkeit von 90 % eingehalten wird.
 - Die LUF-Kurve kennzeichnet die tiefste verwendbare Frequenz.
- Um eine Verbindung mit grosser Wahrscheinlichkeit garantieren zu können, muss die Arbeitsfrequenz zwischen der FOT- und der LUF-Kurve liegen.

5. Repetitionsaufgaben (Lösung Seite 499)

- a) Was verstehen Sie unter dem Begriff «Ionisation»?
- b) Was ist eine Korpuskalustrahlung?
- c) Warum liegt das Dichtemaximum der Elektronen in der Ionosphäre in etwa 300 km Höhe?
- d) Welches ist die primäre Eigenschaft der D-Schicht?
- e) Ist die D-Schicht auch nachts wirksam?
- f) Welche Signale werden an der E-Schicht reflektiert?
- g) Zu welchen Zeiten ist die E-Schicht wirksam?
- h) Welches ist die wichtigste Schicht für den interkontinentalen Funkverkehr?
- i) Welche Signale werden an der F1-Schicht reflektiert?
- k) Warum ist die F2-Schicht auch nachts vorhanden?
- l) Was verstehen Sie unter dem Ausdruck «sporadische E-Schicht»?
- m) Welches sind die Ursachen des Interferenzschwundes?
- n) Wie wirkt sich der Selektivschwund auf die Übertragung aus?
- o) Welche Modulationsart ist am unempfindlichsten gegenüber dem Selektivschwund?
- p) Was wird durch die Sonnenfleckenrelativzahl ausgedrückt?
- q) Durch welche Einflüsse kann eine Raumwellenverbindung gestört werden?
- r) Welches ist die Bedeutung der MUF-Frequenz?
- s) Wie ist die FOT-Kurve entstanden?
- t) Was geschieht, wenn die Arbeitsfrequenz unter der LUF-Kurve gewählt wird?
- u) Wie soll die Arbeitsfrequenz aufgrund der Frequenzprognosenblätter gewählt werden?
- v) Welche Frequenz ergibt die sicherste und qualitativ beste Verbindung?

V. Antennen

1. Einführung

Wir kennen eine Vielzahl von Antennen. Je nach Verwendungszweck unterscheiden wir zwischen Sendeantennen und Empfangsantennen. Empfangsantennen dienen zum Empfang elektromagnetischer Wellen. Sendeantennen dagegen strahlen die in einem Sender erzeugte Hochfrequenzenergie ab. Jede Empfangsantenne lässt sich – wenn auch für gewisse Antennenformen nur beschränkt – als Sendeantenne verwenden und umgekehrt. Schon ein frei aufgehängtes Stück Draht wirkt als Antenne. Diese Art von Antenne ist als Rundfunkempfangsantenne oft anzutreffen, obschon ihre Empfangseigenschaften recht mangelhaft sind. Soll die Qualität einer Empfangsantenne gesteigert werden, so ist diese auf die Wellenlänge des zu empfangenden Signals abzustimmen. Antennen für UKW-Rundfunk- und Fernsehempfang sind typische Vertreter dieser Gattung. Ihre geometrischen Abmessungen stehen in einem bestimmten Verhältnis zur Wellenlänge des Empfangssignales. Diese Sorte von Antennen weist zudem eine ausgeprägte Richtwirkung auf; sie müssen auf den zu empfangenden Sender ausgerichtet sein. Sendeantennen sollen möglichst günstige Abstrahlungseigenschaften aufweisen. Diese Bedingung kann nur durch Abstimmung der Antenne auf die Sendefrequenz erreicht werden. Für Sender mit festen Frequenzen werden meistens die geometrischen Abmessungen der Antenne der Betriebswellenlänge des Senders angepasst. Sendeantennen weisen je nach Verwendungszweck verschiedene Formen auf. Im einfachsten Fall besteht eine Sendeantenne aus einem senkrechten Strahler in Form eines Mastes oder aus einem horizontal aufgehängten Draht. Sendeantennen, die nur in eine bestimmte Richtung strahlen sollen, erfordern in der Regel nicht nur einen Strahler, es sind zur Erzielung der Richtwirkung reflektierende Elemente notwendig. Richtantennen sind oft recht grossräumige Gebilde. In tragbaren Empfangsgeräten wird oft eine Ferritantenne verwendet. Diese ermöglichen dank ihrer ausgeprägten Richtwirkung eine Peilung des Senders. Für genaue Peilungen werden Rahmenantennen eingesetzt, da deren Richtempfindlichkeit sehr scharf ist. In neuerer Zeit trat eine spezifische Empfangsantenne – die aktive Antenne – in Erscheinung. Es handelt sich dabei um eine Empfangsantenne von sehr kleinen Ausmassen, der ein Breitbandverstärker integriert wurde.

2. Was wissen Sie schon über Antennen? (Lösung Seite 500)

- Kann eine Antenne als Sende- und als Empfangsantenne verwendet werden?
- Kennen Sie Empfangsantennen, die sich nur schlecht als Sendeantennen eignen?
- Was verstehen Sie unter dem Ausdruck «Strahlungsdiagramm»?
- Durch welche elektrische Ersatzschaltung kann eine Antenne dargestellt werden, deren Länge einem Viertel der Wellenlänge entspricht?
- Kennen Sie Antennen, deren Ersatzschaltung durch einen Parallelschwingkreis gebildet wird?

- f) Skizzieren Sie einen horizontal polarisierten Halbwellendipol.
- g) Mit welchen Mitteln kann eine Antenne künstlich verlängert werden?
- h) Mit welchen Mitteln kann eine Antenne künstlich verkürzt werden?
- i) Was ist eine Yagi-Antenne?
- k) Was sind Stehwellen?
- l) Zu welchem Zweck werden Feederleitungen und Koaxialkabel verwendet?

3. Antennen

a. Elektromagnetische Felder

Die Tatsache, dass eine Antenne Signale empfangen und aussenden kann, beruht auf dem Wechselspiel elektromagnetischer Felder und Wellen. Wird ein Leiter nach Bild 328 von einem Gleichstrom durchflossen, so baut sich um ihn ein magnetisches Feld auf.

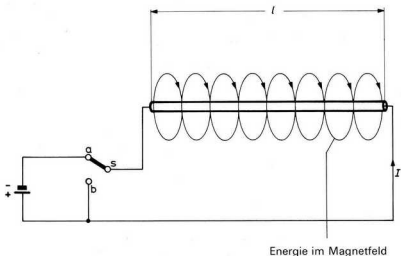


Bild 328

Der Aufbau des Feldes erfordert Energie. Diese aufgewendete Energie hat ihren Sitz im Magnetfeld. Das Magnetfeld erstreckt sich auf die ganze Länge des Leiters. Wir betrachten das Verhalten des Feldes über der Länge l . Wird nun der Schalter s in die Stellung b umgelegt – der Schalter sei so konstruiert, dass der Übergang von a nach b ohne Unterbrechung erfolgt – so bricht das Feld zusammen. **Die Energie des Feldes «kehrt in den Leiter zurück.»** Das Zusammenbrechende Feld induziert seinerseits im Leiter eine Spannung, die wiederum ein Feld aufbaut. Dieser Vorgang klingt ab, da sich die Feldenergie in den Ohmschen Verlusten des Leiters verbraucht. Bild 329 zeigt den Vorgang.

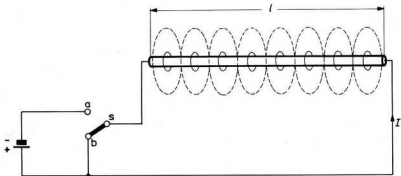


Bild 329

Wird derselbe Leiter nach Bild 330 von einem Wechselstrom durchflossen, so treten das magnetische Wechselfeld und das elektrische Wechselfeld miteinander verknüpft auf.

Wir können also sagen, dass ein sich **änderndes elektrisches Feld (E) ein Magnetfeld (H)** und ein sich **änderndes magnetisches Feld ein elektrisches Feld erzeugt**.

Auch gilt, dass eine **Störung des elektrischen Feldes sich auf das magnetische Feld auswirkt und umgekehrt**.

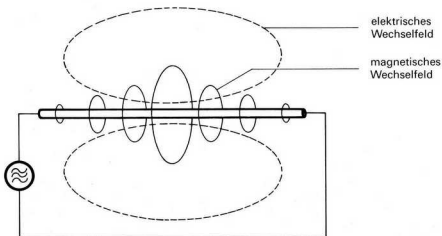


Bild 330

Da beide Felder in einem von einem Wechselstrom durchflossenen Leiter immer **miteinander** auftreten, spricht man von einem **elektromagnetischen Feld**. Beide Felder stehen immer senkrecht zueinander. Unter **Polarisation** eines elektromagnetischen Feldes versteht man die Richtung des elektrischen Feldes.

b. Der Mechanismus der Abstrahlung

Sendeantennen haben die Aufgabe, Energie in den Raum abzustrahlen. Wir wollen nun untersuchen, unter welchen Bedingungen ein von einem Wechselstrom durchflossener Leiter als Strahler wirken kann. **Die Abstrahlung hat ihre Ursache in der endlichen Laufzeit des elektromagnetischen Feldes.**

Die nachfolgenden Erläuterungen sollen Ihnen in sehr vereinfachter Weise ein «bildliches» Verstehen des Abstrahl-Mechanismus ermöglichen.

Wir betrachten den Feldaufbau in einem stromdurchflossenen Leiter nach Bild 331.

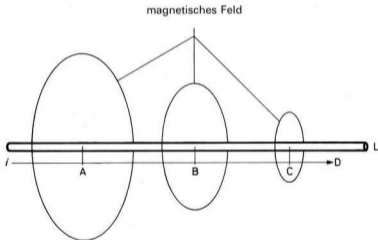


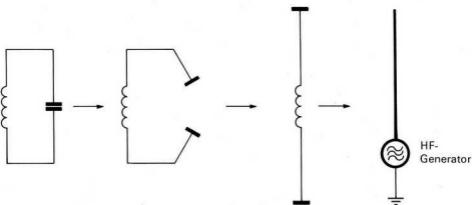
Bild 331

Der Strom i fließt mit Lichtgeschwindigkeit durch den Leiter L. Das Feld breitet sich um den Leiter herum ebenfalls mit Lichtgeschwindigkeit aus. Wenn der Strom im Punkt D anlangt, hat das Feld in den Punkten A, B und C die eingezeichnete Grösse erreicht. Das magnetische Feld wird infolge seiner endlichen Ausbreitungsgeschwindigkeit gegenüber dem verursachenden Strom verzögert. Wird nun der Stromfluss unterbrochen, so hat das Feld im Punkt A den längsten Weg, um in den «Leiter zurückzukehren»; es wird als Letztes den Leiter erreichen. Wird nun der Leiter von einem Hochfrequenzstrom durchflossen, so trifft

das «in den Leiter zurückkehrende Feld» in diesem nach Ablauf einer Schwingung einen Strom an, der in gleicher Richtung zum Strom fliesst, der das Feld verursacht hat. Der in diesem Zeitpunkt fließende Strom erzeugt ein Feld mit gleicher Polarität; es stösst somit das ursprüngliche Feld vom Leiter weg, womit dieses in den Raum abgestrahlt wird. Mit dem Feld wird auch die in diesem enthaltene Energie abgestrahlt. Die Strahlungsenergie steigt mit zunehmendem Strom und mit zunehmender Frequenz.

Wenn es uns gelingt, in einem Leiter einen möglichst grossen Hochfrequenzstrom zum fließen zu bringen, dann erreichen wir eine grosse Strahlungsenergie. Diese Forderung erscheint zunächst schwer realisierbar, da zu einem geschlossenen Stromkreis immer ein Rückleiter erforderlich ist. Es scheint somit sonderbar, dass in einem isoliert aufgehängten Draht ein Strom zum fließen kommt. Jeder Antennendraht kann jedoch als Schwingkreis betrachtet werden. Wir müssen nur beachten, dass die Induktivität des Kreises nicht in einer Spule konzentriert ist, sondern sich auf die ganze Antennenlänge verteilt. Der Kondensator wird durch die Kapazität des Antennendrahtes gegenüber der Erde gebildet.

Bild 332 veranschaulicht die Überführung eines geschlossenen Schwingkreises in einen **offenen Schwingkreis**.



Übergang vom geschlossenen zum offenen Schwingkreis

Bild 332

Jede Eindrahtantenne stellt einen geöffneten Schwingkreis dar. Wird nun der Antennendraht nach Bild 332 von einem HF-Generator gespeist, dann verhält er sich wie ein Schwingkreis, es fließt im Draht ein HF-Strom. Je grösser dieser Strom ist, desto mehr Energie wird in Form einer elektromagnetischen Welle in den Raum abgestrahlt. Diese elektromagnetische Welle breitet sich im Raum mit Lichtgeschwindigkeit aus. In einem Leiter ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit jedoch kleiner, da die Dielektrizitätskonstante und eine eventuell vorhandene Permeabilität berücksichtigt werden müssen. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit folgt der Beziehung:

$$c' = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \cdot \mu_r}}$$

c' = Ausbreitungsgeschwindigkeit im Leiter
 c = Lichtgeschwindigkeit
 ϵ_r = relative Dielektrizitätskonstante des Leiters
 μ_r = relative Permeabilität des Leiters

c. Strom- und Spannungsverteilung auf einer abgestimmten Eindrahtantenne

Eine abgestimmte Eindrahtantenne ist eine Antenne, deren Länge einem Viertel einer Wellenlänge oder einem ganzzahligen Vielfachen davon entspricht. Wir wollen nun untersuchen, wie sich eine abgestimmte Eindrahtantenne verhält. In Bild 333 erkennen wir die gewählte Versuchsanordnung.

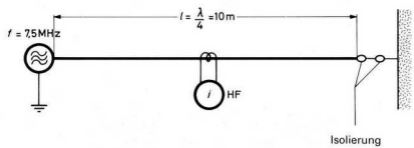


Bild 333

Ein Hochfrequenzgenerator speist eine Eindrahtantenne, deren Länge einem Viertel der Wellenlänge entspricht. Der Strom in der Antenne wird über eine Ankoppelschleife mit einem HF-Ampèremeter gemessen. Diese Einrichtung erlaubt die Strommessung an irgend einem Punkt der Antenne. Wir messen nun den Antennenstrom an möglichst vielen Orten längs der Antenne und halten die Messresultate in Bild 334 grafisch fest.

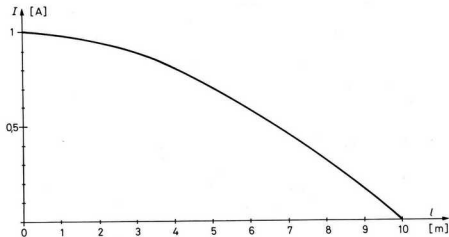


Bild 334

Der Versuch zeigt, dass der Strom am Speisungspunkt am grössten ist, um dann gegen das Antennenende hin abzufallen. Am Ende der Antenne kann kein Strom mehr fließen. Wir wollen diese Stromverteilung auf der Viertelwellenantenne nicht einfach als eine Tatsache hinnehmen, sondern versuchen, uns die Vorgänge mit Hilfe eines Modells zu erklären. Wir betrachten eine Periode des HF-Stromes in Bild 335.

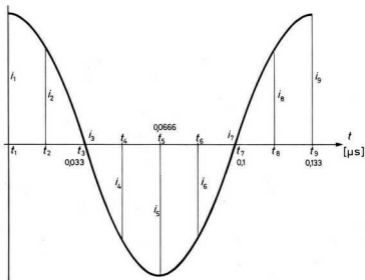


Bild 335

Für eine Frequenz von 7,5 MHz beträgt die Dauer einer Periode:

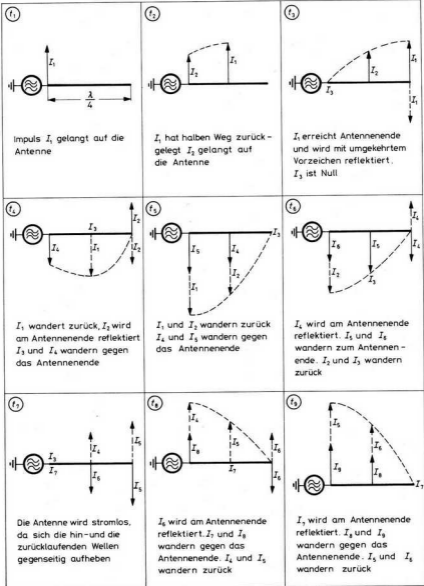
$$t = \frac{1}{7,5 \cdot 10^6} = 0,133 \mu\text{s}$$

Wir unterteilen diese Periode in acht gleich lange Zeitabschnitte und untersuchen nun für die Zeiten t_1 bis t_9 die Vorgänge in der Antenne. Wir betrachten dabei die Periode nicht als Ganzes; wir verfolgen nur den Weg der Stromstösse i_1 bis i_9 . Diese Vereinfachung ist erlaubt, da wir uns einen Wechselstrom zusammengesetzt denken können aus einer Vielzahl von Gleichstromstössen mit verschiedener Stärke und verschiedenen Vorzeichen. Aus dieser Vielzahl von Stromimpulsen greifen wir die Werte i_1 bis i_9 heraus. Im Zeitpunkt t_1 schicken wir den Stromimpuls i_1 in die Antenne. Dieser Stromimpuls wandert mit Lichtgeschwindigkeit durch die Antenne und erreicht nach:

$$t = \frac{s}{v} = \frac{10}{300 \cdot 10^6} \frac{\text{m} \cdot \text{s}}{\text{m}} = \text{s}$$

$$t = 0,033 \mu\text{s}$$

das Ende der Antenne. Das heisst, er erreicht das Antennenende im Zeitpunkt t_3 . Bild 336 zeigt die Vorgänge auf der Antenne für die Zeiten t_1 bis t_9 .



Mst: 1,8 : 1

Die gewählten Zeitintervalle betragen $\frac{1}{8}$ der Periodendauer.

Bild 336

In den Phasen t_1 bis t_4 spielt sich auf der Antenne ein Einschwingvorgang ab. Ab t_5 wird deutlich, dass sich auf der Antenne eine **stehende Welle** bildet. Eine stehende Welle ist dadurch gekennzeichnet, dass sie an Ort und Stelle schwingt; die Maximalwerte treten immer am gleichen Ort auf. Bild 336 zeigt deutlich, dass am Antennenende der Strom immer Null ist, während im Speisungspunkt der Antenne der Strom im Rhythmus der Frequenz des Generators zwischen seinem positiven und negativen Scheitelwert pendelt. Der Vorgang ist zu vergleichen mit dem Schwingen einer Klaviersaite. Die dabei auftretenden Schwingungsbäuche und Schwingungsknoten sind stationär; die Saite schwingt im Schwingungsbauch mit der maximalen Amplitude.

Auf der Antenne bildet sich nicht nur eine stehende Stromwelle, es tritt gleichzeitig eine stehende Spannungswelle auf. Am Ort des Strommaximums liegt ein Spannungsminimum und umgekehrt.

Am Ende jeder Antenne bildet sich deshalb immer ein Stromminimum und ein Spannungsmaximum.

Aus diesem Grund können wir von einer beliebig langen Antenne immer sagen, wie sich diese elektrisch verhält. Einige Beispiele sollen das Verhalten verschiedenen langer Antennen veranschaulichen.

Die Viertelwellenantenne

Im Speisungspunkt verhält sich die Viertelwellenantenne wie ein Serieschwingkreis im Resonanzfall. Der Strom erreicht seinen höchsten, die Spannung ihren tiefsten Wert.

Bild 337 zeigt die Strom-Spannungsverteilung auf der Antenne und das Ersatzschaltbild.

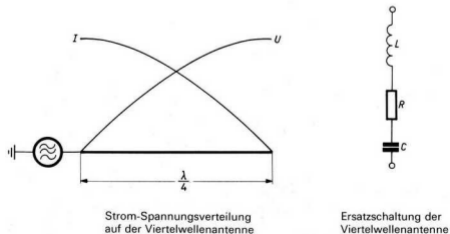
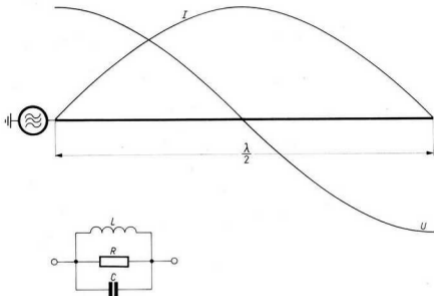


Bild 337

Die Halbwellenantenne

Im Speisungspunkt verhält sich die Halbwellenantenne wie ein Parallelschwingkreis im Resonanzfall, da der Strom seinen Minimalwert und die Spannung ihren Höchstwert erreichen. Bild 338 zeigt die entsprechende Strom-Spannungsverteilung auf der Antenne.

Strom-Spannungsverteilung auf der Halbwellenantenne

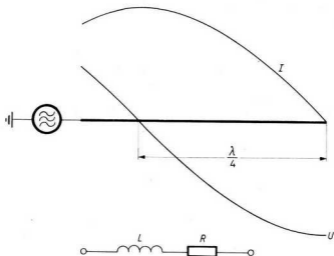


Ersatzschaltbild der Halbwellenantenne

Bild 338

Die nicht abgestimmte Eindrahtantenne

Jede nicht abgestimmte Eindrahtantenne, die länger als eine Viertelwellenlänge ist, wirkt induktiv. Sie verhält sich wie ein Serieschwingkreis, der mit zu hoher und wie ein Parallelschwingkreis, der mit zu tiefer Frequenz – bezogen auf die Resonanzfrequenz – betrieben wird. Bild 339 zeigt die Strom-Spannungsverteilung auf der Antenne.



Ersatzschaltbild der nicht abgestimmten Antenne, deren Länge grösser als $\lambda/4$ ist.

Bild 339

d. Der Strahlungswiderstand

Die Antenne wirkt als Strahler. Wir trachten danach, die abgestrahlte Energie möglichst hoch werden zu lassen. Für den Generator wirkt sich die Abstrahlung von Energie wie eine Wirklast auf. Würde die Antenne nicht strahlen und wäre sie verlustfrei, so würde sie für den Generator – Sender – eine reine Blindlast darstellen. Ist die Antenne auf die Sendefrequenz abgestimmt, so wirkt sie wie ein rein Ohmscher Widerstand, da sie sich dann wie ein Schwingkreis verhält, der mit der Resonanzfrequenz betrieben wird. Da nun aber die Antenne strahlt und mit Verlusten behaftet ist, wird der Spannungsknoten nie ganz Null, auch wird der Strom im Speisungspunkt einer Halbwellenantenne nie ganz Null.

Die Wirkkomponente der Antenne setzt sich zusammen aus dem Verlustwiderstand – analog dem Verlustwiderstand in einem Schwingkreis – und dem **Strahlungswiderstand**. Der Strahlungswiderstand ist eine reine Rechengrösse. Man stellt sich die abgestrahlte Leistung in einem Widerstand verbraucht vor und nennt diesen Widerstand Strahlungswiderstand. Da die Stromverteilung auf der Antenne unterschiedlich ist, und man für jeden Punkt auf der Antenne einen

anderen Wert für den Strahlungswiderstand ermitteln würde, bestimmt man diesen immer im Strommaximum. Der **Fusspunkt-widerstand** – das ist der Widerstand im Speisungspunkt der Antenne – einer Viertelwellenantenne entspricht praktisch dem Strahlungswiderstand, da die Antenne im Strommaximum gespeist wird und der Verlustwiderstand sehr viel kleiner ist als der Strahlungswiderstand.

Der Strahlungswiderstand lässt sich algebraisch definieren:

$$R_s = \frac{P_s}{I_{\text{eff max}}^2}$$

R_s = Strahlungswiderstand
 P_s = abgestrahlte Leistung
 $I_{\text{eff max}}$ = Effektivwert des Stromes im Strombauch

Der Strahlungswiderstand einer idealen Vertikalantenne – das ist eine Antenne auf ideal geerdetem Grund im Freien – lässt sich nach folgender Zahlenwertgleichung errechnen:

$$R_s = 1579 \left(\frac{h_{\text{eff}}}{\lambda} \right)^2 \Omega \quad \lambda \gg h$$

R_s = Strahlungswiderstand

λ = Wellenlänge

h = Antennenhöhe

h_{eff} = wirksame Antennenhöhe (Definition siehe unter e)

Diese Formel zeigt uns, dass mit kürzer werdender Antenne der Strahlungswiderstand immer kleiner wird. Der Wirkungsgrad einer zu kurzen Antenne sinkt rasch ab, da der Strahlungswiderstand Werte erreicht, die in der Grössenordnung des Antennenverlustwiderstandes liegen. Je kürzer die Antenne im Verhältnis zur Wellenlänge, desto kleiner wird der Strahlungswiderstand. Ein kleiner Strahlungswiderstand ist aber gleichbedeutend mit ungünstigen Strahlungseigenschaften.

e. Effektive Antennenhöhe

Wir haben gesehen, dass die Antenne nicht über ihrer ganzen Länge gleichmässig Energie abstrahlt. Sie strahlt dort am besten, wo der grösste Strom fliesst. Antennenteile, die nur einen kleinen Strom führen, tragen wenig zur Abstrahlung bei. Will man die gesamte Strahlung einer Antenne erfassen, so muss man die Antenne in unendlich viele unendlich kleine Teilabschnitte unterteilen und die Summe der Strahlungsenergien dieser Teilabschnitte bilden. Um dieses komplizierte Vorgehen zu umgehen, führte man den Begriff der **«effektiven Antennenhöhe»** ein. Die effektive Antennenhöhe ist eine reine Rechengrösse. Ihr Wert

wird so gewählt, dass sie mit dem Strom im Fusspunkt die gleiche Energie abstrahlen würde, wie die tatsächlich vorhandene Antenne mit der auf ihr ungleichmässig verteiltem Strom.

Ein Beispiel soll die Definition erläutern. Auf einer Viertelwellenvertikalantenne ist die Stromverteilung nach Bild 340 sinusförmig.

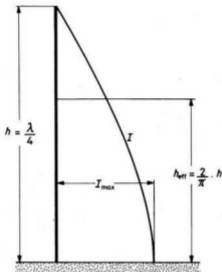


Bild 340

Die wirksame Antennenhöhe ist nun gegeben durch die Höhe des Rechteckes, das über dem Wert des Maximalstromes I_{\max} die gleiche Fläche umfasst wie die Stromkurve. Bei einer sinusförmigen Stromkurve, wie sie auf der Viertelwellenantenne entsteht, beträgt die effektive Antennenhöhe:

$$h_{\text{eff}} = \frac{2}{\pi} h ; \text{ wobei } h = \frac{\lambda}{4}$$

Für andere Antennenformen wird die Berechnung der effektiven Antennenhöhe weitaus komplizierter. Man gewinnt deshalb den Wert der effektiven Antennenhöhe meistens im Experiment über den Umweg einer Feldstärkemessung.

f. Strahlungsdiagramme

Das elektromagnetische Feld wird bei vielen Antennen nicht nach allen Seiten hin gleichmässig abgestrahlt. Die Antenne bevorzugt gewisse Richtungen, während in anderen Richtungen nur wenig Energie abgestrahlt wird. Die Art des Abstrahlungscharakters hängt von der Antennenform, von Gegenständen in unmittelbarer Umgebung der Antenne, vom Einfluss der Erde und von der Stromverteilung auf der Antenne ab. Das **Strahlungsdiagramm** einer Antenne müsste dreidimensional dargestellt werden. In der Praxis begnügt man sich jedoch mit einer

Vertikaldiagramm einer $\lambda/4$ -Antenne

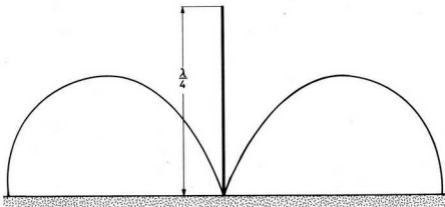


Bild 341

Das Horizontaldiagramm der gleichen Antenne zeigt Bild 342

Darstellung der Abstrahlung in horizontaler und vertikaler Richtung. Das **Vertikaldiagramm** hält den Aufriss der Feldverteilung fest, während das **Horizontaldiagramm** den Grundriss derselben wiedergibt. Die Strahlungsdiagramme werden durch Messungen ermittelt, indem man beispielsweise zur Aufnahme des Horizontaldiagrammes im gleichen Abstand vom Strahler auf einem Kreis möglichst viele Feldstärkemessungen vornimmt. Die Resultate dieser Messungen werden in das Diagramm eingetragen. Bild 341 zeigt das Vertikaldiagramm einer vertikalen Viertelwellenantenne.

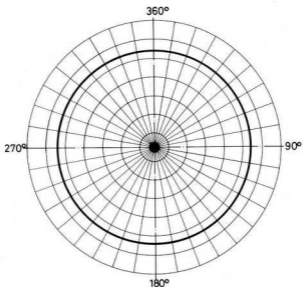


Bild 342

Die Antenne wirkt in horizontaler Richtung als Rundstrahler.

Anders verhält sich der horizontale Halbwellendipol. Sein Horizontaldiagramm ist in Bild 343 festgehalten.

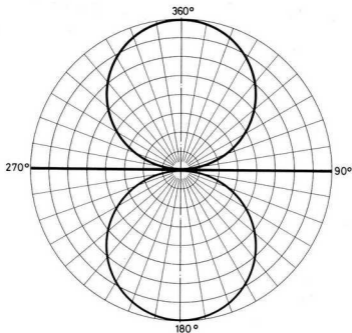


Bild 343

Das Vertikaldiagramm des horizontalen Halbwellendipols hängt stark von seiner Höhe ab Boden ab.

g. Antennenformen

ga. Der Viertelwellenvertikalstrahler

Der $\lambda/4$ -Vertikalstrahler besteht aus einem senkrechten Draht oder Stab, der eine Viertelwellenlänge lang ist. Unter diesen Voraussetzungen ist die Antenne in Resonanz. Wie wir bereits gesehen haben, entfällt je eine Viertel einer Strom- und einer Spannungskurve auf die Antennenlänge. Da der Strom am Antennenende Null wird, die Spannung dagegen ihren Maximalwert erreicht, ergibt sich eine Strom- und Spannungsverteilung nach Bild 344. Wäre die Antenne verlustfrei und würde sie nicht strahlen, so würde sie am Fusspunkt einen reinen Kurzschluss darstellen.

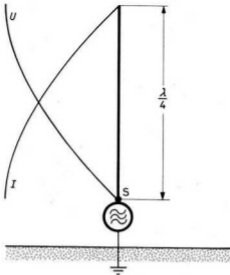


Bild 344

Da die Antenne jedoch Leistung abstrahlt – dargestellt durch den Strahlungswiderstand R_s – und Leistung verbraucht – dargestellt durch den Verlustwiderstand R_v – tritt am Speisungspunkt S die Summe der beiden Widerstände auf:

$$R_0 = R_s + R_v \quad R_0 = \text{Widerstand im Speisungspunkt}$$

Diese Formel gilt nur bei Speisung im Strombauch, da der Strahlungswiderstand immer für das Strommaximum angegeben wird. Diese Bedingung ist in unserem Beispiel erfüllt.

Der Widerstand im Speisungspunkt misst für die Viertelwellenantenne rund 40Ω . Diese Antenne wirkt als Rundstrahler. Das Horizontaldiagramm entspricht Bild 342.

Will man eine Vertikalantenne für verschiedene Frequenzen benutzen, dann muss sie elektrisch verlängert oder verkürzt werden, damit die Resonanzbedingung wieder erfüllt ist.

Schaltet man zur Antenne eine Induktivität nach Bild 345 in Serie, so wird die Antenne künstlich verlängert.

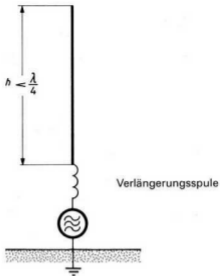


Bild 345

Analog zur elektrischen Verlängerung einer Antenne kann diese durch Serieschaltung einer Kapazität elektrisch verkürzt werden. In Bild 346 erkennen wir das Prinzip der künstlichen Verkürzung einer geometrisch zu langen Antenne.

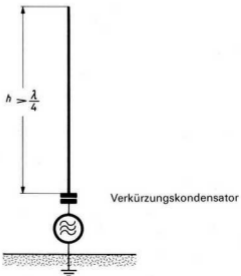


Bild 346

Anstelle der Erde wird oft ein Gegengewicht verwendet. Ein Gegengewicht besteht aus einer Anzahl Leiter, die vom Erdungspunkt der Antenne aus strahlenförmig ausgelegt werden.

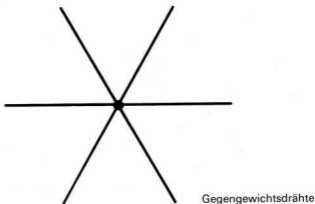


Bild 347

Ein Gegengewicht empfiehlt sich immer dann, wenn die Erdung über einen schlecht leitenden Erdboden erfolgt. Schlechte Leitfähigkeit der Erde schafft zusätzliche Verluste, die durch ein Gegengewicht herabgemindert werden können.

gb. Der Halbwellendipol

Ersetzt man bei einem Viertelwellenstrahler die Erde durch einen zweiten Viertelwellenstrahler, so erhält man nach Bild 348 einen Halbwellendipol.

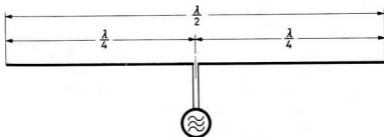


Bild 348

Das Horizontalstrahlungsdiagramm für den Halbwellendipol wurde in Bild 343 gezeigt. Die Strom- und Spannungsverteilung auf dem Halbwellendipol geht aus Bild 349 hervor.

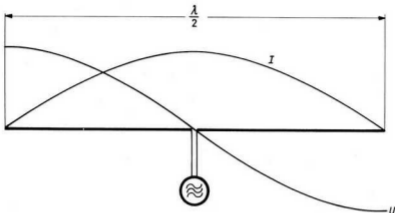


Bild 349

Der Halbwellendipol wird wie der Viertelwellenstrahler im Strombauch gespeist. Im Resonanzfall stellt der Dipol eine reine niederohmige Last von etwa 70Ω dar. Dieser Speisungswiderstand ist von der Drahtdicke abhängig. Für einen unendlich dünnen Draht würde der Speisungswiderstand beim Halbwellendipol auf $73,2 \Omega$ ansteigen. Mit zunehmender Drahtdicke nimmt er ab und schwankt bei den praktisch realisierbaren Antennen um 65Ω . Die Dicke der Strahler beeinflusst auch die Bandbreite der Antenne. Da sich der Dipol wie ein Serieschwingkreis verhält, weist er auch wie dieser eine Bandbreite auf. Je dicker die Antennenstäbe gemacht werden, desto grösser wird die Bandbreite der Antenne. Es wird unterschieden zwischen elektrischer und geometrischer Länge der Dipolantenne. Beide Werte sind nur für unendlich dünne Antennen identisch. Sobald die Antenne jedoch Drahtdicken aufweist, wie sie in der Praxis vorkommen, muss die mechanische Länge um einige Prozent kürzer gewählt werden als die elektrische. Diese Verkürzung wird bei der Berechnung der Antenne im **Verkürzungsfaktor** berücksichtigt.

Der Halbwellendipol ist eine sehr verbreitete Antenne. Er wird in der Kurzwellen- wie in der Ultrakurzwellentechnik häufig verwendet. Im Kurzwellenfernverkehr wird die Dipolantenne oft als **Raumstrahler** eingesetzt.

gc. Der Ganzwellendipol

Der Ganzwellendipol ist ein Dipol, dessen mechanische Länge einer Wellenlänge entspricht. Bild 350 zeigt seinen Aufbau.

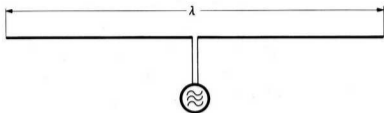


Bild 350

Er wird in der Mitte im Spannungsbauch nach Bild 351 gespeist. Die Speisung erfolgt hochohmig. Die Strom- und Spannungsverteilung ergibt sich nach Bild 351.

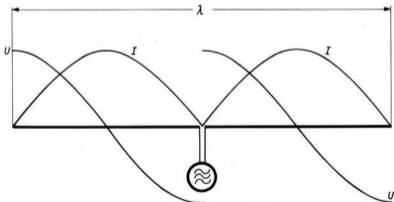


Bild 351

Da diese Antenne im Spannungsbauch gespeist wird, spricht man oft vom Spannungsgespeisten Dipol. Der Widerstand im Speisungspunkt und die Bandbreite des Dipols sind vom Verhältnis Dipollänge zu Leiterdurchmesser abhängig. Die Bandbreite eines Ganzwellendipols ist stets grösser als diejenige eines Halbwellendipols. Der Widerstand im Speisungspunkt erreicht je nach den geometrischen Abmessungen der Antenne $1..6 k \Omega$. Je grösser das Verhältnis Dipollänge zu Dipoldurchmesser wird, desto höhere Werte erreicht der Widerstand im Speisungspunkt. Der Verkürzungsfaktor spielt dieselbe Rolle wie beim Halbwellendipol.

Der Ganzwellendipol hat infolge seiner Grösse einen besseren Wirkungsgrad als der Halbwellendipol. Der **Antennengewinn** beträgt etwa 1,8 dB. Der Antennengewinn wird als Leistungsverhältnis angegeben. Als Leistungsgewinn bezeichnet man den Leistungszuwachs in der Hauptstrahlrichtung, den eine Antenne gegenüber einem Halbwellendipol aufweist.

Dank der hochohmigen Speisung lässt sich die Antenne mit einem besseren Wirkungsgrad betreiben, da infolge der kleinen Ströme in der Zuleitung wenig Verluste auftreten.

Der Ganzwellendipol wird oft als Raumstrahler für Kurzwellenweitverbindungen eingesetzt.

gd. Der Faltdipol

In der UKW-Empfangstechnik ist der gefaltete Dipol – Faltdipol – nach Bild 353 häufig anzutreffen.

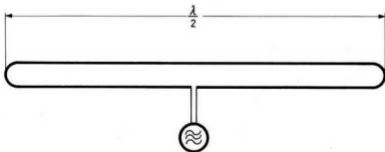


Bild 352

Der Faltdipol ist aus der Parallelschaltung zweier Halbwellendipole entstanden. Die Parallelschaltung der beiden gleich langen und gleich dicken Antennenstäbe bewirkt die Parallelschaltung der Induktivität der Antenne. Die resultierende Induktivität ist noch halb so gross wie diejenige eines einfachen Dipols. Gleichzeitig erfolgt auch die Parallelschaltung der Antennenkapazitäten, was eine Verdoppelung der Antennenkapazität bewirkt. Die Resonanzfrequenz der Antenne wird somit nicht verändert. Als Folge des ungünstigeren L - C -Verhältnisses wird die Antenne breitbandiger. Die Induktivitäten der beiden Antennen sind nicht nur parallelgeschaltet, sie sind auch miteinander gekoppelt. Durch diese Kopplung wird der Speisungswiderstand hinauftransformiert. In einem symmetrischen Faltdipol erfolgt eine Transformation um den Faktor 4. Der Widerstand im Speisungspunkt misst demnach rund $300\ \Omega$. Werden die beiden Antennenstäbe verschieden dick gemacht, so lässt sich der Speisungswiderstand damit variieren, da infolge der Unterschiede zwischen den Induktivitäten der beiden Dipole das Transformationsverhältnis geändert wird. Diese Tatsache macht man sich bei der Anpassung der Antenne an die Speiseleitung zunutze.

Das Strahlungsdiagramm des Faltdipols entspricht demjenigen des Halbwellendipols.

Der Faltdipol wird fast ausschliesslich als UKW-Empfangsantenne verwendet, wobei er meistens mit Zusatzelementen zur Richtantenne ausgebaut wird.

ge. Die Langdrahtantenne

Die Langdrahtantenne besteht nach Bild 353 aus einem Draht, der länger ist als die Betriebswellenlänge.

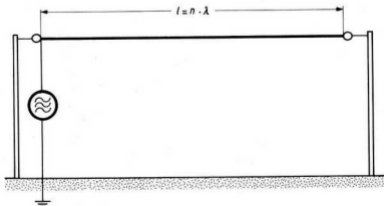


Bild 353

Das Horizontalstrahlungsdiagramm ist stark von der Länge der Antenne abhängig. Bild 354 zeigt, wie mit zunehmender Antennenlänge die Richtwirkung in Richtung der Drahtachse zunimmt.

Der Strahlungswiderstand ist frequenzabhängig. Die einfach zu bauende Antenne wird oft im Kurzwellenverkehr verwendet.

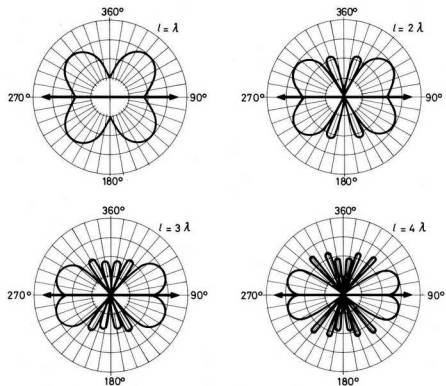


Bild 354

gf. Die V-Antenne

Die V-Antenne besteht aus zwei V-förmig angeordneten Langdrahtantennen nach Bild 355.

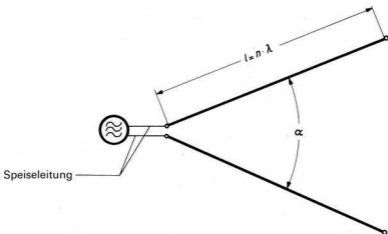


Bild 355

Die Speisung erfolgt über eine Zweidrahtleitung. Der Öffnungswinkel α ist von der Schenkellänge abhängig. In Bild 356 erkennen wir die ausgeprägte Richtwirkung nach beiden Seiten der Antennenachse.

Richtdiagramm einer V-Antenne



Bild 356

Der Antennengewinn nimmt mit wachsender Schenkellänge zu. Er steigt von 3 dB bis auf 10 dB für eine Schenkellänge von 9λ an. Die Antenne arbeite relativ breitbandig.

Da diese in vertikaler Richtung sehr flach abstrahlt, ist sie besonders für Kurzwellenverbindungen über die Ionosphäre geeignet.

gg. Die Rhombusantenne

Die Rhombusantenne nach Bild 357 entsteht durch die Hintereinanderschaltung von zwei V-Antennen.

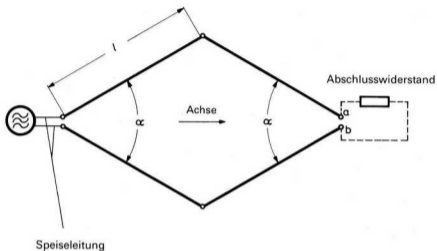


Bild 357

Die Schenkellänge l und der Winkel α beeinflussen die Richtwirkung. Die Antenne sollte mindestens eine halbe Wellenlänge über dem Erdboden montiert werden. Die Rhombusantenne arbeitet sehr breitbandig. Ohne Abschlusswiderstand strahlt sie in beiden Richtungen der Antennenachse. Wird die Antenne dagegen an den Punkten a und b mit einem Ohmschen Widerstand von rund $700 \dots 800 \Omega$ abgeschlossen, so strahlt sie nur noch in Richtung des Abschlusswiderstandes. Dieser muss so bemessen sein, dass er die halbe Senderleistung aufnehmen kann. Die beiden Strahlungsdiagramme sind aus Bild 358 zu ersehen.

Rhombusantennen werden im kommerziellen Kurzwellenverkehr sehr oft verwendet, da sie infolge ihrer ausgezeichneten Richtwirkung und des grossen Antennengewinnes einen sehr guten Wirkungsgrad haben.

Bidirektionale Rhombus-Antenne

Unidirektionale Rhombus-Antenne

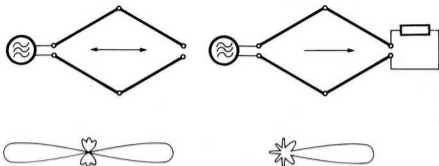
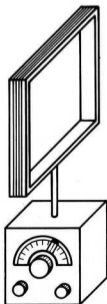


Bild 358

gh. Rahmenantennen

Rahmenantennen sind reine Empfangsantennen. Sie bestehen nach Bild 359 aus einer Spule, die rahmenförmig aufgewickelt ist.



drehbare Rahmen-Antenne

Empfänger

Bild 359

Die Rahmenantenne reagiert auf das magnetische Feld. Trifft die Wellenfront nach Bild 360 senkrecht auf den Rahmen, so werden in den Teilen A und B des Rahmens Spannungen induziert, die sich gegenseitig aufheben. An den Klemmen a und b der Antenne liegt somit keine Spannung.

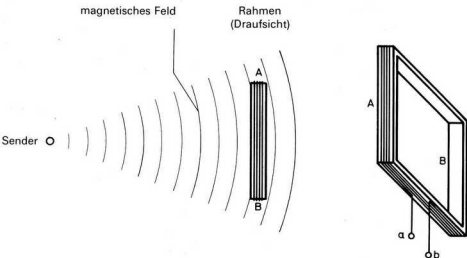


Bild 360

Wird nun der Rahmen nach Bild 361 um 90° gedreht, so werden in den Teilen A und B der Antenne Spannungen induziert, die infolge des Zeitunterschiedes eine kleine Phasenverschiebung aufweisen. Dank dieser Phasenverschiebung kann an den Klemmen a und b eine Differenzspannung abgegriffen werden, die als Empfangsspannung zur Verfügung steht.

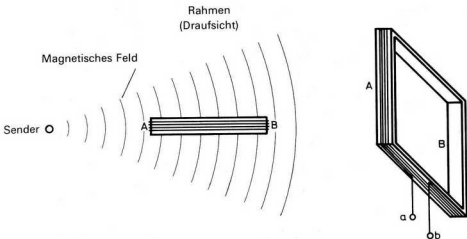


Bild 361

Rahmenantennen werden in Peilgeräten zur Peilung von Funkstationen verwendet. In tragbaren Radiogeräten sind sie auch oft anzutreffen, obschon sie in Kleingeräten durch die **Ferritantenne** verdrängt wurden. Die Ferritantenne besteht aus einem einige cm langen Ferritstab, auf dem nach Bild 362 die Empfangsspule angebracht ist.



Bild 362

Die Ferritantenne hat ähnliche Peileigenschaften wie die Rahmenantenne. Zur Richtungsbestimmung wird bei Peilantennen über einen zusätzlichen Antennenstab ein Teil des elektrischen Feldes eingekoppelt. Damit lässt sich die Richtung des angepeilten Senders feststellen. Ohne diese Zusatzeinrichtung ist die Peilung mit der Rahmen- oder Ferritantenne immer zweideutig.

gi. Richtantennen

Durch Anbringen von **parasitären Elementen** an eine Dipolantenne erhält man eine **Richtantenne**. Eine Richtantenne ist eine Antenne, deren Energie in einer bestimmten Richtung scharf gebündelt abgestrahlt wird. Parasitäre Elemente sind nicht gespeiste Elemente einer Antenne. Wir kennen zwei Arten von parasitären Elementen: Den **Reflektor** und den **Direktor**.

Der Reflektor besteht aus einem nicht gespeisten Stab, der nach Bild 363 auf der **gleichen Ebene hinter** dem Dipol angebracht ist.

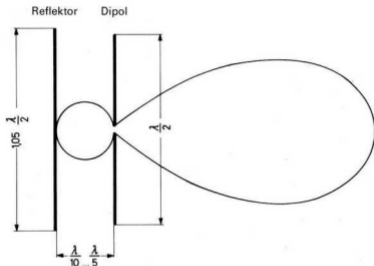


Bild 363

Der Reflektor wirkt wie ein Spiegel, er reflektiert die Antennenstrahlung. Das Strahlungsdiagramm richtet sich nach vorne aus. Der Reflektorabstand beträgt ungefähr 20% der Wellenlänge. Die Länge des Reflektors wird etwa 5...6% grösser gewählt als die Wellenlänge. Die Reflexion kommt durch die Kopplung des Reflektors mit dem Dipol zustande. Wir wollen den Mechanismus der Reflexion an einem Beispiel in vereinfachter Form betrachten:

Der Dipol wird durch ein ankommendes Feld erregt und beginnt zu schwingen. Bei richtiger Anpassung wird vom angeschlossenen Empfänger die Hälfte der ankommenden Energie aufgenommen. Die verbleibende Hälfte wird vom Dipol wieder abgestrahlt, wobei der Reflektor erregt wird und zu schwingen beginnt. Er wirkt nun ebenfalls als Strahler. Der Abstand vom Dipol zum Reflektor ist so bemessen, dass das vom Reflektor erzeugte Feld am Dipol mit dem Feld des Dipols in Phase ist und dieses unterstützt, was eine Zunahme der Antennenspannung

am Dipol bewirkt. Der Antennengewinn ist dann am grössten, wenn die Phase des empfangenen Feldes mit der Phase des vom Reflektor erzeugten Feldes genau übereinstimmt. Zwei Grössen beeinflussen die Phasenlage: Der Abstand Dipol – Reflektor und die Reflektorlänge. Der Abstand zwischen den beiden Elementen hat einen Einfluss auf die Phasenlage, weil er die Laufzeit des Feldes bestimmt. Die Reflektorlänge beeinflusst die Phasenlage, weil er durch die Verlängerung von einigen Prozenten über die halbe Wellenlänge hinaus induktiv wirkt. Die genaue Reflektorlänge bestimmt den Anteil des induktiven Blindwiderstandes des Reflektors. Laufzeit und induktiver Blindwiderstand des Reflektors werden so aufeinander abgestimmt, dass die grösste Antennenspannung auftritt. Der Antennengewinn liegt im günstigsten Fall bei etwa 3 dB. Der Reflektor verursacht ein Absinken des Widerstandes im Speisungspunkt. Die gleiche Wirkung kann erzielt werden, wenn man einen etwas verkürzten Stab nach Bild 364 in der **gleichen Ebene vor** dem Dipol anbringt.

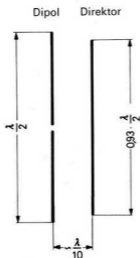


Bild 364

Der Strahlungsmechanismus ist derselbe wie beim Reflektor. Um Phasengleichheit am Dipol zu erreichen, muss jedoch der Direktor kapazitiv wirken; er wird deshalb gegenüber dem Dipol um einige Prozent verkürzt. Der erzielbare Antennengewinn liegt ebenfalls bei etwa 3 dB. Reflektor und Direktor werden meistens kombiniert, wobei für sehr ausgeprägte Richtwirkungen mehrere Direktoren angebracht werden. Diese Antenne wird nach ihrem Erfinder **Yagi-Antenne** genannt. In Bild 365 erkennen wir die einfachste Yagi-Antenne mit nur einem Direktor.

Reflektor Dipol Direktor



→ Senderrichtung
← Empfangsrichtung

Bild 365

Das Strahlungsdiagramm dieser Antenne verläuft nach Bild 366

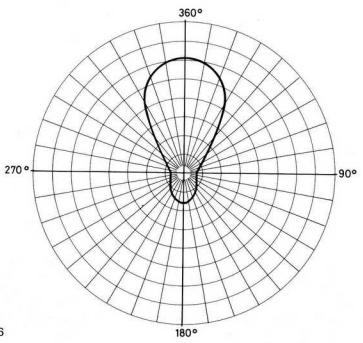


Bild 366

Yagi-Antennen sind als Empfangsantennen für UKW- und Fernsehempfang weit verbreitet. Sie werden aber wegen ihrer scharfen Bündelung und dem hohen Antennengewinn im Bereich der kürzeren Kurzwellen oft auch für Grossdistanzverbindungen eingesetzt.

gk. Aktive Antennen

Unter der Bezeichnung aktive Antenne wurde ein Empfangsantennentyp entwickelt, der sich durch kleinste Abmessungen, grosse Bandbreite und geringes Rauschen auszeichnet. Dieses Antennensystem besteht aus der eigentlichen Antenne und einem Transistorverstärker, der sich direkt am Fusspunkt befindet. Antenne und Verstärker sind so dimensioniert, dass sich die günstigsten Betriebsbedingungen ergeben. Vorerst werden aktive Antennen für die Unterhaltungselektronik hergestellt, wobei das ganze System inklusive die Antenne im Rückspiegel für Automobile untergebracht ist. Die Antenne gestattet den Empfang im UKW-, KW-, MW- und LW-Bereich.

h. Hochfrequenzleitungen

ha. Grundlagen

In den wenigsten Fällen befinden sich Sender und Empfänger direkt an der Antenne. Zwischen die Antenne und den Generator oder die Antenne und den Verbraucher muss eine Speiseleitung geschaltet werden. Von der Qualität dieser Leitung ist der Wirkungsgrad der Anlage abhängig. Solche Leitungen müssen möglichst kleine Verluste aufweisen und dürfen nicht strahlen.

Wir wollen einige Eigenschaften der Hochfrequenzleitung am Beispiel einer Doppeldrahtleitung untersuchen. Für die Doppeldrahtleitung lässt sich ein Ersatzschaltbild nach Bild 367 zeichnen.

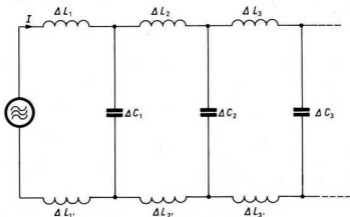


Bild 367

Die Leitung besteht aus Längsinduktivitäten und Querkapazitäten. Die Leitungsdrähte wirken als Induktivitäten, während sich zwischen den Drähten die Querkapazität bildet. Eine jede Leitung lässt sich nun in viele sehr kleine Teilabschnitte unterteilen. Zu jedem Teilabschnitt gehören die Teilinduktivitäten L und die Teilkapazität P . Wir stellen uns nun eine unendlich lange Leitung vor. An diese unendlich lange Leitung wird nach Bild 368 ein Generator angeschlossen.

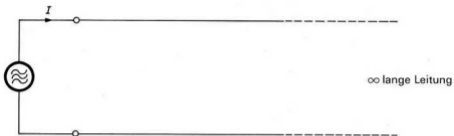


Bild 368

Der Generator liefert an die Leitung den Strom I . Dieser Strom lädt über die Längsinduktivitäten die Querkapazitäten auf. Es fließt eine Ladung in die Leitung hinein. Für eine unendlich lange Leitung würde der Generatorstrom ewig fließen. Die Leitung stellt für den Generator einen Ohmschen Widerstand dar, dessen Wert unabhängig von der Frequenz des Generatorstromes ist. Dieser Widerstand – er heisst **Wellenwiderstand Z_w** – ist von den geometrischen Abmessungen der Leitung abhängig. Unter Vernachlässigung der bei einer guten Leitung ohnehin geringen Leistungsverlust ergibt sich der Wellenwiderstand zu:

$$Z_w = \sqrt{\frac{L}{C}} \Omega \quad [Z_w] = \sqrt{\frac{Vs}{A}} \cdot \frac{V}{As} = \frac{V}{A} = \Omega$$

Dabei sind die L - und C -Werte der Leitung über einer bestimmten Länge gemessen worden.

Ohne die Formel für den Wellenwiderstand mathematisch ableiten zu wollen, werden wir an unserer Modelleitung nach Bild 367 die Vorgänge studieren, die zur Definition des Wellenwiderstandes führten.

Der Strom des Generators lädt über die Induktivitäten ΔL_1 und $\Delta L_1'$ den Kondensator ΔC_1 auf. Die Spannung, die sich am Kondensator ΔC_1 aufbaut, bewirkt einen Strom über die Induktivitäten ΔL_2 und $\Delta L_2'$, der den Kondensator ΔC_2 auflädt. Auf der unendlich langen Leitung wiederholt sich dieser Vorgang unendlich oft. Als Folge davon fließt der Generatorstrom I mit gleichbleibender Stärke ewig, da die unendlich lange Leitung nie fertig aufgeladen sein wird. Es ist nun leicht einzusehen, dass der Wellenwiderstand mit zunehmender Induktivität zunimmt und mit zunehmender Kapazität absinkt. Die Induktivitäten wirken

einem Stromfluss entgegen. Je grösser dagegen die Kapazitäten sind, desto grösser werden die Ladeströme. Wird nun eine Leitung mit einem ohmschen Widerstand abgeschlossen, dessen Widerstandswert dem Wellenwiderstand der Leitung entspricht, dann verhält sich diese Leitung vom Generator her gesehen wie eine unendlich lange Leitung. Die Leitung nach Bild 369 transportiert die gesamte Generatorenergie – immer unter der Voraussetzung, dass sie verlustfrei ist – zum Abschlusswiderstand R .

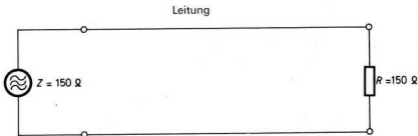
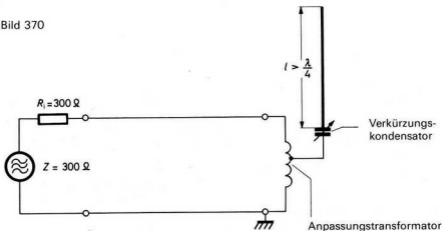


Bild 369

Die Leitung ist angepasst; es geht auf ihr keine Energie verloren. Die gesamte vom Generator abgegebene Energie wird im Widerstand R verbraucht. Dieser Fall entspricht der idealen Speisung einer Antenne. Die Antenne wird dabei elektrisch auf Resonanz abgestimmt; der resultierende Speisungswiderstand wird auf den Wellenwiderstand der Leitung transformiert und an diese angeschlossen. Der Innenwiderstand des Generators wird ebenfalls dem Wellenwiderstand der Leitung angepasst. Unter diesen Voraussetzungen – sie sind in Bild 370 dargestellt – wird die gesamte Generatorenergie der Antenne zugeführt.

Bild 370



Eine ideale verlustfreie Leitung lässt sich nicht realisieren. Jede Leitung weist Verluste auf. Wie beim Schwingkreis steigen die Verluste mit zunehmender Frequenz an. Die **Leitungsdämpfung** wird oft in dB/100 m angegeben, einzelne Fabrikanten geben die Dämpfung in Np/km an. Das **Neper** Np ist ein Dämpfungsmass wie das dB, es basiert jedoch auf dem natürlichen Logarithmus. Neper lassen sich leicht in dB umrechnen:

$$Np \cdot 8,686 = dB$$

Hochfrequenzleitungen, die am Ende offen oder geschlossen sind, verhalten sich wie Schwingkreise. Bild 371 zeigt die Verhältnisse auf einer offenen Leitung.

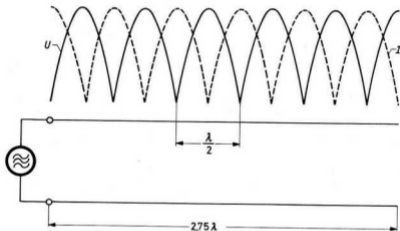


Bild 371

Das mittels Generator in dem Leiter erzeugte elektromagnetische Feld ist der eigentliche Energieträger und verursacht Strom und Spannung auf der Leitung. Da die Leitung am Ende offen ist, wird die ankommende Wellenfront reflektiert, sie kehrt um und wandert zum Generator zurück. Auf der Leitung fließen nun zwei Ströme; der Strom in Richtung zum Leitungsende und der reflektierte Strom in Richtung zum Generator. Durch Überlagerung der beiden Ströme bilden sich auf der Leitung **stehende Wellen**. Auf einer Leitung, die mit ihrem Wellenwiderstand abgeschlossen ist, messen wir an jedem Punkt der Leitung den gleichen Strom. Auf einer am Ende offenen Leitung können wir messtechnisch eine Strom- und Spannungsverteilung nach Bild 371 nachweisen. Die Maximalwerte

nennen wir Strom- oder Spannungsbauch, die Minimalwerte Strom- oder Spannungsknoten. Die stehende Welle kann mit Messgeräten auf der Leitung nachgewiesen werden. Da am offenen Leitungsende der Strom auf den Wert Null zusammenbricht, entsteht dort ein Stromknoten. Der Strombauch erscheint demzufolge nach Bild 372 nach einem Viertel der Wellenlänge. Gleichzeitig herrscht am offenen Leitungsende die grösste elektrische Feldstärke; es entsteht ein Spannungsbauch.

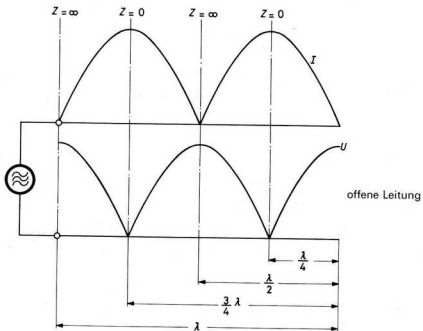


Bild 372

Die Zeichnung zeigt, dass sich eine Leitung, die einen Viertel der Wellenlänge oder ein ungeradzahliges Vielfaches davon lang ist, wie ein Serieschwingkreis verhält, da die Impedanz der verlustfreien Leitung am Leitungsanfang infolge des Spannungsknotens Null wird. Misst die Leitung eine halbe Wellenlänge oder ein ganzzahliges Vielfaches davon, dann verhält sie sich am Leitungsanfang infolge des Stromknotens wie ein Parallelschwingkreis. Bild 372 zeigt den Wechsel im Verhalten der Leitung. Die durch die Leitung dargestellte Impedanz ist in Abständen von je einem Viertel der Wellenlänge festgehalten.

Die Verhältnisse kehren sich um, wenn man nach Bild 373 die Leitung am Ende kurzschliesst. Am Leitungsende liegt nun ein Strombauch, während die Spannung infolge des Kurzchlusses Null wird. Die Viertelwellenlänge lang sind, verhalten sich am Leitungsanfang wie Parallelschwingkreise und alle Leitungen, die ein ungeradzahliges Vielfaches einer Viertelwellenlänge lang sind, verhalten sich am Leitungsanfang wie Parallelschwingkreise. Die kurzgeschlossene Halbwellenleitung und alle Leitungen, die ein ganzzahliges Vielfaches einer halben Wellenlänge lang sind, verhalten sich wie Serieschwingkreise.

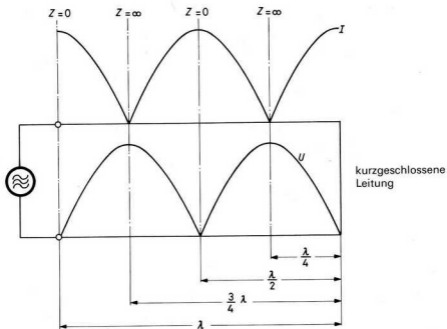


Bild 373

Eine Leitung, die als Schwingkreis verwendet wird, heisst **Lecherleitung**. Solche Leitungen werden im Bereich der Dezimeterwellen oftmals als Schwingkreise eingesetzt. Lecherleitungen sind sehr stabil und weisen eine hohe Kreisgüte auf. Liegt die Leitungslänge zwischen den Werten einer Viertelwellenlänge, dann wirkt die Leitung entweder kapazitiv oder induktiv. Bild 374 zeigt die möglichen Fälle.

Leitungs- länge	offene Leitung		kurzgeschlossene Leitung	
	Erscheint an den Eingangs- klemmen als :	Strom- Spann- ungsverteilung	Erscheint an den Eingangs- klemmen als:	Strom- Spann- ungsverteilung
$l < \frac{\lambda}{4}$				
$l = \frac{\lambda}{4}$				
$l = \frac{\lambda}{4} \dots \frac{\lambda}{2}$				
$l = \frac{\lambda}{2}$				

Bild 374

Sobald die Leitung nicht Luft als Dielektrikum aufweist, sondern ein Isoliermaterial, dessen relative Dielektrizitätskonstante grösser als Eins ist, wird die notwendige Leiterlänge für eine bestimmte Resonanzfrequenz herabgesetzt. Der gleiche Effekt tritt auf, wenn die Leitung Ferrite zur Erhöhung der Leiterinduktivität enthält. Die damit erreichbaren Verkürzungsfaktoren lassen sich leicht errechnen.

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu_r \cdot \epsilon_r}}$$

μ_r = relative magn. Permeabilität (für Luft ≈ 1 ;
für Isoliermaterial auch nicht wesentlich > 1)

ϵ_r = relative Dielektrizitätskonstante

v = Verkürzungsfaktor

Der **Verkürzungsfaktor** v gibt an, um wieviel die geometrische Länge der Leitung kürzer gemacht werden muss, als für eine Leitung ohne Ferrit und mit Luft als Dielektrikum. Die Ursache der Verkürzung liegt in der geringeren Ausbrei-

tungsgeschwindigkeit der Welle auf einer Leitung mit Dielektrikum oder Ferrit. Die abgestimmte Viertelwellenleitung lässt sich für die Resonanzfrequenz als Transformator verwenden. Die Transformation folgt der einfachen Formel:

$$Z_w = \sqrt{R_e \cdot R_a}$$

R_e = Eingangswiderstand
 R_a = Ausgangswiderstand
 Z_w = Wellenwiderstand der Leitung

Ein Beispiel soll den Vorgang erklären. Eine Yagi-Antenne für eine Frequenz von 200 MHz und einem Fusspunktwiderstand von 120 Ω soll an eine Leitung mit einem Wellenwiderstand von 300 Ω angepasst werden. Gesucht ist der erforderliche Wellenwiderstand und die geometrische Länge der Transformationsleitung. Die Leitung besitzt ein Dielektrikum mit einem ϵ_r von 3. Bild 375 zeigt die Anordnung.

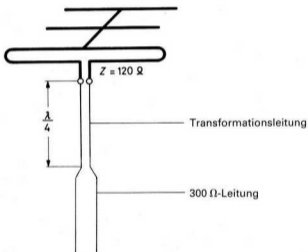


Bild 375

Vorgehen:

1. Schritt: Berechnen des Wellenwiderstandes der Transformatorleitung

- Grundformel anschreiben $Z_w = \sqrt{R_e \cdot R_a}$
 - Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen $Z_w = \sqrt{120 \cdot 300}$
- $Z_w = 190 \Omega$

2. Schritt: Berechnen der geometrischen Länge

- Grundformel anschreiben $l = \frac{\lambda}{4} \cdot v$
- $l = \frac{c}{f \cdot \sqrt{\epsilon_r}} \cdot \frac{m}{s} \cdot s = m$
- Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen $l = \frac{300 \cdot 10^6}{200 \cdot 10^6 \sqrt{3}}$
- $l = 0,866 \text{ m}$

Die Viertelwellentransformationsleitung wird oft zur Anpassung von Antennen an Speiseleitungen eingesetzt.

hb. Die Zweidrahtleitung

Die Zweidrahtleitung – oft auch **Feederleitung** genannt – besteht aus zwei parallel geführten Drähten. Wird kein Zwischenmaterial verwendet, so wird der Leiterabstand durch Isolierstäbe, die in regelmässigen Abständen angebracht sind, eingehalten. Eine solche Feederleitung wird deshalb auch «Hühnerleiter» genannt. Die meisten Leitungen weisen jedoch zwischen den Leitern ein Kunststoffmaterial als Dielektrikum auf. Oft wird das Dielektrikum perforiert, um die Leitungsverluste herabzusetzen. Bild 376 zeigt einige Ausführungen von Zweidrahtleitungen.

Diverse Feederleitungen

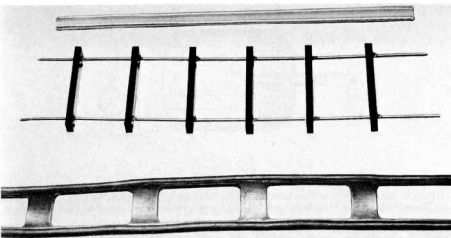


Bild 376

Der Wellenwiderstand einer Zweidrahtleitung errechnet sich nach folgender Näherungsformel zu:

$$Z_W \approx 276 \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \lg \left(\frac{2a}{d} \right) \Omega \quad \begin{array}{l} a = \text{Abstand der Leiter} \\ d = \text{Durchmesser der Leiter} \end{array}$$

Bild 377 erklärt die zur Berechnungsformel für den Wellenwiderstand erforderlichen Masse.

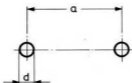


Bild 377

hc. Das Koaxialkabel

Das Koaxialkabel besteht nach Bild 378 aus einem Innenleiter und einem diesen Innenleiter umschliessenden Aussenleiter.

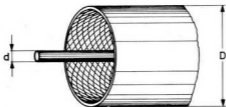


Bild 378

Als Dielektrikum werden hochwertige Isolierstoffe verwendet. Der Wellenwiderstand errechnet sich nach folgender Näherungsformel zu:

$$Z_W \approx 138 \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \cdot \lg \left(\frac{D}{d} \right) \Omega$$

i. Antennenanpassgeräte

Antennenanpassgeräte dienen der Abstimmung der Antenne und der Anpassung an die Senderendstufe.

Wir wissen, dass sich eine Antenne abstimmen lässt, indem man sie durch Serienschaltung einer Induktivität künstlich verlängert oder mit einer Kapazität künstlich verkürzt. Die so abgestimmte Antenne wirkt im Speisungspunkt als Ohmscher Widerstand. Dieser Ohmsche Widerstand ist für die Senderendstufe der Belastungswiderstand; er muss deshalb an die Endstufe optimal angepasst werden. Diese Anpassung erfolgt über einen Hochfrequenztransformator. Das Antennenanpassgerät erfüllt somit zwei Aufgaben: es *stimmt* die Antenne *ab* und *passt* diese der Endstufe *an*. Bild 379 zeigt ein Antennenanpassgerät, das universell verwendbar ist. Es lassen sich damit praktisch alle Antennen abstimmen und anpassen.

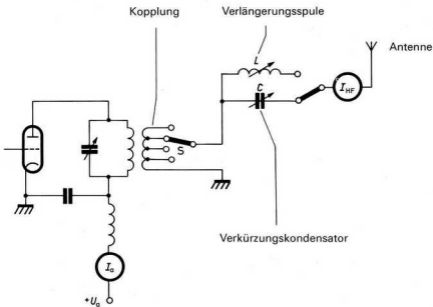


Bild 379

Die angeschlossene unabgestimmte Antenne kann wahlweise mit dem Kondensator C verkürzt oder mit der Spule L verlängert werden. Mit dem Kopplungsschalter S wird die Kopplung solange verstellt, bis der Anodenstrom den höchst zulässigen Wert erreicht hat. Da Antennen im allgemeinen niederohmig angepasst werden – man betreibt sie dabei als Serieresonanzkreis – wird die richtige Abstimmung am Antennenstrommaximum erkannt.

Ein einfaches und qualitativ gut arbeitendes Anpassgerät für Antennen ist das π -Filter. Diese auch unter dem Namen **Collinsfilter** bekannte Einrichtung erlaubt auf einfache Art mit geringem Aufwand die Abstimmung und Anpassung der meisten Antennen. Bild 380 zeigt die Schaltung eines Collinsfilters.

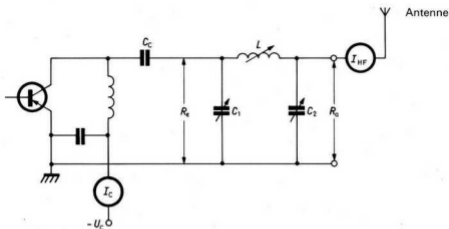


Bild 380

Um die Transformationsvorgänge im Filter besser verstehen zu können, zeichnen wir nach Bild 381 ein Ersatzschaltbild, worin das Filter als Parallelschwingkreis dargestellt wird. Die Transformation erfolgt dabei durch kapazitive Spannungsteilung.

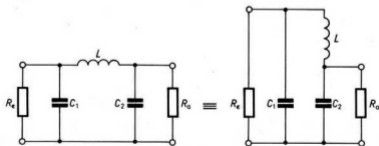


Bild 381

Unter der Voraussetzung, dass R_e grösser ist als R_a , lassen sich die Filterelemente recht einfach berechnen. Die Berechnungsformeln sollen aufgeführt werden, ohne dass auf deren Herleitung näher eingegangen wird.

$$C_1 = \frac{2 Q_L}{\omega \cdot (R_e + \sqrt{R_a \cdot R_e})} \quad Q_L = \text{Betriebsgüte des Filters}$$

$$C_2 = \frac{2 Q_L}{\omega \cdot (R_a + \sqrt{R_a \cdot R_e})}$$

$$L = \frac{R_a + R_e + 2 \sqrt{R_a \cdot R_e}}{2 Q_L \cdot \omega}$$

Für Röhrensender wählt man in der Regel eine Betriebsgüte von 10, während Transistorendstufen eine solche von etwa 5 verlangen.

Wir wollen anhand von zwei Beispielen die Dimensionierung eines Collinsfilters zeigen.

Eine abgestimmte Viertelwellenantenne nach Bild 382 mit einem Fusspunktwi- derstand von 65Ω soll an eine Röhrendstufe angepasst werden. Die Röhre verlangt einen Arbeitswiderstand von $3 \text{ k}\Omega$. Die Sendefrequenz beträgt 4 MHz .

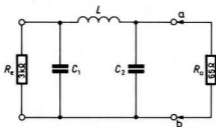


Bild 382

Vorgehen:

1. Schritt: Berechnen von C_1

– Grundformel anschreiben

$$C_1 = \frac{2 Q_L}{\omega \cdot (R_e + \sqrt{R_a \cdot R_e})}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$C_1 = \frac{2 \cdot 10}{2 \pi \cdot 4 \cdot 10^6 (3 \cdot 10^3 + \sqrt{3 \cdot 10^3 \cdot 65})}$$

$$C_1 = 231 \text{ pF}$$

2. Schritt: Berechnen von C_2

– Grundformel anschreiben

$$C_2 = \frac{2 Q_L}{\omega \cdot (R_a + \sqrt{R_a \cdot R_e})}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$C_2 = \frac{2 \cdot 10}{2 \pi \cdot 4 \cdot 10^6 (65 + \sqrt{3 \cdot 0,065 \cdot 10^3})}$$

$$C_2 = \mathbf{1571 \text{ pF}}$$

3. Schritt: Berechnen von L

– Grundformel anschreiben

$$L = \frac{R_a + R_e + 2 \sqrt{R_a \cdot R_e}}{2 Q_L \cdot \omega}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$L = \frac{65 + 3 \cdot 10^3 + 2 \sqrt{65 \cdot 3 \cdot 10^3}}{2 \cdot 10 \cdot 2 \pi \cdot 4 \cdot 10^6}$$

$$L = \mathbf{7,86 \mu\text{H}}$$

Im nächsten Beispiel soll untersucht werden, wie das Filter zu dimensionieren ist, wenn die Antenne **nicht** abgestimmt ist, und somit eine Blindkomponente aufweist. Bild 383 zeigt die Schaltung.

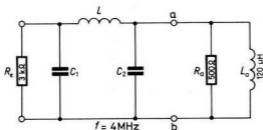


Bild 383

Die Antenne erscheint an den Anschlussklemmen a und b als komplexer Widerstand, bestehend aus der Parallelschaltung von einem Wirkanteil und einem induktiven Blindanteil. Es ist nun Aufgabe des Filters, den Blindanteil zu kompensieren. Zu diesem Zweck wird C_2 so gross gewählt, dass der induktive Widerstand unterdrückt wird.

Vorgehen:

1. Schritt: Bestimmen von C_1

– Grundformel anschreiben

$$C_1 = \frac{2 Q_L}{\omega \cdot (R_e + \sqrt{R_e \cdot R_g})}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$C_1 = \frac{2 \cdot 10}{2 \pi 4 \cdot 10^6 (3 \cdot 10^3 + \sqrt{0,5 \cdot 3 \cdot 10^6})}$$

$$C_1 = \mathbf{188 \text{ pF}}$$

2. Schritt: Bestimmen von L

– Grundformel anschreiben

$$L = \frac{R_g + R_e + 2 \sqrt{R_e \cdot R_g}}{2 Q_L \cdot \omega}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$L = \frac{0,5 \cdot 10^3 + 3 \cdot 10^3 + 2 \sqrt{0,5 \cdot 3 \cdot 10^6}}{2 \cdot 10 \cdot 2 \pi 4 \cdot 10^6}$$

$$L = \mathbf{11,8 \text{ } \mu\text{H}}$$

3. Schritt: Bestimmen von C_2

C_2 wird wie im ersten Beispiel errechnet. Zum errechneten Wert ist die Kapazität zu addieren, die zur Kompensation des induktiven Blindwiderstandes notwendig ist.

– Grundformel anschreiben

$$C_2' = \frac{2 Q_L}{\omega \cdot (R_g + \sqrt{R_g \cdot R_e})}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$C_2' = \frac{2 \cdot 10}{2 \pi \cdot 4 \cdot 10^6 (0,5 \cdot 10^3 + \sqrt{0,5 \cdot 3 \cdot 10^6})}$$

$$C_2' = \mathbf{462 \text{ pF}}$$

– Bestimmen des induktiven Blindwiderstandes

– Grundformel anschreiben

$$X_L = \omega L$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$X_L = 2 \pi 4 \cdot 10^6 \cdot 120 \cdot 10^{-6}$$

$$X_L = \mathbf{3,02 \text{ k}\Omega}$$

– Bestimmen der Kompensationskapazität C_k

– Grundformel anschreiben

$$C_k = \frac{1}{\omega X_{C_k}}$$

– Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen

$$C_k = \frac{1}{2 \pi 4 \cdot 10^6 \cdot 3,02 \cdot 10^3}$$

$$C_k = \mathbf{13,2 \text{ pF}}$$

- Bestimmen von C_2
 - Grundformel anschreiben $C_2 = C_2' + C_k$
 - Zahlenwerte einsetzen und ausrechnen $C_2 = 462 + 13,2$
- $$C_2 = 475,2 \text{ pF}$$

Wäre die Antenne kapazitiv, so müsste C_2 um den Betrag des kapazitiven Anteils verringert werden.

Wie die Beispiele zeigen, lassen sich die meisten Antennen über ein Collinsfilter abstimmen und anpassen. Das Filter weist zudem eine gute Oberwellenunterdrückung auf, da es seinem Wesen nach als Tiefpassfilter wirkt. Dank seinen universellen Möglichkeiten ist es oft in Senderendstufen anzutreffen.

4. Das Wesentliche

Um einen von einem Wechselstrom durchflossenen Leiter entsteht ein elektromagnetisches Feld. Das elektrische und das magnetische Feld sind immer miteinander verknüpft; sie stehen senkrecht aufeinander. Die Abstrahlung hat ihre Ursache in der endlichen Laufzeit des elektromagnetischen Feldes.

Jede Antenne wirkt elektrisch als Schwingkreis.

Auf der Eindrahtantenne bilden sich stehende Wellen. Diese entstehen durch Überlagerung der hinlaufenden und der zurücklaufenden Welle. Am Ende der Antenne bildet sich immer ein Stromknoten und ein Spannungsbauch. Das elektrische Verhalten einer Eindrahtantenne kann einfach grafisch ermittelt werden, indem man vom Antennenende aus beginnend Strom und Spannung aufzeichnet. Der so ermittelte Stand von Strom und Spannung am Speisungspunkt gibt Auskunft, ob die Antenne als Serieschwingkreis, als Parallelschwingkreis, kapazitiv oder induktiv wirkt.

Die Viertelwellenantenne wirkt im Speisungspunkt niederohmig, sie stellt einen Serieschwingkreis dar.

Die Halbwellenantenne dagegen wirkt hochohmig als Parallelschwingkreis.

Der Strahlungswiderstand ist eine reine Rechengrösse. Man stellt sich die abgestrahlte Leistung im Strahlungswiderstand verbraucht vor. Der Strahlungswiderstand bezieht sich immer auf das Strommaximum der Antenne.

Die effektive Antennenhöhe ist eine reine Rechengrösse. Ihr Wert ist so gewählt, dass sie mit dem Strom im Speisungspunkt die gleiche Energie abstrahlen würde, wie die tatsächlich vorhandene Antenne mit dem auf ihr ungleichmässig verteiltem Strom.

Die Abstrahlcharakteristik einer Antenne wird in zwei Strahlungsdiagrammen festgehalten. Das Horizontaldiagramm zeigt die Abstrahlung in horizontaler Richtung, das Vertikaldiagramm in vertikaler Richtung.

Wir kennen verschiedene Antennenformen:

- Der Viertelwellenvertikalstrahler ist ein Rundstrahler. Er wird niederohmig gespeist, da er als Serieschwingkreis wirkt.
- Der Halbwellendipol wird in der Mitte gespeist. Er ist gesamthaft eine halbe Wellenlänge lang und wirkt im Speisungspunkt niederohmig. Er wird meistens horizontal montiert und weist dann ein achterförmiges Horizontalstrahlungsdiagramm auf.
- Der Ganzwellendipol wird in der Mitte hochohmig gespeist. Er ist gesamthaft eine Wellenlänge lang. Sein Wirkungsgrad ist etwas besser als derjenige des Halbwellendipols. Die Abstrahlcharakteristik ist dieselbe wie beim Halbwellendipol.
- Der Faltdipol ist aus der Parallelschaltung zweier Halbwellendipole entstanden. Er wird in der Mitte gespeist, die Speisung erfolgt mit 300Ω . Das Strahlungsdiagramm entspricht demjenigen des Halbwellendipols. Er ist breitbandiger als ein Halbwellendipol.
- Die Langdrahtantenne ist länger als die Betriebswellenlänge. Sie strahlt primär in Richtung der Drahtachse.
- Die V-Antenne besteht aus zwei V-förmig angelegten Langdrahtantennen. Der Antennengewinn nimmt mit wachsender Schenkellänge zu. Die V-Antenne strahlt primär in der Richtung der Drahtachse.
- Die Rhombusantenne hat die Form eines Rhombus. Sie ist durch die Hintereinanderschaltung von zwei V-Antennen entstanden. Sie arbeitet sehr breitbandig. Wird sie ohne Abschlusswiderstand betrieben, so strahlt sie in beiden Richtungen der Hauptachse. Wird sie dagegen mit einem Belastungswiderstand abgeschlossen, so strahlt sie nur noch in Richtung des Abschlusswiderstandes.
- Die Rahmenantenne ist eine reine Empfangsantenne. Sie ist richtempfindlich, es lassen sich damit Sendestandorte anpeilen.
- Die Ferritantenne besteht aus einem Ferritstab mit Antennenspule; sie ist wie die Rahmenantenne zur Funkpeilung geeignet.
- Dipole können zu Richtantennen ausgebaut werden, wenn hinter dem Strahler ein um einige Procente längerer Reflektor und vor dem Strahler einer oder mehrere um einige Procente kürzere Direktoren angebracht werden. Solche Yagi-Antennen weisen ein scharf gebündeltes Richtdiagramm auf.

Hochfrequenzleitungen dienen zur Speisung von Antennen. Sie arbeiten strahlungsfrei, wenn sie richtig angepasst und abgeschlossen sind. Empfänger oder Sender und Antenne müssen an den Wellenwiderstand der Hochfrequenzleitung angepasst werden. Der Wellenwiderstand ist frequenzunabhängig, er ist bestimmt durch die geometrischen Abmessungen der Leitung und durch das verwendete Dielektrikum. Leitungen sind nicht verlustfrei, sie weisen eine bestimmte Dämpfung auf. Eine Leitung, die mit ihrem Wellenwiderstand abgeschlossen ist, verhält sich elektrisch wie eine unendlich lange Leitung; es entstehen auf ihr keine stehenden Wellen. Sobald eine Leitung nicht mit ihrem Wellenwiderstand beidseitig abgeschlossen ist, bilden sich stehende Wellen, da nicht alle Energie weitergeleitet wird, ein Teil wandert zum Generator zurück. Als Leitungen werden Zweidrahtleitungen oder Koaxialkabel verwendet.

Antennenanpassgeräte haben den Zweck, eine unabgestimmte Antenne elektrisch abzustimmen und den Fusspunktwiderstand an die Senderendstufe anzupassen. Die Abstimmung der Antenne erfolgt durch Verkürzung mit einem Serie-kondensator oder Verlängerung mit einer Serieinduktivität. Die Anpassung erfolgt über einen Transformator. Ein universelles Anpassgerät ist das Collinsfilter. Es erlaubt Abstimmung und Anpassung zugleich.

5. Repetitionsaufgaben (Lösung Seite 501)

- a) Wie verhalten sich die auf einem vom Wechselstrom durchflossenen Leiter entstehenden Felder zueinander?
- b) Erklären Sie, warum eine Stabantenne strahlt.
- c) Auf jeder Eindrahtantenne gibt es einen Ort, an dem Strom- und Spannungsverteilung bei allen Antennen gleich sind. Welches ist dieser Ort und wie verhalten sich dort Strom und Spannung zueinander?
- d) Erklären Sie, warum sich auf einer Eindrahtantenne stehende Wellen bilden.
- e) Wie ist die Impedanz einer Viertelwellenantenne im Speisungspunkt?
- f) Welches ist die elektrische Ersatzschaltung einer Viertelwellenantenne?
- g) Wie ist die Impedanz einer Halbwellenantenne im Speisungspunkt?
- h) Welches ist die elektrische Ersatzschaltung einer Halbwellenantenne?
- i) Welches ist die elektrische Ersatzschaltung einer Antenne, die kürzer ist als ein Viertel der Wellenlänge?
- k) Wie ist die Speisungsimpedanz einer Antenne, die drei Viertel einer Wellenlänge misst?
- l) Welches ist die elektrische Ersatzschaltung einer Antenne, die länger als eine halbe Wellenlänge, aber kürzer als drei Viertel einer Wellenlänge ist?
- m) Definieren Sie den Ausdruck «Strahlungswiderstand»
- n) In welchen Fällen ist der Strahlungswiderstand mit dem Fusspunktwiderstand praktisch identisch?
 - o) Was verstehen Sie unter dem Ausdruck «effektive Antennenhöhe»?
 - p) Welche zwei Arten von Strahlungsdiagrammen kennen Sie?
 - q) Welches Strahlungsdiagramm ergibt sich für die Horizontalstrahlung des Viertelwellenvertikalstrahlers?
- r) Zu was dienen Gegengewichte?
- s) Wie wirkt der Halbwellendipol im Speisungspunkt?
- t) Welche Form hat das Horizontalstrahlungsdiagramm des Halbwellendipols?
- u) Welchen Vorteil weist der Ganzwellendipol gegenüber dem Halbwellendipol auf?
- v) Kennen Sie einen breitbandigen Dipol?
- w) In welcher Richtung strahlt die Langdrahtantenne?
- x) In welcher Richtung strahlt die V-Antenne?
- y) Wie wird das Horizontalstrahlungsdiagramm einer nicht abgeschlossenen Rhombusantenne verändert, wenn diese mit einem Ohmschen Widerstand abgeschlossen wird?
- z) Welche Antennenformen eignen sich nur für den Empfang?
 - aa) Welches sind ihre spezifischen Eigenschaften?
 - ab) Welches ist der Zweck eines Reflektors für die Dipolantenne?
 - ac) Wie sind seine geometrischen Abmessungen?
 - ad) Wie kann die Richtwirkung einer Dipolantenne weiter erhöht werden?

- ae) Zu was dienen Hochfrequenzleitungen?
- af) Nennen Sie die beiden gebräuchlichsten Formen von Hochfrequenzleitungen.
- ag) Welche geometrischen Abmessungen muss eine Hochfrequenzleitung aufweisen, damit sie als Transformator wirken kann?
- ah) Was stellt eine Hochfrequenzleitung von einer halben Wellenlänge am Eingang dar, wenn sie am Ende kurzgeschlossen ist?
- ai) Welches Verhalten zeigt eine Hochfrequenzleitung, die drei Viertel einer Wellenlänge lang ist, wenn sie am Ende offen ist?
- ak) Wie verhält sich eine am Ende offene Hochfrequenzleitung, die mehr als einen Viertel einer Wellenlänge lang, jedoch kürzer als eine halbe Wellenlänge ist?
- al) Wie verhält sich eine Hochfrequenzleitung, die mit ihrem Wellenwiderstand abgeschlossen ist?
- am) Wann bilden sich auf einer Hochfrequenzleitung stehende Wellen?
- an) Durch welche Einwirkungen wird eine Hochfrequenzleitung elektrisch verkürzt?
- ao) Was ist eine Lecherleitung?
- ap) Welche Faktoren bestimmen den Wellenwiderstand einer Zweidrahtleitung?
- aq) Welche Faktoren bestimmen den Wellenwiderstand einer Koaxialleitung?
- ar) Welches sind die Aufgaben eines Antennenanpassgerätes?
- as) Wie können Antennen elektrisch verkürzt werden?
- at) Wie können Antennen elektrisch verlängert werden?
- au) Wie erfolgt die Anpassung der abgestimmten Antennen an die Endstufe?
- av) Welches sind die Vorteile des Collinsfilters?