Lehrschriften für die Aus- und Weiterbildung
des Personals der Zivilen Luftfahrt der DDR

Grundlagen der HF-Technik für Flugzeugfunkanlagen

INTERFLUG
Gesellschaft für internationalen Flugverkehr m. b. H.

Autor: Ingenieur Wilfried Schulze

Lektor: Dipl.-Ing Peter Quittel

Technische Redaktion: Bruno Lau

Für die Betriebsschule der INTERFLUG erarbeitet und
für Schulungszwecke bestimmt.
Die Lehrschrift besitzt keine Gültigkeit im Sinne von
technischer Dokumentation und Betriebsdokumentation.
Nicht zum Verkauf im öffentlichen Buchhandel zugelassen.
Nachdruck - auch auszugsweise - nur mit Genehmigung des
Verfassers bzw. des Herausgebers.

Herausgeber: INTERFLUG - Technische Dokumentationsstelle
Berlin - Schönefeld
Dezember 1970

Ordnungs-Nummer: FF-A-4/7 Ag/130/66/70 TDZL-785-

Inhaltsverzeichnis

		Seite
0.	Einleitung	1
1.	Frequenzbereiche und ihre Ausbreitungs-eigenschaften	3
1.1.	Frequenzaufteilung	3
1.2.	Wellenausbreitung und Reichweite in den einzelnen Bereichen	6
2.	Flugzeugantennen	12
2.1.	Kurzwellen- und Mittelwellenantennen	13
2.2.	Ultrakurzwellen-Antennen	15
2.3.	Richtantennen	17
2.3.1.	UKW-Bereich	17
2.3.2.	MW- und LW-Bereich	17
2.3.3.	Funkhöhenmesser	21
2.3.4.	Radar	23
2.3.5.	Sekundär-Radar	27
2.3.5.1.	dm-Bereich	27
2.3.5.2.	cm-Bereich	28
2.4.	Antennenspeiseleitungen	28
3.	Empfänger, Prinzipien und Haupteigenschaften	33
3.1.	Geradeausempfänger	33
3.2.	Überlagerungsempfänger	34
4.	Empfängerbaugruppen	38
4.1.	Mischstufe	38
4.1.1.	Allgemeines	38
4.1.2.	zur Mischertheorie	39
4.1.3.	praktische Realisierung	39
4.1.4.	Mischergrundschaltungen	39
4.2.	Oszillatoren	42
4.2.1.	Grundsätzliches	42
4.2.2.	Prinzip der Schwingungserzeugung	42
4.2.3.	ausgeführte Oszillatorschaltungen	46
4.2.3.1.	Meißneroszillator	46

		Seite
4.2.3.2.	Hartley-Oszillator	47
4.2.3.3.	Colpitts-Oszillator	50
4.3.	HF- und ZF-Verstärker	52
4.3.1.	HF-Verstärker (Eingangsstufen)	52
4.3.2.	ZF-Verstärker	54
4.3.3.	Die Bandbreite und die Empfindlichkeit von ZF- und HF-Verstärkern	58
4.3.3.1.	Allgemeines zur Bandbreite und ihre Abhängigkeit von den Schaltelementen	58
4.3.3.2.	Möglichkeiten der Bandbreiten- und Selektionsänderung	61
4.3.3.3.	Rechnerische Behandlung der Bandbreite und Selektion	62
4.3.3.4.	Empfindlichkeit und Rauschen	65
4.3.4.	Automatische Verstärkungsregelung	68
4.4.	Demodulatoren und Diskriminatoren	71
4.4.1.	Amplitudendemodulatoren	71
4.4.2.	Frequenzdemodulatoren	73
4.4.2.1.	Flankendemodulatoren	73
4.4.2.2.	Phasendiskriminator	75
4.4.2.3.	Verhältnisgleichrichter (Ratiodetektor)	77
4.5.	Frequenznachstimmung für Oszillatoren	78
4.5.1.	Allgemeine Betrachtungen	78
4.5.2.	Prinzipielle Ausführung von Nachstimmschaltungen	81
4.5.2.1.	Oszillatornachstimmung mittels Reaktanzröhren, Kapazitätsdioden und Ferritvariometern	81
4.5.2.2.	Oszillatornachstimmung bei cm-Empfängern (Radar, Dopplernavigator)	84
5.	Sender, Prinzipien und Haupteigenschaften	89
5.1.	Allgemeine Betrachtungen	89
5.2.	Grundfunktionen eines Senders und grundsätzlicher Aufbau	90
5.3.	Einstufige Sender	90
5.4.	Mehrstufige Sender	93

		Seite
6.	Sendefrequenzaufbereitung mehrstufiger Sender	95
6.1.	Prinzip der Sendefrequenzaufbereitung	95
6.1.1.	Variabler Oszillator (VFO)	98
6.1.2.	Quarzoszillatoren	99
6.1.2.1.	Prinzip	99
6.1.2.2.	Grundschaltungen	101
6.1.3.	Frequenzvervielfachung und Teilung	101
6.1.4.	Rastererzeugung	104
7.	Senderendstufen	107
7.1.	Eigenschaften und Besonderheiten	108
7.2.	Antennenfilter	110
8.	Modulation	116
8.1.	Allgemeines über die Modulation	116
8.2.	Modulationsarten	116
8.3.	Theorie der Modulation	117
8.3.1.	Amplitudenmodulation	117
8.3.2.	Frequenzmodulation	121
8.4.	Modulationsverfahren	123
8.4.1.	Bremsgittermodulation	124
8.4.2.	Anoden-Schirmgitter-Modulation	125
9.	Fernsteuerung von Bordanlagen	128
9.1.	Allgemeine Betrachtungen	128
9.2.	Selsynübertragungen	129
9.2.1.	Einfache Fernanzeigesysteme	129
9.2.2.	Systeme mit Servomotoren	131
9.3.	Schrittschaltsysteme	133
9.4.	Servosysteme	137
9.4.1.	Grundsätzlicher Aufbau von Servosystemen mit Potentiometern	138
9.4.2.	Servomotoren	141
9.4.2.1.	Gleichstrommotoren	142
9.4.2.2.	Wechselstrommotoren	143
9.4.3.	Servoverstärker	145
9.4.3.1.	Schaltungsbeispiele für Servoverstärker	145

		Seite
10.	Magnetverstärker	151
10.1.	Physikalische Grundlagen	151
10.2.	Grundschaltungen	157
Anlagen		
	Antworten und Lösungen	161
	Literaturverzeichnis	169

0. Einleitung

Mit der vorliegenden Lehrschrift soll der Kreis der Studierenden im Bereich der zivilen Luftfahrt angesprochen werden, für deren berufliche Tätigkeit Grundlagenkenntnisse auf dem Gebiet der Nachrichtentechnik notwendig sind.
Der fachliche Inhalt entspricht den Anforderungen der Technikerausbildung und ist außerdem zur Unterstützung bei Umschulung und Ausbildung von Flug- und Flugzeugwartungspersonal geeignet.
Für das Verständnis der behandelten Probleme sind grundsätzlich Kenntnisse über die Bauelemente der Nachrichtentechnik sowie der Elektrotechnik erforderlich.
Bei der Behandlung des Stoffes wurde weitgehend auf komplizierte mathematische Ableitungen verzichtet und nur dort, wo es zum Verständnis notwendig erschien, wurden Endgleichungen angeführt.
Aus der Vielzahl der Schaltungen und Systeme der Nachrichtentechnik wurden nur die gebräuchlichsten und wichtigsten Grundprobleme ausgewählt und behandelt. Für über diesen Rahmen hinaus interessierte Leser wird die am Schluß angegebene Literatur empfohlen.
Die am Ende jedes Abschnittes gegebene Zusammenfassung stellt die

Kernprobleme des jeweiligen Gebietes heraus.
Die Beantwortung der Kontrollfragen bzw. die Lösung der Aufgaben zu jedem Abschnitt geben dem Leser Aufschluß darüber, wie weit der beahndelte Stoff von ihm verstanden wurde.
Zur Selbstkontrolle sind dazu am Schluß der Lehrschrift die Antworten und Lösungen angegeben.

1. Benutzte Frequenzbereiche und ihre Ausbreitungseigenschaften

1.1. Frequenzaufteilung

Die Frequenzbereiche für den Funkverkehr und für die Funkortung werden auf internationaler Ebene durch den IFRB (International Frequence Registration Board) registriert. Der IFRB ist einer der beratenden Ausschüsse des Internationalen Fernmeldevereins. Er hat die Aufgabe, die Mitgliedsländer bei technischen Festlegungen zu unterstützen und Empfehlungen auszuarbeiten. Nichtmitgliedsländer sind bestrebt, ihre Systeme den Festlegungen anzupassen.
In der zivilen Luftfahrt gibt es zwei Gruppen von Funkdiensten:

- Funkverkehrsdienste zur Übermittlung von Nachrichten;
- Funkortungsdienste als Navigationshilfen und zur Flugsicherung.

Die Funkverkehrsdienste belegen die Kurzwellen- und Ultrakurzwellenbänder. Die Funkortungsdienste (Funknavigations- und Funkmeßeinrichtungen) belegen einen sehr breiten Frequenzbereich. Für Funknavigationseinrichtungen wird vorwiegend der Lang-, Mittel- und Ultrakurzwellenbereich, für Funkmeßeinrichtungen der dm- bzw. cm-Wellenbereich verwendet.
Ein Frequenzverteilungsplan für die Funkdienste der zivilen Luftfahrt ist in Tabelle 1 dargestellt. Tabelle 2 gibt eine Übersicht der Frequenzbereiche und der zugehörigen Wellenlängen, die für die Funktechnik allgemein von Bedeutung sind.
Einige der in Tabelle 1 angeführten Funknavigationsverfahren sind nur in verschiedenen Regionen in Anwendung (z.B. auf Transatlantikstrecken Decca und LORAN).
Bei den Funkmeßeinrichtungen handelt es sich überwiegend um autonome Systeme, d.h. Sende-Empfangsanlagen befinden sich im Flugzeug. Somit sind die Arbeitsfrequenzen unabhängig von Bodenstationen.

Die Wahl der Arbeitsfrequenzen wird bei diesen autonomen Systemen in erster Linie nach den technisch günstigsten Bedingungen vorgenommen.
Es liegt hier keine Bindung an internationalen Festlegungen vor.
Anders liegt der Fall bei den Funkverkehrs- und bei Navigationsanlagen. Hier ist jedes Land bei der Durchführung von internationalem Luftverkehr gezwungen, die international verwendeten Frequenzen bzw. die in den anzufliegenden und zu überfliegenden Gebieten vorhandenen Navigationssysteme zu verwenden.

Tabelle 1

Übersicht über die Funksysteme der zivilen Luftfahrt

	Frequenzen	Anmerkungen
Funkverkehrsanlagen		
Kurzwellenanlagen	1,5... 30,0 MHz	Weitverkehr bis 8000 km
Ultrakurzwellenanlg.	118,0...150,0 MHz	Nahverkehr bis 300 km
Funknavigationsanlagen		
Markierungsfunkfeuer	75 MHz	
Ungerichtete Funkfeuer	150...1300 KHz	"NDB"; bis 300 km
Instrumenten-Landesysteme	108...112 MHz Landekurs 329...335 MHz Gleitweg	"ILS"

	Frequenzen	Anmerkungen
Mehrstrahl-Funkfeuer	200...400 kHz	"VAR"; bis 400 km
Allrichtungs-Funkfeuer	108...118 MHz	"VOR"; bis 300 km
Langstrecken-Ortungssysteme	70...128 KHz Decca 1750...1950 KHz LORAN	komplizierte Bodeneinrichtungen
Azimut-Entfernungssysteme	112...118 MHz Azimut 962...1213 MHz Entfernung	"VOR-DME", "VORTAC"; bis 300 km
<u>Funkmeßanlagen</u>		
Wetter- und Hindernis-Radar	9... 10 GHz	Autonome Bordsysteme
Doppler-Radar	9... 10 GHz	Autonome Bordsysteme
Höhenmesser	444 MHz; 2 GHz	Autonome Bordsysteme
Sekundär-Radar	1030 MHz, 1090 MHz, 9370 MHz	Sende- u. Empf.-Frequenzen unterschiedlich

Tabelle 2

Übersicht über die in der Funktechnik gebräuchlichen Frequenzbereiche und deren Bezeichnungen

Frequenzbereich		Wellenlänge λ		Bezeichnung	Kurzzeichen
30 kHz...	300 kHz	10 km...	1 km	Langwellen	LW
300 kHz...	3 MHz	1000 m ...	100 m	Mittelwellen	MW
3 MHz...	30 MHz	100 m ...	10 m	Kurzwellen	KW
30 MHz...	300 MHz	10 m ...	1 m	Ultrakurzwellen	UKW
300 MHz...	3000 MHz	100 cm...	10 cm	Dezimeterwellen	UHF
3000 MHz..	30000 MHz	10 cm...	1 cm	Zentimeterwellen	SHF

Die in Tabelle 2 angegebenen scharfen Abgrenzungen zwischen den einzelnen Bereichen werden in der Praxis nicht gemacht, da im physikalischen Verhalten der Wellen die einzelnen Bereiche natürlich fließend ineinander übergehen. Die angegebenen Bezeichnungen dienen nur der Sofortorientierung.

1.2. Wellenausbreitung und Reichweite in den einzelnen Bereichen

Die Ausbreitung der elektromagnetischen Wellen in den einzelnen Frequenzbereichen ist bezüglich der physikalischen Fortpflanzung sehr unterschiedlich.
Die Ausbreitung ist ein Kriterium für die Reichweite von abgestrahlten elektromagnetischen Wellen.

Man unterscheidet bei der Ausbreitung von Wellen, unabhängig von der Frequenz, zwischen Boden- und Raumwellen.
Die Bodenwelle bildet sich aus den elektromagnetischen Wellen, die sich entlang der Erdoberfläche ausbreiten. Das Verhalten dieser Wellen ist sehr stark von der Beschaffenheit der Erdoberfläche abhängig. Darunter sind die elektrischen Eigenschaften (Leitfähigkeit) zu verstehen.
Als Raumwellen werden die elektromagnetischen Wellen bezeichnet, die unter den verschiedensten Winkeln in die Atmosphäre eindringen. Diese Wellen werden durch die elektrische Struktur der Atmosphäre beeinflußt. Die Raumwellen werden an der Heaviside-Schicht (Ionosphären-Schicht) reflektiert und in Abhängigkeit des Winkels, mit dem sie auf dieser auftreffen, gebrochen.
Durch diese sich nach den Gesetzen der Optik vollziehenden Reflektion, werden die elektromagnetischen Wellen zur Erdoberfläche zurückgeworfen und an dieser abermals reflektiert.
Die Höhe und Dicke der Heaviside-Schicht hängt von der Intensität und dem Winkel der Sonneneinstrahlung ab. Demzufolge sind die Ausbreitungsbedingungen, Qualität und Reichweite der Übertragung von der Tages- und Jahreszeit abhängig. Bei intensiver Sonneneinstrahlung ist die ultraviolette Strahlung groß. Dadurch tritt eine starke Ionisation der Luftschichten zwischen 50 und 300 km Höhe auf. Da der Ionisationsgrad auf Grund des mit zunehmender Höhe abnehmenden Luftdruckes auch abnimmt, unterteilt man diese Schichten in D - E - F - Schicht. Die E- und die F - Schicht beeinflussen durch ihren unterschiedlichen Ionisationsgrad auch die Frequenzen mit unterschiedlicher Wellenlänge verschieden stark.
Wie schon gesagt, ist die Stärke der ultravioletten Strahlung für die Ionisation verantwortlich. Demzufolge ist im Sommer und speziell in der Mittagszeit die Heaviside-Schicht wesentlich dicker und näher über der Erdoberfläche als im Winter. Die Ionisationsschicht ändert also ihre Struktur. Die Reichweiten, die durch die Raumwellen erreicht werden, sind in einigen Frequenzbereichen starken Schwankungen unterworfen.

Aus diesem Grunde werden im Kurzwellenbereich verschiedene Tages- und Nachtfrequenzen verwendet, denn durch Änderung der Wellenlänge können diese Einflüsse in gewissem Grade kompensiert werden.
Die Ausbreitung durch Reflexion an der Heaviside-Schicht trifft für den Langwellenbereich (λ = 2000 bis 20000 m), für den Mittelwellenbereich (λ = 200 bis 2000 m) und für den Kurzwellenbereich (λ = 10 bis 200 m) zu. Die gleichzeitige Abstrahlung der Bodenwelle hat in dem LW-, MW- und KW-Bereich unterschiedliche Reichweiten.
Im Langwellenbereich kann die Bodenwelle bei Entfernungen bis 1000 km, im Mittelwellenbereich dagegen nur wenige 100 km und im Kurzwellenbereich nur bis etwa 100 km genutzt werden. Die Bodenwelle ist im Gegensatz zur Raumwelle in ihrer Gleichmäßigkeit unabhängig von atmosphärischen Einflüssen. Außerhalb des Bereiches der Bodenwelle ist man jedoch ausschließlich auf die Raumwellen angewiesen (Weitverkehr).
Im KW-Bereich werden durch die Raumstrahlung (Raumwellen) sehr große Reichweiten erzielt. Man ist in der Lage, in Abhängigkeit von den schon erwähnten Einflüssen, der Frequenz und selbstverständlich von der Leistung des Senders, Reichweiten und mehreren 1000 km zu erreichen.
Unter günstigen Bedingungen sind Verbindungen rund um den Erdball möglich.
Oberhalb der Frequenz f = 30 MHz (λ = 10 m) im UKW-Bereich sowie im dm- und cm-Bereich tritt praktisch keine Reflexion an der Heaviside-Schicht auf. Die entstehende Raumwelle ist so klein, daß sie völlig ohne Bedeutung ist. Somit kann im Wellenbereich $\lambda < 10$ m gewissermaßen von einer optischen Ausbreitung gesprochen werden. Demzufolge sind in diesem Wellenbereich nur Reichweiten in Abhängigkeit der Höhe der Antennen (Sender, Empfänger) bis zum Horizont möglich. Bei Frequenzen f > 30 MHz treten keine atmosphärischen Ausbreitungsbeeinflussungen mehr auf. Die optische Ausbreitung wird mit steigender Frequenz immer extremer. Während bei λ = 10 m noch eine ganz leichte Krümmung der Wellen durch

die untersten atmosphärischen Schichten auftritt, ist die Ausbreitung im dm- und cm-Bereich vollkommen geradlinig.
Im Kurzwellenbereich treten je nach Wellenlänge in Sendernähe mehr oder weniger große tote Zonen auf, die zwischen dem Ende der Bodenwelle und der ersten wiederkehrenden Raumwelle liegen. In diesen toten Zonen ist kein Empfang möglich.
Der Mittelwellenbereich dagegen weist keine toten Zonen auf, jedoch ist in diesem Bereich am Tage wegen der starken Dämpfung der Raumwellen an der D - und E - Schicht kein Fernempfang möglich.
Im Langwellenbereich herrschen in bezug auf die Raumwellen annähernd die gleichen Bedingungen wie beim Mittelwellenbereich, jedoch ist hier die Reichweite der Bodenwelle ca. 10 mal größer.
Eine schematische Darstellung der Ausbreitung der behandelten Wellenbereiche ist in Abb. 1 dargestellt.
Eine weitere störende Erscheinung ist der Schwund oder Fading. Er wird hervorgerufen durch Überlagerung der Raum- und der Bodenwelle am Empfangsort. Wenn beide Wellen mit gleicher Feldstärke und mit 180° Phasenunterschied eintreffen, kommt es zur völligen Auslöschung des Empfanges. Hierbei handelt es sich um den sogenannten Nahschwund. Auch dieser Nahschwund ist abhängig von atmosphärischen Einflüssen und wechselt ständig mehr oder weniger schnell.
Der Fernschwund oder Interferenzschwund entsteht durch den Wegunterschied zweier Raumwellen. Dabei wird ebenfalls eine Phasendifferenz von 180° oder annähernd 180° hervorgerufen, so daß es zu Modulationsverzerrungen kommt. Der Wegunterschied zweier Wellen entsteht durch verschieden starke Reflexionen an der E - bzw. F - Schicht,

Zusammenfassung

Die Frequenzbereiche für den Flugfunkverkehr und für die Flugnavigation werden international festgelegt. Die Funkverkehrsfrequenzen liegen im Kurz- und Ultrakurzwellenbereich. Die Funknavigations- und Funkortungsdienste arbeiten in den Lang -, Mittel-, Ultrakurz- und den dm- sowie cm-Wellenbereichen.

Einige Funknavigationsverfahren werden nur regional verwendet.
Bei der Ausbreitung von elektromagnetischen Wellen entstehen in allen Frequenzbereichen Raum- und Bodenwellen. Diese Raum- und Bodenwellen verhalten sich in den einzelnen Wellenbereichen verschieden und haben für den Empfang unterschiedliche Bedeutung.
Die Raumwellen größerer Wellenlänge werden an der Ionosphäre reflektiert. Die Ionosphäre ist in verschiedene Schichten unterteilt. Die Ausbreitung von elektromagnetischen Wellen hängt von mehreren Faktoren ab. Frequenzen oberhalb 30 MHz haben eine annähernd geradlinie Ausbreitung.
Im Kurzwellenbereich treten in Sendernähe tote Zonen auf. Störende und den Empfang beeinflussende Effekte sind der Nah- und Fernschwund.

Kontrollfragen

1. Welche Faktoren beeinflussen die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen ?
2. In welchem Wellenbereich hat die Bodenwelle die größte Reichweite und in welcher Größenordnung liegt diese ?
3. In welchem Frequenzbereich treten keine atmosphärischen Beeinflussungen auf und warum ist das der Fall ?
4. Wodurch entstehen die sogenannten toten Zonen im Kurzwellenbereich und warum entstehen diese toten Zonen nicht im Mittel- und Langwellenbereich ?

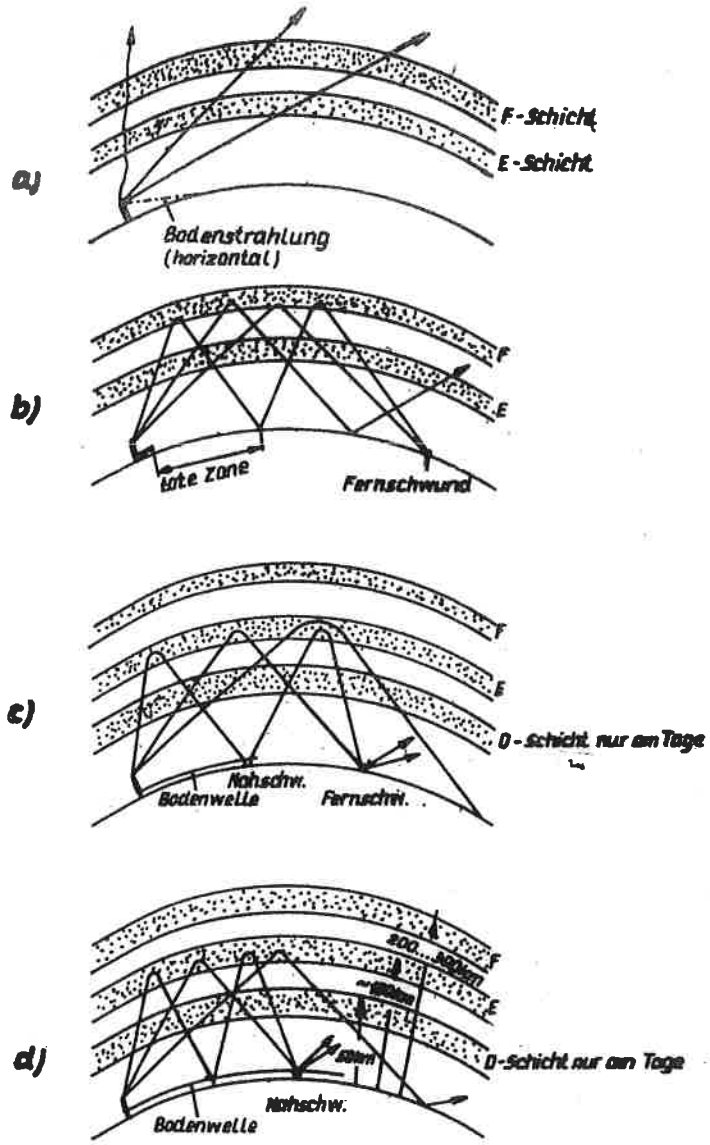


Abb. 1 Schematische Darstellung der Wellenausbreitung

a) cm-dm-UKW; c) MW
b) KW d) LW

2. Flugzeugantennen

Für die An- und Unterbringung der Antennen an Flugzeugen gibt es eine Reihe von Kriterien.

- Der Einbauort der Antennen muß so gewählt werden, daß die Antenne ihrer Aufgabe gerecht werden kann, d.h. die Funktion der zur Antenne gehörenden Bordanlage bestimmt die Unterbringung am oder im Flugzeug. Dabei sind selbstverständlich konstruktive Eigenheiten des Flugzeugtyps zu beachten, durch die eventuelle störende Beeinflussungen auftreten können. So müssen z.B. die Antennen der Blindlandebordanlagen immer dem Flugzeug voraus blicken, d.h. sie müssen im vorderen Teil untergebracht sein, da bei einer Blindlandung auf einem gerichteten Funkstrahl geflogen wird, der dem Flugzeug entgegengerichtet ist.
- Funktionsstörungen durch Vereisung und Störungen der aerodynamischen Verhältnisse, besonders bei Flugzeugen mit hoher Fluggeschwindigkeit, begegnet man dadurch, daß vielfach die Antennen innerhalb der Flugzeugkonturen untergebracht werden bzw. durch Verkleidungen aus nichtleitenden Materialien (Isolierstoffe) abgedeckt werden.

Entsprechend der Wellenlänge der abzustrahlenden oder zu empfangenen elektromagnetischen Wellen sowie der Funktion der zugehörigen Funkanlage, werden Antennen von unterschiedlicher Art und mit unterschiedlichen Diagrammen verwendet. Prinzipiell unterscheiden sich Flugzeugantennen nicht von denen, die allgemein bei anderen Funkdiensten eingesetzt werden.
Man kann die Antennen in zwei Gruppen unterteilen:

- Antennen mit Rundstrahl-Diagramm;
- Antennen mit Richt-Diagramm.

Für den Funkverkehr zur Nachrichtenübermittlung werden ausschließlich Antennen mit Rundstrahl-Diagrammen angewendet, deren Idealfall ein Kreis, dessen Mittelpunkt die Antenne ist, darstellt.

Für die Navigation und die Funkortung werden bis auf wenige Ausnahmen mehr oder weniger stark gerichtete Antennensysteme mit unterschiedlichen Diagrammen eingesetzt.

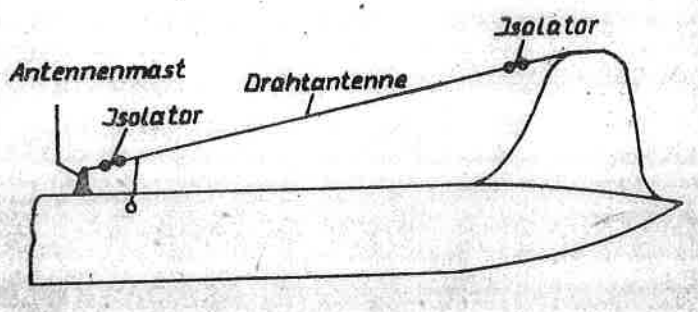
2.1. Kurzwellen- und Mittelwellenantennen

Die Kurzwellen- und Mittelwellenantennen sind überwiegend als Draht- oder Stabantennen ausgeführt. Dabei ist unter Stabantenne ein Rund- oder Hohlmaterial zu verstehen, das auf Isolatoren längs des Flugzeugrumpfes montiert ist.
Die Diagramme dieser Antennen haben, wie schon erwähnt, entsprechend ihrer Verwendung, kreisförmigen Charakter. Es handelt sich um ungerichtete Antennen. Neuerdings verwendet man Strömungsprofile des Flugzeuges (Flugzeugzellenteile) als Kurzwellenantenne.
Die Kurzwellenantennen werden als Sende- und Empfangsantennen verwendet.
Die Mittelwellenantennen dienen in Zusammenarbeit mit gerichteten Antennen hauptsächlich als Empfangsantennen für Navigationsanlagen. Sowohl die Kurzwellenantennen, als auch die Mittelwellenantennen, sind in ihrer Längenausdehnung durch Größe und Konstruktion des Flugzeuges begrenzt.
Bei den Kurzwellenantennen spielt die Länge, entsprechend der jeweiligen Arbeitsfrequenz, für den Sendebetrieb eine große Rolle. Die Antenne ist so bemessen, daß ihre Länge der Wellenlänge λ oder einem Teil ($\frac{\lambda}{2}$; $\frac{\lambda}{4}$) des mittleren Frequenzbandes entspricht.
Bei Frequenzen im oberen oder unteren Frequenzband stimmt die Antennenlänge nicht mit der jeweiligen Wellenlänge der Arbeitsfrequenz überein. Dadurch kommt es zu Fehlanpassungen zwischen der Senderausgangsstufe und der Antenne, die zu Leistungsverlusten der Senderenergie führt.
Da eine mechanische Verlängerung oder Kürzung nicht möglich ist, wird bei Frequenzwechsel die Anpassung durch eine elektrische Verlängerung oder Verkürzung vorgenommen.
Die elektrische Verlängerung ist bei Frequenzen im unteren Frequenzband erforderlich und kann durch Reihenschaltung

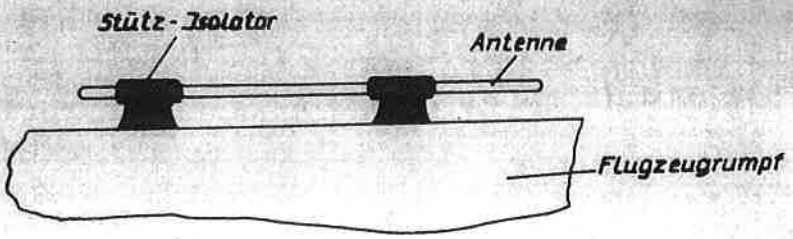
einer Induktivität (Variometer) mit der Antenne erreicht werden.

Die elektrische Verkürzung der Antenne ist bei Frequenzen im oberen Frequenzband (hohe Frequenzen) notwendig und kann durch Reihenschaltung einer Kapazität mit der Antenne durchgeführt werden.

Bei Empfangsantennen ist die Fehlanpassung der Antenne an den Empfängereingang nicht so kritisch, wie im Falle des Sendebetriebes. Selbstverständlich treten bei nicht abgestimmter Empfangsantenne (aperiodische Antenne) Verluste auf. Auch hier kann wie im Sendebetrieb mit den gleichen Mitteln die Anpassung hergestellt werden. Abb. 2 zeigt einige Ausführungsformen von Kurz- und Mittelwellenantennen.



a)



b)

Abb. 2 a) KW-Drahtantenne
b) KW-Stabantenne und MW-Antenne

2.2. Ultrakurzwellen-Antennen

Wie aus Tabelle 1 ersichtlich, werden Ultrakurzwellen-Antennen sowohl für den Funksprechverkehr, als auch für die Funknavigation benötigt. Entsprechend ihres Einsatzes werden unterschiedliche Antennenformen verwendet. Für den Sprachverkehr sind ausschließlich unsymmetrische Dipole (Stabantennen oder Schwertantennen) mit Rundstrahl-Diagramm im Einsatz. Für die Funknavigation kommen symmetrische Dipole (V- oder U-Antennen) annähernder Rundstrahl- und/oder Richtcharakteristik zur Anwendung. Die Richtantennen werden im nächsten Abschnitt behandelt.

Die bei den UKW-Verkehrsfunkanlagen verwendeten unsymmetrischen Dipole (auch als Marconi-Antenne bekannt), haben ein kreisförmiges Horizontaldiagramm und werden gleichermaßen als Sende- und Empfangsantenne benutzt (s. Abb. 3).

Die Strahlerlänge der Antenne entspricht $\frac{1}{4}$ der Wellenlänge ($\frac{\lambda}{4}$) des mittleren Frequenzbandes. Auch im Ultrakurzwellenbereich gelten die Bedingungen der Antennenanpassung entsprechend Abschnitt 2.1.

Die kreisförmige Charakteristik der Sende/Empfangsantennen ist für die Funkverbindungsanlagen von Wichtigkeit, da dadurch im Bereich der Reichweite die gewünschte flugrichtungsunabhängige zweiseitige Verbindung möglich ist.

Die in Funknavigationsanlagen (ILS/VOR) symmetrischen Dipole haben kein ausgesprochenes Runddiagramm, es ist als elliptisch anzusehen (siehe Abb. 4). Dieses Diagramm wird durch V- oder U-Form der Antenne erreicht. Diese Antennen eignen sich je nach Betriebsart (ILS/VOR) für den Empfang gerichteter elektromagnetischer Wellen (Blindlandesystem ILS) als auch für den Empfang von elektromagnetischen Wellen von UKW-Drehfunkfeuern (VOR).

Es handelt sich hier also um Antennen, die einen Grenzfall darstellen, weil sie, sowohl Rundempfang der Allrichtungs-Funkfeuer VOR als auch gerichteten Empfang der ILS-Landekurssignale ermöglichen sollen.

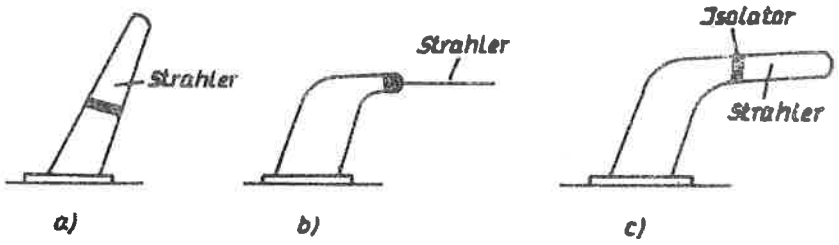


Abb. 3 UKW-Antennen für Verkehrsfunkanlagen

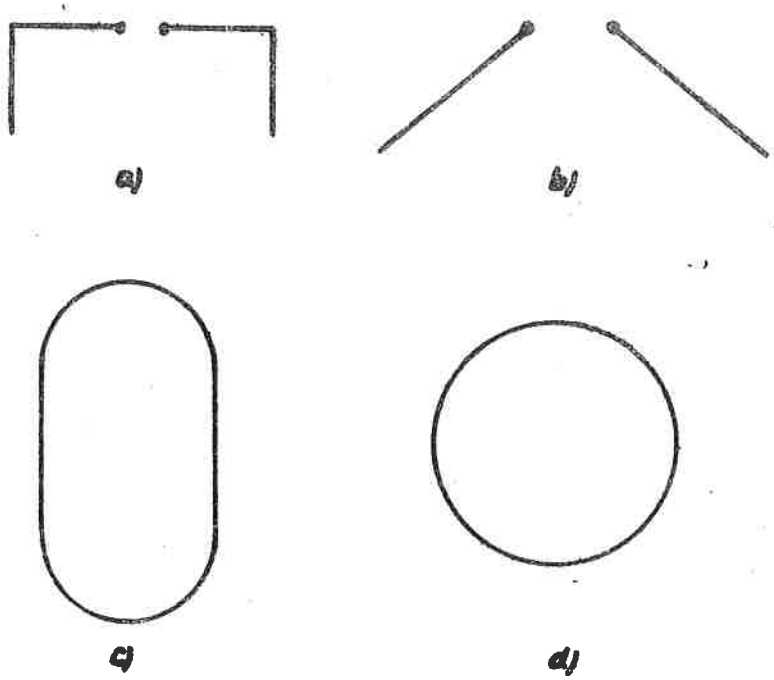


Abb. 4 a) b) Abgewinkelter Dipol
c) Diagramm in Dipolebene
d) Diagramm in Ebene senkrecht der Dipolebene

2.3. Richtantennen

Unter Richtantennen sind die Arten von Antennen zu verstehen, die ein spezielles Diagramm haben, d.h. die Abstrahlung und der Empfang haben in bezug auf die Feldstärke eine oder zwei Vorzugsrichtungen. In diesen Richtungen ist die Feldstärke sehr viel größer als in den außerhalb dieser Vorzugsrichtungen liegenden Bereichen.
Richtantennen werden in der Flugfunktechnik für Navigations- und Funkmeßzwecke eingesetzt.
Bei den Richtantennen gibt es wie bei den ungerichteten Antennen, entsprechend der Wellenlängen und den spezifischen Eigenarten der Anlagen, unterschiedliche Ausführungsformen. Man verwendet folgende Arten:

- Drehbare oder umlaufende Rahmenantennen,
- Umlaufende Doppelrahmenantennen,
- Reflektoren (Parabolspiegel) umlaufend oder schwenkend,
- Feststehende Dipole oder Doppeldipole,
- Schlitzantennen.

2.3.1. UKW-Bereich

Für den UKW-Bereich wird in erster Linie der symmetrische Dipol benutzt. Er hat in der Dipolebene ein Diagramm, das einer 8 gleicht (siehe Abb. 5). Dieser Dipol wird z.B. für die Blindlandebordanlage des Gleitwegsystemes benutzt. Der Einbau erfolgt so, daß die Keulen des Diagramms in der Flugzeuglängsachse liegen.

2.3.2. MW- und LW-Bereich

Für den Mittel- und Langwellenbereich findet für die Funkortung die Rahmenantenne Anwendung und ermöglicht relativ genaue Standortbestimmungen. Die Grundlage des Richtempfanges bzw. der Peilung ist die Größe der Antennenspannung in Abhängigkeit von der Richtung der einfalllenden elektromagnetischen Wellen. Abb. 6 zeigt das Prinzip der Rahmenantenne und das Horizontaldiagramm.

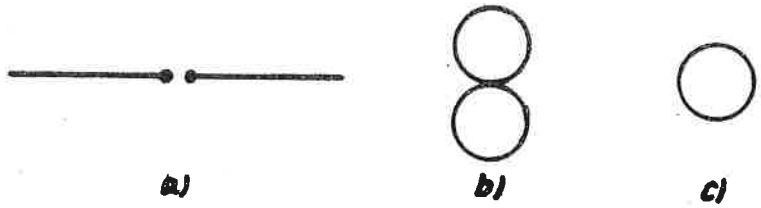


Abb. 5 a) UKW Dipol
Dipolachse
b) Richtdiagramm in Ebenen durch
c) Diagramm in Ebenen senkrecht
Dipolachse

2.3.2.1. Wirkungsweise

Liegt der anzupeilende Sender in Richtung der Rahmenebene, so hat die Antennenspannung der Rahmenantenne ihren Höchstwert. Liegt der Rahmen um 90° versetzt, d.h. die Senkrechte auf der Rahmenebene zeigt zum Sender, dann ist die Antennenspannung sehr klein, sie geht gegen Null (Minimum).
Die Minimumpeilung wird wegen der größeren Genauigkeit gegenüber der Maximumpeilung bevorzugt.

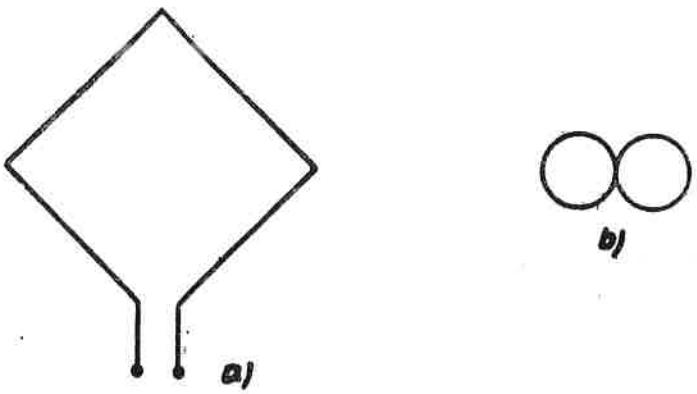


Abb. 6 a) Prinzip der Rahmenantenne b) Horizontaldiagramm

Das Antennendiagramm ist sowohl in der Maximum- als auch in der Minimumpeilung zweideutig, da bei Drehung des Rahmens um 180° die gleichen Verhältnisse entstehen. Diese Zweideutigkeit wird durch Hinzuschalten einer feststehenden ungerichteten Hilfsantenne (Rundstrahlcharakteristik) und entsprechender Auswertung im Empfänger beseitigt (Abb. 7).
Anwendungsfall: Radiokompasse ARK-5 und ARK-9.

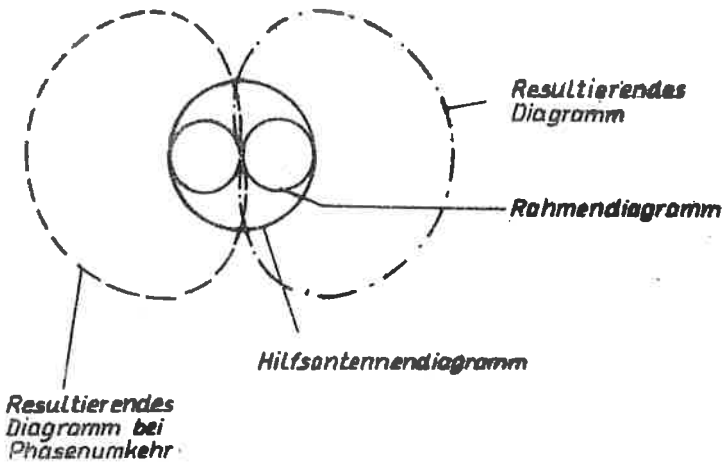


Abb. 7 Diagramm zur Seitenbestimmung

Kreuzrahmenantennen besitzen zwei um 90° versetzte Rahmen. Dabei arbeitet der eine Rahmen als Peilrahmen und der andere um 90° versetzte Rahmen übernimmt die Funktion der Hilfsantenne. Wird der Peilrahmen (Peilrahmenantenne) auf das Feldstärkeminimum gedreht, so steht der Hilfsrahmen im Feldstärkemaximum, also in der Richtung zum Sender. Der Vorteil bzw. der Sinn dieser Art von Rahmenantennen besteht darin, daß die Beeinflussung der Peilgenauigkeit durch atmosphärische Störungen bzw. durch Störungen anderer Sender o.ä. bei schwacher Feldstärke des gewünschten Senders weitgehend unterdrückt wird. Das ist dadurch begründet, daß die sogenannte Hilfsantenne, die ja ebenfalls ein Richtdiagramm besitzt, in jedem Fall im Feldstärkemaximum des zu peilenden Senders steht. Die oben erwähnte feststehende Hilfsantenne hat ein Runddiagramm und nimmt

Störstrahlungen aus allen Richtungen gleichmäßig gut auf. Die Peilung mittels solcher Kreuzrahmen wird jedoch wiederum zweideutig, d.h. auch hier kann wie bei der einfachen Rahmenantenne der angepeilte Bodensender in der angezeigten oder auch in der 180° versetzten Richtung liegen. Die Eindeutigkeit wird geschaffen, indem man zunächst unter Aufschaltung einer Rundantenne peilt und anschließend zur Verringerung des Peilfehlers auf Kreuzrahmenbetrieb umschaltet.
Anwendungsfall: ARK-11.

2.3.3. Funkhöhenmesser

Die Antennen für den Funkhöhenmesser sind symmetrische Halbwellendipole. Sie sind an der Unterseite des Flugzeuges angebracht und haben ein Richtdiagramm in Form einer elliptischen Keule (ohne reflektierende Fläche wäre das Diagramm eine 8), die auf die Erdoberfläche gerichtet ist. Die Sende- und die Empfangsantenne sind getrennt, aber in Form und Diagramm völlig übereinstimmend.
In Abb. 8 ist das Strahlendiagramm der Höhenmesserdipole abgebildet. Die Sende- und Empfangsantennen müssen so angebracht sein, daß eine direkte Strahlung der Sendeantenne zur Empfangsantenne ausgeschlossen ist. Die Empfangsantenne darf nur die von der Sendeantenne abgestrahlten und an der Erdoberfläche reflektierten elektromagnetischen Wellen empfangen, damit die einwandfreie Funktion der Höhenmeßanlage gewährleistet ist.
Diese Abschirmung der Sende-Empfangsantennen untereinander erreicht man durch geschickte Anordnung der Dipole in der Form, daß zwischen ihnen ein genügend großer Abstand bleibt und Flugzeugteile die "Sicht" zueinander trennen. Das trifft zu, wenn sie so angeordnet sind, daß ihre Ebenen parallel zueinander liegen. Bei Anordnung der Dipole hintereinander, also in Richtung ihrer Ebenen, ist eine Abschirmung zwischen ihnen auf Grund ihrer Strahlungsdiagramme nicht notwendig.

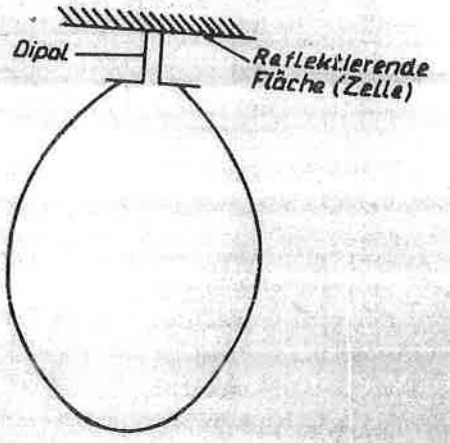


Abb. 8a Diagramm der Höhenmesserantenne

Abb. 8b Diagramm ohne reflektierende Fläche

2.3.4. Radar

In der Radartechnik werden zur Abstrahlung und zum Empfang der reflektierten elektromagnetischen Wellen völlig andere als die bisher behandelten Antennenformen verwendet. Diese Antennen sind für die Abstrahlung bzw. für den Empfang von sehr kurzen Wellen (dm- cm-Wellen) bestimmt.

1.) Die Antennen für die Wetter- und Hindernisbordanlagen haben die Form eines Hohlspiegels (Parabolspiegel) oder eines Ausschnittes davon, in dessen Brennpunkt ein Dipol oder Hornstrahler als Erreger angebracht ist. Abb. 9 zeigt das Prinzip dieser Antennen sowie die durch die Reflexion am Spiegel erzeugte Richtstrahlung. Die Spiegel sind aus Vollblech hergestellt, die zur Beeinflussung der Strahlungscharakteristik in einigen Fällen mit einem zusätzlichen Reflektor, belegt sind.

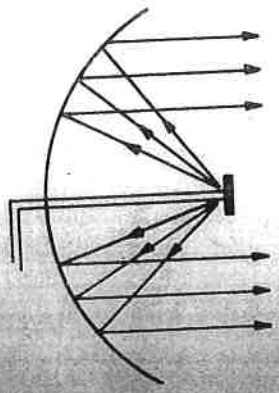


Abb. 9 Prinzip einer Radarantenne

Abb. 10a Horizontaldiagramm

Abb. 10b Vertikaldiagramm

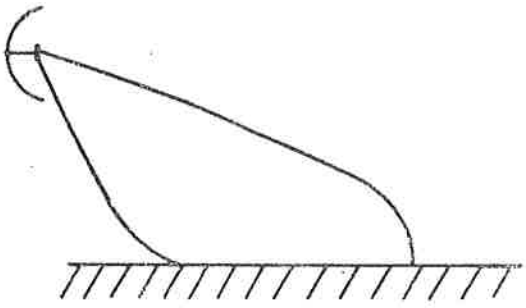


Abb. 10c Vertikalebene ($cosec^2$ - Diagramm)

Die Antennen schwenken, bezogen auf die Flugzeuglängsachse, automatisch 90^{o} nach links und rechts, d.h. die Antenne tastet in horizontaler Ebene vor dem Flugzeug einen Halbkreis ab. Bei anderen Anlagentypen rotieren die Antennen horizontal um 360^{o} (Rundsichtradar). Eine Neigung der Antennen aufwärts und abwärts ist möglich.
Die abgestrahlte Energie ist sehr scharf gebündelt. Der Öffnungswinkel des Strahlers hängt von der Antennenform ab. Bei einigen Verwendungsarten (Betriebsarten) bleibt das Diagramm in der horizontalen Ebene zwar ein scharf gebündeltes Keulendiagramm, in der vertikalen Ebene wird es aber für die Abtastung einer möglichst breiten Fläche in ein cosec^{2}-Diagramm geformt (siehe dazu Abb. 10). In anderen Betriebsarten wird ein sogenanntes Bleistift-Diagramm, also eine extrem scharfe Bündelung in beiden Ebenen angewandt (Größenordnung 2^{o}). Nähere Angaben dazu sind in L. B. Radaranlagen gemacht.

Die Radarantennen werden als Sende- und Empfangsantennen verwendet, d.h. die abgestrahlten elektromagnetischen Wellen werden an dem zu ortenden Ziel (Gewitterfronten, Flugzeugen, Bergen usw.) reflektiert durch die Antenne, auf dem umgekehrten Wege wie bei der Sendung aufgenommen und der Empfangsanlage zugeführt.
Die Funktionsumschaltung der Antenne (Sendung-Empfang) erfolgt durch die Radaranlage selbst (Antennenweiche in Form Schlitzbrücke o. ä.). Die Diagramme der Ausstrahlung gleichen denen der Betriebsart Empfang.
Die Radarantennen sind im Flugzeugbug oder unterhalb des Buges angebracht und mit Verkleidungen aus nichtmetallischen Stoffen abgedeckt.

2.) Die Antennenanlagen von Doppler-Navigations-Radaranlagen haben die Aufgabe, mindestens zwei scharf gebündelte Strahlen, schräg nach vorn unten und schräg nach hinten unten, zu senden. Der Winkel der Abstrahlung ist bezogen auf die Flugzeuglängs- und -Querachse für beide Strahlungsrichtungen gleich und konstant. Die Antenne des Doppler-Navigators ist im Gegensatz zu den der

beschriebenen Rundsicht-Radarantennen, flugzeugfest. Sie ist entweder starr eingebaut und genau justiert (z.B. "Trassa", "Strela") oder zur ständigen Horizontierung auf die Lagekreisel (Kreiselvertikale) aufgeschaltet.
Die Formung von gleichzeitig vier scharf gebündelten Diagrammen läßt sich bei den angewandten Frequenzen (3-cm-Bereich) vorteilhaft mit Schlitzstrahleranordnungen erzielen (Schlitzstrahler sind die elektrische Umkehrung der oben beschriebenen UKW-Dipole und besitzen gleiche Diagrammformen wie diese). Sie werden vornehmlich in der cm-Wellen-Technik eingesetzt. Man findet sie aber bereits als UKW-Antennen in Form von Schlitzen im Flugzeugrumpf, um herausragende Antennengebilde (s. Abb. 3) zu umgehen. Die Keulenformung erfolgt nun durch ein mit Schlitzen versehenes Gitter von Speise-Hohlleitern. Schlitzmaße und -abstände sind durch die Frequenz festgelegt. Die Keulenwinkel werden durch die Schlitzwinkel bestimmt. Da bei Doppler-Anlagen im allgemeinen kein Impulsbetrieb wie bei Rundsichtradar sondern Dauerstrich benutzt wird, sind zwei gegeneinander abgeschirmte identische Antennengebilde für Sender und Empfänger eingesetzt.

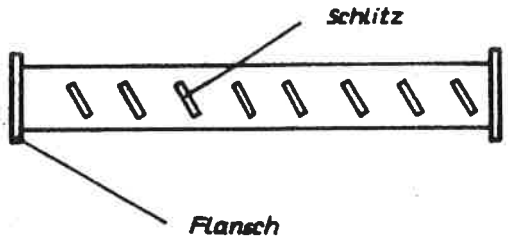


Abb. 11 Schlitzstrahler

Als Einbauort wird entsprechend der für die Funktion notwendigen Strahlungsrichtung die Unterseite des Flugzeuges (Tragfläche oder Rumpf) verwendet. Die Antennen sind innerhalb der Kontur montiert und mit einer nichtmetallischen Verkleidung abgedeckt.

2.3.5. Sekundär-Radar

2.3.5.1. dm-Bereich

Als Zwischenform zwischen den UKW-Antennen und den eben beschriebenen cm-Antennen gelten die Antennen für die Sekundär-Radaranlage. Es handelt sich um feststehende Antennen.
Die Sekundärradaranlagen arbeiten in zwei verschiedenen Systemen und mit verschiedenen Frequenzen. Die Abfrage- und die Antwortfrequenzen sind in den einzelnen Systemen ebenfalls unterschiedlich.
Die Antenne für den ICAO-Bereich (Standardbereich) ist für die Abstrahlung und den Empfang der Frequenzen 1090 MHz und 1030 MHz ausgelegt. Sie stellt einen vertikalen unsymmetrischen Dipol (Schwinger) mit einer ungefähren Länge von $\frac{\lambda}{4}$ dar.
Das Diagramm soll die Form einer Halbkugel haben. Das Aussehen des Richtdiagrammes ist jedoch von der Form des Flugzeugrumpfes abhängig. Daher bringt man sie im geometrischen Schwerpunkt unter dem Rumpf an.
Das Sekundärsystem der SU weicht vom standardisierten ICAO-System u.a. in den benutzten Frequenzen und den Antennentypen ab. Die Antennen sind hier symmetrische Dipole in Reflexionskästen, die in beide Seiten des Seitenleitwerkes eingelassen sind. Beide Antennen besitzen annähernd halbkugelförmige Diagramme. Die Summe aus beiden ergibt in der horizontalen Ebene die geforderte Rundstrahlcharakteristik.

2.3.5.2. cm-Bereich

In die Reihe der cm-Richtantennen gehört noch das 3-cm-Empfangssystem des Transponders. Diese Antennen arbeiten im Bereich 9370 MHz und dienen als Abfrageempfangsantennen in Zusammenarbeit mit dem Präzisionsanflug-Radar (PAR). Es handelt sich hierbei um dielektrische Strahler mit ausgesprochener Richtwirkung (Ellipsenform). Der Abschluß des abführenden Hohlleiters ist hier durch einen dielektrischen Stopfen vorgenommen, mit dessen geometrischer Form man die Strahlungscharakteristik beeinflußt. Das Gesamtdiagramm (Halbkugel nach vorn) wird auch hier durch Überlagerung zweier solcher elliptischer Teildiagramme erzielt. Entsprechend ihrer Aufgabe (Anflughilfe) sind diese Antennen am Rumpf untergebracht.

2.4. Antennenspeiseleitungen

Als Antennenspeiseleitungen werden zwei Arten von Leitern verwendet:

- konzentrisches oder koaxiales Kabel,
- metallischer Hohlleiter (Rechteckhohlleiter oder Rundhohlleiter).

Das Koaxialkabel ist ein konzentrisches Kabel, das aus einem Innenleiter (meistens Kupferlitze) und einem Abschirmgeflecht (Kupfer) besteht, das durch einen geeigneten, die HF nicht dämpfenden Isolierstoff vom Innenleiter getrennt ist. Das Abschirmgeflecht dient hierbei als zweiter Leiter (Rückleiter). Die Koaxialkabel haben eine geringe Dämpfung, so daß eine verlustarme Übertragung von Hochfrequenzenergie zwischen Sender und Antenne bzw. zwischen Antenne und Empfänger gewährleistet ist. Weiterhin wird durch die Abschirmung (Abschirmgeflecht) eine wilde Abstrahlung von Sendeenergie und gleichermaßen eine Fremd- oder Störstrahlung auf Empfangsantennenleitungen ausgeschlossen. Es werden störende und schädliche Beeinflussungen anderer Anlagen und

die Beeinflussung durch andere Anlagen ausgeschaltet.
Koaxialkabel werden mit international festgelegten Wellenwiderstandswerten "Z" hergestellt und sind für ein breites Frequenzband verwendbar. Sie werden als Antennenleitungen von 150 kHz bis etwa 2 GHz verwendet.
Oberhalb von f = 2 GHz werden Hohlleiter als Antennenenergieleitungen verwendet. Hohlleiter sind Rohre mit rechteckigem Innenraum (seltener werden auch Hohlleiter mit kreisförmigem Innenraum verwendet) deren Flächen poliert und oberflächenveredelt sind.
Die Energiefortpflanzung im Hohlleiter (auch Wellenleiter genannt) findet in Form eines elektromagnetischen Feldes im Innenraum statt, in ähnlicher Weise, wie sich die Energie von einer Sendeantenne aus als Welle in den Raum ausbreitet. Der Energietransport wird durch die elektrische Feldstärke E und die magnetische Feldstärke H beschrieben. Diese Tatsachen weichen vollkommen vom Energietransport im Koaxialkabel ab, der in Form eines HF-Stromes erfolgt. Die elektrische Verhältnisse im Koaxialkabel werden wie gewohnt durch Strom und Spannung erfaßt.
Koaxialkabel sind breitbandige Energieleitungen, d.h. sie können von tiefsten Frequenzen an bis zu solchen Frequenzen eingesetzt werden, bei denen die Verluste im Kabel zu groß werden (Richtwert 2 GHz).
Bei Hohlleitern liegen die Verhältnisse komplizierter. Je nach Querschnittsabmaßen findet unterhalb einer zugehörigen Grenzfrequenz kein Energietransport mehr statt. D.h. man muß die Querschnitte um so größer wählen, je tiefer die Arbeitsfrequenz liegt. Bei 2 GHz gelangt man bereits zu Querschnitten von ca. 5 x 10 cm für Rechtecktypen. Nach oben existiert in erster Näherung keine Frequenzgrenze. Dennoch benutzt man z.B. nicht etwa immer den oben genannten Grundtyp sondern wählt den Querschnitt aus Gewichts- und Herstellungsgründen nur so groß, wie er für die jeweilige Arbeitsfrequenz (die ja meist konstant ist) erforderlich ist.

Frequenzen von 9,8 GHz werden noch bei einem Querschnitt von ca. 10 x 23 mm verlustfrei übertragen.
Der Einsatz von Hohlleitern ist wesentlich teurer als der von Koaxkabel. Konstruktion und genaue Fertigung von Kurven, Drehungen und beweglichen Kupplungen sind sehr aufwendig. Die Verlegung von Koaxkabel ist wesentlich einfacher.

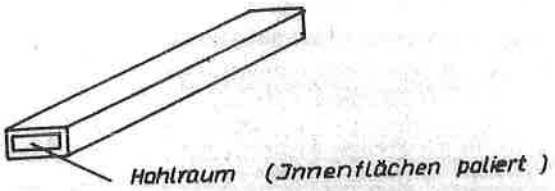


Abb. 12a Hohlleiterstück

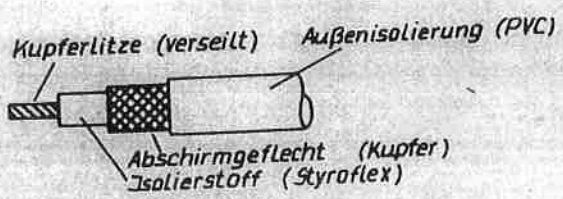


Abb. 12b Koaxialkabel

Zusammenfassung Die Funktion bzw. die Aufgabe der jeweiligen Antenne bestimmt den Einbauort am Flugzeug. Antennen haben je nach Wellenlänge und Funktion unterschiedliche Formen und unterschiedliche Strahlungsdiagramme. Vielfach werden Antennen gleichzeitig als Sende-

und Empfangsantennen verwendet. Die Anpassung der Antennen an die Senderausgänge oder an die Empfängereingänge ist für die Leistungsfähigkeit der Anlagen von Bedeutung. Es gibt Antennen mit Rundstrahl- und solche mit Richtdiagrammen. Grenzfälle sind Antennen, die beiden Arten gerecht werden. In den dm- und cm-Wellenbereichen werden völlig andere Antennenformen als in den längeren Wellenbereichen verwendet.
Als Antennenspeiseleitungen werden entsprechend dem Wellenbereich Koaxialkabel oder Hohlleiter verwendet. Koaxialkabel werden mit definiertem Wellenwiderstand gefertigt. Die Anwendung der Koaxialkabel ist über große Frequenzbereiche möglich. Hohlleiter sind entsprechend ihren geometrischen Atmessungen nur für bestimmte Frequenzen verwendbar.

Kontrollfragen

5. Warum werden für den Funksprechverkehr Antennen mit Rundstrahl-Diagramm verwendet und zu welchen Arten von Antennen gehören diese ?

6. Aus welchem Grunde müssen Sendeantennen auf die Wellenlänge oder einem Teil dieser($\frac{1}{2}$ oder $\frac{1}{4}$) der jeweiligen Sendefrequenz abgestimmt werden ?

7. Wie lang muß ein $\frac{\lambda}{4}$ -Strahler für die Frequenz f = 125 MHz sein ?
Berechnen Sie diese Länge.

8. Nennen Sie einige Richtantennen.

9. Wann hat eine Rahmenantenne ihr Feldstärkeminimum und wie sieht das Antennendiagramm in der Horizontalebene aus ?

10. Welche Vorteile haben Kreuzrahmenantennen gegenüber einfachen Rahmenantennen ?

11. Bis zu welchen Frequenzen (Wellenlängen) können Koaxialkabel als Antennenleiter verwendet werden ?

12. Worin unterscheidet sich eine Koaxleitung von einem Hohlleiter in bezug auf die Energiefortpflanzung ?

3. Empfänger, Prinzipien und Haupteigenschaften

In den Empfangsanlagen der Flugzeugfunkausrüstung werden viele Arten und Ausführungsformen von Empfängern verwendet. Sie haben jedoch alle die gleiche Aufgabe, nämlich die von Sendern ausgestrahlten Hochfrequenzsignale, die bestimmte Informationen enthalten, über die Antennenanlagen zu empfangen, zu verstärken, zu demodulieren und so zu verarbeiten, daß sie entweder direkt auswertbar werden oder durch nachgeordnete Geräte ausgewertet werden können.
Es werden zwei grundsätzliche Arten von Empfängern unterschieden:

- Geradeausempfänger,
- Überlagerungsempfänger.

Sie sind je nach Verwendung und Einsatz auf eine feste Frequenz abgestimmt oder innerhalb eines bestimmten Bereiches in Schritten bzw. kontinuierlich durchstimmbar.
Wegen der sehr dichten Belegung der Frequenzbänder und der hohen Forderung in der Zuverlässigkeit und Präzision der einzelnen Systeme ist eine hohe Frequenzstabilität, Abstimmgenauigkeit und Trennschärfe bei den Funkempfangsanlagen unerläßlich. Flugzeugfunkempfänger unterliegen extremen Einsatzbedingungen. Ihre technische Konzeption muß so ausgelegt sein, daß bei den im Betrieb auftretenden klimatischen und mechanischen Bedingungen eine einwandfreie und zuverlässige Funktion gewährleistet ist.

3.1. Geradeausempfänger

Im Geradeausempfänger werden die von der Antenne aufgenommenen Hochfrequenz-Schwingungen, ohne die Frequenz umzusetzen, in einer oder mehreren Hochfrequenzverstärkerstufen verstärkt.
Anschließend wird das verstärkte Signal direkt der nachfolgenden Demodulationsstufe zugeführt, in der die Trägerfrequenz (HF) von der Modulationsfrequenz (NF) getrennt wird. Die Niederfrequenz ist das gewünschte und auszuwerten

de Signal und wird in der folgenden NF-Verstärkerstufe oder mehreren NF-Verstärkerstufen verstärkt und zum Empfängerausgang geführt.
In Abb. 13 ist das Blockbild eines Geradeausempfängers dargestellt. Man spricht von Einkreis- oder Mehrkreisgeradeausempfängern. Die Einstufung richtet sich nach der Anzahl der abstimmbaren Schwingkreise in den Hochfrequenzverstärkerstufen. Die Bezeichnung "Geradeausempfänger" basiert auf der Tatsache, daß das Signal im direkten Verlauf ohne Frequenzumsetzung vom Empfängereingang über Hochfrequenzverstärkerstufen, der Demodulationsstufe (Gleichrichtung) zum Niederfrequenzverstärker und von dort zum Ausgang des Empfängers (Kopfhörer oder Auswerteschaltung) gelangt. Die Haupteigenschaft eines Geradeausempfängers unterscheidet sich grundsätzlich von der Haupteigenschaft des Überlagerungsempfängers, der aus folgendem Abschnitt ersichtlich ist. Geradeausempfänger sind in der Trennschärfe (Selektivität) zweier benachbarter Sender und der Empfindlichkeit sehr schlecht und werden in der Flugfunkempfangstechnik fast nicht mehr verwendet.

3.2. Überlagerungsempfänger

Der Überlagerungsempfänger, auch Superhetempfänger genannt, setzt die durch die Antenne empfangene Hochfrequenz, nachdem sie in einer oder mehreren Vorstufen (HF-Verstärkerstufen) verstärkt wurde, in der Mischstufe mit einer im Empfänger erzeugten Oszillatorfrequenz in eine Zwischenfrequenz (ZF) um. Diese ZF entsteht durch die Überlagerung der Empfangsfrequenz (Empfangssignal mit der im Empfänger erzeugten Oszillatorfrequenz). Je nach Aufgabe des Empfängers ist die Oszillatorfrequenz konstant oder variabel.
Die Bildung der Zwischenfrequenz erfolgt nach folgender Gleichung:

$$f_{ZF} = f_{OSZ.} \pm f_{Eing.} \qquad (1)$$

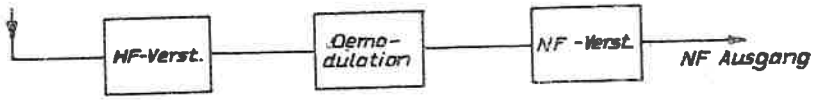


Abb. 13 Geradeausempfänger

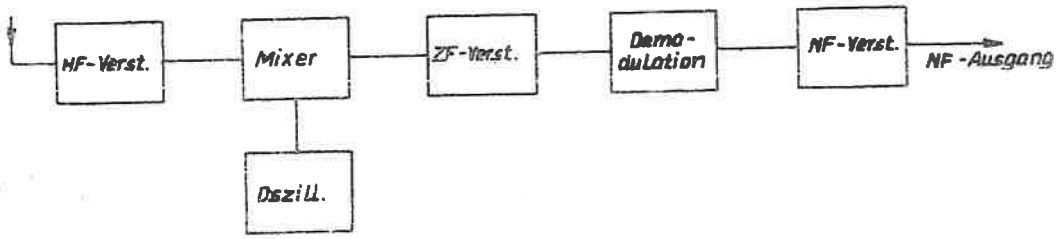


Abb. 14 Überlagerungsempfänger

Die so gewonnene, von der Eingangsfrequenz $f_{Eing.}$ unabhängige konstante f_{ZF}, wird im ZF-Teil, bestehend aus mehreren ZF-Verstärkerstufen, verstärkt. Danach erfolgt in der Demodulationsstufe die Trennung (durch Gleichrichtung) der Niederfrequenz von der Zwischenfrequenz (d.h. der Trägerfrequenz). Das gewonnene Niederfrequenzsignal wird dann im Niederfrequenzteil auf die gewünschte Größe verstärkt und dem Empfängerausgang zugeführt.
Abb. 14 zeigt das Blockschaltbild des Überlagerungsempfängers.

Der oben beschriebene Überlagerungsempfänger ist ein Einfach-Superhetempfänger. Morderne kommerzielle Empfänger werden wegen der notwendigen hohen Verstärkung, Selektivität und Spiegelfrequenzsicherheit oft in Doppel-Superhet-Schaltung ausgeführt. Hierbei ist nach Bildung der 1. ZF und Verstärkung derselben eine zweite Mischstufe mit dem zweiten dazugehörigen Oszillator angeordnet. Es wird also eine zweite Frequenzumsetzung vorgenommen. Danach folgt der zweite Zwischenfrequenzteil, gebildet durch ZF-Verstärkerstufen.
Der weitere Signaldurchlauf ist analog dem des Einfach-Superhets. Der Vorteil der zweifachen Frequenzumsetzung liegt darin, daß eine weitaus bessere Nahselektion und Spiegelfrequenzselektion bei höherer Verstärkung erreicht wird. Unter Nahselektion ist die Trennung von frequenzbenachbarten Sendern zu verstehen. Die Spiegelfrequenz ist die Eingangsfrequenz, die zusammen mit dem Oszillatorsignal im Überlagerungsempfänger die gleiche Zwischenfrequenz erzeugt, wie die Frequenz des Nutzsignals, auf die der Empfänger abgestimmt ist (als nachteilig kann bei Überlagerungsempfängern der große schaltungstechnische Aufwand bezeichnet werden).
Bei zweifacher Frequenzumsetzung wird im allgemeinen die erste Zwischenfrequenz hoch (Spiegelselektion) und die zweite Zwischenfrequenz niedrig (Nahselektion und Empfindlichkeit) gewählt.
In Abb. 15 ist das Blockschaltbild eines Zweifach-Superhet abgebildet.

Um den genannten Forderungen auch bei hohen Eingangsfrequenzen (über 100 MHz) zu erfüllen, werden für höchste Ansprüche auch 3-fach-Super verwendet.

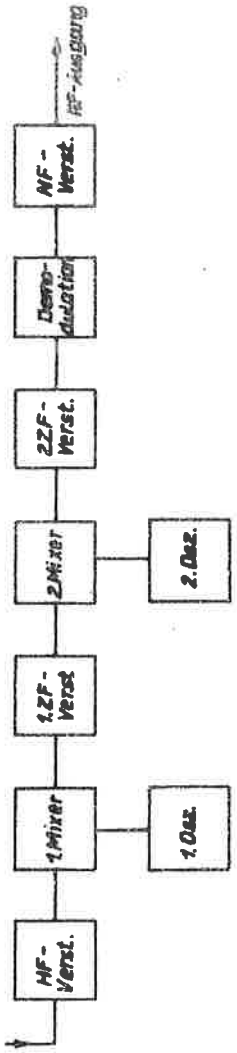


Abb. 15 Zweifach-Superhet-Empfänger

4. Empfängerbaugruppen

4.1. Mischstufe

4.1.1. Allgemeines

Mischstufen (auch Mischer genannt) haben die Aufgabe, aus zwei Wechselspannungen (der Eingangssignalspannung und der im Empfänger erzeugten Oszillatorspannung) eine Spannung anderer Frequenz, die Zwischenfrequenz (ZF), zu erzeugen.
Es gilt Formel (1) in Pkt. 3.2.
Die in der Eingangsspannung vorhandene Information (in Form von Modulation) bleibt erhalten und ist in der ZF wiederzufinden. Der Mischer ist das kennzeichnende Hauptelement eines Superhets. Der Zweck ist, das Signal einem hochselektiven Verstärker zuzuführen - in 3.2. erläutert -, dessen Arbeitsfrequenz in einem Bereich mit möglichst hoher erzielbarer Verstärkung liegt.
Im Einfachsuper wird nun die Oszillatorfrequenz beim Durchstimmen der HF-Kreise gleichzeitig mitverändert, so daß das entstehende Mischprodukt f_{ZF} in seiner Frequenz konstant bleibt. Dieses gelangt dann zum ZF-Verstärker (hochselektiv, hochverstärkend), der dann die Verstärkungs- und Selektivitätsforderungen realisiert. Die Durchlaßfrequenzen gebräuchlicher ZF-Verstärker liegen im Optimalbereich von 400 bis 1500 kHz.
Im Doppelsuper (erfüllt zusätzlich Spiegelselektionsforderungen) für KW- und UKW-Empfang sind 2 derartige Mischer mit zugehörigen Oszillatoren und 2 unterschiedliche ZF-Verstärker vorhanden.
Der erste ZF-Verstärker arbeitet auf relativ hoher ZF (Spiegelselektion) von 2 bis 10 MHz, der zweite liegt bei 300 bis 500 kHz und erfüllt Nahselektion und Hauptverstärkung. Ist der erste Oszillator durchstimmbar wie beim Einfachsuper, so entsteht eine konstante 1. ZF wie oben. Der zweite Oszillator braucht dann nur auf einer Festfrequenz zu arbeiten, um die Umsetzung in die 2. ZF durchzuführen. Man kann aber

auch die erste ZF noch variabel und dazu den zweiten Oszillator so durchstimmen, daß eine konstante 2. ZF entsteht.

4.1.2. Zur Mischertheorie

Das Entstehen eines Mischproduktes (ZF) aus zwei Einzelfrequenzen ist grundsätzlich daran gebunden, die Einzelfrequenzen gemeinsam auf ein Bauelement zu leiten, das eine gekrümmte Kennlinie besitzt. Eine gekrümmte Kennlinie führt zu Verzerrungen, d.h. Bildung von Oberwellen des Eingangssignals. Führt man zwei Eingangssignale zu, so entstehen neben den Oberwellen auch noch Summe, Differenz sowie deren Vielfache aus beiden Eingangsfrequenzen. Wichtig ist nur die Summe (bzw. Differenz je nach elektrischer Auslegung) aus beiden Eingangsspannungen $f_{Eing.}$ und $f_{Osz.}$, siehe Formel (1).
Diese f_{ZF} wird automatisch durch die Selektivität des ZF-Verstärkers ausgesiebt und weiter verstärkt.

4.1.3. Praktische Realisierung

Mischstufen werden mit Röhren oder Transistoren aufgebaut. Beim Aufbau mit Röhren verwendet man z.B. Trioden, Pentoden, Heptoden oder Oktoden. Für sehr hohe Frequenzen werden auch Röhren- oder Halbleiterdioden eingesetzt.

4.1.4. Mischergrundschaltungen

In der Praxis existieren 2 Grundformen:

- additive Mischung,
- multiplikative Mischung.

4.1.4.1. Additive Mischung

Bei der additiven Mischung werden die zu mischenden Signale, die Eingangsfrequenz $f_{Eing.}$ und die Oszillatorfrequenz $f_{Osz.}$

gemeinsam auf das gleiche Gitter einer Röhre bzw. auf die Basis eines Transistors gegeben. In Röhrenmischern verwendet man Trioden oder auch Mehrgitterröhren in Triodenschaltung. In der Praxis werden die zu mischenden Signale über Koppelkondensatoren direkt aufgeschaltet und ihre Summe liegt am Eingang der gekrümmten Kennlinie. Am Ausgang erscheint u.a. die gewünschte f_{ZF}.

Die additive Mischung wird wegen ihrer Rauscharmut besonders in KW- und UKW-Empfängern angewandt. Eine gewisse gegenseitige Beeinflussung der beiden Signalquellen infolge der direkten Zusammenschaltung ist jedoch nicht ausgeschlossen. Abb. 16 zeigt das Prinzipbild.

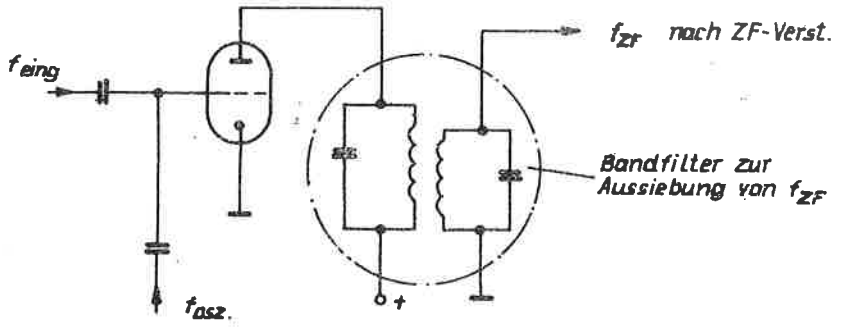


Abb. 16 Additive Mischung mit Triode

Eine Sonderform der additiven Mischer sind die sogenannten selbstschwingenden Mischstufen. Hier wird dem Oszillator (Röhre oder Transistor) an der Steuerelektrode direkt die Eingangsspannung $f_{Eing.}$ zugeführt.

Der Oszillator führt dann zugleich die Mischfunktion aus und gibt an seinem Ausgang die f_{ZF} ab. Eine Rückwirkung des Oszillators auf den Antennenkreis ist nur durch eine HF-Vorstufe zu unterbinden.

4.1.4.2. Multiplikative Mischung

Bei der multiplikativen Mischung wird das Eingangssignal dem Steuergitter und das Oszillatorsignal dem zweiten Steuergitter bzw. dem Bremsgitter zugeführt. Beide Signale wirken also an verschiedenen Eingängen auf den Anodenstrom ein. Die Signalquellen sind also elektrisch völlig getrennt und beeinflussen sich nicht. Die multiplikative Mischung ist besonders im Mittelwellen- und im Langwellenbereich gebräuchlich.
Abb. 17 zeigt das Prinzipbild.
Naturgemäß kommt die multiplikative Mischung nur in der Röhrentechnik bei Mehrgitterröhren vor. Trioden, Transistoren und Dioden eignen sich nur für additive Mischung.

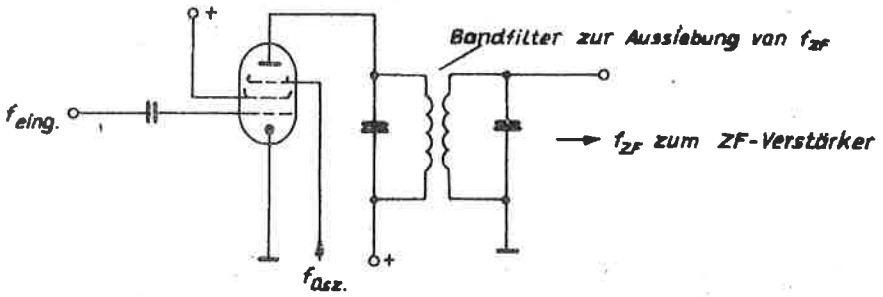


Abb. 17 Multiplikative Mischung mit Pentode

4.2. Oszillatoren

4.2.1. Grundsätzliches

Allgemein wird jedes schwingende Gebilde als Oszillator bezeichnet. Für die Nachrichtentechnik werden Oszillatoren zur Erzeugung elektrischer Schwingungen verschiedenster Frequenzen benötigt. In Oszillatoren, für die Erzeugung hochfrequenter Schwingungen bis zur Wellenlänge $\lambda = 1$ m, werden ausschließlich Röhren oder Transistoren verwendet. Im Frequenzbereich unter 1 m Wellenlänge (z.B. in der Radartechnik) verwendet man Spezialröhren (Magnetrons, Reflexklystrons). Hier findet man auch Tunneldiodenschaltungen.
Die Aufgabe eines Oszillators innerhalb eines Empfängers wurde unter Pkt. 3.2. bzw. Pkt. 4.1. behandelt.

4.2.2. Prinzip der Schwingungserzeugung

Oszillatoren erzeugen Wechselspannungen ohne daß ihnen von außen eine Wechselspannung zugeführt werden muß. Die Wechselspannung wird also durch schaltungstechnische Maßnahmen mittels Röhre oder Transistor aus der angelegten Gleichspannung (Speisespannung) gewonnen. Die gewonnene Wechselenergie entsteht durch Umformung aus der Gleichenergie. Die dominierende Methode der Schwingungserzeugung ist die Anwendung einer Mitkopplung. Es gibt eine Vielzahl von Oszillatorschaltungen, von denen in den folgenden Abschnitten nur die bekanntesten und gebräuchlichsten behandelt werden sollen. Es werden nur die Oszillatoren für Sinusspannungen betrachtet. Kippschwingungserzeuger (Sperrschwinger, astab. Multivibratoren) gehören in das Gebiet der Impulstechnik.
In der modernen Empfangstechnik werden von den Oszillatoren sehr hohe Frequenzstabilitäten verlangt. Die Forderungen erreichen die Größenordnung 10^{-6} bis 10^{-7} und sind nur durch besondere Maßnahmen, z.B. Einbau der frequenzbestimmenden Bauelemente in Thermostaten oder Anwendung von Schwingquarzen, zu erfüllen.

Der prinzipielle Vorgang der Schwingungserzeugung durch Selbsterregung wird durch Rückkopplung eines Teiles der verstärkten Spannung eines Verstärkers, auf dessen Eingang, erreicht. Schwingschaltungen mit Röhren und entsprechende mit Transistoren sind weitgehend gleich.
Gibt man auf das Gitter einer Röhre von außen eine kleine Wechselspannung und führt einen Teil der verstärkten Wechselspannung wieder auf das Gitter der Röhre zurück und zwar so, daß die zurückgeführte Spannung die gleiche Phasenlage hat wie die ursprüngliche kleine Anfangswechselspannung, dann erhöht sich die Gitterwechselspannung um den Betrag der zurückgeführten Wechselspannung. Durch diese Erhöhung der Steuerspannung am Gitter der Röhre erhöht sich automatisch wieder die Anodenwechselspannung und damit erhöht sich die Steuerspannung am Gitter abermals. Dieser Vorgang wächst lawinenartig an, bis der Sättigungszustand der Röhre erreicht ist.
Bei einer entsprechend großen Spannungsrückführung (Rückkopplung) ist zum Einleiten dieses eben beschriebenen Vorganges keine Fremdspannung am Gitter der Röhre notwendig. Es genügt ein sehr kleiner Spannungsstoß z.B. beim Einschalten der Stufe oder eine sehr geringe Spannungsänderung. Es genügt unter Umständen schon die natürliche Rauschspannung eines ohmschen Widerstandes, um den gewünschten Schwingvorgang einzuleiten.
Ein Oszillator soll nicht wild, sondern auf einer genau definierten Frequenz schwingen. Dieses wird erreicht, indem man in den Verstärkungs- oder Rückkopplungsweg ein frequenzabhängiges Schaltglied, einen Schwingkreis (Induktivität, Kapazität) schaltet. Dieser Kreis ist für die gewünschte Frequenz ausgelegt und auf diese abgestimmt.
Diese und folgende Betrachtungen sind für Röhren aufgestellt. Für Transistoren gelten jedoch völlig identische Überlegungen.
Die Größe der Spannungsrückführung, der Mitkopplung wird in dem Rückkopplungsfaktor δ ausgedrückt und ist das Verhältnis der rückgekoppelten Spannung u_K zur vollen

Anodenwechselspannung u_a

$$\beta = -\frac{u_k}{u_a} \qquad (2)$$

Die Spannung u_k ist gleichzeitig die Gitterwechselspannung u_g (der Oszillator erhält ja von außen kein Signal).
Das Minuszeichen drückt die durch den Rückkopplungskreis aufzubringende Phasendrehung um 180° aus, um den Phasenunterschied zwischen Ein- und Ausgangsspannung der Röhre (180°) auszugleichen. Das Rückkopplungssignal soll ja phasengleich am Gitter erscheinen.
Für eine Verstärkerstufe ist der Verstärkungsfaktor ν das Verhältnis der abgegebenen Anodenwechselspannung u_a zur zugeführten Gitterwechselspannung u_g, d.h.
$\nu = -\frac{\partial u_a}{\partial u_g}$, kann man wegen $u_k = u_g$ setzen:

$$\beta = -\frac{u_k}{u_a} = -\frac{u_g}{u_a} = \frac{1}{\nu} \qquad (2a)$$

Hieraus gewinnt man die Barkhausen'sche <u>allgemeine Selbsterregerformel</u>

$$\beta \cdot \nu = 1 \qquad (2b)$$

In dieser allgemeinen Gleichung sind sämtliche Einflüsse von Röhren- oder Transistorkenngrößen sowie der Einfluß des Außenwiderstandes und des Rückkopplungskreises voll berücksichtigt.

Der Verstärkungsfaktor einer Elektronenröhre in Katodenbasisschaltung ist

$$\mathfrak{V} = S \frac{Ri \cdot \mathfrak{R}a}{Ri + \mathfrak{R}a} \qquad (3)$$

daraus ergibt sich

$$\mathfrak{V} = \frac{1}{\frac{1}{S \cdot \mathfrak{R}a} + \frac{1}{S \cdot Ri}} \qquad (3a)$$

Wendet man die Barkhausensche Röhrengleichung

$$S \cdot Ri \cdot D = 1 \qquad (4)$$

an, so entsteht aus den Gleichungen (2b) und (3a) die spezielle Selbsterregerformel

$$\mathfrak{k} = D + \frac{1}{S \cdot \mathfrak{R}a} \qquad (5)$$

Für die spezielle Selbsterregerformel in Transistorschaltungen werden selbstverständlich die Transistorkennwerte (h - Parameter) sowie ebenfalls der Außenwiderstand verwendet.
Es gilt

$$\mathfrak{k} = \frac{1}{h\,21} + \mathfrak{R}_a \frac{h\,22}{h\,21} \qquad (6)$$

(Hierbei soll auf die Ableitung der Gleichung verzichtet werden.)

Man sieht, daß die speziellen Selbsterregerformeln für Röhren- und Transistorschaltung große Ähnlichkeit miteinander haben.

4.2.3. Ausgeführte Oszillatorschaltungen

4.2.3.1. Meißneroszillator

Die Rückkopplungsschaltung nach Meißner ist die bekannteste und im Lang-, Mittel- und Kurzwellenbereich am häufigsten angewandte Schaltung. Das Prinzipschaltbild des Meißner-Oszillators mit einer Triode zeigt Abb. 18a.

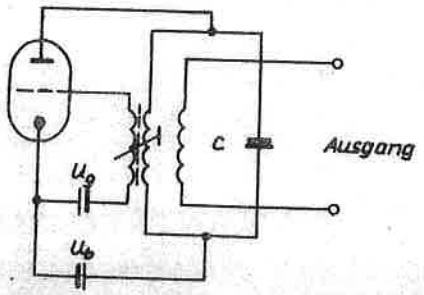


Abb. 18a Prinzipbild des Meißner-Oszillators mit Triode

Die Rückführung eines Teils der Ausgangsspannung auf den Eingang zum Zwecke der Selbsterregung erfolgt durch einen Koppeltransformator. Der Rückkopplungsfaktor ist hierbei auf Grund der transformatorischen Rückkopplung vom Übersetzungsverhältnis des Koppeltransformators abhängig. Man polt die Sekundärwicklung so, daß zwischen $\mathcal{U}_k$ und $\mathcal{U}_a$ eine Phasendrehung von 180° entsteht und damit der Phasenunterschied 0° am Gitter entsteht.

Die Induktivität La bildet mit der Kapazität C einen Parallelresonanzkreis im Anodenzweig der Röhre. Durch Änderung der Kapazität C läßt sich die Resonanzfrequenz und damit die Schwingfrequenz des Oszillators ändern.
Meißner-Oszillatoren werden meistens mit Trioden aufgebaut, da Trioden einen größeren Durchgriff D haben gegenüber Pentoden. Eine Verkleinerung des Durchgriffes würde gleichzeitig, wie man leicht an der Gleichung für die Selbsterregung sieht, eine Verkleinerung des Rückkopplungsfaktors bedeuten.
Den Meißner-Oszillator mit einem Transistor in Emitterschaltung sieht man in Abb. 18 b.

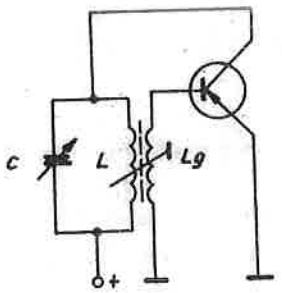


Abb. 18b Meißner-Oszillator mit Transistor in Emitterschaltung

4.2.3.2. Hartley-Oszillator

Der Hartley-Oszillator ist auch unter der Bezeichnung induktive Dreipunktschaltung bekannt. Man kann ihn als eine Abart des Meißner-Oszillators betrachten. In Abb. 19a ist das Schaltbild des Hartley-Oszillators gezeigt. Die Rückkopplung erfolgt bei diesem Oszillator durch die induktive Spannungsteilung. Durch die Wahl der Anzapfung an der Schwingkreisspule ist die Größe des Rückkopplungsfaktors einstellbar.

Dieser ist definiert durch das Verhältnis

$$\delta = \frac{L_{gk}}{L_{ak}} \qquad (7)$$

Mit Hilfe des Drehkondensators C_{ag} wird die Frequenz eingestellt. Die Oszillatorfrequenz ergibt sich aus

$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{(L_{gk} + L_{ak})\ C_{ag}}} \qquad (8)$$

Die Gitter-Anoden-Kapazität liegt bei der Röhrenschaltung dem Drehkondensator parallel. Bei dem Hartley-Oszillator wird die Rückkopplungsspannung, wie beim Meißner-Oszillator, mit gleicher Phase wie die ursprüngliche Spannung auf das Gitter zurückgeführt.
Die Schaltungsform in Abb. 19a ist eine praktische Schaltung. Es gibt noch eine weitere Röhrenschaltung in der die frequenzbestimmenden Bauelemente im Gitter-Katodenkreis liegen (Abb. 19b).

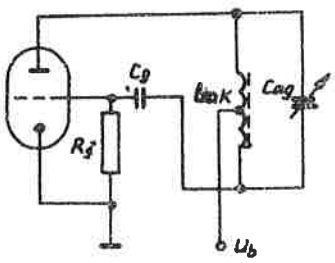


Abb. 19a Praktische Schaltung des Hartley-Oszillators

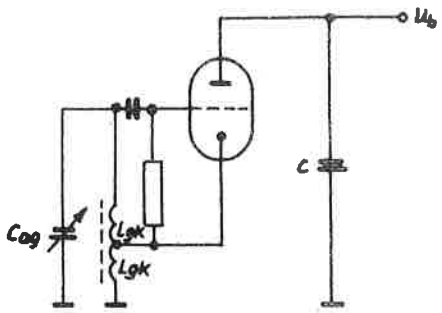


Abb. 19b Hartley-Oszillator, die frequenzbestimmenden Glieder liegen im Gitter-Katodenkreis

Den Hartley-Oszillator mit Transistor in Emitterschaltung zeigt Abb. 19c.

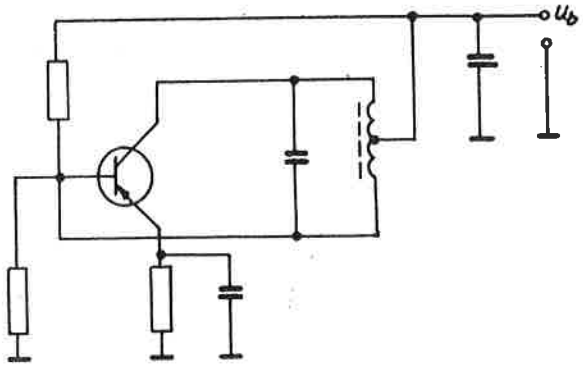


Abb. 19c Hartley-Oszillator in Emitterschaltung

4.2.3.3. Colpitts-Oszillator

Der Colpitts-Oszillator ist in seinem Aufbau dem Hartley-Oszillator ähnlich, nur ist in dieser Schaltung nicht die Induktivität angezapft, sondern hierbei ist die Schwingkreiskapazität aufgespaltet. Man spricht bei dieser Schaltung von einer "kapazitiven Dreipunktschaltung". Der Aufteilungspunkt wird, wie bei der induktiven Dreipunktschaltung, mit der Katode verbunden (s. Abb. 20a).
Der Rückkopplungsfaktor dieser Schaltung ergibt sich aus

$$\mathfrak{K} = \frac{C_{ak}}{C_{gk}} \qquad (9)$$

Hieraus erkennt man, daß die Änderung des Kapazitätsverhältnisses eine Änderung des Rückkopplungsfaktors bewirkt.
Für die Oszillatorfrequenz der kapazitiven Dreipunktschaltung gilt

$$\omega_o = \sqrt{\frac{C_{ak} + C_{gk}}{L_{ag} \cdot C_{ak} \cdot C_{gk}}} \qquad (10)$$

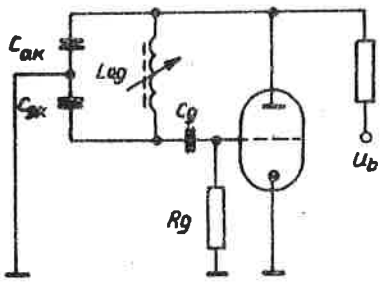


Abb. 20a Kapazitive Dreipunktschaltung (Colpitts-Oszillator)

Eine Veränderung der Schwingfrequenz ist durch eine variable Induktivität (Variometer oder Spule mit einstellbarem HF-Kern) möglich. Die Röhrenkapazitäten gehen mit in die Schwinkreiskapazitäten ein, wodurch die Schaltung gegen wilde Schwingungen unanfällig ist. Die getrennte Einstellung der Rückkopplungsamplitude (Verhältnis der Kapazitäten) und der Frequenz (variable Induktivität) garantiert eine sichere Funktion bei der Abstimmung.
Der Colpitts-Oszillator ist bis in den UKW-Bereich einsetzbar. Abb. 20b zeigt das Schaltbild eines Colpitts-Oszillators mit einem Transistor in Emitterschaltung.

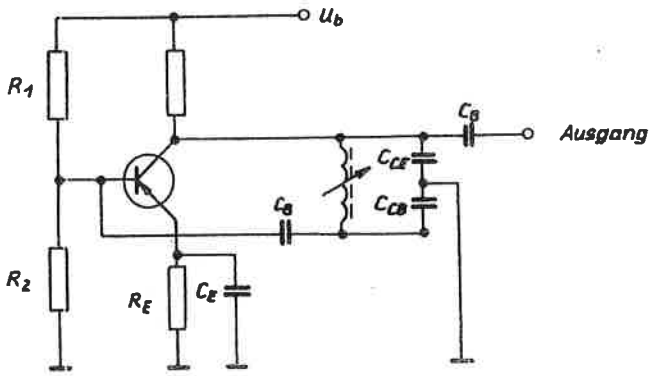


Abb. 20b Colpitts-Oszillator in Emitterschaltung

Der Rückkopplungsfaktor für die Emitterschaltung ergibt sich aus folgenden Gleichungen:

$$R = - \frac{U_{BE}}{U_{CE}} \qquad (11)$$

$$K = \frac{C_{BC}}{C_{BE}} \qquad (12)$$

Alle Transistoroszillatoren lassen sich, außer in Emiterschaltung, auch in Basisschaltung aufbauen, besonders wenn die geforderte Schwingfrequenz sehr hoch liegt.

4.3. HF- und ZF-Verstärker

4.3.1. HF-Verstärker (Eingangsstufen)

Der HF-Verstärker wird als HF-Vorstufe in Empfängern mit mittlerer bis hoher Güte eingesetzt. Die HF-Vorstufe erfüllt gleichzeitig mehrere Aufgaben:

- Vorverstärkung des über die Antenne aufgenommenen hochfrequenten Signals auf eine Größe, die beim Geradeausempfänger eine lineare Gleichrichtung oder beim Überlagerungsempfänger eine brauchbare Mischung in der Mischstufe gewährleistet.
- Vorselektion sowie Verbesserung des Signal-Rauschverhältnisses besonders im KW- und UKW-Bereich.
- Unterdrückung der Ausstrahlung der Oszillatorfrequenz und deren Oberwellen über die Empfangsantenne im UKW-Bereich. Je nach Anforderung werden Empfänger mit ein bis maximal drei HF-Vorverstärkerstufen ausgelegt. HF-Verstärker werden, sofern der Empfänger mit Röhren bestückt ist, fast ausschließlich mit HF-Pentoden aufgebaut. Der Grund dafür ist die hohe Verstärkung, die große Steilheit und der hohe Innenwiderstand dieser Röhren. Der hohe Innenwiderstand erlaubt die Einschaltung einfacher, unangezapfter Schwingkreise in den Anodenkreis, ohne daß diese durch die Röhre bedämpft werden. Für hohe Eingangsfrequenzen (z.B. UKW-Empfänger) ist das Eigenrauschen der HF-Pentode, auch der rauscharmen Spanngitterröhren, zu hoch. Trotz ihrer geringen Verstärkung liefern in diesem Fall HF-Trioden günstigere Signal-Rauch-Verhältnisse. Zur Erhöhung der Verstärkung verwendet man meistens zwei Trioden in der sogenannten Kaskodeschaltung.

Transistorisierte Empfänger werden durch die Verwendung rauscharmer HF-Transistoren empfindlicher als Röhrengeräte. Moderne Bordgeräte haben daher nur Transistoren in den HF-Stufen.
Der relativ geringe Innenwiderstand (kollektor- und besonders basisseitig) der Transistoren zwingt dabei allerdings zu besonderen Maßnahmen bei der Schwingkreisankopplung. (Anzapfung, Koppelwicklungen usw.)

- Verstärkung des HF-Verstärkers

  Die Verstärkungsberechnung gleicht prinzipiell dem Verfahren bei RC-Verstärkern. Dabei gilt für Pentoden, ohne Berücksichtigung anderer schaltungsbedingter Einflüsse

$$V = S \cdot \mathfrak{R}_a \qquad (13)$$

  Bei Selektivverstärkern ist für $\mathfrak{R}_a$ die Größe $\mathfrak{R}_o$, der Scheinwiderstand des Schwingkreises zu setzen. Liegt Resonanz vor, so wird die komplexe Größe reell, also kann R_o geschrieben werden. Die Bestimmung von R_o erfolgt aus den Güten der Schwingkreiselemente, nach den dafür gültigen Elementarformeln (s. Abschn. 4.3.3.3.).
  Sind die Güten der Schwingkreiselemente hoch, d.h. die Verluste klein (z.B. dielektrische Verluste der Kapazität), so ergeben sich hohe Resonanzwiderstände R_o, wodurch eine hohe Stufenverstärkung erreicht wird. Die Stufenverstärkung eines HF-Verstärkers liegt in der Größenordnung zwischen 200 und 400. Sind in einem Empfänger mehrere HF-Stufen vorhanden, so gilt für die gesamte HF-Verstärkung das Produkt aus den Verstärkungen der einzelnen Stufen.

$$V_{ges} = V_{StI} \cdot V_{StII} \cdot \cdots V_{Stn} \qquad (13a)$$

- Verstärkungsregelung

  Die Vorverstärkerstufe wird zum Schutz gegen Übersteuerung der Mischstufe durch eine Gleichspannung geregelt. Übersteuerungen der Mischröhre können zu Frequenzverwerfungen und Aussetzen des Oszillators führen. Hierbei wird die verzögerte Regelung (siehe dazu Abschn. 4.3.4.) angewendet. Dadurch wird verhindert, daß schon bei kleinem Eingangssignal der Regelvorgang einsetzt, wodurch eine Verschlechterung des Signal-Rausch-Verhältnisses hervorgerufen würde. Das bedeutet ein Absinken der Empfindlichkeit des Empfängers.

- Abstimmung des HF-Verstärkers

  HF-Verstärker müssen so aufgebaut sein, daß das gesamte zu empfangende Frequenzband (z.B. 100 MHz bis 150 MHz) annähernd gleichmäßig verstärkt wird, wobei gleichzeitig, wie schon erwähnt, eine Vorselektion gewünscht wird. Dieses erreicht man durch die Abstimmung der in den Gitterkreis bzw. den Anodenkreis geschalteten Selektionsmittel (Schwingkreis oder Filter), in dem die Induktivität bzw. die Kapazität verändert werden.
  HF-Verstärker werden in den verschiedensten Schaltungsvarianten gefertigt, jedoch muß bei allen Arten ein absoluter Gleichlauf der Abstimmung HF-Verstärker-Oszillator gewährleistet sein, da sonst eine Verschiebung der Zwischenfrequenz eintreten würde. Dadurch würde der Signaldurchlauf erheblich oder sogar völlig gestört.
  Abb. 21 zeigt das Prinzipschaltbild eines HF-Verstärkers mit Röhre.

4.3.2. ZF-Verstärker

Der ZF-Verstärker ist, wie unter Punkt 3.2. schon behandelt wurde, nur in Überlagerungsempfängern anzutreffen. Der ZF-Verstärker ist neben dem Oszillator das grundlegende Merkmal eines Überlagerungsempfängers.

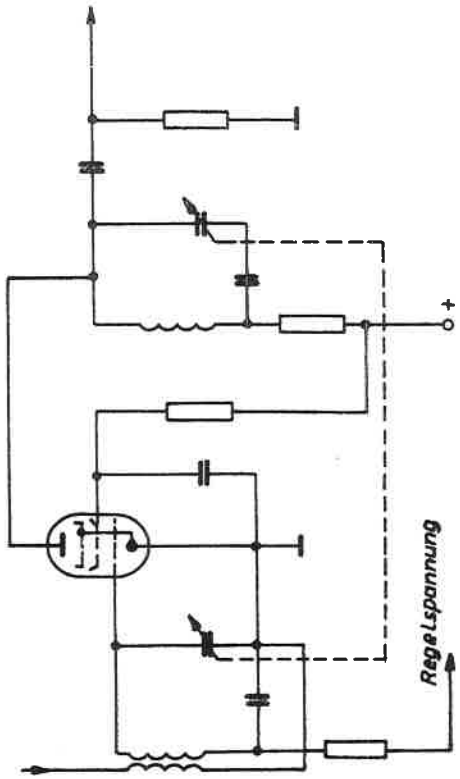


Abb. 21 HF-Vorstufe

Die Aufgabe des ZF-Verstärkers ist es, das Zwischenfrequenzsignal (ZF) entstanden aus der Mischung von Eingangsfrequenz f_e und Oszillatorfrequenz $f_{Osz.}$, so selektiv wie nur möglich zu verstärken. ZF-Verstärker arbeiten wie HF-Verstärker und sind in der gleichen Weise zu berechnen, sind jedoch im Gegensatz zu HF-Verstärkern auf eine bestehende Frequenz fest abgestimmt (Ausnahmen findet man beim Dreifachsuper, der eine variable 1. ZF haben kann). Die feste Abstimmung und die gegenüber der Eingangsfrequenz relativ niedrige Zwischenfrequenz ermöglichen es eine hohe Verstärkung, bei hoher Selektivität und hinreichend großer Bandbreite zu erreichen.

ZF-Verstärker werden mehrstufig aufgebaut. Wegen der erforderlichen hohen Verstärkung werden ausschließlich HF-Pentoden bzw. HF-Transistoren eingesetzt. Als Belastungswiderstand wirkt der Eingangswiderstand des in den Anodenkreis geschalteten Selektionselementes, das Bandfilter. Bandfilter haben bei guter Selektion eine größere Bandbreite als ein Einzelkreis. Der Einsatz von Pentoden anstelle von Trioden ist durch den wesentlich höheren Innenwiderstand der Pentode (Größenordnung 500 k Ohm) begründet. Eine Triode mit einem Innenwiderstand $R_i \approx$ 10 kOhm würde den im Anodenkreis liegenden Bandfilterkreis (Resonanzwiderstand $R_o \approx$ 100 kOhm) so stark bedämpfen, daß eine Verflachung und Verbreiterung der Filterdurchlaßkurve entstehen würde. Das führt zur Senkung des Verstärkungsgrades und zur Verschlechterung der Selektivität.

Normale LC-Bandfilter liefern Bandbreiten von 4 bis 10 kHz. Sind geringere Bandbreiten gefordert, wie z.B. beim Telegrafiebetrieb, setzt man Schwingquarze in die Bandfilter ein. Durch Quarzfilter können Bandbreiten bis zu 20 Hz realisiert werden. Man kennt zwei-, drei- und mehrkreisige Bandfilter, deren Kreise induktiv oder kapazitiv miteinander gekoppelt sind. Der Kopplungsgrad, man unterscheidet drei Arten der Kopplung

- unterkritisch
- kritisch
- überkritisch.

bestimmt die Form der jeweiligen Durchlaßkurve, d.h. die Verstärkung (Höhe der Kurve) und die Bandbreite sowie die Selektion (Breite der Kurve und Flankensteilheit).
Bei ZF-Verstärkern werden ebenfalls wie bei anderen Baugruppen der Funkempfangstechnik Transistoren eingesetzt. Jedoch ist der schaltungstechnische Aufwand beim Einsatz von Transistoren insofern größer als besonders die Eingangswiderstände klein sind und bei direkter Ankopplung der gleiche Effekt, wie der oben bei Verwendung von Trioden beschriebene, auftritt. Dieser Tatsache begegnet man durch Anzapfung der Spulen (siehe Abb. 22b) oder durch passende Sekundärwicklungen usw.
Abb. 22a und 22b zeigen die Prinzipschaltungen von ZF-Verstärkerstufen.

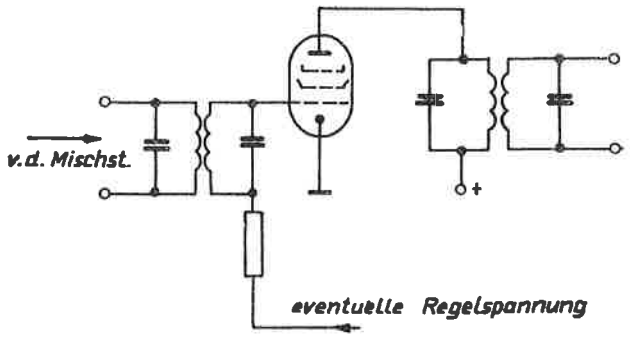


Abb. 22a ZF-Verstärkerstufe mit Pentode

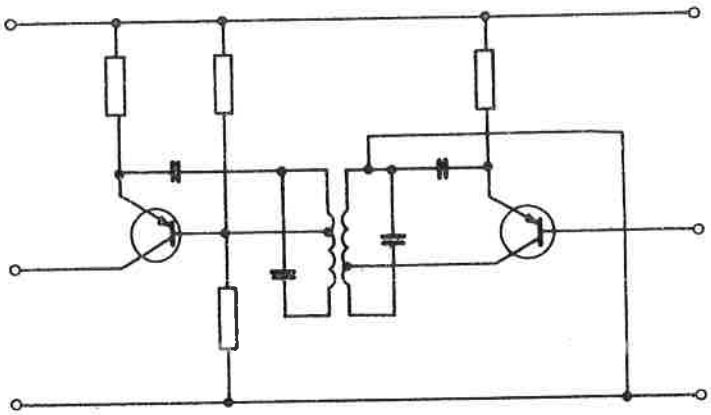


Abb. 22b ZF-Verstärkerstufe mit Transistoren

4.3.3. Die Bandbreite und die Empfindlichkeit von ZF- und HF-Verstärkern

4.3.3.1. Allgemeines zur Bandbreite und ihrer Abhängigkeit von den Schaltelementen

Unter dem Begriff "Bandbreite" versteht man den Frequenzdurchlaßbereich eines Verstärkers, in dem die Frequenzen seitlich (unter und über) der Sollfrequenz f_o noch mit dem 0,707-fachen Wert der maximalen Verstärkung verstärkt werden. Die gewünschte Bandbreite sowie die Selektion eines Verstärkers werden durch zweckmäßige Auswahl der Selektionselemente wie Einzelkreis (Schwingkreis), Bandfilter, Quarzfilter oder in Sonderfällen durch die Verwendung von elektromechanischen Filtern erreicht.

In jedem Falle wird dadurch eine mehr oder weniger steile und breite Selektionskurve erzeugt (siehe Abb. 23a).
Die Bandbreite ist derjenige Frequenzbereich, der zwischen den Frequenzen f_1 und f_2 liegt, wobei f_o die Soll- oder Bandmittenfrequenz ist. Sie ist abhängig von den Verlusten (der Güte) der verwendeten Bauelemente (Induktivitäten, Kapazitäten) der Schwingkreise. Ein weiterer, die Bandbreite bzw. die Güte des Selektionskreises beeinflussender Faktor ist der Innenwiderstand der Röhre bzw. der Ausgangswiderstand des Transistors, in deren Anoden- bzw. Kollektorkreis der Schwingkreis oder das Bandfilter geschaltet ist. Der Eingangswiderstand der nachfolgenden Stufe übt gleichermaßen einen dämpfenden Einfluß aus. Auch ein kleiner Röhreninnenwiderstand, Transistorausgangswiderstand sowie kleine Gitterableit- und Basiswiderstände der folgenden Stufe bedämpfen den Selektionskreis. D.h. die in Abb. 23a dargestellte Selektionskurve wird flachgedrückt (Abb. 23b), wobei der Anstieg der Flanken stark verringert (schlechte Selektion) und gleichzeitig die Bandbreite (Breite der Kurve in 0,707-facher Höhe) vergrößert wird.
Für die unverfälschte Übertragung von kommerziellen Telefoniesignalen wird eine Bandbreite von ca. 6 kHz und für Telegrafiesignale im Einseitenbandbetrieb eine Bandbreite von ca. 10 Hz benötigt.
Die Idealform einer Selektionskurve ist ein Rechteck. Jedoch ist dieses in der Praxis nicht zu realisieren. Eine befriedigende Annäherung an die Idealform wird mit Quarzfiltern oder elektromechanischen Filtern erzielt (siehe Abb. 23c).
Alle Frequenzen, die außerhalb des Bereiches f_1 und f_2 liegen, (Abb. 23a, b, c) werden abhängig von ihrem Abstand gedämpft und schließlich völlig unterdrückt, d.h. diese Frequenzen werden vom Empfänger nicht verarbeitet. Der Sperrgrad gegen die Nachbarfrequenzen wird als Nebenwellen- oder Nachbarkanaldämpfung bezeichnet und in dB (Dezibel) ausgedrückt.