

In 100 Jahren vom Fritter zum Digitalempfänger (3)

AUTOR



RUDOLF GRABAU
Much
Tel. 02245 3471

Einführung neuer Gleichrichter- und Verstärkerelemente

Bei Verfügbarkeit diskreter Halbleiter (Dioden, Transistoren) ab Anfang der 60er Jahre wurden die bislang entwickelten Empfangsprinzipien der Röhrengeräte weitgehend beibehalten, jedoch verringerten sich Gerätegewicht und -abmessungen (bei vergleichbaren Nutzungseigenschaften) erheblich; der Aufwand reduzierte sich auch deswegen, weil keine Anodenspannung mehr erforderlich war. Bislang konnten Störgeräusche allenfalls durch Kappung von Amplitudenspitzen („Krachtöter“) oder höheren Frequenzen („Klangblende“) begrenzt werden, erst mit Halbleitern wurde eine wirksame Rauschunterdrückung bei geringem Aufwand möglich (Störaustattung, Squelch/Muting).

Nutzung der Fähigkeiten elektronischer Datenverarbeitung

In den 80ern wurden unter Nutzung der Datenverarbeitung hochwertige Filter entwickelt, die hohe Selektivität auch bei höheren Frequenzen aufwiesen. Dadurch war es möglich, Zwischenfrequenzverstärker weitgehend beliebiger Bandbreite weitab von der Empfangsfrequenz zu realisieren. Gleichzeitig sind sehr übersteuerungsfeste Mischer entwickelt worden. Vermehrt wurde anstelle der „additiven“ Mischung, bei der beide Signale direkt zusammengeführt werden, um sich an der nichtlinearen Kennlinie (Diode, Transistor) zu überlagern, wieder die „multiplikative“ Mischung angewendet. Bei dieser wird der Mischer über zwei getrennte Steuerelektroden (z. B. Ringmischer, Dual Gate MOSFET) angesteuert. Unter Verwendung von hochentwickelten Filtern und Mischern wurden Empfänger mit großem Dynamikbereich, hoher Spiegelfrequenz- und Intermodulationsfestigkeit sowie hoher Selektivität realisierbar, und zwar bereits bei Einfachüberlagerung. Zugleich wurde es möglich, unter Verwendung von dekadisch steuerbaren Oszillatoren Empfänger mit hoher Fre-

quenzstabilität, Treffsicherheit, Reproduzierbarkeit und Abstimmgeschwindigkeit sowie mit großem RF-Frequenzbereich herzustellen, so dass Mehrfachüberlagerung nicht mehr erforderlich war. Die hier aufgezeigte Entwicklung galt allerdings vorzugsweise für die kommerzielle Funktechnik, während für zivile Produkte (Unterhaltungselektronik) ein anderer Trend verfolgt wurde: Stärkere Integration der Schaltelemente in mehreren Generationen von integrierten Schaltkreisen (IC), Automatisierung der Verfahren zur Herstellung von Massenprodukten, dadurch Senkung der Verkaufspreise, Steigerung des Verbrauchs von Elektronikprodukten („Ex und Hopp“).

Wie bereits zuvor erwähnt, haben Fortschritte in der Filtertechnik, in der Herstellung intermodulationsarmer Mischer sowie in der Oszillatorentwicklung in der Folgezeit zu erhebliche Veränderungen des Überlagerungsempfängers bewirkt. Schließlich wurde der freischwingende Oszillator durch dekadisch einstellbare Steueroszillatoren oder durch Synthesizer ersetzt – besonders bei kommerziellen/militärischen Anwendungen. Dieser erzeugt über einen größeren Bereich in sehr kleinen Schritten radiofrequente Wechselspannungen veränderbarer Frequenz, die von einem oder mehreren hochkonstanten Quarzgeneratoren abgeleitet oder auch extern (GPS) gesteuert wird. Die jeweilige Frequenz wird dekadisch aufgebaut, wobei die Genauigkeit des Steuergenerators erhalten bleibt.

Zuletzt ermöglichten SMD-Bauelemente (Surface Mounted Devices) und die Multi-Layer-Technik der „Platinen“ eine nochmalige Miniaturisierung auch anspruchsvoller Geräte – ohne zunächst jedoch einen voll digitalen Empfänger mit dem bislang gewohnten Leistungsvermögen zu erreichen.

Digitalempfänger

Auch die Entwicklung digitaler Empfänger begann in den 80er Jahren. Man versuchte dabei, Funktion und Eigenschaften eines Geräts zum Empfang drahtlos übertragener radiofrequenter Signale mit Hilfe anpassbarer Hardware in Software abzubilden. Ziel waren nicht nur preiswerte, weitgehend automatisch

herstellbare Geräte für Rundfunkempfang („Radio on a chip“), sondern vor allem auch das sogenannte „Software Defined Radio“ (SDR) für kommerzielle und öffentliche Funkdienste – also Anwendungen im Bereich von Sicherheitsdiensten und Streitkräften sowie im Mobilfunk. Ein SDR führt einen Großteil der Signalverarbeitung mit Hilfe eines Allzweckrechners oder programmierbarer Digitalhardware durch (z. B. DSP). Dadurch soll größtmögliche Flexibilität erreicht werden. Es ermöglicht die Implementierung unterschiedlicher Funkverfahren durch alleinigen Austausch der Software. So könnten z. B. zellulare SDR-Netze innerhalb kürzester Zeit kostengünstig auf neue Standards hochgerüstet werden.

Der ideale SDR-Empfänger würde aus einem Analog-Digital-Konverter mit Antenne bestehen (Bild 32). Die ausgelesenen Daten könnten dann von einem digitalen Rechner verarbeitet werden. Noch ist allerdings die verfügbare digitale Elektronik zu langsam, um alle Funksignale in einer Breite von z. B. 2 GHz direkt in ausreichender Auflösung zu digitalisieren, auch reicht deren Dynamikbereich nicht aus. Daher wird derzeit ein analoger Mischer vorgeschaltet, welcher das Signal in ein niedrigeres Basisband heruntermischt (Bild 33). In einem SDR wird die Radiofrequenz mit einem Mixer in eine Zwischenfrequenz von z. B. 12 kHz umgesetzt. Diese Zwischenfrequenz wird mit Hilfe von Analog/Digital-Wandlern digitalisiert, die Demodulation erfolgt in Software. Anstelle von spezifischen Demodulatoren kann auch ein Universalrechner eingesetzt werden, welcher die Demodulation sowie die weitere Verstärkung und gegebenenfalls Verarbeitung übernimmt. Die Hardware eines SDR besteht typischerweise aus einem Sender- und Empfängermodul, sowie jeweils einem A/D- und D/A-Konverter. Vorerst

konnte allerdings mit Hilfe der SDR-Technik lediglich einfache Radiotechnik implementiert werden, für anspruchsvollere Empfänger war weiterhin noch ein analoges Frontend erforderlich. Ziel war und ist natürlich eine Ultra-Wide-Band-Technik, das heißt Vielkanalempfang von Funksendern, die ihre Übertragungsfrequenz in einem weiten Bereich des Spektrums frei wählen (anstelle der heutigen Funkgeräte mit vielen nebeneinanderliegenden diskreten Frequenzkanälen).

Heute unterscheiden sich Empfänger außer in den nutzerspezifischen und technischen Eigenschaften auch durch ihre Ausgänge, die an die Art der Signalverarbeitung angepasst sind. In früherer Zeit wurde fast ausschließlich der demodulierte Inhalt abgehört oder ausgedruckt. Heute bestimmt das gewünschte Ausgangssignal immer mehr auch die Empfänger-technologie, sei es ein Videoausgang, ein analog getastetes Fax-Signal, das Basisband oder die Zeichenfolge einer Multiplexübertragung (Richtfunk), besonders aber eine große Vielfalt immer komplexer werdender Digitalmodulationen. Für die weitere Verarbeitung wird vom Empfänger gefordert, dass alle relevanten Merkmale der RF-Ausstrahlung und/oder der Inhalt dieser Aussendung parallel beziehungsweise seriell bereitgestellt werden.

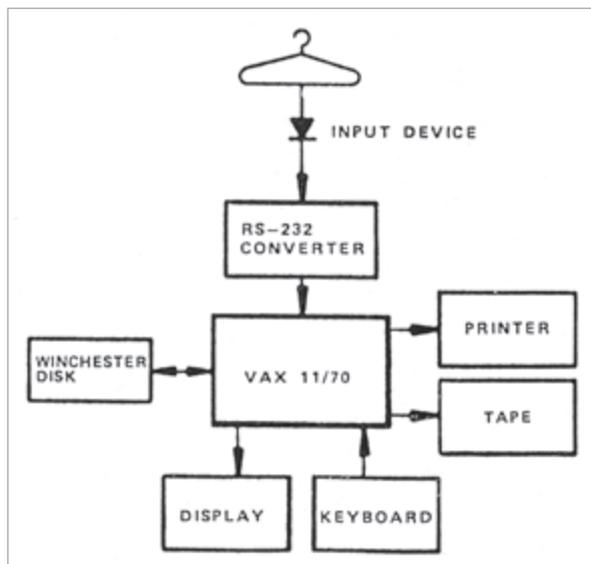


Bild 32: Idealer Digitalempfänger nach Vorstellung des Informatikers (in den 80er Jahren). Abb aus [17]

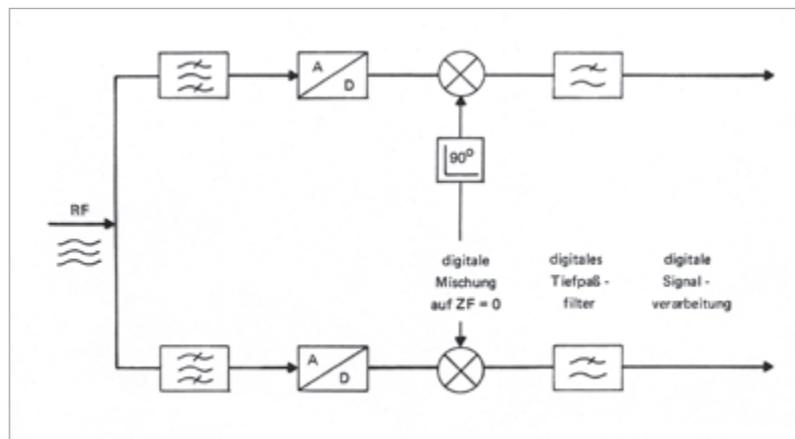


Bild 32: Digitaler Empfängern nach dem Homodynprinzip. Abb aus [1].

Breitbandempfänger

Der Bedarf für Breitbandempfang entstand zunächst bei der hoheitlichen Funküberwachung sowie in der Aufklärung durch Nachrichtendienste und Streitkräfte. Mit Aufkommen neuartiger Kommunikationsverfahren, die ohne feste Frequenzzuteilung oder mit komplexen breitbandigen Modulationsverfahren betrieben werden sollen, gewinnen derartige Empfangsprinzipien aber auch generelle Bedeutung. Mehrere Prinzipien stehen im Wettbewerb untereinander [17, 19].

Unübertroffen ist immer noch ein Empfängerprinzip, das heute (quasi als Standard) für frequenzselektive Funkempfänger angewendet wird, nämlich das des Überlagerungsempfängers (Superhet). Dieser eignet sich jedoch nur bedingt zur Abdeckung größerer Frequenzbereiche, denn bei Bandbreitenvergrößerung verringern sich Empfindlichkeit wie Diskriminationsfähigkeit. Dennoch wird hierzu der kanalabtastende Superhet (scanning superhet receiver, Bild 34) mit kontinuierlichem oder schrittweisem Durchlauf des Mischeroszillators eingesetzt. In Version eines relativ sehr schnellen Suchempfängers wird er oft auch zur Einweisung (Akquisition) von diskret abstimmbaren Empfängern benutzt, welche dann die Aufnahme des Senders übernehmen, die der Suchempfänger gefunden hat (Abhängeempfang, Bild 35). So wird dieser wieder frei gemacht und kann die Suche fortsetzen. Aber zwangsläufig sinkt auch hierbei die Auffasswahrscheinlich-

keit der Abtastgeschwindigkeit nicht überschritten werden, wenn die Empfindlichkeit nicht erheblich absinken soll. Die Bandbreite ist der Quadratwurzel der Abtastgeschwindigkeit proportional. Daher erreicht der kanalabtastende Suchempfänger schnell seine Grenzen von Auflösung und Empfindlichkeit.

Bei einfachen Ausführungen für höhere Frequenzbereiche (SHF/EHF) besteht die Eingangsschaltung oft aus einem Yttrium-Granat-Filter (yttrium iron garnet YIG) als Vorselektion, einem Mischer und einem frequenzvariablen Oszillator. Filter und Oszillator werden elektronisch durchgestimmt (mit typisch 100 MHz/ms). Erfordernisse aufgrund der Signalumwelt (z. B. Frequenzagilität) haben allerdings dazu geführt, dass auch Superhets mit größerer Momentanbandbreite (bis mehrere hundert MHz) angewendet werden.

Den Kristall-Video-Empfänger (crystal video receiver) als einfachstes Empfangsprinzip gibt es nach 100 Jahren immer noch, allerdings nur im militärischen Bereich zur Warnung vor elektromagnetischer Anstrahlung, wie z. B. bei tragbaren Warnempfängern gegen Gefechtsfeldradar. Der einfachste Warnempfänger besteht aus einer Breitbandantenne, einem Impuls-Demodulator (im einfachsten Fall einer rauscharmen „Kristall“-Diode) und anschließender optischer oder akustischer Ausgabe des so gewonnenen Videosignals. Die Empfindlichkeit eines derartigen einfachen Dioden-Empfängers ist sehr gering, sie kann aber durch Vorschalten eines rauscharmen Breitbandverstärkers und Nachschaltung eines Videoverstärkers mit logarithmischer Kennlinie erheblich gesteigert werden. Eine eingeschränkte Frequenzselektivität kann mit einem Parallel-Filter-Empfänger (paralleled filter receiver, channelized receiver) erreicht werden. Hierbei werden durch Parallel- und Kaskadenschaltung von Filtern mit zwischengeschalteten Mischeinrichtungen Bänder und Teilbänder voneinander getrennt. Durch abstimmbare Selektionsmittel kann die Frequenzdiskriminationsfähigkeit (auf 5 – 50 MHz) weiter gesteigert werden, hierzu verwendet man heute zumeist YIG-Filter, elektrisch über einen großen Frequenzbereich steuerbare Filter hoher Güte. Empfindlichkeit und Auffasswahrscheinlichkeit bleiben jedoch begrenzt, das gewonnene Ausgangssignal lässt nur einfache Verarbeitungsalgorithmen zu und engt somit die Sicherheit der Signal-Klassifizierung ein – daher wird dieses Empfangsprinzip wohl weiterhin auf wenige Anwendungsgebiete beschränkt bleiben. Treibt man dagegen wesentlich höheren Aufwand, z. B. durch Einsatz von mehreren Superhet-Empfängern, nähert man sich bereits den Prinzipien (und dem Aufwand) des Filterbank- bzw. Vielkanal-Empfängers (s.u.).

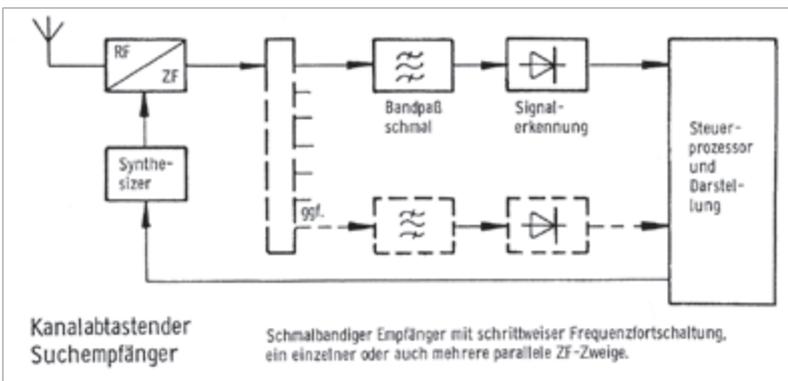


Bild 34: Kanalabtastender Suchempfänger mit schrittweiser Frequenzfortschaltung. Abb. aus [1].

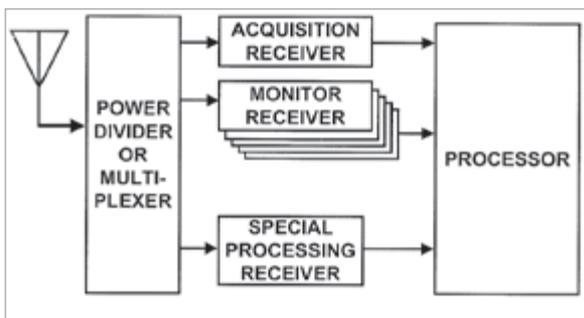


Bild 35: Struktur einer Empfangsanlage mit scannendem Suchempfänger zur Akquisition sowie Abhängeempfängern für Signalaufnahme und Analyse. Abb. aus [17].

keit bezogen auf den Gesamtfrequenzbereich erheblich ab, auch ist die erreichbare Genauigkeit der Frequenzeinweisung begrenzt. Denn ein herkömmlicher Superhet hat zwar den Vorteil, dass seine Frequenzauflösung durch eine Verringerung der ZF-Bandbreite gesteigert werden kann – bei einer gegebenen ZF-Bandbreite darf allerdings eine bestimmte maxima-

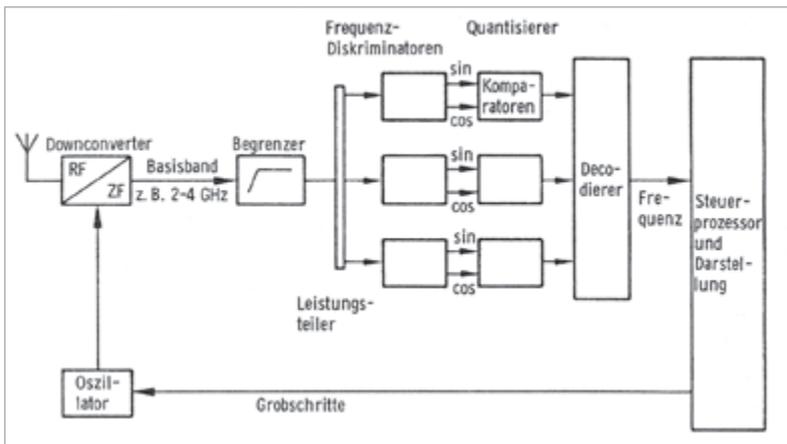


Bild 36: Prinzipielle Struktur eines IFM-Empfängers.

Abb. aus [17].

sung gefordert, z. B. zur Einsteuerung selektiver Superhet-Empfänger. Hierzu kann man einen IFM-Empfänger (instantaneous frequency measurement receiver) verwenden. Dieser besitzt als Eingangsschaltung entweder ein Bandpassfilter mit RF-Begrenzungsverstärker oder einen Superhet-Down-Converter mit folgender Begrenzung (Bild 36). Der Begrenzer dient zur Anpassung des RF-Pegels an den Dynamikbereich der folgenden Diskriminator-schaltung. Leistungsteiler verteilen das Eingangssignal auf parallelgeschaltete Frequenz-diskriminatoren aus Verzögerungsbaugruppen und Detektoren. Nachgeschaltete Videoverstärker liefern eine Ausgangsspannung, deren Phasenlage digital in Komparatoren gemessen wird. Die quantisierten Phasenwinkelinformationen werden in einem Prozessor verarbeitet. Als Ausgang werden Frequenzwerte erzeugt, welche die empfangene RF angeben. Vorteil des IFM-Empfängers ist seine fast 100%ige Auffassungswahrscheinlichkeit im Empfangsfrequenzbereich (üblich eine Oktave, also 1:2) und seine recht gute Frequenzauflösung (typisch bis 2,5 MHz).

In den 60er Jahren untersuchte man auch

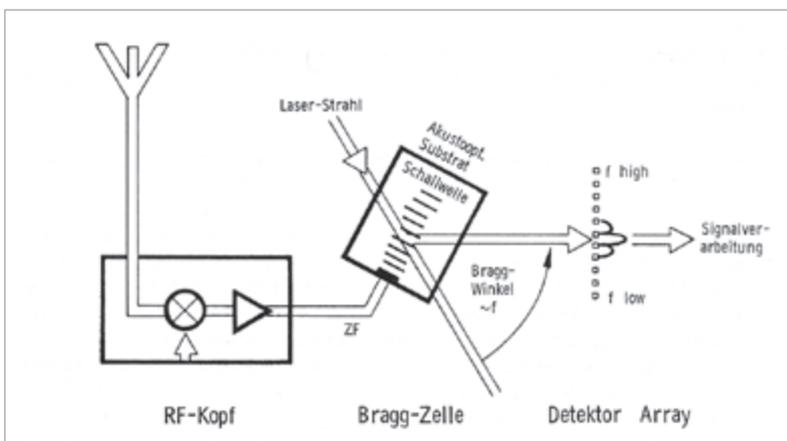


Bild 37: Prinzipielle Funktion eines Braggzellen-Empfängers.

Abb. aus [17].

optische Verfahren zur Frequenzdiskrimination, so den Braggzellen-Empfänger (Bragg Cell receiver). Dabei wird der physikalische Effekt angewandt, nach dem ein Lichtstrahl gebeugt wird, wenn er durch ein enges Gitter tritt. Als Bragg-Effekt bezeichnet man die Entdeckung, dass eine mechanische Welle in einem akustooptischen Substrat (also einem Material, in dem sich akustische Wellen und Lichtwellen ausbreiten können) durch Ausbildung von Zonen höheren und niedrigeren Drucks ein Beugungsgitter erzeugt (Bild 37). Ein Lichtstrahl, der dieses Gitter durchdringt, wird um den Braggwinkel abgelenkt.

In einem Braggzellen-Empfänger werden drei wesentliche Komponenten benötigt:

- Ein Laser als Quelle monochromatischen, kohärenten Lichts.
- Die eigentliche Braggzelle, bestehend aus einem ausgerichteten Ein-Kristall (optisch transparent, akustisch anregbar), einem breitbandigen elektromagnetischen (z. B. piezoelektrischen) Wandler und einem Wellenabsorber, der am gegenüberliegenden Ende die mechanischen Wellen reflexionsfrei aufnimmt.
- Ein Photodetektor-Array zur Detektion der gebeugten Laserstrahlung.

Der gebeugte Laserstrahl fällt auf einen Punkt des Detektor-Arrays. Der Bragg-Winkel ist ein Maß für die Frequenz des Eingangssignals. Speist man den Schallgeber der Braggzelle mit einem Frequenzgemisch, so entstehen alle entsprechenden Beugungsgitter gleichzeitig, aus der Braggzelle tritt dann ein Lichtband aus, dessen Intensität proportional den Amplituden der jeweiligen Frequenzen ist. An den einzelnen Detektoren des Arrays kann die Signalbelegung des gesamten Empfangsfrequenzbereichs in Realzeit als Digitalinformation entnommen werden. Prinzipiell handelt es sich um eine extrem schnelle Fourier Transformation des Empfangsfrequenzbereichs. Diese wird in zwei Nanosekunden durchgeführt, nämlich die das Laserlicht benötigt, um die Braggzelle zu durchlaufen. Den Schwachpunkt des Braggzellen-Empfängers stellt das Detektorarray dar. Die Pho-

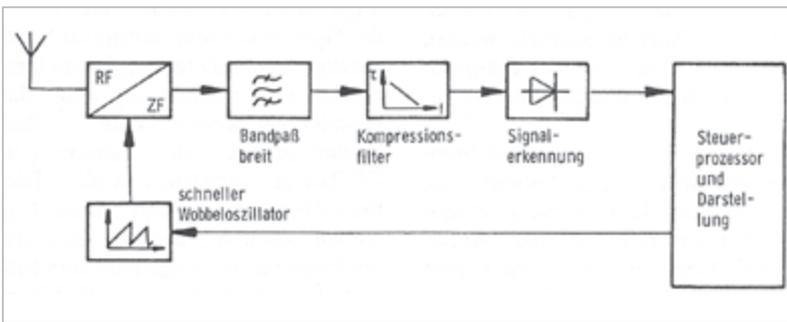


Bild 38: Funktion des Kompressionsempfängers. Abb. aus [17].

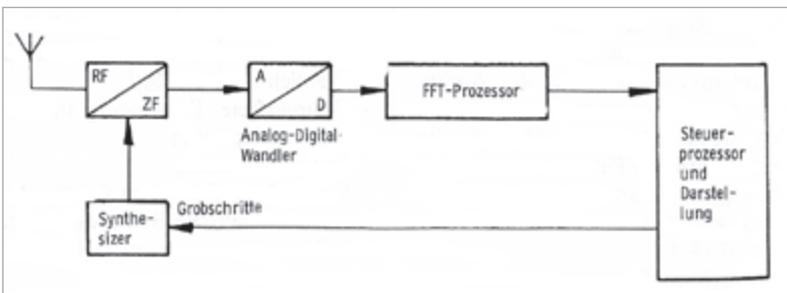


Bild 39: Funktion des FFT-Empfängers. Abb. aus [17].

todetektoren verfügen bei kurzer Signaldauer nur über geringe Empfindlichkeit und der Empfänger besitzt nur einen kleinen Dynamikbereich, kann also leicht übersteuert werden. Dieses innovative Empfangsprinzip gilt daher – wie auch andere Anwendungen der Surface Acoustic Wave (SAW)- oder Oberflächenwellen (OFW)-Technologie – nicht mehr als zukunftsfähig.

Beim Kompressions-Empfänger (compressive receiver, microscan receiver, Bild 38) durchläuft ein schneller Oszillator periodisch sei-

nen Frequenzbereich. Das von einem breiten Bandpass ausgefilterte ZF-Band wird einem synchron durchstimmbaren Kompressionsfilter zugeführt, dem die Signalerkennung nachgeschaltet ist. So wird eine hohe Abtastgeschwindigkeit erreicht. Grundsätzlich besteht der Kompressions-Empfänger aus denselben Komponenten wie ein kanalabtastender Überlagerungsempfänger, mit Ausnahme des Filters, einer dispergierenden Verzögerungsleitung. Das erfasste Signal wird durch einen linear abtastenden Oszillator frequenzverschoben. Die Verschiebung ist der Oszillatorabstimmung proportional, diese wiederum ist an die verwendete Verzögerungsleitung angepasst. Das Ausgangssignal der Verzögerungsleitung ist ein zeitlich komprimierter Impuls, dessen zeitliche Lage in unmittelbarem Zusammenhang mit der Frequenz des vom Empfänger erfassten Signals steht. Ist die Zeitverzögerung der Verzögerungsleitung gleich der Abtastgeschwindigkeit des Empfangsoszillators, dann steht die gesamte, in der Verzögerungsleitung enthaltene Signalleistung fast zum gleichen Zeitpunkt am Ausgang an. Die Dauer des aus der Verzögerungsleitung kommenden komprimierten Impulses ist etwa gleich dem Kehrwert der Bandbreite, z. B. bei 500 MHz zwei Nanosekunden. Die Frequenzauflösung des Kompressionsfilters ist wesentlich höher als die des ZF-Verstärkers, sie ergibt sich aus dem Kehrwert der Dispersion der Verzögerungsleitung, also z. B. bei einer Dispersion von 200 ns 5 MHz. Beim Kompressionsvorgang bleibt die relative Amplitude des Eingangssignals erhalten, kann also als Hilfsmittel für eine Signalerkennung verwendet werden.

Beim FFT-Empfänger (Bild 39) wird mittels eines schrittweise abgestimmten Oszillators ein breites RF-Teilband einem Analog/Digital-Wandler mit großer Auflösung und hoher Geschwindigkeit zugeführt. Die in die digitale Ebene gewandelten Signale werden in einem FFT-Prozessor quasi in Realzeit als Spektrum untersucht, die Ergebnisse einem Steuerprozessor zugeführt. Mit diesem Prinzip wird eine hohe Wahrscheinlichkeit der Signalerkennung erreicht.

Der Filterbank-Empfänger (Bild 40) wendet ebenfalls das Superhet-Prinzip an. Ein breites RF-Teilbandsignal wird parallel einer Filterbank zugeleitet (z. B. 5 GHz auf 100 Filter von je 50 kHz). Diese setzt sich aus einer Vielzahl von gleich breiten, aber frequenzmäßig nebeneinanderliegenden Einzelfiltern zusammen. Das RF-Teilbandspektrum wird kammförmig auf Belegung geprüft, das Ergebnis der Signalerkennung parallel dem Prozessor zugeleitet. An den Frequenzgrenzen zwischen den Filtern entstehen durch Leistungsaufteilung „Grauzonen“ der Signalerkennung, die durch eine zweite Filterbank oder eine Verschiebung des ZF-Bandes

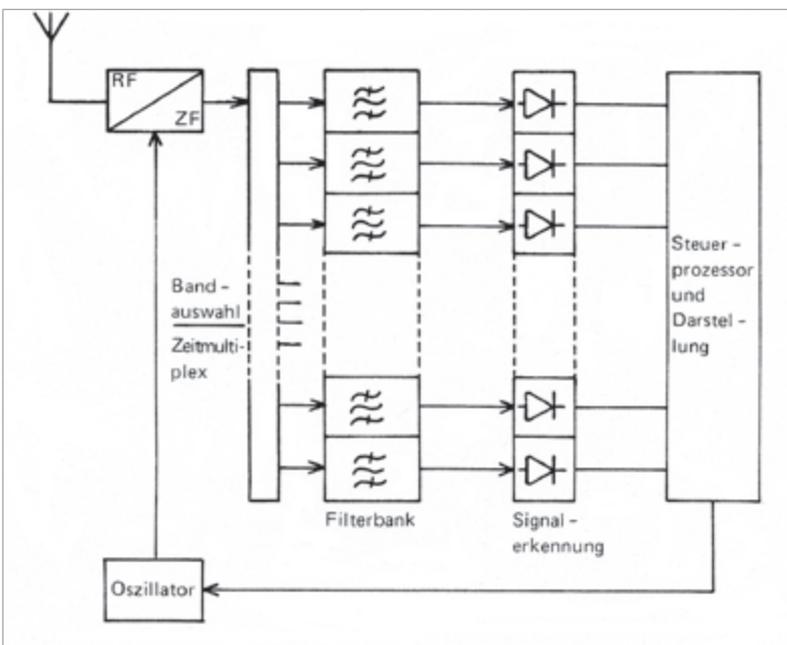


Bild 40: Funktion eines Filterbank-Empfängers. Abb. aus [17].

(jeweils um 50% Bandbreite) vermieden werden können, was allerdings zusätzlichen Aufwand beziehungsweise Halbierung der Suchgeschwindigkeit bedeutet. Der Filterbank-Aufwand kann verringert werden, wenn mittels Oszillator schmale RF-Bänder ausgewählt und die Filterbank im Zeitmultiplexbetrieb betrieben wird.

Der Vielkanal-Empfänger (Bild 41) ist bislang das aufwendigste, aber auch leistungsfähigste und vielseitigste Empfangssystem. Bei Vollausbau besteht er aus einer Vielzahl parallelgeschalteter Superhet-Empfänger, bei denen gegebenenfalls auch ZF-Bandbreiten und Signalerkennung den erwarteten Signalen angepasst werden können. Derartig aufwändige Suchempfangs-Prinzipien hoher Leistung waren bisher Suchaufgaben im Bereich der FmEloAufklärung vorbehalten. Die Entwicklung der Nachrichtenübertragungstechnik lässt allerdings erwarten, dass in absehbarer Zeit und bei fortentwickelter Technologie und weiter fallenden Preisen derartige Verfahren auch für breitbandig wirksame Kommunikationssysteme eingesetzt werden können (z. B. in Basisstationen mit einer Vielzahl von Funkstellen wie z. B. Software Defined Radios).

All diese Prinzipien zum Breitbandempfang werden unter Berücksichtigung von Anforderungen, Einsatzumgebung und Aufwand bereits in begrenzter Stückzahl im militärischen Bereich angewendet. Ob sich eines davon auch im Massenmarkt der Kommunikationsverfahren als Standard durchsetzt (oder ein anderes, neu zu entwickelndes), wird sich in der Zukunft zeigen – die größten Chancen, auch unter Kostengesichtspunkten, scheint derzeit der FFT-Empfänger zu haben.

Nachsatz

Der Autor beschreibt – wie schon in den vorangegangenen Folgen seines Beitrags – in diesem 3. Teil besonders die weitere Entwicklung der Empfängertechnik in den letzten Jahrzehnten des 20. Jahrhunderts, und zwar aus seinem Erfahrungshintergrund der kommerziellen Funktechnik - wohl wissend, dass sich

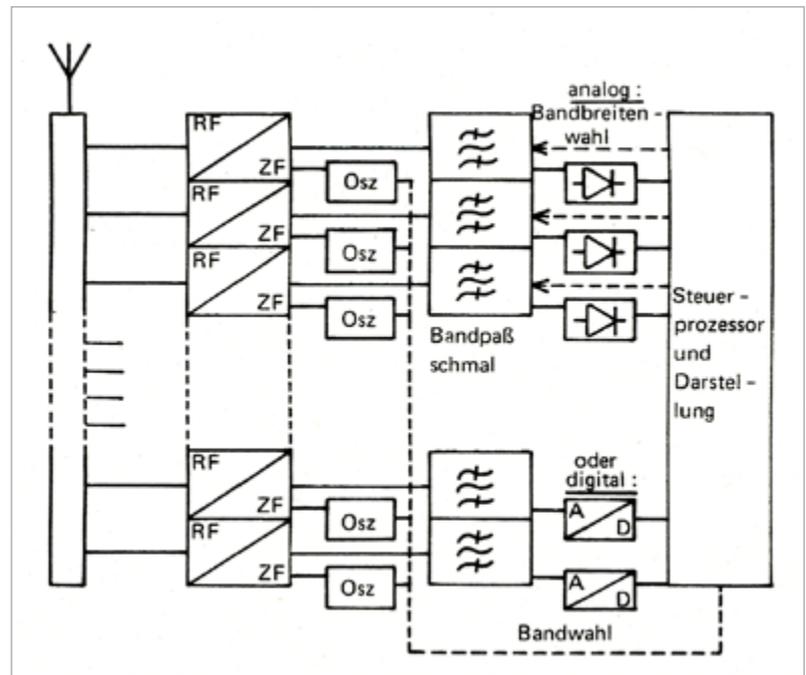


Bild 41: Funktion eines Vielkanalempfängers.

Abb. aus [17].

Den wesentlichen Engpass stellt aber immer noch, auch beim FFT-Empfänger, die RF-Eingangsschaltung (das „front end“) dar, denn die verfügbaren digitale Lösungen erreichen noch nicht das inzwischen gewohnte Leistungsvermögen analoger Eingangsschaltungen. Anzumerken ist jedoch, dass auch Festfrequenzempfänger (fixed-tuned receiver) wieder Anwendungen finden, z. B. zur Aufnahme von GPS-Signalen – hierbei werden die verschiedenen Sender und ihre Nachrichteninhalte anhand ihrer Codemodulation voneinander unterschieden.

die allgemeine Radiotechnik in diesem Zeitraum an anderen Zielen orientierte, vor allem vermehrt an den Erfordernissen des Marktes. Es ist jedoch nicht auszuschließen, dass die hier dargestellten Digital- und Breitbandtechniken in der Zukunft auch in publikumsnäheren Bereichen der Kommunikations- und Rundfunktechnik Anwendungen finden.

QUELLEN (2)

Quellen [1] bis [18] sind in der FG 189 abgedruckt

- [19] Adamy: Receiver System Specifications, in: Journal of Electronic Defense, Alexandria, VA July 2006...May 2007
- [20] www.ldradioworld.de/Vom Autodyne zum Ultradyn
- [21] www.andreadrian.de/sdr
- [22] www.wikipedia.de/ z.B. Überlagerungsempfänger

	Arten	Wirkungsweise	Wesentliche Eigenschaften	Von-bis (etwa)
Mittelbare Wirkung der RF-Energie	Funkenstrecke Thermoelement Bolometer	Funkenüberschlag/ Erwärmung	Nachweis elektromagnetischer Energie	1888...1890
Kohärer/Fritter	Metalgranulat Graphitpulver Quecksilber	Von Hochfrequenz durchflossenes Material steuert einen Morseschreiber und muss mechanisch wieder in den Ursprungszustand versetzt werden	Schreibempfang; für Hörempfang Ticker oder Schleifer erforderlich	1890...1904
Magnetdetektor	umlaufender Eisendraht, rotierender Magnet	Empfangssignal wird magnetisch auf einen umlaufenden Eisendraht übertragen, von diesem mittels Transformator an ein Telefon. Alternativ erzeugt ein im Transformatorfeld rotierender Magnet einen im Telefon wahrnehmbaren Ton.	Erzeugung eines im Telefon hörbaren Tons	Marconi
Elektrolytischer Zellenrichterrichtiger	z.B. Schlömilchzelle	Gleichrichtung in homogener Flüssigkeit	Konstante Wirkung, einfachere Bedienung	1904...1920
Kontakt-detektor	z.B. Pyrit, Silizium, Molybdän	Primärempfang: Ein Resonanzkreis, Gleichrichtung durch Detektor	Geringe Trennschärfe, Hörempfang bei Löschkensender bzw. „Überlagerungsempfang“ mit Hilfssender	1906...1950
	Sekundärempfang	Mehrere Resonanzkreise	Etwas höhere Trennschärfe, geringere Rückwirkung	1904...1930
Detektor mit Vorspannung	z.B. Carborund	Gleichspannung am Detektor verschiebt die Kennlinie in optimalen Bereich	Etwas höhere Empfindlichkeit, weniger Verzerrungen	1905...1925
Frequenzselektiver Röhrengleichrichter	Audion (Einkreiser, tuned radio receiver)	Gleichrichtung an der Gitter-Anodenstrecke	Mäßige Empfindlichkeit	1910...1960
mit Rückkopplung	Audion (regenerative detector receiver)	Entdämpfung des Resonanzkreises durch Rückführung eines Teils des verstärkten Empfangssignals	große Empfindlichkeit, unmodulierte Träger werden hörbar	1920...1950
	Mehrkreis-Geradeempfänger		Steigerung von Empfindlichkeit und Trennschärfe	1920...1945
Reflexempfänger	Einröhrenempfänger Geradeempfänger, auch Superhet	Röhren-Mehrfachnutzung zur RF- und NF-Verstärkung	Reduzierung der Anzahl teurer Röhren	1925...1950
Neurodyn		Kompensation der Gitter-Anodenkapazität von 3-Pol-Röhren zur Vermeidung von unerwünschter Rückkopplung	Neutralisationsschaltung zur Selbstschwingungs-Unterdrückung. Verwendung zumeist in mehrstufigen Geradeempfängern, aber auch in Superhets	1925...1950
Superregenerativempfänger („Pendler“)	Eigenquenchung	Pendelrückkopplung in der Audionröhre	Ausreichende Empfindlichkeit, starke Auswirkung der Antennenkopplung	1925...1960
	Fremdquenchung	Erzeugung der Pendelfrequenz mit einem gesonderten Oszillator	Geringerer Einfluss der Antennenkopplung,	1925...1930
Superheterodyn „Super“ (Einfachsuper)	AM-Gleichrichtung	Mischung mit Oszillatorfrequenz ergibt Zwischenfrequenz; Hüllkurven-Gleichrichtung	Nur für Empfang von AM-Sendungen	1920...
Superhet(erodyn) für unmodulierte Träger	ZF-Überlagerer (Quarz oder regelbar)	Überlagerung des empfangenen unmodulierten Signals mit einem frequenzversetzten Hilfsträger	Hörempfang unmodulierter getasteter Trägerwellen	1930...
Homodyn/ Synchrody (Einfachsuper mit ZF=0)		Oszillator schwingt direkt auf der Empfangsfrequenz, „ZF“ ist die Niederfrequenz	Direkt-Mischer	...1950 1980... (digitaler Empfänger)
SSB-Empfang	z.B. Produkt-detektor	Hinzufügen des unterdrückten Trägers vor/bei Demodulation	Hörempfang von Einseitenbandfunk	1930...
Superhet für FM	Diskriminator (FM)	Nach Begrenzung wird im Diskriminator die FM in AM umgewandelt und dann wie diese gleichgerichtet	Hörempfang frequenzmodulierter Sendungen	1950...
Superhet für FM	Ratiodetektor (FM)	Sonderform des Diskriminators, der zugleich eine Begrenzerfunktion besitzt.		1960...

	Mehrkanalempfänger (Funkpeiler)	Phasenmessung	Peilantenne bestimmt Peilverfahren	1920...
Superheterodyn (Mehrfachsuper)	Niedrige ZF	Eine oder mehrere variable ZF	Hoher elektrischer und mechanischer Aufwand	1940...
	Hochliegende ZF	Eine oder mehrere variable ZF, auch Restoszillator	Hohe Spiegelfrequenzsicherheit	1960...
Digital abstimmbarer Empfänger	Empfangsoszillator mit Frequenzzähler	Oszillatorfrequenz wird gezählt und um den ZF-Frequenzwert berichtet	Frequenz digital ablesbar und auslesbar	1960...1990
	Überlagerungsoszillator mit digitaler Frequenzaufbereitung	Analyseoszillator, Frequenzsynthese	Frequenz digital einstellbar und auslesbar	1980...
Digitalempfänger	ZF/NF-Prozessor	Analoges Frontend setzt in Basisband um	Digitale Filterung und Signalverarbeitung	1990...
Breitbandempfänger	Kristall-Video-Empfänger	Gleichrichtung mit rauscharmer Diode	Breiter Frequenzbereich, aber keine Frequenzdiskriminierung, geringe Empfindlichkeit, das gewonnene Ausgangssignal lässt nur sehr einfache Verarbeitungsalgorithmen zu. Bei hohen Frequenzen auch mit YIG-Filter.	1940...2000
"	Parallel-Filter-Empfänger (channelized receiver)	Durch Parallel- und Kaskadenschaltung von Filtern mit zwischengeschalteten Mischleinrichtungen werden Teilbänder voneinander getrennt.	Geringe Frequenzdiskriminierung und Empfindlichkeit, das gewonnene Ausgangssignal lässt sehr einfache Verarbeitungsalgorithmen zu.	1950...
"	IFM-Empfänger (instantaneous frequency measurement receiver)	Das Eingangssignal wird auf parallelgeschaltete Frequenzdiskriminatoren aus Verzögerungsbaugruppen und Detektoren verteilt. In Komparatoren wird deren Phasenlage digital gemessen. Daraus werden Frequenzwerte abgeleitet.	Annähernd 100%ige Auffassungswahrscheinlichkeit bei guter Frequenzauflösung, geringe Empfindlichkeit.	1960...
"	Braggzellen-Empfänger	Beugung in akustooptischem Substrat	Frequenzmessung in Realzeit, nicht übersteuerungsfest	1960...1990
"	Kanalabtastender Superhet (scanning superhet receiver)	Periodisch durchstimmbarer Oszillator	Anfangs nur Panoramaempfänger mit optischer Darstellung, später auch mit Signalerkennung. Mittlere bis hohe Empfindlichkeit.	1930...
"	Kompressions-Empfänger (compressive receiver)	Ein schneller Oszillator durchläuft periodisch seinen Frequenzbereich. Das ZF-Band wird einem Kompressionsfilter zugeführt	Mittlere Empfindlichkeit, hohe Abtastgeschwindigkeit, Frequenzmessung in Realzeit	1950...
"	FFT-Empfänger	Mittels eines schrittweise abgestimmten Oszillators wird ein breites RF-Teilband einem Analog/Digital-Wandler zugeführt. Die in die digitale Ebene gewandelten Signale werden in einem FFT-Prozessor als Spektrum untersucht.	hohe Wahrscheinlichkeit der Signalerkennung	1980...
"	Filterbank-Empfänger	Nach Superhet-Umsetzung wird ein breites RF- Teilbandsignal parallel einer Filterbank (aus gleich breiten, frequenzmäßig nebeneinanderliegenden Einzelfiltern) zugeleitet	Das RF- Teilbandspektrum wird kammförmig auf Belegung geprüft,	1970...
"	Vielkanal-Empfänger	besteht er aus einer Vielzahl parallelgeschalteter Superhet-Empfänger, bei denen ZF-Bandbreite und Signalerkennung dem jeweils erwarteten Signal angepasst werden können	aufwendigster, aber auch der leistungsfähigster und vielseitigster Breitbandempfänger	1980...

Bild 42: Übersichtstabelle der beschriebenen Empfangsverfahren.