Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 73 (1982)

Heft: 17

Artikel: Vom analogen zum digitalen Richtfunk

Autor: Noesen, P.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-905001

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 16.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Vom analogen zum digitalen Richtfunk

P. Noesen

621.396:621.3.049.037.37;

Ausgehend vom heutigen Stand der analogen Richtfunktechnik wird der Einfluss von neuen Komponentenentwicklungen, insbesondere von Mikrowellenhalbleitern, auf die Richtfunktechnik dargelegt. Die Einführung von Integrierten Fernmelde-Systemen (IFS) bedingt auch in den Richtfunknetzen den Übergang zur digitalen Übertragung. Um die gleiche Übertragungskapazität wie beim analogen Netz und die gleiche Übertragungsqualität wie beim Kabel zu erreichen, müssen die Anforderungen an die digitale Richtfunktechnik sehr hoch gestellt werden. Sie können nur durch gesteigerte Komplexität der Signalaufbereitung und -verarbeitung bei der Richtfunkübertragung sichergestellt werden. Die im Aufbau begriffene 34-Mbit/s-Richtfunkverbindung Zürich–Lugano stellt einen ersten Schritt in diese Richtung dar.

Description de l'influence de nouveaux développements de composants, notamment de semi-conducteurs pour ondes micrométriques, sur les faisceaux hertziens. L'introduction de systèmes de télécommunication intégrés détermine également le passage à la transmission numérique dans les réseaux hertziens. Pour atteindre la même capacité de transmission que dans le réseau analogique et la même qualité que pour la transmission par câbles, les exigences posées aux faisceaux hertziens numériques sont très élevées et ne peuvent être satisfaites que par une plus grande complexité de la préparation et du traitement des signaux. La liaison hertzienne Zurich–Lugano à 34 Mbit/s, en cours d'aménagement, est un premier pas en ce sens.

1. Einleitung

Richtfunkverbindungen sind heute ein fester Bestandteil der Fernnetze, sowohl in der Schweiz als auch im Ausland. In den grossen, weniger stark besiedelten Ländern ausserhalb Europas, wie z. B. in den USA oder Kanada, stellen sie sogar über weite Distanzen die einzige ökonomisch tragbare Verbindung dar. In der Schweiz werden alle wichtigen Fernverbindungen zwischen den grösseren Städten parallel über Kabel und Richtfunk geführt. Der Hauptgrund für dieses Konzept ist die erhöhte Verfügbarkeit zu Verbindungen. Die Übertragungsmedien sind grundsätzlich verschieden: im einen Falle eine elektrische oder optische Leitung, im andern Falle Luft. Deshalb sind auch die potentiellen Störmöglichkeiten verschieden und unabhängig voneinander.

Die Entwicklung der Richtfunktechnik ist, was die Übertragungskapazität anbelangt, immer der Entwicklung der Kabeltechnik gefolgt. So stehen heute für praktisch alle gängigen Kanalzahlen, von einigen Telefonkanälen bis zu 2700 Telefonkanälen (oder für Fernsehübertragung), entsprechende Richtfunkgeräte zur Verfügung.

Dies ist nicht weiter erstaunlich, da Kabel und Richtfunk ja meistens kombiniert miteinander oder hintereinander eingesetzt werden und deshalb kompatibel sein müssen. Aus dem gleichen Grund haben auch die Richtfunkverbindungen bis vor wenigen Jahren praktisch ausschliesslich analoge Signale, nämlich Tf- und TV-Signale verarbeitet. Durch die Einführung von Integrierten Fernmelde-Systemen, in der Schweiz kurz IFS genannt, welche auf der Übertragung von Digitalsignalen basieren, muss nun auch beim Richtfunk der entsprechende Übergang von analoger zu digitaler Signalübermittlung vollzogen werden.

2. Stand der analogen Richtfunktechnik

Das Prinzip der Übertragung von analogen Signalen über eine Richtfunkverbindung ist in Figur 1 dargestellt. Die obere Frequenzgrenze des zu übertragenden Basisband-Signales (BB) hängt von der Anzahl der darin enthaltenen Telefonkanäle (Tf) ab. In den meisten Fällen wird zunächst ein Zwischenfrequenzträger (ZF) bei 70 oder 140 MHz mit dem BB-Signal frequenzmoduliert. Durch Frequenzumsetzung geschieht in einem Mischer mit Hilfe eines quarzstabilen Radiofrequenzträgers (RF) die Umwandlung des ZF-Signals in ein RF-Signal, mit anschliessender Verstärkung auf die Sendeleistung. Mehrere RF-Signale werden mit einer Kanalweiche zusammengefasst und über eine gemeinsame Antenne über das Funkfeld übertragen. Auf der Empfangsseite müssen die RF-Signale in einer Kanalweiche wieder getrennt und jedes Signal einem Empfänger zugeführt werden. Hier passiert nun der umgekehrte Prozess: Frequenzumsetzung von der RF- in die ZF-Lage, ZF-Verstärkung und -Frequenzdemodulation, womit das BB-Signal wieder zur Verfügung steht.

Um mehrere RF-Signale gemeinsam übertragen zu können, wird ein Frequenzplan benutzt. Der Abstand zwischen zwei RF-Kanälen heisst Rasterabstand. Je dichter die RF-Kanäle angeordnet sind und je breitbandiger die Basisbandsignale dabei sind, desto besser ist die Frequenzbandnutzung. Ein Mass dafür bildet das Verhältnis aus höchster Basisbandfrequenz und RF-Kanalraster. Tabelle I zeigt die Verhältnisse für typische 1800-Kanal- und 2700-Kanal-Richtfunksysteme. Die Frequenzmodulation erlaubt eine recht gute Frequenzbandnutzung. Sie könnte nur noch durch Amplitudenmodulation (AM), insbesondere Einseitenband-AM, bis dicht an den theoretischen Maximalwert 1 verbessert werden. Solche Systeme stellen jedoch bei Breitbandübertragung äusserst hohe Anforderungen an die Linearität des Übertragungskanals, so dass sie sich bis heute

Frequenzbandnutzung bei analoger Übertragung Tabelle I

Übertragungskapazität pro RF-Kanal	1800	2700	TF-Kanäle
A. Bandbreite eines TF-Kanals	0,3...3,4	0,3...3,4	[kHz]
B. Basisband	0,312...8,204	0,312...12,388	[MHz]
C. Oberste BB-Frequenz	8,2	12,4	[MHz]
D. RF-Frequenz-Bänder (Beispiele)	2,3...2,7 3,8...4,2	6,4...7,1 10,7...11,7	[GHz]
E. Frequenzraster	29	40	[MHz]
F. Frequenzbandnutzung (Verhältnis C/E)	0,28	0,21	

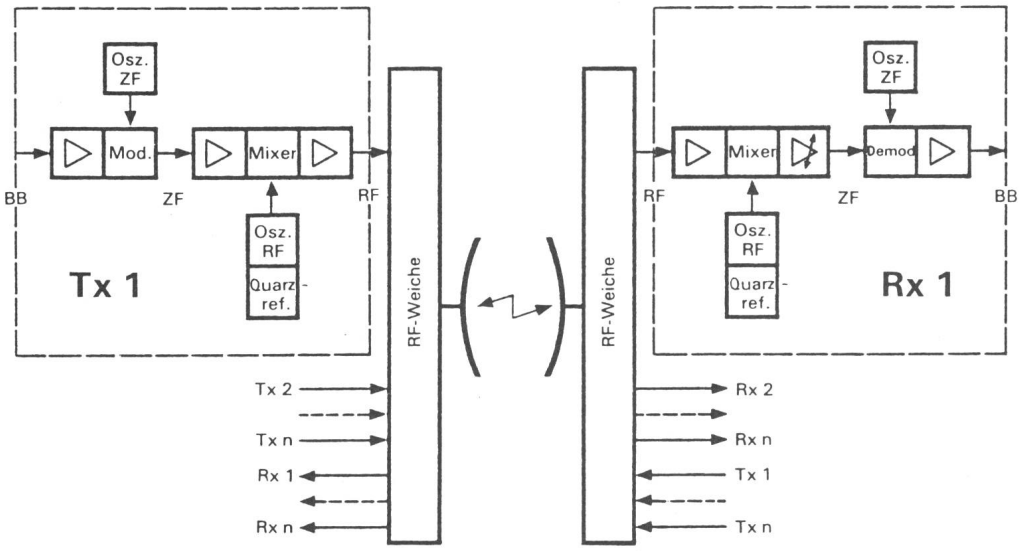

Fig. 1 Schematischer Aufbau eines Richtfunkübertragungssystems
Tx Sender
Rx Empfänger
BB Basisband
ZF Zwischenfrequenz
RF Radiofrequenz

nicht durchsetzen konnten. Mit Frequenzmodulation werden heute pro RF-Kanal bis zu 2700 Tf-Signale übertragen. Einige 3600-Kanal-Anlagen sind in Japan installiert. Mit höherer Übertragungskapazität steigen die Anforderungen an die Anlagen so stark an, dass einerseits der Aufwand nicht mehr in tragbarem Verhältnis mit dem erreichten Mehrnutzen steht, andererseits die langfristige Einhaltung der anspruchsvollen, technischen Daten nicht gesichert erscheint.

Die analogen Richtfunkgeräte belegen heute praktisch nur Frequenzbänder unterhalb 12 GHz. Ein Grund dafür ist die historische Entwicklung der Richtfunktechnik, welche bei tiefen RF-Frequenzen begonnen hat, hauptsächlich, weil anfangs nur dort die Mikrowellenleistungserzeugung möglich war. Ein weiterer Grund, welcher heute massgebend ist, liegt im zunehmenden Einfluss der Regendämpfung auf die Streckenlänge oberhalb 12 GHz. Soll eine gewisse minimale Verfügbarkeit erreicht werden, muss die typische Streckenlänge bei höheren RF-Frequenzen abnehmen (Figur 2). Für längere Verbindungen im Fernnetz würde dies eine erhöhte Anzahl von Relaisstationen bedeuten. Neben dem Kostenfaktor wäre eine rasche Verschlechterung der Übertragungsqualität in Kauf zu nehmen, da sich bei analogen Signalen die unvermeidlichen Geräuschbeiträge der einzelnen Richtfunkstrecken akkumulieren. Die Übertragungsqualität ist für eine Normstrecke von 2500 km international durch das CCIR[1]) festgelegt. Diese Länge ist in Europa z. B. typisch für das Eurovisionsnetz und kann mit etwa 50 hintereinandergeschalteten Teilstrecken überbrückt werden. In den USA sind 6400 km lange Ost-West-Verbindungen von Küste zu Küste über rund 110 Teilstrekken realisiert.

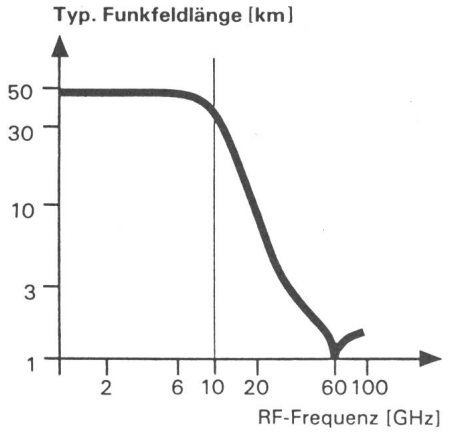

Fig. 2 Typische Funkfeldlängen in Funktion der RF-Frequenz

3. Neue Komponentenentwicklungen

Den grössten Einfluss auf die Richtfunktechnik hat ohne Zweifel die stürmische Entwicklung der Mikrowellenhalbleiter ausgeübt. Auf der einen Seite haben Leistungstransistoren sukzessive die Mikrowellenröhren in den Sendern verdrängt; auf der anderen Seite erlaubten rauscharme Kleinsignal-Dioden und Transistoren, immer bessere Mischer und RF-Vorverstärker und damit empfindlichere Empfänger zu bauen, wodurch wiederum die Sendeleistung reduziert werden konnte. Figur 3 zeigt diese Entwicklung.

Heute werden die meisten Sender unterhalb 10 GHz nach dem Prinzip «Leistungserzeugung bei 2 GHz und anschliessende Frequenzvervielfachung auf die gewünschte Ausgangsfrequenz» aufgebaut. Durch Einsatz des «richtigen» Vervielfachungsfaktors kann so mit geringstem zusätzlichem Aufwand Leistung in den üblichen Richtfunkbändern bei 2, 4, 6 und 8 GHz erzeugt und es können ganze Familien von Richtfunkgeräten mit weitgehend gleichen Mikrowellenteilen aufgebaut werden. 2 GHz wird meistens als Startfrequenz verwendet, weil bis zu dieser Frequenz zuverlässige Siliziumtransistoren mit hoher Ausgangsleistung in genügender Quantität und zu akzeptablen Preisen und Lieferfristen angeboten werden. Man muss dabei im Auge behalten, dass der Mikrowellenmarkt ziemlich beschränkt ist und von wenigen, meistens sehr kleinen Spezialfirmen beliefert wird.

[1]) CCIR: Comité Consultatif International des Radiocommunications.

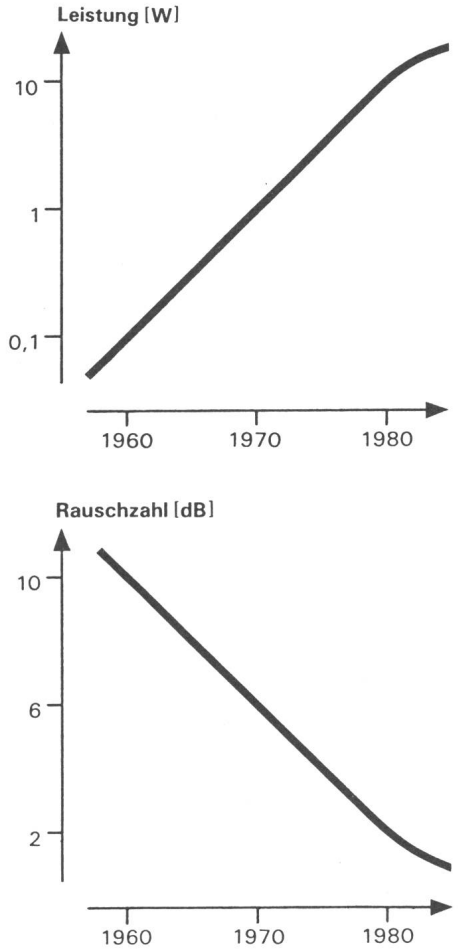

Fig. 3 Entwicklung der Mikrowellen-Halbleiter über die Zeit
Typische Sendeleistungen und Empfängerrauschzahlen bei 4 GHz

In den Empfängern werden je nach Anwendung einfache Mischer mit einer Diode oder aufwendige Mischer mit mehreren Dioden (zur Unterdrückung der Spiegelfrequenz) eingesetzt. Damit kann die Empfängerrauschzahl von etwa 8 auf 5 dB (unterhalb 10 GHz) verringert werden. Für noch höhere Ansprüche werden RF-Vorverstärker mit rauscharmen Silizium-Bipolar- oder Gallium-Arsenid-Feldeffekt-Transistoren verwendet. Die Rauschzahl des gesamten Empfängers wird dann in erster Linie durch die Rauschzahl des Eingangstransistors bestimmt. Mit diesem Konzept können Empfängerrauschzahlen von 2 bis etwa 4 dB realisiert werden. Die Wahl des Konzeptes ist immer ein Kompromiss zwischen Systemdaten und Kosten.

Die Zukunft der Mikrowellenhalbleiter wird durch die Fortschritte in der Gallium-Arsenid-Technik bestimmt. Dieses Halbleitermaterial erlaubt höhere Grenzfrequenzen als Silizium, ist aber schwieriger herzustellen und zu bearbeiten.

Zur Leistungserzeugung sollen in Zukunft GaAs-FET-Transistoren direkt bei der benötigten RF-Endfrequenz eingesetzt werden. Dadurch vereinfachen sich die Schaltungen wesentlich; der Materialaufwand wird reduziert; der Wirkungsgrad nimmt zu. Hauptproblem ist heute noch die Reproduzierbarkeit dieser Transistoren bei der Serieherstellung und damit ihre Verfügbarkeit auf dem Markt. Doch existieren schon heute Direktverstärker mit einer Ausgangsleistung von 5 W bei 4 und 6 GHz und von 1 W bei 11 GHz.

Auf der Empfängerseite werden noch rauschärmere Transistoren und Dioden erwartet und – in weiterer Zukunft – integrierte Mikrowellenschaltungen auf GaAs-Material. So kann z. B. der gesamte Empfänger-Eingangsteil, welcher aus RF-Vorverstärker, Mischer und Lokaloszillator besteht, auf einem Substrat zusammengefasst werden. Solche Schaltungen werden aber kaum allein für den Richtfunkmarkt entwickelt werden, da die Kosten zu hoch wären, sondern weil neue, grosse Absatzmöglichkeiten auf dem Gebiet des direkten Satellitenrundfunks erwartet werden (Heimempfänger).

Neben den Mikrowellenhalbleitern haben die Anwendung der Streifenleitertechnik anstelle der Wellenleiter- und Koaxialtechnik sowie die Miniaturisierung von passiven Bauteilen wie RF-Filter, Zirkulatoren und Isolatoren die modernen Richtfunkgeräte weitgehend beeinflusst. Dies wird am augenfälligsten, wenn Übertragungskapazität, Volumen und Leistungsverbrauch verschiedener Richtfunkgenerationen miteinander verglichen werden, wie dies in Tabelle II dargestellt ist.

4. Digitaler Richtfunk

4.1 Probleme und Vorteile

Vom Prinzip her unterscheidet sich die digitale Richtfunkübertragung von der analogen recht wenig. Der schematische Aufbau in Figur 1 gilt nach wie vor. Das Basisband ist jetzt ein digitaler Datenstrom mit einer bestimmten Bitrate, welche die zu übertragende Informationsmenge bestimmt. Der ZF resp. RF-Träger wird mit dem Basisband moduliert, wobei prinzipiell alle bekannten Modulationsmethoden, nämlich Amplituden-, Frequenz- und Phasenmodulation sowie Mischformen davon, möglich sind. Auch hier werden mehrere RF-Kanäle entsprechend einem Frequenzplan zusammengeschaltet und über eine gemeinsame Antenne übertragen.

Die Probleme der digitalen Richtfunkübertragung sind durch die spezifischen Eigenschaften des Signals bedingt. Ein Hauptvorteil der digitalen Übertragung, nämlich die grössere Störunempfindlichkeit, wird durch einen entsprechend grösseren Bandbreitenbedarf erkauft. Während analog übertragene Telefonkanäle im Abstand von 4 kHz zusammengefügt werden können, braucht ein digital übertragener Telefonkanal 64 kbit/s (8 kHz Abtastfrequenz; 8 Bit Amplitudencodierung). 1800 Tf-Kanäle, welche analog mit einem Rasterabstand von 29 MHz übertragen werden können, verlangen also in digitalisierter Form eine Bitrate von etwa 140 Mbit/s (normierte Bitrate für 1920 Tf-Kanäle). Will man mit den digitalen Richtfunksystemen die gleiche Bandbreiteneffizienz wie mit den analogen erreichen, so

Vergleich von drei Generationen Richtfunkanlagen Tabelle II

Generation		1960	1970	1980
Übertragungskapazität	[TF-Kanäle]	960	1800	2700
Volumen	[Liter]	1200	60	30
Leistungsverbrauch	[W]	1000	140	70

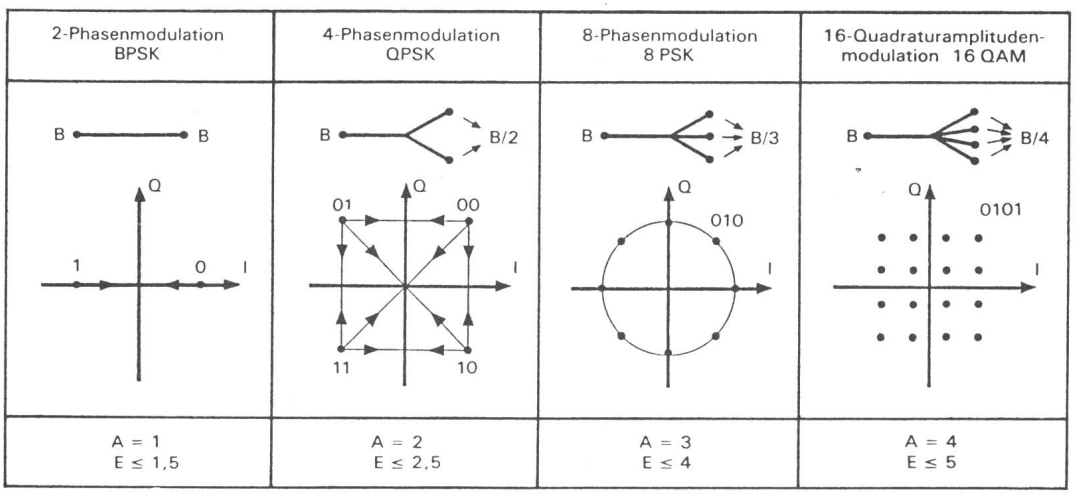

Fig. 4 Die am meisten gebrauchten digitalen Modulationsmethoden
B Bitrate
A Anzahl übertragene Bits pro Phasen-/Amplitudenlage
E mögliche Bandbreiteneffizienz (Bit/s/Hz);
PSK ≙ Phase Shifting Keying

müssen aufwendige Modulationsmethoden eingesetzt werden, welche für die drahtlose Übertragung die Signalbandbreite entsprechend reduzieren.

Ein weiteres spezifisches Richtstrahlproblem ist der sog. Mehrwegschwund. Die relative Dielektrizitätskonstante der Luft ist sowohl räumlich wie zeitlich starken Schwankungen unterworfen. Dadurch können an der Empfangsantenne Wellenanteile mit verschiedenen momentanen Phasen und Amplituden ankommen. Das Resultat ist eine mehr oder weniger grosse Dämpfung und Verzerrung des Empfangssignals. Beträgt der Laufzeitunterschied mehrere Nanosekunden, so kann sich die Dämpfung in Funktion der RF-Frequenz sehr rasch ändern. Man redet dann von selektivem Schwund. Während dieser bei der analogen FM-Übertragung keinen nennenswerten Einfluss hat, reagieren die meisten digitalen Modulationen sehr empfindlich auf diese Art von Verzerrung. Die Hauptgründe dafür sind das breitbandige, nur langsam abfallende Spektrum sowie die «Verschmierung» der Information über das ganze Frequenzband des RF-Kanals, dies im Gegensatz zum rasch abfallenden Spektrum des analogen Signals mit einer eindeutigen Frequenzzuordnung der einzelnen Tf-Kanäle. Ohne Gegenmassnahmen bewirken die selektiven Schwundereignisse durch die Verzerrung des digitalen Signals ein schnelles Ansteigen der Fehlerrate und eine viel frühere Unterbrechung der Verbindung, als dies mit flachem Schwund der Fall ist. Die Verfügbarkeit der Verbindung nimmt also ab. Die Modulationsmethode hat einen grossen Einfluss auf die Empfindlichkeit des digitalen Signals gegenüber selektiven Schwundereignissen. Generell sind aufwendige, bandbreitensparende Methoden empfindlicher als einfache Modulationsverfahren mit geringer Bandbreiteneffizienz.

Wie erwähnt, ist die Erzeugung von RF-Leistung aufwendig. Man versucht deshalb, mit möglichst wenig Leistung auszukommen und limitierende Klasse-C-Verstärker einzusetzen. Die analoge Übertragung mit Frequenzmodulation lässt letzteres ohne weiteres zu. Die meisten digitalen, bandbreitensparenden Modulationsmethoden verlangen dagegen lineare Verstärker, weil sowohl Amplituden- als auch Phasenverzerrungen eine Erhöhung der Fehlerrate bewirken.

Nach dieser Skizzierung der wichtigsten Probleme bei digitaler Richtfunkübertragung sollen nun einige spezifische Vorteile kurz erläutert werden. Zunächst sind die Regenerierbarkeit und hohe Störimmunität zu erwähnen, welche es erlauben, praktisch ohne Qualitätseinbusse die digitalen Signale über eine grosse Anzahl von Teilstrecken zu übertragen. Dadurch können auch RF-Frequenzen oberhalb 10 GHz eingesetzt werden. Die digitale Richtfunktechnik bringt zudem kostenmässig Vorteile, obwohl die entsprechenden Richtfunkgeräte gemäss Figur 1 aufwendiger sind. Gesamthaft gesehen kommt die digitale Übertragung unter Einbezug der Multiplexer günstiger zu stehen. Dies gilt besonders für Übertragungsstrecken bis 300 km, also Distanzen, wie sie in der Schweiz vorkommen.

4.2 Lösungsmöglichkeiten

Der erste und wesentlichste Schritt zur Lösung der erläuterten Probleme ist die Wahl einer zweckmässigen Modulationsmethode. Im Gegensatz zur analogen Übertragung, wo praktisch nur Frequenzmodulation (mit international normierten Hüben) zur Anwendung gelangt, ist man sich bis heute bei der digitalen Übertragung noch nicht einig, welches die günstigste Modulation ist. Dies rührt wohl daher, dass jede Methode ihre spezifischen Vor- und Nachteile hat. Die Wahl hängt dann davon ab, welchen Kriterien man das grösste Gewicht zubilligt, was sehr oft eine Ermessensfrage ist. So werden heute z. B. für die 140-Mbit/s-Übertragung vier verschiedene Modulationsmethoden verwendet. Immerhin zeichnet sich ein Trend ab. Mehrstufige Phasenmodulationen sowie kombinierte, mehrstufige Phasen/Amplitudenmodulationen werden am häufigsten eingesetzt, um hohe Bandbreiteneffizienz zu erreichen. Die verbreitetsten Methoden sind in Figur 4 dargestellt.

Im einfachsten Fall entsprechen den zwei digitalen Werten 0 und 1 die RF-Phasenlagen 0° und 180°. Bei höherstufigen Modulationen wird der Bitstrom zunächst in zwei oder mehrere Teilströme mit entsprechend niedrigerer Rate aufgeteilt, worauf dann zwei oder mehr Bit pro Zustand über-

Digitale Bandbreiteneffizienz für bestehende RF-Kanalraster

Tabelle III

Frequenzraster	Anzahl TF-Kanäle[1])		Notwendige Bitrate	RF-Bandbreiteneffizienz
	analoge	«digitalisierte»		
(MHz)			(Mbit/s)	(bit/s/Hz)
29	1800	1920	140	4,8
40	1800	1920	140	3,5
40	2700	2880	200	5

[1]) genormte Werte

tragen werden können. Daraus resultiert die höhere Bandbreiteneffizienz, aber auch eine kleinere Störfestigkeit. Bei digitalen Signalen definiert man die Frequenzbandnutzung als die Bitrate geteilt durch den RF-Rasterabstand. Tabelle III zeigt typische Werte, welche erreicht werden müssen, wenn die gleiche Effizienz wie bei analoger Übertragung resultieren soll. Die meisten auf dem Markt erhältlichen Geräte erfüllen diese Bedingung noch nicht. Für die 140-Mbit/s-Übertragung liegen die erreichten Bandbreiteneffizienzen zwischen 2 und 3,5 bit/s/Hz. Um hohe Werte zu erreichen, muss zusätzlich zur mehrstufigen Modulationsmethode das (theoretisch unendlich ausgedehnte) Spektrum des Signals stark begrenzt werden. Eine gute Übertragung des digitalen Signals mit niedriger Fehlerrate und hoher Störimmunität wird aber nur erreicht, wenn die Filtercharakteristik des gesamten Systems sehr genauen und engen Anforderungen entspricht (Nyquist-Kriterien). An dieser anspruchsvollen Optimierungsaufgabe arbeiten heute alle Richtfunkfirmen.

Wie erwähnt, verschlechtern bei hohen Bitraten die selektiven Schwundereignisse die Übertragungsqualität in weit stärkerem Mass als bei analoger Übertragung. Ohne zusätzliche Schutzmassnahmen können die gestellten Verfügbarkeitsziele nicht erreicht werden. Zwei Verfahren werden eingesetzt: adaptive Entzerrung sowie Raum- und Frequenzdiversity.

Adaptive Entzerrer haben die Aufgabe, die bei der Übertragung aufgetretenen Verzerrungen zu korrigieren. Im einfachsten Fall wird in der ZF-Ebene nur die Schräglage des Frequenzganges kompensiert. Im besten Fall können in der BB-Ebene mit Hilfe von rückgekoppelten Netzwerken alle linearen Verzerrungen egalisiert werden. Während ZF-Entzerrer relativ einfach aufgebaut sind und auch schon praktisch eingesetzt werden, befinden sich die transversalen BB-Entzerrer zurzeit noch im Versuchsstadium. Die Schaltungen sind komplex und benötigen bei hohen Bitraten sehr schnelle integrierte Schaltungen.

Bei Raumdiversity werden zwei Signale eines Senders mit zwei um mehrere Meter versetzten Antennen empfangen und phasenrichtig addiert. Da der selektive Schwund normalerweise nicht gleichzeitig auf beiden Signalpfaden auftritt, wird sein Einfluss auf das Gesamtsignal gemildert.

Bei Frequenzdiversity wird das digitale Signal parallel über zwei vollständig unabhängige Richtfunksysteme mit verschiedenen RF-Frequenzen übertragen. Letztere können in gleichen oder in verschiedenen RF-Bändern liegen. Je grösser der Frequenzabstand, desto höher die Wahrscheinlichkeit, dass der selektive Schwund nicht gleichzeitig bei beiden Frequenzen auftritt. Diese Methode bietet zusätzlich einen Schutz gegen Geräteausfälle, ist dafür aber materialaufwendig. Normalerweise wird am Ausgang der beiden Empfänger das bessere der zwei Signale mit einem fehlerfreien Umschalter weitergeleitet. Auf die Wahl der geeigneten Umschaltkriterien wird im letzten Kapitel noch kurz eingegangen.

Da das modulierte RF-Signal zufolge der höherstufigen Modulationen und der notwendigen Spektrumsbeschneidung praktisch immer auch Amplitudenschwankungen enthält, darf das digitale Richtfunkgerät keine stark begrenzenden Baugruppen enthalten. Der heikelste Teil ist der Senderleistungsverstärker. Um die gestellten Linearitätsbedingungen zu erfüllen, werden heute Wanderfeldröhren und FET-Verstärker eingesetzt, welche mehrere Dezibel un-

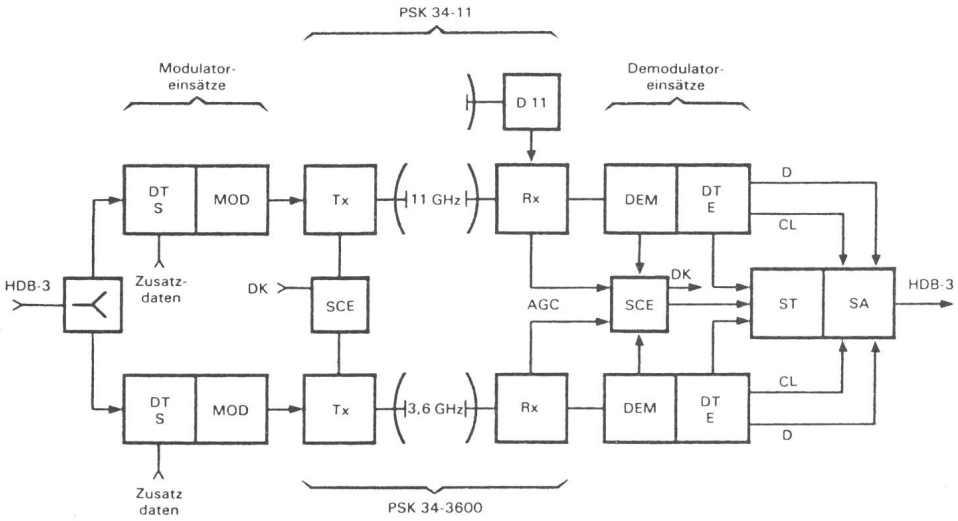

Fig. 5 Blockdiagramm des digitalen Richtfunksystems Zürich–Lugano

DT S Datenteil Sender
DT E Datenteil Empfänger
SCE Dienstkanal- und Fernübertragung
Tx Sender
MOD Modulator
DEM Demodulator
Rx Empfänger
ST Steuerung
SA Umschalter
D 11 Raumdiversity
DK Dienstkanal
D Daten
CL Takt

terhalb der Sättigung betrieben werden, so dass die Amplituden- und Phasenverzerrungen in annehmbaren Grössenordnungen bleiben. Es sind jedoch Untersuchungen im Gange, mittels Vorverzerrung des Signals den Einsatz von hartlimitierenden Leistungsverstärkern zu ermöglichen [2].

5. Digitale Richtfunkverbindung Zürich–Lugano

Diese Verbindung soll Ende dieses Jahres einen Datenstrom von 34-Mbit/s übertragen (Fig. 5). Zur Gewährleistung der geforderten hohen Verfügbarkeit wird das Signal über zwei parallele Richtfunkstrecken, eine im 3,6- und eine im 11-GHz-Band, geführt. Die 11-GHz-Verbindung ist zusätzlich durch eine Raumdiversity-Einrichtung geschützt. Da für das 3,6-GHz-Band ebenfalls das im 11-GHz-Band übliche 40-MHz-Raster verwendet wurde, genügt eine Bandbreiteneffizienz von 0,85 bit/s/Hz. Mit der gewählten 4-Phasen-Modulation lässt sich dieser Wert ohne besondere Schwierigkeiten erreichen.

Die Gliederung des Blockschemas von Figur 5 lässt die wesentlichen Systemteile erkennen. Sendeseitig wird das ankommende HDB-3-Signal[2]) aufgeteilt und zwei identischen Modulatoreinsätzen zugeführt. Diese bestehen aus einem Datenteil zur Aufbereitung der Daten und dem eigentlichen 4-Phasen-Modulator, an dessen Ausgang ein digital moduliertes ZF-Signal mit einer Trägerfrequenz von 70 MHz zur Verfügung steht. Dieses ZF-Signal wird dem Sender zugeleitet, wo es auf die RF-Frequenz umgesetzt, verstärkt und der Antenne zugeführt wird. Das 11-GHz-Gerät benützt einen Wanderfeldröhren-Verstärker. Er wird etwa 5 dB unterhalb der Sättigung betrieben und gibt eine Leistung von etwa 6 W ab. Im 3,6-GHz-Gerät kommt ein FET-Verstärker zur Anwendung, welcher beim 1-dB-Kompressionspunkt eine Leistung von 1 W liefert.

[2]) HDB-3: *H*igh *D*ensity *B*ipolar Index *3*, normierter Code für Leitungsübertragung.

Der Empfänger unterscheidet sich kaum von jenem einer FM-Anlage. Aus dem ZF-Signal wird im Demodulator das digitale Signal zurückgewonnen. Zur Umkehrung der Operationen des Datenteils im Modulator enthält auch der Demodulator einen Datenteil. An dessen Ausgang stehen Daten und Takt getrennt zur Verfügung.

Der Umschalter wählt das bessere Signal aus und leitet es nach der Umwandlung in den HDB-3-Code dem Ausgang zu. Er arbeitet bitfehlerfrei und wird von vier verschiedenen Qualitätskriterien mit abgestufter Priorität gesteuert. Es sind dies: Fehlermeldungen, Bitfehlerauswertung, AGC-Schwelle 1 und AGC-Schwelle 2 (AGC = Automatic Gain Control).

Die Kriterien mit der niedrigsten Priorität werden aus der AGC-Spannung des ZF-Hauptverstärkers im Empfänger abgeleitet. Mit diesen Schwellen, die in weiten Grenzen eingestellt werden können, sollen selektive Schwundereignisse frühzeitig erfasst werden. Bei Relaisstationen mit ZF-Durchschaltung müssen auch die AGC-Spannungen der dort stationierten Empfänger bis ans Ende des Modulationsabschnitts übertragen werden. Dazu umfasst das Gesamtsystem eine Dienstkanal- und Fernübertragungseinrichtung zur Übermittlung eines Omnibusdienstsignals und von Steuersignalen. Deren Übertragung erfolgt durch direkte Frequenzmodulation des RF-Trägers im Sender. Die Verbindung Zürich–Lugano wird zunächst während etwa eines Jahres als Versuchsstrecke betrieben werden, bevor sie im ordentlichen Verkehr zum Einsatz kommt, dies um weitere Erfahrungen auf dem Gebiet der digitalen Richtfunkübertragung zu sammeln [3].

Literatur

[1] *H. Carl:* Richtfunkverbindungen. Stuttgart, Verlag Berliner Union, 1964.

[2] *K. Feher:* Digital communications, microwave applications. Englewood Cliffs, N.J., Prentice-Hall, 1981.

[3] *U. Gysel:* Ein digitales Richtstrahlsystem für 34 Mbit/s. STR Report 3(1982)1, S. 16...22.

Adresse des Autors

P. Noesen, dipl. Ing. ETHZ, Standard Telephon und Radio AG, Friesenbergstrasse 75, 8055 Zürich.