Digitaler Hörfunk

Autor(en): **Kramer, D.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **79 (1988)**

Heft 21

PDF erstellt am: **24.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-904097

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Digitaler Hörfunk

D. Kramer

Die digitale CD-Technik hat ein neues Ton-Qualitätsbewusstsein geweckt, dem die Rundfunkanstalten nur durch Einführung des digitalen Hörfunks Rechnung tragen können. Als Übertragungsmedium kommen Rundfunksatelliten oder – vor allem in der Schweiz – Kabelfernsehnetze in Frage. Dieser Beitrag beschreibt die technischen und wirtschaftlichen Randbedingungen sowie einen gangbaren schweizerischen Weg zum digitalen Radio.

La technique digitale du disque compacte a provoqué une nouvelle prise de conscience en matière de qualité du son. Les radiodiffusions sont obligées de tenir compte de ce besoin en introduisant la diffusion sonore digitale. Comme voies de transmission, on prévoit les satellites de radiodiffusion ou – surtout en Suisse – les réseaux de télévision par câbles. L'article décrit le cadre technique et économique ainsi qu'une solution suisse permettant la radiodiffusion de signaux digitaux.

Adresse des Autors

Daniel Kramer, Dipl. El.-Ing. ETH, Technischer Direktor SRG, Schweizerische Radio- und Fernsehgesellschaft, 8052 Zürich.

Jedes Bearbeiten von analogen Signalen hat bekanntlich einen Qualitätsverlust zur Folge. Eine kaum hörbare Verschlechterung der Tonqualität wird z.B. mit jedem Bearbeitungsgang aufaddiert, so dass schliesslich die Tonverfälschungen hörbar werden. Verwendet man für diese Vorgänge ein digitales Signal, so wird es im Normalfall immer als eine Folge von 1 oder 0 erkannt. Da die Rückwandlung in ein analoges Signal erst am Schluss erfolgt, unterliegt diese Art der Bearbeitung praktisch keiner Qualitätseinbusse.

Auch bezüglich Zwischenspeicherung bietet das digitale Signal zahlreiche Vorteile. So unterliegt der Dynamikumfang (Unterschied zwischen leisester und lautester Stelle einer musikalischen Darbietung) keiner physikalischen Grenze mehr, wie dies für Magnetbänder oder Schallplatten der Fall war. Ähnlich verhält es sich mit dem Rauschen, das bei Zwischenspeicherung auf Magnetband oder Schallplatte systembedingt dazuaddiert wird. Bei der digitalen Technik entfällt diese Art der Störung praktisch vollständig.

Es verwundert deshalb nicht, dass «Digitale Technik» heute in der Unterhaltungselektronik zum Schlagwort geworden ist, ähnlich wie vor wenigen Jahren die Hifi-Technik. Es ist deshalb nicht erstaunlich, wenn die Anhänger des «digitalen» Tones mehr und mehr auch den digitalen Radioton verlangen. Welche Möglichkeiten dazu bestehen, in welchem Zeitraum sie realisiert werden können und welches die zur Verfügung stehenden Techniken sein werden, ist Gegenstand der weiteren Ausführungen.

Die Analog-Digital-Wandlung

Beim digitalen Tonkanal sind 2 Grössen von grosser Wichtigkeit: zum einen die Abtastfrequenz, welche mindestens doppelt so hoch wie die höchste Frequenz sein muss, die man übertragen oder speichern will (Abtast-Theorem) und zweitens die pro Abtastwert zugewiesene Anzahl Bit, welche den Dynamikumfang bestimmt, den das System übertragen kann. Im Studiobereich scheint sich heute weltweit eine Abtastfrequenz von 48 kHz durchzusetzen. Im Gegensatz dazu wurde für CD-Platten aus verschiedenen Gründen eine Abtastfrequenz von 44,1 kHz gewählt. Eine Codeumsetzung wird also unumgänglich sein, falls CD-Plattenspieler in digitale Studios integriert werden müssen. Heute ist eine solche Umsetzung fast ohne Qualitätseinbusse möglich.

Anders verhält es sich bezüglich der Anzahl Bit, die jedem Abtastwert zugewiesen werden und damit den Dynamikumfang D des Systems definieren. Der letztere leitet sich aus dem Signal/Rausch-Verhältnis bzw. dem Quantisierungsgeräuschabstand ab:

$$D = 10 \cdot \log P_S/P_Q \quad (1)$$

Unter der Annahme linearer Quantisierung und heuristisch gefundener Verteilungsdichten der Nutz- und Quantisierungsfehlersignale ergibt sich, wie man zeigen kann [1]:

$$D = 10 \cdot \log (1{,}5 \cdot 2^{2n}) \text{ dB} \quad (2)$$

wobei n die Anzahl Bit pro Abtastwert bezeichnet. In erster Näherung kann D wie folgt vereinfacht werden:

$$D \approx (6n + 2) \text{ dB} \quad (3)$$

Von der maximal erreichbaren Systemdynamik müssen leider einige dB abgezogen werden, nämlich für den Eigenfehler des A/D-Wandlers 2 dB, für den Quantisierungsgeräuschfehler (nach CCIR-468-3) 12 dB, für den Schutzabstand zum Quantisierungs-

rauschen 20 dB sowie als Übersteuerungsreserve 10 dB, total also 44 dB.

Somit bleibt bei einer Zuordnung von 16 Bit pro Abtastwert, wie für die CD-Platte üblich, lediglich ein Nutzdynamikumfang von 54 dB übrig. Praktische Untersuchungen haben zwar gezeigt, dass das Programmaterial nur in den seltensten Fällen den Dynamikumfang von 50 dB übersteigt. In den Tonstudios, wo man jeden Qualitätskompromiss ausschliessen möchte, wird erwogen, 18 oder gar 20 Bit pro Abtastwert zuzuordnen. Ob sich dafür ein Standard durchsetzen wird, ist noch ungewiss. Für Rundfunkbedürfnisse würden 48 kHz und 16 Bit ausreichen.

Mögliche Übertragungswege

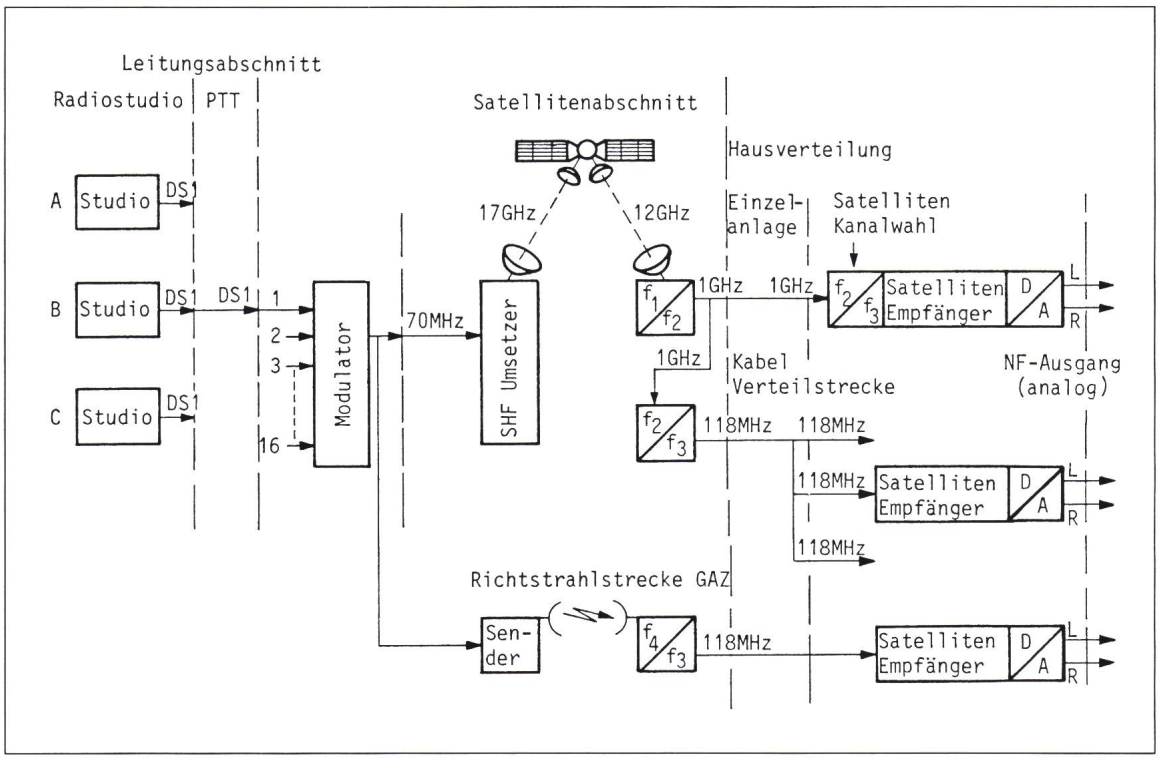
Bestehende Hörfunkübertragungskanäle zur Ausbreitung digitaler Audiokanäle zu nutzen erscheint aufgrund des hohen Bandbreitenbedarfs aussichtslos zu sein. Abgesehen von der Lang-, Mittel- und Kurzwelle käme höchstens das UKW-Band von 87,5–108 MHz in Frage. Praktische Versuche [2] haben aber gezeigt, dass eine Vermischung von herkömmlichen UKW-Signalen mit digitalen Kanälen beim heute üblichen Kanalabstand von 100 kHz zu empfindlichen Störungen der analogen Kanäle führen würde. Diese Störungen hängen nicht zuletzt von der Güte der analogen Empfänger ab, wobei auch hier unter den verschiedenen Fabrikaten grosse Streuwerte festzustellen sind. Die Ausscheidung von speziellen UKW-Kanälen zur Übertragung digitaler Signale wäre als Alternativlösung auf europäischer Ebene nur nach langwierigen internationalen Vereinbarungen möglich. Auch das anschliessende Band von 108...112 MHz (Flugfunk) wird sich kaum innert nützlicher Frist für Rundfunkzwecke freilegen lassen. Die gemeinsame Nutzung von Rundfunksatellitenkanälen im 12-GHz-Bereich mit dem Fernsehen wäre eine andere Möglichkeit. Ein solches Signal durchläuft dabei allerdings die unterschiedlichsten Übertragungswege, die sehr vielfältige Ansprüche stellen. So muss es sich vom Studio bis zur Satellitenstation in die bestehenden digitalen PTT-Übertragungsleitungen integrieren lassen. Anschliessend soll es den Störungen, die sich auf der Satellitenstrecke zutragen können, standhalten. Schliesslich folgt die Umsetzung und Decodierung im Empfänger, die wiederum anderen Gesetzmässigkeiten folgt. Berücksichtigt man noch eine dazwischenliegende Kabelverteilung, so muss das digitale Signal fast unmöglichen Ansprüchen genügen (Fig. 1).

Der digitale terrestrische Übertragungskanal

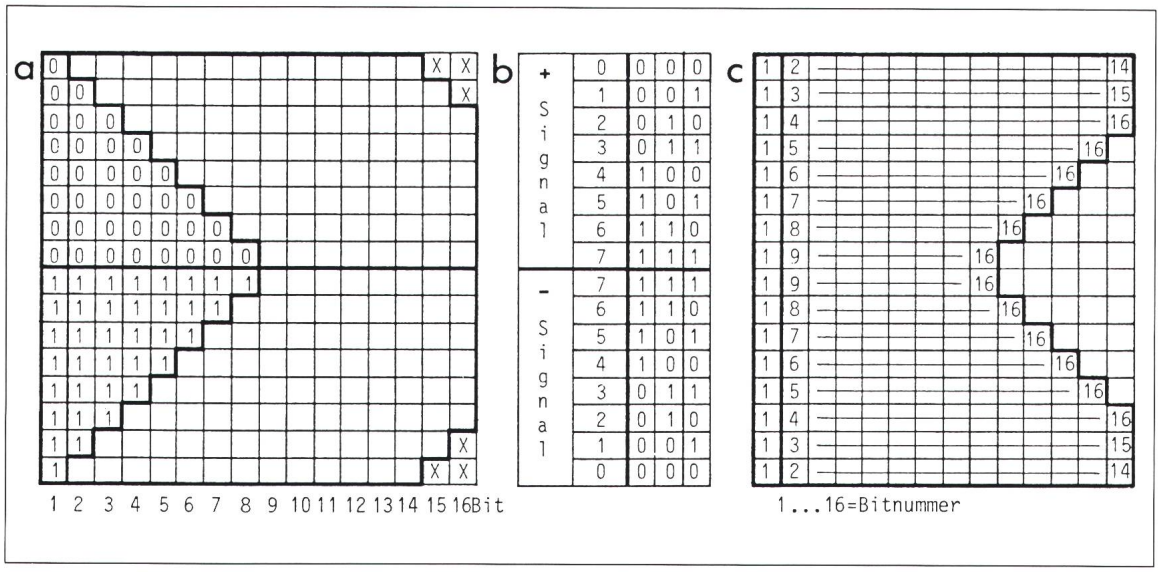
Ausgangspunkt sind die existierenden digitalen terrestrischen Übertragungsverfahren. Einmal mehr scheinen Frankreich mit dem MVS-620-Verfahren und Deutschland mit dem DS-1-System zwei verschiedene Wege zu gehen. Da letzteres bessere Voraussetzungen liefert, wollen wir uns zuerst diesem Standard zuwenden.

Ausgangspunkt von DS-1 ist das in der Übertragungstechnik definierte digitale Telefoniesystem mit 30 Kanälen, das PCM 30 mit einer Kapazität von 2,048 Mbit/s, nach CCITT G 732, 30 Kanäle, 8-kHz-Abtastfrequenz, 8 Bit pro Abtastwert. Auf dieser Grundstruktur basieren alle durch das CCITT empfohlenen Systemhierarchien. Innerhalb dieses Grundsystems musste der hochqualitative Tonkanal so definiert werden, dass unter Einhaltung gewisser minimaler Anforderungen ein Maximum an Tonkanälen untergebracht werden konnte.

Als erstes musste die Abtastfrequenz festgelegt werden. Eingehende Untersuchungen [3] haben gezeigt, dass eine Begrenzung der Audiobandbreite auf 15 kHz keine wesentliche Qualitätseinbusse bewirkt. Damit genügt eine Abtastfrequenz von 32 kHz. Mit einer Quantisierung von 16 Bit könnten somit in einem PCM-30-Kanal à 2,048



Figur 1
Übertragungsmöglichkeiten eines digitalen Radiosignals
GAZ: Gemeinschaftsantennen-Zubringernetz der schweizerischen PTT



Figur 2
Funktionsweise der 16/14-Bit-Gleitkommatechnik

a zu übertragende Signale
□ 0 oder 1 (Mantisse)
× Bit, die nicht übertragen werden können

b Skalenfaktor-Tabelle

c Übertragungsformat: Vorzeichen + Mantisse

Mbit/s 4 Tonkanäle untergebracht werden. Aber leider reicht dazu die Kanalkapazität doch nicht ganz, ist doch neben der normalen Toninformation eine minimale Rahmenstruktur notwendig (64 kBit von den möglichen 2048 kBit). Für die Tonübertragung stellen aber 16 Bit eine minimale Forderung dar, will man auf die Aussteuerungsreserve nicht verzichten. Mit einem Kunstgriff, der sogenannten Gleitkommatechnik (Potenzschreibweise), lässt sich diese Forderung erfüllen. Der gesamte nutzbare Pegelbereich wird dabei in 8 Unterbereiche zu 6 dB unterteilt, wobei negative Signalwerte als Zweierkomplement der entsprechenden positiven Werte geschrieben werden (Fig. 2a). Jeder Unterbereich ist einer der Bitstellen 1 bis 8 der Binärzahl, welche das Tonsignal repräsentiert, zugeordnet. Der Signalwert kann nun als Produkt einer Mantisse und einer Zweierpotenz (in binärer Schreibweise) geschrieben werden:

$$z = y \cdot 10^{x} \qquad (4)$$

wobei y eine maximal 13stellige binäre Zahl - beim Aussenden kommt noch das Vorzeichenbit dazu - und x den Zahlenfaktor (Fig. 2b) darstellt. Dies bedeutet nichts anderes, als dass der Zahlenfaktor angibt, wie viele den Unterbereich definierende Nullen oder Einer die zu übertragende Binärzahl auf den Stellen 2 bis 8 enthält bzw. welche Stellen bei der Übertragung unterschlagen werden können (Fig. 2c). Man beachte, dass die erste Kolonne in Figur 2c (Bitnummer 1) das Vorzeichen überträgt und dass für die 2 benachbarten Pegelbereiche unterhalb der oberen Systemgrenze (im positiven und negativen Bereich) nur 14 Bit bzw. 15 Bit übertragen werden können. Da sich die entsprechenden Pegelbereiche ohnehin in der Übertragungsreserve befinden, sind sie für normale Signalamplituden nicht relevant. Für kleinere Werte lassen sich mittels (4) alle 16 Bit rekonstruieren.

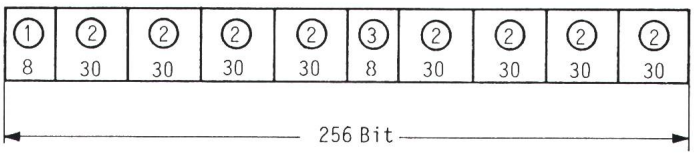
Die gewonnene Übertragungskapazität wird dadurch erkauft, dass der Skalenfaktor selbst nur für jeden 64. Abtastwert, d.h. alle 2 ms, ermittelt wird. Seine Übertragung erfolgt in diesem Zeitabschnitt mehrmals sequentiell (ein Bit pro Abtastwert) mit Hilfe eines 15. Bit des Übertragungssystems, das auch als Paritätsbit genutzt wird. Innerhalb dreier Abtastwerte wird der gleiche Skalenfaktor also wiederholt, innerhalb von 64 Abtastwerten insgesamt 21mal. Das 64. Paritätsbit wird vom Skalenfaktor nicht belegt.

Wie bereits erwähnt, müssen nun die 15 Bit pro Abtastwert in einen PCM-30-Kanal à 2,048 kBit (auch DS-2-Kanalbündel genannt) mit 30 Sprachkanälen à 64 kbit/s sowie 2 Kanälen à 64 kbit/s für den Fernsprechbetrieb verpackt werden. Aus verschiedenen praktischen Gründen wurde für ein digitales Stereosignal eine Bruttobitrate von 1,024 Mbit/s festgelegt, mit einer ähnlichen Rahmenstruktur wie von der CCITT-Empfehlung G 732 definiert. Der Grundrahmen hat dabei eine Länge von 256 Bit (Fig. 3) und eine Erneuerungsfrequenz von 4 kHz. Es beginnt mit einem Kennwort von 8 Bit. Anschliessend folgen 8 Tonpakete à 15 Bit, wobei das 15. Bit, wie oben beschrieben, das Paritätsbit mit einem Bit des Skalenfaktors eines Tonpaketes kombiniert. Je zwei nebeneinanderliegende Pakete enthalten entweder die rechte und linke Toninformation eines Stereosignals oder 2 unabhängige Monosignale. Danach folgen 8 Bit Zusatzinformation (je 4 Bit für den linken und den rechten Tonkanal) und wieder 8 Tonpakete à 15 Bit.

Die Zusammensetzung der Bruttodatenrate eines so definierten DS-1-Kanals ist in Tabelle I dargestellt.

Als Leitungscode des DS-1-Signals verwendet man den HDB-3-Code (High Density Bipolar). Dank seiner Codiervorschrift von maximal 3 aufeinanderfolgenden logischen 0 lässt sich der Signaltakt einfacher zurückgewinnen. Auf PTT-Strecken von 2,048 Mbit/s (PCM 30 oder DS-2) können demnach ohne Probleme zwei DS-1-Kanäle übertragen werden.

Eine Bemerkung zu den Zusatzin-



Figur 3
Rahmenstruktur

① Rahmenkennung
② Doppelcodewort
③ Zusatzinformation

formationen. In Anlehnung an VPS (Video-Programmsystem) im Fernsehbereich oder RDS (Radio-Datensystem) für UKW übertragen die Zusatzinformationen programmrelevante Angaben wie Betriebsart (mono/stereo), Programmart (15 verschiedene Programmarten wie Nachrichten, Sport, Hörspiel, Jazz usw.) oder Kennung (Sprache oder Musik). In einer späteren Phase sind weitere Informationen denkbar.

In Europa ist das DS-1-Verfahren leider nicht unbestritten. Frankreich versucht mit allen Mitteln ein anderes System zu bevorzugen, das MVS-620-System. Vorgebracht durch TRT (Télécommunications radio-électriques et téléphoniques) sowie TDF (Télédiffusion de France), geht dieses System von einer Quellencodierung von 32 kHz à 14 Bit pro Tonkanal aus. Die Übertragung erfolgt dann ebenfalls über einen 2,048 Mbit/s-Kanal mit HDB-3-Code, allerdings mit folgenden Tonkanalkombinationen:

- 3 Stereopaare à 32 kHz und 10 Bit kompandiert oder
- 2 Stereopaare à 32 kHz und 14 Bit linear (Euroradio) oder
- 1 Stereopaar à 48 kHz, bis zu 20 Bit.

Rahmenstruktur wie eventueller Skalenfaktor, aber auch der Fehlerschutz (Reed Salomon) weichen von DS-1 ab. Grösstes Problem ist dabei die für das Euroradio gewählte Pegelauflösung von 14 Bit linear. Untersuchungen beim Institut für Rundfunktechnik in Deutschland haben deutlich gezeigt, dass zwischen einer Übertragung mit 16 Bit linear und 16/14 Bit (mit Gleitkommatechnik) kein Unterschied hörbar ist, wohl aber zwischen 16 Bit und 14 Bit linear codiert. Abgesehen von den Kompatibilitätsproblemen, die bei einem europaweiten Empfang entstehen werden und auf die noch später eingegangen werden soll, bleibt nur zu hoffen, dass bei einem Entscheid die qualitativen Argumente in den Vordergrund gerückt werden.

Satellitenübertragung: Codierung

Der TV-Kanal eines Rundfunksatellitenkanals weist folgende Parameter auf:

- Aufwärts-/Abwärtsfrequenz: 17/12 GHz
- Sendeleistung (EIRP): 65,5 dBW
- Bandbreite des Transponders: 27 MHz
- Signalbandbreite: etwa 15 MHz (gemäss WARC 77)

Nach *Shannon* gilt bekanntlich für die Kapazität eines bandbegrenzten Gaussschen Kanals

$$C = B \cdot \log_2 (1 + S/N) \qquad (5)$$

Mit B = 27 MHz und $S/N \sim 13{,}5$ dB errechnet sich eine Kanalkapazität von weit über 100 Mbit/s. Nun hängt aber der Grenzwert noch von anderen Faktoren ab wie

- Leistungsbedarf,
- Bandbreitenbedarf,
- Modulationsverfahren,
- Fehlerschutz,
- Komplexität der Sende- und Empfangsgeräte,

so dass Abstriche notwendig sind.

Ausgehend von einer Satelliten-Kanal-Kapazität von 20,48 Mbit/s kann ein optimaler Kompromiss für 16 stereophone Signale (oder 32 monophone Tonquellen) gefunden werden. Dabei wird nicht nur die Eigenschaft des Satellitenkanals berücksichtigt, sondern auch die Möglichkeit, dieses Signal innerhalb zweier Kabelfernsehkanäle von 7 MHz Bandbreite zu übertragen.

In der Praxis werden 16 DS-1-Kanäle, aufgeteilt in 2 Datenströme à 10,24 Mbit/s, «multiplexiert» (Fig. 4). Die Anführungszeichen weisen darauf hin, dass es sich dabei eher um eine vollständige Decodierung der DS-1-Signale mit Korrektur von eventuellen Fehlern und anschliessender Neucodierung in eine völlig neue Takt- und Paketstruktur mit erhöhtem Fehlerschutz als um eine gewöhnliche Multiplexierung handelt [4]. Letzterem ist insofern eine hohe Bedeutung beizumessen, als kleinste Übertragungsfehler sich sehr negativ auf die Tonqualität auswirken. Satellitenstrecken sind bekanntlich störanfälliger als normale PTT-Übertragungsleitungen.

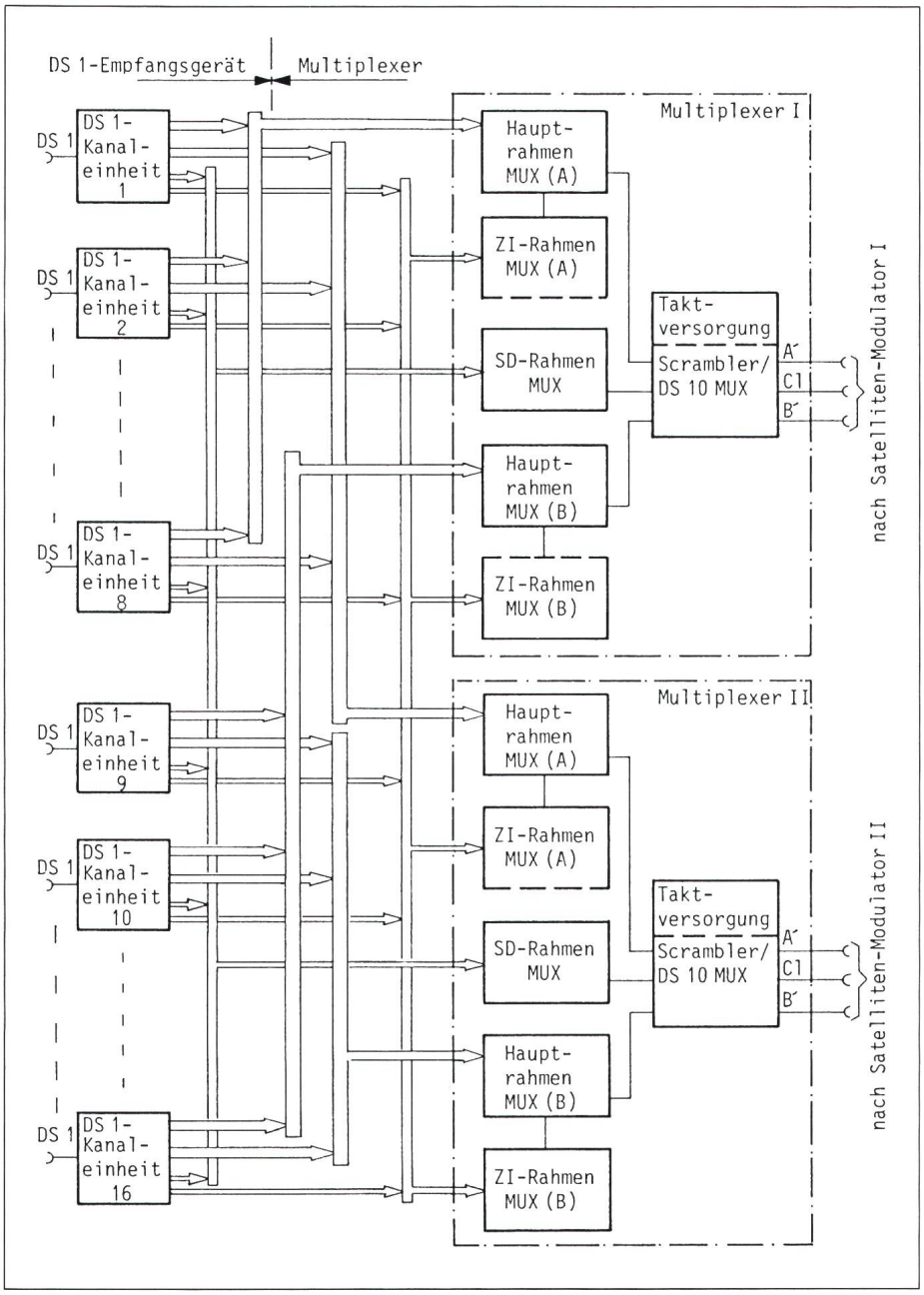
Die 14 Bit eines Tonabtastwertes werden dabei nicht vollumfänglich geschützt, sondern nur deren 11 (die MSB), die speziell codiert werden. Grundlage ist dabei der sogenannte BCH-(Base-, Chandhuri-, Hocquenghem-)Code 63/44 (Blocklänge 63 Bit, Nutzinformation 4×11 Bit sowie 19 Bit für Fehlererkennung und -korrektur). Zusammengesetzt mit einem Überrahmen für Sonderdienste und Zusatzinformationen (geschützter Skalenfaktor und Zusatzinformationen für die verschiedenen Tonkanäle) sowie 4×3 Bit ungeschützter Toninformation ergibt dies einen Block à 77 Bit. Zwei solche Blöcke werden verkämmt zu 154 Bit und in einen Hauptrahmen von 320 Bit (2×154 Bit plus 12 Bit Synchronisaton) eingebettet (Fig. 5). Damit wird die theoretische Fehlerrate eines digitalen Satellitenkanals von 10^{-3} auf 10^{-6} verbessert. Anstatt diesen Restfehler mit aufwendigen Systemverbesserungen auf 10^{-10} (ein Fehlerereignis alle 5 Stunden, was für eine hochqualitative Tonübertragung ein Minimum ist) weiter zu verbessern, werden die Fehler lediglich erkannt und mit benachbarten Werten verschleiert.

Zusätzlich kommt die für die Quellencodierung gewählte Gleitkommatechnik dem Fehlerschutz insofern entgegen, als der Übergang von guter zu schlechter Qualität infolge von Fehlern weniger abrupt erfolgt, als dies bei rein linearer Codierung der Fall ist. Die gewählte Kanalcodierung genügt aber nicht nur den Gesichtspunkten der Fehlerkorrektur auf der Satellitenstrecke, sondern vermag auch die Verhältnisse in den Empfangsanlagen zu berücksichtigen. So wurde experimentell festgestellt, dass im Empfänger infolge von Schaltvorgängen anderer Stromverbraucher Bündelfehler vorkommen können. Der BCH-Code ist diesbezüglich besonders resistent.

Je 512 der oben beschriebenen Pakete à 320 Bit werden schliesslich in einem Überrahmen (Fig. 5) zusammengefasst. Pro Sekunde können demnach in einem Satellitenmultiplexsignal von 10,24 Mbit/s 62,5 solcher Überrahmen wiederholt werden. Um die Übertragungssicherheit zu erhö-

Tonübertragung:	2 Ch à 14 Bit à 32 kHz =	896 kbit/s
Fehlerschutz und Skalenfaktor:	2 Ch à 1 Bit à 32 kHz =	64 kbit/s
Zusatzinformation:	8 Bit à 4 kHz =	32 kbit/s
Rahmenkennung:	8 Bit à 4 kHz =	32 kbit/s
Total		1024 kbit/s

Tabelle I Datenrate des DS-1-Kanals
Ch Kanal



Figur 4 Hörfunk-Satelliten-Multiplexer
ZI Zusatzinformation
SD Sonderdienste

hen, werden je 8 DS-1-Kanäle abwechslungsweise im einen, dann im anderen Satellitenmultiplexsignal übertragen (Fig. 4). Für weitere Details der Codierung sei auf [5] verwiesen.

Satellitenübertragung: Modulation

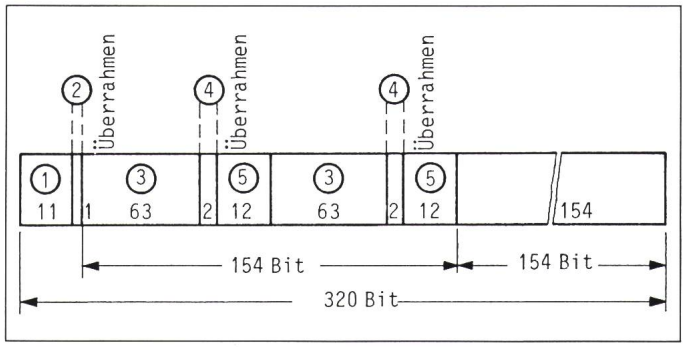
Bei der Wahl des Modulationsverfahrens für die Satellitenstrecke ging es vor allem darum, einen Kompromiss zwischen Aufwand und Systemverhalten zu finden. Vier verschiedene Systeme wurden einander gegenübergestellt (Tab. II). Unter der Voraussetzung billiger Empfänger, aber auch der Möglichkeit, die so modulierten Kanäle unverändert über Kabelanlagen mit einer Bandbreite von 14 MHz übertragen zu können, fiel die Wahl auf ein rein digitales System, das 4-PSK- (Phase-Shift-Keying-) System, auch QPSK- (Quadrature-PSK-) System [6/7]. Da im Sender eine Differenzcodierung (4-DPSK) gewählt wurde, können im Empfänger sowohl kohärente (kontinuierliche) Demodulatoren mit zusätzlicher Differenzdecodierung oder differentielle Demodulatoren eingesetzt werden. Diese Lösung hat den Vorteil, dass bei genügender Systemreserve die billigere differentielle Demodulation eingesetzt werden kann. Die kohärente Demodulation weist ein um etwa 2 dB besseres Systemverhalten auf.

Zur Einhaltung einer Fehlerrate von 10^{-3} auf dem Satellitenkanal genügt für das 4-CPSK (kohärente PSK) ein C/N (Carrier to Noise) von 9,5 dB. Für die Schweiz (und Deutschland) erbringt der TV-SAT aber ein praktisches Verhältnis C/N von 17 dB, so dass sich die um 2...3 dB schlechtere 4-DPSK-Modulation durchaus verantworten lässt (Fig. 6). Diese Systemreserve ermöglicht – neben der Einführung von differentieller Codierung –, für das digitale Radio kleinere Empfangsantennen (z.B. 30 cm) als für das Fernsehen einzusetzen oder eine Sendung auch ausserhalb der festgelegten Fernsehversorgung zu empfangen.

Nebenbei sei darauf hingewiesen, dass einerseits die weiter oben geschilderten beiden Satellitenmultiplexsignale à 10,24 Mbit/s eine Voraussetzung für das 4-PSK-Signal sind, braucht es doch zur Modulation zwei Bitströme, die in Teilrahmen gleicher Länge gegliedert sind. Anderseits sollte das über den Satelliten ausgestrahlte Signal aus technischen Gründen immer die gleiche durchschnittliche Leistung aufweisen, was aber bei Modulationspausen oder konstanten Tonsignalen nicht der Fall wäre. Das digitale Signal muss deshalb verwürfelt werden (Scrambling), damit eine sogenannte Energieverwischung erzielt wird. Dies geschieht mit Hilfe einer Pseudozufallsfolge, die im Sender wie im Empfänger synchron erzeugt werden muss.

Die Kabelübertragung

Der Empfang eines TV-Direktsatellitenkanals bietet heute – obwohl noch keiner in Betrieb ist – keine besonderen Probleme. Nach dem Breitbandempfänger gilt es aber, den für den digitalen Hörfunk bestimmten Kanal in bestehende Kabelsysteme, sei dies in Einzelempfangsanlagen oder Gemeinschafts- bzw. Kabelanlagen, zu transportieren und in der richtigen Steckdose enden zu lassen. Jedes empfangene Satellitensignal wird nach der Breitband-Empfangseinheit auf die 1. Zwischenfrequenz bei etwa 1 GHz heruntergemischt. Von da an gibt es 2 Szenarien (Fig. 1). Handelt es sich um eine Einzelempfangsanlage, so kann das



① Hauptrahmen-synchronisation
② Überrahmen Sonderdienste
③ BCH-geschützte Nutzinformationen
④ Überrahmen für Zusatzinformationen (inkl. geschützter Skalenfaktor)
⑤ 4×3 Bit ungeschützte Nutzinformationen

Figur 5 Hauptrahmen der Satellitenübertragung

1-GHz-Signal bei nicht allzu grosser Übertragungsdistanz direkt auf das Kabel gegeben werden. In einem Vorsatzgerät wird es demoduliert und auf eine für digitale Hörfunkempfänger geeignete Frequenz umgesetzt. In Gemeinschafts- oder Kabelanlagen ist die Umsetzung dagegen möglichst nahe bei der Empfangsantenne bzw. der Kabelkopfstation vorzunehmen, damit das Signal möglichst ohne Verlust auf übliche Frequenzen weiterverteilt werden kann. Die Bandbreite der 16 stereophonen digitalen Tonkanäle wurde, wie weiter oben erläutert, so ausgelegt, dass die Übertragung ohne nennenswerten Qualitätsverlust in 14 MHz breiten Kanälen erfolgen kann. Im Kabel müssen deshalb für ein solches Bündel mindestens 2 Fernsehkanäle belegt werden. International scheint man sich auf die Sonderkanäle S2 und S3 geeinigt zu haben, so dass die zur Übertragung im Kabel notwendige 2. Zwischenfrequenz 118 ± 7 MHz betragen muss (Fig. 7). Diese Frequenz hätte den Vorteil, dass nach einer leichten Modifizierung der Antennensteckdose, der UKW-Hörrundfunkbereich und der digitale Hörfunk gemeinsam ausgekoppelt werden könnten (gleiche Buchse). Allerdings sind gewisse Nachteile zu erwarten wie:

- Störung des UKW-Empfanges durch Spiegelung des digitalen Signals an der 1. ZF-Stufe des Empfängers,
- Beschränkte Ausbaumöglichkeit des digitalen Rundfunks,
- Störgefahr für das digitale Signal durch Oszillatorsignale des UKW-Empfängers oberhalb 100 MHz.

Andere Vorschläge gehen deshalb davon aus, die digitalen Hörfunkprogramme am TV-Ausgang auszukoppeln und den Radioausgang bei 111 MHz zusätzlich zu dämpfen. Diese Lösung hätte noch den Vorteil, bei der allfälligen Einführung weiterer digitaler Hörfunkkanäle die Belegung der Sonderkanäle S4 und S5 zu erleichtern. Dies geschieht auf Kosten von Fernsehkanälen, die aber auf das zukünftig zu erschliessende Hyperband S21 (bzw. M21) bis S41 ausweichen könnten.

Schliesslich sei darauf hingewiesen, dass die Übertragung von digitalen Hörfunksignalen nicht zwingend über Satellitenstrecken erfolgen muss. So könnte die Verteilung in dichtverkabelten Ländern wie der Schweiz über digitale Kabelsysteme oder Richtfunkstrecken (GAZ) der PTT erfolgen (Fig. 1). Auf diesen speziellen Fall soll später nochmals eingegangen werden.

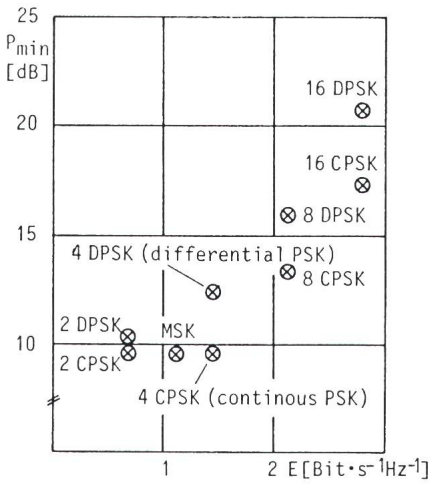
Digitale Heimempfänger

Auf die Tonqualität, die am Empfängerausgang erwartet werden darf, wurde schon an anderer Stelle eingegangen. Hier seien nur das Funktionsprinzip und die Bedienungsmöglichkeiten erläutert. Die Empfänger gliedern sich in 3 Teile (Fig. 8).

- HF-Analogteil zur Demodulation des digitalen Signals,
- Digitalteil zur Decodierung und Wiederherstellung des ursprünglichen digitalen Basissignals mit Zusatzinformationen,
- Digital/Analog-Wandler zur Wiederherstellung des analogen Tones.

Verfahren	A	B	C	D
Übertragungs-Methode	FM/FM Pilotsignal auf Unterträger	FM/FM Links- und Rechtskanal auf getrennten Unterträgern	PSK/FM 1 Stereosignal je Unterträger	PSK rein digitales Verfahren
Zahl der Stereoprogramme ohne Kompander	3	6	12 (Eventuell Fehlerschutz notwendig)	16 (4-Phasen CPSK) 12 (2-Phasen CPSK) mit sehr hoher Systemreserve
Zahl der Stereoprogramme mit Kompander	5 (?) (Gewinn durch Kompandierung 14dB)	12	Nicht untersucht, da gleichförmige Quantisierung erwünscht.	
Signalqualität (SIN)	60 dB	60 dB	Quantisierungs-rauschen	86 dB
Anmerkung	zu geringe Kanalzahl	Günstig für Verteilung in Kabelanlagen	Ungünstig im Vergleich zu D (Kosten)	Hohe Systemreserven. Verteilung im Kabel schwierig.

Tabelle II Vergleich der untersuchten Übertragungsverfahren [1]



Figur 6 Verhältnis Leistung/Bandbreite für verschiedene Modulationsverfahren

P_{min} Leistungsbedarf bei gleicher Fehlerrate
E Spektrale Effizienz

Der HF-Analogteil enthält einen Tuner mit einer für den digitalen Hörfunk bevorzugten Frequenz von 118 MHz (Mittelfrequenz der TV-Kanäle S2/S3). Meistens kann er aber auch für andere Kanäle (z.B. S4/S5 oder S6/S7) umgestimmt werden. Für Einzelempfangsanlagen oder Kleingemeinschaftsanlagen, wo die SHF-Satellitensignale für den Transport in die 1-GHz-Ebene umgesetzt werden, ist ein Empfangsteil für den Freuqenzbereich 950 bis 1350 MHz vorgelagert. Nach einer Umsetzung auf die oben beschriebene Frequenz von 118 MHz erfolgt eine weitere Umsetzung auf 70 MHz. Das Signal wird anschliessend gefiltert, verstärkt und demoduliert. Diesbezüglich sei daran erinnert, dass je nach Decoderaufwand und damit auch erreichter Signalgüte die differentielle oder kohärente Demodulation mit nachgeschalteter Differenzcodierung angewendet wird. Am Ausgang dieses Moduls stehen wieder beide Datenströme von 10,24 Mbit/s zur Verfügung.

Der zweite Empfängerteil umfasst folgende digitalen Funktionen:

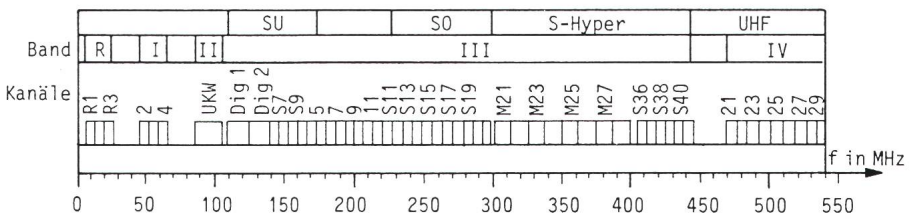
- Synchronisation und Demultiplexierung,
- Fehlererkennung und Korrektur,
- Ableitung des Skalenfaktors und Herstellung der ursprünglichen Amplitude,
- Concealment (Korrektur von nicht erkannten Fehlern).

Schaltungstechnisch ist dieser Teil sehr umfangreich. Dank einem VLSI-Bauelement [8], das in grossen Stückzahlen hergestellt werden soll, wird aber nicht nur eine optimale Decodierung erreicht, sondern auch ein erschwinglicher Empfängerpreis. Die Umwandlung im Analog-Converter basiert auf bekannten Techniken. Einzig beim abschliessenden Filter 11. Grades muss zur Erreichung möglichst kleiner Klirrwerte von etwa 0,02% ein gewisser Aufwand betrieben werden.

Entsprechend angewendeter Technik und den vorgesehenen Zusatzinformationen ergeben einen besonders bedienungsfreundlichen Empfänger:

- Voreinstellbare TV-Guppen-Kanäle im S-Band,
- Zugriff auf einen oder mehrere der 32 Tonkanäle einer Gruppe,
- 16 Programmarten - Wahltasten für Sport, Jazz, Folk usw.,
- Separate Lautstärkeneinstellung für Sprache und Musik,
- Fernbedienung,
- Verschiedene optische Anzeigen.

Bedauern kann man höchstens das Fehlen einer Programmidentifikation, die aber später im System eingebaut werden soll. Vorserien eines solchen Gerätes sind bereits auf dem Markt. Der Preis beträgt ungefähr 1500 Franken. Laut namhaften Herstellern dürfte dieser bei Seriengeräten unterhalb von 1000 Franken zu stehen kommen.



Figur 7 Vorschlag zur Neubelegung der Kabelkanäle S2-S41 unter Berücksichtigung des digitalen Rundfunks und der Einführung von Breitbandfernsehkanälen

Dig 1 und 2 Sonderkanäle mit einer Bandbreite von 14 MHZ für digitalen Hörfunk, wobei Dig1 = S2+S3, Dig 2= S4+S5
M21...28 Sonderkanäle Fernsehen, mit einer für MAC geeigneten Bandbreite von 12 MHz

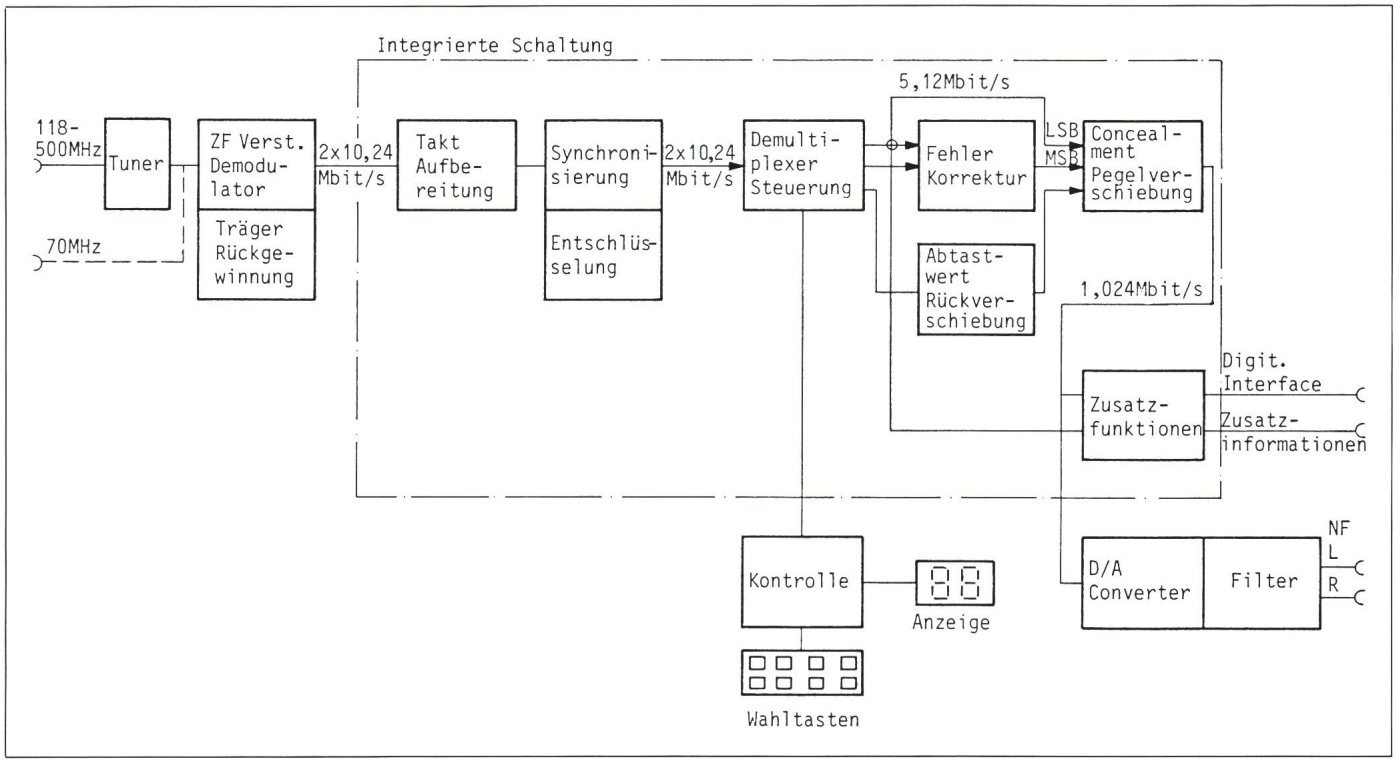
Normung

Wo stehen heute die Normungsbestrebungen für den digitalen Hörfunk? Welche Chance besteht, dass sich die beschriebene Norm durchsetzen wird?

Im *Studiobereich* dürfte sich mit Bestimmtheit die Abtastfrequenz von 48 kHz durchsetzen (CCIR-Empfehlung 646). Ob es allerdings bei 16 Bit pro Abtastwert bleiben wird, ist noch ungewiss. Unter dem Druck der Tonstudios könnte eine Erhöhung bis 20 Bit vollzogen werden. Eine Umsetzung von einer Norm in eine andere ist heute ohne grosse Probleme möglich. Selbst die Zuspielung von CD-Platten mit einer Abtastfrequenz von 44,1 kHz und 16 Bit pro Abtastwert kann mit entsprechender Umcodierung als gelöst betrachtet werden.

Im *Übertragungsbereich* ist die Angelegenheit etwas komplizierter, muss sich doch eine zukünftige Norm an die Übertragungssysteme der PTT und der Kabelverteiler anpassen können. Gleichzeitig muss sie die gestellten Anforderungen für tiefe Bitfehlerraten über Satellitenstrecken erfüllen. Grundlage dazu bilden die digitalen Übertragungssysteme PCM 30 der Postverwaltungen, die weiter vorne besprochen wurden. Welches System sich schliesslich durchsetzen wird, ob DS-1, MVS 620 [9] oder ein anderes, z.B. das noch in Entwicklung befindliche Digital Audio Broadcasting System (DAB), muss einmal mehr der Markt, gegebenenfalls die Politik, entscheiden. Alle Systeme sind sowohl bei der UER (Union Européenne de Radiodiffusion), CEPT (Conférence Européenne des administrations des Postes et des Télécommunications) als auch beim CCIR (Comité Consultatif International des Radiocommunications) zur Normierung eingegeben worden. In der Schweiz sind keine Alleingänge möglich. Man wird sich, wie so oft auf diesem Gebiet, auf das Ausland abstützen müssen. Allerdings liegt das DS-1 in bester Ausgangsposition.

Was die Ausbreitung selbst anbelangt, so laufen neben der Ausstrahlung über Rundfunksatelliten im 12-GHz-Bereich (11,7 bis 12,5 GHz) Bestrebungen, den digitalen Hörfunk auch für andere Zwecke zu erschliessen. Einerseits ist die verfügbare Anzahl Kanäle im 12-GHz-Bereich beschränkt. Anderseits eignet sich dieser Frequenzbereich praktisch nur für den stationären Empfang. Parabol- oder Planarantennen, die im bisherigen



Figur 8 Digitaler Radioempfänger
Concealment = Fehlerverschleierung

12-GHz-Bereich üblich sind, haben den Nachteil starker Richtungsabhängigkeit. Anlässlich der WARC-ORB-88-Konferenz soll deshalb versucht werden, einerseits dem Rundfunk einen weiteren Frequenzbereich zwischen 22 und 22,5 GHz zuzuteilen und anderseits im Bereich zwischen 0,5 und 2 GHz ein Band zu reservieren, das sich insbesondere für den mobilen digitalen Rundfunkempfang (z.B. im Auto) eignen würde. Diesem mobilen Empfang ist insofern Bedeutung beizumessen, als damit zum Beispiel die Kurzwellenversorgung in Europa oder die grenzüberschreitende UKW-Versorgung (UKW-Programme hören bekanntlich an der Landesgrenze auf) mit qualitativ hochstehenden Signalen einer optimalen Lösung zugeführt werden könnten. Konsequenterweise müsste man für alle Rundfunkdienste die gleichen digitalen Empfänger verwenden können.

Aber auch die an UKW gestellten höheren Ansprüche könnten in Zukunft mit digitaler Signalübertragung gelöst werden. Erweiterung des UKW-Bandes auf 112 MHz und Reservierung für digitale Dienste wäre dabei eine Variante. Der Einsatz von bandbreitereduzierenden Verfahren, mit dem Ziel, analoge und digitale Programme auf Nachbarkanälen ohne gegenseitige Störung unterzubringen, ist eine andere Forschungsrichtung. Auch hier möchte man das digitale DS-1-Basissignal möglichst beibehalten können, nicht zuletzt, um die digitalen Empfänger dank Massenfertigung auf erschwinglichem Preisniveau halten zu können.

Folgerungen für die Schweiz

Zurzeit stehen uns kaum Möglichkeiten zur Ausstrahlung eines digitalen Tonprogrammes zur Verfügung. Selbstverständlich wären Satellitenkanäle denkbar, wobei die Schweiz heute noch über keinen eigenen Rundfunksatelliten verfügt. In nächster Zukunft ist auch keiner geplant, da die Kosten für einen einfachen digitalen Rundfunksatelliten-Stereotonkanal auf Fr. 2 Mio pro Jahr geschätzt werden und im Vergleich zur relativ kleinen Zuhörerzahl dieser Aufwand kaum zu rechtfertigen ist.

Die einzige kurzfristige Chance zur Verbreitung eines schweizerischen digitalen Hörfunkprogrammes besteht also darin, möglichst bestehende, für alle Landessprachen geeignete Programme zu nutzen (maximale potentielle Hörerzahl) und sich einer bestehenden Infrastruktur zur Verteilung der Signale zu bedienen. Diese Möglichkeit besteht!

Der Telefonrundspruch hat Zukunft

Die Programme des Telefonrundspruchs, ein Angebot der schweizerischen PTT, werden von der SRG produziert. Dieser Dienst verliert aus verschiedenen Gründen pro Jahr rund 10 000 Abonnenten. Er zählt heute etwas mehr als 300 000 Anschlüsse. Ungenügende Qualität ist eines der Hauptargumente für den Hörerverlust, um so mehr, als die meisten Programmteile ohnehin über UKW, sei es aus der Luft oder über das Kabel, in besserer Qualität empfangen werden können. Aus tariflichen Gründen sind aber heute noch besonders Hotels und Spitäler am TR-Dienst interessiert. Es stellte sich deshalb für die PTT wie für die SRG die Frage der Fortführung dieser Dienstleistung. Dazu ist zu bedenken, dass der Telefonrundspruch nur unter grossen Schwierigkeiten im zukünftigen Swissnet integriert werden kann.

Die Frage der Fortführung des TR wurde von den PTT und der SRG zustimmend beantwortet, allerdings unter der Voraussetzung, dass das gesamte Programmkonzept überarbeitet und das Übertragungsverfahren in Zukunft auch den qualitativen Erwartungen der Zuhörer angepasst wird. So wurde bereits 1987 beschlossen, im

Angebot des TR die ersten SRG-Radioprogramme jeder Sprachregion unverändert zu übernehmen und über die gesamte Schweiz zu verteilen. Demgegenüber sollen die übrigen 3 TR-Programme nur noch aus Eigenproduktionen der von den PTT beauftragten SRG bestehen und nach folgendem Raster stärker typisiert werden:

- Leitung 1: Servicekette (für Touristen) mit Informations- und Unterhaltungscharakter
- Leitung 3: Ernste Musik
- Leitung 6: Unterhaltungsmusik ohne Wortbegleitung

Der Telefonrundspruch könnte damit die gesuchten Programmelemente für eine möglichst landesweite Nutzung liefern. Um aber für diese aufgewerteten Programmelemente eine Infrastruktur zu finden, über die wenn möglich digitale Signale verteilt werden könnten, ist ein anderes Übertragungsmedium zu suchen als die heutigen Telefonleitungen.

Bei der Realisierung eines digitalen Hörfunksystems müssen zudem 4 technische Elemente aufeinander abgestimmt sein: die Sendestudios, die Grobverteilung (bzw. die Zuführung zum Sender), die Feinverteilung zum Benützer sowie die Empfängertechnik, von denen im folgenden noch kurz die Grob- und Feinverteilung besprochen werden soll.

Gemeinschaftsantennen-Zubringerdienst

Davon ausgehend, dass die Feinverteilung von schweizerischen digitalen Programmen in den nächsten 10 Jahren wohl nur über das Kabel möglich sein wird, musste eine entsprechende Lösung für die Grobverteilung zwischen Studios und Kabelkopfstation gefunden werden. Hier kam dem Projekt *Digitales Radio* die Tatsache entgegen, dass das GAZ-Netz (Gemeinschaftsantennen-Zubringernetz) der PTT erneuert werden muss. Dieses Netz führt heute den abonnierten Kabelnetzen neben den TV-Programmen 7 stereophone und 7 monophone Radioprogramme zu. Für das neue Verteilungssystem von Radioprogrammen wurden deshalb 4 verschiedene Modulationsverfahren untersucht, wobei die abschliessende Wahl zur Übertragung der Radioprogramme (ob digitalen oder analogen Ursprungs) auf ein digitales Übertragungssystem mit 20,48 Mbit/s und DS-1-Schnittstelle fiel. Damit können neben der nötigen Rahmenstruktur 16 Programme in stereophoner Qualität übertragen werden. Die PTT beabsichtigen, neben den 3 Programmen des Telefonrundspruchs und den ersten SRG-Programmen jeder Sprachregion auch ausländische Radioprogramme anzubieten, und zwar möglichst keine Programme, die in digitaler Form bereits über Rundfunksatelliten angeboten werden, sondern solche, die sich einer grossen Beliebtheit erfreuen. Damit eine möglichst hohe Qualität angeboten werden kann, ist sogar daran gedacht, das Signal im Ausland direkt und wenn möglich über digitale Leitungen oder Richtstrahlstrecken zu übernehmen. Nach einer zentralen Zusammenführung aller Programme erfolgt die Verteilung über das GAZ-Netz und deren 34-Mbit/s-Basisstrekken.

Nutzung bestehender Kabelfernsehnetze

Der Kabelbetreiber, der digitale Radioprogramme in sein Netz einspeisen will, hat nun die Wahl zwischen digitalen Hörfunkprogrammen, die er selbst ab Satellit empfängt, und solchen, die er über das GAZ-Netz bezieht. Dabei soll das Signal möglichst bis zum Verbraucher digital geführt werden. Ist das Netz zur Übertragung digitaler Programme eingerichtet, so können die Angebote durch die Kabelbetreiber entweder als 20,48-Mbit/s-Pakete direkt in die TV-Sonderkanäle umgesetzt werden, oder aber die einzelnen Programme werden nach entsprechender Umcodierung in Form einer neuen digitalen Palette angeboten, was technisch allerdings relativ aufwendig ist. Falls das Netz nicht für die Ausbreitung digitaler Hörfunkprogramme vorbereitet ist (Sonderkanäle bereits durch das Fernsehen belegt, keine Ausbaumöglichkeit), so können die Programme nach einer Digital-Analog-Wandlung auf normalen UKW-Kanälen weitergegeben werden. Diese Lösung könnte insbesondere für kleinere Kabelnetze von Interesse sein, wird doch schon das neue GAZ-Netz eine wesentlich bessere Signalqualität anbieten als das bestehende Netz. Dass die 3 Spezial-TR-Programme noch während einer Übergangszeit von 10 Jahren parallel in der heute üblichen Form und Qualität als HFTR über Telefonleitungen angeboten werden müssen, ist selbstverständlich.

Schon bald digitales Radio?

Die Realisierung des digitalen Telefonrundspruchs ist beschlossene Sache. Der Zeitplan sieht vor, dass bis Ende 1989 die Sendestudios umgerüstet sind. Das digitale GAZ-Netz sollte ebenfalls bis Herbst 1989 mit den entsprechenden Codier- und Modulationsgeräten versehen sein. Schliesslich haben die Kabelbetreiber diesem Projekt ihre Unterstützung zugesagt und beabsichtigen, nicht zuletzt zur Übertragung der geplanten digitalen Hörfunkprogramme ab Rundfunksatellit, ihre Netze entsprechend vorzubereiten. Was die Empfangsgeräte selbst anbelangt, so sichert die Industrie zu, dass eine Auslieferung heute bereits möglich wäre. Allerdings musste die Produktion zurückgestellt werden, sind doch die deutschen Pläne zur Ausstrahlung digitaler Hörfunkprogramme durch den Ausfall des TV-SAT 1 arg in Mitleidenschaft gezogen worden. Sobald aber der nächste Satellit zur Ausstrahlung von Radioprogrammen bereit ist, sollten auch in der Schweiz digitale Radioempfänger angeboten werden.

Literatur

[1] *H. Wilkens:* Terrestrischer digitaler Hörrundfunk - Chancen und Risiken. Rundfunktechnische Mitteilungen 30(1986)3 S. 109...112.

[2] *K. Heintz, W. Schambeck* und *G. Steudel:* Messungen mit dem digitalen Satelliten-Hörrundfunk-System (DSR) - Satellitenstrekken-Tests und Einspeisung in Breitband-Kabelnetze. Rundfunktechnische Mitteilungen 31(1987)4, S. 153...160.

[3] *H. Jakubowski:* Quantisierungsverzerrungen in digital arbeitenden Tonsignalübertragungs- und Verarbeitungssystemen. Rundfunktechnische Mitteilungen 24(1980)2, S. 91...92.

[4] *S. Börner:* Multiplex- und Modulationseinrichtung für den digitalen Hörrundfunk in der TV-SAT-Erdfunkstelle Usingen. Rundfunktechnische Mitteilungen 30 (1986)5, S. 209...216.

[5] *P. Treytl:* Digitaler Hörfunk über Rundfunksatelliten. Informationsbroschüre. Bonn, Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT), 1985.

[6] *T. Peiler:* Synchrone QPSK-Demodulatoren für den digitalen Hörrundfunk. Rundfunktechnische Mitteilungen 31(1987)3, S.113...118.

[7] *K. Leuenberger:* Digitale Richtfunkgeräte mit PSK- und QAM-Modulation: Übertragungstechnische Grundkonzepte. Bull. SEV/VSE 78(1987)15, S. 898...903.

[8] *C.R. de Graaf:* Digital radio broadcasting via satellite. Eindhoven, Philips Research Laboratories, 1986.

[9] *J.-M. Martin:* 2-Mbit/s multiplexing system for sound-programme transmission. Commutation et Transmission 7(1985)1.