

Das DAB/DMB-Übertragungsverfahren

Prof. Dr. Henrik Schulze
Fachhochschule Südwestfalen-Meschede
Lindenstr. 53, D-59872 Meschede
Tel.: 0291/991030 FAX: 0291/991040
E-Mail: schulze@fh-meschede.de

Gliederung in Stichworten

Besonderheiten des Mobilempfangs: Mehrwegeausbreitung, Fading, Echolaufzeiten, Dopplereffekt

OFDM: Multiträger-Modulation bei DAB; Parametersätze und "Transmission Modes"

Aufbau des physikalischen Rahmens

Fehlerschutz: "Unequal Error Protection" mit Faltungscodes; Protection Profiles, Bitfehlerkurven

Interleaving

Computersimulationen: Die Monte-Carlo-Methode

Erweiterungsmöglichkeiten von DAB/DMB und Vergleich mit dem Digitalen Fernsehen

Besonderheiten des Mobilempfangs

Bei der Entwicklung des DAB-Systems ist die mobile Empfangbarkeit eine Randbedingung gewesen, die entscheidende Auswirkung auf die Wahl des Übertragungsverfahrens und der Systemparameter hatte.

Die Schwierigkeiten bei einer mobilen Empfangssituation wie etwa im Autoradio oder auch beim Mobiltelefon liegen darin begründet, daß im Gegensatz zu einem stationären Empfang mit Richtantenne die elektromagnetische Welle den Empfänger nicht nur über einen Ausbreitungsweg erreicht, sondern auf vielfältige Weise und aus unterschiedlichen Richtungen gestreut, gebeugt und reflektiert und dadurch inkohärent mit sich selbst überlagert. Die Interferenz ist abhängig von der Frequenz und dem Empfangsort, d.h. bei bewegtem Empfänger zeitlich fluktuierend, - mal konstruktiv und mal destruktiv. Wegen der damit verbundenen Amplitudeneinbrüche bezeichnet man diesen Effekt als Mehrwegeschwund (multipath fading). **Bild 1** zeigt einen typischen Amplitudenverlauf bei fester Frequenz im VHF-Bereich für ein Fahrzeug höherer Geschwindigkeit als Funktion der Zeit. **Bild 2** zeigt den Amplitudenverlauf als Funktion der Frequenz bei fester Zeit (festem Ort) bei Echolauflängen von einigen Kilometern, wie sie für den Rundfunkempfang durchaus typisch sind.

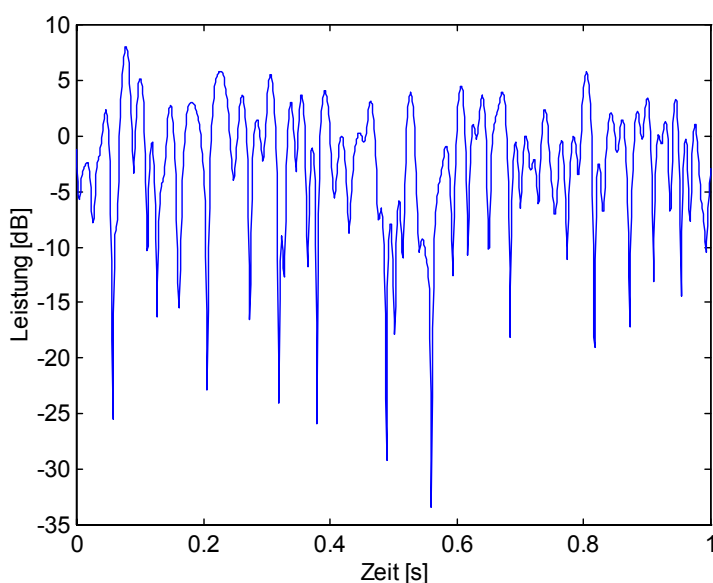


Bild 1: Mehrwegeschwund bei fester Frequenz als Funktion der Zeit bei einer maximalen Dopplerfrequenz von 40 Hz

Fahrzeuggeschwindigkeit v , der Übertragungsfrequenz f_0 und den Einfallswinkeln der Ausbreitungswege berechnen. Die Dopplerfrequenz hat ihren maximalen Betrag f_{Dmax} bei einem Einfallswinkel von 0° oder 180° . Es gilt:

$$f_{Dmax} = \frac{v}{c} f_0 \approx \frac{1}{1080} \frac{f_0}{\text{MHz}} \frac{v}{\text{km/h}} \quad (1)$$

In **Tabelle 1** sind einige praktisch relevante Zahlenwerte für die Dopplerfrequenz zusammengestellt.

Tabelle 1: Dopplerfrequenzen bei verschiedenen Übertragungsfrequenzen und Geschwindigkeiten

	48 km/h	96 km/h	192 km/h
225 MHz	10 Hz	20 Hz	40 Hz
900 MHz	40 Hz	80 Hz	160 Hz
1500 MHz	67 Hz	133 Hz	267 Hz

Durch die Interferenzmuster bewegt sich der Fahrzeug hindurch. Der Empfänger muß mit Empfangssituationen fertig werden, die sich in Bruchteilen von Sekunden völlig verändern. Außerdem ändert sich die Amplitude innerhalb der Übertragungsbandbreite sehr stark. Der Übertragungskanal ist also charakterisiert durch **Zeitvarianz** und **Frequenzselektivität**.

Die **Zeitvarianz** wird bestimmt durch die Wellenlänge und die Geschwindigkeit, mit der sich das Fahrzeug durch das Interferenzmuster hindurchbewegt. Die relevanten physikalischen Größen sind die beim Empfang auftretenden **Dopplerfrequenzen**, die sich aus der Lichtgeschwindigkeit c ,

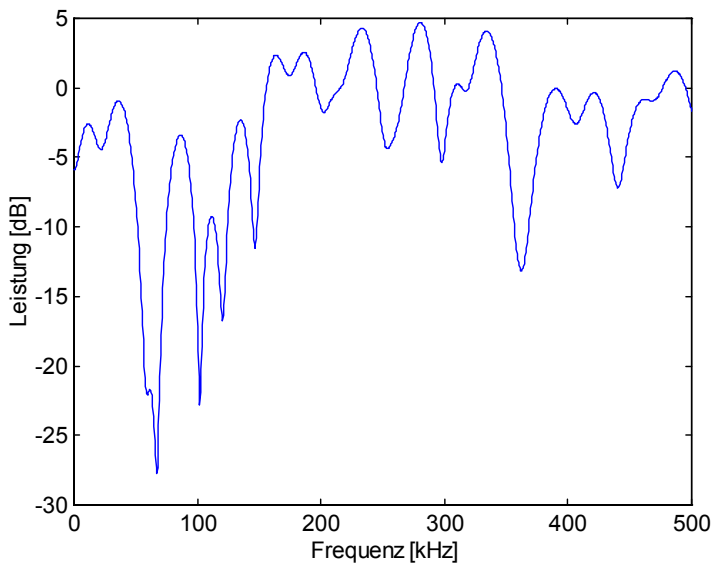


Bild 2: Mehrwegeschwund bei fester Zeit als Funktion der Frequenz (relativ zur Bandmitte) bei Echowegen von einigen Kilometern

von Lauflängenunterschied und Lichtgeschwindigkeit. In

Tabelle 2: Laufzeitdifferenzen

Weg	300 m	3 km	30 km
Laufzeit	1 μ s	10 μ s	100 μ s

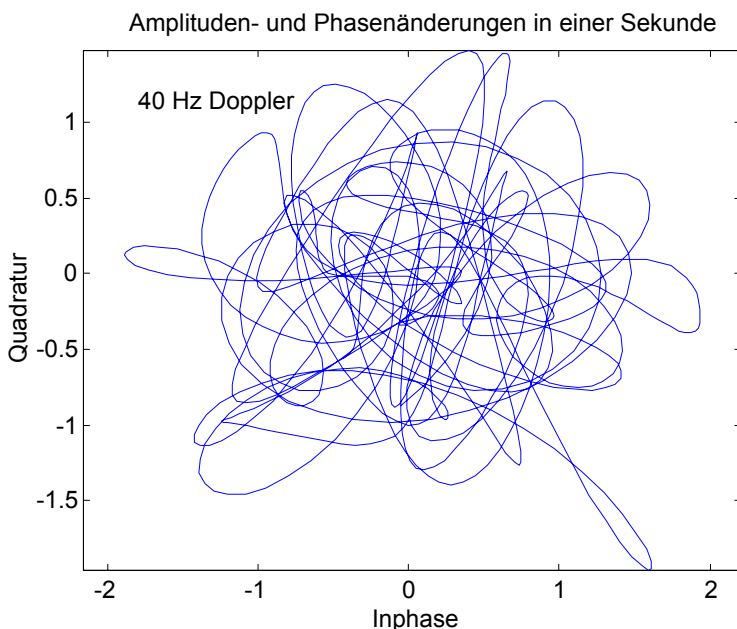


Bild 3: Mehrwegeschwund (Amplitude und Phase) bei fester Frequenz als Funktion der Zeit bei einer maximalen Dopplerfrequenz von 40 Hz

Datenraten sind die Echolauferzeiten oft nicht mehr deutlich kleiner als die Symboldauer T_S des digitalen Modulationsverfahrens. Bei Echolauferzeiten von einigen 10 μ s ist schon bei einer Bruttodatenrate von 200 kbit/s (Bitdauer $T_b=5\mu$ s) und einer Übertragung mit dem Standardverfahren QPSK (Quaternary Phase-Shift Keying) die Symboldauer nur noch $T_S=10\mu$ s und damit von derselben

Bild 3 zeigt die Amplituden- und Phasenänderungen bei einer festen Frequenz in der komplexen Ebene. Die Kurve kann man sich vorstellen als die Spur der Spitze des komplexen Zeigers aus Trägerphase und -amplitude.

Die Zeitvarianz wird bei digitaler Übertragung dann zum Problem, wenn sich während der Übertragung weniger Bits der Kanal so stark ändert, daß die Phase (bei Phasenmodulation) oder die Amplitude (bei Amplitudenmodulation) des Sendesymbols nicht mehr zuverlässig zurückgewonnen werden kann.

Die **Frequenzselektivität** wird bestimmt durch die Länge der auftretenden Laufzeitdifferenzen. Diese ergeben sich als Quotient

Tabelle 2 sind einige Zahlen

Laufzeitdifferenzen von einigen Mikrosekunden sind typisch für zellularen Mobilfunk. Beim Rundfunk können Laufzeitdifferenzen von mehreren 10 μ s auftreten. Bei sogenannten "Gleichwellennetzen" muß das System Echos von deutlich über 100 μ s verkraften.

Je länger die Echos sind, desto mehr Einbrüche gibt es innerhalb der Übertragungsbandbreite. Bei digitaler Übertragung kommt es aufgrund der Echos zu Interferenzen aufeinanderfolgender Übertragungssymbole, sog. Intersymbolinterferenzen.

Bei Übertragung von hohen Datenraten sind die Echolauferzeiten oft nicht mehr deutlich kleiner als die Symboldauer T_S des digitalen Modulationsverfahrens. Bei Echolauferzeiten von einigen 10 μ s ist schon bei einer Bruttodatenrate von 200 kbit/s (Bitdauer $T_b=5\mu$ s) und einer Übertragung mit dem Standardverfahren QPSK (Quaternary Phase-Shift Keying) die Symboldauer nur noch $T_S=10\mu$ s und damit von derselben

Größenordnung wie die Echos, was einen Empfang praktisch unmöglich macht, wenn keine Gegenmaßnahmen getroffen werden. Hiervon handelt der folgende Abschnitt.

OFDM: Multiträger-Modulation bei DAB

Eine Möglichkeit, bei hohen Datenraten die Symboldauer zu verlängern und die Übertragung damit unempfindlicher zu machen, ist die der Multiträger-Modulation. Der Grundgedanke besteht darin, die Symboldauer zu verlängern, indem man den Datenstrom parallelisiert und auf viele (*Unter-*) Träger verteilt. Jeder dieser Träger transportiert dann nur noch einen kleinen Bruchteil der gesamten Datenrate, wodurch die Symboldauer T_S bei jedem (*Unter-*) Träger sehr groß werden kann, insbesondere groß gegen die typischen Echolaufzeiten. Hierzu können einige hundert oder sogar über tausend Träger nötig sein. Die Modulation einer derartig hohen Zahl von Trägern ist möglich durch digitale Signalverarbeitung im komplexen Basisband. Die Pulsform wird durch digitale Filterung erzeugt und auf die Frequenzen der Unterträger ebenfalls digital umgesetzt. Man spricht hier von einer *Filterbankstruktur*¹. Angeregt werden die Filter durch die informationstragenden komplexen Modulationssymbole z_k (z.B. QPSK-Symbole). In der einfachsten Version, die auch bei DAB verwendet wird, entspricht dies einer inversen schnellen Fouriertransformation (IFFT). Man nennt das Verfahren dann OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) [5,6,7]. Während einer Dauer T läßt sich das so erzeugte und digital/analog gewandelte Signal als endliche Fourierreihe schreiben:

$$s(t) = \sum_{k=-K/2}^{K/2} z_k \cdot e^{j2\pi kt/T} \quad (0 \leq t < T) \quad (2)$$

Die Fourierkoeffizienten z_k enthalten die Information. Der Koeffizient mit dem Index 0 wird aus technischen Gründen, die mit der D/A-Wandlung beim Empfänger zu tun haben, Null gesetzt. Damit sind K Unterträger moduliert, die den Abstand $1/T$ besitzen. Die Signalgenerierung (2) ist offenbar eine **Fouriersynthese**. Die Information z_k kann aus dem "OFDM-Symbol" (2) durch **Fourieranalyse** zurückgewonnen werden:

$$z_k = \frac{1}{T} \int_0^T e^{-j2\pi kt/T} s(t) dt \quad (k = \pm 1, \pm 2, \dots, \pm K/2) \quad (3)$$

Implementiert wird dies empfangsseitig wieder durch eine schnelle Fouriertransformation (FFT). **Bild 4** zeigt die Kette Sender/Empfänger schematisch.

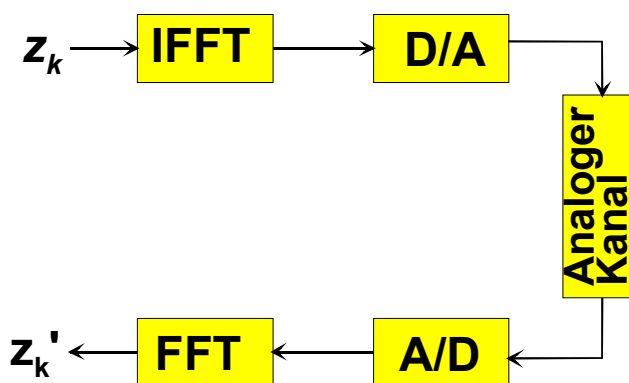


Bild 4: Implementation von OFDM mittels FFT

Eine wirksame Maßnahme gegen Mehrwegeausbreitung bei OFDM ist die Einfügung des sog. *Schutzintervalles*. Das Signal (2) wird nicht nur während einer Zeitdauer der Länge T gesendet, sondern während einer Zeitdauer (=OFDM-Symboldauer) $T_S = T + \Delta$, z.B. für Echos mit Laufzeiten $\tau < \Delta$ bewirken daher keine Intersymbolinterferenz, sondern lediglich eine (frequenzabhängige) Phasenverschiebung, die aber bei der bei DAB verwendeten *differentiellen* QPSK bedeutungslos ist. Echos, die die Dauer Δ des Schutzintervalles überschreiten, können allerdings zu starken Systemdegradationen führen [8]. Bei DAB

wurde die Dauer des Schutzintervalles Δ auf etwa $T/4$ festgelegt. Man kann nun Δ bzw. T nicht zu groß wählen, weil bei langen Symbolauern die durch die Fahrzeugbewegung bedingten Phasenfluktuationen des Mobilfunkkanals (siehe **Bild 3**) zu groß werden. Die Geschwindigkeit der Phasenfluktuationen wird durch die Dopplerfrequenz bestimmt. Von einem Symbol zum nächsten muß die Phase des Kanals näherungsweise konstant sein, da in der Phasendifferenz zweier aufeinanderfolgender Symbole die Information steckt. Es muß also die Bedingung

$$f_{D \max} T_S \ll 1 \quad (4)$$

¹Eine ausführliche Darstellung der Grundlagen findet sich im Buch von Kammeyer [2].

erfüllt sein. Es kommt zu deutlichen Systemdegradationen, wenn das Produkt in die Größenordnung von ca. 0,05 kommt. Für jede Symboldauer T_S gibt es daher eine ungefähre obere Grenze für die Trägerfrequenz bei einer maximal zulässigen Fahrzeuggeschwindigkeit. Um DAB in verschiedenen Frequenzbereichen ausstrahlen zu können, wurden vier Parametersätze (sog. Übertragungsmodi/Transmission Modes) definiert, die sich für unterschiedliche Frequenzbereiche und Versorgungsszenarien eignen, s. **Tabelle 3**.

Tabelle 3: Die Parametersätze der drei Übertragungsmodi

Modus	K	$1/T$	$T+\Delta$	Δ	$f_n^{(max)}$ (120 km/h)	Anwendungsbereich
I	1536	1 kHz	ca. 1246 μ s	ca. 246 μ s	ca. 375 MHz	Grundversorgung
II	384	4 kHz	ca. 312 μ s	ca. 62 μ s	ca. 1,5 GHz	Lokale Versorgung
III	192	8 kHz	ca. 156 μ s	ca. 31 μ s	ca. 3 GHz	Kleinzelle, Satellit
IV	768	2 kHz	ca. 623 μ s	ca. 123 μ s	ca. 750 MHz	Grundversorgung

Konstant ist bei allen Parametersätzen das Produkt von Unterträgerabstand $1/T$ und Anzahl der Unterträger K , wodurch die Bandbreite von ca. 1,5 MHz festgelegt ist. Die langen Symbole von Modus I können extrem lange Echos verkräften, dafür kann man praktisch nur im VHF-Bereich übertragen. Der Fernsehkanal 12 (223-230 MHz), der (fast) europaweit für die DAB-Grundversorgung vorgesehen ist, erlaubt gerade noch eine maximale Fahrzeuggeschwindigkeit von ca. 200 km/h. Dafür können bei einem Schutzintervall $\Delta \approx 250 \mu$ s extrem lange Echos verkräftet werden: 200 μ s entsprechen einer Umweglaufzeit von 60 km. Dies ist der typische Abstand von Grundnetzsendern in Mitteleuropa. Wird nun dasselbe DAB-Signal von allen Sendern eines Versorgungsgebietes zeitsynchron auf derselben Frequenz ausgestrahlt, so kommen beim Empfänger keine Signale von relevantem Pegel an, deren Laufzeitdifferenzen größer sind als das Schutzintervall. Somit ist der Modus I geeignet für eine Grundversorgung mit Gleichwellennetzen. Der Modus II ist dafür ausgelegt, die normalerweise durch die Topographie bedingten Echos zu verkräften. Er eignet sich auch für lokale Gleichwellennetze mit geringem Senderabstand. Im L-Band bei 1,5 GHz ist in Europa ein Frequenzband für DAB zugewiesen, daß insbesondere für die lokale Versorgung vorgesehen ist. Hier wird man Modus II verwenden, auch wenn sich Beschränkungen bezüglich der Höchstgeschwindigkeit (ca. 120 km/h) ergeben, die aber bei lokaler Versorgung weniger ins Gewicht fallen dürften. Modus III ist reserviert für möglicherweise später zu erwartende Zuweisungen in höheren Frequenzbereichen, ist aber wegen des kurzen Schutzintervalles auf Empfang von (hochstehenden) Satelliten bzw. terrestrisch auf kleine Funkfeldlängen beschränkt. Modus IV wurde nachträglich eingeführt. Er liegt in seinen Parametern genau zwischen Modus I und II und soll den besonderen Umständen der Rundfunkversorgung in Kanada Rechnung tragen.

Der Rahmenaufbau

In jedem Übertragungsmodus gibt es einen Übertragungsrahmen (Transmission Frame). Dies ist eine periodisch sich wiederholenden Anordnung von OFDM-Symbolen, die jeweils genau festgelegte Funktionen haben. Der Rahmen beginnt mit zwei Synchronisationssymbolen. Darauf folgen einige Symbole, die dem Steuerkanal (Fast Information Channel FIC) zugeordnet sind. Dessen wichtigste Aufgabe ist es, dem Empfänger die aktuelle Multiplexkonfiguration mitzuteilen sowie Informationen über die übertragenen Programme. Darauf folgt der Hauptdatenkanal (Main Service Channel MSC), der die eigentlichen Nutzdaten überträgt und der den bei weitem größten Teil des Rahmens belegt. Im Modus I beträgt die Rahmendauer 96 ms, in Modus II und III jeweils 24 ms und im neu definierten Modus IV 48 ms. Der Rahmenaufbau ist in Modus I, II und IV identisch (**Bild 5**), nur jeweils um einen Faktor 4 bzw. 2 in der Zeit skaliert.

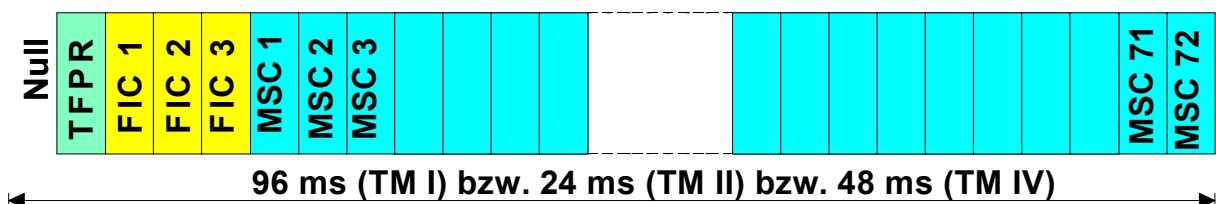


Bild 5: Rahmenaufbau bei Transmission Mode I, II und IV: 76 OFDM-Symbole und ein Nullsymbol

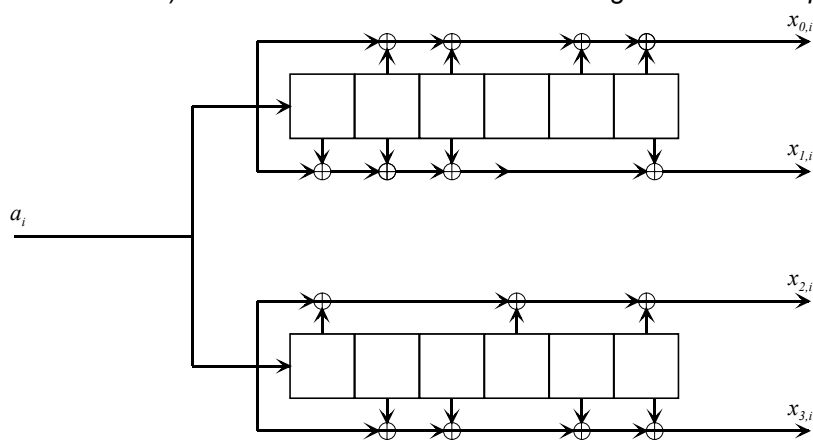
Zur groben Zeitsynchronisation dient ein Nullsymbol, während dessen Dauer kein Signal übertragen wird. Das folgende TFPR (Time-Frequency-Phase Reference) -Symbol dient der Feinsynchronisation.

Der FIC umfaßt 3 OFDM-Symbole, der MCS 72. In Transmission Mode III hat der FIC 8 und der MSC 144 Symbole. Die Übertragungskapazität des MSC, die in allen Modi exakt identisch ist, berechnet sich z.B. in Modus II wie folgt: Ein OFDM-Symbol transportiert $K=384$ komplexe QPSK-Symbole, d.h. 768 Bits. Ein Übertragungsrahmen enthält 72 OFDM-Symbole im MSC und damit 55296 Bits, die in 24 ms übertragen werden. Daraus ergibt sich die Bruttodatenrate von 2304 kbit/s. In Modus I werden $221184=4 \times 55296$ Bits in 96 ms übertragen, was auf dieselbe Datenrate führt.

Unabhängig vom Übertragungsmodus ist bei DAB ein Datenrahmen definiert, der einer Zeitdauer von 24 ms entspricht. Hier wurde als Zeitbasis die Rahmendauer der MPEG-Audiocodierung übernommen. Dieser sog. CIF (Common Interleaved Frame) enthält 55296 Bit, die bei Modus II und III jeweils genau in einen Übertragungsrahmen eingebettet werden. Bei Modus I bzw. IV werden 4 bzw. 2 davon in einen Übertragungsrahmen eingebettet, wobei jeweils einer davon genau 18 bzw. 36 OFDM-Symbole des Rahmens beansprucht. Die Kapazität des CIF von 55296 Bits kann frei auf die verschiedenen Teildatenströme (sog. Subchannels) der verschiedenen Dienste verteilt werden, allerdings sind nicht einzelne Bits adressierbar. Vielmehr wurde eine kleinste adressierbare Einheit die "Kapazitätseinheit" (CU) definiert, die 64 Bit umfaßt. Der CIF besteht aus $55296/64=864$ CUs. Welchen Anteil davon ein *Subchannel* belegt, hängt von dessen Nettodatenrate und dem verwendeten Fehlerschutz ab.

Fehlerschutz

Die Auswahl zwischen verschieden starkem Fehlerschutz für dieselbe Nutzenanwendung (Audio oder Datendienste) wird bei DAB durch die Verwendung von *Rate Compatible Punctured Convolutional* (RCPC) Codes [9] möglich.



Sie erlauben den Einsatz verschieden starker Codes, ohne daß ein wesentlicher Zusatzaufwand etwa durch den Einsatz mehrerer Decoder erforderlich wäre. RCPC Codes bilden eine *Codefamilie*, die aus einem gemeinsamen *Muttercode* abgeleitet ist. Der Muttercode, ein Faltungscode niedriger Coderate, ist der stärkste Code in der Familie und beansprucht die meiste Redundanz. Die *Tochtercodes* erhält man daraus durch gezieltes Weglassen von Redundanz. Dies wird als

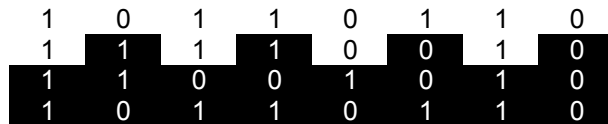
Bild 6: Erzeugung des Faltungscodes (133,171,145,133) durch Schieberregister

Punktierung bezeichnet. Dem Empfänger muß bekannt sein, wo Redundanz weggelassen wurde. Es ist nur ein Decoder nötig, nämlich der (Viterbi-) Decoder für den Muttercode. Der Muttercode bei DAB besitzt die Rate 1/4 und Schieberregisterlänge 6. Er wird generiert durch die in **Bild 6** dargestellte Schieberregisterschaltung. Die Generatorpolynome, die die Anzapfungen festlegen, lauten in der oktalen Kurzschreibweise (133,145,171,133). Für ein Datenbit werden 4 codierte Bits erzeugt.

Aus einem seriellen Datenstrom werden 4 parallele. Z.B. können 8 Takte des Outputs des Coders lauten (erstes Bit links):

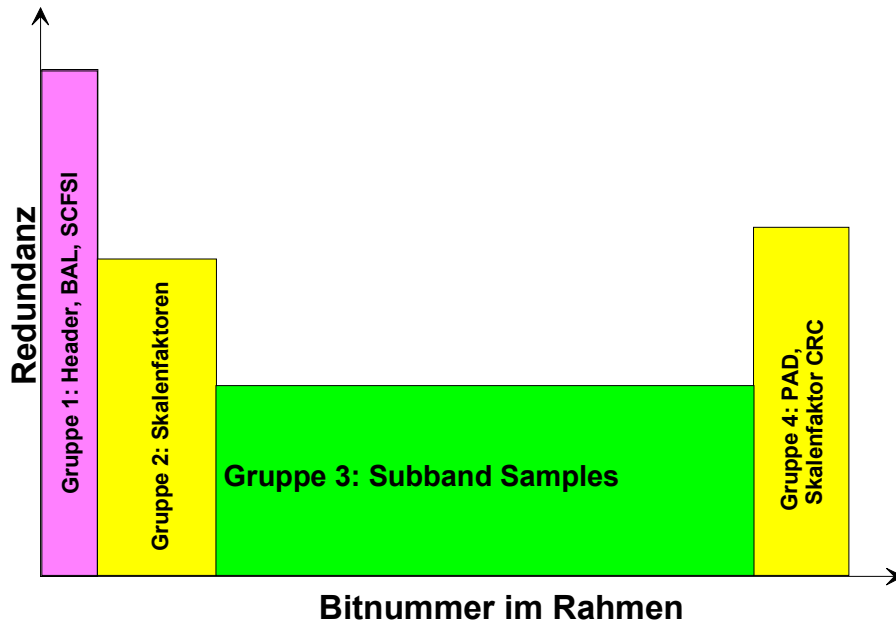
1	0	1	1	0	1	1	0
1	1	1	1	0	0	1	0
1	1	0	0	1	0	1	0
1	0	1	1	0	1	1	0

Einen Code der Rate 1/3 bzw. 1/2 erhält man, indem man einfach die Bits der untersten Zeile bzw. der beiden untersten Zeilen nicht überträgt. Es läßt sich aber auch ein Code der Rate 2/3 (=8/24) erzeugen, indem man die unteren beiden Zeilen nicht überträgt, und in der zweiten Zeile nur jedes zweite Bit. Wenn man die weggelassenen ("punktieren") Bits schwärzt, ergibt sich folgendes Bild:



Auf diese Weise kann man Coderaten 8/9,8/10,8/11,8/12,...,8/31,8/32 generieren. Wenn man bei der Definition der Punktierungsmuster noch die Bedingung der *Ratenkompatibilität* [9] einhält, kann man sogar innerhalb des Datenstromes zwischen verschiedenen Coderaten umschalten.

Man hat damit die Möglichkeit zu ungleichgewichtigem Fehlerschutz (UEP: Unequal Error Protection), d.h. verschieden wichtige Bits im Datenstrom unterschiedlich stark zu schützen. Bei DAB bringt dies insbesondere bei dem Fehlerschutz der Audiodaten Gewinne, da dort der Datenrahmen sehr unterschiedlich wichtige Bits enthält, siehe **Bild 7**.



Die erste Bitgruppe im Rahmen ist die wichtigste. Hier muß am meisten Redundanz zugefügt werden. Sie besteht hauptsächlich aus dem Header, ohne den nichts decodiert werden kann. Die nächste Bitgruppe, besteht vor allem aus Skalenfaktoren. Fehler in dieser Gruppe führen zu starker Beeinträchtigung des Höreindrucks (Pfeif- und Zwischertöne). Sie können aber bis zu einem gewissen Ausmaß erfolgreich verschleiert werden. Die größte Gruppe bilden die Abtastwerte in den

Bild 7: Unequal Error Protection für Audiorahmen

Teilbändern (Subband Samples). Hier wird der geringste Fehlerschutz benötigt. In der vierten Gruppe werden programmbezogene Zusatzdaten übertragen (PAD: Programme Associated Data) sowie eine Fehlererkennung (CRC: Cyclic Redundancy Check) für die MSBs der Skalenfaktoren, die zur Fehlerverschleierung nötig ist. Die Empfindlichkeit ist vergleichbar mit der in Gruppe 2. Das Bild zeigt sehr deutlich, daß man erheblich mehr Redundanz benötigen würde, wenn man nur eine Coderate zur Verfügung hätte. Man müßte dann den ganzen Rahmen so stark schützen wie die empfindlichste Gruppe 1.

Tabelle 4: Benötigte Kapazität bei verschiedenen Datenraten und verschiedenem Fehlerschutz

Audiodatenrate	PL1	PL2	PL3	PL4	PL5
32 kbit/s	35 CUs	29 CUs	24 CUs	21 CUs	16 CUs
48 kbit/s	52 CUs	42 CUs	35 CUs	29 CUs	24 CUs
56 kbit/s	X	52 CUs	42 CUs	35 CUs	29 CUs
64 kbit/s	70 CUs	58 CUs	48 CUs	42 CUs	32 CUs
80 kbit/s	84 CUs	70 CUs	58 CUs	52 CUs	40 CUs
96 kbit/s	104 CUs	84 CUs	70 CUs	58 CUs	48 CUs
112 kbit/s	X	104 CUs	84 CUs	70 CUs	58 CUs
128 kbit/s	140 CUs	116 CUs	96 CUs	84 CUs	64 CUs
160 kbit/s	168 CUs	140 CUs	116 CUs	104 CUs	80 CUs
192 kbit/s	208 CUs	168 CUs	140 CUs	116 CUs	96 CUs
224 kbit/s	232 CUs	208 CUs	168 CUs	140 CUs	116 CUs
256 kbit/s	280 CUs	232 CUs	192 CUs	168 CUs	128 CUs
320 kbit/s	X	280 CUs	X	208 CUs	160 CUs
384 kbit/s	416 CUs	X	280 CUs	X	192 CUs

Für Audiosignale mit Abtastfrequenz 48 kHz stehen 14 verschiedene Datenraten zwischen 32 kbit/s und 384 kbit/s zur Verfügung. Es sind fünf Optionen für unterschiedlich starken Fehlerschutz möglich, die als *Protection Level* PL1 bis PL5 bezeichnet werden. Dabei bietet PL1 den stärksten Fehlerschutz (und erfordert am meisten Redundanz) und PL5 den schwächsten. Außer diesem letzteren kann man alle anderen für die mobile Übertragung als geeignet ansehen, mit unterschiedlichen Anforderungen an den Störabstand. Von diesen $14 \times 5 = 70$ theoretischen Kombinationsmöglichkeiten sind bei DAB 64 vorgesehen. **Tabelle 4** zeigt die beanspruchte Bruttokapazität (in CUs) in Abhängigkeit von der Audiodatenrate und dem Protection Level. Nicht vorkommende Kombinationen sind mit einem X gekennzeichnet.

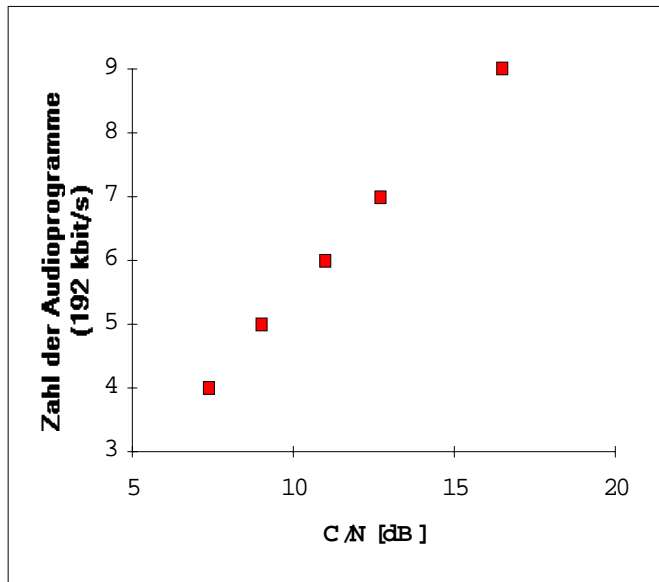


Bild 8: Anzahl der übertragbaren Programme (192 kbit/s) als Funktion des Störabstandes

Der unterschiedliche Störabstand C/N für die unterschiedlichen Protection Levels und die Zahl der übertragbaren Programme mit 192 kbit/s Audio (im Mobilfunkkanal) sind in **Bild 8** dargestellt. **Tabelle 4** zeigt, daß man in den meisten Fällen bei gleicher Kapazitätsbelegung eine Stufe in der Datenrate heruntergehen kann, um sich dafür den nächst stärkeren Fehlerschutz zu erkaufen. Dies erleichtert Konfigurationsänderungen. Außerdem halbiert sich bei Halbierung der Nettodatenrate auch die Kapazität. Man kann damit z.B. sehr leicht ein Stereoprogramm in zwei Monoprogramme teilen.

Die DAB-Spezifikation sieht für Datendienste 8 Protection-Levels mit gleichmäßigem Fehlerschutz vor: Protection Level 1-A, 2-A, 3-A, 4-A mit den jeweiligen Coderaten 1/4, 3/8, 1/2, 3/4 und 1-B, 2-B, 3-B, 4-B mit den jeweiligen Coderaten 4/9, 4/7, 4/6, 4/5. Bei

PL2-A und PL4-A ist der Fehlerschutz nicht ganz gleichmäßig: Die Coderate 3/8 erhält man, indem man ein Drittel der Bits mit Rate 8/22 schützt und zwei Drittel mit 8/21. Die Coderate 3/4 erhält man, indem man ein Drittel der Bits mit Rate 8/10 schützt und zwei Drittel mit 8/11. Für die bei DAB verwendete Codierung kann man die Bitfehlerraten leicht aus analytischen Formeln (asymptotisch enge obere Schranken) ermitteln [10].

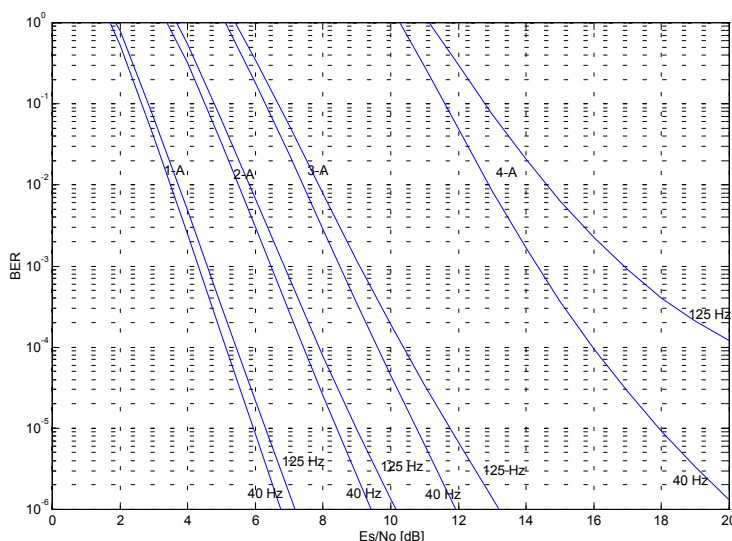


Bild 9: Bitfehlerraten (analytische obere Schranken) für die A-Protection Profiles im Rayleigh-Kanal für DAB Transmission Mode II ($T_s=312 \mu s$)

PL 4-A (das Profil mit der höchsten Bandbreiteneffizienz und dem schwächsten Fehlerschutz) sehr

Bild 9 zeigt für die Symboldauer des DAB Transmission Mode II im Mobilfunkkanal bei 40 bzw. 125 Hz Dopplerfrequenz die Bitfehlerkurven für die A-Protection Profiles. Bei L-Band-Übertragung bei 1.5 GHz entsprechen diese Dopplerfrequenzen Geschwindigkeiten von 29 bzw. 90 km/h. Als Dopplerspektrum wurde das mit der isotropen Leistungsverteilung angenommen. Auf der Abszisse ist E_s/N_0 in dB aufgetragen. Diese Größe entspricht dem der Messung direkt zugänglichen "Störabstand" (SNR, C/N).

Die Kurven zeigen, daß

viel schwächer ist als die anderen Profile der "A-Klasse". Insbesondere zeigt sich ein starkes "Ausflachen" bei höheren Fahrzeuggeschwindigkeiten. Schon bei 90 km/h zeigt sich bei der Bitfehlerrate 10^{-4} ein Verlust von 4 dB. Dieses Profil kann daher für die mobile Übertragung nur unter starken Vorbehalten in Betracht gezogen werden.

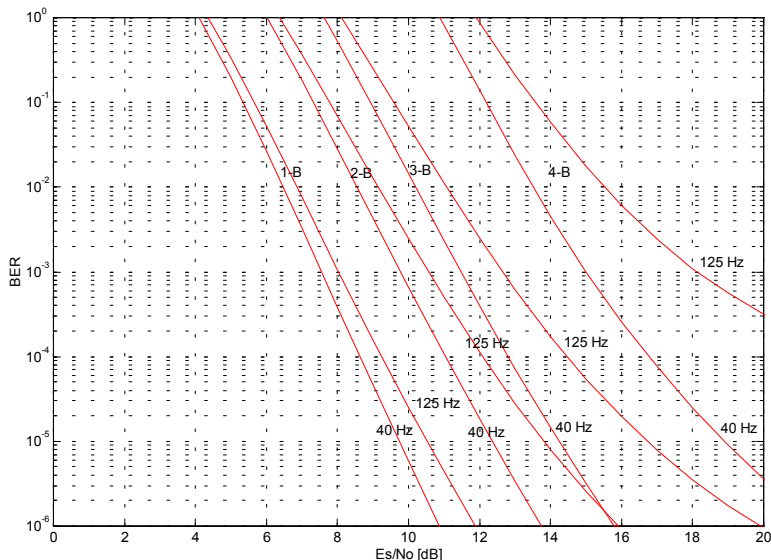


Bild 10: Bitfehlerraten (analytische obere Schranken) für die B-Protection Profiles im Rayleigh-Kanal für DAB Transmission Mode II ($T_s=312 \mu s$)

Bild 10 zeigt für die Symboldauer des DAB Transmission Mode II und den nicht-frequenzselektiven Rayleigh-Kanal bei 40 bzw. 125 Hz Dopplerfrequenz die Bitfehlerkurven für die B-Protection Levels. Wieder ist bei den beiden schwächsten Profilen ein starkes Ausflachen bei der höheren Dopplerfrequenz. Protection Level 4-B ist sicher für Mobilempfang ungeeignet, 3-B dürfte nur eingeschränkt zu empfehlen sein.

Tabelle 5 zeigt für die 8 Protection Profiles die übertragbaren Datenraten des reinen DAB-Systems und des DMB-System inclusive eines zusätzlichen äußeren Fehlerschutzes für Videodaten (RS(204,188)-Codierung) sowie den Störabstand bei den beiden betrachteten Dopplerfrequenzen, der jeweils nötig ist, um die für DMB angestrebte Bitfehlerrate von $2 \cdot 10^{-4}$ zu erreichen.

Tabelle 5: Maximale Datenraten für die verschiedenen Protection Levels bei DMB

Protection Level	Rc=	CUs	Datenrate DAB [kbit/s]	Datenrate Video [kbit/s]	SNR (40 Hz)	SNR (125 Hz)
1-A	1/4	864	576	530,8	5.0 dB	5.4 dB
2-A	3/8	864	864	796,2	7.1 dB	7.6 dB
1-B	4/9	864	1024	943,7	8.4 dB	8.8 dB
3-A	1/2	864	1152	1061,6	9.3 dB	10.0 dB
2-B	4/7	861	1312	1209,1	10.6 dB	11.5 dB
3-B	4/6	864	1536	1415,5	12.3 dB	13.9 dB
4-A	3/4	864	1728	1592,5	15.6 dB	19.0 dB
4-B	4/5	855	1824	1680,9	16.2 dB	21.5 dB

Bei Protection Level 2-B und 4-B kann nicht die volle Kapazität des DAB-Systems ausgeschöpft werden. Dies hängt mit der Restriktion zusammen, daß die (DAB-) Nettodatenrate ein Vielfaches von 32 kbit/s sein muß.

Interleaving

Voraussetzung für eine wirksame Fehlerkorrektur ist eine gleichmäßige Verteilung der durch den Übertragungskanal bedingten Störungen. Die Schwundeinbrüche durch Mehrwegeausbreitung betreffen dagegen immer eine größere Anzahl benachbarter Modulationssymbole. Die Fehlerbündel ("Bursts") würden die Funktion des Decoders stark beeinträchtigen. Als Gegenmaßnahme wird die Information über den Zeit- und Frequenzbereich so verstreut, daß Bits, die beim Decoder kurz nacheinander ankommen, physikalisch weit voneinander getrennt übertragen werden, damit die

jeweiligen Schwundstörungen zueinander unkorreliert sind. Diese Technik wird als *Interleaving* bezeichnet. Das *Frequenzinterleaving* bei DAB besteht einfach darin, daß die QPSK-Symbole den Unterträgern eines OFDM-Symbols in einer (festen) pseudozufällig verwürfelten Reihenfolge zugeordnet werden. Der *Zeitinterleaver* ist ein sog. Faltungsinterleaver, dessen Grundprinzip so funktioniert: Das Bit Nr. 0 eines Rahmens wird unverzögert übertragen, Bit Nr. 1 um 24 ms verzögert, Bit Nr. 2 um 2 x 24 ms verzögert usw., bis schließlich nach Bit Nr. 15, das um 15 x 24 ms verzögert wird, das Bit Nr. 16 wieder unverzögert übertragen wird, Bit Nr. 17 um 24 ms verzögert wird usw. Bei DAB wird das Prinzip des Faltungsinterleavers noch geringfügig modifiziert, indem vor der Verzögerung noch innerhalb von Blöcken der Größe 16 durch ein "Bit Reverse" die Reihenfolge der Daten verändert wird.

Voraussetzung für gewünschte Wirkung des Interleavings ist allerdings, daß aufeinanderfolgende Bits auch wirklich unkorrelierte Störungen durch den Funkkanal erfahren, d.h. die entsprechenden Korrelationslängen dürfen nicht zu groß werden. Bei einem stehenden oder auch sehr einem sehr langsam fahrenden Fahrzeug kann das Zeitinterleaving keine zeitliche Dekorrelation der Schwundeinbrüche bewirken. Bei ausschließlich sehr kurzen Echolaufzeiten versagt das Frequenzinterleaving. Aussagen über vom System benötigte Störabstände wie in Bild 5 setzen in der Regel ideal wirksames Interleaving voraus. Die Frequenzplanung muß entweder sicherstellen, daß das Interleaving wirksam ist (Gleichwellennetze unterstützen z.B. das Frequenzinterleaving) oder aber entsprechende Degradationen von vornherein berücksichtigen.

Die Bitfehlerkurven in **Bild 9** und **Bild 10** gelten für ideales Interleaving.

Computersimulationen

Die analytischen Kurven ermöglichen einen einfachen und schnellen Vergleich der einzelnen Codierungsprofile. Dennoch sind für bestimmte Fragestellungen Computersimulationen notwendig, z.B. wenn es um die Auswirkungen eines nicht idealen Interleavings geht oder wenn die Verteilung der Bitfehler untersucht werden soll. Eine leicht zu implementierende und von der Rechenzeit günstige Methode ist die Monte-Carlo-Simulation (zuerst vorgeschlagen in [8]; eine kurze Beschreibung findet sich auch in dem Buch von Kammeyer [2]). Hierbei wird die Mehrwegeausbreitung in der Rechnersimulation nachgebildet, indem N Ausbreitungswege mit *zufälligen* Trägerphasen θ_k , Dopplerfrequenzen ν_k und Laufzeiten τ_k einem direkten Ausbreitungsweg überlagert werden. Im komplexen Basisband ergibt sich so aus dem Signal $s(t)$ das Empfangssignal

$$r(t) = \sqrt{1-\rho^2} \cdot s(t) + \frac{\rho}{\sqrt{N}} \sum_{k=1}^N e^{j\theta_k} e^{j2\pi\nu_k t} s(t - \tau_k) \quad (5)$$

Hinzu kommt noch additives weißes Rauschen. Der Faktor ρ gibt die relative Leistung des gestreuten Signales zur Direktkomponente an. Man kann zeigen, daß man mit (5) genau die richtigen statistischen Eigenschaften des Mobilfunkkanals erhält, wenn der Zufallsgenerator geeignet an die Verteilung der Dopplerfrequenzen und Echolaufzeiten angepaßt ist und die Phasen gleichverteilt über den Einheitskreis ausgewürfelt werden.

Erweiterungsmöglichkeiten; Vergleich mit DVB-T

Mit DAB/DMB ist ein leistungsfähiges, robustes und flexibles System eingeführt worden, das sich gleichermaßen für Hörrundfunk und Multimedia-Dienste eignet. Obwohl bereits eine sehr hohe Datenübertragungsrate möglich ist, ist durch die Multimedia-Anwendungen die Frage aufgeworfen worden, inwieweit sich die Übertragungsrate weiter steigern läßt. Im folgenden sollen zwei Ansätze gezeigt werden, die dies ermöglichen.

Bei dem Systemvorschlag **X-DAB** (eXtended DAB) [11] wird anstelle der 4-stufigen PSK eine Mehrstufencodierung mit differentieller 8-PSK verwendet. Hierbei finden ausschließlich Codes Anwendung, die das DAB-System ohnehin vorsieht. Der Vorteil besteht in der *robusten mobilen Übertragung* auch höherer Datenraten zwischen 1,5 Mbits/s und 2 Mbit/s, wo das konventionelle DAB-System dieses nicht mehr leistet. Zum Beispiel erzielt man bei gleicher Datenrate gegenüber dem Protection Level 4-A einen Gewinn von 4 dB im Störabstand (bei 40 Hz; bei 125 Hz sind es mehr als 6 dB). X-DAB kann im selben Frequenzblock mit konventionellem DAB koexistieren, allerdings kann der konventioneller Empfänger diese Daten nicht auswerten.

Bei **DAB mit hierarchischer Modulation** [12] wird ein *Basisdatenstrom* gemäß der DAB-Spezifikation phasenmoduliert übertragen. Zusätzlich wird jedoch die Amplitude moduliert. Ein geeigneter Empfänger kann bei *stationärem Empfang* diesen Datenstrom zusätzlich auswerten. Man kommt damit auf Videodatenraten für den stationären Empfang von insgesamt ca. 2,6 Mbit/s. Mobil läßt sich nur der Basisdatenstrom von z.B. 1,2 Mbit/s (Protection Level 2-B) auswerten. Die Parameter lassen sich so auslegen, daß der Mobilempfang durch die zusätzliche Amplitudenmodulation nur um ca. 1 dB degradiert. Der Vorteil von diesem Systemvorschlag liegt darin, daß der konventionelle Empfänger immer den Basisdatenstrom decodieren kann. Außerdem ist die erreichbare Datenrate deutlich höher als bei X-DAB. Andererseits gilt diese Verbesserung nur bei stationärem Empfang. Bei mobilem Empfang bleibt die Datenrate niedrig.

Welcher der beiden Vorschläge jeweils vorzuziehen ist, hängt von den Erfordernissen der Anwendung ab.

Heftig diskutiert wird in jüngster Zeit über den Mobilempfang mit dem digitalen terrestrischen Fernsehsystem **DVB-T**. Dieses System [13] hat in vielen Punkten große Ähnlichkeit mit DAB: Insbesondere wird auch mit OFDM übertragen und die Faltungscodierung ist sehr ähnlich. Andererseits wird bei DVB nicht differentiell, sondern kohärent demoduliert, was eine Kanalschätzung erforderlich macht. Diese ist ursprünglich nicht für den Mobilempfang ausgelegt worden, sie scheint aber dennoch für viele Empfangsszenarien ausreichend zu sein. Bei kohärenter QPSK-Demodulation ergibt sich bei gleicher Coderate (in Frage kommen hier Coderate 1/2 und 2/3) und *idealer Kanalschätzung* ein theoretischer Gewinn von 3 dB gegenüber DAB. Durch nichtideale Kanalschätzung ist allerdings mit Degradationen von 2 dB und mehr zu rechnen, sodaß kaum noch Gewinne übrig bleiben oder sogar mit Verlusten zu rechnen ist. All dies ist Gegenstand aktueller Untersuchungen. Selbstverständlich lassen sich mit DVB aufgrund der größeren Bandbreite höhere Datenraten übertragen. Dies heißt aber keineswegs, daß dieses System eine höhere Bandbreiteneffizienz besitzt. Aufgrund der Forderung, 4 Frequenzblöcke unterschiedlicher Sender in einem VHF-Fernsehsenderkanal der Breite 7 MHz übertragen zu können, wurde bei DAB die Bandbreite auf ca. 1,5 MHz beschränkt. DVB-T beansprucht in einem UHF-Fernsehsenderkanal von 8 MHz eine Bandbreite von ca. 6,7 MHz. Würde man 5 DAB-Frequenzblöcke *direkt benachbart* von dem selben Sender ausstrahlen (dies ist technisch ohne weiteres möglich, wenn man das Signal mit einer einzigen IFFT erzeugt), würde dieses Signal sehr genau dieselbe Bandbreite beanspruchen. Damit könnte DAB mit Coderate 1/2 bzw. 2/3 eine Videodatenrate von 5,3 Mbit/s bzw. sogar 7 Mbit/s transportieren. Diese Zahlen liegen über denen von DVB-T mit 5 Mbit/s bzw. 6,6 Mbit/s. X-DAB könnte sogar 8 Mbit/s und mehr transportieren.

DAB ist also in der Bandbreiteneffizienz etwas besser als DVB-T. Dies hängt damit zusammen, daß bei DVB ein Teil der Kapazität für die Pilotsymbole zur Kanalschätzung benötigt wird. Bei einem Vergleich bezüglich der Übertragungssicherheit bei Mobilempfang ist zur Zeit noch keine endgültige Aussage möglich. Experimentelle und theoretische Untersuchungen hierzu dauern an.

Literaturverzeichnis

- [1] ETS 300 401, "Radio broadcasting system; Digital Audio Broadcasting (DAB) to mobile, portable and fixed receivers", European Telecommunications Standards Institute, Draft prETS, Sophia Antipolis January 1997
- [2] Kammeyer, K.D.: Nachrichtenübertragung, 2. Auflage, Teubner-Verlag Stuttgart 1996
- [3] Proakis, J.: Digital Communications, 3rd Edition, McGraw-Hill New York 1995
- [4] Lauterbach, Th.: Digital Audio Broadcasting, Francis' Verlag Feldkirchen 1996
- [5] Weinstein, S.; Ebert, P.M.: Data Transmission by Frequency Division Multiplexing Using the Discrete Fourier Transform, IEEE Trans. on Communications, COM-19, pp. 628-634, 1971
- [6] Hirosaki, B.: An Orthogonally Multiplexed QAM System Using the Discrete Fourier Transform, IEEE Trans. on Communications, COM-29, pp. 982-989, 1981
- [7] Alard, M.; Lasalle, R.: Principles of Modulation and Channel Coding for Digital Broadcasting for Mobile Receivers, EBU Technical Review 224, S. 168-189, 1987
- [8] Schulze, H.: Stochastische Methoden und digitale Simulation von Mobilfunkkanälen, Kleinheubacher Berichte Bd. 32, S. 473-483, 1989
- [9] Hagenauer, J.: Rate Compatible Punctured Convolutional Codes (RCPC Codes) and their Applications, IEEE Transactions on Communications, COM-36, pp. 389-400, 1988
- [10] P. Höher, J. Hagenauer, E. Offer, Ch. Rapp, H. Schulze: Performance of an RCPC-Coded OFDM-based Digital Audio Broadcasting (DAB) System, Proc. Globecom '91, Vol.1, pp. 2.1.1.-2.1.7.
- [11] H. Schulze, G. Zimmermann: A Compatible DAB Extension for Mobile Multimedia Applications, 2nd European Personal and Mobile Communications Conference (EPMCC) September 1997 in Bonn, Proceedings erschienen als ITG-Fachbericht.
- [12] M. Ruf, H. Schulze: Erhöhung der Datenkapazität bei DAB durch hierarchische Modulation, angenommener Beitrag für die 2. ITG Fachtagung Codierung, März 1998, erscheint als ITG-Fachbericht.
- [13] U. Reimers (Hrsg.): "Digitale Fernsehtechnik", Springer-Verlag 1995