

DAB: Das europäische System für den digitalen Hörrundfunk

Mit dem Ziel "CD-Qualität im Autoradio" haben europäische Industrieunternehmen und Forschungseinrichtungen ein digitales Hörrundfunksystem entwickelt, das kürzlich standardisiert und als ETS (European Telecommunication Standard) beschlossen wurde. Versuchsausstrahlungen haben in mehreren europäischen Ländern begonnen. In Deutschland gibt es Pilotprojekte in mehreren Bundesländern. Die Industrie arbeitet an der Entwicklung von Endgeräten, die in Kleinserien für die Pilotprojekte bereits verfügbar sind. Neben der Übertragung von Audiodaten bietet das DAB-System die Möglichkeit, beliebige Datendienste zu übertragen. Diese können Zusatzinformationen für Audioprogramme enthalten, sie können aber auch völlig unabhängig davon eigenständige "Datenprogramme" sein. DAB wird daher auch als "Multimedia-Datenrundfunk" angesehen, dessen Übertragungskapazität frei konfigurierbar ist. Dieser Vortrag gibt einen Überblick über die technischen Ansätze und Ideen, die dem DAB-System zugrunde liegen. Das Übertragungsverfahren und sein Verhalten im Mobilfunkkanal werden diskutiert. Dabei soll auch in die Hintergründe, die zu den Systementscheidungen und Parameterfestlegungen führten, Einblick gegeben werden. Es soll gezeigt werden, welche vielfältigen Möglichkeiten das System dem (Daten-) Rundfunkanbieter, dem Netzbetreiber und schließlich dem Nutzer bietet.

Abstract

"CD quality for the car radio" is the goal of the Digital Audio Broadcasting (DAB) system, that has recently been standardized as an ETS (European Telecommunication Standard). It has been developed by the European industry in cooperation with research institutes. Pilot broadcasting tests have started in many European countries. First receivers are available on the market. Besides Audio Broadcasting, DAB can provide Data Broadcasting. These data can include additional information to audio channels, but independent "Data Programmes" are also possible. DAB can therefore be regarded as a "Multimedia Data Broadcasting Service" with a freely configurable transport capacity. We give a survey of the technical concepts and ideas of DAB. The transmission system and its behaviour in the mobile radio channel are discussed. The various options of the system for broadcasters and the user are pointed out.

1. Einleitung

Das Kürzel DAB (= "Digital Audio Broadcasting") steht für ein neuartiges, weltweit bisher einzigartiges digitales Rundfunksystem. Es wurde entwickelt in Rahmen eines EUREKA-Projektes in Zusammenarbeit zahlreicher europäischer Firmen und Forschungseinrichtungen. Von der europäischen Standardisierungsorganisation ETSI (European Telecommunications Standards Institute) wurde der Standard ETS 300 401 erarbeitet, der im Februar 1995 verabschiedet wurde [1]. Zu Beginn der Arbeiten an diesem System vor etwa 10 Jahren lautete das Ziel: "CD-Qualität im Autoradio". Dies ist mit dem heute standardisierten System erreicht, aber darüber hinaus sind Möglichkeiten für eine Vielzahl von zusätzlichen Datendiensten geschaffen worden, an die zu Beginn - zumindest in diesem Ausmaß - wohl kaum jemand gedacht hätte. Schlagworte wie "DAB-Der Radiohighway" sind geprägt worden, die zum Ausdruck bringen sollen, daß es sich bei DAB um eine neue Art von Rundfunk handelt: Einen Multimedia-Datenrundfunk. So mag die Standardanwendung von DAB zwar nach wie vor darin bestehen, ca. 5 bis 6 Stereoprogramme hoher Qualität innerhalb der Systembandbreite von ca. 1,5 MHz zu übertragen, was etwa der Bandbreitenausnutzung des UKW-Rundfunks mit ca. 300 kHz pro Programm entspricht. Zusätzlich ist dann noch Kapazität vorhanden für die Übertragung von Zusatzdaten niedriger Rate (einige 10 kbit/s). Alternativ können aber auch doppelt so viel Programme in Mono oder geringerer Audio-Qualität übertragen werden. Es kann auch im Extremfall die gesamte oder fast die gesamte Übertragungskapazität für beliebige ("Multimedia"-) Datendienste zur Verfügung gestellt werden. Fordert man mobile Empfangbarkeit, so kann man auf diese Weise ca. 1,1 Mbit/s übertragen, bei stationärem Empfang sogar ca. 1,7 Mbit/s. Im Vergleich dazu geht es auf der "Datenautobahn" eher im Schneckentempo voran. Für die Verteilung großer Datenmengen an einen großen Kreis von Interessenten ist DAB daher sicher ein hervorragend geeignetes Medium. Dies kann z.B. nachts geschehen, wenn durch das geringe Angebot an (unterschiedlichen) konventionellen Hörfunkprogrammen Kapazitäten frei werden.

Die störungsfreie mobile Empfangbarkeit war bei der Entwicklung des DAB-Systems von Beginn an eine zentrale Forderung. Wohl jeder kennt die Probleme mit dem UKW-Empfang im Autoradio, der Flachlandbewohner vielleicht etwas weniger als der in dieser Hinsicht leidgeprüfte Bewohner des Mittelgebirges. Das UKW-System ist konzipiert für stationären Empfang mit einer Richtantenne in 10 m Höhe über dem Boden. Nur unter diesen Voraussetzungen ist eine flächendeckende Rundfunkversorgung gewährleistet. Bei mobilem Empfang mit Antennen ohne Richtwirkung wird der Empfang durch Mehrwegeausbreitung und die dadurch bedingte Interferenz gestört: Das Signal erreicht den Empfänger nicht auf einem einzigen direkten Ausbreitungsweg, sondern auf vielerlei Weise gebeugt, gestreut und reflektiert. Treten dabei große Laufzeitunterschiede ("lange Echos") auf, wird beim UKW-Rundfunk das frequenzmodulierte Nutzsignal nichtlinear verzerrt. Außerdem fährt das Fahrzeug durch ein Interferenzmuster von Wellenbergen und -tälern und das Signal verschwindet in den Tälern immer wieder im Rauschen. Man spricht daher von Mehrwegeschwund (multipath fading).

Digitale Übertragungsverfahren mit einem starken Fehlerschutz ermöglichen auch unter solch schwierigen Bedingungen störungsfreien Empfang.

Sparsamer Umgang mit der knappen Resource "Spektrum" wird bei digitaler Übertragung durch Datenreduktion ermöglicht. Bei DAB-Hörfunk wird dazu die Audio-Codierung des MPEG-1 Standards (Layer II) verwendet. Dieses auch als MUSICAM bezeichnete Verfahren wurde von Projektpartnern im Rahmen von DAB entwickelt und von diesen in die MPEG-Standardisierung eingebracht. Es war daher naheliegend, sich bei DAB an diesen Standard anzulehnen. Die Audiocodierung erlaubt eine Datenreduktion von ca. 1,5 Mbit/s für einen digitalisierten Stereokanal bei 48 kHz Abtastfrequenz und 16 Bit Quantisierung auf z.B. 192 kbit/s ohne hörbaren Qualitätsverlust.

Eine sparsame Ausnutzung des Spektrums bei der Frequenzplanung wird bei DAB durch die sog. Gleichwellentechnik möglich. Während bei konventioneller Runkfunkplanung viele Frequenzen für die Ausstrahlung identischer Programminhalte von unterschiedlichen Senderstandorten erforderlich sind (ansonsten würden Interferenzen auftreten), benötigt DAB hierfür nur eine Frequenz, auf der alle Sender eines Versorgungsgebietes dasselbe Signal ausstrahlen. Der Grund dafür liegt in der Resistenz des Übertragungsverfahrens gegen Mehrwegeausbreitung. DAB ist daher bezüglich der Netzplanung um ein Vielfaches effizienter als UKW-Rundfunk. Aufgrund der Besonderheiten von Gleichwellennetzen und aufgrund der höheren Störfestigkeit der digitalen Übertragung wird zudem nur ein Bruchteil der Sendeleistung benötigt,- ein wichtiger Aspekt bezüglich der Energieersparnis und der elektromagnetischen Umweltverträglichkeit.

Dieser Übersichtsvortrag soll die wichtigen technischen Ansätze darstellen, die dem DAB-System zugrunde liegen und den Zusammenhang zu den für den Benutzer wichtigen Eigenschaften herstellen. Der Schwerpunkt liegt auf dem Übertragungsverfahren. Ein tieferes Verständnis digitaler Übertragungsverfahren, insbesondere für den Mobilempfang, erfordert umfangreichere theoretische Grundlagen, die hier weder vorausgesetzt noch erarbeitet werden können (hierzu sei auf die Bücher von Kammeyer [2] und Proakis [3] verwiesen). Um eine Vorstellung von der Funktionsweise des Systems zu bekommen, ist dies auch nicht immer nötig. Auch können nicht alle Systemaspekte gleich ausführlich behandelt werden. Die Auswahl ist sicher subjektiv und davon geprägt, womit sich der Autor während der Entwicklung an dem System besonders beschäftigt hat. Auf die ausführliche und gut lesbare Darstellung von Lauterbach [4] soll als weiterführende Literatur verwiesen werden.

2. Bündelung von Diensten: Der Multiplex

Die DAB-Bandbreite von ca. 1,5 MHz reicht aus, um z.B. 6 Stereoprogramme mit der Datenrate von je 192 kbit/s mit einem starken, für Mobilempfang bestens geeigneten Fehlerschutz zu übertragen. Diese Konfiguration ist aber nicht starr vorgegeben, sondern nur eine (wenn auch möglicherweise eine bevorzugte) aus einer Vielzahl von Möglichkeiten. Die Bandbreite von 1,5 MHz legt bei dem gewählten Modulationsverfahren eine Datenrate fest, die brutto (d.h. inklusive Redundanz für Fehlerschutz) nach Abzug des Overheads für Synchronisation und Steuerungszwecke maximal für Hörfunk oder Datendienste genutzt werden kann. Beim DAB-System sind dies genau 2304 kbit/s. Die erwähnten 6 Stereoprogramme mit Nettodatenraten von 192 kbit/s haben mit einem passenden Fehlerschutz z.B. Bruttodatenraten von je 373,33 kbit/s, was zusammen eine Bruttodatenrate von 2240 kbit/s ergibt. 64 kbit/s brutto stehen bei diesem Beispiel für Datendienste noch zur Verfügung. Es wäre nun auch möglich, weniger Programme mit höherer Nettodatenrate und/oder mehr Redundanz zum Fehlerschutz zu übertragen oder mehr mit niedrigerer Datenrate. Ebenso ist es möglich, bei gleicher Bruttodatenrate von 373,33 kbit/s einige Programme mit stärkerem Fehlerschutz und niedrigerer Nettodatenrate zu übertragen und einige mit höherer Nettodatenrate und schwächerem Fehlerschutz, - je nach Anforderungen an die Audioqualität und die Empfangbarkeit unter schwierigen Bedingungen. Man kann sich die Gesamtkapazität von 2304 kbit/s (brutto) vorstellen als eine Torte, die auf die verschiedenen Nutzenanwendungen aufgeteilt wird. Bild 1 veranschaulicht dies an einem Beispiel. Es werden 5 Hörfunkprogramme übertragen, eines mit 256 kbit/s, zwei mit 224 kbit/s, eines mit 192 kbit/s und eines mit 64 kbit/s (Nettodatenraten). Letzteres könnte z.B. ein Sprachbeitrag in Mono sein, wofür diese Datenrate völlig ausreicht. Die dadurch eingesparte Kapazität kann anderen Programmen zugute kommen, wo man z.B. für besonders kritisches Programmmaterial eine Sicherheitsreserve haben möchte, sodaß auch ein besonders geschulter Hörer keinen Unterschied zur CD bemerkt. Die beiden Programme mit 224 kbit/s belegen einen unterschiedlichen Anteil an der Kapazität (19 bzw. 23%), weil sie unterschiedlich starken Fehlerschutz besitzen. Eines davon belegt dieselbe Kapazität wie das Programm mit 256 kbit/s (23%). Letzteres ist daher schwächer geschützt. Zwei Datenkanäle mit unterschiedlichem Fehlerschutz haben in diesem Beispiel Platz.

Bild 1: Beispiel für die Aufteilung der DAB-Übertragungskapazität

Dieses Beispiel zeigt, daß die einzelnen Anteile (Subchannels) individuell mit Fehlerschutz versehen und dann erst zusammengefügt werden, wobei darauf zu achten ist, daß die gesamte Bruttokapazität nicht überschritten wird. Im Beispiel von Bild 2 werden 4 Hörfunkprogramme und 2 Datendienste von einem Multiplexer zu einen Gesamtdatenstrom gebündelt. Jeder dieser Teildatenströme (sog. "Subchannels" in der Terminologie des ETSI-Standards) wird einzeln unabhängig von den anderen mit einem Fehlerschutz versehen.

Bild 2: Multiplexbildung bei DAB (vereinfachtes Bild)

Diese individuelle Zuweisung des Fehlerschutzes ermöglicht eine Anpassung an die jeweiligen Erfordernisse des einzelnen Teildatenstromes. Die für Fehlerschutz zur Verfügung stehende Redundanz kann so optimal verteilt werden, wodurch letztlich die Bandbreiten- und Leistungseffizienz verbessert wird. Diese individuelle Kanalcodierung der Teildatenströme ist typisch für das DAB-System. In den anderen Systemen - u.a. auch beim digitalen Fernsehen - werden erst die Datenströme in einem Multiplex zusammengefügt und anschließend gemeinsam codiert. Die bei DAB gewählte Strategie ist bezüglich der Übertragung die effizientere, besonders bei mobilem Empfang.

3. Modulation

In mobilen Empfangssituationen erreicht das Signal den Empfänger in der Regel über mehrere Ausbreitungswege. Bei

Übertragung von hohen Datenraten sind die Echolaufrzeiten oft nicht mehr deutlich kleiner als die Symboldauer T_s des digitalen Modulationsverfahrens. Echos führen dann zu Überlagerungen mit den Nachbarsymbolen, sog. Intersymbolinterferenzen. In typischen Rundfunkversorgungssituationen können Umweglängen von vielen Kilometern auftreten, was zu Echolaufrzeiten von einigen $10 \mu\text{s}$ führt (1 km Umweglänge führt zu einer Echolaufrzeit von $3,33 \mu\text{s}$). Schon bei einer Bruttodatenrate von 200 kbit/s (Bitdauer $T_b=5 \mu\text{s}$) und einer Übertragung mit dem Standardverfahren QPSK (Quaternary Phase-Shift Keying) sind die Symbole nur noch $T_s=10 \mu\text{s}$ lang und damit von derselben Größenordnung wie die Echos, was einen Empfang praktisch unmöglich macht, wenn keine Gegenmaßnahmen getroffen werden. Beim digitalen Mobilfunksystem GSM wird dabei ein Entzerrer eingesetzt, der die Verzerrungen des Kanals im Empfänger rechnerisch berücksichtigt. Hierzu ist eine Kanalschätzung notwendig, die wiederum das Einfügen von Trainingssequenzen in den Datenstrom erfordert. Nach ausführlicher, zum teil heftiger kontroverser Diskussion konkurrierender Systemvorschläge wurde bei DAB ein anderer Weg beschritten: Die Multiträger-Modulation. Eine ausführliche Darstellung dieses Verfahrens findet sich in [2] Der Grundgedanke besteht darin, die Symboldauer zu verlängern, indem man den Datenstrom parallelisiert und auf viele (Unter-) Träger moduliert. Jeder dieser Träger transportiert dann nur noch einen kleinen Bruchteil der gesamten Datenrate, wodurch die Symboldauer T_s sehr groß werden kann, insbesondere groß gegen die typischen Echolaufrzeiten. 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. 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 daß analoge Signal als endliche Fourierreihe schreiben:

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

(2)

Implementiert wird dies empfangsseitig wieder durch eine schnelle Fouriertransformation (FFT). Bild 3 zeigt die Kette Sender/Empfänger schematisch.

Bild 3: Implementation von OFDM mittels FFT

Eine wirksame Maßnahme gegen Mehrwegeausbreitung bei OFDM ist die Einfügung des sog. Schutzintervalles. Das Signal (1) wird nicht nur während einer Zeitdauer der Länge T gesendet, sondern während einer Zeitdauer (=OFDM-Symboldauer) $T_s=T+D$, z.B. für . Echos mit Laufzeiten bewirken daher keine Intersymbolinterferenz, sondern lediglich eine (frequenzabhängige) Phasenverschiebung, die aber bei der bei DAB verwendeten differentiellen QPSK bedeutungslos ist. Echos, die die Dauer , z.B. für . Echos mit Laufzeiten bewirken daher keine Intersymbolinterferenz, sondern lediglich eine (frequenzabhängige) Phasenverschiebung, die aber bei der bei DAB verwendeten differentiellen QPSK bedeutungslos ist. Echos, die die Dauer D des Schutzintervalles überschreiten, können allerdings zu starken Systemdegradationen führen [8]. Bei DAB wurde die Dauer des Schutzintervalles D auf etwa $T/4$ festgelegt. Man kann nun D bzw. T nicht zu groß wählen, weil bei langen Symboldauern die durch die Fahrzeugbewegung bedingten Phasenfluktuationen des Mobilfunkkanal zu groß werden. Der entscheidende Parameter ist die maximale Dopplerfrequenz , die proportional zu Trägerfrequenz f_0 und Fahrzeuggeschwindigkeit v ist. Es muß die Bedingung

(3)

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 drei (in der nächsten Version der Spezifikation werden es vier sein) Parametersätze (sog. Übertragungsmodi/Transmission Modes) definiert, die sich für unterschiedliche Frequenzbereiche und Versorgungsszenarien eignen, s. Tabelle 1.

Tabelle 1: Die Parametersätze der drei Übertragungsmodi

: Die Parametersätze der drei Übertragungsmodi

Modus

K

1/T

T+D

+D

D

fo(max) (120 km/h)

(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

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 verkraften, 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 extrem lange Echos verkraftet 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 verkraften. 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 3 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. Ein voraussichtlich in der nächsten Version des Standards definierter Modus IV liegt in seinen Parametern genau zwischen Modus I und II und trägt den besonderen Umständen der Rundfunkversorgung in Kanada Rechnung.

4. Der Rahmenaufbau

In jedem Übertragungsmodus gibt es einen Übertragungsrahmen (Transmission Frame). Dies ist eine periodisch sich wiederholende 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 und II identisch (Bild 4), nur um einen Faktor 4 in der Zeit skaliert.

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 MSC 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.

Bild 4: Rahmenaufbau bei Transmission Mode I und II: 76 OFDM-Symbole und ein Nullsymbol

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 werden 4 davon in einen Übertragungsrahmen eingebettet, wobei jeweils einer davon genau 18 OFDM-Symbole des Rahmens beansprucht. Die Kapazität des CIF von 55296 Bits kann frei auf die verschiedenen Teilströme (Subchannels) 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.

Für Audiodaten stehen 14 verschiedene Datenraten zwischen 32 kbit/s und 384 kbit/s zur Verfügung (in der nächsten Version der Spezifikation werden es mehr sein). 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 2 zeigt die beanspruchte Bruttokapazität (in CUs) in Abhängigkeit von der Audiodatenrate und dem Protection Level. Nicht vorkommende Kombinationen sind mit einem X gekennzeichnet.

Tabelle 2: Benötigte Kapazität bei verschiedenen Datenraten und verschiedenem Fehlerschutz

: 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

Bild 5: Anzahl der übertragbaren Programme 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 5 dargestellt. Tabelle 2 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.

Bei Datendiensten sind für eigene Subchannels alle Datenraten möglich, die ein ganzzahliges Vielfaches von 8 kbit/s betragen. Es gibt hier vier Protection Levels, wobei wieder PL1 der stärkste ist. Den Zusammenhang zwischen Protection Level und belegter Kapazität für eine Nettodatenrate von $8n$ kbit/s zeigt Tabelle 3. Die Coderate gibt das Verhältnis von Nettobits zu Bruttobits an. Ein Nettodatenstrom von 64 kbit/s führt bei PL3 z.B. auf eine Bruttodatenrate von 128 kbit/s und belegt 48 CUs. Bei Protection Level 4 beträgt die maximale Übertragungskapazität des DAB-Systems 1728 kbit/s.

Tabelle 3: Benötigte Kapazität für Datendienste mit 8n kbit/s für verschiedenen Fehlerschutz

: Benötigte Kapazität für Datendienste mit 8n kbit/s für verschiedenen Fehlerschutz

PL1

PL2

PL3

PL4

Coderate

1/4

3/8

1/2

3/4

Kapazität

12n CUs

8n CUs

6n CUs

4n CUs

Man kann mehrere Datendienste in einem Subchannel im sog. Packet Mode bündeln. Dies ist insbesondere dann sinnvoll, wenn die individuellen Datenraten unter 8 kbit/s liegen bzw. wenn die Datenraten zeitlich nicht konstant sind.

5. Fehlerschutz

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

Die Auswahl zwischen verschieden starkem Fehlerschutz für dieselbe Nutzanwendung (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 Faltungscodes 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 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:

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

Auf diese Weise kann man Coderaten $8/9, 8/10, 8/11, 8/12, \dots, 8/31, 8/32$ 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.

Bild 7: Unequal Error Protection für Audiorahmen

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 Zwitschertöne). Sie können aber bis zu einem gewissen Ausmaß erfolgreich verschleiert werden. Die größte Gruppe bilden die Abtastwerte in den 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.

6. Interleaving

Voraussetzung für eine wirksame Fehlerkorrektur ist eine gleichmäßige Verteilung der durch den Übertragungskanal bedingten Störungen. Die durch Mehrwegeausbreitung bedingten Schwundeinbrüche betreffen dagegen immer eine größere Anzahl benachbarter Modulationssymbole. Dadurch bedingte 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. Man kann das Zeitinterleaving als Bestandteil der jeweiligen Blöcke "Fehlerschutz" (für jeden Subchannel) in Bild 2 ansehen.

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.

7. Organisation der Dienste

Die bisher beim Rundfunk dem Benutzer geläufigen Begriffe "Sender", "Frequenz", "Programm" würden bei DAB zu einem Begriffswirrwarr führen: Man hat auf einer "Frequenz" (d.h. in einem Frequenzblock von 1,5 MHz) mehrere (z.B. 6 Hörfunk-) "Programme", während man beim UKW-Rundfunk ein Programm auf einer oder u.U. mehreren Frequenzen empfangen kann, die zu verschiedenen Sendern gehören. Bei DAB-Gleichwellennetzen kann man nicht zwischen verschiedenen Sendern wählen: Man empfängt gleichzeitig von allen Sendern im Gleichwellennetz, deren elektromagnetische Wellen zum Empfänger gelangen. Ferner kann es bei DAB unabhängige Datendienste geben, die nichts mit (Hörfunk-) "Programmen" im traditionellen Sinne zu tun haben. Um Verwechslungen von vornherein auszuschließen, wurden neue Begriffe geprägt. Die Hörfunk- und Datendienste, die zu einem DAB Multiplex zusammengeführt und in einem Frequenzblock von 1,5 MHz übertragen werden, nennt man ein Ensemble. Wenn der Empfänger auf eine bestimmte Frequenz eingestellt ist, empfängt er ein bestimmtes Ensemble. Jedes Ensemble hat seine weltweit eindeutige Identifikationsnummer. Ein Programm kann aus verschiedenen inhaltlich zusammenhängenden Programm-Komponenten bestehen, die Hörfunk oder andere Daten enthalten. Bild 8 erläutert diese Struktur an einem Beispiel. Die Komponenten können ganze Subchannels belegen oder - im Packet Mode - Teil eines Suchchannels sein. Verschiedene Programme können auf dieselben Komponenten zugreifen, da es z.B. nicht nötig ist, dieselben Verkehrsinformationsdaten (TMC: Traffic Message Channel) für NDR 1 und NDR 2 zweimal zu übertragen. Ebenso greifen in Bild 8 NDR 1 und NDR 2 auf einen weiteren gemeinsamen Datenkanal zu. Der private Anbieter FFN hat dagegen seinen eigenen Datenkanal. Die Zuordnung zwischen Programmen und Programmkomponenten kann dynamisch verändert werden: Z.B. können NDR 1 und NDR 2 zeitweilig dieselbe primäre Audiokomponente besitzen, z.B. während der Nachrichtensendungen oder auch in einem gemeinsamen Nachtprogramm. Die dadurch gewonnene Übertragungskapazität kann dann anderweitig genutzt werden. Spart man dabei z.B. durch den Wegfall eines Audio-Subchannels 168 CUs ein, so kann man damit (siehe Tabelle 3) mit PL3 eine Datenrate von 224 kbit/s übertragen. Zwischen Mitternacht und 5 Uhr morgens ließe sich dadurch etwa ein halbes Gigabyte übertragen. Diese Art von "Datenrundfunk" ist sicher eine attraktive Möglichkeit zur Verbreitung von Software oder Daten an ein größeres Publikum.

Bild 8: Organisation der Dienste (Beispiel)

8. Ausblick

Mit DAB ist ein leistungsfähiges, robustes und flexibles System eingeführt worden, das sich gleichermaßen für Hörrundfunk und Multimedia-Dienste eignet. Hier wurde gezeigt, wie dieses System funktioniert. Die Vielfalt der Möglichkeiten, die sich daraus ergeben, konnte nur angedeutet werden. Was davon sinnvoll ist und vom Nutzer wirklich als Bereicherung des Programmangebotes angesehen wird, muß sich in der Praxis erweisen. Für den Anbieter ist dieses neue Medium eine beachtliche Herausforderung bezüglich der Auswahl der Dienste und auch bezüglich des Managements. Die Industrie steht vor der Aufgabe, Endgeräte so zu konzipieren, daß einerseits die neuen Dienste ansprechend dargestellt werden und andererseits die Bedienung einfach bleibt. Unter anderem vom Gelingen dieser Aufgaben hängt der Erfolg der Einführung von DAB entscheidend ab.

Schrifttum

[1] European Telecommunications Standards Institute (ETSI) und European Broadcasting Union (EBU): Radio broadcast systems; Digital Audio Broadcasting (DAB) to mobile, portable and fixed receivers, ETS 300 401, Genf und Sophia Antipolis, Februar 1995

[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