

Codierung, Interleaving und Multiplex-Diversity bei DAB: Auswirkungen auf die Rundfunkversorgung

Henrik Schulze
 Universität-GH-Paderborn
 Abt. Meschede, Fachbereich 15
 Lindenstr. 53
 59872 Meschede

1 Einleitung

Der digitale Hörrundfunk DAB (Digital Audio Broadcasting) ermöglicht auch unter schwierigen mobilen Übertragungsbedingungen den Empfang von qualitativ hochwertigen Audioprogrammen und Zusatzdaten. Die Zahl der Programme, die in einem Frequenzblock von 1.5 MHz übertragen werden können, ist dabei nicht starr vorgegeben. Die Systemspezifikation erlaubt es, die Übertragungskapazität auf Audiodatenraten und Fehlerschutz flexibel aufzuteilen, je nachdem, wie es den jeweiligen Erfordernissen entspricht. Als typische Konfiguration ist oft die Rede von 6 Stereoprogrammen in einem Frequenzblock, wobei die Audiodatenraten jeweils 192 kbit/s betragen und ein Fehlerschutz verwendet wird, bei dem unter typischen mobilen Empfangssituationen ein Mindeststörabstand C/N von etwa 11 dB erforderlich ist. Wenn man die Zahl der Programme pro Block auf 5 oder 4 reduziert, läßt sich eine noch höhere Störfestigkeit erreichen, was sich im Gewinn von einigen Dezibel im Störabstand C/N bzw. in der Robustheit des Systems gegenüber ungünstigen Echosituationen und hohen Fahrzeuggeschwindigkeiten äußert. Umgekehrt kann man die Zahl der Programme auf 7 oder 8 erhöhen, verliert dabei aber an Störfestigkeit.

Gegenstand dieses Vortrags sind die unterschiedlichen Möglichkeiten der Kanalcodierung bei DAB und die jeweilige Störfestigkeit des Systems in verschiedenen mobilen Empfangssituationen. Da die optimalen Senderabstände und die benötigten Sendeleistungen genau hiervon abhängen, ist dies von entscheidender Bedeutung für die Planung der Rundfunkversorgung. Ferner wird die Möglichkeit untersucht, durch Diversity die Störsicherheit weiter zu verbessern, indem senderseitig mehrfach dieselbe Information in den DAB-Multiplex eingespeist wird. Hierdurch wird allerdings die Bandbreiteneffizienz stark reduziert. Andererseits sind auch die C/N -Gewinne erheblich. In bestimmten Szenarien kann letzteres wichtiger sein. Insbesondere z.B. bei Lokalfunk in dünn besiedelten Gebieten brauchen unter Umständen gar nicht 6 Programme ausgestrahlt zu werden, sondern vielleicht nur 2 oder 3. In diesem Fall ist die Mehrfachausstrahlung eines oder mehrerer Programme sicher sinnvoller, als den Multiplex mit 'Dummy-Daten' zu füllen. Der Empfänger, der dies (mit vertretbarem Zusatzaufwand) ausnutzen kann, wird eine erheblich höhere Versorgungssicherheit gewährleisten. Bezieht man die Diversity-Gewinne in die Planung mit ein, lassen sich die Wiederholabstände der Frequenzblöcke verringern. Wenn man all diese Möglichkeiten geschickt ausnutzt, kann man die Flexibilität der Planung, insbesondere für die Lokalfunkversorgung, deutlich verbessern.

2 Modulation und Systemparameter bei DAB

Bei DAB wird das Multiträgerverfahren OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) verwendet. Die Information wird dabei auf viele spektral überlappende (Unter-) Träger mit jeweils sehr niedriger Datenrate verteilt. Die Orthogonalitätsbedingung gewährleistet die Trennbarkeit der Träger empfangsseitig. Die rechteckigen Basispulse jedes einzelnen Trägers sind dabei um ein sog. 'Schutzintervall' der Länge Δ verlängert. Echoslafzeiten $\tau < \Delta$ verursachen dann keine Intersymbolinterferenz [1]. Jeder einzelne Unterträger ist mit DQPSK moduliert.

Für unterschiedliche Anwendungen sind drei verschiedene Übertragungsmodi ('Transmission Modes' TM I, TM II, TM III) mit verschiedenen Symbolauern und Schutzintervallen spezifiziert [8], siehe Tabelle 2.1.

Tabelle 2.1: Übertragungsparameter bei DAB für verschiedene Transmission Modes

	Transmission Mode I	Transmission Mode II	Transmission Mode III
Symboldauer $T_s =$	ca. 1246 μ s	ca. 312 μ s	ca. 156 μ s
Schutzintervall $\Delta =$	ca. 246 μ s	ca. 62 μ s	ca. 31 μ s
Anzahl OFDM-Symbole pro Rahmen (ohne Nullsymbol)	76	76	153
Anzahl der belegten Unterträger	1536	384	192
Rahmendauer	96 ms	24 ms	24 ms
Dauer des Nullsymbols	ca. 1.297 μ s	ca. 324 μ s	ca. 168 μ s

Lange Symbole mit langen Schutzintervallen verkraften lange Echolaufzeiten, sind aber empfindlicher gegen Phasenfluktuationen durch den Dopplereffekt (und das Phasenrauschen des Oszillators) und daher nur für niedrigere Frequenzen einsetzbar. Bei einem isotropen Dopplerspektrum und einem Rayleigh-Kanal mit Fahrzeuggeschwindigkeiten bis etwa 200 km/h eignet sich der 'Transmission Mode I' mit einer Symboldauer von ca. 1.25 ms nur bis zu Frequenzen von etwa 300 MHz, dafür eignet er sich mit einem Schutzintervall von etwa 250 μ s besonders gut für Gleichwellennetze. Transmission Mode II hat ein Schutzintervall von ca. 60 μ s und eignet sich bei den genannten Bedingungen bis etwa 1.2 GHz. Bei Transmission Mode III halbiert sich die Symboldauer und das Schutzintervall noch einmal. Der Frequenzbereich geht dann bis etwa 2.4 GHz.

Die Nutzdatenströme bei DAB sind in 'logischen Rahmen' von 24 ms organisiert, und zwar unabhängig vom Übertragungsmodus. Quellcodierung, Kanalcodierung und Zeitinterleaving erfolgen jeweils auf der Zeitbasis der logischen Rahmen. Erst bei der Einbettung von logischen Rahmen in physikalische muß zwischen den drei Übertragungsmodi unterschieden werden.

3 Codierungsprofile für Audiodaten

Die Systemspezifikation erlaubt 14 verschiedene Audiodatenraten zwischen 32 kbit/s und 384 kbit/s. Typische

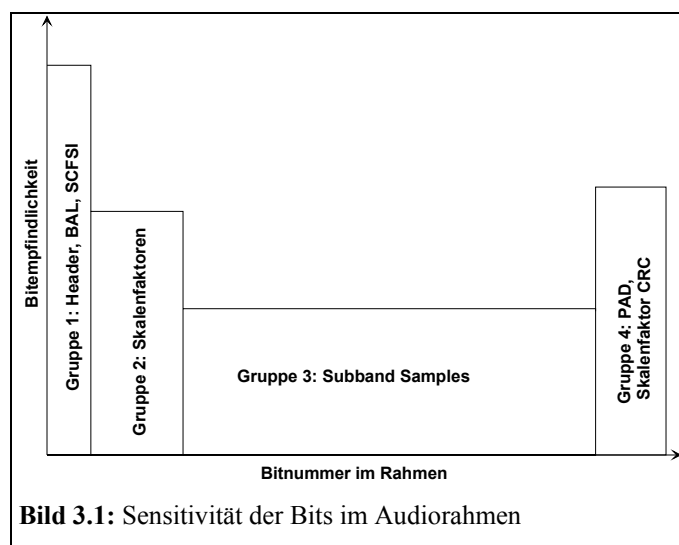


Bild 3.1: Sensitivität der Bits im Audiorahmen

Datenraten für gute Stereoqualität liegen bei 192 kbit/s bis 256 kbit/s. Für jede erlaubte Datenrate sind bis zu 5 verschiedene starke Möglichkeiten des Fehlerschutzes vorgesehen, um die Anpassung an unterschiedliche Versorgungssituationen zu ermöglichen. Auf diese Weise kann die gesamte Übertragungskapazität sehr flexibel auf Audiodaten und Fehlerschutz verteilt werden.

Die Bits des 24 ms-Audiodatenrahmens bei DAB lassen sich in 4 Sensibilitätsgruppen unterteilen: Die erste Gruppe (bei typischen Audiodatenraten ca. 350 Bits) besteht aus dem Header und anderen zur Decodierung des Rahmens unbedingt nötigen Daten. Die Bitfehlerrate sollte hier unterhalb von 10^{-6} bis 10^{-7} liegen. Außerdem ist eine Fehlererkennung vorgesehen. Die zweite

Gruppe (typisch: ca. 750 Bits) besteht aus Skalenfaktoren. Störungen hier sind für das Ohr sehr unangenehm (Zwitschergeräusche 'Birdies'), weshalb eine Fehlererkennung der Skalenfaktor-MSBs vorgesehen ist, die zur Fehlerverschleierung genutzt werden kann. Die Fehlerrate sollte trotzdem nicht über ca. 10^{-5} liegen. Die dritte Gruppe ist die größte (typischerweise mehrere tausend Bits) und umfaßt die Abtastwerte. Bitfehler hier können wie 'Glucksen' oder 'Gurgeln' klingen. Mit Kopfhörer wird eine Bitfehlerrate ab etwa 10^{-4} als störend empfunden, im Labor mit Hintergrundgeräuschen (erst recht im fahrenden Auto) sind 10^{-3} noch zumutbar. Die vierte Klasse besteht aus ca. 100 Bits und umfaßt den Skalenfaktor-CRC sowie audiogebundene Zusatzdaten (PAD=Programme Associated Data). Sie sind genauso gut zu schützen wie die zweite Gruppe.

Die unterschiedlichen Bitempfindlichkeiten werden bei DAB durch ungleichgewichtigen Fehlerschutz berücksichtigt. Implementiert wird er durch RCPC Codes [2] mit einem Muttercode der Rate 1/4 und dem Gedächtnis 6. Durch Punktierung können Coderaten 8/32, 8/31, ..., 8/10, 8/9 erzeugt werden.

Die Methode des *Code Designs* für DAB ist in [3] beschrieben, dort wird allerdings noch von einer höheren Zahl an Sensitivitätsklassen ausgegangen. Die Vorgehensweise besteht im wesentlichen darin, anhand der Bitfehlerkurven (s.u.) bei einem gegebenen C/N-Arbeitspunkt für die einzelnen Sensitivitätsklassen soviel an Redundanz hinzuzufügen, daß die geforderte höchste zulässige Bitfehlerrate der Klasse unterschritten wird. Die mittlere Coderate R_{av} wird wesentlich durch die Coderate R_3 der größten Gruppe 3 bestimmt. Dies führt dazu, daß oft noch Bits 'übrig' sind, d.h. daß die anderen Gruppen besser geschützt sind als ursprünglich gefordert. Der Arbeitspunkt wird dann allein durch die Fehlerrate in der Gruppe 3 bestimmt. Ein typisches Codierungsprofile ist in Tabelle 3.1 dargestellt. Die Spalte T+P steht für Tail- und Padding Bits.

Tabelle 3.1: Codierungsprofil Nr. 45 der DAB-Spezifikation; Audiodatenrate 192 kbit/s, Protection Level 3

Bitgruppe	1	2	3	4	T+P	Summe
Nettobits	352	768	3392	96	---	4608
R=	8/24	8/18	8/14	8/19	8/16	$R_{av}=0.51$
Bruttobits	1056	1728	5936	228	12	8960
$P_b(11dB)<$	10^{-7}	10^{-6}	10^{-4}	10^{-6}	---	=140 CUs

Die letzte Zeile gibt die jeweils in der Bitgruppe unterschrittenen Bitfehlerwahrscheinlichkeiten für einen Rayleigh-Kanal mit idealem Interleaving und kleiner Dopplerfrequenz an.

Die Spezifikation sieht 5 verschiedene 'Protection Level' PL1 bis PL5 vor mit mittleren Coderaten zwischen 0.35 (PL1) und 0.75 (PL5). Der Protection Level bestimmt den notwendigen Rauschabstand (auch bei unterschiedlichen Nettodatenraten, zumindest in guter Näherung). Tabelle 3.2 zeigt exemplarisch für die Audiodatenrate 192 kbit/s und die 5 Protection Level die Bruttobitratens, die mittleren Coderaten R_{av} , die Coderate in der dritten Bitgruppe R_3 sowie den notwendigen Rauschabstand im o.g. idealen Rayleigh-Kanal.

Tabelle 3.2: Protection Level bei DAB für 192 kbit/s Audio, Coderaten und nötiger Rauschabstand

PL	Bruttodatenrate	R_{av}	R_3	C/N (10^{-4}) [dB]
5	256 kbit/s	0.75	8/10	16.5
4	309 kbit/s	0.62	8/12	12.7
3	373 kbit/s	0.51	8/14	11.0
2	448 kbit/s	0.43	8/17	9.0
1	555 kbit/s	0.35	8/21	7.4

Je nach dem gewählten Protection Level sind also sehr unterschiedliche Arbeitspunkte (d.h. erforderliche Rauschabstände) für das Übertragungsverfahren möglich. Der minimal erforderliche Rauschabstand C/N läßt sich über einen Bereich von ca. 9 dB variieren. Die Variationsbreite ist sogar noch weit größer (mehr als 15 dB), wenn man ungünstige Bedingungen, z.B. bei hohen Dopplerfrequenzen, betrachtet.

Der Preis für eine bessere Störsicherheit ist der erhöhte Bandbreitenbedarf pro Programm. Dadurch lassen sich bei stärkerem Fehlerschutz weniger Programme im Multiplex unterbringen.

4 Bitfehlerkurven im Mobilfunkkanal

Für das oben beschriebene Code Design und die Auswahl des richtigen Protection Level für eine bestimmte Anwendung ist die Kenntnis der Bitfehlerkurven für die jeweiligen Übertragungskanäle von entscheidender Bedeutung. Glücklicherweise muß nicht alles simuliert werden, da für DQPSK bei Rayleigh-Fading analytische Formeln für obere Schranken der Bitfehlerraten bekannt sind, die für niedrige Bitfehlerraten (in der Praxis: unterhalb von ca. 10^{-2}) asymptotisch eng sind. Für Faltungscodes gilt allgemein eine Abschätzung der Form ('Union Bound')

$$P_b \leq \sum_{d=d_{free}}^{\infty} c_d P_d, \quad (4.1)$$

wobei d_{free} die freie Distanz des Codes ist, die Zahlen c_d nur vom Code abhängen (sog. Fehlerkoeffizienten, Tabellen finden sich z.B. in [2]) und die sogenannten Fehlerereigniswahrscheinlichkeiten P_d nur vom Modulationsverfahren und dem Kanal. Für die Fehlerereigniswahrscheinlichkeiten bei DQPSK im zeitselektiven Rayleigh-Kanal haben Hagenauer et al. [4] folgende Formel hergeleitet:

$$P_d = \left(\frac{1-\rho}{2} \right)^{2d-1} \sum_{e=0}^{d-1} \binom{2d-1}{e} \left(\frac{1+\rho}{1-\rho} \right)^e, \quad \rho = \frac{R_1}{\sqrt{2(1+N_0/E_S)^2 - R_1^2}} \quad (4.2)$$

$$R_1 \approx 1 - (\pi f_D T_S)^2 \quad (\text{AKF des Fadings bei } t = T_S)$$

Hierbei ist T_S die Symboldauer und f_D die maximale Dopplerfrequenz. Für die Autokorrelationsfunktion (AKF) wurde das Dopplerspektrum der isotropen Winkelverteilung angenommen. Ideales Interleaving ist vorausgesetzt.

Die Bitfehlerkurven aus Gl. (4.1) für den Grenzfall verschwindender Dopplerfrequenz sind in Bild 4.1 aufgetragen für die Coderaten 8/24, 8/22, 8/20, 8/18, 8/16, 8/15, 8/14, 8/13, 8/12, 8/11 und 8/10. Um deutlich zu

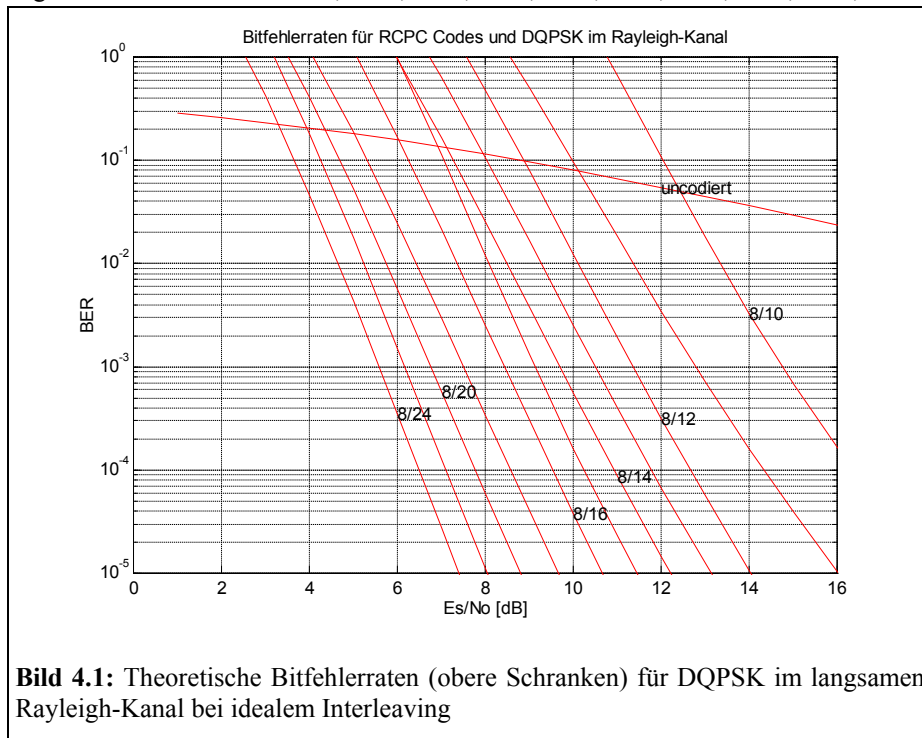


Bild 4.1: Theoretische Bitfehlerkurven (obere Schranken) für DQPSK im langsamen Rayleigh-Kanal bei idealem Interleaving

machen, wie wichtig Codierung bei solchen Kanälen ist, wurde die Kurve für uncodierte Übertragung mit eingezeichnet.

Bild 4.2 zeigt deutlich, wie sehr das System bei hohen Dopplerfrequenzen schlechter wird: Bei den für die Bitgruppe 3 typischen Coderaten 8/14 bis 8/12 um etwa 2-3 dB. Ebenfalls erhebliche Verschlechterungen werden durch Echos verursacht, deren Laufzeit größer ist als das Schutzintervall. Diese Effekte lassen sich nicht einfach analytisch behandeln, man ist deshalb auf

Simulationen angewiesen [3].

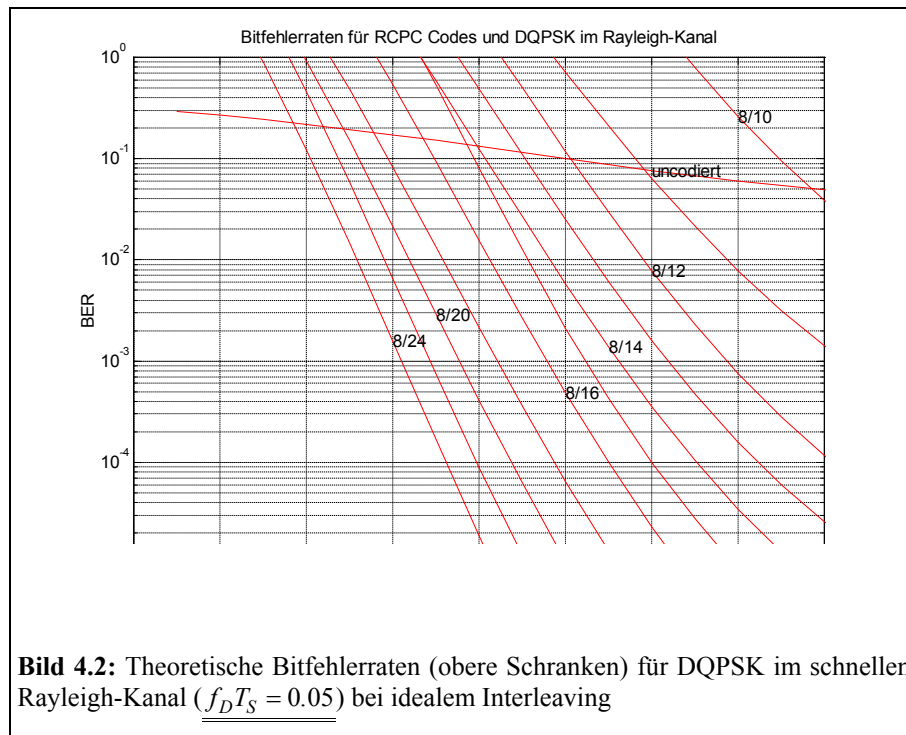


Bild 4.2: Theoretische Bitfehlerkurven (obere Schranken) für DQPSK im schnellen Rayleigh-Kanal ($f_D T_S = 0.05$) bei idealem Interleaving

Die theoretischen Bitfehlerkurven setzen gleichmäßig verteilte Störungen voraus, d.h. ideales Interleaving. Um die Bündelstörungen des Mobilfunkkanals aufzubrechen, werden bei DAB zwei unabhängige Interleaving-Mechanismen verwendet. Der Frequenzinterleaver ist ein Blockinterleaver, der eine bestimmte Pseudozufallspermutation der K QPSK-Symbole, die während der OFDM-Symboldauer T_s moduliert werden, durchführt. Da die Länge K der Permutation gleich der Anzahl der modulierten Unterträger ist, besitzt jeder Transmission Mode

einen anderen Frequenzinterleaver. Der Frequenzinterleaver bewirkt nur dann ein Aufbrechen der Bündelstörungen, wenn nicht ein wesentlicher Teil der Übertragungsbandbreite von ca. 1.5 MHz in einen Schwund einbruch fallen kann, sondern innerhalb der Bandbreite immer viele Einbrüche (und damit auch Nicht-Einbrüche) vorkommen. Dies ist gewährleistet, falls die Bedingung

$$\Delta\tau \cdot B \gg 1 \quad (4.1)$$

erfüllt ist, wobei B die Übertragungsbandbreite und $\Delta\tau$ der Delay Spread (Varianz des Verzögerungsleistungsdichtespektrums) ist. Zur Bewertung des DAB-Systems wurden neben den bekannten GSM-Echoprofilen 'Rural

Area' (RA), 'Typical Urban' (TU), 'Bad Urban' (BU) und 'Hilly Terrain' (HT) weitere Profile herangezogen, um

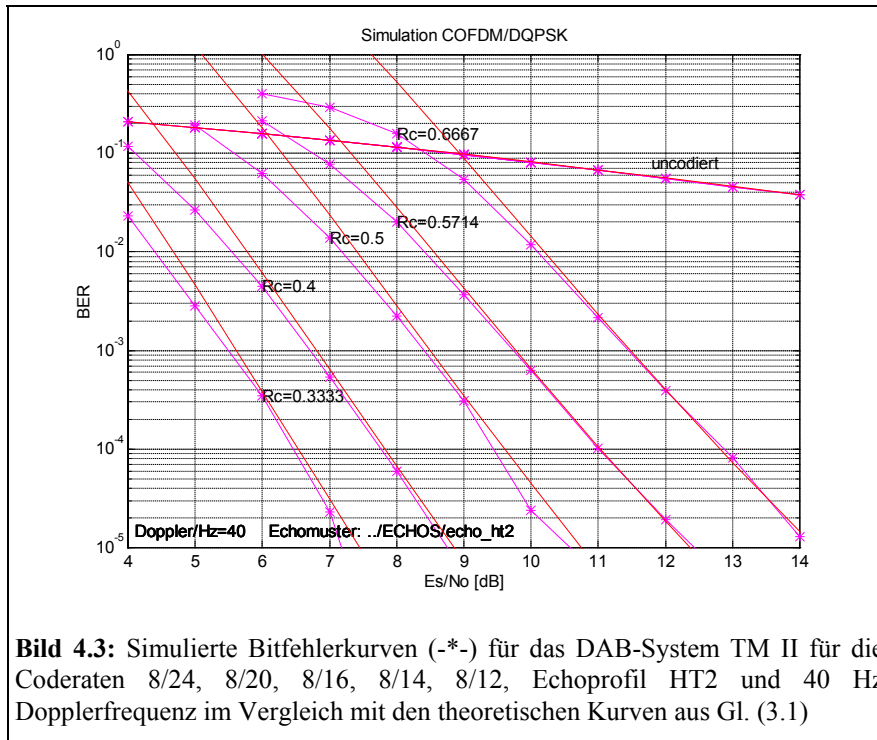


Bild 4.3: Simulierte Bitfehlerkurven (-*-) für das DAB-System TM II für die Coderaten 8/24, 8/20, 8/16, 8/14, 8/12, Echoprofil HT2 und 40 Hz Dopplerfrequenz im Vergleich mit den theoretischen Kurven aus Gl. (3.1)

den größeren Funkfeldlängen bei DAB Rechnung zu tragen. Eine Übersicht findet sich in [7]. Eines der speziellen DAB-Profile, 'DAB Hilly Terrain 2' (HT2), ist für das DAB-System im Transmission Mode II besonders günstig, da kein Echo länger ist als das Schutzintervall, andererseits aber $\Delta\tau = 14\mu\text{s}$ verhältnismäßig groß ist. Bedingung (4.1) ist damit recht gut erfüllt. Dieses Profil soll daher im folgenden bei Simulationen als exemplarisches Beispiel für gutes Frequenzinterleaving verwendet werden. Gegenübergestellt werden sollen Simulationen mit dem GSM-Profil TU mit $\Delta\tau = 1\mu\text{s}$, wo Bedingung

(4.1) nicht gut erfüllt ist. Alle im folgenden beschriebenen Simulationen beziehen sich auf den Rayleigh-Kanal, d.h. als ungünstigster Fall wird reiner Streuempfang und die völliger Abwesenheit eines direkten Ausbreitungsweges angenommen.

Der Zeitinterleaver bei DAB ist ein Faltungsinterleaver, der Fehlerbündel von bis zu 24 ms aufbrechen kann.

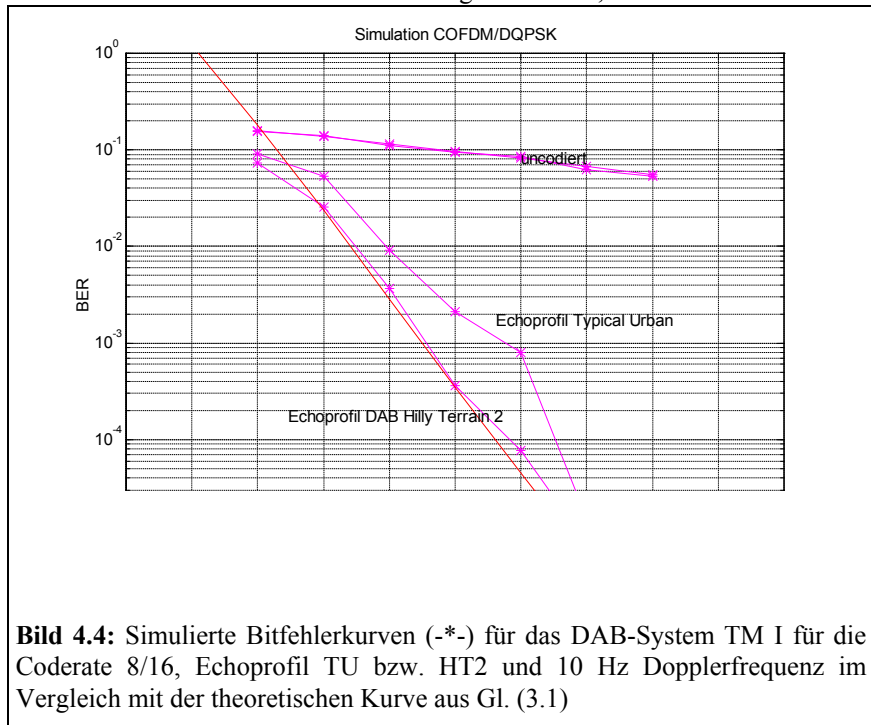


Bild 4.4: Simulierte Bitfehlerkurven (-*-) für das DAB-System TM I für die Coderate 8/16, Echoprofil TU bzw. HT2 und 10 Hz Dopplerfrequenz im Vergleich mit der theoretischen Kurve aus Gl. (3.1)

Die Korrelationszeit des Kanals sollte also kleiner als 24 ms sein. Dies bedeutet $f_D \cdot 24\text{ms} \geq 1$ bzw. (gerundet)

$$f_D \geq 40\text{Hz} \quad (4.2)$$

Da die Bedingung (4.2) für das Zeitinterleaving unabhängig vom Übertragungsmodus ist, bei Modus I aber eine Dopplerfrequenz von 40 Hz schon etwa die obere Grenze ist, die aufgrund des schnellen Schwundes vom System verkraftet werden kann, ist bei TM I das Zeitinterleaving immer nur eingeschränkt wirksam, bei niedrigen Fahrzeuggeschwindigkeiten sogar oft völlig unwirksam! Für diesen Modus ist daher die

Wirksamkeit des Frequenzinterleavings besonders wichtig. Da Situationen mit kurzen Echolaufzeiten durchaus typisch sind, muß durch 'künstliche' lange Echos von entfernten Sendern im Gleichwellennetz für ein wirksames Frequenzinterleaving gesorgt werden.

Simulierte Bitfehlerkurven für die Coderaten 8/24, 8/20, 8/16, 8/14, 8/12 und Transmission Mode II des DAB-Systems im Vergleich mit den analytischen Kurven für einen Rayleigh-Kanal mit $f_D = 40\text{Hz}$ (ca. 30 km/h bei 1.5 GHz) und dem Echoprofil HT2 finden sich in Bild 4.3. Die gute Übereinstimmung der simulierten mit den

theoretischen Kurven zeigt, daß bei diesen Systemparametern das Interleaving ausreicht. Die verwendete Monte-Carlo-Simulationsmethode ist in [5] und [6] beschrieben.

Bei 10 Hz Dopplerfrequenz (48 km/h bei 225 MHz) ist das Zeitinterleaving allein nicht mehr hinreichend wirksam. Die Auswirkungen des Frequenzinterleavings zeigt Bild 4.4 für die Coderate 8/16 und TM I bei den Profilen TU und HT2. Im Gegensatz zum Profil HT2 ist für das Profil TU offenbar das Interleaving nicht mehr ausreichend. Es zeigen sich deutliche Verschlechterungen. Noch auffälliger als der Verlust von 1-2 dB im Störabstand ist aber, daß sich trotz der großen Anzahl simulierter Bits (wie in allen anderen Simulationen ca. 5 Millionen) keine 'glatten' Kurven ergeben, also offenbar die Statistik nicht ausreicht. Anscheinend kann man auch innerhalb des makroskopischen Zeitraums von ca. 20 Sekunden, den die Simulation widerspiegelt, nicht von einem stationären Zustand sprechen.

5 Gewinne durch Multiplex-Diversity bei DAB

Die folgenden Überlegungen sollen auf 2-fach-Diversity beschränkt werden. Die Verallgemeinerung auf mehr Diversity-Zweige ergibt sich nach denselben Überlegungen.

Diversity bei differentieller Demodulation wird dadurch implementiert, daß die (*soft decision*) Entscheidungsvariablen nach den Demodulatoren der Diversity-Zweige einfach zu einer neuen Entscheidungsvariablen addiert werden.

Codierte Übertragung mit Diversity kann als Verkettung mit einem Wiederholungscode aufgefaßt werden. Dieser "Diversity-Code", hat die doppelte freie Distanz des ursprünglichen. Die theoretischen Bitfehlerkurven für 2-fach Diversity erhält man, indem man einfach in Gl. (4.1) die Fehlerereigniswahrscheinlichkeit P_d durch P_{2d} ersetzt.

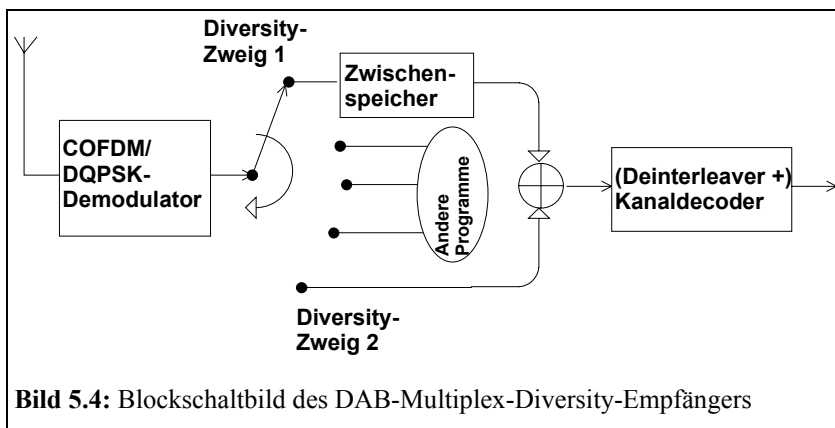


Bild 5.4: Blockschaltbild des DAB-Multiplex-Diversity-Empfängers

Bei DAB kann man Diversity auf einfache Weise dadurch implementieren, daß man denselben codierten Datenstrom mehrfach in den Multiplex einspeist. Der Empfänger muß die Daten zwischenspeichern und dann addieren. Der Zusatzaufwand im Empfänger für diese Art von Diversity liegt außer den vorzunehmenden Änderungen der Steuerung nur in dem zusätzlichen Speicheraufwand und der Addition. Bild 5.1 zeigt das Blockschalt-

bild eines DAB-Multiplex-Diversity-Empfängers für 2-fach Diversity.

Mehrfachübertragung im DAB-Multiplex erfordert eine erhebliche zusätzliche Redundanz, die zu Lasten der Bandbreiteneffizienz und damit der Zahl der Programme im Multiplex geht. Andererseits wird dadurch der notwendige Rauschabstand erheblich reduziert. Tabelle 5.1 gibt am Beispiel der 192 kbit/s Audiübertragung und des idealen Rayleigh-Kanals anhand der Bitfehlerkurven aus Bild 5.2 einen Überblick über die Bruttodatenraten, die mittlere Coderaten (der Faktor 1/2 für 2-fach Diversity ist berücksichtigt), die Coderaten in der Bitgruppe 3 (zur Notation: $R=8/16/2$ bedeutet Coderate 8/16 mit 2-fach Diversity usw.) und die erforderliche Störabstände. Mit PLX-2 ist Protection Level X mit 2-fach Diversity gemeint.

Tabelle 5.1: Protection Level bei DAB für 192 kbit/s Audio, Coderaten und nötiger Rauschabstand bei 2-fach Diversity

PL	Bruttodatenrates	R_{av}	R_3	C/N (10^{-4}) [dB]
5-2	512 kbit/s	0.375	8/10/2	10.0
4-2	619 kbit/s	0.31	8/12/2	7.5
3-2	747 kbit/s	0.26	8/14/2	6.4
2-2	896 kbit/s	0.21	8/17/2	5.0
1-2	1109 kbit/s	0.17	8/21/2	3.9

PL5-2 und PL4-2 sind praktisch nicht interessant, da man bei PL1 mit einer vergleichbaren mittleren Coderate von etwa 1/3 bessere Resultate erzielt. Dagegen ist es mit PL3-2, PL2-2 und PL1-2 möglich, den Arbeitspunkt in bis dahin nicht betrachtete Bereiche zu verschieben, allerdings um den Preis einer hohen Redundanz. Zwischen PL5 und PL1-2 liegen immerhin fast 13 dB im C/N (bei ungünstigen Kanälen noch mehr).

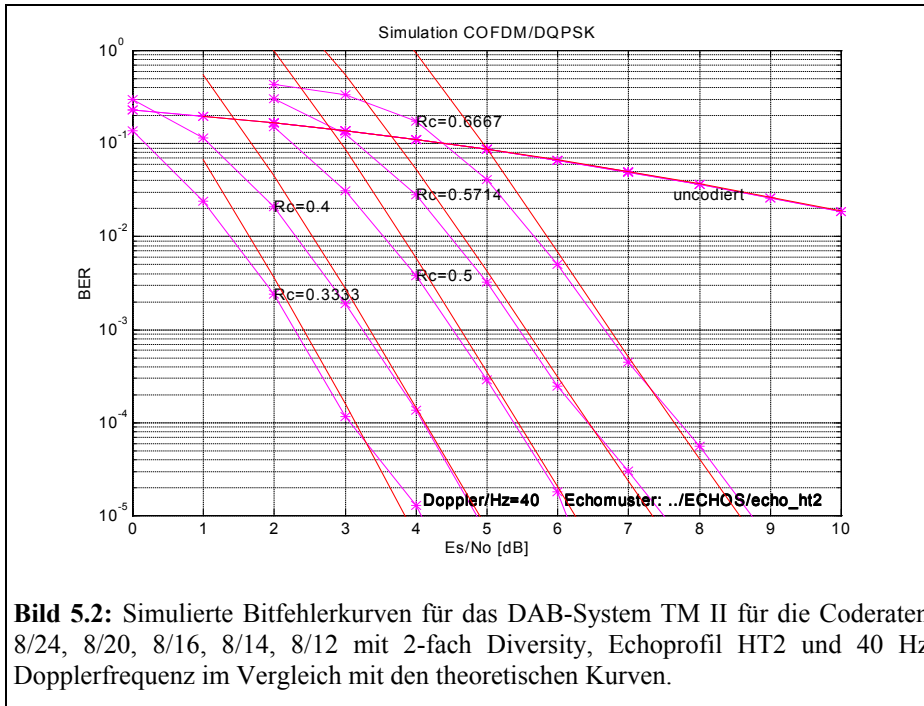


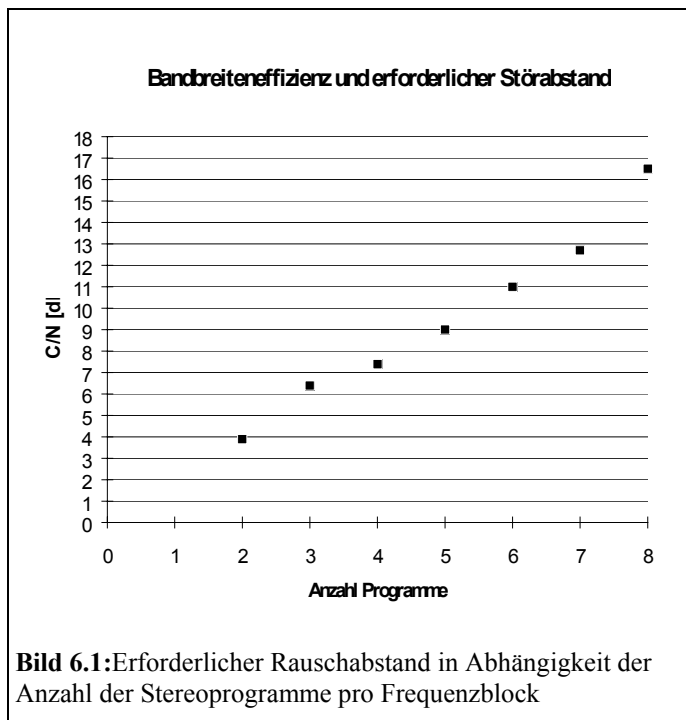
Bild 5.2 zeigt die Simulation des DAB-Systems mit 2-fach Multiplex-Diversity im Modus II und dem Rayleigh-Kanal mit Echoprofil HT2 und 40 Hz Dopplerfrequenz für die Coderaten 8/24, 8/20, 8/16, 8/14, 8/12 (die Coderaten beziehen sich auf einen Diversity-Zweig) im Vergleich mit den theoretischen Kurven. Die Übereinstimmung ist gut. Für die statistische Unabhängigkeit der beiden Diversity-Zweige spielt die Anordnung im CIF eine wichtige Rolle. Ungünstig ist es of-

fenbar, wenn für beide Zweige dasselbe Bit im jeweiligen Subchannel immer auf demselben (Unter-) Träger übertragen wird.

Bei der Simulation zu Bild 5.2 ist dies beachtet. Bei ungünstiger Anordnung ergeben sich demgegenüber deutliche Verschlechterungen.

6 Betrachtungen zur Rundfunkversorgung

Das DAB-System bietet eine Reihe von Möglichkeiten, die Kanalcodierung an die Erfordernisse der Rundfunkversorgung anzupassen: Je nachdem, ob ein niedriger C/N-Arbeitspunkt oder eine hohe Zahl von



Programmen Vorrang hat, steht ein passendes Codierungsprofil zur Verfügung. Die Erfordernisse können sehr unterschiedlich sein, z.B. zwischen großflächiger landesweiter Grundversorgung und Lokalfunk. Insbesondere bei letzterem kann es vorkommen, daß ein DAB-Multiplex deutlich weniger als 6 Programme überträgt. Für diesen Fall, aber auch den Fall sehr ungünstiger Empfangsbedingungen, läßt sich durch Multiplex-Diversity die Störsicherheit - auf Kosten der Anzahl der Programme - noch einmal signifikant verbessern. Bild 6.1 zeigt als Beispiel die Möglichkeiten, die Anzahl der im Multiplex übertragenen 192 kbit/s-Audioprogramme zu verändern und damit unterschiedliche Arbeitspunkte zu erreichen.

Zugrunde gelegt sind hier die Tabellen 3.2 und 5.1, d.h. es wird ein Kanal mit idealem Interleaving und ohne Verluste durch hohe Fahrzeuggeschwindigkeiten vorausgesetzt. Bild 6.1 gibt daher nur eine grobe Orientierung. Eine genaue Planung muß die Gegebenheiten sorgfältiger berücksichtigen.

Dies gilt besonders für unterschiedliches Systemverhalten im TV-Kanal 12 bei TM I und bei 1.5 GHz und TM II. Z.B. wird der kritische Wert $f_D T_S = 0.05$ im ersterem Fall bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 192 km/h

erreicht, im letzteren schon bei 115 km/h. Andererseits ist in letzterem bei einer Geschwindigkeit von ca. 30 km/h (40 Hz Dopplerfrequenz) das Zeitinterleaving noch nahezu ideal, in ersterem bei einer Geschwindigkeit von ca. 50 km/h (10 Hz Dopplerfrequenz) schon längst nicht mehr (bei Übertragung in Band I sind sogar 200 km/h schon zu 'langsam'). Hier muß ein wirksames Frequenzinterleaving die Situation retten. Da schwach frequenzselektive Echoprofile wie 'Typical Urban', die zu schlechtem Frequenzinterleaving führen, in bestimmten Gegenden eher die Regel als die Ausnahme sind, sind die 'künstlichen Echos' im Gleichwellennetz, die von weiter entfernten Sendern herrühren, wichtig. Dies bedeutet aber, daß am Rande des Versorgungsgebietes das Empfangssignal möglichst aus mindestens zwei Komponenten unterschiedlicher Laufzeit bestehen muß. Anderenfalls muß die Versorgungsplanung hier von einer um einige Dezibel schlechteren Empfängerempfindlichkeit ausgehen. Dem läßt sich begegnen durch eine stärkere Kanalcodierung, - allerdings wieder auf Kosten der Programmmzahl.

Für lokale Gleichwellennetze im L-Band, in denen nur wenige Programme ausgestrahlt werden, bietet sich eine Übertragung mit wenigen, stark codierten Audioprogrammen an, eventuell mit Diversity. Insgesamt ist trotz der wenigen Programme diese Strategie nicht so ineffizient von der Bandbreitenausnutzung, wie es zunächst den Anschein hat: Durch die höhere Störsicherheit können die Wiederverwendungsabstände für dieselbe Frequenz verringert werden, wodurch man diese insgesamt öfter nutzen kann. Wie groß dieser Gewinn ist, sollte mit Hilfe von Feldstärkeprognosemodellen genauer untersucht werden.

7 Zusammenfassung

Die obigen Betrachtungen deuten die Vielfalt der Planungsmöglichkeiten bei DAB an, aber auch die Schwierigkeiten, diese optimal zu nutzen. Hierzu muß die Versorgungsplanung stärker als bisher mit der Kanalcodierung verknüpft werden. Zentrale Frage ist, wie ein Gewinn im Störabstand ('Empfängerempfindlichkeit') sich 1. auf den Senderabstand im Gleichwellennetz und 2. auf die Mindestdistanz zweier verschiedener Gleichwellennetze mit derselben Frequenz auswirkt. Ersteres ist ein wichtiger Kostenfaktor, letzteres bestimmt die Bandbreiteneffizienz der Versorgung mit DAB überhaupt: Wieviel Megahertz braucht man eigentlich, um die bestehende Rundfunkstruktur auf DAB abzubilden bzw. diese zu erweitern? Diese Frage ist bisher nicht befriedigend geklärt. Ohne angemessene Berücksichtigung der Möglichkeiten der Kanalcodierung wird möglicherweise eine Lösung gefunden, die in den Kosten und der Bandbreitennutzung weit entfernt vom Optimum liegt.

Literatur

1. M. Alard, R. Lasalle: *Principles of Modulation and Channel Coding for Digital Broadcasting for Mobile Receivers* EBU Rev. Techn., 224, S. 47-69, 1987
2. J. Hagenauer: *Rate Compatible Punctured Convolutional Codes (RCPC Codes) and their Applications*, IEEE Transactions on Communications, COM-36, pp. 389-400, 1988
3. P. Höher, J. Hagenauer, E. Offer, Ch. Rapp, H. Schulze: *Performance of an RCPC-Coded OFDM-based Digital Audio Broadcasting (DAB) System*, ITG Fachtagung Hörrundfunk 18.-20. Februar 1992 in Mannheim, erschienen als ITG Fachbericht 118 "Hörrundfunk", S. 135-140, 1992
4. J. Hagenauer, N. Seshadri, C.-E. W. Sundberg: *The Performance of Rate Compatible Punctured Convolutional Codes for Mobile Radio*, IEEE Transactions on Communications, COM-38, pp. 966-980 1990
5. H. Schulze, *Stochastische Methoden und digitale Simulation von Mobilfunkkanälen*, Kleinheubacher Berichte Bd. 32, S. 473-483, 1989
6. P. Höher: *A Statistical Discrete-Time Model for the WSSUS Multipath Channel*, IEEE Trans. on Veh. Technology, VT-41 (4), pp. 461-468, 1992
7. Th. Wächter, *Das Übertragungsverfahren des zukünftigen digitalen Hörrundfunks*, Der Fernmeldeingenieur, Doppelheft 11-12, 1992
8. European Telecommunications Standards Institute (ETSI) und European Broadcasting Union (EBU): *Radio broadcast systems; Digital Audio Broadcasting (DAB) to mobile, portable and fixed receivers*, Draft prETS 300 401, Genf und Sophia Antipolis, 1994