

Höherstufige OFDM-Übertragung im DAB-Kanal und Bitfehlerhäufigkeit

Hanns Thilo Hagemeyer

Institut für Nachrichtenübertragung, Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 47, 70569 Stuttgart
e-mail: hagemeyer@inue.uni-stuttgart.de

1. Einleitung

Die im Main Service Channel (MSC) des DAB-Kanals zur Verfügung stehende Bitrate von etwa 2,3 Mbit/s ist zu gering, um damit eine Übertragung eines hierarchisch codierten Videosignals mit ausreichender Bildqualität zu ermöglichen [1]. Um die Vorteile einer hierarchischen Bildcodierung zu nutzen, ist es daher sinnvoll, die Bitrate eines DAB-Kanals zu erhöhen. Bei dem im DAB-Standard [2] festgelegten Vielträgerverfahren wird jeder Träger mit einer Vierphasenumtastung (4-PSK) moduliert, so dass das in Bild 1 dargestellte Signalzustandsdiagramm auftritt. Jeder Träger enthält dabei zwei Informationsbits je Übertragungsschritt (Symbol). Mit den 72 Symbolen des Main Service Channels zu je 1536 Trägerfrequenzen im Modus I des DAB-Standards kann somit bei einer Rahmendauer von 96 ms die Bruttobitrate von 2,304 Mbit/s erreicht werden. Wegen der Verzerrungen des zeitvarianten Mehrwegekanals sind Übertragungsfehler unvermeidlich, so dass ein Teil der Übertragungskapazität als Redundanz zur Fehlerkorrektur verwendet werden muss. Üblicherweise liegt die Redundanz des hierzu verwendeten Faltungscodes in der Größenordnung von 50%. Der Vorteil einer zusätzlichen äußeren Codierung, die im DAB-Standard nicht vorgesehen ist, wurde in [1] dargelegt.

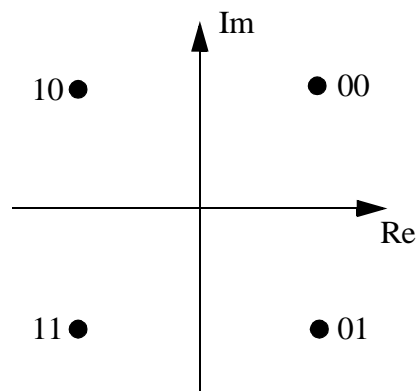


Bild 1 Signalzustandsdiagramm bei Vierphasenumtastung (4-PSK)

2. Mehrstufige Modulation

Eine Erhöhung der Bitrate ist nun dadurch möglich, dass an Stelle der 4-PSK ein höherstufiges, hybrides Modulationsverfahren, wie z. B. 16-QAM oder 64-QAM, verwendet wird. Die Signalzustände dieser beiden Quadratur-Amplitudenmodulationsverfahren sind in Bild 2 bzw. Bild 3 gezeigt. Je Übertragungsschritt und Träger werden nun 4 bzw. 6 Bits gesendet, so dass sich eine Bruttobitrate von 4,608 bzw. 6,912 Mbit/s ergibt. Der Parameter α beschreibt den Abstand der Signalzustände von den Koordinatenachsen. Für $\alpha = 1$ sind die Signalzustände in horizontaler und vertikaler Richtung äquidistant. Für $\alpha > 1$ sind die Signalpunkte verschiedener Quadranten weiter voneinander entfernt als die innerhalb eines Quadranten. Die Auswirkungen auf die Bitfehlerhäufigkeit werden in Abschnitt 4 dargestellt.

Die Signalzustandsdiagramme in Bild 2 und Bild 3 enthalten zusätzlich die Zuordnung der Informa-

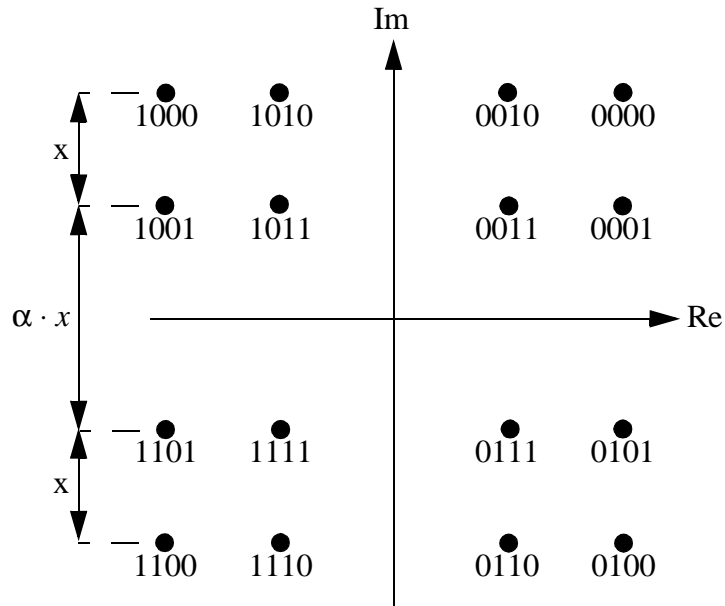


Bild 2 Signalzustandsdiagramm bei 16-QAM

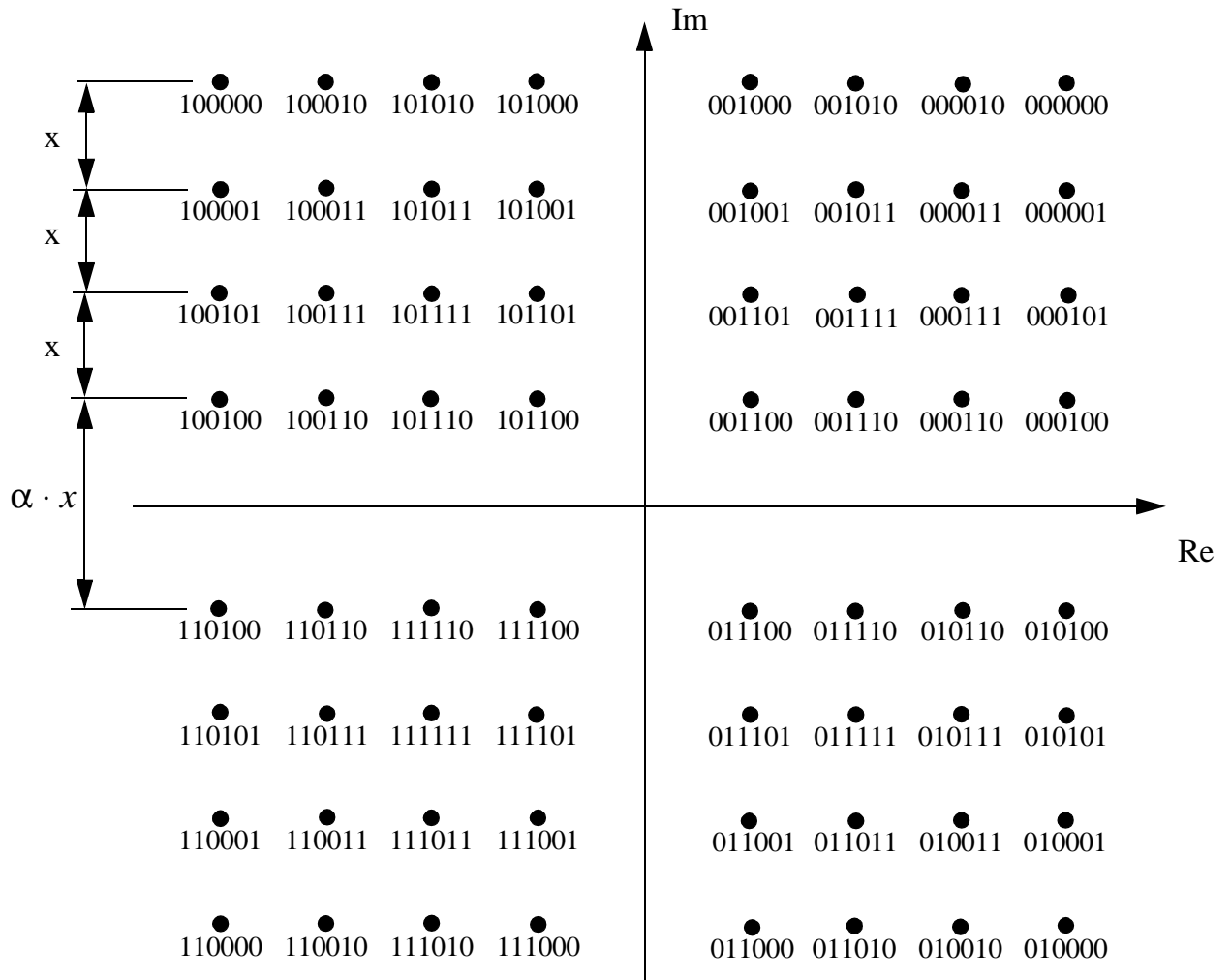


Bild 3 Signalzustandsdiagramm bei 64-QAM

tionsbits zu den Signalzuständen. Dabei wird üblicherweise so vorgegangen, dass sich benachbarte Zustände nur in einem Bit unterscheiden, so dass bei der wahrscheinlichsten Fehlersituation nur ein Bit gefälscht wird (Gray-Codierung). Man erkennt bei der Bitzuordnung in Bild 2 ferner, dass die ersten beiden Bits den Quadranten angeben und das zweite Bitpaar den Signalzustand innerhalb eines Quadranten beschreibt. Entsprechendes gilt für die 64-QAM in Bild 3. Diese Signalzuordnung ist somit kompatibel zur DAB-Spezifikation. Beschränkt sich die Auswertung des Empfängers nur auf den Quadranten, so werden nur die beiden ersten Bits decodiert. Die Zusatzdaten erhält man durch Auswertung der Signalzustände innerhalb der Quadranten. Man kann somit unterscheiden zwischen den DAB-Basisdaten und den Zusatzdaten. Bei 16-QAM ist der Zusatzdatenstrom genau so groß wie der Basisdatenstrom, bei 64-QAM ist er doppelt so groß.

3. Simulationsprogramm eines hybriden DAB-Verfahrens

Ausgehend von einem Simulationprogramm für das standardisierte DAB-Verfahren [3] wurde ein Programm für eine hybride DAB-Übertragung entwickelt, bei dem durch die höherstufigen Modulationsverfahren 16-QAM und 64-QAM eine höhere Bitrate möglich ist. Das Simulationprogramm wurde in der Simulationsumgebung PTOLEMY erstellt. Bild 4 zeigt das entsprechende PTOLEMY-Universum. Die Sterne und Galaxien, die sich vom Simulationsprogramm für das standardisierte DAB-Verfahren unterscheiden, sind mit einem Q markiert.

In der linken oberen Ecke befinden sich 4 Datenquellen, je zwei für den Fast Information Channel (FIC) und für den Main Service Channel (MSC). Der Fast Information Channel teilt sich auf in den Basis (DAB)-FIC und den Zusatz-FIC, der Main Service Channel entsprechend in den Basis (DAB)-MSC und den Zusatz-MSC. Es wird hier angenommen, dass auf der Basis des DAB-Modus I 72 der 76 Symbole eines DAB-Rahmens für den Main Service Channel verwendet werden und 3 Symbole, auch beim Zusatzdatenstrom, für den Fast Information Channel. Das erste Symbol eines Rahmens dient wegen der Kompatibilität zum DAB-Standard als Referenzsymbol.

Entsprechend der DAB-Spezifikation werden die FIC- und MSC-Daten im Energy-Dispersal-Scrambler verwürfelt und anschließend mit der gewünschten Coderate faltungscodiert. Die MSC-Daten werden zusätzlich einer zeitlichen Umordnung (time interleaving) unterworfen. In dem darauf folgenden Baustein findet eine simulationsinterne Formatumwandlung statt. Im nächsten Baustein werden gegebenenfalls Nullbits (padding bits) hinzugefügt, um eine standardisierte Bitrate (Vielfaches von 8 kbit/s) zu erhalten. Diese vier Datenströme werden nun dem OFDM-Modulator zugeführt.

3.1 OFDM-Modulator

Die einzelnen Komponenten (Sterne) des OFDM-Modulators werden in der PTOLEMY-Simulation zu einer sog. Galaxie zusammengefasst, die in Bild 4 dargestellt ist. In den beiden QAM-Modulatoren für den FIC und den MSC werden aus jeweils zwei Bits des Basisdatenstroms bzw. zwei oder vier Bits des Zusatzdatenstroms die komplexen Signalzustände gemäß Bild 2 oder 3 gebildet. Bezogen auf den DAB-Modus I erzeugt der obere Modulator die drei Symbole des FIC und der untere Modulator die 72 Symbole des MSC, die im anschließenden Multiplexer zusammengefasst werden. Auf die für die Detektion verwendeten Pilotsignale wird weiter unten eingegangen.

Die Zuordnung der Signalzustände zu den einzelnen Frequenzen des Vielträgerverfahrens OFDM wird entsprechend dem DAB-Standard im Frequenz-Interleaver-Baustein festgelegt. Wegen der Kompatibilität zum DAB-Verfahren wird eine differenzielle Modulation verwendet, d.h. der gesen-

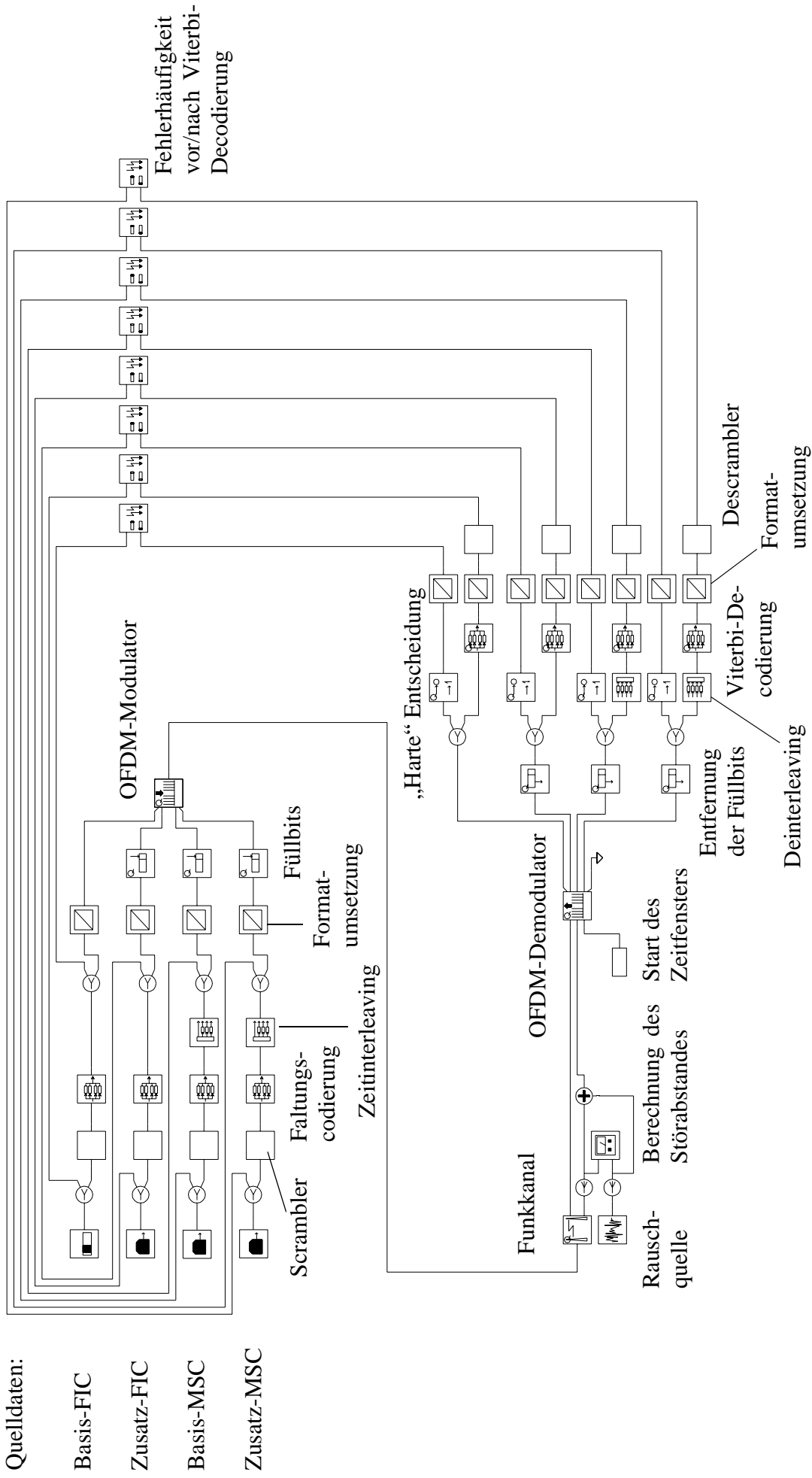


Bild 4 PTOLEMY-Universum des hybriden DAB-Verfahrens

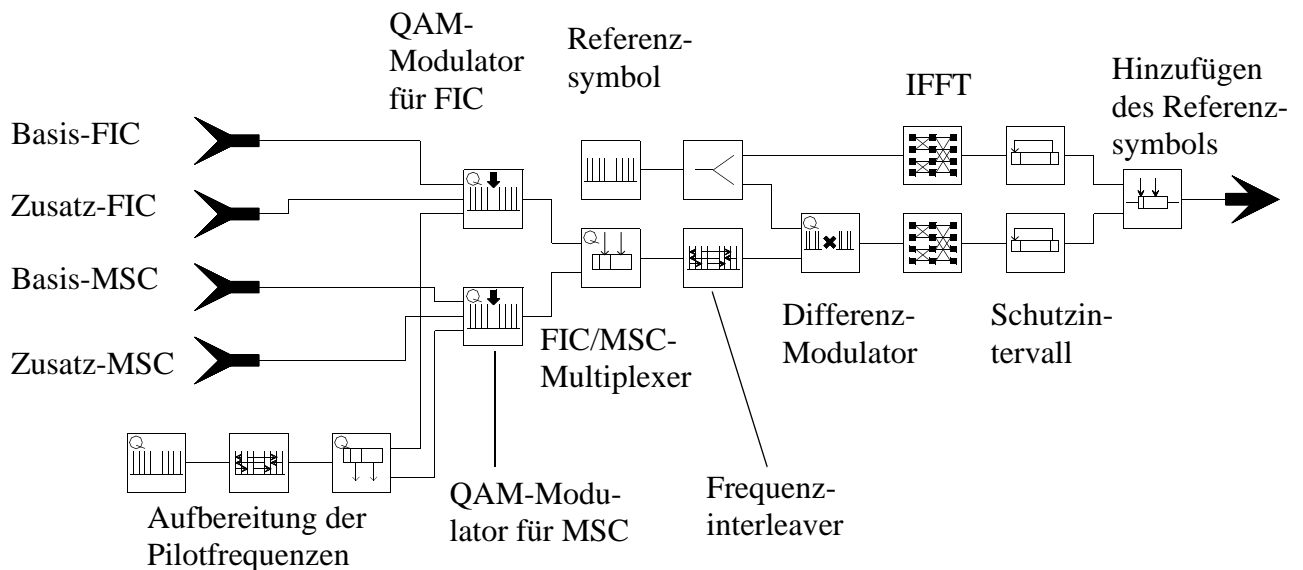


Bild 5 PTOLEMY-Galaxie des hybriden OFDM-Modulators

der Signalzustand $\underline{y}_{i,n}$ des Unterträgers i im Symbol n ergibt sich aus dem Signalzustand des Trägers i im vorangegangenen Symbol $n-1$ gemäß

$$\underline{y}_{i,n} = \frac{\underline{y}_{i,n-1}}{|\underline{y}_{i,n-1}|} \cdot \underline{x}_{i,n} \quad n = 2, \dots, N \quad (1)$$

wobei $\underline{x}_{i,n}$ der vom QAM-Modulator erzeugte komplexe Signalzustand entsprechend den Signalzuständen in Bild 2 oder Bild 3 und N die Anzahl der Symbole je DAB-Rahmen (76 bei Modus I) ist. Durch die Verwendung der differentiellen Modulation ist bei DAB eine Rückgewinnung der kohärenten Trägerphase nicht erforderlich. Die komplexen Werte des Symbols $n = 1$ entsprechen dem Referenzsymbol, das als 1. Symbol eines DAB-Rahmens übertragen wird. Die Normierung in Gl. (1) hat zur Folge, dass nur bezüglich der Phasen eine differentielle Modulation ausgeführt wird, nicht jedoch bezüglich der Amplituden.

Die anschließende inverse diskrete Fouriertransformation (IFFT) sowie die zyklische Fortsetzung bei der Generierung des sog. Schutzintervalls sind identisch mit dem DAB-Verfahren.

Das am Ausgang des Modulators erzeugte Signal ist so aufgebaut, dass die Basisdaten des FIC und des MSC mit einem herkömmlichen DAB-Empfänger empfangen werden können. Durch den geringeren Abstand der Signalzustände von den Entscheidungsschwellen ist jedoch der bereits oben erwähnte größere Störabstand erforderlich.

3.2 Der Übertragungsweg

Der den Funkkanal beschreibende Stern des PTOLEMY-Universums in Bild 4 führt eine Faltung des Sendesignals mit der zeitvarianten Impulsantwort des Kanals durch [3]. Die Simulation findet im äquivalenten Tiefpassbereich statt. Zusätzlich zum komplexwertigen Ausgangssignal liefert dieser Baustein eine Information über den reellen, zeitabhängigen Übertragungsfaktor des Übertragungsweges, um bei der Simulation den Fall einer idealen Kanalschätzung nachbilden zu können.

Ferner kann ein additives Rauschsignal mit frequenzkonstantem Leistungsdichtespektrum und näherungsweise gaußförmiger Amplitudenverteilung zum Nutzsignal hinzugefügt und der entstehende Störabstand berechnet werden.

3.3 OFDM-Demodulator

Bild 6 zeigt die PTOLEMY-Galaxie des OFDM-Demodulators. Dabei wird zunächst wie bei DAB durch eine zeitliche Fensterung das Schutzintervall beseitigt und dann jedes Symbol durch diskrete Fouriertransformation in den Frequenzbereich transformiert. In dem hier beschriebenen Simulationsprogramm wurde auf eine automatische Festlegung und Regelung des Empfangsfensters verzichtet, da sie sich nicht von der Vorgehensweise bei DAB unterscheidet. Durch das Vorhandensein eines Referenzsymbols kann die Frequenz- und Rahmensynchronisation wie beim herkömmlichen DAB durchgeführt werden.

Bei der anschließenden differenziellen Demodulation müssen die komplexen Signalzustände $\underline{x}_{i,n}$ aus Gl. (1) zurückgewonnen werden. Die gesendeten Signalzustände $\underline{y}_{i,n}$ werden auf dem Übertragungsweg mit dem komplexen Übertragungsfaktor $\underline{H}_{i,n}$ bewertet, so dass sich der empfangene Signalzustand $\underline{z}_{i,n}$ gemäß

$$\underline{z}_{i,n} = \underline{H}_{i,n} \cdot \underline{y}_{i,n} \quad (2)$$

ergibt. Die differenzielle Demodulation erfolgt nun wiederum nur bezüglich der Phase mit der Beziehung

$$\hat{\underline{x}}_{i,n} = \underline{z}_{i,n} \cdot \frac{\underline{z}_{i,n-1}^*}{|\underline{z}_{i,n-1}|} = \frac{\underline{H}_{i,n}}{\underline{H}_{i,n-1}} \cdot |\underline{H}_{i,n-1}| \cdot \underline{x}_{i,n} \quad (3)$$

wobei $\hat{\underline{x}}_{i,n}$ den Schätzwert von $\underline{x}_{i,n}$ darstellt und * den konjugiert komplexen Wert kennzeichnet. Aus dem Faktor $|\underline{H}_{i,n-1}|$ ergibt sich die Notwendigkeit, auf der Empfangsseite eine Kanalschätzung bezüglich des Übertragungsfaktors durchzuführen. Hierfür werden ähnlich wie beim DVB-T-Standard Pilotensignale verwendet. Der Ausdruck $\underline{H}_{i,n}/\underline{H}_{i,n-1}$ ist bei langsamer Geschwindigkeit ungefähr gleich 1, bei größerer Geschwindigkeit führt er zu einer zusätzlichen Fehlerquelle bei der differenziellen Demodulation.

3.4 Pilotensignale zur Kanalschätzung

Die Auswahl der Pilotfrequenzen lehnt sich eng an die bei DVB-T verwendete Vorgehensweise an [4]. Die Anzahl der Pilotfrequenzen wird an die Anzahl der OFDM-Träger des jeweiligen DAB-Modus angepasst [5]. So werden hier ebenfalls kontinuierliche Pilote (continual pilots) und verstreute Pilote (scattered pilots) in das übertragene Signal eingefügt. Die Anzahl der verwendeten

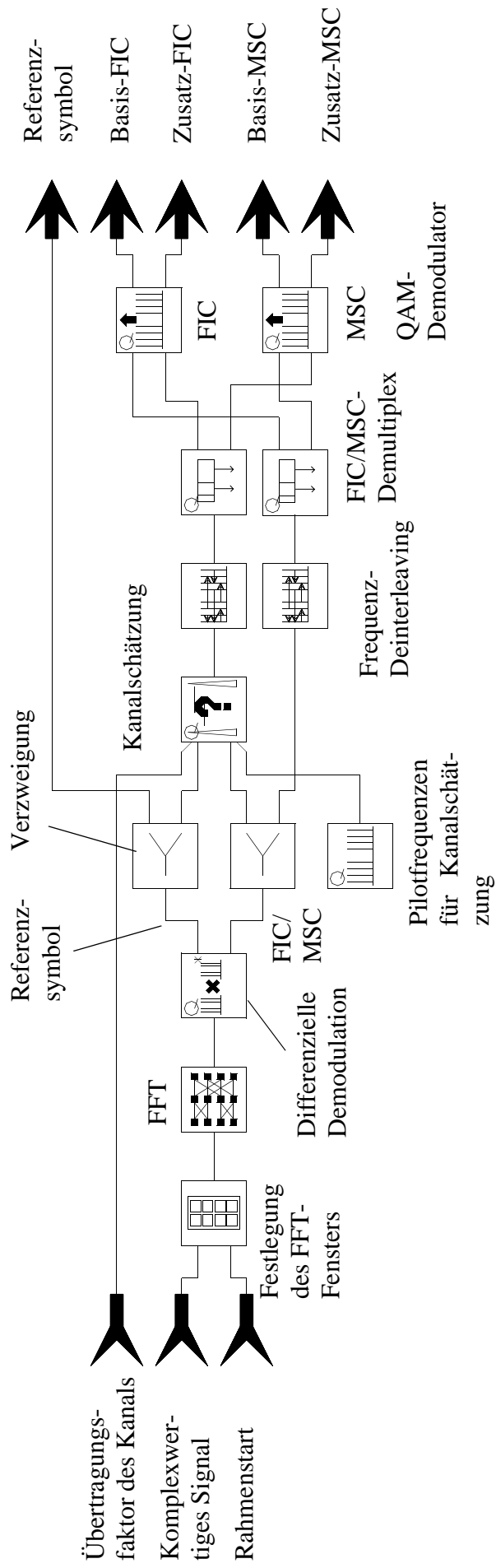


Bild 6 PROLEMY-Galaxie des hybriden OFDM-QAM-Demodulators

Pilote ist in Tabelle 1 angegeben.

Übertragungsmodus	Anzahl K der Träger	Anzahl verstreute Pilote	Anzahl kontinuierliche Pilote	Anzahl zusammenfallender Pilote	Anzahl der für Zusatzdaten nutzbaren Träger
I	1 536	128	40	10	1 378
II	384	32	12	3	343
III	192	16	8	2	170
IV	768	64	20	5	689

Tabelle 1: Anzahl der Pilotfrequenzen bei QAM

Aufgrund der Pilotfrequenzen reduziert sich die Bruttobitrate der Zusatzdaten im Modus I von 2,304 Mbit/s auf maximal 2,067 Mbit/s bei Verwendung von 16-QAM bzw. von 4,608 Mbit/s auf 4,134 Mbit/s bei 64-QAM.

Da der DAB-Standard keine Pilotfrequenzen vorsieht, haben die Piloten keine festgelegte Phase, sondern lediglich eine festgelegte Amplitude. Die Pilotträger werden wegen der Kompatibilität zu DAB weiterhin 4-PSK-moduliert. Sie haben jedoch eine konstante Amplitude, um den reellen Übertragungsfaktor des Kanals schätzen zu können.

Die Pilotfrequenzen werden in einem Stern der Galaxie OFDM-Modulator (vgl. Bild 5) festgelegt. Wegen des später durchgeführten Frequenzinterleavings werden die festgelegten Pilotfrequenzen zuvor einem Deinterleaving unterworfen, so dass sie nach dem Frequenzinterleaving an der korrekten Position sind.

3.5 Viterbi-Decodierung mit Soft Decision

Zur Verringerung der Bitfehlerhäufigkeit wird auch im Zusatzkanal des MSC und FIC eine Faltungscodierung durchgeführt. Die Decodierung erfolgt mit einem Viterbi-Decodierer mit Soft Input. Hierzu wird im OFDM-Demodulator die Distanz des empfangenen Signalzustandes zu den nominellen, mit dem Übertragungsfaktor des Funkkanals multiplizierten Signalpunkten berechnet. In Bild 7 ist die Vorgehensweise anhand der 16-QAM dargestellt. Dabei sind d_{n0} und d_{n1} die Distanzen des n -ten Bits ($n = 1 \dots 4$) im vierstelligen Codewort zu den nominellen Signalpunkten 0 und 1. Da der in Bild 7 angenommene empfangene Signalpunkt zum Punkt 1000 am nächsten liegt, ist $d_{11} = d_{20} = d_{30} = d_{40}$. Die Distanz wird also jeweils zu dem für das jeweilige Bit nächstliegenden Signalzustand ermittelt. Für jedes Bit eines Codewortes werden somit zwei Metriken an den Viterbi-Decodierer weitergegeben, wobei zur Nachbildung realer Systeme eine Quantisierung, d.h. eine Umwandlung der Metrik in Integerzahlen durchgeführt wird.

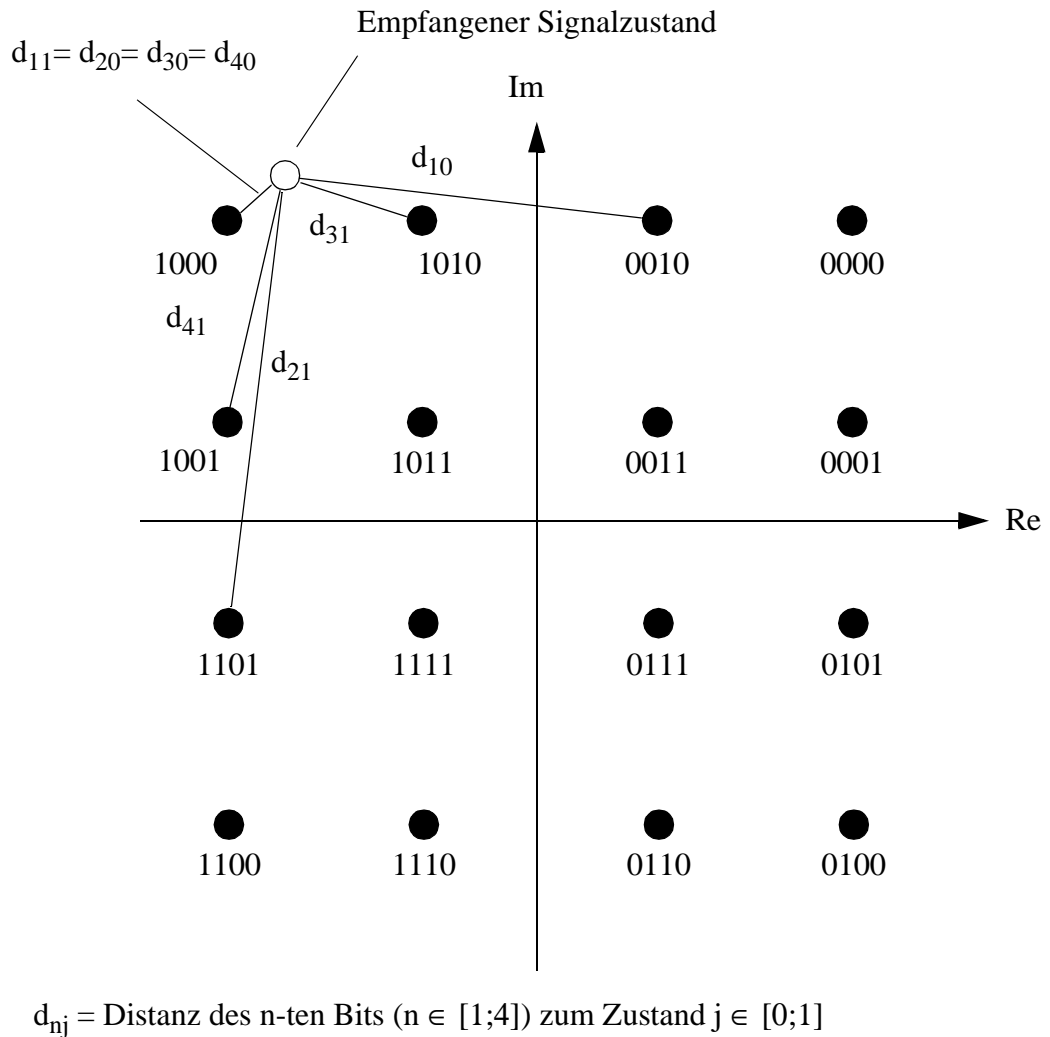


Bild 7 Metrikberechnung für Soft Decision im Viterbi-Decodierer bei 16-QAM

4. Ermittlung der Bitfehlerhäufigkeit durch Simulation

4.1 Bitfehlerhäufigkeit der DAB-Basisdaten

Beim Übergang von 4-PSK auf 16-QAM oder 64-QAM ist es unvermeidlich, dass die Empfindlichkeit des Signals gegenüber Störeinflüssen zunimmt. Bei unveränderter mittlerer Sendeleistung rücken die einzelnen Signalzustände enger zusammen. Bei einer mittleren Leistung der komplexen Hüllkurve des Sendesignals von 1 beträgt bei 4-PSK der Abstand a_4 der Signalzustände von der Entscheidungsschwelle

$$a_4 = 1/(\sqrt{2}) \quad (4)$$

Bei 16-QAM beträgt der kleinste Abstand von den Koordinatenachsen (vgl. Bild 2) nur noch

$$a_{16} = \frac{\alpha}{2} \cdot x = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{2}{\alpha} + \frac{4}{\alpha^2}}} \quad (5)$$

Für die Rückgewinnung der DAB-Basisdaten ist nur der Quadrant maßgebend, in dem sich der empfangene Signalzustand befindet, so dass auch bei 16-QAM die Koordinatenachsen als Entscheidungsschwellen für die Detektion der DAB-Basisdaten dienen. Für die symmetrische Anordnung der Signalzustände ($\alpha=1$) ergibt sich ein minimaler Abstand von $a_{16} = 0,45 a_4$.

Entsprechend ergibt sich bei der Übertragung mit 64-QAM

$$a_{64} = \frac{\alpha}{2} \cdot x = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{6}{\alpha} + \frac{14}{\alpha^2}}} \quad (6)$$

als minimaler Abstand der Signalzustände von den Koordinatenachsen bzw. Entscheidungsschwellen. Für $\alpha=1$ ist $a_{64} = 0,22 a_4$.

Treten am Eingang des Empfängers zusätzliche additive Störungen auf, so erhöht sich die mittlere Bitfehlerhäufigkeit. Bild 8 zeigt die durch Simulation ermittelte Bitfehlerhäufigkeit der DAB-Basisdaten vor der Viterbi-Decodierung bei Störung durch additives, näherungsweise gaußverteiltes Rauschen mit vorgegebenem Störabstand. Der Simulation für den DAB-Modus I liegt das Kanalmodell „Hilly Terrain I“ zugrunde, wobei das Laufzeitprofil mit 30 Laufzeiten nachgebildet wurde. Jeder dieser Laufzeiten wurde ein Dopplerspektrum bestehend aus 21 Dopplerfrequenzen mit näherungsweise

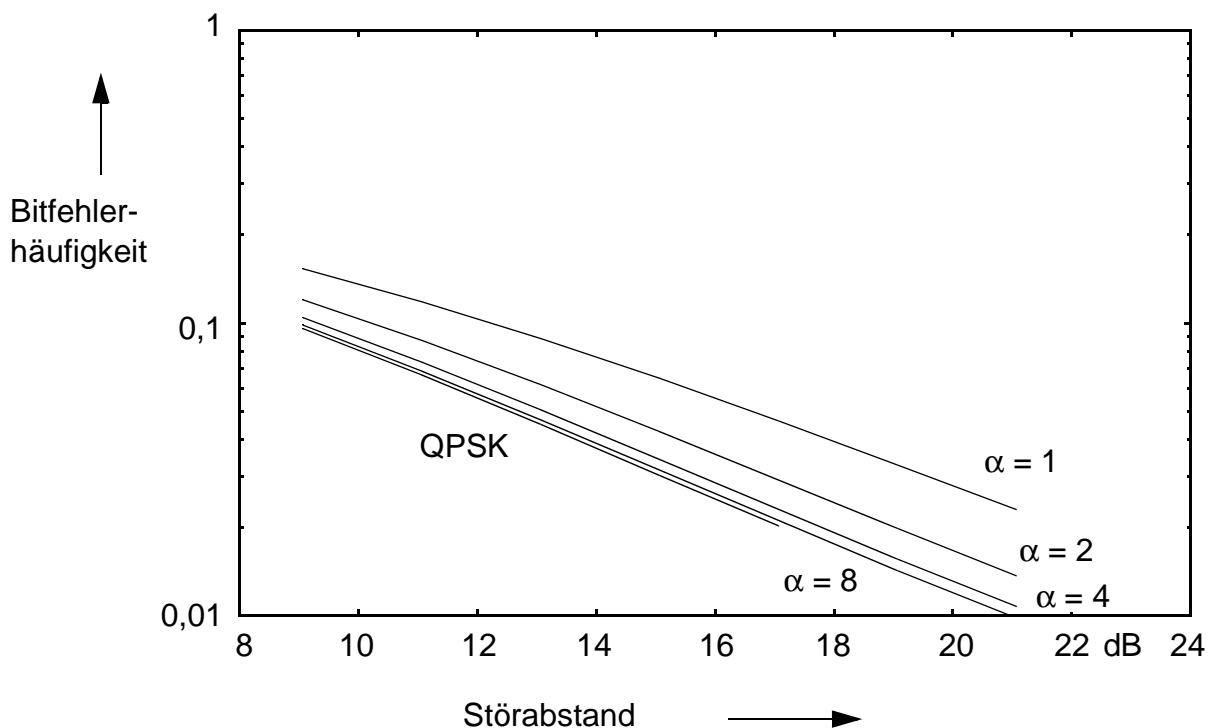


Bild 8 Bitfehlerhäufigkeit der DAB-Daten vor Viterbi-Decodierung bei 16-QAM

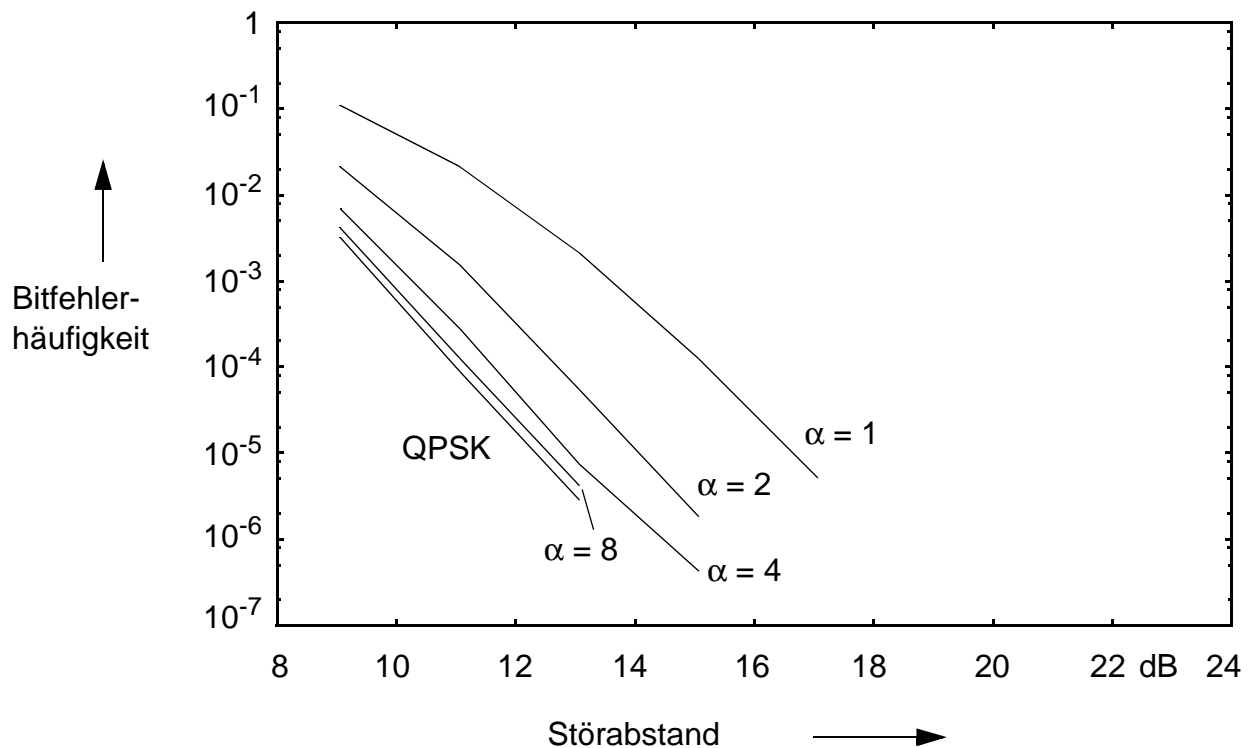


Bild 9 Bitfehlerhäufigkeit der DAB-Daten nach Viterbi-Decodierung bei Coderate 1/2 und Übertragung der Zusatzdaten mit 16-QAM

Clarke-Aulin-Verteilung zugeordnet. Die der Fahrzeuggeschwindigkeit proportionale maximale Dopplerfrequenz beträgt 10 Hz. Die Schätzung des reellen Übertragungsfaktors für jede Trägerfrequenz wurde als ideal angenommen. Bei einer Bitfehlerhäufigkeit von 3% ergibt sich eine erforderliche Zunahme des Störabstandes von etwa 4,5 dB. Rückt man die 4 Signalzustände eines Quadranten weiter vom Ursprung weg, so verringert sich die Bitfehlerhäufigkeit der DAB-Basisdaten. Sie ist für $\alpha=8$ nur noch geringfügig höher als bei 4-PSK. Allerdings steigt dafür die Bitfehlerhäufigkeit der Zusatzdaten, wie im nächsten Abschnitt gezeigt wird.

Die gleichen Verhältnisse ergeben sich für die Bitfehlerhäufigkeit nach der Viterbi-Decodierung, wobei als Eingangssignal des Viterbi-Decoders ein mehrstufiges Signal verwendet wird (Soft Decision). Bild 9 zeigt die Bitfehlerhäufigkeit bei einer Coderate 1/2. Für die äquidistante Anordnung der Signalzustände mit $\alpha=1$ ergibt sich wieder eine Erhöhung des erforderlichen Störabstandes um etwa 4,5 dB, während sich z. B. für $\alpha=8$ die Bitfehlerhäufigkeit der Basisdaten bei 16-QAM nur unwesentlich gegenüber 4-PSK erhöht. Werden die DAB-Daten innerhalb einer 64-QAM übertragen, so ergibt sich eine weitere Erhöhung der Bitfehlerhäufigkeit, da die Signalzustände dichter benachbart sind als bei 16-QAM. Wie Bild 10 zeigt, ist bei einer Bitfehlerhäufigkeit von 10^{-5} ein um nahezu 8 dB größerer Störabstand erforderlich als bei der Aussendung von 4-PSK-Signalen.

4.2 Bitfehlerhäufigkeit der Zusatzdaten

Während die Bitfehlerhäufigkeit der DAB-Basisdaten mit steigendem Wert α geringer wird, nimmt die Bitfehlerhäufigkeit der Zusatzdaten erwartungsgemäß zu, da die Signalpunkte innerhalb eines Quadranten mehr und mehr zusammenrücken. Bei einer mittleren Leistung der Signalzustände von 1

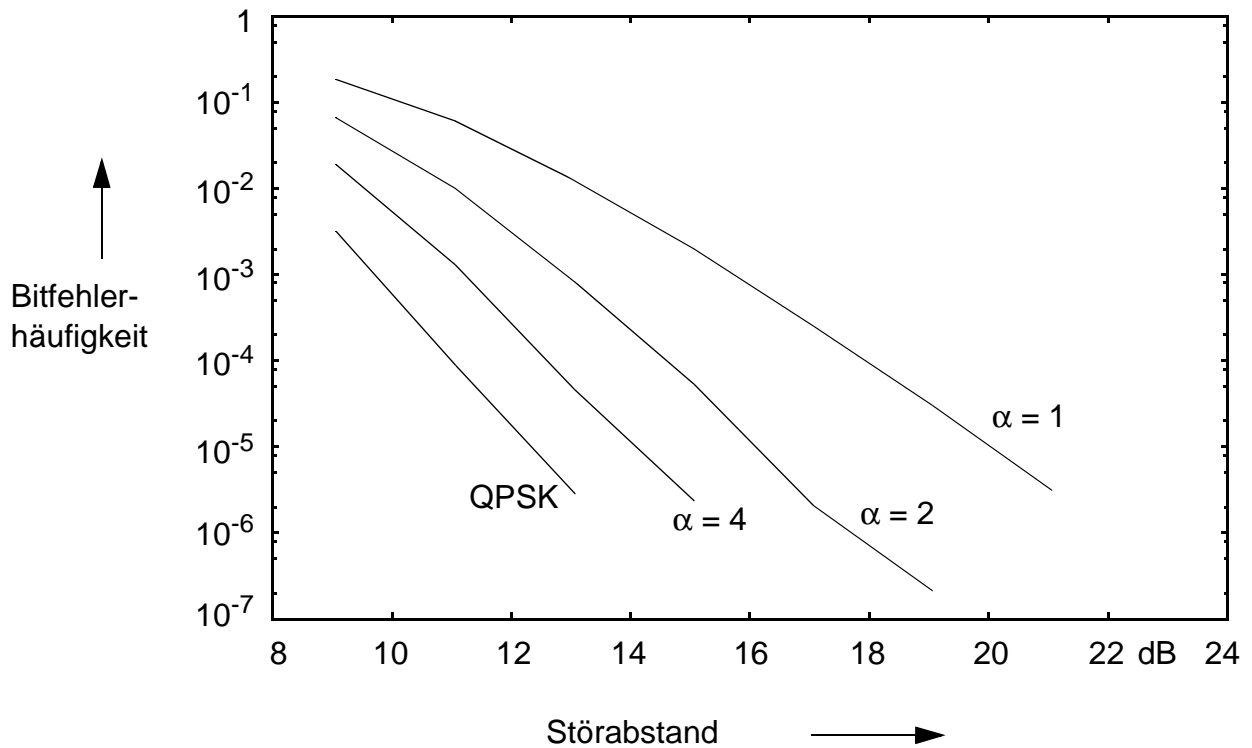


Bild 10 Bitfehlerhäufigkeit der DAB-Daten nach Viterbi-Decodierung bei Coderate 1/2 und Übertragung der Zusatzdaten mit 64-QAM

beträgt der Abstand der Signalzustände innerhalb eines Quadranten bei 16-QAM

$$x_{16} = \frac{1}{\sqrt{\frac{\alpha^2}{2} + \alpha + 1}} \quad (7)$$

und bei 64-QAM

$$x_{64} = \frac{1}{\sqrt{\frac{\alpha^2}{2} + 3\alpha + 7}} \quad (8)$$

Dieser Sachverhalt ist in Bild 11 für die Bitfehlerhäufigkeit vor der Viterbi-Decodierung und in Bild 12 für die Bitfehlerhäufigkeit nach der Viterbi-Decodierung bei einer Coderate 1/2 dargestellt. Für eine Fehlerhäufigkeit von 10^{-5} nach der Viterbi-Decodierung ist bei $\alpha=1$ ein Störabstand von 18 dB erforderlich.

Für die Übertragung der Zusatzdaten mit 64-QAM ergibt sich die in Bild 13 dargestellte Abhängigkeit der Bitfehlerhäufigkeit vom Störabstand. Hierbei wurde die Coderate auf 1/4, halbiert, so dass sich dieselbe Nettobitrate für die Zusatzdaten wie bei 16-QAM ergibt. Für eine Bitfehlerhäufigkeit von 10^{-5} ist nun bei $\alpha=1$ ein Störabstand von etwa 19,5 dB erforderlich, so dass die Verwendung einer 64-QAM nur bei sehr guten Störabständen einen Vorteil bringen kann.

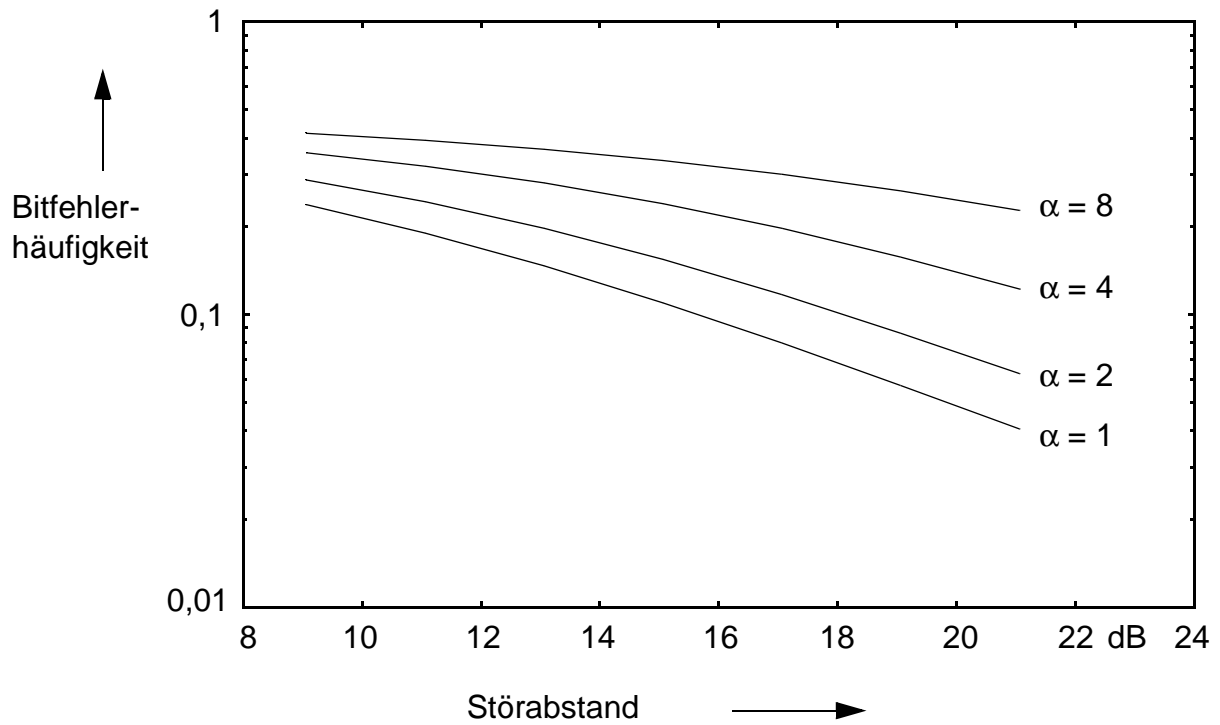


Bild 11 Bitfehlerhäufigkeit der Zusatzdaten vor Viterbi-Decodierung bei 16-QAM

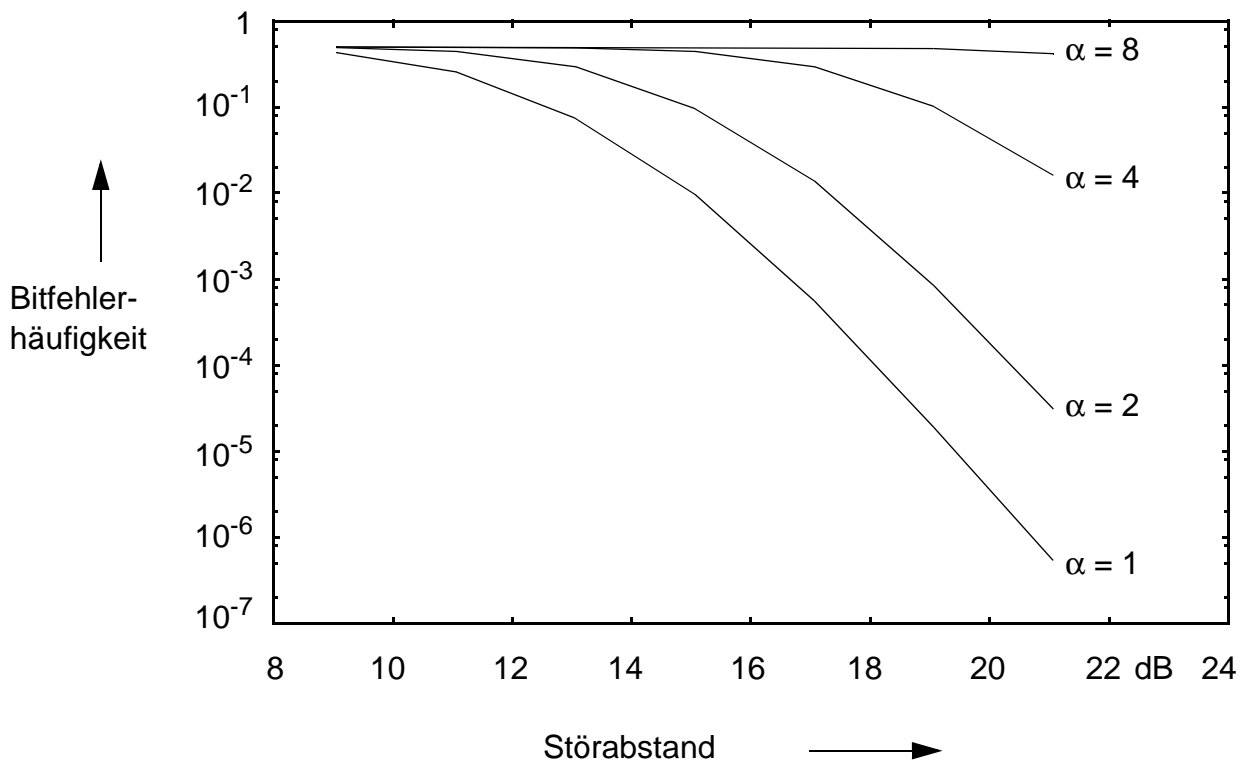


Bild 12 Bitfehlerhäufigkeit der Zusatzdaten nach Viterbi-Decodierung bei Coderate 1/2 und Übertragung mit 16-QAM

5. Zusammenfassung und Ausblick

In den vorangegangenen Abschnitten wurde ein hybrides Modulationsverfahren beschrieben, das zum DAB-Standard kompatibel ist, bei Verwendung eines speziellen Empfängers aber eine höhere Übertragungsgeschwindigkeit ermöglicht. Mit einem herkömmlichen DAB-Empfänger kann der DAB-Basisdatenstrom empfangen werden, der entweder einen Multiplex von mehreren Audiosigna-

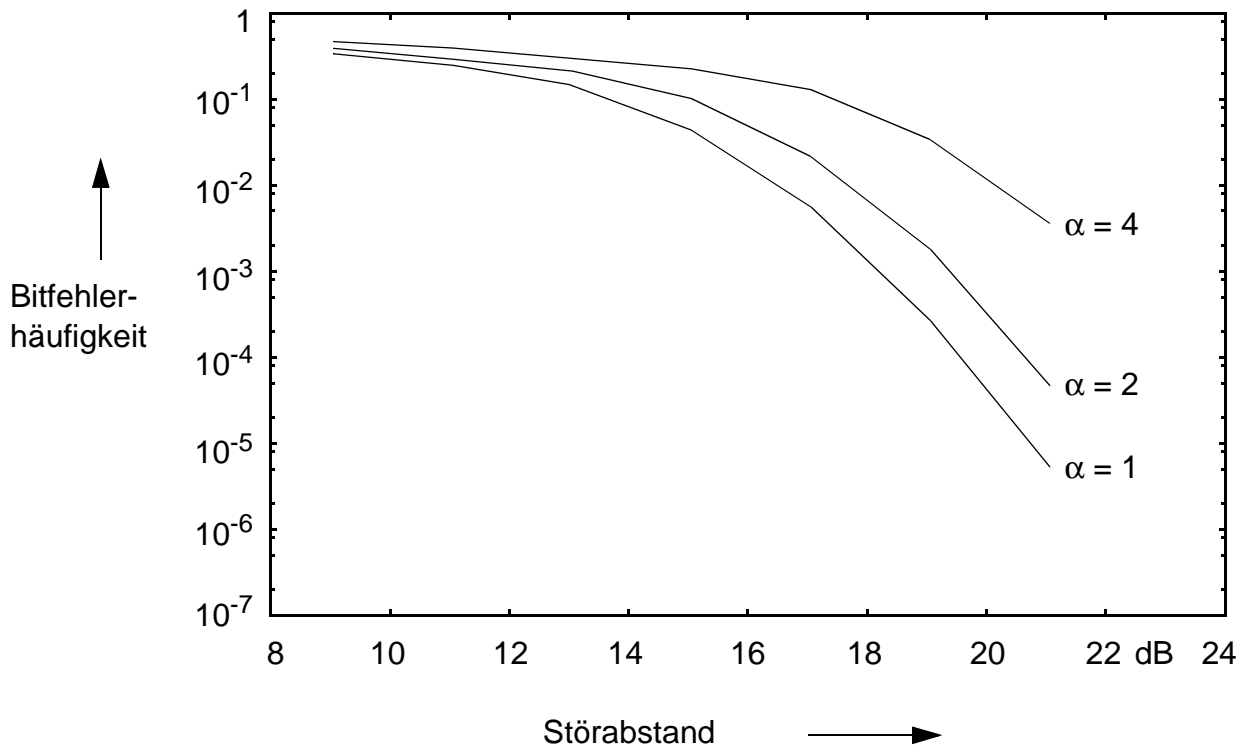


Bild 13 Bitfehlerhäufigkeit der Zusatzdaten nach Viterbi-Decodierung bei Coderate 1/4 und Übertragung mit 64-QAM

len enthält oder die Basisebene eines hierarchischen MPEG-Videosignals. Durch das Hinzufügen weiterer Signalzustände wird das erweiterte DAB-Signal jedoch empfindlicher gegenüber additivem Rauschen und Dopplerverschiebungen bei bewegtem Empfang. Somit muss für die Übertragung hybrider DAB-Signale ein in ausreichendem Maße vergrößerter Störabstand hergestellt werden können. Je geringer die mögliche Vergrößerung des erforderlichen Störabstandes ist, desto größer muss der Faktor α gewählt werden, um die Bitfehlerhäufigkeit der Basisdaten nicht zu sehr zu erhöhen. Desto größer ist aber auch die Bitfehlerhäufigkeit der Zusatzdaten, so dass bei diesen Daten eine geringere Coderate erforderlich ist. Desto geringer ist dann aber auch die zusätzlich übertragbare Bitrate. Eine Erhöhung der Bitrate ist somit möglich, setzt aber einen ausreichenden Störabstand voraus.

- [1] Sostawa, B.: Videoübertragung in einem DAB-Kanal. In: Beutler, R., Prosch, Th. (Hrsg.): Messung und Modellierung von Funkkanälen. ISBN-Nr. 3-922308-84-8. Stuttgart 1998
- [2] European Telecommunication Standard ETS 300 401: Radio broadcasting systems; Digital Audio Broadcasting (DAB to mobile, portable and fixed receivers. ETSI 1997
- [3] Hagemeyer, H.T.: Einfluß des Funkkanals auf die Bitfehlerhäufigkeit bei DAB. In: Beutler, R., Prosch, Th. (Hrsg.): Messung und Modellierung von Funkkanälen. ISBN-Nr. 3-922308-84-8. Stuttgart 1998
- [4] European Telecommunication Standard ETS 300 744: Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for digital Terrestrial television (DVB-T). ETSI 1997
- [5] Gasch, H.: Simulation einer hybriden DAB-Übertragung. Diplomarbeit am Institut für Nachrichtenübertragung, Universität Stuttgart 1999.