

Einfluß des Funkkanals auf die Bitfehlerhäufigkeit bei DAB

Hanns Thilo Hagmeyer
Institut für Nachrichtenübertragung
Universität Stuttgart

Zusammenfassung

Mit dem an der Universität von Kalifornien in Berkeley entwickelten Simulationswerkzeug PTOLEMY wurde ein Rechenprogramm zur Simulation einer DAB-Übertragungsstrecke erstellt. Es erlaubt die Ermittlung der Bitfehlerhäufigkeit vor und nach der empfangsseitigen Viterbi-Decodierung des Signals. Die Simulation zeigt, daß bei zeitvarianter Mehrwegeausbreitung, wie sie bei mobilem Empfang vorliegt, die Restfehlerhäufigkeit nach der Viterbi-Decodierung vom Verzögerungs-Doppler-Spektrum des Übertragungskanals abhängig ist. Hierbei ist ein Zusammenhang zwischen der Bitfehlerhäufigkeit und der Standardabweichung der Empfangsleistung bzw. des Störabstandes festzustellen. Das Simulationsprogramm erlaubt ferner die Berechnung der komplexen Hüllkurve eines DAB-Empfangssignals, das nach einer D/A-Umsetzung und I/Q-Modulation in einen realen DAB-Empfänger eingespeist werden kann.

1. Ermittlung der Bitfehlerhäufigkeit durch Simulation mit PTOLEMY

An der Universität von Kalifornien in Berkeley wurde ein Simulationswerkzeug mit der Bezeichnung PTOLEMY entwickelt, das sich sehr gut für die Simulation von Übertragungssystemen eignet. Das objektorientierte Konzept von Ptolemy erlaubt eine sehr übersichtliche Programmierung von Übertragungssystemen. In Ptolemy werden die einzelnen Objekte als Sterne bezeichnet, die zu sog. Galaxien zusammengefaßt werden können. Ein komplettes, lauffähiges Programm wird als Universum bezeichnet.

Bild 1 zeigt das Universum für eine DAB-Übertragungsstrecke im Modus I. Die Anordnung und Verknüpfung der Sterne entspricht unmittelbar dem Blockschaltbild einer DAB-Übertragungsstrecke. Im Gegensatz zu einem FORTRAN- oder C-Programm besitzt das Ptolemy-Universum kein vom Benutzer geschriebenes Hauptprogramm. Durch die Verknüpfung der Sterne mit dem graphischen Entwicklungswerkzeug Pigi (Ptolemy interactive graphical interface) wird das Hauptprogramm (Scheduler) automatisch erstellt.

Das in Bild 1 dargestellte Universum erlaubt die Bildung eines Multiplexrahmens mit 6 Audioprogrammen im MSC (main service channel) und den FIC-Steuerdaten (fast information channel) [1]. Die zur Sendeseite des DAB-Systems gehörenden Sterne und Galaxien sind auf der linken oberen Seite abgebildet. Die bei der Simulation verwendeten Audiodaten werden einer Datei mit digitalisierten Tonsignalen entnommen. Die Audiodaten werden vor der sendeseitigen Multiplexbildung einer Energieverteilung (energy dispersal), einer Faltungscodierung und einer zeitlichen Verschachtelung (time interleaving) unterworfen. Man erkennt, daß bei den FIC-Daten kein Zeit-Interleaving durchgeführt wird. Auf der unteren Seite des Bildes sind die Sterne und Galaxien plaziert, die den Empfänger nachbilden. Von den 6 Audioprogrammen werden aus Rechenzeitgründen nur zwei Programme decodiert. Zwischen Sender und Empfänger befindet sich ein Stern, der den Funkkanal repräsentiert. Dem DAB-Signal kann additives Gaußverteiltes Rauschen zugefügt werden. Die Simulation des Funkkanals wird im äquivalenten Basisbandbereich durchgeführt.

DAB Modus I

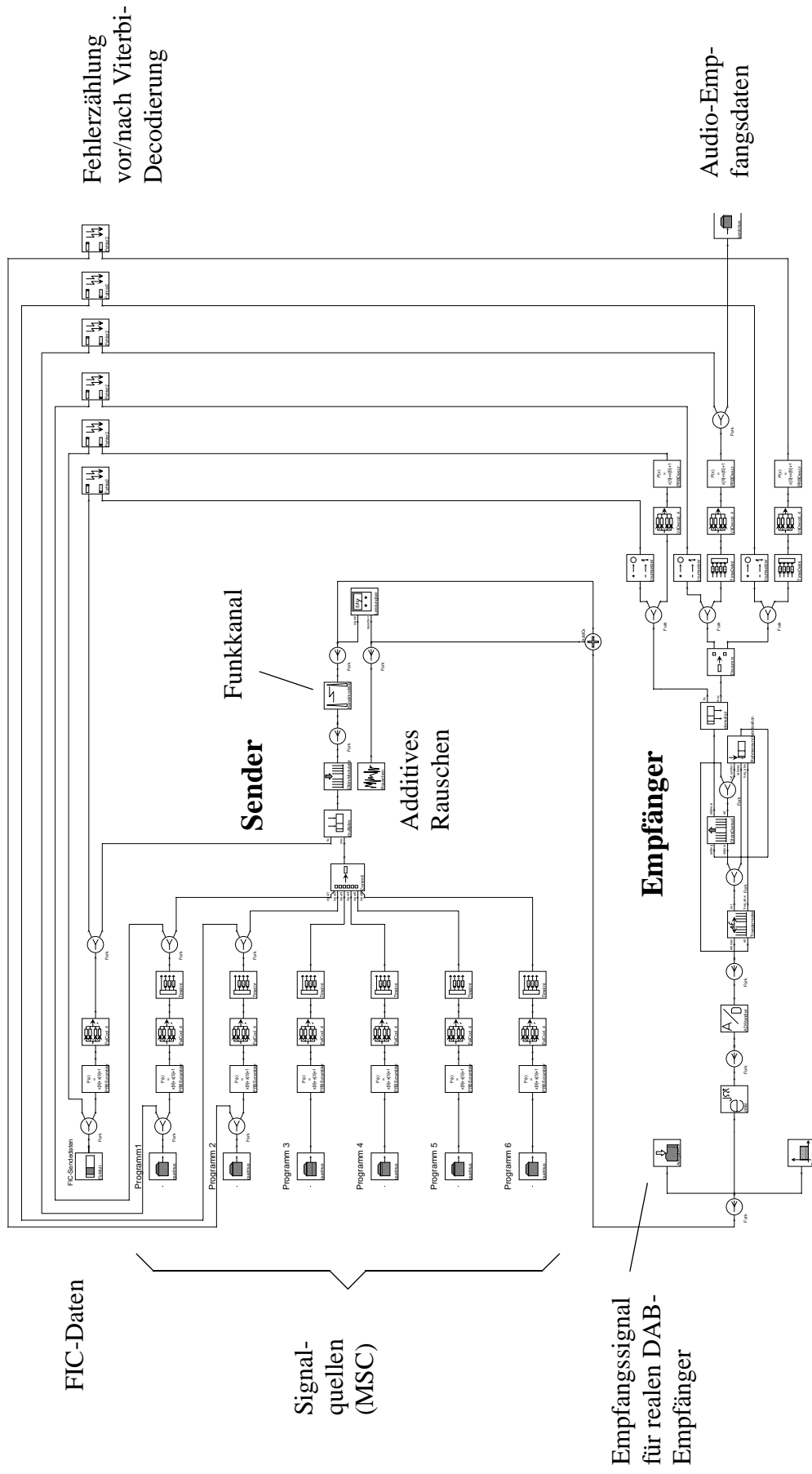


Bild 1 PTOLEMY-Universum für DAB-Modus I

Im rechten oberen Teil des Bildes findet ein Vergleich der Sende- und Empfangsdaten statt, um die Bitfehlerhäufigkeit zu bestimmen. Der Fehlervergleich wird sowohl mit den faltungsco-dierten Daten durchgeführt, als auch mit den ursprünglichen, uncodierten Daten, um die Fehlerhäufigkeit vor und nach der Viterbi-Decodierung zu ermitteln. Die Fehlerhäufigkeit nach der Viterbi-Decodierung wird für die verschiedenen Coderaten des variablen Fehlerschutzes eines digitalen Audiosignals getrennt ermittelt.

Auf der rechten unteren Seite des Bildes befindet sich ein Stern, mit dem die decodierten Audiodaten in einer Datei abgespeichert werden. Somit kann das digitalisierte Audiosignal auf der Empfangsseite in ein hörbares Signal zurückverwandelt und mit der berechneten Bitfehlerhäufigkeit verglichen werden.

Man erkennt, daß sich das DAB-Simulationssystem durch die graphische Oberfläche sehr übersichtlich und leicht bedienbar darstellt. Die für das gesamte Universum oder die für einzelne Sterne und Galaxien erforderlichen Parameter können in entsprechenden Masken vorgegeben werden.

2. Abhängigkeit der Bitfehlerhäufigkeit vom Funkkanal

Der den Funkkanal repräsentierende Ptolemy-Stern führt eine Faltung des Sendesignals mit der zeitvarianten Impulsantwort des Kanals gemäß Gl. (1) durch.

$$\hat{\underline{s}}_2(m\Delta t) = \sum_{k=1}^K \left(A_k e^{j\varphi_k} \sum_{n=1}^N B_{kn} e^{j\psi_{kn}} e^{j2\pi f_{Dn} m\Delta t} \hat{\underline{s}}_1(m\Delta t - \tau_k) \right) \quad (1)$$

Hierbei sind $\hat{\underline{s}}_1(m\Delta t)$ und $\hat{\underline{s}}_2(m\Delta t)$ die Abtastwerte der komplexen Hüllkurven des Sende- und Empfangssignals im Abstand $\Delta t = 1 / 2,048 \mu s$. Die Größen A_k und φ_k repräsentieren das Laufzeitprofil, und die Größen B_{kn} und ψ_{kn} beschreiben die zu jeder Laufzeit gehörenden Dopplerverschiebungen. Die Werte A_k und B_{kn} sind entsprechend (2 a,b) so normiert, daß der simulierte Funkkanal keine Dämpfung aufweist.

$$\sum_{n=1}^N B_{kn}^2 = 1 \quad (2a) \qquad \sum_{k=1}^K A_k^2 = 1 \quad (2b)$$

Die Dopplerfrequenzen sind näherungsweise äquidistant mit

$$f_{Dn} \approx -f_{Dmax} + (n-1) \frac{2f_{Dmax}}{N-1} \quad n = 1, \dots, N \quad (3)$$

Das DAB-Simulationprogramm wurde eingesetzt, um die Bitfehlerhäufigkeit bei verschiedenen Ausbreitungsbedingungen zu ermitteln. Die Untersuchungen wurden beispielhaft anhand einer vom Institut für Höchstfrequenztechnik und Elektronik der Universität Karlsruhe berechneten Ausbreitungssituation entlang eines 5 km langen Autobahnstückes der A8 am Drakensteiner Hang durchgeführt (Bild 2). Die Ausbreitungssituation wird dabei in der Weise beschrieben, daß für insgesamt 51 Testpunkte im Abstand von 100 m die Feldstärke, die Laufzeit, der Einfallswinkel beim Empfänger und der Abstrahlwinkel der Teilwellen beim Sender

vorliegen. Die den Untersuchungen zugrundeliegende Senderkonfiguration bestand aus den Senderstandorten Aalen, Geislingen, Stuttgart, Mühlacker, Heidelberg, Hornisgrinde und Ulm, wobei im wesentlichen die drei erstgenannten zur Empfangsfeldstärke beitragen. Da für alle 7 Sender eine rundstrahlende Sendeantenne angenommen wurde, war eine Berücksichtigung des Abstrahlwinkels nicht erforderlich. Beim Empfänger wurde ebenfalls eine Antenne ohne Richtcharakteristik angenommen.

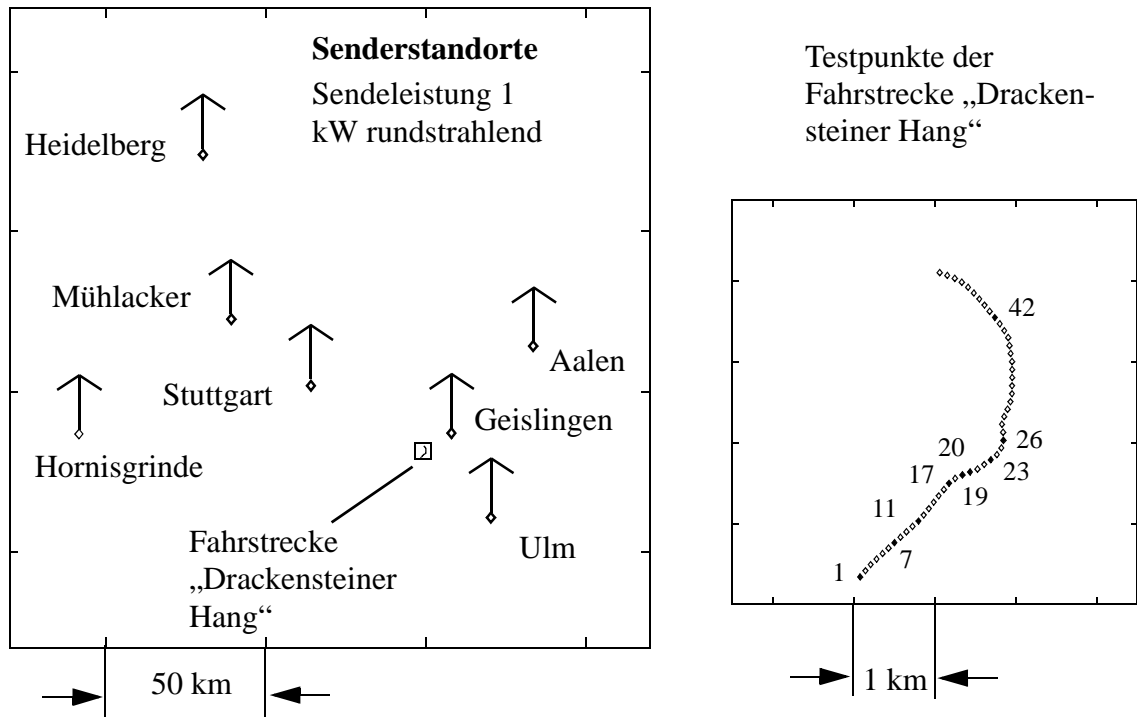


Bild 2 DAB-Testpunkte am Drackensteiner Hang

Für einige der Testpunkte ist die Abhängigkeit zwischen Bitfehlerhäufigkeit und Störabstand in Bild 3 dargestellt. Je nach Testpunkt schwankt der bei einer Coderate von $8/16 = 1/2$ für eine Bitfehlerhäufigkeit von 10^{-4} erforderliche Störabstand bei den untersuchten Punkten zwischen etwa 8 dB beim Punkt 23 und 13 dB beim Punkt 11. Der Störabstand ist dabei das logarithmierte Verhältnis von mittlerer Nutzleistung zu Störleistung am Eingang des simulierten Empfängers. Es zeigt sich, daß der erforderliche Störabstand um so größer ist, je größer die Standardabweichung der Empfangsleistung je DAB-Symbol ist. Die Standardabweichungen der Empfangsleistungen liegen bei den untersuchten Testpunkten zwischen 0,1 und 3,6 dB und sind in Bild 3 zusätzlich angegeben. Trägt man den für eine Bitfehlerhäufigkeit von 10^{-4} erforderlichen Störabstand über der Standardabweichung der Empfangsleistung je DAB-Symbol auf, so erhält man für die betrachteten Testpunkte den in Bild 4 gezeichneten Zusammenhang. Die Standardabweichung der Empfangsleistung ist vom Verzögerungs- und vom Dopplerleistungsspektrum abhängig. Je mehr voneinander unabhängige Teilwellen am Empfangsort eintreffen, desto geringer ist in der Regel die Standardabweichung der Empfangsleistung und desto geringer ist die mittlere Bitfehlerhäufigkeit bei gleichem mittlerem Störabstand. Die Häufigkeitsverteilung der Empfangsleistung und deren Standardabweichung ist nicht nur von den Beträgen A_k und B_k des Verzögerungs- und Dopplerleistungsspektrums abhängig, sondern insbesondere bei einer geringen Anzahl von Teilwellen auch von den Phasenbeziehungen φ_k und ψ_{kn} in Gl. (1).

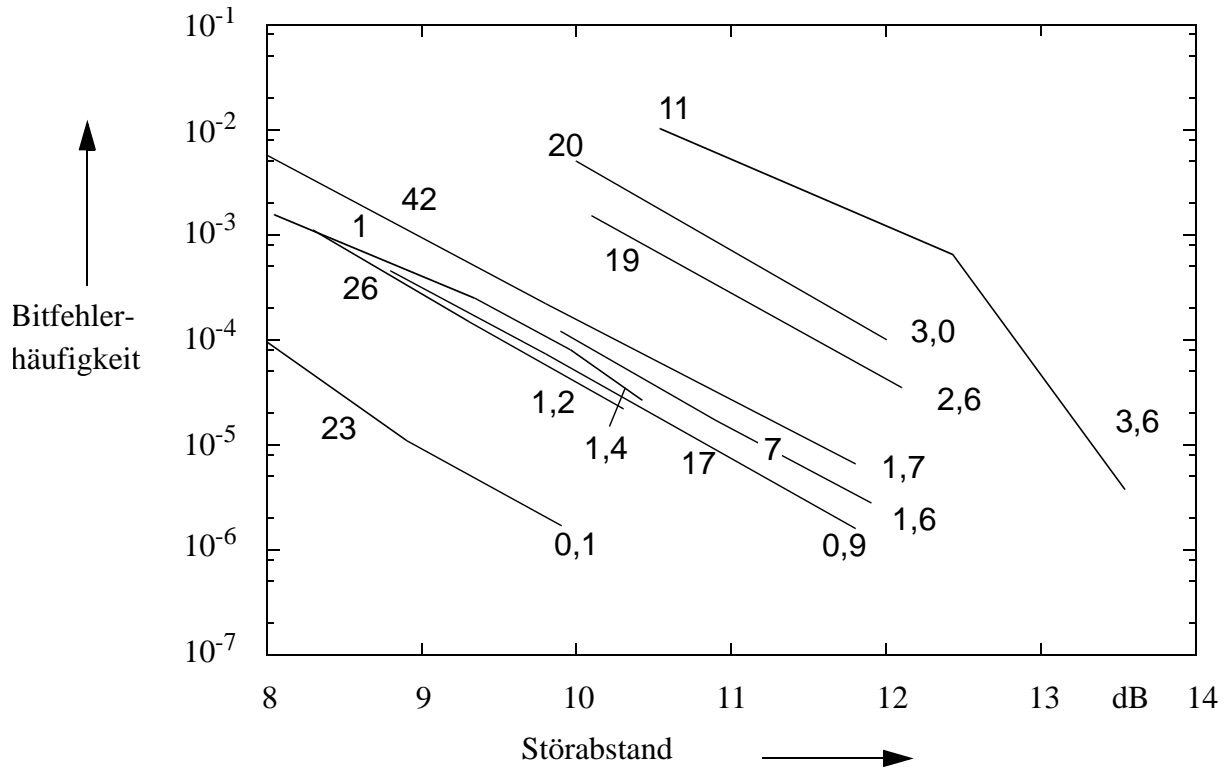


Bild 3 Bitfehlerhäufigkeit nach Viterbi-Decodierung bei Gaußischem Rauschen für verschiedene Testpunkte am Drackensteiner Hang (Coderate 8/16, max. Dopplerfrequenz 10 Hz)

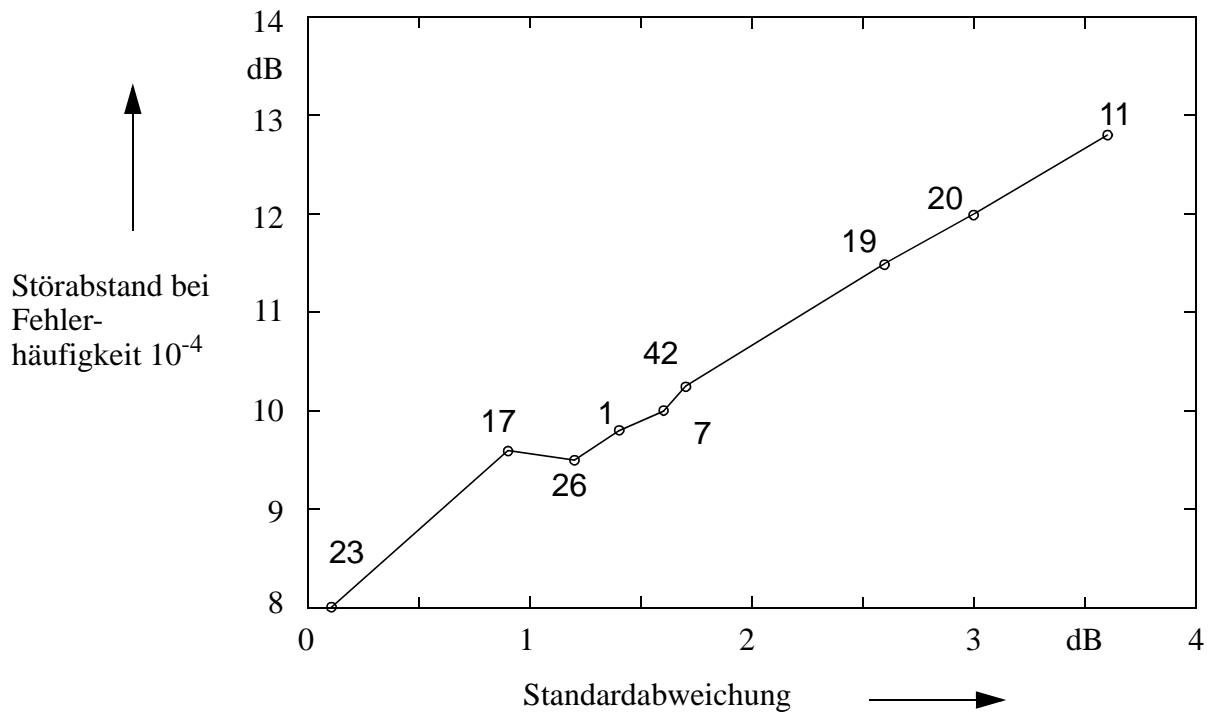


Bild 4 Zusammenhang zwischen dem für eine Bitfehlerhäufigkeit von 10⁻⁴ erforderlichen Störabstand und der Standardabweichung der Empfangsleistung

Die Häufigkeitsverteilung der Empfangsleistung weicht für die einzelnen Testpunkte mehr oder weniger stark von einer Gaußverteilung ab und wird deshalb nicht vollständig durch die Standardabweichung beschrieben. Dies gilt vor allem dann, wenn die Anzahl der Teilwellen am Empfangsort gering ist. Daher ist der in Bild 4 dargestellte Zusammenhang nicht streng monoton.

3. Signaleinspeisung in einen DAB-Empfänger

In der linken unteren Ecke des Ptolemy-Universums in Bild 1 befindet sich ein Stern, der die Abtastwerte des Real- und des Imaginärteil der komplexen Hüllkurve am Ausgang des Funkkanals in je eine Datei schreibt. Diese Daten werden gemäß Bild 5 so aufbereitet, daß sie in einen realen DAB-Empfänger eingespeist werden können. Die Abtastfrequenz des Signals besitzt den bei DAB standardisierten Wert von 2,048 MHz. Diese Abtastwertfolge wird nun in einem großen Halbleiterspeicher mit einer Speicherkapazität von 512 MB gespeichert. Dabei werden die Abtastwerte auf 8-Bit-Festkommazahlen quantisiert und mit einer $x/\sin(x)$ -Funktion im Frequenzbereich multipliziert. Ein DAB-Rahmen besteht im Modus I aus 196 608 Abtastwerten. Somit kann in dem RAM-Speicher ein DAB-Signal von etwa 130 s Dauer gespeichert werden.

Aus diesem Massen-RAM-Speicher können nun die Daten in Echtzeit ausgelesen und einem realen DAB-Empfänger zugeführt werden. Hierzu werden die 8-Bit-Abtastwertpaare des Real- und des Imaginärteils zunächst in zwei Analogsignale umgewandelt und mit je einem Tiefpaß bandbegrenzt. Mit der daraus entstehenden Normalkomponente $r(t)$ und der Quadraturkomponente $q(t)$ wird nun in einem I/Q-Modulator das hochfrequente DAB-Signal erzeugt. Dieses Signal wird auf den Antenneneingang des DAB-Empfängers gegeben.

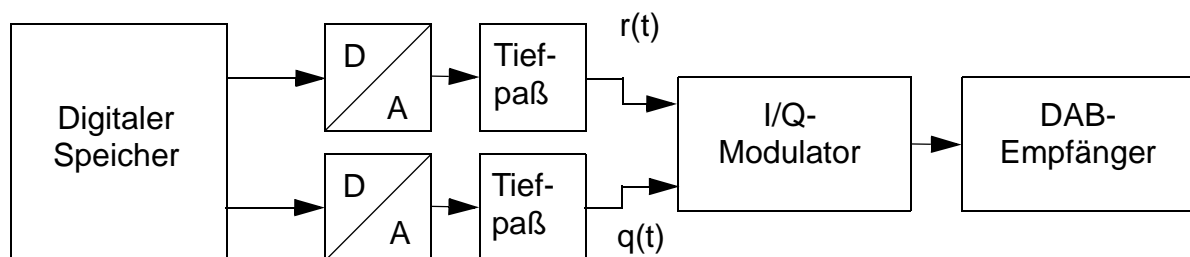


Bild 5 Erzeugung eines DAB-Empfangssignals

Damit ist es möglich, die Reaktion des DAB-Empfängers auf verschiedene Funkkanäle zu untersuchen. Parallel zu der Normal- und Quadraturkomponente des Signals kann noch ein Triggersignal in dem RAM-Speicher abgelegt werden, um für Testzwecke die Signale auf einem Oszilloskop darstellen zu können. Dadurch reduziert sich jedoch die maximale Dauer des gespeicherten DAB-Signals auf etwa 87 s.

[1] European Telecommunication Standard ETS 300 401: Radio broadcasting systems; Digital Audio Broadcasting (DAB) to mobile, portable and fixed receivers. ETSI 1997