

DFG-Schwerpunktprogramm TakeOFDM: Grundlagen und Anwendungen der Orthogonalen Frequenzmultiplex-Technik

DFG Priority Programme TakeOFDM: Basics and Applications of the Orthogonal Frequency Division Multiplexing Technique

Prof. Dr. Hermann Rohling, Technische Universität Hamburg-Harburg, rohling@tu-harburg.de

Kurzfassung

Die Abkürzung OFDM steht für Orthogonal Frequency Division Multiplexing und stellt eine digitale Mehrträger Übertragungstechnik dar. In diesem Beitrag wird das DFG-Schwerpunktprogramm TakeOFDM mit seiner technisch wissenschaftlichen Bedeutung vorgestellt. Zahlreiche neuartige Techniken und Konzepte für künftige Nachrichtenübertragungssysteme werden im Rahmen dieses Programms entwickelt und analysiert. Grundlage bildet dabei in allen Fällen die OFDM Technik, die aufgrund ihrer zahlreichen technischen und auch ökonomischen Vorteile bereits in aktuellen Systemen implementiert wurde und längst für Mobilfunksysteme der 4. Generation fest eingeplant ist. Nach einer Darstellung der grundsätzlichen Eigenschaften und Vorzüge der OFDM-Übertragungstechnik wird im zweiten Teil dieses Beitrags ein Überblick über die unterschiedlichen Teilaspekte des TakeOFDM-Programms gegeben. Diese erstrecken sich vor allem auf verschiedene Techniken der physikalischen und Datensicherungs-Schicht und werden durch ihre Ergebnisse ganz wesentlich dazu beitragen, neue Konzepte und Technologien auf Basis der OFDM-Technik für unterschiedliche Applikationen voranzutreiben.

Abstract

The term OFDM stands for Orthogonal Frequency Division Multiplexing and represents a digital multicarrier transmission technique. In this contribution, the priority programme TakeOFDM, funded by the German Research Foundation (DFG), is presented, and its technical and scientific significance is described. Numerous novel techniques and concepts are developed and analysed within the framework of this programme. In all cases, the basis is given by the OFDM technique, which has already been implemented in several systems due its various technical and economical advantages. Moreover, OFDM has become a strong candidate for 4th generation mobile communication systems. After outlining the general properties and advantages of the OFDM technique, an overview of different aspects of the TakeOFDM programme will be presented. These aspects span many techniques of the physical and data link layer, and the obtained results will be a substantial driving force for developing new concepts and technologies on the bases of the OFDM technique for various applications.

1 Die OFDM-Technik

1.1 Einleitung

In den letzten Jahren hat sich die OFDM Technik in vielen Bereichen der drahtlosen und auch der drahtgebundenen Übertragung aufgrund der technisch-wirtschaftlichen Vorteile sehr erfolgreich etabliert. Das Konzept der OFDM Übertragungstechnik hat Eingang in die Rundfunksysteme des digitalen Fernsehens (DVB-T) und Hörfunks (DAB, DRM) gefunden. Darüber hinaus wird die OFDM Technik auch in zahlreichen Kommunikationssystemen eingesetzt. Dazu zählen WLAN-Applikationen (z.B. IEEE 802.11a) und der WiMAX-Standard. Für zukünftige Mobilfunksysteme der 4. Generation wurde die OFDM Technik im Long Term Evolution (LTE) Projekt für die Downlink Strecke bereits fest ausgewählt. Aber auch im Bereich der drahtgebundenen Kommunikation ist die orthogonale Frequenzmultiplextechnik unter der Bezeichnung Discrete Multitone (DMT) in

ADSL- und VDSL-Systemen implementiert. In diesem Fall werden höchste Datenraten über einfache Telefon Kupferleitungen übertragen. Dabei wird die im OFDM System sehr einfach realisierbare Möglichkeit der Adaption an den häufig stark frequenzselektiven Übertragungskanal mit einem adaptiven und subträgerspezifischen Verfahren ausgenutzt.

Worin liegt dieser Erfolg der OFDM-Übertragungstechnik begründet? Die Antwort auf diese Frage liegt in der Charakterisierung des Übertragungskanals. Kupferleitungen sind durch Signalreflektionen geprägt und terrestrische Funkkanäle sind durch Mehrwegeausbreitung sowie durch ein zeitvariantes Verhalten charakterisiert. Das Sendesignal wird auf dem Übertragungsweg mehrfach reflektiert, und unterschiedlich verzögerte Varianten des Sendesignals erreichen den Empfänger in additiv überlagerter Form. Durch diesen physikalischen Prozess der Signalüberlagerung resultiert eine starke Störung in Form von Intersymbolinterferenzen (ISI) über viele benachbarte

Symbole hinweg. Erschwerend kommt hinzu, dass sich diese Störung über der Zeit aufgrund der Bewegung des mobilen Empfängers verändert. Entsprechend müssen diese Störungen durch einen technisch außerordentlich aufwändigen adaptiven Entzerrer wieder beseitigt werden. Die in dem beschriebenen Umfeld spezifischen Besonderheiten und Vorzüge der OFDM-Übertragungstechnik werden im Folgenden näher erläutert.

In frequenzselektiven Übertragungskanälen bietet die OFDM Technik den Vorteil einer technisch einfachen Entzerrung. Insbesondere für die DSL basierten leitungsgebundene Systeme kann der zusätzliche Vorteil einer technisch einfachen Adaption an den fast zeitinvarianten Übertragungskanal durch das sogenannte *bit loading* intensiv genutzt werden.

1.2 Grundprinzip

Der Entwurf eines Übertragungssystems orientiert sich immer an den zugrunde liegenden Eigenschaften des Übertragungskanals. Wie beschrieben, sind terrestrische Funkkanäle und einfache Kupferleitungen durch Mehrwegeausbreitungen gekennzeichnet, was bei Einträgerverfahren empfangsseitig eine aufwändige Entzerrung erfordert.

Als Alternative bietet sich hier die OFDM-Übertragungstechnik an. Das grundsätzliche Charakteristikum besteht darin, die gegebene Bandbreite in eine Vielzahl schmalbandiger und auf der Frequenzachse äquidistant angeordneter Subkanäle zu unterteilen, siehe Bild 1. Jeder dieser Subkanäle wird mit Informationssymbolen moduliert, und die additiv überlagerten Subträgersignale formen das Sendesignal. Der Effekt der geringen Bandbreite eines einzelnen Subträgers bewirkt eine entsprechend lange Symboldauer, was den Effekt der oben diskutierten Intersymbolinterferenzen erheblich reduziert.

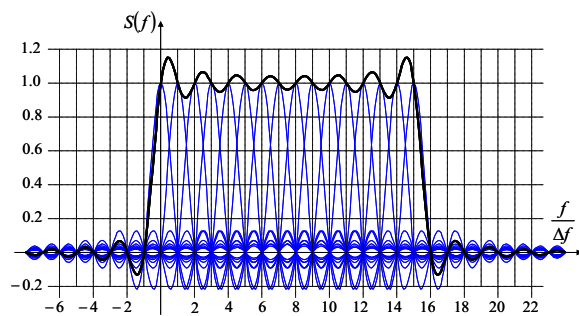


Bild 1 Spektrum eines OFDM-Signals

Zur mathematischen Beschreibung des OFDM-Prinzips in Sender und Empfänger wird eine Systembandbreite B angenommen, die in N schmalbandige Subkanäle aufgeteilt wird. Die Symboldauer T_S wird so gewählt, dass sie dem reziproken Subträgerabstand

Δf entspricht, d.h. $T_S = 1/\Delta f$. Mit diesen Voraussetzungen sind die einzelnen Subträgersignale orthogonal zueinander. Das Signal $\tilde{g}_k(t)$ von Subträger k stellt eine komplexwertige Schwingung der Frequenz $k\Delta f$ dar:

$$\tilde{g}_k(t) = \begin{cases} e^{j2\pi k\Delta f t} & t \in [0, T_S] \\ 0 & t \notin [0, T_S] \end{cases} \quad (1)$$

Verglichen mit einem Einträgerverfahren gleicher Bandbreite ist die Symboldauer N mal größer, da die gesamte Systembandbreite in N schmalbandige Subkanäle aufgeteilt wurde. Damit wird die Symboldauer insbesondere größer als die maximal im Funkkanal auftretende Umweglaufzeit. Dies reduziert wesentlich den schädlichen Effekt der Mehrwegeausbreitung. Um die Orthogonalität zwischen den Subträgern vollständig zu erhalten, wird zusätzlich ein sog. Schutzintervall (Guardintervall) der Dauer T_G in den Datenstrom eingefügt. Dieses stellt eine periodische Fortsetzung des Subträgersignals dar:

$$g_k(t) = \begin{cases} e^{j2\pi k\Delta f t} & t \in [-T_G, T_S] \\ 0 & t \notin [-T_G, T_S] \end{cases} \quad (2)$$

Die Länge T_G des Schutzintervalls orientiert sich an den zu erwartenden maximalen Umweglaufzeiten.

Auf diese Weise wird jegliche Intersymbolinterferenz vermieden, und die Entzerrung kann subträgerweise vorgenommen werden. Da die verwendeten Subträgersignale Eigenfunktionen des Kanals darstellen, wird jedes Signal lediglich in Amplitude und Phase, nicht jedoch in der Frequenz geändert. Folglich kann der Kanaleinfluss durch einen einzigen komplexwertigen Faktor pro Subträger beschrieben werden. Die Orthogonalität der einzelnen Signale ist damit nicht nur senderseitig gewährleistet, sie bleibt auch im Empfänger erhalten (siehe Bild 2), was eine sehr einfache Entzerrung ermöglicht.

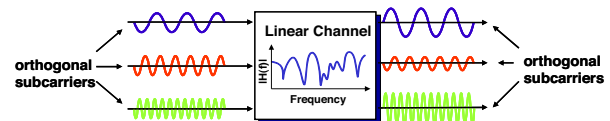


Bild 2 Orthogonalität der Subträger

Das komplette zeitkontinuierliche OFDM-Sendesignal setzt sich aus einer Überlagerung der gewichteten Subträgersignale zusammen:

$$s_n(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} S_{n,k} \cdot e^{j2\pi k\Delta f t} \quad (3)$$

Dabei kennzeichnet $S_{n,k}$ das Modulationssymbol auf Subträger k und im Symbolintervall n . Ein solches komplexes Modulationssymbol wird einem sog. Mo-

dulationsalphabet entnommen, wie es am Beispiel einer 64-QAM bzw. 64-DAPSK in Bild 3 dargestellt ist.

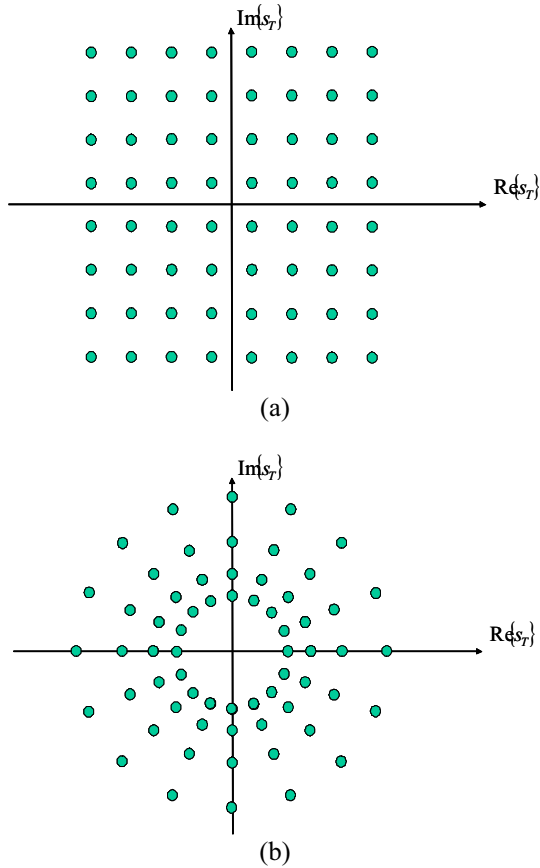


Bild 3 Digitale Modulationsverfahren: (a) 64-QAM, (b) 64-DAPSK

Das Sendesignal besitzt eine rechteckförmige Impulsform. Daher ist einem Subträger ein si-förmiges Spektrum zugeordnet:

$$G_k(f) = T \cdot \text{si}[\pi T(f - k\Delta f)] \quad (4)$$

Obwohl sich die einzelnen Subträgerspektren teilweise überlappen, kommt es aufgrund der Orthogonalität zu keiner gegenseitigen Störung.

In einer technischen Realisierung wird das oben dargestellte zeitkontinuierliche Signal in zeitdiskreter Form erzeugt und anschließend einem D/A-Wandler zugeführt. Tastet man das Signal entsprechend dem Abtasttheorem im Abstand $\Delta t = 1/B = 1/N\Delta f$ ab, ergibt sich die zeitdiskrete Folge $s_{n,i}$ zu:

$$s_{n,i} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} S_{n,k} \cdot e^{j2\pi ik/N} \quad (5)$$

Diese Gleichung zeigt einen weiteren wichtigen Vorteil der OFDM-Übertragungstechnik. Die Abtastwerte $s_{n,i}$ eines einzelnen OFDM-Symbols können nämlich gemäß obiger Gleichung aus der inversen diskreten Fouriertransformation (IDFT) - angewandt auf die Modulationssymbole $S_{n,k}$ - gewonnen werden. Für die IDFT existieren effiziente Algorithmen in Form der sog. „schnellen“ inversen Fouriertransformation (IFFT), mit denen ein zeitlicher und rechentechnischer Vorteil entsteht.

Entsprechend aufwandsgünstig lässt sich die Verarbeitung im Empfänger durchführen, indem das Signal abgetastet und die Abtastwertefolge $r_{n,i}$ anschließend einer FFT unterzogen wird:

$$R_{n,k} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{i=0}^{N-1} r_{n,i} \cdot e^{-j2\pi ik/N} \quad (6)$$

Die Beziehung zwischen den Send- und Empfangswerten kann alternativ durch eine Faltung im Zeitbereich oder eine Multiplikation im Frequenzbereich dargestellt werden:

$$\begin{aligned} r_{n,i} &= h_{n,i} * s_{n,i} + n_{n,i} \\ R_{n,k} &= H_{n,k} \cdot S_{n,k} + N_{n,k} \end{aligned} \quad (7)$$

In der zweiten Gleichung kommt zum Tragen, dass der Kanaleinfluss auf Subträger k durch einen komplexen Faktor $H_{n,k}$ beschrieben werden kann, der einen Abtastwert der Kanalübertragungsfunktion darstellt, d.h. $H_{n,k} = H(k\Delta f, nT)$. Der Term $N_{n,k}$ beschreibt das additiv überlagerte Rauschen.

Damit ist ein OFDM basiertes System für eine Rundfunkanwendung bereits vollständig beschrieben. Im Kommunikationsbereich muss zusätzlich die Zugriffstechnik auf den Funkkanal in Verbindung mit der OFDM Übertragungstechnik geregelt werden.

1.3 Vielfachzugriff

In zukünftigen Kommunikationssystemen wird eine Vielzahl unterschiedlicher Dienste nachgefragt, die insbesondere über reine Sprachübertragung weit hinausgehen werden. Daraus folgt für die einzusetzende Technik unmittelbar die Notwendigkeit nach einem hohen Maß an Adaptivität und Flexibilität, um die sehr unterschiedlichen Nutzeranforderungen, z.B. hinsichtlich Datenrate, erfüllen zu können.

Bezüglich der verschiedenen Übertragungsparameter bietet die OFDM-Übertragungstechnik zusätzlich die geforderte Flexibilität und Adaptivität in hohem Maß. Dies betrifft vor allem die Optionen des Vielfachzugriffs bei der Vergabe der verfügbaren Ressourcen. Grundsätzlich kann in einem OFDM-basierten System der Vielfachzugriff durch die bekannten klassischen FDMA-, TDMA- und CDMA-Techniken umgesetzt

werden, siehe Bild 4. Die Besonderheit kommt bei der OFDM Technik dadurch ins Spiel, dass durch die Verwendung von Subträgern die gesamte Bandbreite in eine Vielzahl schmalbandiger Frequenzressourcen unterteilt ist.

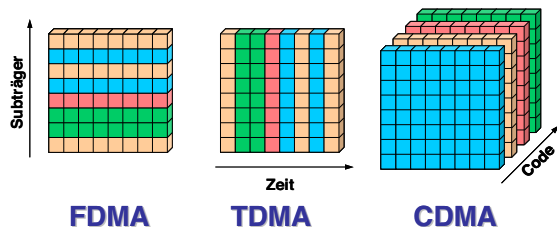


Bild 4 Vielfachzugriffsverfahren für die OFDM-Übertragungstechnik

Damit kommt der FDMA-Technik in Verbindung mit OFDM eine besondere Bedeutung zu, indem jedem Nutzer exklusiv einige für ihn besonders geeignete Subträger zugeordnet werden. Orientiert sich diese Zuordnung an der Auswahl der jeweils „besten“ Subträger mit dem höchsten Signal-zu-Störabstand, entsteht ein erheblicher Diversitätsgewinn (sog. Mehrnutzer-Diversität), siehe Bild 5.

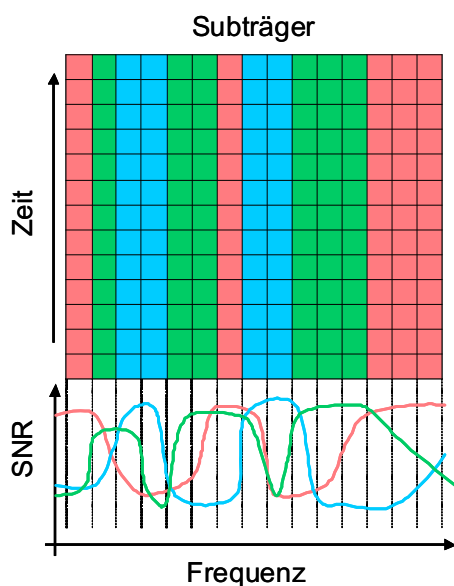


Bild 5 Mehrnutzer-Diversität bei OFDM-FDMA durch Auswahl der „besten“ Subträger pro Nutzer

Alternativ bekommt in einem OFDM-TDMA-Konzept ein Nutzer alle Subträger für die Dauer einiger OFDM-Symbole exklusiv zugeordnet. Bei einem OFDM-CDMA-Ansatz wird ein Modulationssymbol über mehrere Subträger gespreizt, um den

Effekt des frequenzselektiven Funkkanals abmildern zu können.

Vergleicht man die Leistungsfähigkeit der genannten drei Techniken, so zeigt sich, dass aus den genannten Gründen das OFDM-FDMA-Prinzip mit Abstand die besten Resultate liefert (siehe Bild 6), und ein OFDM-CDMA-Verfahren nur geringe Vorteile gegenüber einer technisch einfachen OFDM-TDMA-Lösung aufweist.

Diese moderne Form der digitalen Übertragungstechnik ist Gegenstand des von der DFG geförderten Schwerpunktprogramms TakeOFDM, in dem viele Wissenschaftler interessante Themen basierend auf der OFDM-Übertragungstechnik untersuchen.

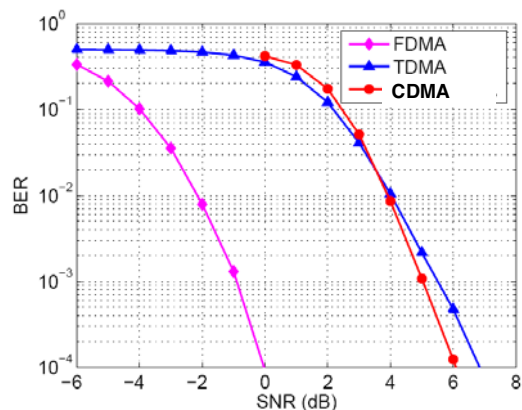


Bild 6 Vergleich der Leistungsfähigkeit von OFDM-FDMA, OFDM-TDMA und OFDM-CDMA

2 TakeOFDM

2.1 Grundsätzliche Zielsetzung

Die beschriebenen Eigenschaften der OFDM-Übertragungstechnik haben dazu geführt, dass das OFDM-Konzept allgemein als attraktiver Kandidat für künftige Kommunikationssysteme angesehen bzw. bereits in Standards festgeschrieben ist. Im Zusammenhang mit dem Einsatz der OFDM Technik ergibt sich auch heute noch eine Reihe interessanter technisch-wissenschaftlicher Fragestellungen. Diese beziehen sich insbesondere auf hochaktuelle schichtenübergreifende Verfahren und Algorithmen in Verbindung mit der OFDM-Übertragungstechnik, um neuartige Nachrichtensysteme entwickeln zu können. Vor diesem Hintergrund wurde im Jahr 2004 das von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderte TakeOFDM-Schwerpunktprogramm gestartet. Das grundsätzliche Ziel besteht darin, in den Projekten neue Techniken und Algorithmen für künftige Übertragungssysteme auf der Basis von OFDM zu analysieren bzw. neu zu entwerfen. Dabei sollen vor allem verschiedene Aspekte der physikalischen und der Da-

tensicherungsschicht detailliert betrachtet und vor allem in gegenseitiger Abstimmung entwickelt und optimiert werden, was den schichtenübergreifenden Ansatz verdeutlicht. Typische Beispiele für solche Untersuchungspunkte sind einerseits Mehrantennensysteme, adaptive Codierung und Modulation, andererseits adaptive Ressourcenvergabe und Netzplanung. Dabei stehen nicht allein Funkssysteme, sondern auch drahtgebundene Techniken (z.B. VDSL) im Fokus der Untersuchungen. Aus der Vielzahl der ineinander greifenden Aspekte ergibt sich unmittelbar die Notwendigkeit einer interdisziplinären Zusammenarbeit von Fachleuten unterschiedlicher Fachrichtungen. So sind Wissenschaftler aus den Bereichen Hochfrequenztechnik, Nachrichtentechnik, Protokollarchitektur, Codierungstheorie und Netzwerksicherheit aufgefordert, ihre Forschungsarbeiten eng miteinander zu verzahnen. Entsprechende Verbundprojekte wurden und werden im Rahmen des TakeOFDM-Schwerpunktprogramms besonders gefördert.

2.2 Untersuchte Teilaspekte

Aus der Vielzahl der Projekte, die im TakeOFDM-Programm bearbeitet werden, ergibt sich die Breite, mit der an neuen Techniken und Konzepten für Übertragungssysteme auf der Basis der OFDM-Übertragung geforscht wird. Bei näherer Betrachtung der Teilaspekte kristallisieren sich wichtige und für die Forschung Trend setzende Schwerpunktthemen heraus. Einige dieser typischen Schwerpunkte werden im Folgenden kurz umrissen.

2.2.1 Mehrantennensysteme

Der Einsatz von mehreren Antennen an Sender und/oder Empfänger, auch als „Multiple Input Multiple Output“ (MIMO) bezeichnet, spielt in der aktuellen Entwicklung der Mobilkommunikation eine herausragende Rolle. Der Hauptgrund liegt darin, dass eine solche Technik – je nach Ausprägung – eine wesentliche Steigerung der Kapazität bzw. eine erhöhte Zuverlässigkeit der Übertragung verspricht. Die Kombination von MIMO und OFDM, die von vielen Forschern seit einigen Jahren intensiv aufgegriffen wird, soll die Vorteile beider Konzepte miteinander verbinden. Im TakeOFDM-Programm nehmen Untersuchungen zu MIMO-OFDM-Techniken einen entsprechend großen Raum ein. Dabei geht es beispielsweise um geeignete senderseitige Strategien zur Vorverarbeitung der Antennensignale in Ein- und Mehrnutzerszenarien. In diesem Zusammenhang können adaptive Strahlformungs-Konzepte genannt werden, in denen durch eine geeignete Vorcodierung gezielt gute Kanaleigenschaften für bestimmte Teilnehmer herbeigeführt werden, siehe Bild 7.

Für die Betrachtung von MIMO-OFDM-Konzepten werden ferner geeignete Funkkanalmodelle entworfen, um aussagekräftige simulative Analysen durchführen zu können.

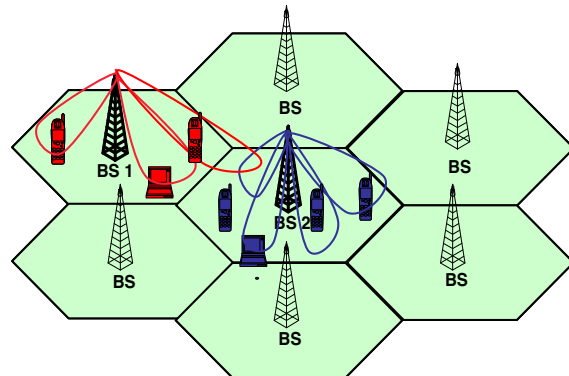


Bild 7 Zellulares Netz mit Mehrantennensystem (Strahlformung)

2.2.2 Ressourcenallokation

Für alle Übertragungssysteme spielt die effiziente Verwaltung der vorhandenen Ressourcen eine bedeutende Rolle. Dies trifft in besonderem Maße auf die knappen Frequenzressourcen in Mobilfunksystemen zu. Die Thematik der Ressourcenallokation wird im TakeOFDM-Schwerpunkt intensiv aufgegriffen und untersucht. Insbesondere in Verbindung mit dem o.g. MIMO-Ansatz sind Algorithmen von Interesse, welche die über Zeit, Frequenz und Raum verfügbaren Ressourcen an die Nutzer verteilen. Dabei werden Methoden entwickelt, die abhängig von der Kanalkenntnis im Sender eine abgestufte Adaptivität gewährleisten. Auch ein Vergleich mit robusten, aber nichtadaptiven Verfahren wird einbezogen.

Bei Zuteilung der Ressourcen sind neben Informationen über den aktuellen Zustand des Übertragungskanals auch Angaben von höheren Schichten des Protokollstapels von Interesse. Dies betrifft z.B. den Zustand der Warteschlangen sowie von bestimmten Dienstgüte-Anforderungen (Datenrate, Verzögerung), welche von den Anwendungen vorgegeben werden. Derartige schichtenübergreifende Verfahren der Ressourcenallokation sind besonders vielversprechend und werden in verschiedenen Projekten des TakeOFDM-Schwerpunktprogramms ausführlich behandelt.

2.2.3 Linkadaption

Eng verknüpft mit Fragen der Ressourcenallokation ist die Anpassung der Übertragungsparameter an die momentane Kanalsituation, um die Kapazität des Übertragungsmediums nach Möglichkeit optimal auszunutzen. Entsprechende Konzepte sind ein fester Bestandteil der Forschungsarbeiten im Rahmen des TakeOFDM-Programms. Die OFDM-Übertragungs-

technik bietet hier eine besondere Flexibilität, da die Parameter über der Frequenz variiert, d.h. subträger-spezifisch eingestellt werden können. Damit werden die i.a. frequenzselektiven Eigenschaften des Kanals in die Dimensionierung der Parameter einbezogen. Speziell die Methoden einer adaptiven Modulation (siehe Bild 8) und Kanalcodierung können hier nutzbringend angewendet werden und stehen im Fokus verschiedener Forschungsprojekte.

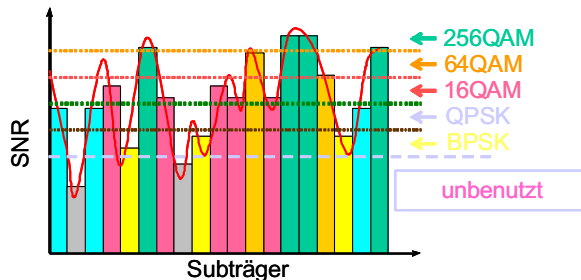


Bild 8 Adaptive Modulation der Subträger

2.2.4 Systemkonzepte

Die OFDM-Übertragungstechnik ist bereits heute in zahlreichen Übertragungssystemen implementiert. Dies betrifft sowohl drahtgebundene Systeme (DSL) als auch Funkssysteme (DVB-T, IEEE 802.11a, WiMAX). Auch für Mobilfunksysteme der vierten Generation gilt die OFDM Technik als sicherer Kandidat. Die Integration des Multiträger-Verfahrens in ein Systemkonzept wirft eine Reihe interessanter Fragestellungen auf, denen sich die am TakeOFDM-Programm beteiligten Wissenschaftler widmen. So werden Konzepte für zellulare Systeme entwickelt und analysiert, die insbesondere eine Koordination und Reduzierung der zwischen den Zellen auftretenden Interferenzen betrachten. Ferner werden auch für hochmobile Anwendungen, wie in Hochgeschwindigkeitszügen, geeignete Ansätze untersucht.

3 Zusammenfassung

Viele aktuelle Kommunikationssysteme basieren auf der OFDM-Übertragungstechnik. In diesem Beitrag wurden zunächst die grundsätzlichen Eigenschaften dieser Technik umrissen und ihre Vorteile dargestellt. Es wurde deutlich, dass diese Technik aufgrund ihrer Vorteile auch für zukünftige drahtgebundene und drahtlose Systeme ein attraktiver Kandidat ist. Für den Einsatz in solchen Systemen sind ist auch heute noch eine Reihe technisch-wissenschaftlicher Fragestellungen relevant, die im von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderten Schwerpunktprogramm TakeOFDM behandelt werden. Aus der kurzen hier gegebenen Darstellung der durchgeführten Forschungsprojekte wird das breite Spektrum der Aktivi-

täten deutlich. Diese Arbeiten sind nicht nur von grundsätzlicher Bedeutung, sondern werden auch ganz maßgeblich zur praktischen Umsetzung dieser Übertragungstechnik und zum wirtschaftlichen Erfolg entsprechender Produkte beitragen.

4 Danksagung

Der Autor bedankt sich bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die finanzielle Förderung des Schwerpunktprogramms TakeOFDM.

5 Literatur

- [1] J. Bingham: Multicarrier Transmission for Data Transmission: An Idea Whose Time Has Come, *IEEE Comm. Magazine*, Mai 1990, pp. 5 – 14
- [2] R.F.H. Fischer, B.H. Huber: A New Loading Algorithm for Discrete Multitone Transmission. *Proc. Globecom 1996*, pp. 724 – 728
- [3] T. May, H. Rohling, V. Engels: Performance Analysis of 64-DAPSK and 64-QAM Modulated OFDM Signals. *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 46, No. 2, Feb. 1998 pp. 182 – 190
- [4] M. Lampe, H. Rohling, W. Zirwas: Misunderstandings about Link Adaptation for Frequency-Selective Fading Channels. *Proc. IEEE PIMRC*, Lissabon, 2002
- [5] Rainer Grünheid, Edgar Bolin, Hermann Rohling: Blockwise Loading Algorithm for the Adaptive Modulation Technique in OFDM Systems, *IEEE VTC-2001*, Atlantic City, USA, October 2001
- [6] H. Rohling, R. Grünheid: Cross Layer Considerations for an Adaptive OFDM-based Wireless Communication System, *Wireless Personal Communications*, 32, Springer, 2005, pp. 43 - 57