

# Entwurf einer OFDM Funkschnittstelle für ein Kommunikationssystem unter Berücksichtigung der Systemanforderungen

Markus Radimirsch, Wolfgang Detlefsen

Robert Bosch GmbH

Zentralbereich Forschung/Vorausentwicklung, Abt. FV/SLH

Robert-Bosch-Straße 200, 31132 Hildesheim

Tel.: +49-(0)5121/49-2543, Fax: -2538

E-Mail: markus.radimirsch@fr.bosch.de

**Abstract:** Im Projekt "Zellulares ATM Zugangsnetz" (ZATM)<sup>1</sup> werden Technologien für den drahtlosen ATM-Teilnehmeranschluß in einem zellularen Netz untersucht. Die Funkschnittstelle basiert auf OFDM. Hierbei ist eine Vielzahl von Anforderungen beim Entwurf der Funkschnittstelle zu berücksichtigen. Diese Anforderungen resultieren einerseits aus den physikalischen Randbedingungen wie den Eigenschaften des Funkkanals, andererseits aus den Anforderungen des darüberliegenden Data Link Control (DLC) Protokolls und der Festlegung einiger Parameter. Sie sind teilweise genau entgegengesetzt, so daß beim Entwurf der Funkschnittstelle Kompromisse eingegangen werden müssen. Dieser Beitrag zeigt zunächst diese Anforderungen auf und leitet daraus die im Projekt entworfene Funkschnittstelle her.

## 1 Einleitung

Die Versorgung von Teilnehmern mit ATM-Diensten per Funk wird seit etwa 1993 an vielen Stellen intensiv untersucht. Dabei haben sich schon frühzeitig zwei Trends herausgebildet:

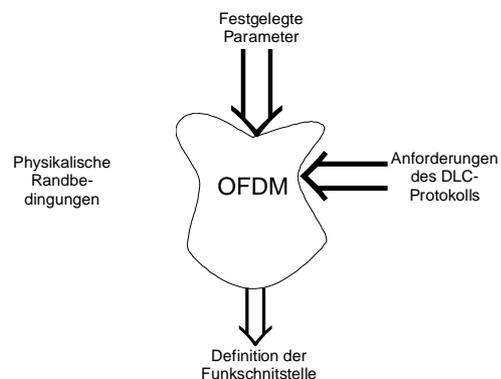
- Verwendung von OFDM. In den ACTS-Projekten WAND [1] und MEDIAN [2] sowie im Projekt ZATM wird OFDM verwendet.
- Verwendung eines zentral gesteuerten Medienzugriffsprotokolls (MAC), z.B. in WAND, MEDIAN, SAMBA [3] und ZATM

OFDM wurde in der Vergangenheit für Rundfunksysteme wie DAB und DVB untersucht und eingesetzt. Drahtlose ATM-Systeme (wireless ATM, WATM) sind Kommunikationssysteme, d.h. es findet Datenübertragung in beide Richtungen statt.

Seit 1996 gibt es Standardisierungsaktivitäten bei ETSI für ein HIPERLAN Typ 2 (High PERFORMANCE Radio LAN, kurz H/2), zuerst bei RES 10 und mittlerweile im Projekt BRAN (Broadband Radio Local Area Networks), [4]. Die Entscheidung für ein zentral gesteuertes MAC-Protokoll ist Anfang 1998 gefallen. Die Technik für die Funkschnittstelle ist noch offen, wobei OFDM von vielen BRAN-Mitgliedern favorisiert wird. Die in ZATM und damit in diesem Beitrag verwendeten Randbedingungen und Parameter entsprechen weitgehend den bei ETSI BRAN diskutierten Anforderungen.

In Bild 1 ist die Anforderungssituation für die OFDM-Funkschnittstelle dargestellt. Das OFDM-Übertragungsverfahren in der Mitte wird durch die

Anforderungen "zusammengepreßt" und muß in irgendeine Richtung "ausweichen". Dort, wo sich OFDM hin ausdehnen kann, ergibt sich dann durch geschickte Parametrierung und einige neue Verfahren (z.B. für Synchronisation) ein harmonischer Entwurf für die Funkschnittstelle.



**Bild 1: Anforderungssituation an die OFDM Funkschnittstelle**

Dieser Beitrag wird zunächst die Anforderungen an die OFDM-Funkschnittstelle, wie in Bild 1 gezeigt, darstellen. Anschließend wird aufgezeigt, wie sich die einzelnen Anforderungen auswirken und welche Prioritäten zu setzen sind. Nachdem dann die gewählten Parameter der Funkschnittstelle erläutert werden, schließt der Beitrag mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick.

<sup>1</sup> Gefördert im Rahmen des BMBF-Förderschwerpunktes "Breitbandige Mobilkommunikation für Multimedia auf ATM-Basis"

## Anforderungen an die Funkschnittstelle

### Festgelegte Parameter:

Die festgelegten Parameter F.1 bis F.4 wurden weitgehend dem bei ETSI RES 10 entstandenen Report zu H/2, [5], entnommen.

**F.1** Frequenzband: 5,15-5,25 GHz

**F.2** Kanalbandbreite:  $B \approx 25$  MHz

**F.3** Nettodatenrate:  $R \geq 20$  Mbit/s  
(nach Dekodierung bei theoretisch unendlich langer Datenübertragung)

**F.4** Einsatzbereich vorwiegend in Gebäuden (auch Produktionshallen)

### Physikalische Randbedingungen:

Die physikalischen Randbedingungen umfassen neben den Eigenschaften des Funkkanals auch die inhärenten Eigenschaften von OFDM.

**P.1** Funkkanal: Messungen in großen Gebäuden (z.B. Produktionshallen) ergeben eine maximal zu berücksichtigende Dauer der Kanalimpulsantwort von ca. 250 ns. Außerhalb von Gebäuden kann dieser Wert bis zu 1000 ns und mehr betragen. Weitere etwa 100 ns müssen für den Ausgleich von Filterlaufzeiten in Sender und Empfänger eingeplant werden, so daß sich eine relevante Dauer der Kanalimpulsantwort  $T_{k,r} = 350$  ns ergibt.

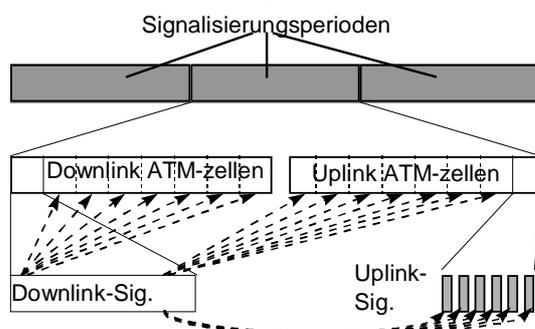
**P.2** Anforderungen von OFDM an die Genauigkeit der Frequenz- ( $\delta f$ ) und Zeitsynchronisation ( $\delta t$ ):  
 $\delta f \leq 2\%$  von  $\Delta f$  ( $\Delta f =$  Unterträgerabstand)  
 $\delta t \leq 2 f_A$  ( $f_A =$  Abtasttakt)

**P.3** OFDM ist umso effizienter, je höher die Unterträgeranzahl ist

**P.4** Die Orthogonalität der Unterträger des OFDM-Symbols untereinander muß gewährleistet sein.

### Anforderungen des DLC-Protokolls:

Zum Verständnis der Anforderungen des verwendeten DLC-Protokolls DSA++ werden hier nur einige grundlegenden Eigenschaften dargestellt. Eine detaillierte Erklärung findet sich z.B. in [6]



**Bild 2:** MAC-Protokoll DSA++

Das Prinzip des MAC-Protokolls ist in Bild 2 dargestellt. Downlink und Uplink arbeiten im Zeitduplex (TDD). Die gemeinsame Nutzung des Kanals wird durch ein zentral gesteuertes dynamisches TDMA-Verfahren (Time Division Multiple Access) gesteuert. Je eine Downlink- und Uplinkphase zusammen bilden eine Signalisierungsperiode (SP), die durch die Downlink-Signalisierung (D-Sig) bestimmt wird. Die D-Sig-Nachricht enthält (1) Ankündigungen an Zielterminals, für die Nachrichten in der Downlinkphase bestimmt sind; (2) Reservierungen von Zeitschlitz im Uplink für Terminals; (3) Zuweisung von kurzen Zeitschlitz für die Uplink-Signalisierung. Die kurzen Zeitschlitz werden für Kapazitätsanforderungen derjenigen Terminals benötigt, die derzeit keine ATM-Zellen im Uplink zu übertragen haben, denen sie die Kapazitätsanforderung huckepack mitgeben können. Sie werden durch wahlfreien Zugriff gemeinsam von den Terminals benutzt. Zwischen jeder Down- und Uplinkphase wird ein Transceiver Turnaround Intervall eingefügt.

Aus der Beschreibung des MAC-Protokolls ergeben sich folgende Forderungen an die Funkschnittstelle:

**M.1** Die Nachrichten im Uplink können eine oder mehrere ATM-Zellen enthalten, so daß sich unter Einbeziehung des DLC-Overheads eine Granularität von etwa 60 Bytes für die Nachrichtenlänge ergibt.

**M.2** Die Nachrichten in den kurzen Zeitschlitz umfassen nur etwa 7 Informationsbytes, die aber von der Kanalkodierung stärker geschützt werden sollten als normale Datennachrichten (dies gilt auch für die D-Sig Nachricht).

**M.3** Durch die Struktur im Uplink wechselt das Senderecht sehr schnell, so daß im Empfänger in kurzer Folge neu synchronisiert werden muß. Daher darf der Overhead für die Synchronisation nur gering sein.

Eines der erklärten Ziele beim Entwurf der betrachteten WATM-Systeme ist, dem Nutzer ATM-Dienste zu liefern, ohne daß er merkt, daß er per Funk bedient wird. Das beschriebene MAC-Protokoll wurde so entworfen, daß es die Anforderungen an die Unterstützung der ATM-Dienstgüte (Quality of Service, QoS) einhalten kann. Die Funkschnittstelle muß daher die Anforderungen des MAC-Protokolls möglichst genau einhalten, auch wenn die Lösung aus OFDM-Sicht nicht ganz optimal ist.

## 3 Bewertung der Anforderungen

Zur Bewertung der Anforderungen werden die oben aufgezählten Punkte durch die vorgestellte Buchstaben-Zahlen Kombination (F.1 - F.4, P.1 - P.3, M.1 - M.3) referenziert.

Um die Bewertung vorzunehmen, müssen Annahmen über einige weitere Parameter der Funkschnittstelle getroffen werden:

**W.1** Für eine günstige Realisierung der FFT im OFDM-Modem bietet sich eine Zweierpotenz (z.B. 32, 64, 128, 256) für die FFT-Länge  $N_{\text{FFT}}$  an.

**W.2** Um das Aliasing-Problem bei der Sendefilterung zu mildern, muß entweder überabgetastet oder aber einige Unterträger am Rand nicht belegt werden. Das Verhältnis von Anzahl belegter Unterträger  $N_B$  und FFT-Länge  $N_{\text{FFT}}$  wird mit  $v_B = 3/4$  angenommen.

**W.3** Die Wertigkeit der Modulation auf den Unterträgern soll  $w_M = 3$  betragen.

**W.4** Die Coderate der Kanalkodierung beträgt  $R_C = 1/2$

### **Symboldauer, Unterträgeranzahl:**

Die Bitrate  $R \geq 20$  Mbit/s führt zu einer Rate von ca. 50.000 ATM-Zellen pro Sekunde, d.h. eine ATM-Zelle muß in etwa  $T_{\text{ATM}} = 20 \mu\text{s}$  übertragen werden.

Ausgehend von den Eigenschaften von OFDM (z.B. P.3) und der Größe einer Nachricht mit einer ATM-Zelle von  $N_{\text{ATM}} = 60$  Bytes = 480 Bits (M.1), würde es sich im ersten Schritt anbieten, eine große Unterträgeranzahl zu wählen, so daß eine ATM-Zelle in einem OFDM-Symbol übertragen wird. Mit den oben getroffenen Annahmen ergibt sich:

$$N_{\text{FFT}} = N_{\text{ATM}} / (v_B \cdot w_M \cdot R_C) \approx 427$$

Damit ergibt sich mit W.1, etwas Zusatzaufwand für Synchronisation und Abgleichen der übrigen Parameter eine Unterträgeranzahl  $N_{\text{FFT}} = 512$  und  $N_B = 384$ . Mit dieser Wahl der Unterträgeranzahl würde sich ein Guard-Intervall im Bereich von  $1 \mu\text{s}$  leicht realisieren lassen und der Einsatz außerhalb von Gebäuden wäre möglich (siehe P.1).

Zieht man zusätzlich M.2 in Betracht, zeigt sich schnell, daß sich mit diesem Verfahren keine kurzen Zeitschlitze realisieren lassen. Die Realisierung kurzer Zeitschlitze ist aber für die Effizienz des DLC-Protokolls von großer Bedeutung, [7], und muß unbedingt beim Entwurf des Übertragungsverfahrens in Betracht gezogen werden. Für kurze Zeitschlitze mit  $N_{\text{kurz}} = 7 \text{bytes} = 56 \text{bits}$  ergibt sich eine sinnvolle Wahl der Unterträgeranzahl zu

$$N_{\text{FFT}} = N_{\text{ATM}} / (v_B \cdot w_M \cdot R_C) \approx 51$$

oder, mit W.1,  $N_{\text{FFT}} = 64$ .

Die Dauer eines OFDM-Symbols,  $T$ , setzt sich aus der eigentlichen Symboldauer,  $T_S$ , und der Dauer des Guardintervalls,  $T_G$ , zusammen:

$$T = T_G + T_S$$

Die Dauer des Guard-Intervalls ergibt sich aus P.1 (in Gebäuden) unter Berücksichtigung der Filterlaufzeiten in Sender und Empfänger zu  $T_G \approx$

$320 \text{ ns}$ . Nimmt man zudem einen Systemtakt  $f_A = 25 \text{ MHz}$  an, ergibt sich die Dauer eines  $T$  OFDM-Symbols zu:

$$T = 64 \cdot 1/f_A + 320 \text{ ns} = 72 \cdot 40 \text{ ns} = 2880 \text{ ns}.$$

Der Anteil des Guard-Intervalls beträgt demnach ca. 11% und ist damit im Rahmen der allgemeinen Entwurfsregeln für OFDM Modulationsverfahren.

In einem OFDM-Symbol werden ergibt sich eine Bitanzahl

$$N_{\text{bit}} = N_{\text{FFT}} \cdot w_M \cdot R_C \cdot v_B = 72$$

und damit 6,67 OFDM-Symbole pro ATM-Zelle mit  $N_{\text{ATM}}$  bits. Durch eine Anpassung der Coderate  $R_C$  auf  $5/9$  paßt eine ATM-Zelle in 6 OFDM-Symbole.

Die oben beschriebenen Parameter wurden für die Realisierung des Demonstrators in ZATM ausgewählt.

### **Synchronisation, Modulationsart auf den Unterträgern**

Aus Sicht des MAC-Protokolls ist der Synchronisationsaufwand ein Overhead, der vor allem aufgrund der in M.3 aufgeführten Gründe möglichst klein gehalten werden muß. Gleichzeitig muß der Forderung in P.2 entsprochen werden. Bekannte Verfahren aus der Rundfunktechnik sehen ein langsames Einschwingen und danach ein Tracking der Synchronisation vor. Dies ist hier nicht möglich, da die Pakete auf der Funkschnittstelle oft nur sehr kurz sind. Außerdem muß eine Komplettsynchronisation innerhalb der Dauer einer Nachricht möglich sein.

Bei Verwendung einer nichtdifferentiellen Modulationsart auf den Unterträgern mit kohärenter Demodulation wird zusätzlich zur Frequenz- und Zeitsynchronisation nach P.2 eine Kanalschätzung nötig, die im allgemeinen eine Mittelung über mehrere OFDM-Symbole erfordert und zudem Pilotsymbole für Tracking benötigt. Dies widerspricht der Forderung nach einer Komplettsynchronisation in einem Schritt.

Um dies zu vermeiden, wurde eine differentielle Phasenmodulation (PSK) auf den Unterträgern gewählt. Im ZATM-Demonstrator kommt eine 8 DPSK zum Einsatz.

Das Synchronisationsverfahren der ZATM Funkschnittstelle wurde nach diesen Anforderungen entworfen, siehe [8]. Das Verfahren benötigt 2 OFDM-Symbole wie oben beschrieben. Es ermöglicht eine Frequenz- und Zeitsynchronisation in vier Schritten. Die Genauigkeit ist ausreichend, um die in P.2 erwähnten Anforderungen zu erfüllen.

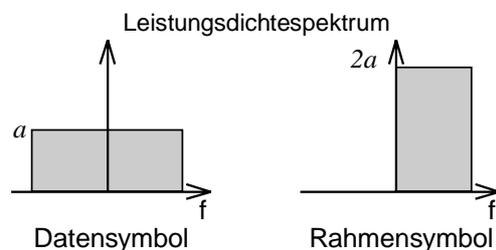
### **Weitere Eigenschaften der Funkschnittstelle**

Eine wichtige Forderung an das Modem ist die Möglichkeit, in Zeiten mit geringer Aktivität möglichst wenig Strom zu verbrauchen, da die Terminals auch mit Batterie betrieben werden sollen.

Zu diesem Zweck ist es nötig, daß das Terminal von Zeit zu Zeit prüft, ob Nachrichten für es vorliegen. Dies geschieht durch Abhören der D-Sig Nachricht.

Dazu muß zunächst der Beginn jeder Signalisierungsperiode gefunden werden. Mit dem oben beschriebenen Synchronisationsverfahren wäre dafür eine gleitende Korrelation nötig, die sehr signalverarbeitungsaufwendig ist. Um dieses Problem zu lösen, wurde ein Rahmendetektionsverfahren entwickelt und untersucht, das die Detektion des Anfangs der SP auf analoge Weise erlaubt. Wenn das Terminal das Signal für den Beginn der SP erhält, beginnt es mit der genauen Synchronisation gemäß dem oben angeführten Verfahren, allerdings in einem sehr viel kleineren Zeitfenster.

Das Rahmendetektionsverfahren arbeitet mit einer Belegung der Unterträger nach Bild 3. Dadurch daß nur die Hälfte der Unterträger belegt ist, ist das Rahmensymbol eindeutig.



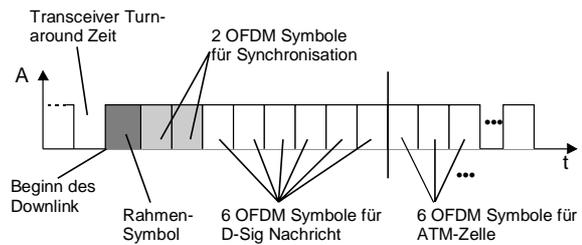
**Bild 3: Aufbau des Rahmensymbols**

Nach P.4 ist es wichtig, daß die Orthogonalität der Unterträger erhalten bleiben muß. Eine potentielle Quelle von nichtlinearen Veränderungen des OFDM-Signals ist das Nachregeln einer Automatic Gain Control (AGC) im Empfänger. Daher ist es nötig, den Signalpegel zu Beginn des Empfangs einer Nachricht einzustellen und ein Nachregeln zu verhindern. Dazu wird eine Präambel vor jeder Nachricht versendet.

Zu Beginn des Downlinks kann hierfür das beschriebene Rahmensymbol verwendet werden, während im Uplink eine eigene Präambel zum Einsatz kommt.

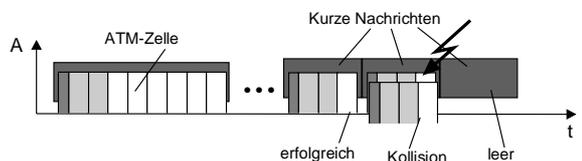
#### 4 Struktur auf der Luftschnittstelle

Mit der im vorigen Abschnitt beschriebenen Lösung ergibt sich die Struktur auf der Luftschnittstelle als Abfolge von Präambeln, Synchronisationssymbolen und OFDM-Symbolen.



**Bild 4: Struktur einer Downlink-Phase**

In Bild 4 ist die Struktur einer Downlink-Phase dargestellt. Zu Beginn wird das Rahmensymbol gesendet, das gleichzeitig als Präambel für die Einstellung der AGC dient. Es folgen zwei OFDM-Symbole für die Synchronisation und sechs OFDM-Symbole für die D-Sig Nachricht. Anschließend werden je sechs OFDM-Symbole für ATM-Zellen hintereinander weg gesendet.



**Bild 5: Struktur einer Uplink-Phase**

In Bild 5 ist die Struktur einer Uplink-Phase dargestellt. Jedes Paket beginnt mit einer Präambel und zwei OFDM-Symbolen für Synchronisation. Die Nachrichten mit ATM-Zellen umfassen Vielfache von sechs weiteren OFDM-Symbolen. In kurzen Signalisierungsnachrichten wird nur ein weiteres OFDM-Symbol hinzugefügt.

### 5 Zusammenfassung

Im vorliegenden Beitrag wurde der Entwurfsweg einer OFDM-Funkschnittstelle für ein WATM-System vorgestellt. Die physikalischen Randbedingungen und die Anforderungen vom MAC-Protokoll sind teilweise entgegengesetzt, so daß die Lösung ein Kompromiß sein muß. Dies betrifft vor allem die Unterträgeranzahl, die für ZATM auf 64 festgelegt wurde.

Es hat sich gezeigt, daß OFDM heute so weit entwickelt ist, daß es für reif für den Einsatz in Kommunikationssystemen ist.

#### Literatur:

- [1] J. Mikkonen, J. Kruys, "The Magic WAND: a Wireless ATM Access System", ACTS Mobile Summit, Granada, Spanien, 1996
- [2] C. Ciotti, J. Borowski, "The AC006 MEDIAN Project - Overview and State of the Art", ACTS Mobile Summit, Granada, Spanien, 1996
- [3] M. Dinis, et al., "SAMBA: a Step to Bring MBS to the People", ACTS Mobile Summit, 1997, Aalborg, Dänemark
- [4] BRAN Terms of Reference, siehe <http://www.etsi.org>

- [5] High Performance Radio Local Area Networks (HIPERLANs), Requirements and Architecture, TR 101 031, ETSI, 1997
- [6] D. Petras, A. Krämling, "MAC protocol with polling and fast collision resolution for an ATM air interface", IEEE ATM workshop, San Francisco, 1996 (verfügbar unter <http://www.comnets.rwth-aachen.de/~petras>)
- [7] D. Petras, A. Krämling, ". Wireless ATM: Performance evaluation of a DSA++ MAC protocol with fast collision resolution by a probing algorithm", Intern. Journal of Wireless Information Networks, vol. 4, num. 4, Oct. 1996 (verfügbar unter <http://www.comnets.rwth-aachen.de/~petras>)
- [8] B. Stantchev, G. Fettweis, "Burst Synchronisation for OFDM-based Cellular Systems with separate signalling channel", IEEE VTC '98, Ottawa, Kanada