Digitale Mobilkommunikation

Autor(en): **Krebser, J. / Braun, W. R. / Ochsner, H.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **78 (1987)**

Heft 15

PDF erstellt am: **28.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-903895

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Digitale Mobilkommunikation

J. Krebser, W.R. Braun, H. Ochsner

Wie in vielen anderen Bereichen ist auch im Mobilfunk eine Ablösung der bisherigen analogen Systeme durch digitale zu erwarten. In diesem Aufsatz werden die Vorteile der digitalen Übertragung erläutert und zwei Konzepte zur effizienten Nutzung des zur Verfügung stehenden Frequenzspektrums dargelegt und diskutiert.

Comme dans de nombreux autres domaines, il faut s'attendre également en radiotéléphonie mobile à ce que les systèmes analogiques soient remplacés par des systèmes numériques. L'article explique les avantages de la transmission numérique. Deux conceptions pour l'emploi efficace du spectre disponible des fréquences sont décrites et examinées.

1. Einführung und Überblick

In kürze wird in der Schweiz das Natel-C-Mobiltelephonsystem in Betrieb genommen, ein Ereignis, das auf die wachsende Bedeutung des Mobilfunks für die moderne Gesellschaft hinweist. Das neue Funkfernsprechnetz wird einem breiten Kundenkreis eine neuartige, attraktive Dienstleistung, die «Kommunikation unterwegs», kostengünstig anbieten können. Die Übertragung der Sprachsignale erfolgt im Natel-C gleich wie in modernen Mobiltelephonsystemen anderer Länder Europas mittels schmalbandiger, analoger Modulationsverfahren. Angesichts der doch recht weit fortgeschrittenen Digitalisierung der Übertragungswege in den leitergebundenen Fernmeldesystemen drängen sich die folgenden zwei Fragen auf:

- Warum kann sich die analoge Übertragungstechnik im Mobilfunk so lange halten?
- Wann wird sich die Digitaltechnik durchsetzen, und welche digitalen Übertragungsverfahren werden zur Anwendung gelangen?

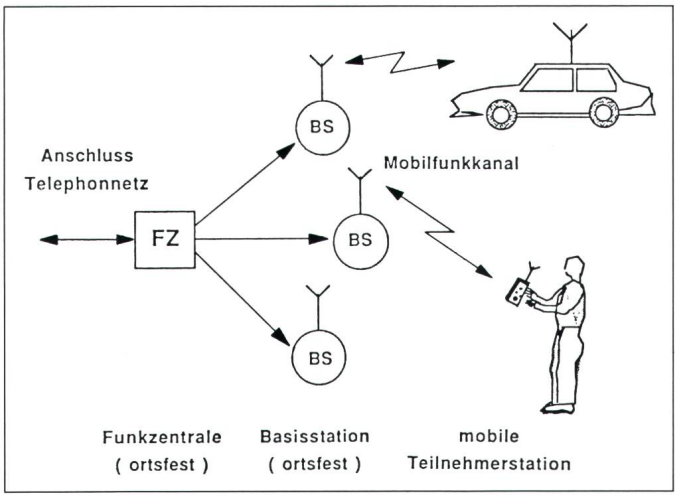
Dieser Aufsatz versucht, einige Aspekte dieses Fragenkomplexes zu beleuchten, wobei sich der Rahmen der betrachteten Mobilfunksysteme auf den Bereich des nichtmilitärischen Landfunks in den VHF/UHF-Frequenzbändern beschränkt. Verwandte Gebiete wie HF-, Satelliten- und Flugfunk sowie schnurloses Telephon werden hier ausgeklammert.

Der nichtmilitärische Landfunk gliedert sich in zwei Hauptgebiete:

- Die *öffentliche Mobiltelephonie* ist die Erweiterung des öffentlichen Telephonnetzes durch «drahtlose» Teilnehmeranschlüsse.
- Unter dem Begriff *nichtöffentlicher Mobilfunk* werden Betriebsfunknetze von Organisationen wie Polizeikorps, Sicherheitsbehörden, Bahnen, Nahverkehrsbetriebe usw. zusammengefasst.

Ein Mobilfunksystem ist prinzipiell nach dem Schema von Figur 1 aufgebaut: Es besteht aus einer ortsfesten Infrastruktur (Funkzentrale, Basisstationen) und den mobilen Teilnehmerstationen. Vor allem in modernen öffentlichen Mobiltelephonsystemen sind die Basisstationen geographisch

Figur 1
Wichtigste Elemente eines Mobilfunksystems



Adresse der Autoren
Dr. *J. Krebser*, Radiocom AG, 5300 Turgi,
Dr. *W.R. Braun*, BBC AG, 5405 Baden-Dättwil,
Dr. *H. Ochsner*, Autophon AG, 4503 Solothurn.

derart über das Versorgungsgebiet verteilt, dass sie ein zellen- oder wabenförmiges Netz bilden. Der Vorteil eines solchen Zellularsystems besteht darin, dass zwei Basisstationen, die zwei Zellen in einigem Abstand versorgen, dieselben Sendefrequenzen benutzen können. Damit wird eine sehr gute Frequenzökonomie erzielt. Je nach Gesprächsvolumen in der Zelle sind die Basisstationen mit mehreren parallelen Kanälen (bis 120) ausgerüstet.

Zur Übertragung der Sprachsignale kommen heute in der Regel analoge, schmalbandige Frequenz- oder Phasenmodulationsverfahren zum Einsatz. Seit einiger Zeit wird der analoge Funkkanal auch zur Übertragung digitaler Information mit niedrigen Übertragungsgeschwindigkeiten benutzt (z.B. Datenverkehr mit der Mobilstation bei Datenraten bis zu 2,4 kbit/s, Übertragung von Signalisierungsinformation). Zu diesem Zweck werden dem Funkkanal basisbandseitig Datenmodems vorgeschaltet. Eine digitale Sprachübertragung nach demselben Verfahren konnte sich aus den folgenden Gründen nicht durchsetzen:

- Die zur Verfügung stehende *Übertragungsbandbreite* ist für die digitale Sprachübertragung sehr knapp. Der Kanalabstand in den Mobilfunkbändern ist auf 20 bis 25 kHz festgelegt. Dieses enge Kanalraster begrenzt die Übertragungsgeschwindigkeit bei herkömmlichen Funkgeräten mit zusätzlichen Basisbandmodems auf etwa 10 kbit/s. Leider weisen Sprachdigitalisierungsverfahren für diese niedrigen Datenraten eine wenig befriedigende Sprachqualität auf.
- Der Mobilfunkkanal stellt für die digitale Übertragung mit Bitraten über 10 kbit/s (kurzzeitiger Signalschwund, Phasenfluktuationen) ein *schwieriges Übertragungsmedium* dar. Besonders ungünstige Bedingungen können in hügeligem Terrain (d.h. in weiten Teilen der Schweiz) beobachtet werden, wo signifikante Echos mit erheblichen Laufzeitverzögerungen zu schwerwiegenden Signalverzerrungen im Empfänger führen [1].
- Die Integration zusätzlicher Basisbandmodems in bestehende Funkgeräte erweist sich oft als schwierig und hat Nachteile bezüglich Preis, Volumen und Stromverbrauch zur Folge.

Trotz dieser Schwierigkeiten ist in jüngster Zeit ein verstärkter Trend zur digitalen Übertragung im Mobilfunk erkennbar: Die europäischen Postverwaltungen erarbeiten grundlegende Spezifikationen für ein paneuropäisches, digitales Mobiltelephonnetz (Kap. 3). Unter dem Namen P2000 wurde ein Vorschlag zur Digitalisierung der Funknetze der schweizerischen Polizeikorps bekannt. Es gibt zahlreiche Gründe, die für die Beschleunigung dieses Übergangsprozesses sprechen:

- *Informationsschutz.* Die Benutzer von Mobilfunksystemen verlangen immer häufiger Massnahmen gegen unerlaubtes Abhören von Funkgesprächen. Bei digitalen Übertragungssystemen kann dieser Schutz einfacher und sicherer realisiert werden.
- Mit *modernen Methoden der digitalen Signalverarbeitung,* die heute dank leistungsfähigen Signalprozessoren auch im Mobilfunk einsetzbar sind, können die schwierigen Übertragungsverhältnisse des Mobilfunkkanals auch bei relativ grossen Echoverzögerungszeiten beherrscht werden.
- Die Tendenz zur *Miniaturisierung der Funkgeräte* (Handfunkgeräte, Taschentelephone) zwingt zur Hochintegration der Baugruppen. Digitale Schaltkreise eignen sich dazu bekanntlich wesentlich besser.
- Da der Stellenwert des *Datenverkehrs* in Funknetzen zunimmt, ist ein kompatibles Signalformat für Sprach- und Datenübertragung vorteilhaft. Dieses Argument wird mit der Verwirklichung des ISDN-Konzepts noch an Bedeutung gewinnen.

Die Entwicklung hin zur digitalen Sprachübertragung könnte sich in zwei verschiedene Richtungen bewegen:

- *Schmalbandige, digitale Übertragungsverfahren für Frequenzmultiplexbetrieb (Frequency Division Multiple Access - FDMA) im heute gültigen Kanalraster.* Die gegenwärtigen Frequenzzuteilung an die Funknetzbetreiber, vor allem in den Bändern des nichtöffentlichen Mobilfunks, ist kurz- und mittelfristig nur mit grössten Schwierigkeiten veränderbar. Schmalbandige, digitale Modulationsverfahren, welche die Gegebenheiten des 20- bzw. 25-kHz-Kanalrasters berücksichtigen, können in diesen Bereichen wirkungsvoll eingesetzt werden. Das Kapitel 2 beschreibt die Möglichkeiten dieser Technik.
- *Breitbandigere Zeitmultiplexsysteme (Time Division Multiple Access - TDMA).* Bei zukünftigen digitalen Mobiltelephonsystemen mit hoher Verkehrskapazität, für welche freie Frequenzbänder reserviert sind, gilt der Betrieb von Schmalbandkanälen im Frequenzmultiplex heute nicht mehr als optimale Lösung. Die im Kapitel 3 beschriebenen Zeitmultiplexsysteme versprechen diesen gegenüber mannigfaltige Vorteile.

2. Schmalbandige digitale Übertragungsverfahren

Die digitale Übertragungstechnik ist unter anderem darum noch wenig verbreitet, weil die hohen Datenraten der heute üblichen Sprachcodierungsverfahren erhebliche Schwierigkeiten bei der digitalen Übertragung über die schmalen Mobilfunkkanäle des 20- bzw. 25-kHz-Kanalrasters bereiten. Dieses Problem kann sowohl durch Sprachcoder mit geringerer Datenrate als auch durch bandbreiteneneffizientere Modulationsverfahren entschärft werden. Tatsächlich zeichnen sich in beiden Bereichen markante Fortschritte ab, welche im folgenden dargestellt werden.

2.1 Sprachcodierung

Die Methoden zur Digitalisierung des Sprachsignals lassen sich in zwei Klassen einteilen: in sogenannte *Vocoder,* welche die Physiologie des Sprechapparates mit einem Filter nachbilden, und *Wellenformcodierer* (z.B. PCM-Codierer und Deltamodulatoren), welche die charakteristischen Eigenschaften des Sprachsignals nicht ausnützen.

Die *Vocoder* benötigen eine sehr kleine Datenrate im Bereich von 2,4 bis 4,8 kbit/s. Durch eine Erhöhung der Datenrate kann dabei die Sprachqualität nicht verbessert werden. Aus einer Reihe von Gründen («synthetische» Sprachqualität, Empfindlichkeit auf Nebengeräusche, hohe Komplexität) hat sich dieses Verfahren im zivilen Mobilfunk nicht durchgesetzt.

Die Wellenformcodierer arbeiten mit Datenraten ab etwa 16 kbit/s. Bei kleineren Übertragungsgeschwindigkeiten nimmt die Sprachqualität schnell ab, so dass die Verständlichkeit nicht mehr gewährleistet ist. Der für den Mobilfunk interessante Bereich mit Datenraten um 10 kbit/s wird von keinem der beiden Verfahren befriedigend abgedeckt.

Neuere Arbeiten auf diesem Gebiet beruhen nun auf einer Synthese der beiden Methoden: Sie nutzen die physiologischen Eigenschaften der

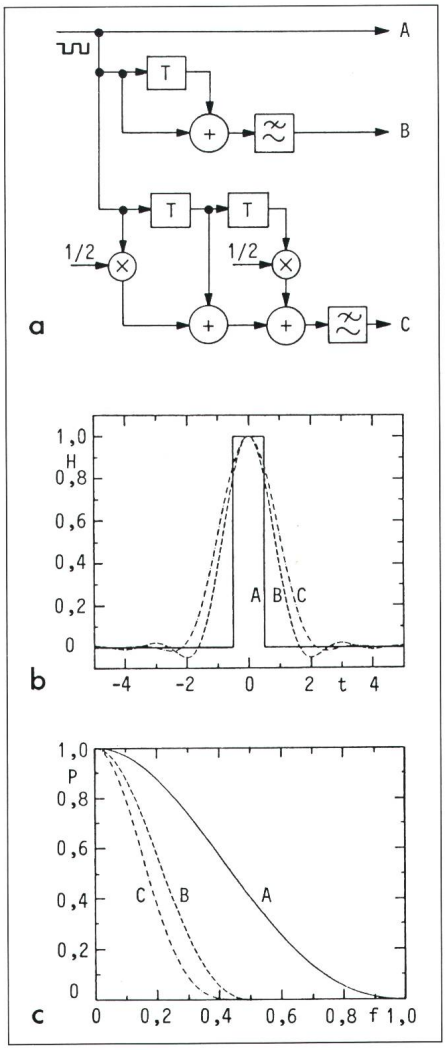
Spracherzeugung und des Gehörs aus und übertragen gleichzeitig wenigstens einen Teil der Wellenform. Damit kann eine recht gute Sprachqualität bei einer Datenrate von 8 bis 12 kbit/s erreicht werden. Mit der unerlässlichen Zusatzinformation (10...20%) für Synchronisation, selektiven Fehlerschutz usw. beträgt die Datenrate auf dem Übertragungskanal etwa 9 bis 14 kbit/s.

2.2 Bandbreiteneffiziente Modulationsverfahren

Bei der Wahl eines Modulationsverfahrens muss neben der verfügbaren Bandbreite zusätzlich berücksichtigt werden, dass aus Gründen der Effizienz die Senderendstufe eines Mobilfunkgerätes in Sättigung betrieben werden sollte. In der Paxis werden deshalb fast ausschliesslich Modulationsverfahren mit konstanter Umhüllenden (d.h. Frequenz- und Phasenmodulation) verwendet.

Ein binäres Basisbandsignal, das sich aus Rechteckimpulsen verschiedener Polarität zusammensetzt, hat ein sehr breites Frequenzspektrum. Zur Bandbreitenreduktion müssen erstens die Sprünge beim Polaritätswechsel durch kontinuierliche Übergänge ersetzt werden und zweitens die Impulsdauer über das Symbolintervall hinaus vergrössert werden. Dadurch überlappen aufeinanderfolgende Impulse, was als Symbolübersprechen bezeichnet wird. Typische Schaltungen zur Erzeugung solcher Impulse, die entsprechenden Impulsformen und die zugehörigen Frequenzspektren sind in Figur 2 dargestellt. Die Impulsformen (Fig. 2b) weisen ausserhalb des Hauptzipfels Nullstellen im Abstand der Symboldauer auf. Dadurch wird zu einem definierten Zeitpunkt der Momentanwert des Signals durch einige überlappende Datensymbole bestimmt (diese Tatsache ist für die Rekonstruktion der Daten im Empfänger sehr wichtig). Ein erzeugtes Basisbandsignal kann nun einem Trägersignal aufmoduliert werden. Bei kleinem Frequenzhub (in der Grössenordnung von 25 bis 35% der Datenrate, also etwa 2,5 bis 3,5 kHz bei 10 kbit/s) entsteht ein schmalbandiges Signal mit konstanter Umhüllenden. Solche Signale werden als CPM-Signale (Continuous Phase Modulation) bezeichnet.

Für einige der unten beschriebenen Empfängertypen muss der Modulationsindex des Signals sehr genau eingehalten werden. In diesen Fällen ist es naheliegend, das frequenzmodulierte Signal direkt digital und nicht mit einer der oben beschriebenen Methoden zu erzeugen. Dazu werden Abtastwerte des Signals in einer Zwischenfrequenzlage in einem Speicher fest einprogrammiert. Wegen der Überlappung der Datenimpulse ist eine Vielzahl möglicher Signalformen abzuspeichern. Bei der Übertragung der digitalen Information wird nun eine der Datensequenz entsprechende Folge von Abtastwerten aus dem Speicher ausgelesen und nach der Digital-/Analogwandlung auf die gewünschte Sendefrequenz hochgemischt.



Figur 2 Pulsformung

A, B, C, Ausgänge des Filters
a Pulsformungsfilter
b Pulsformen
H Amplitude
t Zeit
c Spektren
P Leistung
f Frequenz

2.3 Empfänger

Die oben beschriebenen Signale lassen sich durch drei verschiedene Empfängertypen verarbeiten, welche sich sowohl in bezug auf ihre Komplexität als auch in bezug auf ihr Fehlerverhalten unterscheiden. Der einfachste Empfänger besteht aus einem Frequenzdiskriminator, welcher das im Kapitel 2.2. beschriebene Basisbandsignal rekonstruiert. Dieses wird einmal pro Symbolintervall abgetastet. Ohne Symbolübersprechen liesse sich die Bitfolge direkt aus den Abtastwerten rekonstruieren. Wegen des Symbolübersprechens muss jedoch ein aufwendigerer Weg begangen werden: Man berechnet für jede mögliche Datensequenz die resultierende Sequenz der Abtastwerte (unter Vernachlässigung des Rauschens) und wählt jene Datenfolge, die mit den tatsächlichen Abtastwerten am besten übereinstimmt. Dieses als Maximum Likelihood Sequence Estimation (MLSD) bezeichnete Verfahren kann mit dem sogenannten Viterbi-Algorithmus effizient realisiert werden. Daneben existieren allerdings auch einfachere Decodierverfahren: Durch eine geeignete Vorcodierung der Daten im Sender (differentielle Codierung) ist es z.B. möglich, die Information Bit für Bit durch unabhängige Detektion der Signalwerte zu den Abtastzeitpunkten zurückzugewinnen. Die Fehlerwahrscheinlichkeit dieses Verfahrens ist allerdings wesentlich höher. Trotzdem ist es wegen das minimalen Hardwareaufwandes immer noch die meistverbreitete Art der Detektion.

Der oben beschriebene MLSD-Empfänger wird (im Gegensatz zu den zwei nachfolgend beschriebenen Empfängern) als nichtkohärent bezeichnet, da er die Phase des Trägersignals nicht berücksichtigt. Die maximal zulässige Datenrate liegt bei 10 kbit/s im 25-kHz-Kanal.

Eine zweite Art von Empfängern misst die Änderung der Trägerphase über ein Symbolintervall. Diese Sequenz von Phasendifferenzen kann dann wieder über den Viterbi-Algorithmus in die Datensequenz abgebildet werden. Für kleine Fehlerwahrscheinlichkeiten muss der Frequenzhub im Sender sehr genau eingehalten werden. Typisch für diese Methode, welche als differentiell kohärent bezeichnet wird, ist ein Hub von 25%, wodurch sich die Phase pro Symbol um ± ¼-Kreisdrehung ändert. Bei diesem Empfänger ist ein grösseres Sym-

bolübersprechen zulässig als beim nichtkohärenten, wodurch die Datenrate auf mindestens 16 kbit/s erhöht werden kann.

Der Empfänger des dritten Typs vergleicht die Phase des Signals mit einem unmodulierten Referenzträger. Auch hier wird der Viterbi-Algorithmus dazu verwendet, die Datenfolge zu rekonstruieren. Dieser kohärente Empfänger hat potentiell die kleinste Fehlerwahrscheinlichkeit. Die Erzeugung des Referenzträgers aus dem empfangenen Signal erweist sich jedoch als sehr anspruchsvoll: Die Phase dieses Trägers sollte den Phasenfluktuationen des Mobilfunkkanals folgen, damit der Vergleich mit dem Empfangssignal die durch die Daten erzeugte Phasenänderung rekonstruiert. Die als Trägersynchronisation bezeichnete Schaltung hat also die Aufgabe, zwischen datenabhängigen und durch den Kanal erzeugten Phasenänderungen zu unterscheiden und nur letztere zu berücksichtigen. Dieses schwierige Problem befindet sich momentan noch im Forschungstadium.

Bei der Realisierung der Empfänger ist eine schrittweise Ablösung der analogen Signalverarbeitung durch digitale zu beobachten: die integrierten, digitalen Signalprozessoren werden immer leistungsfähiger und erlauben die Verarbeitung von immer komplexeren Algorithmen bei steigenden Abtastraten. Es ist deshalb zu erwarten, dass in Zukunft die aufwendigeren Empfängertypen realisiert werden und dass die Digitalwandlung des Signals bereits auf einer Zwischenfrequenz erfolgen wird.

3. Digitale Zeitmultiplexsysteme

Der Übergang zur digitalen Übertragung und die damit verbundenen Möglichkeiten der Hochintegration werden den Trend zur Mobilkommunikation voraussichtlich noch verstärken. Künftige Mobiltelephonnetze sind deshalb für grosse Teilnehmerkapazitäten und Verkehrsdichten zu dimensionieren. Waren die bisherigen Natel-Netze in der Schweiz für etwa 10 000 Teilnehmer ausgelegt, so ermöglicht das Natel-C mit gegen 250 000 möglichen Benutzern eine erhebliche Kapazitätssteigerung.

Gegenwärtig definieren die in der CEPT vereinigten europäischen Postverwaltungen ein neues, digitales Mobiltelephonsystem. Dieses System soll in allen beteiligten Ländern als europaweiter Standard anerkannt werden und dem Benutzer den Netzzugriff mit demselben Gerät auf dem ganzen Kontinent ermöglichen. In der Schweiz ist für dieses zukünftige, digitale Mobiltelephonnetz (Natel-D), welches ab etwa 1995 installiert werden könnte, nach heutigen Abschätzungen mit einer Teilnehmerzahl von 500 000 bis 1 Mio zu rechnen.

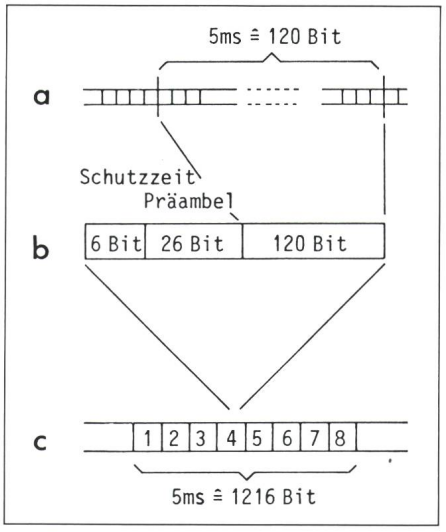
Zur Gewährleistung dieser hohen Verkehrskapazität ist dieses digitale Mobiltelephonnetz für etwa 800 Kanäle zu dimensionieren (Natel-C im Endausbau: etwa 600 Kanäle). Vor allem in Ballungsgebieten wird man aus Gründen der besseren Frequenzbandausnutzung mit kleinen Versorgungszellen (Durchmesser wenige Kilometer) und damit geringen Sendeleistungen arbeiten, so dass die in einer Zelle belegten Kanäle in kürzeren Abständen wieder verwendet werden können. Die kleine Zellengrösse hat nun aber zur Folge, dass ein mobiler Teilnehmer sein momentanes Versorgungsgebiet mit einiger Wahrscheinlichkeit während des Gespräches verlässt und sich in eine benachbarte Zelle begibt. Dort wird ihm ein anderer Kanal zugeteilt. Ein derartiges «Hand-over» muss ohne einen den Benutzer störenden Verbindungsunterbruch erfolgen.

Im geplanten digitalen Netz ist damit ein schnelles Umschalten des Mobilgerätes zwischen Kanälen erforderlich, wobei die Anzahl möglicher Kanäle sehr gross ist. Während der Übergabe ist der gleichzeitige Empfang zweier Kanäle zu gewährleisten. Die Basisstationen in den einzelnen Zellen müssen zwar nicht auf sämtlichen vorgesehenen Kanälen, in Ballungszentren aber doch auf 70 bis 100 Kanälen gleichzeitig verkehren können. Es zeigt sich, dass ein Vielfachzugriff in der Zeit (TDMA) oder gleichzeitig in der Zeit und in der Frequenz diese Anforderungen einfacher und billiger erfüllen kann als das im zweiten Abschnitt erläuterte, reine Frequenzmultiplexverfahren (FDMA).

Im Unterschied zum Frequenzmultiplexverfahren, bei welchem ein Hochfrequenz-Träger mit dem Basisbandsignal eines einzigen Kanals moduliert wird, sind beim Zeitvielfachzugriff die digitalen Signale mehrerer Kanäle zu einem Datenstrom mit höherer Schrittgeschwindigkeit zusammengefasst, welcher dann den Hochfrequenz-Träger moduliert. Ein mögliches Verfahren ist in Figur 3 dargestellt.

Das durch eine Kanalcodierung vor Übertragungsfehlern geschützte, digitale Sprachsignal weist im vorliegenden Beispiel eine Datenrate von 24 kbit/s auf. Der Datenstrom wird nun in Blöcke von 120 Binärzeichen, entsprechend einer Dauer von 5 ms, aufgeteilt und zu jedem Block 32 zusätzliche Zeichen für die Synchronisation hinzufügt. Die 152 Binärzeichen werden nun derart in einen Datenstrom höherer Rate umgesetzt, dass für deren Übertragung lediglich ein Achtel des ursprünglichen Zeitrahmens vom 5 ms, das heisst 625 µs, nötig sind. Die restliche Übertragungszeit (4,375 ms) steht für die Zeitschlitze von sieben weiteren Kanälen zur Verfügung. Der derart komprimierte Datenstrom weist nun eine Datenrate von 243,2 kbit/s auf. Dieses Signal moduliert einen hochfrequenten Träger, wobei als Modulationsverfahren diejenigen bandbreiteneffizienten Techniken zum Einsatz gelangen, welche im Kapitel 2 erläutert wurden. Benötigt man mehr als diese acht Kanäle, so wird dasselbe Verfahren auf Träger mit anderen Frequenzen angewendet. Für dieses kombinierte Zeit- und Frequenz-Multiplexsystem ergibt sich damit ein Kanalraster von etwa 250 kHz.

Das Zeitmultiplexverfahren erfordert eine einwandfreie Synchronisation der Teilnehmersignale. Man denke sich etwa den Fall, wo zwei aufeinanderfolgende Zeitschlitze durch zwei verschiedene Verbindungen belegt werden. Die eine Mobilstation sendet einen Block à 152 Binärzeichen bei-



Figur 3 TDMA-Zeitrahmen
a Sprachdaten: 24 kbit/s
b Zeitschlitz: 625 µs
c Daten auf Funkkanal: 243,2 kbit/s

spielsweise im Zeitschlitz Nummer 3 und schaltet dann ihren Sender aus. Die zweite Mobilstation, welche Zeitschlitz Nummer 4 verwendet, hat nun ihren Sender genau im richtigen Zeitpunkt einzuschalten. Dabei ist zu beachten, dass sowohl die Ausschaltung des ersten wie auch die Tastung des zweiten Senders kontinuierlich zu erfolgen hat, um einen günstigen Verlauf des Frequenzspektrums der Sendesignale zu gewährleisten. Zur Vereinfachung des Synchronisationsvorgangs ist zwischen den Zeitschlitzen eine Schutzzeit (Guard Time), während der keine Nutzinformation übertragen wird, einzuhalten. Im vorliegenden Beispiel ist eine Schutzzeit von 6 Symbolintervallen oder etwa 24 µs vorgesehen.

Zur Gewährleistung einer möglichst raschen Synchronisation wird den Daten eine Synchronisationspräambel (in unserem Beispiel bestehend aus 26 Zeichen) beigefügt, welche dem Empfänger bekannt ist. Diese Präambel erlaubt dem Empfänger, Trägerphase, Bittakt, aber auch die exakte Lage der Zeitschlitze für die Sendedaten zu bestimmen. Zudem ermöglicht sie nötigenfalls die Bestimmung der Übertragungsfunktion des Funkkanals.

Hier zeigt sich ein weiterer Vorteil dieses Verfahrens: Durch die relativ grosse Bandbreite der Funksignale ist eine Auslöschung des empfangenen Signals bei Mehrwegempfang viel weniger wahrscheinlich als bei schmalbandiger Übertragung. Vielmehr erlauben geeignete Detektionsverfahren sogar eine Ausnützung der Raum-Diversity, welche bei Mehrwegempfang inhärent vorhanden ist. Als Möglichkeiten bieten sich hier einfache adaptive, signalangepasste Filter (Adaptive Matched Filter), aufwendigere Entzerrer mit Entscheidungsrückführung (Decision Feedback Equalizer) oder aber die bereits erwähnte relativ aufwendige Maximum Likelihood Sequence Estimation mit dem Viterbi-Algorithmus an.

Zusammenfassend lassen sich folgende Vorteile des Zeitmultiplexverfahrens erkennen:

- Die Anzahl der kostspieligen Hochfrequenzteile (Sender/Empfänger) in der Basisstation verringert sich drastisch, im vorliegenden Beispiel um einen Faktor acht. Bei sehr hohem Verkehrsaufkommen in Ballungsgebieten sind daher wesentlich geringere Infrastrukturkosten zu erwarten.
- Die erhöhte Bandbreite des Zeitmultiplexsignals erlaubt den Einsatz von Entzerrern und damit einen Detektionsgewinn bei Mehrwegempfang, während letztere bei schmalbandigen Verfahren nur störend in Erscheinung tritt.
- Schliesslich trägt eine Aufteilung des Signalraums in die Dimension «Zeit» der mehr zeitbezogenen Natur digitaler Signale sehr viel stärker Rechnung als die Aufteilung in der Frequenz, welche eher analogen Signalen angepasst scheint. Dies zeigt sich vor allem in der einfacheren Schaltungstechnik, welche der Zeitvielfachzugriff mit digitaler Übertragung insbesondere bei Einsatz moderner Signalprozessoren ermöglicht.

Natürlich hat auch das Zeitmultiplexverfahren gewisse Nachteile:

- Im vorliegenden Beispiel bietet eine Basisstation auf jeden Fall mindestens acht Kanäle an. Dies kann in Gebieten mit schwachem Verkehr zu einer Überversorgung führen. Allerdings dürften die damit verbundenen Mehrkosten durch die erreichbaren Einsparungen in den Ballungsgebieten mehr als wettgemacht werden. Besonders bei nichtöffentlichen Anwendungen kann es jedoch vorkommen, dass in einem grösseren Gebiet nur ein oder zwei Kanäle notwendig sind. Hier wäre dann mit Vorteil Frequenzvielfachzugriff anzuwenden.
- Trotz der Breitbandigkeit der Signale lässt sich ein gelegentlicher, kurzzeitiger Unterbruch der Verbindung, bedingt durch Signalschwund, nicht ausschliessen. Da die Datenübertragung in Blöcken à 120 Informationszeichen erfolgt, ist mit Büschelfehlern zu rechnen, welche mit geeigneten Codiertechniken (Interleaving, Block-Codierung) korrigiert werden müssen.
- Bedingt durch die notwendige Schutzzeit und die Präambel ergibt sich eine leicht geringere spektrale Effizienz (Übertragungsleistung pro Bandbreite in bit $\cdot$ s^{-1} Hz^{-1}) des Zeitmultiplexverfahrens. Um eine gute sogenannte Frame Efficiency zu erreichen, ist man also bestrebt, möglichst viele Informationszeichen in einem einzigen Zeitschlitz zu übertragen.
- Zeitmultiplexsysteme weisen inhärent eine Verzögerung in der Grössenordnung der Rahmendauer auf, im vorliegenden Fall also etwa 5 ms. Dazu kommen zusätzliche Verzögerungen durch die Signalverarbeitung im Empfänger, die Sprachcodierung usw. Solange man sich auf acht Kanäle pro Träger beschränkt, wirkt sich die Gesamtverzögerungszeit nicht störend aus.
- Letztlich ist auch zu erwähnen, dass TDMA- und FDMA-Systeme im gleichen Frequenzband unverträglich sind. Dies ergibt Probleme bei der Netz- und Frequenzplanung, vor allem beim Ersatz eines FDMA-Systems durch ein modernes TDMA-Netz. Falls kein neues Frequenzband für das TDMA-Netz zur Verfügung steht, muss mindestens in der Übergangsphase eine grosse Einbusse an Kapazität sowohl im alten als auch im neuen System in Kauf genommen werden.

Trotz dieser Nachteile überwiegen aber doch die Vorteile von TDMA für ein digitales Mobiltelephonsystem mit hoher Verkehrsdichte Obwohl in vielen Fragen noch keine Einigkeit besteht, steht deshalb bereits heute fest, dass im zukünftigen paneuropäischen Mobiltelephonnetz das Zeitmultiplexverfahren zum Einsatz kommen wird.

4. Schlussfolgerungen

Bei der Realisierung von digitalen Übertragungsverfahren für zukünftige Mobilfunknetze sind zwei grundsätzlich verschiedene Systemkonzepte denkbar:

- Schmalbandige Übertragungsverfahren mit Frequenzvielfachzugriff (FDMA) sind vor allem dann interessant, wenn auf bestehende Kanalraster Rücksicht genommen werden muss oder wenn der Funknetzbetreiber mit einigen wenigen Kanälen auskommt. Dank technischen Fortschritten bei der Sprachcodierung und bei den Übertragungsmodems sind wesentliche Fortschritte bezüglich Sprachqualität bei schmalbandiger, digitaler Übertragung zu erwarten.
- Bei zukünftigen, digitalen Mobiltelephonsystemen mit grosser Verkehrsdichte zeichnet sich ein Übergang zu breitbandigeren Zeitmultiplexsystemen (TDMA) ab. Die Übertragung von 8 bis 10 Zeitmuliplex-Kanälen auf einem Hochfrequenzträger verspricht u.a. wesentliche Einsparungen bei den Hochfrequenzausrüstungen der Basisstationen, einfachere Abläufe bei der Übergabe einer Mobilstation von einer Zelle zur anderen (Hand-over) sowie bessere Resistenz gegen Störungen durch Mehrwegempfang.

Literatur

[1] *W.E. Debrunner:* Impulsantworten bei Mehrwege-Empfang in hügeligem Gelände. Frequenz, Band 40(1986), Heft 8/10, p. 236ff.