

Jochen Schiller

# Mobilkommunikation

2., überarbeitete Auflage



PEARSON  
Studium

---

ein Imprint von Pearson Education  
München • Boston • San Francisco • Harlow, England  
Don Mills, Ontario • Sydney • Mexico City  
Madrid • Amsterdam

## Kapitel

# 3

# Medienzugriffsverfahren

In diesem Kapitel werden verschiedene *Medienzugriffsverfahren* (*Medium Access Control, MAC*) vorgestellt, die speziell für einen Einsatz in der drahtlosen Kommunikation ausgelegt sind. Medienzugriffsverfahren umfassen alle Mechanismen, die notwendig sind, um den Zugriff eines Nutzers auf ein Medium mit Hilfe von SDM, TDM, FDM oder CDM zu steuern. MAC-Verfahren entsprechen damit den »Verkehrsregeln« im Autobahn-Fahrzeug-Beispiel aus *Kapitel 2*. Sobald mehrere Fahrzeuge eine Verkehrskreuzung im Zeitmultiplexverfahren nutzen, müssen Verkehrsregeln den Zugriff steuern, um Kollisionen zu vermeiden. Verkehrsampeln dienen dazu, diese Regeln konkret umzusetzen. Während das vorige Kapitel vorrangig Mechanismen vorgestellt hat, die logisch auf der physikalischen Schicht, Schicht 1, des ISO/OSI-Basisreferenzmodells einzuordnen sind, werden MAC-Mechanismen der *Sicherungsschicht* (*Data Link Control, DLC*), Schicht 2, zugeordnet. Schicht 2 wird im Modell weiter unterteilt in die Verbindungsabschnittsteuerung (Schicht 2b, *Logical Link Control, LLC*) und die Medienzugriffssteuerung (Schicht 2a, *MAC*). Die Aufgabe der *DLC*-Schicht besteht darin, eine zuverlässige Punkt-zu-Punkt- oder Punkt-zu-Mehrpunkt-Verbindung zwischen zwei bzw. mehreren Geräten über ein leitungsgebundenes oder drahtloses Medium aufrechtzuerhalten (Halsall, 1996). In den folgenden Abschnitten werden grundlegende MAC-Mechanismen vorgestellt, wohingegen LLC, höhere Schichten und spezielle Zugriffsverfahren auf das Medium im Zusammenhang mit konkreten Systemen in nachfolgenden Kapiteln beschrieben werden.

Zu Beginn wird in diesem Kapitel geschildert, warum spezielle MAC-Verfahren benötigt werden und typische Verfahren, die aus Festnetzen bekannt sind, im Allgemeinen versagen. Im Gegensatz zu Festnetzen stellen in der Funkkommunikation versteckte, nahe oder ferne Endgeräte ein ernsthaftes Problem dar. Anschließend werden MAC-Verfahren vorgestellt, die auf den grundlegenden Multiplextechniken aus *Kapitel 2* basieren. Während SDM und FDM meist in einer relativ statischen Form eingesetzt werden (d.h. ein gewisser Raum oder eine gewisse Frequenz bzw. eine Sprungsequenz wird einer Kommunikationsbeziehung für eine längere Zeit zur Verfügung gestellt), existieren im Gegensatz dazu vielfältige hochdynamische TDM-Verfahren, auf die im Speziellen eingegangen wird. TDM-Verfahren sind deswegen relativ beliebt, weil hier kein (analoger) Empfänger auf eine bestimmte Frequenz eingestellt werden muss (wie bei FDM-Verfahren), sondern die Zugriffszeit auf ein Medium einem Sender sehr flexibel und anforderungsgesteuert zugewiesen werden kann. Bekannte Schemata, die im Folgenden behandelt werden, sind hier Aloha, Vorabreservierung oder Polling.

Schließlich wird am Ende des Kapitels erneut das CDM-Verfahren aufgegriffen, um zu zeigen, wie nun ein MAC-Schema, das auf CDM basiert, verschiedene Codes den verschiedenen Sendern zuweist, um sie im Code-Raum voneinander zu trennen. In diesem Kapitel wird auch deutlich, dass praktisch kein MAC-Verfahren nur ein Multiplexschema einsetzt, sondern immer eine Kombination, um die spezifischen Vorteile der Verfahren

auszunutzen. Das Kapitel schließt mit einer tabellarischen Übersicht der grundlegenden Verfahren.

## 3.1 Motivation für spezielle MAC-Verfahren

Bevor spezielle MAC-Verfahren für die drahtlose Kommunikation entworfen werden, muss zunächst die Frage geklärt werden, warum nicht längst erprobte und vielfach eingesetzte Verfahren aus dem Bereich der leitungsgebundenen Netze zum Einsatz kommen können. Das prominenteste Beispiel ist hier sicherlich CSMA/CD, wie es in der ursprünglichen Spezifikation für IEEE-802.3-Netzwerke (allgemein als Ethernet bekannt) festgelegt wurde.

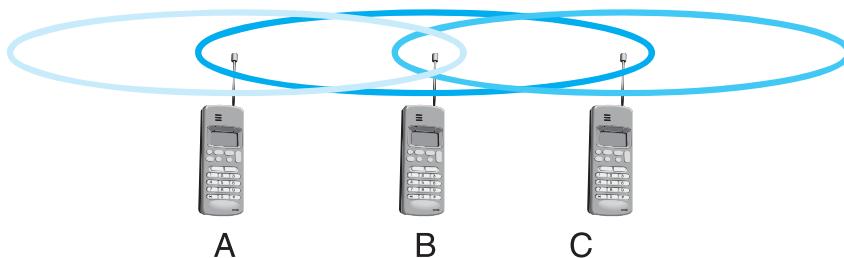
Angenommen also, *CSMA/CD* (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection*) soll für drahtlose Netze eingesetzt werden. Bei diesem Verfahren hört ein potentieller Sender vor dem Senden das Medium (Koaxialkabel oder verdrillte Doppeladern) ab (*Carrier Sense*), um festzustellen, ob es frei ist. Ist das Medium frei, so kann der Sender mit dem Senden beginnen, hört aber weiterhin in das Medium hinein, um festzustellen, ob nicht auch ein weiterer Sender (praktisch) gleichzeitig mit dem Senden begonnen hat (*Collision Detection*). Stellt der Sender eine Kollision fest, so stoppt er sofort mit dem Senden und sendet ein starkes Störsignal (*Jamming*), um alle anderen Stationen von der Kollision zu unterrichten.

Warum versagt dieses Verfahren bei der drahtlosen Kommunikation? Der Grund liegt darin, dass CSMA/CD eigentlich Kollisionen bei einem Empfänger der Daten feststellen will, eine Kollision beim Sender ist relativ bedeutungslos. Die Hauptsache ist, dass ein Signal ungestört am Empfänger ankommt – jedoch stellt der Sender bei CSMA/CD eine eventuell auftretende Kollision bei sich fest, nicht beim Empfänger. Dies stellt bei der Verwendung einer Leitung kein größeres Problem dar, da hier mehr oder weniger von der gleichen Signalstärke auf der gesamten Kabellänge ausgegangen werden kann (bzw. von einer gewissen Mindestsignalstärke innerhalb einer festgelegten maximalen Kabellänge). Findet nun eine Kollision irgendwo im Kabel statt, bekommt dies jede angeschlossene Station mit. Daher ist es auch egal, wenn ein Sender bei sich eine Kollision erkennen will, dabei aber eigentlich eine Kollision bei einem Empfänger meint.

Bei drahtlosen Netzen stellt sich die Situation grundlegend anders dar. Wie in *Kapitel 2* dargestellt, nimmt die Signalstärke im freien Raum bereits proportional zum Quadrat der Entfernung ab, Hindernisse dämpfen ein Signal zusätzlich. Angenommen, ein Sender wendet CSMA/CD an und erkennt ein freies Medium. Daraufhin startet er mit dem Senden, jedoch kollidiert das Signal beim Empfänger, da ein weiterer Sender gleichzeitig (bzw. etwas früher oder später) mit dem Senden angefangen hat. Die hieraus resultierende Problematik wird im folgenden Abschnitt 3.1.1 näher erläutert. Ebenso ergeben sich Probleme bei der Kollisionserkennung. Der Sender kann keine Kollision erkennen und geht von einer erfolgreichen Übertragung aus, obwohl das Signal beim Empfänger zerstört wurde. Die folgenden Abschnitte werden diese und weitere Phänomene vorstellen, die den Einsatz bekannter MAC-Verfahren aus dem Festnetzbereich erschweren oder verhindern.

### 3.1.1 Versteckte und ausgelieferte Endgeräte

In Abbildung 3.1 wird in einem einfachen Szenario eine Konfiguration von drei mobilen Endgeräten angenommen, die in etwa jeweils den gleichen Abstand zueinander haben. Der Übertragungsbereich von A erreicht im Beispiel B, aber nicht C (ebenso soll der Erkennungsbereich von A nicht bis zu C reichen). Weiterhin reicht der Übertragungsbereich von C bis B, aber nicht bis A. Der Übertragungsbereich von B soll hier beide Geräte, A und C, erreichen. A kann in diesem Beispiel also nicht erkennen, wenn C sendet und umgekehrt.



**Abbildung 3.1:** Versteckte und ausgelieferte Endgeräte

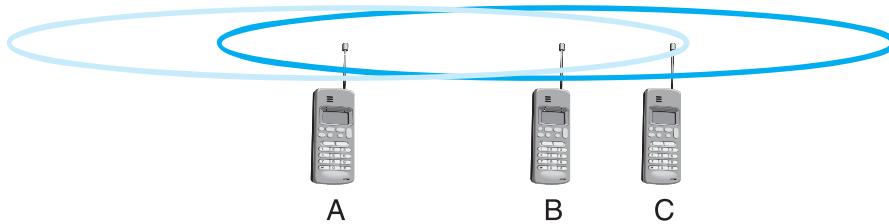
A und C wollen beide Daten zu B senden. Daher hört A in das Medium und stellt fest, dass es frei ist. A beginnt also mit dem Senden, diese Signale erreichen C nicht. C hört ebenso in das Medium und stellt fest, dass es frei ist. Der erste Schritt des CSMA/CD-Verfahrens, das Abhören des Mediums, versagt hier, da das Medium zwar beim Sender C frei ist, nicht jedoch beim Empfänger B. C beginnt daher auch mit dem Senden und verursacht eine Kollision bei B. Nun kann aber A diese Kollision bei B nicht erkennen, da die Signale von C das Gerät A nie erreichen und damit auch nicht die Kollision. A setzt also seine Sendung bis zum Ende fort. In diesem Fall wird A als *versteckt* für C bezeichnet, ebenso ist C versteckt für A (*hidden terminal*).

Versteckte Endgeräte können Kollisionen verursachen, der folgende Effekt lediglich eine unnötige Verzögerung beim Senden von Daten. Angenommen, B sendet Daten an A, C will irgendwelche Daten an ein weiteres Gerät, aber weder A noch B, senden, das komplett außerhalb der Störreichweite von A oder B liegt. Nach CSMA/CD würde nun C das Medium abhören und feststellen, dass es bereits (durch B) belegt ist. Daher verzögert C seine Sendung und wartet, bis das Medium wieder frei ist. Da A jedoch außerhalb der Störreichweite von C liegt, ist dieses Warten unnötig. Falls C eine Kollision bei B durch das gleichzeitige Senden verursachen würde, ist dies bedeutungslos, da nur eine Kollision beim Empfänger A Probleme verursachen könnte, die Signale von C jedoch zu schwach sind, um bis zu A zu gelangen. In diesem Fall ist also das Endgerät C dem Sender B *ausgeliefert* (*exposed terminal*).

### 3.1.2 Nahe und ferne Endgeräte

Abbildung 3.2 zeigt eine weitere Konfiguration mit den drei Endgeräten A, B und C. In diesem Beispiel ist B im Vergleich zu A näher an C. A und B senden beide mit der gleichen Sendeleistung. Da die Stärke eines Signals drastisch mit der Entfernung abnimmt, »übertönt« das Signal von B das von A beim Empfänger C. Ein Ergebnis davon ist, dass C die Übertragung von A nicht empfangen kann.

Je nach verwendetem Zugriffsverfahren könnte C beispielsweise eine Station sein, die Senderechte vergibt (typische Situation in Mobilfunksystemen beim unkoordinierten Medienzugriff zum Senden von Daten an eine Basisstation). In diesem Fall würde B bereits auf der physikalischen Schicht A übertönen; daher könnte C kein faires Schema für den Medienzugriff anwenden, da es stets nur B hört.



**Abbildung 3.2:** Nahe und ferne Endgeräte

Dieser Effekt der *nahen und fernen Endgeräte* ist ein ernstes Problem bei CDM-Verfahren, da hier die Signale aller Sender bei einem Empfänger mit mehr oder weniger der gleichen Signalstärke ankommen sollen. Ist dies nicht der Fall, so entspräche dies in unserem Partybeispiel dem Fall, dass eine Person näher bei einem Zuhörer immer lauter als eine weiter entfernte Person spricht und damit alle Aufmerksamkeit auf sich zieht. Auch wenn die verschiedenen Sender durch exklusive Codes ausgezeichnet sind, so würde doch der dem Empfänger am nächsten gelegene Sender alle anderen übertönen. Daher ist bei CDM-Verfahren eine präzise Steuerung der Sendeleistung notwendig, damit am Empfänger alle Signale die gleiche Stärke aufweisen (in *Kapitel 4* vorgestellte Systeme nach dem UMTS-Standard führen eine solche Leistungssteuerung beispielsweise 1500-mal pro Sekunde durch!).

## 3.2 Mehrfachzugriff durch Raummultiplex (SDMA)

*Raummultiplex* wird für den Mehrfachzugriff auf ein Medium (*Space Division Multiple Access, SDMA*) in der drahtlosen Kommunikation meist in der Art eingesetzt, dass ein mobiles Endgerät einer bestimmten optimalen Basisstation zugewiesen wird. Ein Endge-

rät könnte in einer bestimmten Situation verschiedene Basisstationen empfangen. Ein MAC-Algorithmus kann nun entscheiden, welche Basisstation unter den gegebenen Umständen (verfügbare Frequenzen (FDM), verfügbare Zeitschlüsse (TDM), verfügbarer Code (CDM) – je nach Technologie) die beste ist. SDMA wird typischerweise nie in Reinform eingesetzt, sondern immer in Kombination mit einem oder mehreren der folgenden Verfahren. Die Grundlage für SDMA wird von Zellen und sektorisierten Antennen gebildet, also der Infrastruktur, die Raummultiplex ermöglicht (Space Division Multiplexing, SDM, vgl. *Abschnitt 2.5.1*). Eine neue Anwendung von SDMA kommt derzeit mit intelligenten Antennen auf, welche die Hauptstrahlungskonstellation gezielt formen können (vgl. *Kapitel 2*). Einzelne Nutzer können so im Raum durch individuelle Keulen getrennt werden. Dieses Verfahren kann die Gesamtkapazität einer Funkzelle deutlich erhöhen (gemessen in bit/s/m<sup>2</sup> oder Sprachverbindungen/m<sup>2</sup>).

### 3.3 Mehrfachzugriff durch Frequenzmultiplex (FDMA)

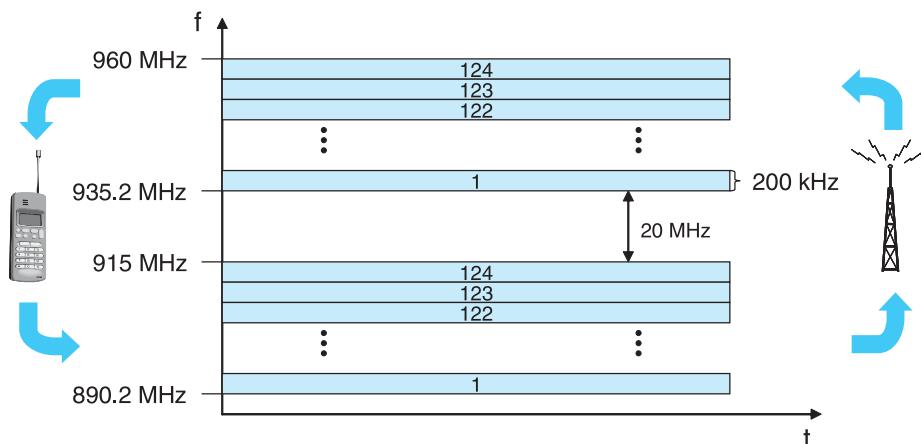
*Mehrfachzugriff durch Frequenzmultiplex* (*Frequency Division Multiple Access, FDMA*) umfasst alle Verfahren, die Übertragungskanälen verschiedene Frequenzen nach einem Frequenzmultiplex- (*Frequency-Division-Multiplex*-, FDM-) Verfahren zuweisen wie in *Abschnitt 2.5.2* vorgestellt. Diese Zuweisung kann entweder statisch sein, wie bei beispielsweise Radio- und Fernsehstationen und der weltweiten Frequenzplanung, oder dynamisch anforderungsgesteuert durchgeführt werden.

Einem Übertragungskanal kann für die gesamte Dauer seiner Existenz eine Frequenz (reines FDMA) oder eine Folge von Frequenzen nach einem bestimmten Muster (FDMA mit TDMA kombiniert) zugewiesen werden. Der zweite Fall ist Standard für die meisten Mobilfunksysteme, um schmalbandige Störungen auf bestimmten Frequenzen zu umgehen, und wird als Frequenzspringen bezeichnet. Sender und Empfänger müssen sich auf eine gemeinsame Sprungsequenz einigen, sonst ist kein Empfang möglich. Daher sind die Sprungsequenzen meist vorgegeben bzw. werden vorab ausgehandelt. Die Tatsache, dass ein Sender nicht beliebig im Frequenzraum herumspringen kann, ist einer der Hauptunterschiede zwischen FDM- und TDM-Verfahren, da bei Letzteren Sendezeitpunkte beliebig gewählt werden können, ohne dass ein Empfänger diese Zeitpunkte alle im Voraus kennen muss.

Außer zum Mehrfachzugriff verschiedener Sender auf ein Medium wird FDM oft zum gleichzeitigen Zugriff einer Basisstation und einer Mobilstation auf das Medium bei zellenbasierten Mobilfunknetzen eingesetzt. Beide Kommunikationspartner benötigen meist einen *Duplexkanal*, d.h. einen Kanal, in dem beide Partner gleichzeitig senden und empfangen können, ohne dass sich die Sendungen stören. Die beiden Richtungen, Mobilstation zu Basisstation und Basisstation zu Mobilstation, werden hier durch unterschiedliche Frequenzen voneinander getrennt. Dieses Verfahren wird mit *Frequenzduplex* (*Frequency Division Duplex, FDD*) bezeichnet. Wiederum müssen beide Kommunikationspartner die Frequenzen in beide Richtungen im Voraus kennen; ein Empfänger kann nicht einfach in

das Medium »hineinhören«, wenn er nicht die richtige Frequenz kennt. Die Kanäle auf den beiden Frequenzen werden auch als *uplink* (Aufwärtsrichtung, von der Mobilstation zur Basisstation oder von einer Bodenstation zu einem Satelliten) und als *downlink* (Abwärtsrichtung, von einer Basisstation zur Mobilstation oder von einem Satelliten zu einer Bodenstation) bezeichnet.

Ein Beispiel für die Kombination von FDM und FDD zeigt Abbildung 3.3 anhand des GSM-Standards für 900 MHz (vgl. *Kapitel 4*). Die grundlegende Frequenzzuweisung für GSM wurde weitgehend einheitlich festgelegt und wird jeweils von nationalen Behörden geregelt (aus diesem Grund kann es auch leichte Abweichungen hinsichtlich der hier aufgeführten Frequenzen je nach Land geben). Alle Kanäle von mobilen Telefonen zu Basisstationen (Aufwärtsrichtung) verwenden Frequenzen im Band zwischen 890,2 und 915 MHz, alle Kanäle von einer Basisstation zu den mobilen Endgeräten (Abwärtsrichtung) liegen zwischen 935,2 und 960 MHz. Mit Hilfe eines FDMA-Schemas legt bei GSM die Basisstation (dargestellt auf der rechten Seite) eine Frequenz für den Kanal zum mobilen Endgerät und für den Kanal vom mobilen Endgerät fest. Somit wird aus einer Auswahl von je 124 Kanälen eine Duplexverbindung aufgebaut. Aufwärtsrichtung und Abwärtsrichtung besitzen in GSM einen festen Abstand. Wenn die Frequenz für die Aufwärtsrichtung  $f_u = 890 \text{ MHz} + i \cdot 0,2 \text{ MHz}$  beträgt, so ist die Frequenz für die Abwärtsrichtung  $f_d = f_u + 45 \text{ MHz}$ , also  $f_d = 935 \text{ MHz} + i \cdot 0,2 \text{ MHz}$ . Die Basisstation wählt dafür einen der Kanäle  $i$ , die Bandbreite beträgt pro Richtung 200 kHz. In diesem Beispiel wird also FDM für den Mehrfachzugriff (124 Kanäle pro Richtung) und den Richtungsduplex (FDD) nach einem relativ festen Schema eingesetzt. Ähnliche FDM-Verfahren für FDD finden sich in den Systemen AMPS, IS-54, IS-95, IS-136, PACS und UMTS (FDD-Modus). *Kapitel 4* erläutert weitere Details zu GSM, insbesondere die Kombination von FDM mit TDM.



**Abbildung 3.3:** Einsatz von Frequenzmultiplex für Mehrfachzugriff und Richtungsduplex

## 3.4 Mehrfachzugriff durch Zeitmultiplex (TDMA)

Im Vergleich zu FDMA sind Verfahren mit *Mehrfachzugriff durch Zeitmultiplex (Time Division Multiple Access, TDMA)* wesentlich flexibler. TDMA-Techniken umfassen alle Verfahren, die einem Sender eine gewisse Sendezeit zuweisen, also Zeitmultiplex steuern. Bei TDMA-Verfahren ist es nicht notwendig, einen Empfänger auf der physikalischen Schicht auf eine bestimmte Empfangsfrequenz einzustellen. Ein Empfänger kann bei diesen Verfahren die gesamte Zeit auf der gleichen Frequenz arbeiten. Dadurch wird der Analogteil von Sender und Empfänger wesentlich vereinfacht, der Mehrfachzugriff verlagert sich im Wesentlichen auf die Steuerungssoftware. Während das gleichzeitige Mithören eines Empfängers auf verschiedenen Frequenzen sehr schwer bis beinahe unmöglich ist, kann sehr einfach auf einer Frequenz in verschiedene Kanäle hineingehört werden, die das Medium nacheinander belegen. Aus diesem Grund arbeiten praktisch alle MAC-Verfahren in Festnetzen nach diesem Verfahren, beispielsweise Ethernet, Token Ring, ATM (Halsall, 1996), (Stallings, 1997).

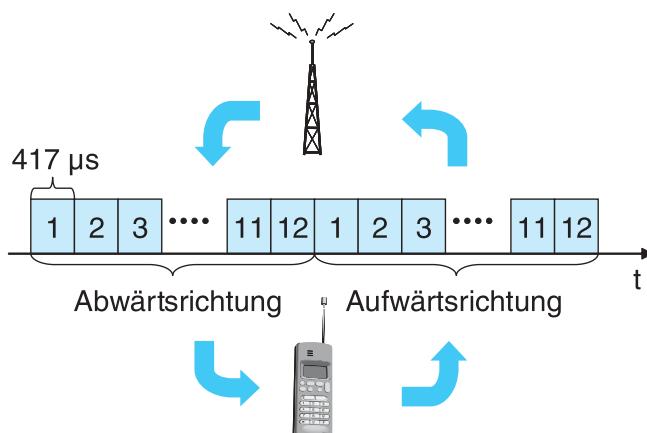
Bei TDMA-Verfahren muss eine Synchronisation zwischen Sender und Empfänger(n) im Zeitbereich stattfinden. Dies kann wie bei FDMA-Verfahren nach einem festen Muster geschehen, d.h. ein bestimmter Zeitabschnitt ist immer für ein bestimmtes Sender-Empfänger-Paar vorab festgelegt, oder es können dynamische Zuweisungsverfahren eingesetzt werden. Dynamische Verfahren benötigen nun allerdings eine eindeutige Kennung zu Beginn der Sendung, oder der Sendezeitpunkt muss kurz vor der Sendung einem Empfänger bekannt gegeben werden. Als Kennungen werden oft die MAC-Adressen eingesetzt; daran kann ein Empfänger erkennen, ob er mit der Sendung gemeint ist. Statische Verfahren benötigen diese Kennungen nicht, sind jedoch auch nicht so flexibel bei schwankenden Anforderungen hinsichtlich der Kommunikationsbeziehungen. In den folgenden Abschnitten werden mehrere statische und dynamische Verfahren vorgestellt, wie sie in der drahtlosen Kommunikation eingesetzt werden. Auch hier werden die Verfahren typischerweise wieder mit anderen Verfahren, z.B. FDMA, kombiniert, um eine höhere Flexibilität und Übertragungskapazität zu erzielen.

### 3.4.1 Statisches TDMA

Das einfachste Verfahren, Zeitmultiplex (TDM) einzusetzen, besteht darin, jedem Kommunikationskanal einen festen Zeitschlitz zuzuweisen. Das Ergebnis dieses Verfahrens ist eine feste, garantierte Bandbreite, weswegen es in praktisch allen traditionellen, auf die Sprachkommunikation ausgelegten Mobilfunksystemen eingesetzt wird. Der MAC-Algorithmus ist sehr einfach, da ein teilnehmendes System lediglich zum richtigen Zeitpunkt mit dem Senden beginnen und aufhören muss. Ist diese Synchronisation gewährleistet, weiß jeder Teilnehmer, wann er zu senden hat, und es kommt zu keinen gegenseitigen Störungen. In Mobilfunksystemen kann dieses feste Zugriffsmuster beispielsweise von der Basisstation festgelegt werden, die dann auch den Wettbewerb zwischen verschiedenen Stationen, die auf das Medium zugreifen wollen, regelt.

Diese Art fester Zugriffsmuster passt ausgezeichnet zu Verbindungen fester Bandbreite. Zusätzlich garantieren diese Systeme eine feste Zugriffsverzögerung; beispielsweise kann eine Station beim DECT-System alle 10 ms senden. TDM-Verfahren mit festem Zugriff werden in vielen digitalen Mobilfunksystemen, wie IS-54, IS-136, GSM, DECT, PHS oder PACS, eingesetzt.

Abbildung 3.4 zeigt, wie ein festes Verfahren für den Mehrfachzugriff und die Errichtung eines Duplexkanals zwischen einer Basisstation und einer mobilen Station eingesetzt wird. Die Zuweisung verschiedener Zeitschlitzte für die Aufwärts- bzw. Abwärtsrichtung auf der gleichen Frequenz wird als *Time Division Duplex (TDD)* bezeichnet (Zeitduplex). Wie in der Abbildung gezeigt, belegt die Basisstation für die Übertragung zu einer bestimmten Mobilstation einen von zwölf Zeitschlitzten, die für die Abwärtsrichtung reserviert sind. Die Mobilstation kann nur einen der zwölf Zeitschlitzte belegen, die für die Aufwärtsrichtung festgelegt wurden. Die beiden Richtungen sind also in der Zeit getrennt. Zusätzlich zur Richtungstrennung können bei diesem Beispiel bis zu zwölf Stationen die gleiche Sendefrequenz belegen, ohne sich gegenseitig zu beeinflussen. Jedes Sender-Empfänger-Paar besitzt einen exklusiven Zeitschlitzt. In dem in Abbildung 3.4 gezeigten Beispiel, das den Standardfall für das DECT-System darstellt, wird das Muster von Zeitschlitzten alle 10 ms wiederholt, jeder Zeitschlitzt ist also 417  $\mu$ s lang. Dieses Verfahren garantiert daher alle 10 ms jeder Station einen exklusiven Zugriff auf das Medium, und zwar für eine Dauer von 417  $\mu$ s unabhängig von allen anderen Stationen.



**Abbildung 3.4:** Einsatz von Zeitmultiplex für Mehrfachzugriff und Richtungs-duplex

Während Verfahren mit festen Zugriffsmustern, wie das gerade vorgestellte DECT-System, perfekt an die Anforderungen von Kommunikationsbeziehungen mit fester, symmetrischer Bandbreite angepasst sind (klassische Sprachübertragung mit z.B. 32 oder 64 kbit/s in beide Richtungen), so sind sie sehr ineffizient für asymmetrische Kommunikationsbeziehungen und insbesondere stoßartigen Datenverkehr. Diese Art von Datenverkehr ist beispielsweise typisch für den Zugriff auf das World Wide Web. Hier werden keine Daten ausgetauscht, solange ein Nutzer eine Seite betrachtet. Dann aber kann der Klick auf einen Hyperlink einen kurzen Datentransfer von der Mobilstation zur Basissta-

tion gefolgt von einem umfangreicherem Datentransfer von der Basisstation zur Mobilstation auslösen. Zwar kann DECT immerhin mit asymmetrischen Verbindungen umgehen (vgl. Abschnitt 4.2), jedoch ist das prinzipielle Schema immer noch zu unflexibel und verschwendet unnötigerweise Bandbreite. In solchen Fällen wären verbindungslose, anforderungsgesteuerte TDMA-Verfahren, wie sie in den folgenden Abschnitten vorgestellt werden, geeigneter.

### 3.4.2 Klassisches Aloha

Wie in den obigen Abschnitten beschrieben, umfasst TDMA alle Mechanismen, um den Zugriff auf ein Medium nach dem Zeitmultiplex zu steuern. Was aber, wenn Zeitmultiplex ohne jegliche Steuerung zum Medienzugriff eingesetzt wird? Genau dies geschieht beim klassischen Aloha, einem Verfahren, das an der Universität von Hawaii entwickelt und im ALOHANET zur drahtlosen Verbindung mehrerer Stationen eingesetzt wurde. Aloha koordiniert weder den Zugriff auf ein Medium, noch löst es Wettbewerbssituationen auf der MAC-Schicht auf. Stattdessen kann jede Station das Medium zu einem beliebigen Zeitpunkt ohne Absprache mit anderen Stationen belegen, wie es in Abbildung 3.5 dargestellt wird. Dies stellt also ein zufälliges Zugriffsverfahren dar, bei dem keine zentrale Instanz den Zugriff steuert oder sich die Stationen untereinander absprechen. Sobald zwei oder mehr Stationen das Medium gleichzeitig belegen, tritt eine *Kollision* auf und die übertragenen Daten werden zerstört. Die Lösung dieses Problems wird bei Aloha den höheren Schichten überlassen (hier könnten Mechanismen zur Übertragungswiederholung angesiedelt sein).

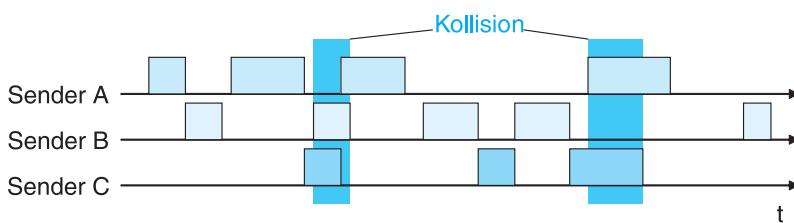


Abbildung 3.5: Mehrfachzugriff mit klassischem Aloha

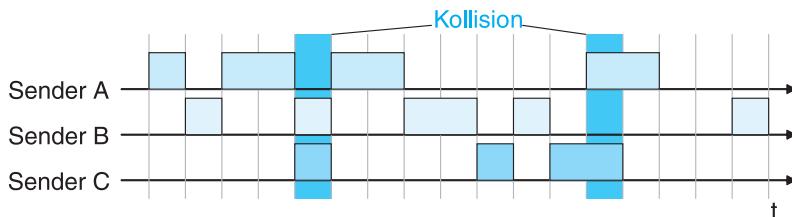
Dieses sehr einfache Aloha-Verfahren arbeitet gut für eine leichte Last und benötigt keine komplexen Steuerungen in den Sendern. Unter der klassischen Annahme<sup>1</sup> Poisson-verteilter

<sup>1</sup> Diese Annahme ist beim heutigen Internetverkehr nicht mehr richtig. Hier wird von einem *selbstähnlichen Verkehr* gesprochen, der durch eine Heavy-Tail-Verteilung anstelle einer Poisson-Verteilung gekennzeichnet ist. Ein Merkmal dieser Verteilung ist, dass es viele Ereignisse (Paketgrößen, Zwischenankunftszeiten etc.) weit entfernt von einem Mittelwert gibt. Selbstähnlich bedeutet, dass praktisch unabhängig von der zeitlichen Auflösung der Beobachtung ähnliche Muster in der Verteilung beobachtet werden können. So ähneln sich die Zwischenankunftszeiten von WWW-Sitzungen, TCP-Verbindungsaufbauten, IP-Paketen oder ATM-Zellen beim Internet-Verkehr stark (Willinger, 1998a, b).

Ankunftsarten und exponentialverteilter Zwischenankunftszeiten wird der maximale Durchsatz bei einer Systemlast von 18% erreicht (Abramson, 1977), (Halsall, 1996).

### 3.4.3 Slotted Aloha

Eine erste Verfeinerung des rudimentären Aloha-Verfahrens geschieht durch die Einführung von *Zeitschlitten* (time slots) und führt zum *Slotted Aloha*. Damit alle Sender die Zeitschlitte einhalten, müssen sie genau *synchronisiert* sein. Ein Sender darf nun nur zu Beginn eines Zeitschlitzes mit dem Senden beginnen, wie in Abbildung 3.6 dargestellt ist. Der Zugriff ist weiterhin nicht koordiniert, aber die Einführung fester Zeitschlitte verdoppelt den möglichen Durchsatz unter den gleichen Bedingungen wie beim vorigen einfachen Aloha von 18% auf 36%.



**Abbildung 3.6:** Mehrfachzugriff mit Slotted Aloha

Wie die folgenden Abschnitte zeigen werden, tauchen die beiden grundlegenden Aloha-Verfahren in vielen Systemen, die einen verteilten Zugriff auf ein gemeinsames Medium erlauben, in abgewandelter Form wieder auf. Aloha-Systeme arbeiten gut, solange die Systemlast relativ niedrig ist, sie können jedoch nie eine harte Garantie für eine minimale Übertragungsbandbreite oder eine maximale Zugriffsverzögerung geben. Hierzu werden zusätzliche Mechanismen benötigt, die beispielsweise Aloha mit statischen Verfahren verknüpfen. Es ist interessant zu sehen, dass auch neueste Mobilfunksysteme wie z.B. UMTS auf Slotted Aloha in bestimmten Situationen für den Medienzugriff setzen (wahlfreier Zugriff für den initialen Verbindungsauftbau).

### 3.4.4 Carrier Sense Multiple Access

Eine sehr einfache Erweiterung des ursprünglichen Aloha-Verfahrens ist das Abhören des Mediums vor einem möglichen Zugriff auf das Medium. Dies ist das grundlegende Prinzip von *Carrier-Sense-Multiple-Access- (CSMA-)* Verfahren (Kleinrock, 1975), (Halsall, 1996). Abhören des Mediums und Zugriff auf das Medium nur in dem Fall, dass das Medium zuvor als frei erkannt wurde, verringert die Wahrscheinlichkeit einer Kollision drastisch. Das Verfahren setzt dabei natürlich voraus, dass auch jede Station alle Sendungen

anderer Teilnehmer empfangen kann. Dies ist nicht der Fall bei versteckten Endgeräten wie in Abschnitt 3.1.1 geschildert. Sobald also ein verstecktes Endgerät gleichzeitig sendet, kann dies nicht unbedingt erkannt werden und es kann zu einer Kollision beim Empfänger kommen. Trotz dieses Problems wird das Verfahren häufig bei lokalen drahtlosen Netzen eingesetzt (vgl. *Kapitel 7*).

CSMA-Verfahren finden sich in verschiedenen Ausprägungen. Bei *nicht persistentem CSMA* hört ein Sender das Medium ab und startet sofort mit dem Senden, sobald das Medium als ungenutzt erkannt wird. Sollte das Medium belegt sein, so wartet der Sender eine gewisse zufällige Zeit, um dann erneut das Medium abzuhören. Dieses Muster wird so lange wiederholt, bis der Zugriff erfolgreich ist. *P-Persistente CSMA*-Systeme hören ebenfalls das Medium ab und warten, bis dieses frei ist, dann jedoch senden sie nur mit einer Wahrscheinlichkeit von  $p$  beziehungsweise warten mit dem Senden auf den nächsten Zeitschlitz mit einer Wahrscheinlichkeit von  $1-p$ . Der Zugriff geschieht also zusätzlich nach einem Schema mit Zeitschlitzten. Bei *1-persistenten CSMA*-Systemen senden alle Stationen sofort, sobald das Medium frei wird. Dies hat zur Folge, dass unter Umständen sehr viele Kollisionen stattfinden, wenn viele Stationen senden möchten und sich die Stationen gegenseitig blockieren. Um eine gewisse Fairness für Stationen einzuführen, die schon länger auf das Senderecht warten, können zusätzliche Algorithmen eingeführt werden, welche die Sendewahrscheinlichkeit dieser schon länger wartenden Stationen im Vergleich zu anderen Stationen erhöhen bzw. die Wartezeiten von Stationen, bevor sie erneut das Medium abhören, über einen größeren Bereich verteilen (Back-off-Mechanismus). Bis auf die Kollisionserkennung (CD, Collision Detection) entsprechen solche Verfahren dem im traditionellen Ethernet eingesetzten (Hallsall, 1996).

*CSMA/CA (CSMA with Collision Avoidance)* ist eines der CSMA-Verfahren, das in drahtlosen Netzen nach dem Standard IEEE 802.11 eingesetzt wird. In diesem Verfahren werden die Wartezeiten einzelner Stationen, bis sie wieder mit dem Abhören des Mediums beginnen dürfen, lastabhängig über einen bestimmten Bereich verteilt (vgl. *Abschnitt 7.3*). Ein sehr aufwändiges und leistungsfähiges Zugriffsverfahren, das auf ähnlichen Prinzipien beruht, ist EY-NPMA (Elimination Yield-Non-Preemptive Multiple Access) wie es für drahtlose lokale Netze nach dem HIPERLAN-1-Standard festgelegt wurde. Hier folgen nacheinander mehrere Phasen des Abhörens des Mediums und des Zugriffs auf das Medium zur Lösung eventueller Zugriffskonflikte, bevor der Sieger aus diesem Verfahren schließlich auf das Medium zur Übertragung der Nutzdaten zugreifen darf. Dieses Verfahren unterstützt Prioritäten, d.h. Daten bestimmter Stationen können bevorzugt gesendet werden.

### 3.4.5 Demand Assigned Multiple Access

Eine prinzipielle Verbesserung der Leistungsfähigkeit von Aloha-Verfahren kann durch die *Vorabreservierung* des Mediums in Kombination mit einem (festen) TDM-Verfahren erreicht werden. So können sich bei diesen Verfahren Phasen der Reservierung und Phasen der Datenübertragung abwechseln. Während der Reservierungsphase können sich Stationen einen gewissen Zeitabschnitt innerhalb der nachfolgenden Datenübertragungs-

phase reservieren. Je nach Schema können in der Reservierungsphase noch Kollisionen auftreten, während der eigentlichen Datenübertragung kann dann aber das Medium garantiert ohne Kollisionen belegt werden. Alternativ kann die Datenübertragungsphase auch in einen Abschnitt ohne Kollisionen (vorabreserviert) und in einen Abschnitt mit potenziellen Kollisionen (spontaner Zugriff) aufgeteilt werden. Verfahren dieser Art verursachen zwar unter leichter Last eine generell höhere Verzögerung (es muss vor dem Zugriff zunächst reserviert werden), erlauben jedoch insgesamt einen höheren Durchsatz auf Grund seltener auftretender Kollisionen.

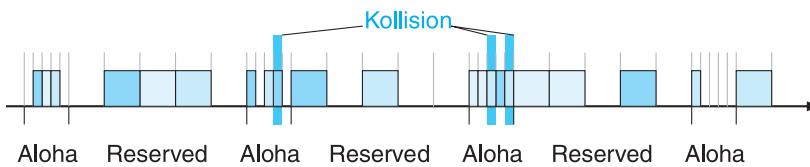


Abbildung 3.7: DAMA mit expliziter Vorabreservierung

Ein einfaches Verfahren dieser Art ist *Demand Assigned Multiple Access (DAMA)*, welches auch als *Reservation Aloha* bekannt ist und oft in der Satellitenkommunikation eingesetzt wird. In Abbildung 3.7 wird DAMA mit seinen zwei Phasen dargestellt. Während einer Wettbewerbsphase, die nach dem Slotted-Aloha-Verfahren arbeitet, können sich alle Stationen bei Bedarf einen Zeitschlitz in der späteren Datenübertragungsphase reservieren. Ein Beispiel wären also Bodenstationen, die sich gewisse Zeitschlüsse für die Übertragung von Daten zum Satelliten reservieren. Kollisionen während der Reservierungsphase können auftreten, sie zerstören jedoch nicht die Datenübertragung, sondern nur die zeitlich wesentlich kürzeren Reservierungswünsche. Ist eine Station mit ihrer Reservierung erfolgreich, so hat sie das alleinige Senderecht in dem von ihr reservierten Zeitschlitz. Der Satellit als Empfänger aller Reservierungswünsche könnte dann in diesem Beispiel alle erfolgreichen Reservierungen an alle Bodenstationen zurücksenden; diese Reservierungsliste muss dann von allen Bodenstationen befolgt werden. Damit es zu keinen Kollisionen auf Grund überlappender Zeitschlüsse kommt, müssen alle Sender perfekt synchronisiert sein. Bei DAMA müssen die Reservierungen einer Wettbewerbsphase nicht unbedingt die nächste Datenübertragungsphase betreffen. Um nicht unnötig Kapazität auf Grund der langen Signallaufzeiten zu Satelliten zu verschenken, kann eine Reservierung auch erst die übernächste oder eine noch spätere Datenübertragungsphase betreffen. DAMA ist ein *explizites Reservierungsschema*, da jeder Zeitschlitz zum Senden von Nutzdaten explizit vorab reserviert werden muss.

### 3.4.6 Packet Reservation Multiple Access

Ein implizites Reservierungsverfahren ist dagegen *PRMA* (*Packet Reservation Multiple Access*) wie in Abbildung 3.8 dargestellt. Hier bilden mehrere Zeitschlitzte einen Rahmen; im Beispiel werden acht Zeitschlitzte zusammengefasst. Jeder Rahmen wird nach einem starren TDM-Verfahren immer wiederholt (das Beispiel zeigt fünf Wiederholungen). Nach dem folgenden Verfahren können nun sendewillige Stationen implizit Zeitschlitzte in einem Rahmen belegen.

Wie auf der linken Seite der Abbildung gezeigt, sendet eine Basisstation (z.B. ein Satellit) den aktuellen Belegungsvektor des Rahmens periodisch an alle Stationen. Sobald eine Station diesen Vektor empfängt, weiß sie, welcher Zeitschlitzt momentan frei und welcher belegt ist. In den Rahmen wird die erfolgreiche Nutzdatenübertragung einer Station durch die Stationskennung (A bis F) dargestellt. Im Beispiel zeigt der erste gesendete Belegungsvektor »ACDABA-F« allen Stationen an, dass die Zeitschlitzte eins bis sechs und acht in dem folgenden Übertragungsrahmen belegt sind und nur noch Zeitschlitzt sieben frei ist. Alle Stationen, die einen Sendewunsch haben, können sich nun um diesen freien Zeitschlitzt nach dem Aloha-Verfahren bewerben, die belegten Zeitschlitzte bleiben hier-von unberührt. Im gezeigten Beispiel wollten mehr als eine Station auf den freien Zeitschlitzt zugreifen und daher ist eine Kollision aufgetreten. Die Basisstation sendet daraufhin den Belegungsvektor »ACDABA-F« aus, der zeigt, dass Zeitschlitzt sieben immer noch frei ist, die Reservierung also nicht erfolgreich war. Für die anderen Zeitschlitzte hat sich in diesem Beispiel nichts geändert. Wiederum können sich Stationen für den freien Zeitschlitzt bewerben. Wie angedeutet hat Station D im zweiten Rahmen nichts mehr ge-sendet, ebenso Station F nicht (dies konnte natürlich die Basisstation nicht im Voraus wissen). Damit sind die Zeitschlitzte drei und acht frei geworden. Diese neue Situation wird von der Basisstation nach dem zweiten Rahmen erkannt.

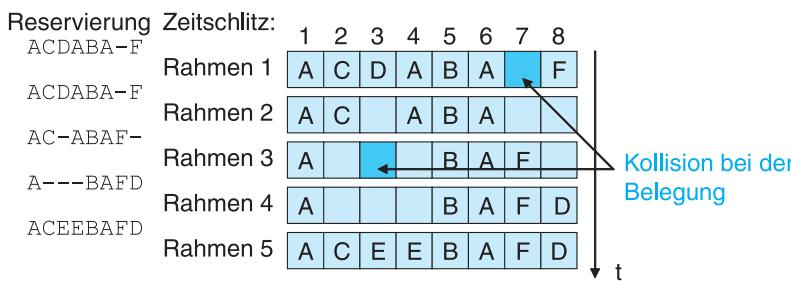


Abbildung 3.8: DAMA mit impliziter Reservierung

Daher kann jetzt die Basisstation vor dem Aussenden des dritten Rahmens im Belegungsvektor allen anderen Stationen mitteilen, dass die Zeitschlitzte drei und acht unbelegt sind. Zusätzlich gelang es der Station F, den Zeitschlitzt sieben zu belegen; auch dies wird im dritten Belegungsvektor angezeigt. PRMA verbindet also koordinierte und zufällige Zugriffe nach dem TDM-Schema in Kombination mit einer Reservierung. Die *Reservierung*

ist jedoch *implizit*, denn sobald eine Station einen Zeitschlitz erfolgreich belegt hat, ist damit der jeweils gleiche Zeitschlitz im nachfolgenden Rahmen so lange reserviert, bis die Station den Zeitschlitz nicht mehr nutzt. Nach erfolgreichem Zugriff kann also eine feste Datenrate garantiert werden. Slotted Aloha wird in diesem Fall nur für ungenutzte Zeitschlitzte eingesetzt, die Datenübertragung wird nicht durch die Kollisionen beeinträchtigt.

### 3.4.7 TDMA mit Reservierung

*TDMA mit Reservierung* stellt ein Verfahren dar, das zwar ein sehr starres Muster von sich abwechselnden Reservierungs- und Datenübertragungsphasen hat, jedoch auch einen spontanen Zugriff auf ein Medium zu gewissen Zeiten zulässt. Abbildung 3.9 zeigt in einem starren Zeitmultiplex-Verfahren zunächst  $N$  Minizeitschlitzte, die zusammen mit  $N \cdot k$  Zeitschlitzten für Nutzdaten einen Übertragungsrahmen bilden. Der Übertragungsrahmen wird immer wiederholt. Jeder Station ist exklusiv ein Minizeitschlitz zugeordnet, mit dessen Hilfe sie bis zu  $k$  Zeitschlitzte für Nutzdaten vorab reservieren kann. Damit besitzt jede Station eine feste maximale Zugriffsverzögerung auf das Medium und eine garantierte Mindestbandbreite. Weitere Stationen dürfen Zeitschlitzte, die nicht reserviert wurden, zum Medienzugriff nutzen. Die Nutzung dieser freien Schlitze kann entweder nach einem einfachen festen Verfahren (z.B. Round-Robin) oder zufällig nach z.B. Aloha geschehen. Mit Hilfe dieses Verfahrens können sowohl isochrone Datenströme mit festen Bandbreitenanforderungen als auch Best-Effort-Verkehr ohne Anforderungen an Bandbreite oder Übertragungsverzögerung übertragen werden.

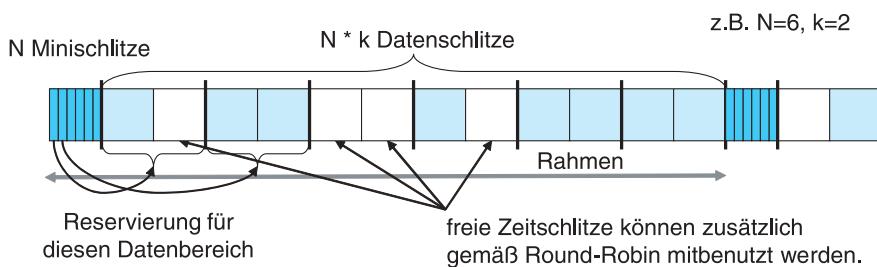


Abbildung 3.9: TDMA mit Reservierung

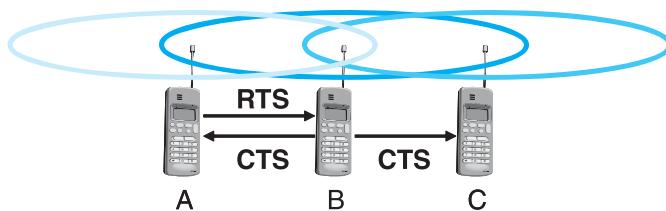
### 3.4.8 Mehrfachzugriff mit Kollisionsvermeidung

Zu Beginn des Kapitels wurde das Problem versteckter Endgeräte geschildert (Abschnitt 3.1.1). Wie lösen die bisher vorgestellten Zugriffsverfahren dieses Problem? Allen Verfahren, die von einer zentralen Basissstation ausgehen, welche ein TDM-Schema festlegt, ist das Problem unbekannt. Sobald nämlich ein Endgerät für die Basissstation versteckt ist, kann es ohnehin nicht kommunizieren. Wie bereits erwähnt, sind jedoch die TDM-Ver-

fahren mit einer Basisstation und mehr oder weniger flexiblen Zugriffsmustern nicht immer für jede Art von Verkehr geeignet und nicht immer so flexibel wie ein reines Aloha-Verfahren. Zusätzlich existiert in manchen Kommunikationsszenarien überhaupt keine Basisstation, wie z.B. bei Ad-hoc-Netzwerken, die unter anderem in *Kapitel 7* näher vorgestellt werden.

Das *Multiple-Access-with-Collision-Avoidance- (MACA-)* Verfahren stellt ein einfaches Prinzip dar, welches das Problem versteckter Endgeräte löst, ohne Basisstation auskommt, die Flexibilität eines Aloha-Verfahrens aufweist und dennoch eine dynamische Reservierung des Mediums zulässt. Abbildung 3.10 zeigt die gleiche Situation wie Abbildung 3.1: A und C wollen beide mehr oder weniger gleichzeitig Daten zu B senden. A hat bereits mit dem Senden begonnen, ist jedoch für C versteckt. Daher startet C ebenfalls mit der Übertragung und verursacht so eine Kollision bei B.

Wird das MACA-Verfahren angewandt, so beginnt A nicht sofort mit der Übertragung, sondern sendet zunächst einen kurzen Sendewunsch (*Request to Send, RTS*). B empfängt diesen Sendewunsch, der eine eindeutige Kennung des Absenders und des Empfängers sowie die beabsichtigte Sendedauer für die Nutzdaten beinhaltet. Dieses RTS-Paket kann von C nicht empfangen werden, löst aber bei B eine Bestätigung zur Empfangsbereitschaft (*Clear to Send, CTS*) aus. Das CTS-Paket enthält wiederum die eindeutige Kennung des Absenders der Nutzdaten (also A), des Empfängers der Nutzdaten (also B) und die Dauer der nun folgenden Datenübertragung von A nach B. Dieses CTS-Paket kann von C empfangen werden, und somit ist das Medium um B herum für die Zeit der nun folgenden Datenübertragung reserviert. Sobald C das CTS-Paket empfängt, darf es für die angegebene Dauer nichts mehr senden. Damit kann beim Empfänger B keine Kollision während der Datenübertragung auftreten, und das Problem der versteckten Endgeräte ist gelöst – solange sich die Übertragungsbedingungen nicht ändern, also beispielsweise eine weitere Station sich nach dem Senden von CTS in den Empfangsbereich von B hineinbewegt.



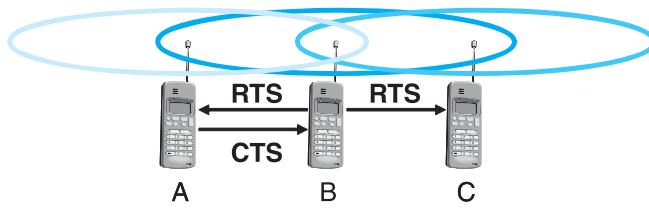
**Abbildung 3.10:** Vermeidung versteckter Endgeräte mit MACA

Kollisionen können bei diesem Verfahren immer noch vorkommen, auch ohne Änderung der Konfiguration. A und C könnten gleichzeitig ein RTS-Paket senden, welches bei B kollidiert. Jedoch ist ein RTS-Paket im Vergleich zu einem Datenpaket im Allgemeinen viel kleiner, sodass die Wahrscheinlichkeit einer Kollision sinkt. B löst einen Wettbewerb dadurch, dass es nur ein CTS für einen Sender zurückschickt, falls es überhaupt ein RTS korrekt empfangen konnte. Ohne ein korrektes CTS darf keine Station senden. Dieses

Medienzugriffsverfahren wird bei lokalen drahtlosen Netzen nach dem Standard IEEE 802.11 als Option angeboten und in *Abschnitt 7.3* näher erläutert.

Die Frage stellt sich natürlich, ob MACA ebenso das Problem der ausgelieferten Endgeräte lösen kann. In diesem Szenario wollte B Daten an A senden, C jedoch an irgendeinen weiteren Empfänger außerhalb der Störreichweite von A. Bei CSMA-Verfahren ist C höflich genug, das Medium vor dem Senden abzuhören, wobei es feststellt, dass das Medium bereits von B belegt ist. Daher wartet C unnötigerweise mit dem Senden, bis B mit dem Senden fertig ist.

Wird MACA eingesetzt, so stellt sich die Situation wie in Abbildung 3.11 gezeigt dar. B muss zunächst ein RTS senden, welches die Kennung des Empfängers (A), die eigene Kennung (B) und die Sendedauer enthält. C reagiert nicht auf dieses RTS, da es nicht der Empfänger ist, A aber bestätigt mit einem CTS, welches B als den Sender und A als den Empfänger der folgenden Daten ankündigt. C empfängt jedoch dieses CTS nie und schließt daraus, dass A außerhalb seiner Erkennungsreichweite liegt. Daher kann C mit dem Senden beginnen und annehmen, dass es keine Kollision bei A verursachen kann. Angenommen, die Übertragungscharakteristiken zwischen verschiedenen Sendern sind gleich, wäre damit das Problem ausgelieferter Endgeräte ohne eine Basisstation oder feste Zugriffsmuster gelöst. Ein Problem von MACA ist der zusätzliche Datenverkehr, der durch RTS und CTS verursacht wird und für kurze, zeitkritische Datenpakete nicht vernachlässigbar ist. Weiterhin geht MACA von weitgehend symmetrischen Sende- und Empfangsverhältnissen aus. Andernfalls könnten ein starker Sender oder gerichtete Antennen das obige Schema konterkarieren.

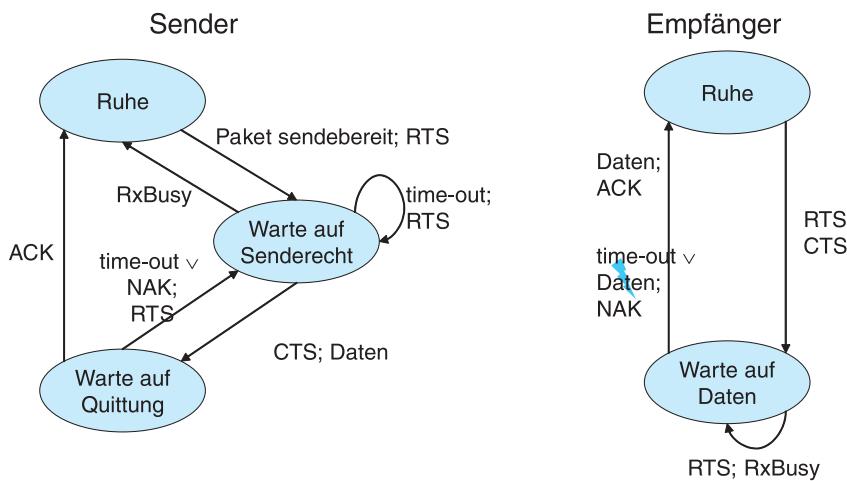


**Abbildung 3.11:** Vermeidung ausgelieferter Endgeräte mit MACA

Abbildung 3.12 zeigt die vereinfachten Zustandsautomaten für einen Sender und Empfänger, die nach dem MACA-Verfahren arbeiten. Ein Sender ist so lange im Ruhezustand, bis ein Nutzer eine Datenübertragung anfordert. Daraufhin sendet der Sender ein RTS-Paket und wartet auf das Senderecht durch eine CTS-Nachricht. Falls ein Empfänger im Ruhezustand eine an ihn adressierte RTS-Nachricht empfängt, antwortet er mit einem CTS und wartet auf die Datenübertragung. Der Sender empfängt dieses CTS und beginnt mit der Datenübertragung. Wenn beim Sender nicht innerhalb einer gewissen Zeit ein CTS eingeht, wiederholt er sein RTS. Gründe hierfür können der Verlust der RTS- oder CTS-Nachricht oder ein beschäftigter bzw. nicht empfangsbereiter Empfänger sein.

Nach der Datenübertragung erwartet der Sender eine Empfangsbestätigung innerhalb einer gewissen Zeit, um danach wieder in den Ruhezustand zurückzukehren. Falls die Da-

ten korrekt beim Empfänger angekommen sind, sendet dieser eine positive Bestätigung zurück. Falls die Daten fehlerhaft empfangen wurden oder der Empfänger über längere Zeit keine Daten empfängt, kehrt er automatisch in den Ruhezustand zurück. Falls der Sender keine Bestätigung oder eine negative Bestätigung erhalten hat, kann er wiederum ein RTS aussenden und auf das Senderecht warten. Ein sofortiges Wiederholen der Daten ist nicht erlaubt, da das Medium nur für die initiale Datenübertragung reserviert war. Ein Empfänger, der gerade auf Daten wartet, könnte zusätzlich durch ein RxBusy darauf hinweisen, dass er gerade beschäftigt ist. Echte Implementierungen müssen weitere Zustände zu diesen grundlegenden hinzufügen, beispielsweise um eine endlose Wiederholung der Daten im Fehlerfall abzufangen.



ACK: positive Empfangsbestätigung  
 NAK: negative Empfangsbestätigung

**Abbildung 3.12:** Zustandsautomaten für den Mehrfachzugriff mit Kollisionsvermeidung

### 3.4.9 Polling

Ein sehr einfaches Verfahren zur Koordination des Medienzugriffs, *Polling*, kann eingesetzt werden, wenn es eine Station gibt, die von allen anderen empfangen werden kann. Dies ist beispielsweise der Fall bei einem Satelliten, den alle Bodenstationen empfangen, oder einer Basisstation, die von allen Teilnehmern in einem lokalen Funknetz empfangen wird. Polling-Verfahren sind seit langem aus der Großrechnerwelt bekannt, wo ein Großrechner (host) nacheinander viele Endgeräte (terminals) abruft, um nachzuschauen, ob ein Sendewunsch vorliegt. Polling ist ein stark zentralisiertes Verfahren mit einer Leitstation (master) und vielen Folgestationen (slaves). Die Leitstation kann nacheinander alle Folgestationen nach verschiedenen Verfahren abfragen: zufallsgesteuert, Round-Robin (alle Folgestationen kommen nacheinander an die Reihe – das Verfahren ist nur dann

sinnvoll, wenn die Verkehrslast bei allen Folgestationen in etwa gleich ist), reservierungs-basiert (Folgestationen können sich zum Senden in eine Liste bei der Leitstation eintragen lassen) etc. Ähnliche Verfahren werden bei drahtlosen lokalen Netzen nach dem Bluetooth-Standard (vgl. *Abschnitt 7.5*) und als eine Option bei IEEE 802.11 (vgl. *Abschnitt 7.3*) eingesetzt.

### 3.4.10 Inhibit Sense Multiple Access

Eine weitere Kombination verschiedener Verfahren stellt *ISMA (Inhibit Sense Multiple Access)* dar, welches zum Medienzugriff im amerikanischen Datendienst CDPD (Cellular Digital Packet Data) im AMPS-Mobilfonsystem eingesetzt wird (das Verfahren ist auch als *Digital Sense Multiple Access*, DSMA, bekannt). Bei diesem Verfahren signalisiert eine Basisstation lediglich ein momentan belegtes Medium durch einen Besetztton in der Abwärtsrichtung (als *BUSY/IDLE* indicator bezeichnet). Sobald kein Besetztton mehr gesendet wird, ist der Zugriff auf das Medium nicht weiter geregelt (Abbildung 3.13). Auch in diesem Szenario würde ein Mithören im Medium keinen Sinn ergeben, da Mobiltelefone oft nur die Basisstation empfangen können, nicht jedoch andere mobile Geräte. Eine Basisstation bestätigt die erfolgreiche Übertragung eines Daten-pakets, ein mobiles Endgerät kann eine Kollision nur am Ausbleiben der Bestätigung er-kennen. Im Falle einer Kollision sind weitere Mechanismen, wie Back-off und Übertra-gungswiederholung, vorgesehen (Salkintzis, 1999).



Abbildung 3.13: Realisierung von ISMA mit einem »Besetztton«

## 3.5 Mehrfachzugriff durch Codemultiplex (CDMA)

Als letztes grundlegendes Verfahren wird *CDMA (Code Division Multiple Access)* vorge-stellt, ein Zugriffsverfahren, das Codemultiplex (CDM) zum Mehrfachzugriff auf ein Me-dium einsetzt. Wie bereits im Zusammenhang mit CDM angedeutet, besteht das Haupt-problem bei diesen Verfahren darin, geeignete Codes zu finden, die verschiedene Nutzer

dieselben Mediums gegeneinander gut abgrenzen, und zusätzlich das Nutzsignal vom Hintergrundrauschen zu unterscheiden.

In *Kapitel 2* wurde bereits gezeigt, wie Codes zum Spreizen eines Signals eingesetzt werden können (z.B. bei DSSS-Verfahren wurde die Chipping-Sequenz direkt durch den Code gesteuert). Welche Codes sind aber für CDMA geeignet? Ein Code für einen Nutzer sollte eine gute Autokorrelation besitzen<sup>2</sup> und möglichst *orthogonal* zu anderen verwendeten Codes sein. Orthogonalität im Coderaum hat die gleiche Bedeutung wie im dreidimensionalen Raum, der uns umgibt. Im normalen Raum kann ein Koordinatensystem angenommen werden, das seinen Ursprung im Punkt (0, 0, 0) hat.<sup>3</sup> Zwei Vektoren in diesem Koordinatensystem werden orthogonal genannt, wenn ihr inneres Produkt null ist. Beispielsweise sind die beiden Vektoren (2, 5, 0) und (0, 0, 17) orthogonal, da  $(2, 5, 0) \cdot (0, 0, 17) = 0+0+0 = 0$ . Aber auch die Vektoren (3, -2, 4) und (-2, 3, 3) sind orthogonal:  $(3, -2, 4) \cdot (-2, 3, 3) = -6-6+12 = 0$ . Dagegen sind die Vektoren (1, 2, 3) und (4, 2, -6) nicht orthogonal zueinander (das innere Produkt ist -10). (1, 2, 3) und (4, 2, -3) sind »beinahe« orthogonal, da ihr inneres Produkt -1, also nahe der Null, ist. Diese mathematisch unsaubere Formulierung ergibt dann einen Sinn, wenn man bedenkt, dass bei einer echten Übertragung von Signalen eventuell die »Codes« durch Rauschen nicht mehr exakt ihren eigentlichen Vorgaben entsprechen, wie nachfolgende Beispiele näher erläutern.

Wie oben angedeutet, sollen Codes zusätzlich eine gute *Autokorrelation* aufweisen. Hiermit wird das innere Produkt des Codes mit sich selbst bezeichnet. Beispielsweise weist der bei ISDN und auch IEEE 802.11 eingesetzte Barker-Code (+1, -1, +1, +1, -1, +1, +1, +1, -1, -1, -1) eine sehr gute Autokorrelation auf, das innere Produkt ist 11. Sobald jedoch dieser Barker-Code um einen Chip versetzt auf sich selbst angewendet wird, fällt der Betrag des inneren Produkts auf 1.<sup>4</sup> Daher wird dieser Code gerne zur Synchronisation eingesetzt. Sobald das innere Produkt schlagartig auf 11 ansteigt, kann ein Empfänger beispielsweise den Beginn eines Datensymbols erkennen. Auch ein leichtes Rauschen bei der Übertragung lässt diese Spitze noch deutlich über den anderen Werten, die typischerweise betragsmäßig um die Eins herum liegen, herausragen.

Nachdem nun die Begriffe *Orthogonalität* und *Autokorrelation* stark vereinfacht erläutert wurden, soll ein (theoretisches) Beispiel die grundlegende Funktionsweise von CDMA präsentieren, bevor das Prinzip auf Signale angewendet wird.

- Im folgenden Beispiel wollen zwei Sender, A und B, nach dem CDMA-Verfahren auf das Medium zugreifen und Daten senden. CDMA weist jedem Sender einen eindeutigen und orthogonalen Code zu: für A den Code  $A_k = 010011$ , für B den Code

<sup>2</sup> Das innere Produkt (auch Skalarprodukt genannt) mit sich selbst sollte betragsmäßig groß sein. Das innere Produkt von zwei Vektoren  $a$  und  $b$ , mit  $a = (a_1, a_2, \dots, a_n)$  und  $b = (b_1, b_2, \dots, b_n)$ , ist

$$\text{definiert als } a \cdot b = \sum_{i=1}^n a_i b_i.$$

<sup>3</sup> Das Beispiel könnte genauso gut  $n$ -dimensional statt nur dreidimensional sein.

<sup>4</sup> Hierfür sollte man sich den Barker-Code über sich selbst schrittweise hinweggeschoben vorstellen, wobei jeweils das innere Produkt berechnet wird. Nur bei exakter Übereinstimmung ist das Ergebnis 11.

$B_k = 110101$ . Sender A möchte nun das Bit  $A_d = 1$  senden, Sender B das Bit  $B_d = 0$ . Damit die gewohnten einfachen Rechenregeln angewendet werden können, sollen in diesem Beispiel die binäre 0 durch -1, die binäre 1 durch +1 dargestellt werden.

- Beide Sender spreizen ihre Daten unter Verwendung des Codes (d.h. der Chipping-Sequenz); Spreizen bedeutet hier lediglich die Multiplikation des Datenbits mit dem Code. In der Realität werden wesentlich längere Codes eingesetzt, einzelne Bits werden dann mit Abschnitten des längeren Codes gespreizt. Sender A sendet also  $A_s = A_d * A_k = +1 * (-1, +1, -1, -1, +1, +1) = (-1, +1, -1, -1, +1, +1)$ . Sender B verfährt genauso mit seinem Bit und Code:  $B_s = B_d * B_k = -1 * (+1, +1, -1, +1, -1, +1) = (-1, -1, +1, -1, +1, -1)$ .
- Beide Signale (die analoge Modulation soll in diesem Beispiel vernachlässigt werden) werden daraufhin von den Sendern gleichzeitig auf derselben Frequenz im selben Raum übertragen. Die Signale überlagern sich daher. Unter Vernachlässigung eventueller Störungen durch weitere Sender bzw. Hintergrundrauschen und vorausgesetzt, dass beide Signale die gleiche Stärke beim Empfänger besitzen, erhält der Empfänger die Summe der Signale:  $C = A_s + B_s = (-2, 0, 0, -2, +2, 0)$ .
- Will der Empfänger jetzt die Daten von Sender A rekonstruieren, so muss er lediglich den Code von A kennen und auf das empfangene Signal beim Ent spreizen anwenden:  $C * A_k = (-2, 0, 0, -2, +2, 0) * (-1, +1, -1, -1, +1, +1) = 2+0+0+2+2+0 = 6$ . Da das Ergebnis deutlich größer als null ist, kann der Empfänger eine binäre 1 erkennen. Soll hingegen das von B gesendete Bit erkannt werden, so muss auch der Code von B verwendet werden:  $C * B_k = (-2, 0, 0, -2, +2, 0) * (+1, +1, -1, +1, -1, +1) = -2+0+0-2-2+0 = -6$ . Das Ergebnis ist negativ, daher war das gesendete Bit die 0.

Wie leicht zu erkennen war, enthält das Beispiel einige Vereinfachungen. Die Codes waren sehr einfach, aber immerhin orthogonal gewählt. Wichtiger aber ist, dass jegliche Störungen vernachlässigt wurden. Jegliches Rauschen würde sich additiv überlagern, mit dem Ergebnis, dass bei obigen Rechnungen sicher nicht so glatte Zahlenwerte wie 6 bzw. -6 herauskommen. Eventuell lägen die Resultate näher bei null, was die Entscheidungsfindung im Empfänger wesentlich erschweren würde. Weiterhin wurden beide gespreizten Nutzdatenbits exakt überlagert und angenommen, dass beide Signale beim Empfänger gleich stark sind.

Was würde aber beispielsweise passieren, wenn das Signal von B beim Empfänger deutlich stärker wäre? Angenommen, das Signal von B ist fünfmal so stark wie das von A. Das beim Empfänger ankommende Signal ist  $C' = A_s + 5 * B_s = (-1, +1, -1, -1, +1, +1) + (-5, -5, +5, -5, +5, -5) = (-6, -4, +4, -6, +6, -4)$ . Will der Empfänger die Daten von B empfangen, so ergibt sich analog zu obigem Beispiel:  $C' * B_k = -6-4-4-6-6-4 = -30$ . Für den Empfänger ist es hier sehr leicht, die binäre 0 zu erkennen, die von B gesendet wurde. Problematischer ist der Empfang der Daten von A:  $C' * A_k = 6-4-4+6+6-4 = 6$ . Der absolute Betrag des stärkeren Signals ist ein Vielfaches (30) von dem schwächeren (6). Während der Empfänger -30 eindeutig der 0 zuordnen kann, fällt dies bei der +6 schwerer, da 6 im Verhältnis zu -30 wesentlich näher bei der Null ist und damit auch als Rauschen interpretiert werden bzw. im Rauschen untergehen könnte. Erläutert anhand des Party-Beispiels aus *Kapitel 2* bedeutet dies Folgendes: Sobald eine Person auf einer Party in irgendeiner Sprache sehr laut spricht, spielt es praktisch keine Rolle mehr, wenn andere

Gäste eine andere Sprache als orthogonalen Code wählen – man wird nicht mehr verstanden und die eigene Stimme trägt nur noch zum Hintergrundrauschen bei. Obwohl dieser Vergleich und das Beispiel sehr vereinfacht sind, so zeigen sie doch, wie wichtig eine exakte Leistungssteuerung für CDMA-Systeme ist. Diese Leistungssteuerung ist auch eines der größten Probleme von CDMA-Systemen und muss teilweise mehrere tausendmal pro Sekunde durchgeführt werden (was wiederum den Leistungshunger entsprechender Mobilgeräte erhöht und die Batterielebensdauer verkürzt).

Das folgende Beispiel veranschaulicht noch einmal den Zusammenhang von CDMA und Bandspreizung nach dem DSSS-Verfahren. In diesem Beispiel werden längere Codes verwendet, d.h. zum Spreizen eines Bits wird nur noch ein Teil eines Codes eingesetzt. Die Codesequenzen in CDMA-Mobilfunksystemen nach dem Standard IS-95 sind beispielsweise  $2^{42}-1$  Chips lang, die Chipping-Rate beträgt 1.228.800 chip/s (der Code wiederholt sich damit alle 41,425 Tage). Weitere Details zu diesem Verfahren finden sich in Viterbi (1995).

Abbildung 3.14 zeigt den Sender A, der die Bitfolge 101 übertragen möchte. Der Code von A ist sowohl als Signal als auch als binäre Folge  $A_k$  dargestellt. Im Beispiel wird der »0« ein positiver Signalpegel, der »1« ein negativer Signalpegel zugeordnet. Nach dem Spreizen, also der Exklusiv-Oder-Verknüpfung von  $A_d$  und  $A_k$ , erhält man das Signal  $A_s$ .

**Abbildung 3.14:** Kodierung und Spreizen der Daten von Sender A

Analog wird beim Sender B mit den Daten 100 vorgegangen, das Ergebnis nach dem Spreizen ist das Signal  $B_s$ .  $A_s$  und  $B_s$  überlagern sich nun während der Übertragung (wiederum werden Rauschen oder unterschiedliche Signalstärken nicht betrachtet). Das Ergebnis ist einfach die Summe der beiden Signale  $A_s + B_s$ , wie in Abbildung 3.15 dargestellt.

In Abbildung 3.16 wird gezeigt, wie der Empfänger versucht, die Daten von A zu rekonstruieren. Dazu wendet er den Code  $A_k$  von A auf das empfangene Signal an und leitet das Ergebnis in einen Integrator (vgl. *Abschnitt 2.7.1*). Der Integrator addiert die einzelnen Teilprodukte (berechnet also das innere Produkt); ein Komparator muss dann entscheiden, ob das Ergebnis ursprünglich eine 0 oder eine 1 dargestellt hat. Wie in Abbildung 3.16 zu sehen ist, kann das Ergebnis eindeutig berechnet werden, obwohl sich beide Signale in der Luft rein physikalisch überlagert haben.

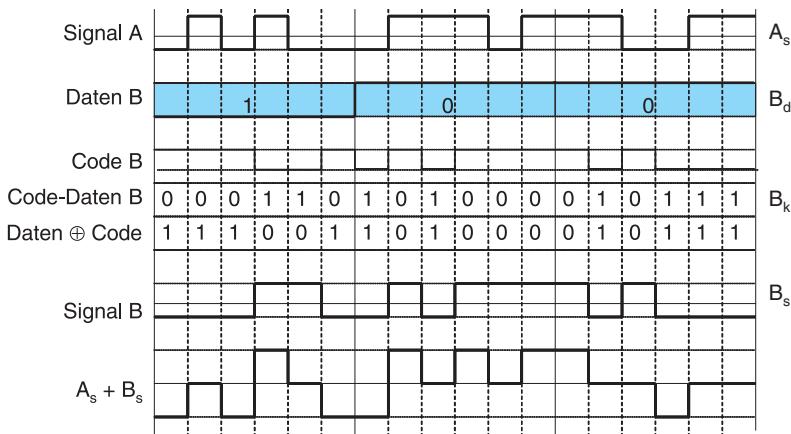


Abbildung 3.15: Kodierung und Spreizen der Daten von Sender B

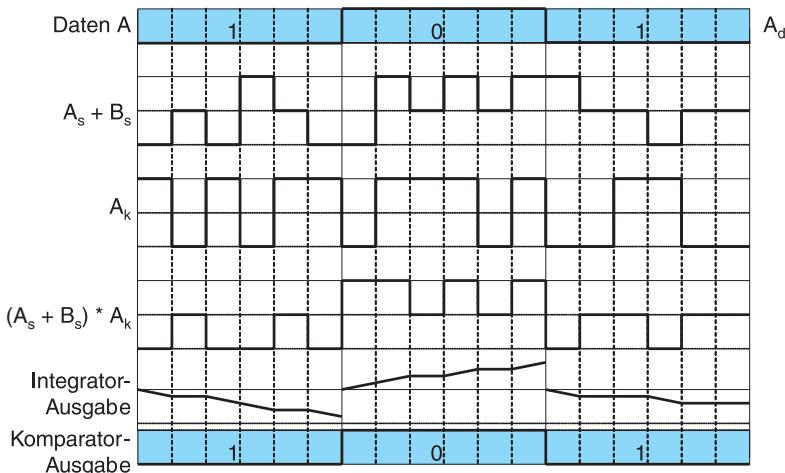
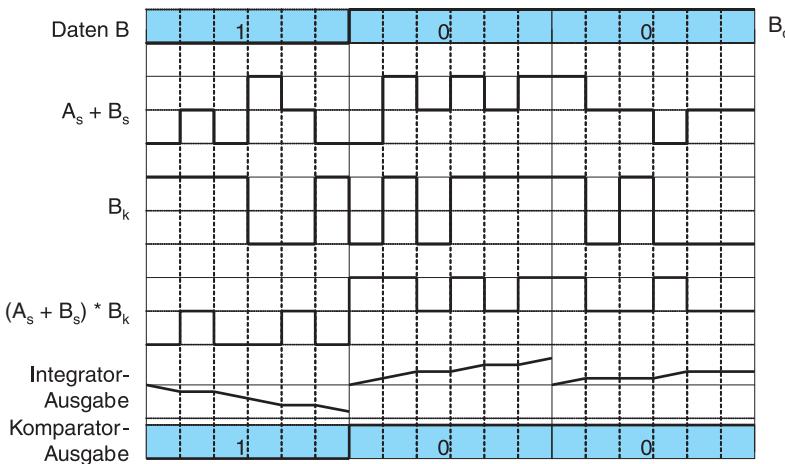
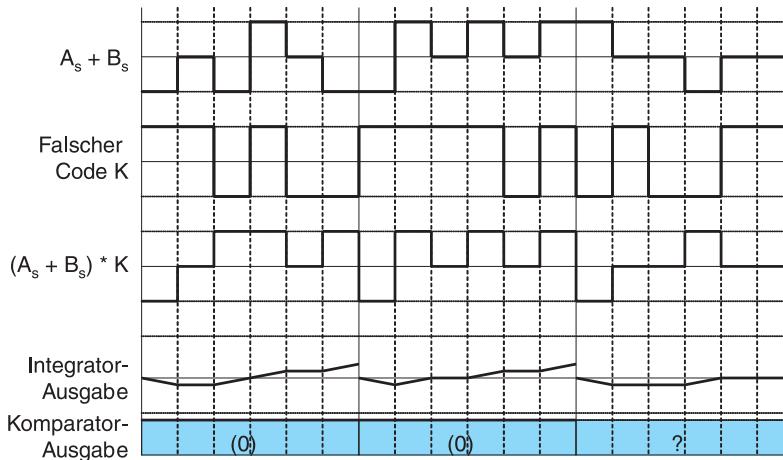


Abbildung 3.16: Rekonstruktion der von A gesendeten Daten

Die gleichen Schritte, nur diesmal mit dem Code von Sender B, müssen durchgeführt werden, sollen die Daten von B empfangen werden (siehe Abbildung 3.17). Der Komparator kann sich sehr leicht für die Originaldaten entscheiden. Betrachtet man aber den Ausdruck  $(A_s + B_s) * B_k$ , so kann man sich auch vorstellen, was passieren würde, wenn das Signal von A sehr viel stärker als das von B wäre und Rauschen die Signale verfälschte. Die kleinen »Spitzen«, die im Beispiel von  $A_s$  hervorgerufen werden, würden wesentlich höher ausfallen, und der Integrator könnte nicht mehr zu einem richtigen Ergebnis kommen. Sind  $A_k$  und  $B_k$  exakt orthogonal und kein Rauschen stört die Übertragung, so funktioniert das Verfahren (in der Theorie) auch bei extrem unterschiedlichen Signalstärken.



**Abbildung 3.17:** Rekonstruktion der von B gesendeten Daten



**Abbildung 3.18:** Empfang eines Signals mit dem falschen Schlüssel

Schließlich zeigt Abbildung 3.18, was passiert, wenn ein Empfänger nicht den richtigen Code für einen Sender kennt oder nicht richtig mit der Chipping-Sequenz eines Senders synchronisiert ist. Der Integrator kann zwar immer noch nach jedem Bit einen Wert berechnen, jedoch kann der Komparator oft nicht mehr eindeutig entscheiden, ob es sich um eine 1 oder eine 0 in den Originaldaten gehandelt hat. Für falsche Schlüssel entsprechen die Signale zufälligem Rauschen, und das Integral über zufälliges Rauschen ist meist nahe null. Selbst wenn sich der Komparator bei einem einzelnen Bit eindeutig entscheiden kann, so bedeutet dies noch lange nicht, dass eine komplette Bitfolge eines Daten-

pakets korrekt empfangen werden kann. Spätestens eine Prüfsumme auf Schicht zwei würde ein fehlerhaftes Paket erkennen. Dies illustriert die inhärente Abhörsicherheit von CDMA-Systemen. Der Code, mit dem ein Sender seine Daten spreizt, wird daher auch manchmal als Schlüssel bezeichnet, da die Spreizung gleichzeitig eine Verschlüsselung darstellen kann.

### 3.5.1 Spread Aloha Multiple Access

Wie im vorigen Abschnitt näher erläutert wurde, ergibt die Kombination von Bandspreiztechnik und Codemultiplex ein leistungsfähiges Medienzugriffsverfahren. CDMA-Sender und -Empfänger sind jedoch keine einfachen Geräte. Will ein CDMA-Gerät die Möglichkeit haben, mit  $n$  anderen Geräten zu kommunizieren, so muss es nicht nur die Spreizcodes der anderen Geräte kennen, sondern auch seinen Empfänger für jeden einzelnen Kommunikationspartner entsprechend programmieren. In Mobilfunksystemen liegt viel dieser Komplexität in der Basisstation; hier kommunizieren die mobilen Geräte auch immer nur mit einem Partner, der Basisstation. Will man jedoch eine spontane, unregelmäßige Kommunikation unterstützen, so erscheint das Verfahren als relativ aufwändig. Mehrere Geräte könnten beispielsweise für eine kurze Dauer der Kommunikation zusammengebracht werden (z.B. in einem Ad-hoc-Netz). Dann möchte man nicht zuerst die Codes aller anderen Teilnehmer in jedes Gerät programmieren. Auf der anderen Seite ist Aloha ein sehr einfaches Verfahren, wenn auch nicht besonders leistungsfähig auf Grund häufiger Kollisionen bei höherer Last.

Wie könnte nun die Kombination der beiden Verfahren aussehen, d.h. die Kombination der Bandspreiztechnik von CDMA mit dem Medienzugriff von Aloha, also CDMA mit nur einem gemeinsamen Code? Dieses Schema wird *Spread Aloha Multiple Access (SAMA)* genannt, eine Kombination von CDMA- und TDMA-Techniken (Abramson, 1996).

SAMA arbeitet nach dem folgenden einfachen Prinzip: Jeder Sender verwendet denselben Code zum Spreizen der Daten, im einfachen Beispiel in Abbildung 3.19 ist dies der Code 110101<sup>5</sup>. Der Zugriff nach dem einfachen Aloha-Prinzip ist im oberen Teil der Abbildung gezeigt. Sender A und Sender B greifen gleichzeitig auf der gleichen Frequenz auf das Medium zu und verursachen damit eine Kollision bei allen drei Bits.

Die gleichen Daten könnten aber auch unter Verwendung einer höheren Sendeleistung für eine viel kürzere Zeit gesendet werden, wie in der Mitte der Abbildung verdeutlicht – wesentlich ist die Energie, die für das Senden eines Bit übertragen wird (im Diagramm die Fläche unter einem Signal). Mit einem Spreizfaktor von  $s = 6$  werden diese Signale gespreizt und damit wird die benötigte Bandbreite versechsfacht. Das Spreizen wird hier auf beide Signale angewendet, jedoch zeitlich leicht versetzt. Ist ein Empfänger mit einem

---

<sup>5</sup> Natürlich ist dieser Code nicht besonders gut, da viel zu kurz. Zudem wird der Code auf jedes Bit einzeln angewandt; in realen Systemen kann sich ein viel längerer Code über viele Bits erstrecken.

der Sender präzise synchronisiert, ist immer noch ein Empfang möglich; das Signal des anderen Senders erscheint als Rauschen (obwohl derselbe Code eingesetzt wird!). Die Wahrscheinlichkeit einer »Kollision« ist nach Abramson (1996) gering, solange die Anzahl der gleichzeitig aktiven Sender unter 0,1 bis 0,2 s bleibt ( $s$  sollte also wesentlich größer als im Beispiel gewählt werden, um eine sinnvolle Anzahl an Sendern zuzulassen).

Das Hauptproblem dieses Ansatzes besteht darin, dass ein geeigneter Code gefunden werden muss. Ein Code kann natürlich nicht zu sich selbst orthogonal sein, die Autokorrelation sollte jedoch sehr gut sein. Weiterhin muss die Korrelation sehr niedrig sein, wird der Code auch nur geringfügig gegen sich selbst verschoben (auch jede andere Verschiebung sollte in einer schlechten Korrelation resultieren). Ähnlich wie bei Aloha liegt auch hier der maximale Durchsatz bei 18%, jedoch kann man nun von den Vorteilen der Bandspreiztechnik, wie geringere Störanfälligkeit gegenüber schmalbandigen Störern und einfache Koexistenz mit anderen Systemen auf der gleichen Frequenz, profitieren.

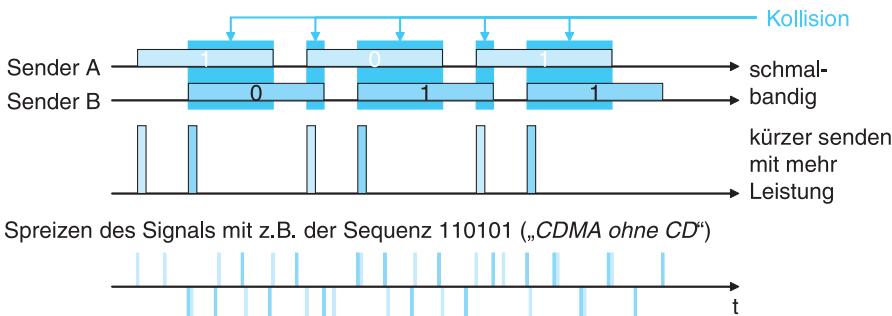


Abbildung 3.19: Mehrfachzugriff mit gespreiztem Aloha

## 3.6 Vergleich der S/T/F/CDMA-Verfahren

Den Abschluss des Kapitels soll ein Vergleich der vier grundlegenden Medienzugriffsverfahren in Tabelle 3.1 bilden. In der Tabelle werden die Verfahren in ihrer »Reinform«, d.h. ohne Kombination mit anderen Verfahren, verglichen. In der Praxis tauchen diese Verfahren jedoch immer in einer Kombination auf. Sehr typisch für viele Mobilfunk- und Satellitensysteme ist die Kombination von SDMA, TDMA und FDMA, wie sie in IS-54, GSM, DECT, PHS, PACS und auch in ICO oder Iridium eingesetzt werden. CDMA wird zusammen mit SDMA in IS-95 für mobile Telefone und im Satellitensystem Globalstar eingesetzt (vgl. Kapitel 4 und 5).

Obwohl viele Netzbetreiber und Gerätethersteller ihre anfänglichen Erwartungen an die Leistungsfähigkeit von CDMA-Systemen im Vergleich zu den frühen achtziger Jahren auf Grund der Praxiserfahrungen mit IS-95 heruntergeschraubt haben, spielt CDMA dennoch eine Schlüsselrolle in beinahe allen Standards für die weltweite drahtlose Kommunikation der dritten Generation, wie beispielsweise W-CDMA (UMTS, FOMA) oder

cdma2000 (vgl. *Kapitel 4*). CDMA kann allen anderen Zugriffsverfahren noch hinzugefügt werden (beispielsweise innerhalb eines TDM-FDM-Zeitschlitzes), um die Gesamtkapazität einer Funkzelle zu erhöhen. Im Vergleich zu anderen Zugriffsverfahren bietet CDMA den Vorteil einer weichen Übergabe eines Teilnehmers von einer Zelle zur nächsten und hat eine weiche Kapazitätsgrenze pro Funkzelle. Die Übergabe (handover, näher erläutert in *Kapitel 4*) beschreibt die notwendigen Mechanismen, um einen Teilnehmer, der bisher vorrangig mit der Basisstation einer Zelle kommuniziert hat, an eine neue Basisstation zu binden. Während TDMA-FDMA-Systeme schlagartig zwischen zwei Basisstationen umschalten, kann ein CDMA-System gleichzeitig mit mehreren Basisstationen eine Kommunikation aufrechterhalten. Damit kann ein Wechsel weicher durchgeführt werden. Bei CDMA können alle Systeme mit einem Teilnehmer gleichzeitig durch die Verwendung desselben Codes kommunizieren, der Teilnehmer profitiert sogar von der konstruktiven Überlagerung der Signale. Bei TDMA-FDMA-Systemen müssen die Frequenz und der Zeitpunkt des Wechsels exakt festgelegt werden, um die Kommunikation nicht zu unterbrechen. Je nach Implementierung und den aktuellen Umgebungsbedingungen kann eine Oszillation zwischen zwei Basisstationen bei TDMA-FDMA-Systemen nie ganz ausgeschlossen werden.

Die weiche Kapazitätsgrenze bei CDMA-Systemen beschreibt die Tatsache, dass ein solches System stets noch einen Teilnehmer in einer Zelle aufnehmen kann; es gibt also keine harte Obergrenze. Bei TDMA-FDMA-Systemen existiert eine solche harte Obergrenze. Sobald auf keiner Frequenz mehr ein Zeitschlitz frei ist, muss jeder neue Teilnehmer zurückgewiesen werden. Sobald ein neuer Teilnehmer einem CDMA-System hinzugefügt wird, steigt der Rauschpegel und die Zellengröße schrumpft, der neue Teilnehmer kann aber dennoch aller Voraussicht nach immer noch kommunizieren. Das Schrumpfen einer Zelle kann natürlich große Probleme bereiten, da nun andere Teilnehmer unter Umständen aus der Zelle herausfallen. Daher ist die Planung von Zellen bei CDMA-Systemen unter Umständen komplizierter im Vergleich zu TDMA-FDMA-Systemen (vgl. *Kapitel 2*).

Während drahtlose Netze für mobile Telefone alle zentralisiert organisiert sind, d.h. eine Basisstation steuert jegliche Kommunikation innerhalb einer Zelle, benötigen beliebige drahtlose Kommunikationsnetze andere Medienzugriffsverfahren. Wie anhand mehrerer Beispiele gezeigt wurde, benötigen die meisten verteilten drahtlosen Kommunikationsnetze irgendeine Form von Aloha. Typischerweise wird Aloha in der Version Slotted Aloha zusammen mit einem Reservierungsschema eingesetzt, um zumindest gewisse Garantien hinsichtlich der Zugriffsverzögerung und Bandbreite geben zu können. Jedes der vorgestellten Verfahren hat seine spezifischen Vor- und Nachteile. Während das einfache CSMA sehr effizient bei niedriger Last arbeitet, kann MACA mit dem Problem versteckter oder ausgelieferter Endgeräte umgehen. Ein einfaches Polling kann dagegen gut eine feste Bandbreite garantieren. Es gibt kein Verfahren, das für alle Anwendungsfälle ideal ist. Dies ist auch mit ein Grund, warum der Standard IEEE 802.11 gleich alle drei Verfahren kombiniert (vgl. *Abschnitt 7.3*). Mit Hilfe von Polling wird eine feste Rahmenstruktur von der Basisstation vorgegeben, und mit CSMA wird auf das Medium während unkoordinierter Zeitschlüsse zugegriffen. Zusätzlich kann MACA eingesetzt werden, wenn das

Problem versteckter Endgeräte gelöst werden muss oder überhaupt keine Basisstation zur zentralen Steuerung existiert.

Verfahren	SDMA	TDMA	FDMA	CDMA
Idee	Unterteilung des Raums in Zellen oder Segmente	Unterteilung der Zeit in disjunkte Zeitschlitze, anforderungsgesteuert oder vorab festgelegt	Unterteilung der Frequenz in disjunkte Teilbänder	Spreizen der Bandbreite mit Hilfe von orthogonalen Codes
Endgeräte	Nur ein Endgerät kann innerhalb einer Zelle oder eines Sektors senden	Alle Endgeräte sind auf derselben Frequenz nur für jeweils eine kurze Zeit aktiv	Jedes Endgerät kann auf einer eigenen Frequenz ununterbrochen senden	Alle Endgeräte können ununterbrochen auf derselben Frequenz am selben Ort senden
Signal-trennung	Zellenstruktur, gerichtete Antennen	Synchronisation im Zeitbereich	Filtern im Frequenzbereich	Anwendung des Codes in speziellen Empfängern
Vorteile	Sehr einfach, erhöht die Kapazität pro $\text{km}^2$	Vollständig digitales Verfahren, lang erprobt, viel Erfahrung, sehr flexibel	Einfach, erprobt, robust	Flexibel, vermindert Frequenzplanungsaufwand, weiche Übergabe
Nachteile	Unflexibel, typischerweise feste Antennen	Größere Schutzabstände auf Grund der Mehrwegeausbreitung benötigt, Synchronisation nicht immer einfach	Unflexibel, Frequenzen sind rar	Komplexe Empfänger, schwierige Leistungssteuerung bei allen Sendern
Bemerkung	Einsatz nur in Kombination mit TDMA, FDMA oder CDMA sinnvoll	Standard in Festnetzen, in praktisch allen Mobilfunknetzen eingesetzt (häufig mit FDMA und SDMA)	Typischerweise mit TDMA (Frequenzsprungverfahren) oder SDMA (Wiederverwendung von Frequenzen) eingesetzt	Einsatz in vielen 3G-Systemen, höhere Komplexität, Erwartungen wurden zurückgeschraubt; Kombination mit TDMA/FDMA

**Tabelle 3.1:** Vergleich von SDMA-, TDMA-, FDMA- und CDMA-Techniken

## ÜBUNGSAUFGABEN

- 3.1 Welcher physikalische Effekt trägt hauptsächlich zum Versagen der aus dem Festnetzbereich bekannten Medienzugriffsverfahren bei? Welche Gegenmaßnahmen werden in Festnetzen getroffen, um diesen Effekt zu vermeiden?
- 3.2 Rufen Sie sich das Problem versteckter und ausgelieferter Endgeräte in Erinnerung. Was passiert beim Vorhandensein solcher Endgeräte, wenn Aloha, Slotted Aloha, Reservation Aloha bzw. MACA eingesetzt wird?
- 3.3 Wie beeinflussen nahe und ferne Endgeräte TDMA-Systeme? Was geschieht bei CDMA-Systemen? Welche Gegenmaßnahmen werden bei TDMA-, welche bei CDMA-Systemen ergriffen?
- 3.4 Wer führt den MAC-Algorithmus bei SDMA aus? Welche Rolle spielen die mobilen Endgeräte, Basisstationen und die Planung des Netzbetreibers?
- 3.5 Welche grundlegenden Voraussetzungen müssen vorhanden sein, um FDMA anwenden zu können? Inwiefern wird dadurch die Komplexität im Vergleich zu TDMA-Systemen erhöht? Wie und auf wen ist die Medienzugriffssteuerung bei FDMA verteilt, wenn man das gesamte Frequenzspektrum (wie zu Beginn von *Kapitel 2* vorgestellt) betrachtet?
- 3.6 Welche Alternativen gibt es in drahtlosen Netzen, um Duplexkanäle einzurichten? Wie sieht die Situation in leitungsgebundenen Netzen aus?
- 3.7 Welche Vorteile bietet ein statisches TDM-Zugriffsmuster im Vergleich zu einem zufälligen, anforderungsgesteuerten Zugriff? Vergleichen Sie die Effizienz beider Ansätze, wobei Sie von der Annahme mehrerer Verbindungen mit je fester Datenrate bzw. mit jeweils unterschiedlicher, schwankender Datenrate ausgehen. Erläutern Sie nun, warum traditionelle drahtlose Netze für Mobiltelefone feste Zugriffsmuster einsetzen, drahtlose Netze für Daten im Allgemeinen jedoch zufällige. In der Zukunft werden auch im Bereich der Mobilkommunikation Sprachdaten nur noch eine untergeordnete Rolle im Vergleich zu von Computern erzeugten Daten spielen. Wie wird dies die Funknetze verändern?
- 3.8 Erläutern Sie den Begriff der Interferenz im Raum, in der Zeit, im Frequenzbereich und im Coderaum. Welche Gegenmaßnahmen treffen jeweils SDMA-, TDMA-, FDMA- und CDMA-Systeme?
- 3.9 Angenommen, in einem Kommunikationsszenario kann jede Station jede andere empfangen. Eine Station möchte Daten übertragen und erkennt ein freies Medium. Warum kann immer noch nach dem Start der Übertragung eine Kollision stattfinden, obwohl keine Station beim Erkennen eines belegten Mediums mit dem Senden beginnt?
- 3.10 Welche Vorteile bieten Reservierungsverfahren? Wie werden hier Kollisionen während der Datenübertragung vermieden? Warum ist die Wahrscheinlichkeit einer Kollision geringer als bei klassischem Aloha? Welche Nachteile bringen Reservierungsverfahren mit sich?



- 
- 3.11 Warum und wie kann MACA bei versteckten bzw. ausgelieferten Endgeräten versagen? Denken Sie daran, dass sich Teilnehmer bewegen können und nicht alle Teilnehmer die gleiche Sendeleistung besitzen.
  - 3.12 Welches der vorgestellten Medienzugriffsverfahren kann harte Garantien bezüglich der Zugriffsverzögerung und der Bandbreite geben?
  - 3.13 Wie werden Schutzabstände in CDMA-Systemen zwischen verschiedenen Teilnehmern gebildet?
  - 3.14 Betrachten Sie erneut das einfache CDMA-Beispiel in Abschnitt Abbildung , jedoch wird jetzt ein zufälliges »Rauschen« auf das übertragene Signal (-2, 0, 0, -2, +2, 0) addiert, beispielsweise (1, -1, 0, 1, 0, -1). Welche Daten werden jetzt im Empfänger für A bzw. B rekonstruiert? Betrachten Sie nun zusätzlich die Problematik naher und ferner Endgeräte. Inwiefern wird dadurch die Situation noch komplizierter, und was wären mögliche Gegenmaßnahmen?