



Hauptseminar im Wintersemester 2001/2002

Dienste und Infrastrukturen für mobile Netze

Basistechnologien

Zugriffsverfahren, Modulation, Handover

Diese Ausarbeitung ist im Rahmen eines Vortrags im Seminar „Dienste und Infrastrukturen für mobile Netze“ im Wintersemester 2001/2002 an der Technischen Universität München entstanden.

Sie ist so knapp und verständlich wie möglich gehalten und soll zur Nachbereitung des Seminar-Vortrags dienen. Wer sich noch tiefergehend mit Basistechnologien zur drahtlosen Übertragung beschäftigen will, dem seien vor allem folgende Werke empfohlen:

- Jochen Schiller: Mobilkommunikation. Addison-Wesley, 2000.
- K. David / T. Benkner: Digitale Mobilfunksysteme. B.G. Teubner Stuttgart, 1996.
- Andrew S. Tanenbaum: Computernetzwerke. Pearson Studium, 2000.
- Uwe Baumgarten: Skript zur Vorlesung „Mobile verteilte Systeme“ im SS2001 an der Technischen Universität München. (Das Skript ist leider nicht online abrufbar.)

I. Einführung in mobile Netze

Bevor das eigentliche Thema „Basistechnologien“ behandelt wird, werden im I. Teil zur Einführung in das Seminar „Mobile Netze“ typische Anwendungs-Szenarien aufgezeigt und der Begriff der Mobilität und die sich daraus ergebenden Herausforderungen geklärt.

1. Typische Anwendungen

a) Information, Unterhaltung

Um das Internet an jeden Ort zu bringen und die Idee der allgegenwärtigen Kommunikationsmöglichkeiten zu verwirklichen, ist man auf mobile und drahtlose Netze angewiesen. Bereits heute hat jeder die Möglichkeit, per WAP, Notebook, PDA oder Mobiltelefon (fast) immer und überall auf Nachrichten, Aktienkurse, Wettervorhersagen und andere Informationen zuzugreifen. Mit den fallenden Kosten für solche Dienste wächst sogar der Wunsch, über drahtlose Netze einfach nur unterhalten zu werden und Spiele zu spielen.

b) mobiles Büro

Ein typischer Angestellter, der viel unterwegs ist, braucht ständigen Kontakt zu seiner Firma. Er könnte zum Beispiel mobil auf die Datenbank seiner Firma zugreifen, um aktuelle Preise, Kundendaten und Lagerbestände zu erfahren, um Kunden oder Geschäftspartner aktuell informieren zu können. Genauso könnte die Firma auch ständig die Geschäfte ihres Mitarbeiters verfolgen. Selbstverständlich ist auch die Nutzung von Kommunikationsdiensten wie Telefonie, e-mail, www oder Videokonferenz.

c) Fahrzeuge

Die meisten Autos werden in naher Zukunft mehrere drahtlose Kommunikationssysteme und mobile Anwendungen integrieren. Der digitale Rundfunk (Digital Audio Broadcast) sendet bereits heute Musik, Nachrichten, Verkehr und Wetter mit einer Bandbreite von 1,5 Mbit/s. Für Sprach- und Datendienste wie Telefonie, Zugriff auf www und e-mails und Videokonferenz stehen GSM, GPRS oder bald UMTS zur Verfügung. Die genaue Position wird satellitengestützt durch „Global Positioning System“ (GPS) bestimmt und kann von einer Software genutzt werden, um dem Fahrer den Weg zu seinem gewünschten Ziel aufzuzeigen. Zusätzlich könnten Autos, die sich in einer näheren Umgebung befinden, ein lokales Ad-hoc-Netz zum Austausch von Daten in Notfall-Situationen oder zum Einhalten eines Sicherheitsabstandes aufbauen. Im Fall eines Unfalls könnte automatisch ein Notruf an Polizei und Rettungsleitzentrale abgesetzt werden.

Ähnliche Einrichtungen sind für Flugzeuge und Züge wünschenswert, allerdings versagen viele digitale Datenübertragungssysteme bei hoher Geschwindigkeit.

d) ortsabhängige Dienste („location aware computing“)

Bei einigen Anwendungs-Szenarien ist es sinnvoll, trotz der für mobile Systeme angestrebten Orts-Transparenz dem Nutzer Dienste anzubieten, die auf seinen aktuellen Aufenthaltsort abgestimmt sind. „Ortsabhängige Dienste“ umfassen mehr als nur die Informationsdienste, die im Moment unter dem Schlagwort „location based services“ bei den Mobilfunk-Anbietern im Kommen sind.

Nachfolgedienste folgen Ihrem Benutzer an seinen aktuellen Aufenthaltsort nach. Typische Beispiele sind Anruf-Weiterschaltung und e-mail-Weiterleitung. Nachfolgedienste basieren darauf, dass ein Benutzer eine permanente logische Adresse (Telefonnummer oder e-mail-Adresse) hat, unter der er immer erreichbar ist, und eine sich je nach Aufenthaltsort ändernde physische Adresse, an die die Sitzungen (Telefonanrufe, e-mails) umgeleitet werden.

Unter ortsbewussten Diensten versteht man die Nutzung von Diensten, die selbst an ihren Ort gebunden sind, wie zum Beispiel Drucker oder andere Peripheriegeräte. Das mobile Endgerät muss dazu über Informationen über seine Umgebung verfügen. Zu lösende Probleme sind die Authentifizierung gegenüber solchen Diensten und deren Abrechnung.

Ortsabhängige Informationsdienste sind nun das, was im Moment als „location based services“ beworben wird: Der Nutzer soll als „Pull-Dienst“ Informationen über die nächstgelegene Tankstelle oder Bank, das nächste WC oder Einkaufszentrum anfordern können. Bei „Push-Diensten“ werden ihm ortsabhängige Informationen ohne Aufforderung zugesandt: beispielsweise die Sonderangebote eines Ladens, am dem man gerade vorbeigeht, oder das Tages-Veranstaltungs-Programm eines Theaters oder Kinos, vor dem man steht.

In vielen Anwendungs-Szenarien sind mobile Netze heute nicht mehr wegzudenken. Die sich ständig weiterentwickelnde Technik (insbes. was die erzielbare Datenrate durch drahtlose Kommunikation betrifft) wird in Zukunft noch viele weitere mobile Anwendungen möglich machen.

2. Mobilität

Nachdem zur Motivation einige Szenarien aufgezeigt wurden, für die mobile Netze die Basis sind, ist als nächstes der Begriff der Mobilität und die Auswirkungen der Mobilität auf Endgeräte zu klären.

Das Wort „Mobilität“ bedeutet, dass jemand oder etwas sich bewegen kann. Wer oder was ist also „mobil“ im Sinne der Informationstechnik und kann sich bewegen?

Wenn der Nutzer eines Systems mobil ist, spricht man von Benutzer-Mobilität. Er kann die Dienste des Systems an unterschiedlichen Orten nutzen. Die Kommunikationsdienste folgen ihm also nach. Typische Beispiele hierfür sind die Anruf-Weiterschaltung am Telefon oder ein WWW-Dienst, den der Benutzer von jedem internetfähigen Computer aus nutzen kann und dessen Oberfläche immer gleich aussieht.

Sind die Endgeräte eines Systems mobil, so spricht man von Endgeräte-Mobilität. Das Kommunikationsgerät selbst kann also seinen Ort wechseln – ob mit oder ohne seinen Benutzer – und ist auch während der Bewegung arbeitsfähig. Typische Beispiele hierfür sind Mobiltelefone oder Palmsize Computers. Abzugrenzen sind portable Endgeräte, die zwar nicht an einen Ort gebunden sind, während des Ortswechsels aber nicht oder nicht vollständig nutzbar sind, wie zum Beispiel eine Notebook mit Netzwerkkarte.

Von Session-Mobilität ist die Rede, wenn eine aktive Sitzung eines Dienstes vom Benutzer unterbrochen und auf einem anderen Endgerät fortgeführt werden kann. Dies ist zum Beispiel bei Telefonanlagen der Fall, wo der Teilnehmer ein Telefongespräch (Session) auf einen anderen Apparat umleiten kann, um es dort entgegenzunehmen und fortzuführen. Das Thema Session-Mobilität ist noch in Forschung, denn auch bei Datendiensten sind Anwendungsfälle denkbar, in denen Session-Mobilität Sinn macht. So könnte der Benutzer zum Beispiel das Ausfüllen eines Formulars, das Bearbeiten eines Textes oder das Online-Shopping unterbrechen und nahtlos an einem anderen Endgerät fortsetzen.

Wie die Beispiele gezeigt haben, gibt es verschiedene Formen von Mobilität, die keinesfalls alle auf drahtloser Kommunikation beruhen. Die Begriffe „mobil“ und „drahtlos“ dürfen also aus keinen Fall als gleichbedeutend angesehen werden. Es existieren sowohl Systeme, die mobil aber nicht drahtlos sind, als auch drahtlos und nicht mobil. Ein Beispiel für den ersten Fall wäre ein Notebook mit Netzwerkanschluss. Das ist mobil (genauer: portabel) und dennoch auf leitungsgebundene Kommunikation angewiesen. Ein Beispiel für den zweiten Fall wäre ein drahtloses Computernetzwerk (Wireless LAN) mit fest-installierten Rechnern.

Die für dieses Seminar relevante Art der Mobilität ist die Endgeräte-Mobilität, die im folgenden gemeint ist, wenn von „Mobilität“ die Rede ist.

Wie wird nun Mobilität erreicht? Und welche Hürden müssen Endgeräte überwinden, um mobil zu werden?

Nicht-mobile Endgeräte sind durch bestimmte Faktoren an ihre Umgebung gebunden. Bei der Entwicklung von mobilen Endgeräten ist die Aufgabe, diese Bindungen zu überwinden.

Bindung an Umgebung	Lösung
Größe, Gewicht	kleine Bauweise
Stromversorgung	Batteriebetrieb / sparsame Hardware
Datenkommunikation	drahtlos (Funk, IR)
Sicherheit	Verschlüsselung

Ein Hindernis ist die Größe und das Gewicht der Geräte. Mobile Endgeräte müssen daher klein und leicht sein, damit sie einfach transportiert werden können. Die kleine Bauweise bringt aber Probleme mit sich. So sollten die Geräte trotzdem robust sein und komfortabel zu bedienen. Innovative Ein- und Ausgabe-Devices sind also gefragt. Zur Eingabe werden heute üblicherweise kleine Tastaturen oder

stiftbasierte Texterkennung eingesetzt. Die Sprachsteuerung und -eingabe steckt noch in den Kinderschuhen. Für die Ausgabe werden meist sehr kleine Displays sowie akustische Signale eingesetzt.

Um für die Stromversorgung nicht mit einem Kabel an das Stromnetz gebunden zu sein, müssen mobile Endgeräte mit Akkus arbeiten. Auch das zeigt neue Grenzen auf. Die von den festen Computern gewohnten extrem stromkonsumierenden Hardwareteile (zum Beispiel rotierende Speichermedien wie Festplatten; schnelle Prozessoren, großzügige RAM-Ausstattung) sind daher bei den meisten Endgeräten nicht denkbar. Außerdem müssen intelligente Maßnahmen zum Energie Sparen eingesetzt werden.

Will man für die Datenübertragung nicht an eine Leitung (Netzwerk, ISDN, etc.) gebunden sein, bleibt nur die drahtlose Kommunikation über Funk oder Infrarot. Für das Seminar „Mobile Netze“ wird die drahtlose Kommunikation eine Hauptrolle spielen. Die Basistechnologien hierfür werden im Hauptteil dieser Arbeit ausführlich dargestellt. Einbußen gegenüber der leitungsgebundenen Datenübertragung müssen natürlich bezüglich der erzielbaren Datenrate und der Zuverlässigkeit der Verbindung hingenommen werden.

Außerdem müssen mobile Endgeräte ein höheres Maß an Sicherheit bieten. Drahtlose Kommunikation kann einfacher abgehört werden als leitungsgebundene. Deshalb wird eine zuverlässige Verschlüsselung gefordert. Die Daten, die auf mobilen Endgeräten gespeichert sind, sind außerdem einer größeren Gefahr ausgesetzt als Daten in Aktenschränken, auf Bürocomputern oder in Rechenzentren.

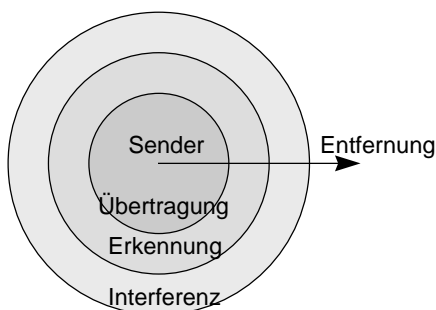
II. Basistechnologien

1. Eigenschaften des drahtlosen Kanals

1.1 Signalausbreitung

Noch ohne zu wissen, wie man digitale Daten in elektromagnetische Wellen umwandelt, wollen wir uns ansehen, wie sich ein nicht-leitungsgebundenes Signal im Raum ausbreitet.

Die Ausbreitung von Signalen in leitungsgebundenen Netzen ist leicht vorhersehbar: Die Signale breiten sich – abgesehen von zu vernachlässigenden Abstrahl-Effekten – entlang des Leiters aus. Falls der Leiter nicht unterbrochen ist, ist die Charakteristik des Leiters an jeder Stelle gleich.



Bei einem drahtlos übertragenen Signal kann dessen Verhalten nur im Vakuum vorhergesagt werden: Es breitet sich gleichmäßig in alle Richtungen im Raum aus, und seine Stärke nimmt quadratisch zur Entfernung ab.

Durch das Abnehmen der Stärke ergeben sich drei Bereiche um die Quelle des Signals: Im Übertragungsbereich ist das Signal so stark, dass es korrekt empfangen werden kann und somit eine Datenübertragung möglich ist. In einem größeren Bereich um den

Übertragungsbereich kann ein Empfänger zwar noch erkennen, dass der Sender ein Signal sendet; die Störungen sind aber schon so groß, dass die Daten nicht mehr korrekt interpretiert werden können. In einem noch weiter vom Sender entfernten Bereich kann ein Empfänger nicht mehr erkennen, dass der Sender ein Signal sendet; das Signal kann aber noch andere Übertragungen stören, indem es zum Hintergrundrauschen beiträgt.

In der Realität sind Übertragungs-, Erkennungs- und Interferenz-Bereich nicht kugelförmig, sondern durch Berge, Täler, Bebauung, Wetter, Bäume, usw. bizarr geformte Polygone. Folgende Effekte tragen dazu bei:

Dämpfung: Selbst wenn zwischen Sender und Empfänger keine Materie ist, verliert das Signal an Leistung. Genauer gesagt nimmt die Leistung quadratisch zur Entfernung ab. Dies ist so zu erklären: Eine (theoretisch punktförmige) Antenne strahlt ein Signal mit einer bestimmten Energie aus. Dieses Signal breitet sich mit Lichtgeschwindigkeit gleichmäßig in alle Richtungen aus. Die Energie verliert sich also gleichmäßig auf der Oberfläche einer Kugel, deren Radius mit Lichtgeschwindigkeit wächst. Aus der Geometrie ist bekannt, dass die Kugeloberfläche quadratisch mit dem Kugelradius zusammenhängt.

Zusätzlich zu dieser Dämpfung im Vakuum kommt in der Realität die teilweise Absorption der Energie des Signals durch die Luft, (Regen)wasser, usw.



Abschattung: Sehr große Objekte (Mauern, Fahrzeuge, Häuser, Bäume) können ein Signal soweit dämpfen, dass es hinter dem Objekt praktisch nicht mehr empfangbar ist. Je höher die Frequenz des Signals ist, desto weniger können sie Objekte durchdringen.



Reflexion: Objekte können ein Signal auch reflektieren, das heißt, das Signal wird abgelenkt und besitzt auch nicht mehr dieselbe Stärke, weil ein Teil der Energie dabei absorbiert wird.



Streuung: Ein Signal wird an einem Objekt in mehrere schwächere Signal aufgespalten, die in unterschiedliche Richtungen weiterlaufen.



Beugung: Signale werden an Kanten von Hindernissen von der ursprünglichen Ausbreitungsrichtung abgelenkt. (Damit lassen sich beispielsweise Empfänger erreichen, die hinter einem Berg sind.)

Da diese fünf Effekte alle gleichzeitig auftreten, ist es praktisch unmöglich, die Signalstärke an einem bestimmten Punkt zu berechnen, und man ist auf sehr präzise Geländemodelle angewiesen.

Die Effekte sind nicht nur negativ zu sehen. Gerade in Städten tragen zum Beispiel Reflexion und Streuung wesentlich dazu bei, dass, obwohl aufgrund der Vielzahl von Gebäuden praktisch nie eine Sichtverbindung zwischen Sender und Empfänger besteht, trotzdem eine Übertragung möglich ist.

1.2 Signale

Nachdem wir nun eine Vorstellung davon haben, wie sich Signale ausbreiten, wollen wir nun genauer betrachten, was (drahtlos übertragene) Signale genau sind.

Signale sind allgemein definiert als die physikalische Repräsentation von Daten. Daten sind etwas Abstraktes, und deren Übertragung zwischen zwei Kommunikationssysteme kann nur durch die Übertragung von Signalen geschehen. Nach dem ISO/OSI-Referenzmodell obliegt diese Aufgabe der Schicht 1: der Bitübertragungsschicht (physical layer).

Bei einer leitungsgebundenen Übertragung könnte zum Beispiel das Anlegen einer positiven Spannung eine binäre 1 bedeuten und eine negative Spannung eine binäre 0.

Wenn Elektronen sich in einem elektrischen Leiter bewegen, entstehen elektromagnetische Wellen. Umgekehrt verursachen elektromagnetische Wellen eine Ablenkung von Elektronen. Durch diesen Effekt kann es passieren, dass schlecht abgeschirmte Datenkabel, die nahe beieinander liegen, sich gegenseitig stören.

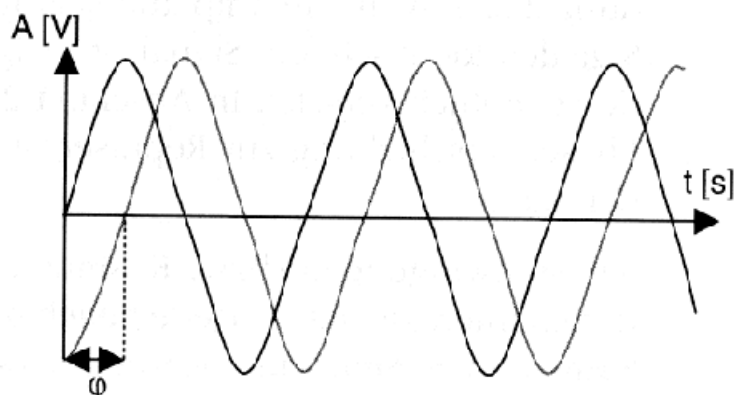
Bei der drahtlosen Übertragung macht man sich diesen Effekt zunutze: Man legt ein elektrisches Signal an eine Antenne, die Antenne erzeugt elektromagnetische Wellen, die an die Umgebung abgestrahlt werden. Die Energie dieser Wellen hängt von der Stärke des elektrischen Signals und von der Abstrahl-Charakteristik der Antenne ab. Wenn eine Antenne umgekehrt elektromagnetische Wellen auffängt, induziert sie dadurch ein elektrisches Signal auf den angeschlossenen Leiter.

Eine Antenne ist selbst nichts anderes als ein nicht-isolierter elektrischer Leiter. Eine optimale Abstrahl-Charakteristik hat die Antenne, wenn ihre Länge der Wellenlänge des Signals (oder einem kleinen Teiler oder einem kleinen Vielfachen der Wellenlänge) entspricht.

Da die drahtlose Übertragung also nur durch (elektromagnetische) Wellen geschehen kann, müssen die zu übertragenden Daten durch ein periodisches Signal dargestellt werden. Dieser Vorgang heißt Modulation und wird im nächsten Abschnitt genauer vorgestellt.

Die einfachste periodische Funktion ist die Sinus-Funktion. Anhand derer wollen wir uns ansehen, welche Parameterwerte wir alle verändern können, um Daten zu repräsentieren:

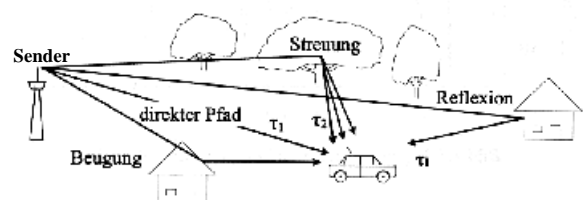
$$g(t) = A_t \sin(2\pi f_t t + \varphi_t)$$



Signalparameter sind die Amplitude A , die Frequenz f und die Phasenverschiebung φ . Die Amplitude ist der Abstand der Hoch- und Tiefpunkte zum Ursprung. Die Frequenz ist die Anzahl der Schwingungen pro Zeit. (Der Kehrwert der Frequenz ist die Periodendauer.) Die Phasenverschiebung (oder einfach Phase) ist die Verschiebung des Signals in der Zeit zum Signal ohne Phasenverschiebung. Alle drei Parameter können über die Zeit verändert werden.

1.3 Störungen

Die Effekte, die im Abschnitt über die Signalausbreitung erklärt wurden (Reflexion, Streuung, Beugung), bewirken, dass ein Signal zwischen Sender und Empfänger nicht genau einen Weg nimmt, sondern aufgespalten über viele Wege zum Empfänger gelangen. Dieser Effekt als Ganzes heißt Mehrwegeausbreitung.



Da die Wege des Signals unterschiedlich lang sind, unterscheidet sich auch die Signallaufzeit, und die Teilsignale kommen verschoben und überlagert beim Empfänger an. Unter konstruktiver Überlagerung versteht man, wenn sich Teilsignale überlagern, die ungefähr um ein Vielfaches ihrer Wellenlänge verschoben sind. Die Amplitude der Wellen des überlagerten Signals sind also ungefähr so groß wie die Summe der Amplituden der Teilsignale, was kaum problematisch ist. Ein wirkliches Problem ist die sog. destruktive Überlagerung. Sie entsteht, wenn die Verschiebung zweier sich überlagernder Wellen ungefähr ein Vielfaches plus $1/2$ der Wellenlänge des ursprünglichen Signals ist. Es addieren sich also jeweils der positiver Abschnitt des einen Teilsignals mit dem negativen Abschnitt des anderen Teilsignals und umgekehrt, so dass sich die Teilsignale gegenseitig auslöschen.

Da sich das Signal in der Realität nicht nur in zwei, sondern in sehr viele Teilsignale aufspaltet, ist die aus den Überlagerungen des Teilsignale resultierende Signalstärke praktisch dem mathematischen Chaos überlassen. Das heißt, dass schon eine sehr kleine Ortsänderung des Empfängers ein drastische Änderung des empfangenen Signalstärke hat. (Diesen Effekt hört man zum Beispiel im Autoradio beim Anfahren: Ein Vorfahren um wenige Zentimeter kann den Empfang signifikant verbessern oder verschlechtern.)

Der Effekt der schnell schwankenden Signalstärke-Änderung heißt Fast Fading und ist bei der digitalen drahtlosen Übertragung ein Problem, da während eines extremen Einbruchs der Signalstärke keine Daten übertragen werden können. Als Lösung muss entweder die Fehlerkorrektur aus einer höheren Schicht greifen, oder man stellt zwei Antennen mit einem gewissen Abstand zueinander auf und verarbeitet das jeweils stärkere Signal.

Das Problem des Delay Spread entsteht ebenfalls durch Mehrwegeausbreitung. Da die Geschwindigkeit der Signale konstant ist, verhält sich die Laufzeit der aufgespaltenen Signale proportional zum Weg, und so kann es passieren, dass die Laufzeiten sich extrem unterscheiden („Zeit-Dispersion“). Ein ausgesandter Impuls kommt also als schwächere teilweise extrem zeitlich versetzte Impulse beim Empfänger an. (Das ist weniger in dicht bebauten Gebieten der Fall als eher in bergigen Gegenden.) Kommen die Unterschiede in die Größenordnung der Dauer einer Bitübertragung, können sich benachbarte Bits gegenseitig störend beeinflussen („Intersymbol-Interferenz“); eine deutlich erhöhte Bitfehlerrate ist die Folge.

Den sog. Doppler-Effekt kennt jeder, an dem schon einmal ein hupendes Fahrzeug mit hoher Geschwindigkeit vorbei gefahren ist: Die Tonhöhe der Hupe ist sehr viel höher, solange das Auto auf einen zufährt, als wenn es danach von einem wegfährt. Dieser Effekt der Frequenz-Veränderung („Frequenz-Dispersion“) des Signals, wenn Sender und Empfänger sich schnell aufeinander zu oder voneinander weg bewegen, tritt nicht nur bei Schall, sondern auch bei der Funkübertragung auf. Überschreitet die Frequenz-Dispersion eine gewisse Toleranz-Schwelle im Empfänger, ist eine erfolgreiche Übertragung nicht mehr möglich. Außerdem kann der Sender auf der entstehenden Frequenz andere Empfänger stören bzw. umgekehrt. Aus diesem Grund ist die Benutzung von Mobiltelefonen in schnellen Zügen schwer bis überhaupt nicht möglich.

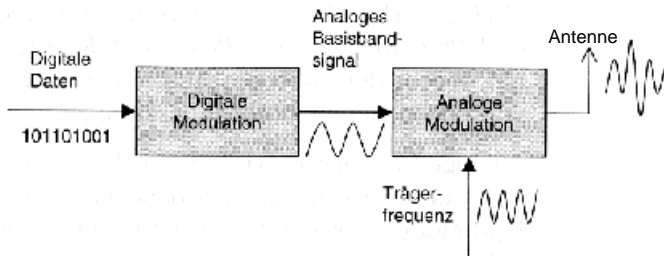
Neben dem Fast Fading gibt es noch den Effekt des Slow Fading, das heißt den längerfristigen Schwund eines Signals. Das Slow Fading entsteht im wesentlichen dadurch, dass sich der Abstand zwischen Sender und Empfänger ändert, und ist normalerweise einfach dadurch auszugleichen, dass die Sendestärke erhöht bzw. verringert wird.

2. Modulation

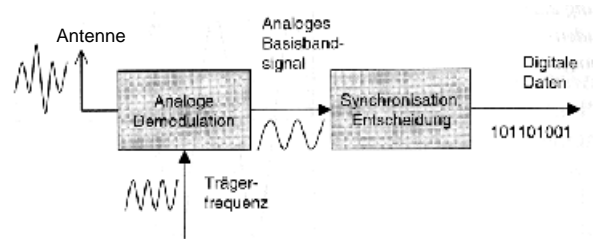
Um digitale Daten in eine Form zu bringen, die mittels Antennen über die Luftschnittstelle übertragen werden kann, werden Modulationsverfahren verwendet. Unter Modulation versteht man allgemein die

Veränderung eines Trägersignals in Abhängigkeit eines Nutzsignals. Das Trägersignal – eine Sinusschwingung – kann in Amplitude, Frequenz und Phase verändert werden.

Modulation



Demodulation

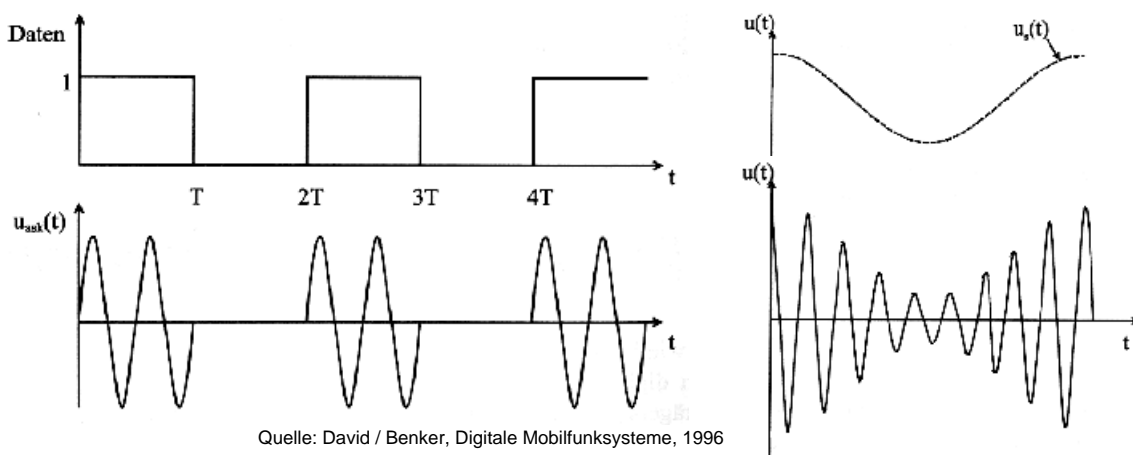


Bei der digitalen Modulation werden digitale Daten in ein sog. analoges Basisbandsignal umgesetzt. Digitale Modulation ist auf jedem Medium notwendig, über das keine Daten digital übertragen werden können. (Im Fall von analogen Telefonleitungen z.B. übernimmt ein Modem diese Aufgabe.)

Bei der drahtlosen Kommunikation ist zusätzlich noch eine analoge Modulation des generierten Basisbandsignals notwendig, um dessen Mitten-Frequenz auf die Trägerfrequenz für die Funkübertragung zu verschieben.

Dies hat mehrere Gründe: Zum einen muss die Länge einer Antenne ungefähr so groß wie die Wellenlänge der Signale sein. Eine Antenne zur Übertragung des Basisbandsignals (das i.d.R. eine sehr geringe Frequenz hat) müsste somit viele Meter lang sein. Außerdem ist eine höhere Trägerfrequenz nötig, damit die übertragenen elektromagnetischen Wellen bestimmte Eigenschaften haben. (Jeder Frequenzbereich hat charakteristische Vor- und Nachteile.) Weiterhin wäre ohne analoge Modulation kein Frequenz-Multiplex möglich, der im nächsten Abschnitt erklärt wird.

2.1 Amplitudenmodulation

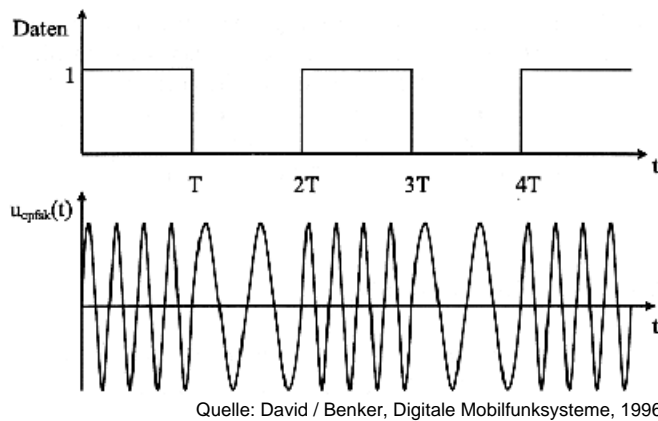


Bei der Amplitudenmodulation wird die Amplitude des Trägersignals abhängig vom Nutzsignal verändert. Ist das Nutzsignal digital, ergeben sich nur zwei unterschiedliche Amplituden. Ist das Nutzsignal analog, wird die Amplitude des Trägersignals stufenlos verändert. (Für digitale Modulation wird häufig auch das Wort „Umtastung“ verwendet. Das Verfahren ist aber für analoge und digitale Signale dasselbe.)

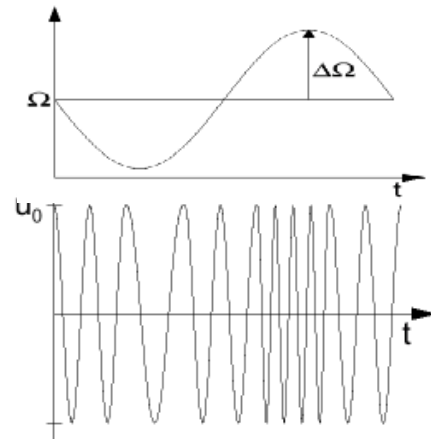
Die Amplitudenmodulation ist zwar sehr einfach, aber auch sehr störanfällig, weil Mehrwegeausbreitung, Rauschen und Dämpfung das Signal sehr stark beeinflussen und ein Störsender auf derselben Frequenz das Signal überlagern kann.

Analoge Amplitudenmodulation wird zum Beispiel bei Kurz- und Mittelwelle-Radiosendern eingesetzt. Amplitudenumtastung wird zum Beispiel bei Glasfaser-Übertragung genutzt. (Ein Lichtimpuls repräsentiert eine 1, Dunkelheit eine 0.)

2.2 Frequenz-Modulation



Quelle: David / Benker, Digitale Mobilfunksysteme, 1996



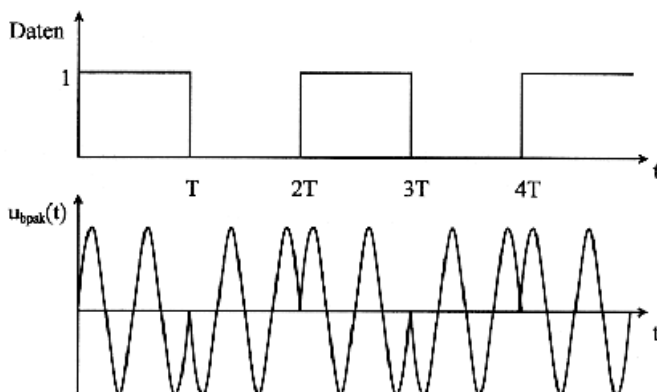
Quelle: Skript Prof. Sehmisch, FH Braunschweig

Bei der Frequenz-Modulation wird die Frequenz des Trägersignals in Abhängigkeit vom Nutzsignal verändert. Bei einem digitalen Nutzsignal muss nur zwischen zwei verschiedenen Frequenzen hin- und her gesprungen werden. Bei einem analogen Nutzsignal verändert sich die Frequenz stetig.

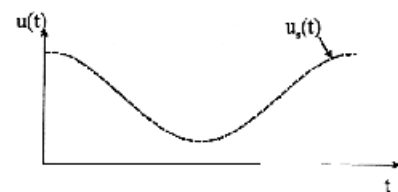
Frequenz-Modulation benötigt eine größere Bandbreite als Amplitudenmodulation, denn es werden ja zwei Frequenzen verwendet (digital) bzw. ein Frequenzband (analog). Es ist dafür weniger stör anfällig. (Überlagerung durch Mehrwegeausbreitung sowie Dämpfung ändern die Amplitude, nicht aber die Frequenz; trotz Rauschen kann Frequenz herausgefiltert werden.)

Frequenz-Modulation wird zum Beispiel beim UKW-Radio eingesetzt. Eine etwas abgewandelte Frequenz-Umtastung als digitale Modulation verwendet zum Beispiel GSM.

2.3 Phasen-Modulation



Quelle: David / Benker, Digitale Mobilfunksysteme, 1996



?

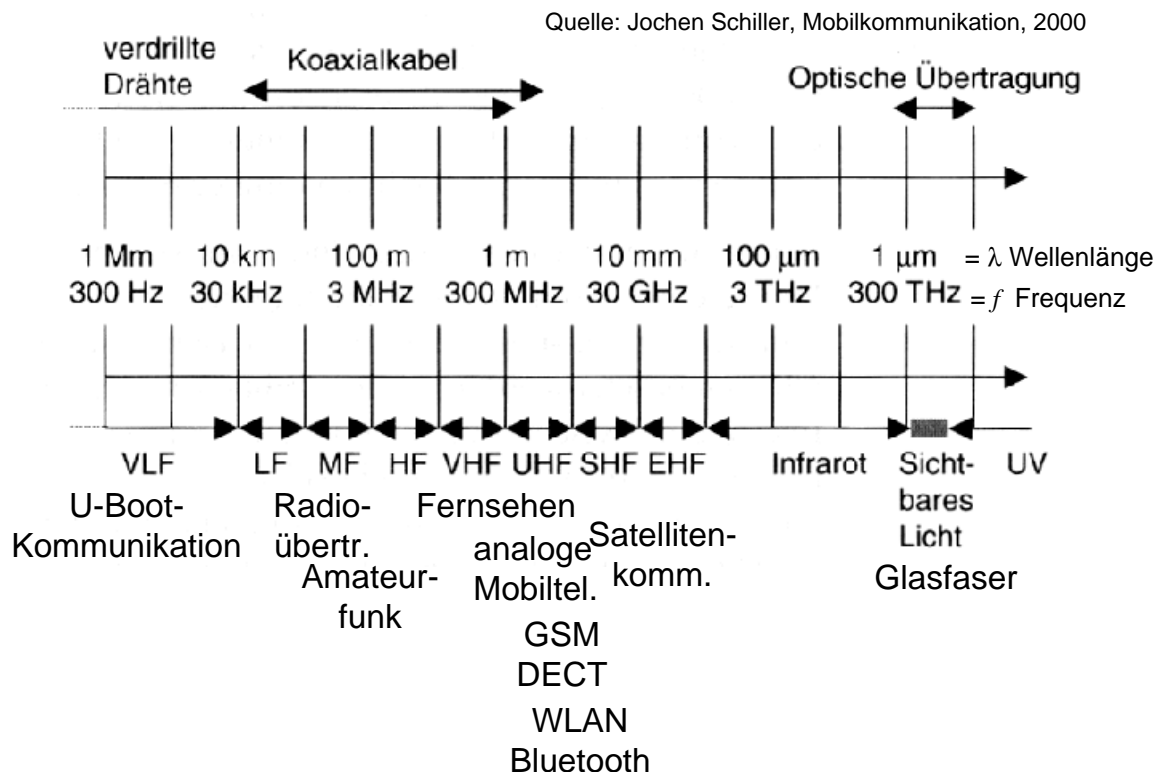
Digitale Phasen-Modulation bedeutet, dass die Phase des Trägersignals anhängig vom (digitalen) Nutzsignal verändert wird. Bei einer 2-Phasen-Umtastung (Binary Phase Shift Keying) zum Beispiel wird eine Trägerschwingung mit Frequenz f mit $+1$ oder -1 multipliziert. Bei einer 4-Phasen-Umtastung werden jeweils zwei Bit zusammen in vier verschiedene Phasen moduliert.

Da Sender und Empfänger sehr präzise synchronisiert sein müssen, sind sie komplexer. Der Lohn dafür ist eine noch etwas größere Robustheit gegen Störungen als bei Frequenz-Umtastung.

Da man bei der Phasen-Umtastung festlegen muss, wie viele verschiedene Phasensprünge benutzt werden sollen, gibt es keine analoge Phasenmodulation.

3. Frequenzspektrum

Übertragung mit Hilfe von Wellen kann auf vielen verschiedenen Frequenzen realisiert werden. Jeder Frequenzbereich besitzt dabei charakteristische Vor- und Nachteile. In diesem Abschnitt soll eine Übersicht über alle zur Datenübertragung nutzbaren Frequenzbereiche gegeben werden.



Übertragung durch Wellen beginnt schon im Infraschall-Bereich von wenigen Kilohertz. Diese Frequenzen werden zum Beispiel von U-Booten genutzt, da sich die Wellen im Wasser fortpflanzen und der Krümmung der Erdoberfläche folgen. Generell gilt, dass sich Wellen in niedrigen Frequenzen eher wie Schall, in höheren Frequenzen eher wie Licht verhalten. Es ist klar, dass ein Nutzsignal nicht auf ein Trägersignal mit einer niedrigeren Frequenz aufmoduliert werden kann. Deshalb kann in diesem Frequenzbereich keine Sprache (4 bis 22 kHz!) übertragen werden, sondern nur Morse-Signale.

Radio-Übertragung beginnt im Langwellenbereich ab 148,5 kHz, Amateur-Funk-Übertragung im Kurzwellenbereich ab 5,9 MHz und der heute übliche UKW-Rundfunk ab 87,5 MHz.

Je mehr Information gleichzeitig übertragen werden soll, desto höher muss die Trägerfrequenz sein. Um Fernsehbilder zu übertragen, musste man die Technik deshalb soweit vorantreiben, dass man Frequenzen im Bereich von 174-230 MHz nutzen konnte.

Die Mobilfunksysteme sind in noch höheren Frequenzbereichen angesiedelt: Das analoge C-Netz benutzte Frequenzen um 450 MHz, GSM900 nutzt die Frequenzen um 900 MHz, GSM1800 die Frequenzen um 1,8 GHz. Die Länge einer Antenne sollte für eine optimale Abstrahl-Charakteristik un-

gefähr der Wellenlänge des zu übertragenden Signals entsprechen. Schon alleine deshalb musste man für den Mobilfunk diese höheren Frequenzen technisch realisieren.

Bei Satellitenkommunikation werden gerichtete Mikrowellen im Bereich von 2 bis 40 GHz genutzt. Sie verhalten sich bereits sehr ähnlich wie Licht, d.h. sie werden nicht mehr an der Ionosphäre reflektiert (wie typischerweise Radiowellen beim Amateurfunk), und für eine Satellitenverbindung ist eine Sichtverbindung nötig.

Ab 3,5 THz beginnt mit den Infrarot-Wellen der optische Frequenzbereich, der nicht mehr staatlich reguliert wird. Sichtbares Licht kann entweder über eine Glasfaser-Leitung genutzt werden oder als gerichtete Laser-Verbindung.

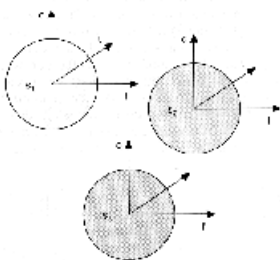
Dass Frequenzen staatlich reguliert werden und äußerst knapp sind, erfuhren zuletzt die Mobilfunk-Anbieter, die die begehrten UMTS-Lizenzen für unermessliche Summen ersteigerten. Wie bei den Modulationsverfahren erklärt, findet Datenübertragung nicht nur auf genau einer Frequenz statt, sondern es muss stets ein ganzes Frequenzband benutzt werden. Je größer dieses Frequenzband ist, umso größer ist die erzielbare Bandbreite. Aufgrund der charakteristischen Eigenschaften bei der Wellenausbreitung können auch nicht beliebig niedrige oder beliebig hohe Frequenzen benutzt werden. Die Folge: Frequenzbänder sind knapp und müssen reguliert werden, damit es nicht durch Mehrfachnutzung zu Interferenzen kommt.

4. Multiplex-Verfahren

Wir können nun ein digitales Signal drahtlos von genau einem Sender an (möglicherweise mehrere) Empfänger übertragen. Als nächstes müssen wir uns nun Verfahren ansehen, damit viele Sender-Empfänger-Paare gleichzeitig das Medium Luft gemeinsam zur Übertragung nutzen können. Das geschieht mit sog. Multiplex-Verfahren.

Multiplex-Verfahren teilen den (geographischen) Raum, das Frequenzband, die Zeit und/oder einen Code-Raum in Kanäle auf.

4.1 Raum-Multiplex

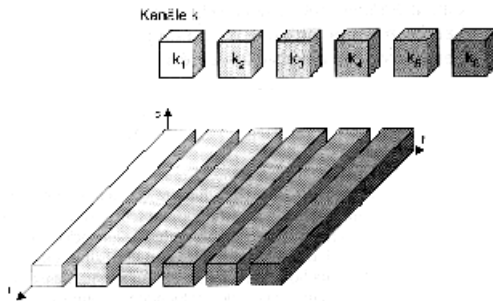


Raum-Multiplex bezeichnet die Unterteilung des geographischen Raums in Zellen oder Segmente. Raum-Multiplex ergibt sich zum einen daraus, dass Signale durch die Dämpfung nur eine begrenzte Reichweite haben und somit zwei weit genug entfernte Sender dieselbe Frequenz zur selben Zeit nutzen können. Zum anderen kann man mittels sog. Sektor- oder Richtantennen, die nicht rundum abstrahlen, sondern nur ein begrenztes Segment versorgen, Raum-Multiplex explizit nutzen.

Jedes zellbasierte Netz nutzt automatisch Raum-Multiplex. (Zellbasierte Netze werden in Kapitel 6 behandelt).

4.2 Frequenz-Multiplex

Jedes drahtlose Kommunikations-System hat ein ihm zugewiesenes Frequenzband. Frequenz-Multiplex unterteilt dieses gesamte Frequenzband in mehrere, sich nicht überlappende kleinere Frequenzbänder. Jedem Kanal wird ein solches Teil-Frequenzband zugewiesen. Damit es nicht zu Interferenzen zwischen zwei benachbarten Kanälen kommt, ist jeweils ein Schutzband zwischen zwei Teil-Frequenzbändern notwendig.

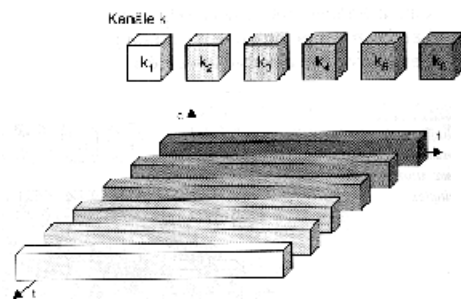


Ein System, das seit vielen Jahrzehnten Frequenz-Multiplex nutzt, ist der (analoge) Rundfunk. Die Koexistenz von mehreren Radio-Sendern ist dadurch möglich, dass die Sender unterschiedliche Frequenzbänder nutzen.

Diese Art des Multiplex ist deshalb sehr einfach, weil keinerlei komplexe Koordination zwischen Sendern und Empfängern nötig ist, sondern der Empfänger muss lediglich auf die Frequenz des Senders eingestellt sein.

In den meisten Fällen reicht Frequenz-Multiplex alleine nicht aus, weil nicht so viele Frequenzbänder zur Verfügung stehen wie Kanäle für ein System benötigt werden. Deshalb wird Frequenz-Multiplex häufig mit Zeit-Multiplex kombiniert. (So zum Beispiel bei GSM.)

4.3 Zeit-Multiplex



Beim Zeit-Multiplex dürfen alle Kanäle das gesamte Frequenzband abwechselnd nacheinander exklusiv nutzen. Die Zeitachse wird also in so viele sog. Time Slots unterteilt, wie Kanäle entstehen sollen. Zwischen zwei Time Slots ist eine kurze Pause nötig, damit es nicht zu Interferenzen zwischen den Kanälen kommt. Durch die Mehrwegeausbreitung müssen die Zwischenpausen besonders lang festgelegt werden.

Zeit-Multiplex erfordert eine sehr präzise Synchronisation der Sender und Empfänger. Das bedeutet, dass alle Endgeräte über höchst präzise Systemuhren verfügen müssen und ein gemeinsamer Takt verteilt werden muss.

Vorteilhaft ist das Zeit-Multiplex-Verfahren vor allem deshalb, weil die Länge der Time Slots an die Anforderungen (notwendige Durchsatzrate) der Kanäle angepasst werden kann.

Typischerweise werden Frequenz- und Zeit-Multiplex zusammen eingesetzt. Jeder Kanal nutzt also eine bestimmte Frequenz eine bestimmte regelmäßig wiederkehrende Zeitspanne exklusiv. Wenn der Kanal nicht immer dieselbe Frequenz nutzt, sondern sog. „frequency hopping“ durchführt, ist er weniger anfällig gegen Störungen, weil eine Störung auf einer bestimmten Frequenz dann nur jeweils einen Time Slot betrifft. Dieses frequency hopping bringt gleichzeitig einen primitiven Abhörschutz, weil die Frequenz-Folge nur den Endgeräten des Systems bekannt ist.

4.4 Code-Multiplex

Das Code-Multiplex-Verfahren ist das jüngste Multiplex-Verfahren und wird im Mobilfunk zum ersten Mal in UMTS eingesetzt. Es beruht auf mathematischen Überlegungen.

Bei Code-Multiplex wird jedes zu sendende Bit in einen Code mit mehreren Bit Länge umgewandelt. Alle Sender senden den codierten Datenstrom zur selben Zeit und auf derselben Frequenz, wodurch sich die Signale überlagern. Jeder Empfänger kann aus dem überlagerten Gesamtsignal mit Kenntnis des Codes den Nutzdatenstrom errechnen.

Um die Funktionsweise von Code-Multiplex intuitiv zu begreifen, wird in der Literatur häufig zum Vergleich eine Party beschrieben, auf der jeweils zwei Personen dieselbe Sprache sprechen. Während alle Personen gleichzeitig durcheinander reden, kann jeder Hörer die Sprache, die er versteht, von den

anderen Sprachen trennen und sein Gegenüber somit verstehen, während ihm die anderen Sprecher wie Hintergrundrauschen vorkommen.

Wie sind nun die Codes zu wählen, damit die überlagerten Signale beim Empfänger wieder entziffert werden können? Wir fassen im folgenden jeden Code als einen Vektor von Nullen und Einsen auf.

1. Die Codes müssen zueinander orthogonal sein. Das bedeutet, dass das Skalarprodukt von zwei (verschiedenen) Codes 0 ergeben muss. Aus der analytischen Geometrie ist bekannt, dass die Dimension der Vektoren (also hier die Länge des Codes) gleich der Anzahl möglicher orthogonaler Vektoren ist. Um also n verschiedene Kanäle mittels Code-Multiplex zu etablieren, müssen die Codes mindestens n Bit lang sein.

2. Die Codes müssen eine gute Autokorrelation aufweisen. Das bedeutet, dass das Produkt jedes Codes mit sich selbst möglichst groß sein muss.

Ein Bit ist in diesem mathematischen Modell die Zahl -1 oder $+1$. Das Codieren eines Bit durch den Sender entspricht einer Multiplikation des Bit mit dem Code-Vektor. Die physikalische Überlagerung der Codes bei der Übertragung entspricht der Addition dieser Daten-Code-Produkte. Der Empfänger multipliziert den empfangenen Vektor mit dem ihm bekannten Code. Da für jeden Code eine gute Autokorrelation gefordert war, ist das Ergebnis entweder deutlich größer als Null (dann wurde das Nutzdatenbit $+1$ empfangen) oder deutlich kleiner als Null (dann wurde das Nutzdatenbit -1 empfangen). Die Nutzdaten sind somit rekonstruiert.

Der besondere Vorteil dieses Verfahrens gegenüber Frequenz- und Zeit-Multiplex ist, dass die Anzahl der Kanäle keine harte Obergrenze hat, sondern es kann immer noch ein Teilnehmer in das System aufgenommen werden. Dann steigt zwar der Rauschpegel an, jeder Teilnehmer kann aber immer noch kommunizieren – wenn auch mit einer geringeren Übertragungsrate, weil die Fehlerkorrektur in einer höheren Schicht mehr Fehler korrigieren muss. (Bei FDM und TDM dagegen ist die Obergrenze durch die Anzahl der Frequenzbänder und Time Slots fest vorgegeben.)

Ein offensichtlicher Nachteil von CDM ist, dass der Digitalteil der Endgeräte sehr komplex ist. Außerdem macht der Fast-Fading-Effekt eine Anpassung der Sendeleistung mehrere tausendmal pro Sekunde nötig, damit kein Sender die anderen „übertönt“ und eine Decodierung der Signale der schwächeren Sender unmöglich macht.

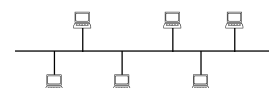
5. Zugriffsverfahren

Mit dem Multiplex-Verfahren (oder einer Kombination mehrerer Multiplex-Verfahren) haben wir nun unterschiedliche Kanäle etabliert.

Zugriffsverfahren umfassen nun alle Mechanismen, die nötig sind, um den Zugriff mehrerer Nutzer auf diese Kanäle zu regeln.

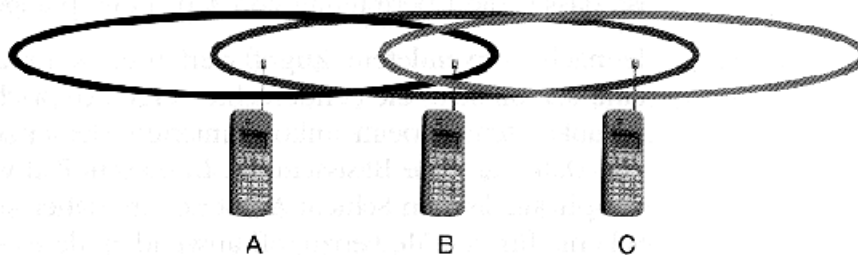
Das primitivste Zugriffsverfahren wäre, dass jeder Kanal statisch einem Sender-/Empfänger-Paar zugeordnet würde. Das ist vermutlich der Grund dafür, dass in der Literatur sehr häufig Multiplex- und Zugriffsverfahren verschwimmen und begrifflich nicht deutlich voneinander abgegrenzt werden.

Zunächst stellt sich die Frage, warum nicht einfach vielfach erprobte Zugriffsverfahren aus dem Bereich der leitungsgebundenen Netze verwendet werden. Diese Frage soll am Beispiel des CSMA/CD-Verfahrens (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection), das im Ethernet verwendet wird, geklärt werden.



Beim CSMA/CD-Verfahren hört ein potentieller Sender das Medium ab, um festzustellen, ob bereits ein anderer Sender mit dem Senden begonnen hat. Ist das Medium frei, beginnt er mit dem Senden und hört gleichzeitig weiterhin das Medium ab. Wenn das empfangene Signal vom gesendeten Signal abweicht, heißt das, dass ein anderer Sender gleichzeitig mit dem Senden begonnen hat. Stellt der Sender so eine Kollision fest, hört er mit dem Senden des Nutzsignals auf, sendet ein starkes Störsignal und versucht eine erneute Sendung nach einer zufällig gewählten Zufallszeit.

Warum versagt dieses Verfahren bei drahtloser Übertragung? Der Sender soll eine Kollision beim Empfänger feststellen, kann aber natürlich nur eine Kollision bei sich selbst feststellen. In einem leitungsgebundenen Netz macht das keinen Unterschied, denn das Signal ist auf der gesamten Kabellänge praktisch gleich. Bei drahtloser Übertragung nimmt die Signalstärke aber mit der Entfernung deutlich ab. Zwei problematische Szenarien können sich also ergeben:



Quelle: Jochen Schiller, Mobilkommunikation, 2000

a) versteckte Endgeräte

Wir nehmen an, es gebe drei Mobilstationen A, B und C. Der Sendebereich von A schließt B ein, aber nicht C, der Sendebereich von B schließt sowohl A als auch C ein, der Sendebereich von C schließt B, aber nicht A ein. A kann also nicht erkennen, wenn C sendet und umgekehrt.

A und C möchten gleichzeitig an B senden. A hört das Medium ab, erkennt, dass es frei ist, und beginnt mit dem Senden an B. C hört das Medium ab, erkennt fälschlicherweise, dass es frei ist (denn es kann nicht erkennen, dass A sendet), und beginnt ebenfalls mit dem Senden. Es kommt zu einer Kollision bei B.

b) ausgelieferte Endgeräte

Wir nehmen dieselbe Anordnung wie in a) an. Diesmal sendet B zu A und C zu einer Mobilstation D, die außerhalb der Reichweite von A und B liegt.

B hört das Medium ab, erkennt, dass es frei ist, und beginnt mit dem Senden an A. C hört das Medium ab, erkennt, dass es belegt ist, und wartet unnötigerweise mit dem Senden an D, obwohl dies die Übertragung von B nach A überhaupt nicht stören würde.

Das CSMA/CD-Verfahren ist also für drahtlose Netze unbrauchbar. Es gibt stattdessen eine kaum überschaubare Vielzahl von Medien-Zugriffs-Verfahren, die auf den Multiplex-Verfahren aufsetzen und die jeweils an die Bedürfnisse des Systems angepasst sind.

Allgemein sind dabei folgende Fragestellungen zu klären:

- Welcher Kanal wird wann welchem Endgerät zugeordnet? (Ein Mobiltelefon benötigt zum Beispiel nicht ständig einen Sprachkanal, sondern nur während eines Telefongesprächs.)

- Wie wird Duplex-Fähigkeit erreicht? (Für beide Übertragungsrichtungen zwischen zwei Endgeräten muss ein Kanal eingerichtet sein.)
- Sollen Upstream- und Downstream-Kanal dieselbe oder unterschiedliche Bandbreiten bieten? (Beim Zugriff auf das www fallen zum Beispiel als Upstream nur die http-Requests an, während die Nutzdaten über den Downstream kommen.)
- Werden Kanäle zum Broadcast eingerichtet? (Bei zellularen Systemen macht ein Broadcast-Kanal zur Steuerung und Synchronisation der Mobilstationen Sinn; bei einem Ad-hoc-Netz könnten über einen Broadcast-Kanal alle erreichbaren Endgeräte aufgefordert werden, sich zu erkennen zu geben.)
- Kanäle könnten je nach Anforderung unterschiedliche Bandbreiten und Fehlerkorrekturen zugewiesen bekommen. Ein Sprachkanal benötigt zum Beispiel eine konstante Bandbreite, und eine Fehlerkorrektur darf den Fluss nicht unterbrechen (und ist für Sprache nicht nötig), während ein Datenkanal auf eine zuverlässige Fehlerkorrektur angewiesen ist und Bandbreite immer schwankend belegt wird.

6. Zellen und Zellstrukturen

Wie in leitungsgebundenen Netzen haben wir nun Lösungen in der Hand, eine drahtlose Datenverbindung zwischen zwei Endgeräten herzustellen, die gleichzeitige Kommunikation mehrerer Sender-Empfänger-Paare durch Kanäle zu ermöglichen und den Mehrfachzugriff auf diese Kanäle zu regeln.

Drahtlose Netze lassen sich im Gegensatz zu leitungsgebundenen schwer räumlich eingrenzen. Festnetze verlaufen dort, wo Kabel sind. Für drahtlose Netze wird dafür im folgenden der Begriff der „Zelle“ eingeführt.

6.1 Zellsysteme

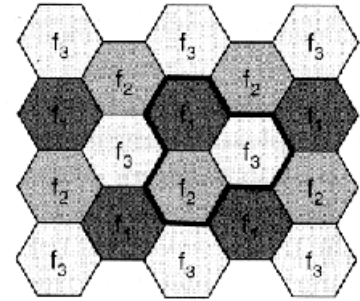
In der Literatur findet man für jedes System eine etwas andere Definition von Zelle. Allen gemeinsam ist: Eine Zelle ist ein (geographisches) Gebilde, in dem Endsysteme über mindestens einen gemeinsamen Kanal drahtlos kommunizieren können. Eine Zelle ist also eine „Funkzone“.

Je nach Größe der Zelle(n) benennt man die Art der Zelle wie folgt:

Pico-Zelle:	1 m – 100 m	(Büro, Heim)
Mikro-Zelle:	100 m – 2 km	(Innenstadt, Firmengelände)
Makro-Zelle:	2 – 40 km	(Städte)
Mega-Zelle:	40 – 200 km	(ländliche Gebiete)
Giga-Zelle:	200 – 2000 km	(Satellitenbereiche)

Dem physikalischen Modell nach hat eine Zelle die Form eines Kreises. (Wir erinnern uns: Das ausgesendete Signal breitet sich in der Theorie in alle Richtungen gleichmäßig aus und wird dabei quadratisch zum zurückgelegten Weg kleiner.)

In dem Modell, das für Mobilfunksysteme meistens verwendet wird, ist eine Zelle sechseckig. Zwei benachbarte Zellen dürfen keine gleichen Frequenzblöcke benutzen, weil sich die Zellen sonst gegenseitig stören würden. (Das Signal breitet sich in der Realität eben nicht wirklich sechseckig aus.) Mit der Sechseckform lassen sich nun die dem System zur Verfügung stehenden Frequenzen optimal ausnutzen: Unterteilt man das Frequenzband in nur drei unterschiedliche Frequenzblöcke, kann man die Frequenzblöcke den Zellen so zuordnen, dass keine zwei benachbarten Zellen denselben Frequenzblock nutzen.



In der Realität ist die Zellplanung noch viel komplexer. Wie Basisstationen anzuordnen sind, hängt von äußeren Rahmenbedingungen ab (Lizenz, Miete eines Standorts), von der Bebauung und von der Anzahl der Nutzer (eine Zelle kann nur eine begrenzte Anzahl Nutzer aufnehmen).

6.2 Ein- und Mehrbereichsnetze

Funknetze sind Netze, bei denen Kommunikationspartner über einen drahtlosen Kanal miteinander kommunizieren.

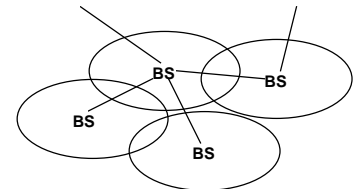
Im einfachsten Fall können alle Partner mit einer einzigen Zelle versorgt werden. In diesem Fall spricht man von einem Einbereichsnetz. Beispiele wären der Seefunk oder ein Bluetooth-ad-hoc-Netz.

Einbereichsnetze sind aber die Ausnahme. In der Regel bestehen Funknetze aus mehreren Zellen und werden in diesem Fall als Mehrbereichsnetz bezeichnet. Ziel ist natürlich, mit den Zellen einen möglichst großen (geographischen) Bereich zu versorgen.

Bei einem Mehrbereichsnetz ohne zusätzliche Zellinfrastruktur müssen sich die Zellen soweit überlappen, dass ein Pfad zwischen allen Partnern besteht (zum Beispiel mehrere sich überlappende ad-hoc-Netze, deren Endgeräte das Weiterleiten von Datenverkehr unterstützen).

In der Regel verfügen Mehrbereichsnetze aber über eine Zellinfrastruktur. Dann besitzt jede Zelle ein ausgezeichnetes Endsystem, eine sog. Basisstation. Die Basisstationen sind untereinander über eine (schnellere) Hintergrundinfrastruktur miteinander verbunden. Das kann zum Beispiel per Festnetz, Richtfunk oder Satellitenkommunikation sein. Die Idee ist also, nur die „letzte Meile“ zum Teilnehmer per Funk zu überbrücken.

Den Sinn, die Vor- und Nachteile von Mehrbereichsnetzen möchte ich im folgenden anhand des Mobilfunks diskutieren. Warum stellt ein deutscher Mobilfunk-Anbieter nicht einfach eine einzige Basisstation in Frankfurt für alle seine Kunden in Deutschland auf?



Wir haben gehört, dass die Frequenzbänder knapp sind. Mit Frequenz- und Zeit-Multiplex zusammen könnte man in einem realistischen Frequenzband einige zig oder einige hundert Kanäle etablieren. Das heißt, es könnten nur einige hundert Teilnehmer gleichzeitig telefonieren, was natürlich viel zu wenig ist. Durch die Aufteilung des Raumes in Zellen können Frequenzbänder mehrfach genutzt werden.

Wir haben weiterhin gehört, dass das Funksignal mit wachsender Entfernung zwischen Sender und Empfänger immer schwächer wird. Damit auch Mobiltelefone am Bodensee und in Flensburg diese eine Basisstation in der Mitte Deutschlands erreichen, wäre eine enorme Sendeleistung nötig, die mit

der üblichen Größe von Mobiltelefonen und mit üblichen Akkus niemals zu realisieren wäre. Außerdem wäre die Strahlenbelastung für die Menschen enorm.

Je größer der Abstand zwischen Sender und Empfänger ist, desto mehr Störungen können stattfinden. Bei kleineren Zellradien müssen nur „lokale“ Störungen kompensiert werden.

Durch die Zellstruktur ist ein Mobilfunknetz zudem robuster gegen Ausfälle. Wenn eine Basisstation versagt, ist nur eine Zelle betroffen. Meist kann das Endgerät sogar einfach eine Verbindung zu einer weiter entfernten Basisstation aufnehmen.

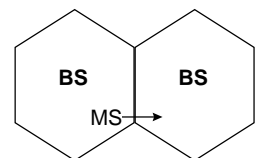
Diese Vorteile bringen aber auch eine Reihe von Herausforderungen mit sich, die es zu lösen gilt. Zum ersten muss ein Mechanismus realisiert werden, der die Übergabe einer Verbindung eines Endgerätes von einer Basisstation an eine andere regelt. Dieser Mechanismus heißt „Handover“ und wird im nächsten Abschnitt genauer betrachtet.

Weiterhin entstehen durch die komplexe Infrastruktur hohe Kosten. Die Basisstationen müssen miteinander verbunden und koordiniert werden. Außerdem müssen Aufenthaltsdaten der Benutzer in einer Datenbank verwaltet werden.

Eine weitere große Herausforderung ist die Frequenzplanung. Gefordert wird auf der einen Seite eine minimale Interferenz durch Benutzung gleicher Frequenzen, auf der anderen Seite müssen die knappen Frequenzbänder so optimal wie möglich ausgenutzt werden. Die in der Realität sehr schwer modellierbare Signalausbreitung (Zellen sind nicht wirklich sechseckig!) ist dabei ein schwieriges Problem.

6.3 Handover

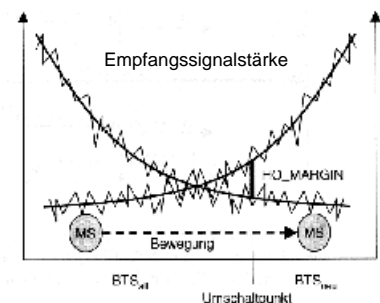
Unter Handover versteht man die Übergabe einer Verbindung eines Endgerätes mit einer Basisstation an eine benachbarte Basisstation.



Es gibt im Wesentlichen zwei Gründe, warum ein Handover sinnvoll und nötig ist: Zum einen, um eine akzeptable Qualität der Funkverbindung zu gewährleisten. Je weiter sich eine Mobilstation von der Basisstation entfernt, umso schwächer wird das Signal und umso schlechter wird die Qualität der Verbindung. Zum anderen kann ein Zellsystem den Handover zur Lastverteilung nutzen: Befinden sich zu viele Teilnehmer in derselben Zelle, werden diejenigen Teilnehmer, die am weitesten von der Basisstation entfernt sind, an andere Basisstationen übergeben.

Gefordert wird natürlich, dass die Verbindung zwischen Mobil- und Basisstation während eines Handover nicht abbricht, da damit auch die Verbindung auf höheren Protokollschichten abbrechen würde. Weiterhin soll die Übergabe sehr schnell geschehen. (Z.B. spezifiziert GSM als Maximaldauer 60 ms!)

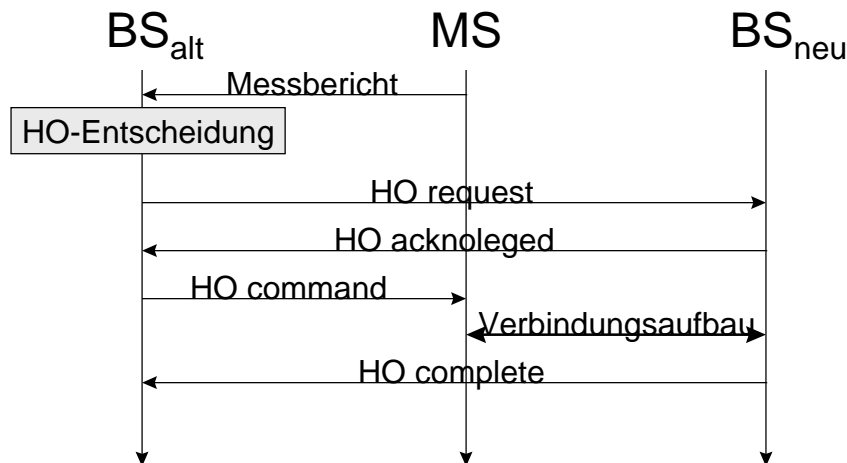
Um die Qualität der Verbindung zu erfassen, führen sowohl Mobil- als auch Basisstation ständig Messungen der empfangenen Signalstärke durch. Die Mobilstation misst auch die Signalstärke, die von benachbarten Basisstationen ausgeht. Sie gibt diese Messwerte regelmäßig an die aktuelle Basisstation weiter.



In der Regel trifft die Basisstation die Entscheidung, ob ein Handover durchgeführt wird oder nicht. Sie glättet dazu die gemessene Signalstärke. Wenn die Signalstärke zwischen Mobilstation und einer

benachbarten Basisstation die Signalstärke zur aktuellen Basisstation um einen gewissen Schwellwert überschreitet, wird der Handover veranlasst.

Dieser Schwellwert ist mit großer Vorsicht zu wählen: Ist er zu groß, verbleibt die Mobilstation zu lange in einer Zelle mit zu schlechter Verbindungsqualität. Im schlimmsten Fall reißt die Verbindung ab. Ist der Schwellwert zu niedrig, kann es passieren, dass eine Mobilstation ständig zwischen zwei oder mehreren Basisstationen hin- und her springt.



Der Vorgang des Handover funktioniert grob wie folgt: Die alte Basisstation fordert bei der neuen einen Handover an („HO requested“). Die neue Basisstation richtet einen Verbindungs-Kanal ein und gibt der alten Basisstation die Kanalinformation zurück („HO acknowledged“). Die alte Basisstation gibt daraufhin der Mobilstation den Befehl, mit der neuen Basisstation auf dem neuen Kanal Verbindung aufzunehmen („HO command“). Ist der Verbindungsaufbau erfolgreich, gibt die neue Basisstation der alten den Befehl „HO complete“, damit diese den alten Kanal freigeben kann. Der Handover ist vollständig.

7. Zusammenfassung

Mit dieser Arbeit wurden die Grundlagen der drahtlosen Kommunikation für die folgenden Seminarvorträge gelegt.

Das Verhalten elektromagnetischer Wellen als Träger für drahtlos übertragene Daten wurde genauer betrachtet und die spezifischen Eigenschaften der drahtlosen Übertragung gegenüber der leitungsgebundenen aufgezeigt. Durch unterschiedliche Modulationsverfahren werden digitale Daten in elektromagnetische Wellen umgewandelt. Verschiedene Multiplex-Verfahren erlauben die gleichzeitige Nutzung der Luftschnittstelle durch verschiedene Sender-Empfänger-Paare. Unterschiedliche Zugriffsverfahren regeln den Zugriff der Endgeräte auf die durch Multiplex geschaffenen Kanäle. Als oberste Schicht (unter den Diensten) stehen verschiedene Modelle zur Verfügung, ein mobiles Netz zu organisieren.

Jedes System muss sich also für ein Modulations-, Multiplex- und Zugriffsverfahren sowie eine Art der Organisation der Infrastruktur entscheiden und dabei die Anforderungen (Qualität, Anzahl der Nutzer, nötige Bandbreite, Sprach- oder Datenübertragung, Kosten für System und Endgeräte, usw.) und sonstigen Rahmenbedingungen (lizenzierte Frequenzbänder, etc.) berücksichtigen. Welche Verfahren die einzelnen Systeme (GSM, UMTS, BlueTooth, DECT, WLAN, usw.) nutzen, werden wir in den kommenden Vorträgen erfahren.