

13 Wireless LAN

Welches Kabel hätten's denn gern? Nun, äh ... Wir wissen nicht, was der nette Strippenzieher empfiehlt. Aber gibt es nicht vielleicht eine bessere Lösung fürs LAN als die Auswahl zwischen Coax, Cat3, Cat5, Cat6, Cat0815? Ohne Mauerdurchbrüche und Kabelsalat? Möglicherweise sind ja Funk-LANs die bessere Alternative ...

Drahtlose Netze sind in – anfangs ein Nischenprodukt für spezielle Bedürfnisse von Firmen, erobern sie langsam sogar den Privatbereich. Es sieht so aus, als wären die Wireless LANs einer der großen Trends der nächsten Jahre. Die Technik der drahtlosen Netze ist aber beileibe nicht neu, einzelne Hersteller sind schon mehrere Jahre auf dem Markt, und Richtfunkstrecken zur Datenübertragung gibt es von Telekommunikations-Anbietern auch schon länger. Zudem wundert sich schließlich schon lange niemanden mehr, dass man zum Telefonieren kein Kabel braucht. Schnurlose Telefone für zu Hause, das Handy für unterwegs – die Preise sind inzwischen weitgehend erschwinglich, die Technik ist ausgereift.

Das Telefonsystem ist aber im Prinzip auch nichts anderes als ein speziell auf die Sprachübertragung ausgerichtetes Netzwerk. Warum also nicht auch die Datenübertragung drahtlos realisieren, Rechner über Funk an ein vorhandenes kabelbasiertes Netz anbinden oder gar gleich das gesamte LAN ohne Verkabelung einrichten?

Wie immer man das Kind auch taufen mag, ob drahtloses Netz, Funk-LAN, Wireless LAN, WLAN, mit unüberwindbaren technischen Hürden wird schon lange niemand mehr konfrontiert. Wer eine normale Netzwerkkarte zum Laufen bekommt, schafft das auch mit einer drahtlosen Anbindung – und gewinnt dabei ein Höchstmaß an Flexibilität. Es klingt wie ein Wunschtraum: Alle Vorteile eines LAN, etwa gemeinsame Nutzung teurer Ressourcen wie Drucker oder Festplatten oder einheitlicher Zugang zum Internet, ohne sich mit den Unwägbarkeiten von Kabeln, Hubs, Switches und Ähnlichem herumschlagen zu müssen. Drahtlose Netze versprechen, dies Realität werden zu lassen.

13.1 WLANs und andere Funktechniken

Immer wieder tauchen aber Missverständnisse auf, die Anwender ganz schön verwirren können. So wird ein WLAN gegen ein Mobilfunknetz gestellt – gerade die Diskussion um die teuren Lizenzen für den Mobilfunk der 3. Generation (UMTS, Universal Mobile Telecommunication System) hat

UMTS

einiges dazu beigetragen. So stellte sich selbst in der öffentlichen Diskussion schnell heraus, dass die versprochene Übertragungsrate von 2 MBit/s bei den Datendiensten über UMTS natürlich nur bei idealen Bedingungen und stationärem Betrieb des Endgeräts erreichbar ist. Und in diesem Fall stellt sich tatsächlich die Frage, warum man nicht lieber einige Masten mit WLAN-Technik zumindest in Ballungsgebieten aufstellt, um richtige Datenübertragung per Funk-LAN zu ermöglichen. Ganz von der Hand zu weisen ist dies nicht: Es wird auch auf einigen Universitätsgeländen praktiziert. UMTS soll aber eben ein universelles Kommunikationssystem darstellen – sowohl Sprache als auch Daten und Bilder übertragen. WLANs wurden jedoch alleine für die Datenübertragung konzipiert. Wollte man etwa mit ihnen telefonieren, wäre ein zusätzlicher Protokollstack für Voice-over-IP nach dem Standard H.323 notwendig. Im Idealfall könnten sich WLAN- und UMTS-Dienste natürlich ergänzen. Ob dies aber – zumindest in Ballungszentren – gemacht wird, ist auch eine politische Frage: Schließlich wollen die Telekommunikationskonzerne, dass ihre Ausgaben für die UMTS-Lizenzen irgendwann die Kassen wieder klingeln lassen. Aber in speziellen Umfeldern, etwa in Flughäfen, Kongresszentren oder Ähnlichem, sind einige Firmen, nachdem dies in den USA schon weite Verbreitung gefunden hat, auch in Europa dabei, so genannte Hotspots zu installieren: Bereiche, in denen man sich mit Notebook und WLAN-Karte gewappnet über ein Funk-LAN ins Internet und möglicherweise auch ins heimische Firmennetz begeben kann.

Bluetooth

Obwohl Bluetooth und WLANs immer wieder miteinander verglichen werden, hat Bluetooth zumindest in seiner ersten Variante ganz andere Ziele als die WLAN-Standards. Es handelt sich um eine Kurzstreckenfunktechnik im Bereich bis 10 Meter, die mit ihrer Datenrate von 1 MBit/s vor allem zur drahtlosen Anbindung von Peripherie an mobile Geräte oder zur einfachen Synchronisation zwischen mobilem Terminal und stationärem Rechner dienen soll. Die Bluetooth-Variante für bis zu 100 Meter Reichweite ist bislang als konkretes Produkt noch nicht in Sicht.

Grundsätzlich handelt es sich bei Bluetooth allerdings auch um eine Art Spezialfall eines WLAN, das von den Standardisierungsgremien für genau umgrenzte Einsatzzwecke mit besonderen Funktionen ausgestattet wurde. Damit Bluetooth so verschiedene Aufgaben wie Druckeransteuerung, Sprachübertragung oder die E-Mail-Kommunikation erledigen kann, müssen Bluetooth-Geräte eine umfangreiche Spezifikation erfüllen. Diese besteht aus vielen aufeinander gestapelten Protokollen, die von der Anwendungsschnittstelle bis hinab zum Funkteil (Radio) reichen.

Bluetooth funkt im lizenzfreien 2,4-GHz-Band (ISM, Industrial/Scientific/Medical) und wechselt 1600 Mal pro Sekunde nach einem komplexen Muster die Frequenz (Frequency Hopping Spread Spectrum, FHSS). Dies soll eine gewisse Robustheit gegenüber Störungen bieten und auch das Ab-

hören erschweren. Fast in ganz Europa und den USA nutzt Bluetooth dazu 79 Kanäle im 1-MHz-Abstand, in Japan, Spanien und Frankreich indes nur mit (leichten) Auflagen bezüglich der Sendeleistung. Da neben Bluetooth noch andere Anwendungen im ISM-Band laufen, etwa die Funk-Netze (WLAN) oder Mikrowellengeräte, darf man davon ausgehen, dass der Datenverkehr nicht immer störungsfrei läuft.

Es gibt Untersuchungen zur gegenseitigen Verträglichkeit, die andeuten, dass der WLAN-Durchsatz bei Anwesenheit von Bluetooth im schlimmsten Fall – wenn etwa beim E-Mail-Abruf Dateien übertragen werden – vorübergehend bis auf die Hälfte einbrechen kann. Häufiger dürfte der Bremseffekt bei rund 17 Prozent liegen, etwa bei parallel laufender Bluetooth-Telefonie. Auf einen Arbeitstag hochgerechnet sei die Beeinträchtigung des WLAN jedoch vernachlässigbar. Umgekehrt sollen Bluetooth-Sprachverbindungen störungsfrei bleiben, solange der Abstand zwischen den Bluetooth-Geräten höchstens 2 m beträgt; dank des Frequency Hopping blieben Geschwindigkeitseinbußen stets unter 22 Prozent.

Im Folgenden werden wir uns allerdings weder mit UMTS noch mit Bluetooth näher beschäftigen, sondern uns ganz auf die eigentlichen drahtlosen Netzwerke für die Datenkommunikation konzentrieren. Dabei legen wir den Schwerpunkt auf die offiziellen WLAN-Standards der IEEE, die im Bereich der 802.11-Spezifikationen angesiedelt sind. Es gibt noch diverse alternative Standards – meist allerdings proprietär oder von keiner größeren Bedeutung. So hat die Firma Proxim den von ihr selbst entwickelten WLAN-Standard als OpenAir auch anderen Firmen zugänglich gemacht – aber selbst Proxim geht nach und nach auf die IEEE-Spezifikationen über. Konkurrierende WLAN-Gremien wie HomeRF, die eine Art abgespecktes 802.11-Netz für die möglichst kostengünstige Heimvernetzung propagierten, scheinen sich ebenfalls nicht durchsetzen zu können: Der Chip-Gigant Intel engagierte sich beispielsweise lange Zeit bei HomeRF, rückt davon aber nach und nach auch wieder ab – zugunsten von 802.11.

13.1.1 Der Einstieg in ein drahtloses Netz

Ein Missverständnis gilt es noch ganz zu Anfang aus der Welt zu schaffen: WLANs nach IEEE 802.11, 802.11b oder 802.11a sind kein Ethernet. Ein Funk-LAN ist nicht einfach ein Ethernet, bei dem man das Kabel weggelassen hat. Sie stellen einen eigenen Standard dar. Da sie aber inzwischen in der Regel gemeinsam mit Ethernet und als Erweiterung von Ethernet-Netzwerken genutzt werden, auf der anderen Seite bei normalen Netzwerktechniken eine große Bedeutung erlangt haben, um das LAN flexibler gestalten zu können, behandeln wir sie hier mit. Denn oft sind gerade die Kabel bei einem LAN das größte Problem – nicht nur, weil nicht immer die von der Spezifikation verlangten Qualitätsmerkmale eingehalten werden, sondern weil das Verlegen der Kabel Schwierigkeiten macht. Mögen etwa im Eigenheim

WLANs

Mauerdurchbrüche und größere Kabelinstallationen noch machbar sein, stößt das in normalen Mietshäusern des Öfteren auf Schwierigkeiten. Aber auch das Einfamilienhaus bereitet Probleme, wenn man entsprechende Schächte nicht schon beim Bau vorgesehen hat. Und wer nicht gleich an allen nur vorstellbaren Stellen Netzwerkdosen für Twisted-Pair-Anschlüsse oder T-Stücke im Coax-Kabel vorgesehen hat, kann bei einer neuen Inneneinrichtung unter Umständen gleich wieder von vorne anfangen. Für Firmen gilt Vergleichbares: Wer nicht von vornherein genügend Kabel in der Wand oder im Schacht versenkt hat, kann bei einer Erweiterung möglicherweise Probleme bekommen. Zudem lassen sich mit vorhandenen Netzdosen oft gar nicht alle temporär ins Netz aufzunehmenden Rechner bedienen. Ein Wireless LAN löst all diese Probleme: Da die entsprechenden Frequenzen Mauern und Fenster durchdringen und im Haus Entfernungen von etwa 30 Metern zwischen zwei Sendern möglich sind, ist eine nahezu beliebige Positionierung der Geräte machbar.

Bei diesen Entfernungen ist selbst die Vernetzung mit dem Nachbarn kein Problem – ein Loch in der Mauer zur Nebenwohnung dürfte der Vermieter dagegen gar nicht so gern sehen. Mit der Einführung von WLAN-Produkten im 2,4- und 5-GHz-Band stellt sogar die Vernetzung mit dem angrenzenden Grundstück oder über eine öffentliche Straße hinweg kein Hindernis mehr dar: Solche Installationen sind nicht mehr genehmigungspflichtig, bei Überquerung öffentlichen Geländes reicht eine einfache Anmeldung, die keine Kosten verursacht. Die Flexibilität macht Wireless LANs natürlich auch für Unternehmen interessant, die beispielsweise Außendienstmitarbeitern einen einfachen Zugang zum LAN bieten wollen, wenn sie einmal in der Firma sind. Selbst beim Überwinden von Längenbeschränkungen bei Ethernet können Funknetze behilflich sein – schließlich dürfen bei Ethernet auf Twisted-Pair-Kabel normalerweise nur 100 Meter zwischen Hub und Arbeitsstation liegen. Da wird es bei der Verbindung zweier Gebäude schnell eng.

Heute verfügbare WLAN-Lösungen können dagegen mit Richtantennen mehrere Kilometer überbrücken. Zwar benötigen die Antennenstationen dafür eine Sichtverbindung, aber in der Regel ist das machbar. Dafür fallen die Kosten für etwaige aufwändige Weitverkehrsverkabelung oder gemietete Standleitungen weg.

13.1.2 WLANs und die Rechtsgrundlage

ISM-Bänder

Die Nutzung von Frequenzen beziehungsweise Frequenzbändern ist international durch verschiedene Stellen geregelt. Bei drahtloser Netzwerkkommunikation werden so genannte ISM-Bänder (Industrial, Scientific, Medical) genutzt. Deren Frequenzumfang ist international festgelegt, jedoch stehen sie nicht überall im gleichen Umfang und dazu noch genehmigungs- und gebührenfrei zur Verfügung. Darüber hinaus bestehen auch Unter-

schiede im Umfang der ISM-Bänder: Von Nation zu Nation variieren die nutzbaren Unterbänder. Folgende Institutionen oder Regulierungsbehörden sind für Freigabe und Aufteilung der Frequenzbänder an den jeweiligen Standorten zuständig (siehe folgende Tabelle).

Standort	Institution	Norm
Europa	European Telecommunications Standards Institute (ETSI)	EN ETSI 300-328
Frankreich	European Telecommunications Standards Institute (ETSI)	SP/DGPT/ATAS/23, EN ETSI 300-328
Spanien	European Telecommunications Standards Institute (ETSI)	EN ETSI 300-328
USA	Federal Communication Commission (FCC)	CFR47, Part 15, Sections 15.205, 15.209, 15.247
Japan	Association of Radio Industries and Businesses (ARIB)	RCR STD-33A

Tab. 13-1

Institutionen, die standortabhängig für die Freigabe der Frequenzbänder zuständig sind

Der Einsatz von funkbasierten WLANs erfolgt in der Regel im 2,4-GHz-ISM-Band, das von IEEE 802.11 festgelegt ist. Für die Bundesrepublik ist der Betrieb genehmigungs- und gebührenfrei. Mit der Verfügung 122 im Amtsblatt 14/1997 des Bundesministeriums für Post und Telekommunikation (BMPT) wird der Betrieb von drahtlosen Datenfunkanlagen ab dem 21. 5. 1997 neu geregelt. WLANs gelten als nicht öffentliche Anwendungen, die eingesetzten Systeme müssen lediglich dem 1994 durch das europäische Standardisierungsinstitut für Telekommunikationsangelegenheiten ETSI (European Telecommunications Standards Institute) verabschiedeten Standard ETS 300-328 entsprechen.

BMPT

Dieser Standard regelt die technischen Voraussetzungen und Zulassungskriterien für Datenfunksysteme im entsprechenden Frequenzband. Im Wesentlichen betrifft dies die Aufteilung des vorhandenen Frequenzbandes in einzelne Kanäle und die maximal zulässige Sendeleistung, die auf 100mW (-10dBW) begrenzt ist. Um eine Zulassung zu erhalten, muss ein Hersteller die Einhaltung der in ETS 300-328 vorgeschriebenen Kriterien durch ein Zeugnis eines unabhängigen und zugelassenen Testlabors oder des Bundesamtes für Post und Telekommunikation (BAPT) nachweisen. In Deutschland ist die Zulassungsvorschrift BAPT 222 ZV 126 dafür zuständig. Nach erfolgreicher Abnahme erteilt das BAPT eine allgemeine Zulassung. Damit dürfen die entsprechenden Geräte ohne weitere Zulassung und auch ohne weitere Gebühren betrieben werden.

BAPT

Die Verfügung 122 ersetzt die bisher gültige Allgemeingenehmigung für Funkanlagen bei der Breitbanddatenübertragung im Frequenzbereich 2,400 bis 2,4835 GHz innerhalb der Grenzen eines Grundstücks durch eine allgemein gültige Zuteilung. Sie regelt sowohl die Anwendung solcher Datenfunkanlagen im grundstücksübergreifenden Bereich als auch für den Betrieb

innerhalb eines Grundstücks. Bis dahin war es nicht erlaubt, Daten über die Grenzen privater Grundstücke hinweg zu übertragen. Mit dem Erlass dieser Verfügung ist es nun jedermann gestattet, solche grundstücksübergreifenden Übertragungen zu installieren und zu nutzen. Die Installation der Anlagen geschieht durch den Betreiber selbst, eine Abnahme durch das BAPT oder andere Stellen ist nicht vorgeschrieben.

Bei der Planung einer solchen grundstücksübergreifenden Übertragung ist allerdings zu beachten, dass zuvor eine Mitteilung an das BAPT zu richten ist. Damit wird die neu installierte Funkstrecke für die BRD zentral registriert; Kosten entstehen dem Nutzer bei Nutzung des Frequenzbandes von 2,4 bis 2,4835 GHz nicht.

Vereinfacht heißt das: Die Geräte müssen lediglich der Norm ETS 300-328 entsprechen und dementsprechend durch den Hersteller beziehungsweise die zuständigen Stellen (etwa das BAPT) geprüft sein. Dem BAPT in Mainz muss der Betrieb schriftlich mitgeteilt werden (Referat 122, Fax: 0 61 31/18-56 16, Tel.: 0 61 31/18-12 29).

13.2 Physikalische Grundlagen

Physikalische Grundlagen

Ein LAN ist ein LAN ist ein LAN ist ein LAN – daran ändert sich auch nichts, wenn es ohne Kabel betrieben wird. Ein drahtloses Netz hat weder etwas mit Handys noch mit Anbindung von Peripherie über Bluetooth zu tun, auch wenn bei Letzterem die Grenzen verwischen. Wireless LANs (WLAN) sind Teil der ganz normalen lokalen Datennetze. Betrachtet man jedoch die Eigenschaften des bei WLAN genutzten Übertragungsmediums, so muss man feststellen, dass das Funkmedium allgemein höheren Störeinflüssen als das drahtgebundene Medium unterliegt. Demnach stellt sich die Frage, wie eine fehlerfreie Datenübertragung realisiert werden kann und wie die Nutzdaten am sinnvollsten auf die elektromagnetischen Wellen moduliert (aufgebracht) werden. Des Weiteren muss man die Tatsache berücksichtigen, dass das Funkmedium innerhalb eines Empfangsbereichs ein Shared Media darstellt, woraus sich ein Multiple-Access-Problem ergibt. Der Unterschied zu dem drahtgebundenen Shared Media liegt jedoch darin, dass viele potenzielle Anwender auf das Funkmedium zugreifen können.

Störungen

Bei einem drahtgebundenen Übertragungsmedium können Störungen bereits wirkungsvoll verhindert werden, indem man Störern den Zugang zum Netzkabel verweigert. Da das genutzte Frequenzband des WLAN lizenzfrei ist, ist die Wahrscheinlichkeit relativ hoch, dass Störungen allein durch andere technische Einrichtungen entstehen, die dasselbe Frequenzband nutzen. Ein klassisches Beispiel dafür ist die Mikrowelle, die mit relativ hoher Leistung ebenfalls mit 2,4 GHz arbeitet. Demnach müssen für die technische Umsetzung von WLANs Lösungen angewendet werden, die eine

fehlerfreie Datenübertragung dennoch gewährleisten. Die Lösung dieses Problems liegt in der Spread-Spektrum-Technologie. Ursprünglich hatte das Militär die Spread-Spektrum-Technologie mit dem Ziel entwickelt, eine stör-unempfindliche und verschlüsselte Datenübertragung zu realisieren. Mittlerweile wird sie aber in großem Ausmaß in der zivilen Nachrichtentechnik eingesetzt. Über die Spread-Spektrum-Technologie wird das schmalbandige Nutzsignal gespreizt, wodurch man die Informationseinheiten über einen größeren Frequenzbereich überträgt, als für die eigentliche Informationsübertragung nötig wäre. Hierdurch wird das übertragene Signal unempfindlicher gegen Störer, da diese über einen größeren Frequenzbereich auftreten müssten, um die Information zu vernichten. Störer sind allgemein schmalbandig, demnach können sie nur einen Teil der gespreizten Nutzinformation nachhaltig beeinflussen.

Bei drahtgebundenen Netzwerken können nur die Komponenten auf das Medium zugreifen, die an das Netzwerk angeschlossen sind. Die Anzahl der potenziellen Benutzer ist jedoch beim Funkmedium theoretisch unbegrenzt, eine Einschränkung kaum möglich, wodurch sich das Multiple-Access-Problem zwangsläufig erhöht. In der Nachrichtentechnik kennt man drei grundsätzliche Verfahren, um dem Multiple-Access-Problem entgegenzuwirken:

Multiple-Access-Problem

- ❑ Time Division Multiple Access, kurz TDMA. Über ein Zeitmultiplexverfahren wird jedem Benutzer für eine bestimmte Dauer das Übertragungsmedium zur Datenübertragung zugeteilt. Die Dauer richtet sich nach einer festgelegten Zeitscheibe.
- ❑ Frequency Division Multiple Access, kurz FDMA. Mit der Hilfe des Frequenzmultiplexverfahrens wird die Bandbreite des zur Verfügung stehenden Frequenzbandes in disjunkte Kanäle unterteilt. Jedem Benutzer steht dauerhaft ein eigener Kanal für die Datenübertragung zur Verfügung.
- ❑ Code Division Multiple Access, kurz CDMA. Bei diesem Verfahren werden die Daten beim Senden über einen Code verschlüsselt. Nur die Empfänger mit demselben Code können die empfangenen Daten wieder entschlüsseln.

Bei den WLANs werden, je nach Typ, ein oder kombiniert mehrere Verfahren angewendet, um das Multiple-Access-Problem zu vermeiden. Auf der physikalischen Ebene wird entweder die Frequency-Hopping-Spread-Spektrum-Technologie (FHSS) oder die Direct-Sequence-Spread-Spektrum-Technologie (DSSS) angewendet.

Bei der FHSS-Technologie wird das vorhandene Frequenzband über das FDMA in verschiedene Kanäle unterteilt. Ein FHSS-Sender nutzt über das TDMA für eine bestimmte Zeit einen der zur Verfügung stehenden Kanäle. Welche Kanäle verwendet werden, hängt von der so genannten Hopping-

FHSS-Technologie

Sequenz ab. FDMA und TDMA fließen hierbei ineinander und werden direkt in einer kombinierten Form genutzt. Die Abgrenzung verschiedener Systeme innerhalb eines Empfangsbereichs erfolgt über das CDMA-Verfahren, wobei der Code unterschiedlichen Hopping-Sequenzen entspricht.

DSSS-Technologie

Bei der DSSS-Technologie werden das FDMA- und das CDMA-Verfahren angewendet. Über das FDMA wird das vorhandene Frequenzband in verschiedene Kanäle unterteilt, wodurch bis zu drei unabhängige Systeme innerhalb eines Empfangsbereichs betrieben werden können. CDMA sorgt für die Abgrenzung verschiedener Systeme innerhalb eines Empfangsbereichs. DSSS-Sender und -Empfänger verwenden denselben Code, um ihre Daten zu verschlüsseln beziehungsweise zu entschlüsseln. Ausschließlich die Systeme, welche über denselben Code verfügen, können untereinander Daten austauschen.

⇒ Generell ist zu beachten, dass sich FHSS- und DSSS-Systeme untereinander nicht vertragen, d. h., befinden sich die unterschiedlichen Systeme innerhalb einer Reichweite, so muss mit dem Auftreten von Störungen gerechnet werden.

13.2.1 Die 802.11-Standards

IEEE 802.11 Entsprechend ihrem Status als normale LANs sind die drahtlosen Netze auch spezifiziert: Funk-LANs entsprechen in der Regel dem Standard IEEE 802.11. IEEE 802.11 wurde 1997 verabschiedet und legt eine Datenübertragung mit 1 oder 2 MBit/s im 2,4-GHz-Band fest. Wie jeder andere IEEE-802.x-Standard beschreibt auch der 802.11-Standard den Media Access Control Layer (MAC) und den Physical Layer im OSI-Schichtenmodell. Unter IEEE 802.11 ist ein einziger MAC definiert, der jeweils mit einem der drei spezifizierten unterschiedlichen Physical Layers zusammenarbeiten kann. Die drei Physical Layers arbeiten entweder nach dem Verfahren des Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS) oder dem des Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS) im 2,4-GHz-Band oder mit einem Infrared Physical Layer. Letzterem wird heute keine große Aufmerksamkeit gewidmet, da es keine WLAN-Produkte auf dem Markt gibt, die mit Infrarottechnologie arbeiten.

IEEE 802.11b Eine Weiterentwicklung auf der PHY-Ebene stellt der Standard IEEE 802.11b, auch 802.11/HR genannt, dar, der 1999 verabschiedet wurde und im 2,4-GHz-Frequenzband eine Datenrate von 5,5 und 11 MBit/s definiert, wobei IEEE auf Entwicklungen von Harris und Lucent aufbaute. Im IEEE 802.11b ist ein entsprechender PHY definiert, der nach dem DSSS-Verfahren arbeitet. Eine weitere Arbeitsgruppe verabschiedete im Jahr 1999 den IEEE 802.11a, der ein WLAN mit einer Datenrate von 6, 9, 12, 18, 24, 36 und 54 MBit/s im 5-GHz-Band spezifiziert.

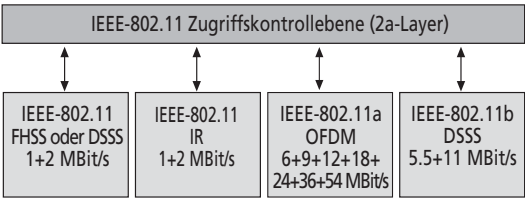


Abb. 13-1
Die Implementierung des IEEE-802.11-Standards

Sind die Lösungen laut IEEE 802.11 und IEEE 802.11b heute in Europa weit verbreitet, so lassen die Produkte laut IEEE 802.11a bei uns noch auf sich warten. Dies liegt unter anderem an der Tatsache, dass zum Zeitpunkt der Drucklegung dieses Buchs das 5-GHz-Band für den lizenzfreien Betrieb noch nicht freigegeben war. Voraussichtlich wird die Freigabe durch das ETSI Anfang bis Mitte 2002 erteilt, wobei noch abzuwarten bleibt, welche Anforderungen sich bezüglich Kanalaufteilung oder maximal zulässiger Sendeleistung für die Produkte ergeben. Zudem arbeitet derzeit die IEEE-802.11h-Gruppe an einer verbesserten Handhabung des laut IEEE 802.11a definierten 5-GHz-Frequenzspektrums und der Reduzierung der verwendeten Übertragungsleistung, damit die europäischen Richtlinien erfüllt werden können. Es bleibt abzuwarten, bis wann die Arbeiten der IEEE-802.11h-Gruppe abgeschlossen sind.

IEEE 802.11a

13.3 Der 802.11 Physical Layer

Der Physical Layer ist in IEEE 802.11 in zwei Teile unterteilt. Die obere Schicht, der Physical Layer Convergence Procedure (PLCP), stellt eine einheitliche Schnittstelle zum MAC-Layer für alle darunter liegenden medienabhängigen Schichten (Physical Medium Dependent, kurz PMD für FHSS, DSSS und Infrarot) zur Verfügung. Der PLCP definiert die Methoden, um die vom MAC-Layer übergebenen Daten (MAC Protocol Data Units, MPDU) in ein übertragbares Format zu bringen und die Managementinformationen zwischen MAC-Layer und PMDs auszutauschen. Das Management der PMD erfolgt dabei über die PMD-SAP (Service Access Points).

Physical Layer

Die PMDs bringen die Daten wiederum in ein von der Übertragungstechnik abhängiges Format, damit diese über das drahtlose Medium übertragen werden können. Weiterhin stellen die PMDs das Interface zum Übertragungsmedium in Form einer Sende- und Empfangshardware bereit, über das der Datenaustausch zu einem oder mehreren Verbindungspartnern ermöglicht wird. Die Hardware ist unter anderem für die Modulation der auszusendenden Daten und Demodulation der empfangenen Daten zuständig. Allen drei PMDs ist eine spezifizierte Übertragungsrate von 1 MBit/s und 2 MBit/s gemeinsam, zusätzlich ermöglicht IEEE 802.11b eine Übertra-

PMD

gungsrate von 5,5 und 11 MBit/s. Um eine Abwärtskompatibilität zu gewährleisten, müssen alle PMDs die niedrigen Übertragungsraten unterstützen.

13.3.1 Frequency-Hopping-Spread-Spektrum-Technologie

FHSS-Technologie

Bei der FHSS-Technologie laut IEEE 802.11 und Festlegung der ETSI wird die vorhandene Bandbreite (2,4000-2,4835 GHz) in 79 Frequenzunterbänder mit je 1 MHz aufgeteilt. Jedes der 79 Frequenzbänder stellt einen Kanal (2-80) bereit, die im Wechsel von den Systemen verwendet werden. Kanal 2 liegt auf der Center-Frequenz von 2,402 GHz und Kanal 80 auf der Center-Frequenz von 2,480 GHz. Über eine so genannte Hopping-Sequenz springen Sender und Empfänger während der Übertragung gleichzeitig zwischen den Kanälen. Die Zeitspanne, die die Systeme auf einem Kanal verbleiben, und der Abstand zwischen zwei nacheinander verwendeten Kanälen wird über die lokale Regulierungsbehörde festgelegt. In Europa (ausgenommen Frankreich und Spanien) darf laut ETSI ein Kanal maximal 400 ms belegt werden, und der Abstand zwischen den zwei nacheinander verwendeten Kanälen muss mindestens 6 MHz betragen. Dies entspricht 2,5 Kanalwechseln pro Sekunde. Die Belegung der 79 Kanäle wird über eine 79-stellige Hopping-Sequenz festgelegt, die ein Hüpfmuster darstellt und die Reihenfolge der Kanalbelegung festlegt. Systeme, die untereinander Daten austauschen, verwenden dieselbe Hopping-Sequenz. Es ist jedoch möglich, dass zufällig zwei Sender zur gleichen Zeit den gleichen Kanal belegen und eine Kollision auftritt. Aufgrund unterschiedlicher Hopping-Sequenzen tritt dies jedoch selten ein. Die dabei auftretenden Fehler werden durch ein wiederholtes Aussenden der Daten korrigiert. Damit ein möglichst kollisionsfreier Betrieb gewährleistet werden kann, sind die Hopping-Sequenzen in drei verschiedene Hopping-Sets aufgeteilt. Folgende Hopping-Sets sind laut IEEE 802.11 definiert:

Hopping-Sets

- ❑ 1. Set: $x = \{0, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27, 30, 33, 36, 39, 42, 45, 48, 51, 54, 57, 60, 63, 66, 69, 72, 75\}$
- ❑ 2. Set: $x = \{1, 4, 7, 10, 13, 16, 19, 22, 25, 28, 31, 34, 37, 40, 43, 46, 49, 52, 55, 58, 61, 64, 67, 70, 73, 76\}$
- ❑ 3. Set: $x = \{2, 5, 8, 11, 14, 17, 20, 23, 26, 29, 32, 35, 38, 41, 44, 47, 50, 53, 56, 59, 62, 65, 68, 71, 74, 77\}$

Der genutzte Kanal einer Hopping-Sequenz lässt sich nach der Formel $f_x(i) = [b(i) + x] \bmod (79) + 2$ berechnen, wobei $f_x(i)$ die Kanalnummer, x das verwendete Hopping-Muster eines Hopping-Sets darstellt und $b(i)$ aus der folgenden Tabelle entnommen wird.

<i>i</i>	<i>b(i)</i>	<i>i</i>	<i>b(i)</i>	<i>i</i>	<i>b(i)</i>	<i>i</i>	<i>b(i)</i>	<i>i</i>	<i>b(i)</i>	<i>i</i>	<i>b(i)</i>
1	0	15	52	29	37	43	41	57	65	71	55
2	23	16	63	30	10	44	74	58	50	72	35
3	62	17	26	31	34	45	32	59	56	73	53
4	8	18	77	32	66	46	70	60	42	74	24
5	43	19	31	33	7	47	9	61	48	75	44
6	16	20	2	34	68	48	58	62	15	76	51
7	71	21	18	35	75	49	78	63	5	77	38
8	47	22	11	36	4	50	45	64	17	78	30
9	19	23	36	37	60	51	20	65	6	78	30
10	61	24	71	38	27	52	73	66	67	79	46
11	76	25	54	39	12	53	64	67	49	-	-
12	29	26	69	40	25	54	39	68	40	-	-
13	59	27	21	41	14	55	13	69	1	-	-
14	22	28	3	42	57	56	33	70	28	-	-

Tab. 13-2
Basis-Hopping-Sequenz,
aus der sich die Hopping-
Sequenz der ver-
schiedenen Hopping-Sets
errechnen lässt

Berechnet man zum Beispiel nach der Formel $f_x(i) = [b(i) + x] \bmod (79) + 2$ aus dem Hopping-Muster 0 des ersten Hopping-Sets den 75., 76. und 77. Kanal, so erhält man folgende Kanalbelegung:

- $f_0(75) = [44 + 0] \bmod (79) + 2 = 46$
- $f_0(76) = [51 + 0] \bmod (79) + 2 = 53$
- $f_0(77) = [38 + 0] \bmod (79) + 2 = 40$

Anhand dieses Beispiels lässt sich erkennen, dass die aufeinander folgenden Kanäle mindestens 6 Kanäle auseinander liegen, was einem Abstand von 6 MHz und der Forderung des Kanalabstands laut ETSI entspricht. Rechnet man für alle drei Hopping-Sets die Hopping-Sequenzen durch, so wird man feststellen, dass die im Beispiel aufgeführte Kanalbelegung (46, 53 und 40) einmalig ist. Dies gewährleistet, dass bei einer Kollision von zwei Sendern bei der Kanalbenutzung dies nur für die Zeitspanne einer Kanalbelegung (400 ms) geschehen kann und die Kollision nach dem Kanalwechsel durch unterschiedliche Wechselverhalten aufgehoben ist.

Kanalabstand

Die Abgrenzung verschiedener FHSS-Systeme erfolgt über das CDMA-Verfahren. Nur die FHSS-Systeme, die denselben Code verwenden, können untereinander Daten austauschen, wobei der Code durch die Nutzung einer einheitlichen Hopping-Sequenz repräsentiert wird. Bis zu 13 unabhängige FHSS-Systeme können durch die unterschiedlichen Hopping-Sequenzen innerhalb eines Empfangsbereichs arbeiten, ohne dass der Datendurchsatz durch gehäuft auftretende Kollisionen merklich reduziert wird.

Die erzielbare Datenrate ist jedoch bei FHSS-Systemen auf 2 MBit/s begrenzt. Laut IEEE-802.11-Standard sind 1 MBit/s und 2 MBit/s FHSS-PHY Layers definiert. Wollte man die Datenrate erhöhen, so müsste man die Bandbreite der Frequenzunterbänder erhöhen. Dies würde aber dazu führen,

dass bei einer vorhandenen Gesamtbandbreite die Anzahl der Kanäle reduziert wird. Eine Reduzierung der zur Verfügung stehenden Kanäle würde wiederum zu einer Anhäufung von Kollisionen führen und zu einem Verlust in dem erzielbaren Datendurchsatz.

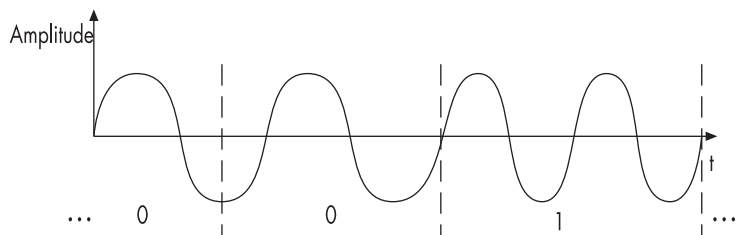
Die Implementierung eines FHSS-Systems ist verhältnismäßig einfach, und es werden keine komplexen logischen Bausteine benötigt. Zum einen ist dadurch der Energieverbrauch relativ gering und zum anderen sind die Kosten für die Erstellung von FHSS-Systemen verhältnismäßig niedrig. Ein großer Nachteil der FHSS-Systeme liegt darin, dass das Roaming (Wandern zwischen verschiedenen Zellen) relativ aufwändig ist. Jeder der 79 Kanäle müsste abgehört werden, um auf eine Zelle aufzuspringen. Da ein gleichzeitiges Abhören aller Kanäle unmöglich ist, müssen alle Kanäle nacheinander abgehört werden, was jedoch eine lange Wartezeit in Anspruch nehmen würde.

13.3.2 FHSS-Modulationsverfahren

Modulationsverfahren

Als Modulationsverfahren wird bei den FHSS-Systemen die Frequenzmodulation angewendet. Dabei wird die Frequenz der elektromagnetischen Welle verändert, um die zu übertragenden Informationen darzustellen. Bei dieser Modulationsart handelt es sich um die Gaussian Frequency Shift Keying-Modulation, kurz GFSK.

Abb. 13-2
Frequenzmodulation, bei der die Information über verschiedene Frequenzen dargestellt werden



Entweder wird bei den FHSS-Systemen die 2GFSK (2-Level Gaussian Frequency Shift Keying) Modulation oder die 4GFSK (4-Level Gaussian Frequency Shift Keying) Modulation angewendet. Generell gilt bei FHSS-Systemen, dass pro Zeiteinheit von einer Sekunde 1 MSymbol übertragen wird.

2GFSK-System

Bei den 2GFSK-Systemen hat ein Symbol eine Länge von einem Bit, pro Zeiteinheit wird ein Bit übertragen; somit kommt man auf eine Datenrate von 1 MBit/s. Die Symbole werden bei den 2GFSK-Systemen folgendermaßen dargestellt:

- 0 wird durch die Sendefrequenz = Center-Frequenz – 110 KHz bis 160 KHz repräsentiert
- 1 wird durch die Sendefrequenz = Center-Frequenz + 110 KHz bis 160 KHz repräsentiert

Bei den 4GFSK-Systemen hat ein Symbol eine Länge von zwei Bits und pro Zeiteinheit werden zwei Bits übertragen, deshalb kommt man auf eine Datenrate von 2 MBit/s. Die Symbole werden bei den 4GFSK-Systemen folgendermaßen dargestellt:

4GFSK-System

- ❑ 00 wird durch die Sendefrequenz = Center-Frequenz – 202,5 KHz bis 216 KHz repräsentiert
- ❑ 01 wird durch die Sendefrequenz = Center-Frequenz – 67,5 KHz bis 72 KHz repräsentiert
- ❑ 10 wird durch die Sendefrequenz = Center-Frequenz + 202,5 KHz bis 216 KHz repräsentiert
- ❑ 11 wird durch die Sendefrequenz = Center-Frequenz – 67,5 KHz bis 72 KHz repräsentiert

Der wesentliche Vorteil, der sich aus der Nutzung der GFSK-Modulation ergibt, liegt in der Tatsache, dass diese Modulation relativ unempfindlich gegen Rauscheinflüsse ist. Rauscheinflüsse beeinflussen die Amplitude des Signals und nicht die Frequenz der elektromagnetischen Welle.

13.3.3 FHSS-Frameformat

Für das Aussenden der Daten übernimmt der PLCP des Physical Layer die Daten des MAC-Layer und packt diese Daten für die Übertragung in ein bestimmtes Frameformat, dessen Header 5 Felder beinhaltet und eine Länge von 128 Bits hat. Auf der Seite des Empfängers werden die Informationen des PLCP-Headers zur Steuerung des Empfängers auf der PHY-Ebene genutzt und der Header wieder entfernt.

FHSS Frameformat

PLCP Preamble		PLCP Header			PSDU
Sync	Start Frame Delimiter	PLW	PSF	Header Error Check	
80 Bits	16 Bits	12 Bits	4 Bits	16 Bits	

Abb. 13–3
FHSS-PLCP-Frameformat

Die *PLCP-Präambel* des PLCP-Headers besteht aus dem SYNC und dem Start Frame Delimiter. Das SYNC-Feld hat eine Länge von 80 Bits, die einen Wechsel von Nullen und Einsen darstellen. Über dieses Feld wird der Frameanfang gekennzeichnet, und der Empfänger kann sich mit dem Sender über den eingehenden Bitstrom synchronisieren. Der *Start Frame Delimiter* hat eine Länge von 16 Bits mit dem Inhalt 0000-1100-1011-1101 er zeigt das Ende des SYNC-Felds an und kennzeichnet den eigentlichen Frameanfang. Das 12 Bits lange *PSDU-Length-Word-(PLW)*-Feld gibt die Länge des Datenteils in Bytes an, die vom MAC-Layer übergeben werden. Der zulässige Wertebereich liegt zwischen 0x000 bis 0xFFF, was einer maximalen Länge von 4095 Bytes entspricht. Über das 4 Bits lange *PLCP Signaling*

PLCP-Präambel

Field (PSF) wird die Datenrate angegeben, mit der der Inhalt der PSDU übertragen wird. Der PLCP-Header des Frames wird immer mit 1 MBit/s übertragen, die Datenrate des PSDU wird über drei Bits spezifiziert (siehe folgende Tabelle).

Tab. 13-3
PSF gibt die Datenrate
des PSDU an

Bit 0 (Reserviert)	Bit 1	Bit 2	Bit 3	Datenrate
0	0	0	0	1,0 MBit/s
0	0	0	1	1,5 MBit/s
0	0	1	0	2,0 MBit/s
0	0	1	1	2,5 MBit/s
0	1	0	0	3,0 MBit/s
0	1	0	1	3,5 MBit/s
0	1	1	0	4,0 MBit/s
0	1	1	1	4,5 MBit/s

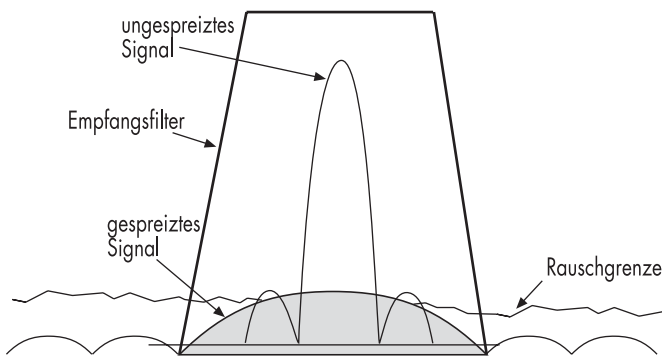
Laut Standard können Datenraten von 1 bis 4,5 MBit/s im PSF signalisiert werden, jedoch sind bei den FHSS-Systemen nur Datenraten von 1 MBit/s oder 2 MBit/s implementiert. Über das 16 Bits lange *Header-Error-Check*-Feld wird eine Fehlerüberprüfung des PLC-Headers über eine 16 Bit CRC (Cyclic Redundancy Check) durchgeführt. Das *PSDU*-Feld beinhaltet die Daten des MAC-Layer, die als MPDU bezeichnet werden, und kann eine Länge von 0-4095 Bytes haben. Um eine Beeinflussung von Gleichspannungsanteilen zu reduzieren und sicherzustellen, dass eine Folge von sich ständig wiederholenden Symbolen vermieden wird, wird der Inhalt des Datenteils im PLCP über ein 127-Bit-Wort mit dem Inhalt 00001110-11110010-11001001-00000010-00100110-00101110-10110110-00001100-11010100-11100111-10110100-00101010-11111010-01010001-10111000-11111111 gescrambelt (verwürfelt). Für das Scrambling wird eine polynomiale Funktion $S(x) = x^7 + x^4 + 1$ angewendet. Anschließend werden die Daten über eine 32/33-Kodierung in 32 Symbole lange Blöcke unterteilt, die jeweils von einem so genannten *Stuff-Symbol* abgeschlossen werden. Dies führt zu einer einfacheren Synchronisierung des Datenstroms und zur Erkennung des letzten Bits eines Pakets.

13.3.4 Direct-Sequence-Spread-Spektrum-Technologie

DSSS-Technologie

Bei der DSSS-Technologie laut IEEE 802.11, IEEE 802.11b und Festlegung der ETSI wird die vorhandene Bandbreite (2,4000-2,4835 GHz) in 13 Frequenzunterbänder mit einer Bandbreite von jeweils 22 MHz und 30 MHz Abstand zwischen den Frequenzbändern aufgeteilt. Jedes der 13 Frequenzbänder stellt einen Kanal (1-13) bereit. Anders als bei der FHSS-Technologie sendet ein Sender immer auf demselben Kanal, und es findet während der Aussendung der Daten kein Kanalwechsel statt.

Für die Datenübertragung über die DSSS-Technologie werden die zu übertragenden Daten gespreizt. Die Spreizung führt dazu, dass im Gegensatz zum schmalbandigen Senden mit hoher Leistung nun über einen größeren Frequenzbereich mit kleiner Sendeleistung gearbeitet wird – die Energie des Signals bleibt dabei gleich. Dadurch ist bei einem eventuellen schmalbandigen Störeinfluss nur ein Teil der Information gestört, während bei schmalbandiger Datenübertragung das komplette Signal verloren ginge. Die Intensität des breitbandigen Signals wird letztendlich unter die Rauschgrenze gebracht, wodurch benachbarte Systeme weniger gestört werden und die Dichte unterschiedlicher Systeme, bezogen auf eine bestimmte Fläche, erhöht werden kann.

**Abb. 13-4**

Durch die Spreizung der DSSS-Technologie wird das Sendesignal unter die Rauschgrenze gebracht

Die Spreizung des Signals erreicht man durch ein Codesignal, das als Pseudo-Noise-Code (PN-Code) bezeichnet wird. Sowohl Empfänger als auch Sender müssen den PN-Code kennen. Den PN-Code kann man sich als eine Art Schlüssel vorstellen; der Sender verschließt dabei die Informationen, und nur der Empfänger mit dem richtigen Schlüssel kann die Informationen wieder entschlüsseln. Dabei ist es unabdingbar, dass der PN-Code nicht im Zusammenhang mit der Information steht. Da durch die Spreizung das Sendesignal unter die Rauschgrenze gebracht wird, können sich Systeme mit unterschiedlichen PN-Codes nicht verstehen oder gegenseitig stören.

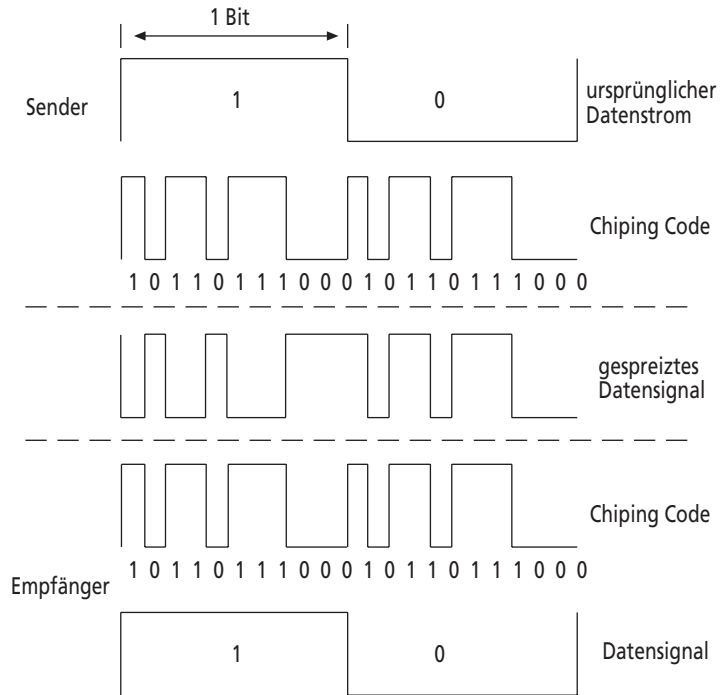
Pseudo-Noise-Code

Die DSSS-Technologie bekam ihren Namen aufgrund der einfachen beziehungsweise direkten Abbildung des PN-Codes auf jedes einzelne Bit. Der PN-Code besteht aus einer Chipsequenz der Länge 2^{n-1} Chips und wird einfach Modulo 2 (Exklusiv-ODER) zum eigentlichen Binärstrom addiert. Das Generieren des PN-Codes erfolgt durch ein spezielles Schieberegister, dessen Registeranzahl die Länge des PN-Codes bestimmt.

Chipsequenz

Auf der Seite des Empfängers werden für die Entschlüsselung des eingehenden Datenstroms die empfangenen Daten mit demselben PN-Code wieder Modulo 2 addiert. Durch die erneute Addition desselben PN-Codes ergibt sich auf der Seite des Empfängers wieder das ursprüngliche Datensignal.

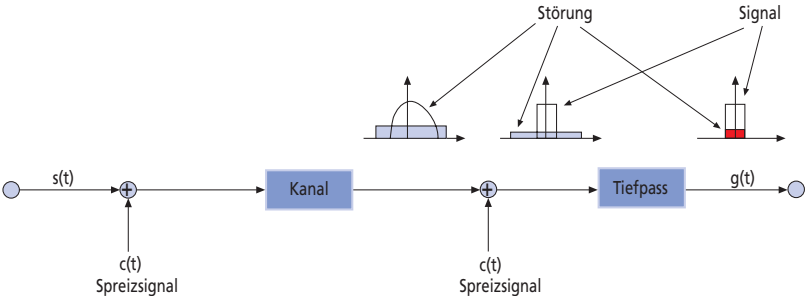
Abb. 13-5
Signalspreizung durch
den PN-Code sende- und
empfangsseitig



Störsignale

Die Verbindungspartner behandeln letztendlich das gewünschte Signal immer zweimal (einmal auf der Seite des Senders und einmal auf der Seite des Empfängers) mit ein und demselben PN-Code, während Störsignale diese Prozedur nur einmal durchlaufen und damit nur einmal gespreizt werden. Demnach bleibt das Störsignal auf der Seite des Empfängers schmalbandig und mit einem hohem Frequenzanteil stehen und kann mit einem einfachen nachgeschalteten Tiefpass ausgefiltert werden – nur das gewünschte Signal bleibt übrig.

Abb. 13-6
Störsignale werden nur
einmal gespreizt und
können durch einen
Tiefpass ausgefiltert
werden



Weil Störsignale nur einmal gespreizt werden und einfach ausgefiltert werden können, kann das gewünschte Signal vom Empfangssignal getrennt werden, obwohl dieses unterhalb der Rauschgrenze liegt und somit eigentlich im Signalrauschen untergeht. Dabei gilt: Desto länger das Codesignal ist, je höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass die ursprünglichen Nutzdaten wieder regeneriert werden können.

13.3.5 DSSS-Modulationsverfahren und PN-Codes

Als Modulationsverfahren wird bei den DSSS-Systemen die Phasenmodulation angewendet. Dabei wird dem zu übertragenden Symbol eine unterschiedliche Phase der elektromagnetischen Welle zugeordnet, um die zu übertragenden Informationen darzustellen. Bei dieser Modulationsart handelt es sich um die Phase-Shift-Keying-Modulation, kurz PSK.

*DSSS-Modulations-
verfahren*

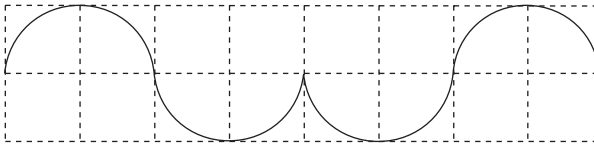


Abb. 13-7
*PSK-Modulation, bei der
die Information über die
Phasenverschiebung
dargestellt wird*

Der Vorteil dieses Modulationsverfahren ist, dass es relativ unempfindlich gegen Störungen ist. Störungen treten nämlich normalerweise in der Amplitude auf und nicht in der Phasenlage.

In Abhängigkeit von der Datenrate beziehungsweise um diese beim vorhandenen Frequenzband erzielen zu können, verwendet man bei der IEEE-DSSS-Technologie unterschiedliche PN-Codes und Varianten der PSK-Modulation.

Bei Systemen mit einer Datenrate von 1 oder 2 MBit/s wird für die Spreizung der 11-Chip Barker Code mit dem Inhalt 10110111000 benutzt. Bei den 1-MBit-Systemen hat ein Symbol eine Länge von einem Bit und pro Zeiteinheit wird ein Bit, übertragen. So kommt man auf eine Datenrate von 1 MBit/s ($1 \text{ MSymbol/s} \times 1 \text{ Bit/Symbol} = 1 \text{ MBit/s}$). Die 1-MBit/s-Systeme verwenden für die Modulation die so genannte Differential Binary Shift Keying Modulation (DBPSK). DBPSK ist eine spezielle Art der Binary Shift Keying Modulation, bei der als Bezugspunkt keine Referenzphase, sondern die zuletzt übertragene Phase verwendet wird. Die folgende Tabelle zeigt die Darstellung der Symbole, wie diese bei der DBPSK-Modulation über die Phasenverschiebung dargestellt werden.

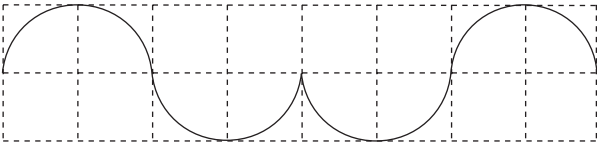
11-Chip Barker Code

Tab. 13-4
Phasenverschiebung der
DBPSK-Modulation

Symbol (1 Bit)	Änderung der Phasenlage (+jω)
0	0
1	π

Die Phasenverschiebung, die für die Darstellung der Informationen verwendet wird, lässt sich auch komplex über einen I- und Q-Anteil darstellen (siehe Abbildung 13-8).

Abb. 13-8
Komplexe Darstellung
der DBPSK-Modulation



Die 2-MBit/s-Systeme haben eine Symbollänge von zwei Bits, und pro Zeiteinheit werden zwei Bit übertragen. So kommt man auf eine Datenrate von 2 MBit/s ($1 \text{ MSymbol/s} \times 2 \text{ Bit/Symbol} = 2 \text{ MBit/s}$). Bei den 2-MBit/s-Systemen wird als Modulationsverfahren die so genannte Differential Quadrature Shift Keying Modulation (DQPSK) verwendet. Dabei bestimmt ein Symbol mit der Länge von 2 Bits die Phasenverschiebung, wie sie in der folgenden Tabelle dargestellt ist.

Tab. 13-5
Phasenverschiebung der
DQPSK-Modulation

Symbol (2 Bit)	Änderung der Phasenlage (+jω)
00	0
01	$\pi/2$
10	$-\pi/2$
11	π

Bei der DQPSK-Modulation bildet ein Bit des Symbols den I-Anteil und ein Bit den Q-Anteil. Die komplexe Darstellung ($I + jQ$) der DQPSK-Modulation wird folgendermaßen beschrieben (siehe Abbildung 13-9).

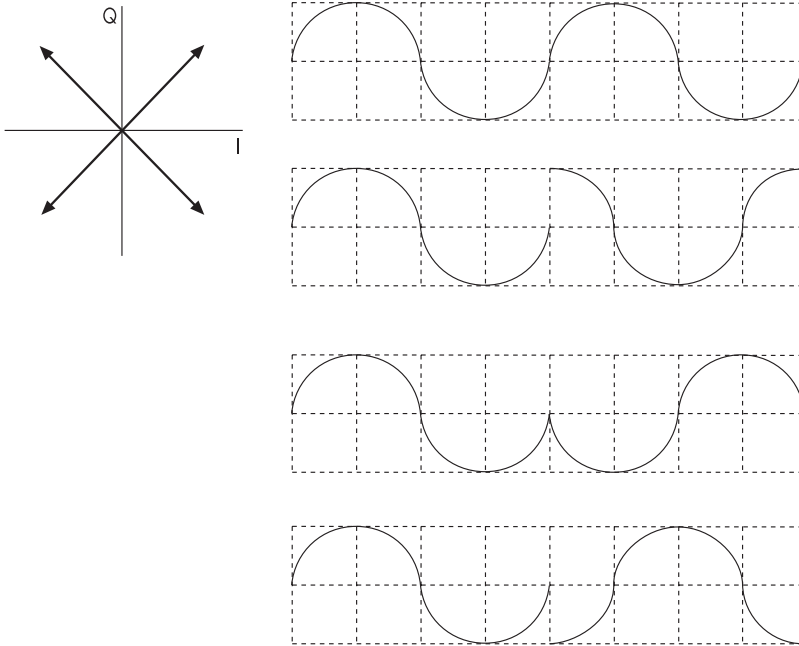


Abb. 13-9
Komplexe Darstellung
der DQPSK-Modulation

Bei der Datenrate von 5,5 und 11 MBit/s verwendet man anstelle des Chip Barker Code einen so genannten Complementary Code, wobei man diesen über die so genannte CCK-Technologie (Complementary Code Keying) gewinnt. Bei CCK handelt es sich um eine Komplementärkode-Tastung, die eine Variante der M-wertigen Orthogonalen Tastung MOK ist. Bei der Datenrate von 11 MBit/s setzt die CCK-Technologie auf ein Codewort auf, das aus 64 komplexen Codewörtern über 6 von 8 Bit der zu übertragenden Information ausgewählt wird. Mit dem ausgewählten Codewort werden die orthogonalen I- und Q-Kanäle angesteuert. Die restlichen 2 Bit der zu übertragenden Information werden für die QPSK-Modulation verwendet, über die das gesamte Symbol moduliert wird.

CCK-Technologie

Da man grundsätzlich mit einer Chiprate von 11 MHz arbeitet, jedoch bei den Systemen mit der Datenrate von 5,5 und 11 MBit/s anstelle des 11 Bits langen PN-Codes mit 8 Bits langen Codes gearbeitet wird, ergibt sich bei diesen Systemen eine Symbolrate von 1,375 MSymbolen/s ($11/8$).

Bei den 5,5 MBit/s gewinnt man den Complementary Code aus 4 Codewörtern mit je 8 Bit, wobei ein Symbol eine Länge von 4 Bits hat. Daraus lässt sich die Datenrate $1,375 \text{ MSymbol/s} \times 4 \text{ Bit/Symbol} = 5,5 \text{ MBit/s}$ errechnen.

Die 11-MBit/s-Systeme gewinnen den Complementary Code aus 64 Codewörtern mit einer Länge von je 8 Bits, wobei ein Symbol eine Länge von

CCK-Codewort

8 Bits hat. Die Datenrate lässt sich somit über $1,375 \text{ MSymbol/s} \times 8 \text{ Bit/Symbol} = 11 \text{ MBit/s}$ errechnen.

Das 8-Bit-CCK-Codewort wird von der folgenden Formel abgeleitet, wobei c das Codewort von LSB nach MSB ergibt.

$$c = \{ e^{j(\ddot{o}_1 + \ddot{o}_2 + \ddot{o}_3 + \ddot{o}_4)}, e^{j(\ddot{o}_1 + \ddot{o}_3 + \ddot{o}_4)}, e^{j(\ddot{o}_1 + \ddot{o}_2 + \ddot{o}_4)}, -e^{j(\ddot{o}_1 + \ddot{o}_4)}, e^{j(\ddot{o}_1 + \ddot{o}_2 + \ddot{o}_3)}, e^{j(\ddot{o}_1 + \ddot{o}_3)}, -e^{j(\ddot{o}_1 + \ddot{o}_2)}, e^{j\ddot{o}_1} \}$$

Diese Formel wird verwendet, um das Codewort für Signalspreizung bei der Datenrate von 5,5 und 11 MBit/s zu generieren. Die Variablen $\ddot{o}_1$ bis $\ddot{o}_4$ legen die Phasenlage des komplexen Codes fest. Bei der Datenrate von 11 MBit/s repräsentiert jedes Symbol eine Information von 8 Bit. Bei 5,5 MBit/s werden pro Symbol 4 Bit übertragen. Die Generierung des Codeworts möchten wir anhand eines Beispiels für die Datenrate von 11 MBit/s aufzeigen.

Der Datenstrom ist in Byte unterteilt, wobei die zu übertragende Information über die Bits $d_7, d_6, d_5, d_4, d_3, d_2, d_1, d_0$ repräsentiert wird. Die 8 Bits werden dazu genutzt, die Phasen $\ddot{o}_1$ bis $\ddot{o}_4$ nach folgender Tabelle zu kodieren.

Tab. 13-6
Schema für die
Kodierung der Phasen

Bits	Phasenlage
d_1, d_0	$\ddot{o}_1$
d_3, d_2	$\ddot{o}_2$
d_5, d_4	$\ddot{o}_3$
d_7, d_6	$\ddot{o}_4$

Die Kodierung basiert auf der Differential Quadrature Shift Keying Modulation (DQPSK), wie sie in der folgenden Tabelle dargestellt ist.

Tab. 13-7
DQPSK-Modulation der
Phasenlage

Bits (d_{i+1}, d_i)	Änderung der Phasenlage (+j ω)
00	0
01	π
10	$\pi/2$
11	$-\pi/2$

Die Generierung des Codewortes für den Bitstrom d_7 bis $d_0 = 10110101$ sieht zum Beispiel folgendermaßen aus:

- ❑ $d_1, d_0 = 01$ ergibt für $\ddot{o}_1 = \pi$
- ❑ $d_3, d_2 = 01$ ergibt für $\ddot{o}_2 = \pi$
- ❑ $d_5, d_4 = 11$ ergibt für $\ddot{o}_3 = -\pi/2$
- ❑ $d_7, d_6 = 10$ ergibt für $\ddot{o}_4 = \pi/2$

Überträgt man die Phasenwerte in die Formel zur Generierung des Codeworts, so ergibt sich folgende Gleichung:

$$c = \{e^{j(\delta + \delta - \delta/2 + \delta/2)}, e^{j(\delta - \delta/2 + \delta/2)}, e^{j(\delta + \delta + \delta/2)}, -e^{j(\delta + \delta/2)}, e^{j(\delta + \delta - \delta/2)}, e^{j(\delta - \delta/2)}, -e^{j(\delta + \delta)}, e^{j(\delta)}\}$$

$$c = \{e^{j2\delta}, e^{j\delta}, e^{j5\delta/2}, -e^{j3\delta/2}, e^{j3\delta/2}, e^{j\delta/2}, -e^{j2\delta}, e^{j\delta}\}$$

Nach der Eulerschen Formel ergibt dies:

$$e^{j\tilde{\delta}} = \cos \tilde{\delta} + j \sin \tilde{\delta} \text{ wobei } \tilde{\delta}: 0, \delta/2, \delta, -\delta/2$$

$$c = \{\cos 2\delta + j \sin 2\delta, \cos \delta + j \sin \delta, \cos 5\delta/2 + j \sin 5\delta/2, -\cos 3\delta/2 - j \sin 3\delta/2, \cos 3\delta/2 + j \sin 3\delta/2, \cos \delta/2 + j \sin \delta/2, -\cos 2\delta - j \sin 2\delta, \cos \delta + j \sin \delta\}$$

woraus sich das komplexe Codewort

$$c = \{1, -1, j, j, -j, j, -1, -1\} \text{ ergibt.}$$

In der Praxis arbeitet ein 11-MBit/s-CCK-Modulator mit 1,375 MHz Takt. Aus dem eingehenden Datenstrom werden 6 von den 8 Bits dazu verwendet, eines der 64 komplexen CCK-Codewörter (Vektoren) auszuwählen. Das ausgewählte Codewort moduliert dann den Träger nach dem QPSK-Verfahren durch entsprechende Ansteuerung der I- und Q-Modulatoren. Die 2 restlichen Bits werden für die QPSK-Modulation verwendet, um die QPSK-Polarität festzulegen, mit der das gesamte Symbol moduliert wird. Die Datensequenz wird demnach über den I/Q-Anteil moduliert. Für das erste Bit des Datenteils wird dabei als Referenzphase das letzte Bit des PLCP-Headers verwendet.

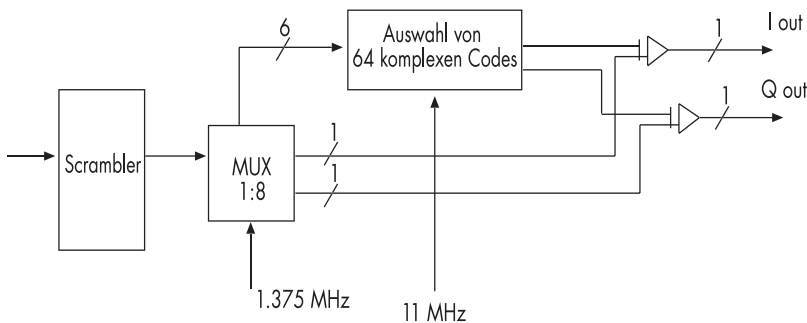


Abb. 13-10

Blockschaltbild einer CCK-Sendestufe

Vergleicht man die verschiedenen Modulationsverfahren der DSSS-Technologie und die daraus resultierende Datenrate, so ergibt dies folgendes Gesamtbild.

Abb. 13-11

Übersicht der
Modulationsverfahren
und Datenraten der
DSSS-Technologie

