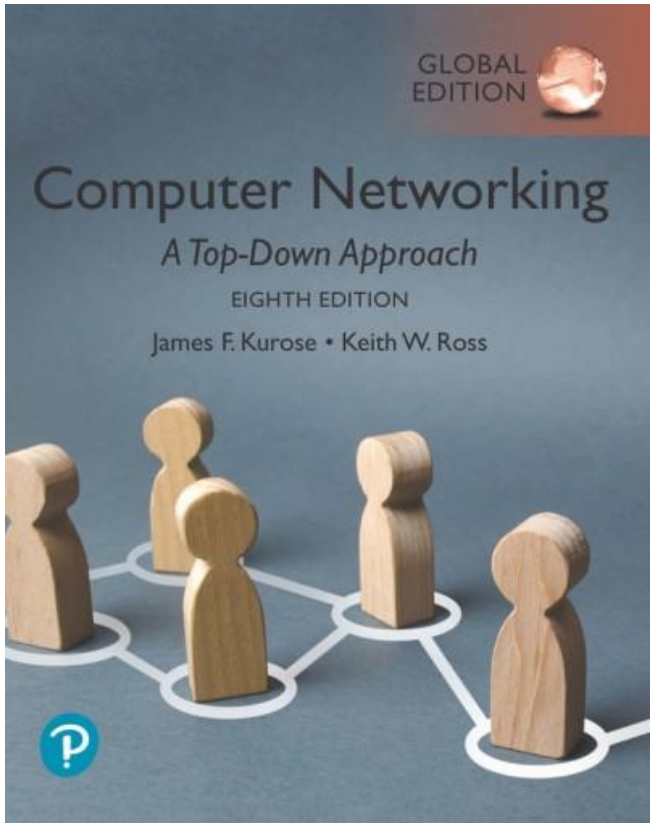
Vorlesung Kommunikationssysteme
Wintersemester 2026/27

Ethernet und drahtlose Netze

Christoph Lindemann

Zeitplan

Nr.	Datum	Thema
01	16.10.26	Organisation, Internet Trends und Grundlagen von Android
02	23.10.26	Protokolldesign und das Internet
03	30.10.26	Anwendungen und Netzwerkprogrammierung
04	06.11.26	LAN und Medienzugriff
05	13.11.26	Ethernet und drahtlose Netze
06	20.11.26	LAN Komponenten und WAN Technologien
07	27.11.26	Routingverfahren und Protokolle
08	04.12.26	Internetworking und Adressierung mit IP
09	11.12.26	IP Datagramme
10	18.12.26	Zusätzliche Protokolle und Technologien
11	08.01.27	User Datagram Protocol und Transmission Control Protocol
12	15.01.27	TCP Überlastkontrolle / Internet Routing und Routingprotokolle
13	22.01.27	TCP für Hochgeschwindigkeitsnetze
14	29.01.27	Review der Vorlesung



James Kurose, Keith Ross,
Computer Networking: A Top-Down Approach,
Global Edition, 8. Auflage, Pearson, 2021.

E-Book:
https://elibrary.pearson.de/book/99.150005/9781292405513

Deutsch:
https://elibrary.pearson.de/book/99.150005/9783863266868

Überblick

Ziele:

- Überblick über drahtlose Standards, deren grundlegende Funktion und Einsatzzweck

Themen:

- Ethernet Frames
- IEEE 802.11: WLAN
- WiMAX
- IEEE 802.15: Bluetooth und ZigBee
- VSAT, GPS, Software Defined Radio

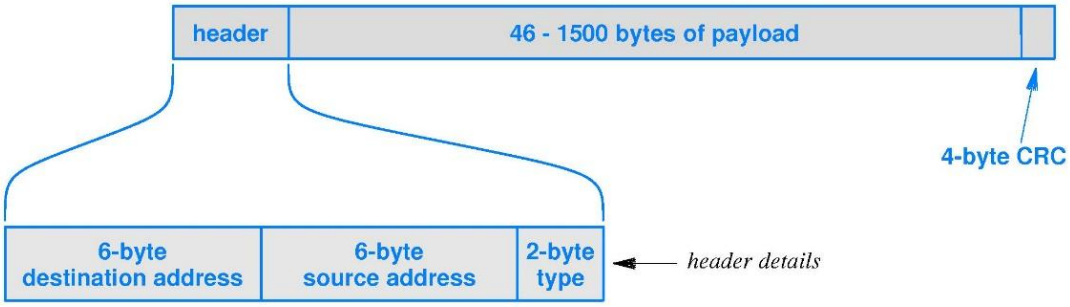
Ethernet

Einführung

- Erfunden bei Xerox PARC
- Mehr als 40 Jahre alt
  - Netzhardware, Verkabelung und Medium haben sich stark geändert
  - Paketformat und Adressierung unverändert
- Abwärtskompatibel → ältere Hardware im Netz wird erkannt und das kompatible Protokoll gewählt

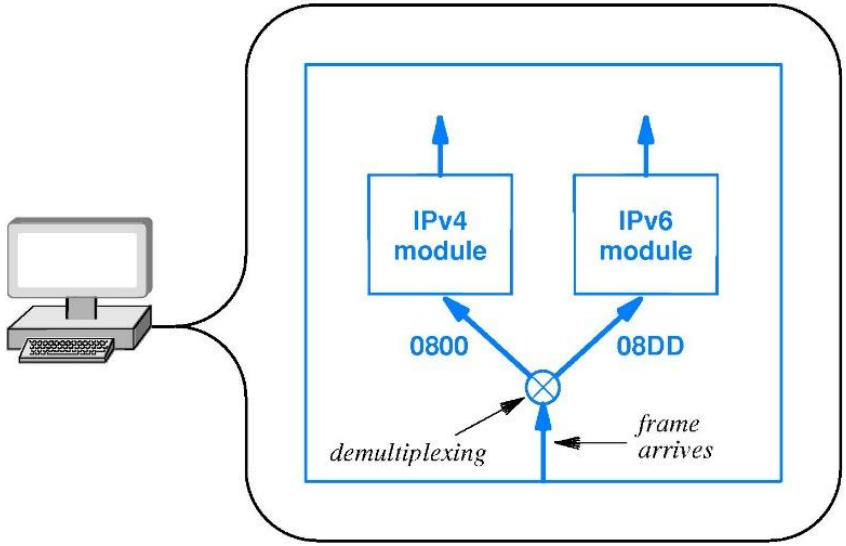
Ethernet Frame Format (1)

- Schicht-2 Pakete werden als **Frame** bezeichnet
- **Frame-Format** beschreibt wie die Daten in einem Frame aufgebaut sind
- Kompatibilität wird erreicht, in dem sich das Frame-Format seit den 70ern nie geändert hat
- Aufbau von Ethernet II Frames: **Header** fester Größe, **Payload**, **Cyclic Redundancy Check** Fehlercode
- Header enthält: 48-bit Zieladresse, 48-Bit Quelladresse, 16-Bit Typenfeld



Ethernet Frame Format (2)

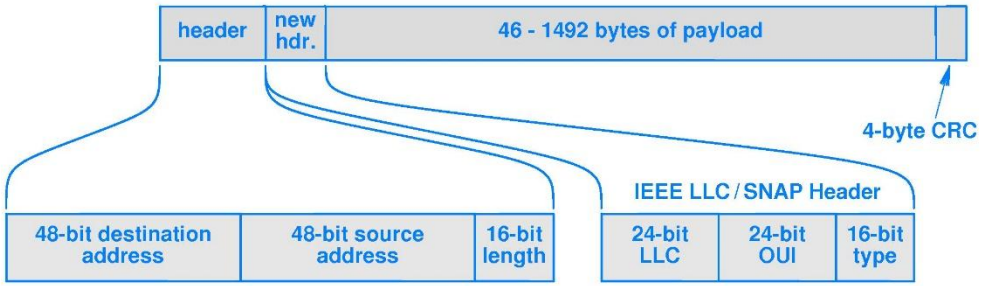
- Typenfeld nennt das Schicht-3 Protokoll, das für den Payload des Frames zuständig ist
  - Ermöglich Muliplexing und Demultiplexing
  - Mehrere Schicht-3 Protokolle können auf einem System genutzt werden, z.B. IP4 und IPv6
  - IP4: 0x0800
  - IPv6: 0x86DD



IEEE Ethernet Frame (1)

- IEEE selbst entwickelte einen Ethernet Frame Standard (IEEE 802.3)
  - Für reines Ethernet selbst kaum verwendet
  - ABER: andere 802 Protokolle nutzen dieses Format → IEEE 802.11 → WLAN

- IEEE 802.3 interpretiert das ursprüngliche Typenfeld als Paketlänge und fügt 8-Byte Logical Link Control / Sub-Network Attachment Point (LLC/SNAP) Header hinzu



IEEE Ethernet Frame (2)

- LLC/SNAP ersetzt das ursprüngliche Typenfeld und ermöglicht viel mehr Typen als vorher

- Wie erkannt die Netzwerkkarte, ob ein Ethernet II oder ein 802.3 Frame empfangen wurde?

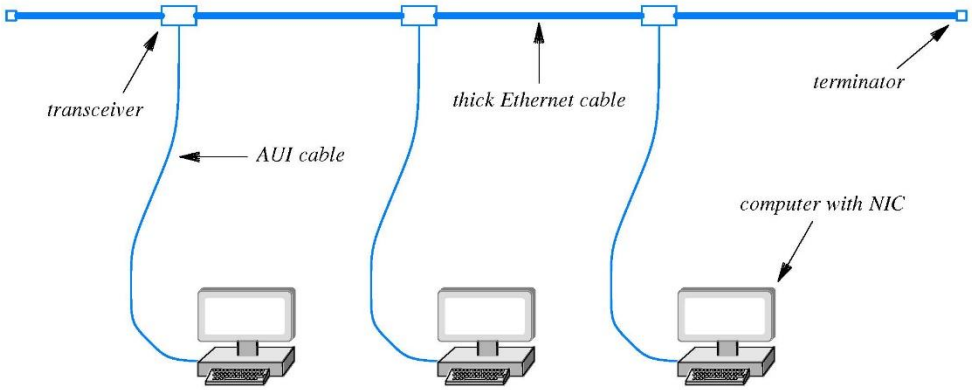
  - Enthält das Typenfeld einen Wert <= 1500, so ist die Länge enthalten → IEEE 802.3 Frame

  - Enthält das Typenfeld einen Wert >= 1536 (0x0600), so wird es als Typenfeld interpretiert → Ethernet II Frame

  - Werte 1501–1535 sind reserviert und werden nicht verwendet

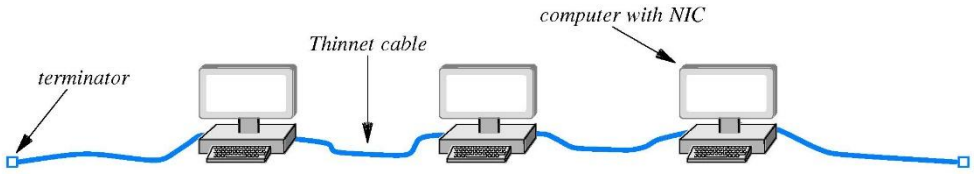
Evolution des Ethernets (1)

- **Thick Wire Ethernet (10Base5)**
  - **Dickes Koaxialkabel** (z.B. in der Decke verbaut) dient als Medium
  - Rechner enthalten **Network Interface Cards** (NIC) → nur für digitale Aspekte (z.B. Framing, CRC) zuständig
  - NICs per dünnem Kabel (**Attachment Unit Interface**; AUI) mit **Transceiver** auf dem Koaxialkabel verbunden
  - Transceiver ist AD/DA Wandler und regelt Carrier Detection, Frame Delineation, …



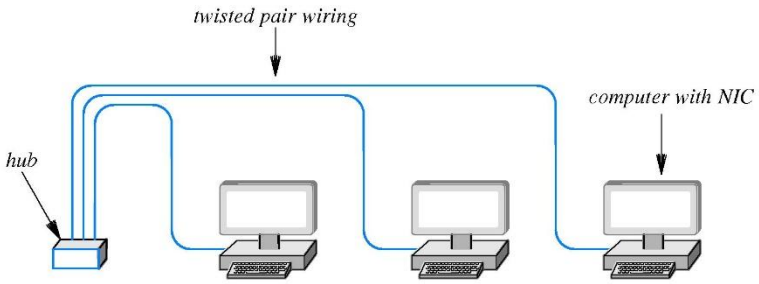
Evolution des Ethernets (2)

- **Thin Wire Ethernet (10Base2)**
  - Dünnes, flexibles Koaxialkabel als Medium
  - Transceiver in NICs integriert
  - Koaxialkabel direkt mit den NICs am Rechner per BNC-T-Stück verbunden
  - Vorteile: günstiger, einfacher zu verlegen, flexibler
  - Nachteile: ein einzelnes vom Rechner getrennte Kabel zerstört das ganze Netz

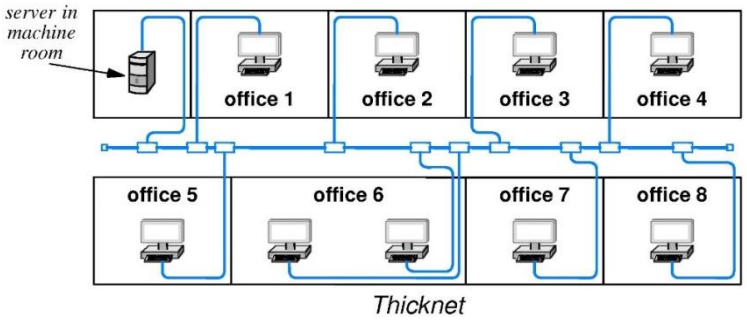


Evolution des Ethernets (3)

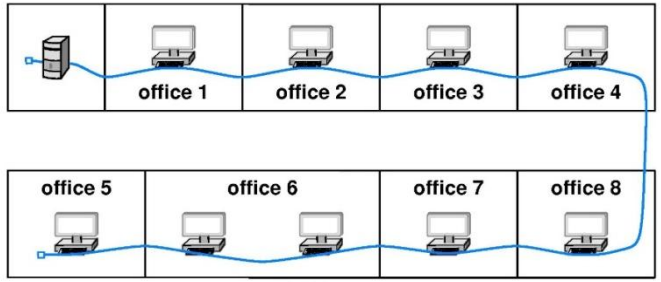
- **Twisted Pair Ethernet (10BaseT)**
  - Umfangreiche Änderungen im Vergleich zu den Vorgängern
  - Zusätzliches zentrales Gerät: **Hub**
  - **Twisted Pair Kabel**
  - Computer verbinden sich nicht zum Koaxialkabel sondern zum Hub → Elektronik im Hub emuliert das geteilte Medium
  - Unverändert das gleiche Frame Format und die gleiche Software im Betriebssystem → nur andere Treiber für die NICs



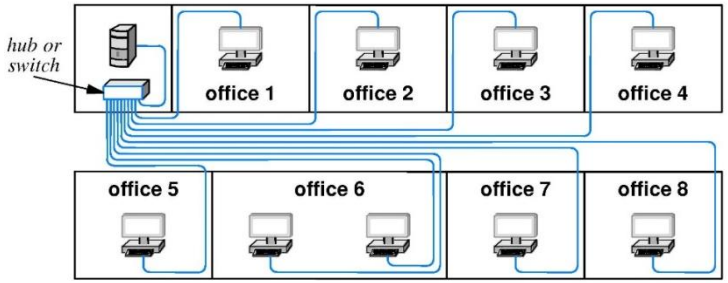
Evolution des Ethernets (4)



Thicknet



Thinnet



Third Generation (twisted pair or fiber)

Ethernet Topologie

- 10BaseT macht es notwendig zwischen **physikalischer** und **logischer Topologie** zu unterscheiden
  - Physikalische Topologie: Aufbau der Netzverkabelung
    - Sterntopologie bei 10BaseT
  - Logische Topologie: Datenfluss zwischen den Endgeräten
    - Bus bei 10BaseT, da der Hub logisch einen Bus emuliert

Twisted Pair Geschwindigkeiten

- Verbesserte Kabel und Isolierungen ermöglichten im Laufe der Zeit höhere Geschwindigkeiten

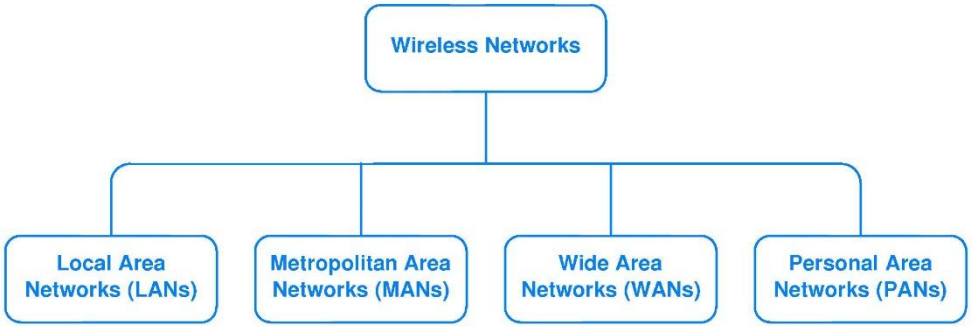
- NICs erkennen automatisch welche Geschwindigkeiten ihr Gegenüber unterstützt → automatische Einstellung der Übertragungsrate (**Autosense**)

Designation	Name	Data Rate	Cable Used
10BaseT	Twisted Pair Ethernet	10 Mbps	Category 5
100BaseT	Fast Ethernet	100 Mbps	Category 5E
1000BaseT	Gigabit Ethernet	1 Gbps	Category 6

Drahtlose Netze

Klassifikation

- Das **elektromagnetische Spektrum** unterliegt der staatlichen Kontrolle
  - Lizenzpflichtige Bereiche des Spektrums sowie frei nutzbare Bereich → z.B. Industrial, Scientific, Medical (ISM) Band 2,4 GHz
  - Staatliche Anforderungen und unterschiedliche Ziele sorgten für eine Vielzahl an spezialisierten drahtlosen Netzen



Personal Area Networks

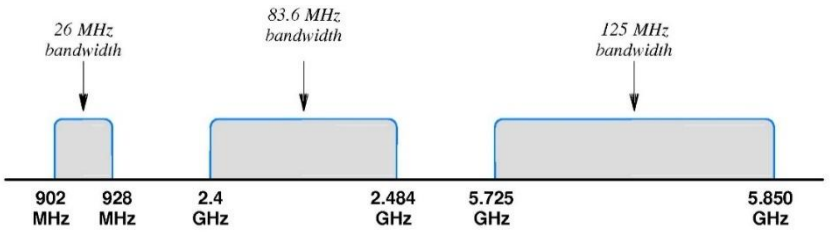
- Kommunikation auf sehr kurzer Distanz, häufig zwischen Geräten des gleichen Nutzers
  - Z.B. Smartphone und Kopfhörer oder Funktastatur und –maus
- **Bluetooth**: Kommunikation von Peripheriegeräten mit dem Hauptsystem (z.B. PC oder Tablet)
- **Infrarot**: Line-of-Sight Kommunikation, häufig für Fernbedienungen
- **ZigBee**, **Z-Wave**: Heimautomation
- **NFC**: Konfiguration und Bezahlen

ISM Bänder

- **Für Geräte in Industrie, Wissenschaft und Medizin reserviert, die hohe Frequenzen erzeugen (z.B. Öfen, Mikrowellen)** → Geräte dürfen nur in diesen Frequenzbändern abstrahlen → keine Interferenz mit Anwendungen auf anderen Frequenzen

- WiFi und Bluetooth nutzen zwar ISM-Bänder, entsprechen aber nicht der Norm und unterliegen eigenen Bestimmungen

- Beispiele von ISM Bändern:



Frequenzspreizung

- Standardverfahren um bei Wireless LANs die **Geschwindigkeit zu erhöhen** und die Übertragung **immun gegen Rauschen** zu machen

- Daten werden über mehrere Frequenzen verteilt
  - **Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS)**: Daten werden mit einem Spreizcode verknüpft
  - **Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS)**: Sender springt zwischen Kanälen; Sender und Empfänger müssen sich synchronisieren; Immun gegen Rauschen
  - **Ortogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)**: Aufteilung des zur Verfügung stehendes Frequenzbandes in nicht überlappende Kanäle

Wireless LAN Standards (1)

- IEEE entwirft die meisten für Wireless LANs relevanten Standards → IEEE 802.11 Familie

- Wi-Fi Alliance zertifiziert Geräte, die den IEEE Standards entsprechen

IEEE Standard	Frequency Band	Data Rate	Modulation And Multiplexing Techniques
original 802.11	2.4 GHz	1 or 2 Mbps	DSSS, FHSS
	2.4 GHz	1 or 2 Mbps	FHSS
	Infrared	1 or 2 Mbps	PPM
802.11b	2.4 GHz	5.5 to 11 Mbps	DSSS
802.11g	2.4 GHz	22 to 54 Mbps	OFDM, DSSS
802.11n	2.4 GHz	54 to 600 Mbps	OFDM

Wireless LAN Standards (2)

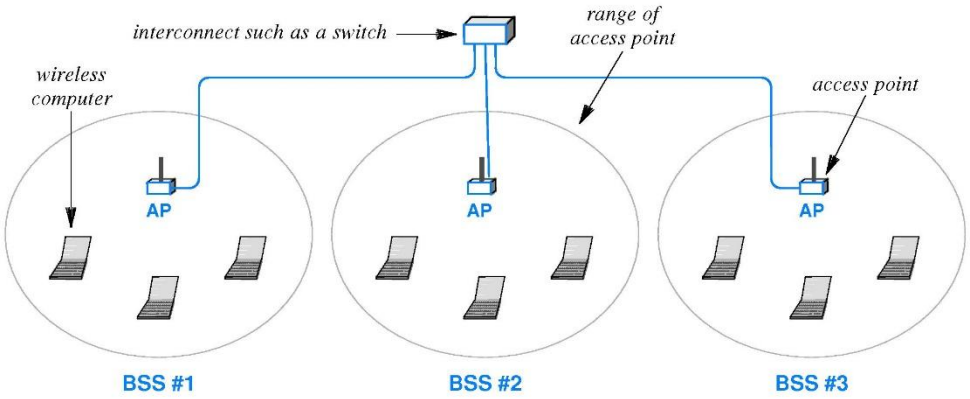
- Weitere IEEE 802.11 Standards, die die „großen“ Standards (z.B. 802.11ac) ergänzen

- Werden teils in die großen Standards aufgenommen und somit obsolet

  - **802.11e**: Quality of Service
  - **802.11h**: Energiekontrolle und Koexistenz mit Radar und Satelliten → ermöglichte 5GHz Band in Deutschland
  - **802.11i**: Verschlüsselung wie WPA2
  - **802.11s**: Mesh Netze

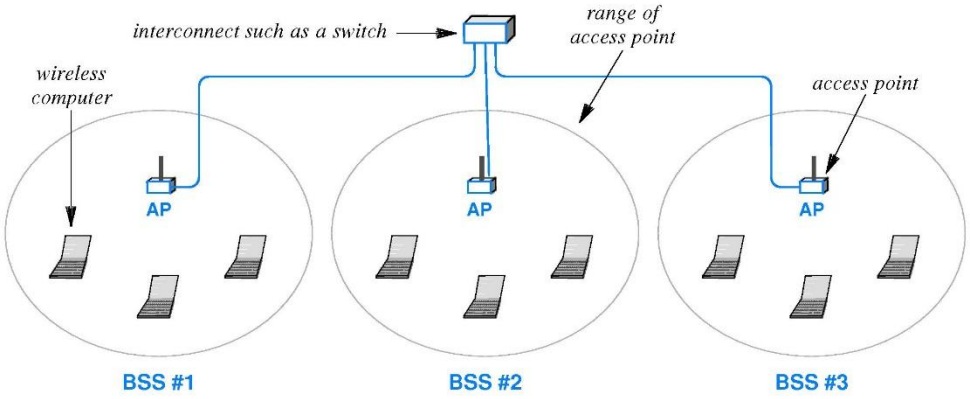
Architektur von WLANs (1)

- Hauptkomponenten der meisten WLANs
  - **Access Points (AP)**
  - Verbindungen zwischen den Access Points (meist über Ethernet)
  - **Drahtlose Stations (STA)** → die Nutzer des WLANs



Architektur von WLANs (2)

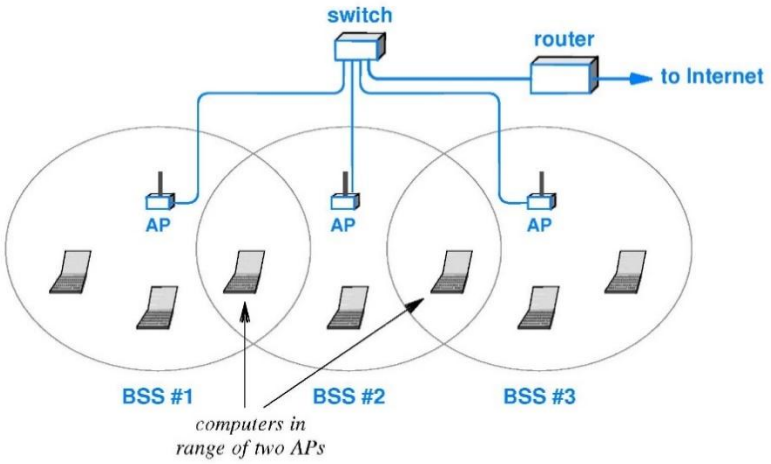
- Typen von WLANs
  - **Infrastrukturmodus**: Kommunikation der Stations über den Access Point
    - Alle Stations, die mit einem bestimmten AP verbunden sind, bilden ein **Basic Service Set** (siehe unteres Bild)
  - **Ad Hoc Netze**: Direkte Kommunikation der Stations untereinander, potentiell Multihop



Positionierung der APs

- Probleme ähnlich der Positionierung von Base Stations für Mobilfunk:
  - Keine **Dead Zones** schaffen: stehen APs zu weit auseinander und Stations bewegen sich, kann es zum Verlust der drahtlosen Verbindung kommen
  - **Überlappung auf das Notwendigste** minimieren

- APs sind typischerweise mit dem Internet verbunden



Anmeldung am AP

- Stations müssen sich, bevor sie mit einem AP kommunizieren können, mit dem AP **assoziieren** → Anmeldung am AP

- Optional auch **Authorisierung** (Zugangskontrolle)

- Datenpakete werden im Infrastrukturmodus stets zuerst zum AP gesendet, und anschließend von diesem weitergeleitet

802.11 Frame Format

- CTL: **Frame Control Informationen**
  - Protokollversion, Frame-Typ, ...
- DUR: **Duration**
  - In Control Frames genutzt zur Reservierung des Kanals
- **Mehrere Adressen**
  1. MAC-Adresse des nächstes Kommunikationspartner auf WLAN-Ebene (meist der AP)
  2. MAC-Adresse des sendenden Interfaces
  3. MAC-Adresse des wirklichen Zieles dieses Paketes (z.B. Router oder andere Station; Ziel zu dem der AP das Paket weiter leitet)
  4. MAC-Adresse des wirklichen Senders
- SEQ: **Sequenznummer**



AP Koordination

- Zwei Möglichkeiten

1. Ähnlich mobilen Netzen messen APs die Signalqualität der Nutzer und führen einen Handover aus
   - Komplex und aufwendig
2. Nutzer führen den Wechsel des APs selbst durch
   - Günstige und einfache Infrastruktur für die APs

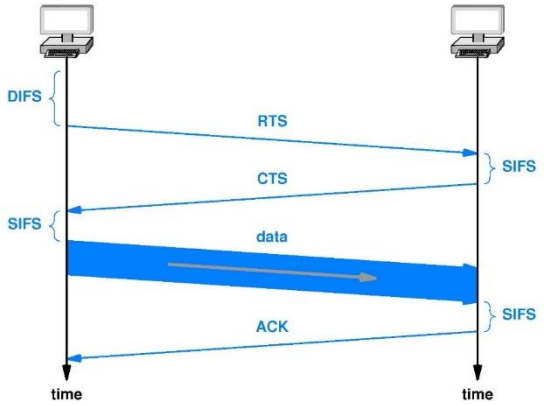
- Welche Version gewählt wird muss von Fall zu Fall entschieden werden

802.11 Medienzugriff

- Im ursprünglichen Standard zwei Verfahren zur Kontrolle des Medienzugriffs vorgeschrieben
  - Point Coordination Function (PCF)
    - AP weist den Stations Zeiten und Frequenzen zu
    - In der Praxis nicht eingesetzt
  - Distributed Coordination Function (DCF)
    - Random Access Protokoll
    - Von allen Stations im Netz ausgeführt

DCF

- Implementiert **CSMA/CA mit Binary Exponentiell Backoff**
  - RTS / CTS zur Umgehung des Hidden Terminal Problems
  - Wartezeiten unterschiedlicher Größe (Inter Frame Spaces IFS) zwischen Operationen auf dem Kanal
    - **DIFS**: Bestimmung ob der Kanals belegt ist
    - **SIFS**: vor CTS, DATA und ACK
  - **Positives Acknowledgement** von Paketen → **Backoff bei Ausbleiben des ACK**, d.h. bei Paketverlust (ähnlich Ethernet bei der Erkennung einer Kollision)



WiMAX (1)

- **Worldwide Interoperability for Microwave Access**
- **Ähnlich WLAN aber viel größere Reichweite**
  - Eine der wenigen einigermaßen erfolgreichen **MAN Technologien**
- **IEEE Standard 802.16**
- **Zwei Modi**
  - **Fixed WiMAX: IEEE 802.16d-2004**
    - **Kein Handover zwischen APs→ fixe Positionen**
  - **Mobile WiMAX: IEEE 802.16e-2005**
    - **Handover → Mobilität**

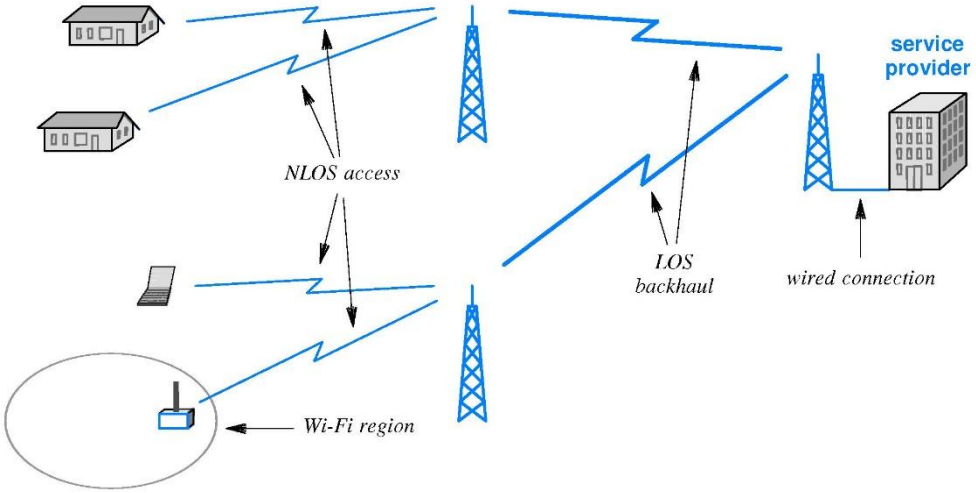
WiMAX (2)

- **Typische Einsatzszenarien:**
  - **Breitbandzugang** → Überbrückung der letzten Meile zum Kunden
  - **Backup-Internetzugang**
  - Verbindung von Standorten (**Sites)** einer Firma
  - **Backhaul** → Verbindung von Mobilfunk Basestations zum zentralen Netz des Anbieters bzw. vom Kernnetz zu abgelegenen Gebieten

WiMAX (3)

- WiMAX unterstützt Frequenzen, die
  - **Line-Of-Sight (LOS)** benötigen, d.h. die Kommunikationspartner müssen sich „sehen“
  - **Kein Line-Of-Sight (NLOS)** benötigen

- Höchste Übertragungsgeschwindigkeit mit LOS → **Backhaul**



WiMAX (4)

- Eigenschaften von WiMAX
  - Lizensiertes Spektrum
  - Maximale Radius einer WiMAX Zelle beträgt 10 Km
  - Verwendet OFDM
  - Unterstützt Quality of Service
  - 70 Mbps bei kurzen Distanzen
  - 10 Mbps bei großen Distanzen

PAN Technologien

Standard	Purpose
802.15.1a	Bluetooth technology (1 Mbps; 2.4 GHz)
802.15.2	Coexistence among PANs (noninterference)
802.15.3	High rate PAN (55 Mbps; 2.4 GHz)
802.15.3a	Ultra Wideband (UWB) high rate PAN (110 Mbps; 2.4 GHz)
802.15.4	ZigBee technology – low data rate PAN for remote control
802.15.4a	Alternative low data rate PAN that uses low power

Bluetooth

- IEEE 802.15.1
- Bluetooth als Produkt gab es schon vorher
- **Ziel: Kabelverbindungen ersetzen**
- Eigenschaften:
  - 2,4 GHz Frequenzband
  - Für kurze Distanz gedacht: bis max 10m
  - Kommunikationspartner sind **Master** oder **Slave**
  - **Master** gewährt dem Slave Zeitfenster zur Kommunikation
  - Bis zu 24 Mbps

Ultra Wideband (UWB)

- War als neue physikalische Übertragungsschicht für Bluetooth 3.0 gedacht
- Sollte sehr großen Frequenzbereich nutzen um einen hohen Durchsatz zu erzielen (480 Mpbs)
- Sehr kurze Distanz
- Standardisierungsverfahren wurde 2009 abgebrochen

ZigBee

- IEEE 802.15.4
- Drahtlose Netze mit geringem Datenaufkommen
  - Hausautomation
  - Sensornetzwerke
  - Industriesteuerung
- Frequenzbänder: 868 MHz, 915 MHz, 2,4 GHz mit 20, 40 oder 250 Kbps entsprechend
- Geringer Stromverbrauch

Infrarot

- Technologie zur Fernsteuerung
- **IrDA (Infrared Data Association)**
- IrDA hat mehrere Standards hervorgebracht, deren wichtigste Gemeinsamkeiten sind:
  - Geringer Energieverbrauch
  - Line-Of-Sight mit Reflektionen
  - Geringer Durchsatz: 2,4 Kbps bis 16 Mbps
  - Geringe Reichweite: wenige Meter

RFID

- **Radio Frequency Identification**

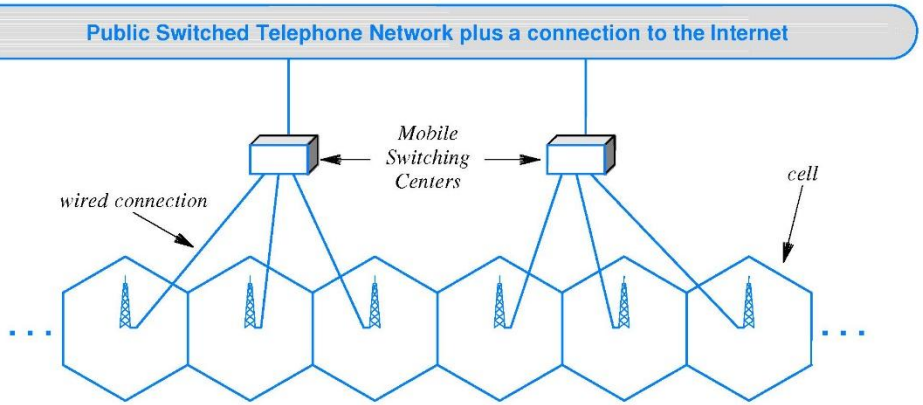
- Im Normalfall werden aus kleinen Tags Identifikationsinformation ausgelesen

- Über 100 RFID Standards für verschiedenste Einsatzzwecke
  - Passives RFID → Tag erhält notwendige Energie über das drahtlose Signal des Senders
  - Aktive RFIDs → Tag enthält eine Batterie, die Jahre hält

- Einsatz: Payment, Inventar, Identifikation, Sensoren …

Mobilfunk (1)

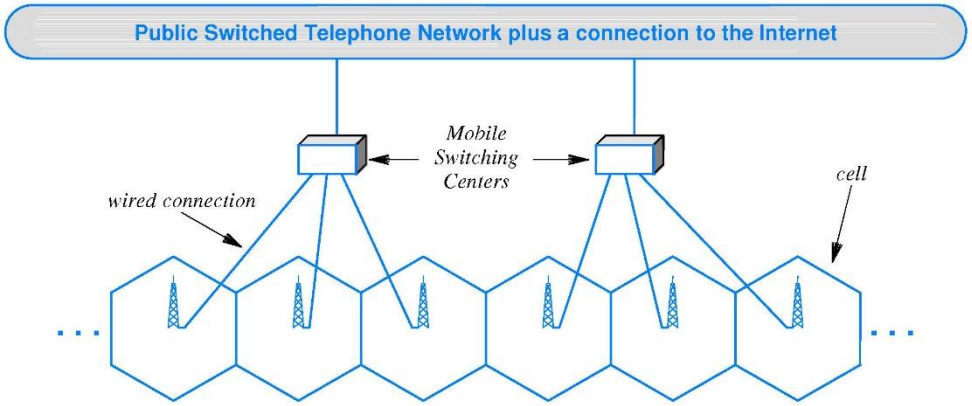
- Telekommunikationsdienste für mobile Nutzer → Zugriff mobiler Nutzer auf das Festnetz
- Heute auch allgemein Daten und Internet
- Das zu versorgende Gebiet wird in **Mobilfunkzellen** aufgeteilt → Mobilfunkzellen enthalten eine **Basisstation**, deren Antennen omnidirektional arbeiten → decken ein kreisförmiges Gebiet ab



Mobilfunk (2)

- Mehrere Basisstationen sind über ein **Mobile Switching Center (MSC)** miteinander verbunden

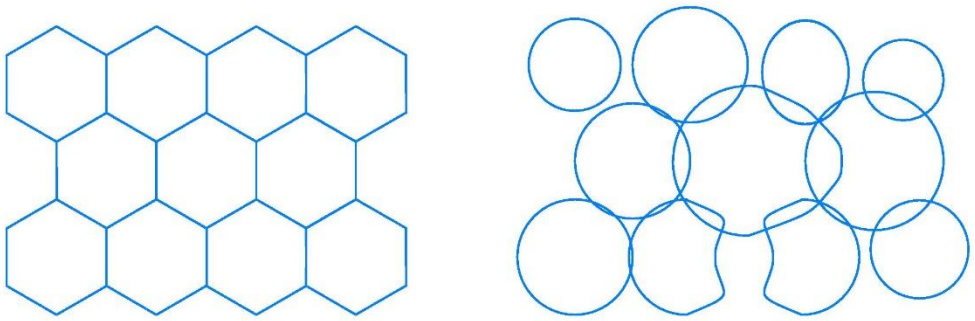
- Bei mobilen Nutzern erfolgt ein Handover von Basisstation zu Basisstationen bzw. von MSC zu MSC



Mobilfunk (3)

- Mobilfunkzellen sind im Idealfall als **Wabenstruktur** mit **hexagonaler** Netzabdeckung geplant (a)

- In der Realität stören Hindernisse, bauliche Gegebenheiten und elektrische Störungen die Signalausbreitung → **Suboptimale Netzabdeckung mit teilweisen Lücken** (b)

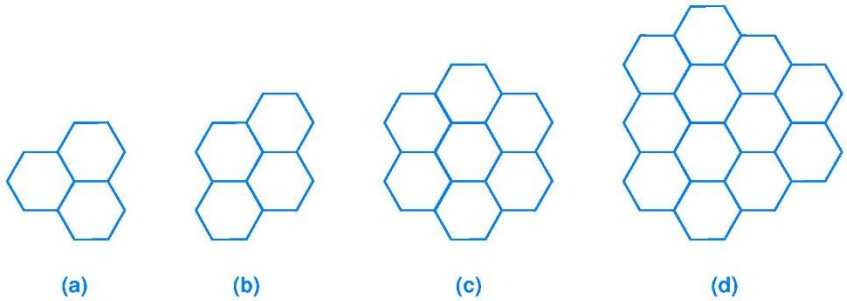


Mobilfunk (4)

- **Zellgröße wird auch vor allem von der Bevölkerungsdichte bestimmt** → jede Basisstation kann nur eine maximale Anzahl an Nutzern unterstützen
- Hohe Dichte an Basistationen in Städten → kleine Zellen
- Im ländlichen Raum große Zellen und wenig Basisstationen
- **Mikro-, Pico- oder Femtozellen**
  - Kleine, unauffällige Zellen mit geringer Größe aber auch geringer Netzabdeckung
  - An Verkehrsschwerpunkten, in Gebäuden, in U-Bahnen, in historischen Stadtteilen, …
  - Erweitern das Hauptnetz kostengünstig und flexibel

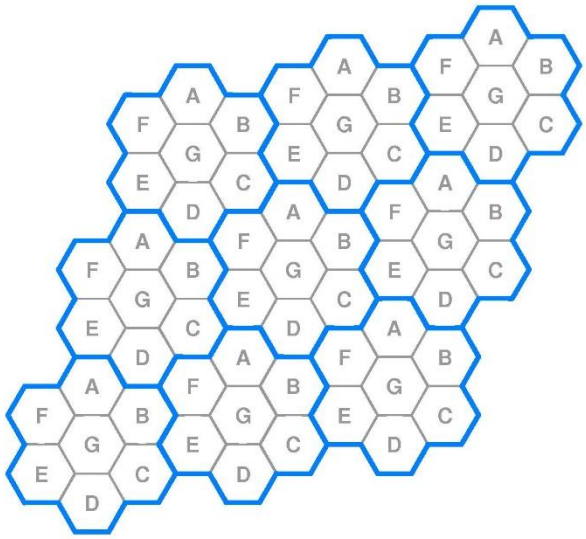
Mobilfunk (5)

- Nutzen benachbarte Mobilfunkzellen gleiche Frequenzen kommt es zu **Interferenz** → Bei der Netzplanung zu berücksichtigen
- Netzplaner verwenden hauptsächlich feste Muster der Größe 3, 4, 7 und 12 → Jede Zelle im Muster eine andere Frequenz
- Indem man diese Muster immer wieder aneinander legt kann man die ganze 2D Ebene füllen



Mobilfunk (6)

- Bespielhafte Netzplanung mit dem Basismuster der Größe 7



Geschichte des Mobilfunk (1)

- 1970s: 1G Netze
  - Analoge Signale
- Seit 1990s: 2G und 2,5G Netze
  - Digitale Signale
  - Viele Länder-spezifische Standards
    - Deutschland: GSM mit TDMA
    - USA: Motorola mit dem TDMA Systeme iDEN, andere Mobilfunkbetreiber IS-95A mit CDMA
    - Japan: PDC mit TDMA
  - Erweiterungen wie **EDGE** ermöglichten höhere Datenraten bis zu 473,6 Kbps bzw. 1 Mbps mit **EDGE Evolution**

Geschichte des Mobilfunk (2)

- Seit 2000s: 3G und 3,5G Netze
  - Ziele:
    - Schnelle Datenübertragungen
    - Mobiles Internet
    - Weltweites Roaming
  - Weltweite Zusammenarbeit um kompatible Standards zu schaffen → **UMTS** mit vielen Ideen aus den ursprünglichen 2G Netzen, z.B. **Wideband CDMA**
  - UMTS mit **HSPA** immer weiter verbessert
  - **CDMA2000** als UMTS-Alternative in Nordamerika → hohe Datenraten durch **EVDO**

Geschichte des Mobilfunk (3)

- Überblick über die Standards der 2G und 3G Netze

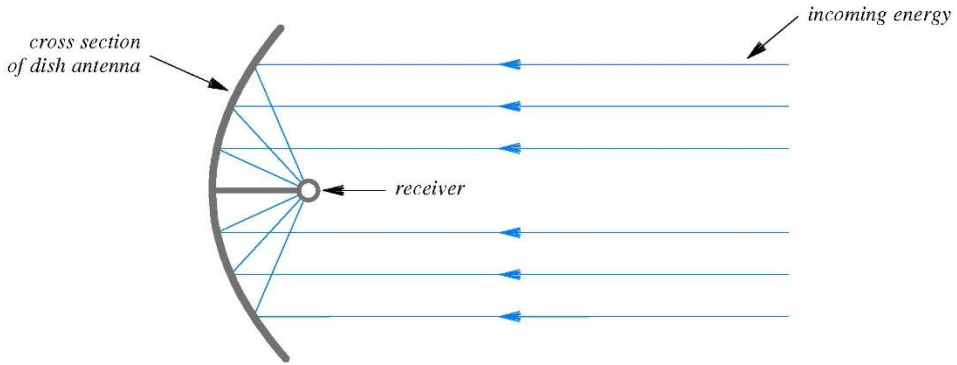
Approach	Standard
GSM	GSM, GPRS, EDGE (EGPRS), EDGE Evolution, HSCSD
CDMA	IS-95A, IS-95B
TDMA	IDEN, IS-136, POC
WCDMA	UMTS, HSDPA
CDMA	1xRTT, EVDO, EVDV

Geschichte des Mobilfunk (4)

- Seit 2008: 4G Netze
  - Ziel: Real-Time Multimedia
  - Gemeinsame Spezifikation für 4G Netze: **International Mobile Telecommunications Advanced (IMT_Advanced)**
    - **Bis zu 1 Gbps im Download**
  - Früher Protokolle der Hersteller erfüllten diese Spezifikation nicht (z.B. **HSPA+, HTC Evo 4G, WiMAX, LTE**) → Durften aber als 4G beworben werden
  - Erst neue Standards **LTE Advanced** und **WiMAX Advanced** sind echte 4G Standards
  - Neu: auch Sprache über Packet Switched Networks!!

VSAT Satelliten (1)

- **Very-Small-Aperture Terminal**
- Bestandteile:
  - **Kleine Parabolantenne mit max. 3m Durchmesser**
  - **Sendefähiger LNB**
- Zweiwegekommunikation
  - Geostationäre Satelliten und Ausrichtung der Antenne auf den Satelliten
- Verwendung: Verbindung von Filialen einer Firma zur Abrechnung, Bezahlung; aber auch Internet



VSAT Satelliten (2)

- Überblick der genutzten Frequenzbänder mit Größe der Parabolantenne, Signalstärke und Beeinflussbarkeit durch das Wetter

Band	Frequency	Footprint	Signal Strength	Effect Of Rain
C Band	3 - 7 GHz	Large	Low	Medium
Ku	10 - 18 GHz	Medium	Medium	Moderate
Ka	18 - 31 GHz	Small	High	Severe

GPS (1)

- **Global Positioning System (GPS)** liefert sehr genaue Zeit- und Ortsinformationen
- Keine Kommunikationstechnologie per se, aber sehr wichtig für schnelle mobile Netze
- Eigenschaften:
  - Für normale Konsumenten eine Genauigkeit bis 2m
  - > 30 Satelliten
  - Satelliten in 6 verschiedenen Orbits
  - Zeitsynchronisation für verschiedene Kommunikationsnetze

GPS (2)

- GPS-Satelliten senden kodiert ihre Position und Zeit
- Aus der Signallaufzeit des Signals kann ein Nutzer die Entfernung des Satelliten berechnen
- Mit den Signalen von 3 Satelliten kann die genaue Position auf der Erde bestimmt werden

Software Defined Radio (1)

- Klassische Netzgeräte: Antennen und Transceiverhardware sind auf ein bestimmtes Protokoll zugeschnitten
- Resultat: Smartphones besitzen mehrere Chips mit redundanten Hardwarebausteinen
  - LTE
  - NFC
  - Bluetooth
  - Wifi
- Alternative: **Software Defined Radio** → Kommunikationshardware ist **programmierbar**
  - **Programmierbare DSPs: Modulation, Signalcodierung**
  - **Programmierbare analoge Filter: Frequenzauswahl**
  - **Mehrere Antennen**

Software Defined Radio (2)

- Durch **Software Defined Radio** programmierbare Features

Feature	Description
Frequency	The exact set of frequencies used at a given time
Power	The amount of power the transmitter emits
Modulation	The signal and channel coding and modulation
Multiplexing	Any combination of CDMA, TDMA, FDMA and others
Signal Direction	Antennas can be tuned for a specific direction
MAC Protocol	All aspects of framing and MAC addressing

Software Defined Radio (3)

- Im militärischen Umfeld im Einsatz
- Für private Zwecke Experimentierkits bestellbar
- **Problem: Umgehung der Spezifikationen**
  - **Beliebige Frequenzbänder nutzbar**
  - **Umgehung von QoS Verfahren und Fairness Mechanismen**
  - **Hardware-Viren**
  - **…**
- **„With great power comes great responsibility”**

Zusammenfassung

- Drahtlose Netze existieren als PAN, LAN, MAN und WAN
- IEEE hat viele drahtlose Protokolle standardisiert
  - IEEE 802.11 für WLAN
  - IEEE 802.15 für PAN
- WLAN kann Infrastrukturmodus oder im Ad hoc Modus
- WLAN nutzt CSMA/CA
- PAN Protokolle: Bluetooth, UWB, ZigBee, IrDA
- RFID Tags zur Identifikation
- Mobilfunk basiert auf Funkzellen in Wabenstruktur
- VSAT Satelliten verbinden Filialen eines Unternehmens
- Software Defined Radio ermöglicht programmierbare Netzhardware