

Wireless Networking

1. Drahtlose Netze

1.1 Medienzugriffsverfahren

1.2 802.11 WLAN

1.3 Bluetooth

1.4 802.16 WIMAX

1.5 LTE, 5G

1.6 IoT



Zum Inhalt

In diesem Kapitel widmen wir uns dem fortgeschrittenen Thema der Funk-Netze, welche inzwischen eine sehr weit verbreitete Netzwerktechnologie sind.

Sie lernen dabei die Kernprobleme und -technologien der Funkübertragung kennen, genauso wie ausgewählte Beispiele von WLAN-Lösungen.

Das zugehörige Kapitel im Tanenbaum ist 4. Ferner empfohlen sei: Jochen Schiller: *Mobilkommunikation*. 2. Auflage, Pearson Studium, 2003.



1. Drahtlose Netze

Drahtlose Kommunikationsnetze erleben wir allgegenwärtig:

- Leuchttürme, Morsen, Buschtrommeln, opt. Telegraphen, ...
- Fernbedienungen an Heimgeräten
- Satellitenkommunikation
- Mobiltelefone: A/B/C/D/E-Netze, Dect, 3G (UMTS)
- Funknetze: Richtfunk, WLAN, Bluetooth, LoRa ...
- Optische Übertragungen: Infrarot (Links, IrDA), LaserLinks

Die Techniken drahtloser Netze sind speziell ausgeprägt von

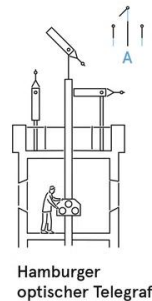
dem Medium ‚Luft‘ – der Regulierung – dem Mobilitätsparadigma

Die Darstellungen dieses Kapitels folgen in Teilen den Materialien von J. Schiller, FU Berlin

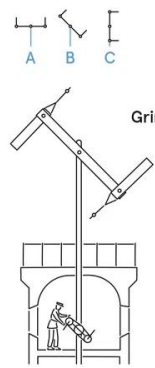
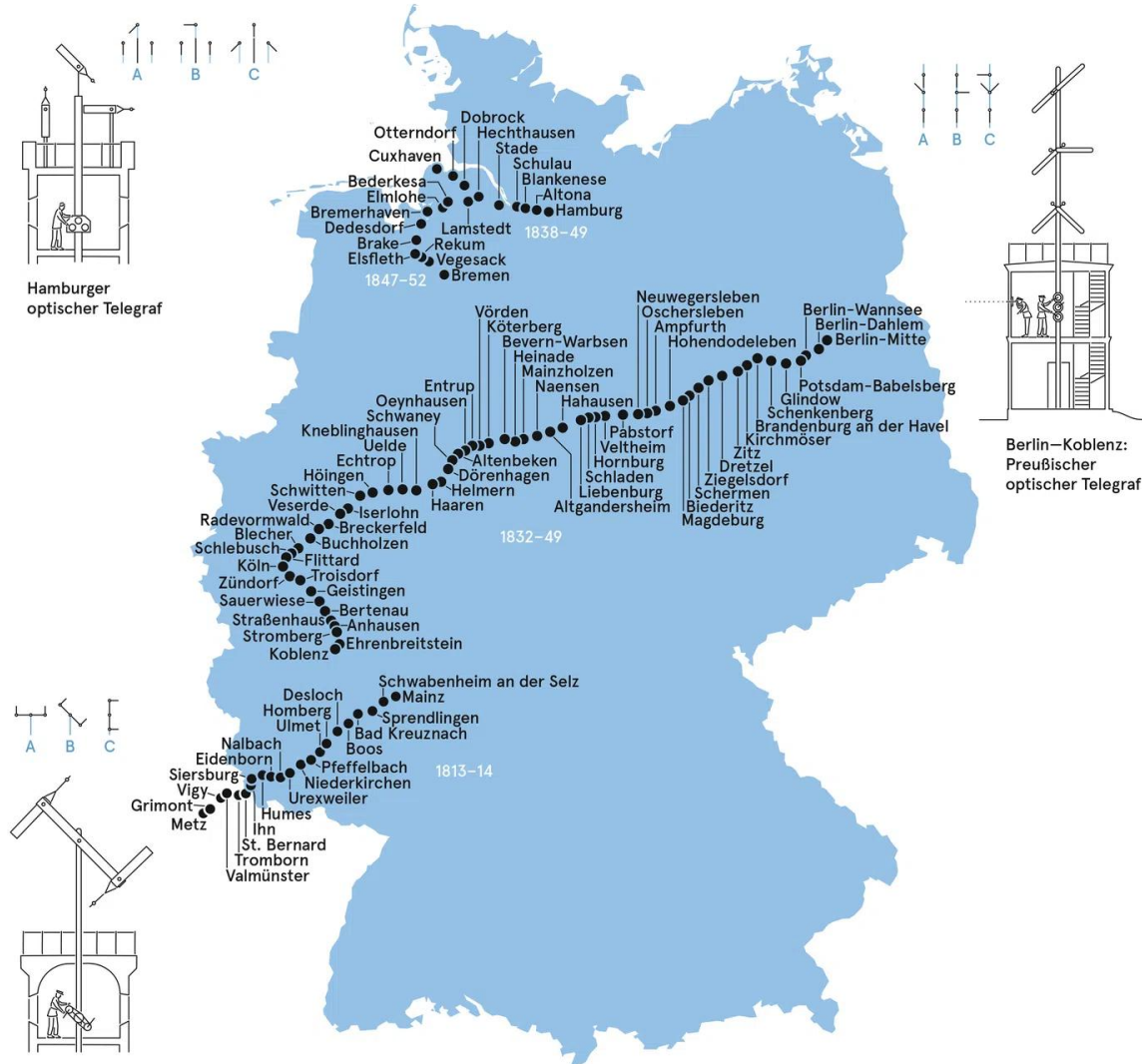


Optische Telegraphenstrecken

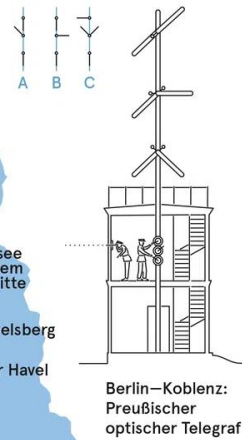
- Fröhe Netzwerke
- Weitverkehrs-kommunikation
- Vor mehr als 200 Jahren
- Voraussetzung: Erfindung des Fernrohrs (1608)



Hamburger optischer Telegraf



Metz-Mainz: Optischer Telegraf nach C. Chappe



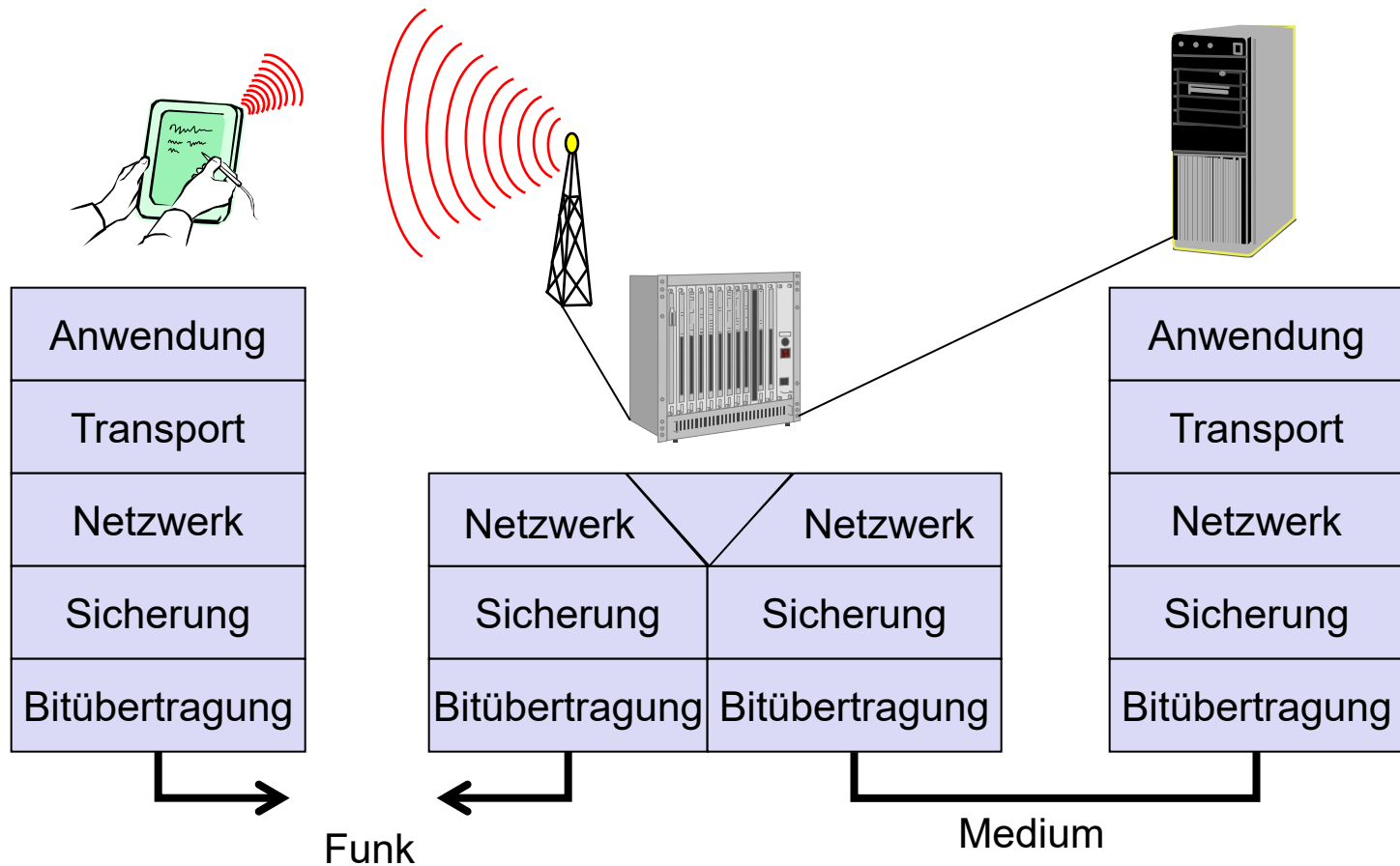
Berlin-Koblenz: Preußischer optischer Telegraf

Netzabdeckung in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts – die Linien optischer Telegrafen

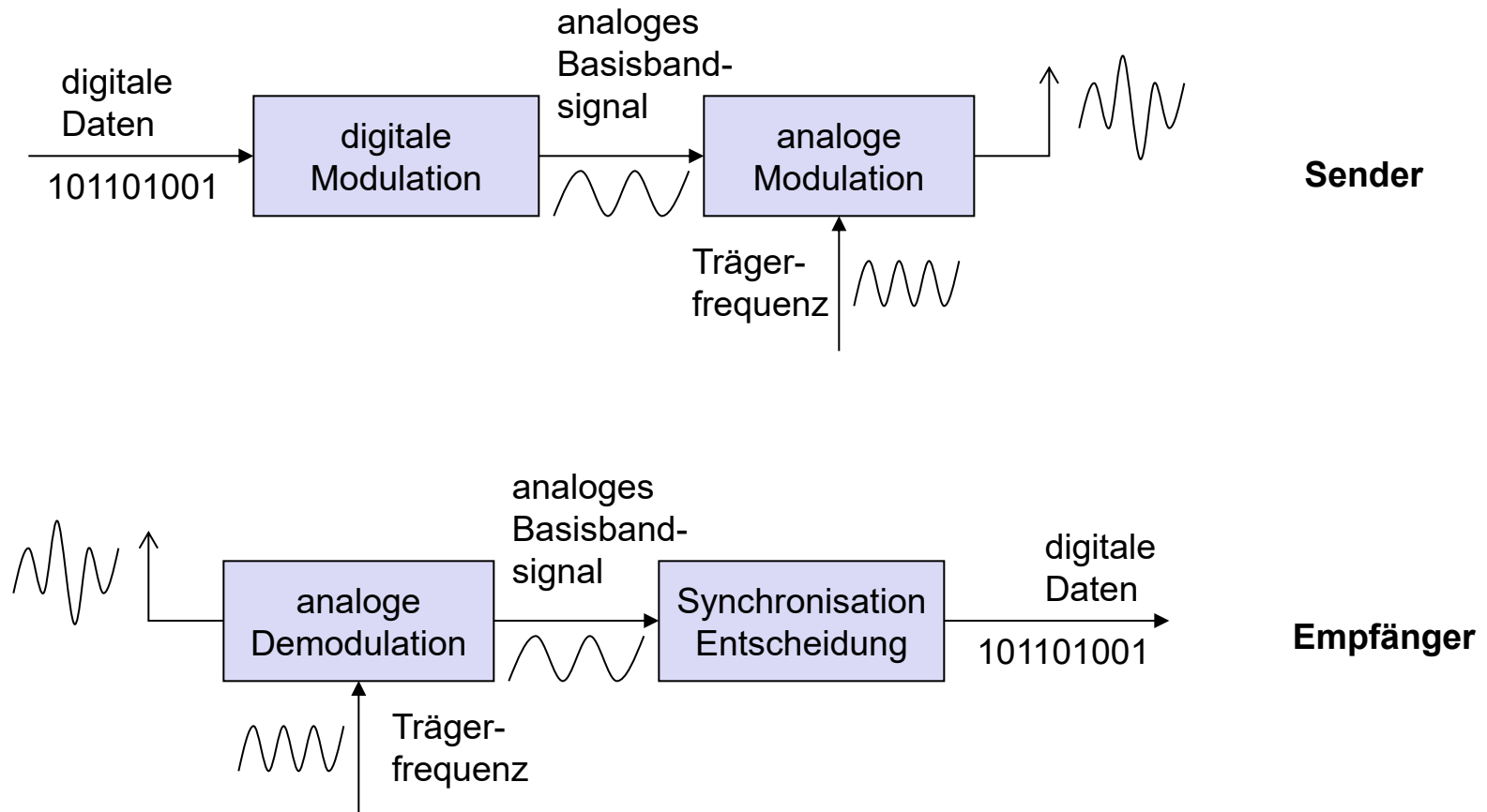
1. Wireless Accesspoints



1. Referenzmodell



1. Modulation und Demodulation



Sinusförmige Trägerschwingung als spezielles periodisches Signal:

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



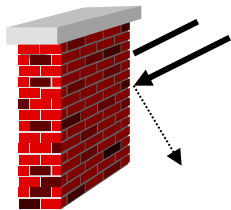
1. Signalausbreitung

Ausbreitung im freien Raum grundsätzlich geradlinig (wie Licht)

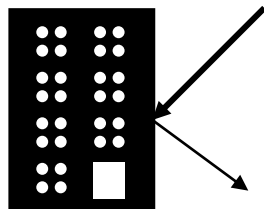
Empfangsleistung nimmt mit $1/d^2$ ab (d = Entfernung Sender : Empfänger)

Empfangsleistung wird außerdem u.a. beeinflusst durch

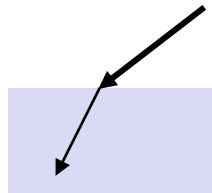
- Freiraumdämpfung (frequenzabhängig)
- Abschattung durch Hindernisse
- Reflexion an großen Flächen
- Refraktion in Abhängigkeit der Dichte eines Mediums
- Streuung (scattering) an kleinen Hindernissen
- Beugung (diffraction) an scharfen Kanten



Abschattung



Reflexion



Refraktion



Streuung



Beugung

1. Signalausbreitungsbereiche

Übertragungsbereich

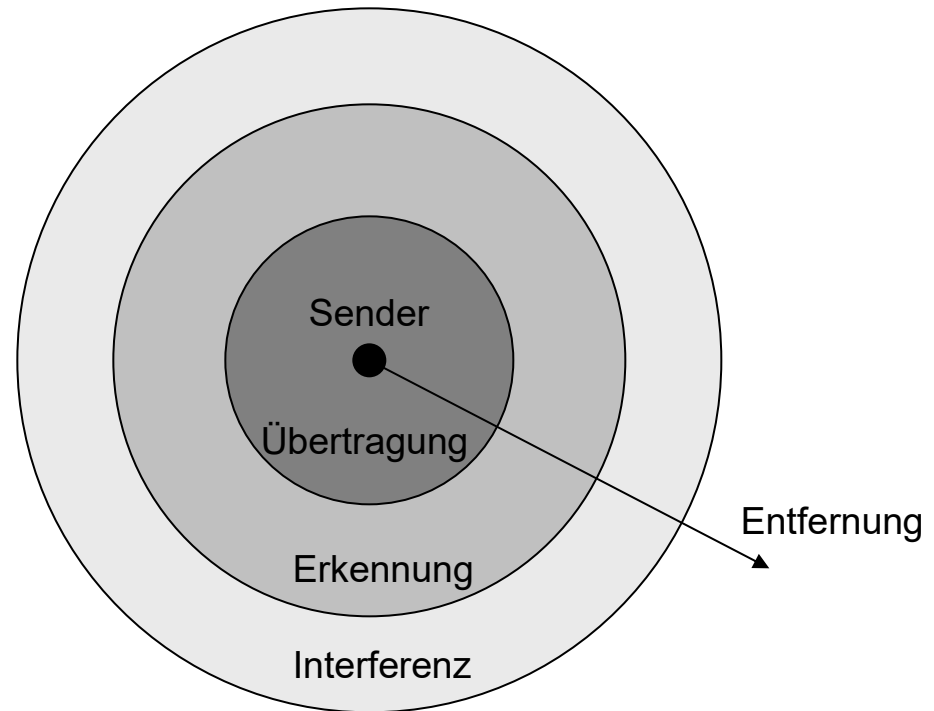
- Kommunikation möglich
- niedrige Fehlerrate

Erkennungsbereich

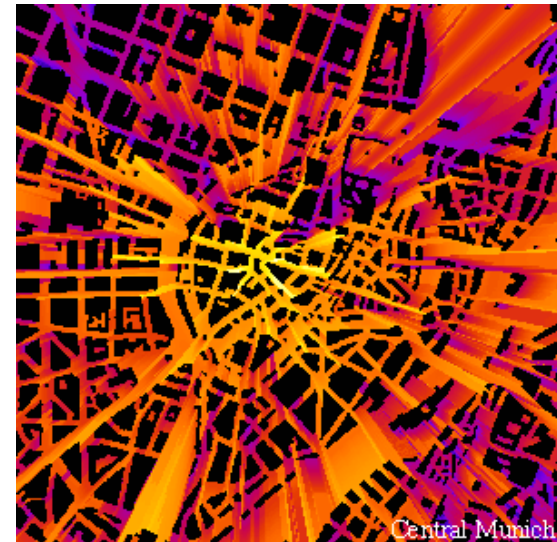
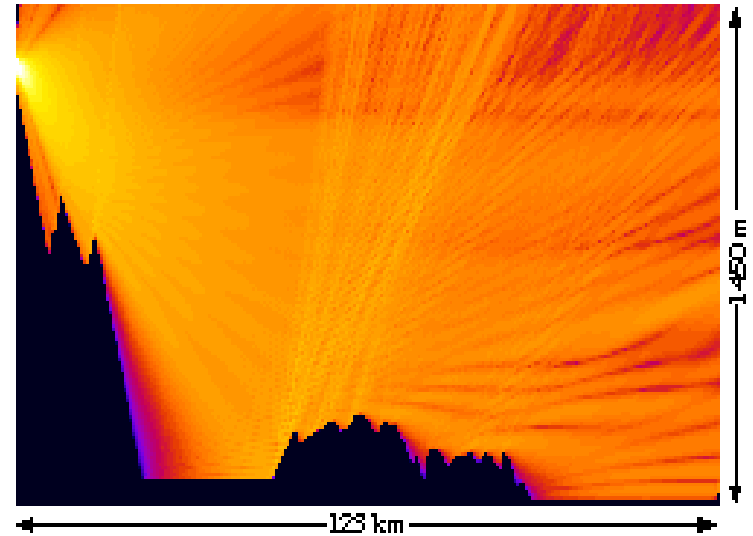
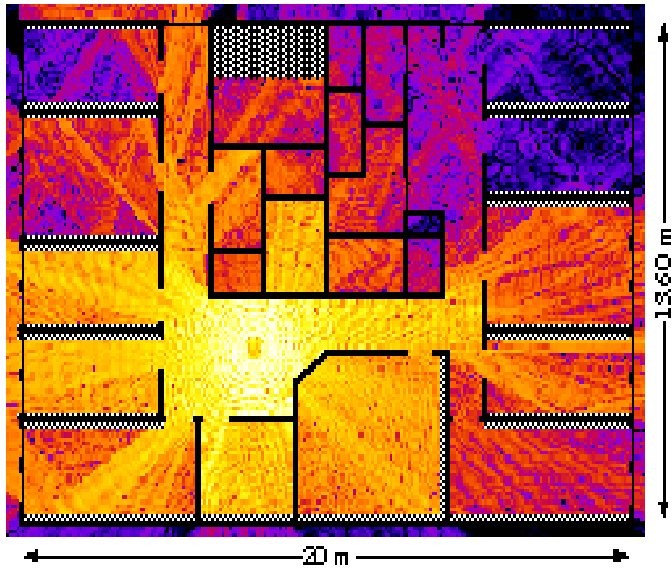
- Signalerkennung
- keine Kommunikation möglich

Interferenzbereich

- Signal kann nicht detektiert werden
- Signal trägt zum Hintergrundrauschen bei



1. Praxisbeispiele



1.1 Medienzugriffsverfahren

Beschränkte Frequenzbänder bedingen geteiltes Medium ‚Luft‘

Aber: Die Signalausbreitung in der Luft geschieht (im Gegensatz zum Kabel) nicht homogen:

- Signalstärke nimmt quadratisch mit der Entfernung ab
- Sender können einander übertönen
- Kollisionen geschehen beim Empfänger, CS & CD beim Sender

Andere Zugriffsverfahren werden benötigt, z.B. Multiplexing:

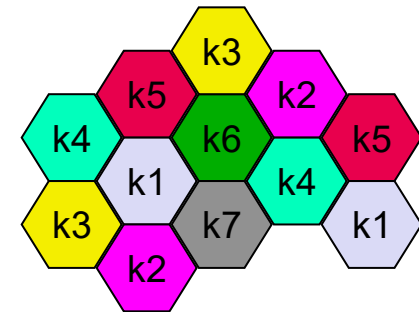
- SDMA (Space Division Multiple Access)
- FDMA (Frequency Division Multiple Access)
- TDMA (Time Division Multiple Access)
- CDMA (Code Division Multiple Access)



1.1 Space Division Multiplexing: Frequenzanordnung

Frequenzen können nur bei genügend großem Abstand der Zellen bzw. der Basisstationen wiederverwendet werden

Modell mit 7 Frequenzbereichen:



Feste Kanalzuordnung:

- bestimmte Menge von Kanälen fest gewisser Zelle zugeordnet
- Problem: Wechsel in Belastung der Zellen

Dynamische Kanalzuordnung:

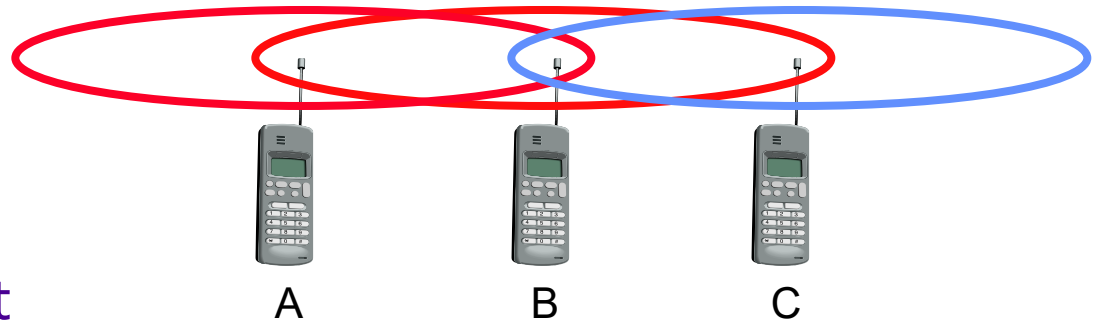
- Kanäle einer Zelle werden nach bereits zugeordneten Kanälen der benachbarten Zellen gewählt
- mehr Kapazität in Gebieten mit höherer Nachfrage
- auch Zuordnung aufgrund von Interferenzmessungen möglich



1.1 Versteckte und „ausgelieferte“ Endgeräte

Verstecktes Endgerät

- ▶ A sendet zu B, C empfängt A nicht mehr
- ▶ C will zu B senden, Medium ist für C frei (CS versagt)
- ▶ Kollision bei B, A sieht dies nicht (CD versagt)
- ▶ A ist „versteckt“ für C



„Ausgeliefertes“ Endgerät

- ▶ B sendet zu A, C will zu irgendeinem Gerät senden (nicht A oder B)
- ▶ C muss warten, da CS ein „besetztes“ Medium signalisiert
- ▶ da A aber außerhalb der Reichweite von C ist, ist dies unnötig
- ▶ C ist B „ausgeliefert“



1.1 MA/CA - Kollisionsvermeidung

MACA (Multiple Access with Collision Avoidance) setzt kurze Signalisierungspakete zur Kollisionsvermeidung ein

- ▶ **RTS** (request to send): Anfrage eines Senders an einen Empfänger bevor ein Paket gesendet werden kann
- ▶ **CTS** (clear to send): Bestätigung des Empfängers sobald er empfangsbereit ist

Signalisierungspakete beinhalten:

- ▶ Senderadresse
- ▶ Empfängeradresse
- ▶ Paketgröße

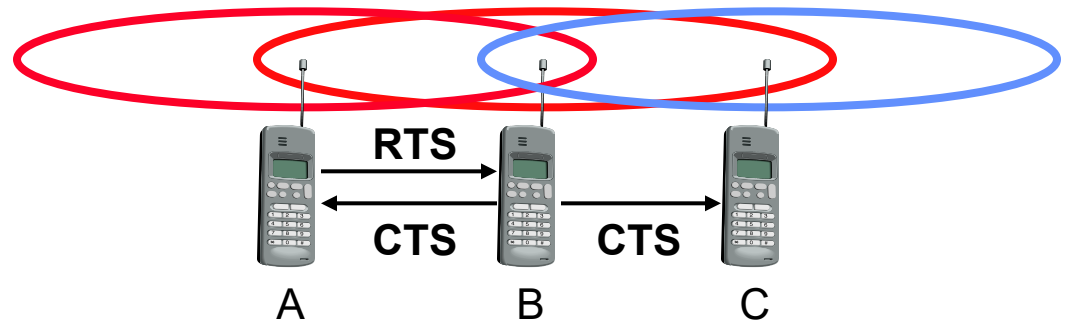
Varianten dieses Verfahrens finden in IEEE802.11 als **DFWMAC** (Distributed Foundation Wireless MAC) Einsatz



1.1 MACA - Wirkung

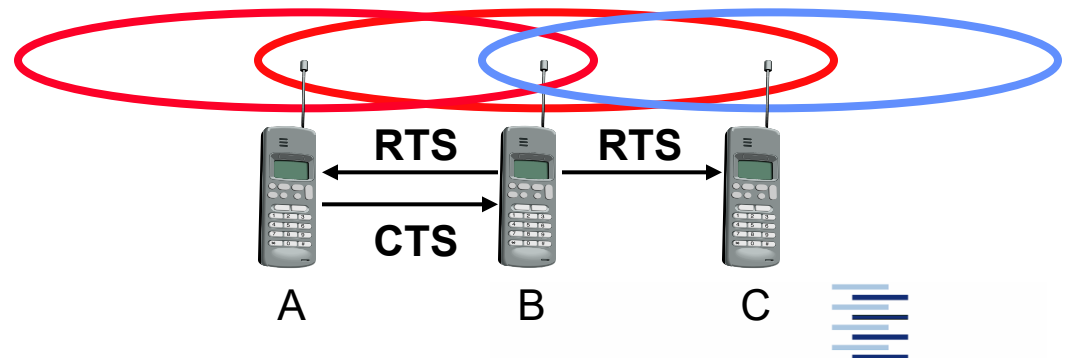
Vermeidung des Problems versteckter Endgeräte

- A und C wollen zu B senden
- A sendet zuerst RTS
- C wartet, da es das CTS von B hört

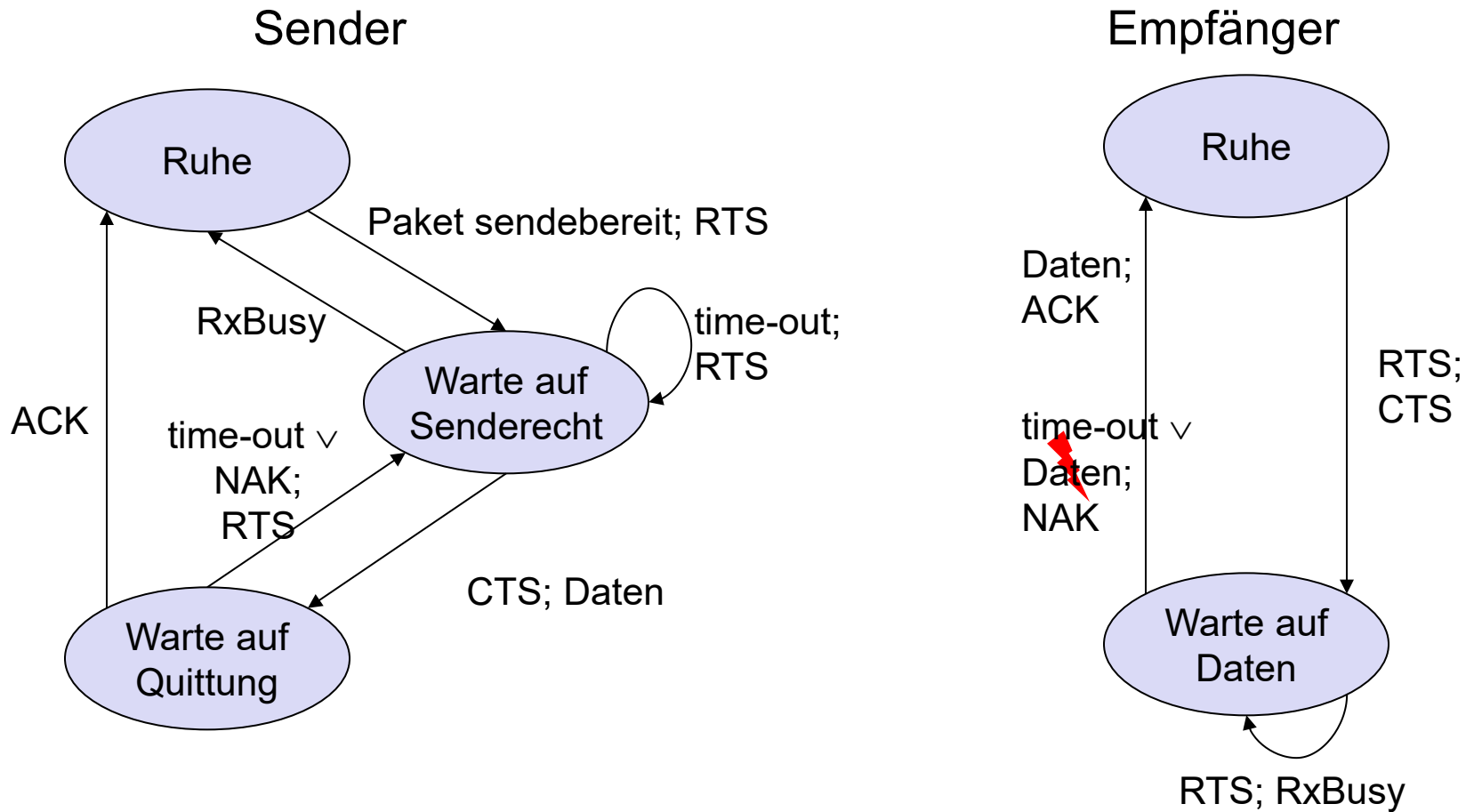


Vermeidung des Problems „ausgelieferter“ Endgeräte

- B will zu A, C irgendwohin senden
- C wartet nun nicht mehr unnötig, da es nicht das CTS von A empfängt



1.1 MACA-Variante: DFWMAC in IEEE802.11

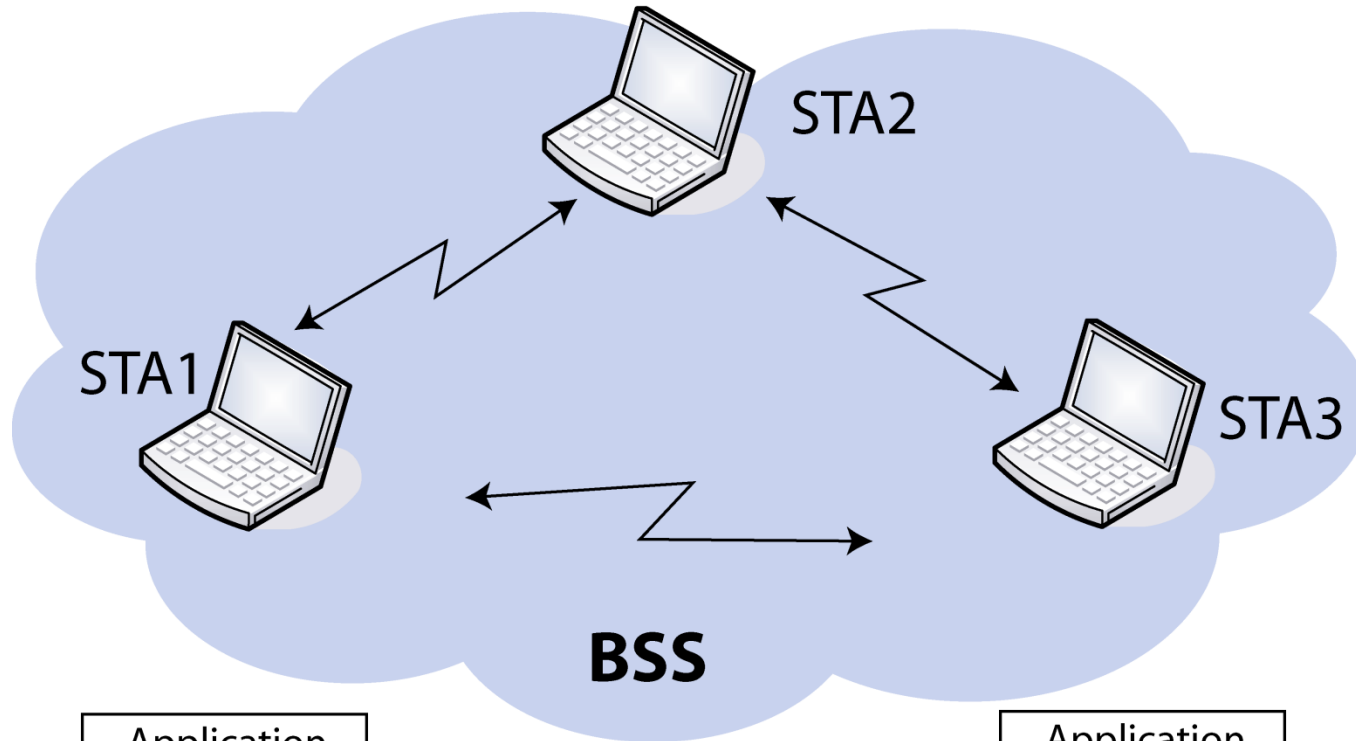


ACK: positive Empfangsbestätigung
 NAK: negative Empfangsbestätigung

RxBusy: Empfänger beschäftigt



1.2 - 802.11: Ad Hoc Netzwerk



Application
TCP
IP
802.11 MAC
802.11 PHY

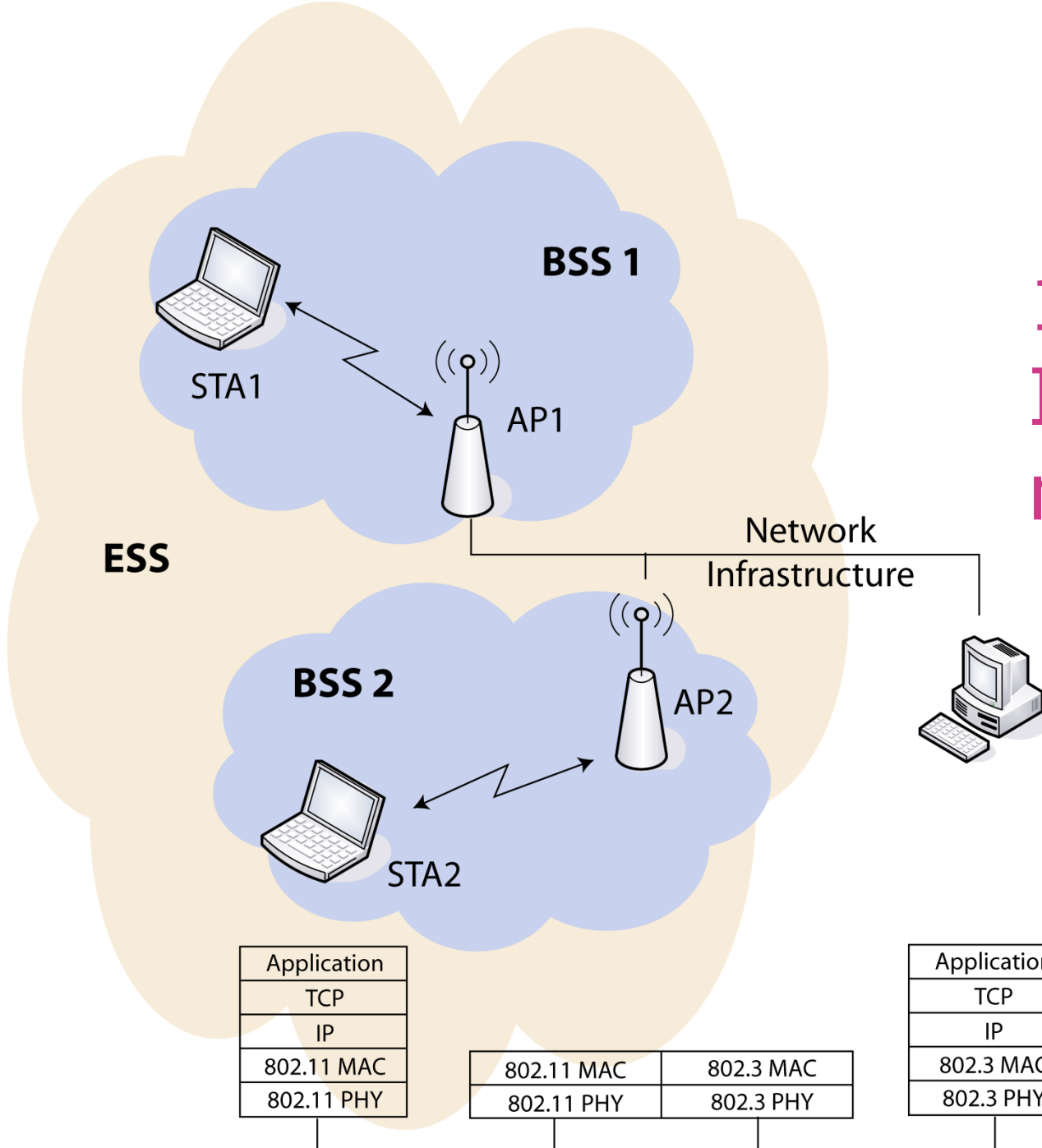
Base Service Set

Application
TCP
IP
802.11 MAC
802.11 PHY



1.2 - 802.11 Infrastruktur- netzwerke

Verbindung mittels
Extended Service Set



1.2 - 802.11

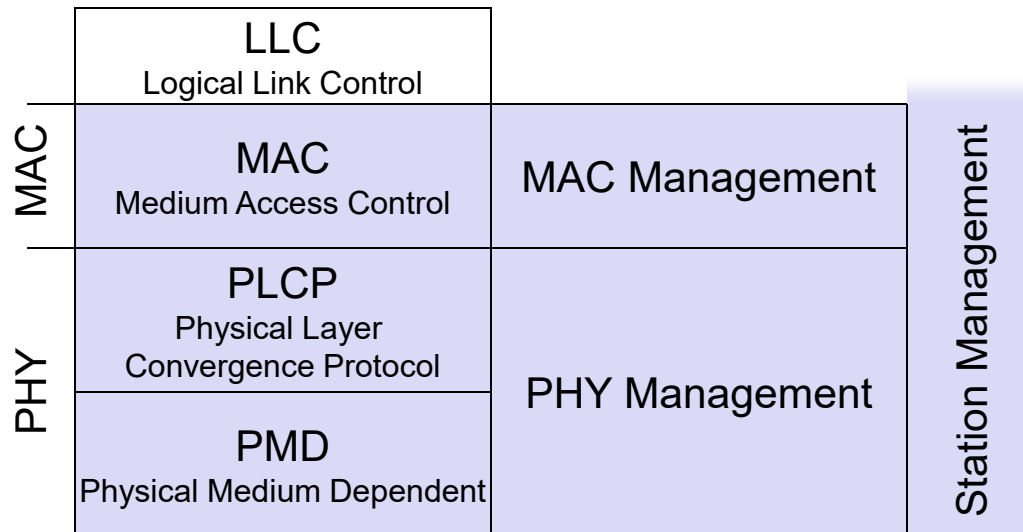
Schichten und Funktionen

MAC

- ▶ Zugriffsmechanismus, Fragmentierung, Verschlüsselung

MAC Management

- ▶ Synchronisierung, Roaming, MIB, Power



PLCP

- ▶ Clear Channel Assessment Signal (Carrier Sense)

PMD

- ▶ Modulation, Codierung

PHY Management

- ▶ Kanalwahl, MIB

Station Management

- ▶ Koordination der Management-Funktionen



1.2 - 802.11 - Physikalische Schicht

3 Varianten: 2 Funk (vornehmlich im 2,4 GHz-Band),
1 IR Datenrate 1 bzw. 2 Mbit/s

FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum)

- spreizen, entspreizen, Signalstärke, nur 1Mbit/s

DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum)

- DBPSK-Modulation für 1 Mbit/s (Differential Binary Phase Shift Keying), DQPSK für 2 Mbit/s (Differential Quadrature PSK)
- Präambel eines Rahmens immer mit 1Mbit/s, dann erfolgt evtl. umschalten
- 11 Mbit/s HR-DSSS in 802.11b, 54 Mbit/s OFDM in 802.11a
- max. Sendeleistung 1 W (USA), 100 mW (EU), min. 1 mW

Infrarot

- 850-950nm, diffuses Licht, typ. 10 m Reichweite
- Trägererkennung, Energieerkennung, Synchronisation



1.2 - 802.11 MAC-Schicht: Distributed Foundation Wireless MAC (DFWMAC)

Verkehrsarten:

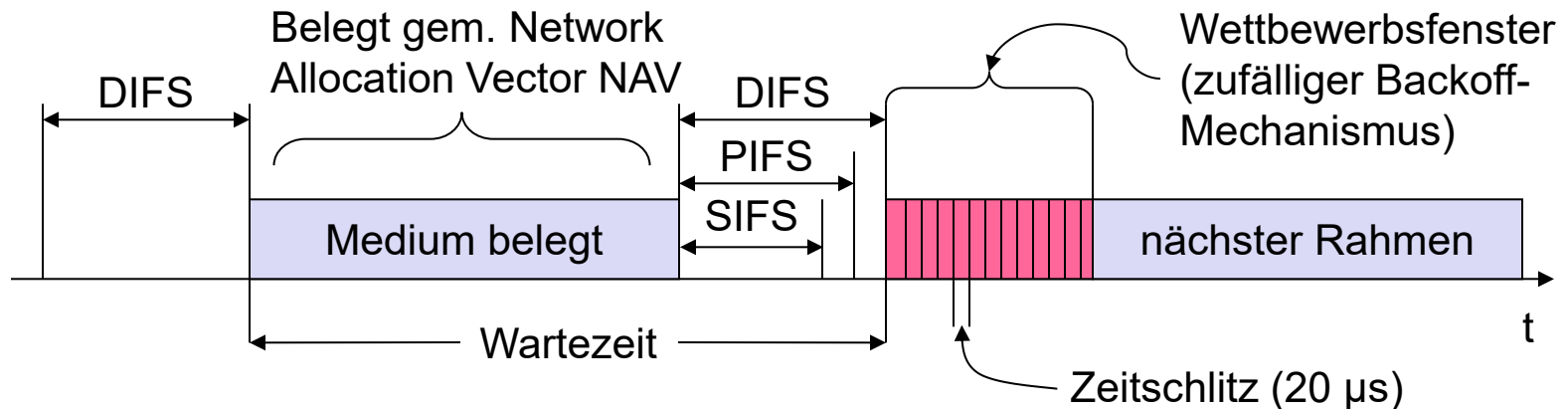
- Asynchroner Datendienst (standard)
 - Austausch von Datenpaketen auf „best-effort“-Basis
 - Unterstützung von Broadcast und Multicast
- Zeitbegrenzte Dienste (optional)
 - implementiert über PCF (Point Coordination Function)

Zugriffsarten:

- DFWMAC-DCF CSMA/CA (standard)
 - Kollisionsvermeidung durch zufälligen „backoff“-Mechanismus
 - Mindestabstand zwischen aufeinanderfolgenden Paketen
 - Empfangsbestätigung durch ACK (nicht bei Broadcast)
- DFWMAC-DCF mit RTS/CTS (optional)
 - Distributed Foundation Wireless MAC
 - Vermeidung des Problems „versteckter“ Endgeräte
- DFWMAC-PCF (optional)
 - Polling-Verfahren mit einer Liste im Access Point



1.2 - 802.11 - CSMA/CA-Verfahren



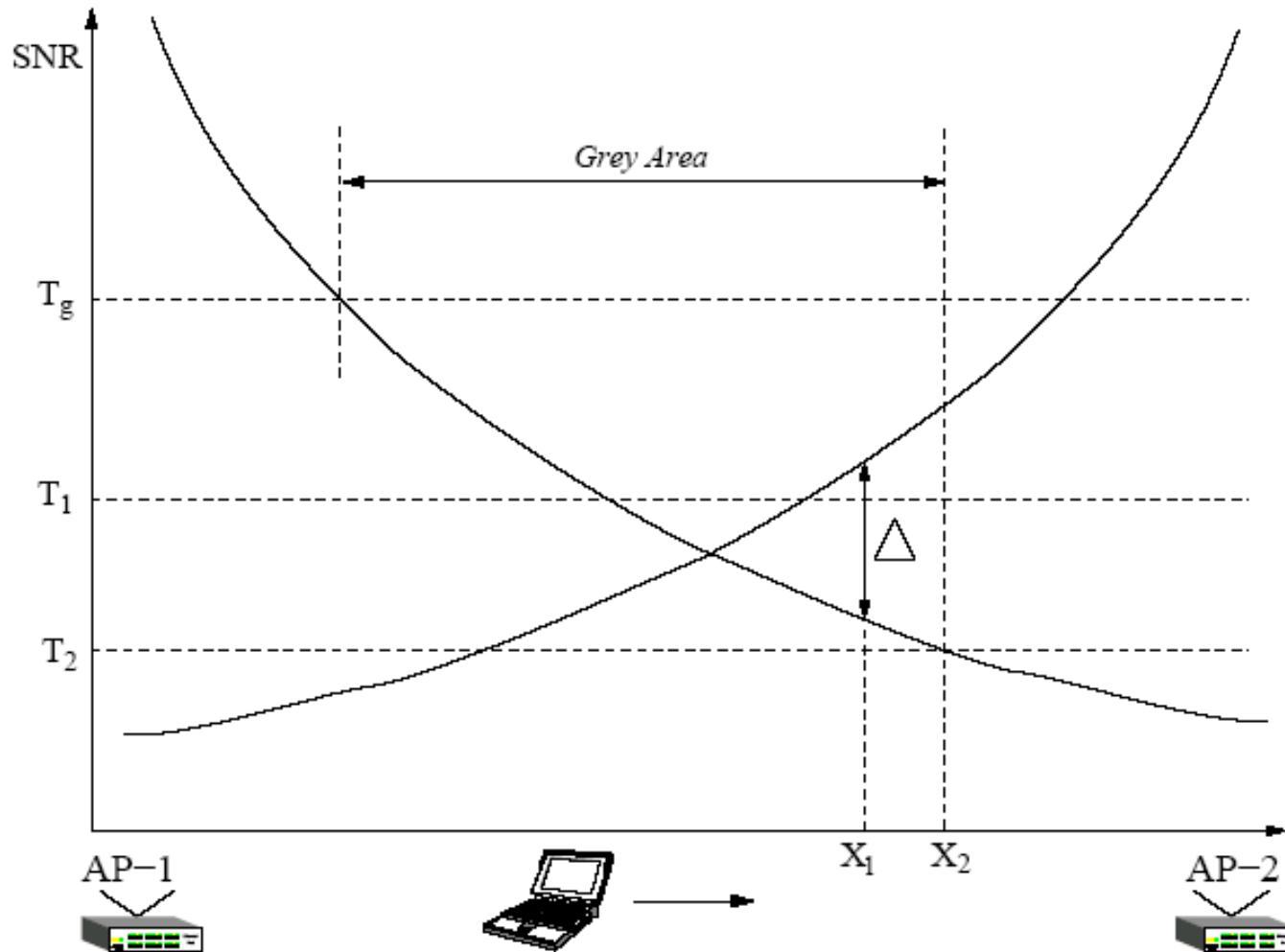
- Sendewillige Station hört das Medium ab (Carrier Sense basierend auf CCA, Clear Channel Assessment)
- Ist das Medium für die Dauer eines Inter-Frame Space (IFS) frei, wird gesendet (IFS je nach Sendertyp gewählt)
- Ist das Medium belegt, wird auf einen freien IFS gewartet und dann zusätzlich um eine zufällige Backoff-Zeit verzögert (Kollisionsvermeidung, in Vielfachen einer Slot-Zeit)
- Wird das Medium während der Backoff-Zeit von einer anderen Station belegt, bleibt der Backoff-Timer so lange stehen (fairer Wettbewerb)

1.2 - 802.11: Roaming

Keine oder schlechte Verbindung? - Dann:

- ▶ Scanning
 - ▶ Abtasten der Umgebung (Medium nach „Leuchtfener“ von APs abhören oder Probe ins Medium senden und Antwort abwarten)
- ▶ Reassociation Request
 - ▶ Station sendet Anfrage an AP(s)
- ▶ Reassociation Response
 - ▶ bei Erfolg, d.h. ein AP hat geantwortet, nimmt Station nun teil
 - ▶ bei Misserfolg weiterhin Scanning
- ▶ AP akzeptiert Reassociation Request
 - ▶ Anzeigen der neuen Station an das Distribution System
 - ▶ Distribution System aktualisiert Datenbestand (d.h. wer ist wo)
 - ▶ normalerweise wird alter AP vom Distribution System informiert

1.2 Handoff

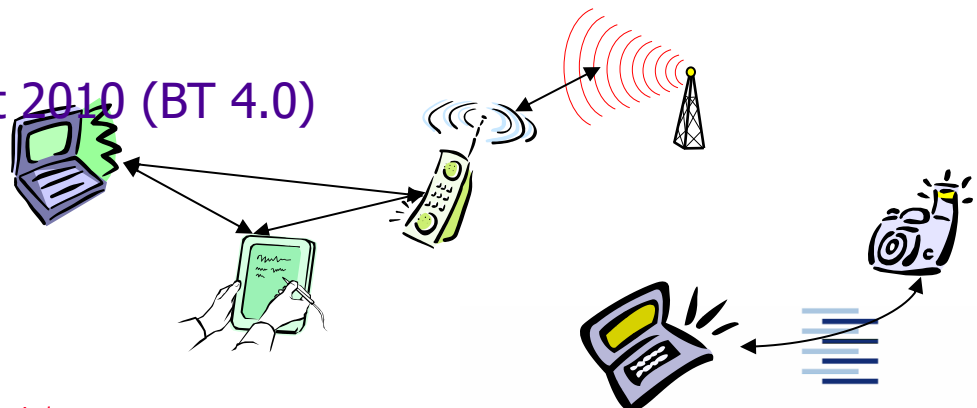
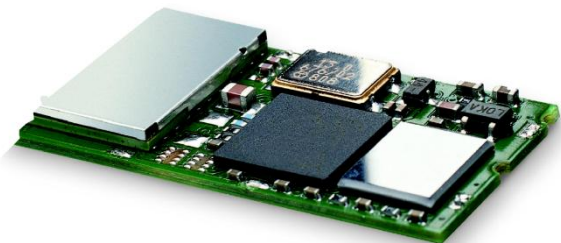


1.2 Ethernet Wireless Standards

1997	max. 2 Mbit/s	2,4 GHz	802.11
1999	max. 11 Mbit/s	2,4 GHz	802.11b
2000	max. 54 Mbit/s	5 GHz	802.11a
2003	max. 54 Mbit/s	2,4 GHz	802.11g
2003	max. 54 Mbit/s	5 GHz	802.11h
2005	QoS via PCF		802.11e
2009	4 x 4 MIMO, ~ 65 – 600 Mbit/s	2,4 or 5 GHz	802.11n
2010	Vehicular Environment (WAVE)	5 GHz	802.11p
2013	8 x 8 MIMO, ~ 78 – 3.200 Mbit/s	5 GHz	802.11ac
2021	WiFi 6E – bis ca, 9 Gbit/s	2.4/5/6 GHz	802.11ax
2024	WiFi 7 – bis ca. 23 Gbit/s	2.4/5/6 GHz	802.11be

1.3 Bluetooth

- Universelles Funksystem für drahtlose Ad-hoc-Verbindungen
- Verknüpfung von Computer mit Peripherie, tragbaren Geräten, PDAs, Handys – im Wesentlichen ein leistungsfähigerer IrDA-Ersatz
- Eigene Netzwerkschicht: Definiert 13 Service Profiles (z.B. Fax, Fon, File Transfer, ...)
- Eingebettet in andere Geräte, Ziel: 5€/Gerät (2002: 50€/USB Bluetooth)
- Kleine Reichweite (10 m), niedrige Leistungsaufnahme, lizenzfrei im 2,45 GHz-ISM-Band (Interferenzgefahr mit 802.11), ca. 1 Mbit/s Bruttodatenrate
- SIG (Ericson et al), seit 1999 V1.0, Physical Layer nun Teil von IEEE 802.15 WPAN
- Bluetooth Low Energy seit 2010 (BT 4.0)



Eines der ersten Module (Ericsson). rg.de/ ♦

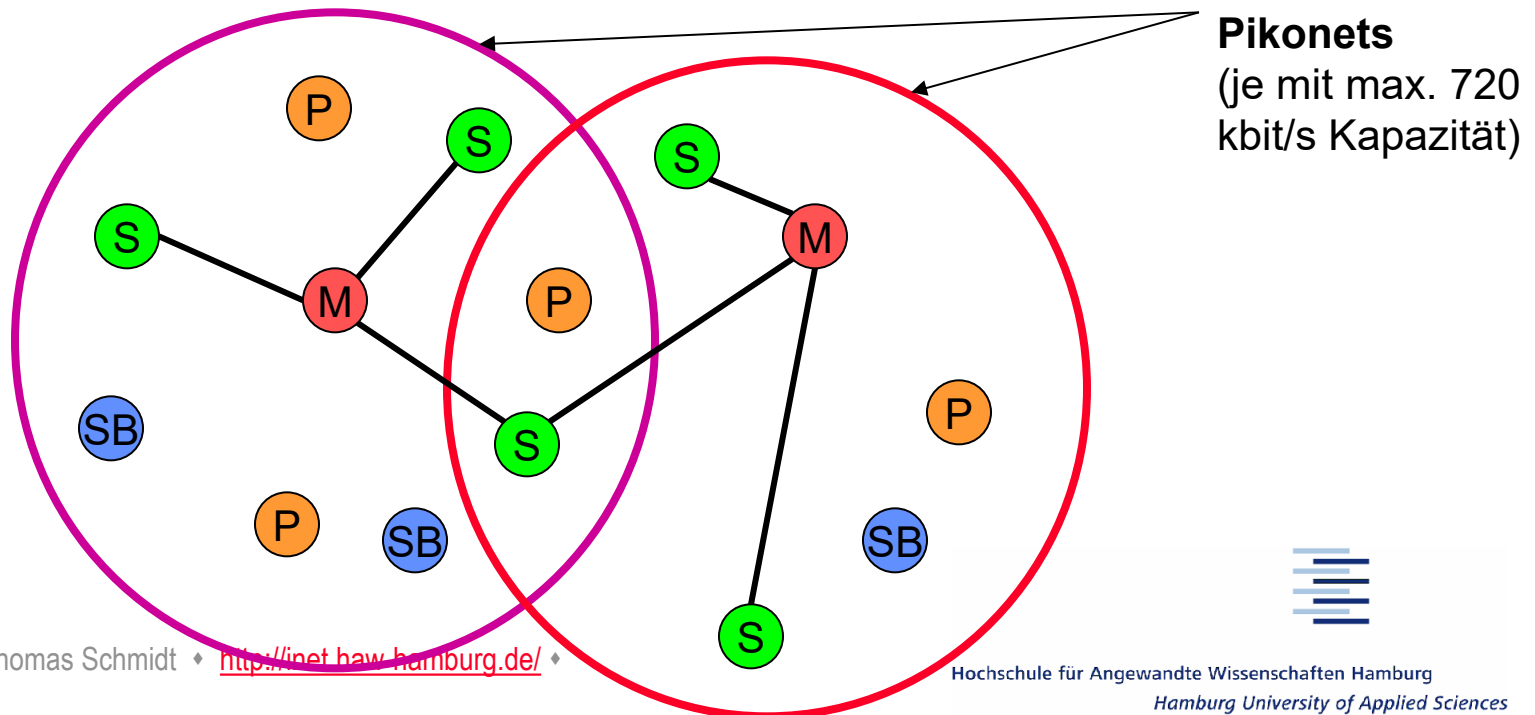
1.3 Piconet & Scatternet

Verbindung mehrerer naher Geräte zu einem ad hoc Piconetz

- Ein Master gibt Frequenzsprungfolge und Zeittakt vor

Verbindung mehrerer naher Piconetze durch gemeinsame Master- oder Slave-Geräte

- Geräte können Slaves in einem Piconetz sein, Master in einem anderen
- Kommunikation zwischen Piconetzen
- Geräte, welche zwischen den Piconetzen hin und her springen

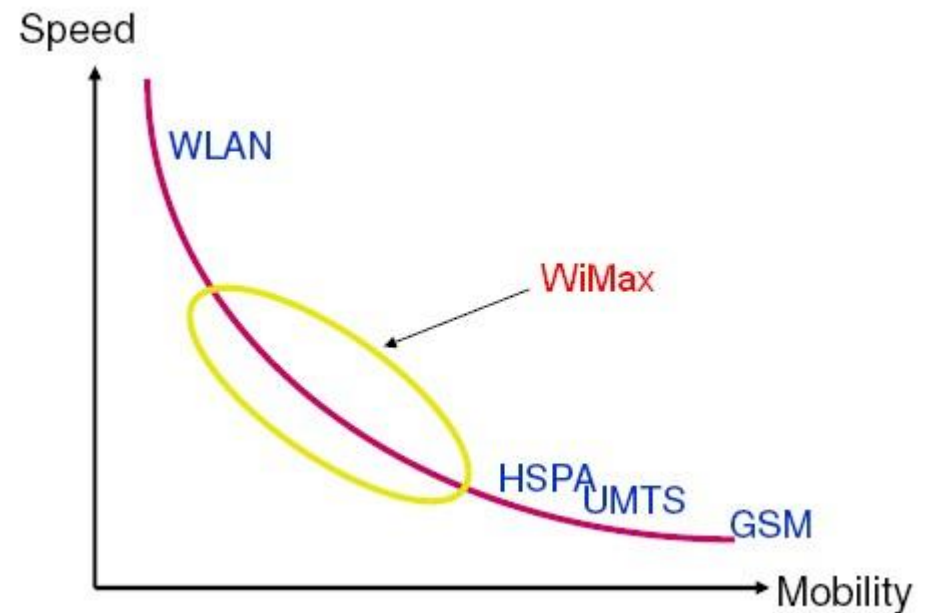
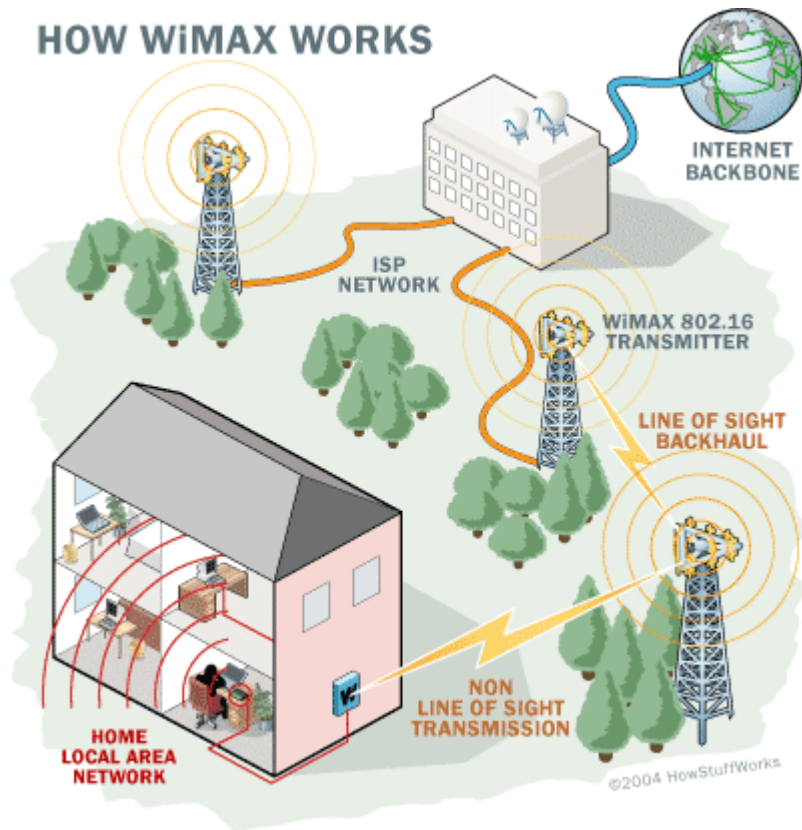


1.4 - 802.16 Wireless MAN (WIMAX)

- ▶ Ursprünglich Fixed Wireless Broadband Access Network
 - ▶ IEEE 802.16d – 2004: Starre Zugangstechnologie
 - ▶ IEEE 802.16e – 2005: Mobiler Zugang mit Handoff
- ▶ MAN Infrastrukturtechnologie: Reichweite $\approx < 45$ km
- ▶ Umbrella Standard:
 - ▶ Verschiedene Frequenzbereiche: 2 – 66 GHz, frei im 5 GHz Band
 - ▶ Verschiedene Medienzugangsverfahren: TDMA, OFDM (mit Fast Fourier Transform), MIMO
- ▶ Bandbreiten abhängig von Frequenzbereichen, MAC, Entfernung – heute typisch: 15 – 30 Mbit/s ohne MIMO, > 100 Mbit/s mit MIMO



1.4 Einordnung von WiMAX



1.4 – 802.16 Eigenschaften

- Verbindungsorientierte Funktechnologie
 - Channel management: Base Station (BS) weist Subscriber Station (SS) Channel IDs (CIDs) innerhalb von Service Flows (→ SFIDs) zu
 - Keine autonome Packetadressierung
- Separate Uplink und Downlink Kanäle
 - Downlink kontrolliert durch BS
 - Uplink mit admission control von BS
 - Automatic Repeat Request (ARQ) optional per Service Flow
- Verschiedene Konvergenz-Layer
 - Point-to-Point (IP) und Ethernet



1.5 LTE – Long Term Evolution

- ▶ 2004 initiiert durch NTT DoCoMo, Zielstellung: Verbesserung des Universal Terrestrial Radio Access (UTRA) und Optimierung des UMTS Radio Zugangs
- ▶ Leistungsziel: Downlink 100 Mbit/s, uplink 50 Mbit/s, RTT < 10ms (UMTS ~ 200 ms im Access)
- ▶ 2008: Stabile Spezifikation für kommerzielle Implementierungen
- ▶ 2009: Erster öffentlicher LTE Service verfügbar (Stockholm und Oslo)
- ▶ 2010: LTE startet in Deutschland (Frequenzversteigerung)



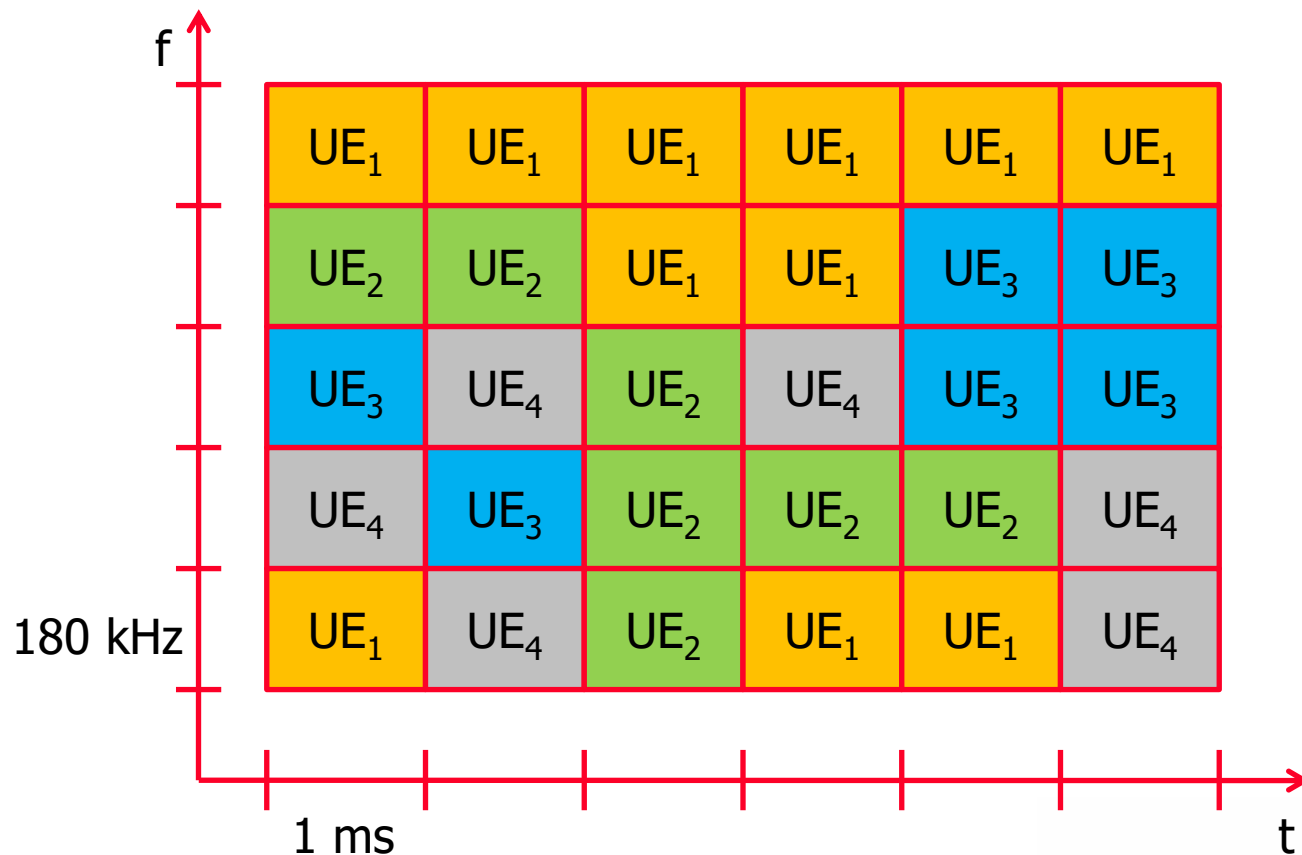
1.5 LTE-Neuerungen

- Neues Radio (Mehrfachantennen), abwärtskompatibel
- Hohe Flexibilität in Spectrum (dynamische Frequenznutzung), Bandbreite und Datenraten
- Kein CDMA
- Peak data rates: 300 Mbit/s DL, 75 Mbit/s UL
- Cell Radius von < 1 km bis zu 100 km
- Vereinfachte Netzwerkkarchitektur
 - Flaches IP-Netzwerk (anstelle des GPRS Kerns)
 - Keine Leitungsvermittlung mehr

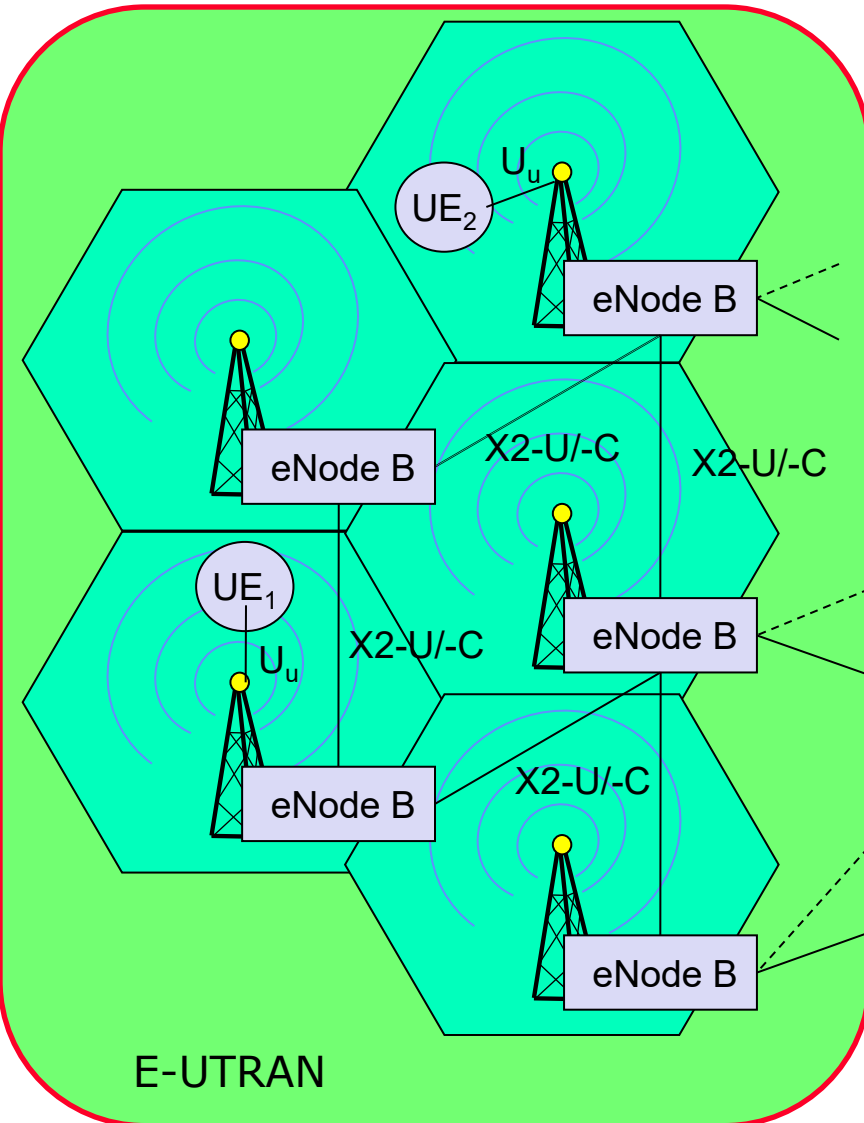


1.5 LTE Multiple Access

- Scheduling von Endgeräten (UEs) in Zeit und Frequenz

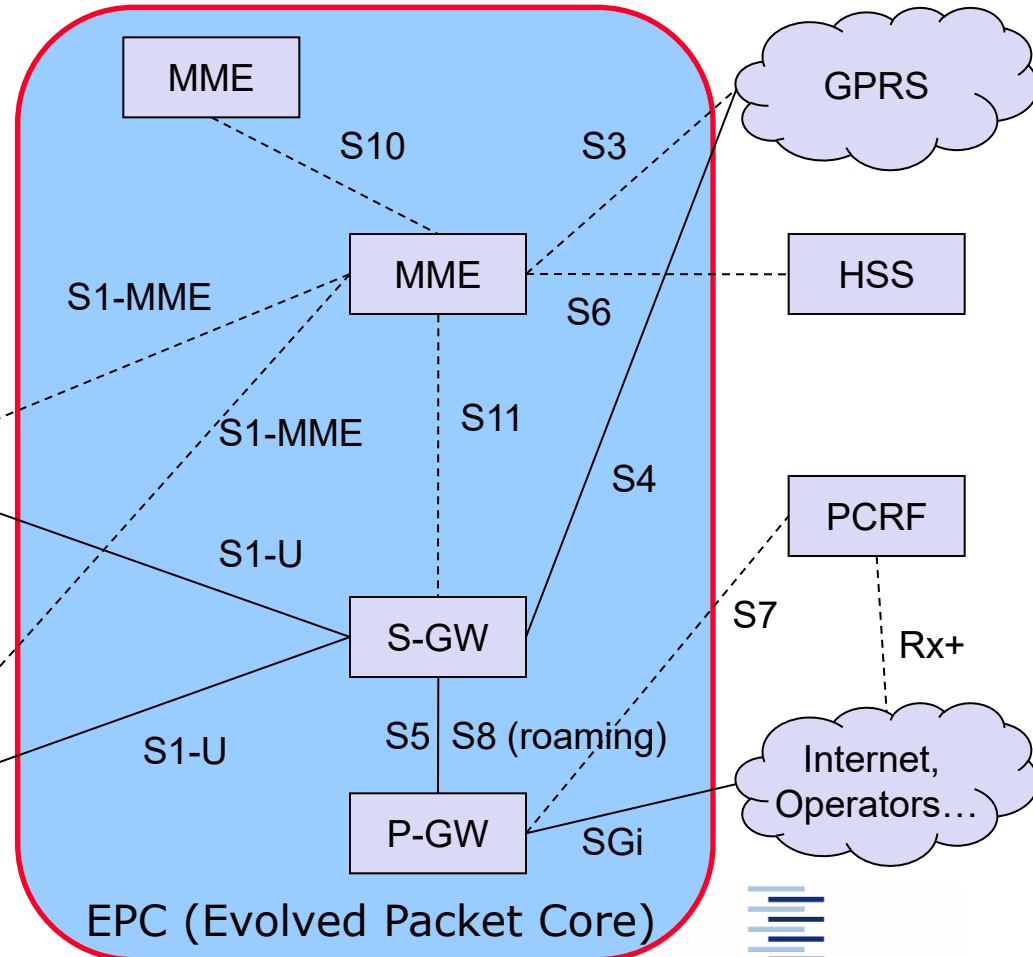


1.5 LTE Architektur



Mobility **M**anagement **E**ntity
Packet-data network **G**ateway
Policy and **C**harging **R**ules **F**unction

Serving **G**ateway
Home **S**ubscriber **S**erver
Server **R**ules **F**unction



1.5 5G – Der gegenwärtige Stand

- ▶ Neues OFDM Radio: 5G New Radio
- ▶ Leistungsmerkmale: ≤ 10 Gbit/s, Latenz ~ 10 ms
- ▶ Drei Frequenzbereiche: Millimeter-wave
 - ▶ Low-band: 600 – 900 MHz
 - ▶ Mid-band: 1.7 – 4.7 GHz
 - ▶ High-band: 24 – 47 GHz
- ▶ Flexibles Service-Angebot, zielgruppendifferenziert
- ▶ Flacher IP-Core – Voice over NR (VoNR) = IP Voice



1.5 5G – offen für Vertical Edges

Massive

Connect everything



100x
Connected Devices

~15 years
Battery Life

1.000.000/km²
Density of connected devices



Create digital twins and predictive maintenance



99.999%
Data transmission reliability

10 Gb/s
Extreme bandwidth

<10 ms
Ultra low latency



Intelligence orchestration and remote control

Critical

Cut the wires

Ultra reliable
Very low latency
Very high availability

Low cost, low energy
Small data volumes
Massive numbers

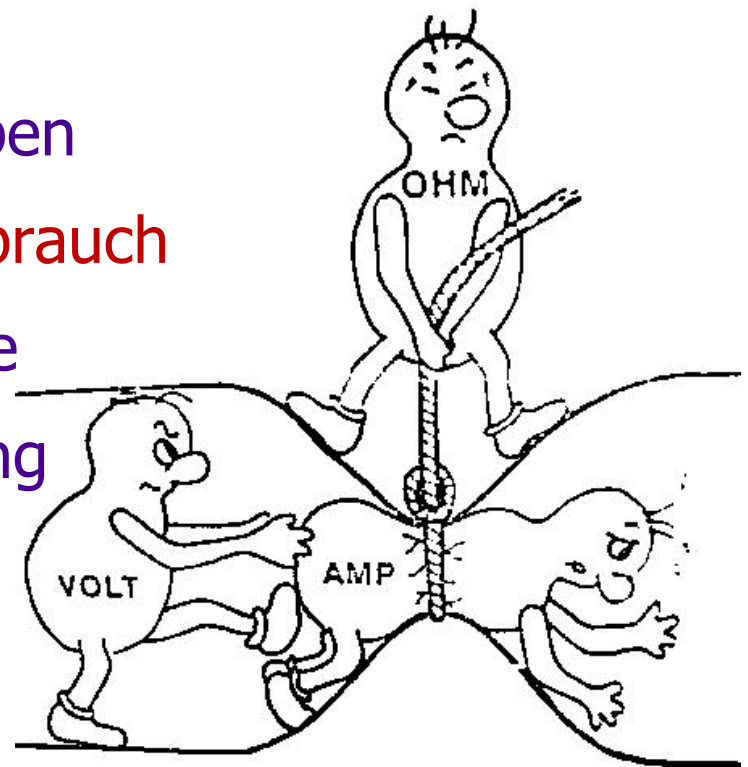
Quelle: Ericsson 2018



1.6 Internet of Things (IoT)

Low Power Lossy Wireless

- ▶ Standard-Kommunikation für das ressourcenbeschränkte IoT
- ▶ Typischerweise batteriebetrieben
- ▶ Schlüsselproblem: **Energieverbrauch**
- ▶ Low power verursacht Verluste
- ▶ Übertragungskapazitäten gering



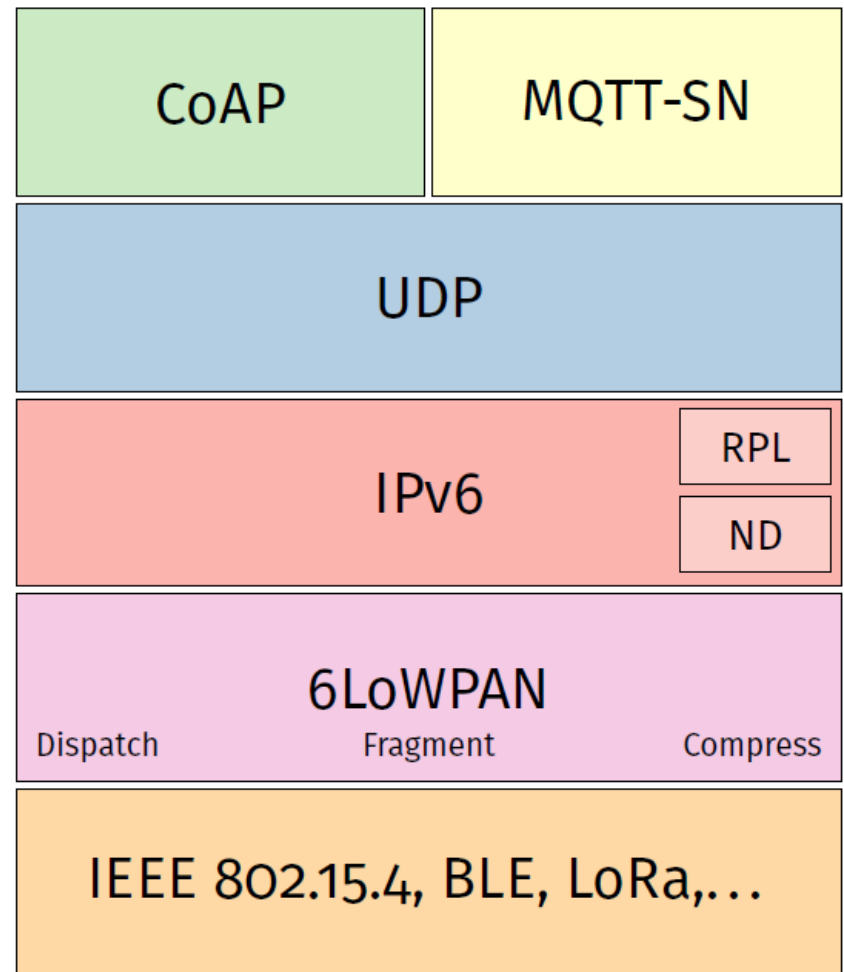
1.6 Link Layer Aspects

- Inherently unreliable due to wireless medium
- Small packet size: ~100 Bytes
- Low bandwidth: ~100 kbit/s
- Topologies include star and mesh
- Networks are ad hoc & devices have limited accessibility
- Typical radios
 - Short range: IEEE 802.15.4, Bluetooth Low Energy (BLE)
 - Long range: NB-IoT, LoRA, Sigfox (proprietary)



1.6 IoT Network Stack

- Neuer Adaptation Layer:
6LoWPAN
- TCP ist selten
- CoAP:
HTTP-Alternative für UDP
- MQTT ist (uraltetes)
Publish-Subscribe Protokoll



1.6 IEEE 802.15.4

- ▶ Common low-power radio
 - ▶ Lower layer of Zigbee and (some) Xbee
 - ▶ IP convergence layer: 6LowPAN
- ▶ Characteristics of 802.15.4:
 - ▶ Frequencies: 868 MHz, 915 MHz, 2.4 GHz
 - ▶ 16-bit short or IEEE 64-bit extended MAC addresses
 - ▶ Entire 802.15.4 frame size is 127 bytes, 25 bytes frame overhead
 - ▶ Bandwidth ranges from 20 to 250 kbit/s
 - ▶ Outreach ranges from 1 to 100 m
 - ▶ 802.15.4 subnets may utilize multiple radio hops



LoRa

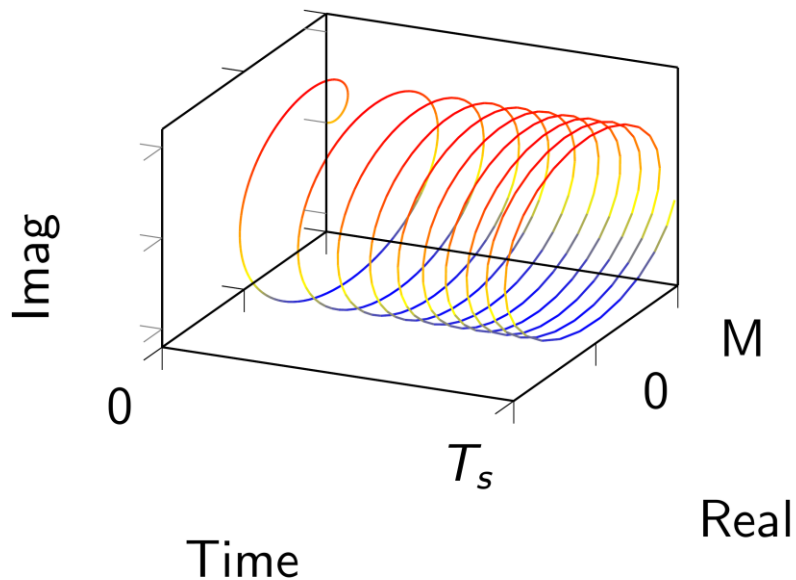
- ▶ Long range radio communication technology
 - ▶ ALOHA approach of low power
 - ▶ typical transmission range 5 – 15 km
- ▶ Frequency (ISM) band depends on region
- ▶ Duty cycle of 1% / channel
- ▶ Modulation robust and configurable
 - ▶ adjusts range, time on air, energy consumption
- ▶ Semi-proprietary technology by SEMTECH
 - ▶ LoRa Alliance with ~ 200 members



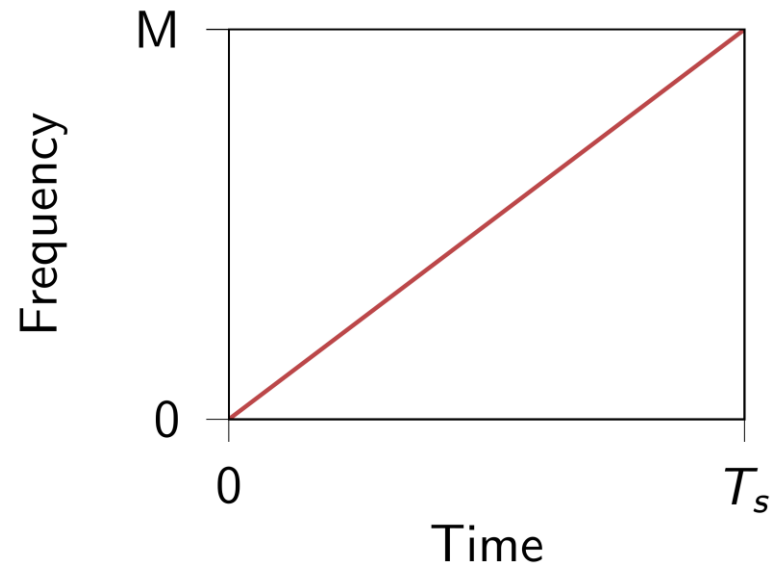
LoRa Modulation

- Chirp Spread Spectrum
- $Y_0(t) = e^{j(\pi Bt^2)}$

Chirp ($Y_0(t)$)



Chirp spectrogram



Geräteklassen für LoRa

Class A

Only receive after send

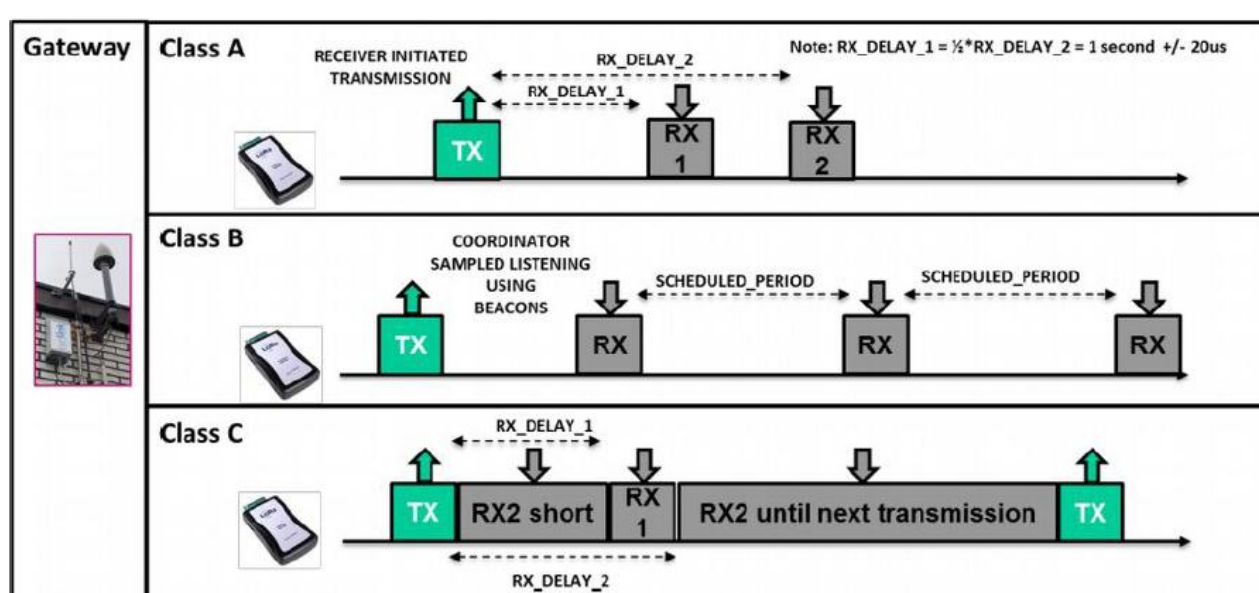
Very low power consumption

Class B

Receive windows scheduled

Class C

Always listen
Highest power consumption



Selbsteinschätzungsfragen

1. Welche besonderen Probleme leiten sich aus dem ‚inhomogenen‘ Medium Luft ab?
2. Warum funktioniert Kollisionserkennung nicht in Funknetzen?
3. Wie operiert stattdessen das konkurrierende Medienzugriffsverfahren in 802.11-CSMA/CA?
4. Welche besonderen Probleme bestehen bei Broadcast?
5. Warum sind Niedrigenergie-Funknetze i.d.R. stark verlustbehaftet?

