

# 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, im Meinel/Sack ist es das Kapitel 5. 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, Hiperlan, Bluetooth
- Optische Übertragungen: Infrarot (Links, IrDA), LaserLinks

Die Techniken drahtloser Netze sind speziell ausgeprägt von

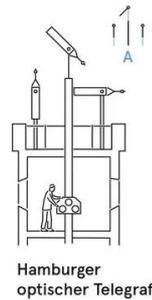
dem Medium ‚Luft‘ – der Regulierung – dem Mobilitätsparadigma

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

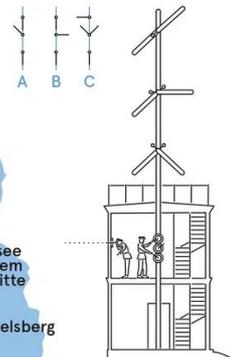


# Optische Telegraphenstrecken

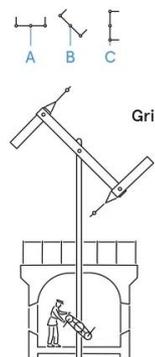
- Fröhe Netzwerke
- Weitverkehrs-kommunikation
- Vor mehr als 200 Jahren
- Voraussetzung: Erfindung des Fernrohrs (1608)



Hamburger optischer Telegraf



Berlin-Koblenz: Preußischer optischer Telegraf



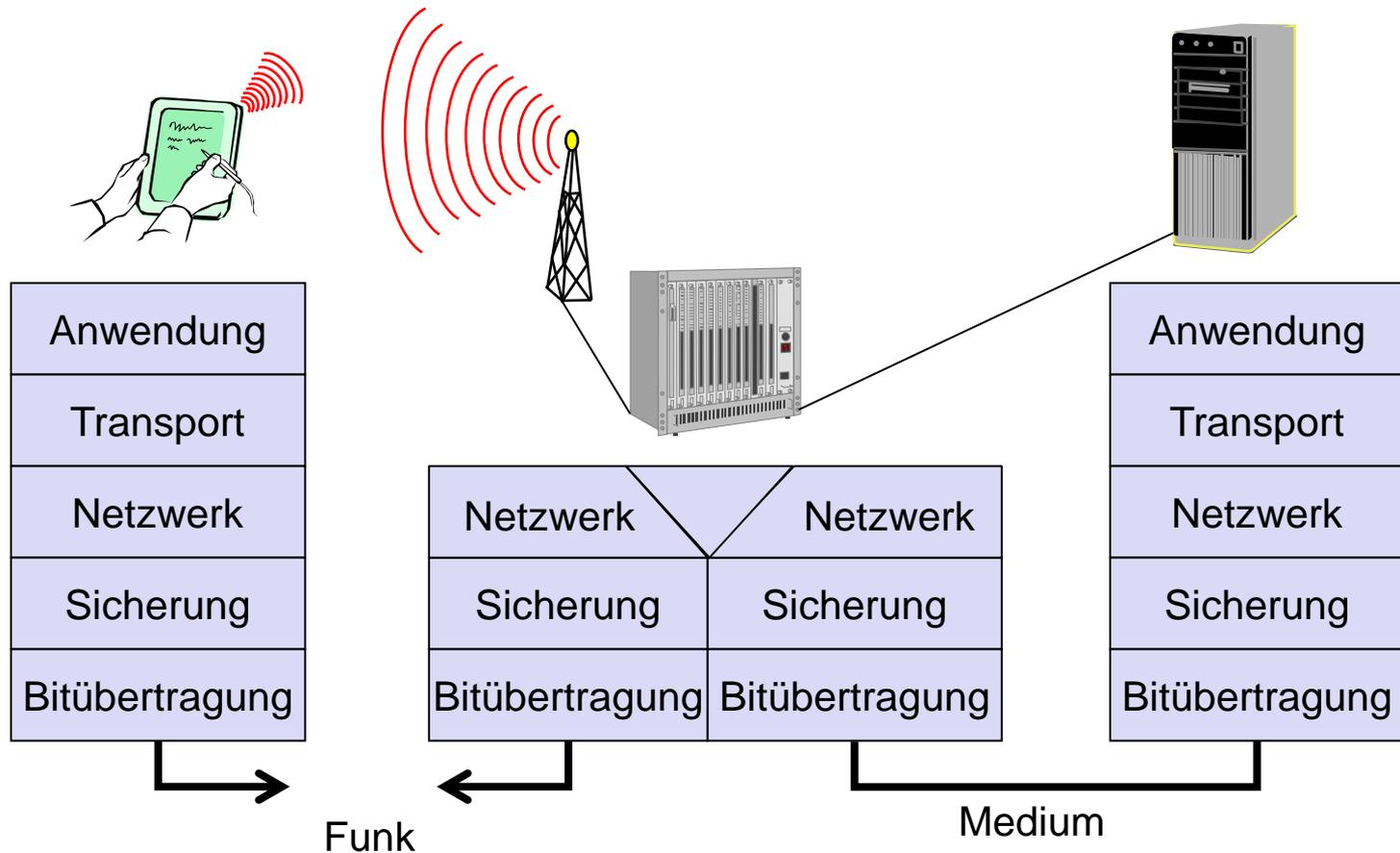
Metz-Mainz: Optischer Telegraf nach C. Chappe

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

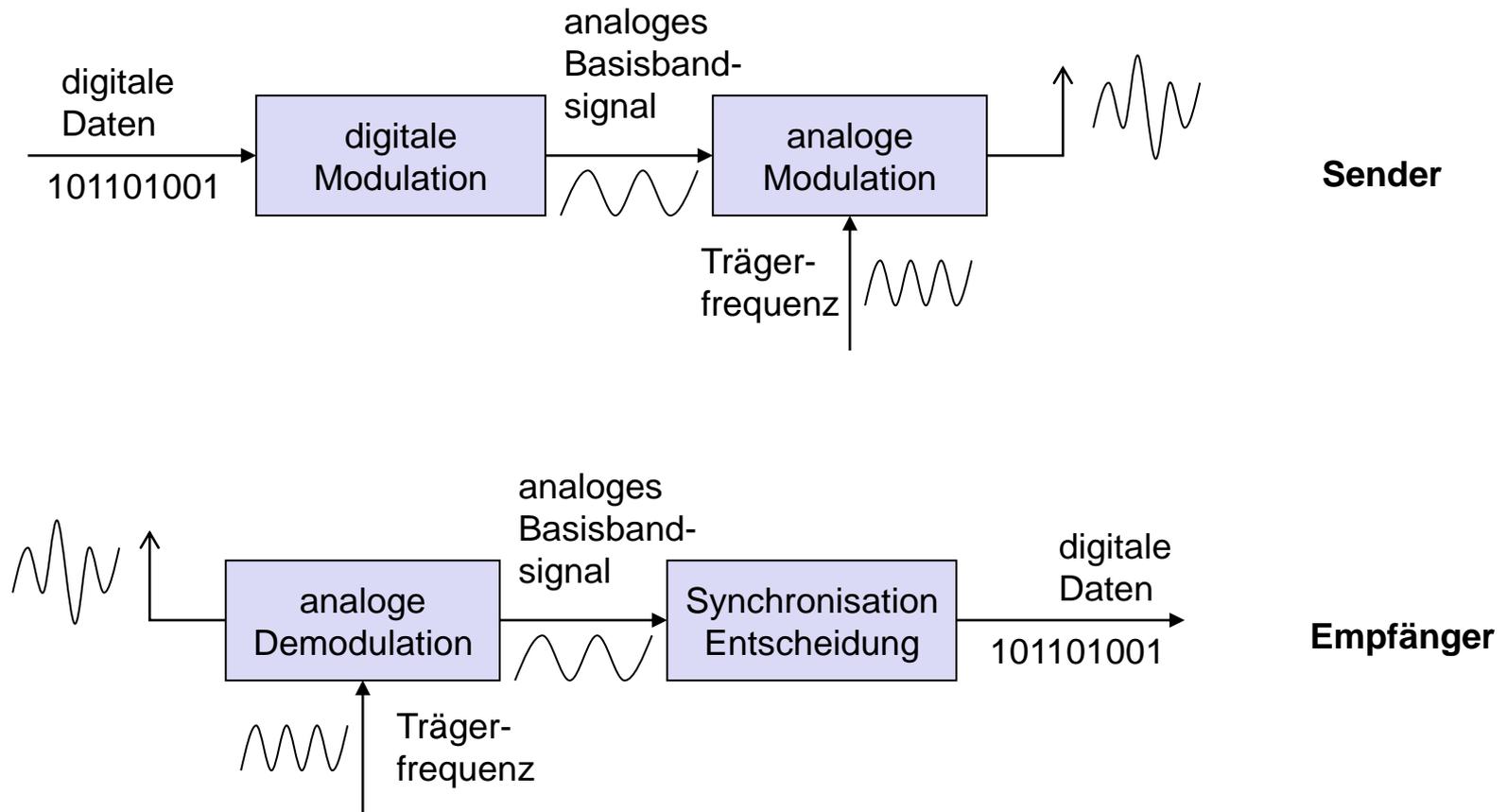
# 1. Wireless Accesspoints



# 1. Referenzmodell



# 1. Modulation und Demodulation



Sinusförmige Trägerschwingung als spezielles periodisches Signal:

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



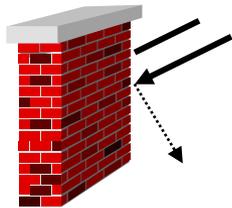
# 1. Signalausbreitung

Ausbreitung im freien Raum grundsätzlich geradlinig (wie Licht)

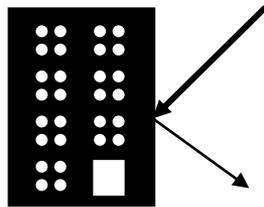
Empfangsleistung nimmt mit  $1/d^2$  ab ( $d$  = Entfernung Sender : Empfänger)

Empfangsleistung wird außerdem u.a. beeinflusst durch

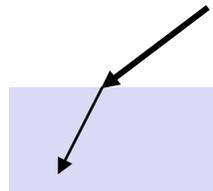
- Freiraumdämpfung (frequenzabhängig)
- Abschattung durch Hindernisse
- Reflexion an großen Flächen
- Refraktion in Abhängigkeit der Dichte eines Mediums
- Streuung (scattering) an kleinen Hindernissen
- Beugung (diffraction) an scharfen Kanten



Abschattung



Reflexion



Refraktion



Streuung



Beugung

# 1. Signalausbreitungsbereiche

## Übertragungsbereich

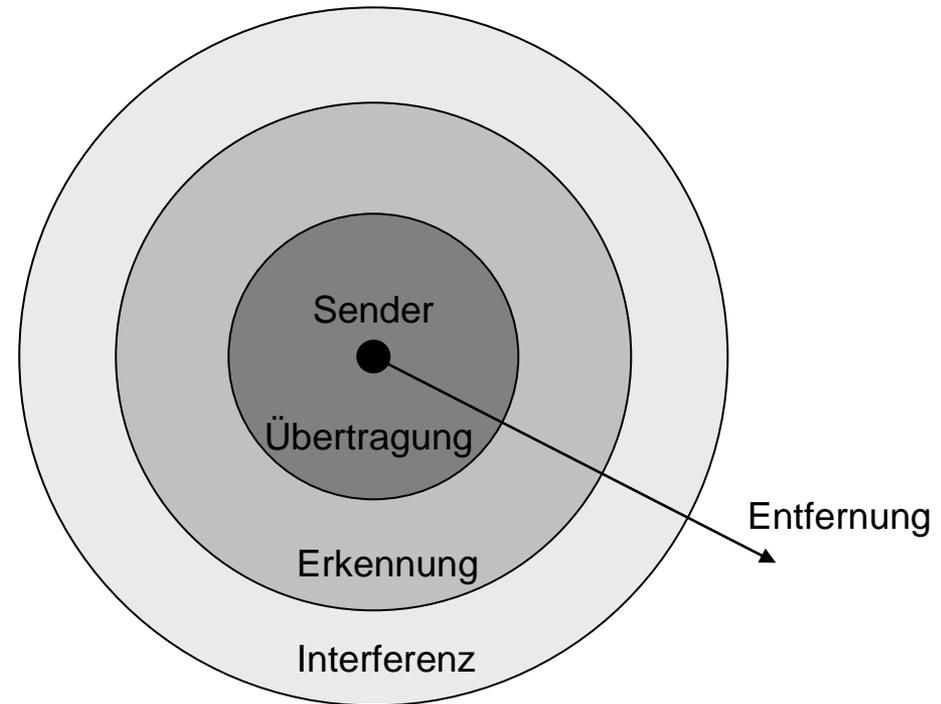
- Kommunikation möglich
- niedrige Fehlerrate

## Erkennungsbereich

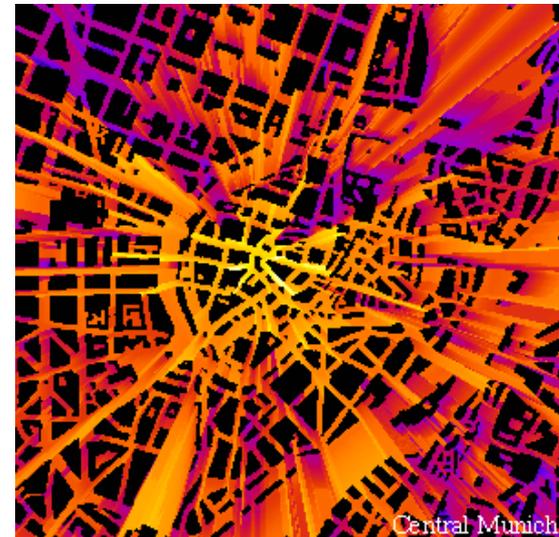
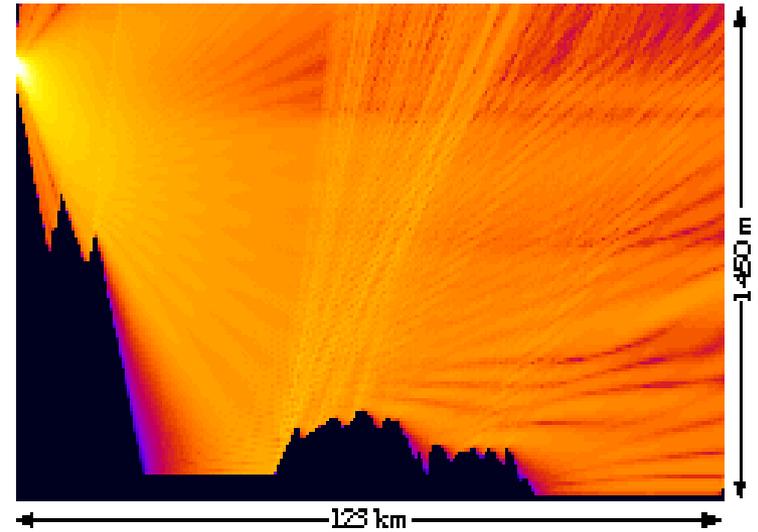
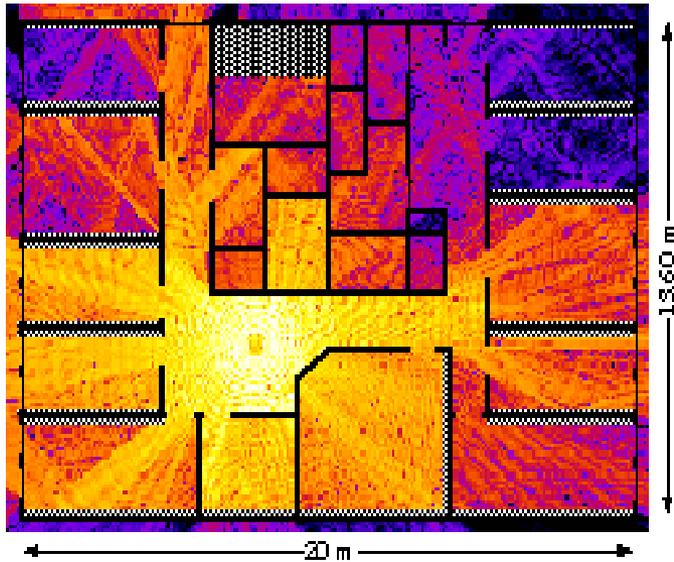
- Signalerkennung
- keine Kommunikation möglich

## 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:

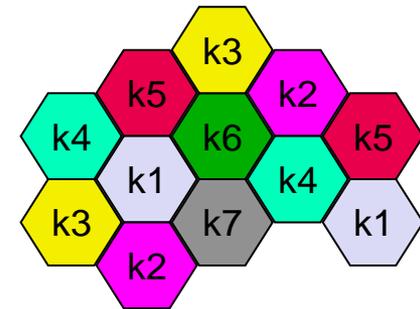
- SDMA (Space Division Multiple Access)
- FDMA (Frequency Division Multiple Access)
- TDMA (Time Division Multiple Access)
- CDMA (Code Division Multiple Access)



# 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:

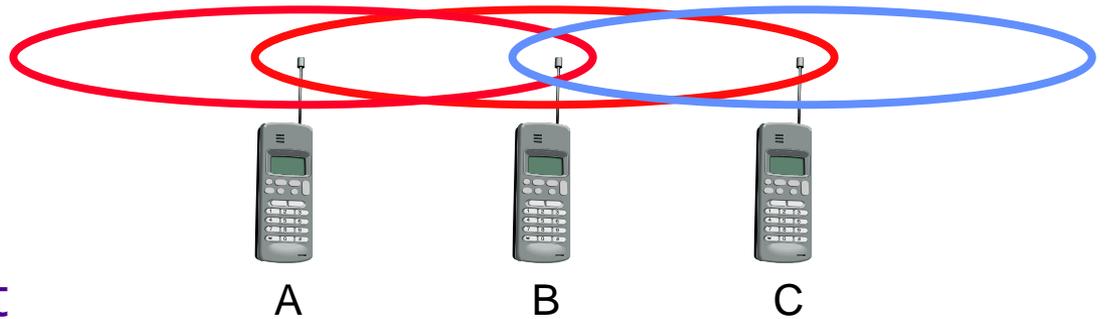
- Kanäle einer Zelle werden nach bereits zugeordneten Kanälen der benachbarten Zellen gewählt
- mehr Kapazität in Gebieten mit höherer Nachfrage
- auch Zuordnung aufgrund von Interferenzmessungen möglich



# 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

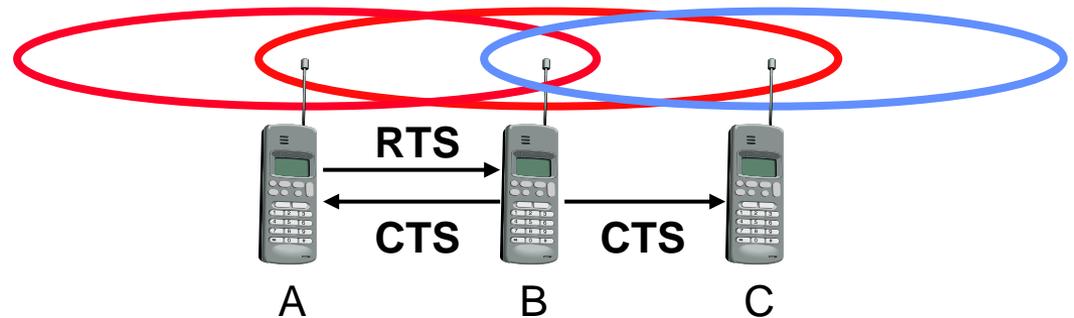
Varianten dieses Verfahrens finden in IEEE802.11 als **DFWMAC** (Distributed Foundation Wireless MAC) Einsatz



# 1.1 MACA - Wirkung

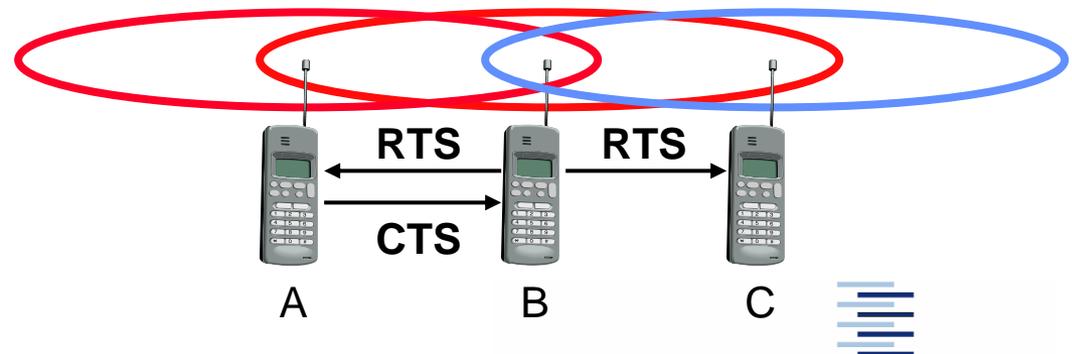
## Vermeidung des Problems versteckter Endgeräte

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

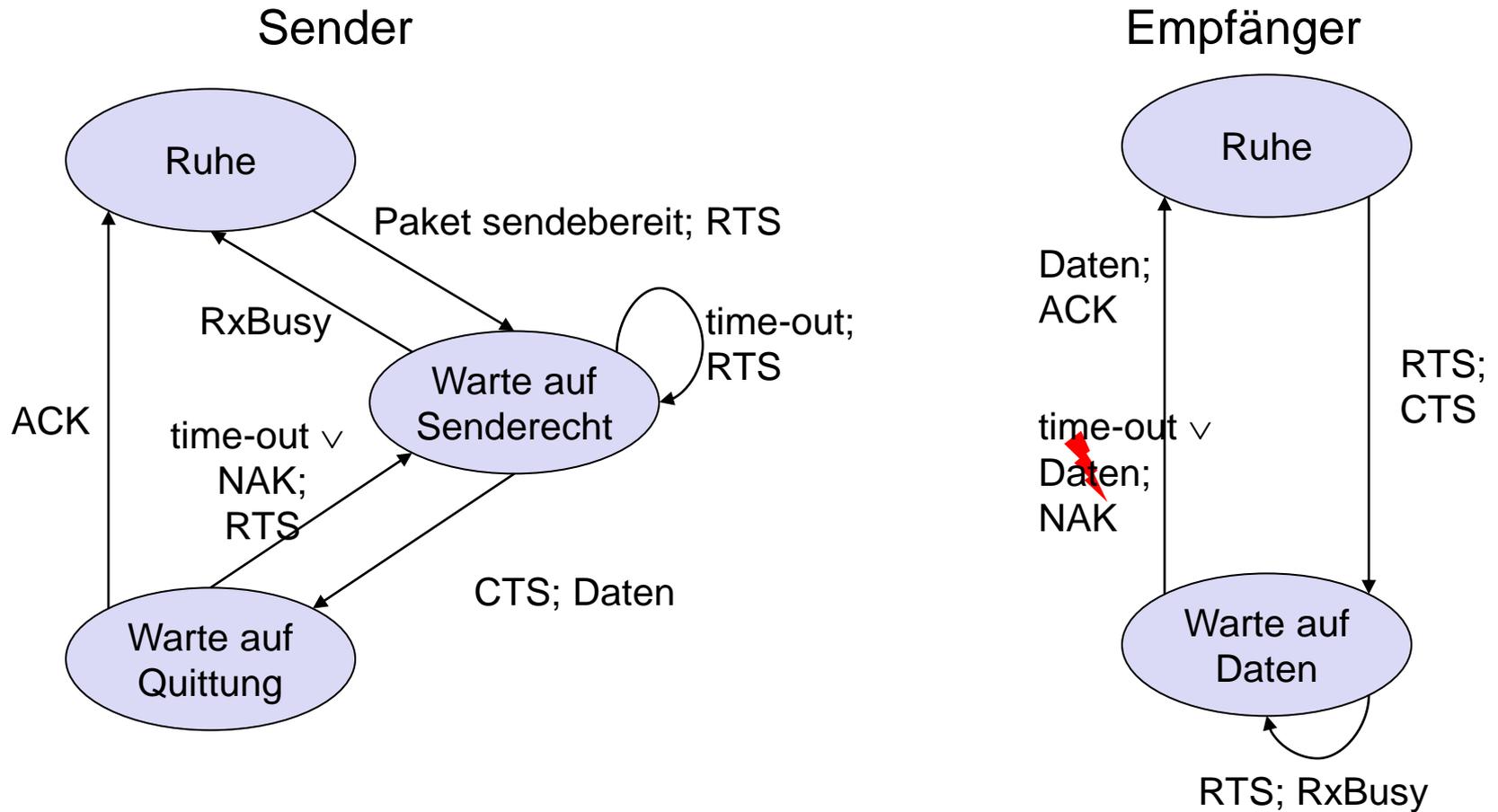


## Vermeidung des Problems „ausgelieferter“ Endgeräte

- 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

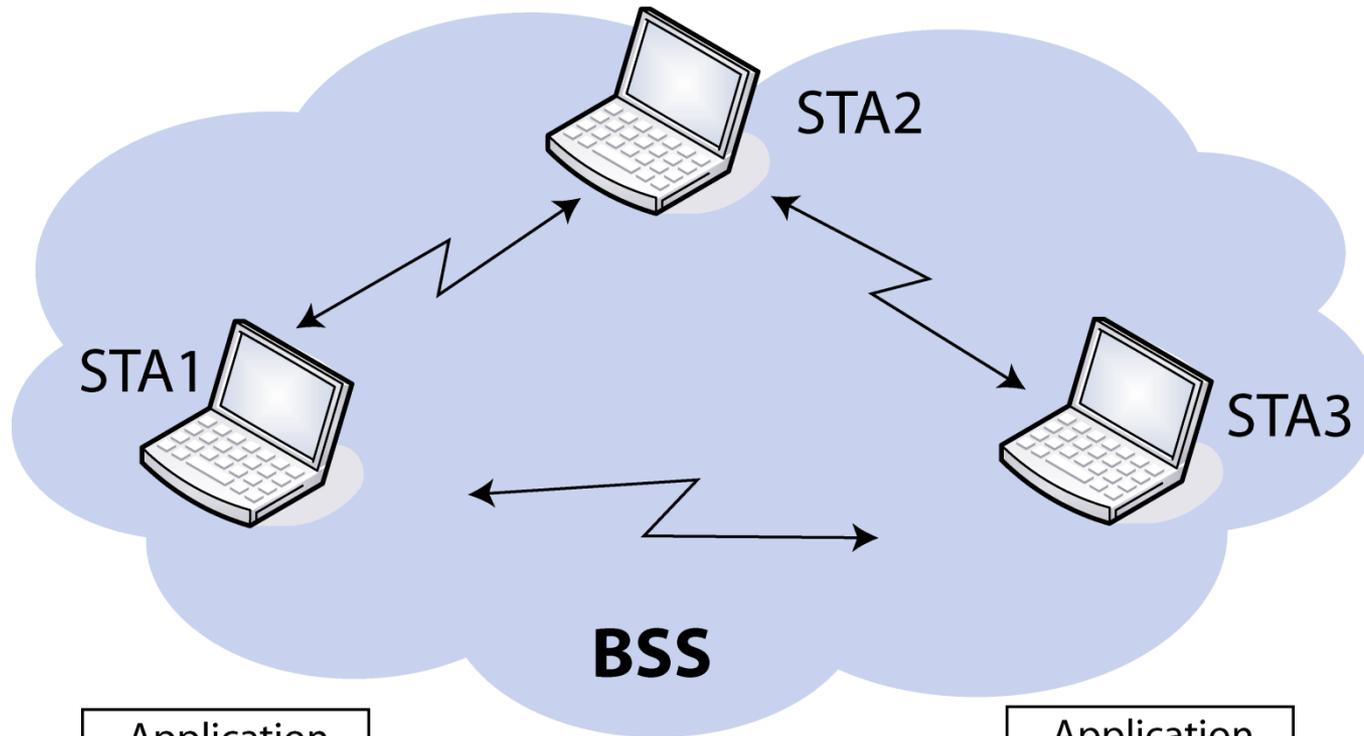


ACK: positive Empfangsbestätigung  
 NAK: negative Empfangsbestätigung

RxBusy: Empfänger beschäftigt



# 1.2 - 802.11: Ad Hoc Netzwerk



Application
TCP
IP
802.11 MAC
802.11 PHY

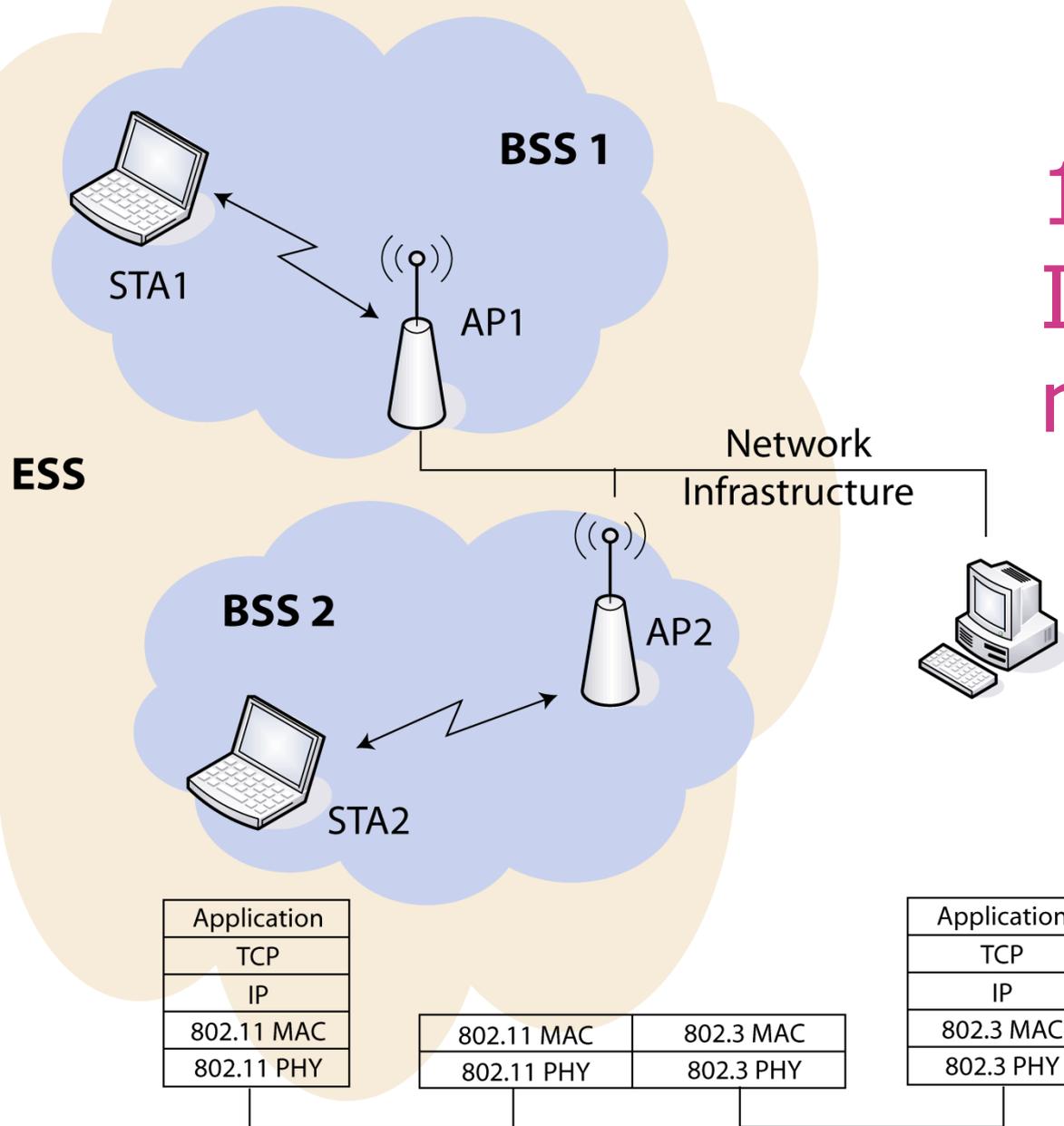
**Base Service Set**

Application
TCP
IP
802.11 MAC
802.11 PHY



# 1.2 - 802.11 Infrastruktur- netzwerke

Verbindung mittels  
Extended Service Set



Application
TCP
IP
802.11 MAC
802.11 PHY

802.11 MAC	802.3 MAC
802.11 PHY	802.3 PHY

Application
TCP
IP
802.3 MAC
802.3 PHY



# 1.2 - 802.11

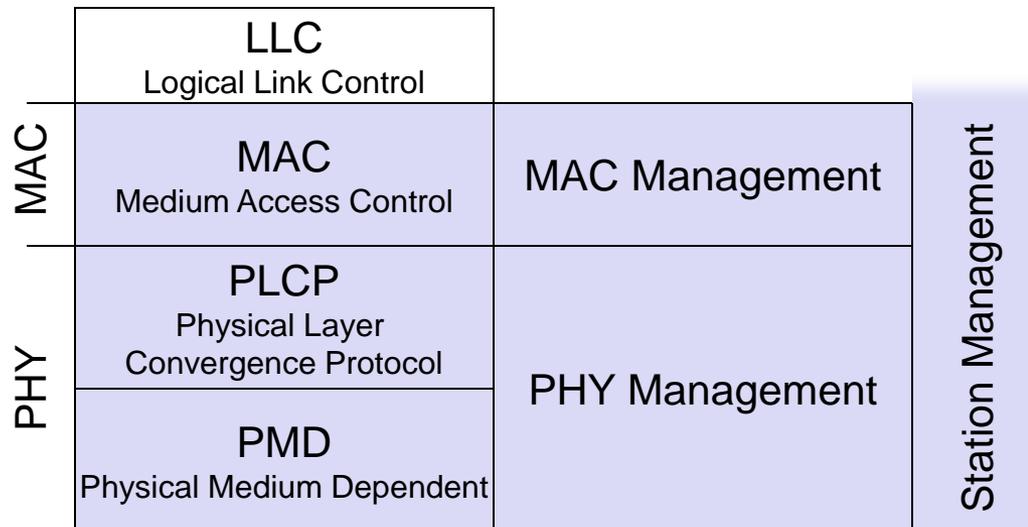
## Schichten und Funktionen

### 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:

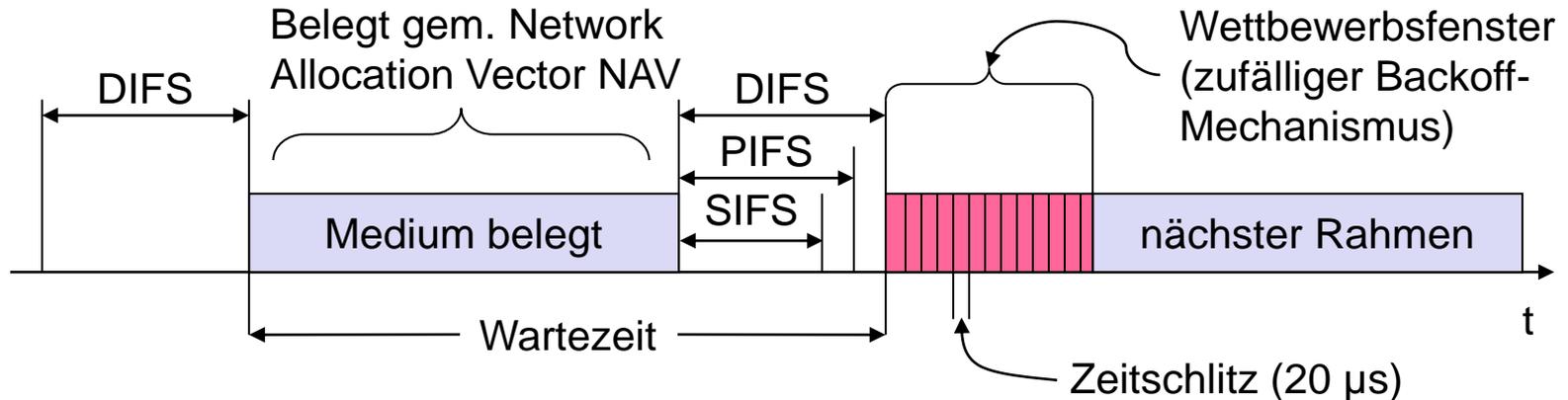
- Asynchroner Datendienst (standard)
  - Austausch von Datenpaketen auf „best-effort“-Basis
  - Unterstützung von Broadcast und Multicast
- Zeitbegrenzte Dienste (optional)
  - implementiert über PCF (Point Coordination Function)

## 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



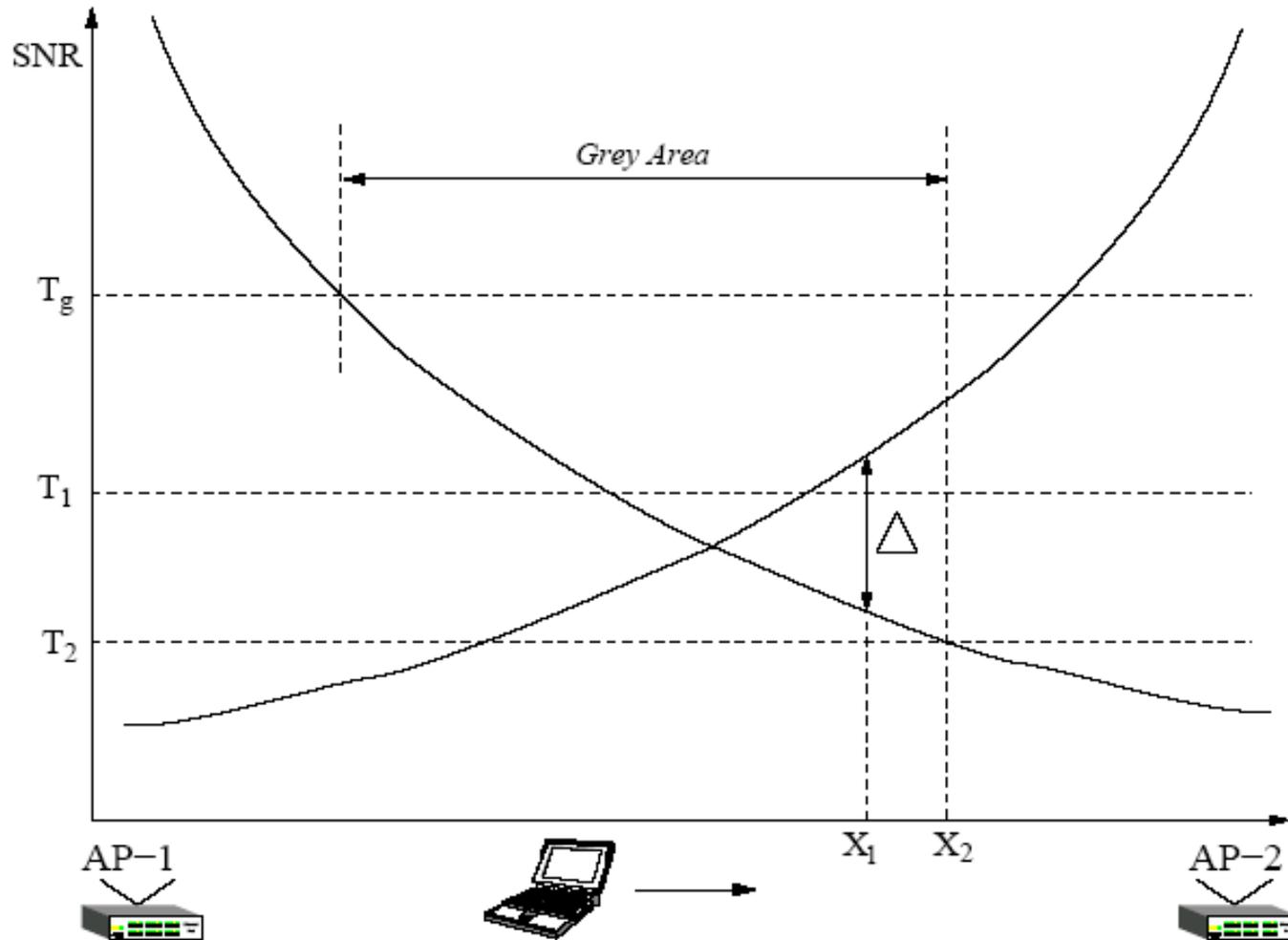
- Sendewillige Station hört das Medium ab (Carrier Sense basierend auf CCA, Clear Channel Assessment)
- Ist das Medium für die Dauer eines Inter-Frame Space (IFS) frei, wird gesendet (IFS je nach Sendertyp gewählt)
- Ist das Medium belegt, wird auf einen freien IFS gewartet und dann zusätzlich um eine 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



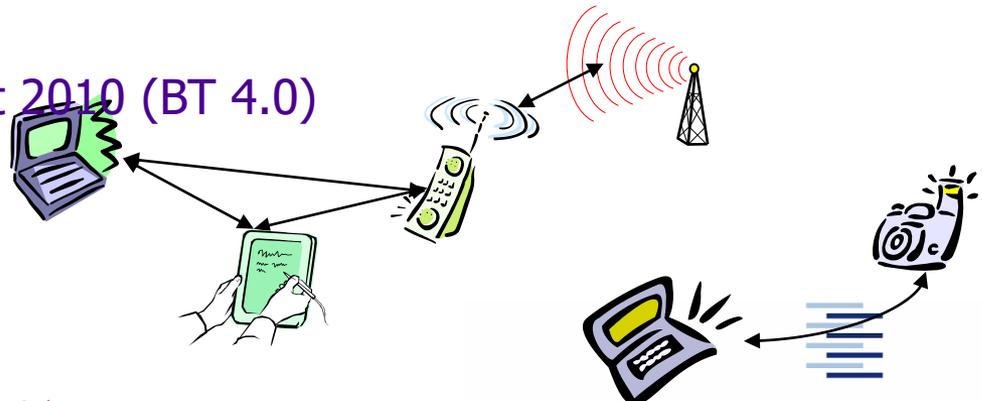
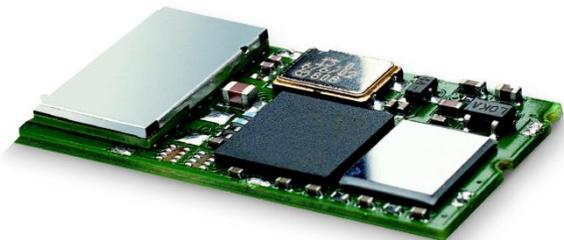
# 1.2 Ethernet Wireless Standards

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
2020	WiFi 6E – bis ca, 9 Gbit/s	2.4/5/6 GHz	802.11ax



# 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/](http://rg.de/) ♦

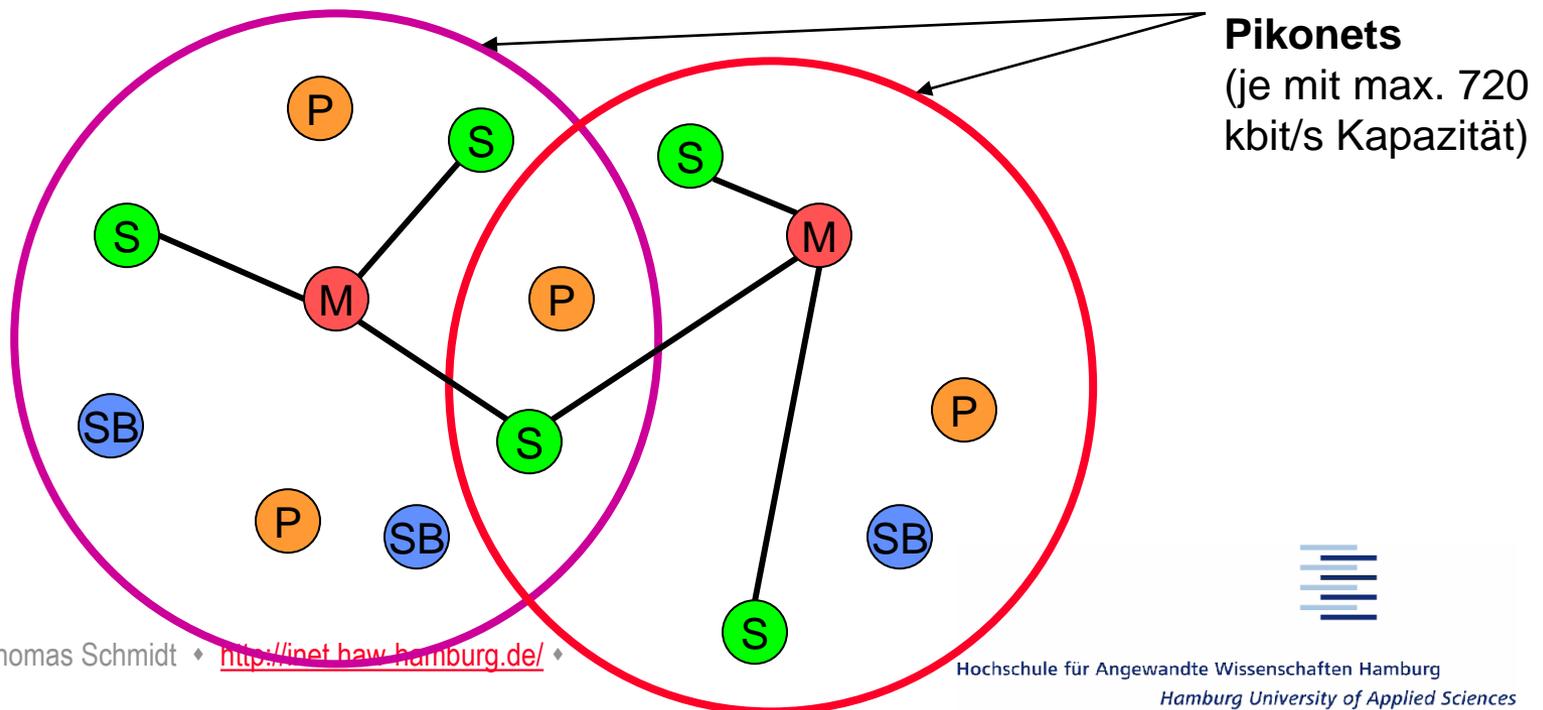
# 1.3 Piconet & Scatternet

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

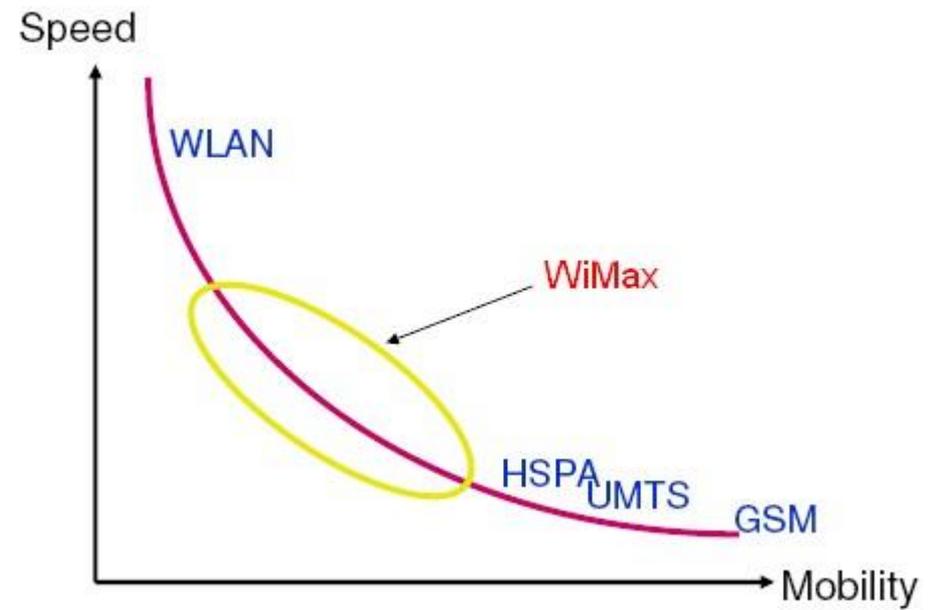
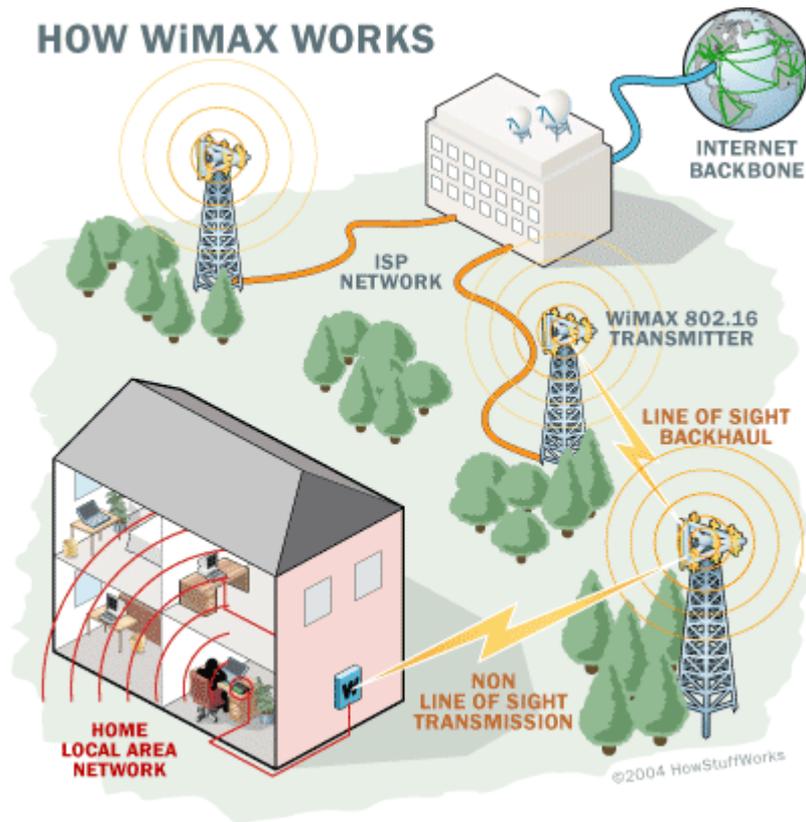


# 1.4 - 802.16 Wireless MAN (WIMAX)

- ▶ 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)



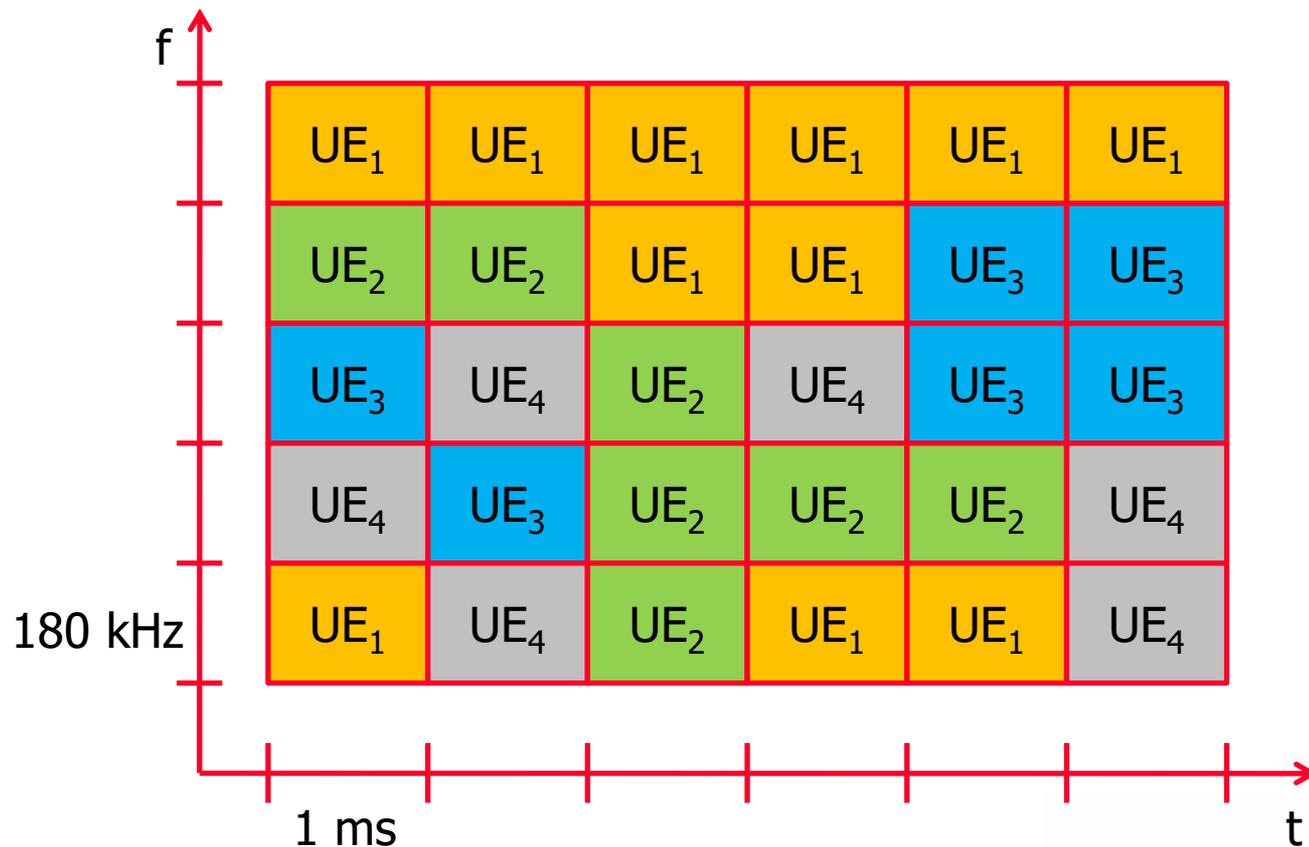
# 1.5 LTE-Neuerungen

- ▶ 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

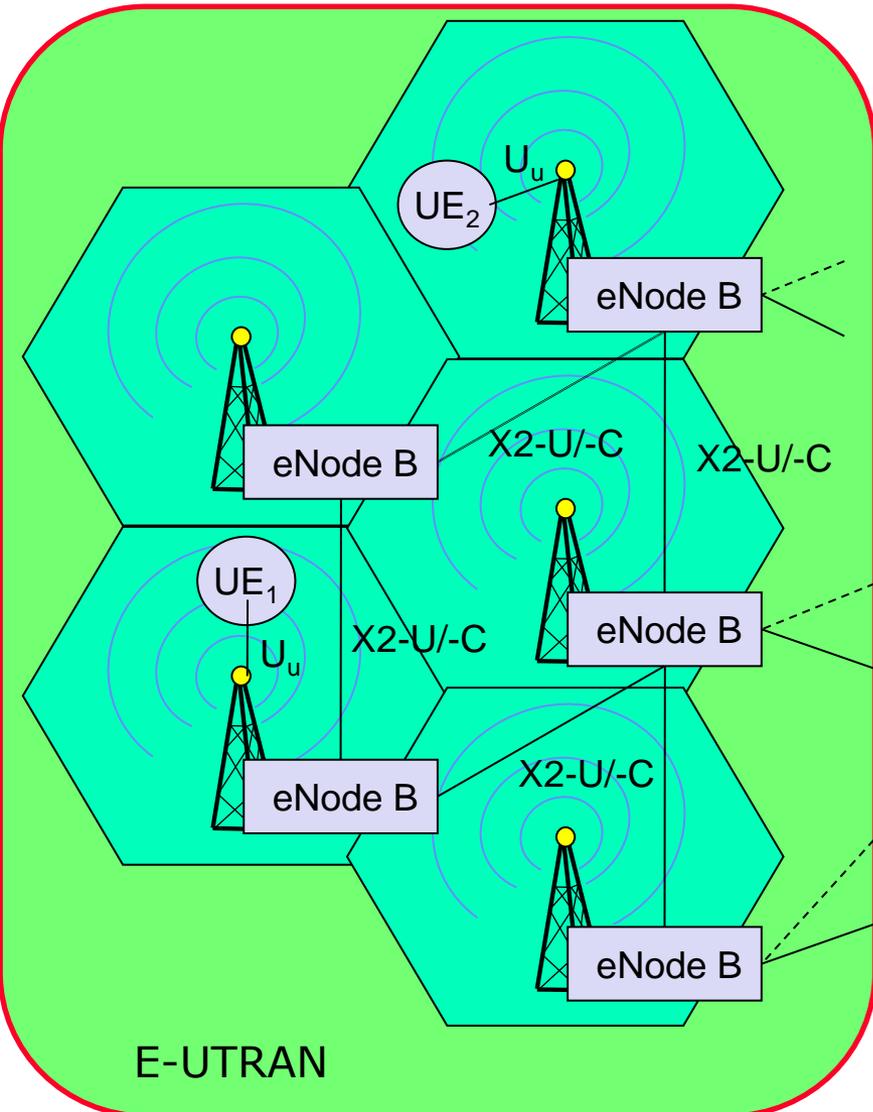


# 1.5 LTE Multiple Access

- Scheduling von Endgeräten (UEs) in Zeit und Frequenz

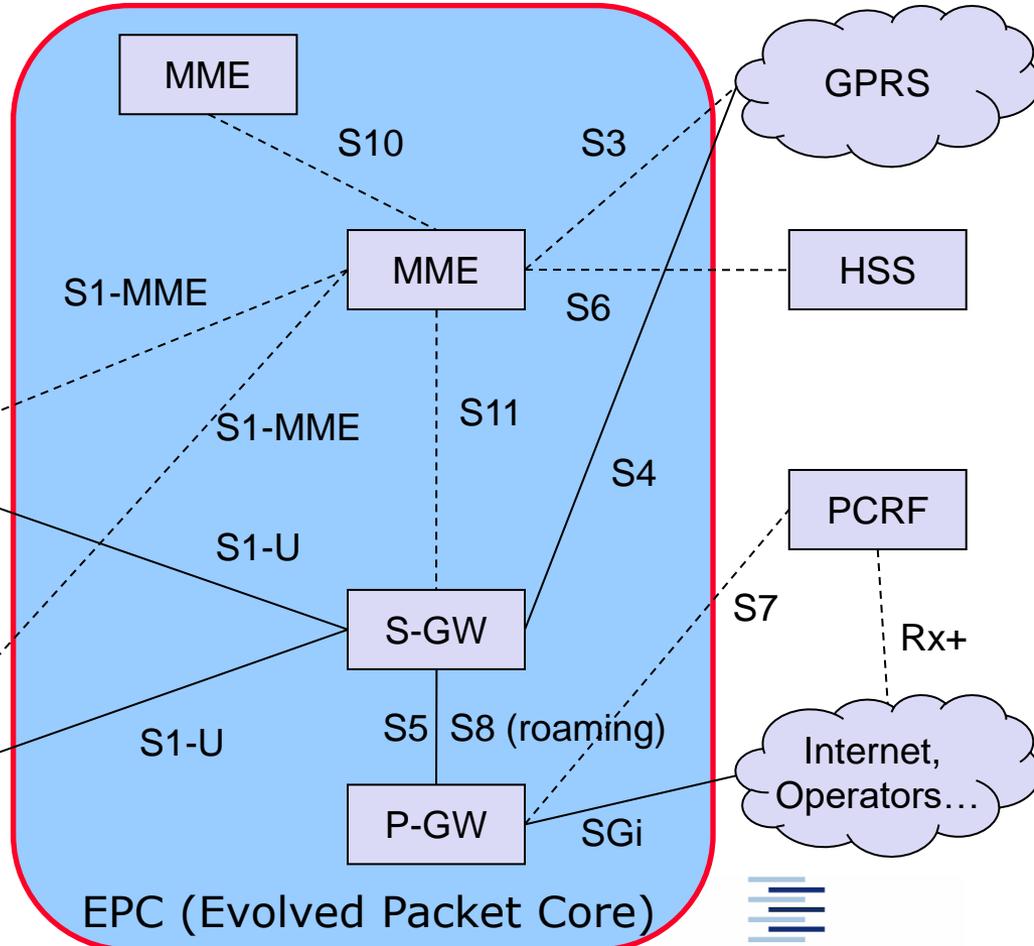


# 1.5 LTE Architektur



**M**obility **M**anagement **E**ntity  
**P**acket-data network **G**ateway  
**P**olicy and **C**harging **R**ules **F**unction

**S**erving **G**ateway  
**H**ome **S**ubscriber **S**erver  
**S**erver **R**ules **F**unction



# 1.5 5G – offen für Vertical Edges

## Massive

Connect everything



100x  
Connected Devices

~15 years  
Battery Life

1.000.000/km<sup>2</sup>  
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

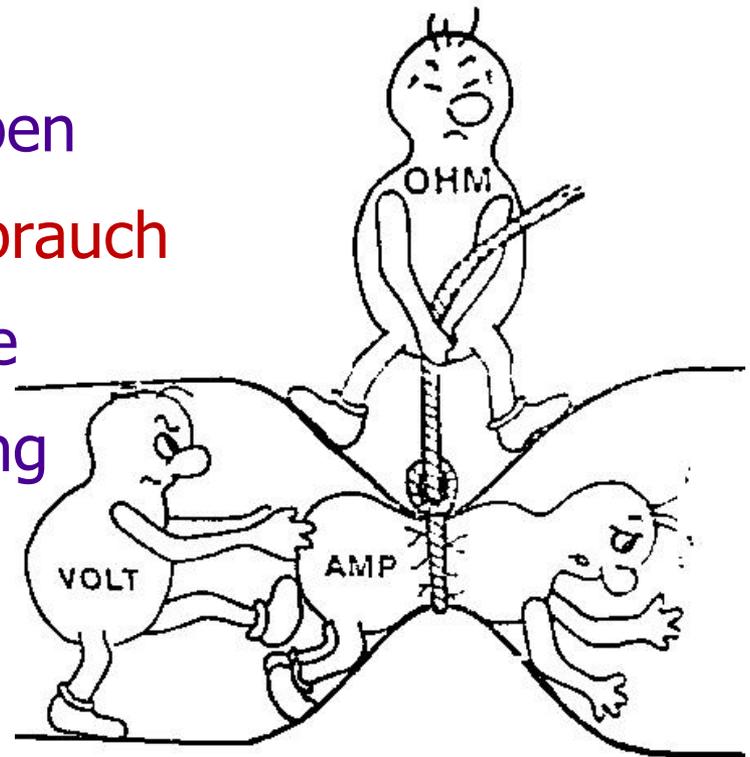
Quelle: Ericsson 2018



# 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



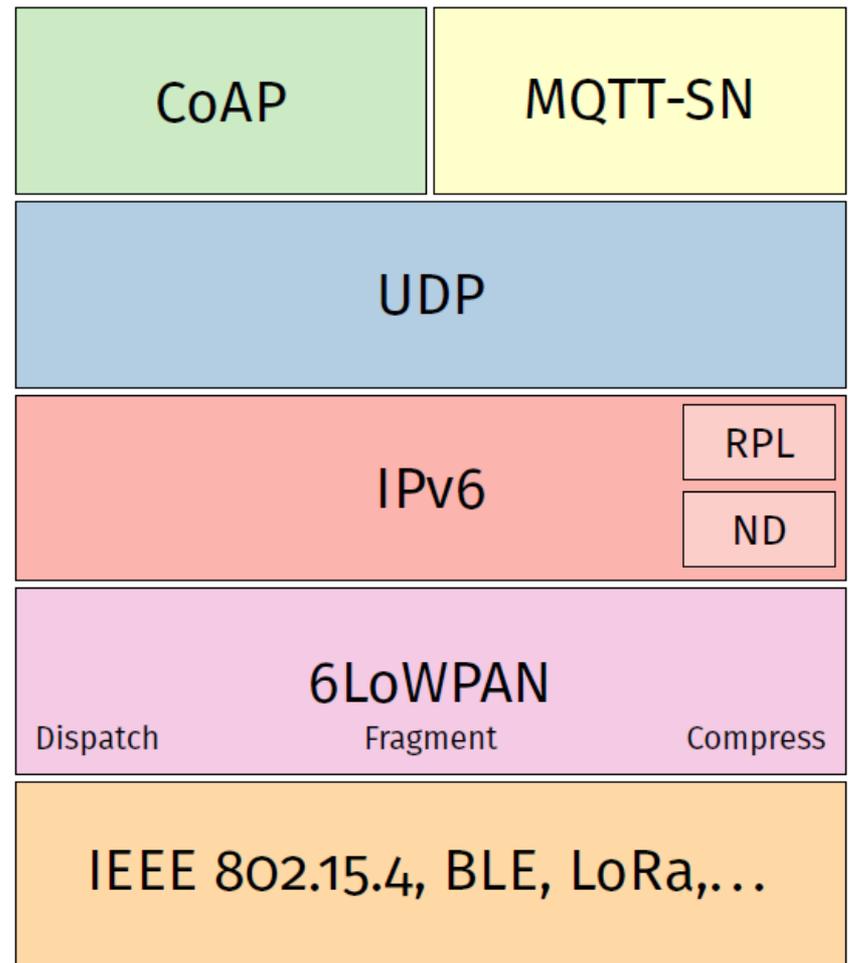
# 1.6 Link Layer Aspects

- 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



# Geräteklassen für LoRa

## Class A

Only receive after send

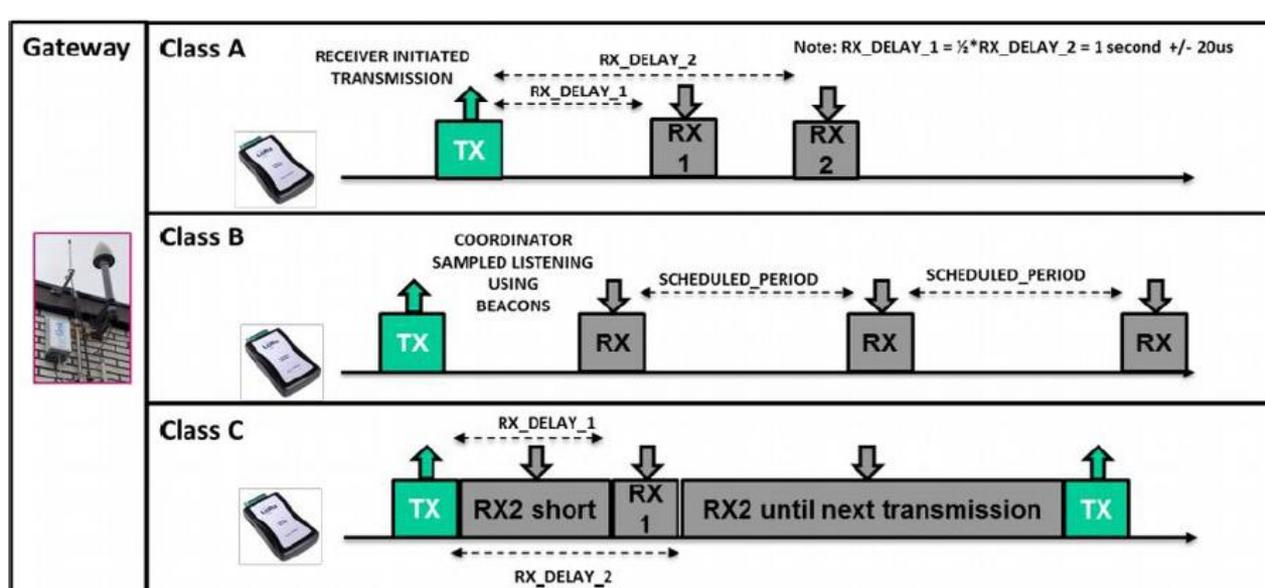
Very low power consumption

## 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?

