



# Drahtlose Medienzugriffsprotokolle

Systemdesign für ultra-hochratile Anwendungen

Dr.-Ing. Marcus Ehrig

12.01.2018



innovations  
for high  
performance  
microelectronics

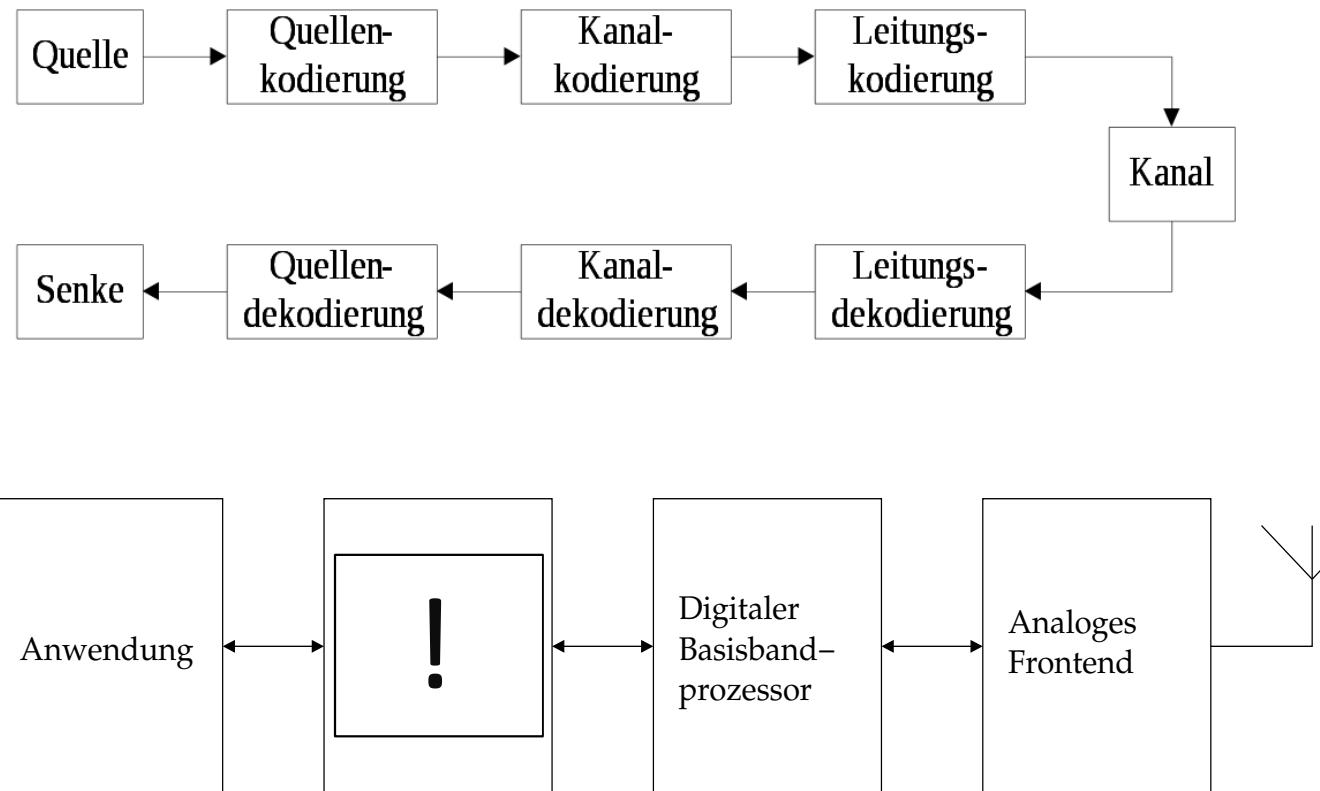
Mitglied der  
Leibniz-Gemeinschaft

# Agenda

---

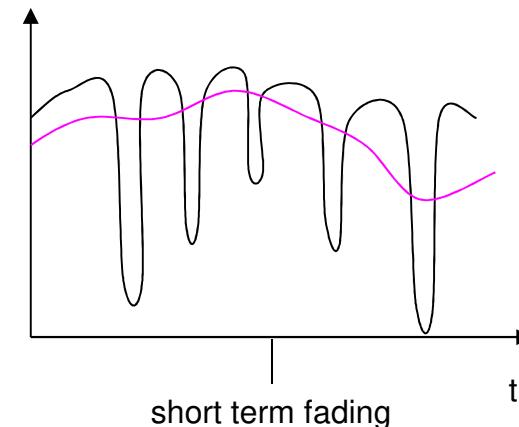
- 1** Einführung und Wiederholung
- 2** Das drahtlose Übertragungsmedium: Luft
- 3** Kommunikationsszenarien
- 4** Medienzugriffsprotokolle
- 5** Steigerung des Datendurchsatzes
- 6** Beispiel: 60 GHz Kommunikationssystem

# Einführung: Nachrichtenübertragungssystem



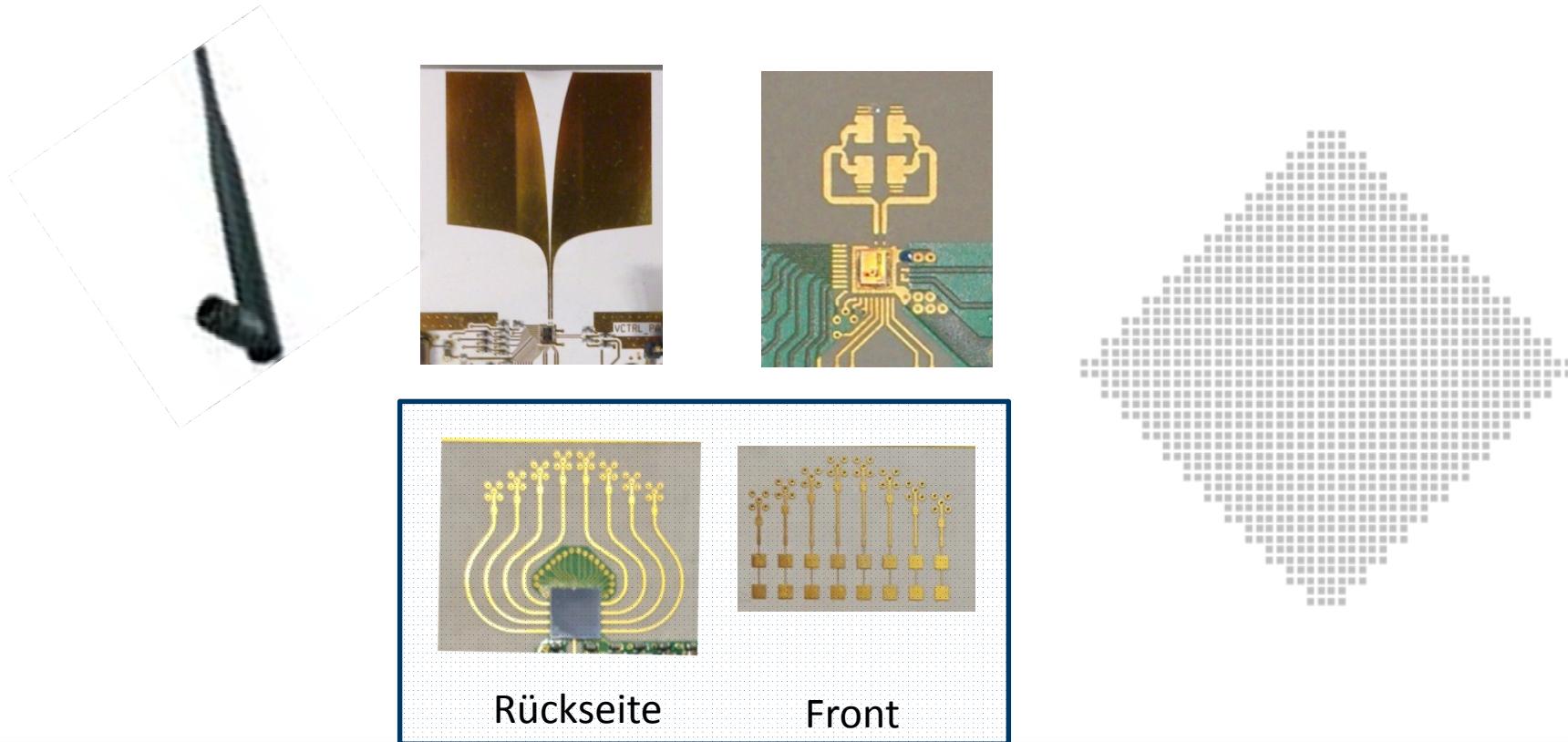
# Drahtlose Übertragung in der Luft

- Ausbreitung der Funkwellen wie Licht
- Empfangsleistung nimmt quadratisch mit der Entfernung ab
- Reichweite sinkt mit höherer Trägerfrequenz  
→ Freiraumdämpfung:  $F[\text{dB}] = 10 \log_{10}(4\pi d f/c)^2$
- Dämpfung durch fast-/slow-Fading
  - Frequenzabhängig
  - Standortabhängig
  - Zeitabhängig
- Molekulare Absorptionseffekte in der Atmosphäre
  - Wasserdampf ( $\text{H}_2\text{O}$ ) @ 2.4 GHz
  - Sauerstoff ( $\text{O}_2$ ) @ 60 GHz



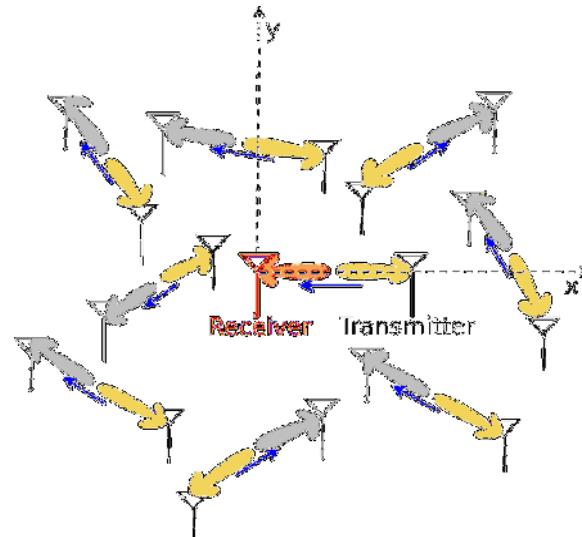
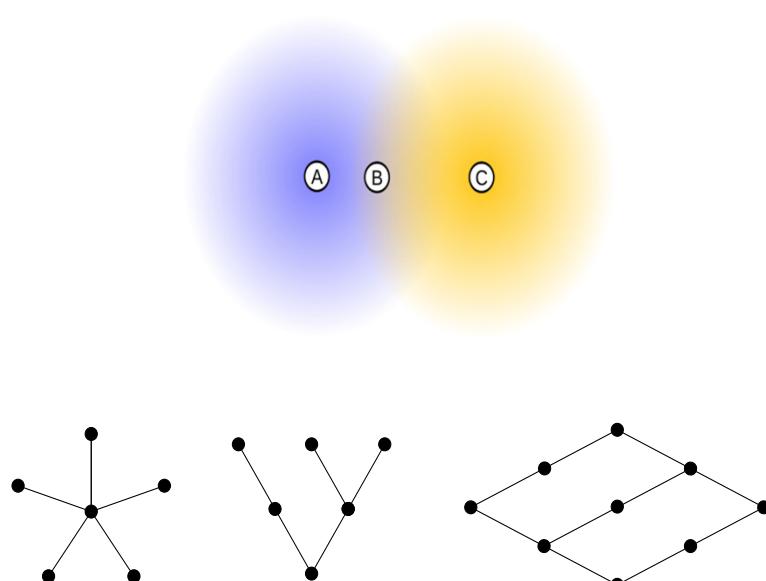
# Drahtlose Übertragung in der Luft

- Antennenabstrahlcharakteristik
  - ungerichtet / omni-direktional
  - gerichtet / direktional
  - Mehrantennensysteme (Beamsteering, MU-MIMO)



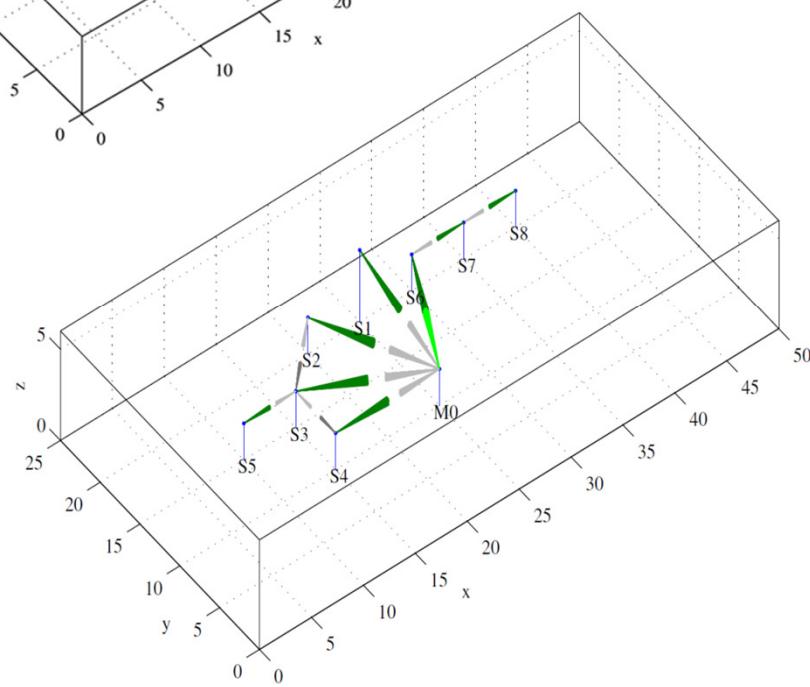
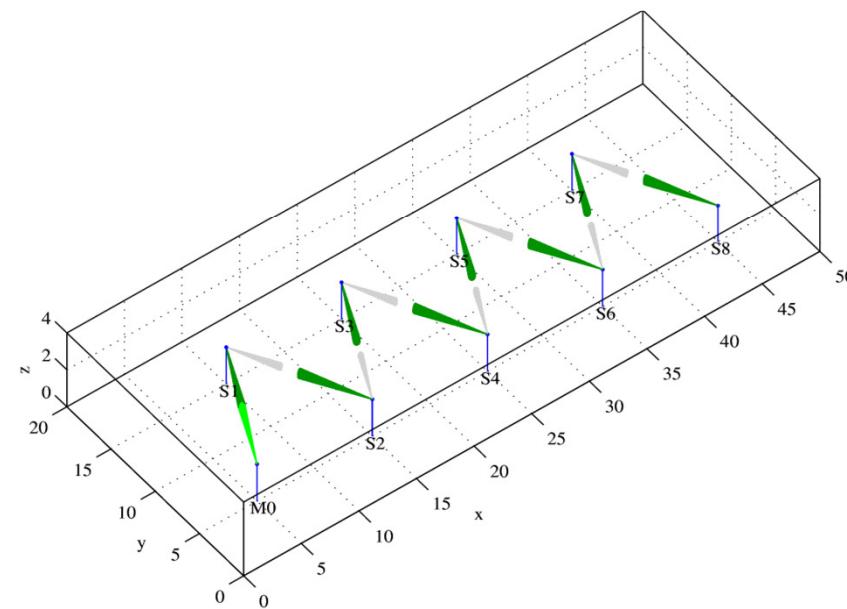
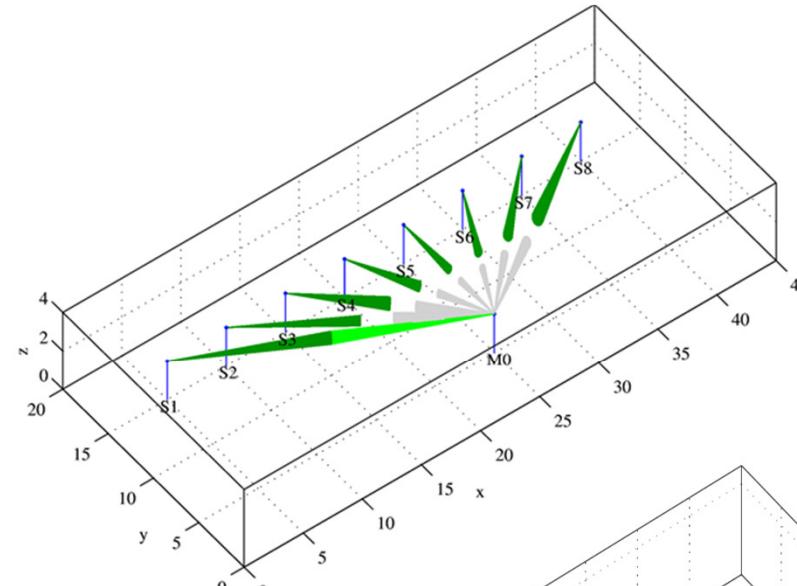
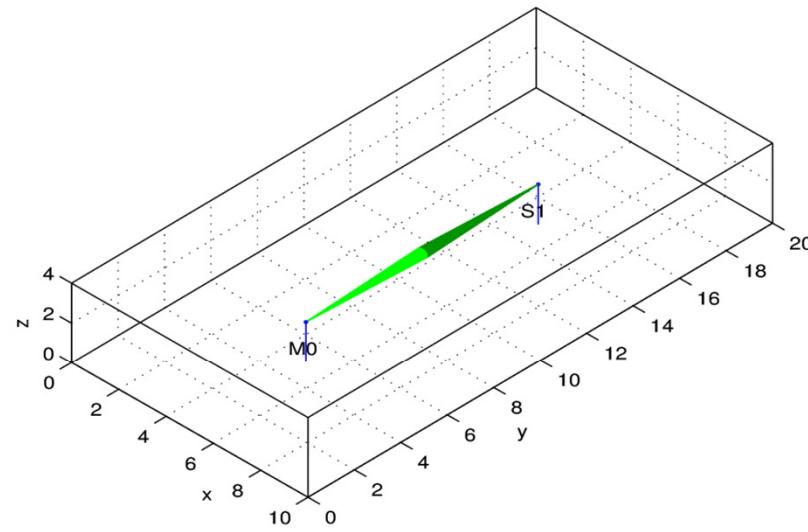
# Kommunikationsszenarien

- **Teilnehmer-/Nachbarsuche vor Kommunikationsaufbau**
  - ad-hoc / infrastructure
- **Antennenabstrahlcharakteristik**
  - Ausrichtung: manuell und/oder elektronisch
- **Single-hop vs. multi-hop, Mesh**
- **Aufbau der Routingtabelle auf Basis benachbarter Teilnehmer**



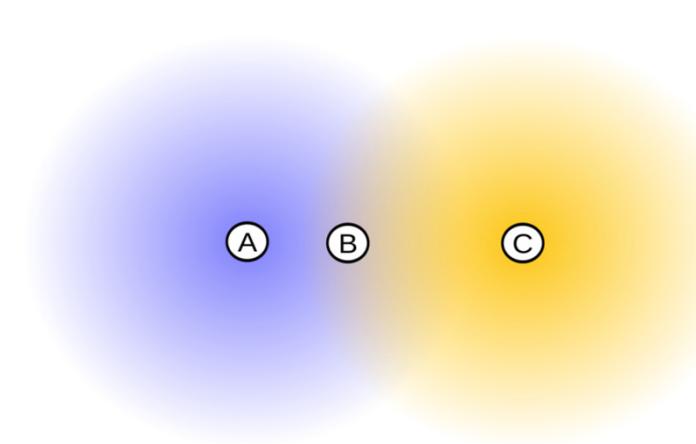
Singh, Interference Analysis for Highly Directional 60-GHz Mesh Networks:  
The Case for Rethinking Medium Access Control, 2010

# Kommunikationsszenarien



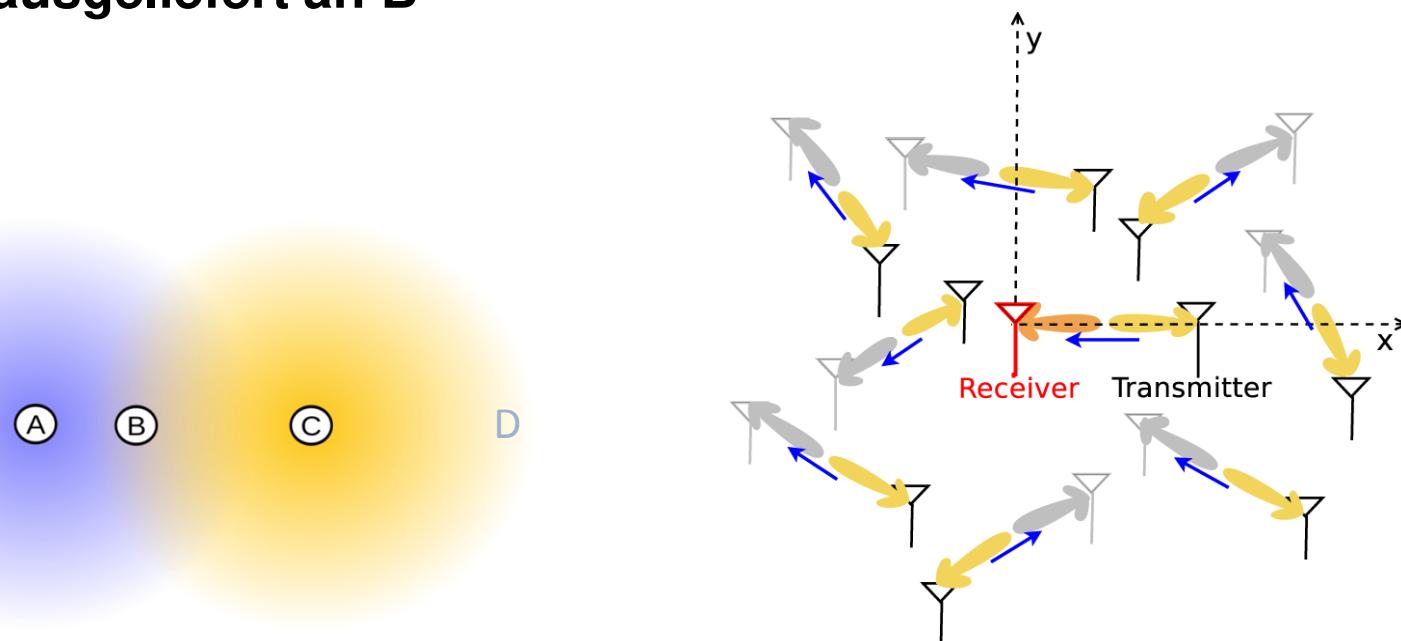
## Effekte: Hidden Terminal

- **Problem des versteckten Systems (hidden terminals)**
  - A sendet nach B, C kann A nicht empfangen
  - C sendet nach B, da für C Medium frei ist
  - Kollision bei B: A sieht Kollision nicht
  - A ist versteckt für C
- **Lösung: MACA RTS/CTS**



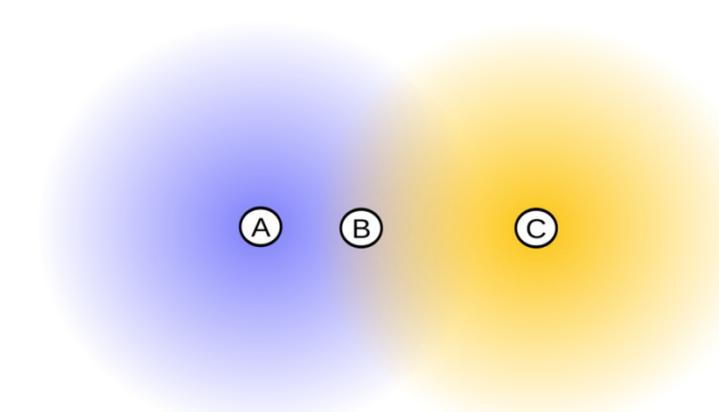
## Effekte: Exposed Terminal

- **Problem des ausgelieferten Systems (exposed terminals)**
  - B sendet zu A, C möchte an D senden
  - C sieht Kanal als belegt und wartet
  - da C außerhalb des Empfangsbereiches von A ist, muß C aber nicht warten
  - C ist ausgeliefert an B



## Effekte: Near-Far

- **Problem der nahen und fernen Systeme**
  - Empfangsleistung nimmt quadratisch mit der Entfernung ab
  - B sendet zu A
  - C sendet zu A
  - B übertönt das Signal von C



# Medienzugriffsprotokolle: Nicht alle auf einmal!?

- **Medium Kabel: CSMA/CD**
  - Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection
  - Detektierung der Kollision durch den Sender oder andere Teilnehmer
- **Medium Luft: CSMA/CA**
  - **Kollisionen passieren am Empfänger!**
  - Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
  - Kollisionsvermeidung durch vorheriges Abhören des Kanals
  - Abhören des Kanals
  - wenn frei dann senden
  - aber in diesem Moment auch die höchste Wahrscheinlichkeit einer Kollision

# Medienzugriffsprotokolle: Nicht alle auf einmal!?

## Reduzierung der Kollisionswahrscheinlichkeit

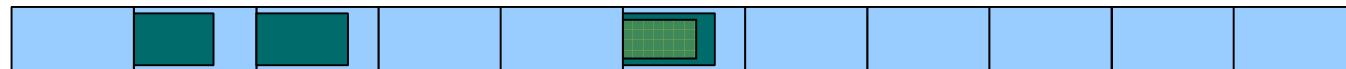
- **Multiplexverfahren:** SDMA, FDMA, TDMA, CDMA
- **Duplexverfahren:** Simplex, Halb-/Vollduplex, TDD, FDD
- **wettbewerbsbasierte Zugriffsverfahren**
  - DCF – Distributed Coordination Function
- **wettbewerbsfreie Zugriffsverfahren:**
  - Polling
  - Reservierung nach Bedarf (Scheduling)  
(meist in einer wettbewerbsbasierten Phase)

## Medienzugriff mit Protokoll

- **ALOHA (Univ. von Hawaii 1970)**
  - unkoordinierter Zugriff, gleichlange Pakete
  - kein Schutz vor Kollisionen
  - max. Durchsatz: 18%



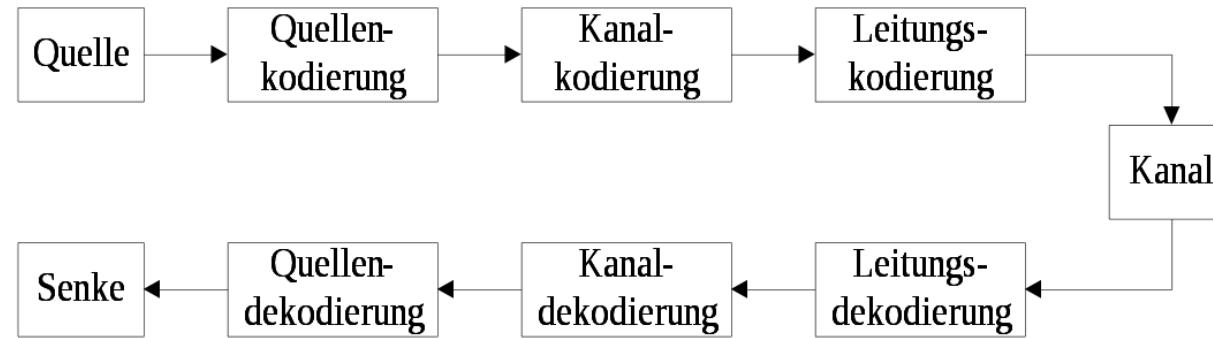
- **slotted ALOHA**
  - synchronisiertes ALOHA über Zeitschlüsse
  - Kollisionswahrscheinlichkeit halbiert
  - max. Durchsatz: 36%



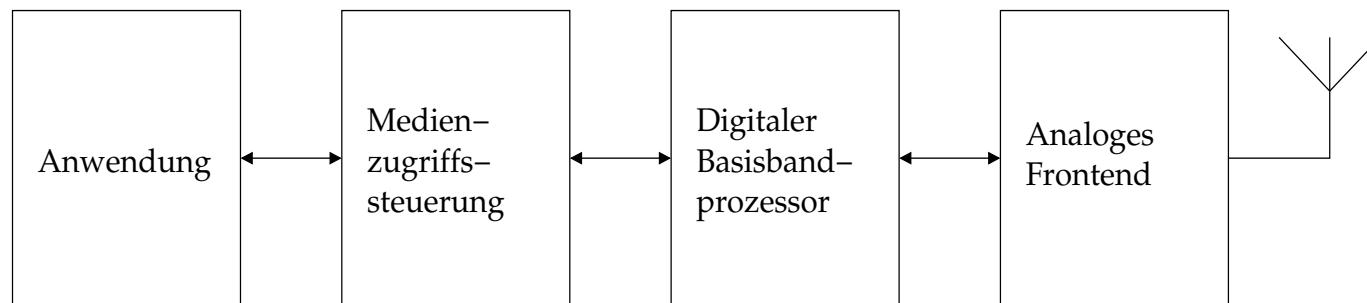
## Aufgaben eines Medienzugriffsprotokolls

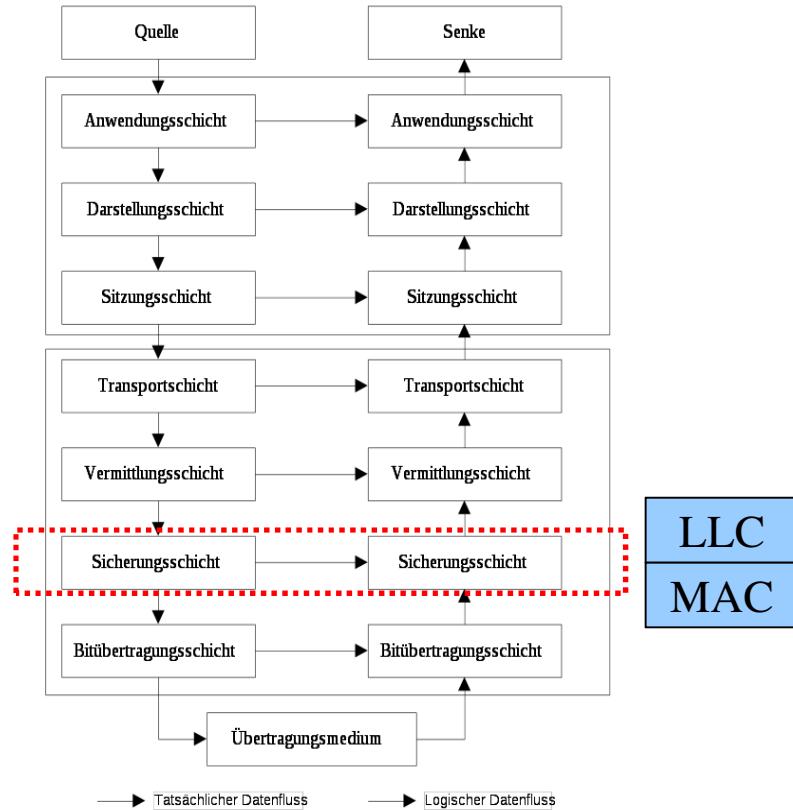
- Steuerung des Zugriffs auf das gemeinsame Medium
- Zeitsynchronisation der Stationen
- Beamforming und Beamsteering
  - Auswahl der Abstrahlcharakteristik
- Teilnehmersuche
- Sicherung der Datenübertragung (ACK/RETRY/Reihenfolge)
- Anpassung der Übertragungsparameter an die aktuellen Eigenschaften des Kanals
  - Maximale Paketlänge, ACK-Policy
  - Modulation und Fehlerkorrektur
- QoS: Priorisierung bestimmter Pakete/Datenströme
- Authentifizierung der Teilnehmer
- Koexistenz mit anderen Netzen
  - Einhaltung der Regulierung (ETSI, ITU)
- Powermanagement

# Systemarchitektur eines Kommunikationssystems



- **Systemaufbau mit MAC-Komponente**
  - **MAC-Schnittstelle als Teil des Protokollstacks der Betriebssystemtreiber**
  - **Anbindung über Router mit integriertem Access Point (AP)**





- Sicherungsschicht (DLC) unterteilt in

## LLC – Logical Link Control

- ARQ
- Flow control
- Fragmentierung/Aggregierung
- Sequence number

## MAC – Medium Access Control

- multiple access control
- PHY/MAC addressing
- packet switching
- queuing and scheduling
- QoS

## Standardisierung

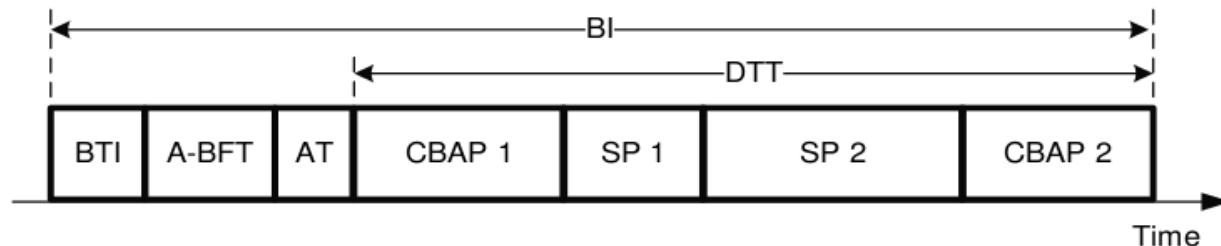
- **IEEE 802.11: WLAM (WiFi)**
- **IEEE 802.15: WPAN**
  - **802.15.1 (2005): Bluetooth**
  - **802.15.4 (2006): ZigBee**
  - **802.15.3c (2009): Millimeter wave (60 GHz) based Alternative Physical Layer Extension**
- **ECMA 368 (-2008): High Rate Ultra Wideband PHY and MAC Standard (WiMedia), 450 Mb/s, TDMA, distributed**
- **ECMA 387 (2008-2010): High Rate 60GHz PHY, MAC and HDMI PAL 6.3 Gbit/s to 25 Gbit/s (channel bonding of 4 channels)**
- **WirelessHD (2010)**
  - **mmWave im 60 GHz Band**
  - **Uncompressed video transmission**
  - **LR-, MR-, HR-PHY OFDM <7.1 Gbit/s**

## Standardisierung: IEEE 802.11 (WiFi) 1999 - ...

- **802.11n (2009): Enhancement for higher Throughput**
  - **2.4 & 5 GHz, 4\*150 Mbit/s, 40 MHz bandwidth, PSDU<65 KB**
- **802.11ac (2013): Enhancements for Very High Throughput for Operation in Bands below 6 GHz**
  - **20-160 MHz bandwidth, 1-8 Streams, max. 6,9 Gbit/s, PSDU<1 MB**
- **802.11ad (2012): Enhancements for Very High Throughput in the 60-GHz-Band**
  - **Directional Multi-Gigabit (DMG) PHY, 4\*2.16 GHz bandwidth**
  - **SC: 4.6 Gbit/s OFDM: 6.7 Gbit/s, PSDU<256 KB**
  - **Control-, OFDM-, SC-, low power SC-PHY, fast session transfer**
- **Nachfolger von n/ac: 802.11ax – 4\*4 MU-MIMO, Steigerung in “gut gefüllten” Netzen**
- **Nachfolger von ad: 802.11ay – MIMO mit bis zu 4 Streams**

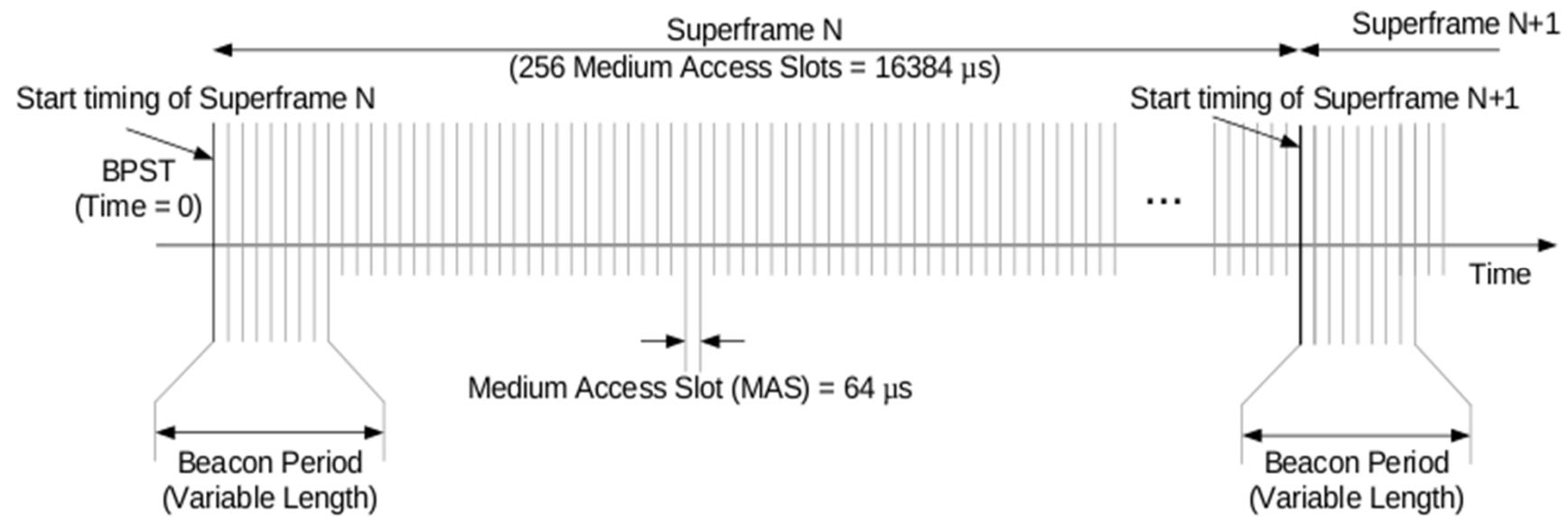
# Medienzugriff: Rahmenaufbau im IEEE 802.11-Standard

- **ad-hoc-Modus und Infrastrukturmodus (AP)**
- **BI** beacon interval
  - **BTI** beacon transmission interval
  - **A-BFT** association beamforming training
  - **AT** announcement time (channel switch, BI duration change)
  - **DTT** data transfer time
    - **CPAB** contention-based access period
    - **SP** service period



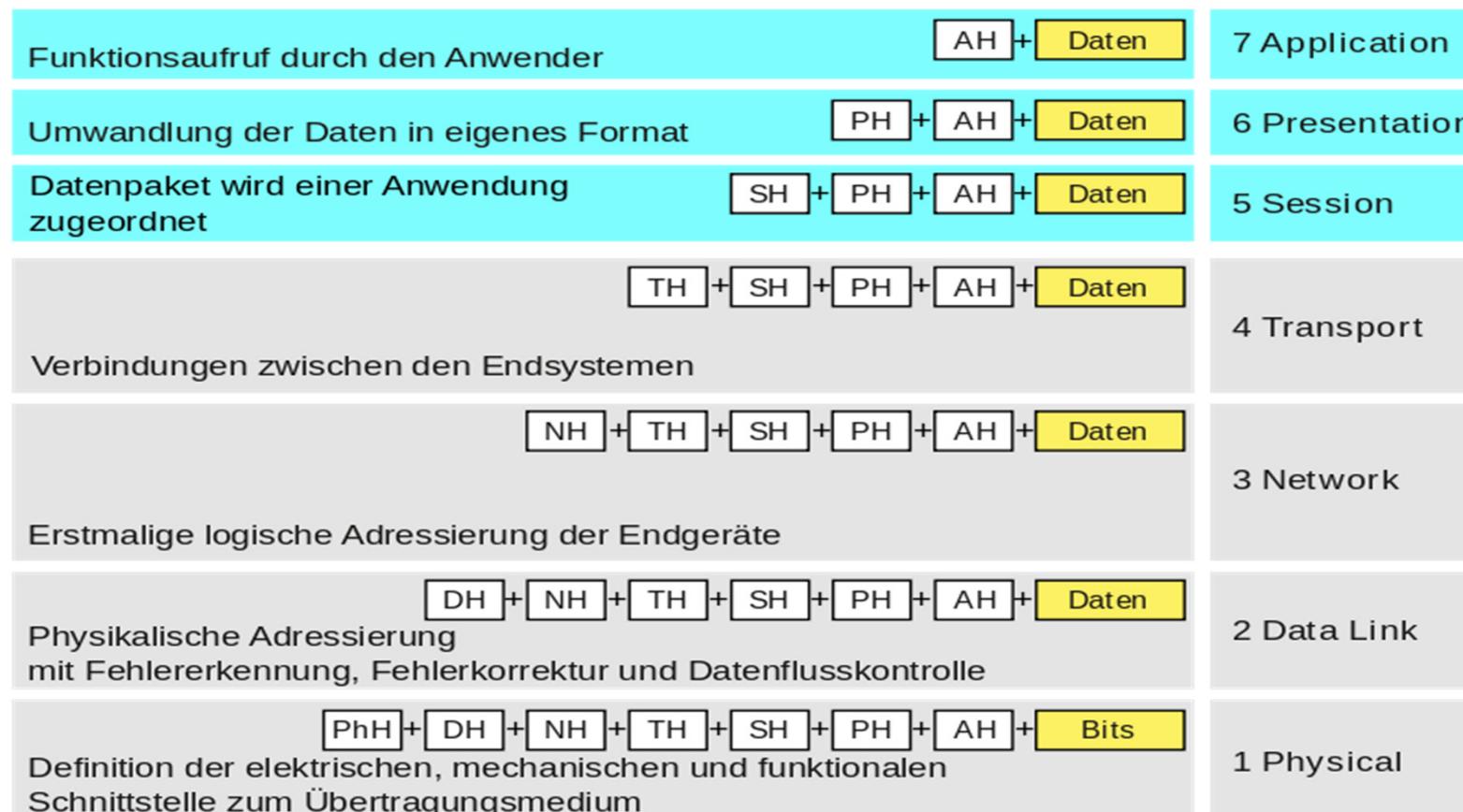
# Medienzugriff: Rahmenaufbau im ECMA387-Standard

- **verteiltes MAC-Protokoll (kein Master)**



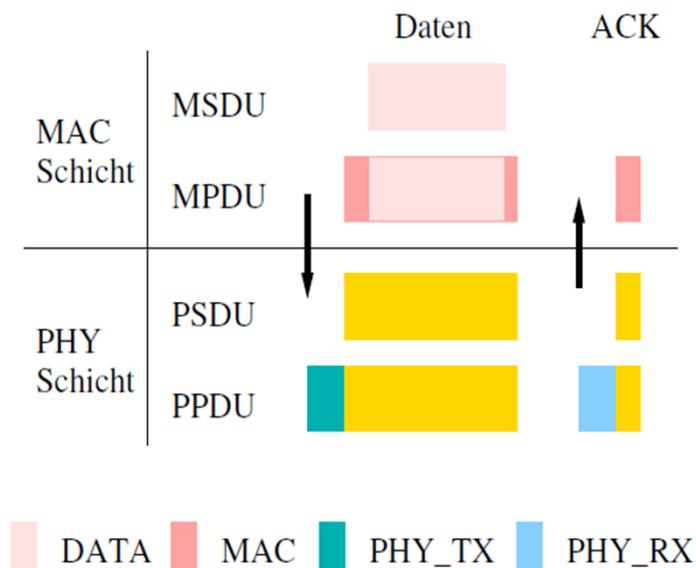
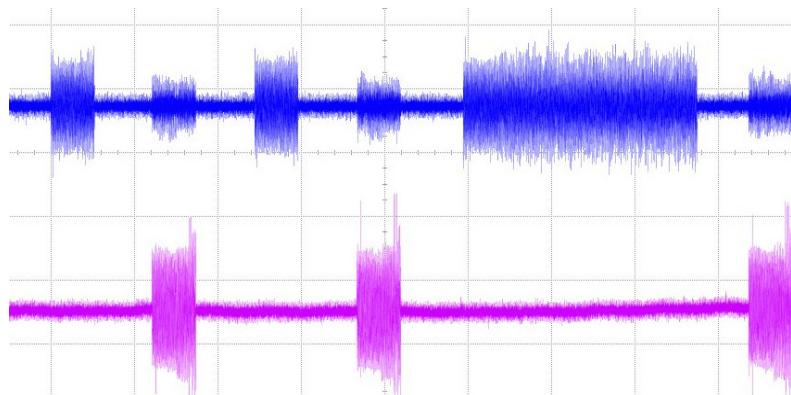
# Einpacken → Verschicken → Auspacken

- Kapselung der Pakete durch die OSI-Schichten
- Hinzufügen von schichtspezifischen Headern -> Overhead



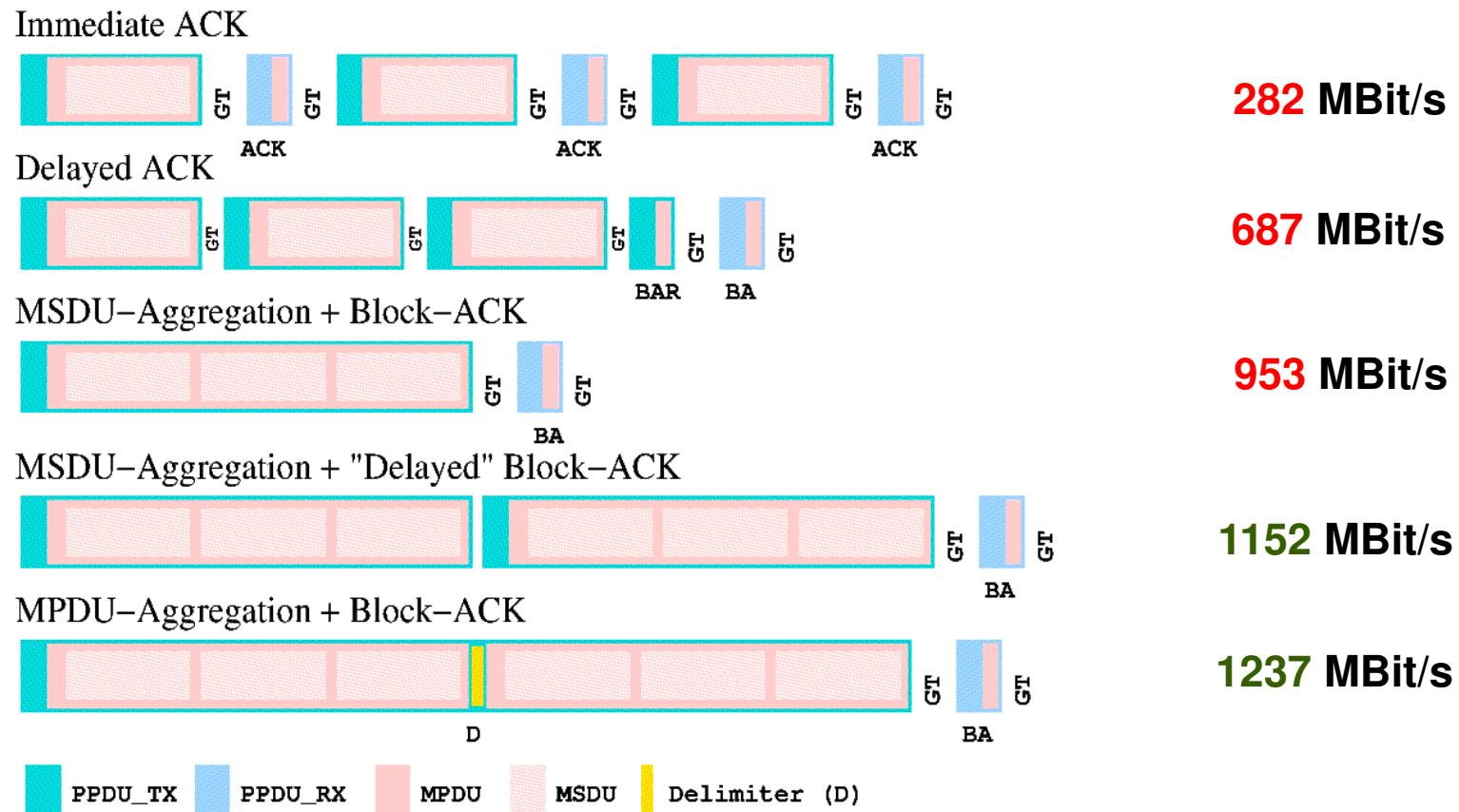
# Einpacken → Verschicken → Auspacken

- Sicherungsschicht: MAC-Header
  - SRC, DEST, length, sequence number, frame type
  - QoS: stream number, class (VO, VI, BE, BK)
  - ACK-Policy, ACK-Information
  - HCS, FCS
- Overhead: PHY+MAC



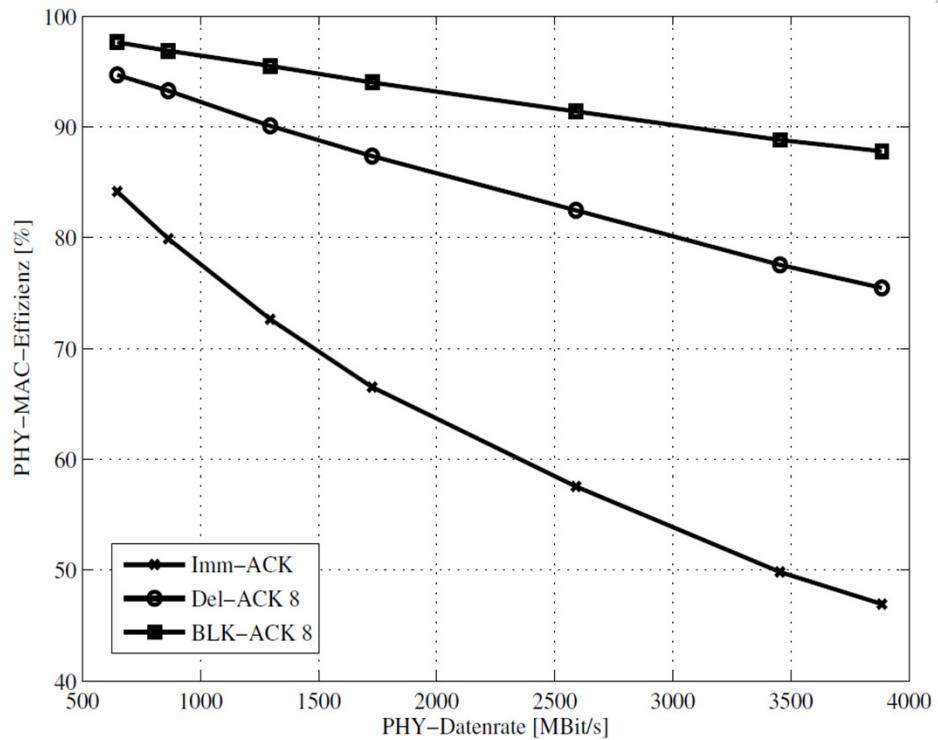
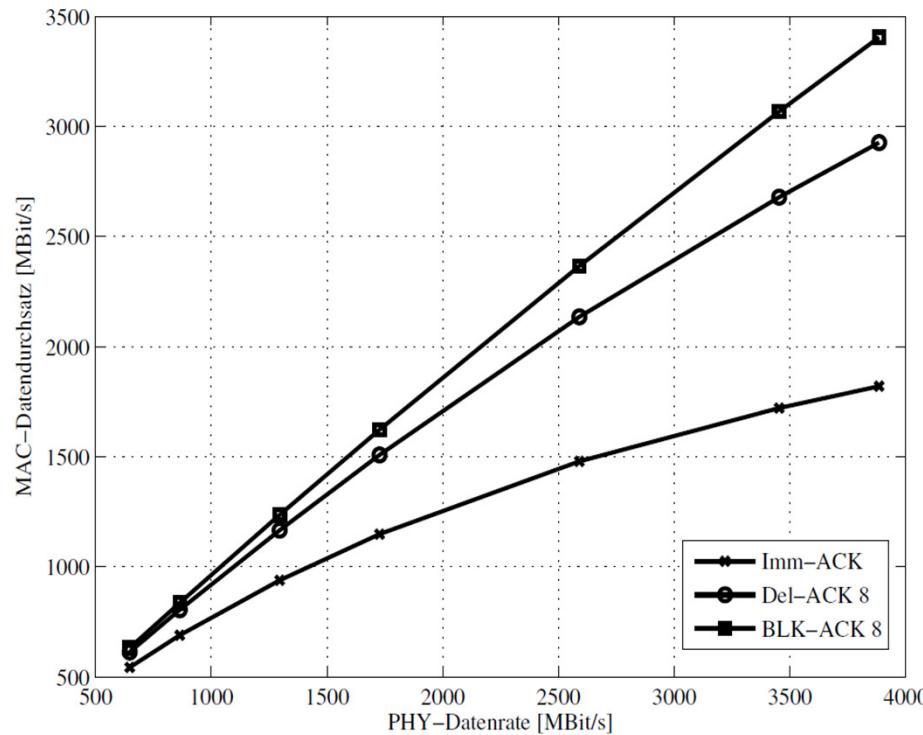
# Reduzierung des Overheads

- **PHY-Datenrate: 1,3 GBit/s netto 2,6 GBit/s brutto R=1/2**
- **Ethernet-Paketgröße: 1514 Bytes**



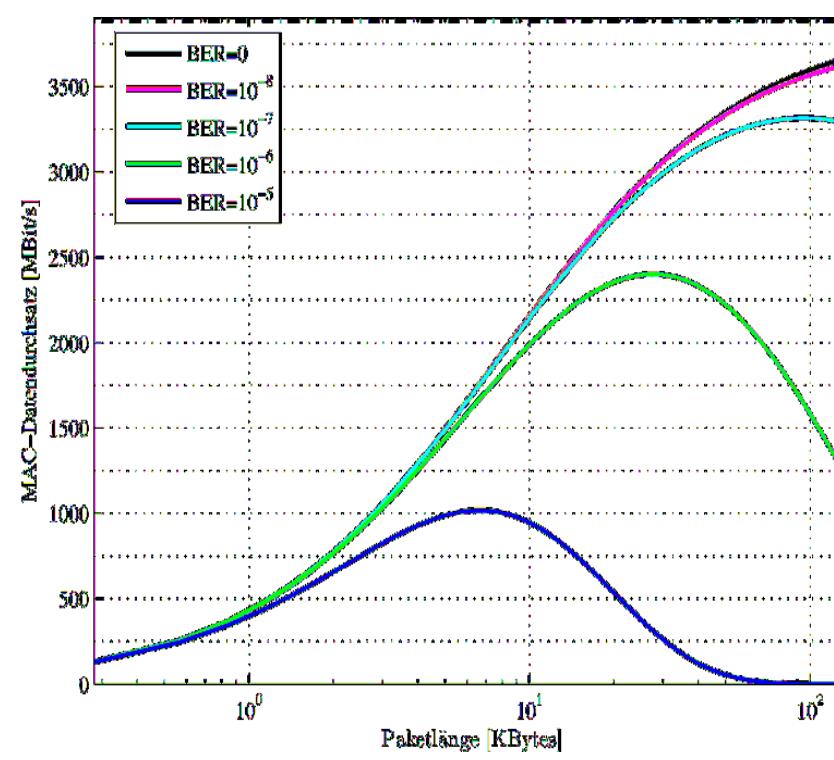
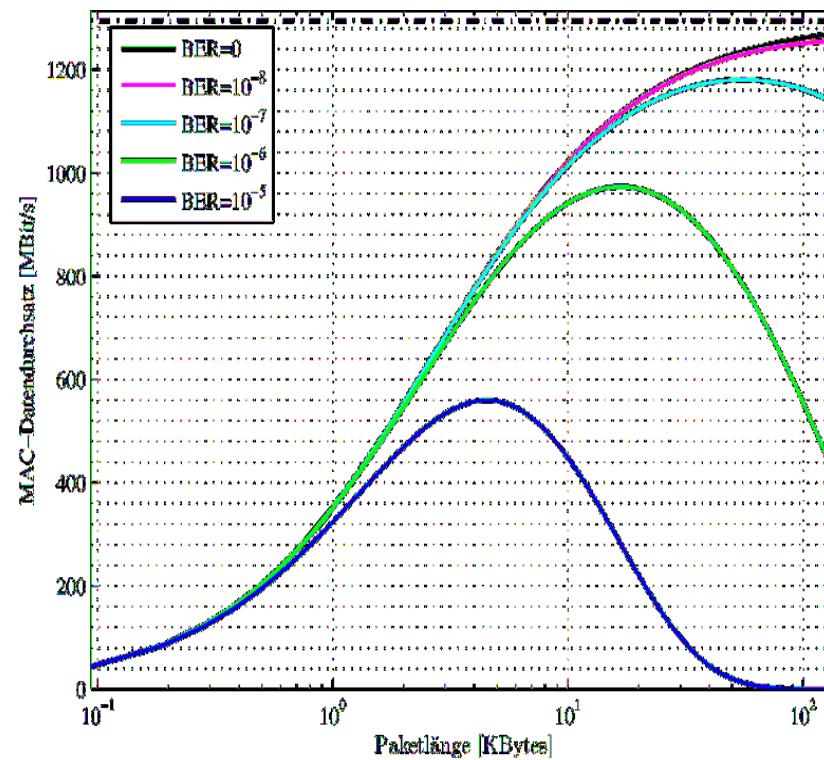
# MAC-Datendurchsatz bei fehlerfreier Übertragung

- Steigerung der PHY-MAC-Effizienz durch Paketaggregierung

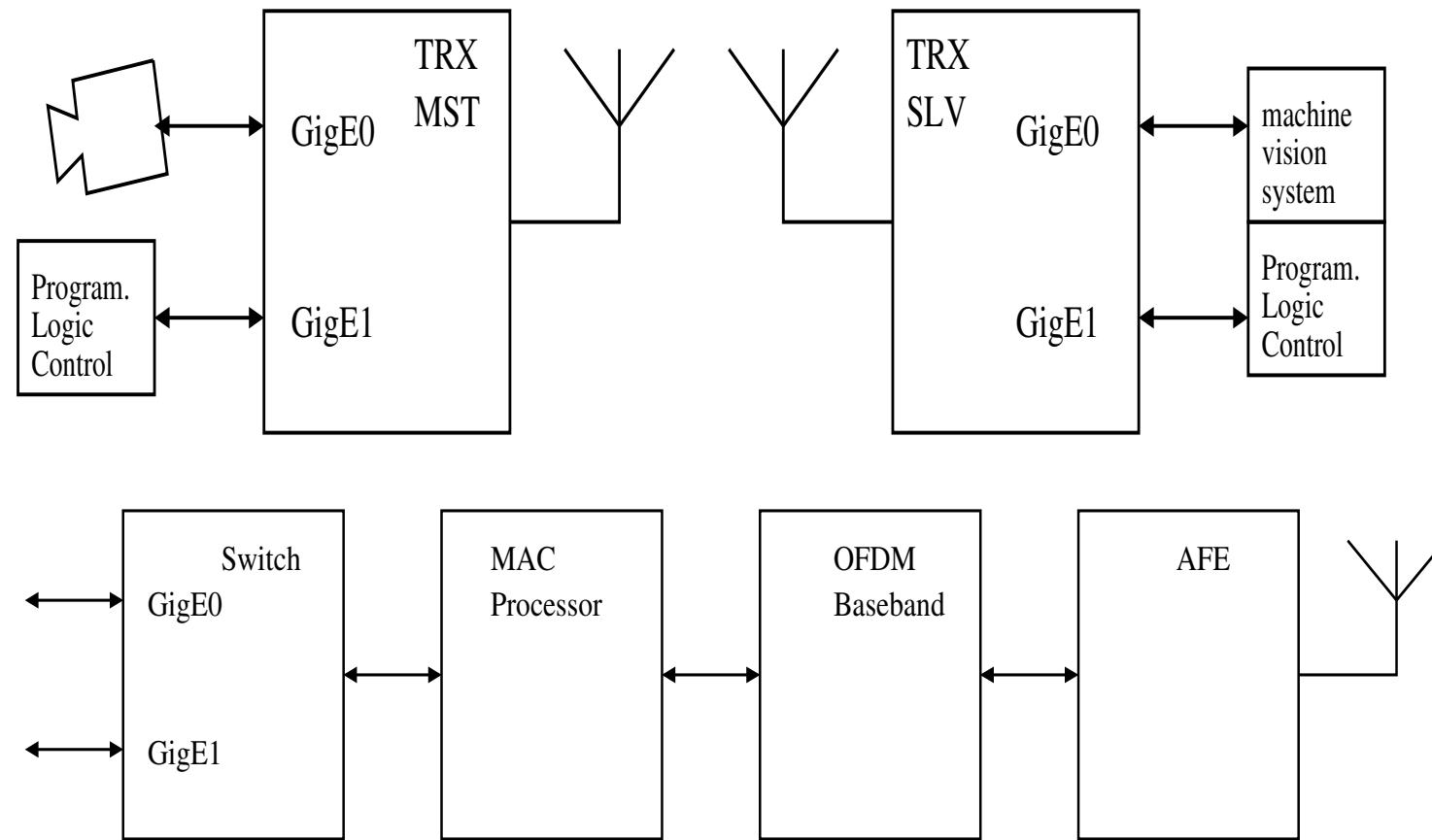


# Einfluß der Paketgröße bei fehlerbehafteter Übertragung

- Fragmentierung vs. Aggregierung
- abhängig von der Bitfehlerrate
- MPDU-Aggregierung + BLK-ACK + selective repeat request
  - Trenner zwischen MPDU -> im Fehlerfall geht nicht die komplette Übertragung verloren



# Demonstrator 60 GHz Kommunikationssystem



## System parameter: OFDM baseband processor

- Results from the EASY-A project
- Channel bandwidth: 2.16 GHz
- Sample frequency: 2.16 Gsps
- FFT size = 1024
- OFDM symbol duration: 593 ns
- Subcarriers: 768 data / 60 pilots / 5 zero
- Subcarrier spacing: 2.11 MHz
- Subcarrier modulation: BPSK, QPSK, 16-QAM
- Forward Error Correction: CC, optional RS
- Different code rates: 1/2, 2/3, 3/4
- Data rates: 650 ... 3860 Mb/s
- Signal field provides 8 subpackets per PHY frame
- Current system parameters: QPSK-1/2 CC -> net data rate 1.3 Gb/s

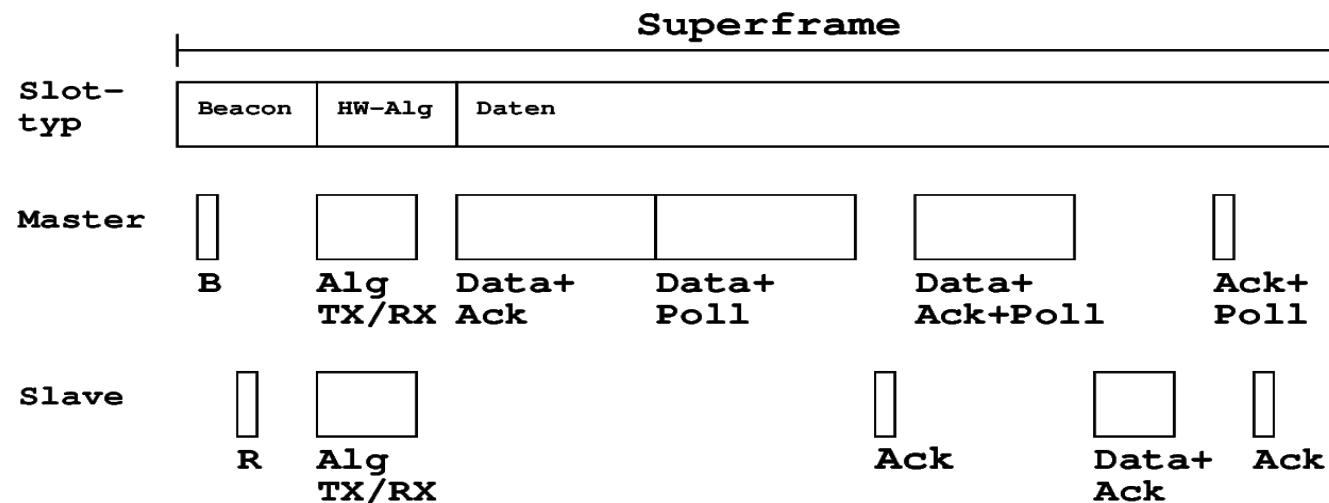
## System architecture: CCD camera system

- Image resolution 1292 x 960 RGB
- **953 Mb/s data rate @ 32 frames per second**
- Configurable Ethernet packet sizes up to 64 kBytes
- Automatic Repeat reQuest (ARQ)
- Asymmetrical bandwidth scenario
- GigE interface



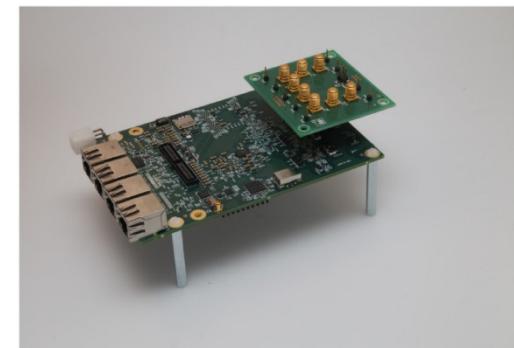
# Medienzugriffssteuerung

- Punkt-zu-Punkt, single-hop, Polling
- ARQ: selective-repeat-request mit positiven Bestätigungen
- Ethernet-Paketaggregierung auf bis zu 16 kBytes
- Anwendungsschnittstelle für den Zugriff auf den Übertragungskanal

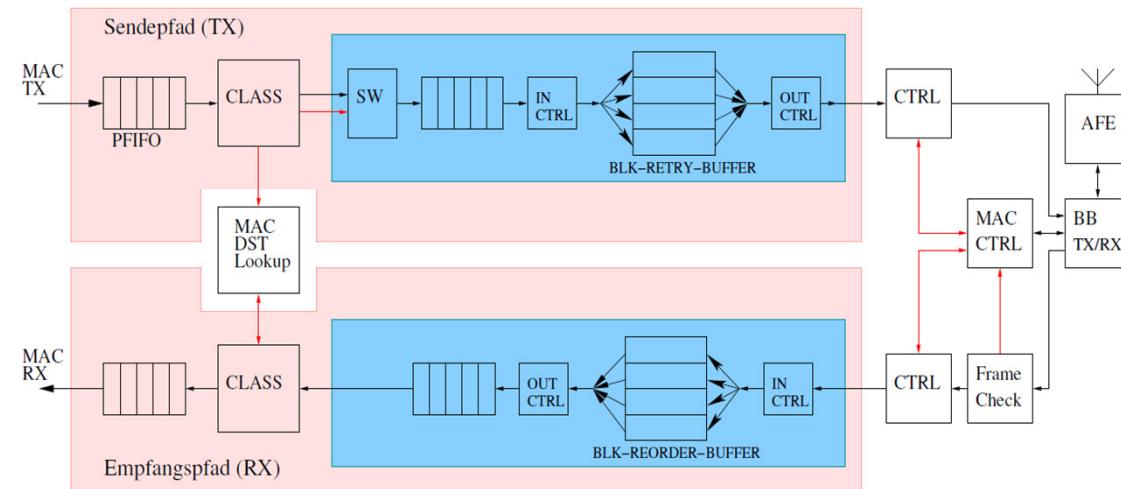
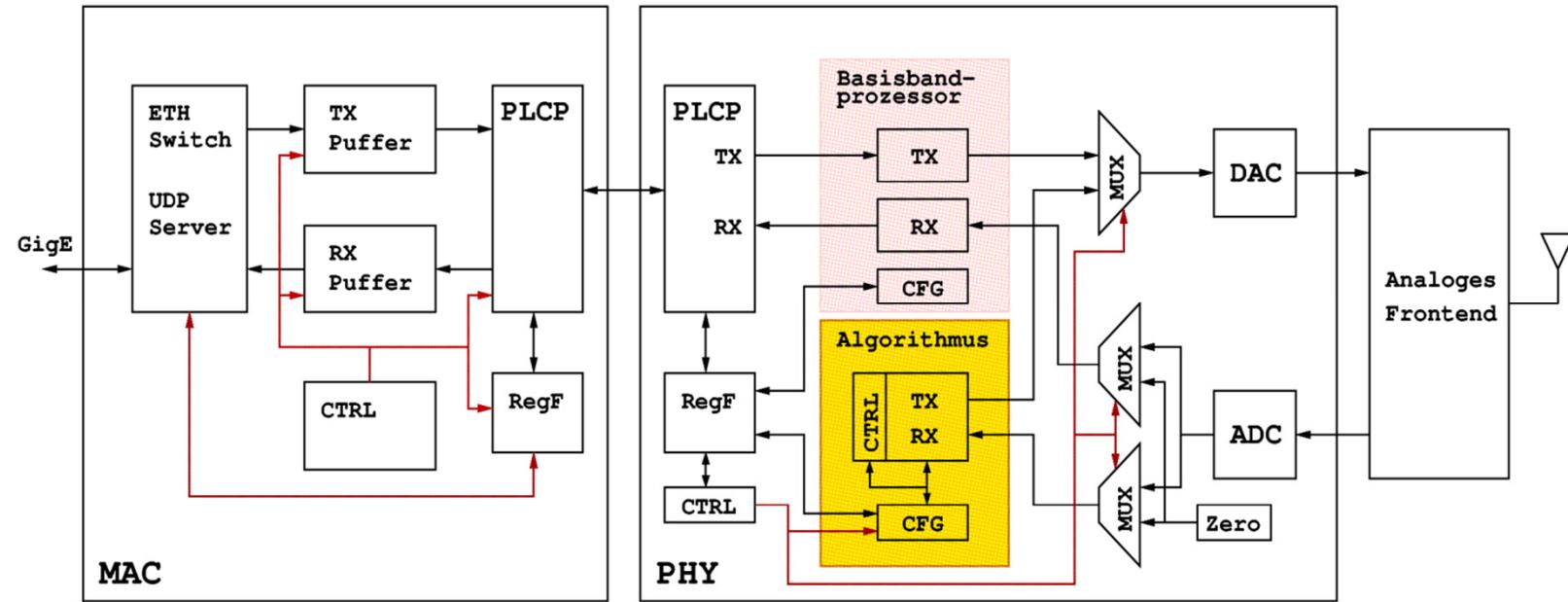


# Demonstrator: Setup und Performanz

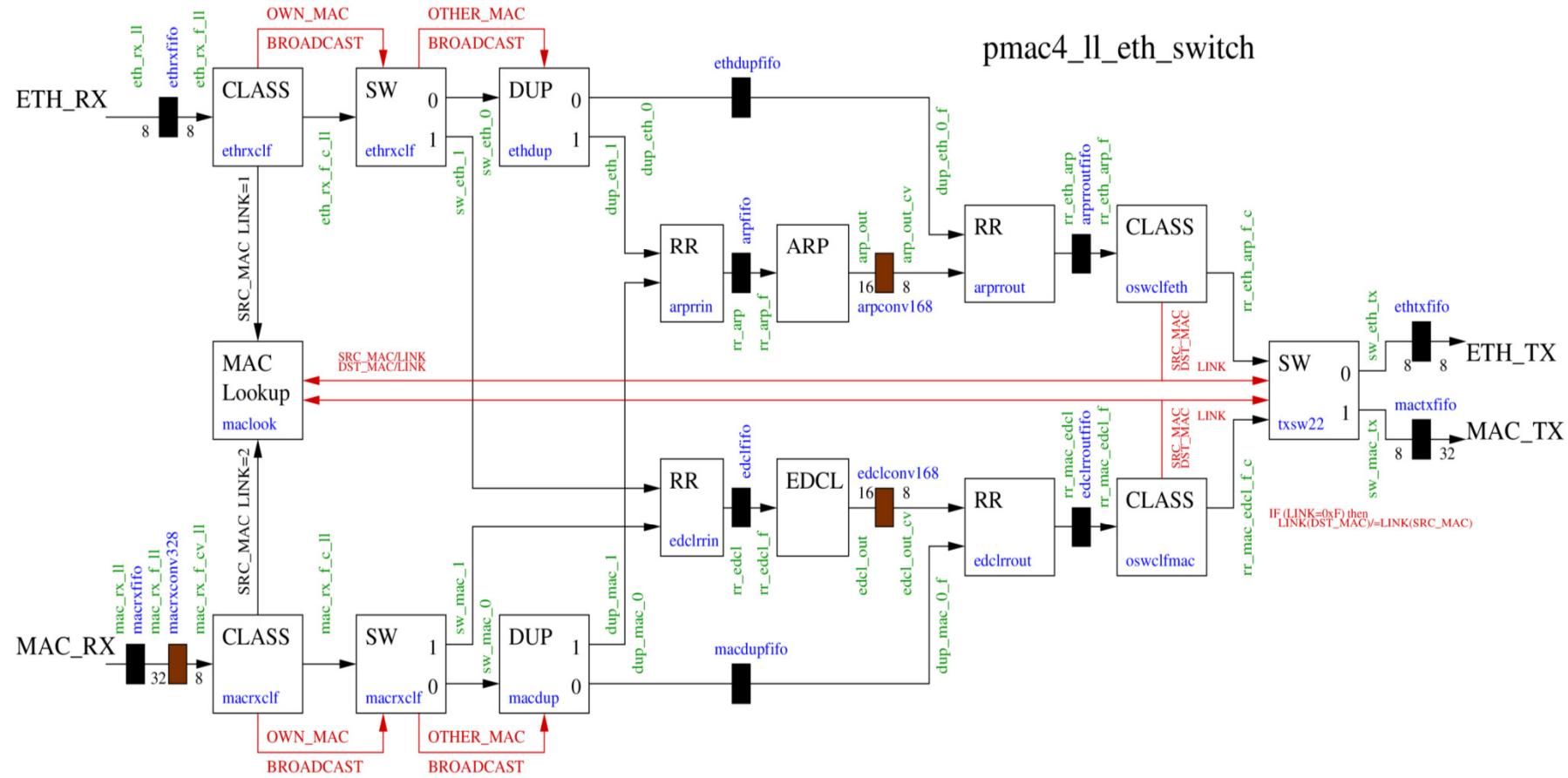
- Funktionalität in programmierbarer Hardware (FPGA)
- Demonstratorsetup:
  - Basisband: OFDM, 2,16 GHz Bandbreite, bis 3,8 Gbit/s netto -> aktuell 1,3 Gbit/s
  - Downlink: Camera Data Link (950 Mbit/s)
  - Uplink: Camera control and video link (25 Mbit/s)
- Measured 7500 PHY-frames per second of about 16 kBytes up to 8 m
  - 11 errors -> PER=1.5\*10<sup>-3</sup>



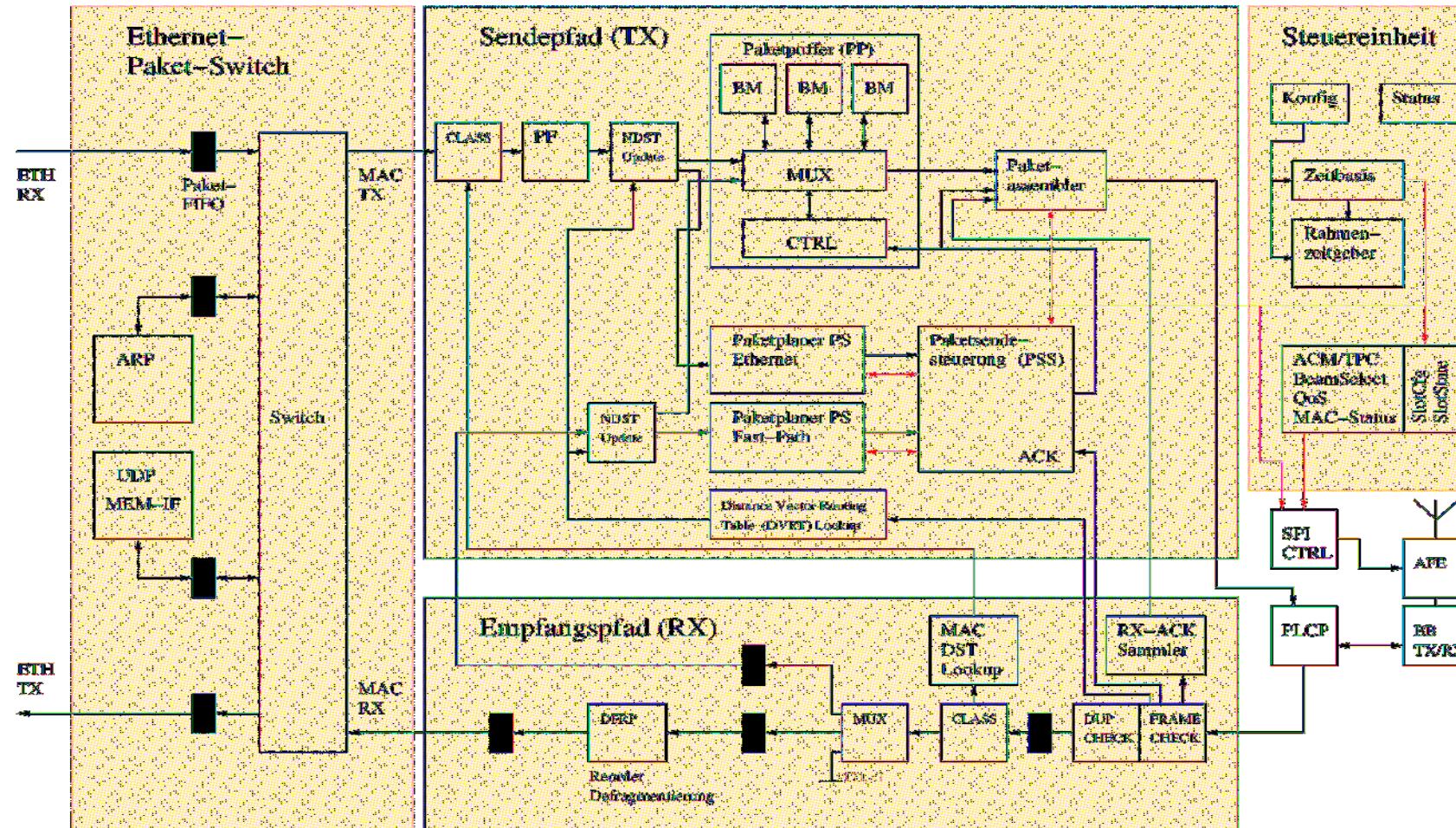
# Demonstrator: MAC Architektur Punkt-zu-Punkt



# 60 GHz OFDM Demonstrator



# MAC-Systemarchitektur: Punkt-zu-Multipunkt





# Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Marcus Ehrig

**IHP – Leibniz-Institut für innovative Mikroelektronik**  
Im Technologiepark 25  
15236 Frankfurt (Oder)  
Tel.: +49 (0) 335 5625 728  
Fax: +49 (0) 335 5625 671  
E-Mail: [ehrig@ihp-microelectronics.com](mailto:ehrig@ihp-microelectronics.com)

**[www.ihp-microelectronics.com](http://www.ihp-microelectronics.com)**

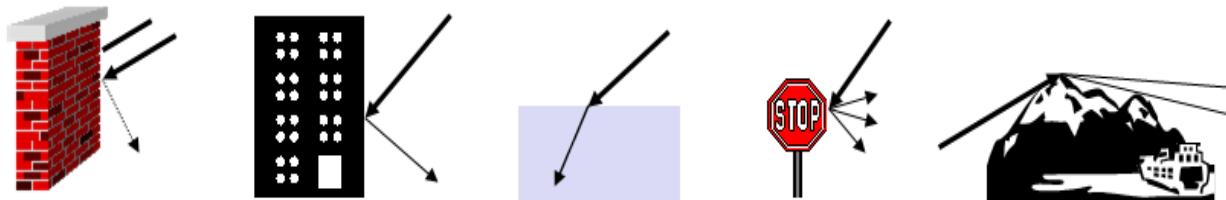


innovations  
for high  
performance  
micro**e**lectronics

Mitglied der  
**Leibniz**  
Leibniz-Gemeinschaft

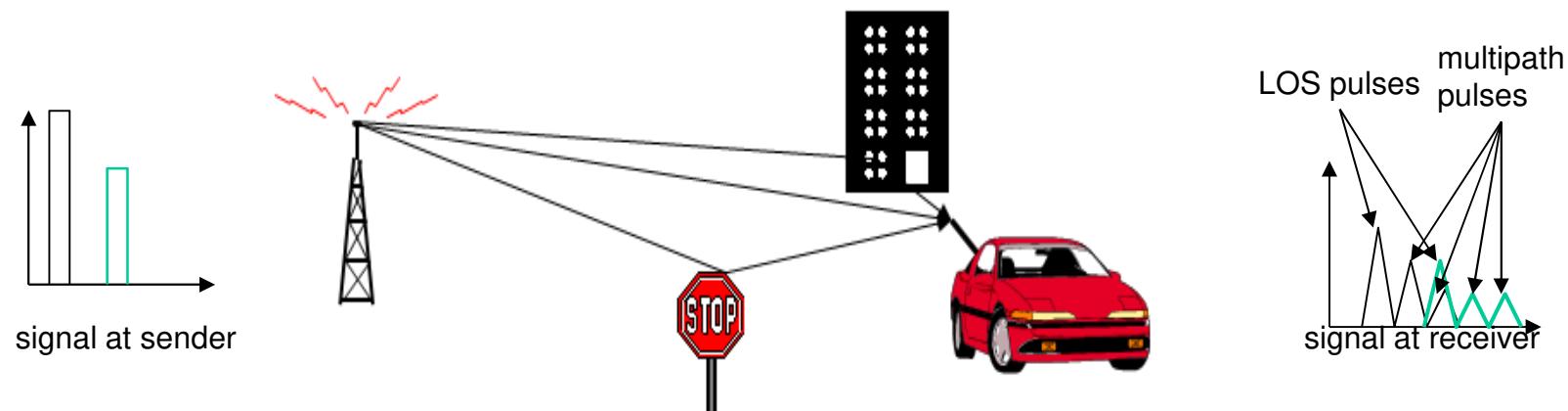
# Drahtlose Übertragung in der Luft

- **Abschattung**
- **Reflexion an großen Objekten**
- **Brechung abhängig von der Dichte des Mediums**
- **Streuung/Diffusion an kleinen Objekten**
- **Beugung an Kanten und Bergkuppen**



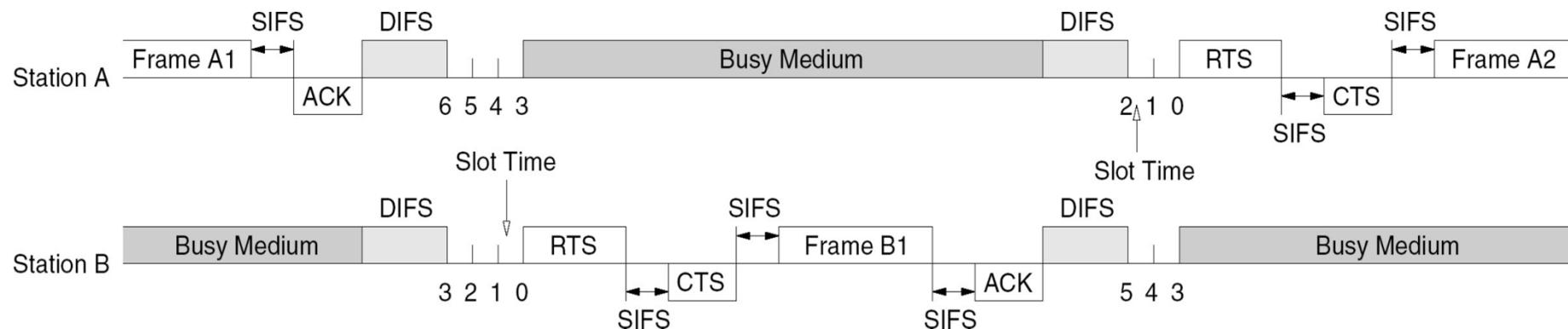
# Drahtlose Übertragung in der Luft

- **Mehrwegeausbreitung:**
  - unterschiedliche Laufzeiten
  - LOS- und NLOS-Pfad
  - Inter-Symbol-Interference (ISI)



## Wettbewerbsbasierter Medienzugriff mit DCF

- **Carrier sense: physikalisch (RSSI) und virtual (NAV)**
- **Inter Frame Spaces (IFS) – Priorisierung des Zugriffs**
- **Backoff**
  - Warten bis Medium für  $\geq (S/P/D)IFS$  frei
  - Würfeln der Backoff-Zeit, wenn backoff timer = 0
  - Reduziere backoff timer um slot-time, wenn slot frei
  - Sende Frame, wenn backoff timer = 0



## Darf's denn auch etwas schneller sein?

### MAC efficiency

$$E = \frac{T_{MAC\_payload}}{T_{PHY} + T_{PHY\_payload}}$$

$$T_{MAC\_payload} = \frac{N_{payload\_bits}}{N_{bits\_per\_OFDM\_symbol}} \times T_{OFDM\_symbol}$$

$$T_{PHY\_payload} = \left[ \frac{N_{MAC\_hdr\_bits} + N_{payload\_bits} + N_{FCS\_bits}}{N_{bits\_per\_OFDM\_symbol}} \right] \times T_{OFDM\_symbol}$$

$$T_{PHY} = T_{preamble} + T_{signal\_field}$$

$$T_{PPDU} = T_{PHY} + T_{PHY\_payload}$$

$$T_{PPDU\_ACK} = T_{PHY} + T_{OFDM\_symbol}$$

# Darf's denn auch etwas schneller sein?



**MAC-Datendurchsatz**

$$S = \frac{\text{AmountOfInformationBits}}{\text{TransmissionDuration}}$$

$$FER_a = 1 - (1 - BER)^{L_{MSDU}}$$

$$A_{EASY} = T_{PPDU} + T_{PPDU\_ACK} + 2 \times (T_{TX\_Dly} + T_{RX\_Dly})$$

$$B_{EASY} = T_{PPDU} + T_{TX\_Dly} + T_{RX\_Dly} + 2 \times T_{Guard}$$

$$S_{Imm\_ACK} = \frac{(1 - FER_a) L_{MSDU}}{(1 - FER_a) \times A + FER_a \times B}$$

# Darf's denn auch etwas schneller sein?

**MAC-Datendurchsatz**  $S = \frac{AmountOfInformationBits}{TransmissionDuration}$

$$FER_a = 1 - (1 - BER)^{L_{MSDU}}$$

$$A_{EASY} = T_{PPDU} + T_{PPDU\_ACK} + 2 \times (T_{TX\_Dly} + T_{RX\_Dly})$$

$$B_{EASY} = T_{PPDU} + T_{TX\_Dly} + T_{RX\_Dly} + 2 \times T_{Guard}$$

$$S_{Imm\_ACK} = \frac{(1 - FER_a) L_{MSDU}}{(1 - FER_a) \times A + FER_a \times B}$$

$$A_{EASY} = \sum_{n=1}^N [T_{PPDU}(n) + T_{TX\_Del}] + T_{PPDU\_ACK} + T_{TX\_Dly} + 2 \times T_{RX\_Dly}$$

$$B_{EASY} = T_{PPDU} + T_{TX\_Dly} + T_{RX\_Dly} + 2 \times T_{Guard}$$

$$S_{Dly\_ACK} = \frac{(1 - FER_a) \sum_{n=1}^N [L_{MSDU}(n)]}{(1 - FER_a) \times A + FER_a \times B}$$