



Drahtlose Medienzugriffsprotokolle

Systemdesign für ultra-hochratige Anwendungen

Dr.-Ing. Marcus Ehrig

12.01.2018



innovations
for high
performance

microelectronics

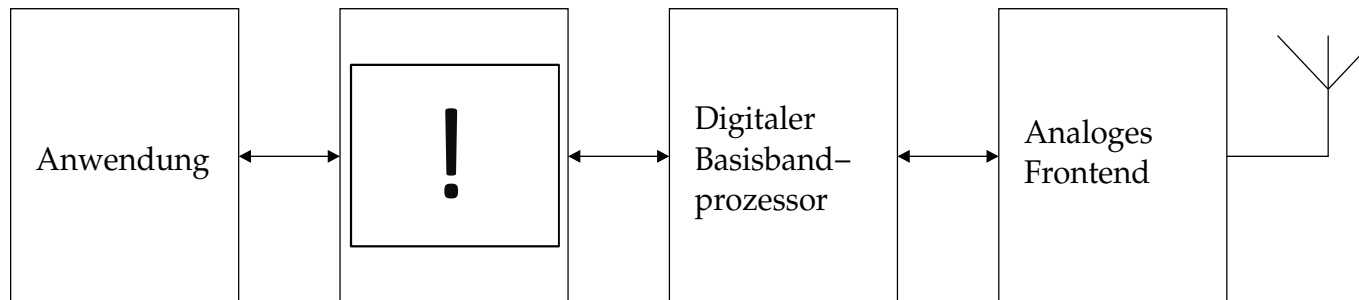
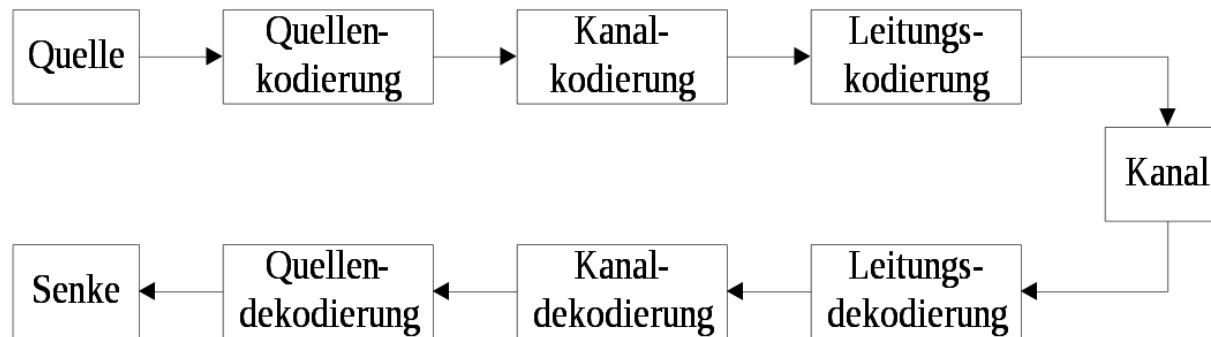
Mitglied der

Leibniz
Leibniz-Gemeinschaft

Agenda

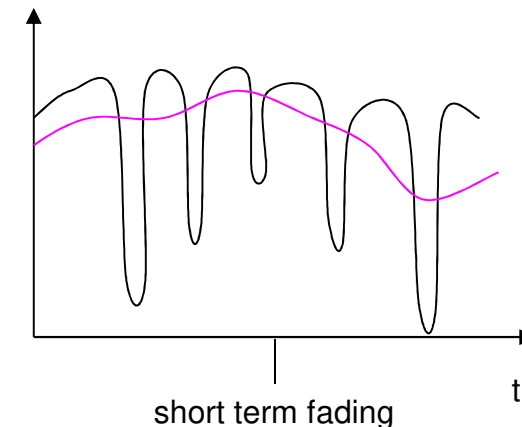
- 1 Einführung und Wiederholung
- 2 Das drahtlose Übertragungsmedium: Luft
- 3 Kommunikationsszenarien
- 4 Medienzugriffsprotokolle
- 5 Steigerung des Datendurchsatzes
- 6 Beispiel: 60 GHz Kommunikationssystem

Einführung: Nachrichtenübertragungssystem



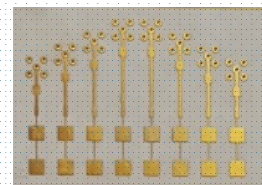
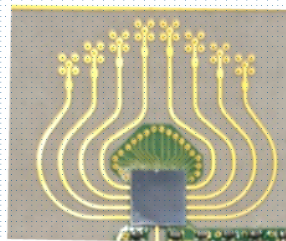
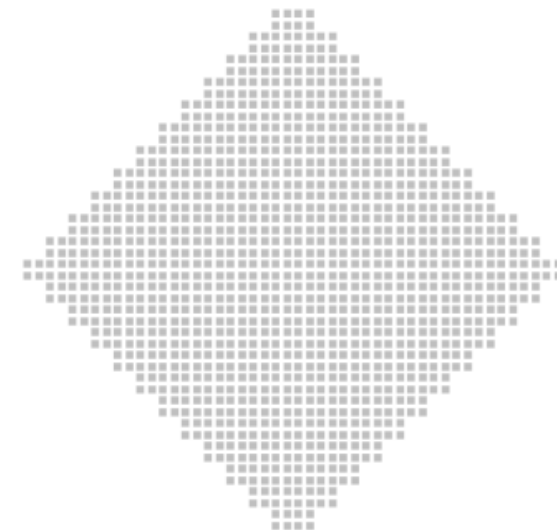
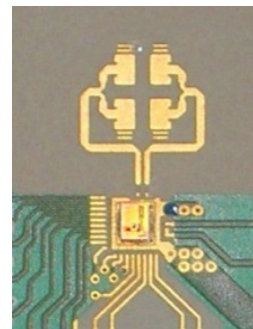
Drahtlose Übertragung in der Luft

- Ausbreitung der Funkwellen wie Licht
- Empfangsleistung nimmt quadratisch mit der Entfernung ab
- Reichweite sinkt mit höherer Trägerfrequenz
→ Freiraumdämpfung: $F[\text{dB}] = 10 \log_{10}(4\pi df/c)^2$
- Dämpfung durch fast-/slow-Fading
 - Frequenzabhängig
 - Standortabhängig
 - Zeitabhängig
- Molekulare Absorptionseffekte in der Atmosphäre
 - Wasserdampf (H₂O) @ 2.4 GHz
 - Sauerstoff (O₂) @ 60 GHz



Drahtlose Übertragung in der Luft

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

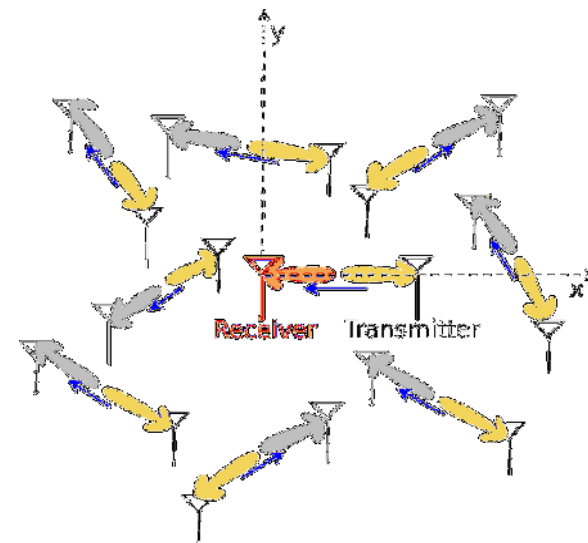
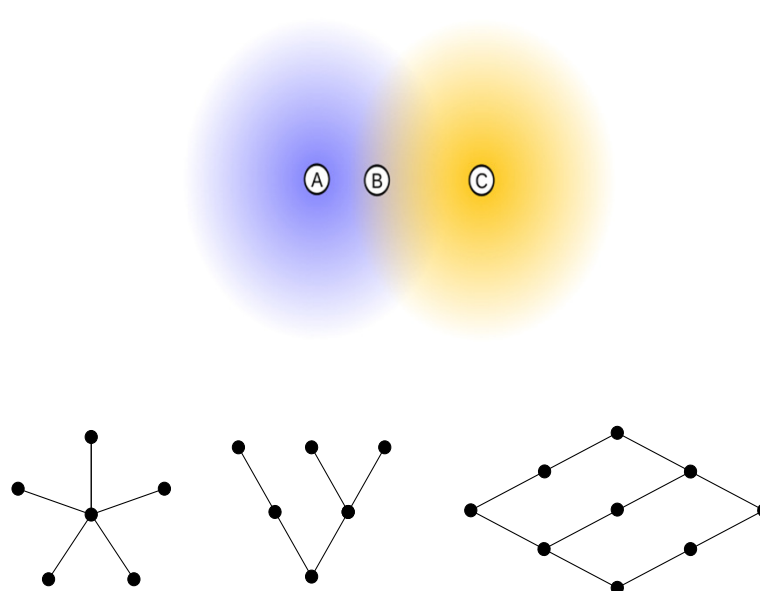


Rückseite

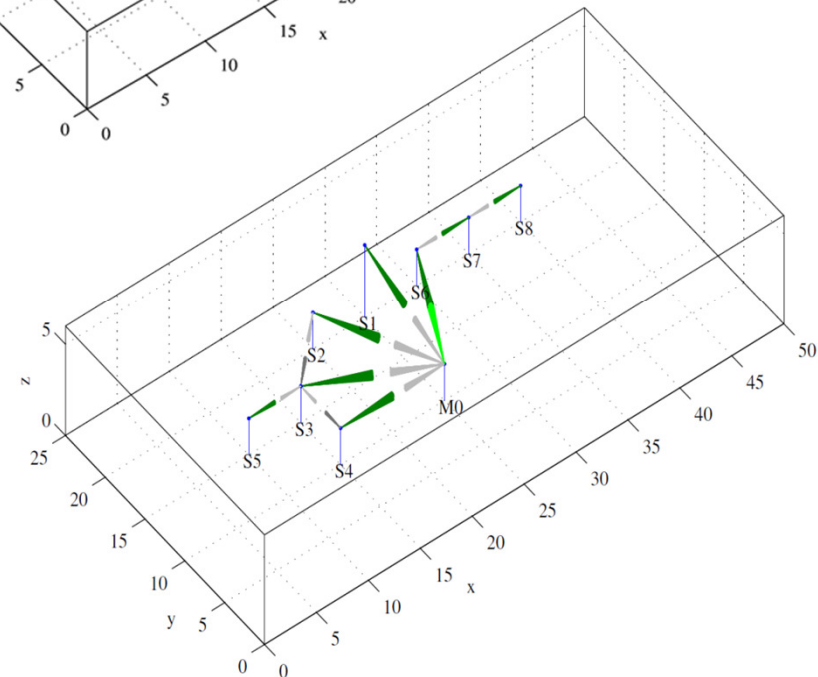
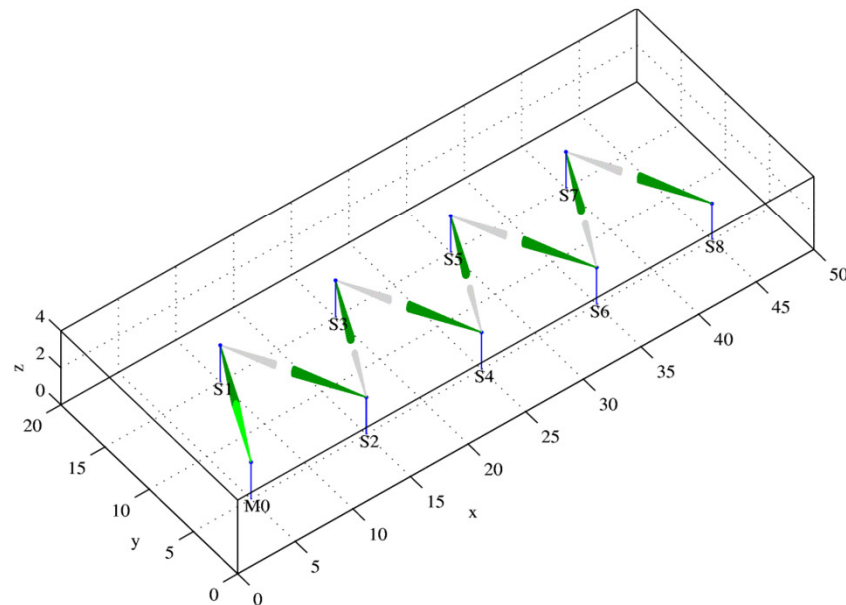
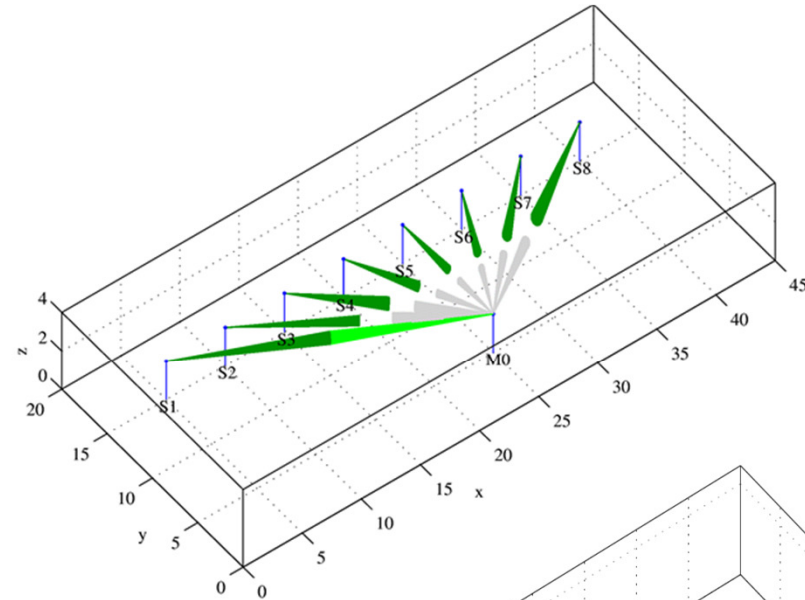
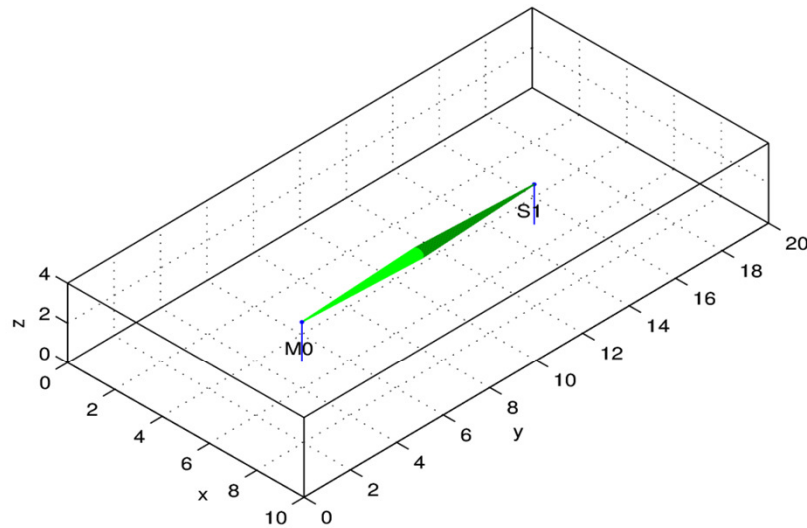
Front

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

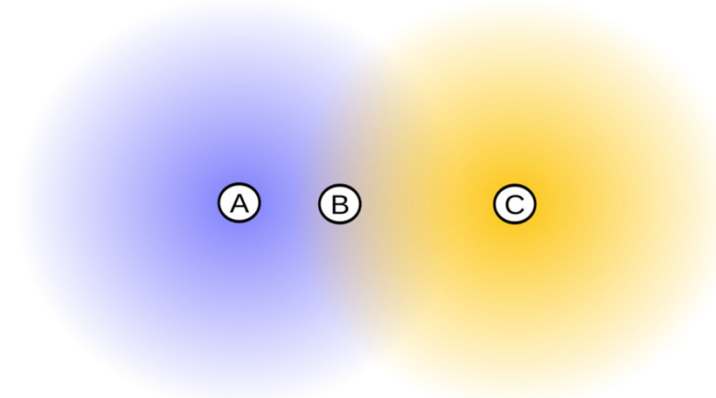


Singh, Interference Analysis for Highly Directional 60-GHz Mesh Networks:
The Case for Rethinking Medium Access Control, 2010



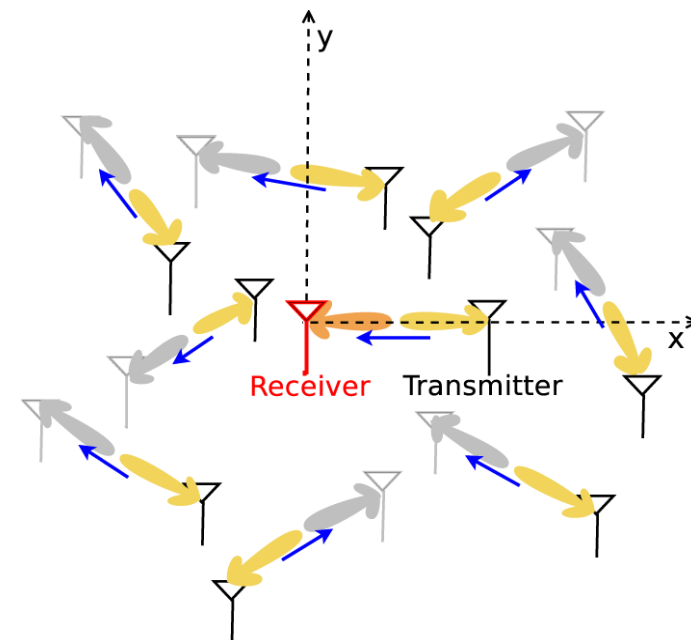
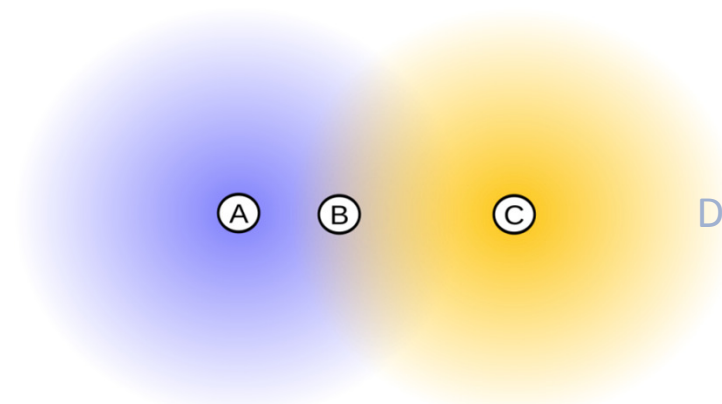
Effekte: Hidden Terminal

- **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**



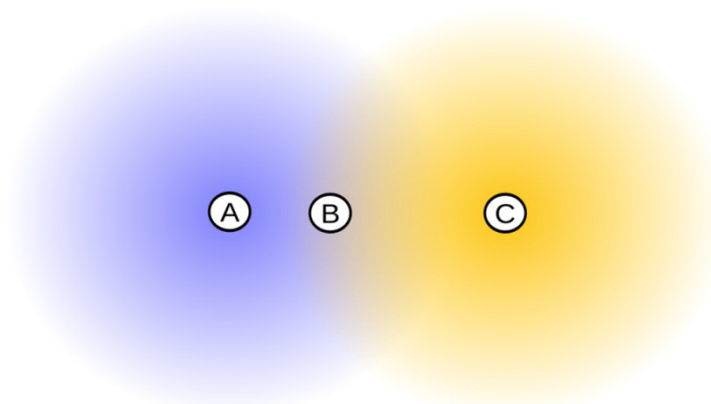
Effekte: Exposed Terminal

- **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**

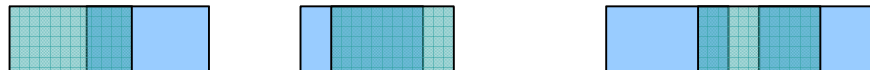
Medienzugriffsprotokolle: Nicht alle auf einmal!?

Reduzierung der Kollisionswahrscheinlichkeit

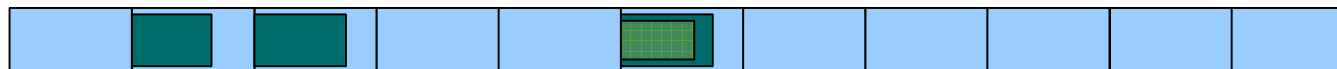
- **Multiplexverfahren: SDMA, FDMA, TDMA, CDMA**
- **Duplexverfahren: Simplex, Halb-/Vollduplex, TDD, FDD**
- **wettbewerbsbasierte Zugriffsverfahren**
 - **DCF – Distributed Coordination Function**
- **wettbewerbsfreie Zugriffsverfahren:**
 - **Polling**
 - **Reservierung nach Bedarf (Scheduling)**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

Medienzugriff mit Protokoll

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



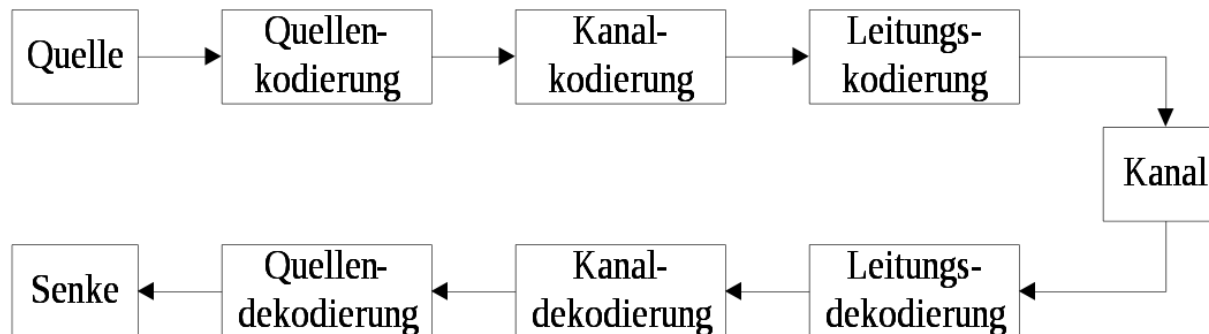
- **slotted ALOHA**
 - synchronisiertes ALOHA über Zeitschlitz
 - Kollisionswahrscheinlichkeit halbiert
 - max. Durchsatz: 36%



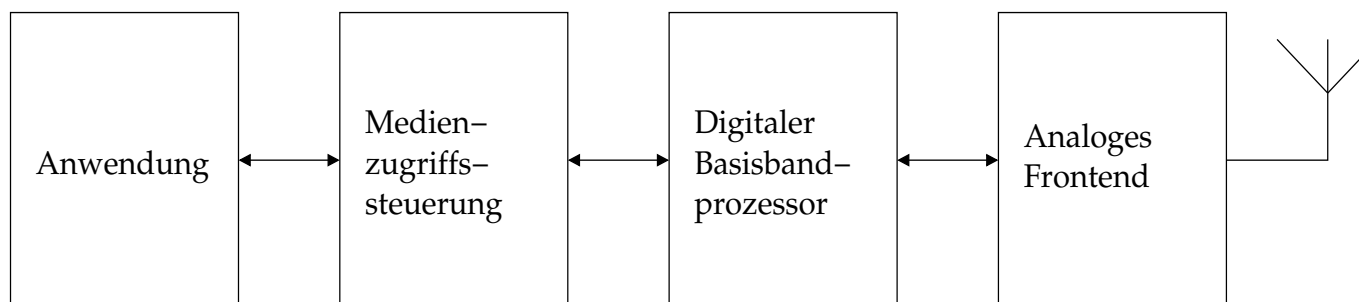
Aufgaben eines Medienzugriffsprotokolls

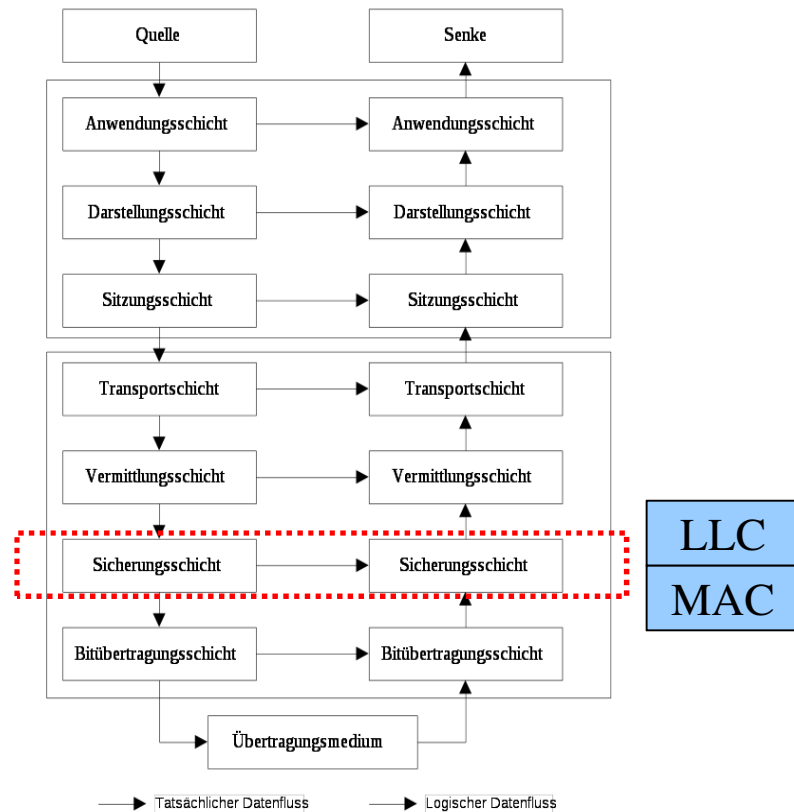
- **Steuerung des Zugriffs auf das gemeinsame Medium**
- **Zeitsynchronisation der Stationen**
- **Beamforming und Beamsteering**
 - **Auswahl der Abstrahlcharakteristik**
- **Teilnehmersuche**
- **Sicherung der Datenübertragung (ACK/RETRY/Reihenfolge)**
- **Anpassung der Übertragungsparameter an die 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/Aggregation
- 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**

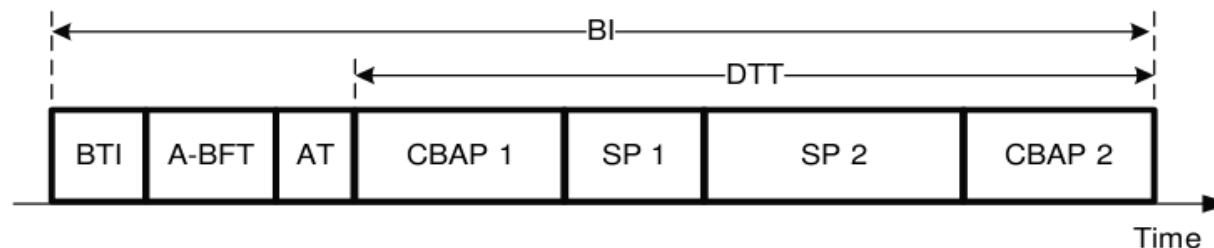
- **802.11ac (2013): Enhancements for Very High Throughput for Operation in Bands below 6 GHz**
 - **20-160 MHz bandwidth, 1-8 Streams, max. 6,9 Gbit/s, PSDU<1 MB**

- **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**

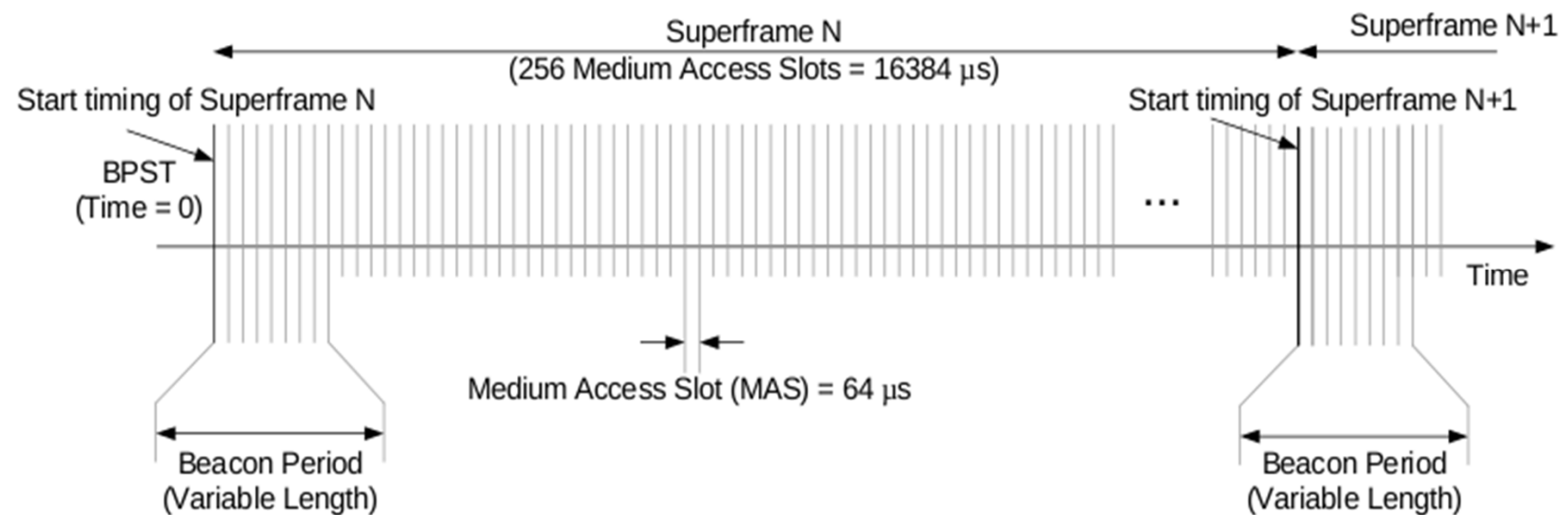
Medienzugriff: Rahmenaufbau im IEEE 802.11-Standard

- **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



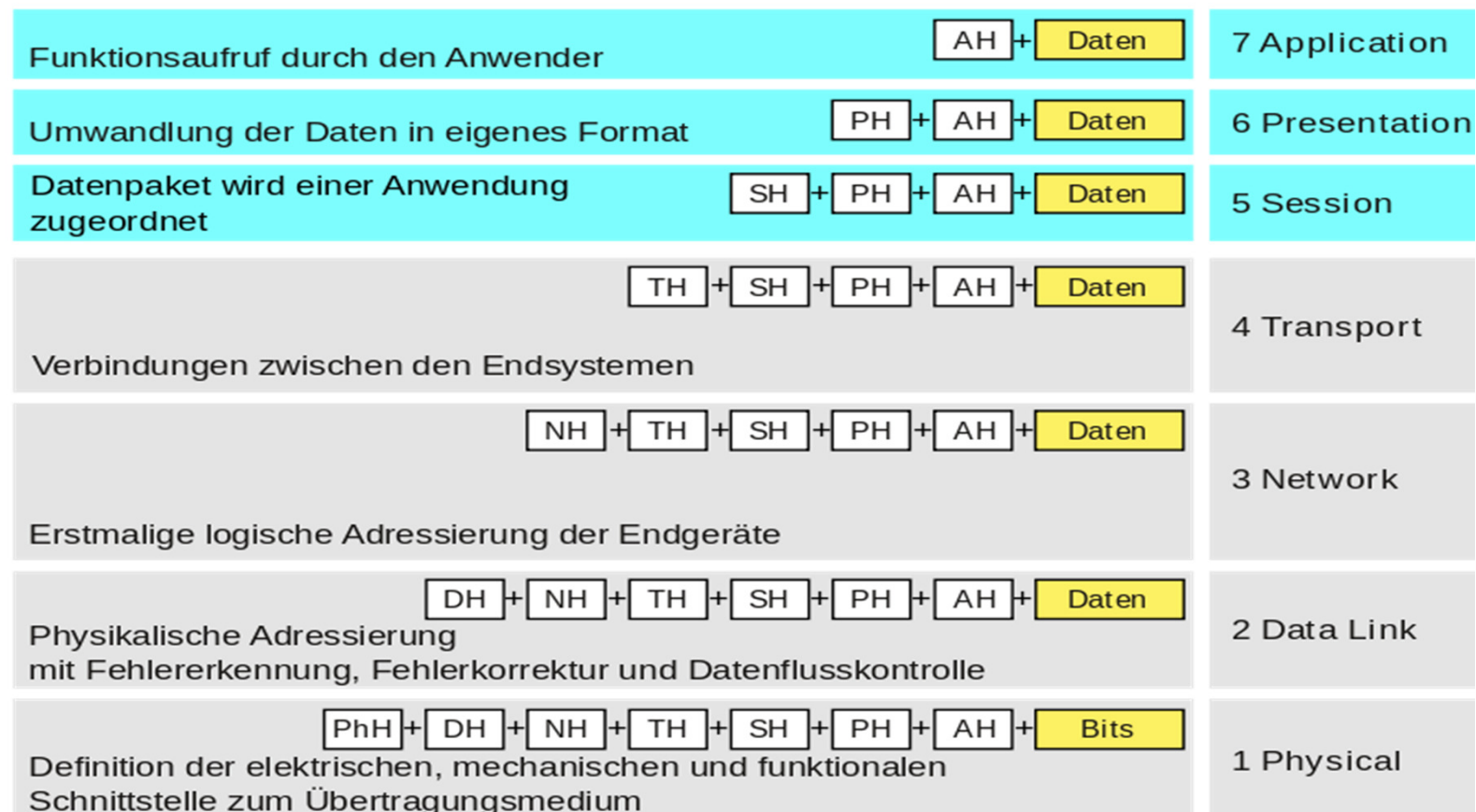
Medienzugriff: Rahmenaufbau im ECMA387-Standard

- verteiltes MAC-Protokoll (kein Master)



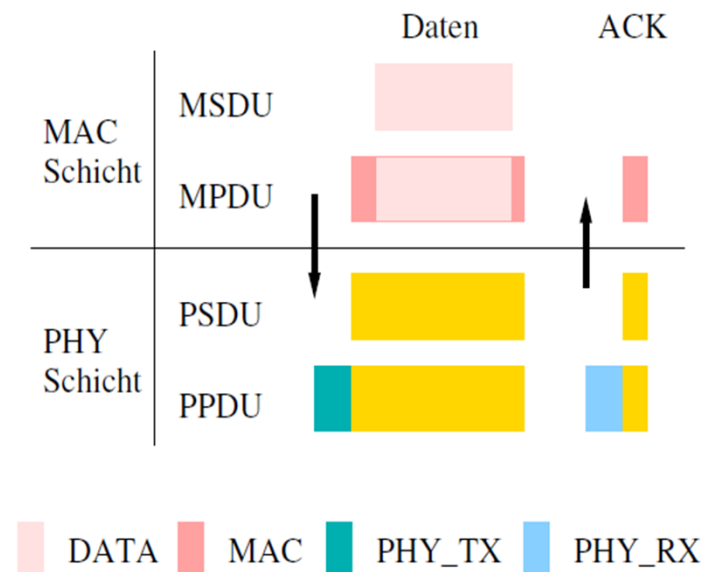
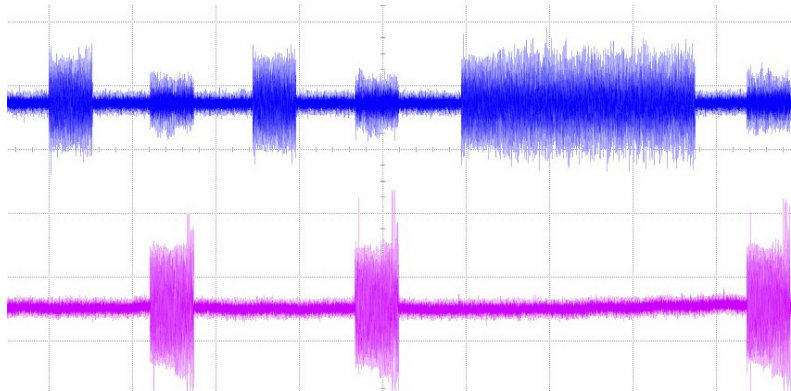
Einpacken → Verschicken → Auspacken

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



Einpacken → Verschicken → Auspacken

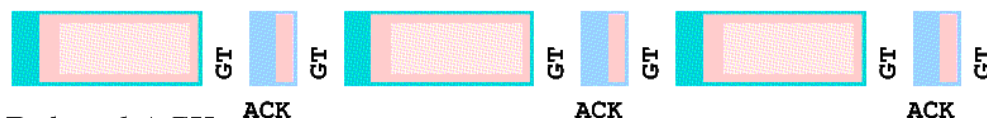
- **Sicherungsschicht: MAC-Header**
 - SRC, DEST, length, sequence number, frame type
 - QoS: stream number, class (VO, VI, BE, BK)
 - ACK-Policy, ACK-Information
 - HCS, FCS
- **Overhead: PHY+MAC**



Reduzierung des Overheads

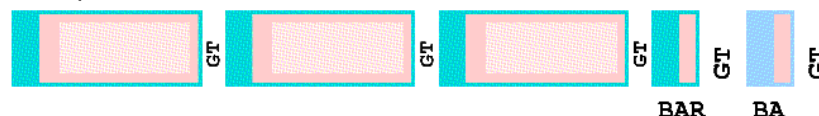
- PHY-Datenrate: 1,3 GBit/s netto 2,6 GBit/s brutto $R=1/2$
- Ethernet-Paketgröße: 1514 Bytes

Immediate ACK



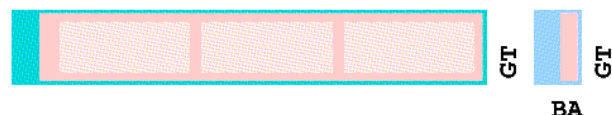
282 MBit/s

Delayed ACK



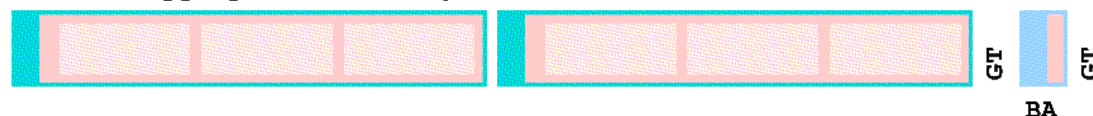
687 MBit/s

MSDU-Aggregation + Block-ACK



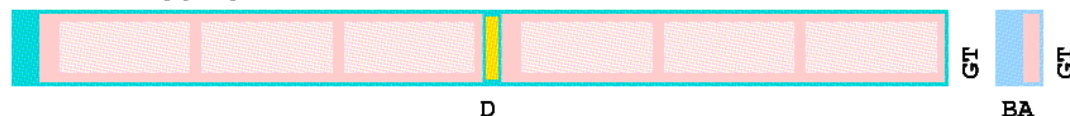
953 MBit/s

MSDU-Aggregation + "Delayed" Block-ACK



1152 MBit/s

MPDU-Aggregation + Block-ACK

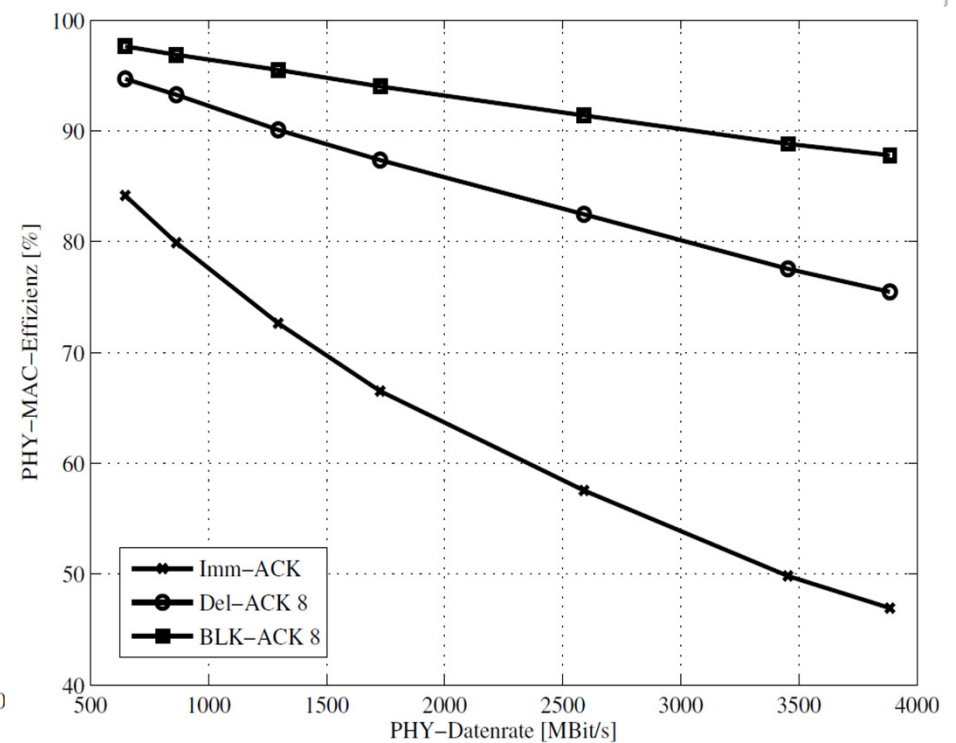
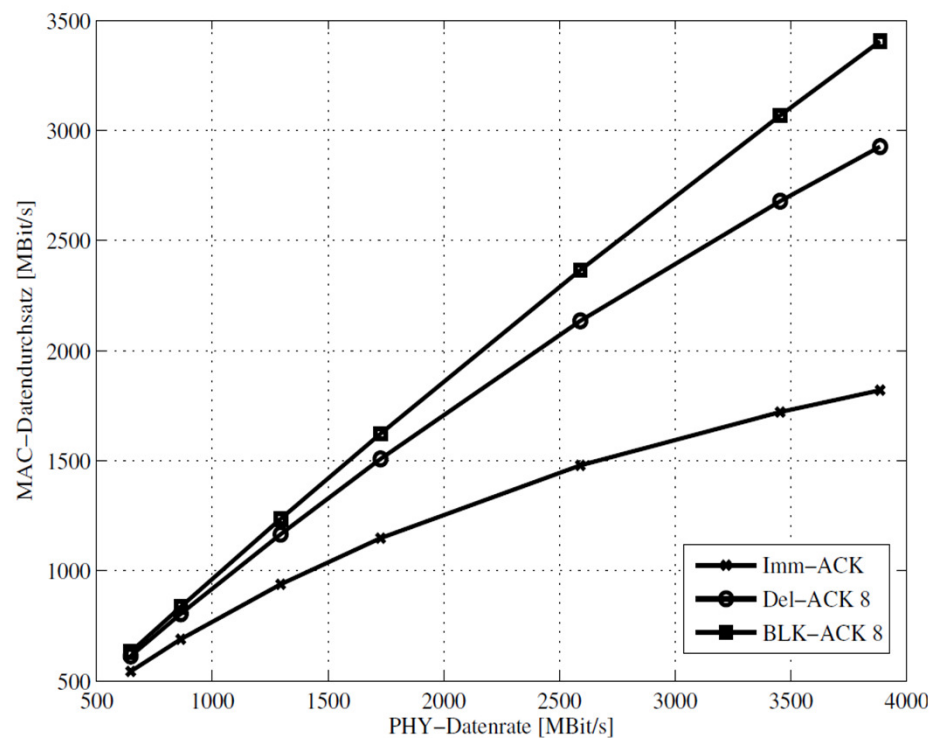


1237 MBit/s



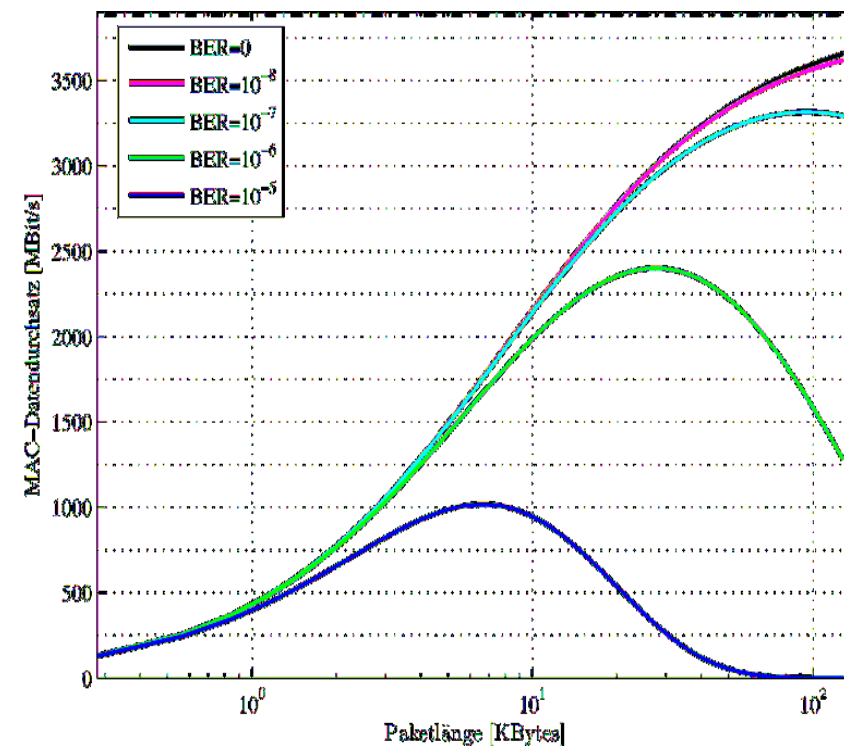
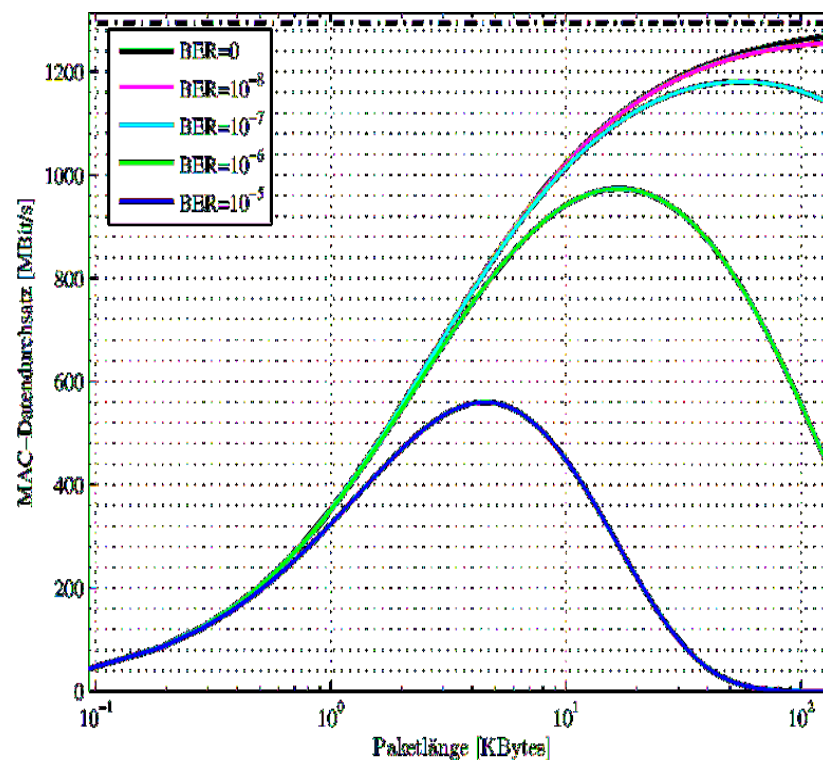
MAC-Datendurchsatz bei fehlerfreier Übertragung

- Steigerung der PHY-MAC-Effizienz durch Paketaggregation

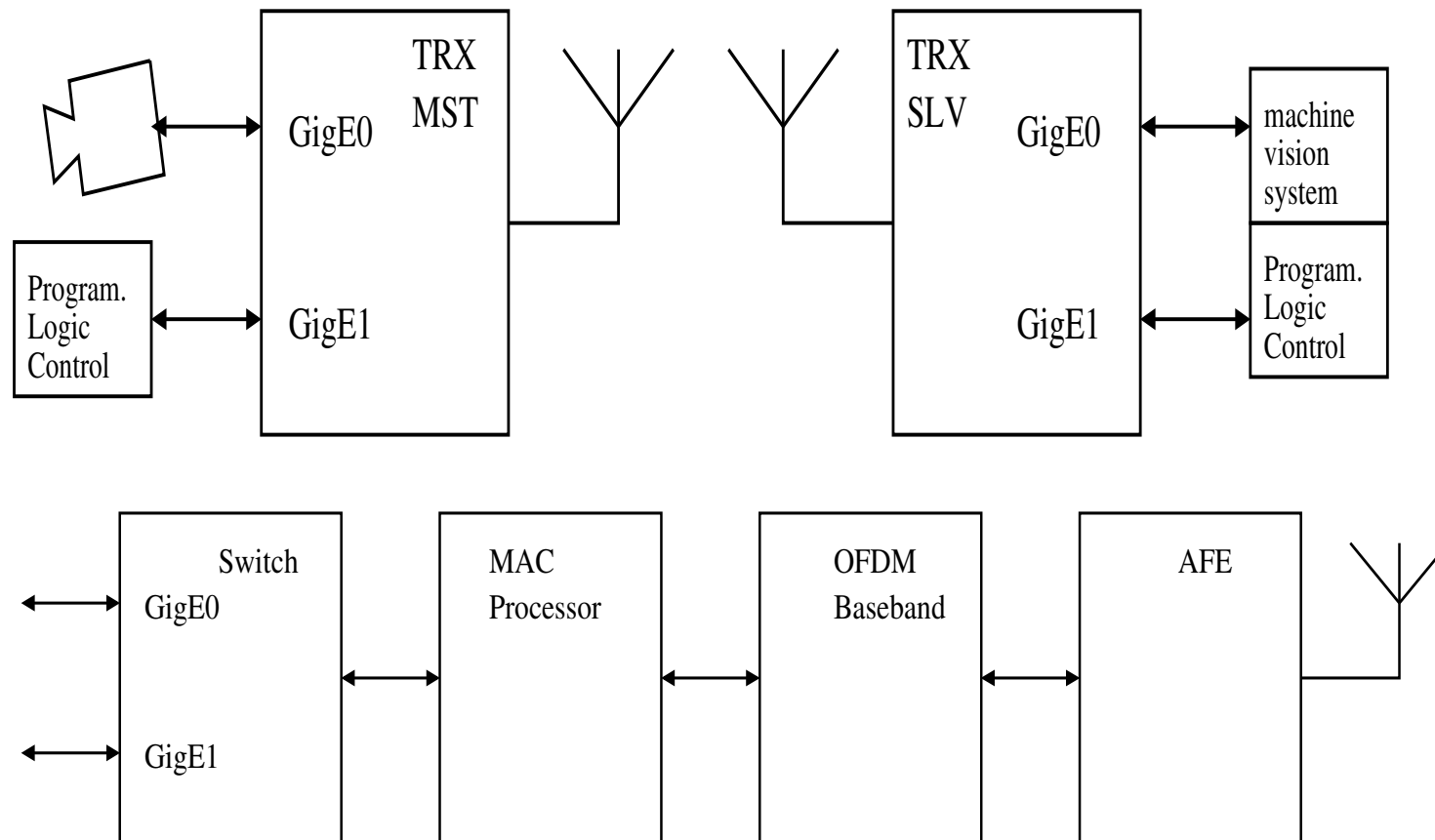


Einfluß der Paketgröße bei fehlerbehafteter Übertragung

- Fragmentierung vs. Aggregation
- abhängig von der Bitfehlerrate
- MPDU-Aggregation + 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**

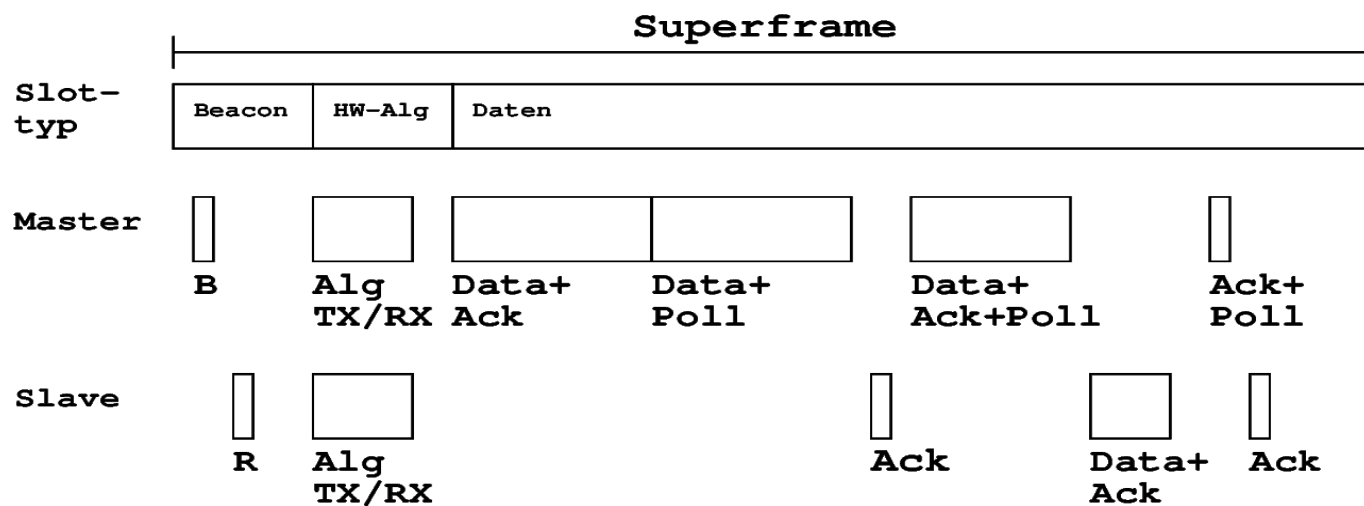
System architecture: CCD camera system

- 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



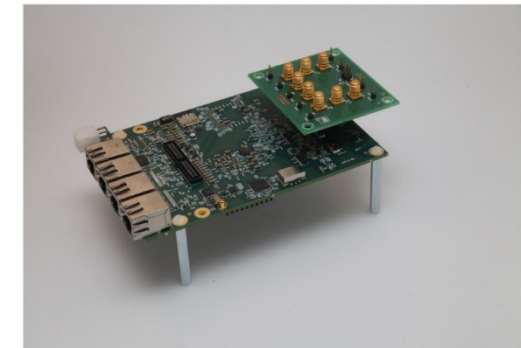
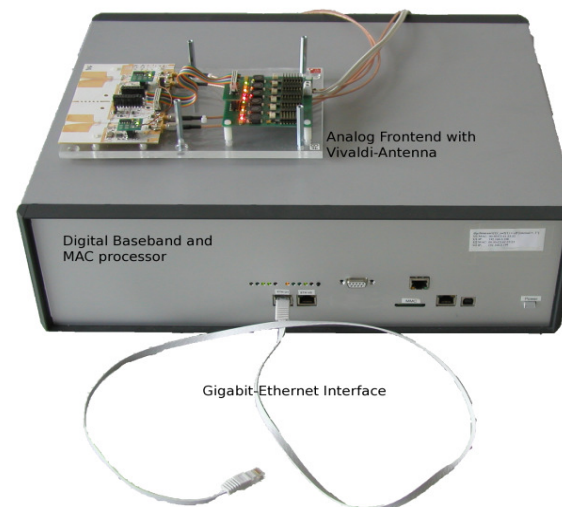
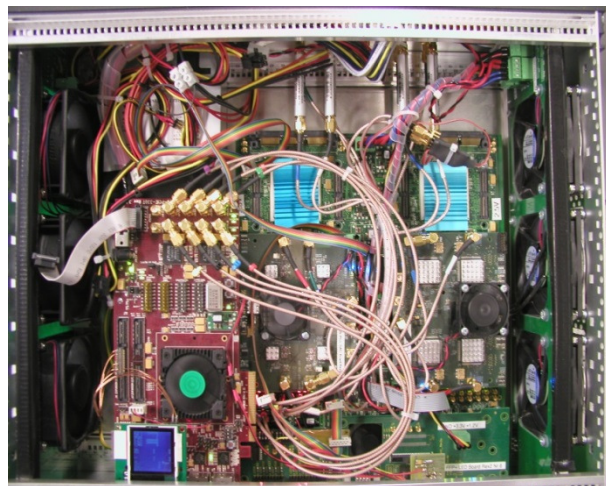
Medienzugriffssteuerung

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

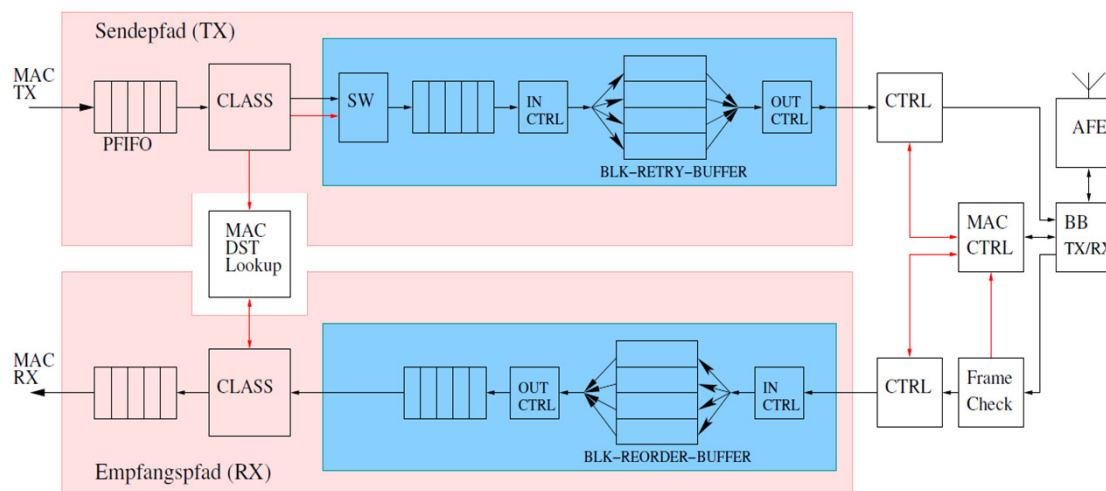
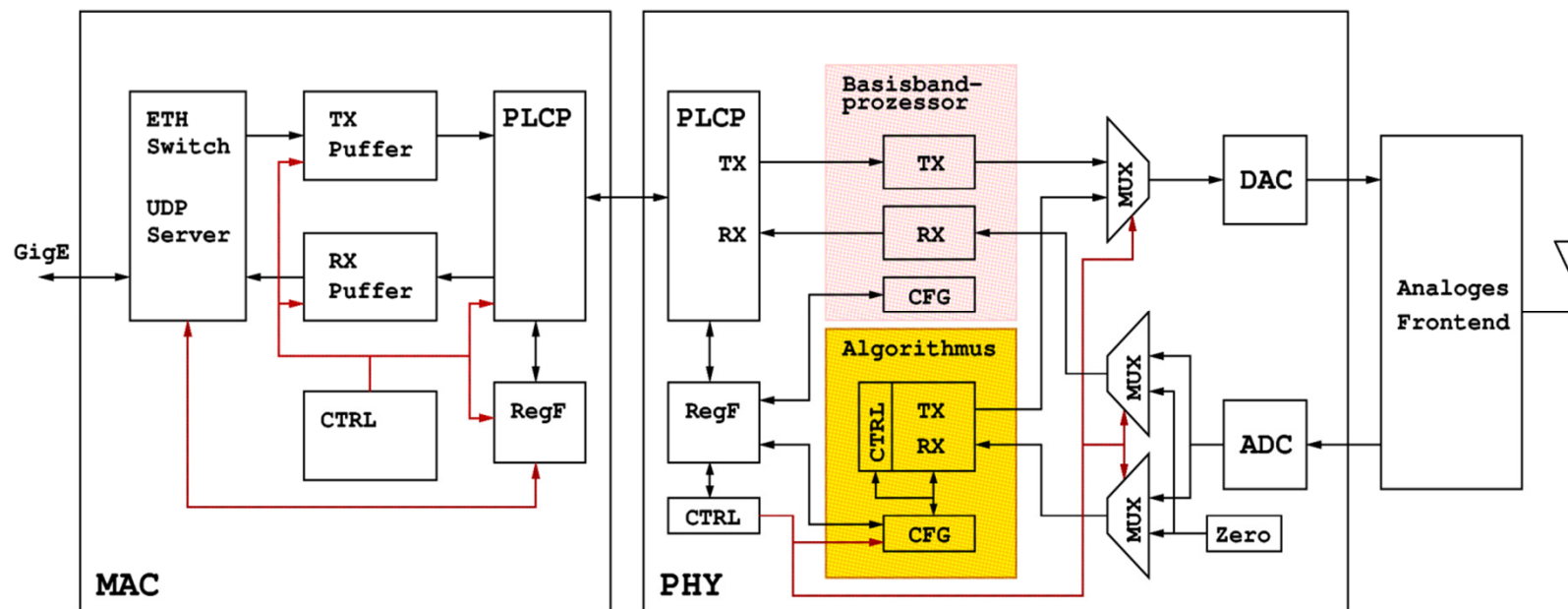


Demonstrator: Setup und Performanz

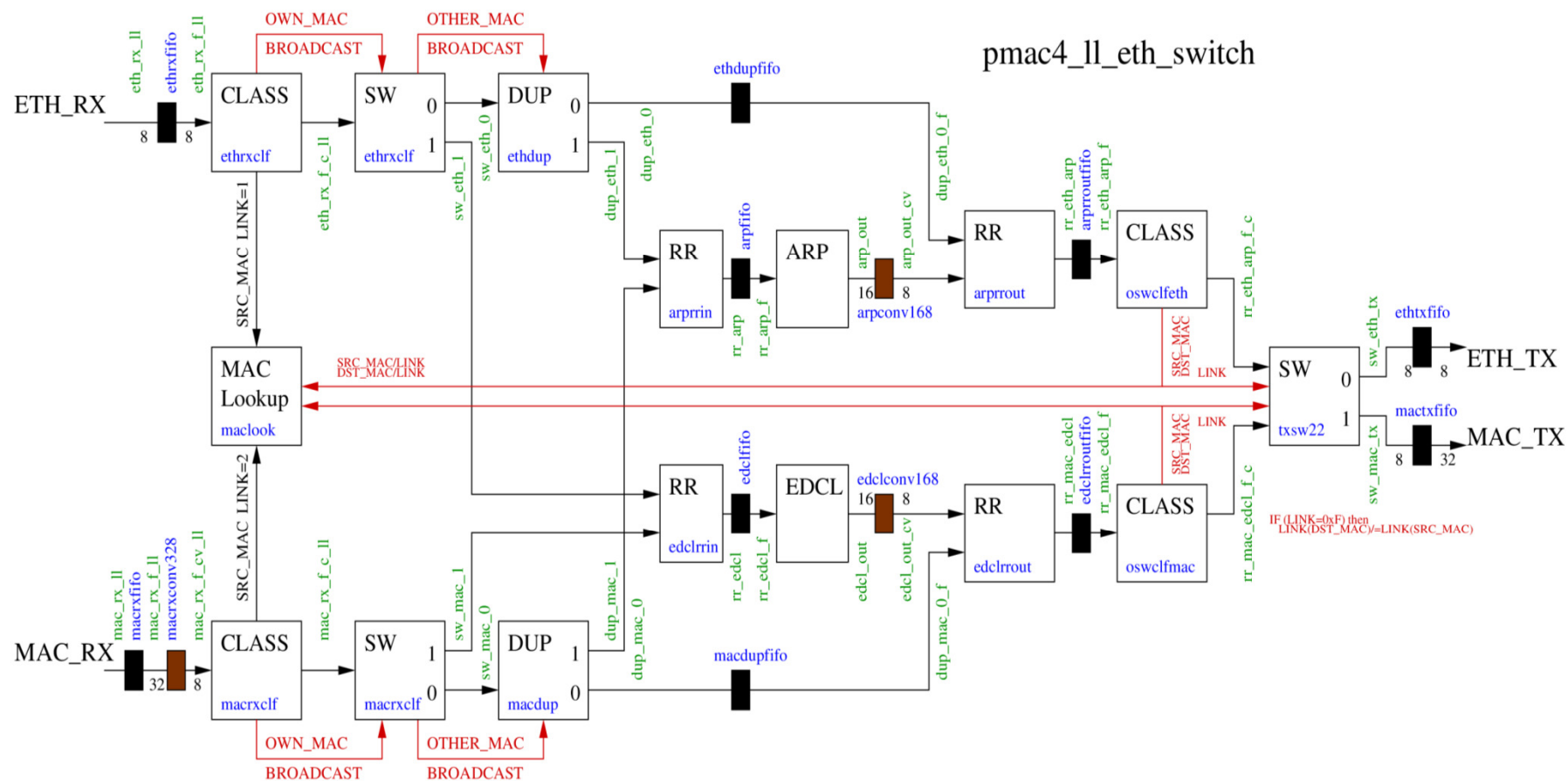
- Funktionalität in programmierbarer Hardware (FPGA)
- Demonstratorsetup:
 - Basisband: OFDM, 2,16 GHz Bandbreite, bis 3,8 Gbit/s netto -> aktuell 1,3 Gbit/s
 - Downlink: Camera Data Link (950 Mbit/s)
 - Uplink: Camera control and video link (25 Mbit/s)
- Measured 7500 PHY-frames per second of about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



Demonstrator: MAC Architektur Punkt-zu-Punkt



60 GHz OFDM Demonstrator







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

www.ihp-microelectronics.com



innovations
for high
performance

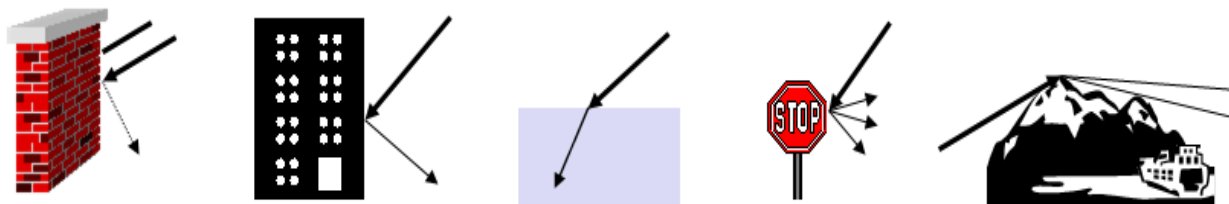
microelectronics

Mitglied der

Leibniz
Leibniz-Gemeinschaft

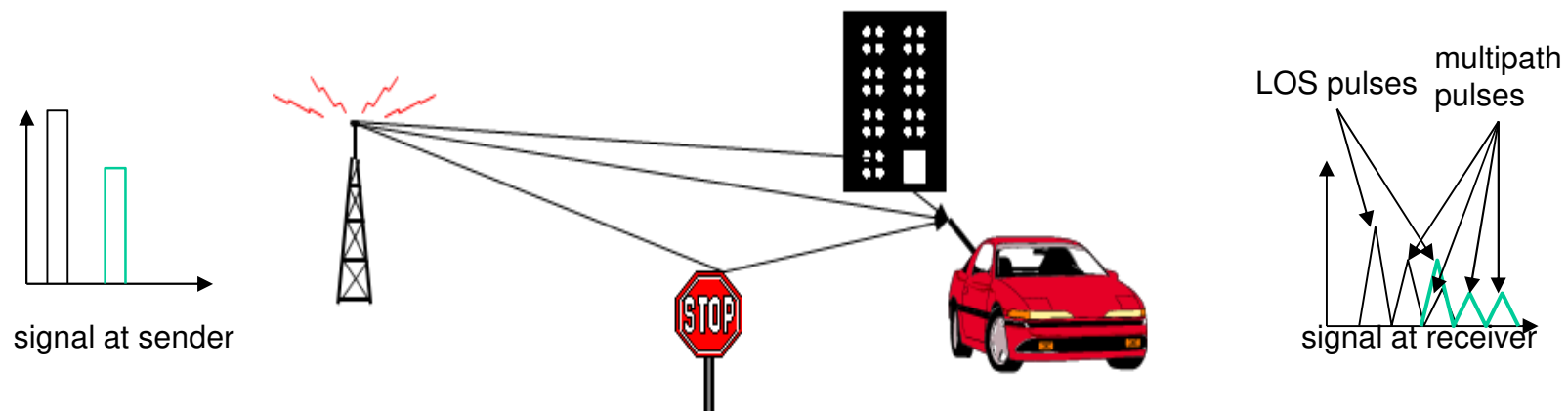
Drahtlose Übertragung in der Luft

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



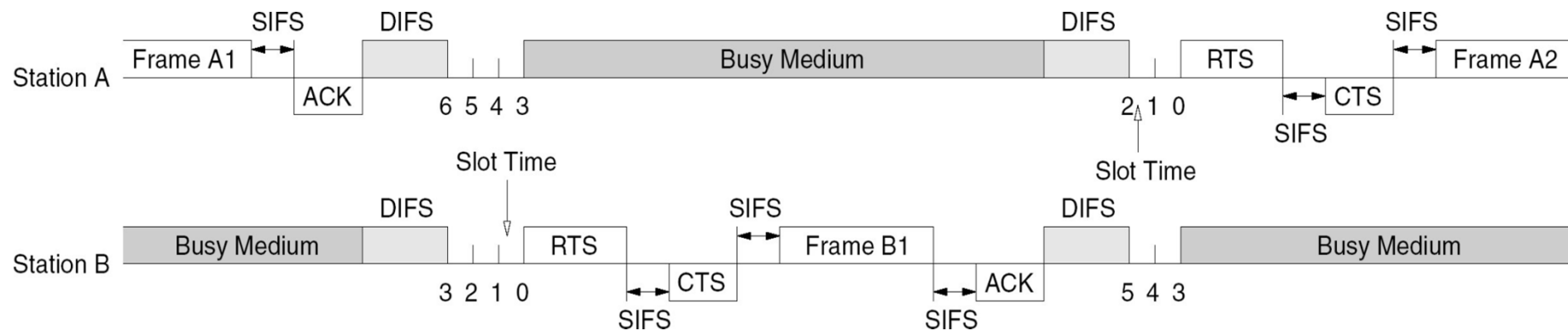
Drahtlose Übertragung in der Luft

- **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

$$E = \frac{T_{MAC_payload}}{T_{PHY} + T_{PHY_payload}}$$

$$T_{MAC_payload} = \frac{N_{payload_bits}}{N_{bits_per_OFDM_symbol}} \times T_{OFDM_symbol}$$

$$T_{PHY_payload} = \left\lceil \frac{N_{MAC_hdr_bits} + N_{payload_bits} + N_{FCS_bits}}{N_{bits_per_OFDM_symbol}} \right\rceil \times T_{OFDM_symbol}$$

$$T_{PHY} = T_{preamble} + T_{signal_field}$$

$$T_{PPDU} = T_{PHY} + T_{PHY_payload}$$

$$T_{PPDU_ACK} = T_{PHY} + T_{OFDM_symbol}$$

Darf's denn auch etwas schneller sein?

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

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

$$A_{EASY} = T_{PPDU} + T_{PPDU_ACK} + 2 \times (T_{TX_Dly} + T_{RX_Dly})$$

$$B_{EASY} = T_{PPDU} + T_{TX_Dly} + T_{RX_Dly} + 2 \times T_{Guard}$$

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

Darf's denn auch etwas schneller sein?

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

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

$$A_{EASY} = T_{PPDU} + T_{PPDU_ACK} + 2 \times (T_{TX_Dly} + T_{RX_Dly})$$

$$B_{EASY} = T_{PPDU} + T_{TX_Dly} + T_{RX_Dly} + 2 \times T_{Guard}$$

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

$$A_{EASY} = \sum_{n=1}^N [T_{PPDU}(n) + T_{TX_Del}] + T_{PPDU_ACK} + T_{TX_Dly} + 2 \times T_{RX_Dly}$$

$$B_{EASY} = T_{PPDU} + T_{TX_Dly} + T_{RX_Dly} + 2 \times T_{Guard}$$

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