



innovations
for high
performance
microelectronics

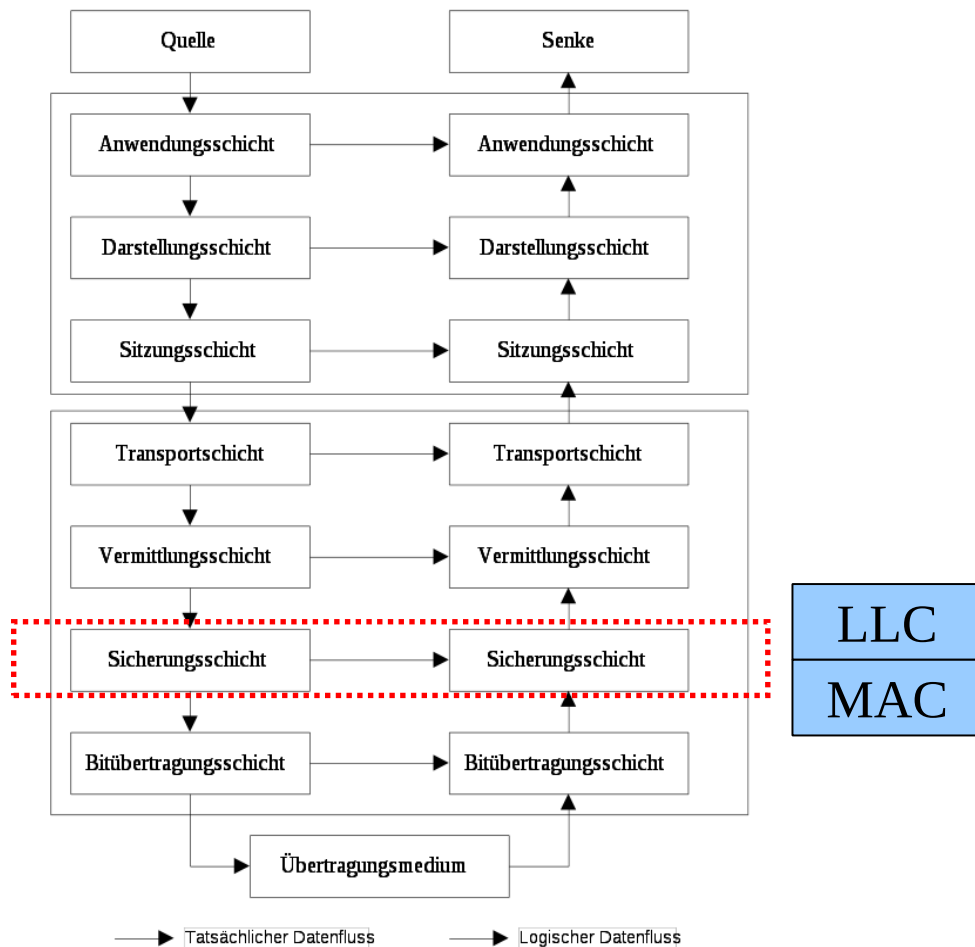
MAC-Systemdesign for ultra-hochratige Anwendungen

Marcus Ehrig

**IHP
Im Technologiepark 25
15236 Frankfurt (Oder)
Germany**

Gliederung

- **Einführung**
- **Das geteilte Übertragungsmedium: Draht vs. Luft**
- **Medienzugriff: Nicht alle auf einmal**
- **Überblick der Standardisierung**
- **Einpacken, verschicken, auspacken und ...**
- **Reklamieren: Wenn mal was verloren geht**
- **Darfs denn auch etwas schneller sein?**



- OSI-Modell
- Sicherungsschicht (DLC) unterteilt in

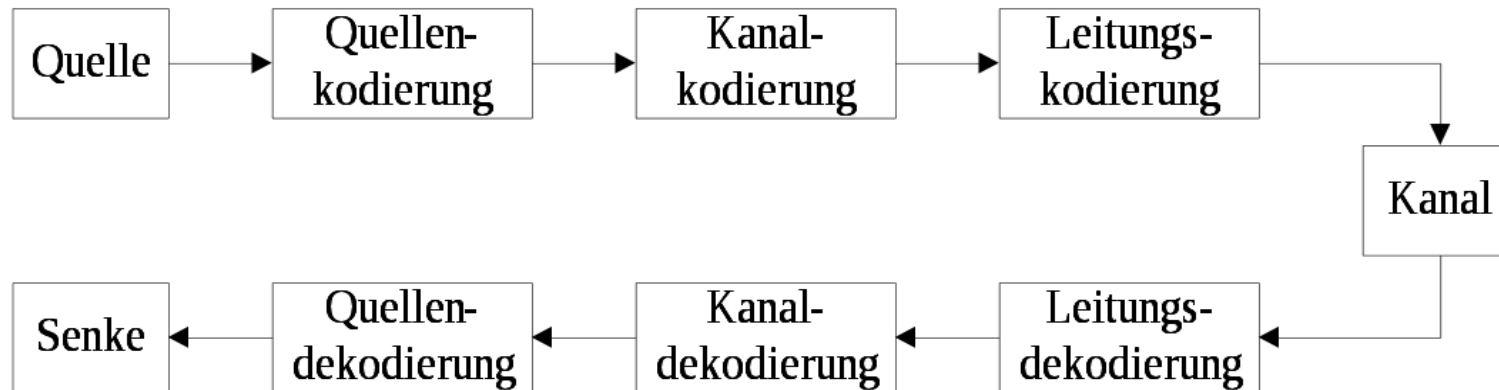
LLC – Logical Link Control

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

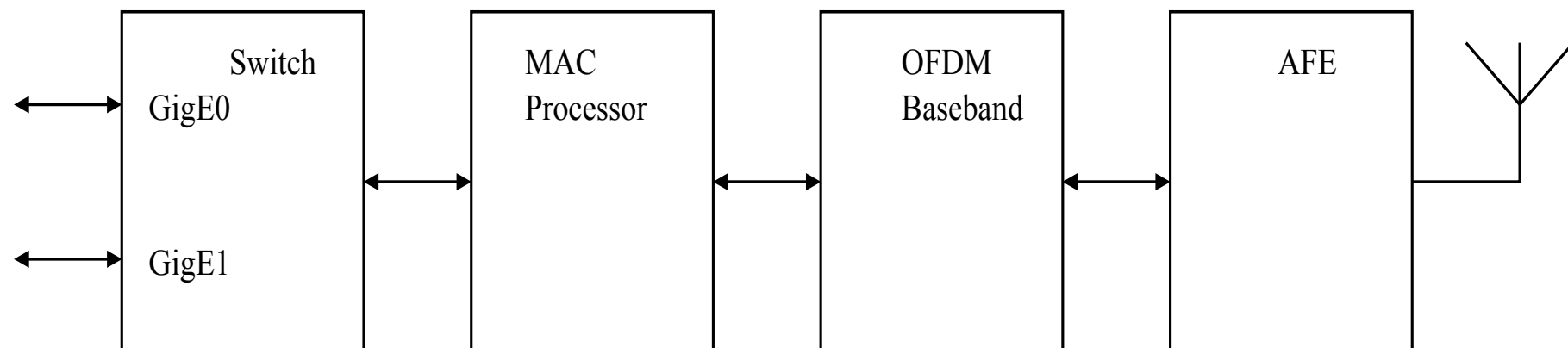
MAC – Medium Access Control

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

Einführung



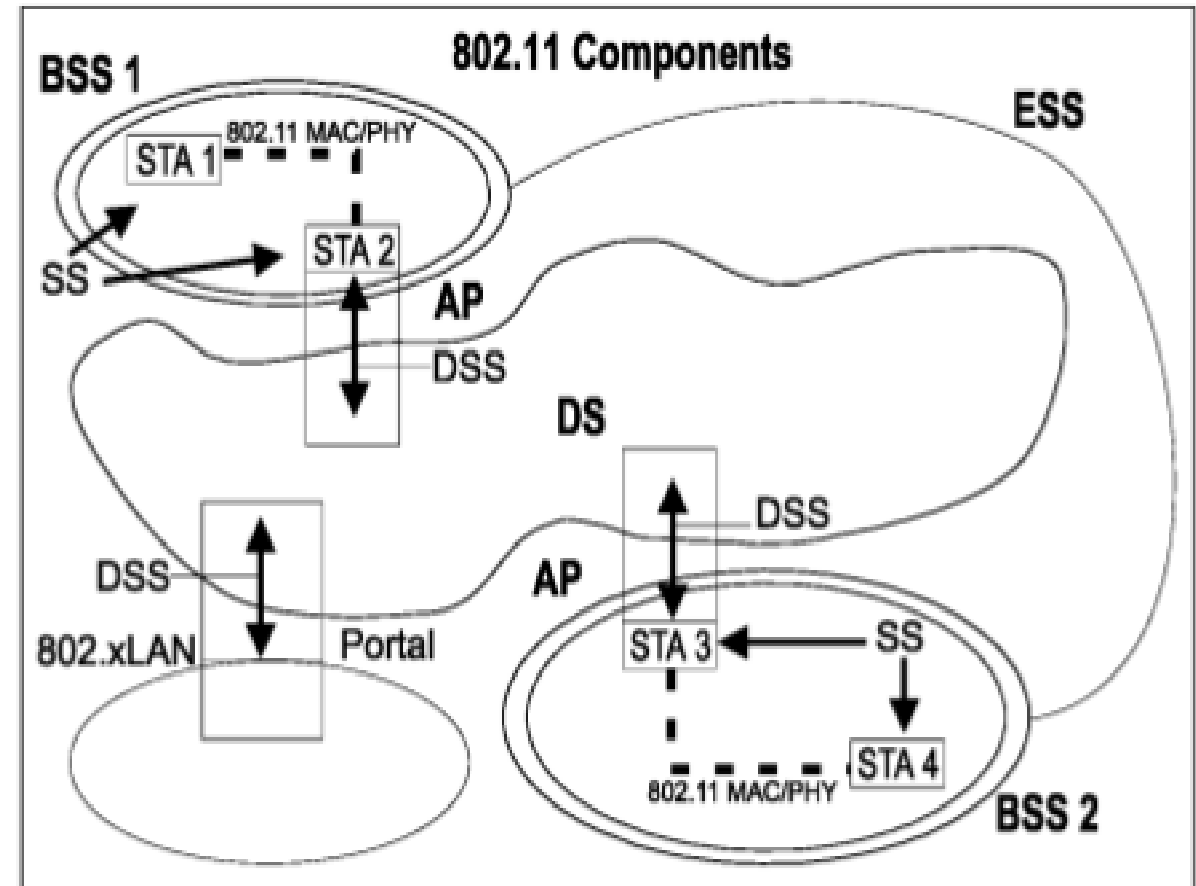
- **Systemaufbau mit MAC-Komponente**
 - **MAC-Schnittstelle als Teil des Protokollstacks der Betriebssystemtreiber**
 - **Anbindung über Router mit integriertem Access Point (AP)**



Einführung

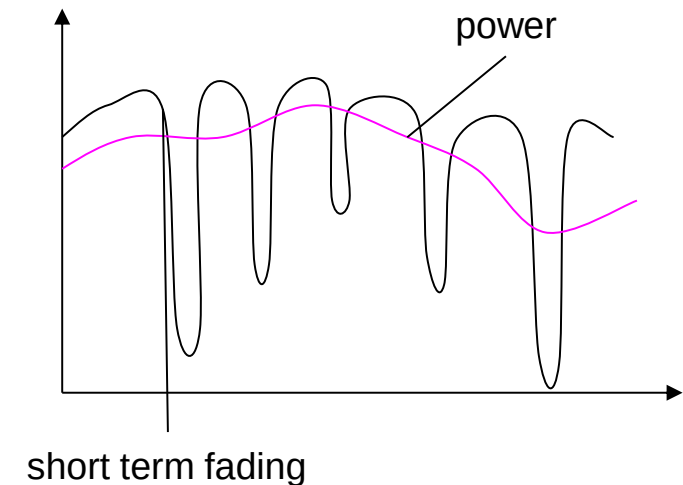
- IEEE 802.11 WLAN-Systemübersicht (WiFi)

- AP - Access Point
- STA - Station
- BSS - Basic Service Set
- ESS - Extended Service Set
- DS - Distribution System
- IBSS - independent BSS ad-hoc



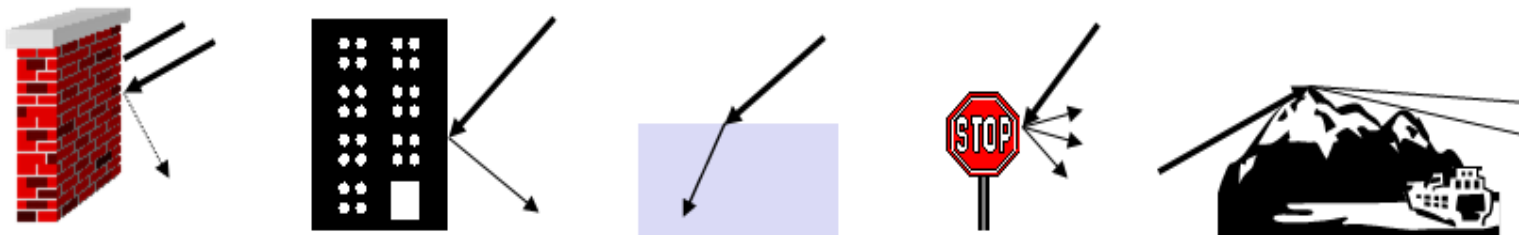
Das geteilte Medium: Draht vs. Luft

- In Luft Ausbreitungsbedingungen wie Licht
- Empfangsleistung nimmt quadratisch mit der Entfernung ab
- **Fading**
 - Frequenzabhängig (fast)
 - Zeitabhängig (slow)
- **Dämpfungsmaximum bei Resonanz von**
 - H₂O @ 2.4GHz
 - O₂ @ 60GHz



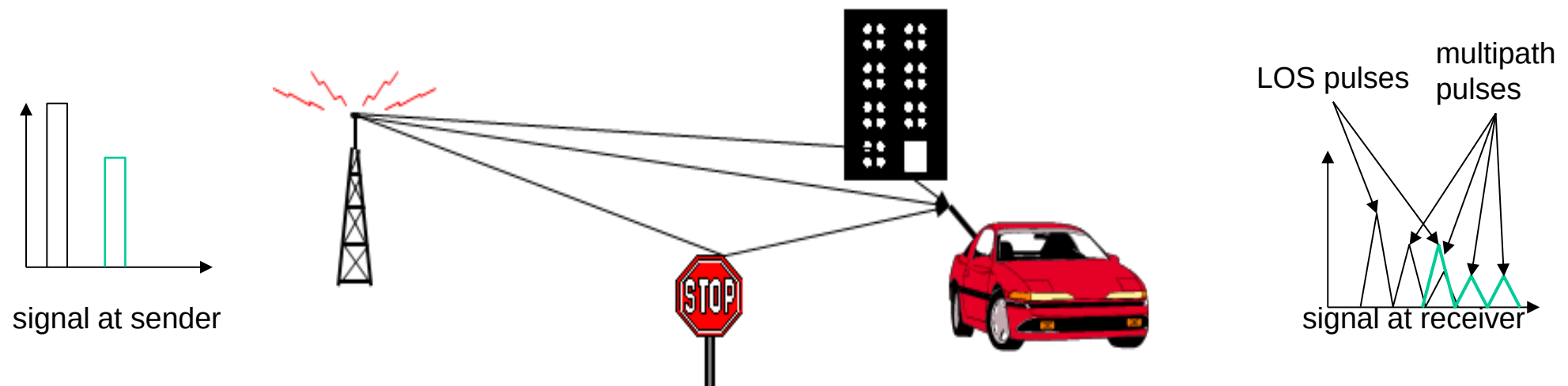
Das geteilte Medium: Draht vs. Luft

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



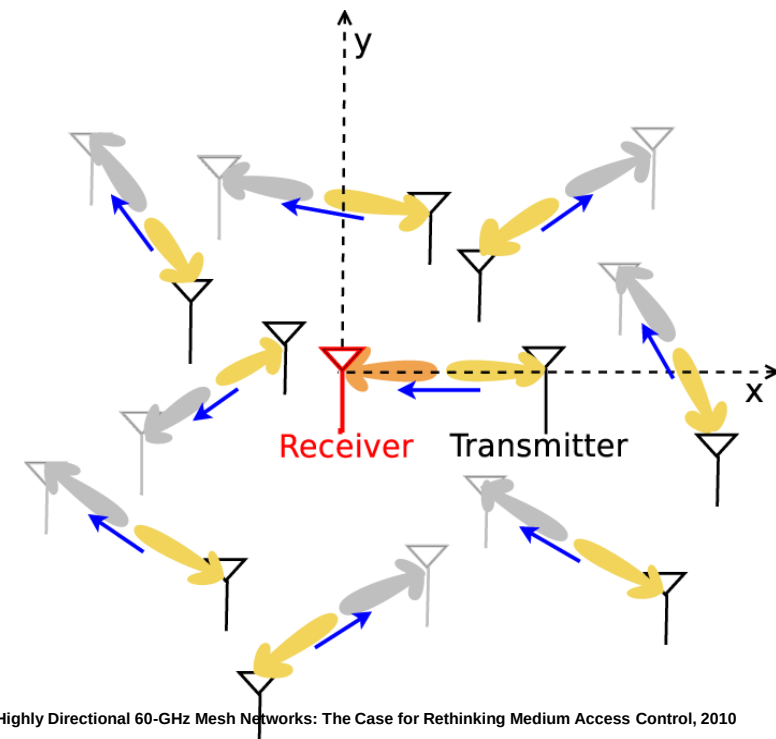
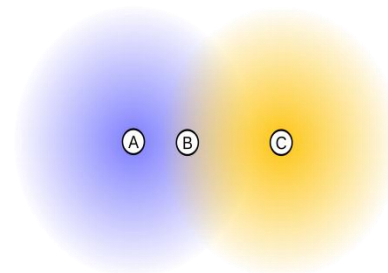
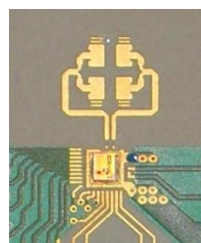
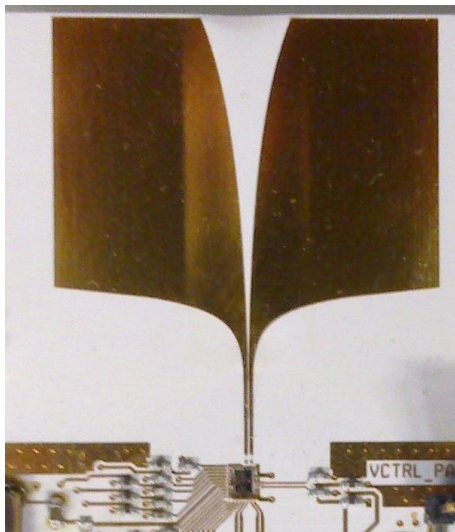
Das geteilte Medium: Draht vs. Luft

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



Das geteilte Medium: Draht vs. Luft

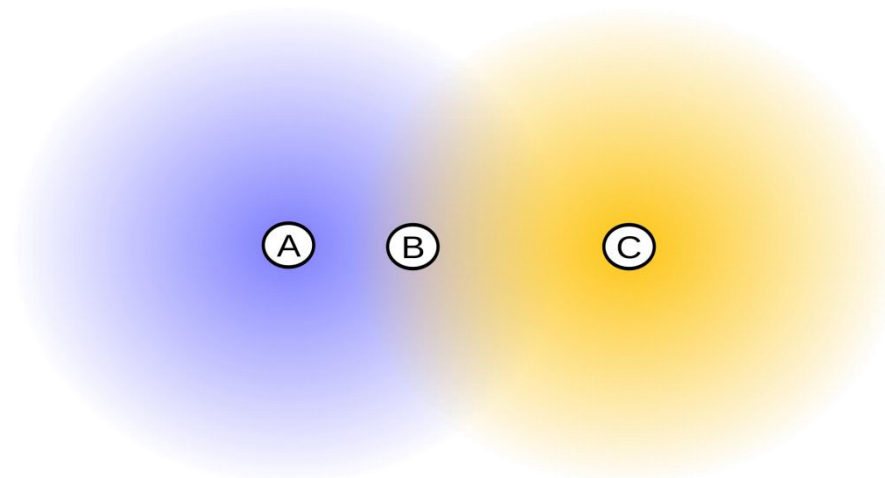
- **Antennenabstrahlcharakteristik**
 - **<5 GHz: omni-direktional**
 - **60 GHz: direktional mit Beamsteering**
 - **Mehrantennensysteme (MIMO)**



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

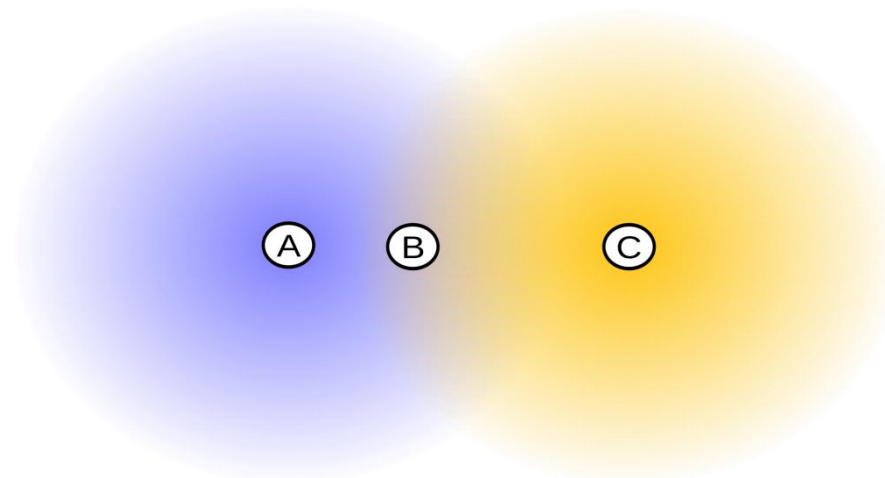
Das geteilte Medium: Draht vs. Luft

- **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**



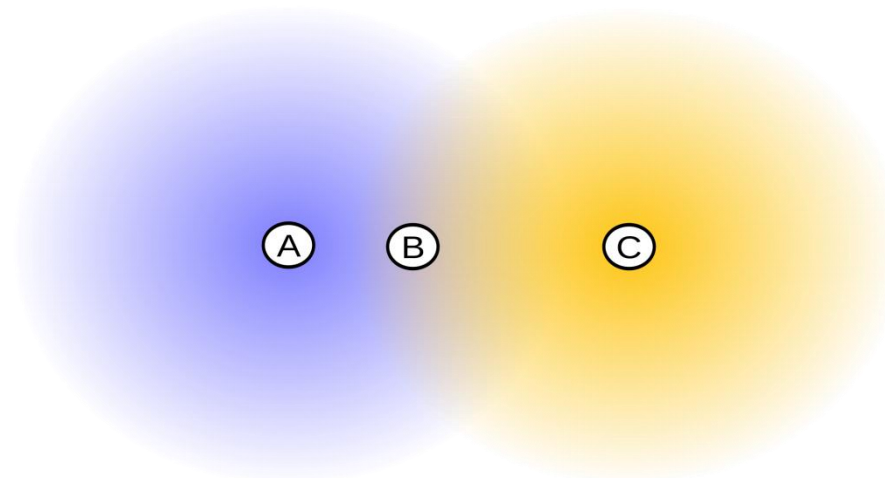
Das geteilte Medium: Draht vs. Luft

- **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



Das geteilte Medium: Draht vs. Luft

- **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**



Medienzugriff: Nicht alle auf einmal

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



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



Medienzugriff: Nicht alle auf einmal

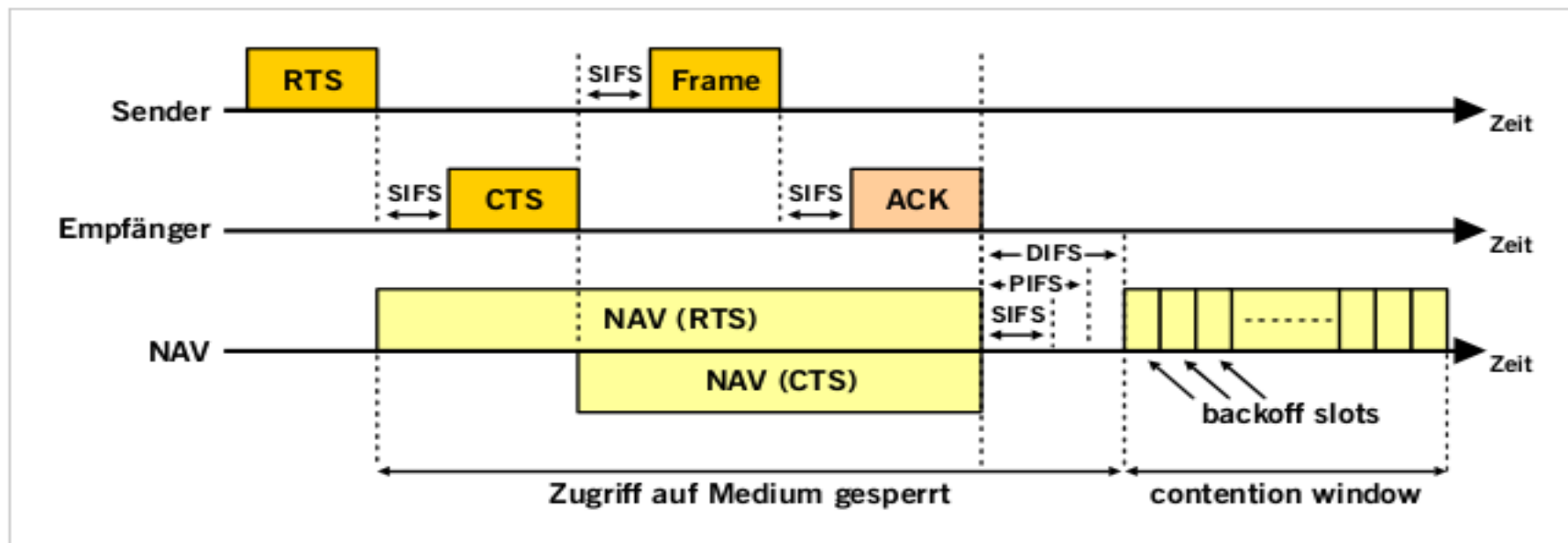
- **Medium Kabel: CSMA/CD**
 - **Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection**
 - **Detektierung der Kollision durch den Sender oder andere Teilnehmer**
- **Medium Luft: CSMA/CA**
 - **Kollisionen passieren am Empfänger!**
 - **Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance**
 - **Kollisionsvermeidung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

Reduzierung der Kollisionswahrscheinlichkeit

- **SDMA, FDMA, TDMA, CDMA**
- **wettbewerbsbasierte Zugriffsverfahren**
 - **(E)DCF – (Enhanced) Distributed Coordination Function**
- **wettbewerbsfreie Zugriffsverfahren:**
 - **PCF bzw. Polling**
 - **Reservierung nach Bedarf****(meist in einer wettbewerbsbasierten Phase)**

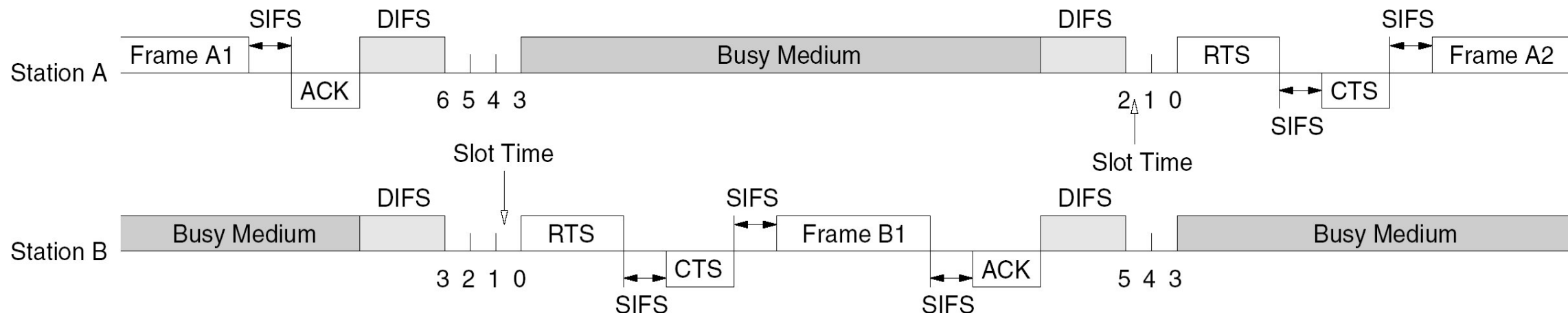
Medienzugriff: Nicht alle auf einmal

- (E)DCF
 - Carrier sense: physikalisch (RSSI) and virtual (NAV)
 - Inter Frame Spaces (IFS): SIFS, PIFS, DIFS, EIFS, RIFS
 - Backoff Time = $\text{Random}() \cdot \text{aSlotTime}$
 - exponential backoff: $CW = (CW_{\min} + 1) \times 2^n - 1$
 - $n = \text{retransmission} / CW_{\min} = 31 / CW_{\max} = 1023$



Das geteilte Medium: Draht vs. Luft

- **DCF**
 - Warten bis Medium für $\geq \text{DIFS}$ frei
 - Würfeln der Backoff-Zeit, wenn backoff timer = 0
 - Reduziere backoff timer um slot-time, wenn slot frei
 - Sende Frame, wenn backoff timer = 0
 - Verlasse backoff procedure, wenn Medium belegt

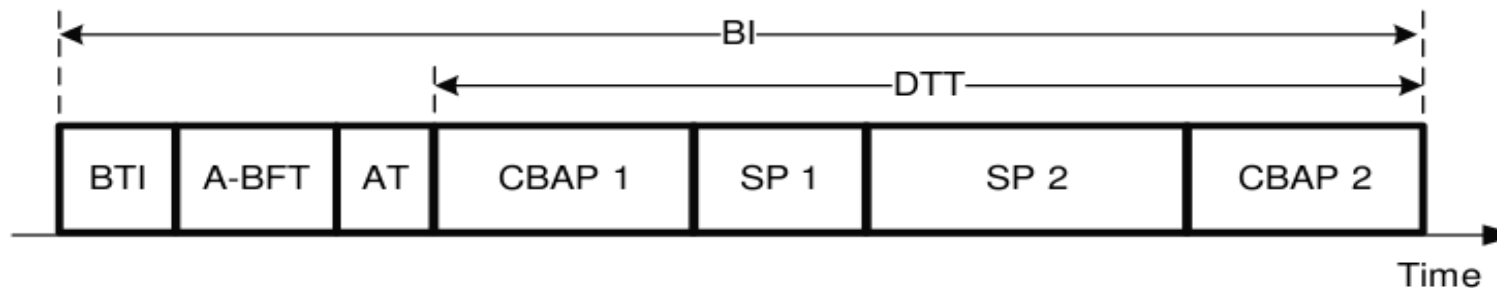


Medienzugriff: Nicht alle auf einmal

- **Aufgaben eines MAC-Protokolls**
 - **Steuerung des Zugriffs auf das gemeinsame Medium**
 - **Zeitsynchronisation der Stationen**
 - **Sicherung der Datenübertragung/Reihenfolge**
 - **Anpassung der Übertragungsparameter an die aktuellen Eigenschaften des Kanals**
 - **Maximale Paketlänge, ACK-Policy**
 - **Modulation und Fehlerkorrektur**
 - **Beamforming und Beamsteering**
 - **Koexistenz mit anderen Netzen (BSS)**
 - **Teilnehmersuche**
 - **Authentifizierung der Teilnehmer**
 - **QoS: Priorisierung bestimmter Pakete/Datenströme**
 - **Powermanagement**

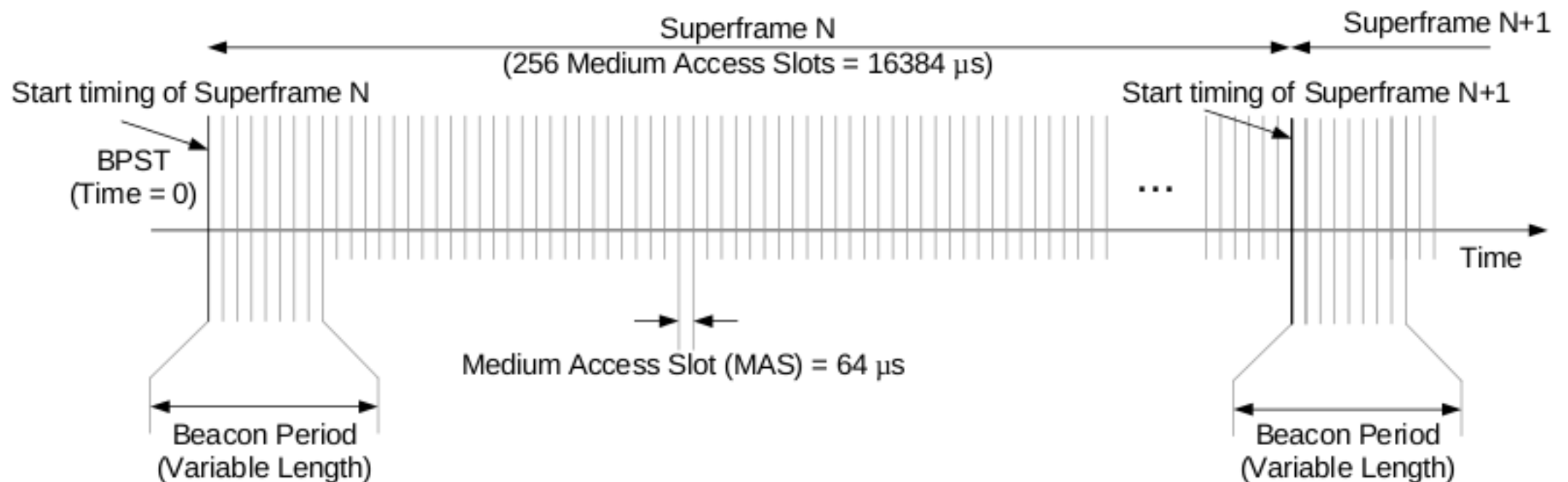
Medienzugriff: Nicht alle auf einmal

- **Rahmenaufbau von MAC-Protokollen: IEEE 802.11**
- **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)
- CPAB: contention-based access period
- SP: service period
- DTT: data transfer time



Medienzugriff: Nicht alle auf einmal

- Rahmenaufbau von MAC-Protokollen: ECMA387
- verteiltes MAC-Protokoll (kein Master)



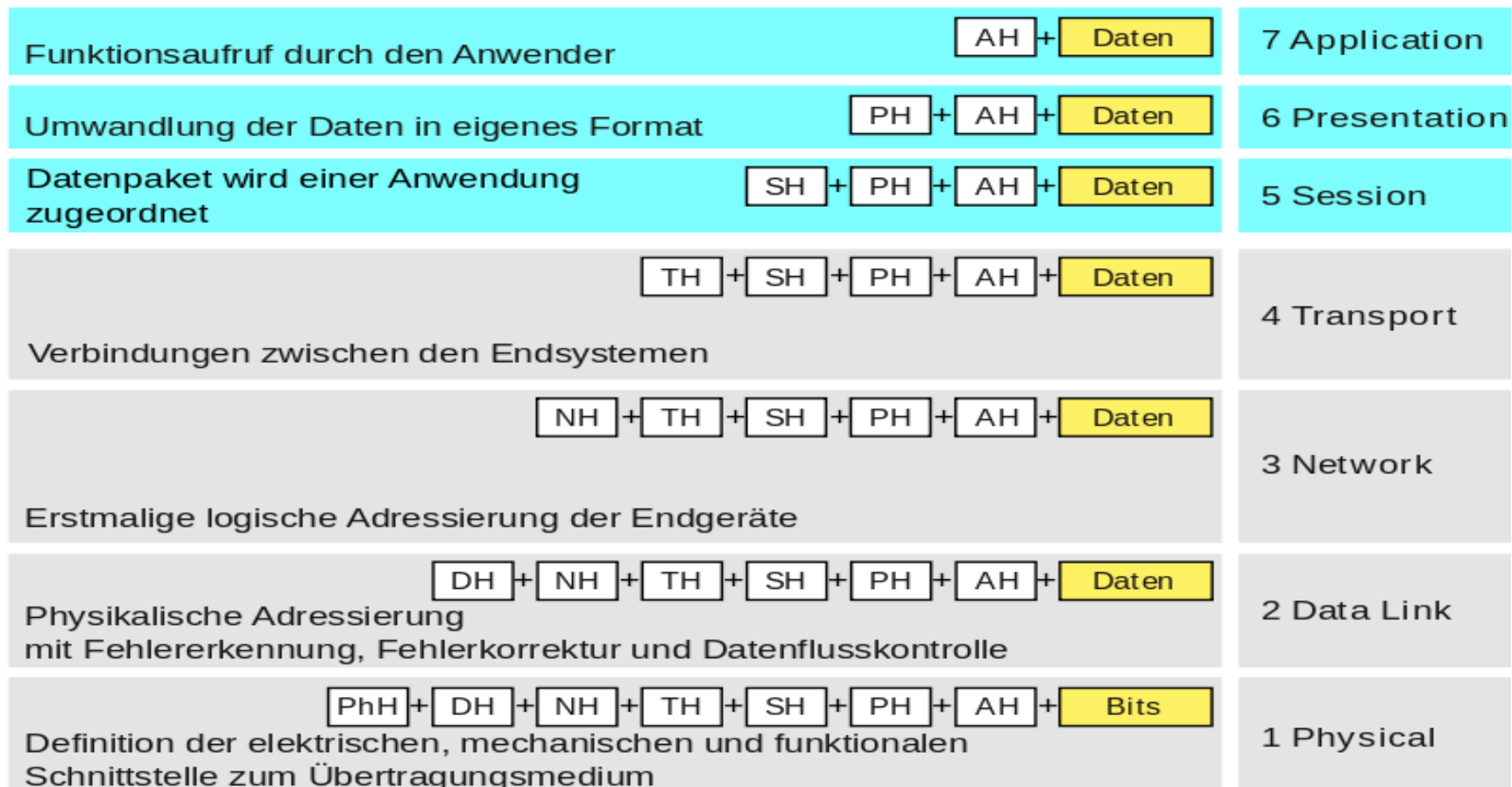
- **IEEE 802.11-(1999-2012) WLAN (WIFI)**
 - **802.11n (2009): Enhancement for higher Throughput**
 - **2.4 & 5 GHz, 4*150 Mb/s, 40 MHz bandwidth, PSDU<65KB**
 - **802.11ac (draft): Enhancements for Very High Throughput for Operation in Bands below 6 GHz**
 - **20,40,80,160,80+80 MHz bandwidth, PSDU<1MB**
 - **20MHz: 8->693Mb/s, 80MHz: 8->3.5Gb/s, 160MHz: 8->6.9Gb/s**
 - **802.11ad (2012): Enhancements for Very High Throughput in the 60GHz Band**
 - **4*2.16 GHz bandwidth, SC: 4.6 Gb/s OFDM: 6.7Gb/s, PSDU<256KB**
 - **Control-, OFDM-, SC-, low power SC-PHY**
 - **fast session transfer**

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

Einpacken, verschicken, auspacken und reklamieren



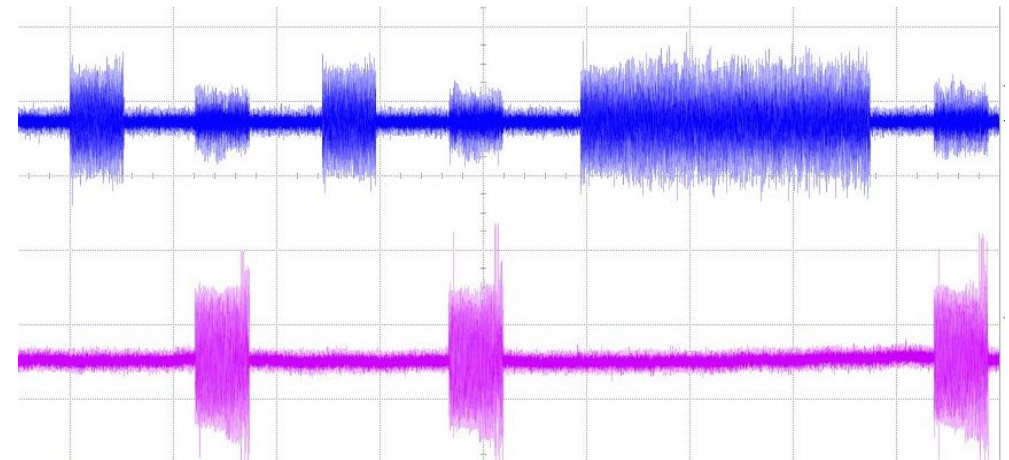
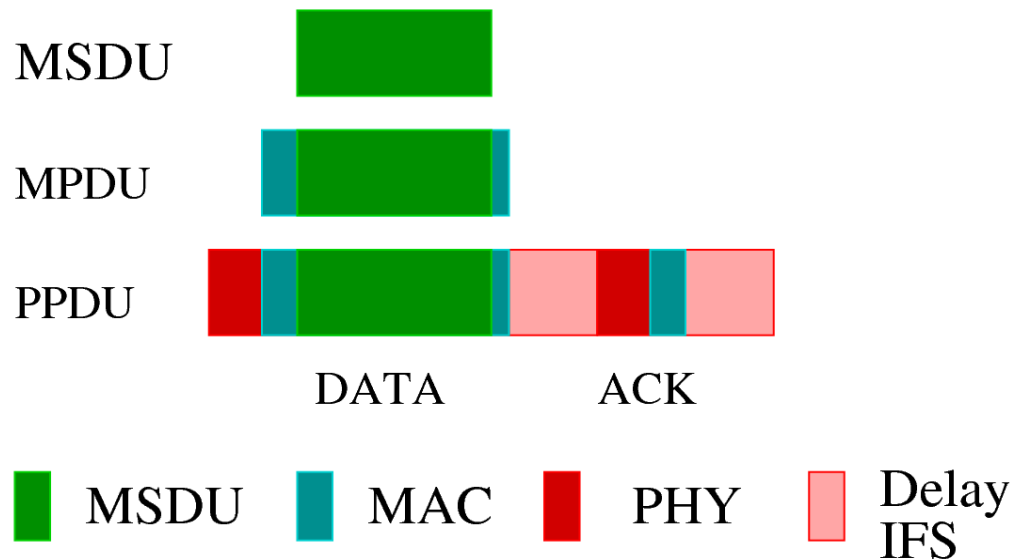
- Kapselung der Pakete durch die OSI-Schichten -> Overhead!
- Hinzufügen von schichtspezifischen Headern



Einpacken, verschicken, auspacken und reklamieren

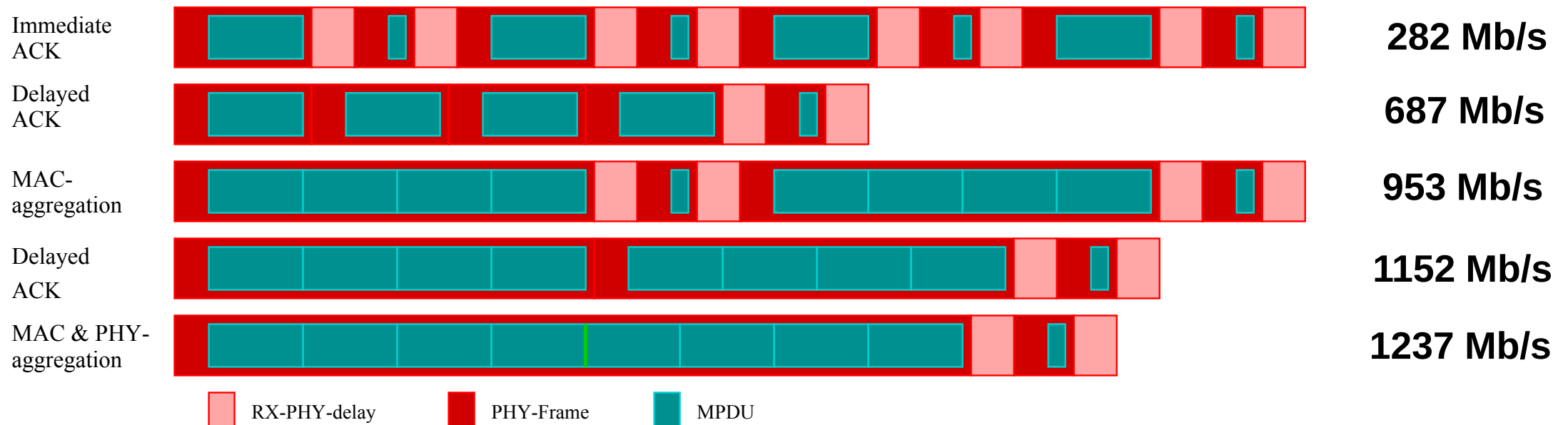


- **Sicherungsschicht: MAC-Header**
 - SRC-/DEST-ADDR, length, sequence number, frame type
 - QoS: stream number, class (VO, VI, BE, BK)
 - ACK-policy, ACK-Information
 - HCS, FCS
- **Overhead: PHY+MAC**



Darfs denn auch etwas schneller sein?

- Aggregation der Datenpakete auf der MAC- und PHY-Ebene
- Verringerung des MAC- und PHY-Overhead
- PHY datarate: 1.3 Gb/s
- MAC-Zugriffsmodus: Polling
- Ethernet packet size: 1514 bytes



Darfs denn auch etwas schneller sein?

MAC efficiency

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

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

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

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

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

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

Darfs denn auch etwas schneller sein?

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

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

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

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

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

Darfs denn auch etwas schneller sein?

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

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

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

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

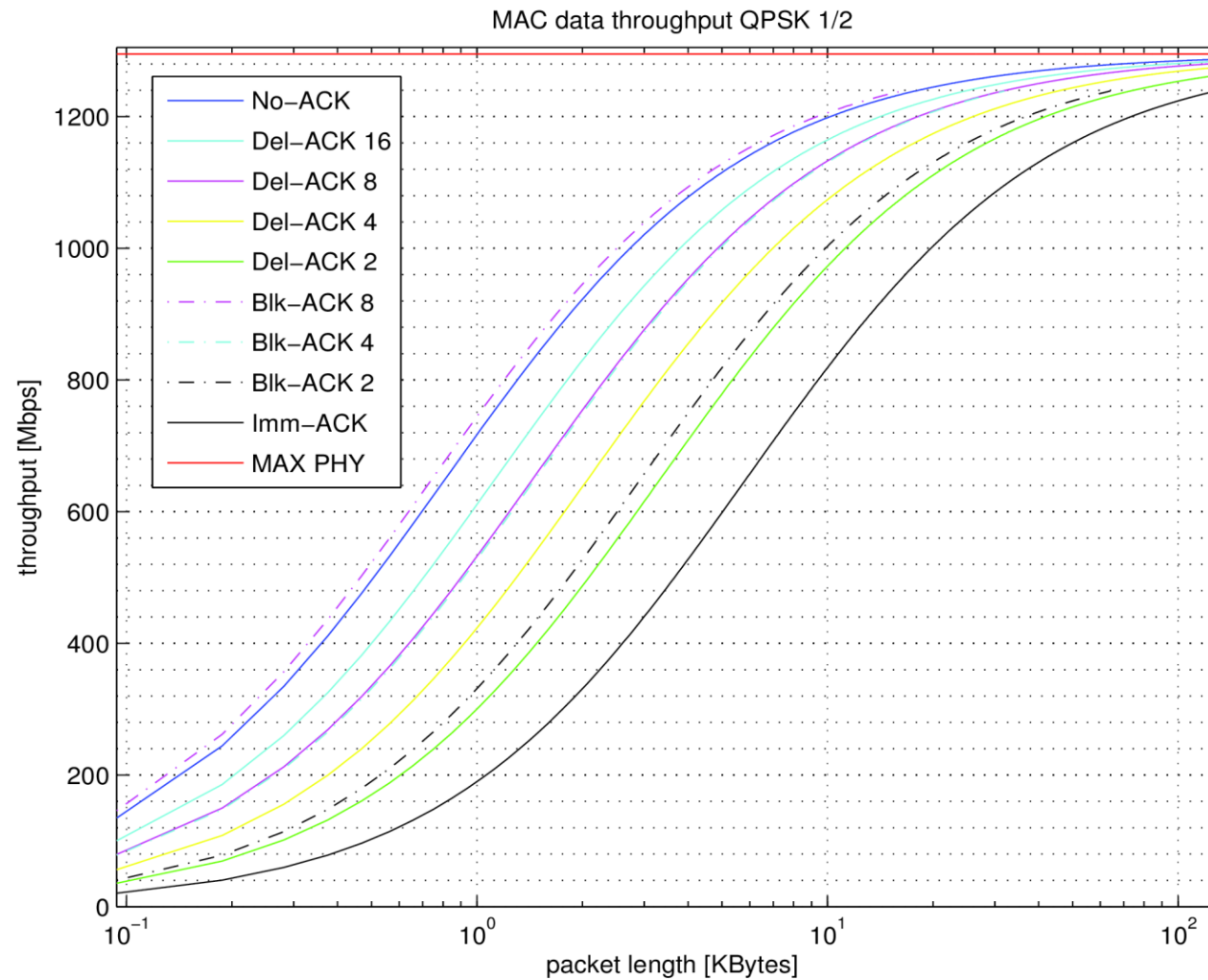
$$S_{Imm_ACK} = \frac{(1 - FER_a) L_{MSDU}}{(1 - FER_a) \times A + FER_a \times B}$$

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

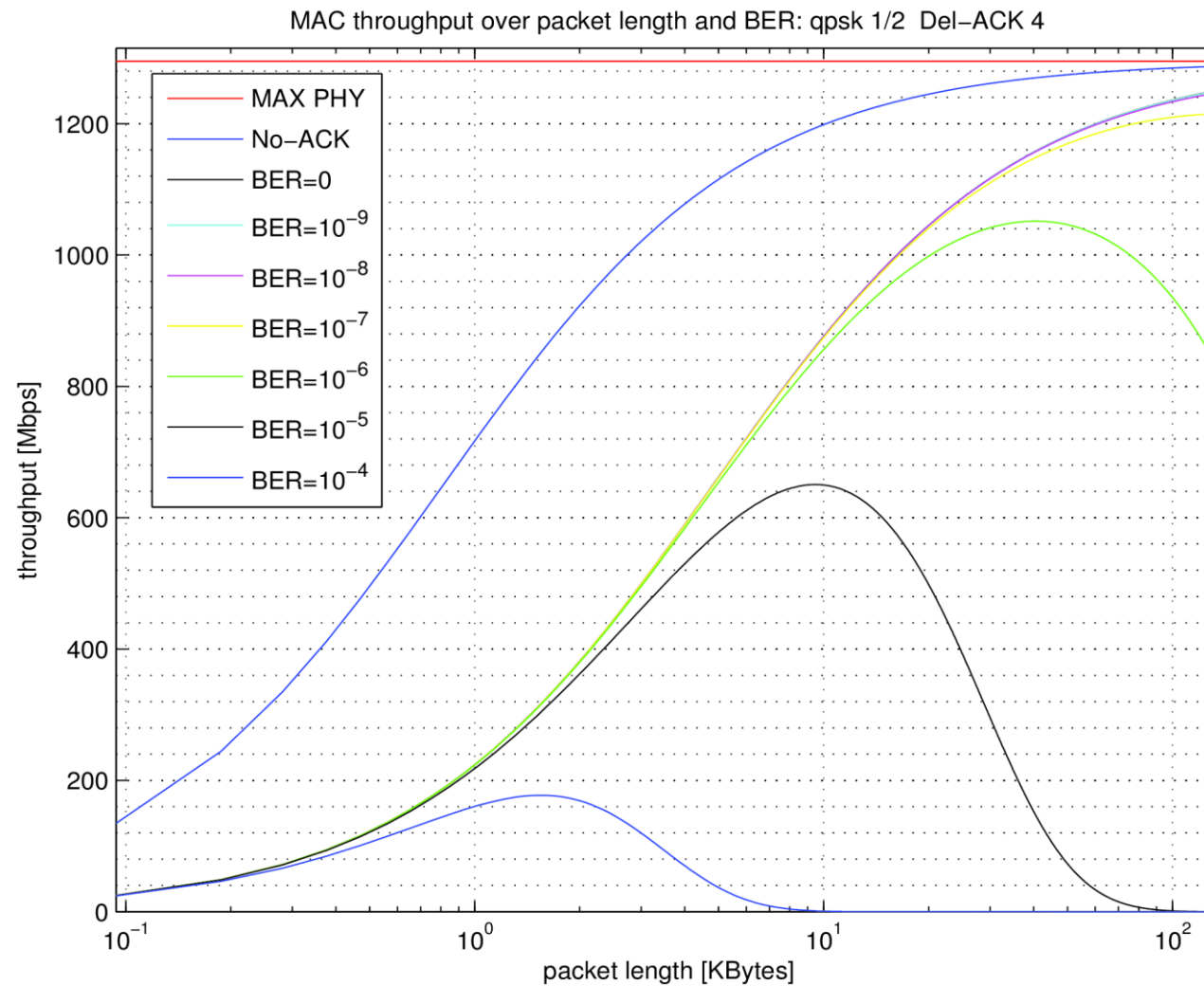
$$B_{EASY} = T_{PPDU} + T_{TX_Dly} + T_{RX_Dly} + 2 \times T_{Guard}$$

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

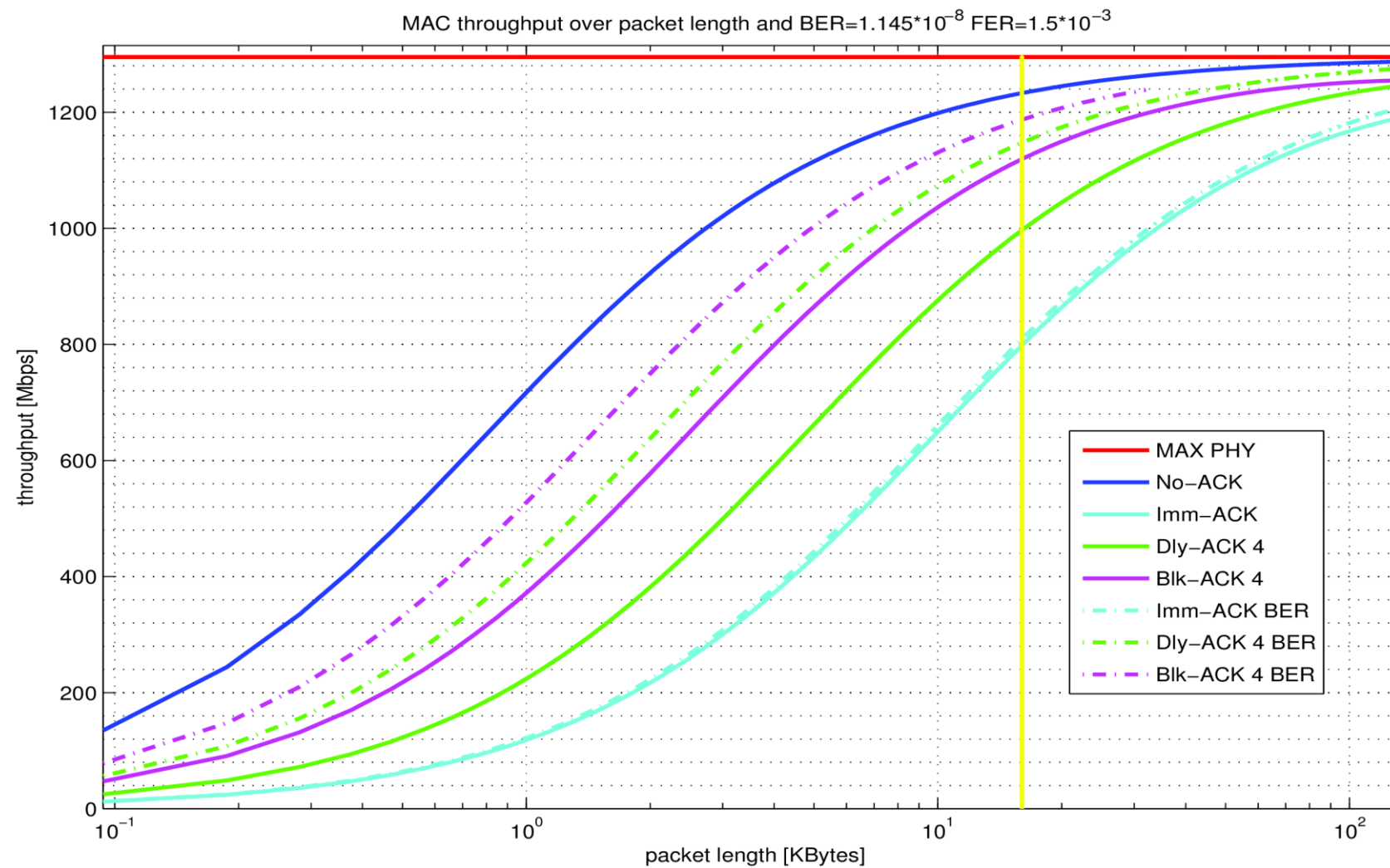
Darfs denn auch etwas schneller sein?



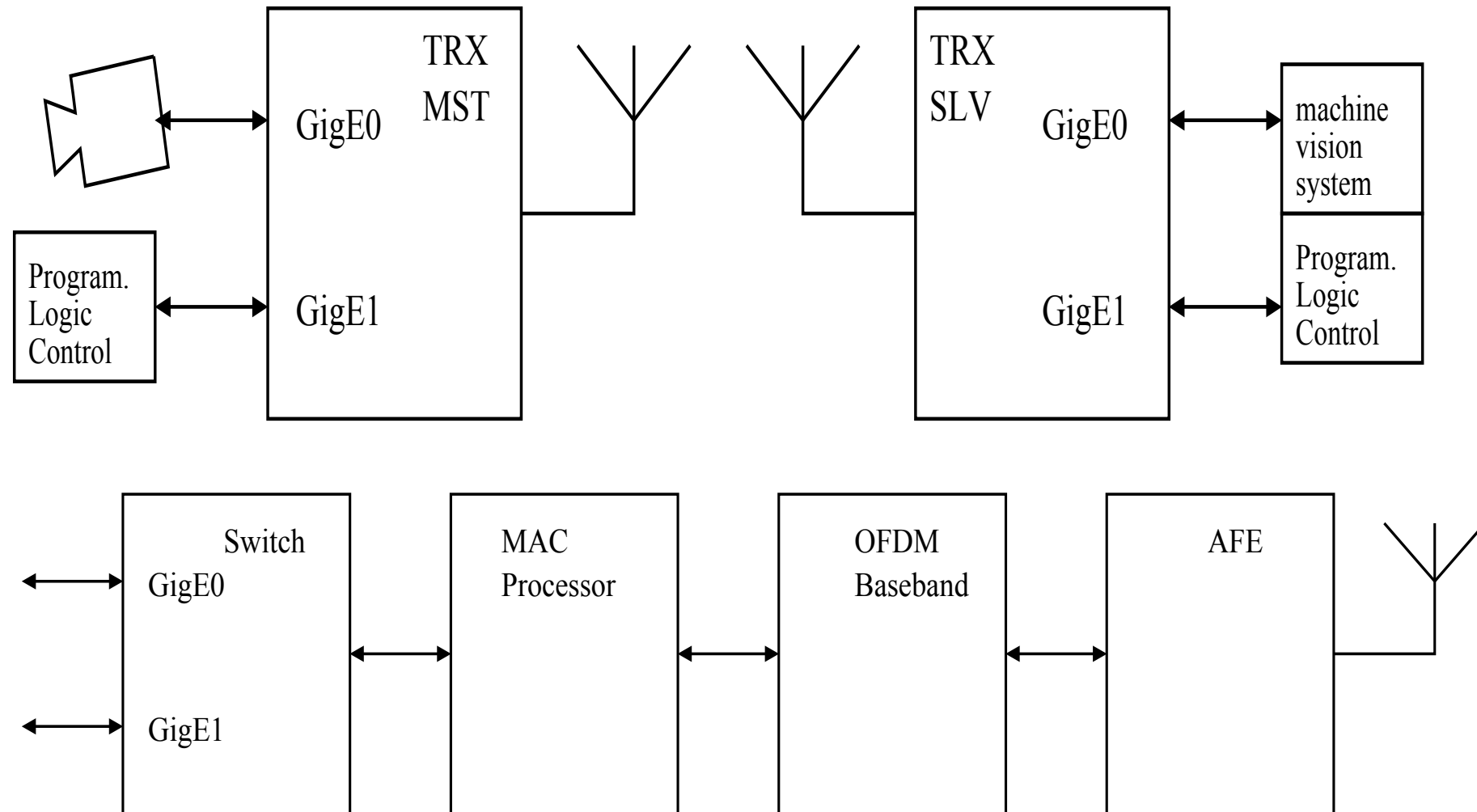
Darfs denn auch etwas schneller sein?



Darfs denn auch etwas schneller sein?



60 GHz OFDM Demonstrator





System architecture: 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

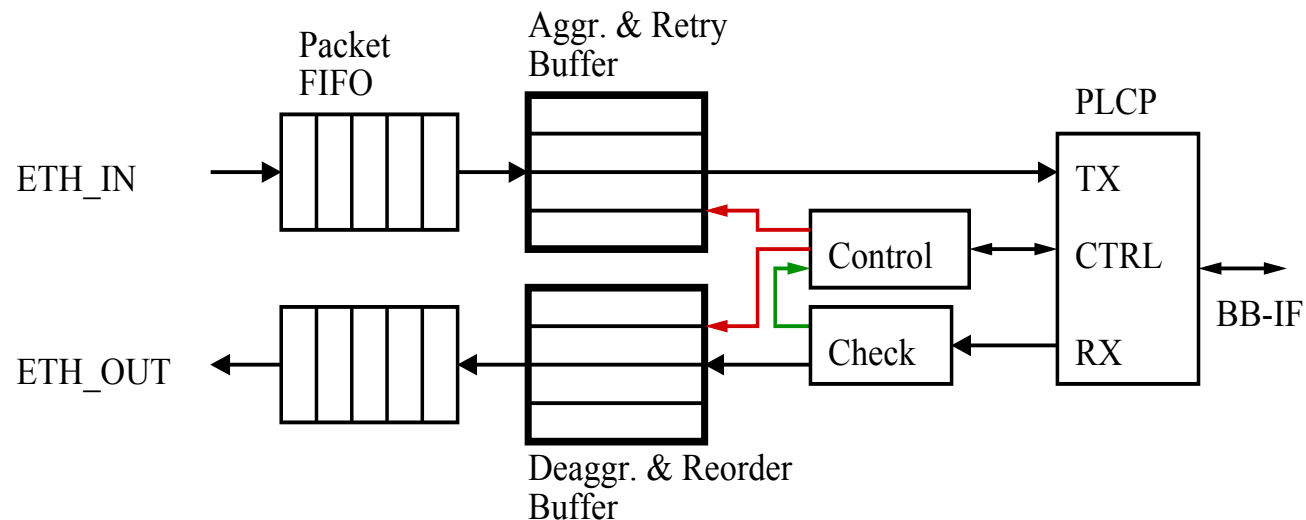
System architecture: CCD camera system

- 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

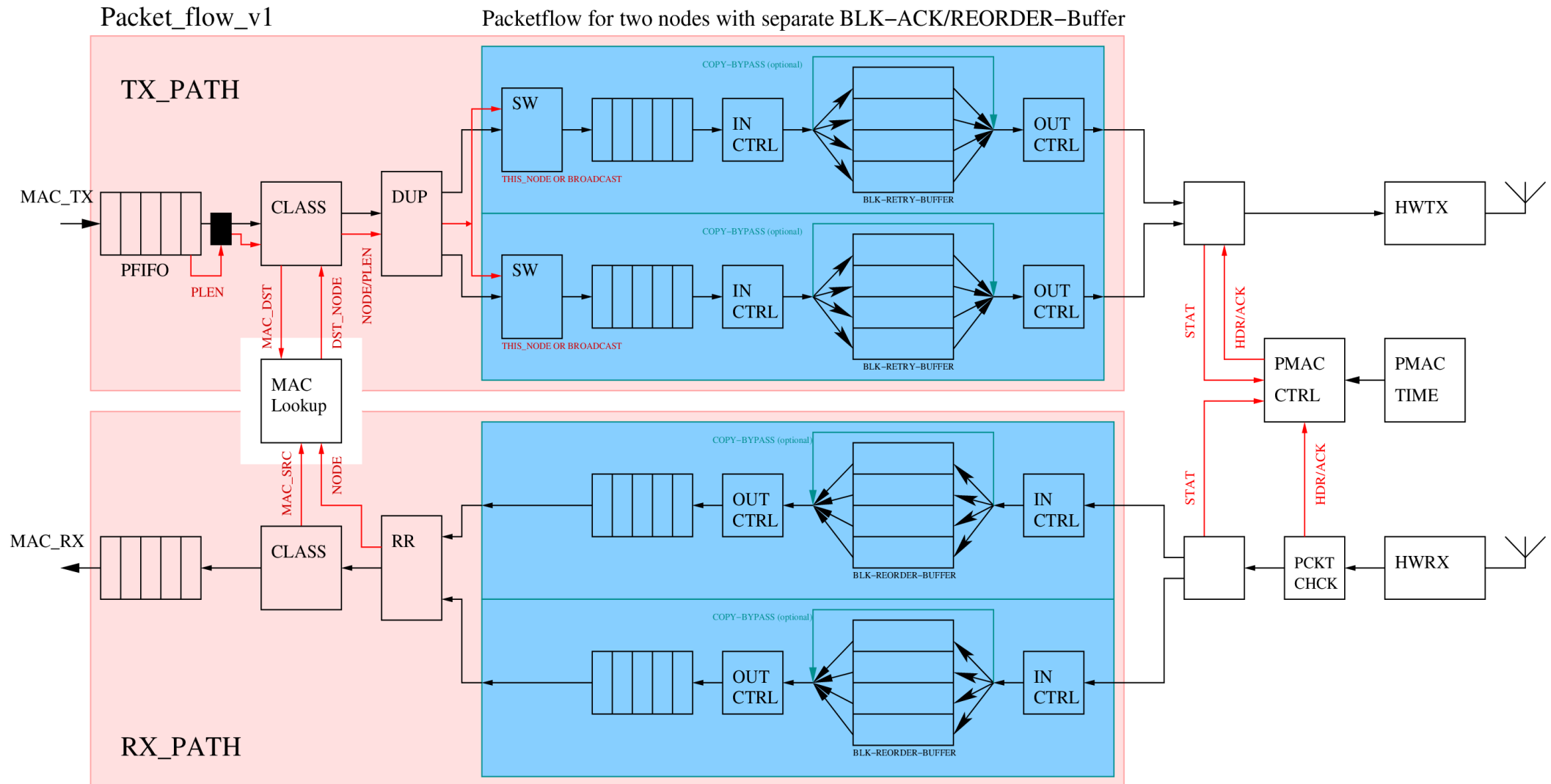


60 GHz OFDM Demonstrator

- Constrains taken from performance evaluation
- MAC level aggregation with delayed ACK
 - four 16 kB packets in the downlink direction (ca 1 Gb/s)
 - one 4 kB packet in the uplink direction (ca 68 Mb/s)
- Hardware structure fixed after FPGA synthesis



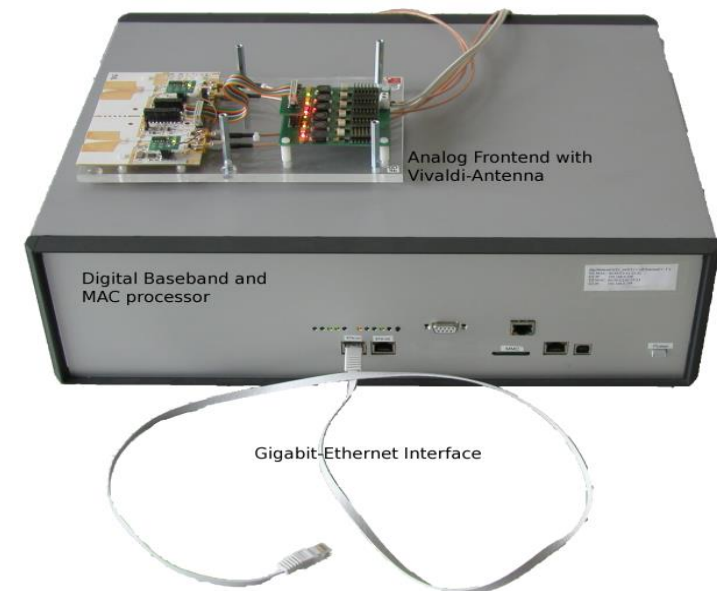
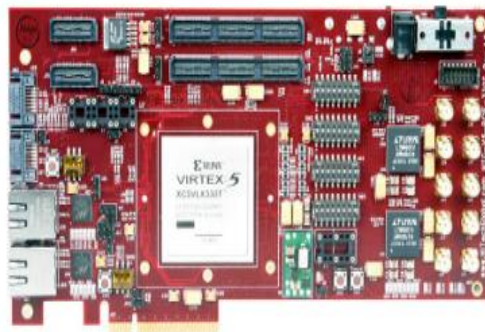
60 GHz OFDM Demonstrator





Demonstrator setup and performance

- Point-to-point bidirectional half-duplex transmission
- Medium access scheme: polling (Master - Slave)
- Demonstrator setup:
 - Downlink: Camera Link (950 Mb/s)
 - Uplink: Camera control and video link (25 Mb/s)
- Measured 7500 PHY-frames per second of about 16 kBytes up to 8 m
 - 11 errors -> $PER=1.5 \cdot 10^{-3}$



Geschafft...

