



innovations  
for high  
performance  
microelectronics

---

# Implementierungsspezifische Aspekte eines High-Performance OFDM Basisbandprozessors

**Markus Petri**

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

## Themen

---

- **Modelle für Kommunikationssysteme**
- **Was ist das Basisband?**
- **Digitale Basisbandprozessoren**
- **Parallelverarbeitung**
- **EASY-A VHR-E: Beispiel eines OFDM-Basisbandprozessors**
- **Latenzen - Ursachen, Einfluss, Vermeidung**
- **Bunte Bilder: Übertragungseffekte**

## Allgemeines Modell eines Kommunikationssystems

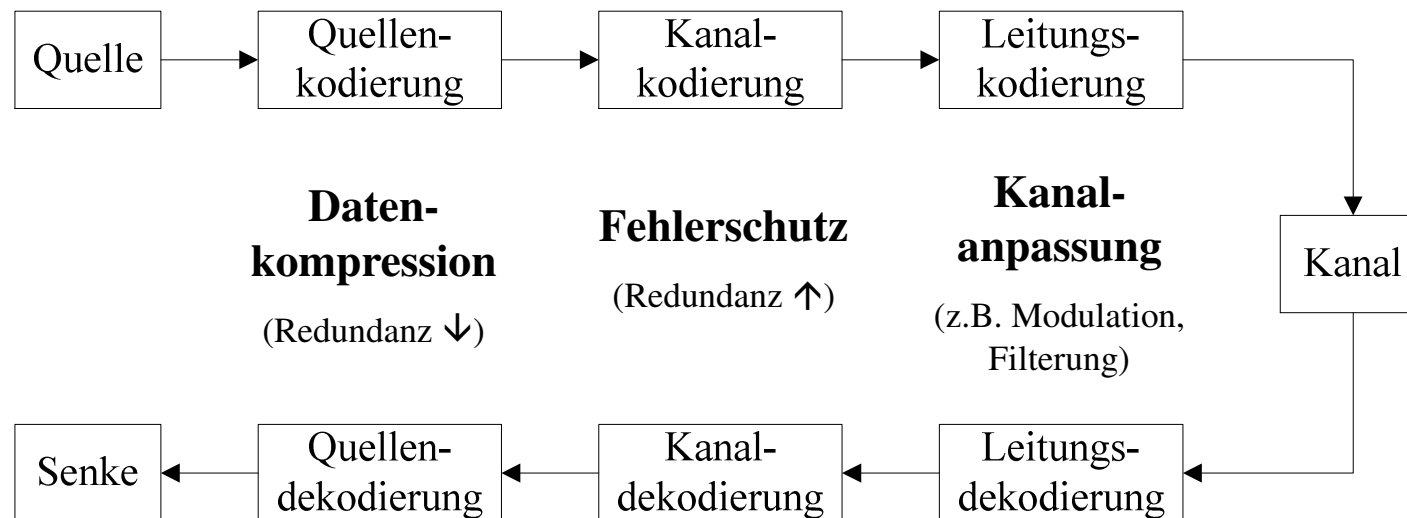
---



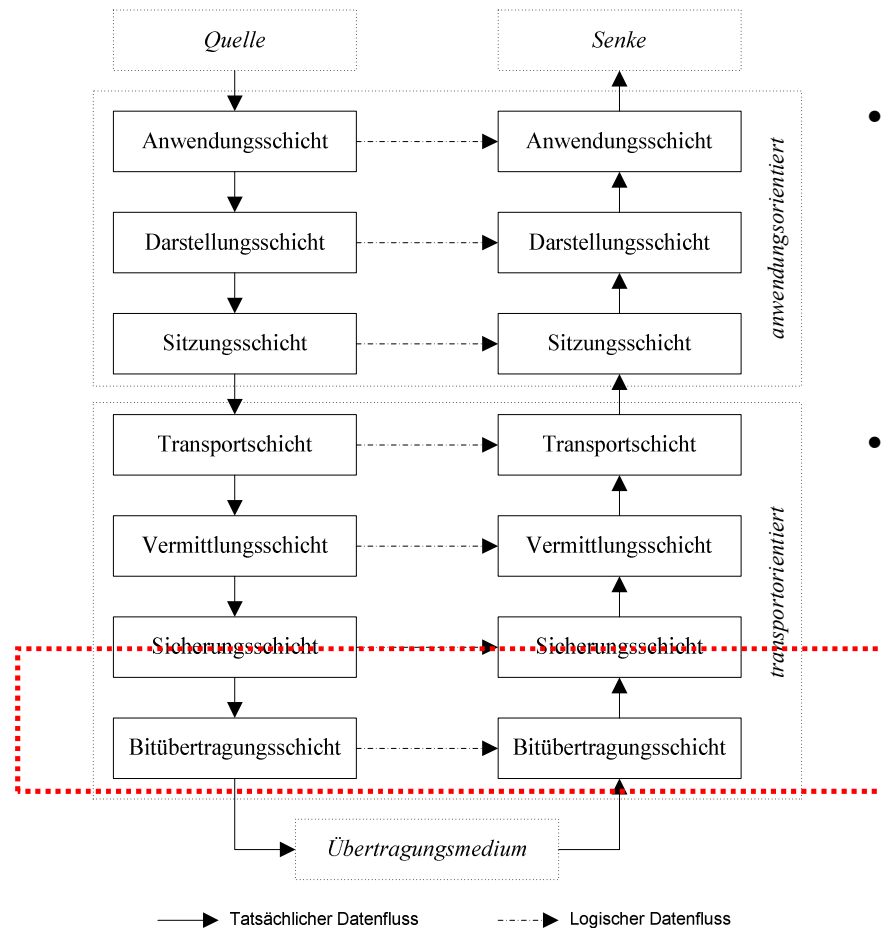
- Verschiedene detaillierte Darstellungen möglich
- Ausschließliche Betrachtung digitaler Quellen und Senken

# Horizontales Modell eines Nachrichtenübertragungssystems

Beschreibt grundlegende (Signal-)Verarbeitungsschritte bei Übertragung von einem (!) Sender zu einem (!) Empfänger



# Vertikales Modell eines Kommunikationssystems



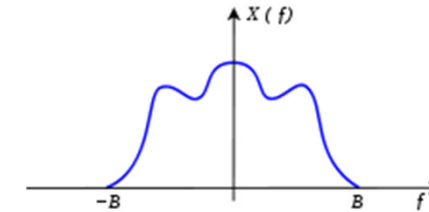
- Umfasst auch höhere Ebenen der Kommunikation:
  - Adressierung (mehrere Empfänger)
  - Kanalzugriffssteuerung
  - Übertragungssicherung
- Abstraktion von darunterliegenden Ebenen

← **Basisbandverarbeitung**

# Was ist das “Basisband”?

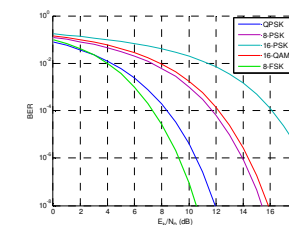
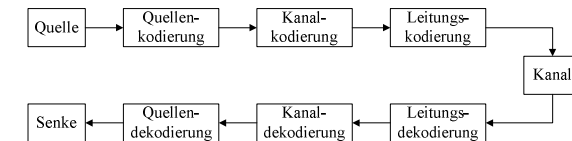
## Basisband:

- „Natürlicher Frequenzbereich des Nutzsignals“,  $f_{\min} = 0$  Hz



## Basisbandverarbeitung:

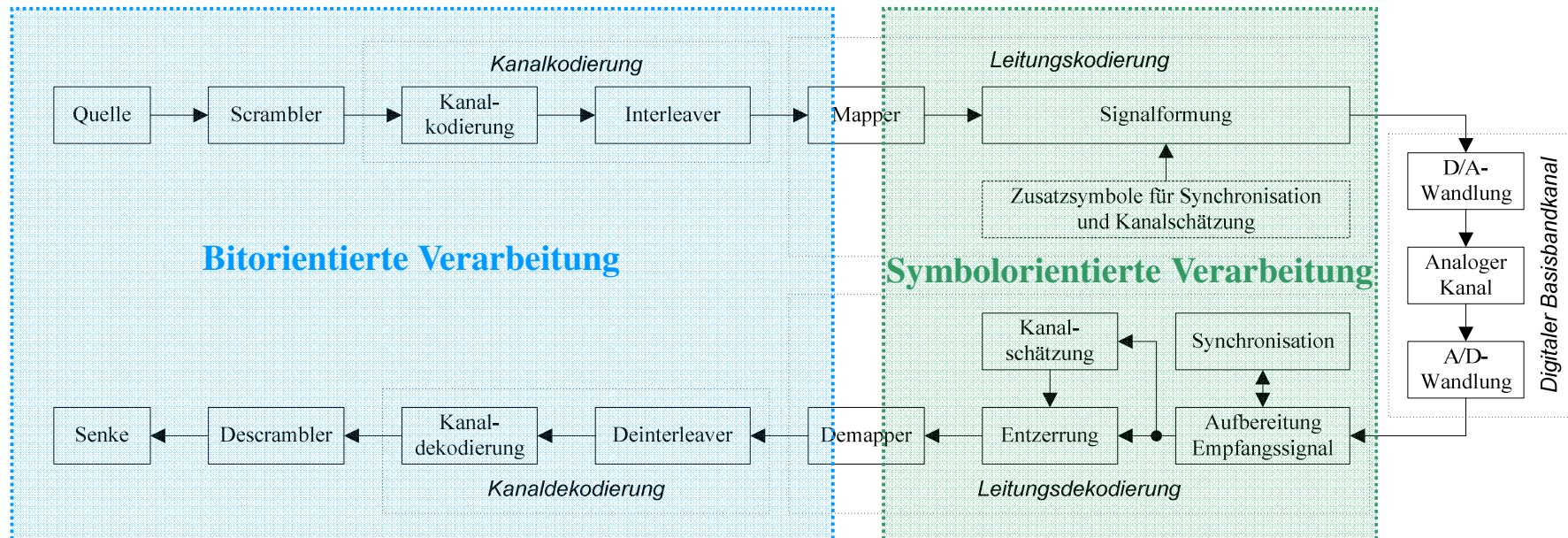
- Unterste Ebene eines Kommunikationssystems  
→ Detaillierte Beschreibung durch das horizontale Modell
- Algorithmen zur Generation und Anpassung des Nutzsignals an den (äquivalenten Basisband-) Kanal  
→ Realer Kanal ist analog, Beschreibung durch digitalen Kanal
- Abstrakte Modellierung durch Bitfehlerraten



## Digitaler Kanal:

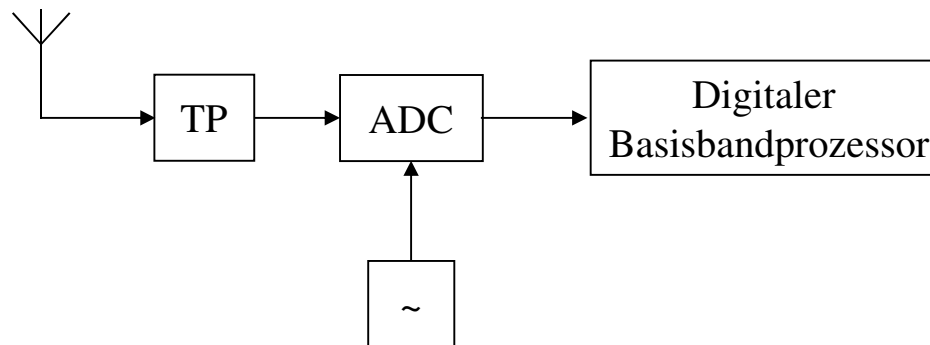
- Definiert Modell, welches digitale Symbole aufnimmt und abgibt
- Beschreibung durch äquivalenten Basisbandkanal (komplexwertig)
- Beinhaltet Wandlung, Impulsformung, Modulation in andere Frequenzbereiche und den analogen Kanal

# Digitales Basisbandmodell



- **Symbolorientierte Verarbeitung sowohl analog als auch digital möglich** (Modulation, Timingsynchronisation, FFT, Phasenkorrektur...)
- **i.A. Implementierungsvereinfachung durch Digitalverarbeitung**
- **Digitalverarbeitung Voraussetzung für SDR- und kognitive Systeme**

## Beispiel eines digitalen Empfängers



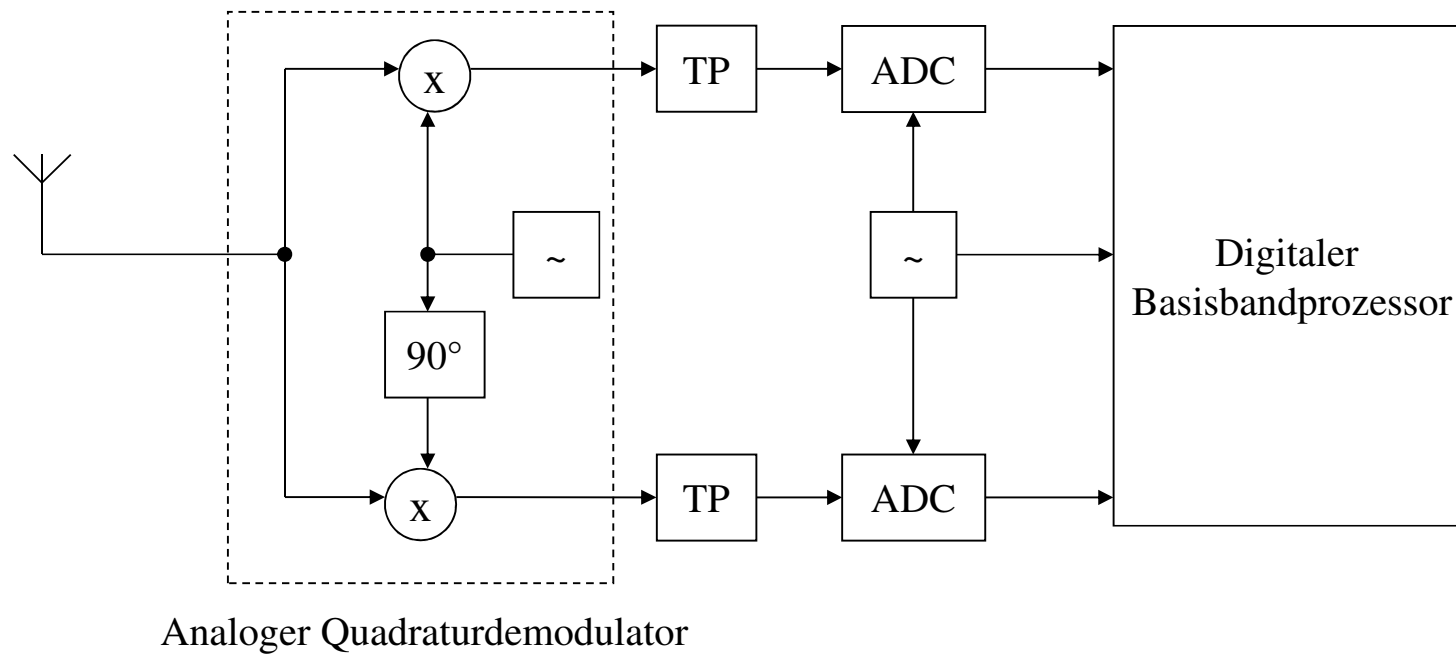
**Problem bei hohen Frequenzen / Bandbreiten (> 1-5 GHz):**

**→ Nyquist-Shannon-Abtasttheorem**



## Beispiel eines digitalen Empfängers

**Mixed-Signal-Systeme notwendig!**



## Ständige Datenratensteigerung notwendig

---

- **Steigender Bandbreitenbedarf in Mobilfunkanwendungen**  
→ Grenze von 1 Gbps vor einigen Jahren durchbrochen
- **Hohe Datenübertragungsraten durch**
  - 1. Erhöhung der spektralen Effizienz**
    - Höhere Coderaten
    - Höhere digitale Modulationen (QPSK -> 64QAM)
    - MIMO
    - Resultat: GSM: 0,4 bit/s/Hz -> LTE: 15 bit/s/Hz
  - und / oder
  - 2. Vergrößerung der Bandbreite**
    - (LTE: 20 MHz → LTE-A: 100 MHz)
    - Bedingt mitunter andere (höhere) Trägerfrequenzen

**→ Große Herausforderungen an die Signalverarbeitung**

## Datenraten bei der Analog-Digital-Wandlung

---

- Signalbandbreite 1,736 GHz
- IQ-moduliert → 868 MHz pro Kanal
- Abtastrate 2.16 GHz je Kanal
- 12 Bit-Auflösung

$$12 \text{ bit} * 2.16 \text{ GHz} * 2 = 51,84 \text{ Gbit / s} = 6,48 \text{ GByte / s}$$

## **Herausforderungen der digitalen Basisbandverarbeitung**

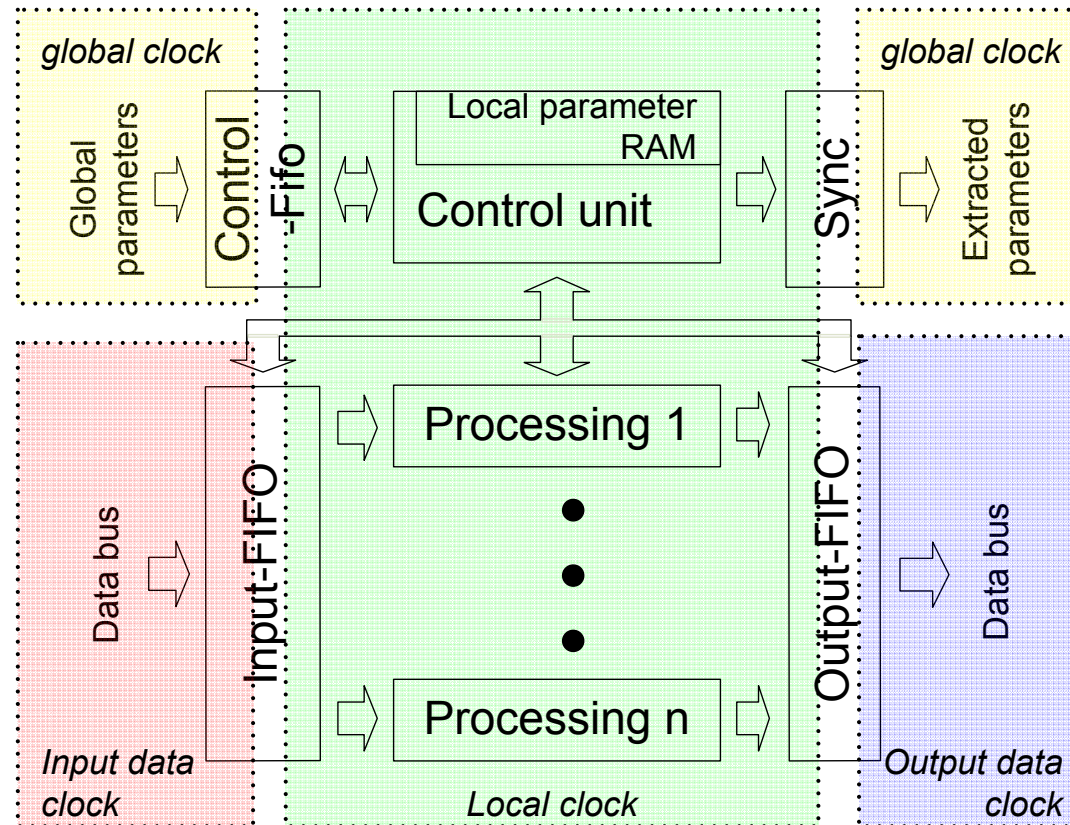
---

- **Hohe Datenrate + komplexe Algorithmen**
  - hoher Verarbeitungsaufwand
  - Hardwareimplementierung erforderlich
- **Abtastraten  $> 1$  GHz**
  - selbst für dediziertes ASIC-Design schwierig
  - hoher Grad an Parallelisierung benötigt
- **Kurze Entwicklungszyklen, konkurrierende Standards**
  - flexible Systeme benötigt
  - Möglichkeit der einfachen Anpassung

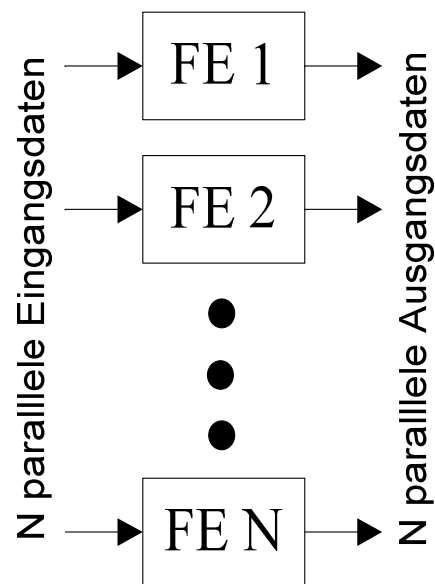
## **Notwendige Kriterien der BB-Implementierung**

---

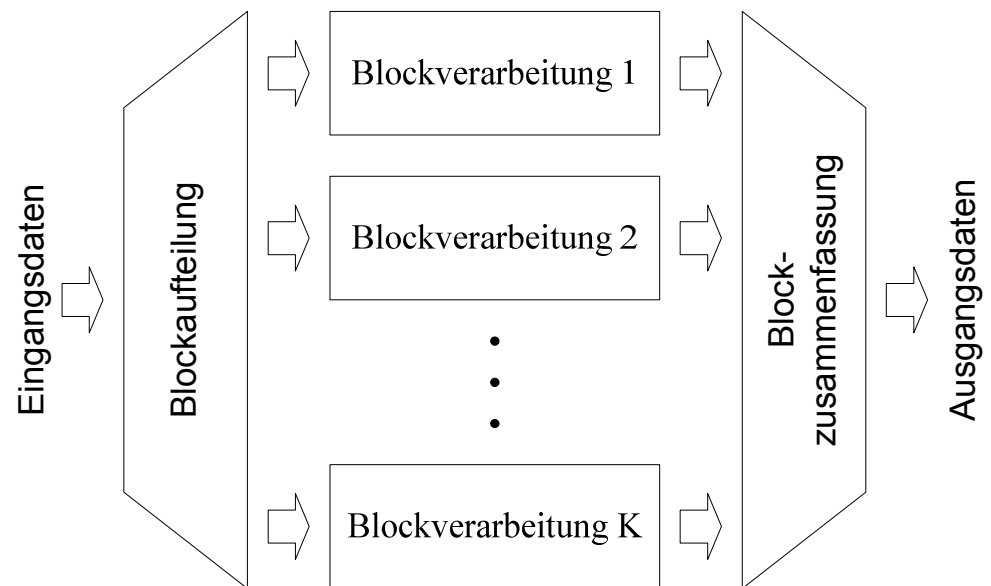
- **Flexibilität bedingt modulares Design ohne globale Kontrollinstanzen**
- **Zur einfachen Skalierung modulweise Trennung der Taktdomänen**  
→ **Transfer zu GALS-Designmethodiken**
- **Parallelverarbeitung**  
→ **Schlüssel zur Sicherstellung des Durchsatzes**  
Varianten:
  - bitparallel
  - blockparallel
  - frameparallel



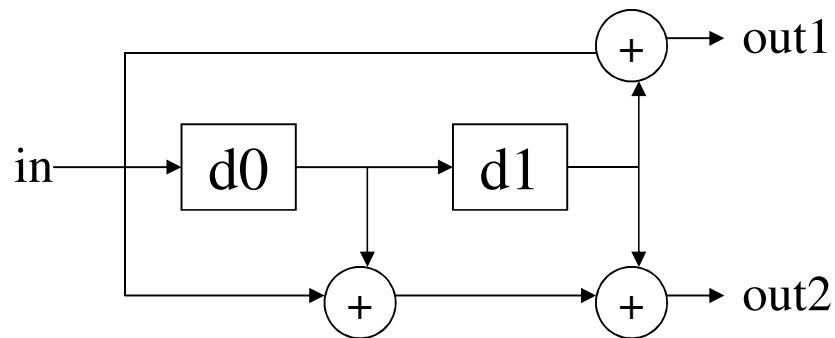
## Bitparallelität



## Blockparallelität



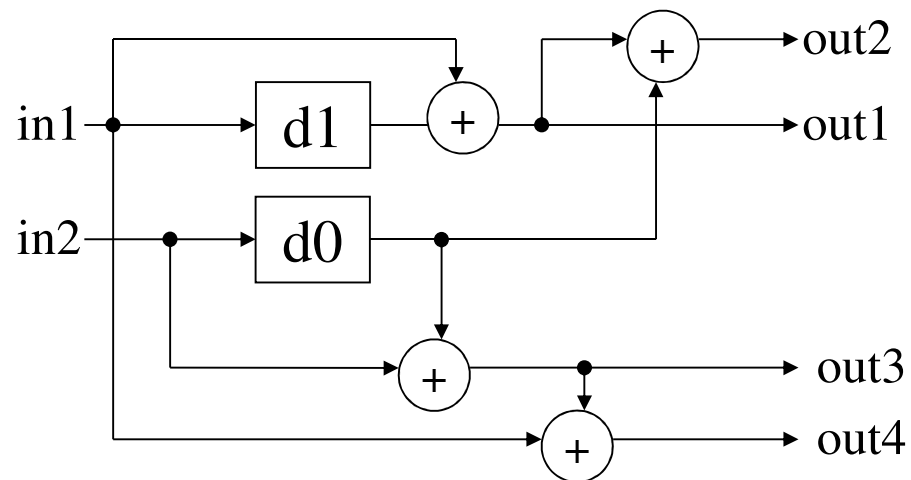
## Bit-Parallelisierung eines Faltungskodierers



```

if rising_edge(clk)
  out1 <= d1 xor in;
  out2 <= d1 xor d0 xor in;
  d1  <= d0;
  d0  <= in;
end;

```



```

if rising_edge(clk)
  d0t := d0;
  d1t := d1;
  for n in 1 to 2 loop
    out1(n) <= d1t xor in(n);
    out2(n) <= d1t xor d0t xor in(n);
    d1t := d0t;
    d0t := in(n);
  end loop;
  d0 <= d0t;
  d1 <= d1t;
end;

```



## **Blockparallelisierung eines Reed-Solomon-Decoders**

---

### **Aufgabe**

- **Realisierung eines (239,255)-RS-Decoders mit 4 Gbps Nettodurchsatz**

### **Vorgaben**

- **32-bit Ein- und Ausgangsinterface**

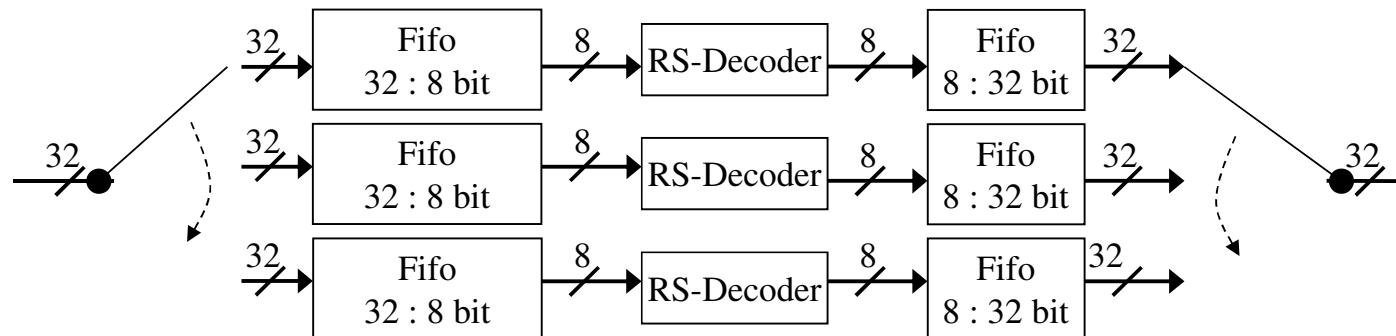
### **Vorhandene Module**

- **Einzelner (239,255)-RS-Decoder mit Byteinterface und 1,6 Gbps Durchsatz**

### **Lösung**

- **Transparenter blockparalleler Decoder aus 3 Einzelmodulen**

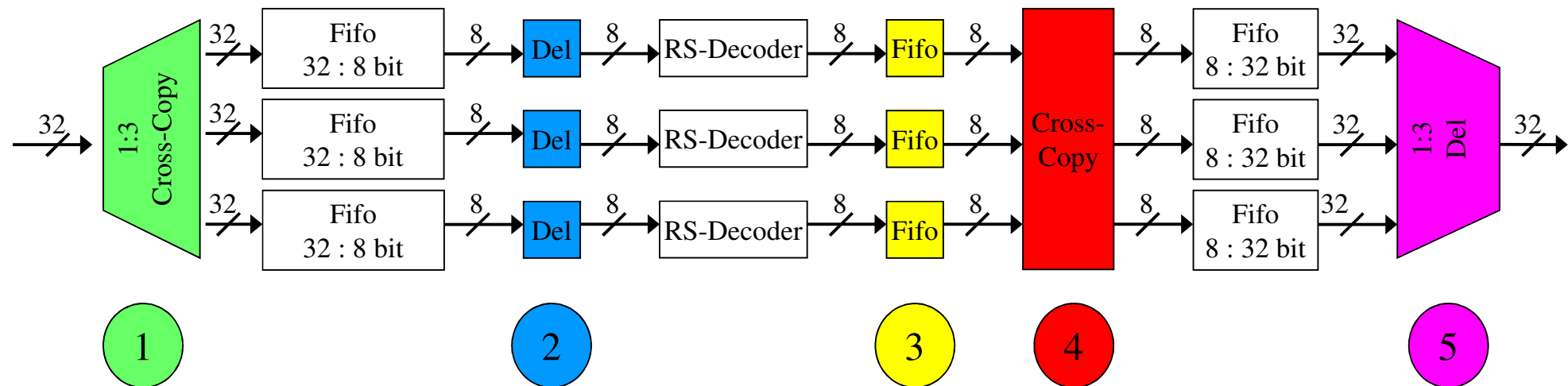
## Blockparallelisierung eines Reed-Solomon-Decoders



**Diese Lösung ist so nicht richtig!!!**

- Block für den ersten Pfad besteht aus 255 Eingangsbytes, es werden jedoch stets Vielfache von 4 eingeschrieben
- Kopieren von einzelnen Bytes und Einfügen von Dummy-Bytes notwendig!

## Blockparalleler RS-Decoder ohne Teilzugriff in Fifos

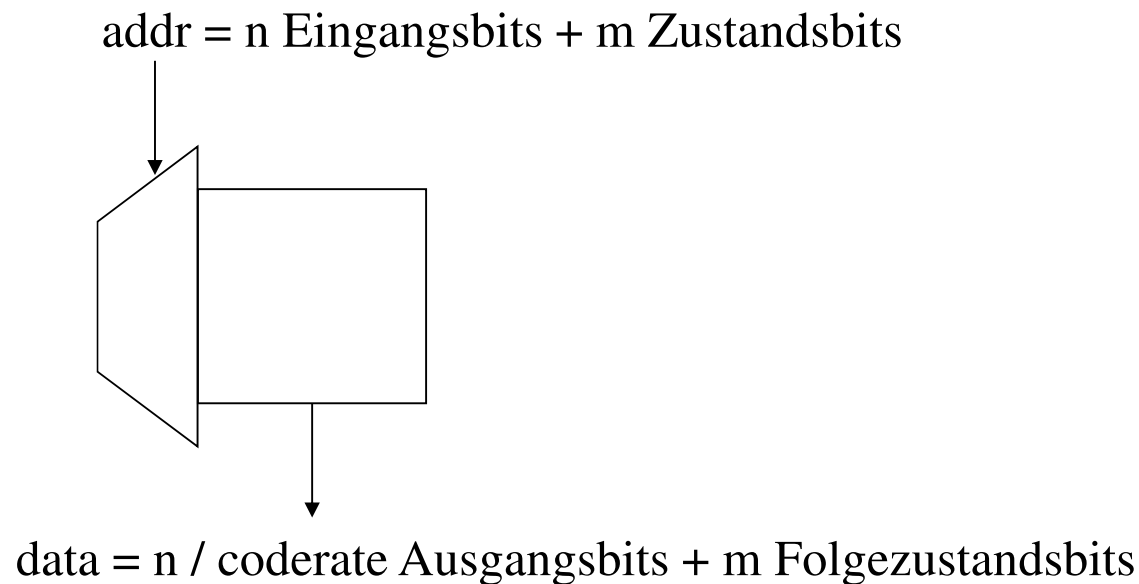


1. Kopieren von Bytes in den nächsten Block + Einfügen von Dummy-Bytes am Ende
2. Löschen überzähliger Dummy-Bytes
3. Speichern des Blocks bis zur Fertigstellung des vorherigen
4. Kopieren von Bytes zum vorherigen Block, Einfügen von Dummy-Bytes am Ende
5. Löschen von überzähligen Dummy-Bytes

## Parallelisierung bei Software-Verarbeitung

### Beispiel: Faltungskodierer

- Strukturelle Parallelisierung in Hardware sinnvoll
- In Software → LUT besser
- Vereinheitlichung mit Punktierung möglich



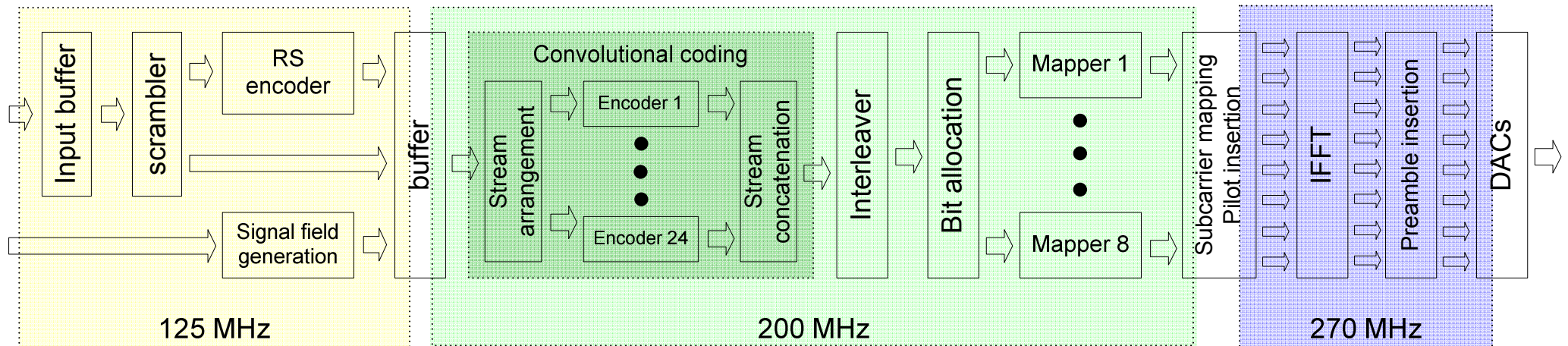
## EASY-A VHR-E 60 GHz OFDM Basisbandprozessor



→ **Modularer, konfigurierbarer, skalierbarer Basisbandprozessor für die Übertragung im 60-GHz-Bereich**

- Nettodatenrate bis 3,9 Gbps (16-QAM-3/4), 5,2 Gbps on-air
- 2,16 GHz Abtastrate; 1,76 GHz genutzte Bandbreite
- OFDM-Modulation mit 1024 Unterträgern
- 8- bis 24-fache Modulparallelisierung (Blockebene), 32-fache Bitparallelität

## EASY-A VHR-E: Blockschaltbild Sender

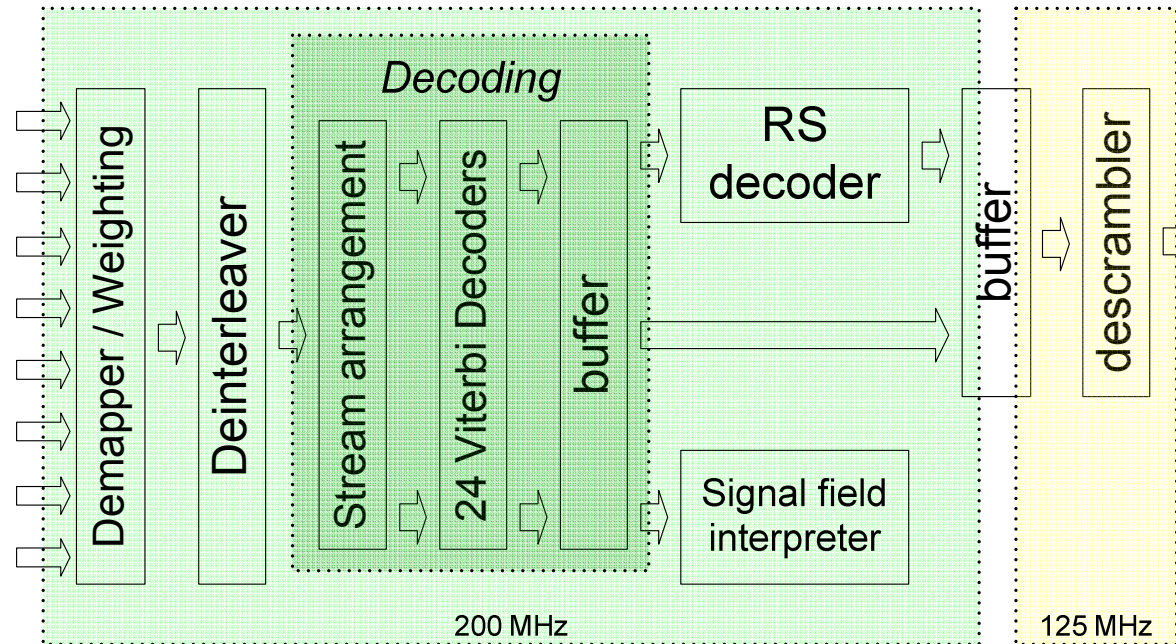


**40.000 Flipflops**

**36.000 LUTs**

**300 DSP-Module**

## EASY-A VHR-E: Blockschaltbild Empfänger-Datenpfad



**145.000 Flipflops**

**210.000 LUTs**

**650 DSP-Module**

(Gesamter Empfänger)

## Ist Datenratensteigerung das A und O?

---



LKW, Hamburg - Berlin: 300 km = 3,75 h  
8000 Festplatten à 500 GB  
→ 2400 Gbit/s = 2,4 Tbit/s

Aber: auch für eine Festplatte werden 3,75 h benötigt → 300 Mbit/s

Auch die Verzögerungszeit ist entscheidendes Systemkriterium!



## **Einfluss von Latenzen auf den Datendurchsatz**

---

- **(theoretische) Datenrate  $\neq$  Datendurchsatz!**
- **Datendurchsatz: Anzahl fehlerfreier (Paket-)Übertragungen pro Zeiteinheit**
- **Beinhaltet auch die Bestätigung empfangener Pakete**
- **Beeinflussung durch Verarbeitungsverzögerung (Latenz)**

## Einfluss von Latenzen auf den Datendurchsatz

---

Paketübertragungszeit inkl. unmittelbarer Empfangsbestätigung:

$$T_p = \frac{N_{ps}}{R} + 2T_L$$

Steigerung der Datenrate mit Vergrößerung der Latenz:

$$R_{neu} = n \cdot R \qquad T_{Lneu} = m \cdot T_L$$

Wie stark darf sich die Latenz bei einer Datenratensteigerung vergrößern, um die Paketübertragungszeit zu verringern?

$$T_{pneu} < T_p$$

$$\frac{N_{ps}}{R_{neu}} + 2 \cdot T_{Lneu} < \frac{N_{ps}}{R} + 2 \cdot T_L$$

## Einfluss von Latenzen auf den Datendurchsatz

---

$$\frac{N_{ps}}{n \cdot R} + 2 \cdot m \cdot T_L < \frac{N_{ps}}{R} + 2 \cdot T_L$$

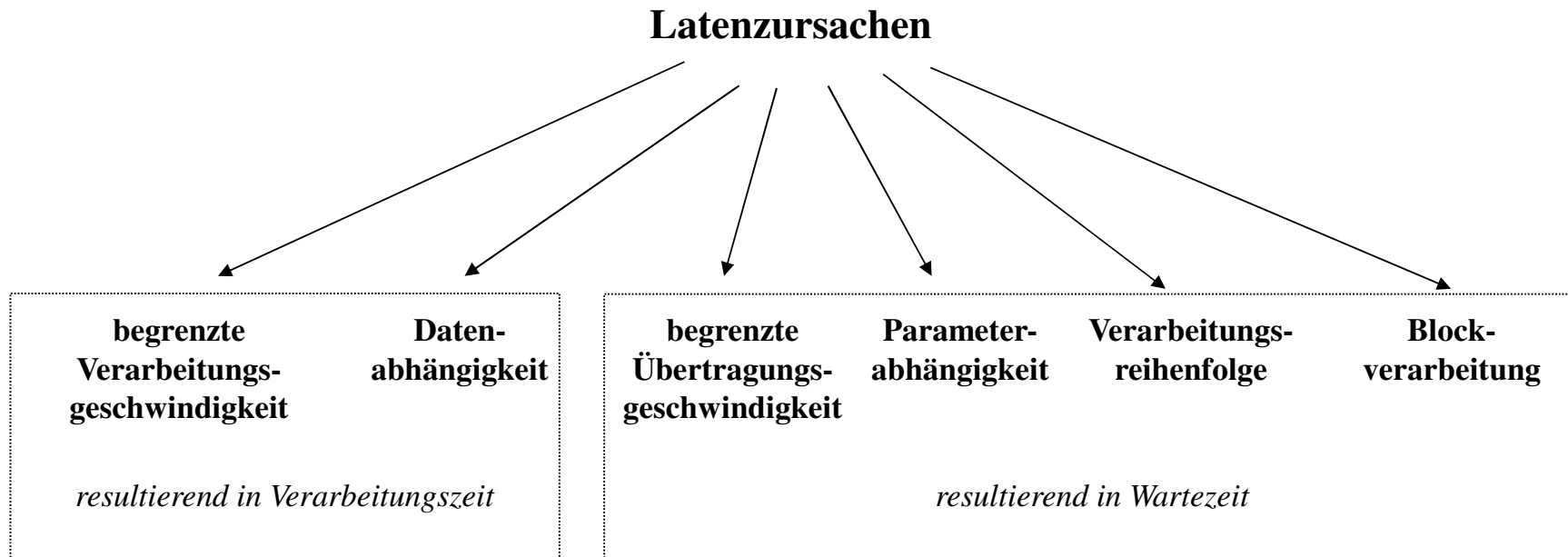
$$m < \frac{N_{ps} \cdot (n - 1)}{2 \cdot n \cdot R \cdot T_L} + 1$$

Bsp:      Paketgröße 2 kB,      R = 500 MB/s,      T<sub>L</sub> = 4 µs,      n = 2

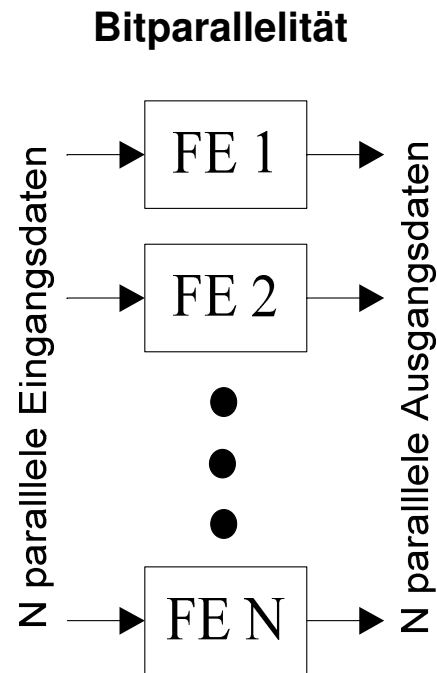
$$\rightarrow m = 1,25$$

Vergrößert sich bei einer Verdoppelung der Datenrate die Latenz um 50 %, verringert sich die Übertragungsrate um 15 % !

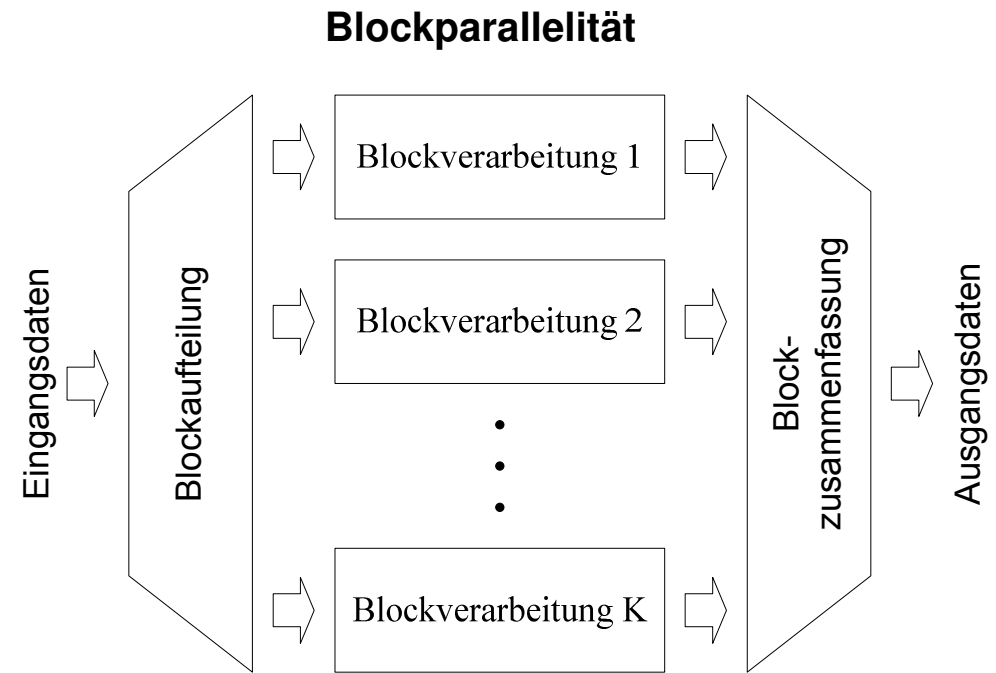
## Ursachen für Latenzen in der Basisbandverarbeitung



# Latenzen der Parallelverarbeitung

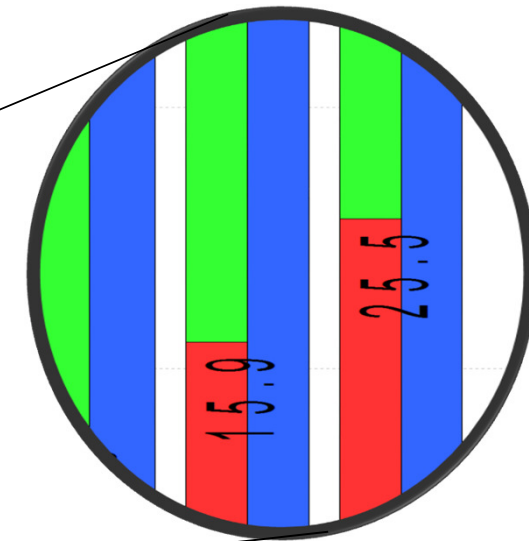
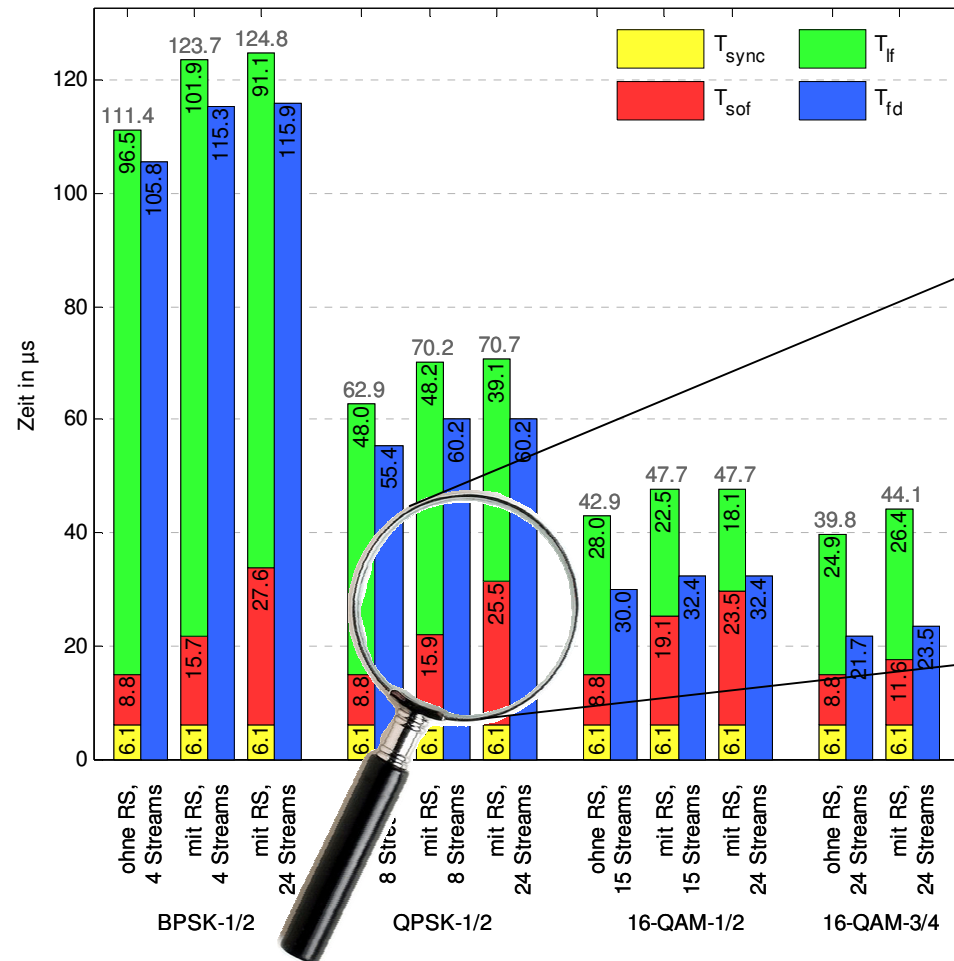


$$T_{Lges} = T_{LFE}$$



$$T_{Lges} = T_{LFE} + \frac{N_{block}}{R_{FE}}$$

# VHR-E: Analyse der Verarbeitungslatenzen



Einfluss der  
blockparallelen  
Streamverarbeitung

## **Latenzverringierung beginnt mit Systemspezifikation**

---

### **→ Vermeidung durch angepasstes Systemdesign**

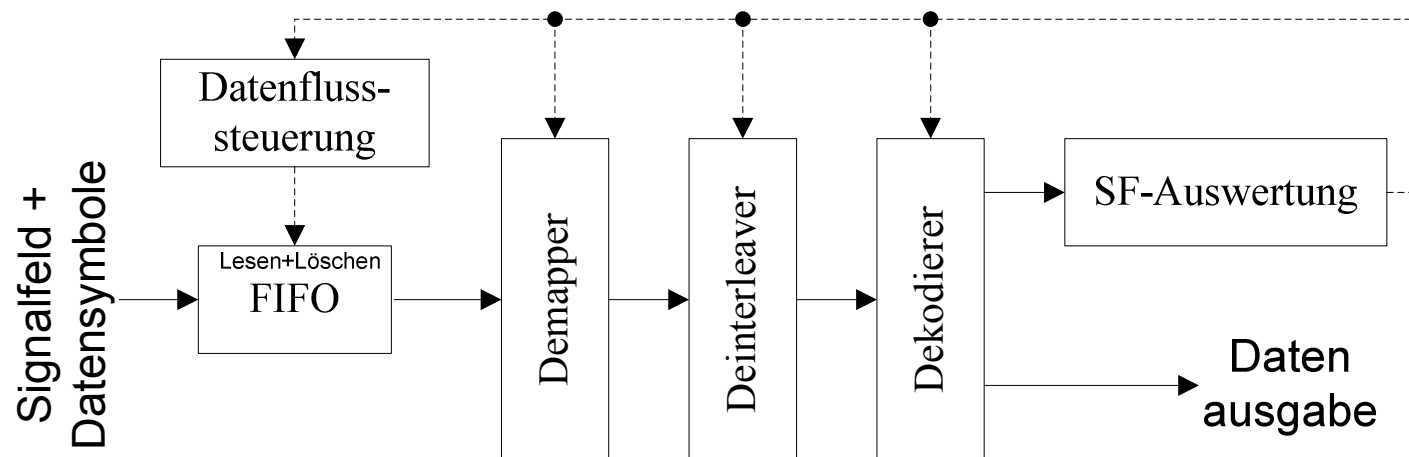
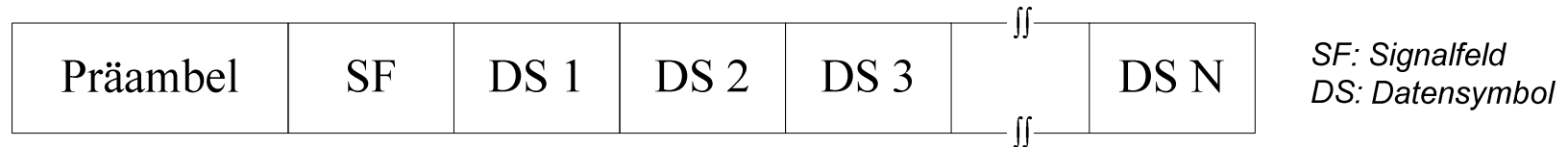
- Anpassung an Problemstellung
- Beachtung Implementierungsparameter

### **→ Verringerung durch optimierte Algorithmen**

### **→ Verbesserung durch geeignete Implementierung**

- Bit- statt Blockparallelität
- Neue Verfahren wie:
  - Implizites Interleaving
  - Spekulative Verarbeitung
- Erhöhung der Verarbeitungsleistung

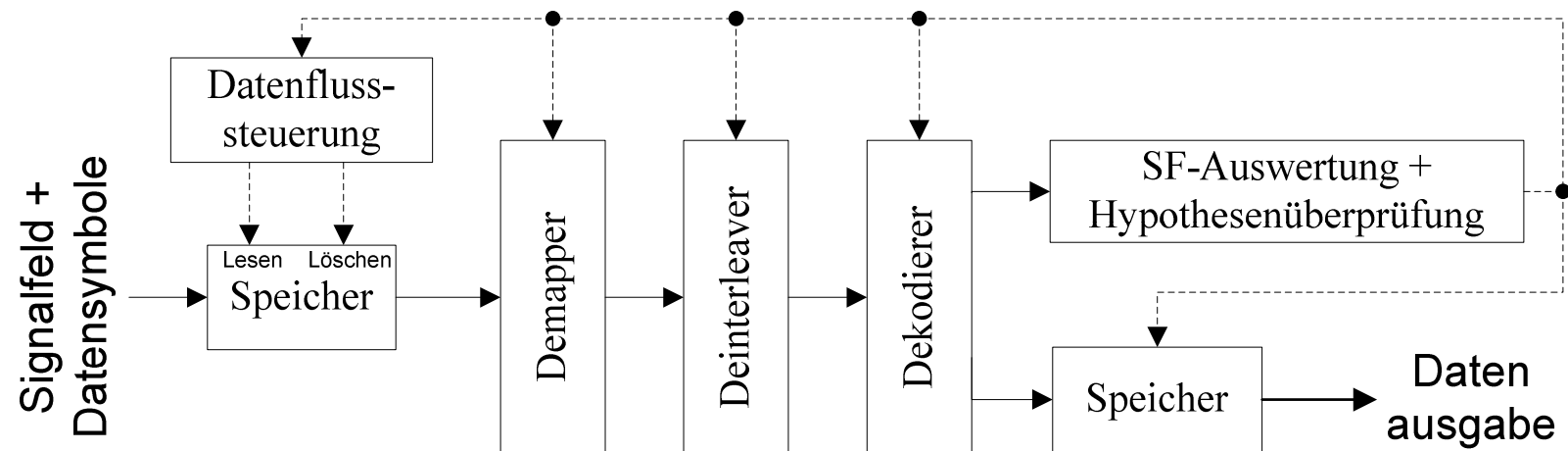
# Typische Basisbandverarbeitung



$$T_{Lnospec} = T_{SFproc} + T_{demap} + T_{deintlv} + T_{decode}$$



# Latenzverringierung durch spekulative Verarbeitung



$$T_{Lspec} = \begin{cases} T_{Lnospec} - T_{demap} - T_{deintlv} - T_{decode} & | \text{Spekulation erfolgreich} \\ T_{Lnospec} & | \text{Spekulation fehlgeschlagen} \end{cases}$$

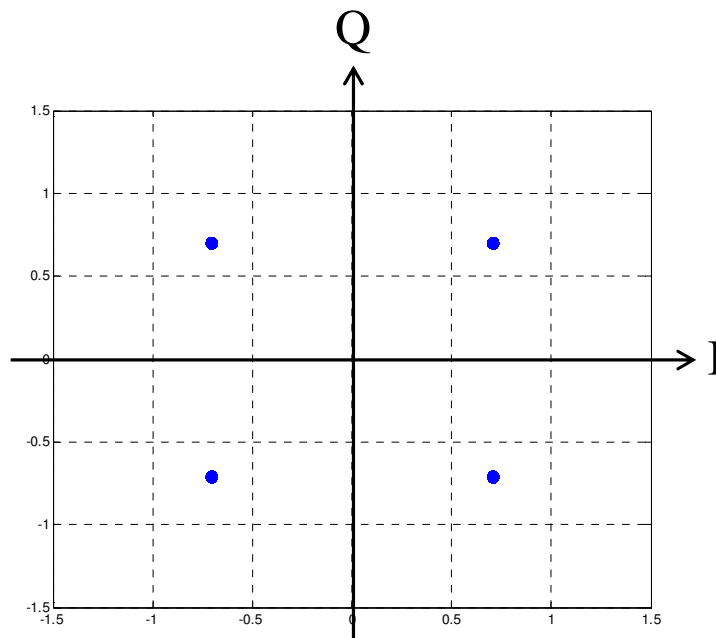
## VHR-E Update: Latenzanalyse

---

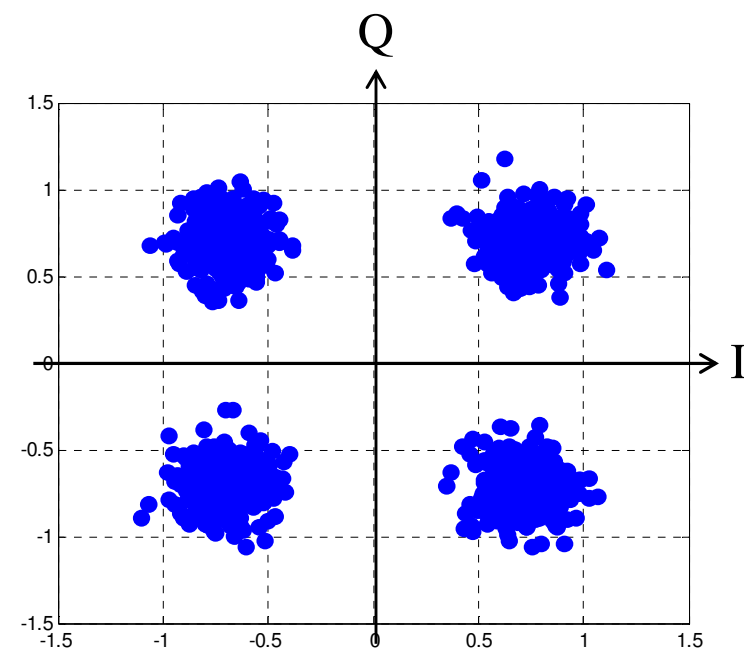
Empfängerlatenz (BPSK, RS, 4 Streams):	21,5 $\mu$ s	
Implizites Interleaving:	- 1,2 $\mu$ s (5,6 %)	
Spekulative Demodulation (erfolgreich):	- 1,7 $\mu$ s (8 %)	
Spekulative RS-Dekodierung (erfolgreich):	- 2,9 $\mu$ s (13,4 %)	
<b>Gesamt:</b>	<b>16,3 <math>\mu</math>s</b>	<b>- 5,2 <math>\mu</math>s (24,2 %)</b>

# Das Konstellationsdiagramm

→ Darstellung der Symbole eines digitalen Modulationsschemas (PSK, QAM) in der komplexen Ebene

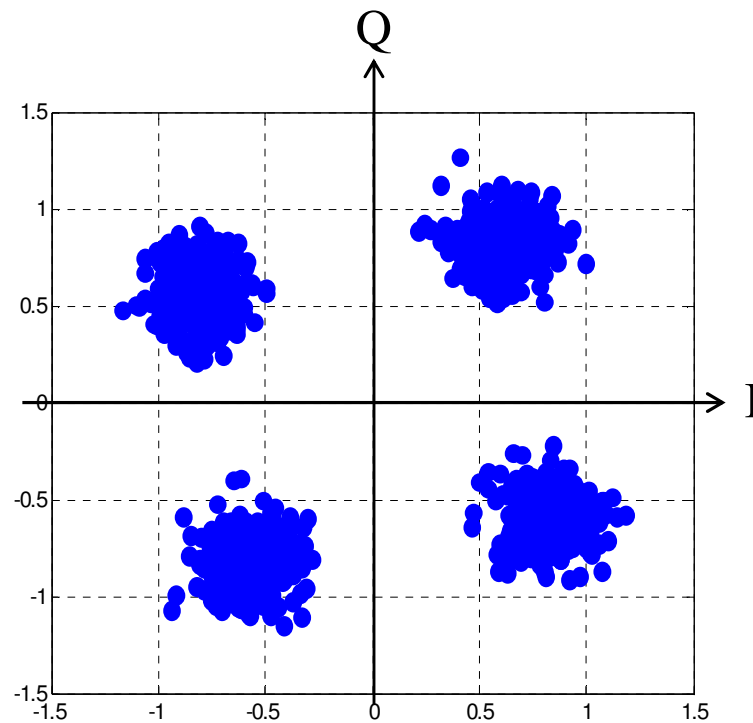


Ideale QPSK-Konstellation

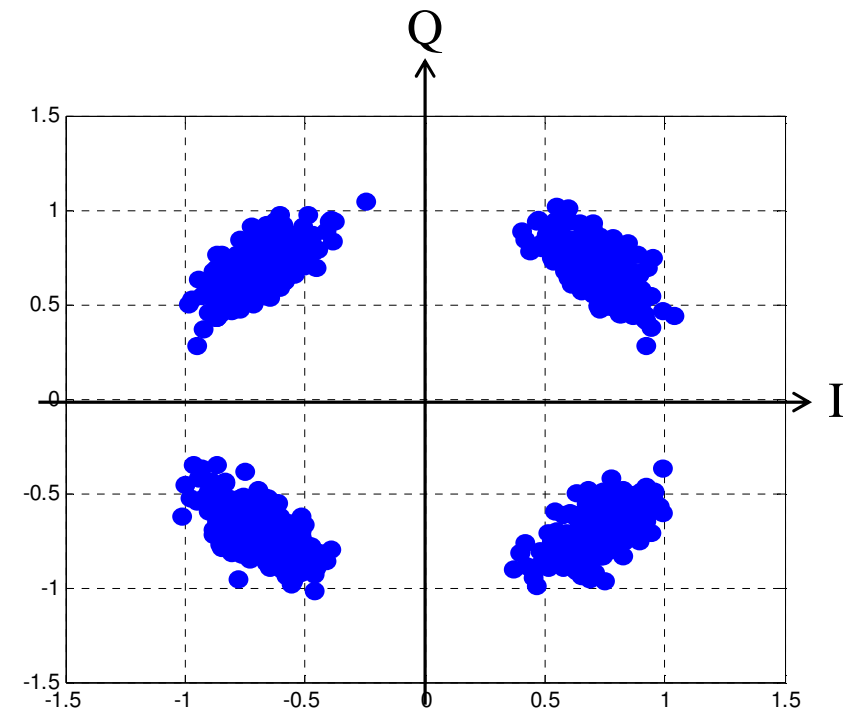


QPSK mit AWGN (15 db  $E_b/N_0$ )

## Phasenversatz und Phasenrauschen

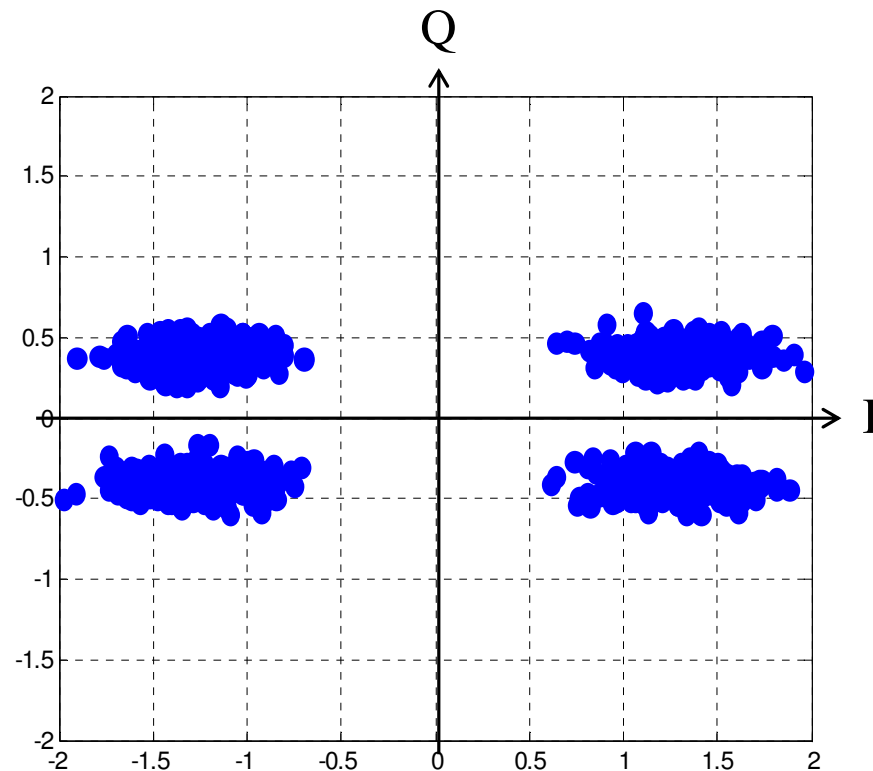


QPSK mit AWGN und  $10^\circ$   
Phasenversatz

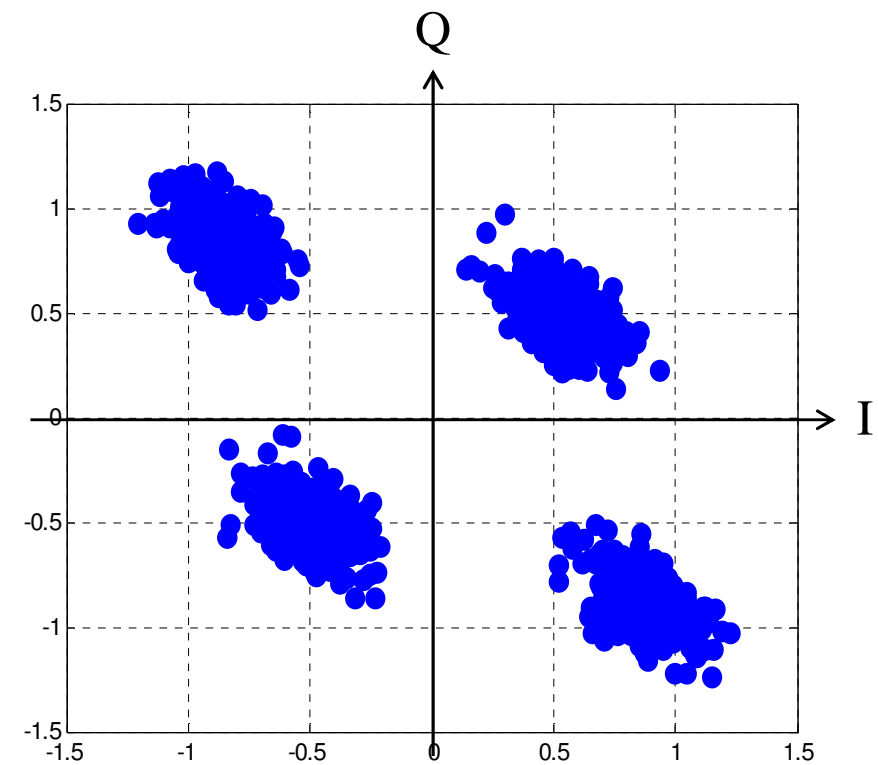


QPSK mit AWGN und  
Phasenrauschen

# IQ-Abweichungen

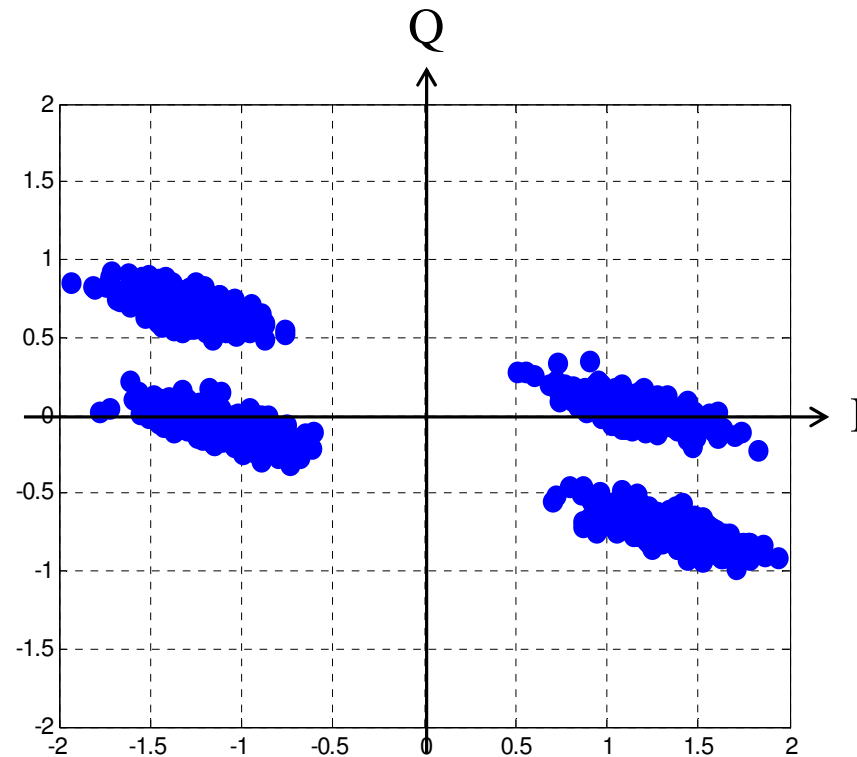


QPSK mit AWGN und 10 dB IQ-Amplitudenabweichung



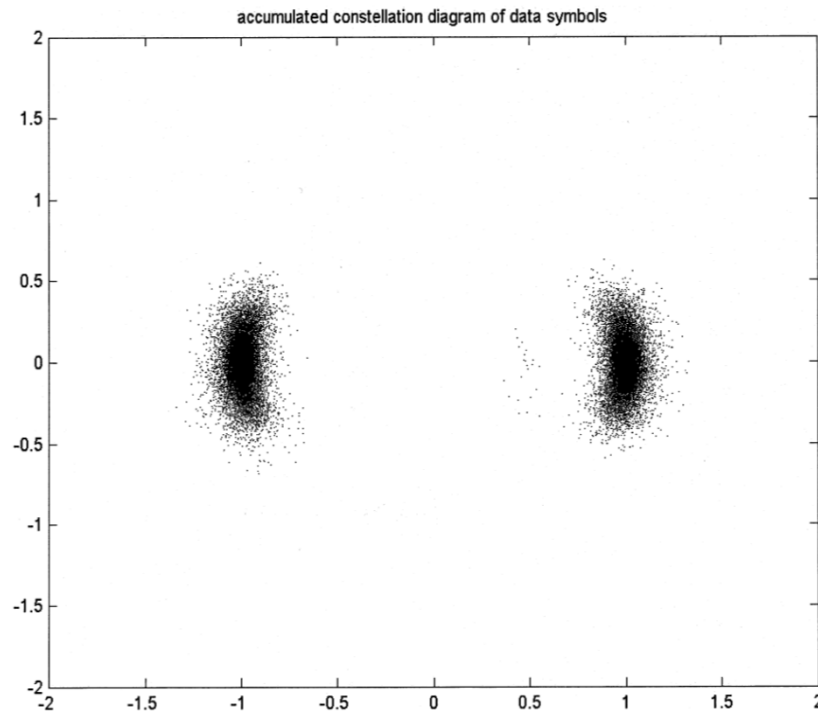
QPSK mit AWGN und 30° IQ-Phasenabweichung

## IQ-Abweichungen kombiniert

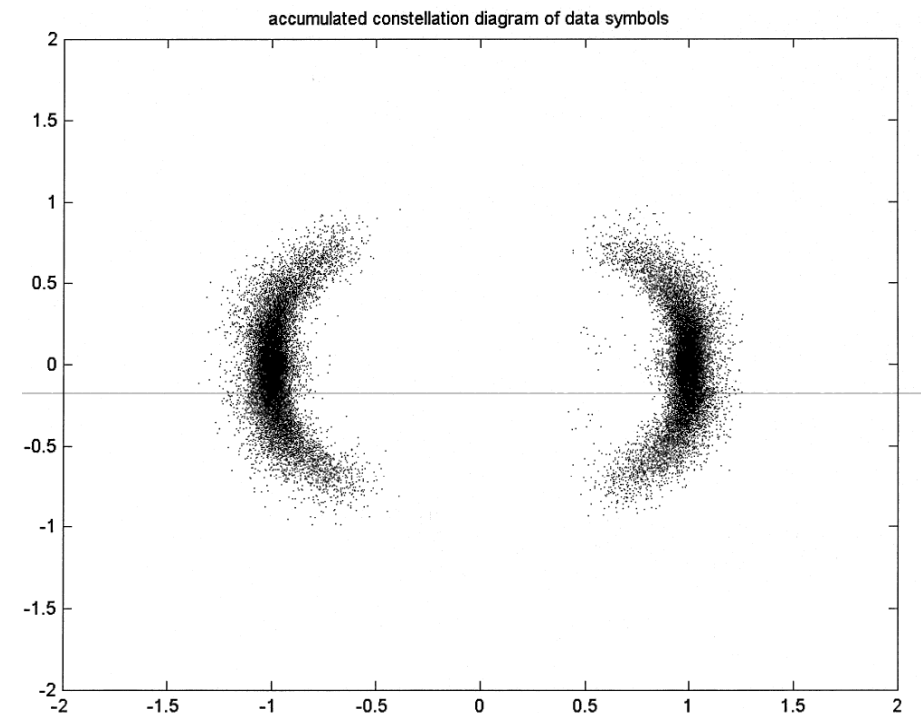


QPSK mit AWGN,  
10 dB IQ-Amplitudenabweichung,  
30° IQ-Phasenabweichung

## Phasenoffset im VHR-E-System

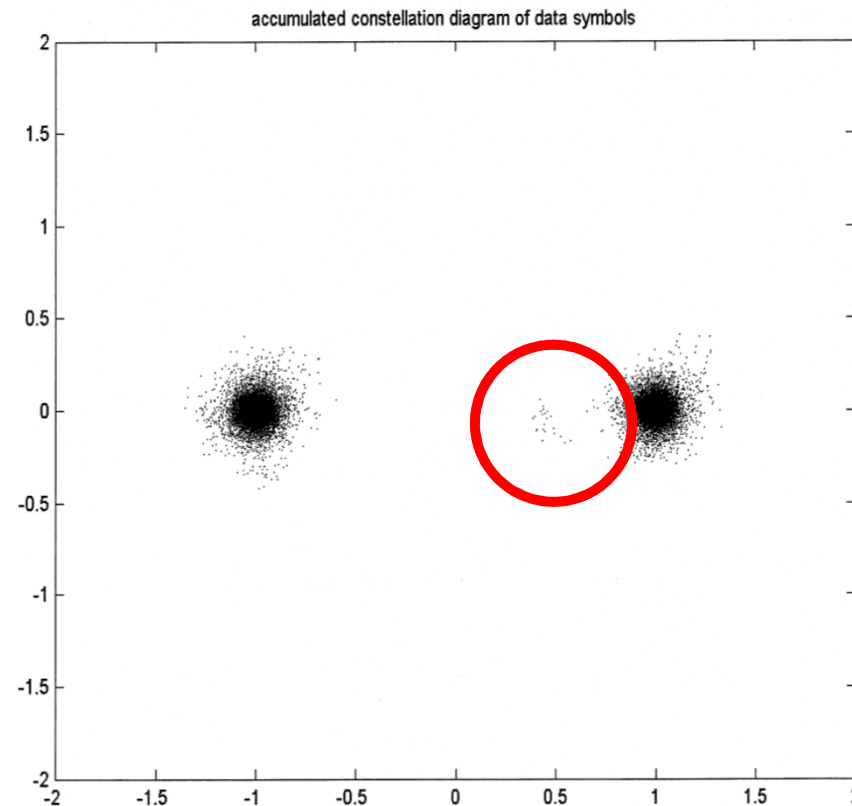


BPSK in 60 GHz-OFDM-  
Demonstrator



dito, mit Verlängerung des I-Pfades

## Die ominöse Wolke

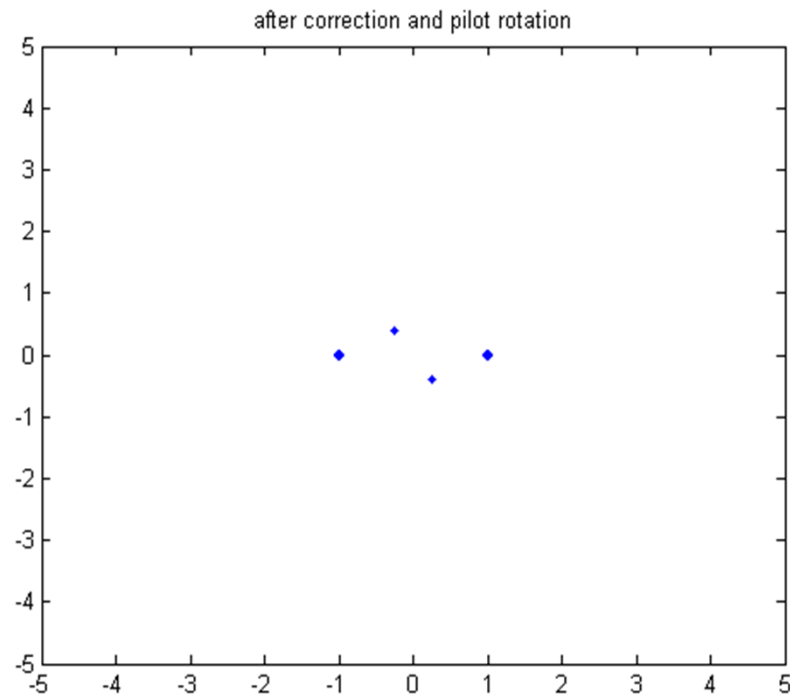


BPSK in 60 GHz-OFDM-  
Demonstrator, diesmal mit  
verlängertem Q-Pfad

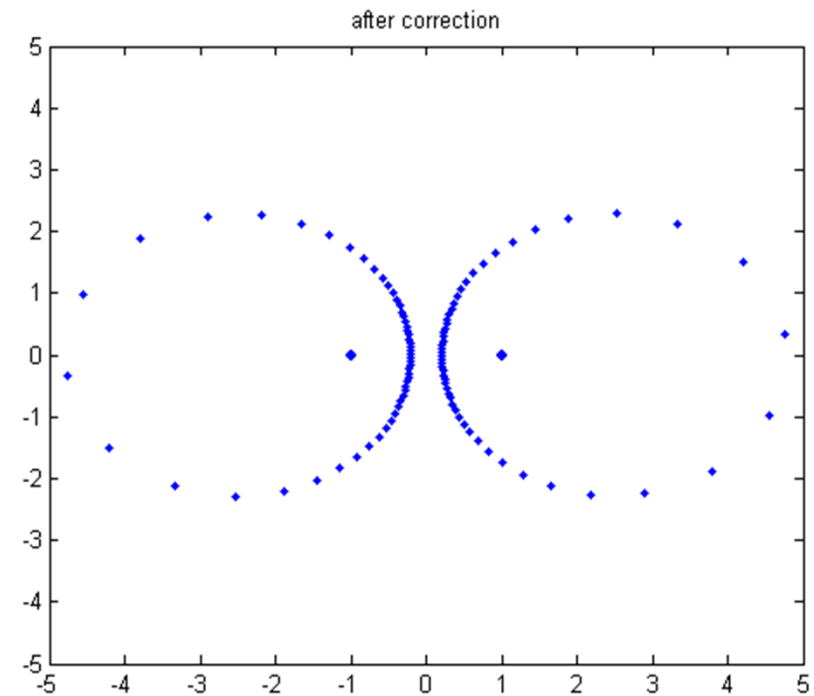


# OFDM mit schmalbandiger Sinusstörung

Störquelle: 100 MHz Sinussignal

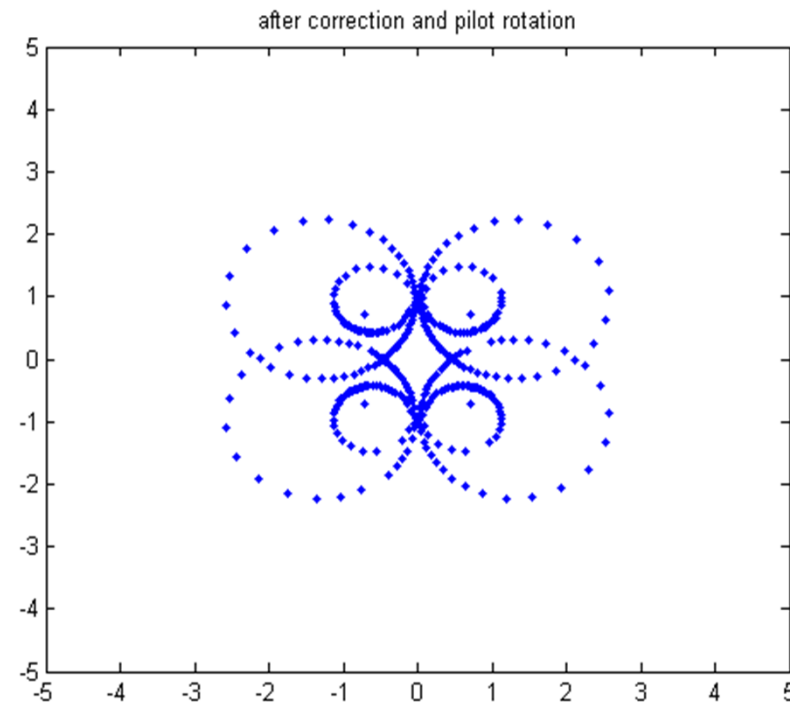


BPSK in 60 GHz-OFDM-  
Demonstratormodell, 1 Frame



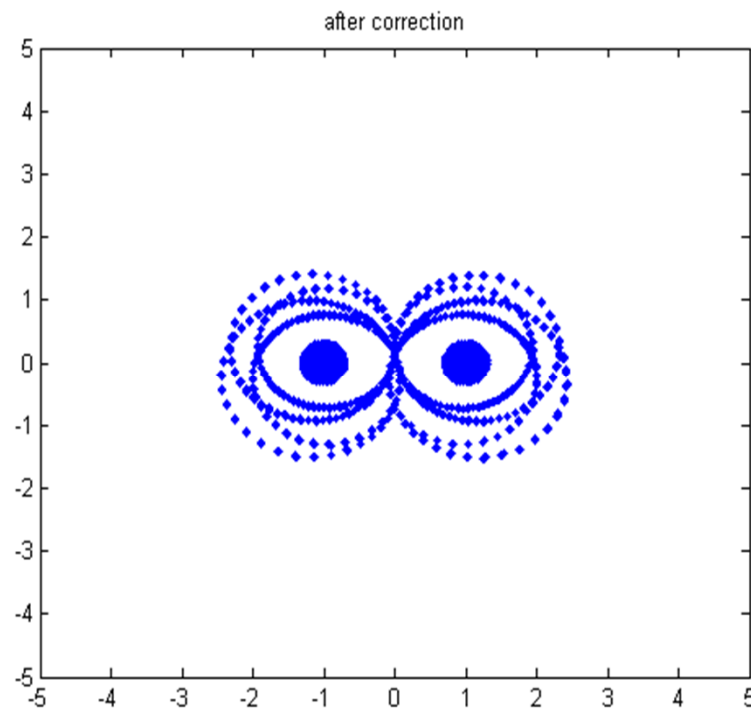
50 Frames mit  $n/25 \cdot \pi$  Phasenversatz

## OFDM mit schmalbandiger Sinusstörung

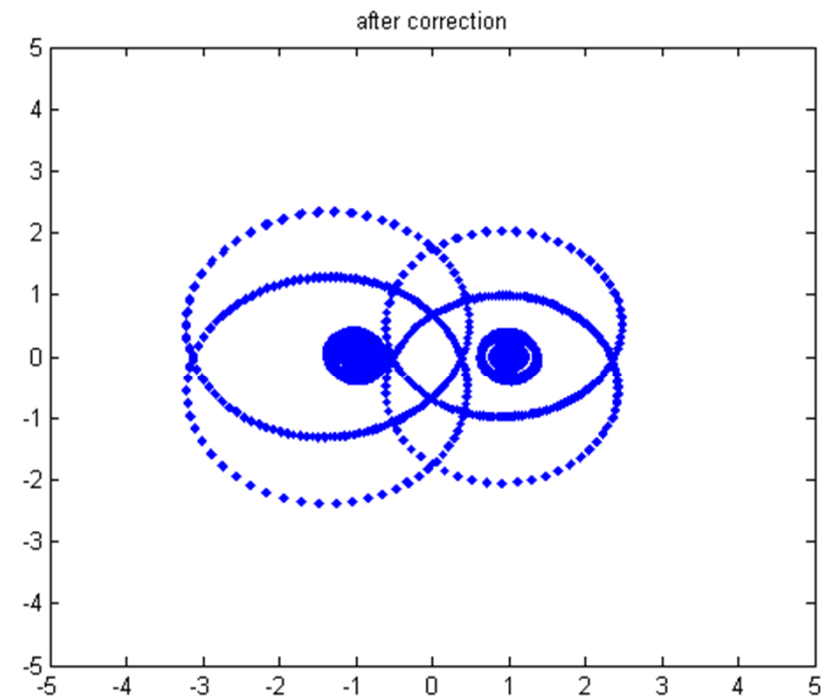


QPSK, 100 MHz Sinusstörung

## OFDM mit schmalbandiger Sinusstörung



BPSK, 105 MHz Störung in I,  
95 MHz in Q



20 MHz Störsignal

## OFDM - Expressionismus

