



Institut für Mikroelektronische Systeme



Leibniz
Universität
Hannover

Effiziente Hardware-Architekturen für Interference Alignment in drahtlosen Kommunikationssystemen

Markus Kock, Holger Blume



15. ITG-Fachtagung für Elektronische Medien, 26.-27. Februar 2013, Dortmund

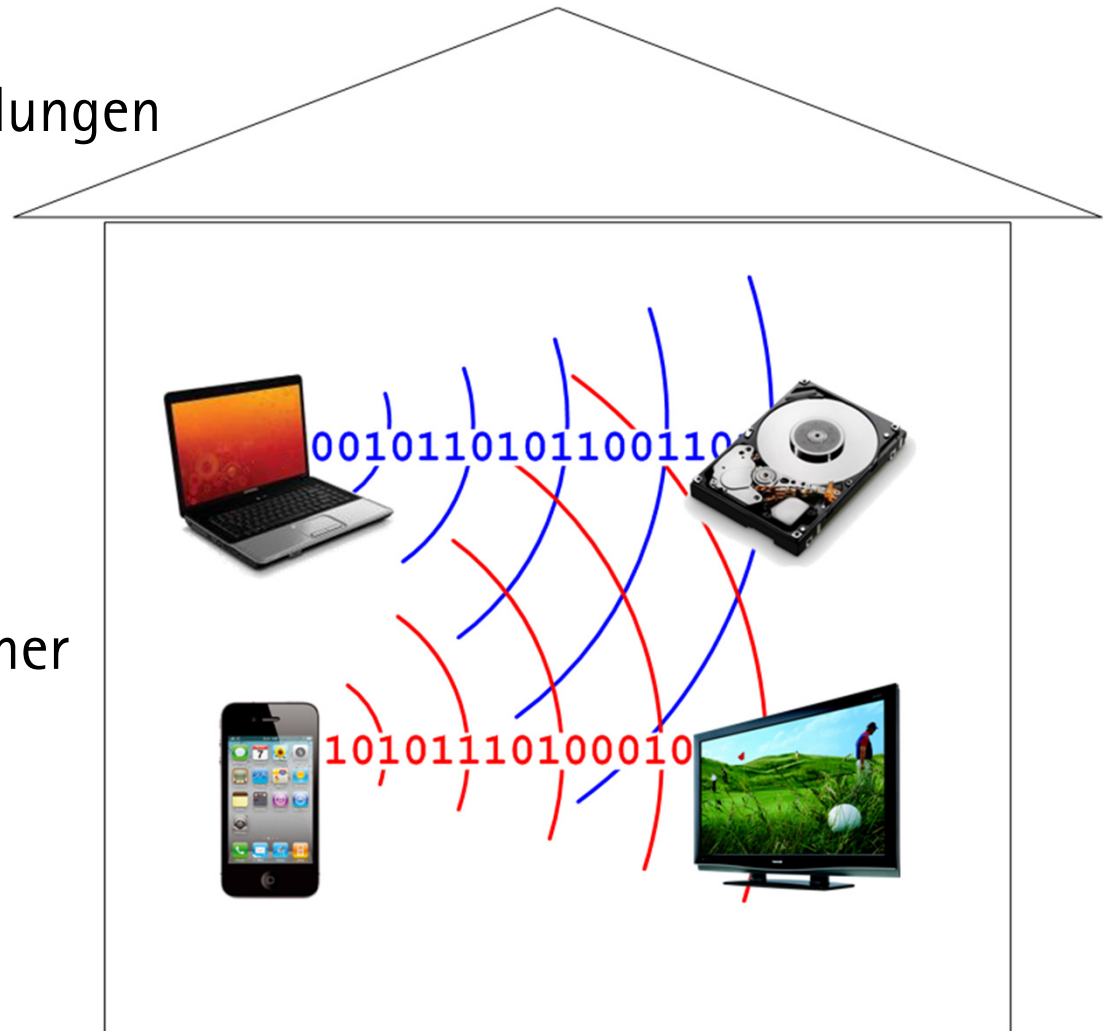


Gliederung

- Interference Alignment (IA)
 - Nutzen
 - Relation zum Raummultiplex (MIMO)
 - Grundprinzip
- Hardware-Beschleuniger für IA-Algorithmen
 - Rechenkomplexität
- Designumgebung

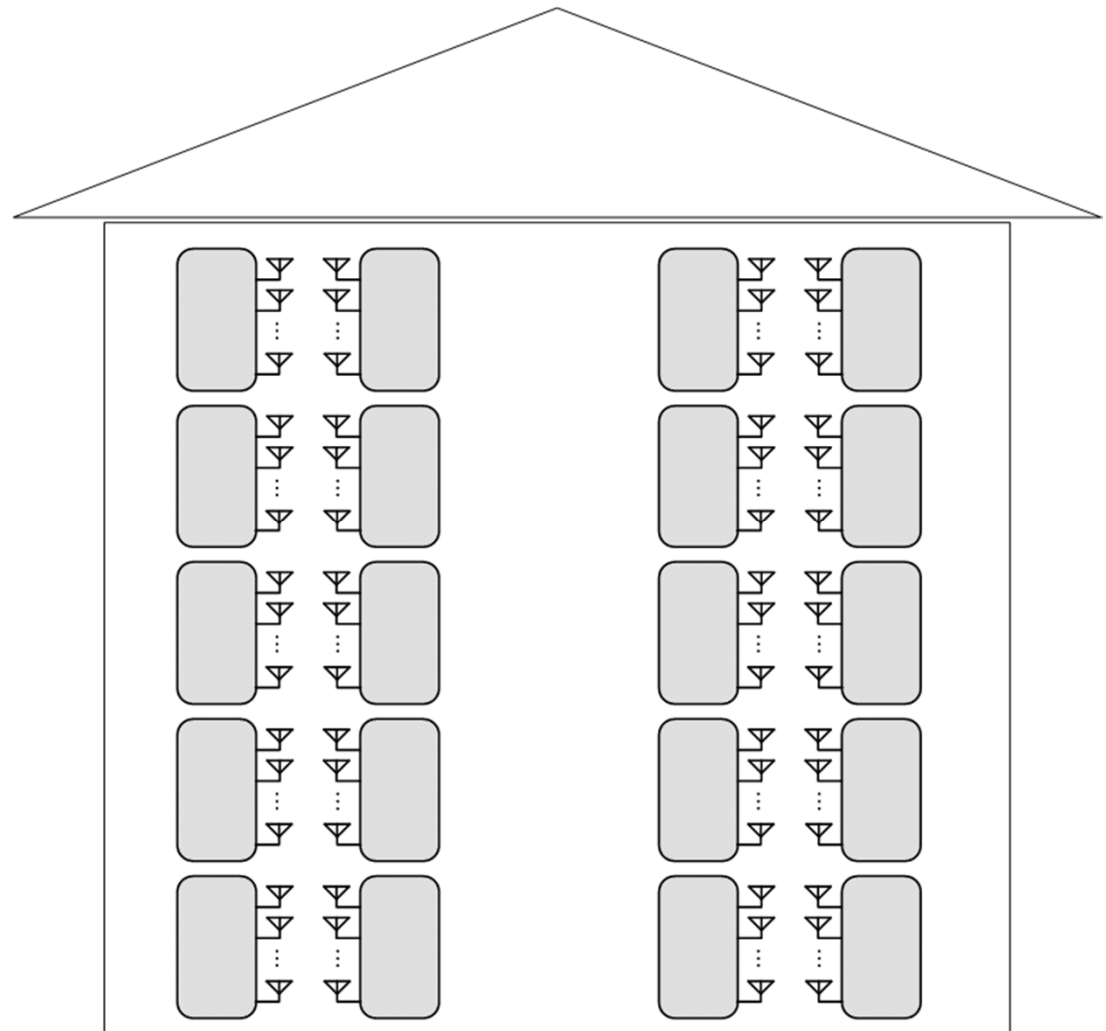
Kommunikationsszenario

- Punkt-zu-Punkt Verbindungen
- Viele Benutzer
- Hohe Datenrate
 - Video-Streaming (unkomprimiert)
 - Vernetzung / WLAN
 - Externe Massenspeicher
 - ...
- Koexistierende Anwendungen

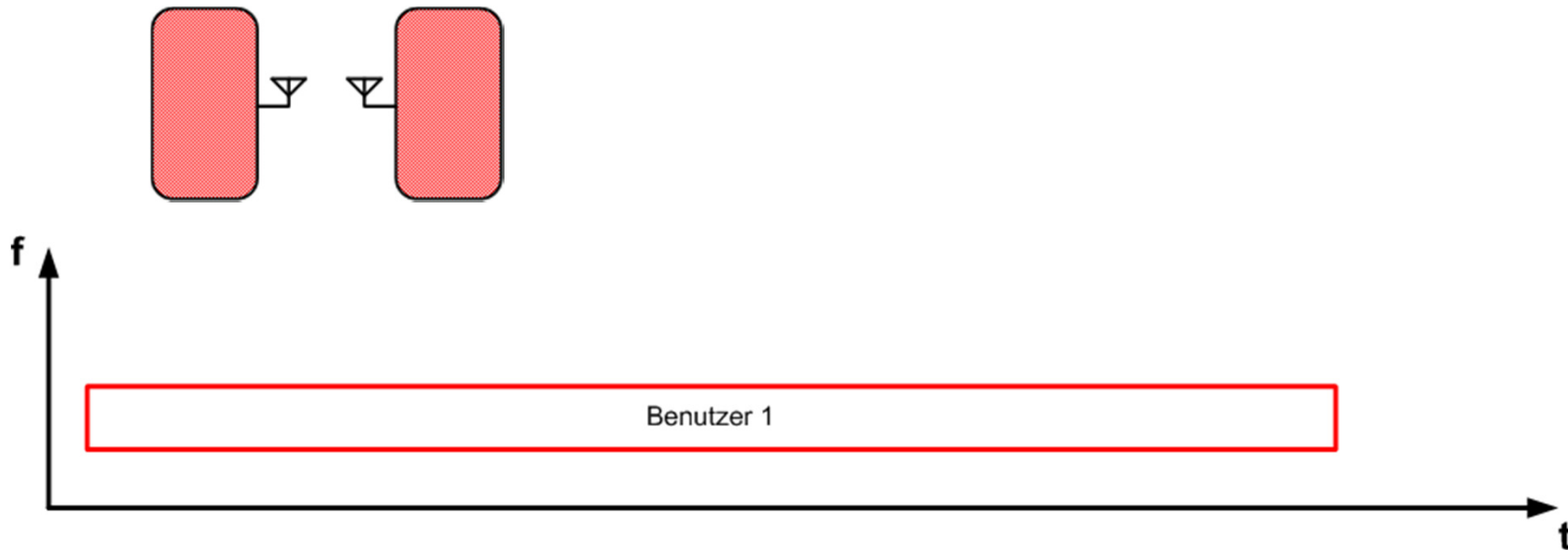


Herausforderung: wachsende Benutzerzahl

- Gemeinsam genutztes Medium
- Kanalkapazität skaliert nicht mit der Anzahl Benutzer!

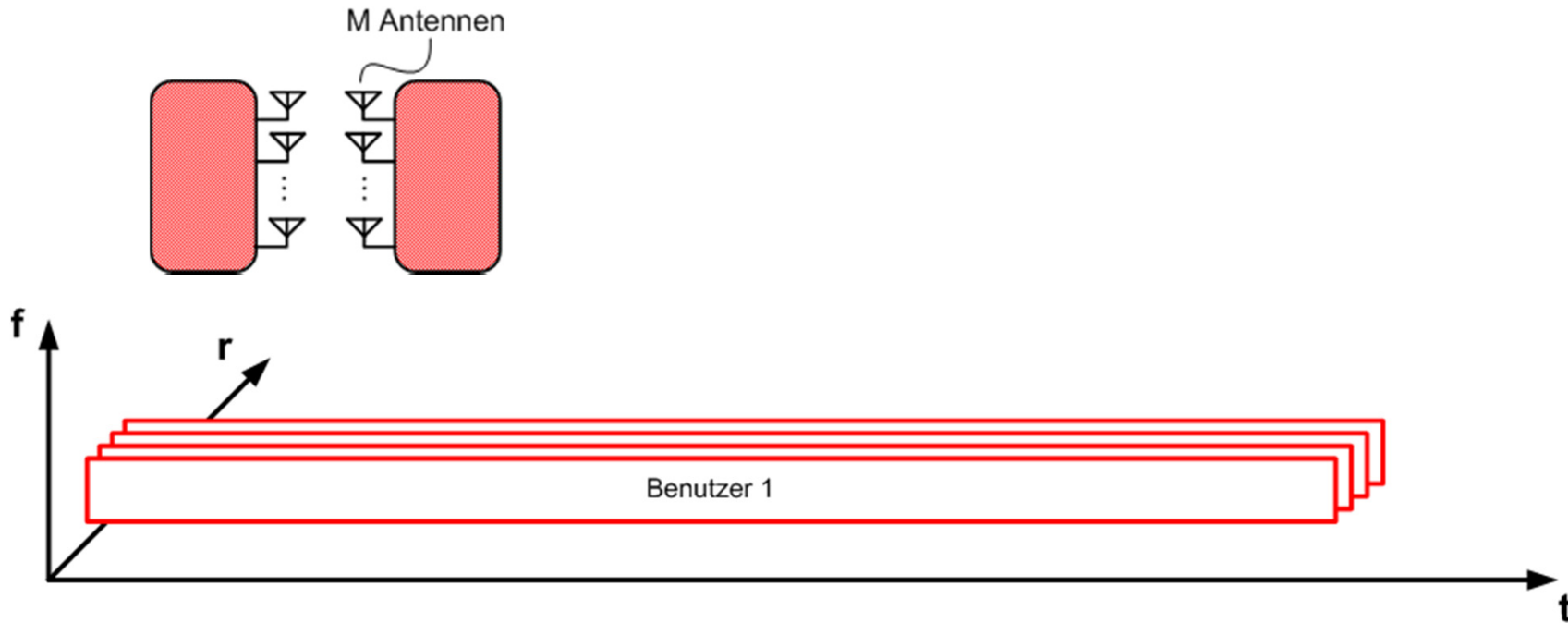


Von SISO zu Mehrbenutzer-MIMO



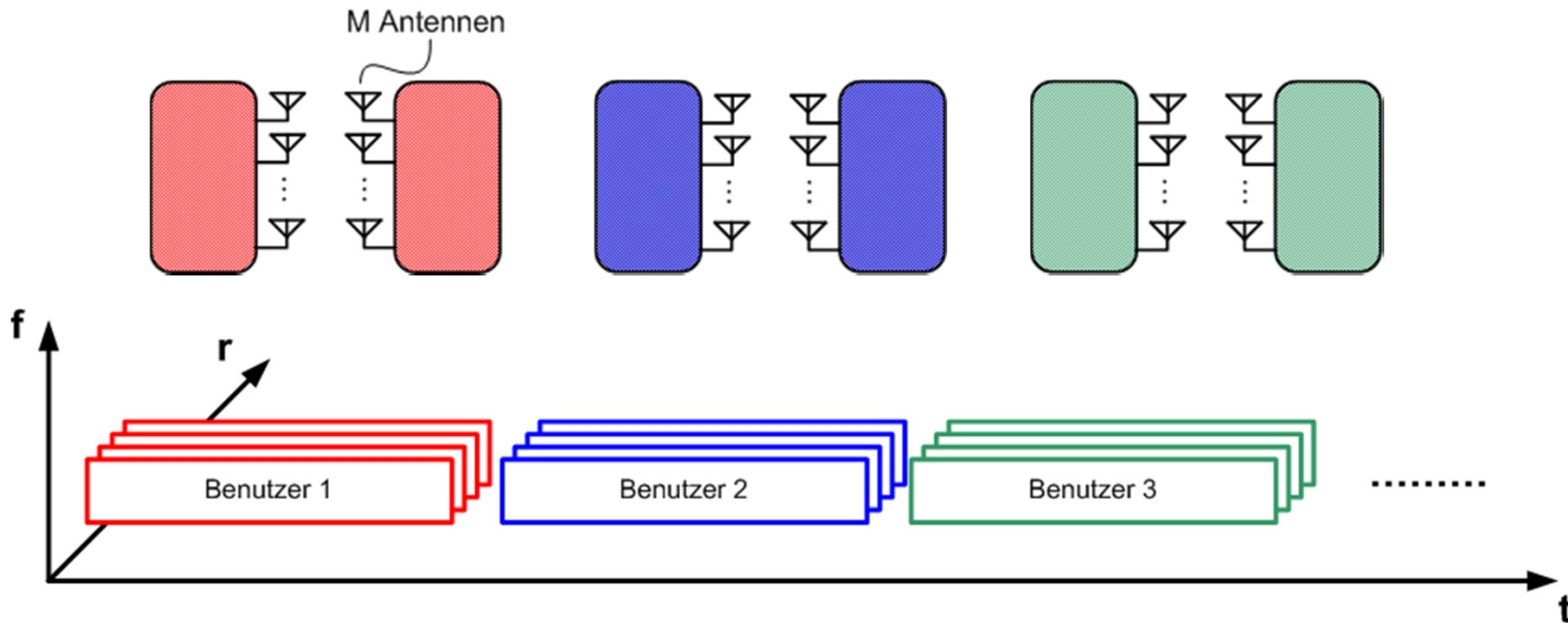
- SISO: ein Sender belegt Spektrum exklusiv

Gewinn durch MIMO Raummultiplex



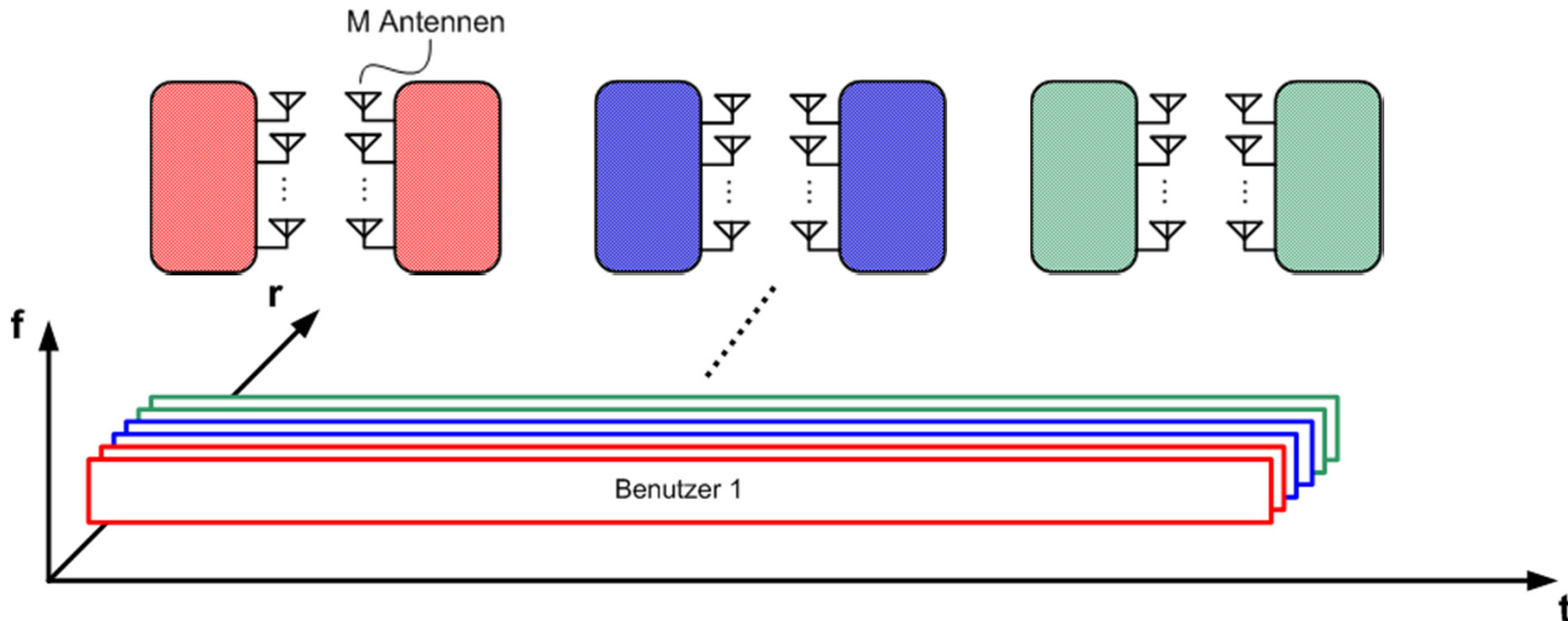
- SISO: ein Sender belegt Spektrum exklusiv
- MIMO Raummultiplex: mehrere Antennen, parallele Kanäle

Geteilte Kanalkapazität



- SISO: ein Sender belegt Spektrum exklusiv
- MIMO Raummultiplex: mehrere Antennen, parallele Kanäle
- TDMA Mehrbenutzer MIMO: geteilte Spektrumnutzung

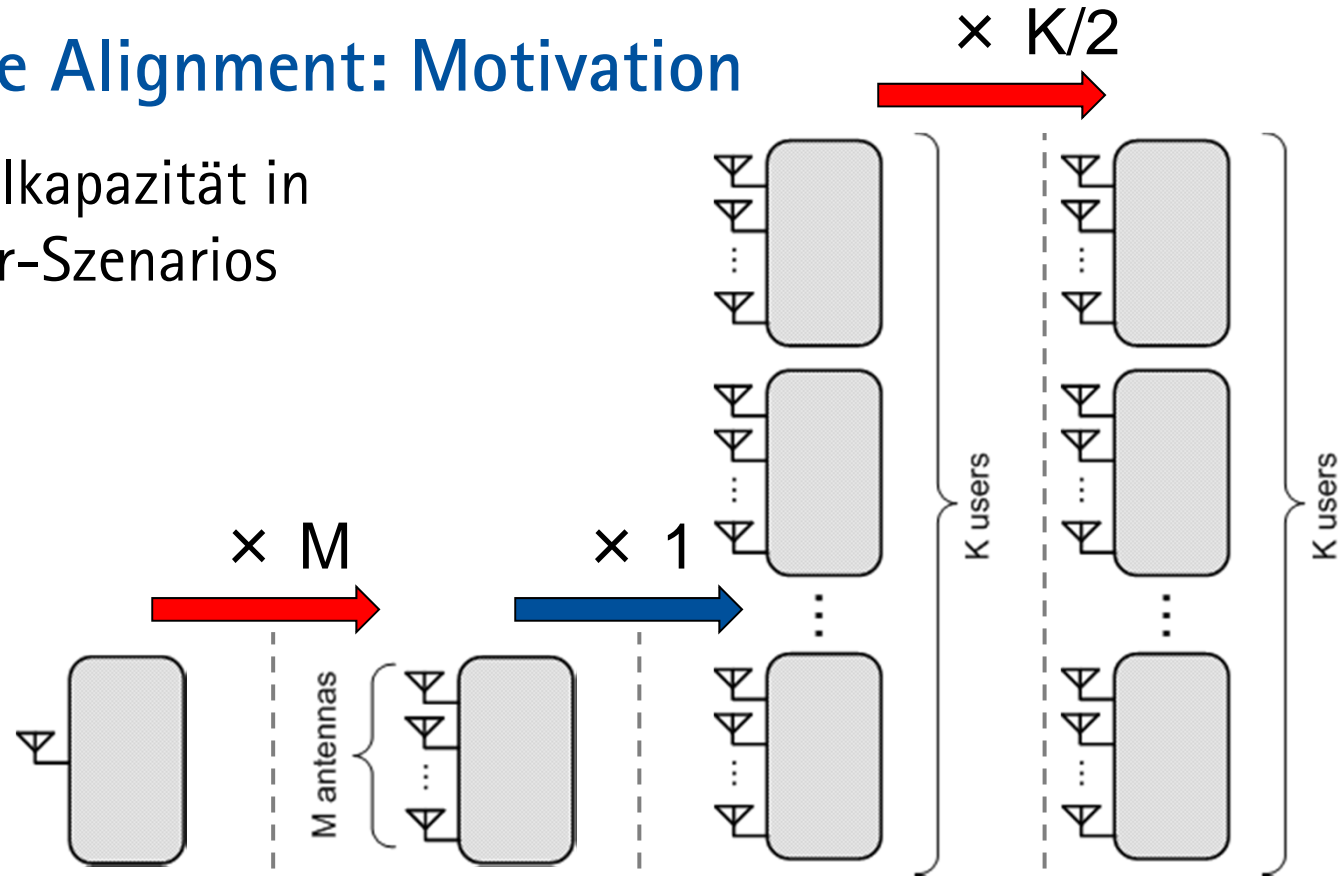
Interference Alignment: Mehrbenutzer-Raummultiplex



- SISO: ein Sender belegt Spektrum exklusiv
- MIMO Raummultiplex: mehrere Antennen, parallele Kanäle
- TDMA Mehrbenutzer MIMO: geteilte Spektrumnutzung
- Interference Alignment: verbesserte Ausnutzung Raummultiplex

Interference Alignment: Motivation

Summenkanalkapazität in Mehrbenutzer-Szenarios

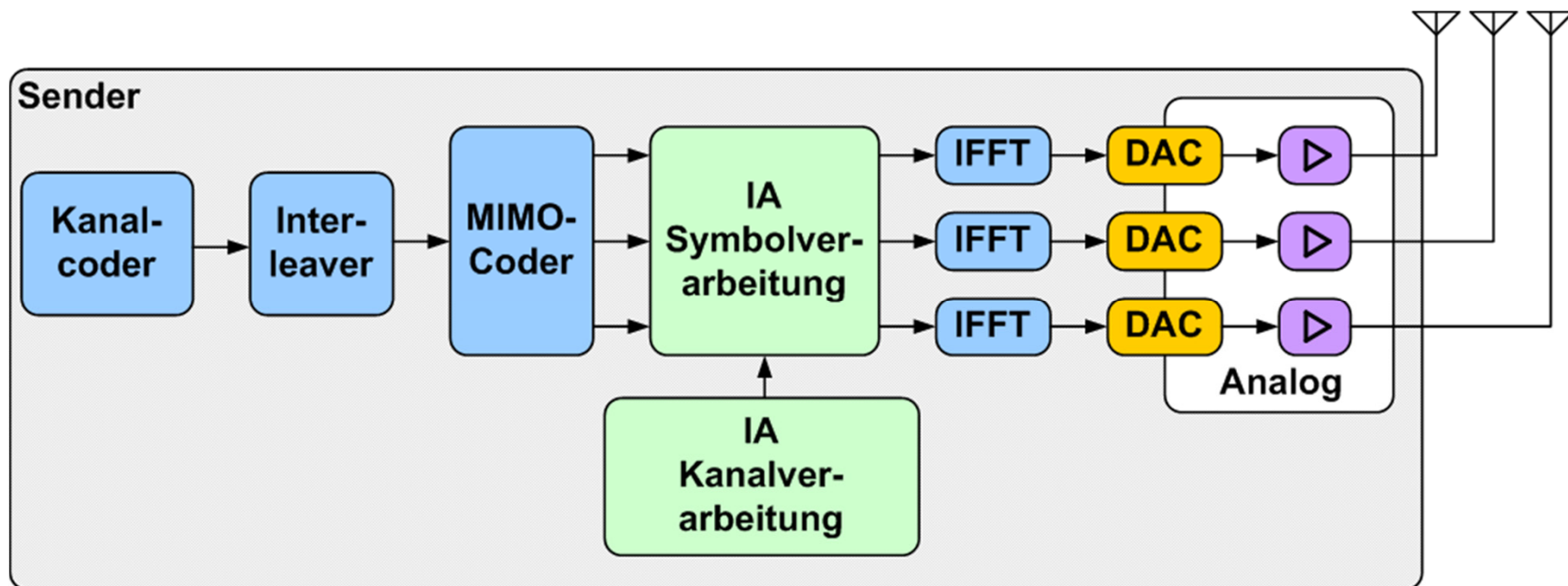


System	SISO	MIMO	MU-MIMO, TDMA	MU-MIMO, IA
Σc	C_0	$M \cdot C_0$	$M \cdot C_0$	$K/2 \cdot M \cdot C_0$
C per user	C_0	$M \cdot C_0$	$1/K \cdot M \cdot C_0$	$1/2 \cdot M \cdot C_0$

B. Nazer, M. Gastpar, S. A. Jafar and S. Vishwanath, "Interference Alignment at Finite SNR: General Message Sets", 2009

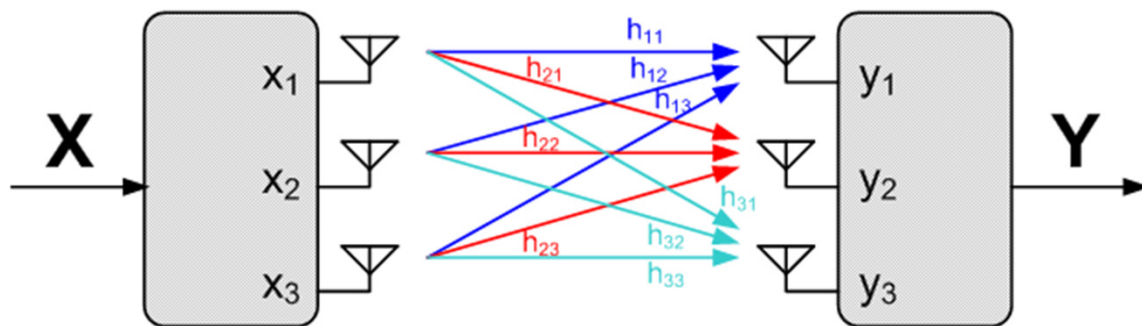
Blockschaltbild MIMO-OFDM System

- IA arbeitet außerhalb des OFDM-Modems
 - auf einem diskreten, linearen Kanal



MIMO Raummultiplex

Lineare Überlagerung am Empfänger



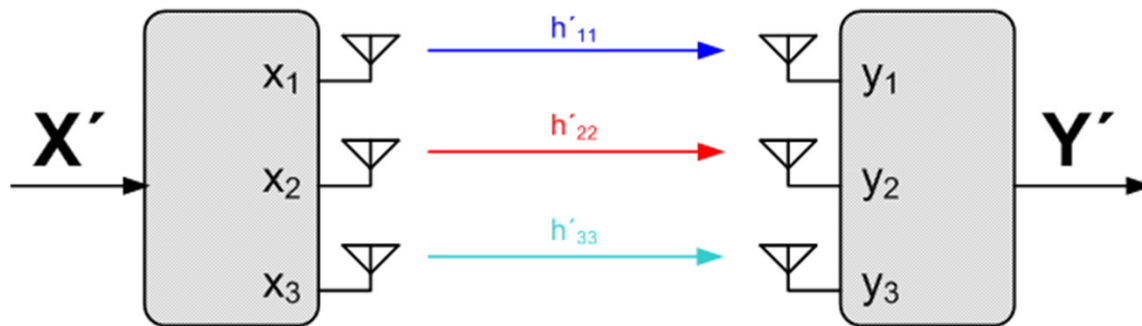
$$y_1 = h_{11}x_1 + h_{12}x_2 + h_{13}x_3$$

$$y_2 = h_{21}x_1 + h_{22}x_2 + h_{23}x_3$$

$$y_3 = h_{31}x_1 + h_{32}x_2 + h_{33}x_3$$

$$\mathbf{Y} = \mathbf{H}\mathbf{X}$$

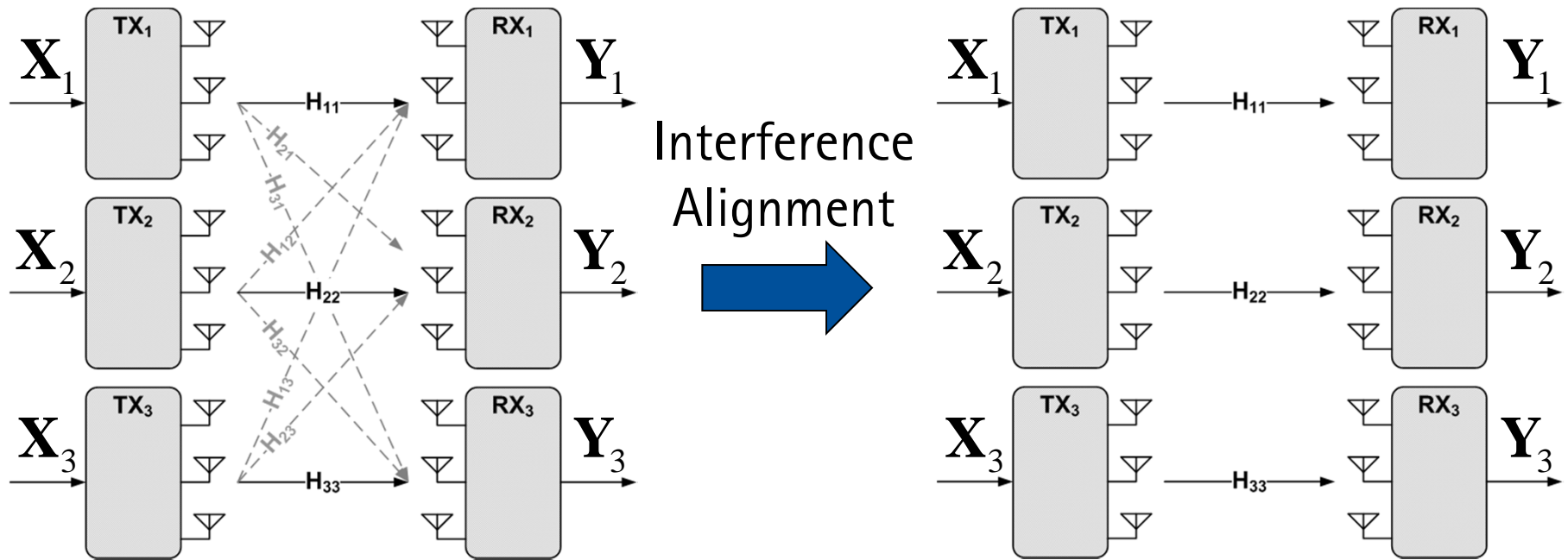
Raummultiplex: unabhängige parallele Kanäle



$$\sum C = M \cdot C_0$$

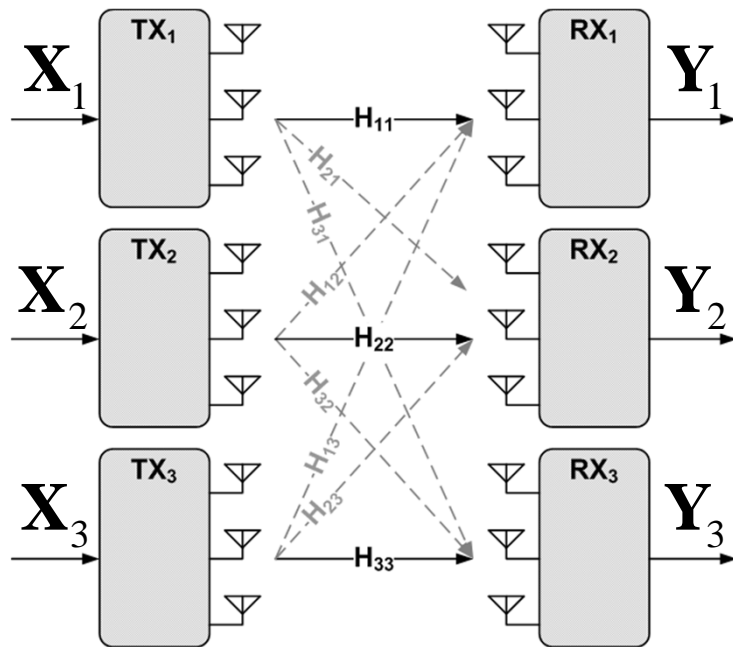
➔ Kanalkapazität skaliert mit der Anzahl Antennen M

Multi-User MIMO System: Ziel



→ Kanalkapazität skaliert mit der Anzahl Benutzer K

Modell MIMO-System

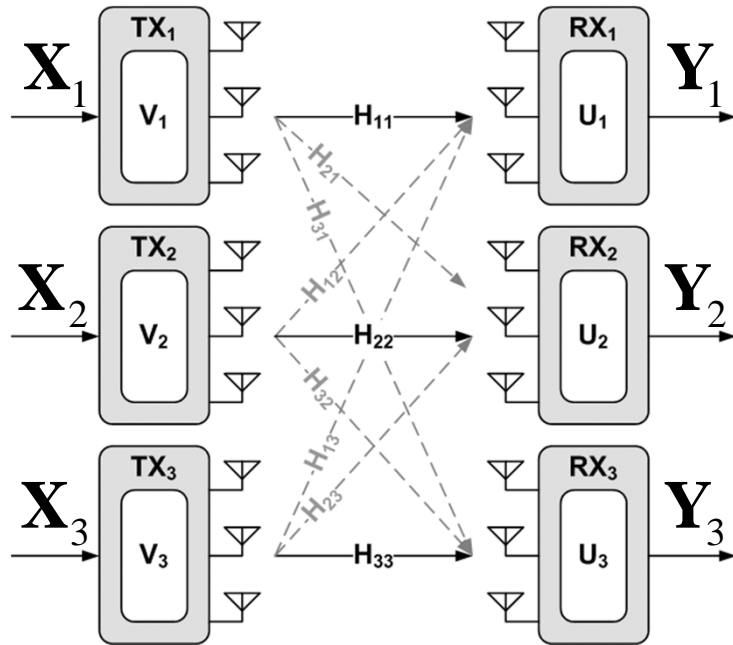


- Lineare Überlagerung am Empfänger
 → System M linearer Gleichungen in M·K Unbekannten

$$\mathbf{Y}_i = \sum_{j=1}^K \mathbf{H}_{ij} \mathbf{X}_j$$

- **Problem:** zu wenige Beobachtungen bzw. Gleichungen
 → unterbestimmtes System
 → TDMA-Ansatz: $\sum C = M \cdot C_0$
- **IA-Ansatz:** Gleichungssystem nach einer Untermenge der Unbekannten lösbar machen

Interference Alignment Ansatz



$$\sum C = M \cdot C_0 \cdot \frac{K}{2}$$

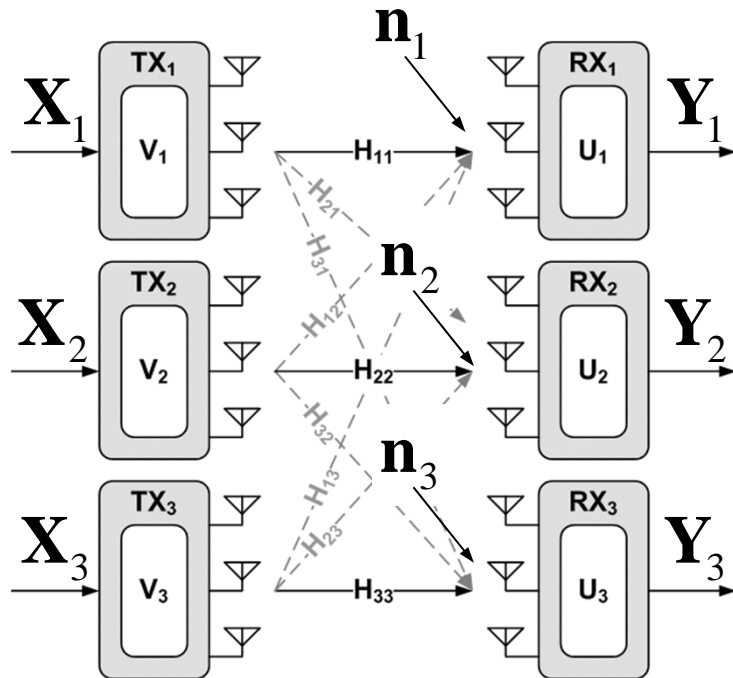
➡ Rauschen?

- Lineare Vorverzerrungs- und Decodermatrizen \mathbf{V}_i und \mathbf{U}_i
- Hinreichende Bedingung für perfektes IA:

$$\hat{\mathbf{H}}_{ij} = \mathbf{U}_i^T \mathbf{H}_{ij} \mathbf{V}_j = \begin{cases} 0 & \forall i \neq j \\ I & \text{else} \end{cases}$$

- Nach \mathbf{V}_j und \mathbf{U}_i lösen

Interference Alignment mit Rauschen



- Additives Rauschen am Empfänger:

$$\mathbf{Y}_i = \mathbf{U}_i^T \left(\sum_{j=1}^K \mathbf{H}_{ij} \mathbf{V}_j \mathbf{X}_j + \mathbf{n}_i \right)$$

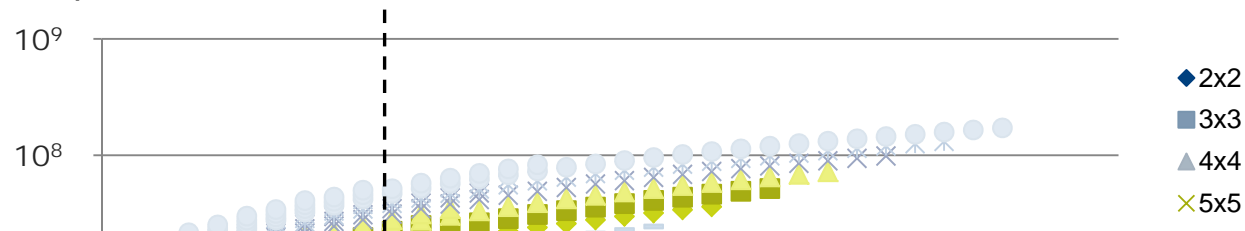
- → Perfektes IA ist nicht mehr die optimale Lösung
- MMSE-Kriterium:
Interferenz+Rauschen minimieren

➔ Für gegebenen Kanal \mathbf{H} numerisch nach \mathbf{V}_j and \mathbf{U}_i auflösen

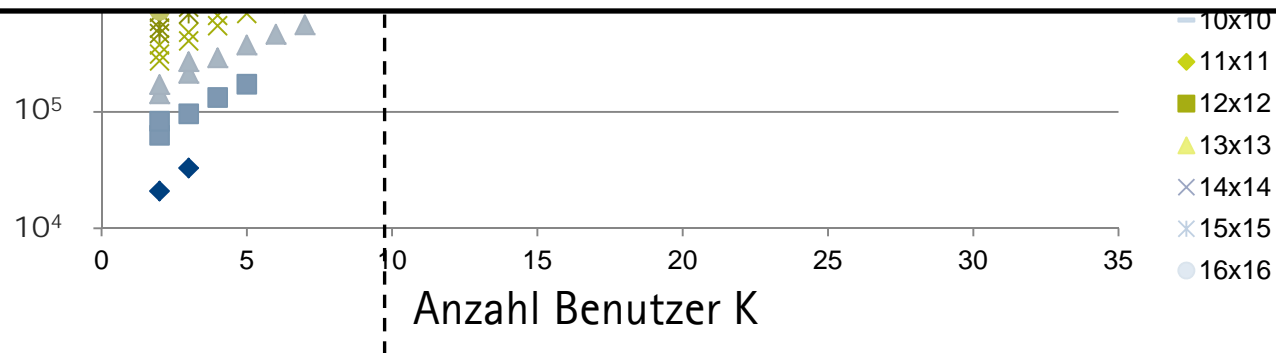
- Spezialfälle : geschlossene Lösungen bekannt
- Allgemein : iterative Ansätze

Analyse Rechenkomplexität Iteratives MMSE IA

Operationen pro Subträger



➔ Effiziente Hardwareplattformen für mobile Anwendungen benötigt



IA Kanalverarbeitung: zentraler Rechenknoten im System

Beispiel: 128 Subträger OFDM-System, 1ms Latenz ➔ 10^{12} Ops/sec

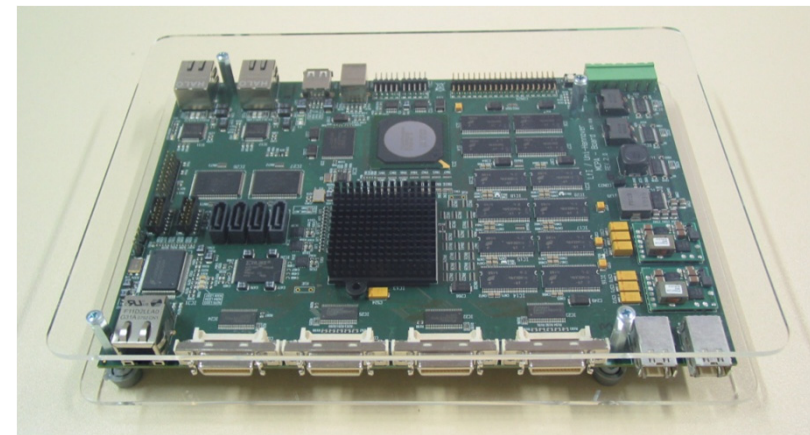
Fallstudie: 3-Benutzer 3x3 MIMO mit Antennen-Selektion

- Perfektes IA
- Die 2 besten aus 3 Antennen
- V, U für jede mögliche Antennenkombination berechnen
- Festverdrahteter Beschleuniger
- Beispielsystem:
 - 128 Subträger OFDM
 - max. 1 ms Latenz

➔ Rechenleistung: 2.8 GOPS

OP	□□□	□□□	□□□	□□□□	□□□□□□
Anzahl	506	249	34	6	1

Operationen je Satz Matrizen V, U



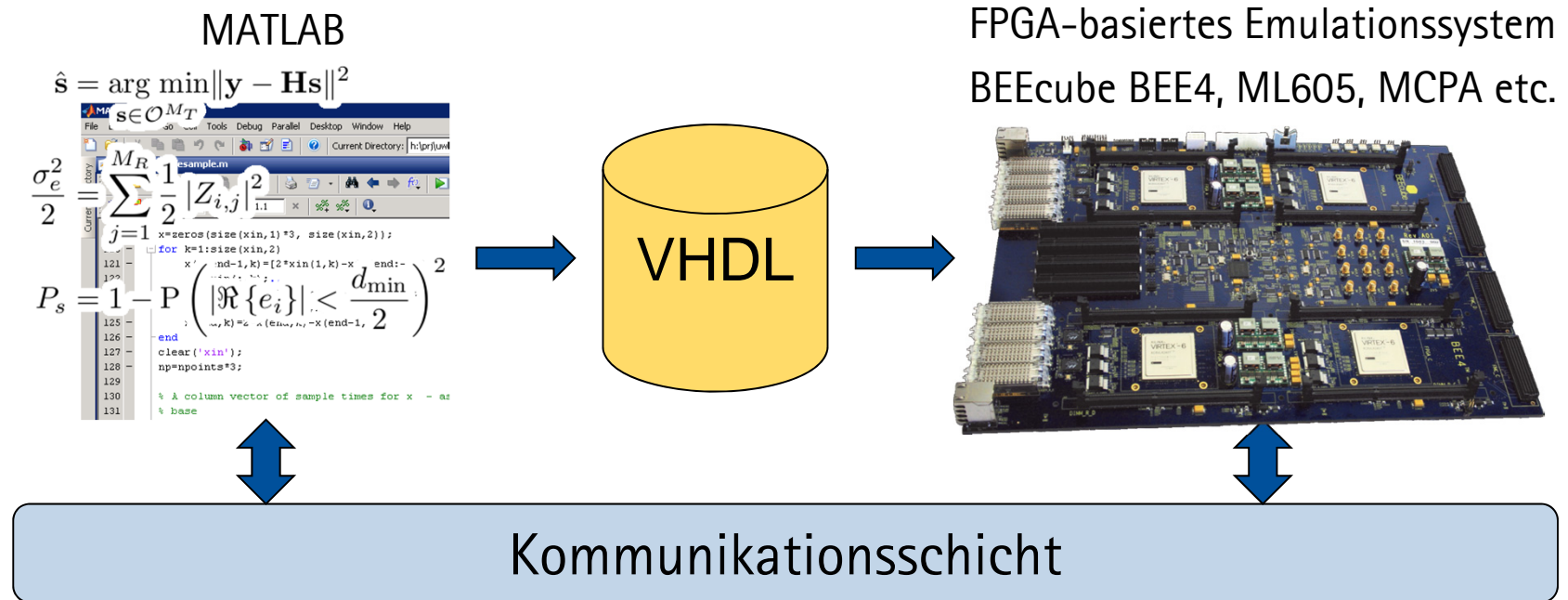
MCPA Emulator
Virtex-5 LX220T FPGA, 2x256 MB DDR1 RAM

Matlab Xeon 2.4 GHz CPU	3.63 s
MCPA Emulator Board @ 100 MHz	380 μs

Laufzeitvergleich

Emulationsbasierter Designflow

- Erstellung hoch optimierter Hardwaremodule
- Hybride Hardware-in-the-loop Simulation und Verifikation
- ASIC-ähnliche Architektur



Zusammenfassung und Ausblick

- Interference Alignment
 - Basistechnologie zur Erhöhung der Kanalkapazität
 - Multi-User Szenarien
 - Rechenkomplexität
- Hardware-Implementierungsaspekte
 - Dedizierter 3x3 MIMO IA-Beschleuniger
- Emulationsbasierter Hardwareentwurf

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Markus Kock
kock@ims.uni-hannover.de