



## Doctoral Thesis

# **MIMO-OFDM-testbed: challenges, implementations, and measurement results** **challenges, implementations, and measurement results**

**Author(s):**

Wenk, Markus

**Publication Date:**

2010

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-006278893> →

**Rights / License:**

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Diss. ETH No. 19131

# MIMO-OFDM Testbed: Challenges, Implementations, and Measurement Results

A dissertation submitted to  
ETH ZURICH

for the degree of  
Doctor of Sciences

presented by

MARKUS WENK

Dipl. El.-Ing. ETH (MSc ETH)

born March 03, 1980

citizen of Rüthi SG, Switzerland

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. W. Fichtner, examiner

Prof. Dr. H. Bölcskei, co-examiner

Prof. Dr. H. Meyr, co-examiner

2010

# Abstract

In recent years, multiple-input multiple-output (MIMO) communication techniques have brought wireless communication to a new performance level. MIMO communication employs multiple antennas at the transmitter and at the receiver and transmits multiple data streams concurrently within the same frequency band. This method, known as spatial multiplexing, increases the spectral efficiency and link reliability without requiring additional transmit power. However, the benefits of MIMO communication come at the cost of, at least to some extent, significantly increased computational complexity compared to single antenna systems, especially in the receiver. To identify strengths and weaknesses of new technologies (e.g., MIMO communication), rigorous testing and experimentation is required. To this end, so-called testbeds are built that serve as experimentation platform.

In this thesis, the design of a modular hardware platform (i.e., testbed) for testing and experimentation of MIMO communication aspects is described. The field-programmable gate array (FPGA)-based platform is able to operate in real-time, i.e., all the signal processing tasks are carried out at least as fast as new data are arriving at the radio frequency (RF)-input. To this end, the baseband MIMO physical (PHY)-layer is implemented on two large FPGAs and a basic media access control (MAC) layer has been realized on the PowerPC of one of the FPGAs. The baseband processing of the MIMO PHY layer on the testbed is similar to the IEEE 802.11a standard and uses orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) as modulation method.

The same hardware platform can also be used as offline testbed. In this setup, the data are prepared on a personal computer (PC) and transmitted over a real-world RF chain. On the receive side, the data are recorded and again processed on a PC. The main advantage of this setup is that different MIMO algorithms can be tested more

efficiently over real-world RF chains and real-world channels. It is not necessary to implement the algorithms in hardware description language (HDL) and time-consuming synthesis problems like timing closure can be avoided.

In a wireless receiver, MIMO detection is a crucial task to fully profit from the MIMO gains. Therefore, the implementation of two MIMO detection algorithms - conditioned ordered successive interference cancellation (COSIC) detection and sphere decoding (SD) - is shown. Both algorithms were also implemented on the testbed for real-time operation. Architectural transformations are presented that improve the efficiency of the original implementation. Especially, pipeline interleaving and an approximation of the original enumeration scheme lead to significantly improved implementation results.

Measurements were carried out mainly on the offline testbed for different detection algorithms. Special emphasis is put on the characterization of the RF transmit path. It has been found that impairments in the RF transmitter have a significant influence on the error-rate performance of optimum receive algorithms. This residual transmit noise is characterized and a method to alleviate the problem is proposed and supported by measurements.

# Zusammenfassung

In den letzten Jahren hat sich die Mehrantennenkommunikation (auch Multiple-Input Multiple-Output (MIMO)-Kommunikation genannt) durchgesetzt, um mittels drahtloser Kommunikation mehr Durchsatz zu erzielen und/oder die Zuverlässigkeit der Übertragung zu verbessern. Die MIMO Technik verwendet mehrere Antennen am Sender und am Empfänger und überträgt gleichzeitig mehrere Datenströme im gleichen Frequenzband. Dies wird häufig als räumliches Multiplex-Verfahren bezeichnet. Es verbessert die spektrale Effizienz und die Zuverlässigkeit einer drahtlosen Verbindung ohne die Leistung im Sender zu erhöhen. Der Preis für diese Verbesserung ist eine deutlich höhere Rechenkomplexität im Empfänger verglichen zu einer herkömmlichen Punkt-zu-Punkt Verbindung.

Um neue Technologien wie zum Beispiel die MIMO Kommunikation zu testen und damit zu experimentieren werden sogenannte Testbeds gebaut. Ein Testbed ist eine Plattform, die nicht unbedingt die gleiche Leistung wie ein (später verfügbares) kommerzielles Produkt erbringt, aber doch die neuen Technologien so verwendet, dass experimentell damit gearbeitet werden kann.

Diese Arbeit zeigt zuerst den Aufbau einer modularen Hardware Plattform (Testbed) welche für MIMO Demonstrationen und Experimente verwendet werden kann. Das Kernstück des Testbeds sind drei Field-Programmable Gate Arrays (FPGAs), welche für die Signalverarbeitung zuständig sind. Das Testbed kann im Echtzeit-Modus oder im Offline-Modus betrieben werden. Für den Echtzeit-Modus ist die dazu benötigte Signalverarbeitung in VHDL auf den FPGAs implementiert. Sie basiert auf dem IEEE 802.11a Standard und benutzt Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) für die Modulation. Um den Packetfluss zu kontrollieren und zu verwalten wurde auf einem der FPGAs ein integrierter PowerPC in Betrieb genommen und darauf ein

einfaches Medium Access (MAC) Protokoll implementiert. Im Offline-Modus werden die Datenpakete vor dem Senden offline, also zum Beispiel in MATLAB, vorbereitet und über die USB-Verbindung ins FPGA geladen. Danach wird das Packet über das RF-board übertragen und im Empfänger wieder gespeichert. Dort können die empfangenen Daten von MATLAB wieder abgeholt und weiterverarbeitet werden. Mit Hilfe des Offline-Modus können Algorithmen sehr einfach in einem 'echten' System (d.h., inklusive den Beeinträchtigungen durch den RF-Pfad) ausprobiert werden.

Für die Leistung und Qualität eines MIMO Empfängers spielt der Detektionsalgorithmus eine wichtige Rolle. Der Detektionsalgorithmus ist mitentscheidend um möglichst stark von der MIMO-Technik zu profitieren. Zwei MIMO Detektionsalgorithmen werden in dieser Arbeit im Detail betrachtet. Zum einen ist dies der Conditioned Ordered Successive Interference Cancellation (COSIC) Algorithmus und zum anderen der Sphere Decoding (SD) Algorithms. Verschiedene Architekturtransformationen und Annäherungen an die optimale Lösung werden vorgestellt um möglichst effiziente Schaltungen zu erhalten. Dank diesen Vereinfachungen kann die Grösse eines Detektors deutlich reduziert werden und erlaubt eine höhere Clock-Frequenz als in vergleichbaren Arbeiten.

Im letzten Teil dieser Arbeit wird anhand von Simulationen und Messungen in die Problematik von Rauschen im Sendepfad eingeführt. Diese Beeinträchtigungen haben einen grossen Einfluss auf die Fehler-rate von optimalen Detektoren, wie zum Beispiel dem SD Algorithmus. Die Fehlerrate wird klar verschlechtert. Um den Einfluss des Rauschens zu reduzieren kann im Empfänger ein sogenanntes Whitening Filter eingebaut werden. Dadurch wird der negative Einfluss wieder reduziert. Diese Beobachtungen werden anhand von verschiedenen Simulations- und Messresultaten unterstützt.