



## ERSTES KAPITEL

# Einleitung

### 1.1 Einführung

In einer Umfrage des Digitalverbands BITKOM aus dem Jahre 2015 gaben 44 Millionen Deutsche an, ein Smartphone zu besitzen. 93 % der Besitzer nutzen das mobile Internet und 55 % lesen und schreiben auf dem Smartphone E-Mails [9]. Durch diese hohe Verbreitung wird in diesem Jahr erstmals der Umsatz mit mobilen Datendiensten den Umsatz mit Handy-Gesprächen übersteigen. Außerdem wird die Datenmenge in den deutschen Mobilfunknetzen von rund 370 Millionen Gigabyte im letzten Jahr auf voraussichtlich 480 Millionen Gigabyte in diesem Jahr ansteigen. Durch die Versteigerung der 700 MHz-Frequenzen soll die Mobilfunkabdeckung weiter auf mehr als 50 MBit/s erhöht werden [8].

Dass sich diese Entwicklung auch in nächster Zeit fortsetzen wird, zeigt sich daran, dass in dem letzten halben Jahr 2 Millionen zusätzliche Smartphones verkauft wurden [9]. Für das nächste Jahr gehen Prognosen davon aus, dass 24,6 Millionen Smartphones verkauft werden [8].

Mit den aufkommenden mobilen Möglichkeiten [7, 10], die aus dem Mobilnetzausbau, den Leistungssteigerungen der Smartphones sowie der steigenden Datenrate [34] resultieren, ändern sich Gewohnheiten der Nutzer. Dies zeigt sich unter anderem in dem Einkaufsverhalten sowie den Fernsehgewohnheiten.

Da die Anzahl der weltweit eingesetzten mobilen Endgeräte, ähnlich der Entwicklung in Deutschland, in Zukunft steigen wird, werden auch die Anforderungen an drahtlose Übertragungssysteme stark ansteigen. Zudem werden bei der Nutzung der mobilen Geräte immer größere Datenvolumen benötigt.

Um den steigenden Anforderungen gerecht zu werden, gehen die Entwicklungen in Übertragungssysteme, drahtlose wie auch drahtgebundene, hin zu höheren Datenraten beziehungsweise zu besserer Übertragungsqualität.

Ein Ziel aktueller Forschungen liegt in der Steigerung der Übertragungsrates beziehungsweise in der Verbesserung der Übertragungsqualität. Um die tatsächliche Leistungsfähigkeit der Algorithmen zu bestimmen, reicht es nicht aus, nur die Simulationsergebnisse



auszuwerten. Zusätzlich muss die Funktionsweise unter realen Bedingungen erforscht werden. Hierzu werden die Algorithmen in reale Systeme integriert, wobei die Integration der Algorithmen eine Herausforderung an die Entwickler darstellt, da bei der Integration in reale Systeme auf die Realisierbarkeit, die Echtzeitfähigkeit und die Energieaufnahme geachtet werden muss.

Eine Möglichkeit, die Algorithmen in reale Systeme zu integrieren, ist die Entwicklung von Prototypen auf Basis von anwendungsspezifischen Halbleiterbauelementen. Mithilfe der Halbleiterbauelemente wird die Funktionsweise der entwickelten Algorithmen auf die eingesetzte Hardware abgebildet. Dieser Entwicklungsprozess ist langwierig und teuer, da bei jeder Änderung des Algorithmus ein neues Einzelstück angefertigt werden muss. Außerdem fehlen für die Herstellung der enormen Menge an Halbleitern die Entwickler, da hierbei sehr stark auf die Grenzen und Möglichkeiten der Halbleiterfertigung geachtet werden muss. Somit ist die Erstellung eines Prototypen sehr ineffizient.

Eine weitere Möglichkeit zur Evaluierung der Algorithmen mit realen Signalen bietet das Software Defined Radio (SDR)-Konzept [16]. Mithilfe des SDR-Konzepts wird der größte Teil der Signalverarbeitung in Software realisiert. Nur das Senden sowie das Empfangen wird durch eine vorgegebene Hardware durchgeführt, die durch den gewählten Ansatz sehr schnell geändert werden kann. Die benötigte Signalverarbeitung kann je nach Einsatzgebiet auf Field Programmable Gate Arrays (FPGAs) oder Universalrechnern (zum Beispiel Personal Computer (PCs)) durchgeführt werden. Hierdurch ermöglicht dieses Konzept den Entwicklern eine schnelle und einfache Veränderung der implementierten Algorithmen durch Anpassung des Programmcodes ohne den Aufwand einer neuen Hardware-Entwicklung.

Der Nachteil der Verwendung der FPGAs liegt in der vergleichsweise schwierigen Programmierbarkeit, da hierzu eine Hardwarebeschreibungssprache wie zum Beispiel VHDL (engl. very high speed integrated circuit hardware description language) oder Verilog verwendet werden muss.

Durch die Signalverarbeitung auf einem PC, lassen sich sehr einfach einzelne Verarbeitungsschritte verändern, da die komplette Signalverarbeitung in einer Hochsprache programmiert ist.

Des Weiteren gibt es bei der Verwendung des SDR-Konzepts kaum Probleme mit der Hardwarearchitektur, da hierbei universell einsetzbare Komponenten verwendet werden.

## 1.2 Stand der Technik

Die Aktivitäten im Bereich Forschung und Entwicklung nach dem Konzept des Software Defined Radios sind in den letzten Jahren stark angestiegen, was hauptsächlich an der hohen Verfügbarkeit der benötigten Signalverarbeitungskomponenten liegt. Vorreiter im zivilen Marktsegment ist die Firma Ettus-Research, die 2004 gegründet und im Jahre 2010 von National Instruments übernommen wurde. Infolge dieser Übernahme wurden Schnittstellen für Matlab und LabView entwickelt. Die Schnittstelle ermöglicht eine direkte Steuerung und Kommunikation mit den SDR-Geräten. Als Grundlage für diese Schnittstelle diente der existierende UHD-Treiber (engl. USRP hardware driver), der ein Open-Source Treiber für die komplette Produktpalette von Ettus-Research ist und auch bei Produkten weiterer Firmen eingesetzt werden kann. Zurzeit sind mehr als 60 verschiedene kommerziell vertriebene SDR-Geräte erhältlich [73], die sich in den verfügbaren Frequenzbereichen sowie der Leistung unterscheiden.

## 1.3 Aufgabenstellung

In dieser Arbeit soll mithilfe des SDR-Konzeptes ein Übertragungssystem zur Evaluierung von Echtzeitübertragung mit adaptiver Modulation (AM) und anschließender automatischer Modulationsklassifikation (AMC, engl. automatic modulation classification) erstellt werden.

Durch den modularen Aufbau des Übertragungssystems soll es möglich sein, mit wenig Aufwand andere Übertragungstechniken, Konzepte und Algorithmen zu evaluieren.

Das entwickelte Übertragungssystem besteht aus SDR-Geräten der Firma Ettus-Research sowie PCs zur Abwicklung der anfallenden Signalverarbeitung. Für die benötigten Signalverarbeitungsschritte wird in dieser Arbeit ein Programm entwickelt, das folgenden Anforderungen genügen muss:

- Das Programm soll objektorientiert aufgebaut sein, damit weitere Algorithmen oder komplette Verarbeitungsschritte mit nur geringem Aufwand integriert werden können.
- Des Weiteren soll das Programm über eine Echtzeitausgabe signifikanter Informationen der Übertragungstrecke verfügen,
- sowie über eine Benutzeroberfläche zur Konfiguration der verwendeten Algorithmen.
- Außerdem soll das Programm skalierbar sein, damit neue SDR-Geräte, neue PCs

oder zusätzliche SDR-Geräte, für den Aufbau eines Mehrantennensystems, ohne großen Aufwand eingesetzt werden können.

Bei der Untersuchung der Echtzeitübertragung mit adaptiver Modulation und anschließender automatischer Modulationsklassifikation sollen folgende Anforderungen und Schwerpunkte analysiert werden:

- Ist die Echtzeitfähigkeit des Übertragungssystems ausreichend für eine Echtzeitübertragung mit adaptiver Modulation und anschließender automatischer Modulationsklassifikation bei einer Bandbreite von 20 MHz?
- Welche Signalverarbeitungsschritte sind hierbei als kritisch zu betrachten?
- Bestätigen die realen Messungen die Leistungsverbesserung bei Übertragungen mit adaptiver Modulation und anschließender automatischer Modulationsklassifikation im Gegensatz zur konstanten Modulation, wie dies in der Literatur [25, 53] gezeigt wird?
- Zeigt die adaptive Modulation mit anschließender automatischer Modulationsklassifikation auch Leistungsverbesserungen im Mehrantennensystem?

## 1.4 Gliederung der Arbeit

Die vorliegende Arbeit ist in fünf Kapitel unterteilt und folgendermaßen aufgebaut.

Die Grundlagen für das Verständnis der Arbeit sind in **Kapitel 2** zusammengefasst. Hier werden zum einen die verwendeten Algorithmen und zum anderen physikalische Grundprinzipien vorgestellt, die bei der Untersuchung der adaptiven Modulation beziehungsweise der automatischen Modulationsklassifikation eine entscheidende Rolle spielen.

In **Kapitel 3.1** wird zuerst die verwendete Hardware beschrieben und untersucht. Danach folgt im **Kapitel 3.2** die Beschreibung des Aufbaus des Übertragungssystems aus den zuvor beschriebenen Komponenten sowie des verwendeten Übertragungskanal. Im letzten Teil des dritten Kapitels wird die Benutzeroberfläche des entwickelten Programms kurz vorgestellt. Außerdem wird in **Kapitel 3.3** auf die Implementierung der verwendeten Funktionen zur adaptiven Modulation und zur automatischen Modulationsklassifikation eingegangen sowie der zeitliche Ablauf der vorgestellten Funktionen innerhalb des Programms erklärt.



**Kapitel 4** befasst sich mit Auswertungen von Echtzeit-Übertragungen. Hierzu gehören im ersten Unterkapitel die Untersuchungen zur Echtzeitfähigkeit des Übertragungssystems. Im zweiten Unterkapitel wird der Einfluss der in Kapitel 3.1 aufgezeigten Hardwareeigenschaften untersucht. Abschließend wird in diesem Kapitel die Leistungsfähigkeit der adaptiven Modulation mit anschließender automatischer Modulationsklassifikation bewertet.

Das letzte Kapitel fasst die Ergebnisse der Arbeit zusammen und gibt Anknüpfungspunkte für weitere Untersuchungen mit dem entwickelten Echtzeitübertragungssystem.

## ZWEITES KAPITEL

# Grundlagen

In der vorliegenden Arbeit werden die Vorteile der adaptiven Modulation mit anschließender automatischer Modulationsklassifikation dargestellt. In diesem Kapitel werden die Grundlagen und Ideen vermittelt, die für das Verständnis dieser Arbeit notwendig sind. Die verwendeten Algorithmen und Einstellungen wurden in Anlehnung an den WLAN-Standard (engl. wireless local area network) IEEE (engl. institute of electrical and electronics engineers) 802.11a [3] ausgewählt.

## 2.1 Übertragungssystem

Ein Übertragungssystem beschreibt im Allgemeinen ein System aus Sender- und Empfängereinheit sowie deren Verbindungen. Die Art der Verbindung kann kabelgebunden oder kabellos sein.

### 2.1.1 Einantennensystem

Bei einem Einantennensystem besteht das Übertragungssystem aus einer Sende- sowie einer Empfangseinheit mit jeweils einer Antenne ( $M_t = M_r = 1$ ). Hierbei entsteht nur eine Verbindung zwischen den beiden Antennen, wie dies in Abbildung 2.1 dargestellt ist. Im Allgemeinen wird das Einantennensystem mit SISO (engl. single-input single-output) abgekürzt.

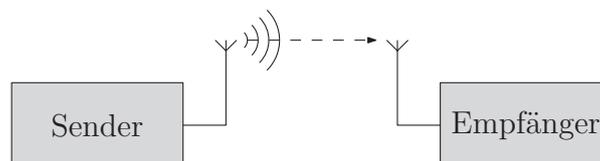


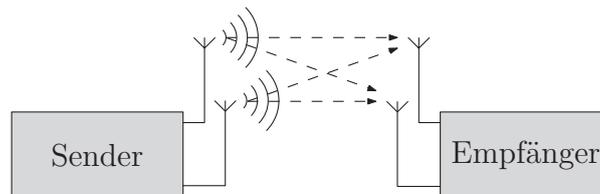
Abbildung 2.1: Einantennensystem

### 2.1.2 Mehrantennensystem

Im Gegensatz zum Einantennensystem verfügt das Mehrantennensystem (MIMO, engl. multiple-input multiple-output) über mehrere Antennen an der Sendeeinheit ( $M_t$ ) sowie

an der Empfangseinheit ( $M_r$ ). Die Antennenkonfiguration wird in Kurzschreibweise durch  $M_t \times M_r$  abgekürzt.

In Mehrantennensystem werden Verbindungen zwischen jeder Sende- und Empfangsantenne aufgebaut, wie dies exemplarisch am Beispiel von jeweils zwei Sende- und Empfangsantennen in Abbildung 2.2 dargestellt ist.



**Abbildung 2.2:** Mehrantennensystem mit jeweils 2 Antennen

### 2.1.3 Transceiver

Die Datenübertragung im Einantennensystem sowie im Mehrantennensystem zwischen einer Sendeeinheit (im folgenden Sender genannt, engl. Transmitter) und einer Empfangseinheit (im folgenden Empfänger genannt, engl. Receiver) ist nur vom Sender zum Empfänger möglich (unidirektional). Damit eine bidirektionale Übertragung, also eine Übertragung in beide Richtungen, zwischen zwei Systemen durchgeführt werden kann, werden in einem Transceiver ein Sender sowie ein Empfänger integriert.

Verfügt der Transceiver über getrennte Sende- und Empfangsstrukturen, können Sender und Empfänger individuell konfiguriert werden und es kann gleichzeitig gesendet und empfangen werden. In diesem Fall handelt es sich um einen Voll-Duplex Transceiver. Ein Halb-Duplex Transceiver dagegen besitzt nur eine Struktur, die sowohl zum Senden als auch zum Empfangen genutzt wird, wobei entweder gesendet oder empfangen werden kann.

Für den Aufbau eines Transceivers können sowohl Einantennensysteme als auch Mehrantennensysteme als Sender beziehungsweise als Empfänger genutzt werden.

## 2.2 Übertragungsverfahren

Für die Übertragung zwischen mehreren Transceivern wird ein Übertragungsverfahren benötigt, das den beteiligten Transceivern bekannt ist [57].

Damit die jeweiligen Transceiver miteinander in einer definierten Weise kommunizieren können, wird ein Transceiver als Master-Transceiver (im folgenden Master genannt) betrieben, die anderen vorhandenen Transceiver werden als Slave-Transceiver (im folgenden Slave genannt) betrieben, wie dies in Abbildung 2.3 am Beispiel von zwei Transceivern