

Beiträge aus der Elektrotechnik

Elena Sobotta

**Rekonfigurierbare Transceiver für mehrere
Standards und Frequenzbänder**

 VOGT

Dresden 2019

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im
Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar.

Bibliographic Information published by the Deutsche Nationalbibliothek
The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche
Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available on the
Internet at <http://dnb.dnb.de>.

Zugl.: Dresden, Techn. Univ., Diss., 2019

Die vorliegende Arbeit stimmt mit dem Original der Dissertation
„Rekonfigurierbare Transceiver für mehrere Standards und
Frequenzbänder“ von Elena Sobotta überein.

© Jörg Vogt Verlag 2019
Alle Rechte vorbehalten. All rights reserved.

Gesetzt vom Autor

ISBN 978-3-95947-038-4

Jörg Vogt Verlag
Niederwaldstr. 36
01277 Dresden
Germany

Phone: +49-(0)351-31403921
Telefax: +49-(0)351-31403918
e-mail: info@vogtverlag.de
Internet : www.vogtverlag.de

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

Rekonfigurierbare Transceiver für mehrere Standards und Frequenzbänder

Elena Sobotta

der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik
der Technischen Universität Dresden

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur

(Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Georg Mayr
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Frank Ellinger
Prof. Dr. Rolf Kraemer

Tag der Einreichung: 23. November 2018

Tag der Verteidigung: 17. April 2019

Danksagung

Zunächst möchte ich mich bei all denjenigen Menschen bedanken, die mich auf dem langen Weg zu dieser Arbeit begleitet und unterstützt haben.

Mein besonderer Dank gilt dabei den folgenden Personen:

Prof. Frank Ellinger, ohne den ich nie die Möglichkeit gehabt hätte diese Arbeit anzufertigen.

Robert Wolf, der mir nicht nur als Masterarbeitsbetreuer sein Wissen weitergeben hat, sondern mir auch weiterhin bei technischen und menschlichen Fragestellungen als kompetenter Ansprechpartner zu Seite stand und schließlich zu meinem inoffiziellen Doktorvater wurde.

Anja Muthmann und Marco Gunia für die sorgfältige Überarbeitung und Durchsicht des Manuskripts.

Paul Stärke, dessen Geduld ich bei mehrmaligen Bondens der 59 Pads meines Chip ausgereizt habe, und der diese Arbeit trotzdem stets zuverlässig und zeitnah erledigt hat.

Niko Joram, der mir seine Arbeit zur Verfügung gestellt hat, die als Vorarbeit für das FMCW-Radar dieses Systems dient.

Meinen ehemaligen Kollegen Dennis Barnhart, der von Anfang an an mich geglaubt hatte und meine Begeisterung für Hardware geteilt hat, sowie Joachim Moll, der mir viele technische Zusammenhänge erläutert hat und mich ermutigt hat mein Studium fortzuführen.

Und natürlich meinem langjährigen Freund Manuel Liedke, der nicht nur die Arbeit überarbeitet hat, sondern auch immer hinter mir stand, nie an meinem Dickkopf gezweifelt hat, mich stets motiviert hat meinen eigenen Weg zu gehen und dabei nicht nachtragend war, wenn wieder wenig Zeit für Familie, Freunde und Freizeit blieb.

Kurzfassung

Rekonfigurierbare Transceiver vereinen mehrere Standards und Frequenzbänder in einem System und verringern damit die Chipfläche und die Kosten. Diese Arbeit befasst sich mit der Analyse, dem Entwurf und der Erprobung eines HF-Frontends eines Senders und Empfängers, das sowohl Kommunikation mit IEEE 802.11a/g als auch Lokalisierung mit FMCW-Radar unterstützt. Um die Zuverlässigkeit des Systems weiter zu erhöhen, kann das System optional um ein HF-MIMO-Modul erweitert werden.

Das Systemkonzept ist durch die Anforderungen der Anwendungsfälle und der Architektur der Direktumsetzung gegeben. Dieses entspricht einem linearen HF-Frontend für die Frequenzbereiche um 2.4 GHz und zwischen 4.6 GHz und 6 GHz mit komplexem Basisband sowie eine Frequenzsynthese zur Erzeugung orthogonaler und frequenzmodulierter Träger.

Das HF-Frontend wurde in zwei Varianten, die sich in der Implementierung der Frequenzumsetzung und der Empfängerarchitektur unterscheiden, entworfen und in einer 180 nm BiCMOS Technologie realisiert. Der eine Empfänger zeichnet sich durch ein geringes Rauschmaß von 4.7 dB und ein IM2 unter -60 dB aus. Die Vorteile des zweiten Empfängers liegen in einer hohen verfügbaren Eingangsleistung im Kompressionspunkt von 21.5 dBm sowie in einem Spannungsmischgewinn von 35dB. Beide Sender haben einen ausgangsseitigen Kompressionspunkt über -11 dBm. Die Messergebnisse belegen die Funktionalität der beiden Entwürfe und bestätigen die Konformität mit IEEE 802.11a/g.

Eine Detailstudie eines linearen Leistungsverstärker belegt, dass die dort vorgestellte Theorie den eingangsseitigen Kompressionspunkt mittels einer durchdachten Auslegung des Biasnetzwerks um 2 dB und die Power-Added-Efficiency um 7% erhöht.

Für das HF-MIMO-Erweiterungsmodul wurde eine Detailstudie eines HF-Amplitudenstellglieds in einer 28 nm CMOS Technologie durchgeführt. Das HF-Amplitudenstellglied basiert auf einem geregelten VGA. Der Vorteil des VGAs zeigt sich in der geringen Phasendrehung über den Stellbereich von 3.5° . Die Regelung erweitert den VGA um eine Eingangsleistungsanpassung von $S_{DD11,\text{dB}} = -12$ dB und eine lineare Verstärkung über den Stellbereich.

Abstract

Reconfigurable transceivers combine multi-standard and multi-band features in a single system and therefore reducing the chip size and costs. This work deals with the analysis, the design and the experimental results of an analog RF frontend of a transmitter and receiver supporting the communication standard IEEE 802.11a/g as well as local positioning with FMCW radar. An optional RF MIMO module enhances the system and thereby increases the reliability of the system.

The requirements of the different applications and the direct conversion architecture define a new system concept. The developed system setup includes a linear RF frontend for the frequency bands around 2.4 GHz and between 4.6 GHz and 6 GHz with a complex baseband and a frequency synthesizer enabling orthogonal and frequency modulated carriers.

Two different versions of RF frontends are designed. They differ in the implementation of the frequency conversion and in different receiver architectures. Both are realized in a 180 nm BiCMOS technology. One of the receivers shows a low noise figure of 4.7 dB and an IM2 under -60 dB. The advantages of the second receiver are demonstrated in a high available input power in the compression point of 21.5 dBm and a voltage conversion gain of 35 dB. Both transmitters show an output-referred compression point above -11 dBm. The measurement results confirm the functionality of the design and comply with IEEE 802.11a/g.

A detailed study of a linear power amplifier confirms that the introduced theory increases the input referred compression point by a sophisticated dimensioning of a bias network by 2 dB and the power added efficiency by 7%.

Concerning the RF MIMO enhancement, a detailed study towards a RF amplitude control stage is carried out and realized in a 28 nm CMOS technology.

The RF amplitude control stage consists of a controlled VGA. The VGA itself reveals a low phase variation of 3.5° versus control range. The control loop enhances the VGA by an automatic input power matching of $S_{\text{DD11,dB}} = -12 \text{ dB}$ and a linear gain versus control range.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	iii
Nomenklatur und ausgewählte Formelzeichen	vi
1 Einleitung	1
2 Systemkonzeption	7
2.1 Systemanforderungen anhand der Anwendungsfälle	8
2.1.1 Kommunikation mittels IEEE 802.11a/g	8
2.1.2 Lokalisierung mittels FMCW-Radar	16
2.2 Eigenschaften der Architektur der Direktumsetzung	22
2.3 Nutzung der Frequenzbänder	26
2.4 Anforderungen an den Leistungsverstärker	28
2.5 HF-MIMO für Kommunikation und Lokalisierung	30
2.6 Abgeleitete Systemarchitektur	32
3 Empfänger für Kommunikation und Lokalisierung	36
3.1 Empfängerkonzepte	37
3.1.1 Beschreibung der Signalkette	41
3.1.2 Empfängers $RXv1$	53
3.1.3 Empfänger $RXv2$	59
3.2 Entwurf der rauscharmen Verstärker	62
3.2.1 LNA in einer hochskalierten Technologie	64
3.2.2 LNA mit zwei Verstärkungsmodi	89
3.2.3 LNA mit Bypass	100
3.3 Entwurf der Abwärtsmischer	104
3.3.1 Schaltermischer mit Vorspannung	104
3.3.2 Gilbert-Mischer	109
3.4 Entwurf des Basisbandverstärkers	114
3.5 Charakterisierung der Signalkette des $RXv1$ und $RXv2$	117

4	Sender für Kommunikation und Lokalisierung	123
4.1	Entwurf der Aufwärtsmischer	125
4.1.1	Schaltermischer mit Vorspannung	125
4.1.2	Gilbert-Mischer	128
4.2	Entwurf des IQ-Summierers und Multiplexers	130
4.3	Entwurf des Treiberverstärkers des Leistungsverstärkers	131
4.4	Charakterisierung der Signalkette des $TXv1$ und $TXv2$	135
5	Frequenzsynthese	144
5.1	Beschreibung der Phasenregelschleife	145
5.2	Beschreibung des Frequenzteilers und des LO-Treibers	147
5.3	Ausgangssignale der Frequenzsynthese	149
6	Erweiterungsmodul für HF-MIMO	152
6.1	Entwurf eines einstellbaren Verstärkers	152
6.2	Regelungskonzept mit zwei Regelschleifen	158
6.3	Entwurf der VGA-Replika	162
6.4	Entwurf des Operationsverstärkers	167
6.5	Experimentelle Ergebnisse	170
7	Implementierung der rekonfigurierbaren Transceiver	177
7.1	Beschreibung und Aufbau des Systems	179
7.2	Experimentelle Ergebnisse des $RXTXv1$ und des $RXTXv2$	185
7.2.1	Empfänger	187
7.2.2	Sender im Kommunikationsmodus	199
7.2.3	Sender im Lokalisierungsmodus	206
7.2.4	Zusammenfassender Vergleich der Sender und Empfänger	208
8	Zusammenfassung und Ausblick	212
	Anhang A: Kontrollierte Expansion zur Kompressionspunkterhöhung	217
	Abbildungsverzeichnis	245
	Tabellenverzeichnis	252
	Literaturverzeichnis	254

Abkürzungsverzeichnis

ACPR	Adjacent Channel Power Ratio
ADC	Analog-to-Digital Converter
AP	Arbeitspunkt
BB	Basisband
BiCMOS	Bipolar CMOS
CF	Crest Factor
CM	Common Mode
CMOS	Complementary Metal-Oxide-Semiconductor
DAC	Digital-to-Analog Converter
DC	Direct Current
DEAL	Drahtlose, zuverlässige Echtzeitkommunikation für Automatisierung, Produktion & Logistik in der Industrie
DIV	Divider
DM	Differential Mode
DSB	Double Sideband
DVB-S	Digital Video Broadcasting – Satellite
DVB-T	Digital Video Broadcasting – Terrestrial
ECL	Emitter-Coupled Logic
EIRP	Equivalent Isotropically Radiated Power
EM	Electromagnetic
EVM	Error Vector Magnitude
FET	Field-Effect Transistor
FMCW	Frequency-Modulated Continuous Wave
HF	Hochfrequenz
HV	Modus mit hoher Verstärkung
IDFT	Inverse Discrete Fourier Transform
IM2	Intermodulationsprodukt zweiter Ordnung
IM3	Intermodulationsprodukt dritter Ordnung

IoT	Internet-of-Things
IP2	Second Order Intercept Point
IP3	Third Order Intercept Point
IQ	In- and Quadrature Phase
ISM	Industrial-Science-Medical
KOM	Kommunikationsmodus
LNA	Low Noise Amplifier
LO	Local Oscillator
LOK	Lokalisierungsmodus
LTCC	Low Temperature Cofired Ceramics
MAC	Media Access Control
MIM	Metal-Insulator-Metal
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output
m-WiMAX	mobile Worldwide Interoperability for Microwave Access
NF	Double-Side-Band Noise Figure
NMOS	n-type Metal-Oxide Semiconductor
NV	Modus mit niedriger Verstärkung
OFDM	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing
OPV	Operationsverstärker
PAE	Power-Added-Efficiency
PAPR	Peak-to-Average Power Ratio
PC	Personal Computer
PCB	Printed Circuit Board
PER	Packet Error Ratio
PFD	Phase Frequency Detector
PLL	Phase-Locked Loop
PMMA	Polymethylmethacrylat
PMOS	p-type Metal-Oxide Semiconductor
PTAT	Proportional-to-Absolute Temperature
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QPSK	Quadrature Phase-Shift Keying
QVCO	Quadrature Voltage-Controlled Oszillator
Radar	Radio Detection and Ranging

RX	Receiver
SISO	Single-Input Single-Output
SMA	Sub-Miniature-A
SNR	Signal-to-Noise Ratio
SoC	System-on-Chip
SPI	Serial Peripheral Interface
SRF	Self-Resonant Frequency
TDoA	Time-Difference-of-Arrival
TX	Transmitter
VCO	Voltage-Controlled Oscillator
VGA	Variable Gain Amplifier
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WLAN	Wireless Local Area Network

Nomenklatur und ausgewählte Formelzeichen

a	Skalar
x	reelles Zeitsignal
\underline{x}	komplexes Zeitsignal
s_{TX}	Schalterzustand eines Zeitsignals
U, I	elektrische Größe im Zeitbereich
$U_{\text{AP}}, I_{\text{AP}}$	elektrische Größe im Arbeitspunkt
\hat{U}, \hat{I}	Amplitude einer Größe
$\bar{I}, \bar{s}, \bar{q}$	zeitlicher Mittelwert einer Größe
$\underline{U}, \underline{I}$	komplexe elektrische Größe im Bildbereich
g_m, r_{BE}	durch Linearisierung im Arbeitspunkt gewonnene Kleinsignalgröße sowohl im Zeit- als auch im Bildbereich
$z(\tau)$	Impulsantwort einer Impedanz im Zeitbereich
\underline{v}	komplexer Verstärkungsfaktor im Zeitbereich
$\underline{Z}, \underline{Y}$	komplexe Übertragungsfunktion im Bildbereich
$G_c, V_c,$	Übertragungsfunktion im Bildbereich bei Frequenzumsetzung
i_C, g_m	normierte Größen
Z_0	Betrag der komplexen Übertragungsfunktion im Bildbereich
S_{11}	Betrag des komplexen S-Parameters
$S_{11,\text{dB}}$	Betrag des komplexen S-Parameters als logarithmische Größe
$\mathbb{I}_n(\hat{u}_e)$	modifizierte Besselfunktion der ersten Art und n -ten Ordnung

1 Einleitung

Das Interesse an Internet-of-Things und Industrie 4.0 ist in der letzten Zeit stetig gewachsen und erste Umsetzungen sind bereits im privaten und industriellen Alltag angekommen. Mögliche Anwendungen sind in der Unterhaltungselektronik, der Haustechnik, sowie in der Interaktion zwischen Sensoren, Aktoren, Maschinen und Menschen und in der Echtzeitsteuerung und -regelung in Fertigungsstraßen und Produktionshallen zu finden. Um interaktiv kommunizieren zu können, müssen viele unterschiedliche Geräte miteinander vernetzt werden. Jedes Gerät verfügt über eine Kommunikationsschnittstelle, aber unterstützt meist nur einen der diversen Kommunikationsstandards. Damit trotzdem Daten zwischen den einzelnen Komponenten ausgetauscht werden können, ist die Implementierung von mehreren Standards und Frequenzbändern in einem Gerät vorteilhaft.

Die Idee mehrere Standards und Frequenzbändern umzusetzen, definiert neue und anspruchsvolle Anforderungen an die Sender und Empfänger. Die meisten konventionellen Transceiver verwenden lediglich einen Standard und ein Frequenzband. Eine naheliegende Möglichkeit, um die Anzahl an Standards und Frequenzbändern zu erhöhen, ist die Parallelschaltung von mehreren Transceivern. Der Aufbau von parallelen Transceiver-Architekturen erhöht jedoch die Chipfläche, den Leistungsverbrauch und die damit verbundenen Kosten. Die Reduzierung von parallelen Transceiver-Architekturen bei gleichbleibender Funktionalität ist somit von zentraler Bedeutung [1]. Als Lösungsmöglichkeit bieten sich rekonfigurierbare Transceiver an, die zwischen mehreren Frequenzbändern und Standards umschalten können.

Die Thematik der rekonfigurierbaren Transceiver wurde bereits in Ansätzen untersucht. Beispielsweise wird in der Arbeit [2] ein Entwurf implementiert, der die beiden Kommunikationsstandards IEEE 802.11a/g/n WLAN und IEEE

802.15.1 Bluetooth in einem System-on-Chip vereinigt. Ein weiteres Beispiel ist der kommerzielle Transceiver-Chip AT86RF233 von *Microchip Technology*, der ZigBee zur Kommunikation und zur RSSI Positionierung verwendet. Die ZigBee Positionierung mit RSSI ist einfach umzusetzen, aber das Prinzip liefert lediglich eine geringe Genauigkeit und garantiert keine Datensicherheit [3]. Die Architektur der beiden Arbeiten profitiert jedoch von demselben Frequenzbereich der jeweiligen Anwendungen. Wenn sowohl mehrere Standards als auch mehrere Frequenzbänder in einem Transceiver umgesetzt werden sollen, führt dies zu einem komplexen und anspruchsvollen Entwurf.

Der kommerzielle Transceiver-Chip DW1000 von *Decawave Limited* setzt dies mit einem breiten Frequenzbereich zwischen 3.5 GHz und 6 GHz um. Der Frequenzbereich wird sowohl zur Datenübertragung als auch zur UWB Lokalisierung verwendet. Das Prinzip der UWB Lokalisierung ist ein Verfahren, das Mehrwegeausbreitungen aktiv berücksichtigt, aber nur eine begrenzte Reichweite aufweist [3]. Die Kombination eines Kommunikations- und eines Lokalisierungssystems ist systemrelevant, da ein Lokalisierungssystem ebenfalls einen Datenaustausch voraussetzt, um Triggerimpulse, Konfigurations- oder Positionsdaten zu übertragen.

Auch das Forschungsprojekt *DEAL*¹ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) beschäftigt sich mit der Kombination aus einem echtzeitfähigen Lokalisierungs- und einem Kommunikationssystem in der Industrie. Die Kombination birgt die Möglichkeit der Vernetzung und Lokalisierung von Produktionsrobotern und gekoppelten Antriebssystemen in Produktion und Logistik, sowie einen autonomen Materialtransport in Fertigungsstraßen und Industrieanlagen. Außerdem sollen verteilte Sensoren und Aktoren an den Maschinen in das Netzwerk eingebunden werden. Die gemessenen Daten sollen über echtzeitfähige Funklösungen gesendet werden, sodass die Flexibilität erhöht und Kabel und damit Kosten eingespart werden können. Dabei sollen nicht nur digitale Daten sondern auch breitbandige, analoge Sensorsignale in

¹Drahtlose, zuverlässige Echtzeitkommunikation für Automatisierung, Produktion & Logistik in der Industrie

einem integrierten Chip verarbeitet werden können. Breitbandige, analoge Sensorsignale kommen beispielsweise bei präzisen, optischen Drehgebern vor.

Für diesen Anwendungsbereich soll ein rekonfigurierbares HF-Frontend aufgebaut werden. Das HF-Frontend ist ein Teilprojekt von *DEAL* und wird in dieser Arbeit betrachtet. Die Lokalisierung soll dabei mit einem frequenzmodulierten Dauerstrichradar, dem FMCW-Radar, erfolgen. Dieses hat den Vorteil, dass die Architektur eines HF-Frontends für FMCW-Radar der eines Frontends für Kommunikation sehr ähnelt und damit für den Entwurf eines rekonfigurierbaren Transceivers geeignet ist. Die kommerziellen Chips AT86RF233 und DW1000, die in den vorherigen Abschnitten vorgestellt wurden, unterstützen Lokalisierungsverfahren mittels RSSI und UWB. Für den Einsatz in *DEAL* sind diese Verfahren jedoch nicht geeignet, da die RSSI-Lokalisierung eine zu geringe Genauigkeit besitzt und die UWB-Lokalisierung eine zu kleine Reichweite aufweist. Außerdem ist die UWB-Lokalisierung anfällig gegenüber Abschattungen. Damit ist das Verfahren nicht robust genug, um im industriellen Umfeld zuverlässige Werte zu liefern.

Für die Kommunikation wird der WLAN-Standard IEEE 802.11a/g gewählt. Dieser Standard zeichnet sich durch seine weite Verbreitung und einem ähnlichen Frequenzbereich, wie die beiden unteren ISM-Bänder, aus. Um die Verbindung robust gegenüber Störeinflüssen zu gestalten, wird das Modulationsverfahren BPSK ausgewählt. Durch die vorgesehene Verwendung der beiden ISM-Bänder bei 2.4 GHz und 5.8 GHz für die Lokalisierung erhöht sich ebenfalls die Robustheit. Dies hat außerdem den Vorteil, dass die Bandbreite des Sendesignals erhöht wird und damit die Messergebnisse verbessert werden.

Um die Robustheit gegenüber Mehrwegeausbreitung und die Zuverlässigkeit des Systems weiter zu erhöhen, können Mehrantennen-Transceiver eingesetzt werden. Diese Mehrantennen-Frontends sind auch ein wichtiger Bestandteil der Systemkonzeption in *DEAL*. Eine einzelne Antenne hat wenige Freiheitsgrade, um sich an die Kanalgegebenheiten anzupassen. Wird diese auf eine phasengesteuerte Gruppenantenne erweitert, kann der Abstrahl- bzw. Empfangswinkel elektronisch eingestellt werden. Dabei werden mehrere Antennen in einem definierten Abstand angeordnet. Jede einzelne Antenne benötigt dabei ein Element

zur Phasenverschiebung. Diese Elemente haben eine hohe Anforderung an die Phasengenauigkeit und die Realisierung ist anspruchsvoll. Um die Phasenschieber zu umgehen und die räumliche Diversität optimal nutzen zu können, kann eine HF-MIMO-Architektur angewandt werden. Bei dieser Architektur wird auf die Begriffsdefinition zurückgegriffen, welche in der Arbeit [6] eingeführt wurde. Dabei wird mit HF-MIMO eine Transceiver-Architektur beschrieben, welche jeden Antennenpfad um ein Modul zur komplexen Wichtung erweitert. Die komplexe Wichtung ermöglicht eine elektronische Einstellung von Phase und Amplitude. Eine Realisierungsmöglichkeit des Wichtungsmoduls ist ein kartesischer Vektormodulator, welcher aus zwei Amplitudenstellgliedern und einem Polyphasenfilter besteht. Alle Antennenpfade werden im HF-Bereich aufsummiert und in einem gemeinsamen Basisband verarbeitet. Im Vergleich zu phasengesteuerten Gruppenantennen kann hier deutlich flexibler auf Kanalbedingungen reagiert werden. Dies verbessert den Quality-of-Service ohne den Aufwand für die Basisbandverarbeitung signifikant zu erhöhen.

Eine Möglichkeit das System zu erweitern, stellt ein MIMO-System dar, welches parallele Empfangs- und Sendepfade sowohl im HF- als auch im BB-Bereich verwirklicht. Im Gegensatz zu HF-MIMO erhöht diese Architektur jedoch aufgrund der parallelen Basisbandpfade die Komplexität und den Stromverbrauch. Da in industrieller Umgebung nicht mit vielen Teilnehmern gerechnet wird, überwiegen für diese Anwendung die Nachteile. Aus diesem Grund wird das *DEAL*-System mit HF-MIMO aufgebaut.

Daraus folgend wird im *DEAL*-Teilprojekt ein rekonfigurierbares HF-MIMO-Frontend für die Lokalisierung mit FMCW-Radar und die Kommunikation mit IEEE 802.11a/g angestrebt. In den Abbildungen 1.1 und 1.2 werden ein Sender und ein Empfänger schematisch dargestellt, welche diesen Anforderungen entsprechen. Der Fokus dieser Arbeit liegt dabei auf dem Entwurf und der Realisierung des rekonfigurierbaren HF-Frontends. Dieses ist in beiden Abbildungen gekennzeichnet. Optional können HF-Wichtungsmodule und eine Summier- bzw. Aufteilungsschaltung für HF-MIMO implementiert werden. Die entscheidende Komponente für den Aufbau eines HF-MIMO-Systems ist das Amplitudenstellglied der Wichtungsmodule. Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit

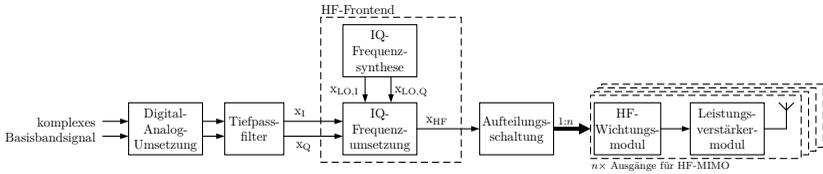


Abbildung 1.1: Schematische Darstellung eines Direktsenders mit HF-Wichtungsmodul

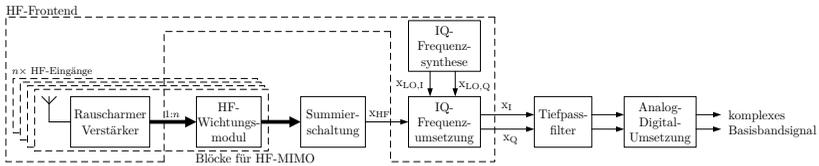


Abbildung 1.2: Schematische Darstellung eines Direktempfängers mit HF-Wichtungsmodul

ein HF-Amplitudenstellglied zur Vorbereitung auf die Erweiterung des HF-Frontends auf ein HF-MIMO-System entworfen.

Aufgrund dieser Festlegungen ergibt sich die Gliederung dieser Arbeit. Die Arbeit beginnt im folgenden Kapitel 2 mit der Erarbeitung der Systemkonzeption. Die Anforderungen an das System werden anhand der Spezifikation des Kommunikationsstandards IEEE 802.11a/g und des FMCW-Radars zur Lokalisierung abgeleitet. Neben den Spezifikationen der Standards hat auch die Wahl der Transceiver-Architektur und deren Vor- und Nachteile einen großen Einfluss auf das System.

Die Kapitel 3 bis 5 geben den kompletten Entwurf des rekonfigurierbaren Transceivers für WLAN und FMCW-Radar wieder. Dabei werden zwei Varianten des Transceivers inklusive Frequenzsynthese vorgestellt und der Entwurf der einzelnen Komponenten diskutiert. Die beiden Transceiver setzen unterschiedliche Architekturkonzepte um und werden parallel entworfen und anhand ihrer Messergebnisse verglichen.

Im Kapitel 3 wird der Entwurf der beiden Empfänger mit unterschiedlichen Architekturen und verschiedenen Topologien der Frequenzumsetzung dokumentiert. Dabei wird im Abschnitt 3.1 die Empfängersignalkette beschrieben und daraus die unterschiedlichen Konzepte der beiden Empfänger erarbeitet. Ebenfalls in diesem Kapitel wird auf das HF-Amplitudenstellglied eingegangen, das die Grundlage für ein Wichtungsmodule und damit für HF-MIMO bildet.

Der Entwurf der Sender im Kapitel 4 beschreibt die beiden Sendervarianten, die sich hauptsächlich im Aufwärtsmischer unterscheiden. Im Speziellen wird der Abschnitt 4.4 dem tieferen Verständnis des Kompressionsverhaltens des Senders gewidmet.

Die eingesetzte Frequenzsynthese wird in Kapitel 5 kurz zusammengefasst und die generierten Ausgangssignale für alle Konfigurationsfälle vorgestellt. Die beiden Transceiver inklusive Frequenzsynthese werden im letzten Kapitel 7 in einem 180 nm BiCMOS Prozess realisiert. Die Messergebnisse werden dokumentiert und miteinander verglichen.

Abschließend wird die Arbeit zusammengefasst und ein Ausblick auf Weiterentwicklungsmöglichkeiten gegeben.