

# **Beiträge zur Ultra-Wideband Ortung**

Von der Fakultät für Elektrotechnik und Informatik der  
Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover  
zur Erlangung des akademischen Grades Doktor-Ingenieur  
genehmigte

## **Dissertation**

von

Dipl.-Ing. Stefan Galler

geboren am 07.08.1973 in Höxter

2012

Referent: Prof. Dr.-Ing. Klaus Jobmann

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Jörn Ostermann

Vorsitzender: Prof. Dr. Jürgen Peissig

Tag der Promotion: 16.11.2012

Hannoversche Beiträge zur Nachrichtentechnik

Band 3.3

**Stefan Galler**

**Beiträge zur Ultra-Wideband Ortung**

Shaker Verlag  
Aachen 2012

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

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

Zugl.: Hannover, Leibniz Univ., Diss., 2012

Copyright Shaker Verlag 2012

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-1559-1

ISSN 1616-5489

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

# Kurzfassung

Systeme zur Ortung von Personen und Objekten innerhalb von Gebäuden gewinnen in zunehmendem Maße an Interesse. Der Einsatz von Ultra-Wideband-Funksignalen ist hierbei Gegenstand aktueller Forschung und Entwicklung. Die vorliegende Arbeit ist ein Beitrag zur Untersuchung grundlegender Eigenschaften der Funkortung mittels Ultra-Wideband-Signalen im Hinblick auf ein real implementierbares, genaues und robustes Ortungssystem.

Hierzu wird ein Ortungssystem, basierend auf einem digitalen Speicheroszilloskop als Empfänger, zur Laufzeitmessung von Funksignalen implementiert. Die zu ortenden Mobilteile des Systems verfügen zur Erzeugung einer definierten Sendepulsfolge jeweils über einen UWB-Pulsgenerator. Das System ist mehrbenutzerfähig und unterstützt sowohl Laufzeit- als auch Laufzeitdifferenz-basierte Ortungsverfahren.

Zur Bewertung der Eignung von Ultra-Wideband-Signalen zur Ortung innerhalb von Gebäuden werden Messungen verschiedener Szenarien unter realen Mehrwegebedingungen im direkten Vergleich zu Wireless-LAN-Signalen durchgeführt.

Basierend auf den gewonnenen Ergebnissen, erfolgt der Entwurf eines kombinierten Winkel- und Laufzeit-basierten Ortungsverfahrens, mittels dessen sich die zur Ortung benötigte Anzahl an Referenzpunkten minimieren lässt. Die Ergebnisse der durchgeführten Messungen in realer Umgebung zeigen Genauigkeiten ähnlich der vorausgegangenen Laufzeit- und Laufzeitdifferenz-basierten Messungen.

## Schlagwörter

Ultra-Wideband (UWB), Ortung, Angle of Arrival (AOA)

# Abstract

Indoor localization systems for people and objects are lately becoming of interest. The use of Ultra-Wideband (UWB) signals is an active topic in research and development. This Dissertation contributes to the fundamentals of radio localization using Ultra-Wideband signals, with respect to a feasible, accurate, and robust localization system.

A localization system is developed using a digital sampling oscilloscope as a receiver. The mobile-units are equipped with a UWB pulse-generator, emitting a pre-defined UWB pulse-train. The system is multi-user capable and supports Time of Arrival as well as Time Difference of Arrival based localization schemes.

In order to evaluate the suitability of UWB signals with respect to indoor-localization, measurements in real-world multi-path surroundings are conducted in a variety of scenarios.

Based on the results, a combined Angle of Arrival/Time of Flight based localization scheme is developed, which minimizes the number of reference points necessary for a position fix. The localization accuracy of conducted measurements, show comparable results to the preceding Time of Arrival and Time Difference of Arrival measurements.

## Keywords

Ultra-Wideband (UWB), localization, Angle of Arrival (AOA)

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>iv</b>
<b>Kapitel 1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation und Zielsetzung	1
1.2 Aufbau der Arbeit	2
<b>Kapitel 2 Grundlagen funkbasierter Ortungssysteme</b>	<b>3</b>
2.1 Ortungsverfahren und Systeme	3
2.1.1 Globale Ortungssysteme	3
2.1.2 Lokale Ortungssysteme	4
2.2 Funkbasierte Ortungsverfahren	6
2.2.1 Laufzeitverfahren	6
2.2.2 Winkelbasiertes Verfahren	11
2.3 Laufzeitmessung von Funksignalen	13
2.3.1 Korrelationsempfänger zur Laufzeitmessung	13
2.3.2 Genauigkeitsgrenzen	14
2.3.3 Ultra-Wideband	16
2.4 Fehlerquellen	17
2.4.1 Mehrwegeausbreitung	18
2.4.2 Einfluss der geometrischen Konstellation	19
<b>Kapitel 3 UWB Echtzeit Lokalisierungssystem</b>	<b>22</b>
3.1 Systemübersicht	22
3.2 Stationäre Systemkomponenten	24
3.2.1 Digitales Speicheroszilloskop als SDR Empfänger	24
3.2.2 UWB Sende- und Empfangsantennen	25
3.2.3 Mehrbenutzerfähigkeit	27
3.3 Mobile Systemkomponenten	27
3.3.1 UWB-Sendesignal	28
3.3.2 UWB Pulsgenerator	29

---

3.4	Signalverarbeitung	33
3.4.1	Signalverarbeitung im Zeitbereich	33
3.4.2	Signalverarbeitung im Frequenzbereich	35
3.4.3	Interpolation im Frequenzbereich	36
3.4.4	Laufzeitschätzung	37
<b>Kapitel 4</b>	<b>Vergleichsmessungen UWB/WLAN</b>	<b>40</b>
4.1	Messaufbau	40
4.1.1	Messaufbau UWB	40
4.1.2	Messaufbau WLAN	41
4.1.3	Referenzsystem und Verifikation der Messaufbauten	43
4.1.4	Autokorrelationsfunktionen der Sendesignale	44
4.2	Metriken	45
4.3	Eindimensionale Messungen	46
4.3.1	Entfernungsschätzung mit UWB und WLAN 1D	46
4.3.2	Entfernungsdifferenzschätzung mit UWB und WLAN 1D	48
4.4	Dreidimensionale Messungen	50
4.4.1	Entfernungsschätzung mit UWB und WLAN 3D	51
4.4.2	Entfernungsdifferenzschätzung mit UWB und WLAN 3D	53
4.4.3	Positionsschätzung mit UWB und WLAN 3D	55
4.5	Einfluss der geometrischen Konstellation	58
4.6	Non Line of Sight Messungen	59
4.6.1	Bürotrennwand zwischen Mobilteil und Antenne 4	60
4.6.2	Absorberwand zwischen Mobilteil und Antenne 2	63
4.7	Schlussfolgerungen	66
<b>Kapitel 5</b>	<b>Kombinierte AOA/TWR Lokalisierung</b>	<b>68</b>
5.1	Lokalisierungsprinzip	68
5.1.1	2D AOA/TWR Ortung	69
5.1.2	Vergleich TDOA	73
5.2	Messaufbau	74
5.2.1	Signalverarbeitung AOA/TWR	74
5.3	Messergebnisse	75
5.3.1	AOA/TWR Schätzung	77

---

5.3.2	Positionsschätzung	79
5.3.3	Einfluss des Antennenabstandes	80
<b>Kapitel 6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>81</b>
	<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>83</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>85</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>88</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>89</b>
	<b>Schrifttumsverzeichnis</b>	<b>95</b>
	<b>Lebenslauf</b>	<b>97</b>

# Abkürzungsverzeichnis

1D	Eindimensional
2D	Zweidimensional
3D	Dreidimensional
AOA	Angle of Arrival
AWGN	Additive White Gaussian Noise
BPM	Bi Phase Modulation
CDMA	Code Division Multiple Access
CRLB	Cramér Rao Lower Bound
DFT	Discrete Fourier Transformation
DOP	Dilution of Precision
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service
EIRP	Equivalent Isotropic Radiated Power
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
EUWB	European Ultra-Wideband
FCC	Federal Communications Commission
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FDZP	Frequency Domain Zero Padding
FFT	Fast Fourier Transformation
FIR	Finite Impulse Response
GDOP	Geometric Dilution of Precision
GLONASS	Globalnaja Nawigazionnaja Sputnikowaja Sistema
GNSS	Global Navigation Satellite Systems
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile Communications
HDOP	Horizontal Dilution of Precision
ID	Identifikationsnummer
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IFFT	Inverse Fast Fourier Transformation
IKT	Institut für Kommunikationstechnik

---

INS	Inertial Navigation Systems
ISM	Industrial, Scientific and Medical
LBS	Location Based Services
LNA	Low Noise Amplifier
LOS	Line of Sight
MIC	Ministry of Internal Affairs and Communications
NLOS	Non Line of Sight
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplex
OLOS	Obstructed Line of Sight
PULSERS	Pervasive Ultra-wideband Low Spectral Energy Radio Systems
RFID	Radio Frequency Identification
RMS	Root Mean Square
RTLS	Real Time Locating Systems
SDR	Software Defined Radio
SNR	Signal to Noise Ratio
SRD	Step Recovery Diode
TCP/IP	Transmission Control Protocol and Internet Protocol
TDMA	Time Division Multiple Access
TDOA	Time Difference of Arrival
TOA	Time of Arrival
TWR	Two Way Ranging
U.C.A.N.	Ultra-Wideband Concepts for Ad-hoc Networks
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
UWB	Ultra-Wideband
VDOP	Vertical Dilution of Precision
WLAN	Wireless Local Area Network