

# Anwendung von Real Time Locating Systems (RTLS) in der Sicherheitstechnik – Verfahren und Technologien von Bluetooth Low Energy (BLE) bis Ultra Wide Band (UWB)

Prof. Dr.-Ing. Christof Röhrig, FH Dortmund, Intelligent Mobile Systems Lab  
M.Sc. Julian Lategahn, FH Dortmund, Intelligent Mobile Systems Lab  
M.Sc. Marcel Müller, FH Dortmund, Intelligent Mobile Systems Lab  
Raoul Kolibius, FH Dortmund, Intelligent Mobile Systems Lab

## 1. Einleitung

Die Positionsbestimmung von Personen und Objekten ist die Basis unterschiedlichster Applikationen der Sicherheitstechnik. So unterschiedlich wie die Anwendungen sind auch die Verfahren und Technologien, die dabei zum Einsatz kommen. Für den Außenbereich werden häufig Satellitenortungssysteme wie GPS eingesetzt. Im Innenraumbereich sind diese aufgrund der Signalabschwächung in der Regel nicht nutzbar, hier kommen verschiedene „Real Time Location Systems (RTLS)“, auch Echtzeitlokalisierungs- oder Echtzeitortungssysteme genannt, auf Basis von Funkortungssystemen zum Einsatz [1]. Ein RTLS verwendet Funksignale für die Ortung und Verfolgung von Ressourcen in Echtzeit. Während früher Wireless LAN und proprietäre Funktechnologien dominierten, werden heutzutage zunehmend iBeacon- (Bluetooth Low Energy Technologie) oder standardisierte UWB-Technologien eingesetzt [1]. Die Messung von Signallaufzeiten mit IEEE 802.15.4-UWB-Funknetzen stellt eine relativ neue Technologie dar, um die Position von Objekten und Personen im Submeterbereich bestimmen zu können. Im Folgenden werden beispielhaft Verfahren und Technologien beschrieben, die am *Intelligent Mobile Systems Lab (IMSL)*<sup>1</sup> der FH Dortmund untersucht und in RTLS-Projekten eingesetzt werden.

## 2. Real Time Location Systems (RTLS)

Die genaue Ortsbestimmung von Personen und Objekten in Echtzeit mittels RTLS gewinnt zunehmend an Bedeutung. Im Kontext eines RTLS versteht man unter Echtzeit die Verfügbarkeit der Positionsinformation innerhalb einer vorgegebenen Zeit, die für die Steuerung nachgelagerter Prozesse ohne Verzögerung notwendig ist [1]. Verschiedene Typen von RTLS-Technologien werden in unterschiedlichen Marktsegmenten angewendet, wie z.B. im Gesundheitswesen, in der Produktion, der Logistik und der Sicherheitstechnik.

Ein wichtiges Unterscheidungsmerkmal liegt darin, wo die Positionsinformation vorliegt:

- Bei der *Selbstlokalisierung* oder Eigenortung wird die Position in dem zu ortenden Objekt selbst bestimmt. Ein typisches Beispiel dafür ist die Navigation mittels GPS, bei der ein GPS-Empfänger aus den empfangenen GPS-Signalen seine Position selbst bestimmt. Wird die Position außerhalb des Objekts benötigt, muss diese mittels Kommunikationstechnik weitergegeben werden.
- Bei der *Fremdortung* wird die Position eines Objektes von außen bestimmt. Notwendiger Bestandteil der Fremdortung ist die Identifikation des Objektes, welches geortet wird.

---

<sup>1</sup><http://www.ims1.fh-dortmund.de>

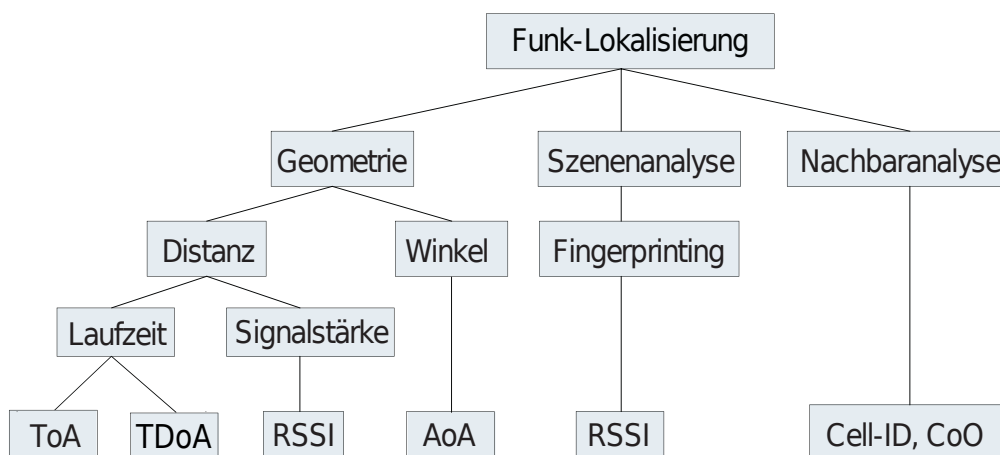
Gerade in der Sicherungstechnik ist die Fremddortung von Objekten und Personen ein wichtiges Anwendungsgebiet von RTLS.

## 2.1. Lokalisierungsverfahren

Für die Bestimmung der Position mittels Funktechnologien existieren unterschiedliche Verfahren:

- *Nachbarschaftsanalyse (Proximity)*: Es wird untersucht, ob sich Objekte mit bekannten Positionen in der Nachbarschaft befinden (z.B. Funkzellenortung).
- *Szenenanalyse*: Es werden Merkmale der aktuellen Position mit Merkmalen einer Karte verglichen (z.B. *Fingerprinting*).
- *Geometrische Analyse*: Es werden Winkel oder Abstandsinformationen zu Landmarken mit bekannten Positionen genutzt (z.B. ToA, TDoA, AoA).
- *Koppelnavigation (Dead Reckoning)*: Es werden relative Bewegungsinformationen erfasst und beginnend von einem bekannten Startpunkt aufsummiert (z.B. Odometrie, *Pedestrian Dead Reckoning*).

Welches Verfahren angewendet werden kann, hängt direkt von den Informationen ab, die für die Positionsbestimmung zur Verfügung stehen (siehe **Bild 1**). Die Nachbarschafts-



**Bild 1:** Techniken zur Funklokalisierung

analyse nutzt Verbindungsinformationen, die fast in jedem Funknetz vorhanden sind. Die erreichbare Genauigkeit hängt bei diesem Verfahren mit der Granularität und Größe der Zellen im verwendeten Funknetz zusammen. Bei diesem, auch *Cell of Origin* (CoO) genannten, Verfahren wird die Position anhand der mit dem mobilen Objekt assoziierten ortsfesten Station bestimmt. Jeder ortsfesten Station, und damit auch der Zelle, ist eine eindeutige Identifizierung (Cell-ID) zugeordnet. Die Positionen der ortsfesten Stationen müssen bekannt sein. Zur Nachbarschaftsanalyse zählt auch die Ortung von Objekten auf RFID-Böden, wie sie vom IMSL im Projekt MULTILOK<sup>2</sup> entwickelt wird. Ziel dieses Projektes ist die Multisensordatenfusion von RFID-Messungen mit Daten aus MEMS-Sensoren, wie sie in aktuellen Smartphones Verwendung finden.

RTLS, die eine Szenenanalyse einsetzen, nutzen die empfangene Signalstärke RSSI (*Received Signal Strength Indicator*), um *Fingerprinting* durchzuführen. Ein Fingerprin-

<sup>2</sup><http://www.fh-dortmund.de/multilok>

ting-Verfahren verwendet eine Radio-Map, in der die Zuordnung von Signalstärken zur Messposition abgespeichert wird. Das Verfahren ist in zwei Phasen unterteilt. In der Kalibrierungsphase werden die empfangenen Signalstärken an vorher definierten Positionen in der Radio-Map abgespeichert. In der Lokalisierungsphase bewegt sich das zu lokalisierende Objekt in der gleichen Umgebung, dabei werden die aktuell gemessenen Signalstärkewerte mit denen aus der Radio-Map verglichen. Metriken für den Vergleich der Signalstärkewerte sind z.B. der Euklidische Abstand oder die Delaunay-Triangulation mit konstanten Signalstärkekennlinien [2]. Der größte Nachteil dieser Verfahren ist der manuelle Aufwand, die Radio-Map in der Kalibrierungsphase zu erstellen.

Die geometrische Analyse wird von RTLS genutzt, um mittels geometrischer Verfahren wie Triangulation oder Trilateration eine Positionsbestimmung durchzuführen. Mittels Funk können durch Laufzeitmessungen (ToA) die Distanz zwischen Sender und Empfänger (Ranging, Lateration) und der Einfallswinkel von Signalen beim Empfänger (AoA) gemessen werden. Weiterhin kann über eine Differenzzeitmessung (TDoA) eine Hyperbelortung durchgeführt werden. Eine Distanzbestimmung ist weiterhin über die empfangene Signalstärke (RSSI) möglich. Die Distanz wird über das logarithmische Distanzverlustmodell berechnet. Dabei wird die Freiraumdämpfung berücksichtigt, die besagt, dass die Signalstärke mit der Distanz zum Sender quadratisch abnimmt.

Sind die Distanzen zu mindestens drei ortsfesten Knoten bestimmt, kann mittels Trilateration eine Position im zweidimensionalen Raum berechnet werden. Im Gegensatz zur Triangulation werden bei der Trilateration nur die Entfernungen zu den ortsfesten Knoten benötigt. Dieses Verfahren ist dadurch deutlich leichter zu implementieren, da die Anforderungen an eine Hardware zur Distanzmessung, im Vergleich zur technisch aufwendigen Bestimmung des Einfallswinkels eines empfangenen Signals, deutlich geringer sind.

In RTLS werden häufig mehrere der oben beschriebenen Verfahren kombiniert. So kann beispielsweise die Hyperbelortung mittels TDoA mit dem Verfahren des *Pedestrian Dead Reckoning* (PDR) kombiniert werden, um die Genauigkeit der Personenortung zu erhöhen [3]. Unter PDR versteht man die Koppelnavigation von Personen mittels Inertialsensorik und Schritterkennung.

### 3. Bluetooth Low Energy (BLE) und iBeacon

iBeacon ist eine von Apple Inc. eingeführte Technologie, die auf Bluetooth Low Energy (BLE) basiert [4]. BLE, auch Bluetooth Smart genannt, ist ein optionaler Bestandteil von Bluetooth 4.0. BLE ist als Single-Chip-Lösung für Kleingeräte verfügbar. Im Vergleich zum klassischen Bluetooth hat BLE einen deutlich geringeren Stromverbrauch, wodurch die Batterien in den Modulen nur sehr selten ausgewechselt werden müssen. Wie auch das klassische Bluetooth sendet BLE im 2,4-GHz-Bereich. Anders als beim klassischen Bluetooth werden bei BLE maximal 1 MBit/s übertragen. BLE wird von aktuellen Smartphones unterstützt. Das Betriebssystem Android unterstützt BLE ab der Version 4.3. Apples iOS unterstützt BLE seit Version 7 auf iPhone 4S und neueren Geräten. BLE wird weiterhin auf aktuellen Nokia Smartphones mit Windows Phone 8 unterstützt.

Als Beacons bezeichnet man kleine BLE-Sender, die in der Umgebung platziert werden und in festen Zeitintervallen ihre Identität (UUID, Major und Minor) als Broadcast aussenden (siehe **Tabelle 1**). Beacons ähneln damit aktiven RFID-Tags, die ihre ID auch in regelmäßigen Abständen aussenden können. Sie erreichen eine Reichweite von bis zu 30 Metern. Kommt ein Empfänger, wie beispielsweise ein Smartphone, in die Reichweite eines

|       |          |                           |
|-------|----------|---------------------------|
| UUID  | 16 Bytes | definiert die Applikation |
| Major | 2 Bytes  | definiert eine Region     |
| Minor | 2 Bytes  | definiert eine Subregion  |

**Tabelle 1:** Werte zur Bestimmung der Identität eines Beacons (siehe [4])

Senders, kann dieser die Identität des Senders erkennen und die empfangene Signalstärke (RSSI) bestimmen. Der RSSI-Wert kann dazu genutzt werden, die Nähe (*Proximity*) zum Sender abzuschätzen. Der aus der Signalstärke ermittelte Abstand vom Empfänger zum Beacon wird von Apple lediglich in vier Kategorien eingeteilt: *Unknown* (unbekannt), *Immediate* (bis 50 cm), *Near* (bis 3 m) oder *Far* (bis 30 m). Wird der RSSI-Wert jedoch direkt ausgelesen, ist auch eine feinere Distanzbestimmung möglich.

Der Empfänger kann den RSSI-Wert nutzen, um eine Positionsbestimmung durchzuführen. Dabei können zwei verschiedene Verfahren genutzt werden: Fingerprinting und Abstandsschätzung. Liegen RSSI-Werte zu mindestens drei Beacons vor, kann mittels Abstandsschätzung und Trilateration eine Position in der Ebene (x, y) bestimmt werden. Das Fingerprinting (siehe Abschnitt 2.1) erfordert einen hohen manuellen Aufwand für die Erstellung der Radio-Map, verspricht jedoch eine höhere Genauigkeit als die Trilateration.

Aufgrund ihrer Arbeitsweise eignet sich die Beacon-Technologie gut für die Selbstlokalisierung von Smartphones. Durch Entwicklung einer entsprechenden App können beispielsweise ortsbezogene Anwendungen sowie eine Indoor-Navigation realisiert werden. Dazu sind in der Umgebung Beacons an bekannten Positionen anzubringen. Das Smartphone bestimmt dann aus den empfangenen IDs, den dazugehörigen RSSI-Werten und den Positionen der Beacons seine eigene Position.

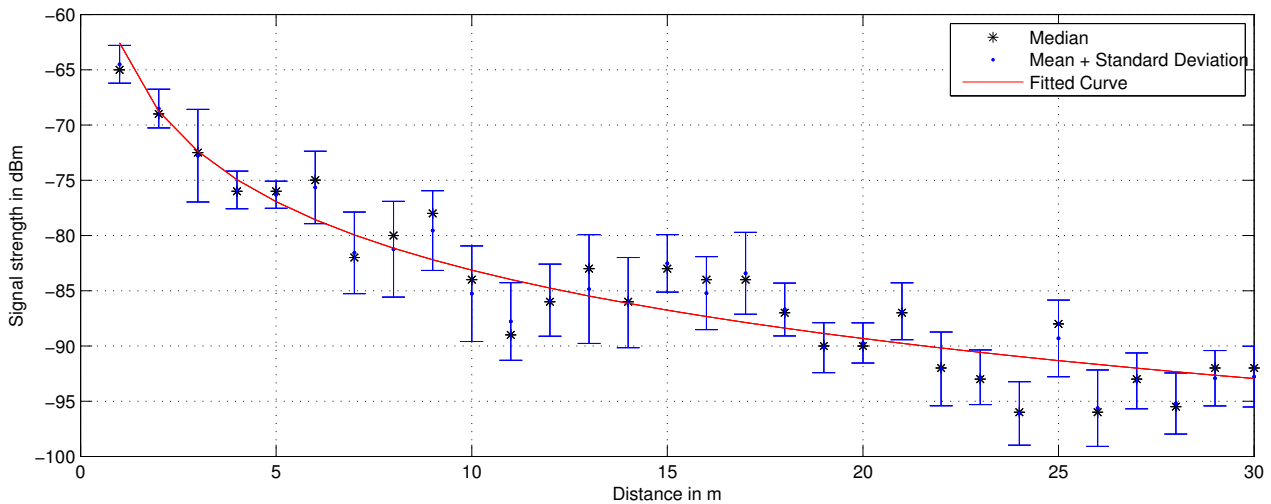
Die Beacon-Technologie kann jedoch auch angewendet werden, um Objekte oder Personen zu orten. Dazu muss jedes zu ortende Objekt mit einem Beacon ausgestattet werden. Das Beacon übernimmt dann die Aufgabe des zu ortenden Tags. Die Umgebung wird mit BLE-Empfängern ausgestattet und übernimmt die Aufgabe des Ortungssystems. Aus den empfangenen IDs der Beacons und den RSSI-Werten wird z.B. mittels Abstandsschätzung und Trilateration die Position der mobilen Beacons ermittelt (Fremdortung).

Als Anwendung einer Fremdortung von Personen mit BLE-Technologie wurde im Rahmen des Projektes „Open iCare Assistant“<sup>3</sup> eine Sturzerkennung entwickelt [5]. Die zu überwachende Person trägt ein BLE-Tag, welches mit Hilfe von Inertialsensoren Stürze erkennen kann. Das Tag sendet regelmäßig Signale aus, welche von BLE-Empfängern in der Umgebung empfangen werden können. Im Falle einer Sturzdetektion wird ein Notfallsignal als Broadcast ausgesendet und von den BLE-Empfängern in der Umgebung empfangen. Die gestürzte Person kann so geortet und Hilfe direkt an den Unfallort gelenkt werden.

### 3.1. Experimentelle Untersuchungen

Zur Bestimmung der Genauigkeit der Distanzschätzungen aus den RSSI-Werten wurden eigene Messungen durchgeführt. Es wurden mittels Android-Smartphone RSSI-Messungen im Abstand von 1 bis 30 m zu einem Beacon in einem Raster von 1 m durchgeführt und aufgezeichnet. **Bild 2** zeigt die Messungen mit den zeitlichen Streuungen (Standardabweichungen) an. Die Messwerte wurden als Basis für die Bestimmung der Parameter des

<sup>3</sup><http://www.fh-dortmund.de/icare>



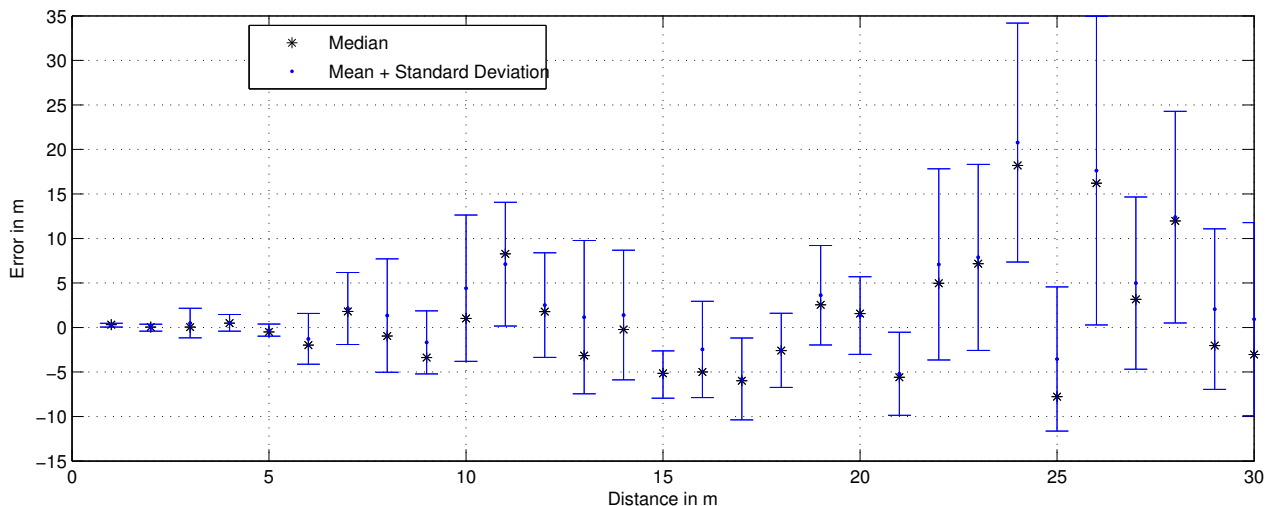
**Bild 2:** Bestimmung der Modellparameter über Referenzmessungen

*Log-Distance Path Loss Model* genutzt, welches die empfangene Signalstärke

$$P_{Rx}/\text{dBm} = P_0/\text{dBm} - 10\gamma \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) \quad (1)$$

als Funktion der Distanz  $d$  und weiteren Modellparametern beschreibt. In der Funktion ist  $P_0$  die Signalstärke bei Distanz  $d_0$  und  $\gamma$  der *Path Loss Exponent* mit dem eine Anpassung an die Umgebung durchgeführt werden kann. Mit Hilfe der Methode der kleinsten Fehlerquadrate wurden die Modellparameter bestimmt. Die daraus abgeleitete Funktion ist als Kurve in Bild 2 dargestellt. Im Mittel kann Modellfunktion (1) die Signalstärke approximieren, die Abweichungen bei geringen RSSI-Werten und großen Distanzen sind jedoch erheblich.

**Bild 3** stellt die Streuung des Modellfehlers, welcher anhand der Messungen und Funktion

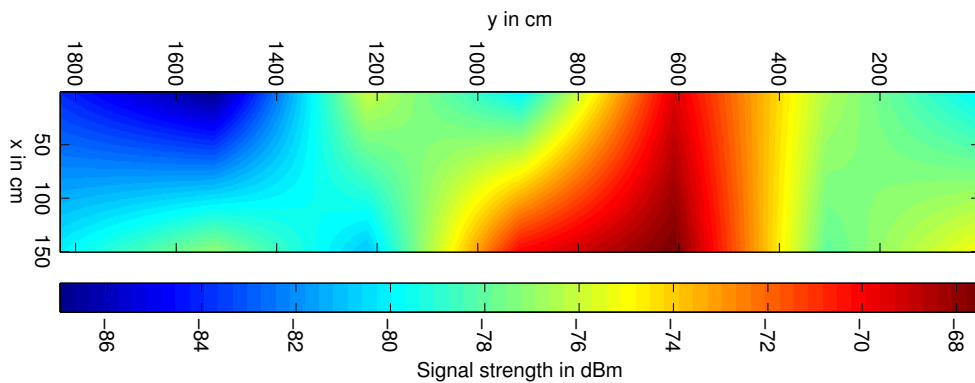


**Bild 3:** Fehler in der Distanzbestimmung über das Log-Distance Path Loss Model

(1) ermittelt wurde, über die gemessene Distanz dar. Es ist deutlich zu erkennen, dass der Fehler mit zunehmender Distanz deutlich ansteigt.

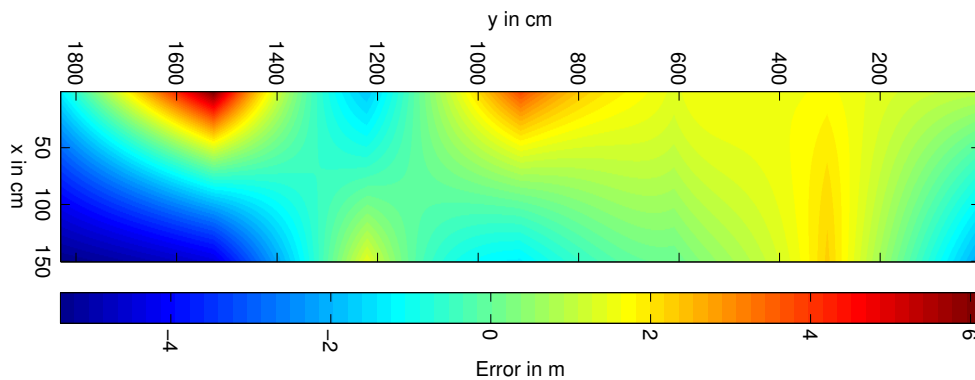
Um den Einfluss einer Büroumgebung auf die Messgenauigkeit zu ermitteln, wurden Messungen in einem Büroflur durchgeführt. **Bild 4** zeigt die Heat-Map mit der empfangenen Signalstärke in einem Flur. Das Beacon wurde an der Wand über einer Tür an Position

$x = 600 \text{ cm}$ ,  $y = 0 \text{ cm}$  angebracht. Der RSSI-Verlauf entspricht aufgrund der Mehrwegeausbreitung der Signale nicht dem Modell der idealen Dämpfung im Freiraum. Der aus



**Bild 4:** Karte mit den Signalstärken innerhalb eines Flurs

der Signalstärke bestimmte Abstand zum Beacon unterliegt durch die nicht homogene Signalausbreitung einem zusätzlichen Fehler. Aus den Signalstärken wurde mittels Modellfunktion (1) der Abstand zum Beacon bestimmt. Der sich daraus ergebende Fehler in der Distanzschätzung ist in **Bild 5** dargestellt.



**Bild 5:** Fehler der Abstandsbestimmung innerhalb eines Flurs

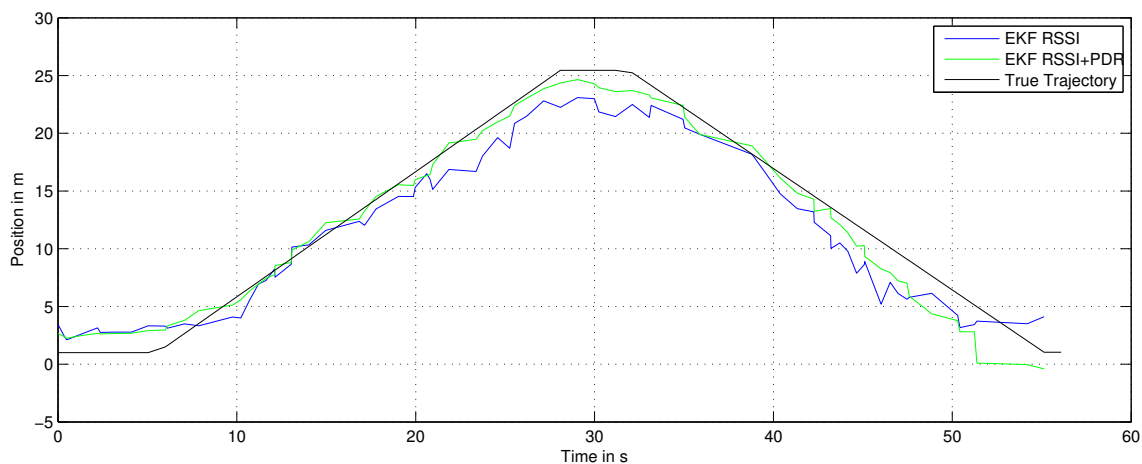
### 3.2. Topologische Positionsbestimmung mittels BLE

Durch Messung der empfangenen Signalstärke von mindestens drei ortsfesten Beacons kann die Position des Empfängers auf einer Ebene ( $y, x$ ) bestimmt werden. Dazu kann die Distanzschätzung mittels Dämpfungsmodell und Trilateration verwendet werden. Die experimentellen Ergebnisse aus dem vorherigen Abschnitt zeigen jedoch, dass nur in der Nähe der Beacons eine Positionsbestimmung mit geringen Fehlern möglich ist. Eine weitere Möglichkeit besteht in der Nutzung von Fingerprinting. Der manuelle Aufwand zur Erstellung der Radio-Map ist jedoch hoch. Zudem muss bei Änderungen in der Umgebung die Radio-Map neu erstellt werden.

Eine völlig andere Möglichkeit der Positionsbestimmung ist die Lokalisierung mittels topologischer Karten. In der klassischen Lokalisierung wird der Ort in Koordinaten eines lokalen oder georeferenzierten globalen Koordinatensystems bestimmt. Diese Position wird für die Navigation anschließend auf eine topologische Karte projiziert, welche im gleichen

Koordinatensystem referenziert sein muss. In einer topologischen Karte werden die Wege als gewichtete Kanten und die Weggabelungen/Kreuzungen als Knoten eines Graphen repräsentiert. Die Navigation auf dem kürzesten Weg kann in der topologischen Karte einfach mit Suchalgorithmen durchgeführt werden. Bei der Navigation im Außenbereich stehen dafür beispielsweise Google Maps oder OpenStreetMap als Karten zur Verfügung. Für die Innenraumnavigation müssen Karten oftmals neu erstellt und aufwändig mit einem Koordinatensystem referenziert werden.

Bei der topologischen Lokalisierung wird weder bei der Positionsbestimmung noch bei der Kartenerstellung ein Koordinatensystem benötigt. Grundidee der topologischen Lokalisierung ist die Positionsbestimmung auf den Kanten der topologischen Karte als Abstand zum nächsten Knoten. Diese Form der Lokalisierung entspricht der natürlichen Form der menschlichen Navigation mittels Landmarken, bei der auch keine exakte Positionsbestimmung in einem Koordinatensystem erfolgt. Im Rahmen des Forschungsprojektes TopLok<sup>4</sup> wird die topologische Lokalisierung am IMSL untersucht. Die topologische Lokalisierung eignet sich besonders gut in strukturierten Gebäuden, in denen die Laufwege durch die Gebäudestruktur weitgehend vorgegeben werden. **Bild 6** zeigt die Positionbestimmung in



**Bild 6:** Fehler der Abstandsmessung BLE und PDR

einer topologischen Karte. Die Grafik vergleicht dabei die reine BLE-Lokalisierung mit einer Fusionierung von BLE und PDR. Zur Positionsbestimmung wird dabei ein *Extended Kalman Filter* (EKF) verwendet.

#### 4. Laufzeitbasierte Verfahren

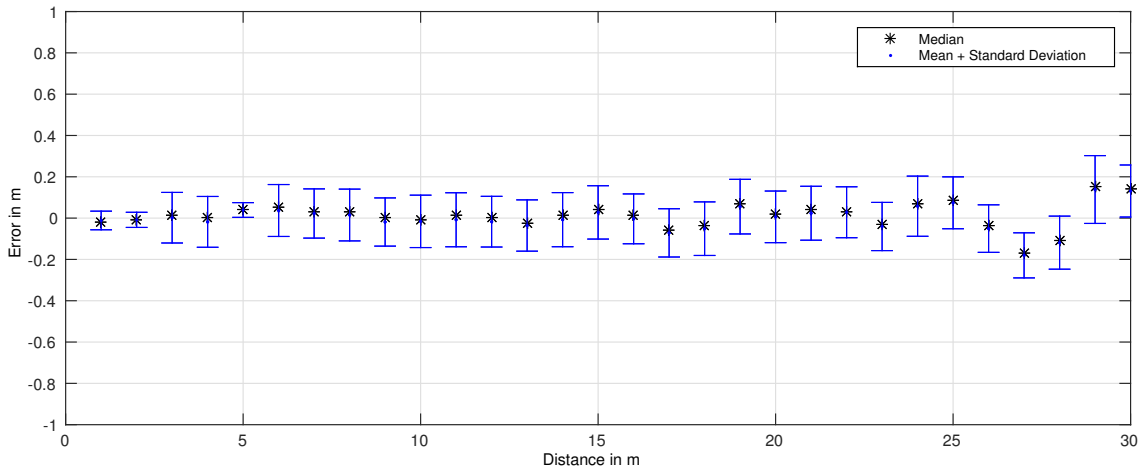
Laufzeitbasierte Verfahren zur Positionsbestimmung versprechen eine höhere Genauigkeit als Verfahren, die mittels RSSI arbeiten. Neben einer Reihe von proprietären Technologien gab es in den letzten Jahren auch Bestrebungen zur Standardisierung. Aufbauend auf dem Funkstandard IEEE 802.15.4 wurden als neue *Physical Layer Ultra Wide Band* (UWB) und *Chirp Spread Spectrum* (CSS) in IEEE 802.15.4a definiert, um eine Genauigkeit in der Distanzmessung zwischen zwei Knoten von unter 1 m zu ermöglichen [6]. IEEE 802.15.4a wurde in den aktuellen Standard IEEE 802.15.4-2011 integriert [7]. CSS wird von der Firma Nanotron Technologies<sup>5</sup> im nanoLOC-System zur Distanzmessung und Kommunikation eingesetzt. Die nanoLOC-Technologie ist seit mehreren Jahren kommerziell erhältlich

<sup>4</sup><http://www.fh-dortmund.de/toplok>

<sup>5</sup><http://www.nanotron.de>

und für verschiedene Anwendungsfälle untersucht und eingesetzt worden [8–11]. Neben dem reinen Ranging sind auch TDoA-Lokalisierungen möglich [12, 13, 3]. Zur Erhöhung der Genauigkeit können die TDoA-Daten mit weiteren Sensordaten wie RSSI [13] und Inertialsensoren [3] fusioniert werden.

Seit November 2013 ist ein IEEE 802.15.4-UWB System von DecaWave Ltd kommerziell verfügbar. Der Hersteller verspricht eine Genauigkeit von 10 cm sowohl im Außen- wie im Innenbereich. Am IMSL wurden Messungen durchgeführt, die die Angaben des Herstellers weitgehend bestätigen. **Bild 4** zeigt den Positionsfehler in den Messungen, welche im



**Bild 7:** Fehler der Abstandsmessung mittels IEEE 802.15.4-UWB

Abstand von 1 bis 30 m zwischen zwei UWB-Knoten in einem Raster von 1 m durchgeführt wurden. Wie bei allen Laufzeitmessungen nimmt der absolute Fehler mit zunehmenden Abstand nicht zu. IEEE 802.15.4-UWB ist damit für Anwendungen geeignet, die eine hohe Genauigkeit über den gesamten Messbereich erfordern.

## 5. Zusammenfassung und Ausblick

Der Beitrag beschreibt aktuelle Verfahren und Technologien, die in RTLS Anwendung finden. Die BLE-Technologie bietet mittels RSSI-Messung eine einfache Möglichkeit, Smartphones zu lokalisieren. Aufgrund der Einschränkungen in der Messgenauigkeit müssen jedoch intelligente Algorithmen verwendet werden, die weitere Sensordaten fusionieren, um eine Positionsgenauigkeit zu erreichen, die für die meisten Anwendungen akzeptabel ist. Die UWB-Technologie bietet eine hohe Ortungsgenauigkeit, ist jedoch nicht zu aktuellen Smartphones kompatibel. Beide Technologien finden in unterschiedlichen Szenarien ihre Anwendung. Durch die zunehmende Verbreitung von Smartphones und die daraus resultierende kostengünstige Verfügbarkeit von Funkkomponenten und MEMS-Sensoren finden RTLS zunehmend neue Anwendungsfelder, auch in industriellen Umgebungen.

## Literatur

- [1] *RTLS – Real Time Locating Systems, White Paper des AIM, Version 2.1.*
- [2] RÖHRIG, C. und F. KÜNEMUND: *WLAN based Pose Estimation for Mobile Robots*. In: *Proceedings of the 17th IFAC World Congress*, Seiten 10433–10438, Seoul, Korea, Juli 2008.



- [3] LATEGAHN, J., M. MÜLLER und C. RÖHRIG: *Robust Pedestrian Localization in Indoor Environments with an IMU Aided TDoA System*. In: *Proceedings of the 5th International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation 2014 (IPIN 2014)*, Busan, Korea, Oktober 2014.
- [4] APPLE INC.: *Getting Started with iBeacon*. Version 1.0, 2. Juni 2014.
- [5] BASTERT, T., F. KÜNEMUND und C. RÖHRIG: *Development of a Fall Detection System and Comparison with Commercial Systems for Home Care*. In: *Proceedings of the 48th DGBMT Annual Conference (BMT 2014)*, Seiten S462 – S465, Hannover, Germany, Oktober 2014.
- [6] SAHINOGLU, Z. und S. GEZICI: *Ranging in the IEEE 802.15.4a Standard*. In: *Proceedings of the IEEE Annual Wireless and Microwave Technology Conference, WAMICON '06*, Seiten 1–5, Clearwater, Florida, USA, Dezember 2006.
- [7] *802.15.4-2011 - IEEE Standard for local and metropolitan area networks - Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)*. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, USA, 2011.
- [8] RÖHRIG, C. und M. MÜLLER: *Indoor Location Tracking in Non-line-of-Sight Environments Using a IEEE 802.15.4a Wireless Network*. In: *Proceedings of the 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2009)*, Seiten 552–557, St. Louis, USA, Oktober 2009.
- [9] MÜLLER, M., L. TELLE, J. LATEGAHN, S. GANSEMER, U. GROSSMANN und C. RÖHRIG: *Technologien zur drahtlosen Positionsbestimmung – Vergleich und Demonstration von WLAN Positionierung und nanoLOC Selbstlokalisierung*. In: *Tagungsband 12. Wireless Technologies Kongress*, Seiten 348–357, Bochum, Deutschland, September 2010.
- [10] RÖHRIG, C., J. LATEGAHN, M. MÜLLER und L. TELLE: *Global Localization for a Swarm of Autonomous Transport Vehicles Using IEEE 802.15.4a CSS*. In: *Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2012 (IMECS 2012)*, Seiten 828–833, Hong Kong, März 2012.
- [11] LOTTIS, A., D. HESS, T. BASTERT und C. RÖHRIG: *Safe@Home – A Wireless Assistance System with Integrated IEEE 802.15.4a Localisation Technology*. In: *Proceedings of the 7th IEEE International Workshop on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS'2013)*, Seiten 461–467, Berlin, Germany, September 2013.
- [12] MÜLLER, M., J. LATEGAHN und C. RÖHRIG: *Pedestrian Localization using IEEE 802.15.4a TDoA Wireless Sensor Network*. In: *Proceedings of the 1st IEEE International Symposium on Wireless Systems within the Conferences on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS-SWS'2012)*, Seiten 23–27, Offenburg, Germany, September 2012.
- [13] LATEGAHN, J., M. MÜLLER und C. RÖHRIG: *TDoA and RSS based Extended Kalman Filter for Indoor Person Localization*. In: *Proceedings of the 78th Vehicular Technology Conference (VTC2013-Fall)*, Las Vegas, USA, September 2013.