

# Untersuchung der 5G Indoor-Lokalisierung in der Intralogistik

Exploring 5G indoor localization in intralogistics

Ali Bozkurt<sup>1</sup>  
Kai Schneider<sup>2</sup>  
Freyja Schneider<sup>3</sup>  
Stefan Loy<sup>4</sup>  
Jan-Erik Jung<sup>3</sup>  
Robert Schulz<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institut für Fördertechnik und Logistik, Universität Stuttgart

<sup>2</sup>NAiSE GmbH

<sup>3</sup>Balluff GmbH

<sup>4</sup>Pilz GmbH und Co. KG

Die Lokalisierung spielt in der Logistik, beispielsweise für die Steuerung von Materialflusssystemen oder für die Rückverfolgbarkeit von Materialflüssen entlang der gesamten Wertschöpfungskette, eine bedeutende Rolle. In der Vergangenheit wurden für die Lokalisierung in der Logistik verschiedene Technologien entwickelt. Die bekanntesten Lokalisierungs-Technologien sind neben dem Global Positioning System (GPS), die Ultrabreitband-Technologie (engl. ultra-wideband, UWB) oder Radiofrequenz-Identifikation (RFID), die in der Industrie bereits erfolgreich etabliert sind. Durch die fortschreitende Entwicklung und den Einsatz der 5G-Technologie, ergeben sich neue Möglichkeiten. Die 5G-Technologie ermöglicht, neben der schnellen Datenübertragung in Echtzeit, auch die Möglichkeit für Indoor-Lokalisierung. Dadurch bietet die 5G-Technologie die besten Voraussetzungen für den kombinierten Einsatz in Produktion und Logistik. Vor diesem Hintergrund wurde im Forschungscampus Active Research Campus for the Next Generation of Automobiles (ARENA2036) der Einsatz der 5G-Technologie in der Indoor-Lokalisierung in statischer und dynamischer Umgebung untersucht.

[Schlüsselwörter: Indoor-Lokalisierung, Lokalisierung, 5G, UWB, Intralogistik, Ladungsträger]

Localization plays an important role in logistics, for example, in the control of logistics systems or the tracking and tracing of materials along the supply chain. In the past, various technologies have been developed for localization in logistics. The best-known localization technologies are GPS, ultra-wideband (UWB), and RFID, which have already been successfully established in the industry. New opportunities are arising through

continuous improvements and the more widespread use of 5G technology. In addition to high-speed data communication in real-time, 5G technology offers the possibility of indoor localization. Thus, 5G technology provides the best conditions for its combined use in production and logistics. In this context, the use of 5G technology in indoor localization in static and dynamic environments was explored at the ARENA2036 research campus.

[Keywords: Indoor localization, 5G, UWB, Intralogistics, Load Carrier]

## 1 EINLEITUNG

Der Wirtschaftsstandort Deutschland ist derzeit einem zunehmenden Wettbewerbsdruck ausgesetzt. Um den Kundenanforderungen weiterhin gerecht zu werden und den Wirtschaftsstandort Deutschland weiter zu stärken, bedarf es nicht nur innovativer und hochwertiger Produkte, sondern auch effizienter Produktionssysteme, um im internationalen Wettbewerb bestehen zu können. Die Logistik hat an dieser Stelle eine bedeutende Rolle, denn eine agile und leistungsfähige Logistik ist der Wegbereiter für ein zukunftsorientiertes, effizientes und zuverlässiges Produktionssystem. Die im Zuge von Industrie 4.0 bereits fortgeschrittene Vernetzung von Produktionsanlagen und -prozessen führte auch auf Seiten der Intralogistik zu einem breiten Spektrum an neuen Chancen und Möglichkeiten. Dazu zählt unter anderem die zentrale oder dezentrale Steuerung von ganzen Materialflusssystemen, bei der manuelle Umschlag- und Kommissioniervorgänge und automatisierte Transporte in Echtzeit synchronisiert und koordiniert werden müssen. Um weitere Potenziale hinsichtlich der

Steuerung sowie der Rückverfolgbarkeit von Materialflüssen zu erschließen, gilt es, sämtliche Förder- und Lagertechnik bis hin zum einzelnen Ladungsträger zu vernetzen und lückenlos, entlang der gesamten Wertschöpfungskette, präzise zu orten. Eine Vielzahl an verschiedenen Technologien für die Lokalisierung wurden bereits entwickelt. Das Global Positioning System (GPS, dt. Globales Positionsbestimmungssystem) bietet beispielsweise für die Lokalisierung im Outdoor-Bereich eine geeignete und kostengünstige Möglichkeit. Jedoch ist es im Indoor-Bereich nur beschränkt einsatzfähig. Angesichts dessen gilt es, eine möglichst genaue und robuste Technologie für die Anwendung im Indoor-Bereich zu identifizieren, welche speziell im Kontext von Produktion und Logistik eingesetzt werden kann. [1].

Im Vergleich zu Outdoor-Bereichen, ist die Indoor-Umgebung durch zahlreiche Einflussfaktoren, wie z. B. Gebäudegeometrie (Wände, Deckenhöhe), Maschinen oder dynamische Hindernisse wie z. B. autonome Fahrzeuge und Menschen wesentlich komplexer [2]. Diese Faktoren beeinflussen die elektromagnetischen Wellen und führen durch Reflexionen zu einem sog. Mehrwegempfang, der sich zudem über die Zeit ständig ändert [3]. Überdies können andere Funk- und Drahtlosquellen als Stör- und Rauschquellen auftreten, die Genauigkeit der Ortung stark beeinflussen [2].

Eine Möglichkeit, um Informationen und Daten entlang der Wertschöpfungskette in Echtzeit zu sammeln, sowie Waren und Güter zu lokalisieren, stellt die 5G Technologie dar. Das vom Bundesministerium für Digitales und Verkehr geförderte Projekt „5G SynergieRegion“ hat das Ziel, neue 5G-Anwendungen für Smart City und Industrie 4.0 zu erforschen [4]. Im Bereich der Intralogistik sind die konkreten Anwendungsfälle von 5G schnelle Datenübermittlung und die Ortung. Die Ergebnisse und Erkenntnisse des Projektes werden in dieser Veröffentlichung vorgestellt.

## 2 STAND DER TECHNIK

### 2.1 ORTUNG UND LOKALISIERUNG

Wie bereits eingangs erwähnt, spielt die Lokalisierung in der Logistik eine bedeutende Rolle. Beispielsweise zur Steigerung der Transparenz und Effizienz von Prozessen und Gütern, sowie der Sicherheit von Personen [5]. Weiterhin ist die Lokalisierung der Wegbereiter für viele Internet of Things (IOT) Anwendungen [6]. Die Lokalisierung hat die Aufgabe, die physikalischen Koordinaten einer oder mehrere Sensorknoten oder der räumlichen Beziehungen zwischen Objekten oder Personen zu ermitteln [7]. Sie beinhaltet eine Reihe von Techniken und Mechanismen, die es einem Sensor ermöglichen, seinen eigenen Standort auf der Grundlage von Informationen, die aus der Umgebung des Sensors gewonnen werden, zu ermitteln [7].

Die Begriffe „Ortung“ und „Lokalisierung“ werden oftmals als Synonyme verwendet. Zudem wird in der Literatur zwischen Selbst- und Fremdontung unterschieden, wobei der Ort der Datenerhebung entscheidend ist. Bei der Selbstortung entstehen die Positionsdaten am Ort des zu ortenden Objektes, z. B. wie bei der klassischen Schiffsnavigation. Als Fremdontung wird bezeichnet, wenn die Position eines Objektes ausgehend von einem räumlich entfernten Beobachter bestimmt wird [8].

### 2.2 LOKALISIERUNGSTECHNOLOGIEN IN DER INTRALOGISTIK

In diesem Abschnitt werden verschiedene Technologien für die Lokalisierung vorgestellt. Diese unterscheiden sich anhand ihrer Genauigkeit und Zuverlässigkeit, ihrer Effektivität und Kosten, sowie durch ihre Universalität. Der Fokus liegt dabei auf Technologien, die sich bereits in der Logistik erfolgreich etabliert haben. Klassische Ortungstechnologien wie z. B. analoge Funknetze, Radar, Ultraschall- oder Infrarot-Ortung sowie akustische Ortung werden dabei nicht berücksichtigt.

#### 2.2.1 GLOBAL POSITIONING SYSTEM (GPS)

Das GPS ist das am weitesten verbreitete satellitengestützte Ortungssystem [2]. Es bietet durch die weltweite Satellitenkonstellation eine maximale Abdeckung und ermöglicht die Bestimmung der geografischen Position mit einer Genauigkeit von bis zu 5 Metern [9]. GPS wird in vielen Outdooranwendungen, beispielsweise für das Tracking & Tracing von Gütern in der Transportlogistik, eingesetzt [10]. Jedoch ist GPS nicht für den Einsatz im Indoor-Bereich geeignet, da eine Sichtverbindung (LOS, engl. Line-of-Sight) zwischen den Empfängern und den Satelliten in Innenräumen nicht möglich ist [2].

#### 2.2.2 RADIO-FREQUENCY-IDENTIFICATION (RFID)

Die Radio Frequency Identification (RFID) ist eine Technologie zur Datenübertragung von kleinen Datenmengen. Der Datenaustausch erfolgt über die Luft zwischen einem Datenträger (Transponder) und einer Lese-Schreibeinrichtung (Scanner) [11], [12]. Die Lokalisierung erfolgt beispielsweise beim Passieren eines Gates. Die Informationen werden anschließend überschrieben [11]. Bei den Transpondern wird zwischen aktiven und passiven Geräten unterschieden. Aktive und semi-aktive RFID-Transponder verfügen über eine eigene Energieversorgung mit zusätzlichen Sensoren für das Condition Monitoring. Sie werden beispielsweise für die Identifikation und Temperaturmessung im Medizinbereich eingesetzt. Passive RFID-Transponder haben einen breiten Anwendungsbereich und werden, aufgrund ihrer vergleichsweise geringen Kosten, primär zur Identifizierung und Verfolgung von Objekten in der Produktion und Logistik eingesetzt. [13], [11]

### 2.2.3 ULTRA-BREITBAND- TECHNOLOGIE (UWB)

Ultrabreitband (UWB, engl. Ultra-wideband) ist eine Funktechnologie für die Kommunikation mit hoher Bandbreite. UWB-Sender können, mit vergleichsweise geringer Sendeenergie, große Datenmengen übermitteln [14]. UWB eignet sich für die Indoor-Lokalisierung und ermöglicht eine Genauigkeit von bis zu 10 cm, auch unter schwierigen Bedingungen wie z. B. durch Wände und Geräte hindurch [13], [14]. Darüber hinaus kann es aufgrund seiner großen Bandbreite über 8,8 GHz Mehrweg-Signalanteile zeitlich genauer voneinander trennen [1]. Die UWB-Technologie hat in den vergangenen Jahren zunehmend an Aufmerksamkeit gewonnen und es sind bereits zahlreiche Lösungen verschiedener Anbieter am Markt verfügbar [1]. Die Lokalisierung basiert auf den Techniken Time Difference of Arrival (TDoA) und Time of Arrival (ToA, dt. Ankunftszeit), auf die im Abschnitt 3.1.13.1.1 näher eingegangen wird. Typische Anwendungsbereiche sind die Ortung von Betriebsmitteln und Ladungsträgern [15].

### 2.2.4 ZIGBEE

ZigBee ist ein Standard für Funknetze, welcher auf dem IEEE 802.15.4-Standard basiert. Es besteht aus einer physikalischen und einer MAC-Schicht [16]. Mithilfe von ZigBee können sich Geräte in einem Umkreis von 10 m – 100 m miteinander verbinden [8]. ZigBee ist für die energieeffiziente Anwendung in Sensornetzen, für drahtlose Schalter und anderen Szenarien ausgelegt [8], [16]. Anwendungsfälle für ZigBee als Lokalisierungstechnologie gibt es etwa bei der kontrollierten Überwachung in Krankenhäusern [8].

### 2.2.5 WI-FI

WiFi wurde 1997 nach dem Standard IEEE 802.11 verabschiedet und ist seither die meistgenutzte drahtlose Technologie [17]. WiFi wird häufig im 2.4GHz oder 5GHz Frequenzbereich verwendet. Durch seine Zuverlässigkeit und hohen Verfügbarkeit wird es mittlerweile auch zur Lokalisierung eingesetzt [18]. Ein weiteres Vorteil ist die hohe Reichweite von 100 bis 300 Metern [8], [19]. Zudem ist theoretisch eine Ortungsgenauigkeit von einem Meter möglich [19]. Allerdings hat WiFi, im Vergleich zu anderen Lokalisierungstechnologien (ZigBee, Bluetooth, LoRa-Wan), den höchsten Stromverbrauch [18]. Dadurch ist die Anwendung in mobilen Geräten sehr beschränkt [19]. Überdies hängt die Leistung, neben den Umgebungsbedingungen (Wände, Hindernisse etc.) stark von der Anzahl teilnehmender Geräte sowie Access Points im Netzwerk ab [18].

### 2.2.6 LONG RANGE WIDE AREA NETWORK (LORAWAN)

Das Long Range Area-Wide Network (LoRaWAN) ist ein Low-Power Wireless-Netzwerkprotokoll für die Kommunikation mit Frequenzen von 863 MHz bis 870 MHz (in

Europa). Dies ermöglicht eine Datenübertragung über Entfernungen von bis zu 15000 Metern [18], [20]. Die maximale Reichweite ist dabei abhängig von der Anzahl der Kommunikations-Knoten, die für die Abdeckung einer Fläche notwendig sind [18]. Der Hauptnachteil liegt in den nur kleinen Datenmengen, die aufgrund des niedrigen Frequenzbereichs übertragen werden können [18]. Im Vergleich zu GPS, bei der die Ortung in großen Lagerhallen und Fabriken nicht zufriedenstellen ist, kann durch LoRa eine zufriedenstellende Genauigkeit erreicht werden [21]. Die Ortung erfolgt nach dem Prinzip des Einfallswinkels (AoA, eng. Angle of Arrival), sowie Time Difference of Arrival (TDoA) [22]. In der Praxis wird LoRaWAN für die Kommunikation und Ortung zwischen Maschinen, Geräten und Ladungsträgern eingesetzt [23].

### 2.2.7 NARROWBAND-IOT

Das Narrowband-IOT (NB-IOT) basiert wie LoRa-Wan auf dem Low-Power Netzwerkprotokoll, bei der eine Vielzahl an IOT Applikationen mit großer Reichweite verbunden werden. Das Narrowband-IOT (NB-IOT) basiert wie LoRaWAN auf dem Low-Power Netzwerkprotokoll. Es zeichnet sich durch eine große Reichweite und geringen Stromverbrauch bei niedrigen Kosten aus, ermöglicht dafür aber nur eine geringe Bandbreite [24], [25], [26]. Das NB-IOT kann in bestehenden Systemen wie z. B. GSM (Global System for Mobile Communications) und LTE (Long-Term Evolution) eingesetzt werden [26]. In der Logistik wird die sowohl die LPWAN Technologie als auch NB-IOT für die Rückverfolgung von smarten Paletten und Ladungsträgers eingesetzt [27], [23].

### 2.2.8 BLUETOOTH LOW ENERGY

Bluetooth Low Energy (BLE) zeichnet sich durch den geringen Stromverbrauch und der hohen Verfügbarkeit von BLE-Transceivern in verschiedenen Geräten aus. Die Technologie wird bereits in vielen industriellen Anwendungen eingesetzt [19]. In der Lokalisierung ist eine hohe Genauigkeit durch Multilateration bzw. Radio Fingerabdruck möglich. Hierfür wird die empfangene Signalstärke (engl. Received Signal Strength Indicator, RSSI) zwischen Sender und Empfänger gemessen [19], [28]. Während einfaches BLE durch seine Sterntopologie nur Point-to-Point, sowie Single-Link Anwendungen ermöglicht, wird beim BLE ein Mesh-Ansatz durch einen einzelnen Knoten, die Kommunikation zwischen zahlreichen Teilnehmern möglich [29]. Selbst wenn die Geräte sich nicht in direkter Funk-Reichweite befinden ist eine Kommunikation möglich, hierfür reicht ein Relay-Knoten in der Nähe aus, welcher die notwendigen Daten entsprechend weiterleitet [30].

### 3 METHODIK

#### 3.1 LOKALISIERUNGSTECHNIKEN

Für die Evaluierung von 5G als Lokalisierungstechnologie für den Anwendungsfall der Intralogistik wurde UWB als Vergleichssystem ausgewählt. Wie in Abschnitt 2.2.3 dargestellt, handelt es sich hierbei um eine bereits etablierte Technologie, welche gut für das gewählte Szenario geeignet sein sollte.

##### 3.1.1 5G SYSTEM

Die Lokalisierung mittels 5G erfolgt nach den Methoden „Time of Arrival“ (ToA) und „Angle of Arrival“ (AoA). Bei der Methode Time of Arrival „ToA“, auch „Time-of-Flight“ genannt, wird die gemessene Signallaufzeit und die bekannte Signalgeschwindigkeit zur Berechnung der Entfernung zwischen dem Sender (Tag) und dem Empfänger genutzt [7].

Dabei wird häufig zwischen Einweg- und Zweiweg-Ankunftszeit-Methode unterschieden. Die Einweg-Ankunftszeit-Methode (a) misst die Ausbreitungszeit, d. h. die Differenz zwischen der Sendezeit und der Ankunftszeit des Signals. Bei der Zweiweg-Ankunftszeit-Methode (b) wird die Hin- und Rücklaufzeit eines Signals am Sendegerät gemessen. Im Folgenden beschränken wir uns auf die Einweg-Methode.

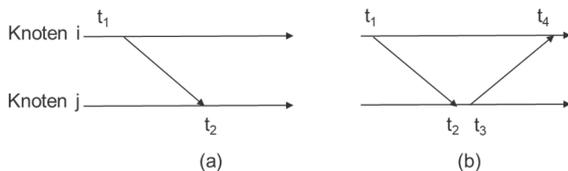


Abbildung 1. Einweg-ToA und Zweiweg-ToA Entfernungsmessverfahren

Die TDoA Methode, basiert auf der ToA-Differenzmessung zwischen dem Ziel und einem Paar von Feststationen [31]. Im Gegensatz zum ToA wird die Position anhand von Laufzeitunterschieden von einem Sender zu jeweils zwei Empfängern bestimmt. Die Empfänger müssen hierbei synchronisiert werden, d.h. die Messung des Signals muss an beiden Empfängern zum exakt selben Zeitpunkt erfolgen. [7]

Eine weitere Möglichkeit für die Lokalisierung ist die Richtung der Signalausbreitung anhand von Antennen zu bestimmen, wie z. B. bei der AoA-Methode. Hierbei wird der Winkel gemessen, mit welchem das gesendete Signal auf den Empfänger auftrifft. Dabei wird die Zeit- bzw. Phasendifferenz der Ankunft an den einzelnen Elementen des Antennen-Arrays zur Berechnung ausgenutzt. [7], [31]. Die AoA-Methode wird oftmals mit anderen Methoden wie z. B. ToA kombiniert, um den Standort mit nur einer Referenzstation zu bestimmen [31]. AoA bietet eine sehr hohe

Genauigkeit von wenigen Grad. Die Genauigkeit der Lokalisierung als Distanz hängt demnach vom Abstand zwischen Sender und Empfänger ab. Jedoch ist die Verwendung von AoA mit zusätzlicher Hardware verbunden, wodurch die Kosten steigen können [7].

##### 3.1.2 UWB-SYSTEM

Die Lokalisierung mittels UWB erfolgt über das bereits in vorigen Abschnitt 3.1.1 erläuterten TDoA-Verfahren. Die UWB-Tags messen ihre Signallaufzeit zu mehreren fest installierten Anker mittels ToA, aus den Ergebnissen kann daraufhin die Position des Tags errechnet werden [32].

Eine Besonderheit hierbei ist, dass die Tags lediglich Signale von den Basisstationen empfangen, die Kommunikation ist also unidirektional. Dies wird auch als Downlink Time Difference of Arrival (DL-TDoA) bezeichnet und ermöglicht theoretisch die Verwendung einer beliebigen Anzahl von Tags, da diese ihre Position ohne aktiven Informationsaustausch mit den Anker bestimmen können.

#### 3.2 VERSUCHSPLANUNG

Auf Grundlage der vollfaktoriellen Versuchsplanung (engl. Design of Experiments, DoE) wurde ein Versuchsplan erstellt. Das DoE ist ein Verfahren zur Analyse von (technischen) Systemen bei einer Vielzahl an Einflussfaktoren [1], [2]. Für den hier untersuchten Anwendungsfall in der Intralogistik, der Ortung von Ladungsträgern, wurden verschiedene relevante Einflussfaktoren, und Zielgrößen definiert (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1. Versuchsplanung mit der Zielgröße und den entsprechenden Einflussfaktoren

Versuchsplanung	Zielgröße	Einflussfaktoren		
Nr. 1	(Maximale) Ortungsgenauigkeit	Material-eigenschaft	Abstand zwischen Referenzpunkt und 5G-Tag	Statisch/dynamisch

Anschließend wurden ein Versuchsplan mit den einzelnen Faktoren sowie Stufen erstellt (Tabelle 2).

Tabelle 2. Versuchsplanung mit Faktoren (A, B und C), sowie die jeweiligen Stufen

Faktor		Stufen	
		-1	+1
A	Materialeigenschaft	Holz	Metall
B	Abstand zwischen Referenzpunkt und 5G-Tag	3 Meter	5 Meter
C	Statisch/dynamisch	Schwach	Stark

Die Zielgröße Ortungsgenauigkeit beschreibt die geometrische Genauigkeit, mit der die Position des Tags relativ zu einem Koordinatensystem mit einem Ortungssystem bestimmt wird. Die Ortungsgenauigkeit ist von verschiedenen Einflussfaktoren abhängig, die es im Rahmen der Versuche zu untersuchen gilt. Wie zuvor beschrieben, sind etwa die Materialeigenschaften des Ladungsträgers, z. B. Kunststoff oder Holz, ein möglicher Einflussfaktor. Ein weiterer Einflussfaktor ist der Abstand zwischen dem der Empfangsantenne und 5G-Tag. Unterschieden werden zudem statische und dynamische Messungen. Das Ziel ist es, die Ortungsgenauigkeit bei einer statischen Messung (Tag befindet sich zum Zeitpunkt der Messungen stets am gleichen Messpunkt) und bei einer dynamischen Messung (Messung während einer FTF-Fahrt oder einer manuellen Bewegung der Ladungsträger) zu messen.

In der Abbildung 2 ist das geometrische Modell des Versuchsplans mit allen Inputfaktoren dargestellt. Bei der Durchführung eines DOE werden jeweils zwei Faktoren gleichzeitig untersucht.

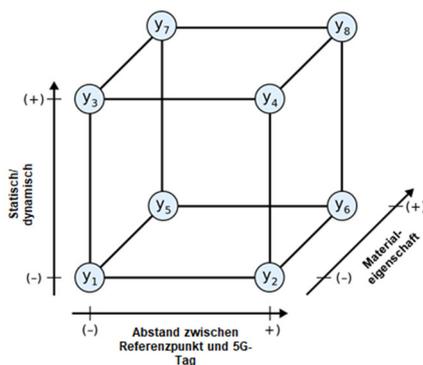


Abbildung 2. Hyperwürfel mit drei Faktoren

Darauf basierend wurde ein Versuchsaufbau für die verschiedenen zu untersuchenden Anwendungsfälle in der ARENA2036 entwickelt.

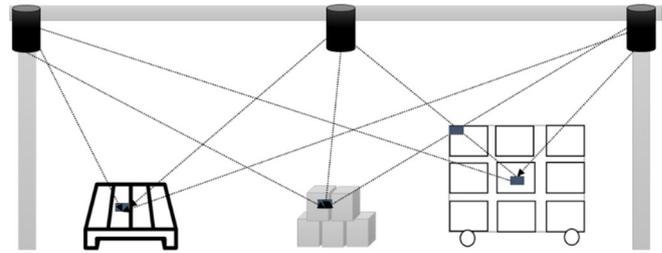


Abbildung 3. Versuchsaufbau 5G



Abbildung 4. Versuchsanlage in der ARENA2036

### 3.3 VERSUCHSAUFBAU

#### 3.3.1 BESCHREIBUNG DER VERSUCHSANLAGE

Bei der Versuchsanlage zur 5G-Indoor-Lokalisierung in der ARENA2036 handelt es sich um ein Prototypen-System, das nicht in das ebenfalls vorhandene 5G-Campus-Netzwerk für die Kommunikation integriert ist. Der Aufbau ist in Abbildung 4 und 5 dargestellt. Die Versuchsanlage besteht aus vier Messempfängern (bunte Quadrate in den Ecken), die mit einem Antennen-Array ausgestattet sind, sowie aus je einem Paar zusätzlicher Antennen an den Längsseiten (grüne Dreiecke). Die zusätzlichen Antennen sind an die Messempfänger angeschlossen. Eine einzelne Antenne deckt nur die Hälfte des Versuchsfelds ab, deshalb wurden die Antennen paarweise montiert.

Die nicht ausgefüllten Quadrate in Abbildung 5 zeigen die Fokuspunkte der Antennen-Arrays auf dem Hallenboden an. Man sieht, dass die Arrays nach unten und in Richtung Mitte des Versuchsfelds ausgerichtet sind. Alle Antennen sind auf ungefähr 7 m Höhe montiert und haben einen Abstand von etwa 10 m zueinander. Die statischen Messungen wurden an den schwarzen Punkten durchgeführt, die rot gestrichelte Linie zeigt die Route für die dynamischen Messungen.

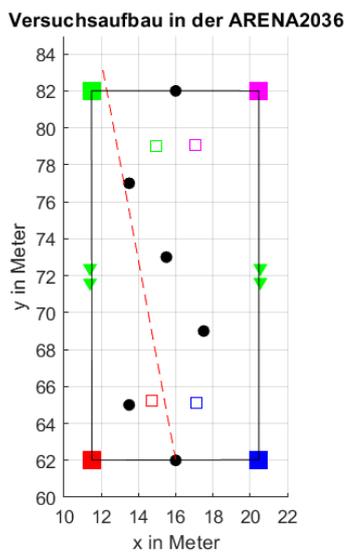


Abbildung 5. Versuchsaufbau mit Messempfängern und zusätzlichen Antennen, Referenzpunkten für statische Messungen und Bewegungslinie für dynamische Messungen

Die Messempfänger können den Zeitpunkt, wann ein Sendesignal von einem 5G-Tag eintrifft, sowie die Richtung, aus der das Signal eintrifft, bestimmen. Die zusätzlichen Antennen liefern nur Zeitmessungen. Es stehen also acht Zeitmessungen und vier Richtungsmessungen an insgesamt sechs Messpunkten zur Verfügung, wobei sich jede Richtungsmessung noch in den Azimut-Winkel (rechts/links) und den Elevation-Winkel (oben/unten) aufteilt.

Alle Zeit- und Winkelmessungen werden an einen Server übermittelt, der anhand dessen die Position des 5G-Tags schätzt. Dies passiert für jedes 5G-Tag mit einer Frequenz von 100 ms. Voraussetzung für die genaue Lokalisierung ist, dass die Position der Empfangsantennen exakt bekannt ist. Die dafür benötigte Vermessung in der ARENA2036 hat die Firma FARO übernommen. Da das Prototypen-System nicht darauf ausgelegt ist, die Position für mehrere 5G-Tags mit hoher Rate in Echtzeit zu schätzen, wurden während der Versuche sämtliche Messungen als Rohdaten abgespeichert und die Lokalisierung erst anschließend offline durchgeführt.

Gegenstand der Untersuchung war primär die Genauigkeit der Positionsschätzung. Andere für die Intralogistik relevante Metriken wie z. B. Latenz, zeitlicher Abstand zwischen zwei Lokalisierungsvorgängen, Anzahl der gleichzeitig lokalisierbaren Tags, Energieverbrauch, Koexistenz mit anderen Anwendungen, sowie die Kosten sollen in der folgenden Analyse unberücksichtigt bleiben.

### 3.3.2 UNTERSCHIEDE ZUR HERKÖMMLICHEN 5G ORTUNG

Eine Besonderheit des Versuchsaufbaus ist die hochgenaue Synchronisierung der Messempfänger mit einer maximalen Abweichung von ca. 200 ps. Dies verbessert die Genauigkeit der zeitbasierten Positionsschätzung von weit über 10 Meter auf deutlich unter einen Meter. Bei herkömmlichen Ortungsverfahren mit Funktechnologien, die ausschließlich in zellulären Mobilfunknetzen und nicht für Logistik-Anwendungen im Innenbereich zur Anwendung kommen, ist dies nicht gebräuchlich.

Darüber hinaus ist das Prototypensystem dazu in der Lage, Zeit- und Winkelmessungen bei der Positionsschätzung zu kombinieren. Aufgrund der bekannten Geometrie des Aufbaus kann etwa eine Reflexion von der Hallendecke erkannt und die zugehörige Zeitmessung daraufhin verworfen werden [33].

### 3.3.3 AUFBAU DES 5G-LOKALISIERUNGSTAGS

Als 5G-Tag wird das Evaluierungsboard RMU500-EK von Quectel verwendet. Das Evaluierungsboard besitzt bereits vier Antennen, die auf der Leiterplatte verbaut sind. Als Funkmodul wurde das Quectel 5G Modul RM520NGLAA nach den 3GPP Release 16 Spezifikation ausgewählt, siehe Abbildung 6 [34], [35]. Das Modul wurde für IOT/eMBB Anwendungen ausgelegt und unterstützt 5G Standalone (SA) [35].



Abbildung 6. Quectel Evaluierungsboard mit dem RM520NGLAA Modul

Für den Aufbau einer Netzwerkverbindung wurde das 5G Modul mit einem Raspberry Pi verbunden. In der Abbildung 7 ist das fertige 5G Ortungsmodul dargestellt



Abbildung 7. 5G-Lokalisierungstag

### 3.3.4 ZUSAMMENSPIEL DES 5G TAGS UND DER VERSUCHSANLAGE (ANKER) UND EMPFANG DES SRS SIGNALS

Die Rolle des 5G-Campus-Netzwerks beschränkt sich auf die Konfiguration der 5G-Tags. Jedem 5G-Tag wird vom Netzwerk ein periodisches und breitbandiges Sendesignal, das sogenannte Sounding Reference Signal (SRS), zugewiesen [36]. Die Bandbreite des SRS beträgt 100 MHz und es wird mit einer Rate von 100 ms gemessen. Die Konfigurationen der 5G-Tags sind orthogonal, das heißt, die Messempfänger können die SRS der verschiedenen 5G-Tags voneinander trennen, auch wenn diese gleichzeitig senden. Die Messempfänger haben selbst keinerlei Einfluss auf die Konfiguration der 5G-Tags. Sie sind lediglich dazu in der Lage, Zeitpunkt und Richtung des empfangenen Signals wie oben beschrieben zu messen.

### 3.4 VERSUCHSAUFBAU DES UWB-SYSTEMS

Als Vergleichssystem für die 5G-Technologie kommt ein UWB-System mit dem Hersteller-unabhängigen omlox-Standard zum Einsatz [37].



Abbildung 8. Eines der für die Messungen verwendeten UWB-Tags von Trumpf

Im Rahmen des Projekts wurde eine UWB-Infrastruktur in der ARENA2036 aufgebaut. Sechs Anker wurden analog zu den 5G Messempfängern an der Versuchsfläche installiert. Zusätzlich wurden acht weitere Anker am Perimeter der Halle angebracht, sodass auch der erweiterte Bereich

um das Versuchsfeld abgedeckt werden kann. Für die Vergleichbarkeit wurden in den Versuchen für UWB und 5G die gleiche Anzahl von Messempfängern bzw. Ankern verwendet.

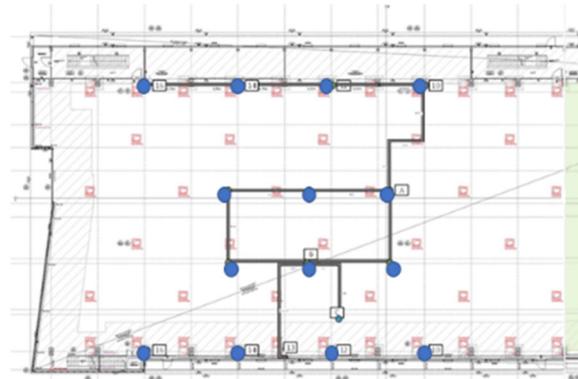


Abbildung 9. Positionierung der UWB-Anker, rechteckiges Versuchsfeld mittig

Als UWB-Tags kamen Modelle von Trumpf zum Einsatz. Die Tags bestimmen ihre Position selbst, wobei auf zusätzliche Filter (z. B. durch interne Inertialsensoren) zugunsten der Vergleichbarkeit mit dem 5G-System verzichtet wurde. Alle im UWB-System aufkommenden Messungen werden in Echtzeit von den Ankern an einen zentralen Server weitergeleitet, wo sie im omlox-System zusammenlaufen. Die geschätzten Positionen werden dort erfasst, über Schnittstellen zur Verfügung gestellt und für den späteren Vergleich mit den Daten aus den 5G-Messungen aufgezeichnet. Das UWB-System arbeitet mit einer Frequenz von 8 Hz.

## 4 VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

In einer ersten Versuchsreihe wurden die 5G- und UWB-Tags an verschiedenen festen und bekannten Referenzpunkten positioniert (schwarze Punkte in Abbildung 5). Dieser Versuchsaufbau soll im Folgenden als *statische Messungen* bezeichnet werden. Der oberste und der unterste Punkt liegen am Rand des durch die Messempfänger bzw. Anker definierten Rechtecks und sind deshalb vom jeweiligen Lokalisierungssystem schwierig zu erfassen, während an den vier mittleren Punkten eine größere Genauigkeit zu erwarten ist. Die Versuche wurden jeweils mit zwei 5G-Tags und drei UWB-Tags durchgeführt. Der Versatz gegenüber dem Referenzpunkt wurde vorab für jedes Tag gemessen und ist in der Auswertung entsprechend berücksichtigt.

Bei den statischen Messungen wurden drei verschiedene Szenarien untersucht: Im ersten Szenario wurden die Tags auf der Unterseite einer Europalette (Flachpalette aus Holz) angebracht, siehe Abbildung 10. Im zweiten Szenario befinden sich die Tags in drei übereinander gestapelten ESD-Behältern, siehe Abbildung 11. Und im dritten Szenario liegen die Tags in KLT-Behältern auf verschiedenen

Höhen im *Riegel*, einem mobilen Lager aus Metall (siehe Abbildung 12). Während mit den ersten beiden Szenarien hauptsächlich die Abschattung der Funkwellen in alle Richtungen untersucht werden soll, erwarten wir im Riegel zusätzliche Reflexionen an den Metalloberflächen. Folglich werden die Empfangsantennen unterschiedlich abgeschattet, und die Lokalisierungs-Systeme werden der Mehrwegeausbreitung ausgesetzt.



Abbildung 10. Tags befinden sich unterhalb der Europalette



Abbildung 11. Tags befinden sich in den gestapelten ESD-KLT-Behältern



Abbildung 12. Tags befinden sich in KLT-Behältern im Riegel

An allen sechs Referenzpunkten wurden die drei Szenarien jeweils zweimal gemessen. Dabei wurden zwischen den beiden Messreihen sämtliche Tags ausgetauscht, d.h. es sind insgesamt vier verschiedene 5G-Tags und sechs verschiedene UWB-Tags zum Einsatz gekommen. Jede einzelne statische Messung an einem Referenzpunkt dauert 90 Sekunden. Bei 5G (10 Hz Updaterate) wurde die Position also ungefähr 900 Mal unabhängig voneinander geschätzt. Für jedes UWB-Tag (8 Hz Updaterate) wurden in diesem Zeitraum etwa 720 Messungen aufgezeichnet.

In einem zweiten Versuch wurden die gestapelten ESD-KLT-Behälter vom zweiten Szenario auf einem Fahrerlosen Transportfahrzeug (Active Shuttle) während der

Messung langsam entlang der rot gestrichelten Linie in Abbildung 5 bewegt. Bei der Auswertung bezeichnen wir diesen Versuch als *dynamische Messung*. Das Experiment mit dem fahrenden Shuttle wurde ohne Austausch der Tags dreimal wiederholt. Im Vergleich zur statischen Messung werden die Funksignale nun auch am Active Shuttle selbst abgeschattet beziehungsweise reflektiert.

Die Herausforderung dabei ist, dass sich bei jedem neuen Messvorgang (einmalige Schätzung der Position) das Active Shuttle und damit die Tags an einer anderen unbekannt tatsächlichen Position befindet. Durch die Verwendung des fahrerlosen Transportfahrzeugs gehen wir von einer nahezu gleichförmigen Bewegung aus, und auch die einzelnen Messungen erfolgen mit einer festen Updaterate. Deshalb haben wir für die Auswertung der Genauigkeit der Positionsschätzung die tatsächliche Position der Tags zwischen dem bekannten Startpunkt und dem ebenfalls bekannten Endpunkt linear interpoliert, d.h. wir gehen davon aus, dass sich die Tags bei jeder neuen Messung um eine konstante Strecke weiterbewegt haben. Da dies nur näherungsweise stimmt – geringe Abweichungen von der gleichförmigen Bewegung des Shuttles sind möglich – entsteht hier ein zusätzlicher, technologieunabhängiger Fehler, der sich in den Ergebnissen widerspiegelt.

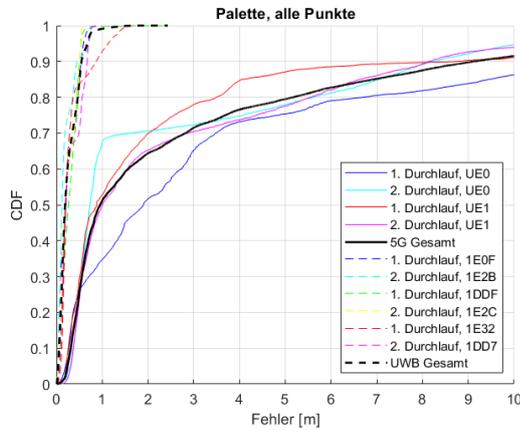
Die Anforderungen an die Ortungsgenauigkeit in der Logistik sind vom jeweiligen Prozess abhängig. Für die Verfolgung von Materialflüssen, wie im vorliegenden Untersuchungsfall, ist eine Genauigkeit von 1 m notwendig [38]. Bei Umschlagprozessen oder Ein- und Auslagerungen ist eine Genauigkeit von einer halben Palettenbreite (ca. 40 cm) in vertikaler Richtung notwendig [13]. Für die Lokalisierung und der eindeutigen Unterscheidung von Behältern im Pulkverhalten ist eine Genauigkeit von 200 mm in horizontaler Richtung erforderlich. Für die Navigation von Fahrerlosen Transportfahrzeugen (FTF) ist eine Genauigkeit von weniger als 50 mm notwendig [38]. Darüber hinaus gilt es, zwischen den Genauigkeitsanforderungen und der durch den Einsatz von Lokalisierungstechnologien entstehenden Kosten abzuwägen, die mit zunehmender Genauigkeit steigen [13].

## 5 ERGEBNISSE

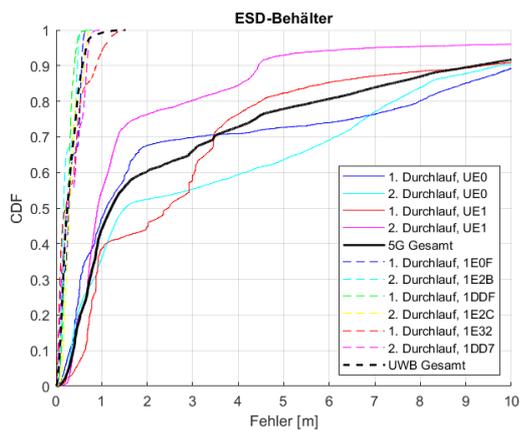
Die Auswertung der statischen Messungen erfolgt getrennt nach Tag, Szenario und Messdurchlauf als Cumulative Density Function (CDF). Auf der y-Achse kann die Wahrscheinlichkeit abgelesen werden, dass der Fehler kleiner als der Wert auf der x-Achse ist. Abbildung 13 zeigt die Ergebnisse kumuliert über alle sechs Referenzpunkte für die drei Szenarien Europalette (a), ESD-KLT-Behälter (b) und KLT-Behälter im Riegel (c). In den Diagrammen sind UE0 und UE1 jeweils die Bezeichnungen der 5G-Tags für beide Durchläufe, und 1E0F, 1E2B, 1DDF, 1E2C, 1E32 und 1DD7 die Bezeichnungen der UWB-Tags. Generell sind die Kurven für 5G durchgezogen und die Kurven für UWB gestrichelt. Jeweils ein 5G-Tag und ein UWB-Tag

sind in allen drei Szenarien sehr nahe beieinander angebracht, d.h. sie befinden sich entweder im selben Behälter auf gleicher Höhe über dem Boden, oder im selben Bereich der Europalette.

(a)



(b)



(c)

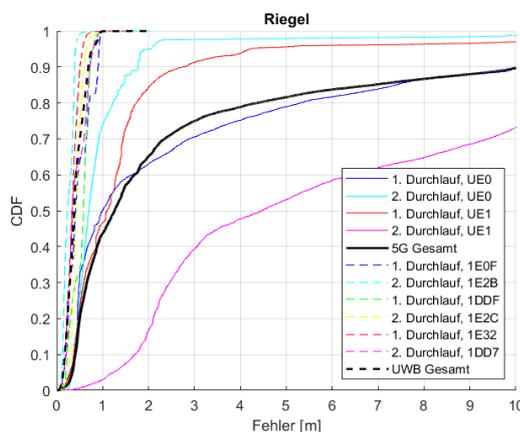


Abbildung 13. Cumulative Density Function (CDF) über alle Referenzpunkte für (a) die Europalette, (b) die ESD-KLT-Behälter und (c) die KLT-Behälter im Riegel

Diese Paare sind jeweils in der gleichen Farbe dargestellt. Da insbesondere bei 5G die Genauigkeit der Lokalisierung der zwei Tags und der beiden Durchläufe sehr stark voneinander abweichen, enthalten die Diagramme auch jeweils die kumulierten Ergebnisse über die farbigen Kurven in Schwarz.

Im Diagramm in Abbildung 13 sieht man, dass das kommerziell etablierte UWB-Referenzsystem die Tags in allen Szenarien wesentlich genauer und zeitlich stabiler lokalisiert als das 5G-Prototypensystem. Grundsätzlich sind mit UWB, durch die sehr große Bandbreite, genauere Zeitmessungen möglich und die Ausbreitungspfade können präzise voneinander getrennt werden. Im UWB-Referenzsystem schwankt der Median-Fehler (50%-Quantil) um 25 cm und bei 5G im Bereich um 1 Meter, wobei einzelne Fälle noch deutlich nach oben abweichen. Dieses grundsätzliche Verhalten kann bei allen drei Szenarien beobachtet werden. Im Folgenden soll dieses Verhalten näher erörtert werden. Offensichtlich weicht bei 5G die erzielte Genauigkeit über die zwei Tags und die beiden Durchläufe sehr stark voneinander ab, insbesondere beim dritten Szenario (Riegel) in 13c. Es kann keine Aussage darüber getroffen werden, ob ein Tag gegenüber dem anderen grundsätzlich bevorzugt ist. Beide 5G-Tags können sehr gute, d.h. nahe an den Ergebnissen des UWB-Referenzsystems, aber auch sehr schlechte Ergebnisse hervorrufen. Bei der genauen Analyse der aufgezeichneten Daten hat sich gezeigt, dass auch die Empfangsleistung an den Antennen über die vier Fälle großen Schwankungen unterworfen ist.

Der Grund hierfür ist die Ausrichtung der Sendeantennen im Tag und die Eigenschaft, dass jede der vier Sendeantennen das Signal in eine andere Richtung strahlt. Das 5G-Modul wurde im Gegensatz zum UWB-Tag nicht für Lokalisierung, sondern primär für die Kommunikation mit einem einzelnen Access Point entwickelt und optimiert. Das Prinzip ist, dass jede Antenne die Sendeleistung bündelt, um in eine bestimmte Richtung eine hohe Reichweite zu erreichen. Der Access Point wählt dann die für ihn beste Antenne aus. Das SRS wird zwar abwechselnd auf allen vier Antennen gesendet, aber während der Versuche wurde immer die gleiche Antenne gemessen. Welche der vier Antennen gemessen wurde, kann von der Ausrichtung des Tags beim Einschalten oder dem Zeitpunkt des Einschaltens abhängen. Es kann sich dabei jedoch bei jedem Tag und bei jedem Durchlauf um eine andere Antenne gehandelt haben. Durch die Richtcharakteristik der Sendeantenne ist dann jeweils ein Teil der Empfangsantennen des Prototypensystems für die Lokalisierung bevorzugt und ein anderer benachteiligt. Falls gerade die Senderichtung geblockt wird, oder generell zu wenige Empfangsantennen ein gutes Signal bekommen, bricht die Genauigkeit der Lokalisierung ein. Durch die statischen Bedingungen der Messung ist die Qualität der Lokalisierung dann konstant gut oder konstant schlecht.

Abbildung 14 zeigt die CDF von zwei Durchläufen der dynamischen Messung mit den ESD-Behältern auf dem fahrenden Active Shuttle. Im Vergleich mit den Ergebnissen der zugehörigen statischen Messungen in 13b sieht man, dass die Kurven für 5G nun wesentlich dichter beieinanderliegen. Während bei den statischen Messungen das nahezu identische Funkfeld an den wenigen Referenzpunkten immer wieder neu gemessen wurde – das heißt die Lokalisierung funktioniert immer konstant gut oder konstant schlecht, beinhaltet die dynamische Messung nun ein sehr viel größeres Spektrum an unterschiedlichen Empfangsbedingungen.

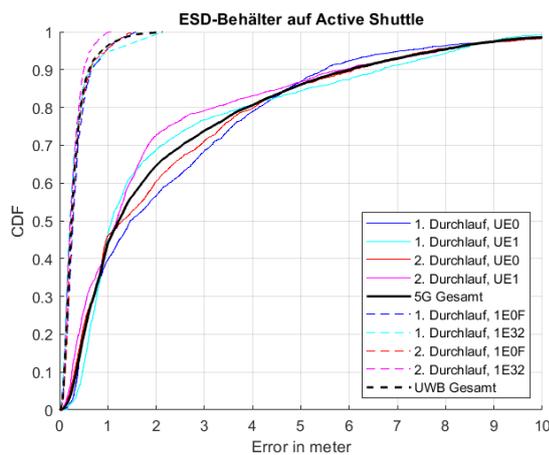


Abbildung 14. Cumulative Density Function (CDF) über die dynamische Messung der ESD-Behälter auf dem fahrenden Active Shuttle

In Abbildung 15 werden exemplarisch die geschätzten Koordinaten des 5G-Tags UE1 im 2. Durchgang dargestellt. Das Active Shuttle hat sich während der Messung auf der gestrichelten Linie von oben nach unten bewegt. Man sieht deutlich, dass die Lokalisierung im oberen Teil der Versuchsfläche hinreichend genau ist, während im unteren Teil auffällig viele Ausreißer sichtbar sind. Der Grund für dieses Verhalten ist die Abschattung der Empfangsantennen durch das FTF im Zusammenspiel mit der Richtcharakteristik der Sendeantenne im Tag. Für eine genaue Lokalisierung sind möglichst viele Empfangsantennen mit guter Signalqualität nötig. Das Ergebnis deutet darauf hin, dass die Antennen unterhalb des Shuttles (kleinere y-Koordinate) durch die Abschattung und die Ausrichtung der Sendeantenne ein stärkeres Signal empfangen als die Antennen oberhalb des Shuttles. Im ersten Teil der Bewegung sind das die vier Messpunkte bei  $y=72$  und  $y=62$ , was für eine stabile und genaue Lokalisierung ausreicht. Im zweiten Teil der Bewegung werden die Antennen bei  $y=72$  zunehmend abgeschattet, bzw. vom Sendesignal nicht mehr erreicht. Folglich nimmt die Qualität der Lokalisierung deutlich ab.

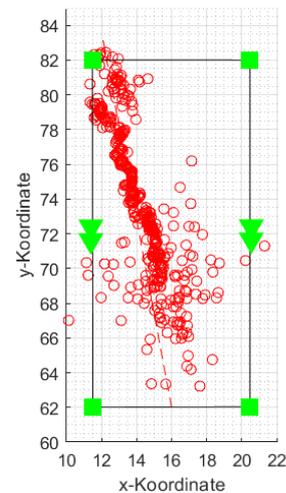


Abbildung 15. Exemplarischer Scatter Plot einer dynamischen Messung (5G-Tag UE1, 2. Durchlauf)

## 6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die Versuche haben gezeigt, dass die Genauigkeit der Lokalisierung mit dem 5G-Prototypensystem noch nicht an das kommerziell etablierte und hinsichtlich der Signalverarbeitung optimierte UWB-Referenzsystem heranreicht. Als Hauptgrund für die zum Teil große Abweichung haben die Autoren die Bündelung der Sendeleistung der Antenne im 5G-Tag identifiziert, die zu einer sehr ungleichmäßigen Ausleuchtung der am Rand der Versuchsfläche installierten Empfangsantennen führt. Es ist deutlich geworden, dass für eine präzise und stabile Lokalisierung entweder eine omnidirektionale Sendeantenne im Tag benötigt wird, oder die im 5G-Modul bereits vorhandene Diversität der vier Sendeantennen hinsichtlich ihrer Ausrichtung gezielt ausgenutzt werden muss. In diesem Fall wird das Signal nacheinander in unterschiedliche Richtungen gestrahlt, damit die Signalqualität an allen Empfangsantennen ausreichend ist. Für einen Lokalisierungsvorgang wird dann pro Empfangsantenne nur das jeweils stärkste Signal der vier Sendeantennen genutzt und die anderen, schwächeren Signale verworfen. Diese Erweiterung des 5G-Prototypensystems wird gegenwärtig umgesetzt.

Außerdem hat die Balluff GmbH im Rahmen des Forschungsprojekts ein 5G-Gateway prototypisch entwickelt, um bereits existierende Endgeräte mit einem 5G-Netzwerk verbinden zu können.

In Abbildung 16 ist das 5G-Gateway (oben) in Kombination mit dem Smart Reordering System, kurz SRS (unten) zu sehen. Das SRS ermittelt mittels eines Time-of-flight Sensors Füllstände und sendet die Daten über das 5G-Gateway an deine Datenbank.

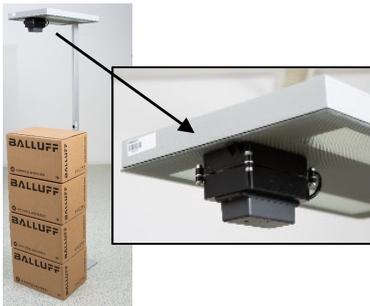


Abbildung 16. 5G-Gateway und Smart Reordering System (Füllstandslevelerkennung)

Zusätzlich kann der Sensor über das 5G-Netzwerk lokalisiert werden. Dies ermöglicht neue Anwendungsfälle, wie sie in Abbildung 17 schematisch dargestellt sind.

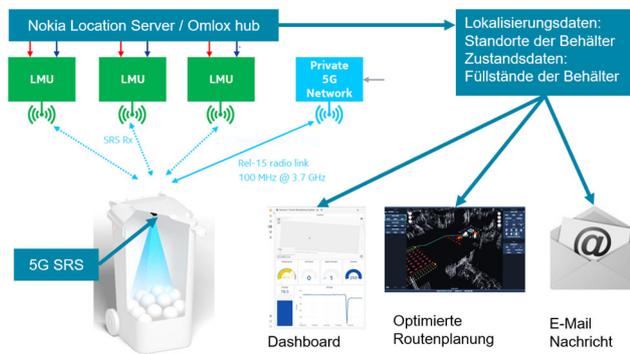


Abbildung 17. Mögliche Anwendungsfälle in der Intralogistik

In einem Dashboard sind die Füllstände, Standorte und weitere Informationen wie bspw. die Umgebungstemperatur ständig einsehbar. Bei Unterschreiten oder Überschreiten eines Füllstandes können automatisch E-Mails ausgelöst werden, die bspw. Bestellungen auslösen. Die erhobenen Daten ermöglichen außerdem eine Optimierung der Routenplanung für den Austausch voller Behälter durch leere Behälter.

Die hier beispielhaft skizzierten Anwendungsfälle haben das Potential, die Steuerung von Materialflusssystemen entlang der gesamten Wertschöpfungskette zu verbessern und somit zur Wirtschaftlichkeit in der Logistik beizutragen.

## FÖRDERHINWEIS

Dieses Forschungsvorhaben wird Rahmen des FuE-Programms "Transferpotenziale vernetzter Produktionstechnologien für Smart City 5G-Anwendungen" (Synergieregion) unter der Leitung der Wirtschaftsförderung Region Stuttgart durchgeführt, das vom Bundesministerium für Digitales und Verkehr gefördert wird.

## DANKSAGUNG

Die Messungen mit dem 5G-Prototypensystem sowie die Auswertung und Analyse der Ergebnisse wurden von Stephan Saur und Siegfried Klein von Nokia Bell Labs unterstützt.

## LITERATUR

- [1] A. R. Jimenez Ruiz and F. Seco Granja, "Comparing Ubisense, BeSpooon, and DecaWave UWB Location Systems: Indoor Performance Analysis," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 66, no. 8, pp. 2106–2117, 2017, doi: 10.1109/TIM.2017.2681398.
- [2] Y. Gu, A. Lo, and I. Niemegeers, "A survey of indoor positioning systems for wireless personal networks," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 11, no. 1, pp. 13–32, 2009, doi: 10.1109/SURV.2009.090103.
- [3] A. M. Ladd, K. E. Bekris, A. P. Rudys, D. S. Wallach, and L. E. Kavraki, "On the feasibility of using wireless ethernet for indoor localization," *IEEE Trans. Robot. Automat.*, vol. 20, no. 3, pp. 555–559, 2004, doi: 10.1109/TRA.2004.824948.
- [4] ARENA2036, *Synergieregion*. [Online]. Available: <https://arena2036.de/de/synergieregion> (accessed: Aug. 23 2023).
- [5] J. Schyga, M. Knitt, J. Hinckeldeyn, and J. Kreutzfeldt, *Method for Specifying Location Data Requirements for Intralogistics Applications*: Hannover : publish-Ing, 2023.
- [6] X. Tian, X. Tong, and X. Wang, *Wireless Localization Techniques*, 1st ed. Cham: Springer International Publishing; Imprint Springer, 2023.
- [7] C. Poellabauer and W. Dargie, *Fundamentals of wireless sensor networks: Theory and practice*. Hoboken, N.J.: Wiley, 2013.
- [8] L. M. Hilty, *Lokalisiert und identifiziert: Wie Ortungstechnologien unser Leben verändern*, 1st ed. Zürich: vdf Hochschulverl., 2012.
- [9] J. Hightower and G. Borriello, "Location systems for ubiquitous computing," *Computer*, vol. 34, no. 8, pp. 57–66, 2001, doi: 10.1109/2.940014.
- [10] P. Drechsler and N. Vojdani, "Technologien zum Tracking von Ladungsträgern und Werkzeugen in der ortsgebundenen Fertigung," 2021.
- [11] W. Franke, Ed., *RFID-Leitfaden für die Logistik: Anwendungsgebiete, Einsatzmöglichkeiten, Integration, Praxisbeispiele*, 1st ed. Wiesbaden: Gabler, 2006. [Online]. Available: [http://bvbr.bib-bvb.de/F?func=service&doc\\_library=BVB01&doc\\_number=014858089&line\\_number=0002&func\\_code=DB\\_RECORDS&service\\_type=MEDIA](http://bvbr.bib-bvb.de/F?func=service&doc_library=BVB01&doc_number=014858089&line_number=0002&func_code=DB_RECORDS&service_type=MEDIA)
- [12] K. Finkenzeller, *RFID-Handbuch: Grundlagen und praktische Anwendungen induktiver Funkanlagen, Transponder und kontaktloser Chipkarten*, 4th ed. München, Wien: Hanser, 2006. [Online]. Available:

- [http://bvbr.bib-bvb.de/F?func=service&doc\\_library=BVB01&doc\\_number=014906514&line\\_number=0002&func\\_code=DB\\_RECORDS&service\\_type=MEDIA](http://bvbr.bib-bvb.de/F?func=service&doc_library=BVB01&doc_number=014906514&line_number=0002&func_code=DB_RECORDS&service_type=MEDIA)
- [13] M. Schenk, *Produktion und Logistik mit Zukunft*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015.
- [14] R. Bernard, *Applying Indoor Positioning Systems: A Primer for Integrators and Security Specialists*. [Online]. Available: <https://www.securityindustry.org/2017/11/21/indoor-positioning-systems/>
- [15] A. Bozkurt, T. Tasci, R. Schulz, and A. Verl, “Designing of Smart Logistics Modules as Cyber-physical systems for Load carriers,” 2021.
- [16] P. Baronti, P. Pillai, V. W. Chook, S. Chessa, A. Gotta, and Y. F. Hu, “Wireless sensor networks: A survey on the state of the art and the 802.15.4 and ZigBee standards,” *Computer Communications*, vol. 30, no. 7, pp. 1655–1695, 2007, doi: 10.1016/j.comcom.2006.12.020.
- [17] C. Klünder, *Einfluss leistungsstarker elektromagnetischer Störquellen auf drahtlose digitale Übertragungssysteme im 2,4-GHz-ISM-Frequenzband*, 1st ed. Göttingen: Cuvillier Verlag, 2014. [Online]. Available: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=5020216>
- [18] S. Sadowski and P. Spachos, “RSSI-Based Indoor Localization With the Internet of Things,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 30149–30161, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2843325.
- [19] K. Szyc, M. Nikodem, and M. Zdunek, “Bluetooth low energy indoor localization for large industrial areas and limited infrastructure,” *Ad Hoc Networks*, vol. 139, p. 103024, 2023, doi: 10.1016/j.adhoc.2022.103024.
- [20] J. R. Zeiler, “Architektur für ein unternehmensübergreifendes Service-System mit intelligenten, modularen Sonderladungsträgern,” Technische Universität München, 2022.
- [21] K.-H. Lam, C.-C. Cheung, and W.-C. Lee, “LoRa-based localization systems for noisy outdoor environment,” in *2017 IEEE 13th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)*, Rome, 2017, pp. 278–284.
- [22] L. Bornholdt, S. Kaven, and V. Skwarek, “Adaptive procedure for indoor localization using LoRa devices,” in *2021 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, Lloret de Mar, Spain, 2021, pp. 1–8.
- [23] J. F. Johannes Zeiler, *Architectural Design for Special Load Carriers as Smart Objects in a Cloud-based Service System: ICIEA 2019 : April 12-15, 2019, Tokyo, Japan*. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2019.
- [24] H. FATTAH, *5G LTE Narrowband Internet of Things (NB-IoT): Practical projects for the cloud and data ... visualization*. Milton: Chapman and Hall/CRC, 2018.
- [25] F. Wei, F. Xiang, S. Verhoeven, and B. Noche, “Entwicklung eines intelligenten Logistik- und Bestands-managementsystems auf Basis von Internet der Dinge Technologien,” (in de), *Logistics Journal : Proceedings*, vol. 2020, no. 12, 2020. [Online]. Available: <https://www.logistics-journal.de/proceedings/2020/5166>
- [26] E. M. Migabo, K. D. Djouani, and A. M. Kurien, “The Narrowband Internet of Things (NB-IoT) Resources Management Performance State of Art, Challenges, and Opportunities,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 97658–97675, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2995938.
- [27] Janczewski and B. von, *Datengold der Logistik: Neuer 5G-kompatibler Tracker macht Paletten intelligent*. [Online]. Available: [https://www.iml.fraunhofer.de/de/presse\\_medien/pressemitteilungen/Live-Palettentracking\\_DLK.html](https://www.iml.fraunhofer.de/de/presse_medien/pressemitteilungen/Live-Palettentracking_DLK.html)
- [28] Y. H. Ho and H. C. Chan, “Decentralized adaptive indoor positioning protocol using Bluetooth Low Energy,” *Computer Communications*, vol. 159, pp. 231–244, 2020, doi: 10.1016/j.comcom.2020.04.041.
- [29] S. M. Darroudi and C. Gomez, “Bluetooth Low Energy Mesh Networks: A Survey,” *Sensors (Basel, Switzerland)*, vol. 17, no. 7, 2017, doi: 10.3390/s17071467.
- [30] P. Schnabel, *Kommunikationstechnik-Fibel: Übertragungstechnik, Netze, Mobilfunktechnik, Breitbandtechnik und Voice over IP*, 5th ed. Ludwigsburg, Württ: Schnabel, Patrick, 2019.
- [31] A. Bensky, “Technologies and applications,” in *Short-range Wireless Communication*: Elsevier, 2019, pp. 387–430.
- [32] omlox, *omlox explained*. [Online]. Available: <https://omlox.com/omlox-explained/omlox-hub-and-api> (accessed: Mar. 27 2023).
- [33] M. Henninger *et al.*, “Probabilistic 5G Indoor Positioning Proof of Concept with Outlier Rejection,” in *2022 Joint European Conference on Networks and Communications & 6G Summit (EuCNC/6G Summit)*, Grenoble, France, 2022, pp. 249–254.
- [34] 3GPP, *Release 16: Specifications and Releases* (accessed: Aug. 23 2023).
- [35] Quectel, *RG RM520n series*. [Online]. Available: <https://www.quectel.com/product/5g-rm520n-series> (accessed: Aug. 23 2023).
- [36] 3GPP, *5G; NR; Physical channels and modulation: (3GPP TS 38.211 version 16.2.0 Release 16)*. [Online]. Available: [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/138200\\_138299/138211/16.02.00\\_60/ts\\_138211v160200p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138200_138299/138211/16.02.00_60/ts_138211v160200p.pdf) (accessed: Aug. 23 2023).
- [37] omlox, *Introducing the omlox core zone: Endless possibilities based on ultra-wideband (UWB): Seamless location data based on UWB*. [Online].

Available: <https://omlox.com/omlox-explained/omlox-core-zone-and-air-interface> (accessed: Aug. 23 2023).

- [38] J. Schyga, J. Hinckeldeyn, B. Bruss, C. Bamberger, and J. Kreutzfeldt, "Application-driven Test and Evaluation Framework for Indoor Localization Systems in Warehouses," 2021.

---

**Ali Bozkurt, M.Sc.**, Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fördertechnik und Logistik (IFT), Universität Stuttgart

Tel.: +49 (0)711 685 83 672

E-Mail: [ali.bozkurt@ift.uni-stuttgart.de](mailto:ali.bozkurt@ift.uni-stuttgart.de)

**Kai Schneider**, Werkstudent Softwareentwicklung  
NAiSE GmbH, Stuttgart

E-Mail: [kai.schneider@naise.eu](mailto:kai.schneider@naise.eu)

**Freyja Schneider, M.Sc.**, Project Coordinator Public Funded Projects, Tel.: +49 7185 173 8014 8014

E-Mail: [Freyja.Schneider@Balluff.de](mailto:Freyja.Schneider@Balluff.de)

**Dipl.-Ing. Stefan Loy**

Pilz GmbH & Co. KG, Felix-Wankel-Straße 2, 73760 Ostfildern

Tel.: +49 (0)711 3409 7902

E-Mail: [s.loy@pilz.de](mailto:s.loy@pilz.de)

**Jan-Erik Jung, M.Sc.**, Strategic Incubation Manager

Tel.: +49 7185 173 8014 274

Mail: [Jan-Erik.Jung@Balluff.de](mailto:Jan-Erik.Jung@Balluff.de)

**Univ.-Prof. Dr.-Ing. Robert Schulz**, Institutsleiter des Instituts für Fördertechnik und Logistik (IFT), Universität Stuttgart

Tel.: +49 (0)711 685 83771

E-Mail: [robert.schulz@ift.uni-stuttgart.de](mailto:robert.schulz@ift.uni-stuttgart.de)

**Adressen:**

Institut für Fördertechnik und Logistik, Universität Stuttgart, Holzgartenstraße 15 B, 70174 Stuttgart

NAiSE GmbH, Pfaffenwaldring 19, 70569 Stuttgart

Pilz GmbH & Co. KG, Felix-Wankel-Straße 2, 73760 Ostfildern

Balluff GmbH, Schurwaldstr. 9, 73765 Neuhausen auf den Fildern