

30. Internationale Kranfachtagung 2022

Kran 4.0 – Erfolge der Digitalisierung

Innovative Assistenzfunktionen für Standardkrane zur Effizienzsteigerung und Prozessoptimierung in Smart Factories

Giuliano Persico, Anja Fischer

Frank Golatowski, Fabian Hölzke, Hannes Raddatz

Matthias Riedl, Thomas Bangemann, Duy Lam Tran

Karsten Meisberger

Hagen Borstell

Klaus Hanisch, Henry Cermann

Metin Tekkalmaz

Julian Lategahn

OPTIMUM

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



ITEA3

Giuliano Persico (Referent)
Demag Cranes & Components GmbH
Ruhrstraße 28
58300 Wetter (Ruhr)

Dr. Frank Golatowski (Referent)
Universität Rostock
Richard-Wagner-Straße 31
18119 Rostock-Warnemünde

Folgen Sie uns auf



YouTube



LinkedIn



Klaus Hanisch (Referent)
tarakos GmbH
Werner-Heisenberg-Straße 1
39106 Magdeburg

Innovative Assistenzfunktionen für Standardkrane

Im Rahmen des internationalen, in Deutschland vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten ITEA3-Forschungsprojektes OPTIMUM (OPTimised Industrial IoT and Distributed Control Platform for Manufacturing and Material Handling), sind innovative Assistenzfunktionen für Standardkrane entwickelt und prototypisch in einem Material Handling Demonstrator implementiert worden. Die Erprobung und Validierung der durch die Assistenzfunktionen erreichbaren Effizienzsteigerung wurde sowohl durch Simulation als auch in einem realen Demo-Montageprozess verifiziert und dokumentiert. Voraussetzungen für die neuen Assistenzfunktionen sind eine verteilte dezentrale Steuerungsarchitektur, Indoor-Lokalisierung aller am Materialfluss beteiligten Akteure (Menschen und Maschinen) sowie eine hochverfügbare, echtzeitfähige drahtlose Kommunikations-Infrastruktur. Auch Aspekte der funktionalen Sicherheit und der Cyber Security wurden berücksichtigt.

1 Motivation

Im Material-Handling-Segment werden Komfortfunktionen für den Bediener, hohe Flexibilität und Produktivitätssteigerung der Maschinen sowie sichere Handhabungsprozesse (Safety) als entscheidende Kriterien für die Nutzung von Kranen in zukünftigen Smart Factories eingeschätzt. Das Projekt OPTIMUM adressierte innovative Konzepte für das Engineering, die Inbetriebnahme, die Steuerung sowie Überwachung von „Material Handling“ Lösungen. Gegenüber den zur Ausgangssituation etablierten zentralen und hierarchisch gegliederten Steuerungs- und Anwendungsprozessen (S95 / IEC 62264) erfordern künftige, komponentenbasierte Konzepte und „kollaborative Automatisierung“ **verteilte** Funktionalitäten. Die in OPTIMUM entwickelten und prototypisch implementierten Technologien sollen Maschinen- und Kranhersteller dazu befähigen, Hardware-Varianten der eingesetzten Steuerungstechnik zu reduzieren und durch Modularität der eingesetzten Software zu ersetzen. Kontext- und Positionsinformationen sollen Assistenzfunktionen ermöglichen, die zu einer Steigerung von Effizienz, Komfort und funktionaler Sicherheit führen und somit die Chancen der Platzierung von neuen und innovativen Produkten im Markt erhöhen.

Unternehmen, die heute klassische Steuerungstechnik vertreiben, werden befähigt, auf die Herausforderungen von komponentenbasierten, verteilten industriellen Steuerungen zu reagieren. Die Arbeiten in OPTIMUM sind bereits in Industrie 4.0 Arbeitskreise eingeflossen, insbesondere auch in die Spezifikation des „OPC UA Companion Profile for Cranes & Hoists“.



Bild 1: Material Handling Demonstrator in der Demag Research Factory

2 Assistenzfunktionen für Standardkrane

Im Material Handling Demonstrator (MH-Demonstrator), siehe Bild 1, wurden folgende neue Funktionen implementiert:

- **Come to Me:** Der Kran fährt autonom zu der Bedienerposition.
- **Follow Me:** Der Kran folgt autonom dem Bediener.
- **Go To:** Der Kran fährt autonom zu einer von Bedienern gewählten Zielposition.
- **Follow Machine:** Der Kran folgt autonom z. B. einem Fahrerlosen Transportsystem (FTS) oder einem Gabelstapler.
- **Restricted 3D Zones:** Dreidimensionale Zonen, die nicht oder nur unter Einhaltung bestimmter Bedingungen – z. B. mit reduzierter Geschwindigkeit – vom Kran angefahren werden dürfen.

Alle aufgeführten Assistenzfunktionen können auch mit der Funktion „Kran-Tandem“ kombiniert werden, die die gleichzeitige Bewegung mehrerer Krane und Laufkatzen/Hebezeuge ermöglicht.

Der Demonstrator in der Domäne des Material Handling (MH) umfasst, neben zwei Kranen, weitere verschiedene Maschinen, die für den innerbetrieblichen Materialfluss in industriellen Prozessen typischerweise eingesetzt werden (siehe Bild 2). Die beiden Industriekrane sind mit je zwei Laufkatzen und Hebezeugen ausgestattet, um so den "flurfreien" Materialtransport zu realisieren. Der bodengebundene Transport erfolgt mittels eines manuell betriebenen Gabelstaplers und eines FTS-Prototyps.

Zur Demonstration und Validierung der innovativen Assistenzfunktionen wurde ein "Demo-Montage-Prozess" definiert, der alle Assistenzfunktionen in einem logischen Kontext nutzt. Für das Montageszenario wurden insgesamt vier Montageplätze in der DEMAG Research Factory eingerichtet. Die Montageaktivitäten werden von zwei Personen durchgeführt, die auch für die Steuerung der benötigten Maschinen zuständig sind: Krane, FTS und Gabelstapler.

2.1 Der Montageprozess

Der Montageprozess besteht aus drei verschiedenen Schritten - siehe Bilder 2-6.

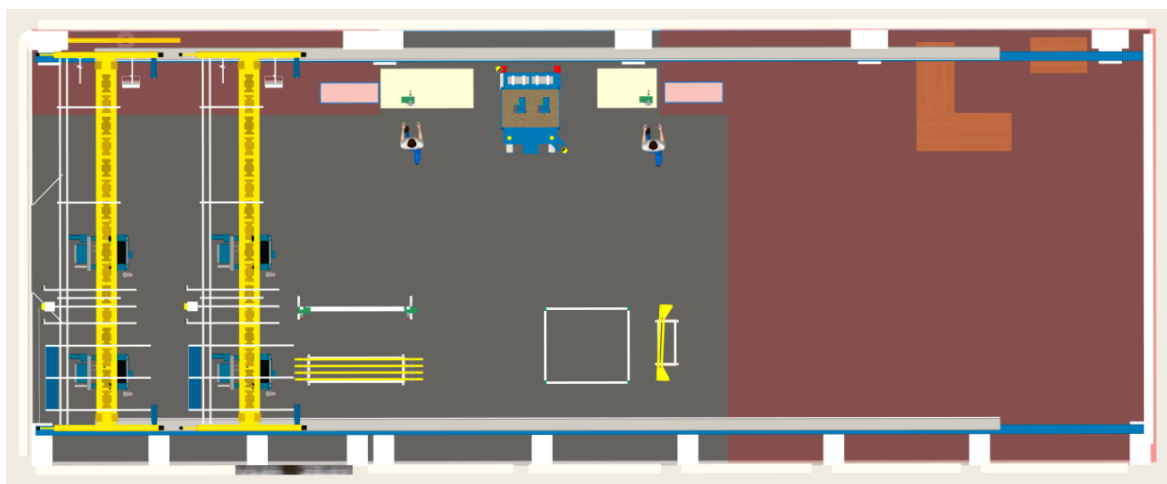


Bild 2: Draufsicht Demo-Montage-Szenario

Zunächst wird ein DEMAG-Kettenzug mit Steuerplatine, Bremse und elektrischer Abdeckung komplettiert. Dies geschieht an den Montageplätzen 1 und 2.

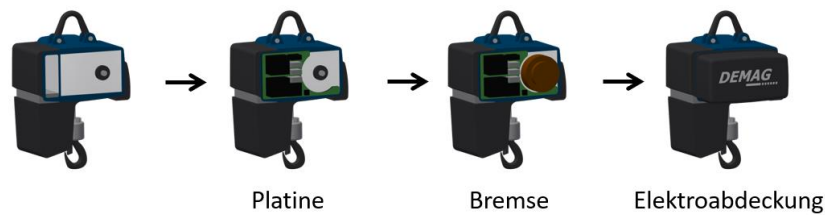


Bild 3: Erster Montageschritt

Im zweiten Schritt werden zwei Kettenzüge mit einem Vierkant-Träger zu einem "Duo" verbunden. Für die Duo-Montage gibt es eine eigene "Duo-Montage-Station".



Bild 4: Zweiter Montageschritt

An der dritten Arbeitsstation werden zwei Duo-Kettenzüge mit zwei Traversen zu einem "Quadro" montiert. Auch für die Quadro-Montage ist ein eigener Montageplatz vorhanden.

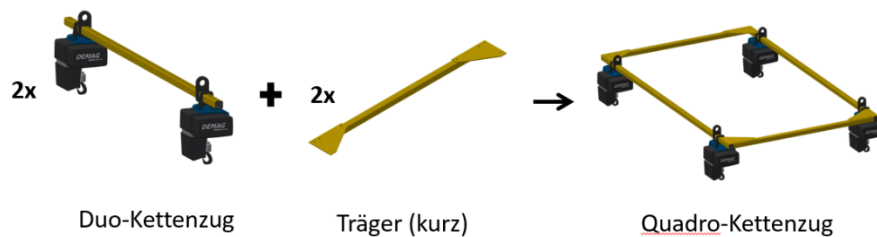


Bild 5: Dritter Montageschritt



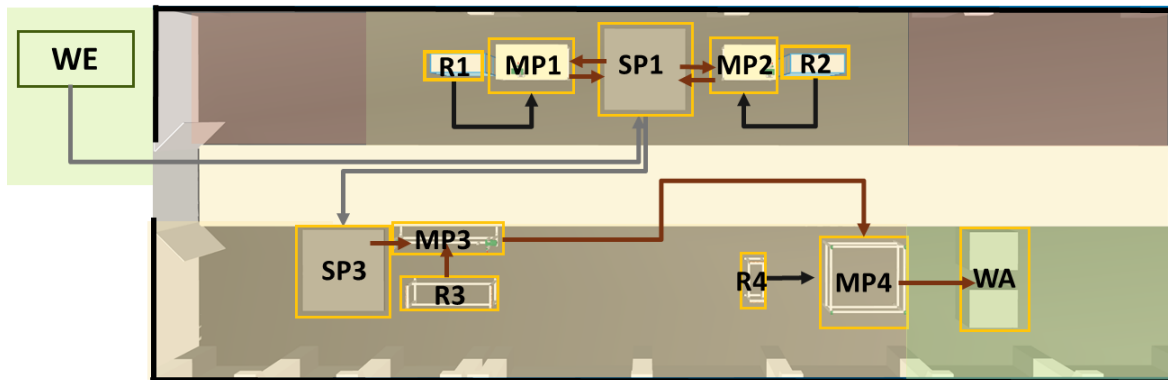
Bild 6: Montage- und Aufbaustationen

Der Kettenzug stellt in diesem Szenario eine "Einzellast" dar, die mit nur einem Anschlagpunkt sicher transportiert werden kann. Der "Duo" repräsentiert eine "Langlast", für deren sicheren Transport zwei Anschlagpunkte benötigt werden. Der "Quadro" symbolisiert "flache Lasten" (z. B. Flugzeugflügel), die mehr als zwei Anschlagpunkte für ihren sicheren Transport erfordern.

Sowohl zum Transport des „Duo´s“ als auch des „Quadros“ können die beiden Krane im "Tandem-Modus" verfahren werden, so dass ein sicherer Transport der verschiedenen Lastformen gewährleistet ist.

2.2 Validierung

Bild 7 stellt eine Übersicht (Top View) des Montageprozesses in der Demonstratorhalle dar:



Legende			
Abkürzung	Bedeutung	Zeichen	Bedeutung
WE	Wareneingang		Sperrbereich
WA	Warenausgang		Montagebereich
MPn	Montageplatz (Nummer)		Quelle/Senke
Rn	Regal (Nummer)		Materialfluss per FTS
SPn	Stellplatz (Nummer)		Materialfluss per Kran

Bild 7: Montageprozesslayout mit Materialfluss vom halbfertigen Kettenzug zum Quadro-Kettenzug

Der Montageprozess der Kettenzüge in der Produktionslinie wurde in zwei verschiedenen Szenarien realisiert:

1. Materialfluss und Handling mit konventionellen Maschinen ohne Assistenzfunktionen
2. Materialfluss und Handling mit den innovativen OPTIMUM-Assistenzfunktionen

Die Gesamtzeit für die Montage eines Quadro-Kettenzuges wurde für beide Szenarien zunächst simuliert (Bild 8):

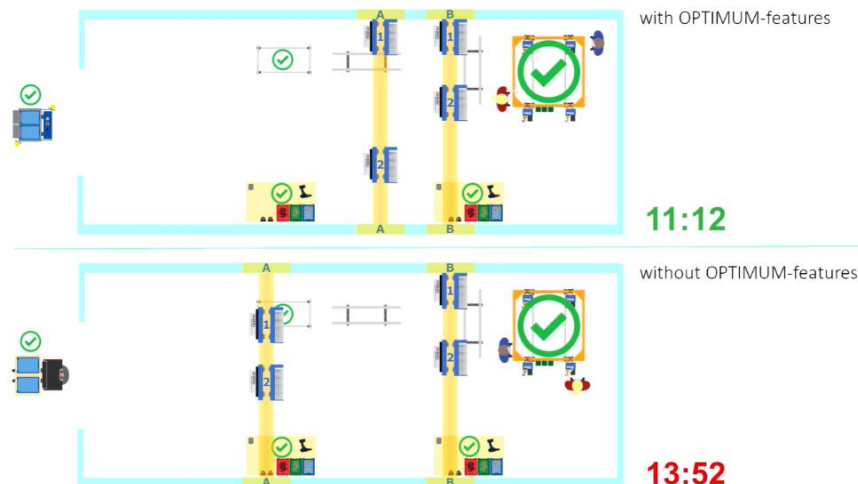


Bild 8: Simulation der Montage eines Quadro-Kettenzuges mit und ohne OPTIMUM Assistenzfunktionen (<https://www.youtube.com/watch?v=BwPIQu31JHU>)

1. Montagezeit ohne Assistenzfunktionen = 13' 52"
2. Montagezeit mit Assistenzfunktionen = 11' 12"

Der Vergleich der Montagezeiten ergibt eine Zyklusreduktion von ca. 18 %.

Die Prozessschritte und die reinen Montagezeiten sind in beiden Szenarien gleich. Die Zyklusreduktion wird durch die Aktivierung von autonomem Verfahren der Krane und des FTS mittels folgender Assistenzfunktionen erreicht:

- Come to Me
- Go To
- Follow Machine

Die Erfassung der Zykluszeiten im realen Demo-Montageprozess konnte die Simulationsergebnisse bestätigen.



Bild 9: Realer Demo-Montageprozess (<https://www.youtube.com/watch?v=ulspY7qCyws>)

In Anbetracht der kleinen Fläche (ca. 220 m²) der Demo-Montage-Linie ist die Einsparung bereits recht beeindruckend und es ist zu erwarten, dass sie sich bei längeren Verfahrenswegen aller am Prozess beteiligter Maschinen entsprechend weiter erhöhen würde.

In den nächsten Kapiteln werden die technischen Voraussetzungen für die Implementierung dieser Assistenzfunktionen beschrieben.

3 Verteilte Steuerungsarchitektur

Die Umsetzung der innovativen Assistenzfunktionen erfordert das Zusammenwirken mehrerer Steuerungskomponenten in den beteiligten Maschinen. Dies bedarf technischer Voraussetzungen, die in OPTIMUM definiert und umgesetzt wurden.

Kern des OPTIMUM-Konzepts sind Geräte, die vorwiegend im industriellen Umfeld eingesetzt werden und verschiedene Aufgaben übernehmen können. Sie laufen autark und sind z. B. direkt in Maschinen verbaut bzw. eingebettet. Speziell für die Erfüllung der Steuerungsaufgaben ist auf den Geräten eine Komponente „Distributed Control Platform“ (DCP) vorgesehen. Sie basiert auf dem Distributed Object Model Environment (DOME) und erlaubt die Kooperation einer beliebigen Anzahl von Geräten und Maschinen, um gemeinsam z. B. Transportaufgaben zu lösen [6]. Wie jedes herkömmliche Steuerungsgerät verarbeitet das DCP Sensordaten und erzeugt Aktorinformationen, die über geeignete Schnittstellen mit der Peripherie ausgetauscht werden. Steuerungsinformationen zwischen DCP werden über ein effizientes Kommunikationsprotokoll ausgetauscht [4], welches bei Nutzung von IP-Kommunikation auch gesichert [5] erfolgen kann.

Neben der direkten, vernetzten Kommunikation zwischen den DCP Instanzen auf den eingebetteten Steuerungsgeräten (Knoten), sollen verschiedene Informationen auch mit weiteren Geräten ausgetauscht werden, die nicht direkt Steuerungsaufgaben erfüllen. Dazu zählen abgesetzte Bediengeräte oder Visualisierungen teils in 3D, die für die Auslegung und Erfüllung der Assistenzfunktionen benötigt werden. Diese Art der Kommunikation erfolgt über eine Industrial Internet of Things (IIoT) Komponente, die ebenfalls auf den Steuerungsgeräten vorhanden ist.

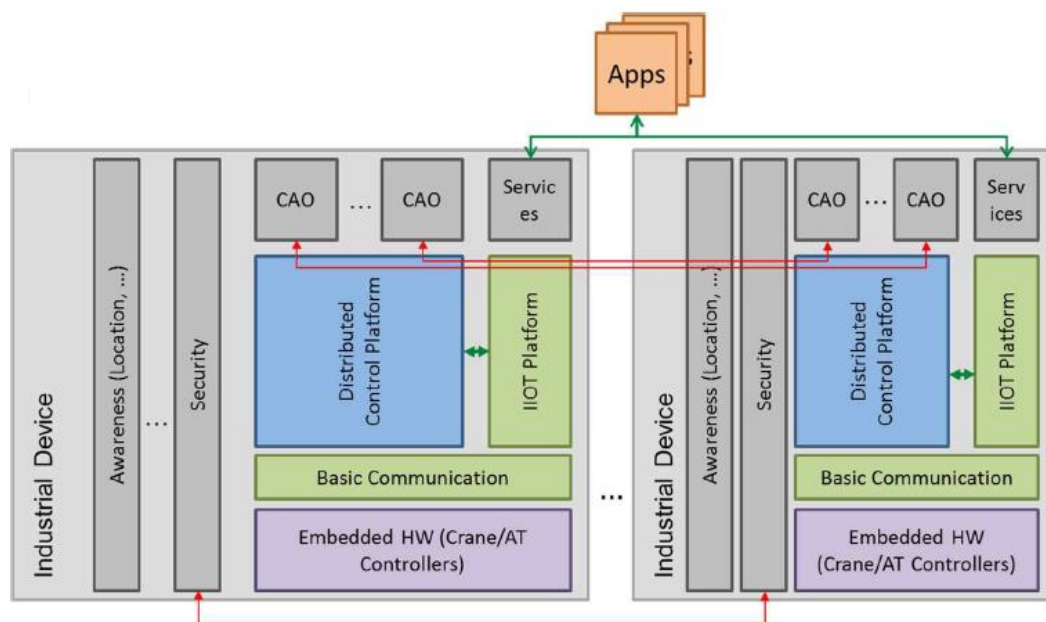


Bild 10: OPTIMUM Komponentenarchitektur

Bild 10 zeigt die grundlegende Architektur, um das oben skizzierte Konzept umzusetzen. Im Mittelpunkt der Architekturdefinition steht das blaue Rechteck mit der Bezeichnung Distributed Control Plattform, das die Schnittstellen zur IIoT-Plattform und die der Basiskommunikation unterhält. Auf der Grundlage des DCP erfolgt die Entwicklung der Steuerprogramme objektorientiert mit in sich gekapselten Funktionen in Form von „Control Application Objects“ (CAO). Ein konkretes Steuerungsprogramm besteht somit aus solchen Objekten und definiert den Datenaustausch zwischen diesen.

Die Control Application Objects, die auf einem bestimmten „Knoten“ laufen, müssen verwaltet werden, z. B. instanziiert, ihren Status ändern oder auch zerstört werden können. Außerdem müssen logische Verbindungen zwischen den Objekten hergestellt werden. Dies kann lokal geschehen, wenn diese Objekte auf demselben Knoten (und in derselben Anwendung) laufen oder netzwerkweit über das gesamte Kommunikationssystem. Die Art des verwendeten Kommunikationssystems ist aus der Sicht des Control Application Object irrelevant. Für den Datenaustausch zwischen den Objekten werden daher die von der Distributed Control Plattform bereitgestellten Dienste genutzt. Auf der Grundlage dieses Ansatzes können verschiedene Kommunikationssysteme oder -protokolle verwendet werden.

Für die vertikale Kommunikation zwischen OPTIMUM-Komponenten und Supervisor oder einem aus der Ferne bedienten HMI-Gerät kann OPC UA oder MQTT verwendet werden. Das entfernte HMI-Gerät kann vom Bediener verwendet werden, um die OPTIMUM-Komponenten zu konfigurieren.

Von Bedeutung ist, dass die horizontale Kommunikation Echtzeitdaten übertragen kann und verschiedene Kommunikationsmedien (drahtgebunden oder drahtlos) eingebunden werden können. Unabhängig vom Kommunikationsmedium muss auch die temporäre Kommunikation zwischen Control Application Objects berücksichtigt werden, z. B. ob ein Bediener mit einem Materialflusssystem interagiert oder ob ein mobiles Materialflusssystem in die Fabrikhalle einfährt, um Material auszuliefern. Daher muss jede OPTIMUM-Komponente in der Lage sein, andere OPTIMUM-Komponenten im Hinblick auf Sicherheitsrichtlinien zu überprüfen.

Bild 11 zeigt die interne Architektur der Distributed Control Plattform (DCP). Gemäß Bild 10 ist die DCP Teil des Industriergeräts und für die Ausführung des lokalen Teils der Steuerungsanwendung verantwortlich. Die DCP besteht aus verschiedenen Blöcken oder logischen Komponenten. Es ist wichtig zu beachten, dass das Industriergerät über ein Betriebssystem (Operating System – OS) verfügt, das Dienste wie Prozess- und Thread-Ausführung, Speicherverwaltung oder Netzwerk-Sockets bereitstellt. Außerdem zeigt die Architektur Interaktionen zwischen den logischen Komponenten.

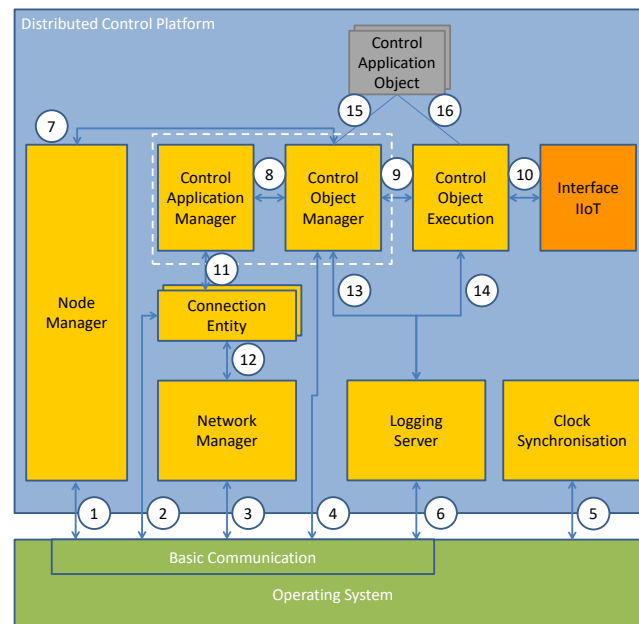
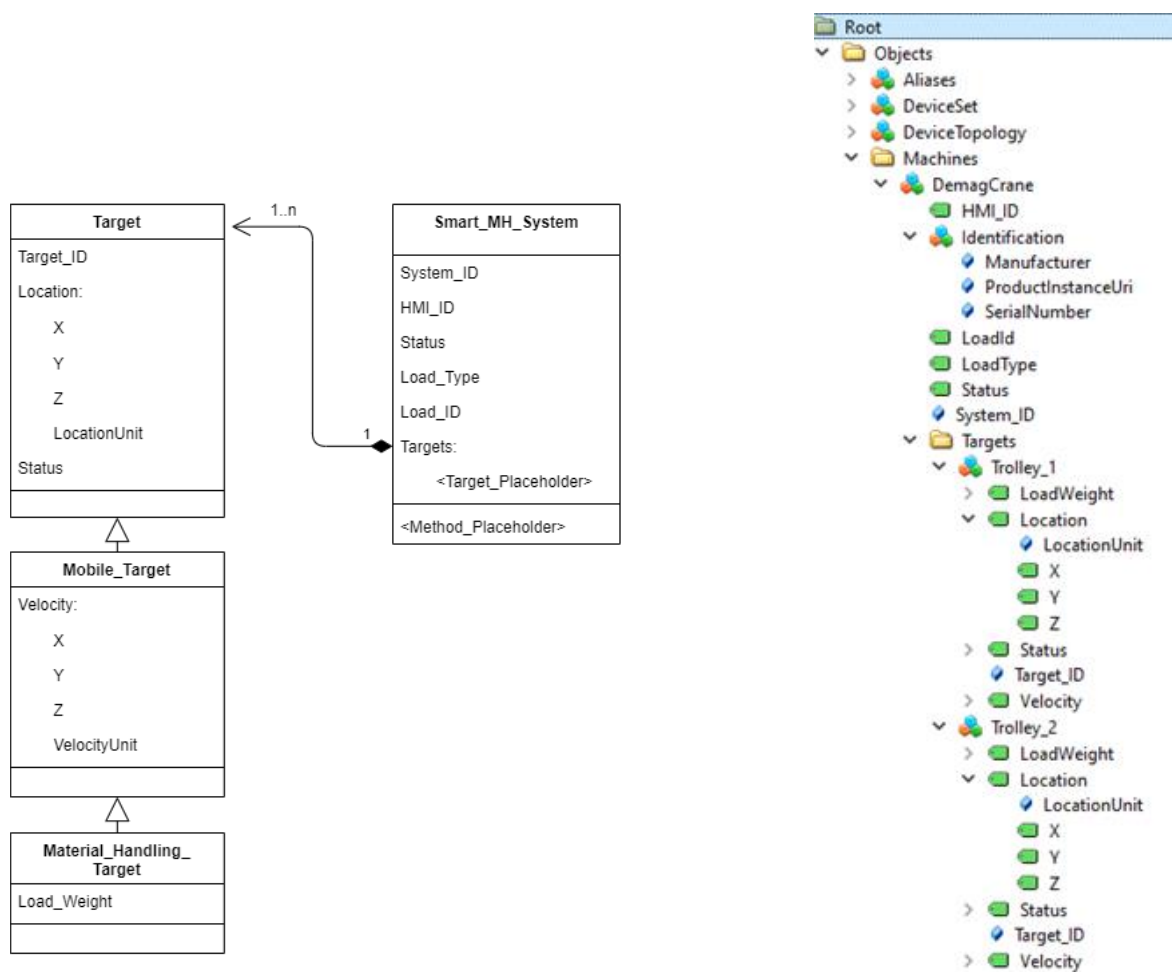


Bild 11: Architektur der Distributed Control Platform (DCP)

4 Industrial IoT-Plattform

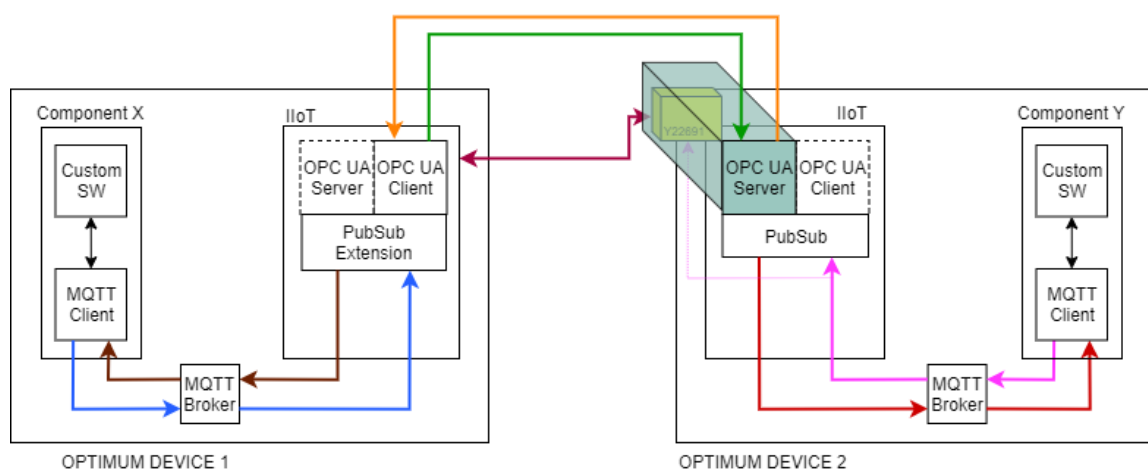
Die IIoT-Plattform ist neben der im vorherigen Abschnitt vorgestellten verteilten Steuerungsplattform DCP ebenfalls eine wichtige Softwarekomponente der OPTIMUM-Architektur (Bild 10), die komplexe Kommunikationsmuster in einem heterogenen Geräteumfeld ermöglicht [4, 6]. Die IIoT-Plattform ist die zentrale Instanz für die horizontale und vertikale Kommunikation und verantwortlich für den Austausch von Systemparametern und Gerätedaten: Sie kann sowohl geräteintern als auch von externen Geräten kontaktiert werden, um Informationen abzurufen. Sie sammelt und überwacht folglich Geräte und verarbeitet oder kombiniert diese, um die Informationen an die umliegenden Komponenten weiterzugeben. Um diesen Prozess durchzuführen, wurden Schnittstellen für die geräteinternen Komponenten (MQTT - Message Queuing Telemetry Transport) und für externe Zugriffe von anderen Geräten (OPC UA – Open Platform Communications Unified Architecture) erarbeitet. Zur Kopplung der geräteinternen Kommunikation über MQTT und der externen Kommunikation über OPC UA wurde das in Bild 12 dargestellte Datenmodell entwickelt [7]. Diese Kopplung folgt zunächst den Empfehlungen des OPC UA Standards zur Kopplung von OPC UA und MQTT, geht aber darüber hinaus, da Daten über MQTT abonniert werden können [8].

In Bild 13 wird exemplarisch dargestellt, wie eine Komponente X eines Gerätes mithilfe der IIoT-Plattform Informationen von einer Komponente Y auf einem anderen Gerät abrufen oder abonnieren kann.

**Bild 12:**

Datenmodell

Links: Maschinenklassen, Rechts: Instanz eines Brückenkrans mit zwei Laufkatzen

**Bild 13:** Datenaustausch zwischen 2 Komponenten auf verschiedenen Geräten mithilfe der IIoT-Plattform

Die IIoT-Plattform kann als universell einsetzbare Instanz angesehen werden, die ältere Geräte und Maschinen via Plug&Play-Technologie in Industrie 4.0-Szenarien integrieren kann. Die Schnittstelle zur geräteinternen Kommunikation kann durch andere Protokolle ausgetauscht werden. So wurde während des OPTIMUM-Projektes zu Evaluationszwecken eine alternative Schnittstelle über AMQP entwickelt.

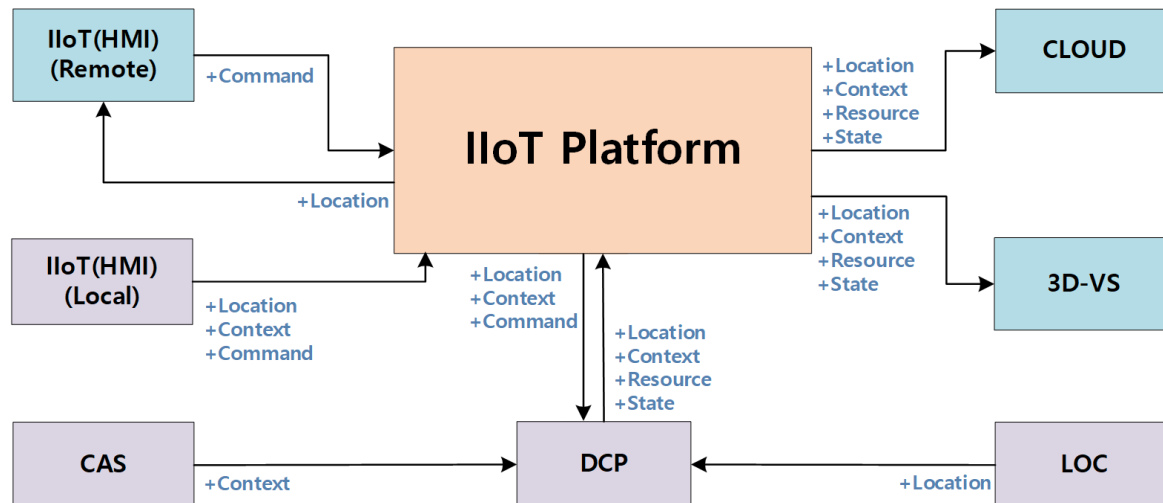


Bild 14: Konzeptueller Informationsfluss zwischen den Komponenten

Bild 14 stellt den Informationsfluss zwischen einzelnen Komponenten des OPTIMUM-Projektes und der IIoT-Plattform dar. Hier wurde die IIoT-Plattform neben der Geräte-zu-Geräte-Kommunikation auch verwendet, um Daten mit den nachfolgend aufgezählten Komponenten auszutauschen:

- **CAS:** Ermöglicht die Verarbeitung und Speicherung von Kontextinformationen im Industriegerät (Context Awareness).
- **LOC:** Verarbeitet die Standortinformationen des Geräts in Echtzeit und stellt sie der DCP zur Verfügung.
- **DCP:** Steuert Geräte in Echtzeit mit Kontext- und Standortinformationen und liefert bei Bedarf Informationen an andere Geräte und externe Komponenten über die IIoT-Plattform. Sie steuert das lokale Gerät unter Verwendung der Zustandsinformationen anderer Geräte (z. B. HMI, 3D-VS, etc.)
- **HMI:** Liefert Steuerbefehle und die Standortinformationen des Bedieners (bereitgestellt durch separates Gerät "Wearable") an die DCP und führt bei Bedarf die Zusammenarbeit zwischen dem Bediener und dem Gerät durch, indem es die Statusinformationen des Geräts von der DCP erhält.
- **3D-VS:** Verfügt über die notwendigen Informationen zur Überwachung und Visualisierung des Arbeitsstatus und Standorts des Geräts.
- **CLOUD:** Führt die Anfrage/Antwort aus, die erforderlich ist, um die in der unteren Schicht erzeugten Daten an die obere Schicht zu übertragen.

Weiterhin ist die IIoT-Plattform für die Containerisierung mittels Docker vorbereitet und Docker-Skripte zum Kompilieren sowie Simulieren wurden entworfen. Die Bereitstellung der IIoT-Plattform als Docker Image ermöglicht eine vereinfachte Verteilung, Versionierung und Orchestrierung von Abhängigkeiten mithilfe des OPTIMUM App Stores. In Bild 15 ist die Containerisierung exemplarisch dargestellt.

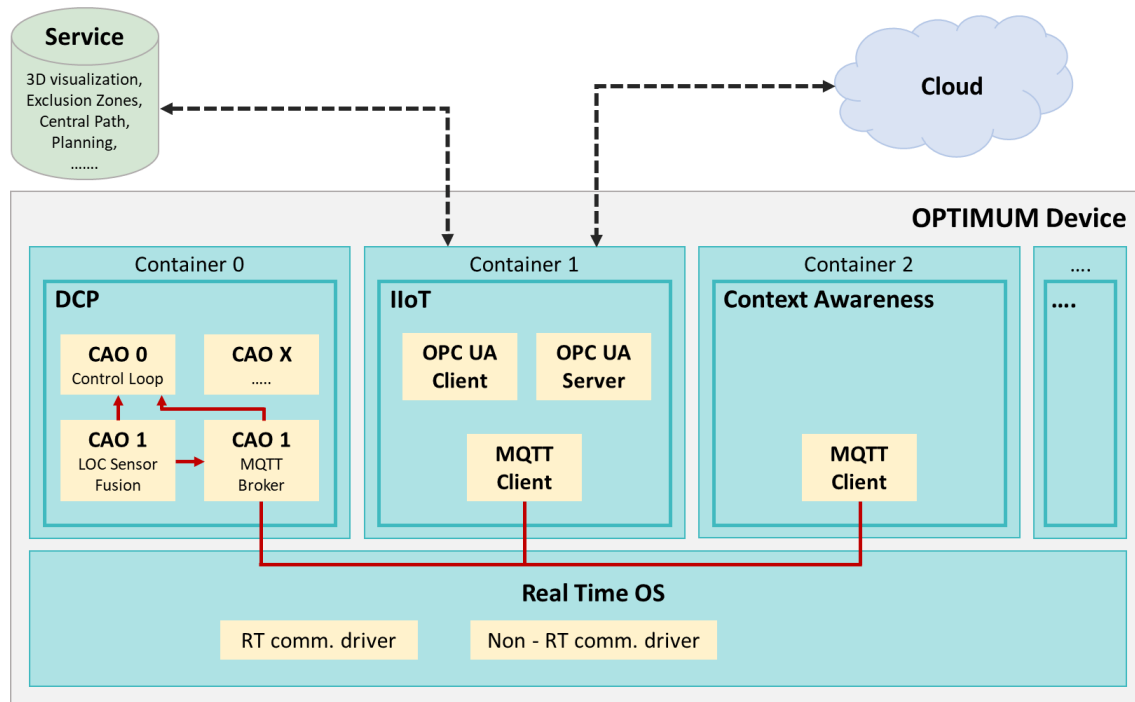


Bild 15: Isolierung von OPTIMUM Komponenten mithilfe von Containern

5 Innovative grafische Bedienoberfläche

Die grafische Benutzeroberfläche (GUI – Graphical User Interface) für den Material-Handling-Demonstrator bei DEMAG in Wetter ergänzt die standardmäßig eingesetzte Kranfunksteuerung und ermöglicht dem Bediener die intuitive und einfache Nutzung von innovativen OPTIMUM Assistenzfunktionen. Um dieses Ziel bestmöglich zu erreichen, stellt die GUI ein 2D-Layout der Fabrikhalle dar, in dem die verschiedenen statischen, aber auch beweglichen Objekte mit einfachen Symbolen visualisiert werden. Um die verschiedenen Objekte und Zustände (z. B.: Status wie verfügbar, belegt, Störung...) zu unterscheiden, werden Styling-Attribute wie Farbe, Form, Rahmen oder Muster verwendet.

Die folgende Ansicht in Bild 16 zeigt ein Beispiel, wie die GUI prototypisch für ein Smartphone umgesetzt wurde. Die GUI kommuniziert mit den Maschinen über OPC UA und ist hardware-interoperabel für verschiedene Geräte und Betriebssysteme wie z. B. Android, Windows, iOS und Linux.



Bild 16: Kransteuerung mit GUI Element

Die GUI erfordert am Anfang eine Identifikation des Bedieners, um den Zugriff auf das Menü der Assistenzfunktionen zu autorisieren. Mit diesem Autorisierungsverfahren ist es möglich, verschiedene Zugriffsebenen in Abhängigkeit von den Bedienerfähigkeiten zu definieren. Das Authentifizierungsverfahren wurde hier unter Verwendung der RFID-Technologie implementiert. Auch weitere Technologien, wie QR-Codes und Kamera können genutzt werden, um das Pairing von Wearable und Smart Device in einfacher Weise zu ermöglichen. Nach der Authentifizierung kann der Bediener die Maschinen auswählen und reservieren, die er zur Erfüllung der Aufgabe benötigt.

Anhand der Farbe und Form der Objektdarstellungen können die Bediener z. B. unterscheiden,

- ob die Maschine von ihm selbst oder von einem anderen Bediener reserviert ist oder ob sie verfügbar ist,
- ob die Maschine mit dem Netzwerk verbunden ist.
- Auch der aktuelle Status der Maschinen, z. B. Betriebsbereitschaft, Warn- oder Fehlermeldungen, wird angezeigt.

Die Bediener können Maschinen auf dem Bildschirm auswählen und jene Assistenzfunktionen, die von der/den ausgewählten Maschine/n ausgeführt werden können, werden mittels entsprechender Schaltflächen angezeigt. Wenn der Bediener beispielsweise einen verfügbaren Kran auswählt, wird die Schaltfläche "Reservieren" angezeigt, und der Bediener kann den Kran durch Anklicken der entsprechenden Schaltfläche reservieren. Wenn der Bediener die Katzen dieses Krans auswählt, werden die dazugehörigen verfügbaren Assistenzfunktionen (siehe Abschnitt 2) angezeigt. Sobald eine Assistenzfunktion gewählt wurde, informiert die GUI den Bediener über die nächsten Schritte, wie z. B. die Auswahl der Master-Katze, den Zielort oder das zu verfolgende FTS.

Nach der Selektion der Assistenzfunktion kann die Kranbewegung beginnen und startet, sobald der Bediener eine dedizierte Freigabetaste an der Funksteuerung betätigt. Falls die Freigabetaste während der Bewegung nicht mehr betätigt wird, wird die Funktion unterbrochen und alle Kranbewegungen kommen zum Stillstand. Schließlich wird der Benutzer über den Status der gewählten Assistenzfunktionen (gestartet, aktiv, beendet) informiert und hat zu jeder Zeit auch die Möglichkeit, aktive Assistenzfunktionen wieder zu stoppen.

Wenn die Assistenzfunktion noch nicht vollständig ausgeführt wurde, kann sie durch erneutes Betätigen der Freigabetaste fortgesetzt werden.

6 Indoor-Lokalisierungssystem

Die Lokalisierung von Maschinen und Personen ist Grundvoraussetzung, um ortsbezogene Daten über die OPTIMUM API (Application Programming Interfaces) zur Verfügung stellen zu können. Daher ist es wichtig, ein robustes und zuverlässiges Ortungssystem zu haben, um Funktionen, die einen Ortsbezug benötigen zu unterstützen.

Ein Pfeiler der im Projekt umgesetzten Lokalisierung ist die Positionsbestimmung über UWB (Ultrabreitband). Dies ist eine funkbasierte Technologie, die ein breites Frequenzspektrum von mindestens 500 MHz nutzt. Das macht UWB im Vergleich zu anderen Funkkonzepten gegenüber Störungen robust. Auch die Interferenz mit anderen Schmalbandlösungen ist sehr gering, was die Koexistenz verschiedener Systeme ermöglicht. In Kombination mit einer sehr präzisen Uhr auf den UWB-Chips ist es möglich, die Distanz zwischen zwei Geräten zu ermitteln.

Um aus den mittels des UWB-Systems gemessenen Entfernungen eine Position zu ermitteln, wird ein Kalman-Filter verwendet, der auf dem Prinzip der Trilateration beruht. Diese benötigt eine Distanzmessung zu drei ortsfesten Ankern mit bekannter Position, um eine eindeutige Position in einem zweidimensionalen Raum oder zu vier Ankern in einem dreidimensionalen Raum bestimmen zu können. Bild 17 zeigt einen typischen Aufbau zur Lokalisierung eines mobilen Tags. Die mobile Einheit misst die Abstände zu jedem Anker in Reichweite. Diese Messungen werden verwendet, um Kreise mit dem entsprechenden Anker als Zentrum und dem Abstand als Radius zu erstellen. Im Falle einer perfekten Messung entspricht der Schnittpunkt der Kreise der eindeutigen Position des Tags. Aufgrund von Messungenauigkeiten, die zum Beispiel durch Mehrwegeausbreitungen des Funksignals entstehen können, kann die Position nicht eindeutig aufgelöst werden und wird statistisch über den Kalman-Filter bestimmt [11].

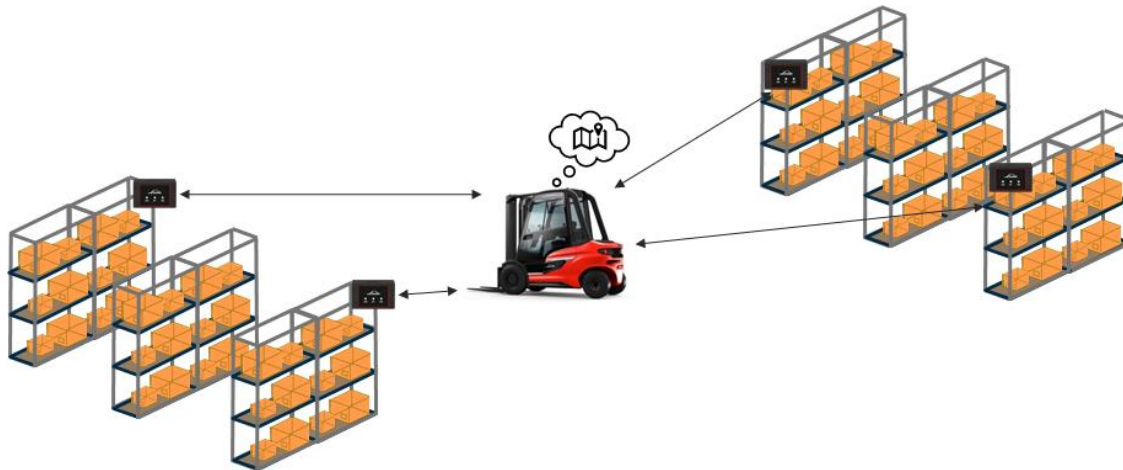


Bild 17: Aufbau des Funklokalisierungssystems

Bei der Lokalisierung von Personen wird - neben UWB - auch eine Inertial Measurement Unit (IMU) verwendet. Eine IMU misst die Beschleunigungen und Rotationsgeschwindigkeiten über jede der drei Raumachsen. Beide Messungen werden verwendet, um den lokalen IMU-Referenzrahmen zunächst an der vertikalen Achse über die Gravitation an der realen Welt auszurichten und seine Drehung zu verfolgen. Dann wird die gemessene (und gedrehte) Beschleunigung zweimal integriert, um die Positionsänderung der Person zu berechnen.

Die permanente Integration von verrauschten Sensorwerten resultiert in einem stetig ansteigenden Fehler, der die Genauigkeit der Lokalisierung im Laufe der Zeit beeinträchtigt. Dieser Effekt wird durch Zero-Velocity-Updates (ZUPT) mit fußmontierten Sensoren abgeschwächt. Diese Methode nutzt die Zeitspannen, in denen ein Fuß den Boden berührt, um den akkumulierten Fehler zu analysieren und zu korrigieren, da die tatsächliche Änderung von Position und Ausrichtung vorübergehend gleich Null ist. Auf diese Weise werden jeder Schritt direkt gemessen und die Schritttrichtung und Schrittlänge des Benutzers als Ergebnis der ZUPT-Methode ermittelt [9].

Zur alleinigen Nutzung ist diese Methode jedoch nicht geeignet. Daher wurde im Rahmen des Projektes ein Fusionsmodul entwickelt, das es ermöglicht, verschiedene Systeme miteinander zu koppeln. Dies wirkt sich besonders vorteilhaft bei der Kombination aus einer absoluten und einer relativen Positionsquelle aus, wie dies bei der Lokalisierung über UWB und IMU der Fall ist. So wird eine kontinuierliche Kalibrierung der Orientierung des Nutzers erreicht, indem die Schritttrichtungsänderung der IMU und der Bewegungstrend aus den vergangenen UWB-Messungen in einem separaten Kalman-Filter verwendet werden [2,3].

Im OPTIMUM Projekt wird die UWB-Lokalisierung vor allem auf den Industrieriegern, wie den Kranen, FTSS oder Staplern genutzt. Eine Kombination über das zuvor beschriebene Fusionsmodul wäre im Falle von weiteren Positionsinformationen jedoch auch möglich.

Da die Krane nicht nur in der XY-Ebene sondern auch vertikal in der Z-Achse verfahren, hat jeder Kran zwei UWB-Tags. Je einer an jeder Laufkatze für die Bestimmung der X- und Y-Koordinaten. Ein weiterer Tag ist am Lasthaken angebracht, damit der entsprechende Tag an der Laufkatze die Z-Koordinate bestimmen kann. Die Tags an den Laufkatzen sind

über eine CAN-Schnittstelle mit der OPTIMUM Steuerung verbunden, um der Steuerungsanwendung die benötigten Positionsinformationen bereitzustellen.

Bei Personen besteht die besondere Herausforderung darin, dass die Anbringung eines UWB-Tags nicht an jeder Position des Körpers möglich ist. Daraus folgen Abschattungen der Antenne, die zu einem Abfall in der Genauigkeit der UWB-Lokalisierung führen können. Daher wurde bei Personen, wie einem Kranbediener, von vornherein auf eine Kombination mit einer IMU gesetzt. Aufgrund dessen wurde ein „Wearable“ entwickelt, das die Anbringung verschiedener Sensorik an den Körper erlaubt. Bild 18 zeigt die einzelnen Komponenten, die für die Realisierung des Prototyps genutzt wurden.

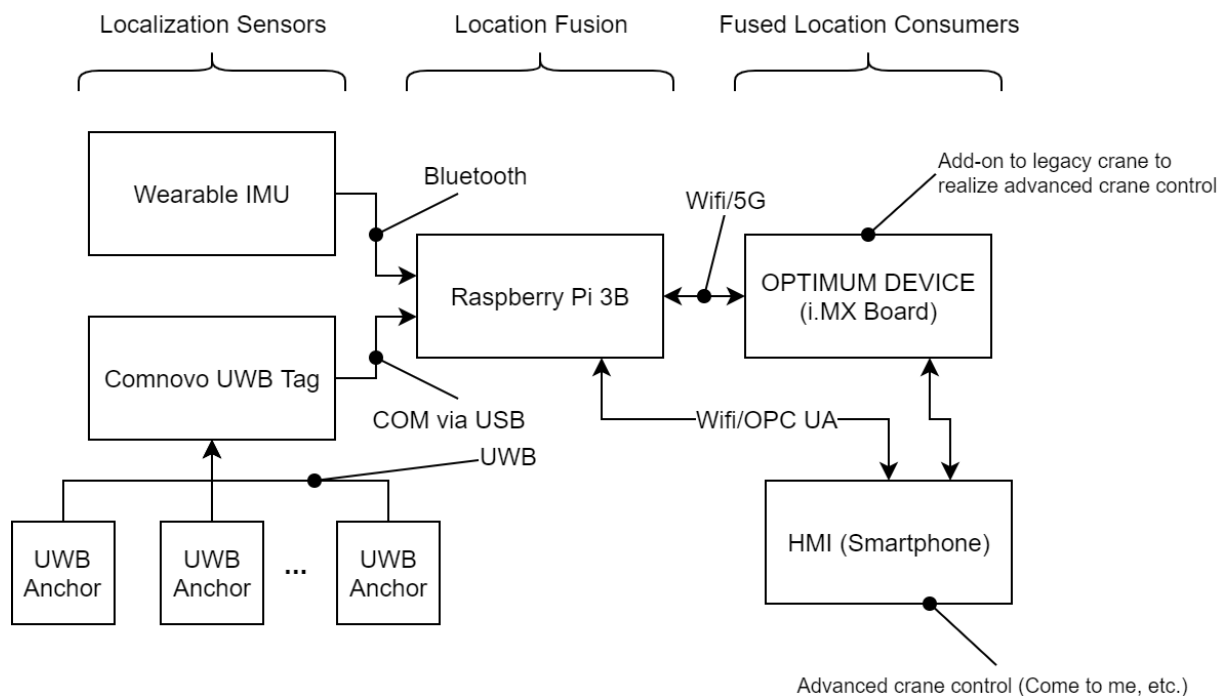


Bild 18: Architektur des Wearables

Die genutzte IMU enthält eine Firmware, die den Schrittlängenvektor aus den IMU-Rohdaten ermittelt. Wurde ein Schritt mit Hilfe des ZUPT-Algorithmus erkannt, wird der Schrittvektor über Bluetooth an eine zentrale Verarbeitungseinheit gesendet. Genauer gesagt, wird ein Rohdatenpaket, bestehend aus Schrittlänge und Bewegungsrichtung, gesendet.

Die Verarbeitungseinheit kombiniert die absolute Position des UWB-Positionierungssystems mit den relativen Bewegungsdaten der tragbaren IMU. Die Verarbeitungseinheit veröffentlicht die Standortdaten über OPC UA, wobei eine „leichtgewichtige“ Version der IIoT-Plattform zum Einsatz kommt. Darüber kann ein Benutzergerät – z. B. ein Smartphone – auf die fusionierten Positionsdaten zugreifen und diese verwenden (Bild 19).

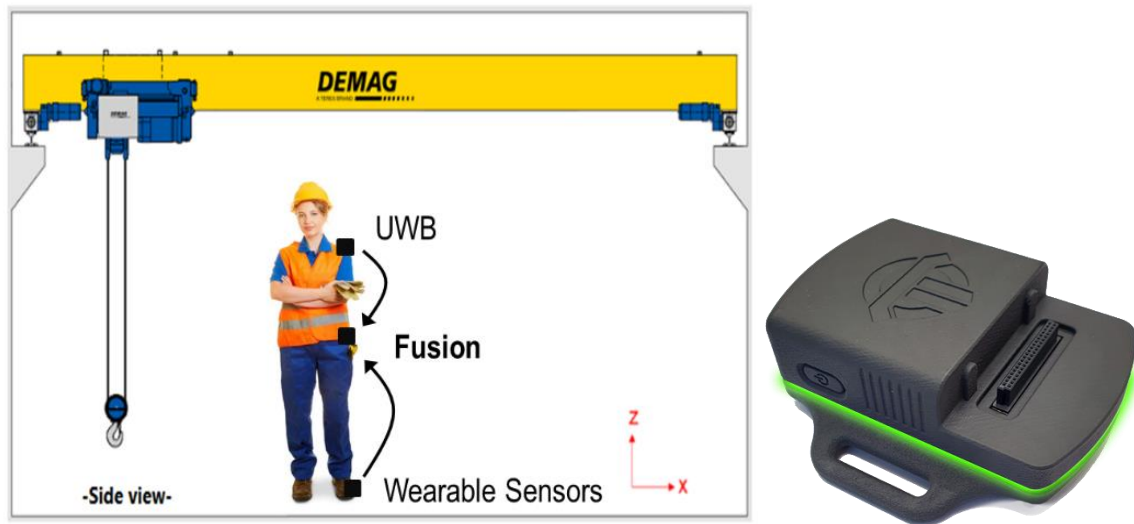


Bild 19: Anwendungsszenario Bedienerlokalisierung mit Wearables und IMU

7 3D-Visualisierung und Simulation

Das Ziel der 3D-Visualisierung und Simulation ist es, die in OPTIMUM entwickelten Assistenzfunktionen zu veranschaulichen und anschließend in einer virtuellen Umgebung zu simulieren. Dies ermöglicht die Demonstration der innovativen Neuerungen und deren Vergleich mit konventionellen Kranbedienungsfunktionen.

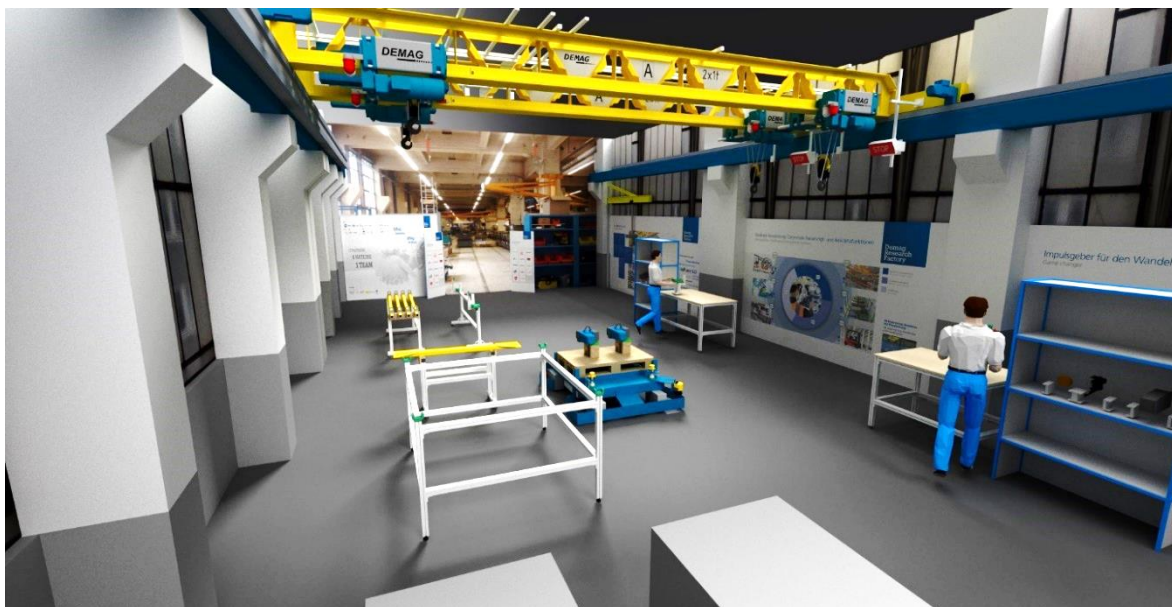


Bild 20: 3D-Visualisierung des MH Demonstrators mit TaraVRBuilder

Die im Planungstool erstellten Fabriklayouts lassen sich in die Simulations-Anwendung übertragen, sodass hier keine zusätzlichen 3D-Modelle benötigt werden. Die in der Planungsphase verwendeten 3D-Geometriemodelle finden in Simulationsmodulen ihre Wiederverwendung (Bild 20).

Zum Aufbau eines Simulationsmodells für die in OPTIMUM entwickelten Technologien werden folgende Simulationsmodule benötigt:

- Kransystem bestehend aus
 - mehreren Kranen
 - pro Kran mehreren Laufkatzen mit je einem Hebezeug
- Bediener
- Fahrzeuge, FTS
- Kontextabhängige Objekte (z. B. eingeschränkte Zonen)

Für die Kommunikation mit Steuerungssystemen bietet das Simulationstool eine Plugin-Schnittstelle, über die die bidirektionale Anbindung an das verteilte Steuerungssystem DOME (Distributed Object Model Environment) des Partners IFAK realisiert wurde. Über diese Plugin-Schnittstelle sind auch alle anderen Simulationskomponenten mit der verteilten Steuerung verbunden.

Der Benutzer kann den virtuellen Kran per Smartphone bedienen - genau wie auch den Kran im realen Demonstrator. In der 3D-Simulation gibt es Module, um das Verhalten der Krane, der Bediener und der Fahrzeuge zu simulieren. Die Positionsdaten der einzelnen Objekte, die sich aus dem simulierten Verhalten ergeben, werden dann über das DOME-Plugin an die DCP übertragen.

Im Falle der Bediener und Gabelstapler, die keine Steuerungsanwendung benötigen, werden die im Simulationsmodell generierten Positionsdaten an die IIoT-Plattform gesendet. Im realen Demonstrator bezieht die IIoT-Komponente die Positionsdaten direkt vom Positionstag über UWB und stellt sie auf dem OPC UA-Informationsmodell der IIoT-Plattform zur Verfügung. Daher hat der für die Simulation verwendete Ansatz im Wesentlichen das gleiche Endergebnis wie im realen Demonstrator, bei dem die IIoT-Plattform über die Positionsdaten des entsprechenden Bedieners oder Fahrzeugs verfügt.

Die IIoT-Plattform verhält sich in der Simulation wie im realen Demonstrator, da sie keine direkte Schnittstelle zu den physischen Komponenten hat. Die verteilte Steuerung ist im Simulationsfall so genau wie möglich an die des realen Demonstrators angepasst. Der Datenfluss von der HMI zur IIoT-Plattform und zur DCP ist genau derselbe, da er nur Standard-Netzwerkverbindungen mit entsprechenden Kommunikationsprotokollen erfordert (Bild 21).

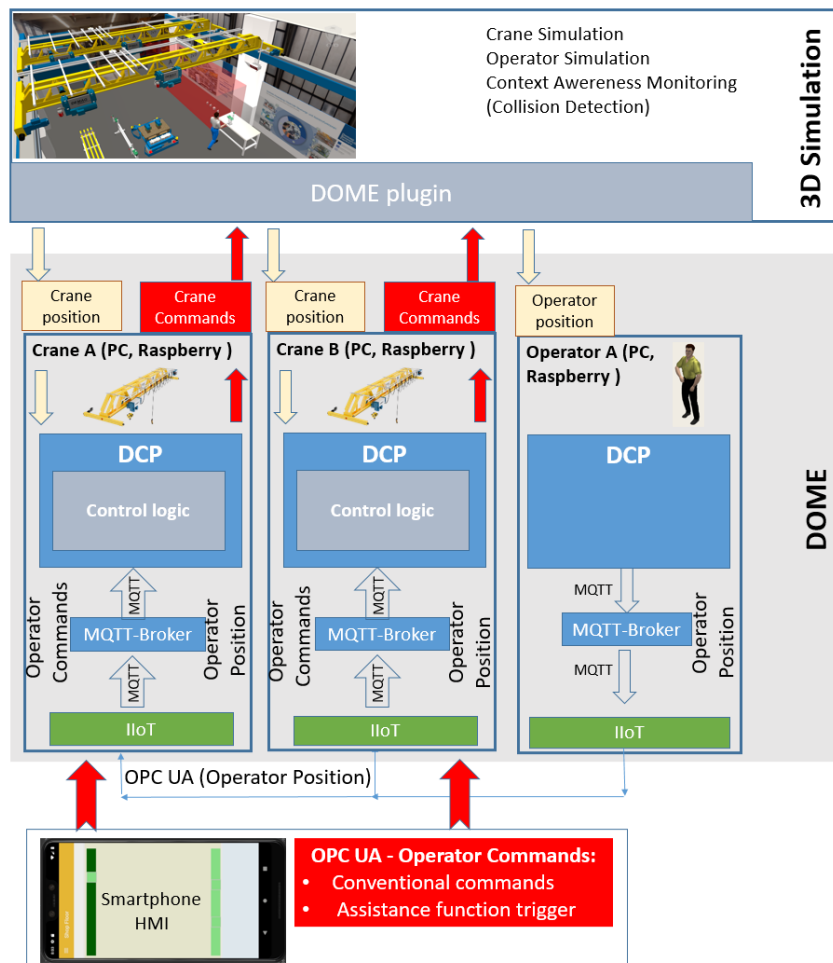


Bild 21: Schematische Darstellung der Kommunikation zwischen virtuellem Demonstrator und realer Steuerung (DCP)

8 Cyber Security

Das OPTIMUM Security Framework implementiert Cyber Security-Maßnahmen in das Architekturkonzept des verteilten Steuerungssystems.

Nach eingehender Analyse der Systemtopologie von IloT-Systemen im Allgemeinen wurden Bedingungen für ein Architekturkonzept für die Cyber Security und darauf aufbauend die Anforderungen für ein solches System mit OPTIMUM-Architektur definiert.

Es wurde eine Bestandsaufnahme der in einem industriellen Steuerungsgerät auf Basis der OPTIMUM-Architektur (IDev) vorhandenen Schnittstellen durchgeführt und ermittelt, wie diese Schnittstellen mit anderen Geräten interagieren können.

Diese Aufstellung diene als Basis zur Identifikation notwendiger und möglicher Absicherungsmaßnahmen in Bezug auf Cyber Security.

Um das System auf konkrete Schwachstellen untersuchen zu können, wurde eine Schwachstellenanalyse nach dem STRIDE-Modell [12] durchgeführt (Bild 22). Dafür wurde zunächst ein repräsentativer Anwendungsfall aus dem deutschen Demonstrator konstruiert, der alle möglichen Interaktionen zwischen Teilnehmern eines OPTIMUM-Systems abdeckt.

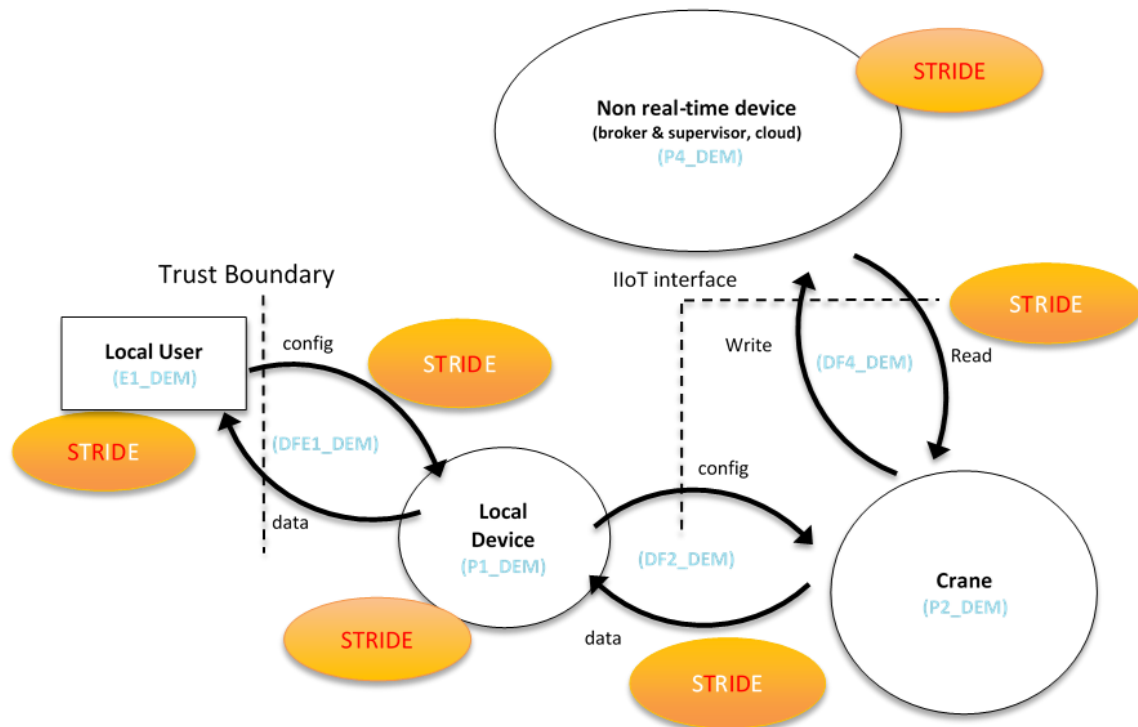


Bild 22: Schwachstellenanalyse mit der STRIDE-Methodik

Die Analyse dieses Anwendungsfalls ergab eine Reihe von Schwachpunkten, die mit geeigneten Maßnahmen eingedämmt oder behoben wurden.

Zunächst wurde sich mit grundlegenden Prinzipien der Datensicherheit beschäftigt. Die Kommunikationsstränge – und hier in erster Linie die drahtlosen – wurden gegen Abhören und Datenmanipulation abgesichert.

Hierzu wurde die Einführung von TLS-gesicherter (Transport Layer Security) Kommunikation auf Basis einer OPTIMUM-PKI (Public Key Infrastructure) vorgeschlagen, in deren Zentrum eine lokale Certificate Authority (CA) steht, die im lokalen OPTIMUM-System für Ausstellung, Verifikation und Verwaltung von Systemzertifikaten zuständig ist.

Geräte werden über einen speziellen Provisionierungsprozess mit lokaler Zertifizierung der CA ausgestattet und können unter Verwendung dieser OPTIMUM-eigenen Zertifikate eine gesicherte Kommunikation untereinander aufbauen.

Zur Implementation dieser Funktionalität kommt ein Backend-Server zum Einsatz, auf dem sowohl eine Certificate Authority implementiert wurde - also auch ein Webservice, der die Funktionalität u. a. der CA für alle Kommunikationsteilnehmer nach außen als RESTful-API zur Verfügung stellt.

Ein in Zusammenhang mit der Verteilung von Zertifikaten wichtiger Punkt ist die Verwahrung der zu den Zertifikaten gehörenden geheimen Schlüssel, die unbedingt vor dem Zugriff Dritter auf den Geräten geschützt werden müssen, um Missbrauch zu verhindern.

Hierzu wurde die Integration von speziellen Mikrocontrollern für Cyber Security, sogenannte

Secure Elements (SE), gewählt. Diese Bausteine bieten nicht nur die Möglichkeit zum sicheren Speichern von geheimen Informationen wie z. B. privaten Schlüsseln, sondern bieten auch kryptographische Operationen nach außen an. Jedes OPTIMUM-Gerät wird mit einem solchen SE ausgestattet, um dort private Schlüssel und Zertifikate sicher abzulegen.

Mit diesen Maßnahmen konnten die wichtigen Aspekte der Vertraulichkeit, Integrität und Authentizität der Daten in der Kommunikation zwischen den Systemteilnehmern hergestellt werden.

Im Bereich der Zugangskontrolle bezüglich der Nutzer des Systems waren weitere Maßnahmen notwendig, die auf der TLS-gesicherten Gerätekommunikation aufbauen.

Für die Nutzeranmeldung war es erforderlich, zwei unterschiedliche Verfahren anzubieten: eines für Systemadministratoren mit Benutzername und Kennwort für z. B. Wartungs- und Konfigurationsarbeiten. Das zweite für Anwender im Bereich des OPTIMUM-Systems, die Maschinen und Geräte nutzen. Hier wurde ein 2-Faktor-Authentisierungsansatz (2FA) mit NFC-Badge und Kennwort/Fingerabdruck gewählt.

Die Benutzeranmeldung über einen PC o. ä. erfolgt für Administratoren und Anwender klassisch unter Verwendung von Benutzername und Kennwort. Die Verbindung der auf dem PC laufenden Applikation erfordert ein OPTIMUM-Zertifikat auf PC-Seite.

Die Benutzeranmeldung von operativem Personal im Produktionsumfeld erfolgt über eine App auf der HMI (z. B. Tablet). Nach Aufrufen der App muss sich der Benutzer zunächst mit seinem Dienstaussweis identifizieren und dann in einem zweiten Schritt unter Angabe einer PIN am System authentisieren.

Für beide Arten der Anmeldung wurde im Backend eine Benutzerdatenbank implementiert, in der neben den eigentlichen Benutzerdaten auch die Autorisierungen für den jeweiligen Nutzer hinterlegt werden. Diese regeln, welche Dienste im System dem Anwender zur Verfügung stehen und welche Maschinen in welchem Umfang genutzt werden dürfen.

Auf diese Art wurde die Zugangskontrolle umgesetzt, um tatsächlich nur zugelassenen Personen Systemzugang zu gewähren.

Ein weiteres Element zur Absicherung des Systems ist ein einfach zu bedienender Provisionierungsprozess für Geräte, die neu ins System eingeführt werden sollen. Hierfür wurde ebenfalls eine HMI-App entwickelt, die über eine TLS-gesicherte Verbindung an das Backend angebunden ist. Über ein Verfahren, basierend auf einer NFC-Kopplung des zu provisionierenden Geräts mit der App auf dem Tablet/Smartphone in Kombination mit einem nach dem SCP03-Protokoll gesicherten Tunnel zum Backend, kann ein neues Systemzertifikat sicher auf dem SE des neuen OPTIMUM-Geräts abgelegt werden. Der Benutzer der App braucht keinerlei Wissen über die zugrunde liegenden Prozesse.

In [5] und [10] wird ein erweitertes Security-Konzept vorgestellt, das über die integrierten Sicherheitsfunktionen der verwendeten Kommunikationsprotokolle hinaus geht und u. a. eine detaillierte Rechtevergabe (Autorisierung) ermöglicht.

Zusammenfassung

Die in OPTIMUM entwickelten Technologien haben das Potential, Maschinen- und Hebezeughersteller zu befähigen, Hardwarevarianten der eingesetzten Steuerungstechnik zu reduzieren und gleichzeitig die Modularität der eingesetzten Software zu erhöhen. Kontext- und Positionsinformationen ermöglichen Assistenzfunktionen, die zu höherer Effizienz, Komfort und Safety (funktionale Sicherheit) führen und somit zu Chancen für neue, innovative Produkte am Markt. Unternehmen, die heute klassische Steuerungstechnik vertreiben, werden befähigt, auf die Herausforderungen der komponentenbasierten, verteilten industriellen Steuerung zu reagieren.

Ausgewählte Ergebnisse des Projektes OPTIMUM werden über die aktive Mitarbeit mehrerer Partner in verschiedene, industrienähe strategische Arbeitskreise von Verbänden oder der Plattform Industrie 4.0 hineingetragen.

Quellenverzeichnis:

- [1] Persico, G.; Hanisch, K.; Cermann, H.: 3D Engineeringtools zur Planung, Visualisierung und Simulation von Krananlagen im Kontext Industrie 4.0, In: Tagungsband der Kranfachtagung 2020, Magdeburg
- [2] Hölzke, F.; Danielis, P.; Golatowski, F.; Timmermann, D.: A Fusion Approach for the Localization of Humans in Factory Environments. In: Proceedings of the 1st IEEE International Conference on Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS-2018), pp. 59-64, ISBN: 978-1-5386-6531-2, Saint-Petersburg, Russland, Mai 2018
- [3] Hölzke, F.; Raddatz, H.; Golatowski, F.; Timmermann, D.; Lategahn, J.: Evaluating the Synergy of Relative and Absolute Indoor Localization in Industrial Spaces. In: Proceedings of the 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON), pp. 1-6, Lisbon, Portugal, Oktober 2019
- [4] Persico, G.; Raddatz, H.; Tran, D. L.; Riedl, M.; Varutti, P.; Tekkalmaz, M.: Communication Solutions for the Integration of Distributed Control in Logistics Systems. In: Proceedings of the 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON), pp. 1-6, DOI: 10.1109/IECON.2019.8927834, Lisbon, Portugal, Oktober 2019
- [5] Persico, G.; Raddatz, H.; Tekkalmaz, M.; Meisberger, K.; Yu, T.; Riedl, M.: Sichere Kommunikation für kollaborative Steuerungssysteme. In: Proceedings 11. Jahreskolloquium Kommunikation in der Automation (KommA), pp. 1-3, Lemgo, Deutschland, Springer, Oktober 2020
- [6] Persico, G.; Raddatz, H.; Tran, D. L.; Riedl, M.; Tekkalmaz, M.: Verteilte Steuerungen für den Einsatz in Logistiksystemen. In: Proceedings VDI-Kongress Automation 2020, Baden-Baden, Deutschland, ISBN: 978-3-18-092375-8, VDI-Verlag, Juli 2020
- [7] Golatowski, F.; Raddatz, H.; Hölzke, F.; Janchivnyambuu, E.; Danielis, P.; Timmermann, D.: An OPC UA-based Crane Model Using Time-Sensitive Networking Technology. In: Proceedings of the 3rd IEEE International Conference on Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS), pp. 1-6, DOI: 10.1109/ICPS48405.2020.9274709, Tampere, Finnland, Juni 2020
- [8] Raddatz, H.; Mahmoud, E.; Hölzke, F.; Danielis, P.; Timmermann, D.; Golatowski, F.: Evaluation and Extension of OPC UA Publish/Subscribe MQTT Binding. In: Proceedings of the 3rd IEEE International Conference on Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS), pp. 1-6, DOI: 10.1109/ICPS48405.2020.9274696, Tampere, Finnland, Juni 2020
- [9] Hölzke, F.; Heller, J.; Deatcu, S. A.; Golatowski, F.; Timmermann, D.: Step Detection through Ultra-Low Complexity Zero Crossing Analysis, 15th IEEE International Conference on Signal Processing (ICSP), China, Dezember 2020
- [10] Yu, T.; Raddatz, H.; Meisberger, K.; Tekkalmaz, M.; Persico, G.; Riedl, M.: IT Security for Collaborative Machines and Human-Machine Interaction; 26th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), pp. 1-8, DOI: [10.1109/ETFA45728.2021.9613609](https://doi.org/10.1109/ETFA45728.2021.9613609), Vasteras, Schweden, September 2021
- [11] Patwari, N.; Ash, J. N.; Kyperountas, S.; Hero, A. O.; Moses, R. L.; Correal, N. S.:

Locating the nodes: cooperative localization in wireless sensor networks. Signal Process. Mag., pp. 54–69, 2005

- [12] Kohnfelder, L.; Garg, P.: The threats to our products. Microsoft Interface, <https://adam.shostack.org/microsoft/The-Threats-To-Our-Products.docx>, April 1999

Abkürzungsverzeichnis:

2FA	2-Faktor-Authentisierungsansatz
3D	Dreidimensional
3D-VS	3D-Visualisierung
A	Anker
API	Application Programming Interface
CA	Certificate Authority
CAN	Controller Area Network
CAO	Control Application Object
CAS	Context Awareness Service
DCP	Distributed Control Platform
DOMÉ	Distributed Object Model Environment
FTS	Fahrerloses Transportsystem
GUI	Graphical User Interface
HMI	Human Machine Interface
HW	Hardware
IDev	Industrieller Device
IIoT	Industrial Internet of Things
IMU	Inertial Measurement Unit
LOC	Localization
MH	Material Handling
MP	Montageplatz

MQTT	Message Queuing Telemetry Transport
NFC	Near Field Communication
OPC UA	Open Platform Communications Unified Architecture
OPTIMUM	OPTimised Industrial IoT and Distributed Control Platform for Manufacturing and Material Handling
OS	Operating System
PC	Personal Computer
PKI	Public Key Infrastructure
R	Regal
RFID	Radio-Frequency Identification
SE	Secure Element
SP	Stellplatz
STRIDE	Spoofing / Tampering / Repudiation / Information disclosure / Denial of service / Elevation of privilege
T	Tag
TLS	Transport Layer Security
UWB	Ultra Wide Band
WA	Warenausgang
WE	Wareneingang
WiFi	Wireless Fidelity
ZUPT	Zero Velocity Update

Beteiligte Projektpartner:

Giuliano Persico	DEMAG Cranes & Components GmbH, Wetter
Anja Fischer	DEMAG Cranes & Components GmbH, Wetter
Frank Golatowski	Universität Rostock
Fabian Hölzke	Universität Rostock
Hannes Raddatz	Universität Rostock
Matthias Riedl	Institut für Automation und Kommunikation, Magdeburg
Thomas Bangemann	Institut für Automation und Kommunikation, Magdeburg
Duy Lam Tran	Institut für Automation und Kommunikation, Magdeburg
Karsten Meisberger	NXP, Hamburg
Hagen Borstell	THORSIS Technologies GmbH, Magdeburg
Klaus Hanisch	TARAKOS, Magdeburg
Henry Cermann	TARAKOS, Magdeburg
Metin Tekkalmaz	ERSTE, Ankara
Julian Lategahn	COMNOVO GmbH, Dortmund