

Referenzfeld zur Erforschung und Entwicklung neuartiger hybrider Formen der Zusammenarbeit von Menschen und Maschinen in der Logistik

Reference field for research and development of novel hybrid forms of human
machine interaction in logistics

*Felix Zeidler
Haci Bayhan
Aswin Karthik Ramachandran Venkatapathy
Michael ten Hompel*

*Lehrstuhl für Förder- und Lagerwesen (FLW)
Fakultät Maschinenbau
Technische Universität Dortmund*

Der vorliegende Artikel beschreibt das Konzept eines derzeit im Aufbau befindlichen Forschungszentrums, das als neuartiges experimentelles Referenzfeld für innovative Dienstleistungen in der Intralogistik dient. Die Kernaufgabe des Zentrums besteht in der Erforschung eines hybriden Wertschöpfungsnetzwerks, in dem Menschen und Maschinen miteinander im Dialog stehen und gemeinsam Arbeitsaufgaben erledigen. Diese im Rahmen der vierten industriellen Revolution aufkommende neuartige Form hybrider Interaktion bringt neue Herausforderungen mit sich, die es wissenschaftlich zu untersuchen gilt. Beispielsweise entstehen durch den Einsatz von Echtzeit-Lokalisierungs- und Virtual-Reality-Systemen neue Möglichkeiten im Bereich der Mensch-Maschine-Interaktion (Human-Machine-Interaction - HMI). Durch die Ausstattung des Forschungszentrums mit unterschiedlichen modular sowie frei skalierbaren Referenz- und Experimentiersystemen wird u. a. die Möglichkeit geschaffen, die zu untersuchenden Szenarien in Echtzeit zu simulieren und damit einen digitalen Zwilling der Realität zu erschaffen. Die vollständige Flexibilität der eingesetzten Systeme (flexible Systemvernetzung, flexible Nutzung der generierten Daten durch andere Systeme etc.) führt zu großen Datenmengen, die mit Hilfe von Machine-Learning- und Deep-Learning-Konzepten so kombiniert und aufbereitet werden sollen, dass neue Erkenntnisse gewonnen werden können. Die beschriebene Systemflexibilität führt u. a. zu der zentralen Herausforderung, eine gemeinsame Syntax für die Interoperabilität der eingesetzten Systeme zu generieren.

[Schlüsselwörter: hybride Dienstleistungen, soziotechnische Systeme, cyberphysische Systeme, Interoperabilität, Mensch-Maschine-Interaktion, Forschungszentrum]

The article describes the concept of a research center (currently under construction) that is going to be used as a novel experimental reference field for innovative services in intralogistics. An important aim of the center is to enable research of hybrid value added networks, where humans and machines intimately cooperate with each other to complete work tasks together. In the context of Industry 4.0 this novel form of hybrid interaction entails new challenges that need to be further researched - for example, the use of real-time localization and virtual reality systems creates new possibilities in the field of human-machine interaction (HMI). Additionally, the research center is equipped with various modular and freely scalable reference and experiment systems that allows to emulate different real time scenarios, including digital twin simulation concepts. The full system flexibility (flexible system networking, flexible use of generated data etc.) leads to high datasets. With the help of machine learning and deep learning concepts, new knowledge from this dataset can be extracted. The described system flexibility leads to new interoperability problems. In order to ensure the interoperability of the systems a common syntax has to be provided. Therefore, more research on this topic is needed.

[Keywords: hybrid services, socio-technical systems, cyber-physical systems, interoperability, human-machine interaction, research center]

1 EINFÜHRUNG

Bereits seit einigen Jahren beschäftigen sich Wissenschaftler mit dem durch Industrie 4.0 hervorgerufenen Paradigmenwechsel in der Organisation und dem Management der gesamten Wertschöpfungskette sowie mit dessen Auswirkungen auf Wirtschaft und Gesellschaft. Die vierte

industrielle Revolution führt u. a. zu grundlegenden Veränderungen bei den in Produktion und Logistik zum Einsatz kommenden Technologien, Services und Methoden. Ursprung dieser Veränderungen ist die Vernetzung aller an den entsprechenden Prozessschritten beteiligten Entitäten sowie die ständige Verfügbarkeit aller relevanten Informationen in Echtzeit. Durch den bedarfsabhängigen Ad-hoc-Zusammenschluss von technischen Objekten, Menschen und intelligenten Systemen entstehen dynamische, echtzeitfähige sowie dezentral und autonom agierende Wertschöpfungsnetzwerke. (vgl. [IN15])

Die technologische Basis für Industrie 4.0 bilden datentechnisch vernetzte Ressourcen und Leistungsobjekte wie z. B. Maschinen, Anlagen, Produkte, Transporteinheiten, Komponenten und Materialien, die mit diversen Sensoren zur Wahrnehmung ihrer Umwelt und einer dezentralen IT-Intelligenz zur Teilnahme an multiagentenbasierten Wertschöpfungsnetzwerken ausgestattet sind. Diese intelligenten cyberphysischen Systeme (CPS), welche über das Internet oder ein äquivalentes Netzwerk miteinander in Verbindung stehen, sind in der Lage die notwendigen Transformationsprozessschritte sowie die zugehörigen Logistikfunktionen in Abhängigkeit von externen Anforderungen autonom zu organisieren, zu steuern und bei Bedarf ad-hoc anzupassen. Der zurzeit stattfindende „Technologieschub“ bei der Konzeption und Einführung von autonomen CPS-basierten Produktions- und Logistiksystemen sowie die fortschreitende Digitalisierung und Automatisierung führen zur Entwicklung neuer Formen von Dienstleistungen und Arbeitsorganisationen (vgl. [LK13]). Diese neuartigen Formen von hybriden Dienstleistungen, welche auf einer paritätischen Berücksichtigung der technologischen als auch der sozialen Komponente basieren, können bis zu einem spezifischen Punkt simulativ untersucht werden; das für eine Implementierung solcher Systeme und Verfahren in die Industrie zwingend erforderliche tiefergehende Verständnis sowie die damit einhergehende Akzeptanz bei den potentiellen Anwendern können erst durch die Entwicklung entsprechender Demonstratoren und die Anwendung geeigneter Methoden des Change Managements generiert werden.

Der durch Industrie 4.0 getriebene Wandel ist somit noch nicht determiniert und kann individuell gestaltet werden (vgl. [LK13]; [Hir05]). Neben der Frage, wie die Organisation von verantwortungsbewusstem und zielgerichtetem Handeln im Rahmen der Mensch-Maschine-Interaktionen gestaltet werden kann, sollte es zukünftig eine bedarfsgerechte Auseinandersetzung zum Thema hybride Dienstleistungen geben. Schlüsselfaktoren für den erfolgreichen Wandel in Richtung Industrie 4.0 stellen sowohl die physische Implementierung von Demonstratoren als auch die Durchführung von Experimenten in einer realitätsnahen intralogistischen Umgebung dar. Das zu errichtende Forschungszentrum repräsentiert einen solchen Demonstrator, in dem Experimente zu diversen

intralogistischen Industrie-4.0-Szenarien durchgeführt, untersucht und ausgewertet werden können. Die konzeptionelle Beschreibung des Forschungszentrums sowie die zugrundeliegenden wissenschaftlichen Zielsetzungen werden in Abschnitt 2 beschrieben. Kapitel 3 stellt zur entsprechenden Einordnung des Dortmunder Forschungszentrums eine Übersicht bereits existierender und thematisch ähnlich ausgerichteter Einrichtungen zusammen. In Abschnitt 4 findet anschließend eine Vorstellung der Hauptsysteme statt, welche im Forschungszentrum eingesetzt werden. Außerdem werden die systemspezifische Flexibilität und Interoperabilität näher beschrieben. Kapitel 5 fasst abschließend die Beschreibung der eingesetzten Systeme zusammen und geht zudem auf die Forschungsziele ein, die sich aus der Interoperabilität dieser Systeme und der Interaktion mit dem Menschen ergeben.

2 KONZEPTIONELLE BESCHREIBUNG UND WISSENSCHAFTLICHE ZIELSETZUNG

Um der Dynamik- und Komplexitätssteigerung auch in Zukunft gerecht werden zu können und damit den Wettbewerbsanschluss nicht zu verlieren, müssen Unternehmen die Anpassungsfähigkeit ihrer Prozesse und Geschäftsmodelle steigern (vgl. [Hir16]). In Zukunft wird es unabdingbar sein Anpassungsmaßnahmen zu generieren, welche sowohl die Vorteile technologischer Innovationen als auch menschlicher Fähigkeiten kombinieren. Zur Analyse und Bewertung der neuartigen kooperativen Arbeitssysteme wird am Standort Dortmund ein vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördertes interdisziplinäres Forschungsprojekt mit dem Titel „Innovationslabor - Hybride Dienstleistungen in der Logistik“ durchgeführt (vgl. [Fra16]). Dezentralisierung, Vernetzung und Lokalisierung bilden dabei die drei Grundpfeiler eines effizienten hybriden Arbeitsumfeldes. Auf Basis der drei genannten Grundpfeiler besteht die Möglichkeit zahlreiche weitere virtuelle Elemente in den Forschungsrahmen mit aufzunehmen; z. B. die Erstellung und Einbindung eines digitalen Zwillings (vgl. [TU 16]).

Diese neuartige Form einer interdisziplinären, hybriden und prozessübergreifenden Forschungsumgebung soll u. a. einen Beitrag dazu leisten die nachfolgend aufgeführten zentralen wissenschaftlichen Fragestellungen zu beantworten:

- Durch die Entstehung hybrider Kooperationsnetzwerke, bei denen sich Menschen und Maschinen in einem gemeinsamen Arbeitsraum gegenseitig unterstützen und ergänzen, ergibt sich die Frage wie verantwortungsvolles, sicheres und zielgerichtetes Handeln in der zukünftigen Mensch-Maschine-Interaktion gestaltet und organisiert werden kann. Hierbei werden sich zwangsläufig neue arbeitsorganisatorische und arbeitspolitische Herausforderungen ergeben.

- Auf der einen Seite können die im Umfeld der Intralogistik immer weiter ansteigende Menge und Komplexität der Daten zu einer Mehrbelastung der Mitarbeiter führen; z. B. in Form von Demotivation oder Überforderung. Auf der anderen Seite können die zur Verfügung stehenden Daten u. a. die Qualität von Mitarbeiterentscheidungen verbessern. Daher gilt es die Frage zu beantworten, wie die ureigenen Fähigkeiten der Mitarbeiter (Intelligenz, Kreativität, Motorik, Erfahrung, Intuition, Flexibilität etc.) bestmöglich mit den Fähigkeiten technischer (Assistenz-)Systeme (Datenauswertung, -visualisierung, -strukturierung etc.) kombiniert werden können.
- Mit Beantwortung der Forschungsfrage, wie technische Systeme bspw. mittels Big-Data-Analysen oder Verfahren der künstlichen Intelligenz ihre Umwelt intelligenter wahrnehmen, analysieren und bewerten können, soll ein Beitrag dazu geleistet werden deren Anpassungsfähigkeit sowie deren Interaktionsfähigkeit mit dem Menschen und anderen Systemen zu erhöhen.
- [Egh17] geht davon aus, dass bis Ende 2017 8,4 Mrd. vernetzte Geräte im Einsatz sein werden; dies entspricht einem Zuwachs von 31 % im Vergleich zum Vorjahr. Diese zunehmende Vernetzung sowie die dezentrale Steuerung der Akteure eines hybriden Kooperationsnetzwerkes führen dazu, dass die zu verarbeitende Datenmenge je Dekade etwa um den Faktor 1000 ansteigt (vgl. [HKK14]). Daraus leitet sich die Frage ab, wie das aufkommende Datenvolumen sicher, drahtlos und in Echtzeit übertragen werden kann.

Zum Aufbau sowie zur anschließenden Untersuchung von Szenarien, Anwendungsfällen und experimentellen Testumgebungen wird das Forschungszentrum mit flexiblen Referenz- und Experimentiersystemen ausgestattet. Zentrales Merkmal des Zentrums ist dabei die bedarfsabhängige Interoperabilität der eingesetzten Systeme. Die dazu notwendigen Systemanforderungen wurden aus einer im nachfolgenden Kapitel zusammengefassten Studie abgeleitet, welche bereits existierende und thematisch ähnlich ausgerichtete Einrichtungen untersucht.

Eine maßstabs- und detailgetreue Darstellung zum strukturellen Aufbau des Dortmunder Forschungszentrums wird in Abbildung 1 gezeigt. Abbildung 2 gibt zusätzlich einen Ausblick zur intelligenten Vernetzung sowie zur dezentralen Kommunikation der eingesetzten Objekte.



Abbildung 1. Struktureller Aufbau des Forschungszentrums



Abbildung 2. Intelligente Vernetzung von Objekten

3 ÜBERSICHT ZU EXISTIERENDEN FORSCHUNGSZENTREN

Dieser Abschnitt untersucht bestehende wissenschaftliche Einrichtungen verschiedener Forschungsgebiete und leitet aus den generierten Erkenntnissen die Systemanforderungen für das neu zu errichtende Forschungszentrum am Standort Dortmund ab. Wie bereits im Abschnitt zur konzeptionellen Beschreibung des Zentrums dargelegt, ist es für die Erforschung und Entwicklung zukünftiger Logistikanwendungen unabdingbar den wissenschaftlichen Fokus der Einrichtung u. a. auf Lokalisierungs- und damit einhergehend auf Navigationssysteme zu richten. Auf Basis der in [Fra17a], [Aal], [Fra17b], [Tec], [Max13a], [Max13b], [VRR⁺15b], [Ins] und [Max15] beschriebenen Systeme sowie der verfügbaren Publikationen, welche sich auf diese Systeme beziehen, lässt sich ableiten, dass im Forschungszentrum u. a. ein optisches Lokalisierungssystem einzusetzen ist, das in der Lage ist dreidimensionale Koordinaten aller im Erfassungsbereich befindlichen Akteure in Echtzeit bereitzustellen. [Max13a] und [Max13b] bestätigen, dass es weiterhin in Zukunft von zentraler Bedeutung ist die Kommunikationscharakteristiken verschiedener drahtloskommunizierender Einheiten zu verstehen. Aufgrund der Menge an nutzbaren Daten, die im Rahmen von Funkkommunikationen erfasst, verarbeitet und untersucht werden können, wird im Forschungszentrum ein Funkreferenzsystem vorgesehen, das u. a. über die Fähigkeit einer multi-standard Basisbandverarbeitung verfügt (vgl. [VRR⁺15b]). Die genannten Referenzsysteme werden

zukünftig miteinander synchronisiert, so dass die Möglichkeit geschaffen wird die generierten Daten aller verfügbaren Systeme bedarfsorientiert auszugeben oder direkt systemunabhängig weiterzuverarbeiten.

Die Anforderungen an die technische Ausstattung des zu errichtenden Forschungszentrums leiten sich zum einen aus der umfassenden Untersuchung bereits existierender Einrichtungen und zum anderen aus den intralogistischen Zukunftsszenarien der Industrie 4.0 ab, in denen Menschen und Maschinen in einem gemeinsamen Arbeitsraum interagieren, kooperieren und sich mit ihren individuellen Fähigkeiten höchsteffizient ergänzen.

4 REFERENZ- UND EXPERIMENTIERSYSTEME INNERHALB DES FORSCHUNGSZENTRUMS

Die im Rahmen des Forschungszentrums eingesetzten Systeme lassen sich abhängig von deren Verwendungszweck in Referenz- und Experimentiersysteme unterteilen. Neben einer Beschreibung der den beiden Kategorien zugehörigen Systeme beschreibt das Kapitel die Herausforderungen und Lösungsansätze der Systeminteroperabilität.

4.1 REFERENZSYSTEME

4.1.1 OPTISCHES REFERENZSYSTEM

Das eingesetzte Motion-Tracking-System stellt eine der wesentlichen Technologien innerhalb des Forschungszentrums dar. Es ermöglicht die Echtzeit-Lokalisierung von Menschen und flurgebundenen Objekten wie z. B. Transportrobotern, aber auch von fliegenden Objekten wie z. B. Transportdrohnen. Zur Lokalisierung der Entitäten werden diese mit kleinen Markern ausgestattet. Nach einer mit minimalem Aufwand verbundenen Systemkalibrierung kann die Tracking-Software des Kameraherstellers genutzt werden, um die Position der Entitäten zu erfassen und zu verfolgen. Das Motion-Tracking-System dient als Referenzsystem zur Bereitstellung von Positionsdaten der Entitäten mit einer softwareseitig garantierten Genauigkeit von < 1 cm. Zur Einhaltung der Lokalisierungsgenauigkeit wird vorausgesetzt, dass die Systemkalibrierung erfolgreich abgeschlossen wurde und mindestens eine Kamera Sichtkontakt zu drei Markern der zu trackenden Entität hat. Zur Positionserfassung und -verfolgung der Menschen und technischen Objekte bzw. der verbundenen Marker, welche sich innerhalb des Forschungszentrums auf einer Grundfläche von ca. 570 m² dreidimensional bewegen können, werden 38 Motion-Tracking-Kameras eingesetzt. Zur Positionsbestimmung im dreidimensionalen Raum garantiert die Software eine maximale Berechnungszeit von < 1 s. Die eingesetzte Software stellt außerdem eine Schnittstelle zur Anwendungsprogrammierung (Application Programming Interface - API) bereit, die sowohl zur Positionsdatenabfrage on Demand als auch zur Ausgabe eines Positionsdatenstreams aller erfassten Entitäten genutzt werden kann. Um den direkt angebundenen interoperierenden Systemen

neben den „rohen“ Lokalisierungsdaten alle notwendigen Kontextinformationen bereitzustellen, wird innerhalb der Motion-Tracking-Software u. a. die Möglichkeit geboten, eindeutige Identifizierungsmerkmale für die getrackten Entitäten zu definieren.

4.1.2 FUNKREFERENZSYSTEM

Zur Erfassung, Verfolgung und Analyse der drahtlosen Kommunikationsprozesse innerhalb des Forschungszentrums wird dieses mit einem Netzwerk aus Software Defined Radios (SDRs) und entsprechend zugehörigen Antennen ausgestattet. Alle im Bereich von DC bis 6 GHz drahtlos kommunizierenden Geräte können von jedem eingesetzten SDR abgedeckt werden. Die Bandbreite beträgt dabei bis zu 120 MHz. Außerdem verfügt jeder SDR über ein Taktsynchronisationssignal, so dass die Taktfrequenz aller eingesetzten SDRs harmonisiert werden kann. Die Harmonisierung der Taktfrequenz ermöglicht zum einen die Ausführung von Algorithmen wie z. B. Time of Flight (TOF) oder Time Difference of Arrival (TDOA) innerhalb des SDR-Netzwerks und zum anderen die Verwendung von Experimentiersystemen, welche auf dem Einsatz kostengünstiger Transceiver basieren und damit ohne das Taktsynchronisationssignal nicht in der Lage wären eine solche Basisbandverarbeitung durchzuführen. Das eingesetzte Funkreferenzsystem kann u. a. dabei unterstützen verschiedene Funkprotokolle, Lokalisierungs- oder Näherungsalgorithmen zu analysieren, zu entwickeln und zu benchmarken. Unter dem Industrie-4.0-Hintergrund einer Vernetzung aller am Wertschöpfungsprozess beteiligten Entitäten zielt das eingesetzte System speziell auf die Untersuchung von Transceivern ab, die auf Ultra-Low-Power-Energiemanagement basieren und drahtlos lediglich niedrige Datenraten übertragen können.

4.1.3 LASERPROJEKTIONSSYSTEM

Das im Forschungszentrum zum Einsatz kommende Laserprojektionssystem ist als Augmented-Reality-Anwendung ausgelegt und erlaubt die statische sowie dynamische Darstellung virtueller Objekte, Markierungen, Hinweissymbole o. ä. Die Steuerungssoftware des Laserprojektionssystems ermöglicht sowohl die direkte Eingabe visueller Darstellungsformen durch den Anwender als auch die direkte Interoperabilität mit anderen Systemen. So kann bspw. die Verknüpfung mit dem Motion-Tracking-System genutzt werden, um Laserdarstellungen mit bewegten Akteuren zu verknüpfen und diesen nachzuführen. Um trotz dynamischer Projektionen jederzeit eine flimmerfreie und gut sichtbare Laserdarstellung zu gewährleisten, wird das System mit 90-Kpps-Scannern ausgestattet (Kpps - Kilo points per second). Das Laserprojektionssystem kann u. a. als Leitsystem für Roboter oder Menschen eingesetzt werden. Weiterhin können Augmented-Reality-Szenarien simuliert werden; z. B. Szenarien zur Verkehrs- oder Aufprallsimulation, bei denen die

reale Umgebung und die darin enthaltenen physisch bewegten Entitäten wie Roboter oder Menschen mit virtuellen „Laserobjekten“ erweitert wird.

4.1.4 VIRTUAL-REALITY-SYSTEM

Um Konzepte wie den digitalen Zwilling zu ermöglichen, um physisch-reale Logistikumgebungen in der virtuellen Welt zu erweitern, um virtuelle Einrichtungen zu simulieren und um Auswirkungen eines Szenarios möglichst schnell zu verstehen, wird ein Großteil der Wände innerhalb des Forschungszentrums mit millimetergenauen Markierungen versehen. Die Markierungen fungieren als Referenzmarker für die Kamera des eingesetzten Virtual-Reality-Systems. Durch die Orientierung an den Referenzpunkten können Position, Ausrichtung und geometrische Abbildung der virtuellen Umgebung auf die Gegebenheiten der realen Umgebung abgestimmt werden, so dass physische und erweiterte Realität für den Anwender nahtlos ineinander übergehen.

4.2 EXPERIMENTIERSYSTEME

4.2.1 ROBOTERSYSTEME

Im Rahmen des Forschungszentrums wird u. a. untersucht, inwieweit Schwärme aus mobilen Transportrobotern und/oder autonomen Drohnen einen Beitrag dazu leisten können der zukünftigen Komplexität des intralogistischen Industrie-4.0-Umfeldes gerecht zu werden. Ein Teil der Experimente zielt z. B. darauf ab die Systemimplementierungsphasen so kurz und einfach wie möglich zu gestalten sowie die notwendigen Systemanpassungen während des Betriebs möglichst autonom und intelligent auszuführen. Zur weitestgehend realitätsnahen und vielfältigen Abbildung industrieller Materialflussszenarien wird das Forschungszentrum u. a. mit mobilen Regalen und mobilen Transportrobotern ausgestattet, welche über eine Hubeinrichtung in der Lage sind die mobilen Regale zu transportieren (siehe dazu auch Abbildungen 1 und 2). Durch eine begrenzte Anzahl an automatischen Roboterladestationen wird dem Prozess eine weitere Dimension der Ressourcenplanung hinzugefügt. Um dem übergeordneten Ziel der Erforschung hybrider Dienstleistungen gerecht zu werden, sind die Transportroboter mit allen notwendigen Sicherheitseinrichtungen ausgestattet, so dass sie gemeinsam mit dem Menschen in einem Raum interagieren können.

Drohnen werden im industriellen Umfeld bereits heute zum Bestandsmanagement sowie zum Transport von kostenintensiven oder zeitkritischen Bauteilen eingesetzt (vgl. [FLU16]; [Dro]). Im Rahmen des Forschungszentrums werden frei programmierbare Drohnen als Forschungsplattformen eingesetzt um zu untersuchen, wie die Abstimmung und Aufteilung von Arbeitsaufgaben zwischen Drohnen, Menschen und weiteren Entitäten noch effizienter gestaltet werden kann.

4.2.2 LR-WPAN UND ANDERE DRAHTLOSNETZWERKE

Drahtlose Sensornetzwerke (WSN – Wireless Sensor Networks) sind eine aus dem Internet der Dinge (IoT – Internet of Things) abgeleitete Terminologie, die speziell auf Geräte abzielt, welche zur Erfassung physikalischer Parameter verwendet werden, ein Low-Power-Energiemanagement aufweisen und meist nur geringe Datenübertragungsraten ausführen können. Diese Terminologie wurde als Low Rate Wireless Personal Area Network (LR-WPAN) in einem IEEE-Standard zusammengeführt. Die beschriebene Art von technischen Geräten wird vermehrt im Bereich von Materialflusssanwendungen eingesetzt, da sie aufgrund ihrer dezentralen und autonomen Funktionalitäten dazu beitragen kann die Komplexität der vorliegenden Prozesse zu reduzieren. Die während der Prozessausführung aufgezeichneten Daten weisen eine hohe Genauigkeit auf, sind in Echtzeit verfügbar und können damit u. a. für zuverlässige Vorhersagen und Prognosen im Rahmen der entsprechenden zugehörigen Prozesse genutzt werden.

In den gesamten Boden des Forschungszentrums wird ein drahtloses Sensornetzwerk mit ca. 550 Knoten eingebracht, wobei die Knoten in einem Rasterabstand von jeweils einem Meter angeordnet sind. Jeder Sensorknoten ist in Übereinstimmung mit den Standards IEEE 802.15.4 PHY und MAC in der Lage drahtlos in den Frequenzbandbreiten 868 MHz und 2,4 GHz zu kommunizieren (vgl. [VRR+15b]; [VRR+15a]). Die Sensoren sind an einen Bus gekoppelt, der für die Programmierung, Energiebereitstellung und das individuelle Zurücksetzen einzelner Geräte genutzt wird. Jeder der mit ca. 15 Sensorknoten besetzten Busstränge ist mit einem individuell programmierbaren Rechner verbunden.

4.2.3 VERNETZTES RECHENSYSTEM

Aufgrund der dezentralen Autonomie von Entitäten beruht der Einsatz zukünftiger Industrie-4.0-Materialflusseinrichtungen in erster Linie auf der Generierung und Nutzung von Daten. Dabei ist nicht nur die Menge der generierten Primärdaten entscheidend, sondern auch die Qualität der erzeugten Metadaten, welche die Primärdaten mit Kontextinformationen anreichern, sowie die systemübergreifende Verfügbarkeit aller Daten. Um die notwendigen Kontextinformationen bereitzustellen und die Daten in Echtzeit an andere Systeme weiterleiten zu können, kommt ein Rechensystem mit einer Breitband-Steuereinheit für simultane Netzwerkverbindungen zum Einsatz.

4.3 SYSTEMINTEROPERABILITÄT

Das vernetzte Rechensystem ist mit dem Taktsynchronisationssignal des Funkreferenzsystems verbunden. Das Motion-Tracking-System ist ebenfalls an dieses Taktsignal angebunden. Da es für jede einzelne Kamera des Motion-Tracking-Systems nicht möglich ist ihre Frames vor dem

Post-Processing in der Tracking-Software zu synchronisieren, werden die vom SDK gestreamten Daten im Augenblick des Synchronisationstaktes mit einem Zeitstempel der entsprechenden Systemzeit versehen. Das vernetzte Rechensystem ist mittels verschiedener Netzwerkkommunikationsstandards dazu in der Lage alle im Forschungszentrum generierten Daten zu verarbeiten. Diese Daten stehen dann im Rechensystem als aktuellster Datensatz zur Verfügung und können mittels TCP/IP von allen innerhalb der Forschungseinrichtung angebotenen Systemen abgerufen bzw. an diese bedarfsgerecht weitergeleitet werden. Zum Beispiel werden die Echtzeitpositionsdaten des Motion-Tracking-Systems diversen Sensoren und Robotern zur Verfügung gestellt, welche die Daten wiederum als Eingangswerte für individuelle Planungsalgorithmen nutzen.

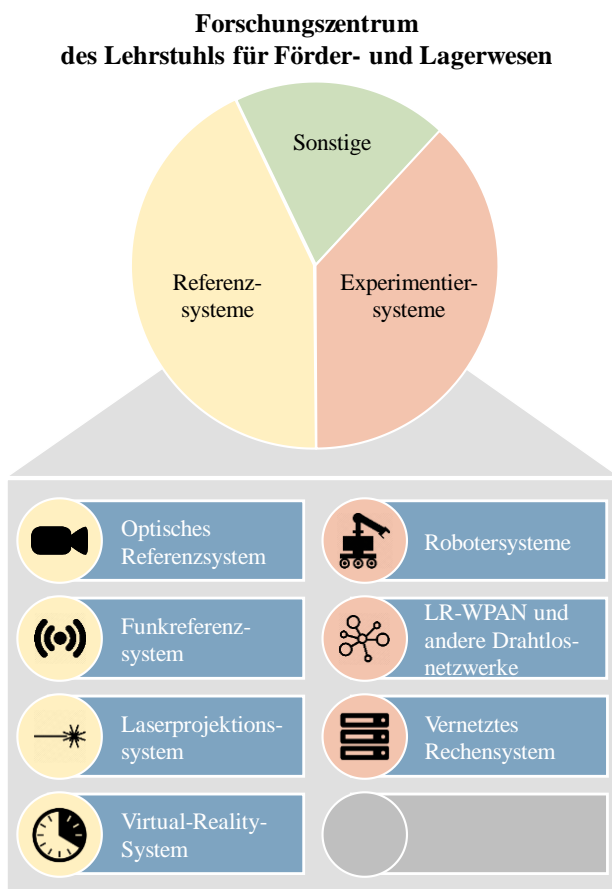


Abbildung 3. Ausschnitt der interoperierenden Systeme innerhalb des Forschungszentrums

Da jedes der eingesetzten Systeme seine eigenen Kommunikationsstandards nutzt, liegt die Herausforderung einer solchen Systemvernetzung darin eine gemeinsame Syntax für alle interoperierenden Systeme zu finden, welche zusätzlich eine vordefinierte zeitliche Datenverfügbarkeit garantieren kann. Diese Herausforderung der Systeminteroperabilität betrifft ebenfalls industrielle Szenarien, in denen bspw. dezentral und autonom gesteuerte

Systeme einer Materialflusseinrichtung miteinander kollaborieren, um Aufgaben und Aufträge eigenständig oder im Kollektiv zu bearbeiten und fertigzustellen.

Abbildung 3 zeigt eine Übersicht der im Rahmen dieses Artikels vorgestellten Referenz- und Experimentiersysteme. Diese und weitere Systeme sind innerhalb des Forschungszentrums über ein Netzwerk miteinander verbunden.

5 FAZIT UND AUSBLICK

Mit dem Internet der Dinge und der Industrie 4.0 entstehen grundlegend neue Formen der hybriden Interaktion von Menschen und Maschinen. Auf der Basis von CPS wird eine kooperative Arbeitsumgebung geschaffen, in der Menschen und Maschinen miteinander im Dialog stehen und gemeinsam Arbeitsaufgaben erledigen. Das Forschungsprojekt „Innovationslabor – Hybride Dienstleistungen in der Logistik“ hat sich zum Ziel gesetzt genau diese neue Form der HMI zu untersuchen und weiterzuentwickeln. Der neuartige und zentrale Erfolgsfaktor des Forschungszentrums liegt in der interdisziplinären Zusammenarbeit von Experten aus den Fachbereichen der Logistik, IT, Ingenieur- und Wirtschaftswissenschaften sowie der Soziologie.

Ein Forschungsschwerpunkt des Zentrums wird zukünftig in der Gestaltung dezentraler Intralogistiksysteme liegen, mit dem Fokus auf Echtzeit-Lokalisierungs- und Navigations-Algorithmen. Neben den klassisch technischen Schwerpunkten wird es im Rahmen der HMI auch neue Forschungsbereiche geben, die sich u. a. mit der Sicherheit von Mitarbeitern beschäftigen, welche auf dem Shopfloor in direktem Kontakt bzw. in direkter Zusammenarbeit mit technischen Einheiten stehen.

Die im Bereich der Intralogistik entstehenden hybriden Kooperationsnetzwerke, in denen Menschen von Maschinen unterstützt werden und Maschinen sich gegenseitig ergänzen, verlangen ein sehr komplexes Steuerungssystem zur Ausführung der logistischen Prozesse. Um u. a. die Entwicklung eines solchen Steuerungssystems weiter voranzutreiben, ist das Forschungszentrum mit hochflexiblen, skalierbaren sowie anpassungsfähigen Referenz- und Experimentiersystemen ausgestattet.

6 DANKSAGUNG

Dieser Artikel entstand in Kooperation mit den drei nachfolgenden Forschungsprojekten:

- „Innovationslabor – Hybride Dienstleistungen in der Logistik“, gefördert durch das deutsche Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)

- SFB 876, Projekt A4 „Ressourcen-effiziente und verteilte Plattformen zur integrativen Datenanalyse“, gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)
- GRK 2193 „Anpassungsintelligenz von Fabriken im dynamischen und komplexen Umfeld“, gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG)

LITERATUR

- [Aal] Aalborg University: *Laboratory facilities*. <http://www.es.aau.dk/sections-labs/Automation-and-Control/Laboratory+facilities/> – Überprüfungsdatum: 2017-07-29
- [Dro] DroneScan: *DroneScan as a solution*. <http://www.dronecan.co/> – Überprüfungsdatum: 2017-07-31
- [Egh17] Egham: *Gartner Says 8.4 Billion Connected "Things" Will Be in Use in 2017, Up 31 Percent From 2016*. <http://www.gartner.com/newsroom/id/3598917> – Überprüfungsdatum: 2017-07-31
- [FLU16] FLUG REVUE, Motor Presse Stuttgart: *Drohnen als fliegende Arbeiter*. <http://www.flugrevue.de/zivilluftfahrt/flugzeuge/drohnen-als-fliegender-arbeiter/708004>. – Aktualisierungsdatum: 2016-12-06 – Überprüfungsdatum: 2017-07-31
- [Fra17a] Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS: *Kommunikationssysteme*. <https://www.iis.fraunhofer.de/de/ff/kom.html>. – Aktualisierungsdatum: 2017-07-29 – Überprüfungsdatum: 2017-07-29
- [Fra17b] Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS: *Lokalisierung und Vernetzung*. <https://www.iis.fraunhofer.de/de/ff/lv.html>. – Aktualisierungsdatum: 2017-07-29 – Überprüfungsdatum: 2017-07-29
- [Fra16] Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML: *Forschungszentrum | Innovationslabor*. <http://www.innovationslabor-logistik.de/forschungszentrum/> – Überprüfungsdatum: 2017-07-29
- [Hir05] Hirsch-Kreinsen, Hartmut: *Wirtschafts- und Industriesoziologie - Grundlagen, Fragestellungen, Themenbereiche*. Juventa Verlag Weinheim und München, 2005
- [Hir16] Hirsch-Kreinsen, Hartmut: *Arbeit 4.0 – der Wandel ist gestaltbar*. 2016. https://www.mais.nrw/sites/default/files/asset/document/arbeit_hirsch-kreinsen_allianz_nrw.pdf. – Aktualisierungsdatum: 2016 – Überprüfungsdatum: 2017-07-29
- [HKK14] ten Hompel, Michael; Kirsch, Christopher; Kirks, Thomas: *Zukunftspfade der Logistik – Technologien, Prozesse und Visionen zur vierten industriellen Revolution*. In: SCHUH, Günther; STICH, Volker (Hrsg.): *Enterprise -Integration*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014. – ISBN 978-3-642-41890-7, S. 203–213
- [Ins] Institut für Integrierte Produktion Hannover IPH: *netkoPs: Vernetzte kognitive Produktionssysteme*. <http://www.netkops.de/> – Überprüfungsdatum: 2017-07-29
- [IN15] Ittermann, Peter; Niehaus, Jonathan: *Industrie 4.0 und Wandel von Industriearbeit - Überblick über Forschungsstand und Trendbestimmungen*. In: HIRSCH-KREINSEN, Hartmut; ITTERMANN, Peter; NIEHAUS, Jonathan (Hrsg.): *Digitalisierung industrieller Arbeit*. Nomos, 2015. – ISBN 9783845263205, S. 32–53
- [LK13] Luft, Nils; Kuhn, Axel: *Aufgabenbasierte Flexibilitätsbewertung von Produktionssystemen*. Zugl.: Dortmund, Techn. Univ., Diss., 2013. Dortmund: Verl. Praxiswissen, 2013 (Fabrikorganisation). – ISBN 978-3-86975-084-2
- [Max13a] Max-Planck-Gesellschaft: *Multi Robot Systeme*. <http://www.cyberneum.de/de/forschungseinrichtungen/trackinglab/multi-robot-systeme.html> – Überprüfungsdatum: 2017-07-29
- [Max13b] Max-Planck-Gesellschaft: *Multisensorische Wahrnehmung und Handlung*. <http://www.cyberneum.de/de/forschungseinrichtungen/trackinglab/multisensorische-wahrnehmung-und-handlung.html> – Überprüfungsdatum: 2017-07-29

[Max15] Max-Planck-Gesellschaft: *TrackingLab*.
<http://www.cyberneum.de/de/forschungseinrichtungen/trackinglab.html>
– Überprüfungsdatum: 2017-07-29

[Tec] Technische Universität München: *Marker-based motion tracking with Vicon*.
<https://www.lfe.mw.tum.de/en/research/methods-and-lab-equipment/> –
Überprüfungsdatum: 2017-04-11

[TU 16] TU Dortmund, GRK 2193: *Anpassungsintelligenz von Fabriken im dynamischen und komplexen Umfeld*.
<http://www.grk2193.tu-dortmund.de/> –
Überprüfungsdatum: 2017-07-29

[VRR+15a] Venkatapathy, Aswin Karthik Ramachandran; Riesner, Andreas; Roidl, Moritz; Emmerich, Jan; ten Hompel, Michael: *PhyNode: An intelligent, cyber-physical system with energy neutral operation for PhyNetLab*. European Conference on Smart Objects, Systems and Technologies, June 16 - 17, 2015 in Aachen, Germany. In: *Smart SysTech 2015: European Conference on Smart Objects, Systems and Technologies*. June 16 - 17, 2015 in Aachen, Germany. Berlin: VDE-Verl., 2015 (ITG-Fachbericht, 259, CD-ROM). – ISBN 978-3-8007-3996-7

[VRR+15b] Venkatapathy, Aswin Karthik Ramachandran; Roidl, Moritz; Riesner, Andreas; Emmerich, Jan; ten Hompel, Michael: *PhyNetLab: Architecture design of ultra-low power Wireless Sensor Network testbed*. In: IEEE (Hrsg.): *2015 IEEE 16th International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM)*. IEEE, 2015. – ISBN 978-1-4799-8461-9, S. 1–6

Haci Bayhan, M.Sc., studierte Maschinenbau an der Technischen Universität Dortmund. Seit 2016 arbeitet er als Doktorand am Lehrstuhl für Förder- und Lagerwesen (FLW) der TU Dortmund.

Tel.: +49 231 755-3442, Fax: +49 231 755-4768, E-Mail: haci.bayhan@tu-dortmund.de

Aswin Karthik Ramachandran Venkatapathy, M.Sc., studierte Automation Robotics an der Technischen Universität Dortmund. Seit 2015 arbeitet er als Doktorand am Lehrstuhl für Förder- und Lagerwesen (FLW) der TU Dortmund.

Tel.: +49 231 755-7520, Fax: +49 231 755-4768, E-Mail: aswinkarthik.ramachandran@tu-dortmund.de

Prof. Dr. Dr. h. c. Michael ten Hompel, studierte Elektrotechnik an der RWTH Aachen und promovierte an der Universität Witten/Herdecke. Er ist Inhaber des Lehrstuhls für Förder- und Lagerwesen (FLW) der TU Dortmund und geschäftsführender Institutsleiter am Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML. Des Weiteren ist er Institutsleiter des Fraunhofer-Instituts für Software- und Systemtechnik ISST.

Tel.: +49 231 9743-600, Fax: +49 231 755-4768, E-Mail: michael.ten.hompel@iml.fraunhofer.de

Felix Zeidler, M.Sc., studierte Maschinenbau und Wirtschaftsingenieurwesen an der Dualen Hochschule Baden-Württemberg. Seit 2016 arbeitet er als Doktorand im GRK 2193 am Lehrstuhl für Förder- und Lagerwesen (FLW) der TU Dortmund.

Adresse: Lehrstuhl für Förder- und Lagerwesen (FLW), TU Dortmund, Joseph-von-Fraunhofer-Straße 2-4, 44227 Dortmund, Deutschland. Tel.: +49 231 755-3450, Fax: +49 231 755-4768, E-Mail: felix.zeidler@tu-dortmund.de