

Implementierung und Test eines Service-Systems mit intelligenten, modularen Sonderladungsträgern

Implementation and testing of a service system with smart and modular special load carriers

Johannes Zeiler
Johannes Fottner

Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik
Fakultät Maschinenwesen
Technische Universität München

Unter- und Überbestände, fehlende Ladungsträger und Sondertransporte sind Probleme, die unter anderem aufgrund von unzureichender Transparenz innerhalb einer Supply-Chain auftreten. Deshalb konzentrieren sich aktuelle Forschungsansätze im Bereich der Logistik auf intelligente Objekte und cyber-physische Systeme, die prozessrelevante Daten sammeln und so zu einer Erhöhung der Transparenz und Optimierung der Supply-Chain beitragen. Dieser Beitrag zeigt auf, wie eine Umsetzung von innovativen produkt- und datenbasierten Dienstleistungen (z. B. automatische Bestandführung, Zustandsüberwachung) mithilfe von modularen, intelligenten und vernetzten Behältern gelingt. Die Erprobung des Service-Systems, der Architektur und der eingesetzten Hardware zeigen dabei die erzielbaren Mehrwerte und technologiebedingten Grenzen auf. Unter anderem können mithilfe des Service-Systems manuelle Prozesse innerhalb des Behälterkreislaufs und notwendige Dokumentationen innerhalb der Supply-Chain digitalisiert werden. Eine gesteigerte Transparenz hinsichtlich aktueller Bestände und Beschädigungen trägt darüber hinaus aktiv zu einer Verbesserung der Prozessqualität bei den an der Supply-Chain beteiligten Partnern bei.

[Schlüsselwörter: Internet der Dinge, intelligente Behälter, modulare Sonderladungsträger, cloudbasiertes Service-System, Supply-Chain-Management, digitales Behältermanagement]

Under- and overstocks, missing load carriers and special transports are problems that occur due to insufficient transparency in a supply chain. Therefore, current research approaches in the field of logistics focus on smart objects and cyber-physical systems that collect process-relevant data and thus contribute to an increase in transparency and the optimization of the supply chain. This article shows how innovative product and databased services (e.g. automatic inventory management, condition monitoring) can be implemented using smart and modular special load carriers. The experiments with the service

system, the architecture and the hardware show the achievable benefits and technology-related limits. Among other things, manual process steps within the container circuit and necessary documentations in the supply chain are digitized with the help of the service system. The increased transparency in current stocks and damaged goods also actively contributes to an improved process quality for the supply chain partners.

[Keywords: Internet of Things, smart container, modular special load carrier, cloud-based service system, supply chain management, digital container management]

1 HERAUSFORDERUNGEN UND PROBLEMSTELLUNGEN IM KLASSISCHEN BEHÄLTERKREISLAUF VON SONDERLADUNGSTRÄGERN

Heutzutage erwartet der Kunde neben einer großen Variantenvielfalt an Produkten einen hohen Individualisierungsgrad. Diese Kundenanforderungen verbunden mit kürzeren Produktlebenszyklen erfordern anspruchsvolle Produktionsumgebungen und flexible Supply-Chain Prozesse. Um den Kunden trotz steigender Anforderungen zufrieden stellen zu können, wächst die benötigte Anzahl an Unternehmen für die Produktherstellung und somit die Lieferkette. Dabei intensivieren sich die gegenseitigen Abhängigkeiten der Supply-Chain Partner [HSP+13]. Aufgrund dieser zunehmenden Komplexität innerhalb der Supply-Chain stellt die Koordination der Lieferketten eine große Herausforderung für produzierende Unternehmen dar. Die Schlagworte Industrie 4.0, Logistik 4.0 und Internet der Dinge (im Englischen Internet of Things, IoT) fassen neue Ansätze zusammen, die darauf abzielen, durch die Integration innovativer Technologien in logistische Objekte flexible und adaptive Logistiksysteme zu entwickeln [PH14]. Verbesserungen in der Kommunikations- und Computertechnologie, die Geräte minimieren und dennoch eine hohe Konnektivität und Rechenleistung gewährleisten, ermöglichen diese intelligenten logistischen Objekte, die in der

Lage sind prozessrelevante Daten zu sammeln. Diese so erfassten Daten können in Kombination mit softwarebasierten Dienstleistungen genutzt werden, um die Transparenz, Effizienz und Flexibilität der Supply-Chain zu erhöhen [KWH13].

Im Folgenden werden die Abläufe und Herausforderungen innerhalb einer beispielhaft beschriebenen Automobil-Supply-Chain zwischen einem Zulieferer und einem Original Equipment Manufacturer (OEM) vorgestellt. Die Teilnehmer der Lieferkette setzen dabei Sonderladungsträger für den Transport ihrer Waren ein. Sonderladungsträger werden, wie in Abbildung 1 dargestellt, für den Transport von empfindlichen oder komplex geformten Bauteilen, wie z. B. Batteriezellen oder Türinnenverkleidungen, eingesetzt. Die Behälter werden parallel zum Entwicklungsprozess des zu transportierenden Produkts entwickelt und gestaltet. In der Regel wird nur eine geringe Anzahl von Sonderladungsträgern benötigt, wobei meist eine einfache, geschweißte Stahlkonstruktion für den Außenbehälter mit einer komplexen Produktaufnahme, dem sogenannten Innenleben, bevorzugt wird. Normalerweise kommt der OEM für die Herstellungskosten der Sonderladungsträger auf und stellt den anderen Partnern der Supply-Chain die Behälter zur Verfügung. Dieser Behälterpool wird im Allgemeinen auf dem Werksgelände des OEMs gelagert. Wenn der vorgehaltene Behälterbestand eines Lieferanten zur Neige geht, fordert dieser eine Lieferung von leeren Sonderladungsträgern aus dem gemeinschaftlichen Behälterpool an. In einem beispielhaften Versorgungsprozess befüllt der Lieferant nach Anlieferung des Leerguts die Behälter mit den produzierten Bauteilen. Ein LKW transportiert die beladenen Sonderladungsträger in ein Zwischenlager eines Logistikdienstleisters. Sobald der Logistikdienstleister einen Lieferauftrag vom OEM erhält, sequenziert er die Bauteile und befüllt die Sonderladungsträger entsprechend der Perlenkette. Anschließend werden die vorsortierten Behälter direkt an die Montagelinie des OEMs geliefert. Dort montieren die Mitarbeiter die Bauteile und transportieren die leeren Sonderladungsträger zurück in das Leergutlager des OEM [ZF19].

Eines der Hauptprobleme des derzeitigen Behältermanagements ist die fehlende Transparenz bezüglich des Behälterflusses von Sonderladungsträgern innerhalb der Supply-Chain. Die Behälter durchlaufen die Logistikprozesse meist ohne jegliche Identifikationspunkte, weswegen die Steuerung und Überwachung der Behälterkreisläufe eine große Herausforderung darstellen. Darüber hinaus nehmen die Mitarbeiter Sonderladungsträger zeitweise für Reparaturen oder andere Zwecke aus dem regulären Prozess, ohne Dokumentation oder Benachrichtigung des Behältermanagements. Aufgrund der genannten Problemstellungen weicht die tatsächlich gelagerte Menge an Behältern oft von der im Behältermanagementsystem erfassten Anzahl ab, was zu Über- und Unterbeständen führt. Kostspielige Sonderlieferungen und zusätzliche Einwegkartonverpackungen sind ein beliebtes Mittel bei Bestands-



Abbildung 1. Sonderladungsträger im Automobilbau für den Transport von Türinnenverkleidungen

problemen, um eine unterbrechungsfreie Produktion zu gewährleisten. Um die Transparenz bzgl. der Behälterbestände zu erhöhen, zählen die Mitarbeiter in regelmäßigen Abständen die gelagerten Sonderladungsträger und speichern die Anzahl in den meist proprietären Behältermanagementsystemen ab. Diese Systeme werden nicht automatisch zwischen den Teilnehmern einer Supply-Chain synchronisiert, wodurch es zu Unstimmigkeiten zwischen den Partnern bei manuellen Abgleichen kommt [ZF19].

Eine Möglichkeit diesen Herausforderungen zu begegnen, ist die digitale Transformation von Sonderladungsträgern in cyber-physische Systeme (CPS). Diese Umwandlung ermöglicht die Erfassung von prozessrelevanten Daten auf der Shopfloor-Ebene und eröffnet neue Möglichkeiten für datenbasierte Dienste zur Optimierung der Supply-Chain [GB12]. Das in [ZRR⁺18] näher beschriebene Verbundprojekt iSLT.NET (Netzwerk für intelligente, modulare Sonderladungsträger) am Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik der Technischen Universität München widmete sich dieser Transformation vom Sonderladungsträger zu intelligenten und vernetzten Behältern. Das Projekt untersuchte u. a. die Potentiale innovativer produkt- und datenbasierter Dienstleistungen, die auf der Integration von IoT-Technologien (Sensor-, Identifikations- und Kommunikationstechnik) und der Modularität des physikalischen Sonderladungsträgers basieren. In [ZF19] wurde das theoretische Architekturkonzept des cloudbasierten Service-Systems für intelligente, modulare Sonderladungsträger vorgestellt. Diese Architektur wurde entworfen, um ein unternehmensübergreifend integriertes Kommunikations- und Identifikationssystem für intelligente, modulare Sonderladungsträger zu realisieren und den Einsatz von datenbasierten Dienstleistungen entlang der gesamten Supply-Chain zu ermöglichen. Das angestrebte Dienstleistungsangebot, basierend auf den gesammelten Daten der intelligenten Ladungsträger, wurde in [MR18] vorgestellt und wird im späteren Verlauf nur noch kurz aufgegriffen.

Dieser Beitrag beschäftigt sich mit der technischen Umsetzung und den praxisnahen Tests des konzipierten Netzwerks für intelligente, modulare Sonderladungsträger. Im ersten Teil wird dafür ein kurzer Überblick über den aktuellen Stand der Technik zu intelligenten Behältern gegeben. Anschließend wird das zur Realisierung des Service-Systems umgesetzte technische Gesamtsystem präsentiert. Dabei wird anhand der fünf Schichten (Intelligente Objekte, Kommunikation, Cloud- & Applikation, Client und Anwender) die umgesetzte Architektur präsentiert. Diese ermöglicht eine unternehmensübergreifende Erfassung, Analyse und Bereitstellung von Daten innerhalb der Supply-Chain zwischen OEM und Lieferant. Im zweiten Teil des Beitrags wird der Versuchsaufbau zur Erprobung des Service-Systems, der Architektur und der eingesetzten Hardware hinsichtlich der geforderten Funktionsumfänge und angestrebten Potentiale beschrieben. Dabei werden an einigen Versuchsauswertungen die erzielten Mehrwerte und technologiebedingten Grenzen des Systems aufgezeigt. Abschließend werden die Forschungsergebnisse kurz zusammengefasst und ein Fazit gezogen.

2 INTELLIGENTE BEHÄLTER IN DER LOGISTIK

Der erste Schritt zu einem intelligenten Behälter kann bereits mit einem einfachen Auto-ID (Automatische Identifikation und Datenerfassung) Verfahren wie RFID (Radio Frequency Identification) umgesetzt werden. 2006 hat die Volkswagen AG bereits das Potential von mit passiven RFID-Tags ausgerüsteten Sonderladungsträgern untersucht [Pel06]. Das Ziel dieses Ansatzes war die automatisierte, ereignisbasierte Verfolgung von Behältern auf dem Werksgelände und dadurch eine Erhöhung der Prozesstransparenz. Auch das Forschungsprojekt RAN (RFID-Based Automotive Network) konzipierte und implementierte ein RFID-basiertes System zur Identifikation und Verfolgung von Kleinladungsträgern [Rei13]. Im Zuge der Implementierung wurden Kleinladungsträger mit passiven RFID-Tags ausgestattet und RFID-Gates an prozessrelevanten Punkten aufgestellt. Anhand der kontinuierlichen Erfassung der Durchfahrten durch einzelne RFID-Gates wurde ein Tracking und Tracing der Behälter und eine aktive Benachrichtigung bei Materialflussereignissen realisiert. Im Projekt FORFood wurde für die Frische- und Tiefkühllogistik ein intelligenter Thermobehälter entwickelt [Pri16]. Dabei stand eine effiziente Rückverfolgbarkeit der Behälter über die gesamte Supply-Chain und die Überwachung der geschlossenen Kühlkette im Vordergrund. Um diese Zielstellung zu erreichen, wurden die Behälter mit RFID und Temperatursensoren ausgerüstet. Dies ermöglichte die Erfassung der Behälterinnentemperatur sowie die automatische Übertragung der Messdaten via RFID an das Back-End. Mithilfe dieses Aufbaus konnten Temperaturverläufe im Inneren des Behälters entlang der Supply-Chain erfasst und vom Nutzer über die entwickelte App ausgewertet werden. Der Datenaustausch wurde nach dem EPCIS-Standard (Electronic Product Code Information

Services) [GS116] und die IT-Architektur entsprechend des EPCglobal Architecture Frameworks [GS115] implementiert. EPCIS ist ein offener Kommunikationsstandard mit ereignisbasierten Funktionalitäten, welcher oft in Zusammenhang mit RFID verwendet wird. Basierend auf den durch den FORFood Behälter ausgelösten EPCIS-Events und zugewiesenen Schlüsselprozessen konnte so ein eventbasiertes Tracking entlang der Lieferkette realisiert werden [Wan14]. Zwei weitere Forschungsprojekte die diesen Standard nutzen sind eTrace, welches sich auf die lückenlose Rückverfolgbarkeit innerhalb einer Fisch-Supply-Chain [GTF⁺11] fokussiert, und das bereits vorgestellte Projekt RAN [Rei13]. Aktuell wird von GS1 eine Erweiterung des EPCIS-Vokabulars für eine durchgängige Erfassung und Nutzung qualitätsrelevanter Daten entlang der Supply Chain entwickelt [WST⁺17]. Diese Erweiterung soll es ermöglichen sensorgesteuerte Qualitätsdaten standardisiert zu erfassen und weiterzuleiten.

Im Forschungsprojekt CairGoLution wurde ein Telematik-Modul und ein „Smart Seal“ in ein Unit Load Device (ULD), einen klassischen Luftfrachtcontainer, integriert [Mün16]. Das „Smart Seal“ ist für die Überwachung des Öffnungszustands des ULDs zuständig. Die Überwachung wird dabei durch einen Reedschalter realisiert. Mithilfe eines UMTS-Moduls wurden die Positionsdaten und Information des „Smart Seal“ an ein Back-End übertragen. Die Luftfrachtcontainer wurden vom Back-End aus überwacht, dabei entschieden Algorithmen, ob das Öffnen der ULD eine Integritätsverletzung war oder nicht. Bei einem unerlaubten Öffnen des Containers, wurde durch das Back-End eine Alarmmeldung für den Nutzer generiert. Ein weiterer intelligenter Behälter aus der Forschung, der sogenannte „inBin“ [ERB⁺12], ist ein mit einem Energy-Harvester, Energiepuffer, Mikroprozessor, Funkmodul, Display und Sensoren ausgerüsteter Ladungsträger. So kann der Behälter neben der Überwachung der Umgebungsbedingungen mit Menschen und Maschinen in seinem Umfeld kommunizieren. Um den menschlichen Nutzer beispielsweise bei der Kommissionierung zu unterstützen, nutzt der intelligente Behälter sein Display und gängige Funkstandards. In einem anderen Forschungsprojekt, „Service-orientiertes Logistikkonzept für ein multifunktionales Behältersystem“, wurde ein Konzept für einen mit Identifikationstechnologien und Sensorsystemen ausgerüsteten Ladungsträger erstellt [LTP13]. Die Zielstellung dabei war unter anderem die Überwachung der Temperatur und die Identifikation des letzten Standortes bei Verlust des Behälters. Für den Demonstrator wurden die Identifikationstechnologien RFID, Barcode und QR-Code (Quick Response Code) sowie Sensoren für Druck- und Temperatur an einen Universalladungsträger angebracht. Ein weiterer interessanter Anwendungsfall für einen intelligenten Behälter ist die „Intelligent Fruit Logistic“ von Verdouw *et al.* [VST⁺19]. In diesem Projekt wurden in die Obststeigen von Euro Pool System IoT-Devices mit einem LPWAN (Low Power Wide Area Network) Modul, einem GPS-Chip (Global Positioning System) und einem QR-Code integriert. Die dazu

entwickelte IoT-Plattform, welche die Positionsdaten verarbeitete, ermöglichte es dem Nutzer die Steigen innerhalb der Obst Supply-Chain durchgängig zu tracken. Ein weiterer Forschungsansatz konzentrierten sich auf einen intelligenten Mehrwegbehälter (smaRTI – smart Returnable Transit Item) der als Bestandteil der Industrie 4.0 mit seiner Ladung (Bauteile), Maschinen und intelligenten Fertigungsanlagen interagieren und selbständig dezentral Entscheidungen treffen kann [NSC⁺19]. An den Behälter wurden ein RFID-Reader zur Identifikation der beladenen Bauteile und eine WLAN-Kommunikationseinheit für die Übermittlung von Daten an das Back-End oder an ein anderes CPS angebracht. Des Weiteren wurden eine Vielzahl an Sensoren, eine Batterie, ein OLED Bildschirm und eine Datenverarbeitungseinheit verbaut. Für die Hardware und Software wurde ein geeigneter Proof-of-Concept unter Laborbedingungen durchgeführt, welcher die Identifikation der sich im Behälter befindenden Bauteile via UHF-RFID und die Überwachung von Handhabungsprozessen mithilfe der Sensorik untersuchte.

Wie aufgezeigt, wurden einzelne Aspekte von intelligenten Ladungsträgern bereits in einigen Forschungsprojekten untersucht, jedoch fehlt es an einem gesamtheitlichen System, welches die technischen Dimensionen eines intelligenten und modularen Sonderladungsträgers (z. B. Identifikation, Sensorintegration und Rekonfiguration) mit einem unternehmensübergreifenden und datenbasierten Dienstleistungssystem (z. B. aktuelle Behälterbestände, Zustandsüberwachung und Prozessoptimierung) kombiniert. Das eingangs erwähnte Verbundprojekt iSLT.NET hat sich zum Ziel gesetzt diese Lücke zu schließen und dabei ein unternehmensübergreifendes Service-System, basierend auf intelligenten, modularen Sonderladungsträgern, zu konzipieren und in einer Supply-Chain zu implementieren. Im nächsten Kapitel wird die technische Implementierung des Service-Systems anhand der fünf Schichten der konzipierten IoT-Architektur (intelligente Objekte, Kommunikation, Cloud- & Applikation, Client und Anwender) präsentiert.

3 TECHNISCHE UMSETZUNG EINES SERVICE-SYSTEMS MIT INTELLIGENTEN, MODULAREN SONDERLADUNGSTRÄGERN

In Abbildung 2 ist der schematische Aufbau der Fünf-Schichten-IoT-Architektur für das Service-System mit intelligenten, modularen Sonderladungsträgern dargestellt. Die Implementierung der konzeptionierten IoT-Architektur [ZF19] innerhalb einer aktiven Supply-Chain zielt darauf ab, prozessrelevante Daten zu sammeln und diese in Form von innovativen datenbasierten Dienstleistungen bereitzustellen. Die technische Umsetzung und der Workflow je Schicht werden in den folgenden Abschnitten ausführlicher erläutert, ausgehend von der untersten Schicht: *Intelligente Objekte*.

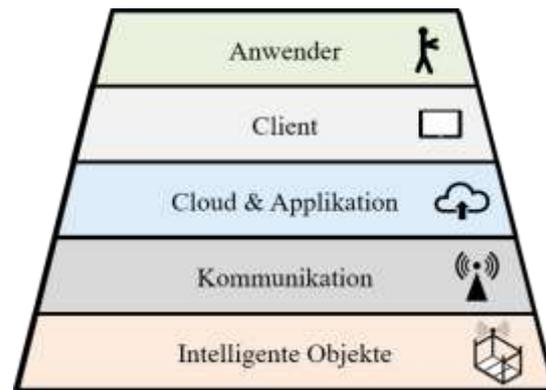


Abbildung 2. Schematischer Aufbau der Fünf-Schichten-IoT-Architektur [ZF19]

In der untersten Schicht befinden sich die intelligenten, modularen Sonderladungsträger (iSLT). Der Außenbehälter ist dabei aus standardisierten Modulen montiert und mit einer speziell entwickelten Produktaufnahme und einem IoT-Modul ausgestattet. 43 dieser intelligenten, modularen Sonderladungsträger befinden sich im aktiven Behälterkreislauf zwischen einem Zulieferer und einem OEM, drei weitere in einer Demonstrator-Supply-Chain zwischen drei Forschungsinstituten. Das IoT-Device besteht aus einem LoRa-Funkmodul (Long Range-Funkmodul), einem QR-Code mit der eindeutigen Behälternummer, einem GPS-Chip und mehreren Sensoren, unter anderem für Beschleunigung (x, y und z-Richtung) und Temperatur. Die Funktechnologie LoRa wurde ausgewählt, da diese einen geringen Energieverbrauch bei hohen Reichweiten ermöglicht und so die prozessbedingten Anforderungen nach einer langen Batterielaufzeit der IoT-Module und geringen Infrastrukturaufwänden erfüllt [ZSF19]. Um auch bei intensivem Handling eine Beschädigung der IoT-Devices zu verhindern, wurden diese in die Seitenverkleidung und in den Unterboden integriert. Während des Einsatzes im aktiven Behälterkreislauf sammeln die IoT-Module auf der Shopfloor-Ebene Temperaturdaten, Beschleunigungen und GPS-Koordinaten. Die gesammelten Daten, inkl. der aktuellen Batteriespannung und der ID des Devices, werden als LoRa-Payload an das LoRa-Gateway und somit an die *Kommunikationsschicht* übermittelt (siehe Abbildung 3). Die Nachrichtenübertragung kann sowohl zeitintervallbasiert als auch eventbasiert, beispielsweise bei einer starken Erschütterung, erfolgen. Die übertragenen Payloads sind dabei AES-128 verschlüsselt. Die LoRa-Gateways sind im Werk an zentralen Positionen, z. B. Wareneingang oder Montage, montiert, um einen möglichst großen und prozessrelevanten Bereich abdecken zu können. Über eine LAN-Schnittstelle, getrennt von den internen Firmensystemen, sind die Gateways mit dem Internet verbunden. Die vom IoT-Modul übermittelten Daten werden von den LoRa-Gateways um den eigenen Standort, den Zeitstempel und die Signalempfangsstärke der Nachricht ergänzt. Anschließend wird dieses Datenpaket weiter an den LoRa-Server bzw. die Cloud- und Applikationsschicht geleitet.

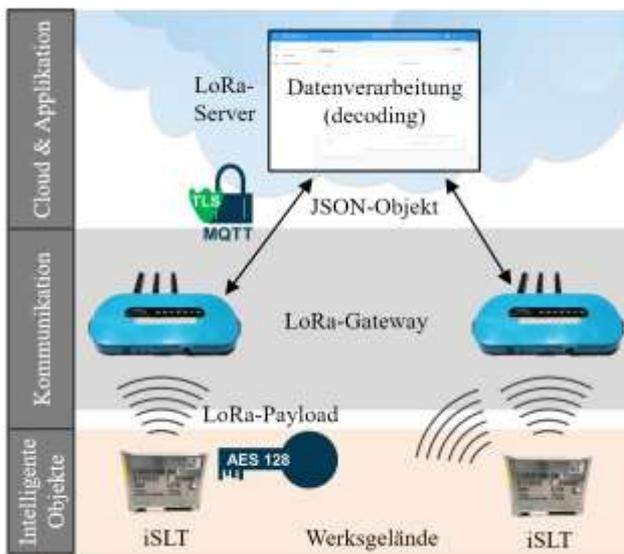


Abbildung 3. Kommunikationsverlauf in den unteren drei Schichten

Dabei wird das Netzwerkprotokoll MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) mit dem Sicherheitsstandard TLS (Transport Layer Security) verwendet.

Innerhalb der *Cloud- und Applikationsschicht* decodiert der LoRa-Server die empfangenen Datenpakete, konsolidiert gleiche Nachrichten, die von mehreren Gateways empfangen und übermittelt wurden, und erstellt aus den gewonnenen Daten ein standardisiertes JSON-Objekt. Dieses Objekt wird mithilfe von MQTT an das Back-End der iSLT.NET Plattform geschickt (siehe Abbildung 4). Dort wird die JSON-Datei als erstes dupliziert. Die erste Instanz wird unverändert in einer Datenbank gespeichert, um auch noch zu einem späteren Zeitpunkt auf die Originalnachricht zugreifen zu können. Die zweite Instanz wird von diversen Softwareservices verarbeitet, die die Daten entsprechend der umgesetzten Dienstleistungen aufbereitet und in den zugewiesenen Datenbanken hinterlegt. Hier stehen die Daten dann für einen späteren Datenabruf bzw. für die weiterführende Nutzung durch das Back-End bereit. Die auf der iSLT.NET Plattform prototypisch umgesetzten Dienstleistungsumfänge werden im folgenden Absatz genauer beschrieben.

Die Dienstleistungen *Tracking* und *Tracing* verarbeiten die aktuellen Positionsdaten und den Routenverlauf der intelligenten, modularen Sonderladungsträger, berechnen Standzeiten und visualisieren die Verläufe und Daten innerhalb der Plattform. Die Dienstleistung *digitales Behältermanagement* ist für die unternehmensübergreifende Live-Überwachung und Darstellung der Bestände im Behälterkreislauf verantwortlich und nutzt dafür die aufbereiteten Daten der Dienstleistung *Tracking*. Zusätzlich kann die Dienstleistung *automatisierte Buchung* mit den aktuellen Positionsdaten innerhalb der Plattform Behälterbuchungen zwischen den Teilnehmern der Supply-Chain simulieren. Die Dienstleistung *Zustandsüberwachung*

erlaubt dem Anwender relevante Daten über die Umgebung des intelligenten, modularen Sonderladungsträgers abzurufen. Dabei handelt es sich um aktuelle Werte und Verläufe der Umgebungstemperatur, der Signalstärke und der Transportbeschleunigungen. Die gemessenen Beschleunigungen in x, y und z-Richtung werden darüber hinaus zur Auswertung von auftretenden Erschütterungen verwendet. Zusätzlich lassen sich anforderungsabhängige Grenzwerte, z. B. für einen Aufprallschock oder Temperaturwert, hinterlegen. Bei Überschreitung dieser Grenzwerte, wird eine Push- oder E-Mailbenachrichtigung ausgelöst. Außerdem wurde eine App für die digitale Erfassung eines *Schadensreports* erstellt und mit der iSLT.NET-Plattform verknüpft. Über den Scan der eindeutigen ID (QR-Code) des intelligenten, modularen Sonderladungsträgers kann der Schadensreport bei der Aufnahme des Schadens direkt mit dem Behälter verknüpft und im Anschluss über die Plattform eingesehen werden. Alle präzentierten Dienstleistungsumfänge fallen mit ihrer Datenverarbeitung und -speicherung in den Bereich der Cloud & Applikationsschicht.

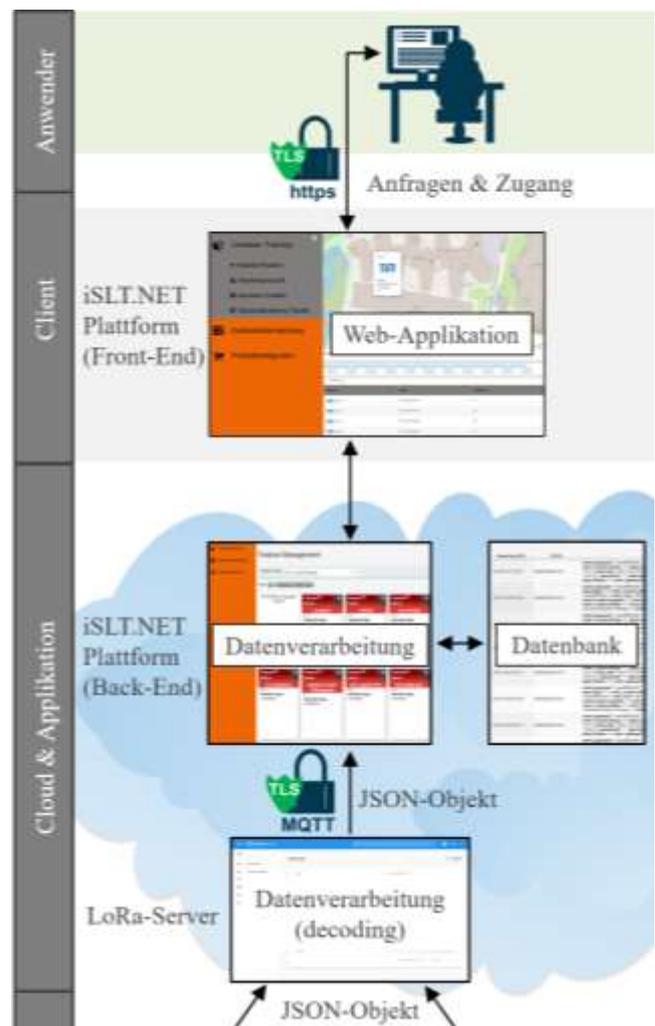


Abbildung 4. Schematischer Workflow zwischen der Cloud & Applikationsschicht, Client- und Anwenderschicht

Innerhalb der *Clientschicht* verfügt die iSLT.NET Plattform über ein webbasiertes Front-End, mit dessen Hilfe der Nutzer auf die beschriebenen Dienstleistungen und aufbereiteten Daten zugreifen kann. Der Webclient ist dabei ähnlich eines Dashboards aufgebaut, welches zusätzlich eine Funktionalität für Push-, E-Mail- oder SMS-Benachrichtigen enthält. Des Weiteren sind ein Export der verfügbaren Daten und Auswertungen in Tabellenform möglich. Von der *Anwenderschicht* aus kann so der Nutzer nach erfolgreichem Login auf dem Front-End der Plattform die Daten und Dienstleistungen des Service-Systems auf jedem internetfähigen Gerät nutzen. Dabei werden für den Datenverkehr das weitverbreitete Kommunikationsprotokoll Hypertext Transfer Protocol Secure (HTTPS) und der Sicherheitsstandard TLS verwendet. Beim Aufbau der Web-Anwendung wurde darauf geachtet die Kerninformation der jeweiligen Dienstleistungen direkt und einfach sichtbar zu machen. Als Beispiel ist hier die Zustandsüberwachung der Temperatur zu nennen, für die eine zusätzliche Ansicht eingerichtet wurde. Dies erlaubt dem Nutzer anhand von ausgewerteten Temperaturdaten auf einen Blick zu erkennen, welche Ladungsträger während des Winters im Freien gelagert werden bzw. wurden. So kann beispielsweise der Anwender gezielt einer Verschmutzung durch Schnee oder Regen vorbeugen. Auf zusätzliche Schnittstellen zu nutzerspezifischen Softwareanwendungen wurde aufgrund des Umsetzungsaufwands innerhalb der prototypischen Implementierung verzichtet.

4 VERSUCHSAUFBAU UND -DURCHFÜHRUNG ZUR ÜBERPRÜFUNG DES IMPLEMENTIERTEN SERVICE-SYSTEMS

Das Ziel der Versuche am Lehrstuhl fml der TUM war es, Erkenntnisse über die Möglichkeiten und Einschränkungen des implementierten Gesamtsystems und der realisierten Dienstleistungen für den beschriebenen Einsatzfall zu erlangen. Zusätzlich sollte eine realistische Einschätzung der derzeitigen Leistungsfähigkeit der eingesetzten Technologien abgegeben werden. Bei den durchgeführten Versuchen am Lehrstuhl fml wurde ein praxisnaher Einsatz des Service-Systems simuliert. Für den Versuchsaufbau wurde der modulare Sonderladungsträger mit sechs IoT-Modulen von drei verschiedenen Herstellern ausgestattet. Pro Hersteller wurde je ein IoT-Device am Seitenrahmen und am Unterboden montiert. So konnten ohne größeren Mehraufwand eine Vielzahl an Datenpunkten je Messung erzeugt und die einzelnen Hardwarehersteller miteinander verglichen werden. In Abbildung 5 ist das Messgelände der TUM in Garching dargestellt. Auf diesem wurden drei LoRa-Gateways an erhöhten Positionen, in der Versuchshalle des Lehrstuhls fml und am Dach des Universitätsgebäudes, angebracht. Auf diese Weise konnte das gesamte Messareal, sowohl im Inneren der Gebäude als auch im Freien, zuverlässig mit LoRa abgedeckt werden. Innerhalb der Plattform wurden für die Auslösung von positionsbasierten Events, wie z. B. innerhalb der Dienstleistung *auto-*



Abbildung 5. Anbringungspunkte der Gateways und verwendete Geofences

matisierte Buchung, vier sogenannte Geofences eingerichtet. Geofences sind virtuelle Begrenzungen auf der Erdoberfläche, welche zum automatisierten Auslösen einer Aktion bei deren Überschreitung genutzt werden. Der Transport des Sonderladungsträgers auf dem Testgelände wurde mit einem Gabelstapler durchgeführt. In diesem Beitrag soll genauer auf die Versuche und Ergebnisse zu den Dienstleistungen *automatisierte Buchung* und *Zustandsüberwachung von Erschütterungen* eingegangen werden.

4.1 AUTOMATISIERTE BUCHUNG

Zur Überprüfung der Dienstleistung *automatisierte Buchung* wurde der intelligente, modulare Sonderladungsträger auf verschiedenen Transportrouten vom Geofence TUM_Versuchshalle zum Geofence TUM_C (siehe Abbildung 5) und umgekehrt transportiert. Ziel dabei war es zu erfassen, ob automatisierte Buchungen zwischen zwei verschiedenen Konten anhand der Positionsdaten und durch Geofencing ausgelösten Events störungsfrei durchgeführt werden können. Dabei wurde der Behälter jeweils in die Mitte des Geofences transportiert und dort für 15 Minuten abgestellt. Die sechs IoT-Devices hatten für die Übertragung der GPS-Koordinaten Intervalle von ein bis fünf Minuten eingestellt. Bei Ein- und Austritt aus den Geofences wurde jeweils eine E-Mail-Benachrichtigung verschickt, welche den Buchungsvorgang simulieren sollte. Die Anzahl an Benachrichtigungen wurde anschließend mit der tatsächlichen Anzahl an Devices im Geofence verglichen. Dabei zeigte sich, dass 58 der 60 (96,7 %) durchgeführten Eintritte in die gewählten Geofences anhand des GPS-Trackings korrekt erkannt wurden und entsprechend eine Benachrichtigung ausgelöst wurde. Die durch das GPS-Modul ermittelten Koordinaten im Geofence veränderten sich allerdings sprunghaft während der 15 Minuten Stillstandzeit, da eine Sensorfusion mit der inertialen Messeinheit der IoT-Devices bei Stillstand nicht möglich ist. Um diesen Koordinatensprung während der Stillstandzeit besser zu quantifizieren und die minimale Größe eines Geofences zu ermitteln, wurden zusätzliche GPS-Messungen

über einen längeren Zeitraum durchgeführt. Die Messungen bei einer Lagerung an einem ortsfesten Punkt über 72 Stunden sind in Abbildung 6 dargestellt. Die Grafik zeigt, dass ohne die Möglichkeit einer Sensorfusion bei einem Geofence mit einem Radius von 30 m bzw. 45 m, 69,2 % bzw. 85,8 % der GPS-Messpunkte innerhalb liegen. Diese Ungenauigkeit hatte bei den Versuchen zur automatisierten Buchung während den 15 Minuten Stillstandphase zur Folge, dass der simulierte Buchungsvorgang aufgrund des GPS-Koordinatensprungs mehrmals oder auch fehlerhaft durchgeführt wurde. Diesem technologiebedingten Problem muss mit einer softwaretechnischen oder prozessbasierten Logik auf der Softwareplattform entgegengesteuert werden. Hier bieten sich mehrere mögliche Maßnahmen an. Beispielsweise könnte innerhalb der Plattform überprüft werden, ob eine Sensorfusion bei der Berechnung der GPS-Koordinaten vorgenommen wurde. Ist dies der Fall kann der Wert direkt übernommen werden, falls nicht, muss über mehrere GPS-Koordinaten ein Mittelwert errechnet werden. Auch anhand einer prozessbasierten Logik, beispielsweise der Überprüfung von vorhergehenden Schlüsselpunkten im Materialfluss, kann kontrolliert werden, ob die übermittelten Koordinaten plausibel sind und übernommen werden können. Eine technologische Alternative zu GPS wäre eine Point-of-Interest (POI) Lokalisierung mithilfe der Gateways. Diese Alternative würde allerdings eine aufwändigere Infrastruktur, beispielsweise je ein Gateway pro Schlüsselpunkt im Prozess, benötigen.

4.2 ZUSTANDSÜBERWACHUNG VON ERSCHÜTTERUNGEN

Die Fragestellungen ob Erschütterungen des Ladungsträgers richtig erkannt werden und ob eine Alarmmeldung bei einer Grenzwertüberschreitung ausgelöst wird, standen im Fokus der Versuche zur Dienstleistung *Zustandsüberwachung*. Für die Versuche wurde der mit zwei IoT-Devices ausgerüstete intelligente, modulare Sonderladungsträger (Seitenrahmen und Unterboden) mithilfe eines Gabelstaplers über unterschiedliche Untergründe, wie z. B. Kopfsteinpflaster oder eine Kabelbrücke, transportiert. Auch eine Notbremsung mit kontrolliertem Herunterfallen des Ladungsträgers von den Gabelzinken war Teil dieser Versuchsreihe. Mithilfe der Experimente wurden unterschiedlich starke Erschütterungen bei einem praxisnahen Handling simuliert. Die dabei erzeugten Erschütterungen wurden von den IoT-Devices anhand der auftretenden Beschleunigungen in x, y und z-Richtung gemessen und eventbasiert an die Plattform übertragen. Auf der Plattform wurden die gemessenen Werte mit einem festgelegten Grenzwert verglichen und bei dessen Überschreitung eine E-Mail-Benachrichtigung verschickt. Bei den Versuchen zeigte sich, dass die künstlich erzeugten Erschütterungen auf der Plattform eindeutig erkennbar waren und bei einer Grenzwertüberschreitung zuverlässig eine Benachrichtigung versandt wurde. Dabei wurde deutlich, dass der Anbringungsort des IoT-Devices einen sehr großen Einfluss

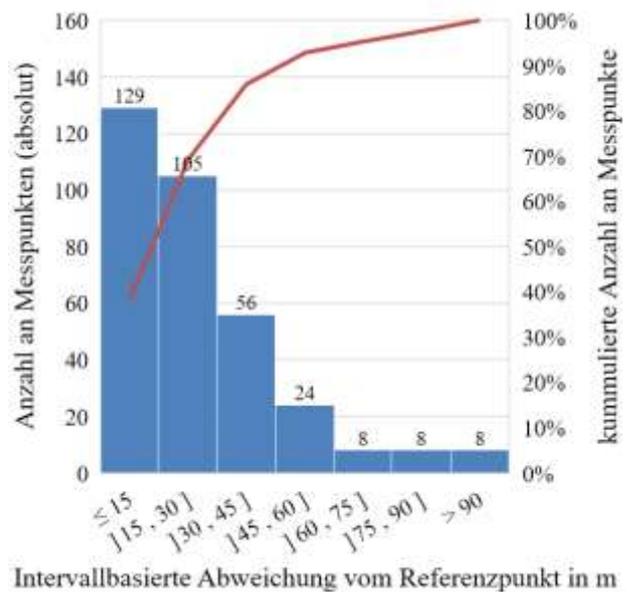


Abbildung 6. Pareto diagramm der GPS-Abweichung bei einer Messaufzeichnung von 72 Stunden

auf die Höhe der gemessenen Erschütterungswerte hatte. Vor allem das am Unterboden montierte IoT-Device erfasste aufgrund der Schwingungen des Bodenblechs bei der Fahrt über Kopfsteinpflaster hohe Beschleunigungswerte zwischen 10,2 g und 17,3 g. Da diese Werte aufgrund der Schwingungen des Bodenblechs höher lagen als beim Herunterfallen des Behälters (11,0 g bis 13,6 g), eignet sich dieser Anbringungspunkt nicht für den Einsatzfall. Das am Seitenrahmen montierte IoT-Device hingegen lieferte stabile Messwerte bei den einzelnen Versuchsreihen. Hierbei zeigte sich, dass anhand der Erschütterungen Rückschlüsse auf das Handling des Behälters gezogen und für diese Anbringungsposition ein aussagekräftiger Grenzwert für unsachgemäßen Umgang bei 9 g festgelegt werden konnte. In den darauffolgenden Versuchen konnten bei einer Grenzwertüberschreitung die benötigten Informationen über den Grad, den Zeitpunkt und den Ort der Erschütterung erfolgreich an den Anwender übermittelt werden. Ein erster Erfolg der Dienstleistung Zustandsüberwachung von Erschütterungen wurde bereits innerhalb des realen Behälterkreislaufs zwischen OEM und Zulieferer erzielt. Aufgrund eines sehr hohen Erschütterungswerts (17,5 g) wurde das Behältermanagement auf einen intelligenten, modularen Sonderladungsträger aufmerksam, welcher daraufhin aus dem Kreislauf geschleust wurde. Es zeigte sich, dass der Unterzug des Behälters sehr stark beschädigt wurde und eine Reparatur aus Sicherheitsgründen unumgänglich war. Mithilfe der durch die Plattform analysierten Daten konnten darüber hinaus die Verantwortlichkeiten für diesen Schadensfall und somit für die Reparaturkosten direkt zugeordnet werden.

5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Gegenwärtig mangelt es innerhalb von Behälterkreisläufen noch an Transparenz, wodurch es zu Problemen wie Unter-, Überbeständen oder Schwund kommen kann. Um den Behälterfluss transparenter zu gestalten und auftretende Probleme effizienter zu lösen, wurde in diesem Beitrag die prototypische Implementierung eines Service-Systems mit intelligenten, modularen Sonderladungsträgern vorgestellt. Die über das Service-System angebotenen Dienstleistungen reichen von datenbasierten bis hin zu datengestützten physischen Dienstleistungen. Bei der Erstellung der Dienstleistungen wurde das Ziel verfolgt die bekannten Problemstellungen innerhalb des Behälterkreislaufts zu lösen und neue Optimierungspotentiale zu identifizieren. Die Implementierung des Service-Systems wurde anhand der Fünf-Schichten-IoT-Architektur für intelligente, modulare Sonderladungsträger durchgeführt: In der untersten Schicht werden die Daten von intelligenten Behältern gesammelt und über ein LoRa-Gateway an die Cloud & Applikationsschicht gesendet. Dort werden die Daten von einem LoRa-Server konsolidiert und anschließend auf einer Cloud-Plattform entsprechend der prototypisch realisierten Dienstleistungen verarbeitet. Die Daten und Auswertungen werden dem Nutzer über eine Web-Anwendung zur Verfügung gestellt. Die benötigte Hardwareinfrastruktur hält sich dank der eingesetzten Technologien in Grenzen, wodurch eine aufwandsarme Implementierung innerhalb einer aktiven Supply-Chain möglich war. Mithilfe der im Anschluss durchgeführten Versuche zur Erprobung des Service-Systems, der Architektur und der eingesetzten Hardware, konnten die erzielbaren Mehrwerte und technologiebedingten Grenzen des implementierten Service-Systems aufgezeigt werden. Ein besonderes Augenmerk wurde auf die Dienstleistungen *automatisierte Buchung* und *Zustandsüberwachung* gelegt. Trotz der technologiebedingten Schwachstellen konnte gezeigt werden, dass eine *automatisierte Buchung* mithilfe des implementierten Service-Systems realisierbar ist, wobei die technologiebedingten Einschränkungen beispielsweise mit einer prozessbasierten Logik ausgeglichen werden müssen. Auch bei der *Zustandsüberwachung* konnte die Funktionalität der Dienstleistung überprüft und sowohl der Mehrwert als auch die technologischen Grenzen aufgezeigt werden. Eine weiterführende Evaluierung des implementierten Service-Systems und ein Anforderungsabgleich durch die Anwender sind bereits Gegenstand laufender Untersuchungen. Zusätzlicher Forschungsbedarf besteht in Bezug auf die Erweiterung des implementierten Service-Systems um weitere Dienstleistungen, Technologien und Teilnehmer, mit dem Ziel, die positiven Effekte für die Anwender zu verstärken.

LITERATURVERZEICHNIS

- [ERB+12] Emmerich, Jan Sören; Roidl, Moritz; Bich, Tobias; Hompel, Michael ten: *Entwicklung von energieautarken, intelligenten Ladehilfsmitteln am Beispiel des inBin*. In: *Logistics Journal Proceedings* (2012). – DOI 10.2195/lj_Proc_emmerich_de_201210_01
- [GB12] Geisberger, Eva; Broy, Manfred: *agendaCPS: Integrierte Forschungsagenda Cyber-Physical Systems*. acatech STUDIE. 01.03.2012. – acatech STUDIE
- [GS115] GS1: *The GS1 EPCglobal Architecture Framework: GS1 Version 1.7 dated 18 April 2015*. 2015
- [GS116] GS1: *EPC Information Services (EPCIS) Standard*. 2016
- [GTF+11] Gunnlaugsson, Valur N.; Thakur, Maitri; Forås, Eskil; Ringsberg, Henrik; Gran-Larsen, Øystein; Margeirsson, Sveinn: *EPCIS standard used for improved traceability in the redfish value chain*. In: *Proceedings of The 13th International MITIP Conference The Modern Information Technology in the Innovation Processes of the Industrial Enterprises*. Norwegen : Fagbokforlaget, 2011 (NTNU Engineering Series, 1). – ISBN 978-8251928168
- [HSP+13] Handfield, Robert; Straube, Frank; Pfohl, Hans-Christian; Wieland, Andreas: *Vorteile im Wettbewerb durch Beherrschung von Komplexität: Trends und Strategien in Logistik und Supply Chain Management*. Hamburg: DVV Media Group, 2013. – ISBN 9783871544828
- [KWH13] Kagermann, Henning; Wahlster, Wolfgang; Helbig, Johannes: *Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0: Final report of the Industrie 4.0 Working Group*. 01.04.2013
- [LTP13] Lammers, Wolfgang; Thiele, Björn; Pelka, Michael: *Schlussbericht: Service-orientiertes Logistikkonzept für ein multifunktionales Behältersystem*. 2013
- [MR18] Meißner, Sebastian; Romer, Martina: *Neue Geschäftsmodelle durch intelligente Ladungsträger und datenbasierte Dienstleistungen*, Bd. 2015. In: BARTON, Thomas; MÜLLER, Christian; SEEL, Christian (Hrsg.): *Digitalisierung in Unternehmen : Von den theoretischen Ansätzen zur praktischen Umsetzung*. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2018 (Angewandte Wirtschaftsinformatik). – ISBN 978-3-658-22772-2, S. 49–65
- [Mün16] Münch, Ulli; TIB - Technische Informationsbibliothek Universitätsbibliothek Hannover (Mitarb.); Technische Informationsbibliothek

- (Mitarb.); Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen (Mitarb.): *CairGoLution: Echtzeit-transparenz von Luftfracht-Frachtströmen durch den Einsatz eingebetteter Sensorik zur Überwachung einzelner Sendungselemente - Teilvorhaben: Einbettung von innovativen Technologien und Design einer Informationsdienstleistung: Schlussbericht, Laufzeit von 01.07.2013 bis 31.12.2016*. 2016
- [NSC⁺19] Neal, Aaron D.; Sharpe, Richard G.; Conway, Paul P.; West, Andrew A.: *smARTI—A cyber-physical intelligent container for industry 4.0 manufacturing*. In: *Journal of Manufacturing Systems* 52 (2019), S. 63–75. – DOI 10.1016/j.jmsy.2019.04.011
- [Pel06] Pelich, Christoph: *Einsatz aktiver RFID bei Volkswagen: Grundlagen, Einsätze und Erfahrungen*. Wolfsburg, 2006. – Aktualisierungsdatum: 2006
- [PH14] Porter, Michael E.; Heppelmann, James E.: *How Smart, Connected Products Are Transforming Competition*. In: *Harvard Business Review* (2014), Nr. 11.
- [Pri16] Prives, Sergey: *Systemkonzept zur Steigerung logistischer Effizienz im Lebensmitteleinzelhandel durch Einsatz intelligenter Behälter*. Dissertation. München, Technische Universität München, Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik. Dissertation, 2016. – Aktualisierungsdatum: 2016
- [Rei13] Reinhart, Gunther: *RAN - RFID-based Automotive Network: Entwicklung von Methoden und Architekturen zur Steuerung und Bewertung von Abläufen in der Automobilindustrie: Verbundvorhaben: RAN: RFID-based Automotive Network: Die Prozesse der Automobilindustrie transparent und optimal steuern: Abschlussbericht, Berichtszeitraum von 01.01.2010 bis 31.12.2012*. Garching b. München, 2013
- [VST⁺19] Verdouw, Cor; Sundmaeker, Harald; Tekinerdogan, Bedir; Conzon, Davide; Montanaro, Teodoro: *Architecture framework of IoT-based food and farm systems: A multiple case study*. In: *Computers and Electronics in Agriculture* 165 (2019), S. 104939. – DOI 10.1016/j.compag.2019.104939
- [Wan14] Wang, Rui: *Konzeption und Entwicklung eines EPC-basierten Datennetzwerkes in der Lebensmittel-Supply-Chain*. Dissertation. München, Technische Universität München, Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik. Dissertation, 2014. – Aktualisierungsdatum: 2014
- [WST⁺17] Werthmann, Dirk; Schukraft, Susanne; Teucke, Michael; Veigt, Marius; Freitag, Michael; Hülsmann, Matthias; Piotrowski, Jakub; Winkler, Matthes; Winter, Roman: *EPCIS-basierter Austausch von Sensordaten*. In: *Industrie 4.0 Management* 33 (2017).
- [ZF19] Zeiler, Johannes; Fottner, Johannes: *Architectural Design for Special Load Carriers as Smart Objects in a Cloud-based Service System*. In: *2019 IEEE 6th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA)*: IEEE, 2019. – ISBN 978-1-7281-0851-3, S. 644–652
- [ZRR⁺18] Zeiler, Johannes; Romer, Martina; Röschinger, Marcus; Fottner, Johannes; Meißner, Sebastian: *Entwicklung des Sonderladungsträgers der Zukunft*. In: *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 113 (2018), 1-2, S. 37–40. – DOI 10.3139/104.111841
- [ZSF19] Zeiler, Johannes; Scherer, Felix; Fottner, Johannes: *LoRaWAN als Kommunikationstechnologie für vernetzte Sonderladungsträger*. In: *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 114 (2019), Nr. 5, S. 268–272. – DOI 10.3139/104.112081

FÖRDERHINWEIS

Das diesem Beitrag zugrundeliegende Forschungs- und Entwicklungsprojekt iSLT.NET wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) innerhalb des Technologieprogramms „PAiCE Digitale Technologien für die Wirtschaft“ gefördert und vom Projektträger „Gesellschaft, Innovation, Technologie - Informationstechnologien/Elektromobilität“ im Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt in Köln betreut (01MA17006E). Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Johannes Zeiler, M.Sc., Research assistant, Mittelstand 4.0-Kompetenzzentrum Augsburg c/o Chair for Materials Handling Material Flow Logistics at the Technical University of Munich.

Prof. Dr.-Ing. Johannes Fottner, Professor and head of the Chair for Materials Handling Material Flow Logistics at the Technical University of Munich.

Address: Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, Boltzmannstraße 15, 85748 Garching, Germany,

Phone: +49 89 289-15936, Fax: +49 89 289-15922, E-Mail: johannes.zeiler@tum.de